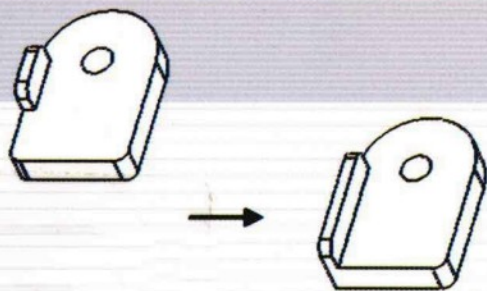




面向制造和装配的 产品设计指南

MIANXIANG ZHIZAO HE ZHUANGPEI DE
CHANPIN SHEJI ZHINAN

钟元◎编著



更低的成本

如何以

更短的时间

进行产品开发？

更高的质量

本书给您提供最佳解决方案



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



策划编辑：何月秋

封面设计：王伟光

本书导读

产品开发如同奥林匹克竞技，更低的产品开发成本、更短的产品开发周期、更高的产品质量，永远是企业追求的最高境界。在全球化的背景下，企业之间的竞争日益加剧；在产品开发中任何一个环节稍有落后，必然被竞争者超越、甚至被淘汰出局。

本书根据作者多年产品开发实际经验编写，并结合了国内外先进的产品开发理念和产品设计思想，具有以下特色：

1. 国内首次详细介绍面向装配的设计指南 与产品的制造一样，产品的装配处于同等甚至更为重要的地位，但长期被忽视。本书在国内首次详细介绍了面向装配的设计指南，以确保产品设计符合产品装配的要求，减少装配错误、降低装配成本、提高装配效率和装配质量。

2. 实用性强 本书没有复杂的理论，而是从产品开发的实际应用着手，介绍了面向制造和装配的设计指南，每一条设计指南都来源于真实的产品开发经验和教训总结，违反其中任何一条设计指南都可能会造成产品开发成本的增加、产品开发周期的延长和产品质量的降低。本书提供的产品设计检查表能够帮助机械工程师系统化地检查产品设计，确保产品设计符合制造和装配的要求。

3. 实例丰富、强调实践 本书的设计指南辅以图形和真实案例，简单易懂。作者从一个机械工程师的角度来分析和讲述每一条设计指南对产品开发的影响，指导机械工程师利用每一条设计指南来提高产品开发的质量。

ISBN 978-7-111-34008-9

定价：28.00元

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术/机械工程/机械

ISBN 978-7-111-34008-9



9 787111 340089 >

面向制造和装配的 产品设计指南

钟元 编著



机械工业出版社



面向制造和装配的产品设计是企业以“更低的开发成本、更短的开发周期、更高的产品质量”进行产品开发的关键。本书详细介绍了面向制造和装配的产品设计指南，包括面向装配的设计指南、塑胶件设计指南、钣金件设计指南和压铸件设计指南等，辅以图形和真实案例，并提供面向制造和装配的产品设计检查表，具有非常高的实用价值。

本书适合从事产品开发的工程师阅读，也可供高等院校机械类专业学生学习。

图书在版编目 (CIP) 数据

面向制造和装配的产品设计指南/钟元编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 4

ISBN 978-7-111-34008-9

I. ①面… II. ①钟… III. ①产品设计 - 指南 IV. ①TB472-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 058678 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 何月秋 责任编辑: 何月秋 刘本明

版式设计: 张世琴 责任校对: 李秋荣

封面设计: 王伟光 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

148mm × 210mm · 7.5 印张 · 219 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-34008-9

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务

策划编辑: (010)88379732

社服务中心: (010)88361066 网络服务

销售一部: (010)68326294 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010)88379203 封面防伪标均为盗版

前 言

产品开发如同奥林匹克竞技。更低的产品开发成本、更短的产品开发周期、更高的产品质量，永远是企业追求的最高境界。在全球化的背景下，企业之间的竞争日益加剧，在产品开发中任何一个环节稍有落后，就可能被竞争者超越，甚至被淘汰出局。

企业如何才能以“更低的成本、更短的时间、更高的质量”进行产品开发呢？面向制造和装配的产品设计正是这样的一个有效手段。它从提高产品的可制造性和可装配性入手，在产品开发阶段就全面考虑产品制造和装配的需求，同时与制造和装配团队密切合作，通过减少产品设计修改、减少产品制造和装配错误、提高产品制造和装配效率，从而达到降低产品开发成本、缩短产品开发周期、提高产品质量的目的。

本书首先介绍了面向制造和装配的产品开发；然后重点介绍了面向制造和装配的设计指南，其中包括面向装配的设计指南、塑胶件设计指南、钣金件设计指南、压铸件设计指南和公差分析等；最后提供了面向制造和装配的产品设计检查表，用于系统化地检查产品设计是否满足产品制造和装配的需求。

本书根据作者多年产品开发实际经验编写，并结合了国内外先进的产品开发理念和产品设计思想，具有以下特色：

1. 详细介绍面向装配的设计指南

同产品的制造一样，产品的装配处于同等重要甚至更为重要的地位，但长期被忽视。本书详细介绍了面向装配的设计指南，以确保产品设计符合产品装配的要求，减少装配错误，降低装配成本，提高装配效率和装配质量。

2. 实用性强

本书没有复杂的理论，而是从产品开发的实际应用着手，介绍了面向制造和装配的设计指南。每一条设计指南都来源于真实的产

品开发经验和教训总结，违反其中任何一条设计指南都可能会造成产品开发成本的增加、产品开发周期的延长和产品质量的降低。

另外，本书提供的产品设计检查表能够帮助机械工程师系统化地检查产品设计，确保产品设计符合制造和装配的要求，具有非常高的实用性。

3. 实例丰富、强调实践

本书的设计指南辅以图形和真实案例，简单易懂。作者从一个机械工程师的角度来分析和讲述每一条设计指南对产品开发的影响，指导机械工程师利用每一条设计指南来提高产品开发的质量。

我要感谢妻子曾颖和女儿钟曾，她们是我写这本书的动力。

鉴于作者水平有限，书中错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。读者可以发邮件至 joezhong@hotmail.com 与作者进行交流。

钟 元

2011 年 5 月于上海



目 录

前言

第 1 章 面向制造和装配的产品开发	1
1.1 绪论	1
1.1.1 产品开发模式的进化	1
1.1.2 产品设计的重要性	4
1.1.3 产品设计的要求	7
1.2 传统产品开发模式	9
1.2.1 传统产品开发流程	9
1.2.2 传统产品开发模式的弊端	10
1.3 面向制造和装配的产品开发模式	12
1.3.1 面向制造和装配的产品开发流程	12
1.3.2 面向制造和装配的产品开发的优点	15
1.3.3 面向制造和装配的产品开发与并行工程	21
1.4 面向制造和装配的产品开发的实施	22
1.4.1 实施的障碍	22
1.4.2 实施的关键	24
第 2 章 面向装配的设计指南	26
2.1 面向装配的设计	26
2.1.1 装配的定义	26
2.1.2 最好和最差的装配工序	26
2.1.3 面向装配的设计的定义	27
2.1.4 面向装配的设计的目的	28
2.1.5 面向装配的设计的历史	28
2.2 设计指南	29
2.2.1 减少零件数量	29
2.2.2 减少紧固件的数量和类型	34
2.2.3 零件标准化	38
2.2.4 模块化产品设计	38

2.2.5	设计一个稳定的基座	40
2.2.6	设计零件容易被抓取	42
2.2.7	避免零件缠绕	42
2.2.8	减少零件装配方向	43
2.2.9	设计导向特征	44
2.2.10	先定位后固定	46
2.2.11	避免装配干涉	49
2.2.12	为辅助工具提供空间	49
2.2.13	为重要零部件设计装配止位特征	50
2.2.14	防止零件欠约束和过约束	51
2.2.15	宽松的零件公差要求	54
2.2.16	防错的设计	57
2.2.17	装配中的人机工程学	66
2.2.18	线缆的布局	70
第3章	塑胶件设计指南	73
3.1	塑胶	73
3.1.1	塑胶的定义	73
3.1.2	塑胶的特性	73
3.1.3	注射成型	74
3.2	塑胶材料选择	75
3.2.1	塑胶材料的分类	75
3.2.2	常用塑胶材料性能	76
3.2.3	塑胶材料选择原则	79
3.3	设计指南	80
3.3.1	零件壁厚	81
3.3.2	避免尖角	83
3.3.3	脱模斜度	85
3.3.4	加强肋的设计	88
3.3.5	支柱的设计	91
3.3.6	孔的设计	93
3.3.7	提高塑胶件强度的设计	97
3.3.8	改善塑胶件外观的设计	102
3.3.9	降低塑胶件成本的设计	108
3.3.10	注射模具可行性设计	112

3.3.11 注射模具讨论要点	113
3.4 塑胶件的装配方式	115
3.4.1 卡扣装配	115
3.4.2 机械紧固	119
3.4.3 超声波焊接	126
第4章 钣金件设计指南	131
4.1 钣金	131
4.1.1 钣金的概念	131
4.1.2 冲压简介	131
4.1.3 常用钣金材料介绍	132
4.2 设计指南	133
4.2.1 冲裁	133
4.2.2 折弯	138
4.2.3 拉深	146
4.2.4 凸包	147
4.2.5 止裂槽	148
4.2.6 指明毛边的方向和需要压毛边的边	149
4.2.7 提高钣金强度的设计	150
4.2.8 降低钣金成本的设计	152
4.2.9 其他钣金设计考虑	157
4.3 钣金常用装配方式	158
4.3.1 卡扣装配	158
4.3.2 拉(铆)钉装配	159
4.3.3 自铆	160
4.3.4 螺钉机械装配	161
4.3.5 点焊	163
4.3.6 各种装配方式比较	163
第5章 压铸件设计指南	166
5.1 压铸简介	166
5.1.1 压铸	166
5.1.2 压铸的优缺点	166
5.1.3 关于压铸件的六大误解	168
5.2 常用压铸材料介绍	169

5.2.1	铝合金	170
5.2.2	锌合金	171
5.2.3	镁合金	172
5.3	设计指南	173
5.3.1	零件壁厚	173
5.3.2	压铸件最小孔	175
5.3.3	避免压铸型局部过薄	176
5.3.4	加强肋的设计	176
5.3.5	脱模斜度	179
5.3.6	圆角的设计	180
5.3.7	支柱的设计	181
5.3.8	字符	183
5.3.9	螺纹	184
5.3.10	为飞边和浇口的去除提供方便	185
5.3.11	压铸件的公差要求	186
5.3.12	简化模具结构,降低模具成本	189
5.3.13	机械加工	191
5.3.14	使用压铸件简化产品结构,降低产品成本	192
第6章	公差分析	195
6.1	公差分析简介	195
6.1.1	引言	195
6.1.2	公差的概念	195
6.1.3	公差的本质	196
6.1.4	公差分析的目的	197
6.2	公差分析的步骤	198
6.2.1	定义公差分析的目标尺寸和判断标准	198
6.2.2	定义尺寸链	200
6.2.3	判断尺寸链中尺寸的正负	200
6.2.4	将非双向对称公差转换为双向对称公差	201
6.2.5	公差分析的计算	202
6.2.6	判断和优化	206
6.2.7	装配偏移	206
6.3	公差分析指南	209

6.3.1 明确目标尺寸及其判断标准	209
6.3.2 公差一致性	210
6.3.3 公差分析结果不满足判断标准时的解决方法	211
6.4 利用 Excel 进行公差分析	217
第 7 章 面向制造和装配的设计检查表	219
7.1 和谐的设计	219
7.2 设计检查表	220
7.2.1 简介	220
7.2.2 使用方法	220
参考文献	228



第 1 章 面向制造和装配的产品开发

1.1 绪论

1.1.1 产品开发模式的进化

1. 原始产品开发模式

在很久以前，当制造业刚刚兴起的时候，人们所能制造的产品很简单，相应的制造工艺也很简单。在此阶段，产品的设计和制造工作都由同一个人来完成，这样的开发模式被称为原始产品开发模式。

还记得小时候叮叮当当的打铁声吗？高温的火炉、飞溅的火星、挥舞的铁锤，铁匠们进行着原始产品开发。当农民需要锄头、镰刀和斧头等农作工具时，他们按照要求，点燃火炉，经过烧、锤、敲、磨、淬火等十几道工序，制造出农民需要的农具，如图 1-1 所示。在原始产品开发模式下，铁匠既是产品设计者，同时又是产品制造者。“我设计，我制造”，这是原始产品开发模式的典型特点。历史已经证明，他们的生产效率很低、很低。

2. 传统产品开发模式

随着社会的发展，叮叮当当的打铁声在人们生活中渐渐远去，产品变得越来越复杂，产品相应的制造工艺也越来越复杂。此时，产品设计和制造都需要很强的专业知识，无法由同一个人胜任，而且，原始产品开发模式效率太低，无法适应大批量的工业化生产。根据亚当·斯密的劳动分工理论，分工越细，效率越高，于是，产品开发产生了设计和制造的社会分工。产品开发过程分为产品设计阶段和产品制造阶段，分别由机械工程师和制造工程师负责。在产品设计阶段，机械工程师关注的是如何实现产品的功能、外观和可靠性等要求，而不去关心产品是如何制造、如何装配的；当机械工

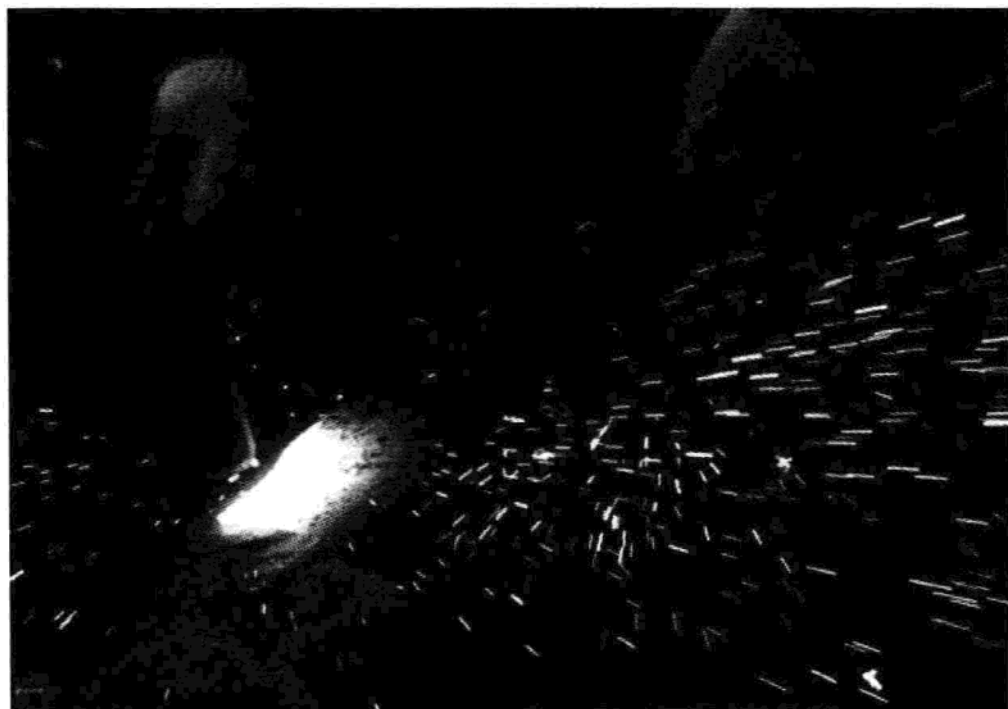


图 1-1 最后的铁匠

注：该图取自参考文献 [1]。

工程师完成产品设计后，由制造工程师进行产品的制造和装配，当然，制造工程师也不关心产品的功能、外观和可靠性等要求。这就是传统产品开发模式。在当时的社会背景下，传统产品开发模式大幅提高了产品开发的效率。

但是，传统产品开发模式存在着一个致命弊端，那就是产品设计与产品制造之间沟通很少甚至没有沟通，两者之间仿佛隔着一堵墙，阻断了设计与制造双方的沟通，因此传统产品开发模式也常被称为“抛墙式设计”。机械工程师完全不关心设计的产品能否顺利制造，不关心产品制造的质量，更不关心产品的制造成本。与此对应的是，制造工程师根本不关心制造的产品是否符合产品设计的要求。“我们设计，你们制造”，这是传统产品开发模式的典型特点。

在传统产品开发模式中，产品设计和产品制造的关系如图 1-2 所示。

3. 面向制造和装配的产品开发模式

进入现代社会，企业之间的竞争日益激烈，消费者对产品更加

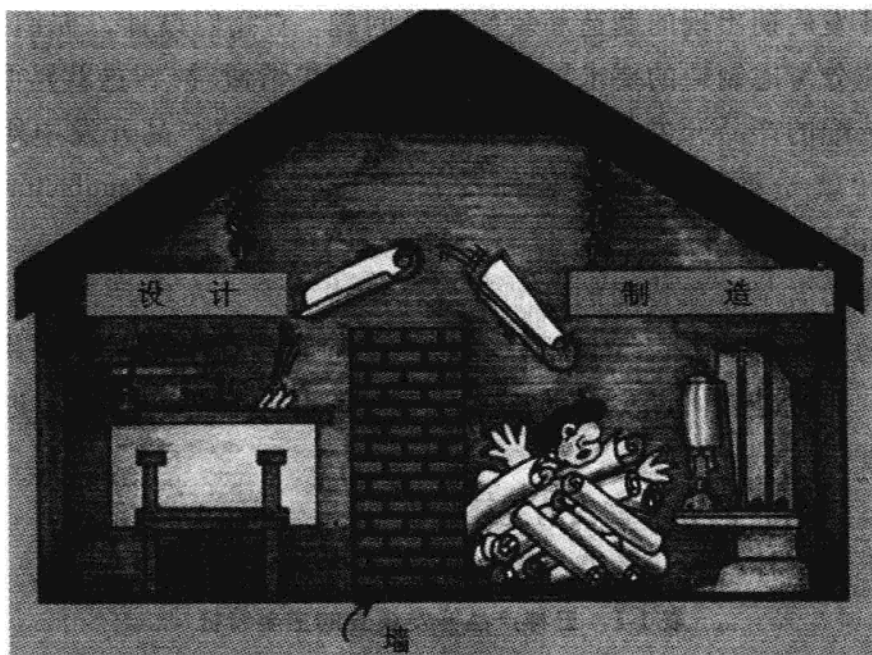


图 1-2 传统产品开发模式中设计与制造的关系

注：该图取自参考文献 [2]。

挑剔，企业必须以更低的成本、更短的时间和更高的质量来提高产品的竞争力。此时，传统产品开发模式的弊端逐渐显现出来：由于产品设计与制造的脱节，在产品的设计阶段难以考虑到来自于制造等方面的要求，机械工程师设计的产品可制造性、可装配性差，使产品开发过程变成了设计、制造、修改设计、再制造的反反复复循环，从而造成产品设计修改多、产品开发周期长、产品开发成本高、质量低等问题。“反反复复修改直到把事情做对”，这句话完整地概括了传统产品开发过程。而且，有些时候“甚至反反复复修改也不一定把事情做对”，结果项目失败。

很明显，产品设计与产品制造的脱节是造成上述后果的根本原因。设计与制造并不应该只是简单的先后顺序关系，不应该是“我们设计，你们制造”的关系，而应当是“水乳交融，你中有我，我中有你”的关系。在产品的设计阶段必须考虑到制造和装配对产品的设计的要求，制造和装配的要求越早介入到设计中，越对产品开发有利。在产品的设计阶段，就应当引入制造和装配的要求，使得机械工程师设计的产品具有很好的可制造性和可装配性，从根本上避免在

产品开发后期出现的制造和装配质量问题。“我们设计，你们制造，设计充分考虑制造的要求”、“第一次就把事情做对”，这就是面向制造和装配的产品开发模式。在面向制造和装配的产品开发中所进行的设计就是面向制造和装配的设计（Design for Manufacture and Assembly, DFMA）。

在面向制造和装配的产品开发模式中，横亘在产品设计与制造之间的“柏林墙”已经倒塌，机械工程师和制造工程师有着共同的目标，那就是如何以更低的成本、更短的时间和更高的质量进行产品开发。

4. 三种产品开发模式的主要特征

上述三种产品开发模式的主要特征见表 1-1。

表 1-1 三种产品开发模式的主要特征

产品开发模式	主要特征
原始产品开发模式	<ol style="list-style-type: none">1. 产品简单2. 我设计，我制造3. 效率很低
传统产品开发模式	<ol style="list-style-type: none">1. 产品较复杂2. 我们设计，你们制造3. 产品设计修改多，产品开发成本高，产品开发时间长，产品质量低4. 反反复复修改直到把事情做对
面向制造和装配的产品开发模式	<ol style="list-style-type: none">1. 产品很复杂2. 我们设计，你们制造，设计充分考虑制造的要求3. 设计修改少，产品开发成本低，产品开发时间短，产品质量高4. 第一次就把事情做对

1.1.2 产品设计的重要性

从产品开发模式的历史演变和进化中可以看出，产品开发的发展历史实际上就是产品设计思想的发展历史。在产品开发中，产品设计扮演着举足轻重的角色。产品设计决定了产品结构、产品材料、

产品制造工艺和装配方法，决定了产品成本，同时也决定了产品质量和产品开发周期。

1. 产品设计决定了产品成本

影响产品成本的四个主要因素是设计、材料、劳动力和管理。在产品开发中，以上各项投入成本所占比例及其对产品成本的影响如图 1-3 所示。由图可见：

- 1) 产品设计阶段的成本仅仅占整个产品开发投入成本的 5%。
- 2) 产品设计决定了 75% 的产品成本。
- 3) 产品设计在很大程度上影响了材料、劳动力和管理的成本。
- 4) 如果没有产品设计的优化，材料、劳动力和管理对于降低产品成本影响很小。

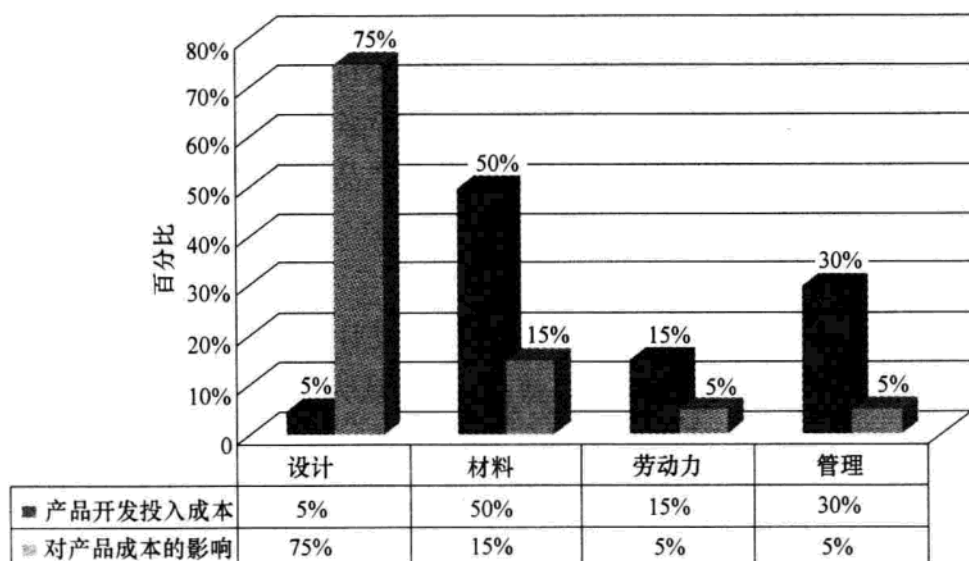


图 1-3 产品开发投入成本及其对产品成本的影响

因此，对一个企业来说，如果要降低企业的产品成本，合理有效的办法不是千方百计地偷工减料，不是千方百计地去剥削员工和工人的剩余劳动价值，不是千方百计地去购买昂贵的制造设备，而是千方百计地把成本和精力投入到产品设计中来。

2. 产品设计决定了产品质量

(1) 质量无极限

每个企业、每种产品和服务，要想在国际市场上占有一席之地，都

要面对“超严格的质量要求”，要努力使自己达到世界级的质量水平。

——朱兰（伟大的质量导师）

随着社会发展和科技进步，企业间竞争不断加剧，顾客对产品和服务的期望越来越高，这一切都要求企业对自身的产品质量提出更高的要求，有一句话可以形象地描述这种情况：“质量无极限”。

（2）产品质量的决定因素 既然产品质量在竞争的环境如此重要，那么产品质量从哪里来？

质量是制造出来的？

制造是按照设计图样和工艺要求，来制造产品。如果产品设计不合理，再精密的制造仪器和再高明的制造工程师也无法制造出高质量的产品。

质量是检验出来的？

检验是在产品制造完成后，根据检验标准，挑出不合格品。检验只是事后把关。当然，通过提高产品检验标准，可以提高产品质量，但同时产品不良率也会增加，造成产品成本的上升，这种方法没有从根本上解决问题。

质量是设计出来的？

没错，质量就是设计出来的。产品设计决定了产品的基因，决定了产品的质量。日本质量大师 Taguchi 认为：产品质量首先是设计出来的，然后才是制造出来的。20 世纪初，德国人把质量定义为：优秀的产品设计加上精致的制造。在这样的思想指导下，日本和德国的产品质量有目共睹。而在朱兰的质量三部曲中，质量设计是提高产品质量的根本。

二八原则形象地说明了产品设计对产品质量的重要性。根据统计，80%左右的产品质量问题是由设计引起的，20%的产品质量问题由后期的制造和装配引起的，如图 1-4 所示。换句话说，如果产品设计很完善，就能够避免 80% 的产品质量问题。

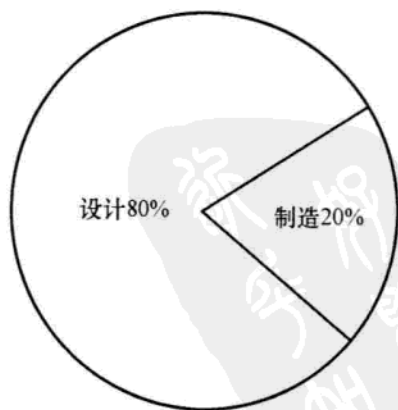


图 1-4 产品质量问题产生根源的二八原则

题；而无论产品制造多么完美，也只能避免 20% 的产品质量问题，对另外 80% 的产品质量问题无能为力。

遗憾的是，现阶段有些企业对质量的认识依然停留在产品质量等于制造质量的初级阶段。它们往往愿意投入巨资购买昂贵的制造设备和引进国外先进的制造技术，却不愿意投入少量的资金引进国外先进的产品设计理念和技术。“中国制造”占领了全世界的市场，但产品质量还有待进一步的提高。

要想改变现状，唯一可以做的就是重视产品设计，从“中国制造”转变到“中国创造”，在产品开发中引入面向制造和装配的产品设计理念。只有这样，“中国制造”的产品才可能与高质量画上等号。

3. 产品设计决定了产品开发周期

产品设计决定了产品开发周期。一个合理的产品设计能够顺利地进行制造和装配，而一个不合理的设计往往会造成产品无法制造或者装配，从而造成产品开发周期的加长。特别是在大批量生产的今天，很多零件都是通过模具（如注射模具等）加工而成，如果产品的设计不合理，零件无法顺利制造或者零件的质量不符合要求，那么此时就不得不修改产品的设计，相应的模具也需要修改，而模具的修改往往会耗费大量的时间，从而造成产品开发周期的加长。

1.1.3 产品设计的要求

既然产品设计对产品开发如此重要，那么怎样才能完成一个优秀的产品设计呢？作为机械工程师，需要明白产品设计的目的是什么以及产品设计需要满足哪些方面的要求。只有明白这些之后，机械工程师才能够设计出优秀的产品。

如图 1-5 所示，产品设计主要需要满足六个方面的要求。

1. 来自于客户或消费者的要求

产品设计的首要和最最重要的要求是来自于客户或消费者对产品功能、质量、外观、可靠性和使用方便性等方面的要求。只有客户或消费者满意的产品，才是最好的产品。一般来说，来自于客户或消费者的要求均会在产品的规格中进行明确的定义。在产品设计和

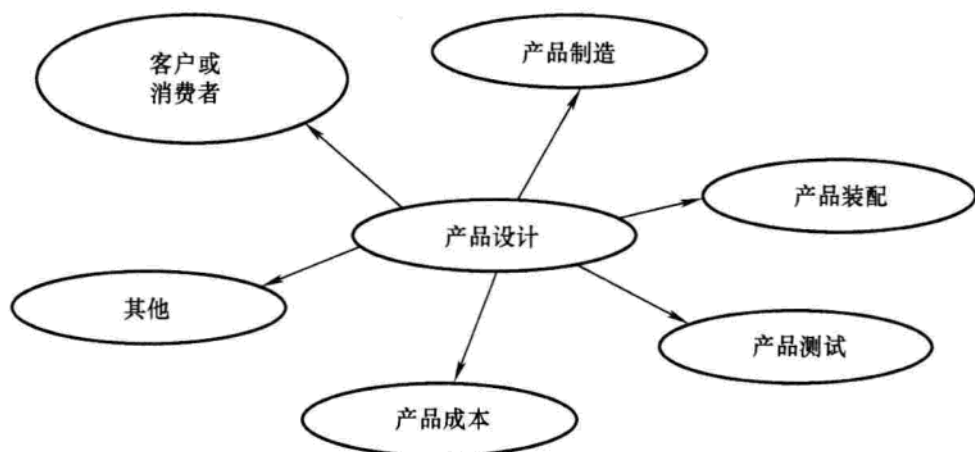


图 1-5 产品设计的要求

产品制造中，机械工程师应当随时检查产品是否满足上述要求。

2. 来自于制造方面的要求

制造是指产品通过什么工艺加工，例如注射加工、钣金冲压、压铸加工和机械加工等。产品设计需要满足来自于制造方面的要求。很多工程师常以为根据客户的要求，在三维软件中绘制出产品图样后，产品设计就大功告成了。事实上，能够在三维软件中把产品绘制出来，不一定表示产品就能够制造出来，或者说产品不一定能够以最低的成本、最短的时间和最高的质量制造出来。产品设计不仅仅是绘制产品图而已，更重要的是要保证产品具有良好的可制造性，而且还需要提高产品的制造效率和质量、缩短产品的制造时间、降低产品的制造成本等。

3. 来自于装配方面的要求

产品往往是由多个零件装配而成的。这里的装配是指产品通过组装工序把多个零件组装成一个完整的产品。同样的，机械工程师在三维软件中可以把一个产品的组装关系绘制得很完美，事实上这不一定表示产品能够组装起来，或者以最高的装配质量和最低的装配成本组装起来。产品的设计还需要保证产品具有良好的可装配性，而且还需要缩短装配时间、提高产品的装配效率和质量、降低装配成本等。

很多机械工程师常会忽略这方面的要求，在学校的学习中也很

少涉及这方面知识，本书在第2章中将详细介绍这些知识。

4. 来自于测试方面的要求

产品只有当测试合格，通过了相关组织的测试，证明安全可靠之后才能走向市场。当然，测试仅仅是一种手段。根据产品的种类不同，产品相应的测试也不同，例如计算机或手机产品必须通过电磁干扰测试才能进行批量生产，进入市场，因为电磁辐射会对消费者的健康造成危害。

所以，机械工程师在产品的设计阶段必须考虑到产品需要满足什么样的测试要求，所设计的产品应能满足这些测试要求。

5. 来自成本的要求

利润是一个企业生存的根本，产品成本太高，必然会影响企业利润。无论产品质量如何完美，如果成本太高，不能给企业带来利润，这样的产品开发也是失败的。

在产品的设计阶段就应当具有成本意识，而且也必须意识到产品成本决定于产品设计，决定于机械工程师之手。

6. 其他

针对具体的项目和产品的情况，产品还需要满足其他方面的要求，例如环保的要求、产品易拆卸及易维护的要求等，这些要求在产品设计阶段也必须考虑到。

需要特别注意的是，产品设计以上各方面的要求在有些时候是相互冲突的，满足了这方面的要求可能导致不能满足另一方面要求。对此，机械工程师需要进行综合判断，在产品的各个设计要求之间取得一个良好的平衡。机械工程师常犯的一个错误就是为了满足一方面的要求而忽略了其他方面的要求。当然，在众多要求之中，来自于客户或消费者的要求往往是排在第一位的，毕竟客户就是上帝。

1.2 传统产品开发模式

1.2.1 传统产品开发流程

传统产品开发流程包括以下主要阶段：定义产品规格、产品设

计、产品制造和装配、产品测试和量产等。

在市场人员提出产品构想，并同各部门人员一起合作定义出产品详细规格后，机械工程师进行产品的设计，然后由制造工程师负责产品制造，装配工程师负责产品装配方面的工艺设计，通过相关测试之后，最后进行大批量生产。在进行产品制造、装配和测试等过程中，如果发现问题，就必须返回到产品设计阶段进行产品设计的修改。传统产品开发流程如图 1-6 所示。

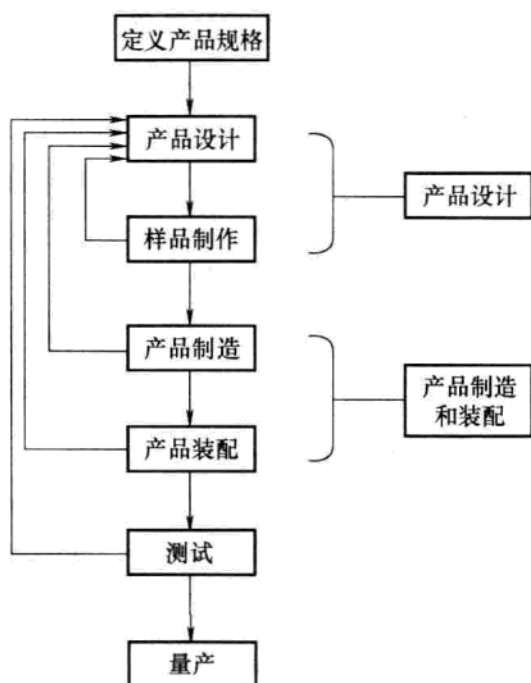


图 1-6 传统产品开发流程

1.2.2 传统产品开发模式的弊端

传统产品开发模式的主要特征就是“我们设计，你们制造”。机械工程师在产品设计阶段没有考虑到制造和装配的要求，造成设计与制造、装配的脱节，所设计的产品可制造性、可装配性差，使产品的开发过程变成了设计、加工、试验、修改的多重循环，从而造成产品设计改动过大、产品开发周期长、产品成本高，同时带来的后果就是产品质量的降低。这就是传统产品开发模式的主要表现——“反反复复修改直到把事情做对”。

传统产品开发模式的弊端如图 1-7 所示。

下面以一个塑胶零件的产品设计来说明传统产品开发模式是如何“产品设计修改次数多、产品开发周期长、产品质量低和产品成本高”的。

图 1-8a 是一个塑胶零件的原始设计剖视图，通过注射加工工艺制造。这是机械工程师在三维软件中绘制的图形。

图 1-8b 是实际制造的零件成品效果图，零件外部发生了严重的

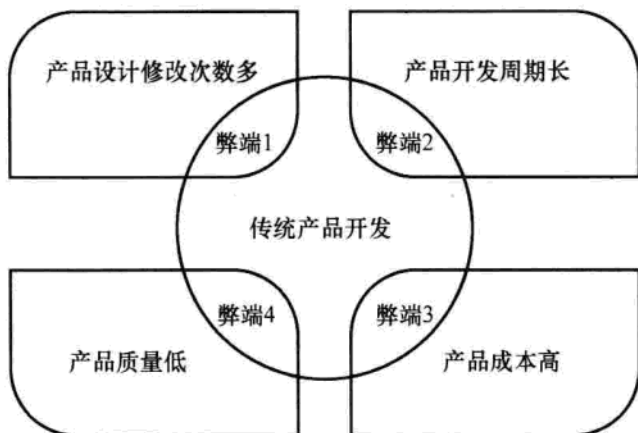


图 1-7 传统产品开发模式的弊端

缩水和变形，零件内部产生了气泡，零件的质量非常低。

对比零件原始设计图和成品图，可以看出两者出现了极大的偏差，制造的零件完全不符合产品设计的要求，这是由于产品设计与制造脱节，在产品阶段完全没有考虑到产品的可制造性。注射加工工艺对零件壁厚有着严格的要求，如果零件壁厚太大，在零件外表面就会产生缩水和变形、零件内部产生气泡等不良现象。原始的零件设计正是因为壁厚太大，所以发生了上述问题。

此时就需要作设计修改，把零件壁厚处进行掏空，避免零件壁厚局部太大，使得零件壁厚满足注射加工的制造性要求，如图 1-8c 所示。由于零件设计的修改，注射模具也需要作相应的修改（如果零件修改过大，甚至有可能造成原注射模具报废，而不得不重新制作新的注射模具），产品开发的成本大大增加，产品开发的周期也加长。

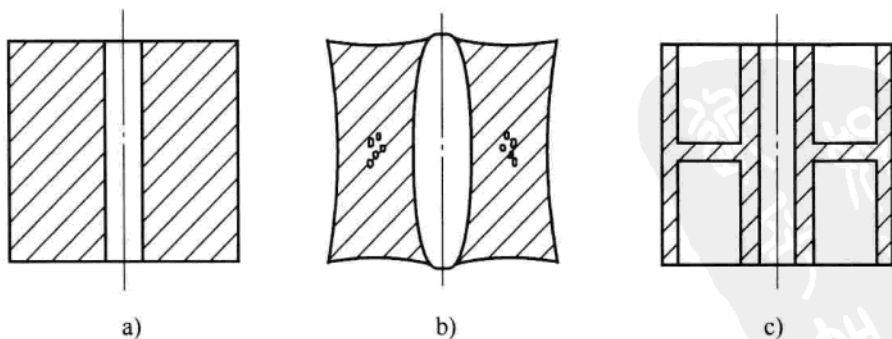


图 1-8 传统产品开发

a) 原始的零件设计图 b) 成品图 c) 正确的零件设计图

1.3 面向制造和装配的产品开发模式

1.3.1 面向制造和装配的产品开发流程

在市场竞争日益激烈的今天，为提高产品质量、缩短产品开发周期、降低产品开发成本等，应当抛弃传统产品开发模式，采用面向制造和装配的产品开发模式。其开发流程如图 1-9 所示。

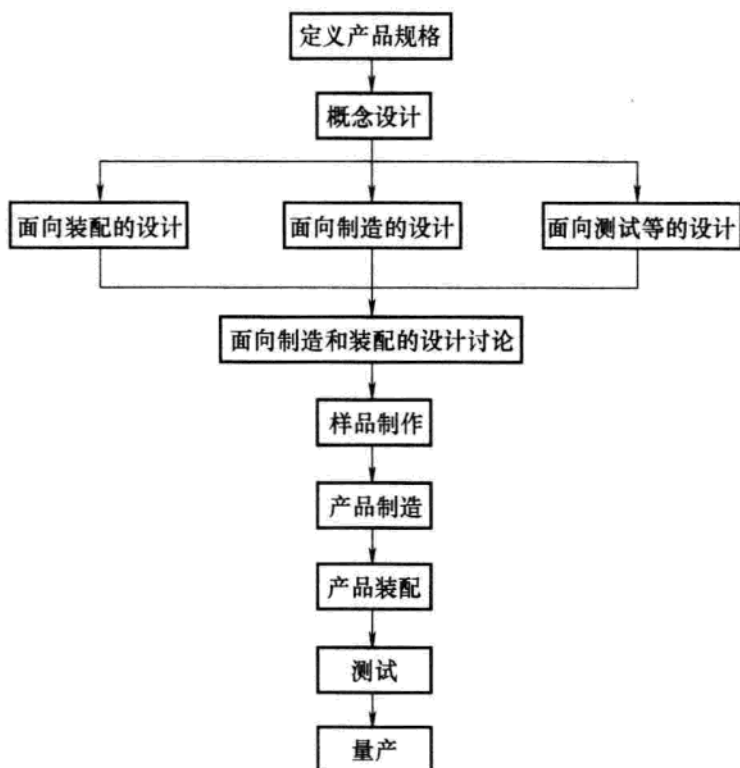


图 1-9 面向制造和装配的产品开发流程

1. 定义产品规格

产品规格是基于客户需求或市场调研结果，对产品开发的整个过程起着纲领性作用。一般来说，产品规格一旦确定下来，就不会轻易更改，否则整个产品开发进度和质量都可能受到很大的影响。因此，在产品开发初期，应当很明确地把产品规格定义清楚。产品的规格定义得越清楚、越详细，对之后的产品开发过程指导意义就

越大。

产品规格主要包括以下内容：

- 产品的尺寸和重量；
- 产品的功能要求；
- 产品的外观要求；
- 产品的可靠性要求；
- 产品的使用性要求；
- 产品的配置；
- 产品的产量；
- 产品的开发进度；
- 产品的成本估计；
- 其他。

2. 概念设计

概念设计是根据产品规格对产品进行整体性的框架设计，起着高屋建瓴、统揽全局的作用，为之后的详细设计指明设计方向和思路。一旦概念设计完成，60% ~ 70% 的产品设计已经定型，因此，在概念设计阶段，产品设计必须考虑到产品各方面的设计要求，例如来自客户、装配、制造、测试、质量和成本等各方面的要求。如果概念设计考虑不全面，在以后的详细设计中如果发现产品设计还有些要求不能满足，此时再来修改设计必将费时费力。

3. 面向装配的设计（Design for Assembly, DFA）

产品能够在三维软件中绘制出来，并不表示产品能够顺利装配。

面向装配的设计是指产品的设计需要具有良好的可装配性，使得装配工序简单、装配效率高、装配时间短、装配质量高、装配成本低等，常用的方法包括简化产品设计、减少零件数量、使用标准件、增加零件装配定位和导向、减少零件装配过程中的调节、零件装配模块化和装配防错等。

本书在第2章中将详细介绍面向装配的设计。

4. 面向制造的设计（Design for Manufacture, DFM）

零件能够在三维软件中绘制出来，并不表示产品能够制造出来。

面向制造的设计是指产品设计需要满足产品制造的要求，具有

良好的可制造性，使得产品以最低的成本、最短的时间、最高的质量制造出来。根据产品制造工艺的不同，面向制造的设计可以分为面向注射加工的设计、面向冲压的设计和面向压铸的设计等。

本书将在第3、4、5章中分别介绍塑胶件、钣金件和压铸件的零件设计，使得零件设计满足来自于注射、冲压和压铸等制造方面的要求。

5. 面向测试的设计

任何产品都必须通过相关的测试，在保证产品的可靠性和对消费者的安全和健康不造成危害的条件下才能够走向市场。不同的产品根据其使用环境的不同具有不同的测试要求，例如，计算机等电子消费类产品需要通过电磁干扰等相关的测试。

面向测试的设计是指在设计阶段，机械工程师需要设计产品满足各种测试的要求，而不是等到产品制造完成之后发现测试不通过的时候再去修改设计。这就要求在产品规格定义阶段明确定义产品需要通过的测试，然后去理解这些测试要求，并接受测试部门同事的建议，以便在产品设计阶段就设计产品使得产品满足这些测试要求，保证产品制造完成后通过相关的测试，并最终保证消费者安全可靠地使用产品。

6. 面向制造和装配的设计讨论

当完成面向制造和装配的设计之后，机械工程师还需要同制造、装配部门的工程师一起合作，从制造和装配的角度对产品的可制造性和可装配性提出改善的意见。这一步非常重要，特别是当机械工程师对某些制造和装配工艺不了解时或者对当前制造装配部门现有制造装配设施和水平不了解时。当然，对于他们的意见，机械工程师不能盲目听从，而是需要认真分析，毕竟他们对设计并不了解，只是从他们的角度和利益出发提出建议，机械工程师更不能因为他们的一面之词就牺牲产品设计其他方面的要求。

7. 样品制作

样品制作是指当产品设计完成后，需要通过简单快速的加工方式制作样品来验证产品设计是否满足上述产品各种设计要求，例如产品的功能、装配、测试等要求。一旦发现产品设计不满足这些要

求，就需要修改设计，直到满足为止。现代大多数的零件制造工艺都需要模具，而模具制造时间长、成本高，而且修改不容易。样品制作作为验证产品设计合理性的一种方法，可以减少设计的错误，从而避免后续模具的反复修改。

样品制作的方法主要有快速原型、数控加工以及三维打印等。一般来说，样品制作不能验证零件的可制造性，除非按照零件的实际制造工艺来制造零件，但这往往是不可能的。

8. 产品制造

当通过样品制作验证产品设计合理之后，零件就可以进行制造了。常用的制造工艺包括注射加工、钣金冲压加工、铸造和机械加工等。除了机械加工之外，大多数制造工艺都需要进行模具制造，通过模具再把产品生产出来，而模具制造的成本和时间在产品开发的成本和周期中都占有不小的比例。对于电子和电器行业，注射加工和钣金冲压加工因为其加工成本较低、效率高，是最常用的制造工艺。

9. 产品装配

零件通过各种制造工艺制造之后，装配在一起就组成一个完整的产品。一般来说，产品会经过小批量的试产来发现和解决装配中出现的问题。

10. 测试

产品的测试用于验证产品是否能够满足相关的测试要求，保证产品的安全性和可靠性。另外，有些产品需要通过相关行业的认证，例如 3C 认证等。

11. 量产

当产品没有质量问题，通过相应的测试之后，就可以进行大规模的量产，走向市场。

1.3.2 面向制造和装配的产品开发的优点

面向制造和装配的产品开发的核心是“我们设计，你们制造，设计充分考虑制造的要求”、“第一次就把事情做对”。面向制造和装配的产品开发具有图 1-10 所示的四大优点：产品设计修改次数少、

产品开发周期短、产品成本低和产品质量高。

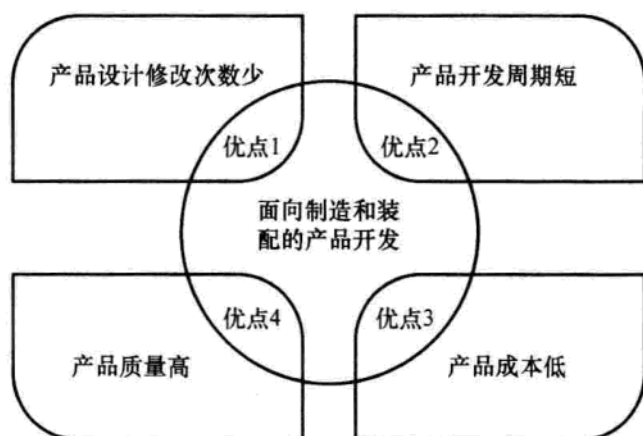


图 1-10 面向制造和装配的产品开发的优点

1. 减少产品设计修改

与传统产品开发相比，面向制造和装配的产品开发能够大幅减少产品设计修改次数，如图 1-11 所示。面向制造和装配的产品开发倡导“第一次就把事情做对”的理念，把产品的设计修改都集中在产品设计阶段完成。在产品设计阶段，机械工程师投入更多的时间和精力，同制造和装配部门密切合作，使得产品设计充分考虑产品的可制造性和可装配性，当产品进入到制造和装配阶段后，由制造和装配问题引起的产品设计修改次数就大大减少。

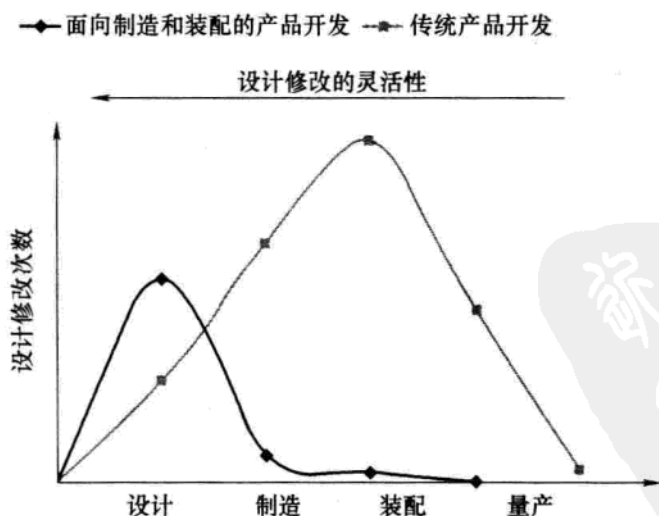


图 1-11 产品设计修改次数和修改灵活性的对比

在产品开发周期中，设计修改的灵活性随着时间的推移逐渐降低。在产品开发阶段进行设计修改最为容易，设计修改时间短、成本低。越到产品开发后期，设计修改越难、成本越高。从图 1-11 中可以看出，传统产品开发的设计修改往往集中在产品开发的后期，在此阶段设计修改难、灵活性差、成本高；而面向制造和装配的产品开发则把设计修改集中在产品开发的初期，在此阶段设计修改容易、灵活性好、成本低。

2. 缩短产品开发周期

面向制造和装配的产品开发能够缩短产品开发周期，从而缩短产品上市时间。据统计，相对于传统产品开发，面向制造和装配的产品开发能够节省 39% 的产品开发时间，如图 1-12 所示。当然，面向制造和装配的产品开发需要更多的产品设计时间和精力以确保产品的可制造性和可装配性。

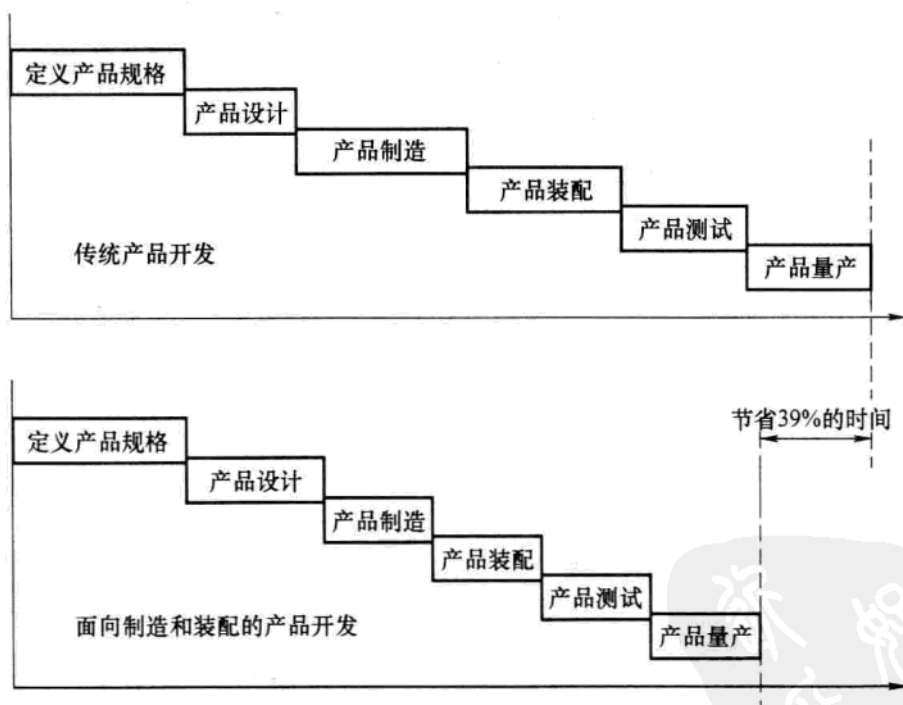


图 1-12 产品开发周期的对比

为缩短产品开发周期、缩短产品上市时间，正确的做法是采用面向制造和装配的产品开发，增加产品设计阶段时间和精力投入，

确保“第一次就把事情做对”。遗憾的是目前有些企业为了缩短产品开发周期，压缩在产品阶段的时间和精力的投入，在产品阶段还没有完善之前，匆匆忙忙进行模具设计和制造，结果当然只能是事倍功半、适得其反，“反复修改才能把事情做对”，产品开发的时间反而大幅增加。

3. 降低产品成本

面向制造和装配的产品开发大幅降低了产品成本。如 1.1.2 节所述，产品设计阶段决定了 75% 的产品成本。面向制造和装配的产品开发同时也是面向成本的开发，这主要通过以下方面来实现：

(1) 在设计阶段进行成本分析，降低产品成本 在产品阶段，对产品的成本进行分析，在满足产品功能等要求的前提下，选择合适的材料和最经济的产品制造工艺。

(2) 减少设计修改，降低成本 在产品开发周期中，设计修改的灵活度随着时间的推移越来越低，设计修改所导致费用就越来越高。一般来说，设计修改费用在产品开发周期中是随着时间的推移呈 10 倍增长的，如图 1-13 所示。

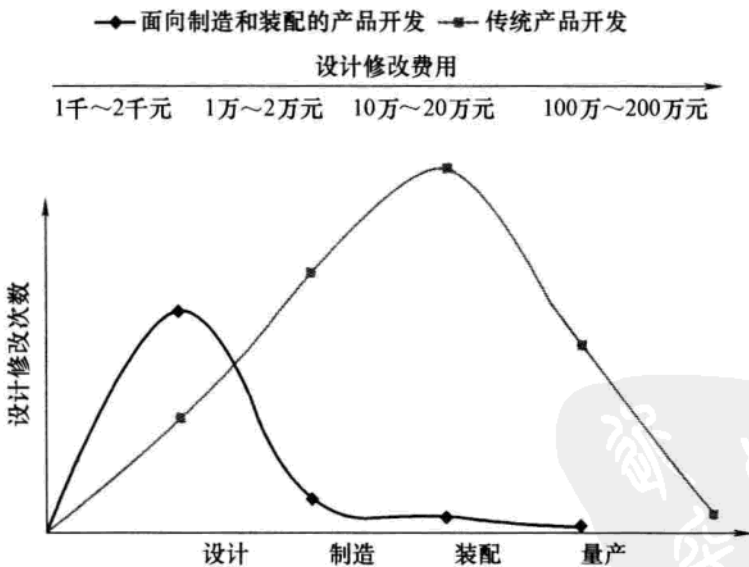


图 1-13 产品设计修改费用在产品开发周期中的变化

相同的一个设计修改，在产品阶段，只需要在三维软件中修改产品的图样，需要的费用只是工程师的设计费用，为 1000 ~

2000 元；在样品制作阶段，需要 1 万 ~ 2 万元；在产品制造和装配阶段，设计修改会导致模具的修改和装配工艺的变更，此时需要的费用就是 10 万 ~ 20 万元；一旦产品已经量产，再需要进行设计修改，这时影响范围就更广，所导致的费用就更高，达到 100 万 ~ 200 万元。当然，如果产品发生严重的质量问题需要召回，此时的费用不仅仅是 1000 万 ~ 2000 万元，更会破坏公司的声誉，这种损失绝对不是用钱可以衡量的。例如，在 2010 年，因为安全隐患问题，某汽车公司不得不大量召回汽车，因此蒙受了几十亿美元的损失。

因此，减少产品设计修改，同时避免在产品开发后期进行设计修改，能够大大降低产品成本。面向制造和装配的产品开发“第一次就把事情做对”，在产品设计阶段就完善产品设计，这就避免了在产品开发后期进行设计修改所带来的巨额费用，降低了产品成本。

(3) 简化零件设计，降低产品制造成本 面向制造和装配的产品开发在产品设计阶段通过简化零件的设计，降低零件制造复杂度，从而达到降低零件制造成本的目的。

零件设计简单与否直接关系到零件制造成本。实现同样功能的一个零件，如果设计简单，制造就简单，制造的成本就低；相反，如果零件设计复杂，制造就复杂，制造的成本就高。从成本上来说，零件上的每一个特征必须有其存在的理由，否则这些特征是可以去除的，而零件上一些不必要的特征往往会增加零件的制造复杂度，从而增加模具的复杂度和制造成本。简化零件的设计，降低零件的复杂度，这是面向制造和装配的产品开发中一个非常重要的内容。本书将在以后的章节中对此作详细的描述。

(4) 简化产品设计，降低产品成本 面向制造和装配的产品开发可以通过简化产品的设计，达到降低产品制造和装配成本的目的。产品成本包括零件的材料成本和相应的制造和装配成本。产品越复杂，产品的装配就越复杂，装配成本就越高，同时装配出现不良品的几率也越高。简化产品设计是降低产品成本的一个强有力的手段。

零件数量是衡量产品复杂度的指标之一。通过减少零件数量、降低产品复杂度可以降低零件成本，如图 1-14 所示。

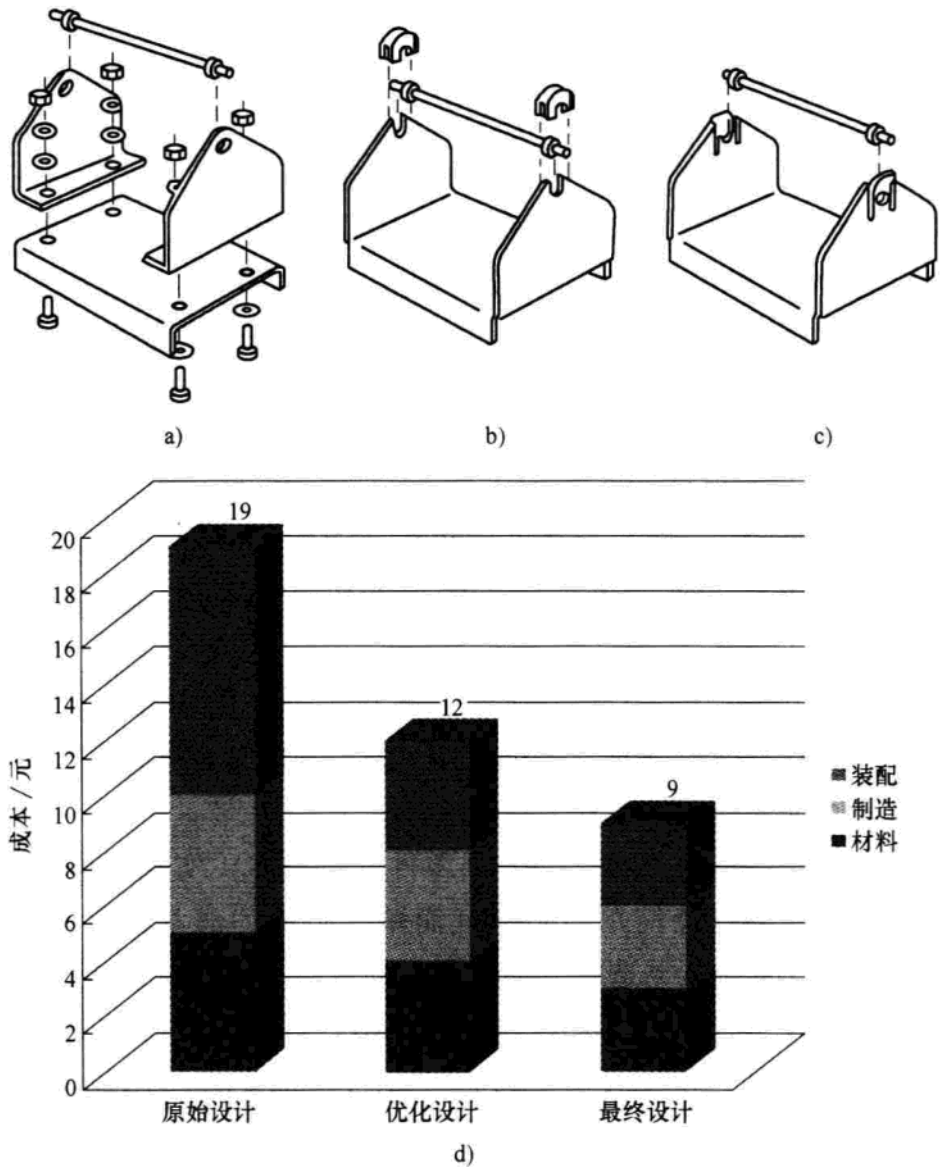


图 1-14 减少零件数量，降低产品成本

a) 原始设计 (零件数: 24) b) 优化设计 (零件数: 4)

c) 最终设计 (零件数: 2) d) 零件数量减少带来的成本降低

减少零件数量、简化产品设计，这是面向制造和装配的产品开发核心之一，也是本书讲述的重点之一。本书将在第 2 章中详细介绍这方面的内容。

(5) 减少装配工序和装配时间，降低装配成本 面向制造和装配的产品开发在产品阶段通过选择合适的装配工序、保证产品

的可装配性，从而使得产品装配变得简单、有效率、人性化，能够大幅缩短装配时间，降低装配成本。据统计，相对于传统产品开发，面向制造和装配的产品开发平均能够节省产品 13% 的装配时间，从而减少产品装配成本支出。

(6) 降低产品不良率，减少成本浪费 产品成本还包括因为制造过程中产品不良率所带来的成本浪费。产品不良率越高，产品的成本浪费就越多。面向制造和装配的产品开发通过降低产品不良率来减少产品的成本浪费。

4. 提高产品的质量

面向制造和装配的产品开发使得产品具有很高的可制造性和可装配性。产品设计在产品开发原始阶段就得到了优化和完善，因此避免了产品在后期制造和装配中产生的质量问题，大大提高了产品的质量。

1.3.3 面向制造和装配的产品开发与并行工程

并行工程是指集成地、并行地设计产品及其相关过程（包括制造过程和支持过程）的系统方法。这种方法要求产品开发人员在一开始就考虑产品整个生命周期中从概念形成到产品报废的所有因素，包括质量、成本、进度计划和用户要求。并行工程的目的是提高质量、降低成本、缩短产品开发周期和产品上市时间。

很显然，要顺利地实施和开展并行工程，离不开面向制造和装配的产品开发。只有从产品开发入手，才能够实现并行工程提高质量、降低成本、缩短开发时间的目的。可以说，面向制造和装配的产品开发是并行工程的核心部分，是并行工程中最关键的技术。掌握了面向制造和装配的产品开发技术，并行工程就成功了一大半。

在此，作者向希望实施并行工程的企业建议，如果想开展和实施并行工程，不妨从面向制造和装配的产品开发入手，因为面向制造和装配的产品开发目前的理论和技术都已经成熟，在国内外都有相当多的成功案例。本书也提供了实实在在的面向制造和装配的产品开发指南。

1.4 面向制造和装配的产品开发的实施

1.4.1 实施的障碍

面向制造和装配的产品开发能够降低产品成本、提高产品质量、缩短产品开发周期，但是，由于传统产品开发思想和各种条件的限制，实施面向制造和装配的产品开发面临着不少的障碍，这主要包括：

1. 轻视产品设计

一些企业轻视产品设计，对产品设计不重视，认为产品设计不重要，不愿意在产品阶段投入时间和精力。时间就是金钱，为了争取缩短产品上市时间，企业千方百计压缩产品设计的时间和精力，这种做法的结果当然是事倍功半、适得其反。

2. 错误的产品质量观念

一些企业认为产品是制造出来的，产品质量就等于制造质量，这是错误的产品质量观念。中国是一个制造大国，中国近 20 年的高速发展很大一部分归功于制造业的贡献，于是企业就有了重制造轻设计的想法，它们认为产品质量就等于产品制造，愿意斥巨资从国外高价进口精密的制造仪器和引进制造技术，而不愿意在产品设计上投入一分钱。

产品质量并不是制造出来的，而是设计出来的。

3. 没有面向制造和装配的产品开发的意识

目前已经有很多企业在传统产品开发基础上，在产品阶段就注重产品设计的可制造性和可装配性，但是这些往往是机械工程师们根据以往产品开发的经验和教训产生的下意识的做法，并没有系统性地考虑产品设计的可制造性和可装配性，与真正的面向制造和装配的产品开发尚有一段距离。

4. 面向制造和装配的产品开发需要团队合作

面向制造和装配的产品开发需要从根本上抛弃长期使用的传统产品开发流程，同时设计部门还需要同制造、装配、测试等部门进行团队合作，这必然会遇到很多障碍。

对于机械工程师来说，面向制造和装配的产品开发不但要求机械工程师在设计时考虑产品的可制造性和可装配性，还需要制造和装配等部门的工程师针对产品设计从制造和装配的角度提出意见。人们常误认为产品设计只是机械工程师的事情，制造和装配部门的同事没有资格对产品设计指指点点，于是根本不在乎他们的建议。当然，另一方面，机械工程师也一定不能对他们的意见言听计从，不能不假思索地牺牲产品其他要求去满足他们的要求，而是需要认真地分析这些建议是不是真的对产品的可制造性和可装配性等有所改善，需要在各个方面取得平衡。因此面向制造和装配的产品开发需要团队合作，实施起来并不容易。

5. 缺乏面向制造和装配的产品开发人才

面向制造和装配的产品开发对机械工程师要求高。机械工程师既要能够把各种产品设计要求转化为产品设计，同时又需要熟悉产品制造和装配的工艺，对于机械工程师来说，这需要时间和经验的积累。目前国内缺乏这方面的人才，同时企业也往往缺乏耐心去培养这方面的人才。

6. 制造的错误定位

在产品开发产业链中，制造方常常是作为设计的一个供应商出现，于是机械工程师理所当然地认为，设计出什么样的产品，供应商就应当制造什么样的产品。而且，有些时候供应商明明知道产品设计不合理，制造出来的产品不可能满足设计要求，但为了得到订单，往往会一开始就满口应承。在这样的情况之下，产品设计常不考虑制造的需求，但是当产品制造出来后就悔之晚矣。

7. “客户第一”原则的错误影响

“客户第一”原则往往会造成对产品可制造性和可装配性的忽视。“客户第一”、“客户至上”，这是很多企业面对客户时所秉承的原则。把客户永远放在一位，对客户的要求都有求必应，害怕客户的丝毫不满意会导致失去客户，于是，在面对客户的要求时，总是想方设法去满足，而往往会忽略产品的可制造性和可装配性。但是，“没有可制造性和可装配性，再好的产品也无法实现”，到头来客户的要求得不到满足，当初的承诺没有实现，客户会更加不高

兴，这反而会失去客户；或者，产品具有可制造性和可装配性，但成本较高，企业没有利润，这样的产品开发也没有意义。如果在开始面对客户的要求时，不是一口应承，而是结合产品的可制造性和可装配性，综合分析，有理有据，纵然客户的要求不能完全满足，但客户一定会为工程师的专业度所折服，并不会因此而不高兴，这才能实现企业与客户之间的双赢。

1.4.2 实施的关键

为提高产品质量、缩短产品开发周期、降低产品开发成本，企业实施面向制造和装配的产品开发的关键如下：

1. 转变思想

机械工程师应该改变产品开发以设计为主的想法。产品并不是想怎么设计就怎么设计，产品设计固然需要一些创新，但同时也必须遵循产品制造和装配的规律。机械工程师应当由“我们设计，你们制造”转变为“我们设计，你们制造，设计充分考虑制造的要求”。

而对于企业来说，应当改变以往“重制造，轻设计”的思想，加大对产品设计的投入，同时支持企业实施面向制造和装配的产品开发。

2. 建立面向制造和装配的产品开发团队

除了机械工程师之外，产品开发团队中还需要包括制造和装配工程师等。产品制造和装配的技术纷繁复杂、日新月异，机械工程师并不可能都完全掌握，而且他们也不是这方面的专家，因此，面向制造和装配的产品开发必须寻求制造和装配工程师的帮助，进行团队合作。在产品的设计阶段，尽早让他们介入到产品的设计中，并提出见解；同时，如果机械工程师在产品设计中遇到制造和装配的问题，也应该尽早向他们征求意见。

3. 实施面向制造和装配的产品开发流程

企业首先应当抛弃传统产品开发流程，在企业内部推广使用面向制造和装配的产品开发流程。当然，改变产品开发流程不是一件容易的事情，涉及多个部门之间的团队合作，这需要企业高层的支持。面向制造和装配的产品开发流程的具体实施则依赖项目工程师的管控。项目工程师应当理解面向制造和装配的产品开发的内涵，

制订合理的产品开发进度（例如，在产品的设计阶段分配足够多的时间和人力），组建产品开发团队参加面向制造和装配的产品开发讨论，在产品的设计阶段就完善产品的设计。

4. 进行面向制造和装配的产品开发培训

从前面的讨论中可以看出，由于对面向制造和装配的产品开发的认识和认知不足，同时缺乏具有相关理论和知识的机械工程师，尽管很多企业想推广使用面向制造和装配的产品开发，但心有余而力不足，目前依然在传统产品开发的漩涡中挣扎，因此，针对机械工程师的面向制造和装配的产品开发培训必不可少。

另外，在有条件的情况下，把机械工程师派到设计的后方去（例如，零件注射加工车间和产品装配线等），让机械工程师亲身参与和体验产品的制造和装配过程，那么他一定会体会到，如果产品设计没有考虑到制造和装配的要求，产品制造和装配是如何地困难。在日本，机械工程师往往只有在工厂工作一段时间充分理解产品的制造和装配过程之后，才有机会从事产品的设计工作。

5. 使用面向制造和装配的产品开发检查表

尽管面向制造和装配的产品开发需要团队合作，但机械工程师仍然承担着主要的责任。面对纷繁复杂的设计要求，机械工程师常会顾此失彼，很可能因为一个微小的设计失误造成产品开发的失败。

本书将提供一个面向制造和装配的产品开发检查表（Excel 格式），该检查表包含全书共 200 条以上面向制造和装配的产品设计指南。在产品的设计阶段，利用该检查表可以系统化地检查产品设计是否具有很好的可制造性和可装配性，从而确保产品设计万无一失。当然，不同企业针对其产品不同的测试或其他要求，还可以在设计的检查表中加入更多的内容。

第2章 面向装配的设计指南

我拆卸了竞争对手的产品，发现我们产品的每一个零件都不比他们的差，甚至更好，但他们的产品比我们的好，我不明白这是怎么回事。

——迷茫的工程师

2.1 面向装配的设计

2.1.1 装配的定义

装配是指把多个零件组装成产品，使得产品能够实现相应的功能并体现产品的质量。从装配的概念可以看出，装配包含三层含义：①把零件组装在一起；②实现相应的功能；③体现产品的质量。装配不仅仅是拧螺钉，不是简单地把零件组装在一起，更重要的是组装后产品能够实现相应的功能，体现产品的质量。装配是产品功能和产品质量的载体。

对于任何一种产品来说，在经过零件的加工制造并成为产品之前，都需要经过装配的过程。产品包含的零件从几个到几百万个不等。一个订书机有几十个零件，一部手机有几百个零件，一辆汽车有几万个零件，而一架飞机则有几百万个零件。装配是产品制造过程中的重要组成部分，装配过程对于产品质量、产品成本、产品开发周期等都具有很大的影响。

2.1.2 最好和最差的装配工序

产品装配过程中最基本的元素是装配工序，一个产品的装配往往由一个或多个装配工序组成。一个典型的产品装配工序包括以下关键操作：（人或者机器人）识别零件、抓起零件、把零件移动到工

作台、调整并把零件放置到正确的装配位置、零件固定、检测等。人工装配和自动化装配的工序会有稍许不同。

装配工序有好坏与优劣之分，不同的装配工序对产品的影响千差万别。从装配质量、装配效率和装配成本等方面来看，最好和最差的装配工序的特征见表 2-1。

表 2-1 最好和最差的装配工序

最好的装配工序	最差的装配工序
零件很容易识别	零件很难识别
零件很容易被抓起和放入装配位置	零件不容易被抓起，容易掉到某些位置
零件能够自我对齐到正确的位置	零件需要操作人员不断地调整才能对齐
在固定之前，零件只有唯一正确的装配位置	1) 在固定之前零件能够放到两个或者两个以上的位置 2) 很难判断哪一个装配位置是对的 3) 零件在错误的位置可以被固定
快速装配，紧固件很少	螺钉、螺柱、螺母的牙型、长度、头型多种多样，令人眼花缭乱
不需要工具或夹具的辅助	需要工具或夹具的辅助
零件尺寸超过规格，依然能够顺利装配	零件尺寸在规格范围之内，但依然装不上
装配过程不需要过多的调整	装配过程需要反复的调整
装配过程很容易、很轻松	装配过程很难、很费力

2.1.3 面向装配的设计的定义

面向装配的设计是指在设计阶段使得产品具有良好的可装配性，确保装配工序简单、装配效率高、装配质量高、装配不良率低和装配成本低。面向装配的设计通过一系列有利于装配的设计指南（例如简化产品设计、减少零件数量等），并同装配工程师合作，简化产品结构，使其便于装配，为提高产品质量、缩短产品开发周

期和降低产品成本奠定基础。

面向装配的设计的研究对象是产品的每一个装配工序，通过产品设计的优化，使得产品的每个装配工序具有表 2-1 列出的最好装配工序的特征，每个装配工序都是最好的装配工序。

2.1.4 面向装配的设计的目的

通过面向装配的设计，产品开发能够达到以下目的：

简化产品装配工序；

缩短产品装配时间；

减少产品装配错误；

减少产品设计修改；

降低产品装配成本；

提高产品装配质量；

提高产品装配效率；

降低产品装配不良率；

提高现有设备使用率。

2.1.5 面向装配的设计的历史

20 世纪 60 ~ 70 年代，人们根据实际设计经验和装配操作实践，提出了一系列有利于装配的设计建议，以帮助设计人员设计出容易装配的产品，这些设计建议还辅以真实的案例告诉人们如何从产品设计着手来改善产品的装配。

1977 年，Geoff Boothroyd 教授第一次提出了“面向装配的设计”这一概念，并被广泛接受。面向装配的设计旨在提高零件的可装配性，以缩短装配时间、降低装配成本和提高装配质量。1982 年，Boothroyd 教授在《自动化装配》一书中，提出了一套评估零件可装配性的体系，并以此为基础，开发出面向装配的设计软件。

自诞生之初，面向装配的设计就受到很多企业的重视，并取得很好的应用效果。1981 年，施乐公司的制造经理 Sidney Liebson 估计施乐公司因为实施面向装配的设计而节省了几百万美元。1988 年，福特公司因为面向装配的设计模式的实施节省了 10 亿美元。

2.2 设计指南

2.2.1 减少零件数量

Keep It Simple, Stupid (简单就是美)

——KISS 原则

KISS 原则是指产品的设计越简单越好，简单就是美，任何没有必要的复杂都是需要避免的。KISS 原则从英文直译是把事情弄得越简单、越傻瓜化越好。其最完美的案例是傻瓜相机，傻瓜相机操作简单，似乎连傻瓜都能利用它拍摄出曝光准确、影像清晰的照片来。

KISS 原则是面向制造和装配的产品设计中最重要的一条设计原则和设计思想，几乎贯穿于每一条设计指南中（请参考以后的章节）。

减少零件数量是 KISS 原则在面向装配的设计中的主要体现。一般来说，在产品中零件数量越多，产品制造和装配越复杂、越困难，产品制造费用和装配费用越高，产品开发周期就越长，同时产品发生制造和装配质量问题的可能性越高。在确保实现产品功能和质量的前提下，简化的设计、更少的零件数量能够降低产品成本，缩短产品开发周期，提高产品开发质量。高水平的机械工程师把复杂的东西设计得很简单，低水平的机械工程师则把简单的东西设计得很复杂。此时也可以把 KISS 原则应用上，因为 KISS 原则也可以翻译成：把事情弄简单点，傻瓜！

对于机械工程师来说，减少零件数量、简化产品设计能够大幅减少工作量。一个零件在其开发周期中的任务包括零件设计、生成二维工程图、样品制作、零件试产、零件装配、零件质量和功能验证等，无一不是繁重的任务。减少零件数量、简化产品设计对于工程师来说是看得见的实惠，能够让工程师把更多的时间和精力放在提高产品设计质量上来。

1. 考察每个零件，考虑去除每个零件的可能性

“最好的产品是没有零件的产品”，这是产品设计的最高境界。

消费者关心的是产品功能和质量，而根本不关心产品的内部结构以及是如何实现这些功能的，因此，在产品中没有一个零件是必须存在的，每一个零件都必须有充分的存在理由，否则这个零件是可以去除的。

当然，不可能存在没有零件的产品，这只是机械工程师的梦想。不过，机械工程师可以向这个梦想努力和靠近，尽量以最少的零件数量完成产品设计。在产品设计中，考察每一个零件，在确保产品功能和质量的前提下，考虑是否可以和相邻的零件合并、是否可以共用产品中已经存在的零件或者以往产品中已经开发完成的零件、是否可以用更简单的制造工艺来实现等，从而达到去除零件、减少产品零件数量、简化产品结构的目的。

图 2-1 所示是一个减少零件数量的实例。在原始的设计中，产品由零件 A 和零件 B 通过焊接装配而成，行使一个卡扣的功能，其中零件 A 是钣金件，零件 B 是机械加工件。在改进的设计中，去除了零件 B，把卡扣的功能合并到钣金件上。同样是实现卡扣的功能，改进的设计中仅包含一个零件，而原始的设计中包含两个零件，而且两个零件还需要通过焊接装配而成。孰优孰劣，一目了然。

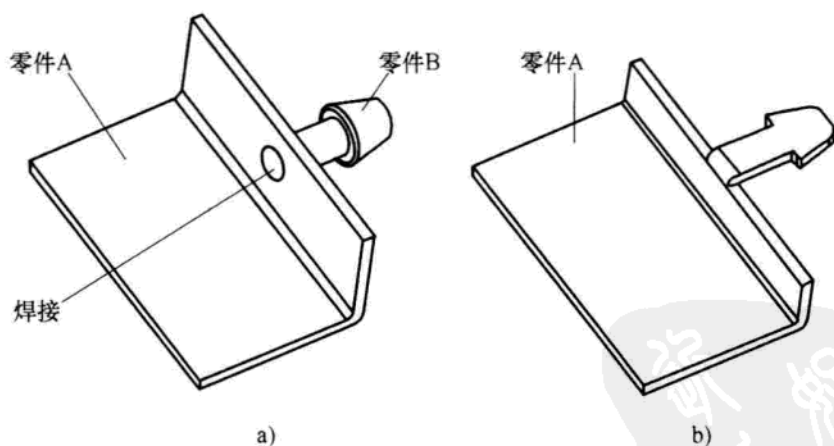


图 2-1 考虑去除每个零件的可能性

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 把相邻的零件合并成一个零件

减少产品零件数量的一个重要途径是通过设计的优化，把任意

相邻的零件合并成一个零件。判断相邻零件能否合并的准则如下：

- 1) 相邻的零件是否有相对运动？
- 2) 相邻的零件是否必须由不同材料组成？
- 3) 相邻的零件的合并是否阻止了其他零件的固定、拆卸和维修等？
- 4) 相邻的零件的合并是否造成零件制造复杂、产品整体成本增加？

如果上面四个问题答案都是否定的，那么相邻零件就有可能合并成一个零件。图 2-1 所示就是把相邻的零件 A、B 合并成一个零件 A 的实例。

3. 把相似的零件合并成一个零件

在产品设计中，相似零件也是减少零件数量的重点关注对象。由于产品功能的需要，在产品中经常存在着两个或多个形状非常相似、区别非常小的零件。机械工程师需要尽量把这些相似的零件合并成一个零件，使得同一个零件能够应用在多个位置。当然，这可能会使零件变得复杂，有时会造成零件应用在某个位置时出现一些多余的特征，带来一定的制造成本浪费。不过一般来说，相似零件合并所带来的制造成本浪费与节省的模具成本和装配成本相比不值一提。

如图 2-2 所示，零件 A 和零件 B 非常相似，唯一的区别是零件左端折边的位置不同，零件 A 的折边在左中侧，零件 B 的折边在左下侧。零件的相似性为零件的合并提供了基础。通过设计的优化，可以把零件 A 和零件 B 合并成零件 C。零件 C 把零件 A 的折边和零件 B 的折边合并成一个大的折边，使得零件 C 既能够应用在零件 A 的位置，同时又能够应用在零件 B 的位置。

设计技巧：在三维软件中，机械工程师先设计好一个零件，然后把零件装配到相似零件的位置，再来设计相似零件所应该具备的特征。合并后的零件包含了相似零件的所有特征。

合并相似的零件可以带来的另外一个好处是防错。在装配过程中相似的零件很容易被装配到错误的位置，这就好比人们总是把邻居家的双胞胎叫错名字一样。如果无法把相似的零件合并成一个零

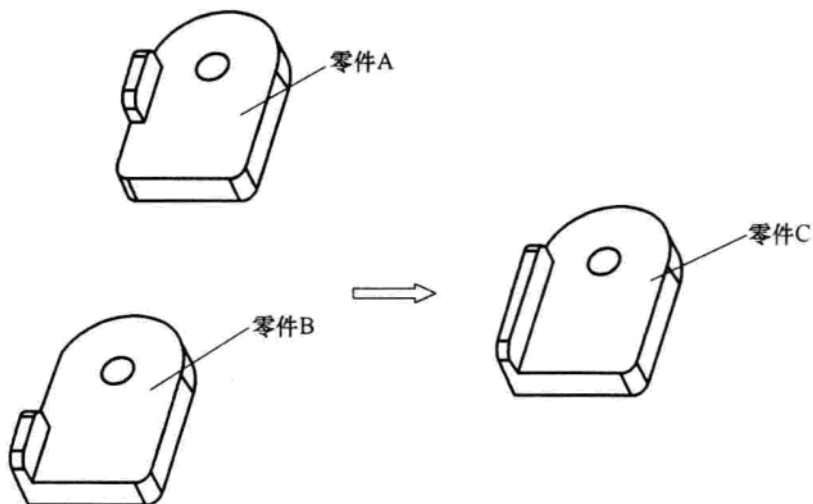


图 2-2 相似的零件合并成一个零件

件，则需要把它们设计得非常不同，夸大零件的区别。防错是面向装配的设计另外一个要求，本章稍后会讲到。

4. 把对称的零件合并成一个零件

同相似的零件一样，对称的零件也是减少零件数量的重点关注对象。由于产品功能的要求，对称零件在产品设计中出现的几率也往往非常大。

如图 2-3 所示，零件 A 和零件 B 是对称的，两者的区别是零件 A 的折边在零件中心线的右侧，而零件 B 的折边在零件中心线的左侧。通过设计的优化，把零件 A 和零件 B 合并成零件 C，零件 C 在零件的左侧和右侧均包含折边，这样零件 C 既能够应用在零件 A 的位置，同时又能够应用在零件 B 的位置。

设计技巧：在三维软件中，机械工程师先设计好一个零件，然后把零件装配到对称零件的位置，再来设计对称零件所应该具备的特征。合并后的零件包含了对称零件的所有特征。

合并对称零件的另外一个好处是防错，因为对称的零件往往也比较相似，容易被装配到错误的位置。如果无法把两个对称的零件合并成一个零件，那么需要把它们设计得非常不对称，夸大零件的不对称性，这是防错的要求。

5. 避免过于稳健的设计

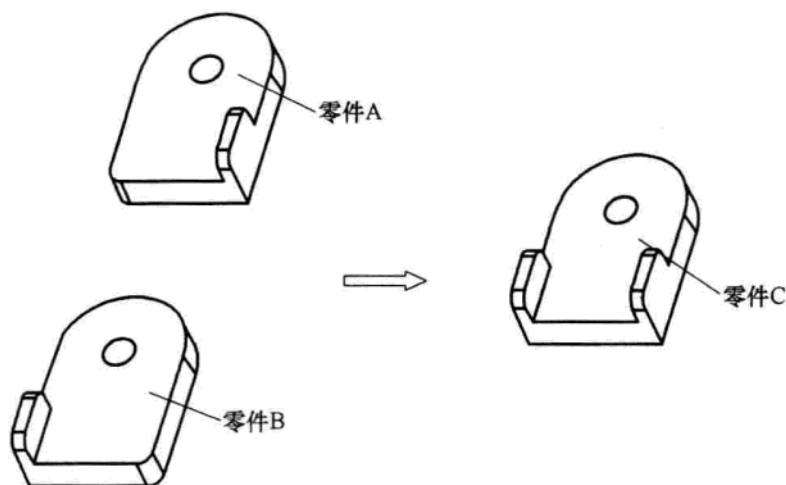


图 2-3 对称的零件合并成一个零件

为了满足各种要求，产品设计应当是稳健的设计，但是稳健有一定的限度，过于稳健的设计会增加零件数量和产品的复杂度，造成产品成本的增加。例如，按照客户的要求，某设备需要承受 500N 的冲击力，为了保证符合要求，产品设计时通过增加零件厚度并添加新的零件来提高产品力学性能，最后该设备实际测量下来能够承受 1000N 的冲击力。很显然，这种过于稳健的设计造成了巨大的浪费。

工程师可以通过相关的理论分析和模拟，以及样品制作和测试来避免过于稳健的产品设计。

6. 合理选用零件制造工艺，设计多功能的零件

零件制造工艺决定了零件形状的复杂度。有的制造工艺只能制造出简单形状的零件，而有的制造工艺能够制造出复杂形状的零件。在产品功能和成本满足的条件下，选用合理的零件制造工艺，设计多功能的零件有助于减少产品的零件数量和降低产品复杂度。如图 2-1 所示，一个钣金件代替了一个钣金和机械加工件的焊接组件。

机械工程师只有掌握多种零件制造工艺，在产品设计时才会游刃有余，才能合理选择零件的制造工艺，设计多功能的零件，从而简化产品设计。

2.2.2 减少紧固件的数量和类型

紧固件对零件仅有着固定的作用，对产品功能和质量并不带来额外的价值。一个紧固件的开发过程包括设计、制造、验证、采购、储存、拆卸（如果有需要）等，耗时耗力；同时，紧固件（特别是螺栓、螺母）的成本通常都比较高，而且紧固件的使用需要工具，非常不方便。因此，应尽量减少紧固件的使用。现在比较流行的消费类电子产品都要求“无工具设计”，即不需要专用的工具就可以完成产品的拆卸，为消费者提供产品的快速装配和使用的方便性。国外不少企业甚至把产品中“无工具设计”作为产品卖点推向市场，并获得大批拥趸。

1. 使用同一种类型的紧固件

如果一个产品中有多种类型的紧固件，机械工程师需要考虑减少紧固件的类型，尽量使用同一种类型的紧固件。使用同一种类型的紧固件能够带来如下好处：

1) 减少在设计和制造过程中对多种类型紧固件的管控。

2) 对紧固件的购买带来批量上的成本优势。

3) 使用同一种类型的紧固件能够减少装配线上辅助工具的种类。很多企业都要求在同一条装配线上紧固件的类型不要超过一定数量，最好是仅使用一种紧固件。

4) 防止产生装配错误。太多的紧固件类型很容易造成操作人员用错紧固件，紧固件用错很容易带来产品质量和功能问题，操作人员不得不花费大量的精力来防止错误的产生，而且一旦装配错误发生，操作人员又不得不花费更大的精力来返工。

如图 2-4 所示，在一个产品中，原始的设计有四种类型的螺钉，包括不同的螺钉长度、螺钉头型、螺钉牙型。通过优化设计，把螺钉的类型减少为一种最常见的 M3 × 6 螺钉，使得同一种类型的螺钉能够应用在产品中不同的位置。

如何减少紧固件的类型需要具体问题具体分析，例如，在钣金件设计中，螺柱是常用的零件。有时因为功能的要求，在同一个钣金件中要求的螺柱高度不一样。此时，有的机械工程师往往就选择

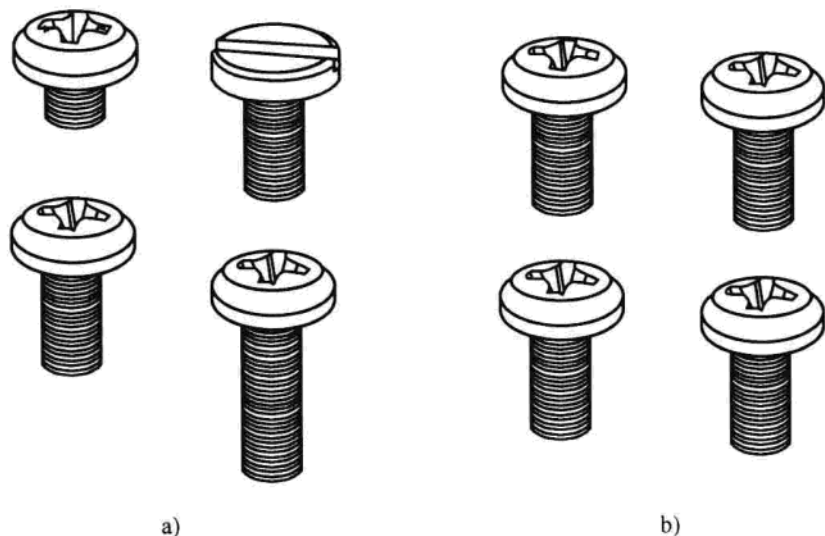


图 2-4 减少紧固件的类型

a) 原始的设计 b) 改进的设计

两种不同高度的螺柱，即两种类型的螺柱。但是，通过在钣金中增加凸台来调整高度就能够使用同一种螺柱，达到减少螺柱类型的目的。如图 2-5 所示，原始的设计中需要两种不同高度的螺柱 M3 × 6

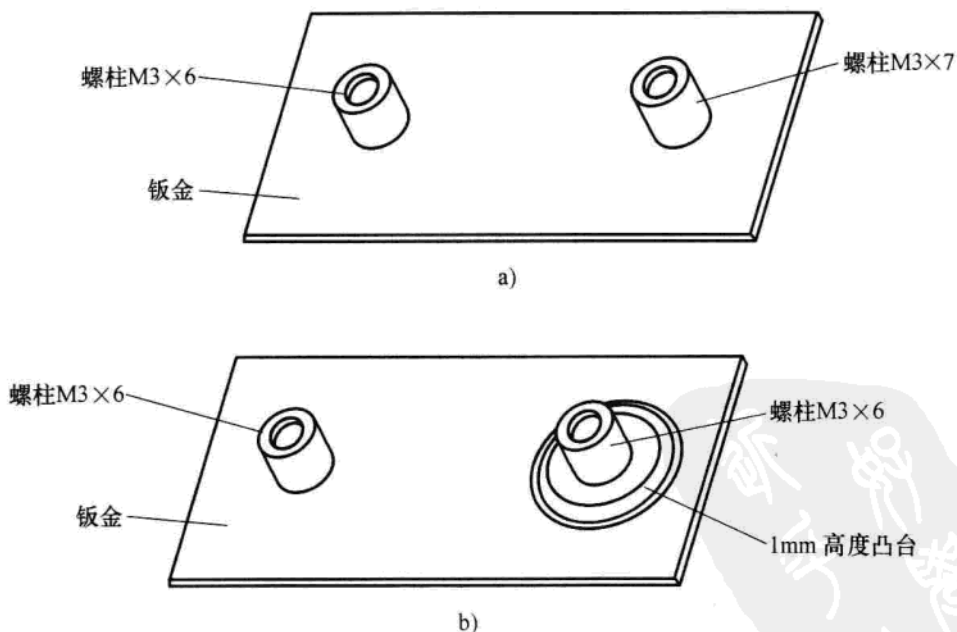


图 2-5 在钣金中减少螺柱的类型

a) 原始的设计 b) 改进的设计

和 $M3 \times 7$ 。 $M3 \times 6$ 是最通用的螺柱， $M3 \times 7$ 则需要定制加工。在改进的设计中，通过在钣金中增加 1mm 的凸台，把螺柱的装配位置提高 1mm ，从而在两个位置都可以使用同一种螺柱 $M3 \times 6$ 。

2. 使用卡扣等代替紧固件

装配一个紧固件需要耗费比较多的时间，一个紧固件的装配成本往往是制造成本的 5 倍以上。如图 2-6 所示，常用四种装配方式成本的高低由左向右排列，即卡扣成本最低，拉钉成本次之，螺钉成本较高，螺栓和螺母的成本最高。

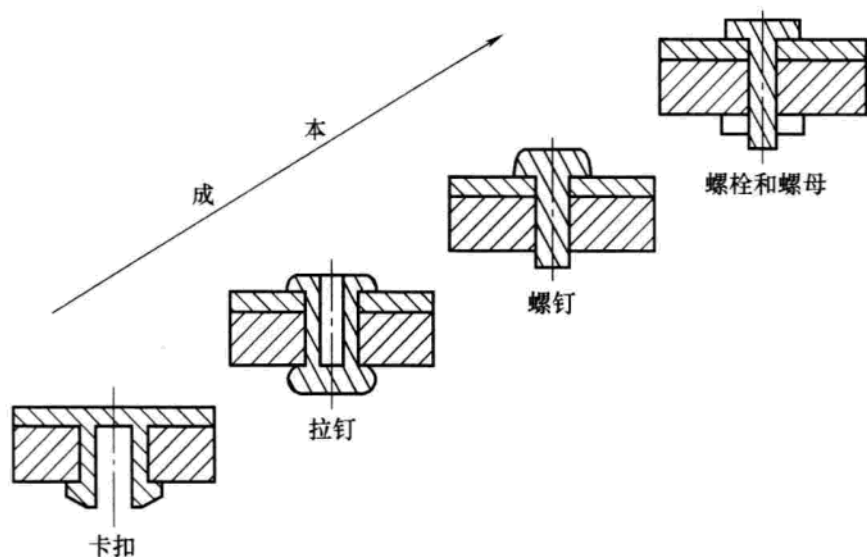


图 2-6 四种装配方式成本对比

卡扣装配是最经济、最环保的装配方式，使用卡扣代替紧固件能够节省大量的装配时间和装配成本。如图 2-7 所示，两个塑胶件之间可以通过卡扣来装配。

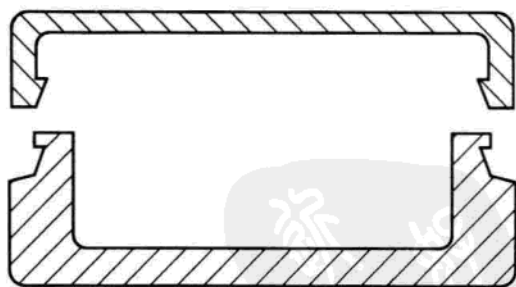


图 2-7 塑胶件通过卡扣固定

在钣金上则可通过折边压紧来减少紧固件数量，如图 2-8

所示。在原始的设计中，两个钣金件通过四个螺钉固定；在改进的设计中，通过在一个钣金上增加折边（类似塑胶件中卡扣的功能）来固定，将螺钉的数量由四个减少到两个。

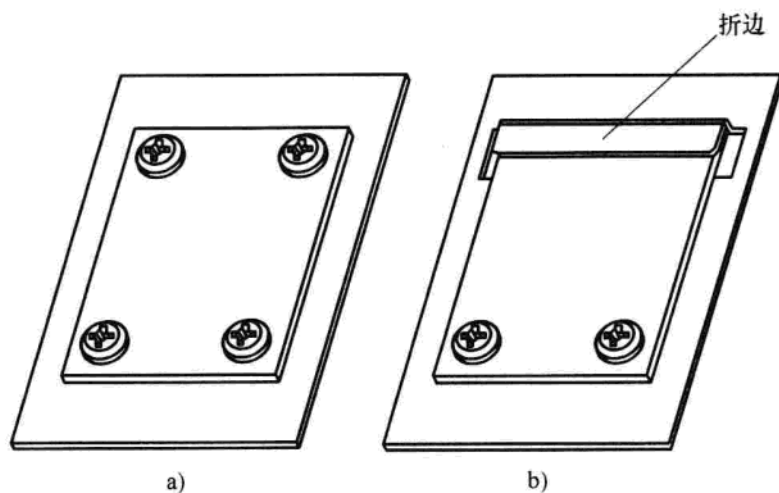


图 2-8 钣金上通过折边压紧减少紧固件数量

a) 原始的设计 b) 改进的设计

3. 避免分散的紧固件设计

把紧固件设计为一体，能够减少紧固件的类型、缩短装配时间和提高装配效率，如图 2-9 所示。

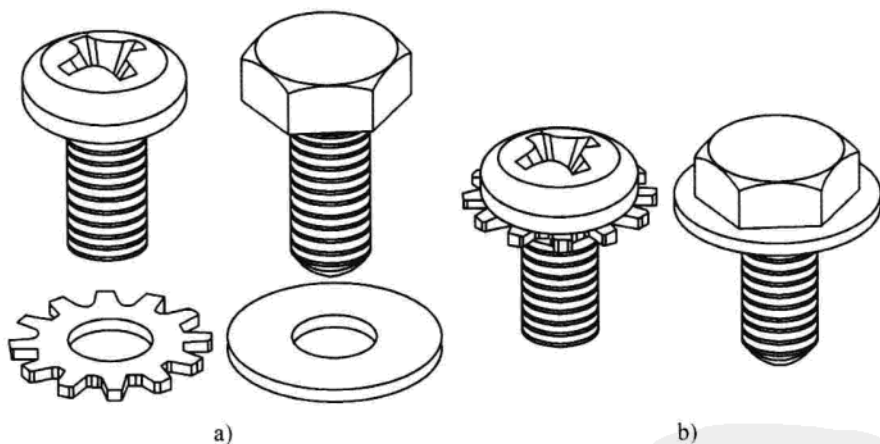


图 2-9 避免分散的紧固件设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

4. 把螺柱和螺母作为最后的选择

同其他的装配方式相比，螺柱和螺母的制造成本最高，装配成本最高，装配效率最低。因此，除非零件的装配要求特别高，否则永远把螺柱和螺母作为最后的选择。

2.2.3 零件标准化

永远不要设计从产品目录中买不到的零件。

——大卫·安德森

零件标准化、避免零件定制具有诸多好处：

1) 零件标准化能够减少定制零件所带来的新零件开发时间和精力浪费，缩短产品开发周期。

2) 零件标准化能够带来零件成本的优势。标准化零件因为规模性往往成本较低。对于塑胶、钣金等需要通过模具进行制造的零件，使用标准化的零件能够节省模具的成本，零件成本优势更加明显。在成本上，定制零件就如同定制衣服一样，通常都会比较贵。

3) 避免出现零件质量问题的风险。标准化的零件已经被广泛使用，并证明质量可靠。相反，定制的零件需要通过严格的质量和功能验证，否则容易出现质量问题。

那么，企业应当如何实现零件标准化呢？

1) 企业应当制订常用零件的标准库和零件优先选用表，并在企业内部不同产品之间实行标准化策略，鼓励在产品开发中从标准库中选用零件，鼓励重复利用之前产品中应用过的零件。同一件产品中的零件也可以进行零件标准化，在前几节中讲述的合并相似和对称的零件就是一种零件标准化的形式。

2) 五金零件，例如螺钉、螺柱、导电泡棉等选用供应商的标准零件，五金零件的定制会带来成本和时间的增加。大卫·安德森在2001年的计算机集成制造大会发表演讲说，“永远不要设计从产品目录中买不到的零件”，意思是永远从供应商那里买现成的标准零件。国外称这样的零件是 off-the-shelf。企业可以收集整理各种五金零件的供应商产品目录。目前有一些企业已经建立了一些常用标准零件（如螺钉）的三维数据库，机械工程师设计产品时可以从数据库中直接调用，这对企业实施零件标准化策略很有帮助。

2.2.4 模块化产品设计

模块化产品设计是指把产品中多个相邻的零件合并成一个子组

件或模块，一个产品由多个子组件或模块组成。应用模块化设计，复杂产品被分解为多个功能模块，从而简化产品结构和减少产品总装配时的装配工序；同时，模块化的子组件能够在产品总装配之前进行质量检验，装配质量问题能够更早、更容易被发现，避免不合格的产品流入到产品总装配线上，从而提高产品装配效率和提高装配质量。

模块化产品设计同时是互换性的设计。当一个子组件在工厂装配或者在使用中发生问题时，子组件很容易被替换，这有利于产品的维护，同时避免因为子组件的质量问题而造成整个产品报废，从而降低产品成本。

另外，模块化的产品设计能够帮助企业实现产品“按需定制”，满足消费者个性化的需要。

如图 2-10 所示，一个汽车座椅被分为两个模块：金属框架和座椅套。消费者可以根据自己的喜好定制座椅的颜色。

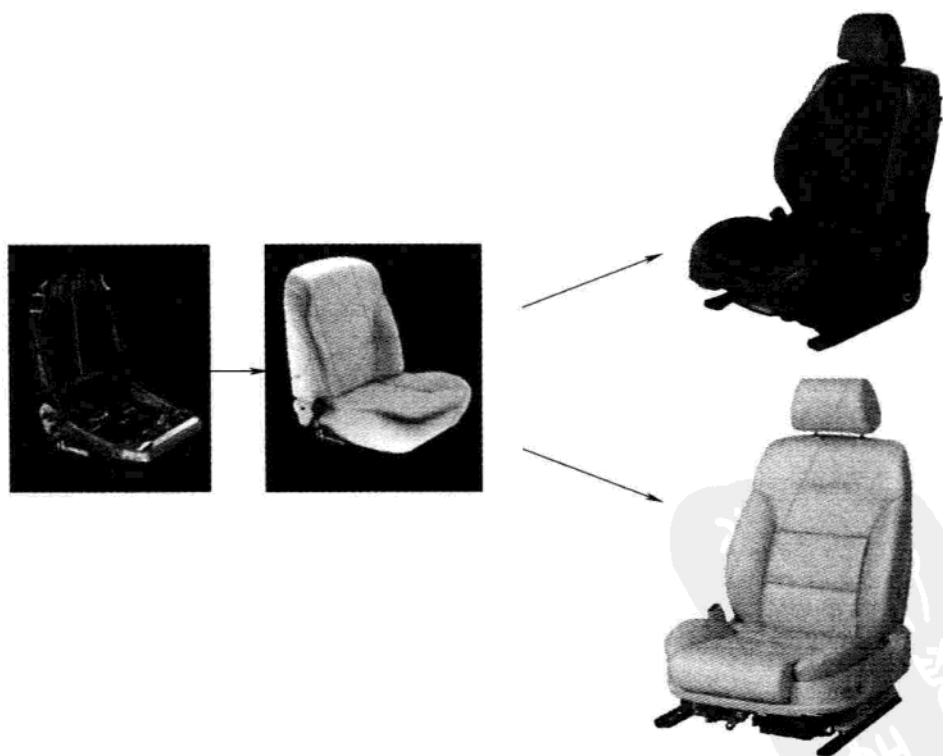


图 2-10 汽车座椅的模块化设计

2.2.5 设计一个稳定的基座

1. 稳定的基座

产品装配中一个稳定的基座能够保证装配顺利进行，同时可以简化产品装配工序，提高装配效率，减少装配质量问题。

一个稳定的基座应当具备如下条件：

1) 基座必须具有较大的支撑面和足够强度以支撑后续零件，并辅助后续零件的装配。

2) 在装配件的移动过程中，基座应当支撑后续零件的固定而不发生晃动以及脱落。

3) 基座必须包括导向或定位特征来辅助其他零件的装配。

图 2-11 所示是一个产品的基座零件。在原始的设计中，零件上大下小，很容易倾斜，不利于后续零件的装配；在改进的设计中，在零件底部增加了一个较大面积的平面，用于提供一个稳定的支撑面，使得后续零件的装配变得非常稳固，能够提高装配效率，减少装配质量问题。

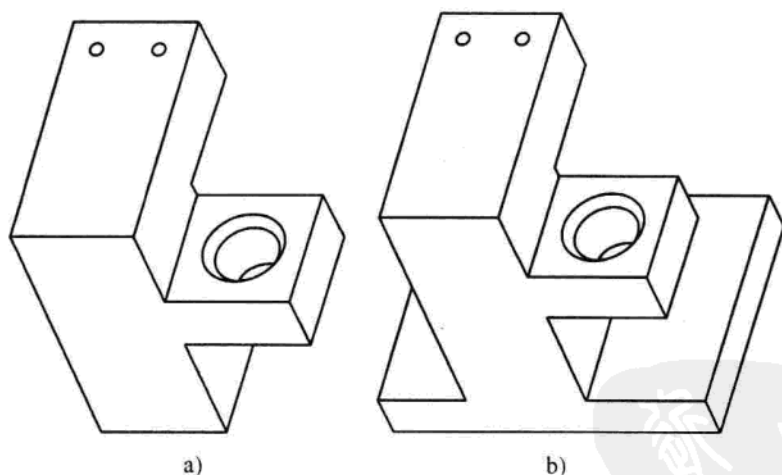


图 2-11 设计一个稳定的基座

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 最理想的装配方式

最理想的装配方式是金字塔式的装配方式。小时候玩积木的经验告诉我们，要想把积木搭得比别人高、比别人快，一定要把最大

的积木放在最下面，然后依次放较小的积木，越到上面积木越小。产品的装配也是如此。金字塔式的装配是将一个大而且稳定的零件充当产品基座放置于工作台上，然后依次装配较小的零件，最后装配最小的零件；同时基座零件能够对后续的零件提供定位和导向功能，如图 2-12 所示。

3. 避免把大的零件置于小的零件上进行装配

机械工程师常犯的一个错误是把较大的零件（或组件）置于较小的零件（或组件）上进行装配，这很容易造成装配过程不稳定、装配效率

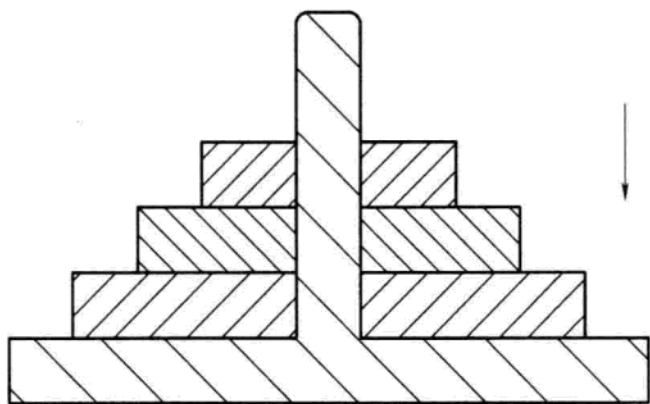


图 2-12 金字塔式的产品装配顺序

低，容易发生装配质量问题，而且有时装配不得不借助装配夹具的辅助。如图 2-13 所示，原始的设计中，较大的零件置于较小的零件之上进行装配，装配过程不稳定，装配困难，容易出现装配质量问题；在改进的设计中，把较小的零件置于较大的零件之上，装配过程稳定、轻松，装配质量高。如果因为设计限制，大的零件不得不置于小的零件之上，那么在设计时也必须在小零件上添加额外的特征，以提供一个稳定的基座。

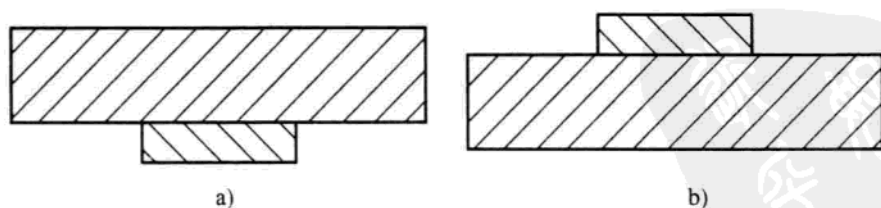


图 2-13 避免把大的零件置于小的零件之上

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2.2.6 设计零件容易被抓取

1. 避免零件太小、太滑、太热和太柔弱

零件需要具有合适的尺寸，使得操作人员或机械手能够很容易地抓取零件，进行装配，零件不能太小、太滑、太热和太柔软。零件越容易抓取，装配过程就越顺利，装配效率就越高；否则，零件的抓取如果需要特殊工具的辅助，装配效率就会大大降低。

2. 设计抓取特征

如果零件尺寸不适合零件的抓取，可以在设计的时候增加其他特征，如折边等。如图2-14所示，在原始的设计中，零件太薄，很难抓取和进行装配；在改进的设计中，增加了一个折边用于零件的抓取，零件的抓取和装配变得很容易。

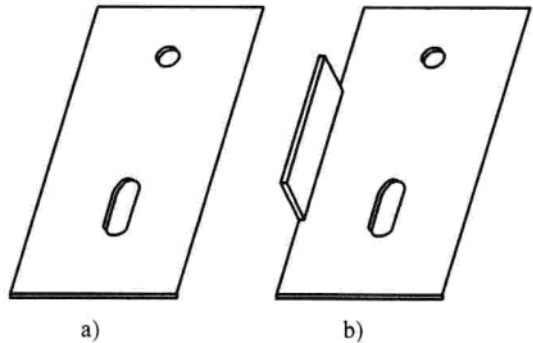


图 2-14 设计零件抓取特征

a) 原始的设计 b) 改进的设计

3. 零件避免锋利的边、角

需要特别注意的是，零件应避免具有锋利的边、角等，否则会对操作人员或消费者造成人身伤害；同时，在装配过程中，锋利的边、角也可能对产品的外观和重要的零部件造成破坏。因此，机械工程师在进行产品设计时，对于零件上锋利的边、角需要进行圆角处理。本书在之后的塑胶件、钣金件和压铸件设计指南中，还会再次提到这一点。例如，对于钣金冲压件，对操作人员或消费者可能会接触的边，要求零件在冲压时增加压毛边的工序，防止锋利边的产生。

2.2.7 避免零件缠绕

1. 避免零件本身互相缠绕

如果零件缠绕在一起，在装配时，操作人员在抓取零件时不得不耗费时间和精力把缠绕的零件分开，而且还可能造成零件的损坏。

如果产品是自动化装配，那么零件互相缠绕在一起会造成零件无法正常进料。

一些零件容易出现缠绕的设计以及相应的改进设计如图 2-15 所示。

2. 避免零件在装配过程中卡住

不合适的零件形状可能造成零件在装配过程中卡住，降低装配效率和产生装配质量问题，如图 2-16 所示。

2.2.8 减少零件装配方向

1. 零件装配方向越少越好

对于产品装配来说，零件装配方向越少越好，最理想的产品装配只有一个装配方向。装配方向过多造成在装配过程中对零件进行移动、旋转和翻转等动作，降低零件装配效率，使得操作人员容易疲惫，同时零件的移动、旋转和翻转等动作容易造成零件与操作台上的

设备碰撞而发生质量问题。只有一个装配方向的零件装配操作简单，对于自动化装配来说，这也是最方便的。

如图 2-17 上部所示，原始的设计中具有两个装配方向，当下面两个零件固定好后，两个零件必须翻转 180°，再固定最上面的零件；改进的设计中只有一个装配方向，零件不需要翻转，就可以把三个零件装配在一起，装配过程简单。

如图 2-17 下部所示，原始的设计中零件的装配方向是从上而下外加一个旋转方向，装配过程复杂，同时可能造成零件之间碰撞而

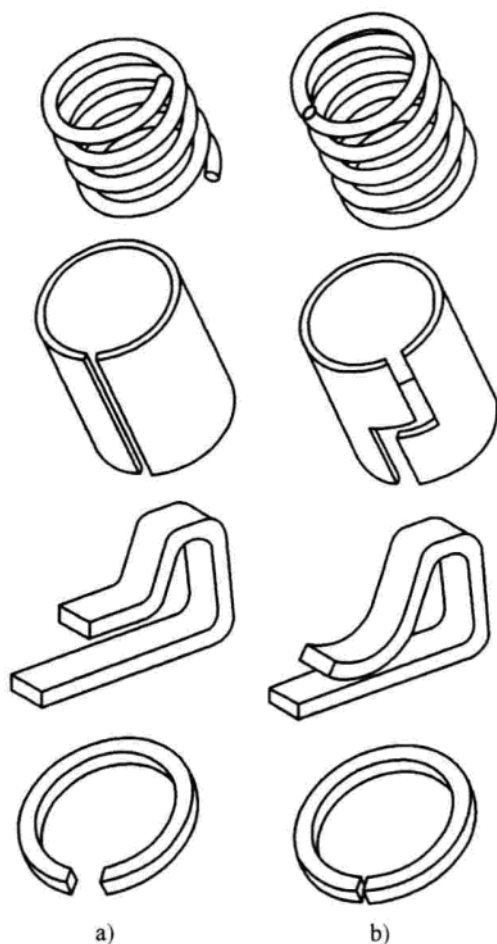


图 2-15 避免零件缠绕的设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

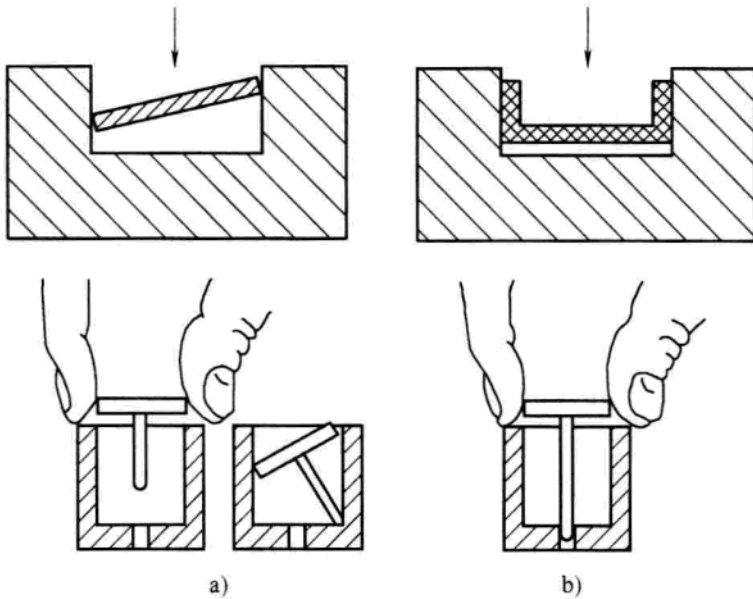


图 2-16 避免不合适的零件形状

a) 原始的设计 b) 改进的设计

发生损坏；改进的设计中零件从上而下进行装配，装配过程简单。

2. 最理想的零件装配方向

最理想的零件装配方向是从上至下。利用零件自身的重力，设计零件的装配方向从上至下，零件就可以轻松地被放置到预定的位置，然后进行下一步的固定工序。相反地，从下至上的装配方向因为需要克服产品的重力，零件在固定之前都必须施加外力使之保持在正确的位置，这种装配方向最费时费力，最容易发生质量问题。

如图 2-17 所示，改进的设计中零件只具有一个从上至下的装配方向，零件装配效率和装配质量均比较高。

2.2.9 设计导向特征

相信读者都见过漏斗。漏斗能够帮助把液体注入到细小的容器中，如图 2-18 所示。如果没有漏斗的帮助，往细小的容器倒入液体时，人们不得不小心翼翼，一不留神就会把液体洒到容器之外。

对液体的倾倒来说，漏斗的作用就是导向，纠正不正确的液体流向，使之流向正确的位置。产品的装配也如同液体的倾倒，如果在零件的装配方向上设计导向特征，零件就能够自动对齐到正确的

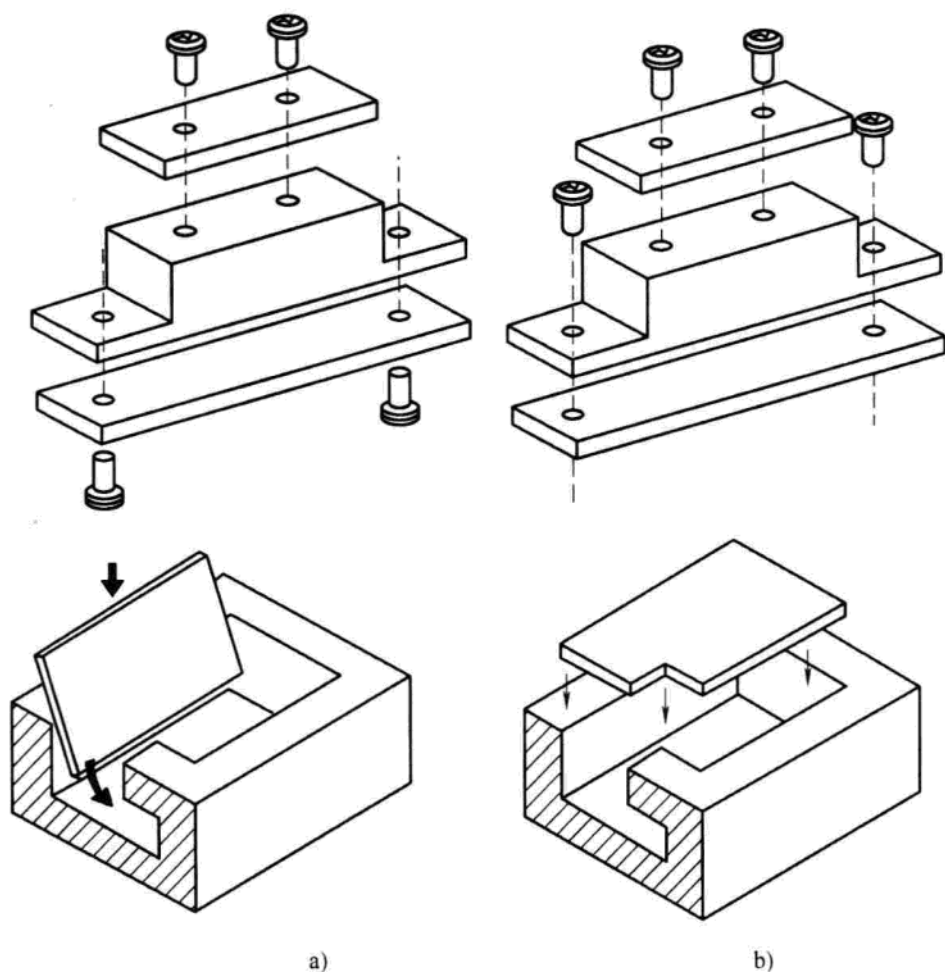


图 2-17 零件的装配方向越少越好

a) 原始的设计 b) 改进的设计

位置，从而可以减少装配过程中零件位置的调整，减小零件互相卡住的可能性，提高装配质量和效率。如果在零件装配方向上没有设置导向特征，那么装配过程也必将磕磕碰碰。

如图 2-19 所示，最差的设计中零件在装配过程中没有导向（见图 2-19a），如果零件稍微没有对齐，则很容易被阻挡无法前进，造成装配过程中止。如果此时遇到不理智的操作人员使用蛮力来强行装配，很容易造成零件损坏。

在较好的设计中，在基座零件上或者插入的零件上增加斜角导向特征能够使得装配过程顺利进行（见图 2-19b）。

当然，最好的设计是在基准零件上和插入的零件上均增加斜角

导向特征，这样的装配过程最为顺利，同时对零件相应的尺寸也可以允许宽松的公差（见图 2-19c）。

常用的导向特征包括斜角、圆角、导向柱和导向槽等。斜角的例子如图 2-19b、c 所示。

连接器是电子电器产品中常用的一个零件。连接器成本高，但很脆弱，在产品装配过程中如果没有正确对齐就容易造成损坏而报废，因此连接器的导向特征



图 2-18 漏斗

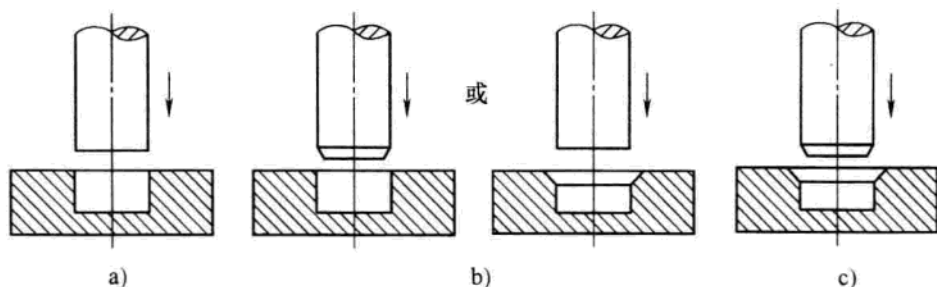


图 2-19 设计导向特征

a) 最差的设计 b) 较好的设计 c) 最好的设计

设计至关重要。图 2-20 所示的连接器具有两个导向特征，一是导向柱，二是上下两侧的斜角。连接器的导向特征设计能够使连接器之间实现快速装配，避免装配损坏，确保装配质量和电子信号的顺利传输。

需要注意的是导向柱的长度不能太短，需要保证导向柱是两个零件最先接触点，导向柱才具有导向效果。

2.2.10 先定位后固定

零件的装配如果先定位后固定，在固定之前零件自动对齐到正确位置，能够减少装配过程的调整，大幅提高装配效率。特别是对那些需要通过辅助工具（如电动螺丝刀、拉钉枪等）来固定的零件，

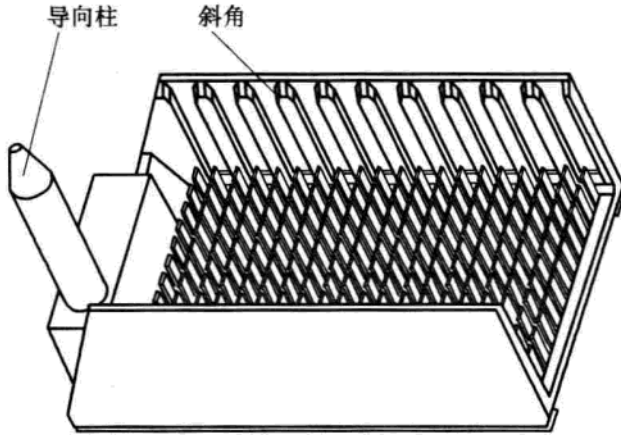


图 2-20 连接器的导向特征

在固定之前零件先定位，能够减少操作人员手工对齐零件的调整，方便零件的固定，提高装配效率。

如图 2-21 所示，在原始的设计中，零件不能自动定位，因此在螺钉固定的过程中零件不得不反复调整对齐到正确位置；在改进的设计中，基座零件上的凹槽限制了零件的移动，使得零件能够自动定位对齐到正确位置，避免了在螺钉固定时手动调整的多余动作。

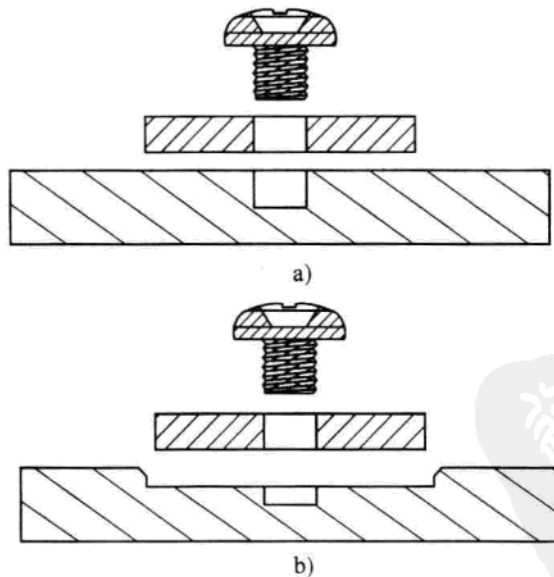


图 2-21 零件先定位后固定

a) 原始的设计 b) 改进的设计

在电子电器产品中，PCB（印制电路板）是必不可少的一个组

件，包含了整个产品中最核心的部件，因此 PCB 的装配非常重要。一般来说，由于 PCB 自身强度比较低，往往需要用多个螺钉来固定，因此 PCB 自动定位后再进行固定，对于提高装配效率非常有帮助。常用的方法有两种：

1. 四周增加限位

在塑胶底座的四周增加限位，在固定之前使得 PCB 自动对齐到正确位置，如图 2-22 所示。需要注意的是 PCB 与塑胶四周的限位间隙不可太小，否则容易造成 PCB 过约束，这会在本章稍后的章节讲到；同时限位间隙不可太大，否则没有定位的效果。

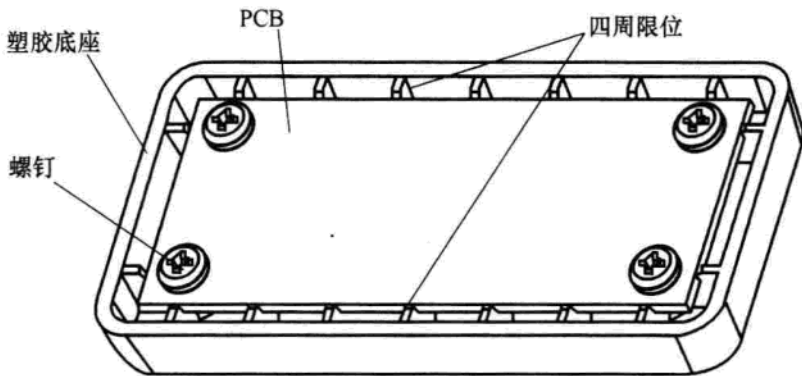


图 2-22 四周限位

2. 使用定位柱

使用定位柱（如果导向柱的精度较高，导向柱也可以被当成定位柱使用），在螺钉固定之前使 PCB 自动对齐到正确位置，如图 2-23 所示。对于钣金来说，在钣金上铆接定位螺柱可以起相同的作用。

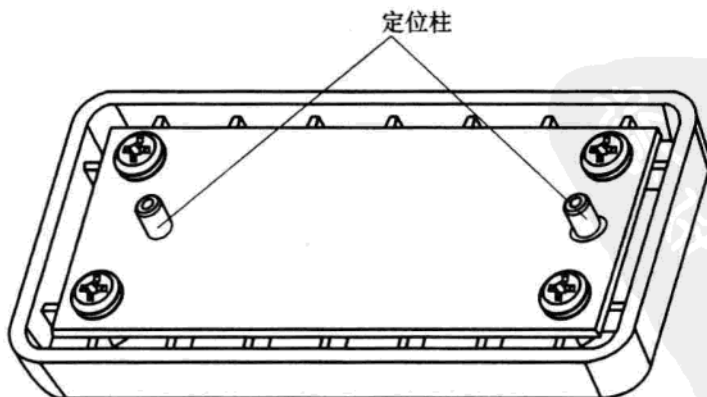


图 2-23 使用定位柱

推荐这种方法，因为定位柱或者定位螺柱的尺寸公差比较容易控制，这种固定方法可以使得 PCB 的装配位置精度比较高。

2.2.11 避免装配干涉

1. 避免零件装配过程发生干涉

避免零件在装配过程中发生干涉是产品设计最基本、最简单的常识，但这是机械工程师最容易犯的错误之一。

零件的装配过程应该很顺利，装配过程不应该出现阻挡和干涉的情况。在三维软件（如 Pro/Engineer）中进行三维建模时，产品是静态的，机械工程师常常忽略了产品的具体装配过程以及零件是如何装配到正确位置的，于是在零件制造出来后，零件品质很好，但很难装配在一起，此时只好借助于锉刀等工具。

避免这样的错误很简单，机械工程师在三维软件中进行简单的产品装配过程动态模拟就可以发现零件是否发生了装配干涉。事实上，对于整个产品的装配过程，都需要进行这样的动态模拟，确保零件装配顺利。这是面向装配的产品设计中最基本的要求。

2. 避免零件运动过程发生干涉

很多产品包含运动零件，运动零件在运动过程中要避免发生干涉，否则会阻碍产品实现相应的功能，造成产品故障甚至损坏。例如，计算机的光驱支架，在光盘的放入和退出过程中，光驱支架是运动的，光驱支架在其运动行程中不能与其他零件发生干涉。

对此，机械工程师也可以通过运动过程模拟确保运动零件在运动过程中畅通无阻，避免发生运动干涉。

2.2.12 为辅助工具提供空间

零件在装配过程中，经常需要辅助工具来完成装配。例如，两个零件之间通过螺钉固定，零件的装配需要电动螺丝刀的辅助；两个零件通过拉钉来固定，那就需要拉钉枪来辅助。在产品设计中需要为辅助工具提供足够的空间，使得辅助工具能够顺利完成装配工序。如果产品设计提供的空间不够大，阻碍辅助工具的正常使用的，势必会影响装配的质量，严重时甚至使得装配工序无法完成。由于

目前的多数产品都倾向于在更小的尺寸空间内集成更多的功能，这就对产品的设计提出了挑战，因此在产品装配中经常会出现辅助工具无法正常使用的情况。至于具体的空间多大才合适，这就需要了解辅助工具的尺寸及其工作原理，也可以向制造工程师寻求帮助。

如图 2-24 所示，原始的设计中，螺钉旋具没有足够的操作空间，在使用过程中会和零件发生干涉，螺钉无法拧入，零件不能固定；改进的设计中，螺钉旋具有足够的操作空间，零件能够顺利固定。

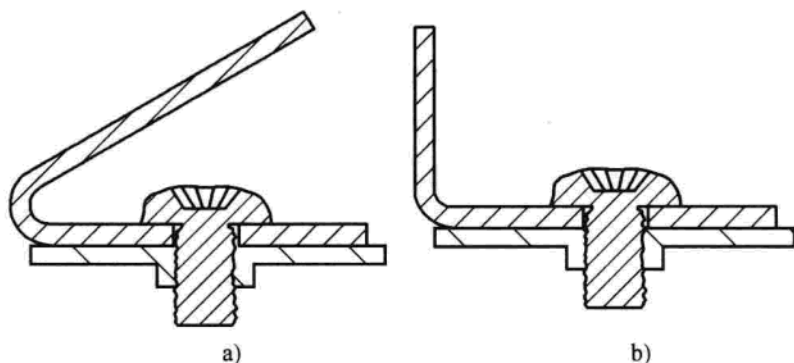


图 2-24 为辅助工具提供空间

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2.2.13 为重要零部件设计装配止位特征

产品中一般都包括很重要但又比较脆弱的零部件，如计算机中的硬盘、电源以及印制电路板等。这些零部件极容易损坏，产品设计需要确保这些重要零部件在装配和使用过程中不被损坏。最容易发生的失效方式是这些重要零部件装配到正确位置后，由于操作人员或者消费者用力不当，使得零部件继续前进，碰到其他零件而损坏，因此，有必要在产品中设计止位特征，阻止重要零部件装配到正确位置后继续前进。

在另外一种情况下，产品设计也需要阻止零件装配到正确位置后继续前进，防止损坏已经装配好的其他重要零部件。

某产品电源的仰视图如图 2-25 所示，前端是电源连接器，电源的装配方向如图中箭头所示。在电源前端有一 U 形止位槽，同机箱中的螺柱相配合，可以阻止电源装配到正确位置后继续前进，避免

损坏电源连接器或者与电源配合的印制电路板及其上面的重要零件。

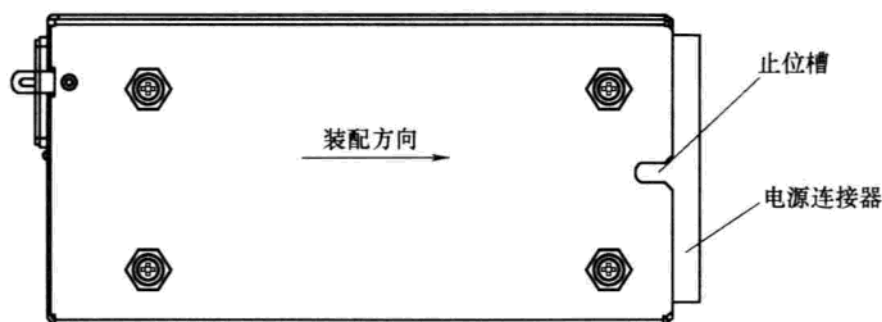


图 2-25 某产品电源止位槽

2.2.14 防止零件欠约束和过约束

空间上任何一自由物体共有 6 个自由度，分别是 3 个沿着 x 、 y 、 z 坐标轴移动的自由度和绕着 3 个坐标轴转动的自由度，如图 2-26 所示。

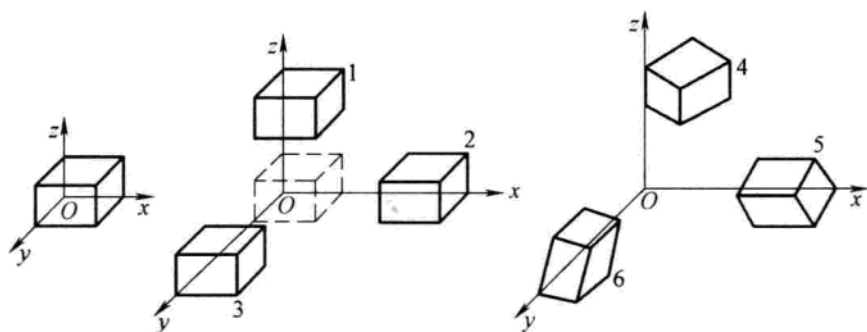


图 2-26 零件的 6 个自由度

1) 完全约束：如果零件在 6 个自由度上均存在约束，称之为完全约束。

2) 欠约束：如果零件在 1 个或 1 个以上的自由度上不存在约束，称之为欠约束。

3) 过约束：如果零件在 1 个自由度上有 2 个或者 2 个以上的约束，称之为过约束。

产品设计需要避免零件欠约束和过约束。只有当零件完全约束时，零件才能在产品中正确地装配以及行使应有的功能。

1. 避免零件欠约束

如果零件欠约束，那么在零件装配好后，零件会在欠约束的自由度方向上出现不该有的运动，妨碍零件功能的实现。

值得注意的是，如果零件尺寸比较大，那么零件的约束需要尽量覆盖零件的整个范围，而不仅仅是在某一个角落对零件进行约束。

2. 避免零件过约束

零件都通过了检查，尺寸都在公差范围之内，为什么还是装配不上？

——迷茫的工程师

如果零件发生过约束，则要么很难进行装配，要么产生装配质量问题，或者装配好之后零件之间存在应力。

如图 2-27 所示，在原始的设计中，零件 A 与零件 B 在 x 方向上有两个约束，因此零件在 x 方向上过约束。由于零件制造公差的存在，此时很容易发生第一个柱子插入到第一个孔后，第二个柱子很难插入到第二个孔中，而且由于无法判定哪一个柱子与孔决定了零件 A 的位置，很难通过尺寸管控来提高产品装配质量。在改进的设计中，零件 A 的第二个孔为长圆孔，避免了在 x 方向上过约束，零件 A 能够轻松地插入到零件 B 中；同时，零件 B 的第一个柱子和零件 A 的第一个孔决定了零件 A 的位置，通过管控相应的尺寸就能够轻松管控零件 A 的位置。

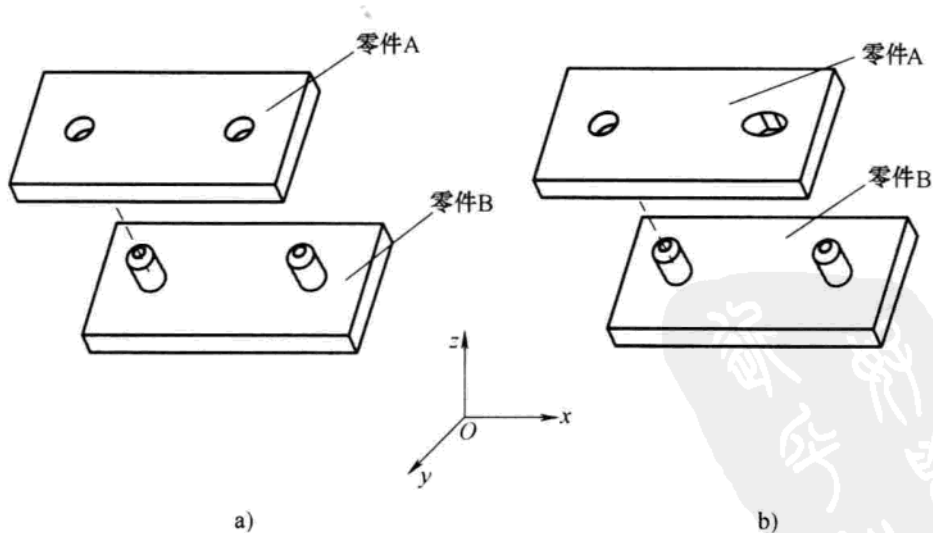


图 2-27 避免零件过约束

a) 原始的设计 b) 改进的设计

其他常见的零件过约束设计及其改进的设计如图 2-28 所示。

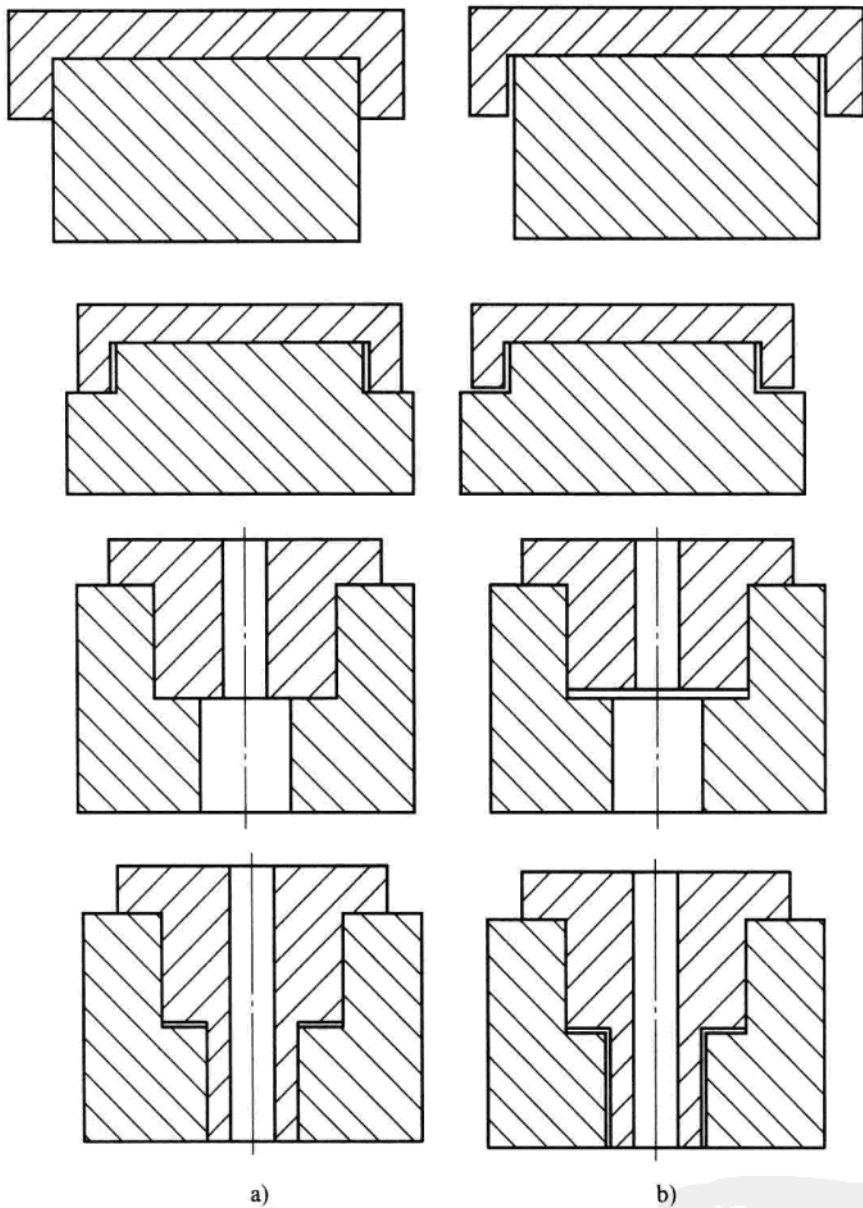


图 2-28 常见零件过约束及改进的设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

当零件之间通过多个螺钉固定时，机械工程师常发现最后几个螺钉与螺钉孔总是没有对齐，很难把螺钉固定上。在这种情况下，可以把一个螺钉孔设计为小孔（即孔的直径比螺钉直径稍大），另外一个孔设计为长圆孔（即孔的直径与小孔直径一样大，长度稍大。需要注意的是长圆孔的长度方向平行于小孔与长圆孔之间的直线），

其余的均是大孔（即孔的直径比螺钉直径大得多），如图 2-29 所示。其中小孔与长圆孔起着定位的作用，而大孔的设计则避免了零件过约束。这既保证了零件的装配位置精度，又保证了零件的顺利装配。不过这样的设计需要在零件装配时指明固定螺钉的顺序，小孔先固定，然后是长圆孔，最后是大孔。

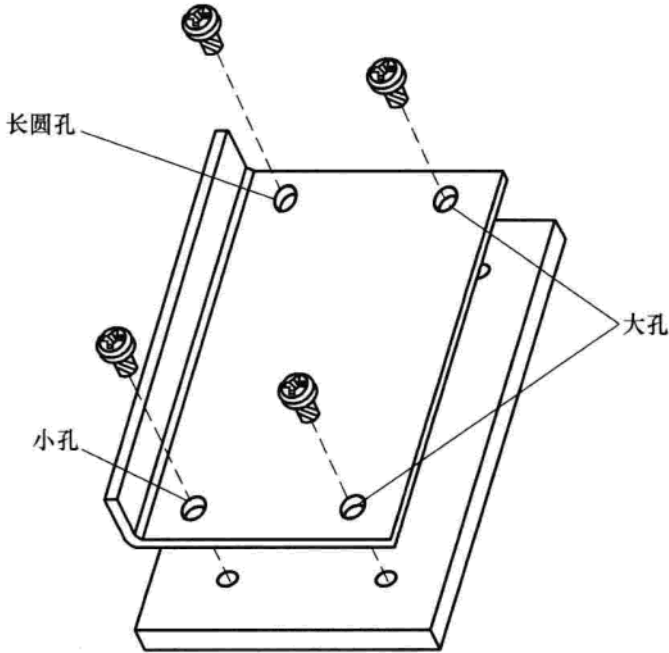


图 2-29 多个螺钉固定时螺钉孔的设计

2.2.15 宽松的零件公差要求

人们常常误以为严格要求零件公差就可以提高产品质量，而为了提高产品质量，唯一的途径是通过对零件的公差作出严格的要求。事实上，严格的零件公差只能表示单个的零件生产质量高，并不一定表示产品质量高。产品质量只能通过产品装配才能体现出来。零件公差越严格，零件制造成本就越高，产品的成本就越高。严格的零件公差要求意味着：

- 1) 更高的模具费用；
- 2) 更精密的设备和仪器；
- 3) 额外的加工程序；

- 4) 更长的生产周期；
- 5) 更高的不良率和返工率；
- 6) 要求更熟练的操作员和对操作员更多的培训；
- 7) 更高的原材料质量要求及其产生的费用。

在传统机加工过程中，零件的公差与成本的关系如图 2-30 所示。可以看出，零件的公差要求越高，零件的成本就越高。

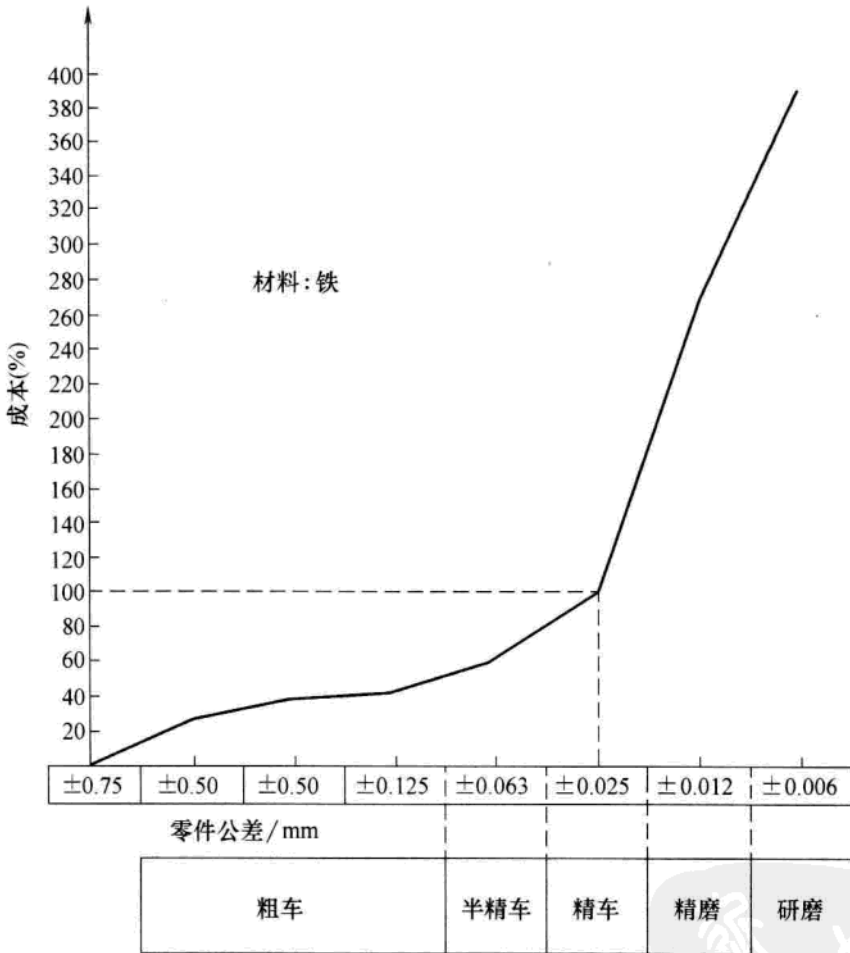


图 2-30 公差与成本的关系

注：该图取自参考文献 [7]。

因此，在满足产品功能和质量的前提下，面向装配的产品设计应当允许宽松的零件公差要求，从而降低产品的制造成本。

那么，如何进行产品设计使得产品装配能够允许宽松的公差要

求呢？

1. 设计合理的间隙

设计合理的间隙，防止零件过约束，避免对零件尺寸的不必要的公差要求。不合理的零件间隙设计会造成对零件不合理的公差要求。在产品的装配关系中，有些情况下零件之间平面与平面是紧贴在一起的，此时平面与平面之间不应该有间隙；而在另外的一些情况下，平面与平面之间需要设计一定的间隙，防止装配干涉或者产品装配尺寸超出规格。如果间隙设计得过小或者没有间隙，为了满足避免零件的干涉和保证装配尺寸，就必须对相关的零件尺寸提出严格的公差要求，请参考 2.2.14 中关于过约束的讨论。至于多大的间隙是合理的，可以通过第 6 章的公差分析计算出来。一般来说，在不影响产品功能和质量的前提下，间隙应尽可能大。

一个合理间隙设计的例子如图 2-31 所示。当通过螺钉固定几个零件时，中间零件的螺钉孔稍微扩大，保证该零件与螺钉之间有一定的间隙，从而可以避免对该零件螺钉孔不必要的公差要求。

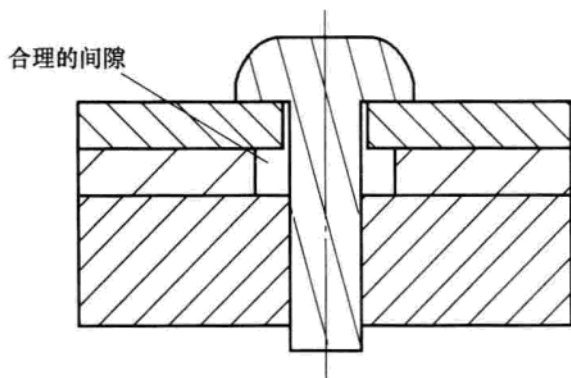


图 2-31 合理的间隙设计

2. 简化产品装配关系

简化产品装配关系，减少尺寸链的数目从而减小累积公差。在同一个尺寸链中，尺寸数目越多，最终所带来的产品的累积公差就越大。如果因为产品质量和功能的要求，产品的累积公差不能大于一定数值，那么就不得不对尺寸链中的尺寸进行比较严格的公差要求。因此，对于那些重要的装配尺寸，在产品最初设计阶段就要重点加以关注，简化产品的装配关系，避免重要装配尺寸涉及更多的零件，从而减少尺寸链中尺寸的数目，达到减小累积公差的目的，能够允许零件宽松的公差要求。

3. 使用定位特征

在零件的装配关系中增加可以定位的特征，如图 2-23 所示的定位柱等。定位特征能够使得零件准确地装配在产品之中，产品设计只需要对定位特征相关的尺寸公差进行制程管控，对其他不重要的尺寸就可以允许宽松的公差要求。

4. 使用点或线与平面配合

当两个零件之间通过平面与平面配合并具有相对运动关系时（可以是装配过程中的相对运动，也可以是使用过程中的相对运动），可以使用点或线与平面配合的方式代替平面与平面的配合方式，避免平面的变形或者平面较高的表面粗糙度阻碍零件的顺利运动，从而可以不对零件的平面度和表面粗糙度提出严格的公差要求，继而允许宽松的公差。

2.2.16 防错的设计

可能出错的事情，就会出错（If anything can go wrong, it will）。

——墨菲定律

(1) 墨菲定律

爱德华·墨菲是一名工程师，他曾参加美国空军于 1949 年进行的 MX981 实验。这个实验的目的是为了测定人类对加速度的承受极限。其中一个实验项目是将 16 个火箭加速度计悬空装置在受试者上方，当时有两种方法将加速度计固定在支架上，而不可思议的是，竟然有人有条不紊地将 16 个加速度计全部装在错误的位置。于是墨菲作出了著名的论断：“如果有两种选择，其中一种将导致灾难，则必定有人会作出这种选择”。此论断后来演变为“可能出错的事情，就会出错（If anything can go wrong, it will）”。

墨菲定律在生活中还有其他的延伸，以下仅供娱乐：

- 1) 你携伴出游，越不想让人看见，越会遇见熟人。
- 2) 你有两把相似的钥匙，你总会用错误的一把钥匙去开门。
- 3) 你若帮助了一个急需用钱的朋友，那他一定会记得你——在下次他急需用钱的时候。
- 4) 你早到了，会议却取消。你准时到，却还要等。迟到了，那就是真的迟到了。

5) 另一排总是动得比较快。你换到另一排, 你原来站的那一排, 就开始动得比较快了。你站得越久, 越可能是站错了排。

6) 你买入一只股票, 股票就一直下跌。你把股票抛了, 股票却扶摇直上。

(2) 防错法

防错 (mistake-proof, error-proof) 法是指通过产品设计和制造过程的管控来防止错误的产生。日本丰田公司第一次提出了防错的概念。我国台湾称之为防呆法, 顾名思义, 就是一个呆子来装配也不会产生错误。

防错法能够达到以下目的:

- 1) 减少错误、提高产品利润率。
- 2) 减少时间浪费、提高生产率。
- 3) 提高产品使用人性化程度、消费者满意度和产品信誉。
- 4) 提高产品质量和可靠性。

在进行产品装配时, 如果零件存在着一个以上的装配位置 (即零件在多个位置都可以装配), 但是只有一个正确位置, 传统的方法是通过装配过程的管控和对操作人员的培训来指导操作人员把零件装配到正确位置。但是, 残酷的事实告诉人们, 在某一天, 零件终将会被装配在错误的位置, 这可能仅仅是因为操作人员的一次心不在焉。试想, 一个操作人员每天进行同样的装配工作上百次、上千次甚至上万次, 如果产品设计不能提前预防装配错误的发生, 那么就算是万分之一的概率, 操作人员稍微不留神, 错误就发生了。因此, 产品设计必须进行防错的设计, 提前预防装配过程中可能发生的错误。

(3) 生活中防错设计的典型例子

USB 接口是计算机中最常用的一种接口方式, 广泛应用于数码相机、数码摄像机、移动硬盘、U 盘、鼠标和键盘等与计算机的连接。USB 的接口设计是一种典型的防错设计。只有当 USB 插头插入方向正确时, USB 插头才能够插入到计算机的 USB 接口中; 当 USB 插头插入方向不对时, USB 接口中孔槽的不对称设计会阻止 USB 设备的进一步插入。USB 接口和 USB 插头的设计如图 2-32 所示。



图 2-32 USB 接口及 USB 插头

那么，USB 的接口设计是一个理想的防错设计吗？平均下来，笔者每天会使用 USB 接口两到三次，但并不是每次的使用心情都是愉快的。根据 USB 接口中孔槽的不对称防错设计，在 USB 插头接触到 USB 接口之前，USB 插头有两种插入方向：一种是正确的方向，USB 插头和 USB 接口中的不对称孔槽刚好对应，USB 插头能够顺利插入到 USB 接口中；另外一种是错误的方向，USB 插头和 USB 接口中的不对称孔槽不对应，USB 接口阻止了 USB 的插入，此时必须调整 USB 插头的插入方向。理论上来说，每次插入 USB 设备都有 50% 的可能性插入方向不对，而每次当作者感觉到插入方向不对时，不得不放下手中的工作，把全部注意力放在 USB 上，仔细看清楚 USB 插头孔槽的位置和 USB 接口中孔槽的位置，再对齐，USB 设备才能插入成功。相信很多读者都有这样的体会，期望着 USB 接口的设计也像计算机的耳机接口一样，我们闭着眼睛、漫不经心地就可以把 USB 设备插入到计算机中，这才是人性化的设计。

因此，USB 的接口设计是一个好的防错设计，但不是最理想的防错设计，因为它不人性化。换句话说，最理想的防错设计不但能够防止错误的发生，还能够防止你产生错误的念头。

在面向装配的产品设计中，防错的设计不仅仅是满足产品制造过程中防错的要求，还需要满足消费者使用产品过程中的防错要求。

消费者使用产品的过程也是产品装配过程的一部分，更为重要的是，消费者对于防错的要求更高，不但要做到防错，还需要做到使用人性化，因为不可能去教育消费者“你应该这样做”、“你应该那样做”。作为很多产品（比如计算机、电视机、空调等）的消费者，他们根本不会花时间去阅读产品使用手册。

防错的设计可以分为设计阶段的防错和装配阶段的防错。传统的防错设计关注产品的装配阶段，为此，企业不得不花费大量的人力和物力来培训操作人员和花费大量的金钱来购买自动化设备。面向装配的产品设计优先考虑产品设计阶段的防错，只有当设计阶段的防错很难实现或者代价太高的时候，才考虑装配阶段的防错。

1. 零件仅具有唯一正确的装配位置

任何一个零件在产品装配中只能具有唯一正确的装配位置，只有当零件装配位置正确的时候，零件才能被固定。如果零件有多个装配位置，产品或零件上应当具有特征来阻止零件被装配到错误的位置。上文说到的 USB 接口就是一个例子，USB 接口有且只有一个正确的装配位置，当 USB 插头插入方向不对时，USB 接口上的不对称孔槽就会阻止 USB 设备的继续插入。

在三维软件中，把零件绕着零件中心轴旋转 90° 、 180° ，进行简单的装配过程模拟就能够判断零件是否具有唯一正确的装配位置。

在产品设计中，最容易发生装配错误的情况是零件由两个点固定。如图 2-33 所示，零件 A 通过两个螺钉固定在零件 B 上。在原始的设计中，在进行实际的装配时，零件 A 有如图 2-34 所示的四种可能的装配位置，显然这很容易引起装配错误；在改进的设计中，零件 A 增加了两个凸台，零件 B 增加一个凸台，使得零件 A 不可能装配到图 2-34b、c、d 所示的错误位置，零件 A 仅具有唯一正确的装配位置。

非对称的孔、槽和凸台等是常用的防错设计特征，如图 2-32 所示的 USB 接口设计、图 2-33 所示的凸台防错设计以及图 2-35 所示的 PS/2 接口防错设计。

2. 零件的防错设计特征越明显越好

在允许的情况下，零件的防错特征设计得越明显越好。非对称

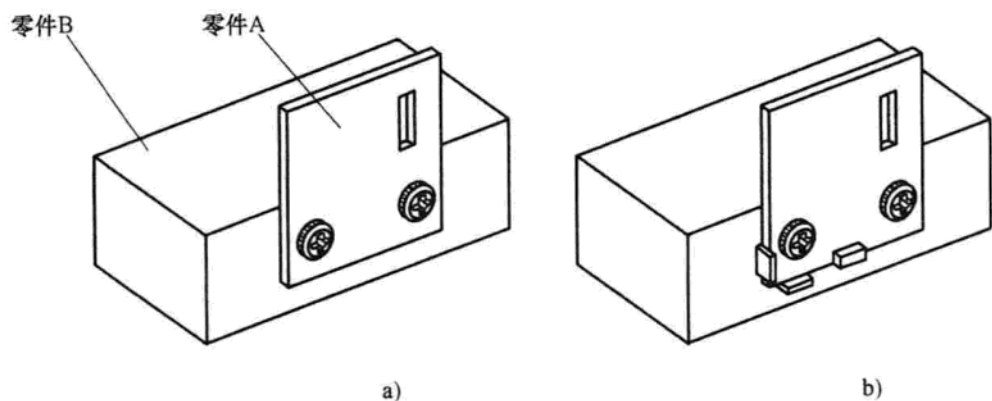


图 2-33 零件两点固定时的防错设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

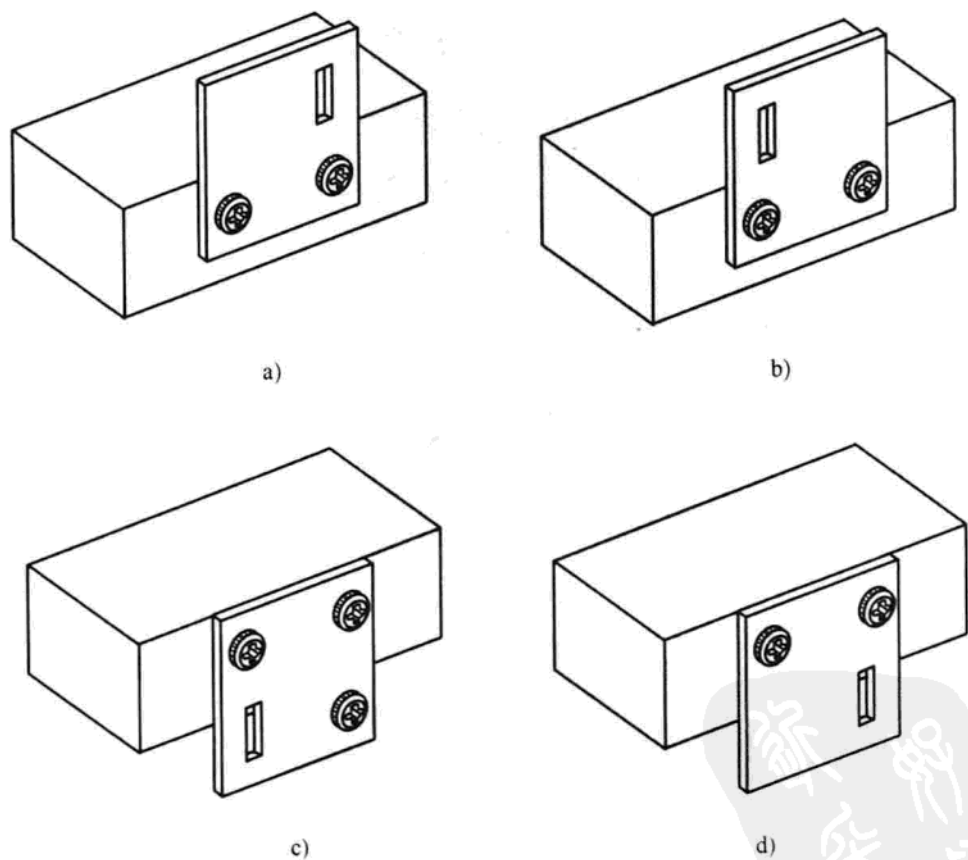


图 2-34 四种可能的装配位置

的孔、槽和凸台越不对称越好。PS/2 接口的防错设计不是一个很好的防错设计，正是因为其防错特征不够明显。

在 USB 接口出现之前，PS/2 接口是键盘和鼠标的通用接口。如

图 2-35 所示，PS/2 接口和 PS/2 插头的防错设计具有两个防错特征：其一是 PS/2 接口中长方形的孔与 PS/2 插头中间的长方形柱子；其二是 PS/2 接口四周不对称的三个孔与 PS/2 插头四周的三个金属突起。只有当以上两个防错特征一一对齐时 PS/2 插头才能正确插入。但是，两个防错特征尺寸都比较小，在实际操作过程中要对齐非常困难，必须把 PS/2 插头和接口完全对齐，才能保证正确插入，稍有偏差都不能成功。PS/2 接口的这种使用感受只有用“痛苦”来形容，使用过 PS/2 接口的键盘和鼠标的读者对此一定深有体会。因此，PS/2 的防错设计不是一个理想的防错设计。

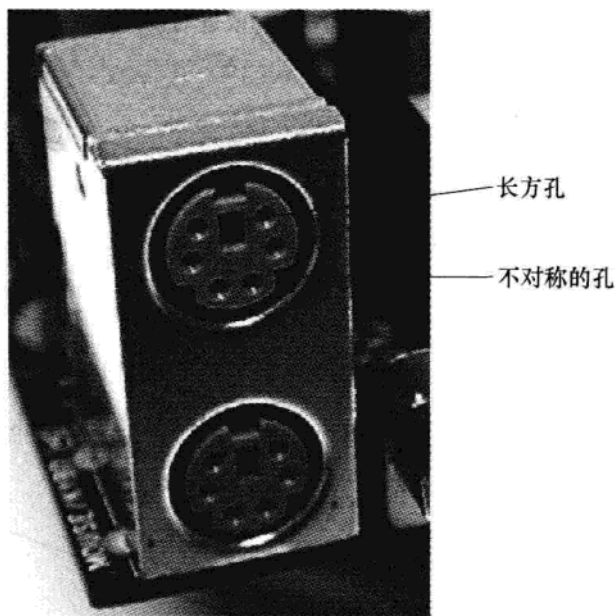


图 2-35 PS/2 接口及 PS/2 插头

3. 夸大零件的不相似处

一天，妈妈给一对双胞胎兄弟喂牛奶，当妈妈把两个孩子都喂

完后，老大哭了：“妈妈，你偏心，给弟弟喂了两次都不给我喂。”

针对相似的零件，在进行防错设计时，尽量把它们合并成一个零件，如果不行，则夸大零件的不相似处。

如果在产品装配的生产线上，有两个相似的零件需要装配在不同的位置实现不同的功能，它们的唯一判别方式是零件料号，那么这就存在着两个零件互相装错位置的风险。如果操作人员不仔细查看零件的料号，很容易会误把一个零件当成另外一个零件，产生装配错误，带来返工，造成时间和成本的浪费。如果当零件的固定不可拆卸时，如焊接、铆合、热熔等，这会造成整个产品的报废，带来更大的成本损失。

在 2.2.1 中讨论了如何把相似的零件合并成一个零件。对于相似的零件，最理想的防错设计是把它们合并成一个零件，如果不能，则需要把零件的不相似处设计得很明显，尽量使得两个零件看上去完全不一样，这样就可以避免在装配过程中，零件被错误地装配到其他位置。如图 2-36 所示，如果 2.2.1 中的两个零件不能合并成一个零件，那么就需要把这两个零件设计得明显不同，使得操作人员能够很清楚地认识到两个零件的区别，从而避免产生装配错误。

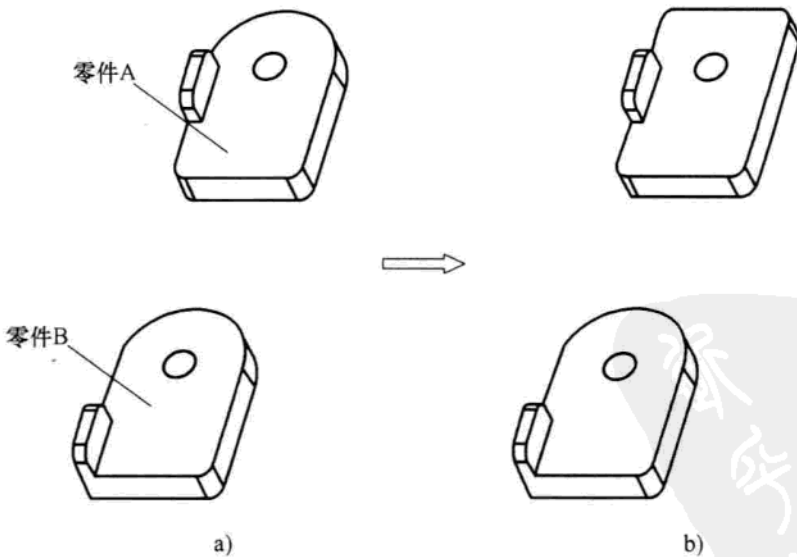


图 2-36 夸大零件的不相似处

a) 原始的设计 b) 改进的设计

4. 夸大零件的不对称性

对于单个零件的防错设计，应尽量使得零件从各个角度都对称，如果不能，应夸大零件的不对称性。

最好的零件是各个角度都对称的零件，不论怎样装配，零件都不会发生装配错误。如图 2-37 所示，人们日常生活中使用的音频接口和音频插头在轴线上是 360° 对称，因此把音频插头插入到音频接口中，无论插头怎么旋转，都不会插错。

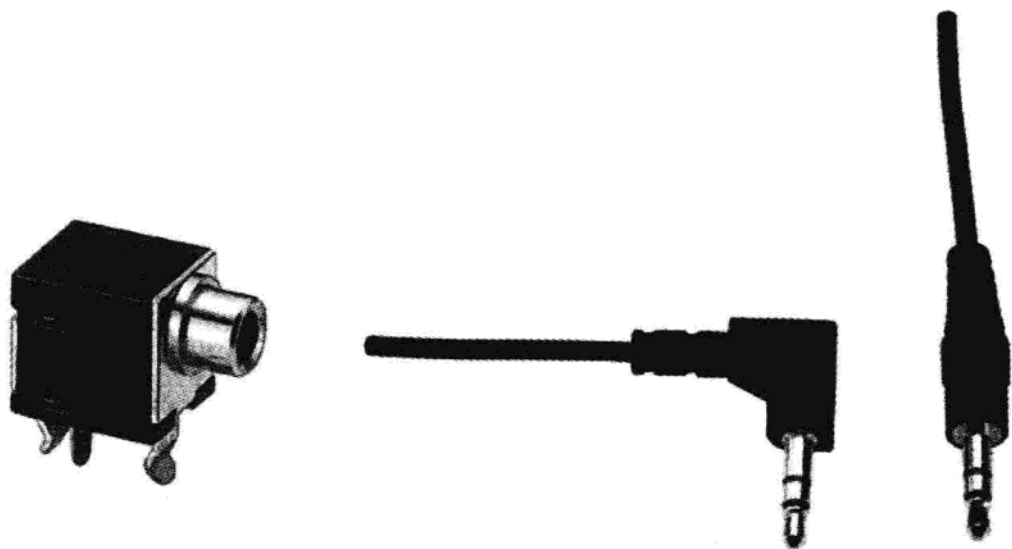


图 2-37 音频接口及音频插头

最好的产品防错设计是根本不需要防错，这是防错设计的最高境界。完全对称的零件符合这样的要求，产品设计时根本不需要担心防错问题。

如果零件因为设计限制无法做到对称，则需要夸大零件的不对称性。零件的不对称性越明显越好。

如图 2-38 所示，在原始的设计中，零件左右两侧凸台的高度一侧为 4mm，一侧为 5mm，相差 1mm，但这是零件的功能要求，无法更改，零件相对于两孔中心连线的对称性无法获得；在改进的设计中，增加左侧凸台的长度，夸大零件的不对称性，零件的不对称性非常明显，从而避免装配错误的产生。

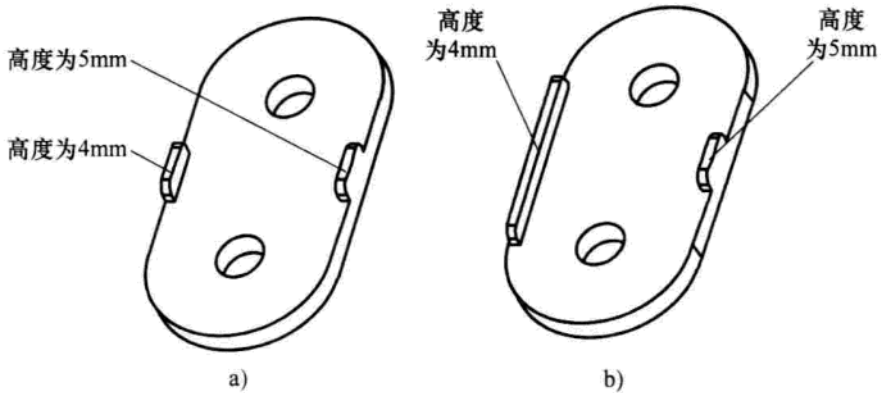


图 2-38 夸大零件的不对称性

a) 原始的设计 b) 改进的设计

5. 设计明显的防错标识

如果零件防错特征很难设计，至少需要在零件上做出明显的防错标识，指导操作人员的装配，或者告诉消费者如何使用。这些标识包括符号、文字和鲜艳的颜色等。

图 2-39 所示是一个左右对称的零件，因为设计的限制，零件无法添加不对称的孔、槽以及凸台等防错特征，那么机械工程师至少需要在零件上添加明显的标识（例如符号或文字）来指导操作人员的装配或者消费者的使用。

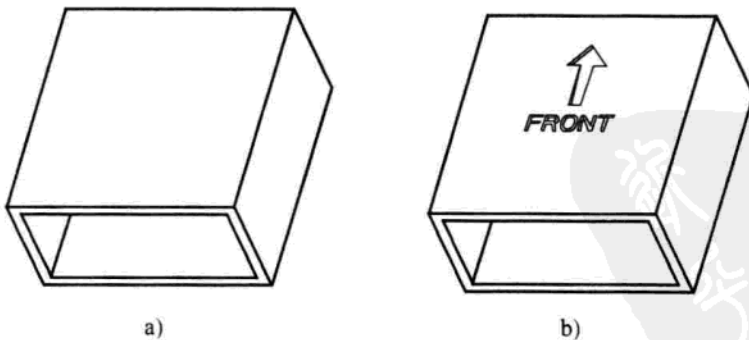


图 2-39 符号和文字防错

a) 原始的设计 b) 改进的设计

PS/2 的接口防错设计也是一个典型的颜色防错的实例。鼠标的 PS/2 接口和插头是绿色，键盘 PS/2 接口和插头是紫色，使用同一种颜色来告诉消费者哪一个接口该插鼠标、哪一个该插键盘，防止消费者把鼠标插头插到键盘接口上或把键盘插头插到鼠标接口上。同时，在鼠标和键盘插头上分别有鼠标和键盘的符号，在计算机上相应的接口处也有鼠标和键盘的符号，这也是防错的特征。当然，这些符号太小，不容易引起消费者的注意。

需要注意的是，这一类的防错特征不是理想的防错设计方法，必须获得操作人员或消费者的注意才能够保证防错设计的成功。这不是防错设计的最佳方法。

6. 最后的选择：通过制程来防错

当通过产品设计进行防错造成产品成本高昂，甚至无法通过设计进行防错时，可以通过产品的制程管控来防错。当然，通过制程管控来防错是防错设计最后的选择。此时，机械工程师应当把防错的要求准确、清晰地告诉装配工程师。

2.2.17 装配中的人机工程学

人机工程学是从人的能力、极限和其他生理及心理特性出发，研究人、机、环境的相互关系和相互作用的规律，以优化人、机、环境以及提高整个系统效率的一门科学。

在产品设计中，机械工程师必须考虑人的生理和心理特性，使得操作人员更容易、更方便、更有效率地进行操作，提高装配的效率，同时提高装配过程中的安全性、降低操作人员的疲劳度和压力、增加操作人员的舒适度。

对于面向装配的人机工程学，产品设计时必须考虑到以下各个方面：

1. 避免视线受阻的装配

在产品的每一个装配工序中，操作人员应当可以通过视觉对整个装配工序过程进行掌控，需要避免操作人员视线被阻挡的情况，或者操作人员不得不弯下腰、偏着头或者仰着脖子等非正常方式才能看清楚零件的装配过程，甚至通过触觉来感受装配过程、通过反

复的移动调整才能对齐到正确的位置，这样的装配效率非常低，而且容易出现装配质量问题。

如图 2-40 所示，原始的设计中视线被阻挡，很难进行固定螺钉的装配；改进的设计中操作人员能够对整个操作过程进行掌控，螺钉的装配非常顺利。当然，原始的设计还有一个装配问题，就是上节所述的“为辅助工具提供空间”。

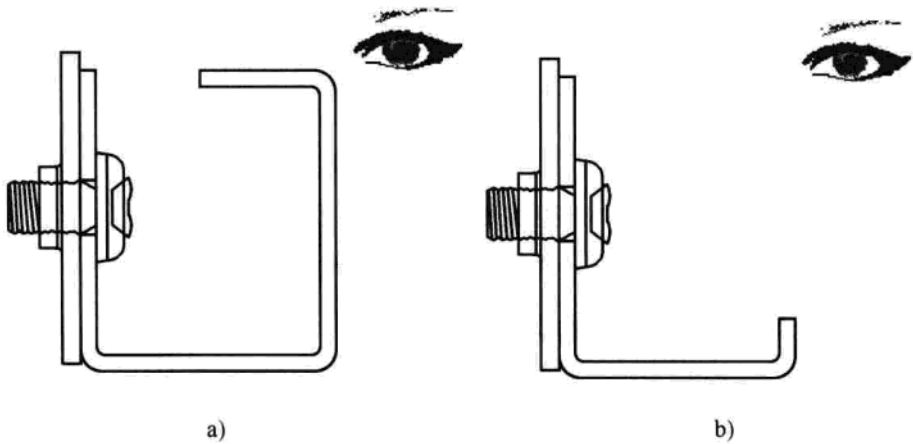


图 2-40 避免视线受阻的装配（一）

a) 原始的设计 b) 改进的设计

如之前所述，为了帮助零件能够自动对齐到正确位置，在零件上增加导向特征。导向特征必须设置在操作人员容易看见的位置。如图 2-41 所示，零件 A 具有两个导向柱，零件 B 具有两个相应的导向孔。在原始的设计中，零件 A 放在零件 B 上面进行装配，再把导向柱和导向孔对齐时，操作人员的视线很容易被零件 A 本身所阻碍；在改进的设计中，零件 A 放在零件 B 的下面，操作人员对零件的对齐过程一目了然，两个零件很容易装配。

一般来说，较小的零件放在较大的零件上进行装配。如果把较大的零件放在较小的零件之上进行装配，较小零件的视线就完全被较大零件阻挡，操作人员不得不通过多次的调整才能对齐，装配效率很低。

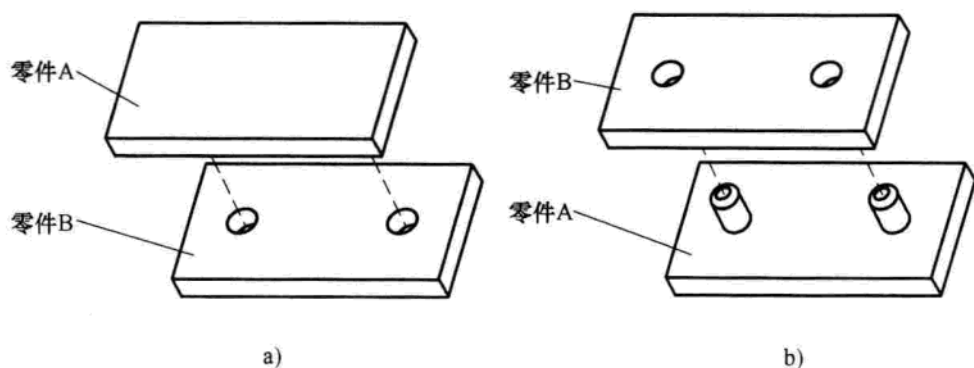


图 2-41 避免视线受阻的装配 (二)

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 避免装配操作受阻的装配

在进行装配操作时, 操作人员会有诸如抓取零件、移动零件、放置零件、固定零件等动作。产品设计应当为这些动作提供足够的操作空间, 避免受到阻碍, 从而造成装配错误甚至造成装配无法进行。

例如, 为了产品拆卸和装配的方便, 手拧螺钉应用于经常需要拆卸的产品中, 但是手拧螺钉的周围需要保证足够的空间, 否则操作人员 (或者消费者) 在拆装产品时, 手很容易被周围的零件阻碍, 造成手拧螺钉无法正常拧紧或拧松, 同时可能使操作人员的手受到伤害。一般来说, 手拧螺钉的圆心周围至少保证 25mm 的空间以保证手拧螺钉的正常拧紧或拧松, 如图 2-42 所示。

3. 避免操作人员 (或消费者) 受到伤害

在产品装配过程中必须保障操作人员 (或消费者) 的安全, 不正确的产品设计很可能对操作人员 (或消费者) 的人身造成伤害。例如, 钣金机箱中如果有锋利的边、角, 就很容易刮伤操作人员 (或消费者) 的手指, 造成伤害。因此, 对于机箱中操作人员 (或消费者) 容易接触的边、角, 在产品设计时必须增加压毛边工序, 以保障操作人员 (或消费者) 的安全。

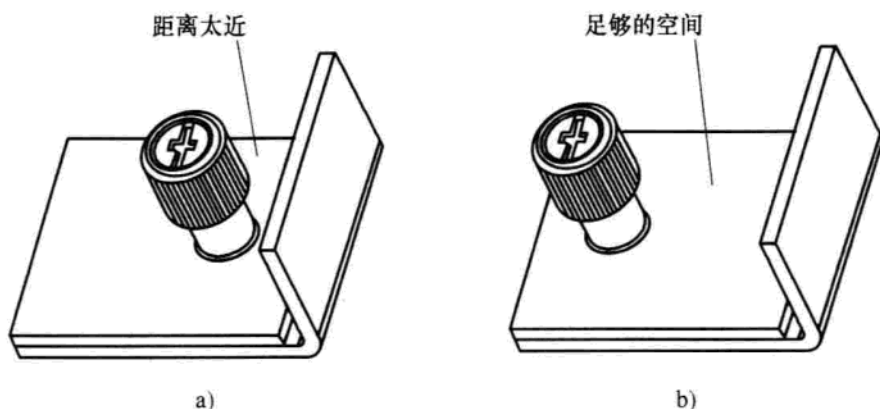


图 2-42 避免装配操作受阻的装配

a) 原始的设计 b) 改进的设计

4. 减少工具的使用种类、避免使用特殊的工具

装配线上工具的种类过多，会增加装配的复杂度，同时会造成操作人员使用错误的工具，引起产品装配错误。例如，一个产品中设计 M3、M4 和 M5 等不同种类的螺钉，这就要求产品装配线上使用不同种类的螺钉旋具，这往往不利于提高装配效率和提高装配质量。

特殊的工具会增加装配线的复杂度，同时操作人员熟悉特殊的工具也需要一定的时间。例如，产品设计中，除非客户指明要求，否则不必使用 Torx 螺钉，使用普通的 Philips 十字螺钉即可，因为 Torx 螺钉需要专用的螺钉旋具。

5. 设计特征辅助产品的装配

操作人员的推、拉、举、按等施力动作都有一定的极限，当产品的装配所需操作人员的施力超出极限或者容易造成操作人员疲劳时，应当通过产品设计减少产品装配过程中所需的施力，辅助产品的装配。

内存是计算机中必不可少的一个重要零件。因为内存形状的关系，在拆卸时操作人员或消费者只能通过手指抓住内存来施力，这很容易造成手指的酸痛，甚至无法拔出内存。为解决这个问题，在内存连接器的两侧增加两个可以旋转的把手，通过向下按动把手，把力转化为向上的拔出力，从而很顺利地把内存拔出，完成拆卸动

作，如图 2-43 所示。利用把手的结构，内存的装配也相当简单，只需把内存向下施力即可固定。

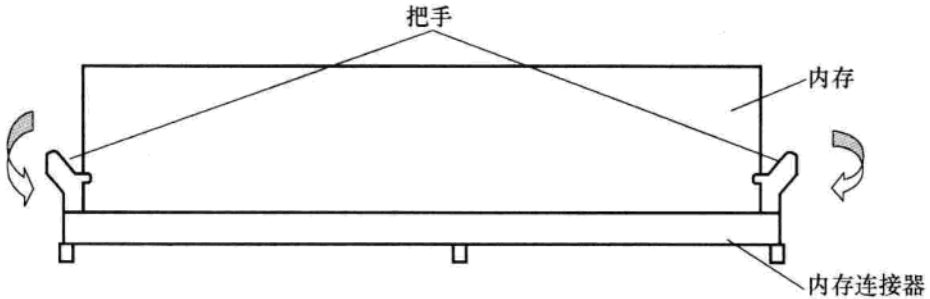


图 2-43 利用把手辅助产品的装配

2.2.18 线缆的布局

1. 合理的线缆布局

现代化的产品倾向于在有限的空间内集成更多的功能，于是产品的内部空间变得异常拥挤，而产品中的线缆经常需要从产品的一端布置到产品的另一端，非常耗费时间和精力，同时线缆的存在容易干扰风流，影响产品内部散热效果，而且线缆也容易带来电磁辐射的问题。

如图 2-44 所示，一个普通的台式机机箱内部包含了电源线、光驱线、硬盘数据线、主板数据线、前置 USB 接口线等，非常复杂。如果在产品设计之初不对线缆的走向和布局进行规划，那么机箱内部肯定乱成一团，更不用谈计算机的散热效果及其带来的电磁辐射问题。

因此，在产品的设计阶段，机械工程师需要规划线缆的走向和布局，同时通过简化产品结构，减少线缆的种类、数量和长度，优化线缆的走向和布局，从而可以大幅提高产品装配效率，避免线缆引起的机箱散热或电磁辐射问题。

2. 对线缆进行保护

在线缆走向周围需要防止零件锋利的边、角刮伤线缆。线缆被刮伤容易造成短路，继而损坏产品中的电子元器件。例如计算机机箱一般由钣金组成，在线缆的走向上钣金需要压毛边，或反折压平，

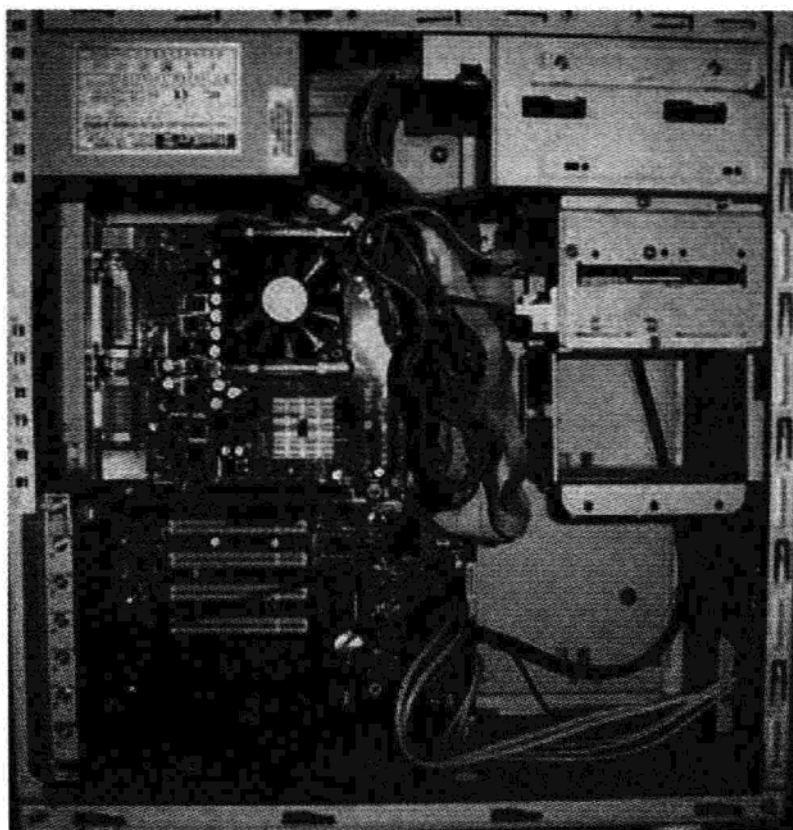


图 2-44 计算机机箱内部线缆布局

或加上塑胶护线套，保证线缆不被刮伤。

如图 2-45 所示，在钣金上线缆通过处反折压平对线缆进行保护。

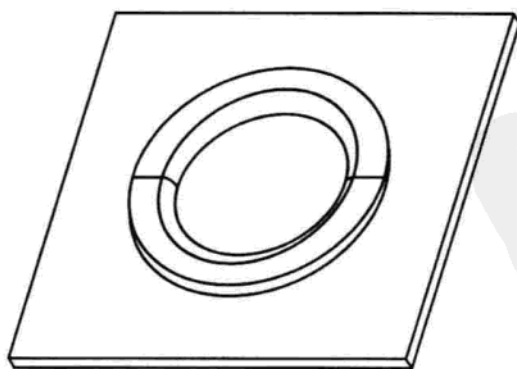


图 2-45 钣金反折压平对线缆进行保护

如图 2-46 所示，可以在钣金缺口上添加线缆护线套对线缆进行

保护。



图 2-46 线缆护线套

第3章 塑胶件设计指南

3.1 塑胶

3.1.1 塑胶的定义

塑胶的定义（美国塑料工业协会）：主要由碳、氧、氢和氮及其他有机或无机元素所构成，成品为固体，在制造过程中是熔融状的液体，因此可以藉加热使其熔化、加压力使其流动、冷却使其固化，而形成各种形状，此庞大而变化多端的材料族群称为塑胶。

塑胶零件（简称塑胶件，下同）广泛应用于现代生活中的每一个角落，如家用电器、仪器仪表、电线电缆、建筑器材、通信电子、汽车工业、航天航空、日用五金等。

近年来，随着塑胶工业的飞速发展和塑胶性能的不断提高，塑胶件得到了更为广泛的应用，塑胶件正在不同的领域替代传统的金属零件，一个设计合理的塑胶件往往能够替代多个传统金属零件，从而达到简化产品结构、节约制造成本的目的。

3.1.2 塑胶的特性

塑胶通常具有以下特性：

- 1) 低强度与低韧性（玻璃纤维强化塑胶则可达到高强度与高韧性）。
- 2) 原料丰富，价格低廉。
- 3) 成型容易，易加工成复杂形状，可大批量生产。
- 4) 重量轻，密度低（塑胶的密度为 $0.9 \sim 2\text{g/cm}^3$ ，铝的密度为 2.7g/cm^3 ，铁的密度为 7.8g/cm^3 ）。
- 5) 受外力作用时容易产生连续变形。
- 6) 色彩鲜明，着色容易，适当加入着色剂，可改变其色泽。

- 7) 良好的绝缘性和隔热性。
- 8) 耐腐蚀性能佳，耐水、耐油、耐酸、耐化学药品，而且不生锈。
- 9) 耐热性差，大部分塑胶的耐热温度约在 150℃ 以下。
- 10) 无导电性（近年有公司开发出具有导电性的塑胶）。
- 11) 可以具有其他特殊性质，例如透明性、弹性等。
- 与金属材料对比，塑胶材料优缺点见表 3-1。

表 3-1 塑胶材料与金属材料对比的优缺点

优 点	缺 点
容易加工成型	使用温度范围窄
高弹性、不易碎	低抗蠕变强度和低屈服强度
重量轻	结构强度低
隔热性佳	散热性差
优良的绝缘体	不导电
不必在成品着色	颜色比对不易
可应用为溶液	可能被溶剂影响
废料可以燃烧	可能产生有毒气体
可以产生透明塑件	因阳光照射而劣化

3.1.3 注射成型

注射成型（Injection Molding）是最常用的塑胶件制造方法。用注射成型方法加工的塑胶件，不仅可以形成复杂的结构，而且零件精度高、质量好，生产效率也高。

塑胶注射成型是将熔融塑胶材料挤压进入模穴，制作出所设计形状的塑胶件的一个循环制程。塑胶注射成型是一种适合高速、大批量生产、精密组件的加工制造方法，它将粒状塑胶料在料筒内融化、混合、移动，再于模穴内流动、充填、凝固，其动作可以区分为塑胶粒的塑化、充填、保压、冷却、顶出等阶段的循环制程。

一个典型的注射成型机如图 3-1 所示，主要包括模具系统、射

出系统、油压系统、控制系统和锁模系统等5个单元。

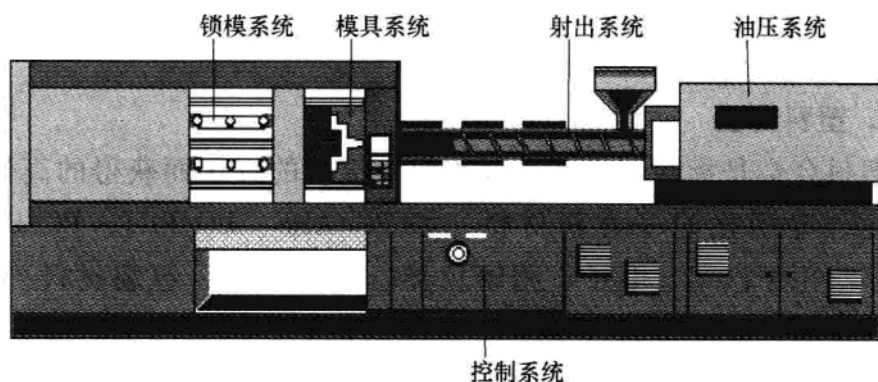


图 3-1 注射成型机

3.2 塑胶材料选择

3.2.1 塑胶材料的分类

按照塑胶材料力学性能，塑胶材料可以分为以下7大类：

1. 通用塑料

通用塑料指综合力学性能较低、不能作为结构件，但成型性好、价格便宜、用途广、产量大的塑料，包括 PE、PP、EAA、PVC，广泛应用于薄膜、管材、鞋材、盆子、桶、包装材料等。

2. 普通工程塑料

普通工程塑料指综合力学性能中等、在工程方面用做非承载荷的材料，如 PS、HIPS、ABS、AAS、ACS、MBS、AS、PMMA 等，广泛应用于各种产品外壳和壳体类。

3. 结构工程塑料

结构工程塑料指综合力学性能较高、在工程方面用做产品结构件、可以承受较高载荷的材料，如 PA、POM、NORYL、PC、PBT、PET 等，广泛应用于各种产品外壳。

4. 耐高温工程塑料

耐高温工程塑料是指在高温条件下仍能保持较高力学性能的塑

料，耐高温和高刚性，如 PI、PPO、PPS、PSF、PAS、PAR 等，广泛应用于汽车发动机部件、油泵和气泵盖、电子电器仪表用高温插座等。

5. 塑料合金

塑料合金是指利用物理共混或化学接枝的方法而获得的高性能、功能化、专用化的一类新材料，如 PC/ABS、PC/PBT、PC/PMMA 等，广泛用于汽车、电子、精密仪器、办公设备、包装材料、建筑材料等领域，能改善或提高现有塑料的性能并降低成本。塑料合金已经成为塑料工业中最活跃的品种之一。

6. 热塑性弹性体

热塑性弹性体（Thermoplastic Elastomer, TPE）是物理性能介于橡胶和塑料之间的一类高分子材料，它既具有橡胶的弹性，又具有塑料的易加工性。TPE 的应用领域涉及汽车、电子、电气、建筑、工程及日常生活用品等多方面，其使用的最终形态包括各种护套、管材、电线电缆、垫片、零配件、鞋件、密封条、输送带、涂料、油漆、粘合剂、热熔胶、纤维等。

7. 改性塑料

改性塑料是指在塑胶原料中添加各种添加剂、填充料和增强剂（如玻璃纤维、导电纤维、阻燃剂、抗冲击剂、流动剂、光稳定剂等），使塑料具有高阻燃性、高机械强度、高冲击性、耐高温性、高耐磨性、导电性等性能，从而扩大塑料的使用范围。

玻璃纤维增强塑料（Fiberglass Reinforced Plastics）就是一种典型的改性塑料，简称玻璃钢，玻璃钢是在原有塑料（如 PC、PP、PA、PET、PBT）的基础上，加入玻璃纤维，复合而成的一种具有高强度、高性能的工程结构塑料。玻璃钢料质轻、不生锈、结构整体成型成本低、自由设计度大，广泛应用于汽车、机械、电器、轮船、航空航天等领域，是替代传统金属材料的最好选择。

3.2.2 常用塑胶材料性能

塑胶材料种类非常多，本节整理了常用的塑胶材料及其特性，以供机械工程师设计时参考选用，见表 3-2。

表 3-2 常用塑胶材料性能及应用

塑胶材料	中文名	优点	缺点	典型应用
PVC	聚氯乙烯	具有不易燃性、耐气候变化性以及优良的几何稳定性,对氧化剂、还原剂和强酸都有很强的抵抗力	能够被浓氧化酸如浓硫酸、浓硝酸所腐蚀,流动特性相当差,其工艺范围很窄	供水管道、家用管道、房屋墙板、商用机器壳体、电子产品包装、医疗器械、食品包装等
PS	聚苯乙烯	具有非常好的几何稳定性、热稳定性、光学透过特性、电绝缘特性以及很微小的吸湿倾向	能够被强氧化酸如浓硫酸所腐蚀,并且能够在一些有机溶剂中膨胀变形	产品包装、家庭用品(如餐具、托盘)、透明容器、光源散射器、绝缘薄膜等
ABS	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物	力学性能适中,易于印刷以及电镀等表面处理,流动性好,尺寸稳定性高,是良好的壳体材料	易受溶剂影响而应力开裂,耐气候性差,不能承受较大载荷	汽车内饰件、电器外壳、手机、电话机壳体、旋钮、键盘等
PMMA	聚甲基丙烯酸甲酯(俗称有机玻璃或亚克力)	优良的光学特性及耐气候变化特性,能耐室外老化,暴晒而不影响它的透明度	表面硬度低,不耐划伤	汽车玻璃、信号灯设备、仪表盘、储血容器、影碟、灯光散射器、日用消费品(如饮料杯、文具等)
POM	聚甲醛(俗称赛钢)	表面硬度大、刚性好、耐磨性好,摩擦性能非常优异、耐疲劳强度高	不耐高温、热稳定性差、耐酸性差	齿轮、弹簧、轴承、轴套、连杆、叶轮、叶片等
PC	聚碳酸酯	具有高抗冲击强度、热稳定性、高光泽度、阻燃特性以及抗污染性、高尺寸稳定性	疲劳强度低、易应力开裂、耐磨性差、流动性较差、材料注射过程较困难	计算机组件、连接器、电器外壳、电器内部元件、镜片、车辆的前后灯、仪表板等

(续)

塑胶材料	中文名	优点	缺点	典型应用
PA	聚酰胺 (俗称尼龙)	很好的机械强度和刚度, 优异的耐磨性和自润滑性	尺寸精度差, 热膨胀和吸水性对尺寸影响很大, 耐酸性差, 耐光性差, 耐污染性差	机械凸轮、滑动机构以及轴承, 汽车工业、仪器壳体以及其他需要有抗冲击性和高强度要求的产品
PBT	聚对苯二甲酸丁二醇酯	最坚韧工程热塑料之一, 有非常好的化学稳定性、机械强度、电绝缘特性	结晶收缩率大, 尺寸稳定性差, 易翘曲、对缺口敏感	齿轮、轴承、耐药品工具外盖, 要求耐冲击的防护面罩、水泵外盖
PPO	聚苯醚	耐高温、高刚性、抗蠕变性能强、介电性能优良	不耐气候, 易受紫外线的照射而变色, 流动性差, 难加工	适于制作耐热件、绝缘件、减摩耐磨件、传动件、医疗器械零件和电子设备零件
PC/ ABS	聚碳酸酯和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物的混合物	具有 PC 和 ABS 两者的优点, 例如 ABS 的易加工特性和 PC 的优良机械特性及热稳定性		计算机和商用机器的壳体、电器设备、草坪和园艺机器、汽车零件 (仪表板、内部装修以及车轮盖)
PC/ PBT	聚碳酸酯和聚对苯二甲酸丁二醇酯的混合物	较高的表面硬度, 较高的刚性和韧性, 较高的抗高温变形能力, 较高的抗应力开裂能力		齿轮箱、汽车保险杠以及要求具有抗化学反应和耐腐蚀性、热稳定性、抗冲击性以及几何稳定性的产品

3.2.3 塑胶材料选择原则

塑胶材料种类繁多，性能各异，选择合适的塑胶材料非常困难。一般来说，塑胶材料的选择通常是沿用以往产品所用过的材料（不求有功，但求无过），或者由塑胶材料供应商、模具制造商推荐，但这样的选择往往不是最优选择。塑胶材料的选取不仅仅要求机械工程师全面了解塑胶材料的性能参数，而且还需要考虑产品的载荷状况、应用环境、功能、外观、装配和成本等因素。

1. 塑胶件载荷状况

选取塑胶材料时，机械工程师应当仔细分析零件承受载荷的情况，包括载荷的大小、类型和时间，然后对比塑胶材料的物理特性，选取合适的材料。五种典型的载荷条件及工程师应考虑塑胶材料特性见表3-3。

表 3-3 典型的载荷条件及应考虑塑胶材料特性

载荷条件	应考虑塑胶材料特性
短期载荷	应力-应变行为
长期载荷	潜变
反复性载荷	疲劳强度
高速和冲击性载荷	抗冲击强度
极端温度下的载荷	热应力-应变行为

2. 产品使用环境

产品使用环境包括环境温度和接触介质。塑胶材料只能在一定的温度范围内正常工作，低于或者超过该温度范围，将不能行使正确的功能，而且每一种塑胶材料工作温度范围都不一样，因此必须明确产品使用环境的温度，包括最高和最低的工作温度，以及长期的工作温度等。

塑胶材料的选取也要考虑产品所可能接触的介质情况，包括接触溶剂和各种蒸气的情况、与酸碱等发生化学反应的情况、吸水情况、受紫外线和环境氧化的影响、受砂和雨水的影响等。

3. 价格

成本永远都是第一位的。塑胶材料的选取需要考虑到材料的价

格，在满足产品应用的条件下，选取价格比较便宜的塑胶材料。

4. 装配要求

塑胶材料选取需要考虑到零件通过什么方式装配到产品之中，根据产品的装配要求选用合适的材料。例如，某产品上下盖要求用超声波焊接，上盖的塑胶材料已经选定为 ABS，那么下盖的塑胶材料应当与 ABS 具有较好的超声波焊接熔合性能，可以为 ABS 或 PM-MA 等。

5. 尺寸稳定性

在选择塑胶材料时，应根据零件和产品的尺寸稳定性要求来选取合适的塑胶材料。某些塑胶材料的尺寸稳定性好，如 PC；而某些材料的尺寸稳定性差，如 PA。

6. 外观

零件是否有透明度的要求、是否需要咬花、是否需要电镀、表面粗糙度是否有要求等，这些外观要求都会影响到塑胶材料的选择。

7. 安全规范

塑胶材料选择时考虑产品是否需要满足某种安全规范或某种认证的要求，比如 3C 认证、FDA、USDA、UL 等；同时也要考虑产品是否需要满足 UL94 防火等级的要求，防火等级分为 5VA、5VB、V-0、V-1、V-2、HB。不同的塑胶材料具有不同的防火等级，甚至同一种塑胶材料因为材料等级不同，其防火等级也不同。

3.3 设计指南

零件设计必须满足来自于零件制造端的要求，对通过注射加工工艺而获得的塑胶件也是如此。在满足产品功能、质量以及外观等要求下，塑胶件设计必须使得注射模具加工简单、成本低，同时零件注射时间短、效率高、零件缺陷少、质量高，这就是面向注射加工的设计。本节将详细介绍塑胶件设计指南，使得塑胶件设计是面向注射加工的设计。

由于注射加工涉及注射模具的制作，面向注射加工的设计显得更为重要。注射模具的制作和修改费时费力，在塑胶件的成本中，

注射模具的成本占有很大的比例，一套模具的成本少则上万元，多则几十万元。当注射模具制造完成后，如果零件设计发生修改，注射模具就需要作相应的修改，这势必会带来模具成本的上升。而有些时候因为模具结构的关系，注射模具无法进行修改，只能重新设计制造一副新的模具，那么带来的成本和时间上的损失就更无法衡量了。

3.3.1 零件壁厚

在塑胶件的设计中，零件壁厚是首先考虑的参数，零件壁厚决定了零件的力学性能、零件的外观、零件的可注射性以及零件的成本等。可以说，零件壁厚的选择和设计决定了零件设计的成功与失败。

1. 零件壁厚必须适中

由于塑胶材料的特性和注射工艺的特殊性，塑胶件的壁厚必须在一个合适的范围内，不能太薄，也不能太厚。壁厚太小，零件注射时流动阻力大，塑胶熔料很难充满整个型腔，不得不通过性能更高的注射设备来获得更高的充填速度和注射压力。壁厚太大，零件冷却时间增加（据统计，零件壁厚增加1倍，冷却时间增加4倍），零件成型周期增加，零件生产效率低；同时过大的壁厚很容易造成零件产生缩水、气孔、翘曲等质量问题。

不同的塑胶材料对塑胶件的合适壁厚有不同的要求，甚至不同塑胶材料生产商生产的同一种塑胶材料也可能存在不同合适壁厚要求。常用塑胶材料零件的合适壁厚范围见表3-4。当塑胶件壁厚值接近表中的合适壁厚值的上下限时，机械工程师应当向塑胶材料生产商征求意见。

表3-4 常用塑胶材料零件的合适壁厚范围（单位：mm）

材料 壁厚	PE	PP	Nylon	PS	AS	PMMA	PVC	PC	ABS	POM
最小	0.9	0.6	0.6	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
最大	4.0	3.5	3.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	4.5	5.0

2. 尽量减小零件壁厚

决定塑胶件壁厚的关键因素包括：

1) 零件的结构强度是否足够。一般来说，壁厚越大，零件强度越好。但零件壁厚超过一定范围时，由于缩水和气孔等质量问题的产生，增加零件壁厚反而会降低零件强度。

2) 零件成型时能否抵抗脱模力。零件太薄，容易因顶出而变形。

3) 能否抵抗装配时的紧固力。

4) 有金属埋入件时，埋入件周围强度是否足够。一般金属埋入件与周围塑胶材料收缩不均匀，容易产生应力集中，强度低。

5) 零件能否均匀分散所承受的冲击力。

6) 孔的强度是否足够，孔的强度容易因为熔接痕影响而降低。

7) 在满足以上要求的前提下，而且注射成型不会产生质量问题，塑胶件零件壁厚应尽量做到最小，因为较厚的零件壁厚不但增加材料成本、增加零件重量，同时会延长零件成型的周期，从而增加生产成本。

为了保证和提高零件强度，机械工程师往往倾向于选择较大的零件壁厚。事实上，通过选择较大零件壁厚来保证和提高零件强度不是最好的方法。零件强度的提高可以通过添加加强肋、设计曲线或波浪型的零件剖面等来获得，这不但可以减少零件的材料浪费，也缩短了零件注射成型的周期。

3. 零件壁厚均匀

最理想的零件壁厚分布是在零件的任一截面上零件厚度均匀一致。不均匀的零件壁厚会引起零件不均匀的冷却和收缩，从而造成零件表面缩水、内部产生气孔、零件翘曲变形、尺寸精度很难保证等缺陷。

常见塑胶件均匀壁厚设计的范例如图 3-2 所示。

如果零件均匀壁厚不可能获得，那么至少需要保证零件壁厚处与壁薄处有光滑的过渡，避免零件壁厚出现急剧的变化。急剧变化的零件壁厚影响塑胶熔料的流动，容易在塑胶背面产生应力痕，影响产品外观；同时易导致应力集中，降低塑胶件强度，使得零件很难承受载荷或外部冲击。

四种零件壁厚不均匀处的壁厚设计如图 3-3 所示。最差的壁厚设计见图 3-3a，零件壁厚出现急剧变化；较好的壁厚设计见图 3-3b 和图 3-3c，壁厚壁薄处均匀过渡，一般来说，过渡区域的长度为厚度的 3 倍；最好的壁厚设计见图 3-3d，不但零件壁厚光滑过渡，而且在零件壁厚处使用掏空的设计，既保证零件不发生缩水，又保证零件强度。

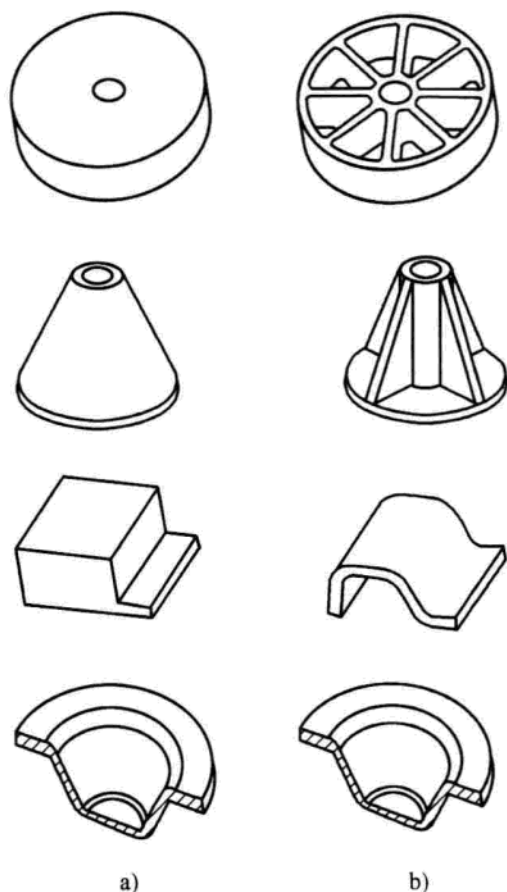


图 3-2 零件壁厚应均匀
a) 原始的设计 b) 改进的设计

检查零件壁厚是否均匀的方法是在三维软件中做无数个剖截面，零件是否具有均匀壁厚则一目了然。

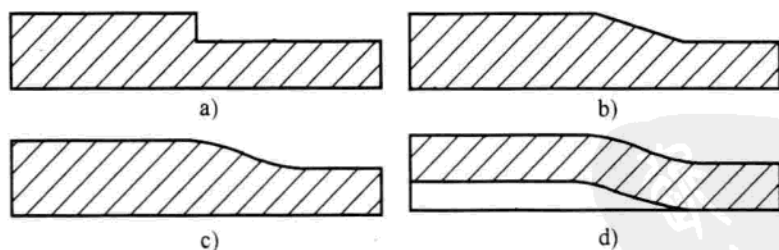


图 3-3 四种零件壁厚不均匀处的壁厚设计
a) 最差的设计 b) 较好的设计 c) 较好的设计 d) 最好的设计

3.3.2 避免尖角

塑胶件的内部和外部需要避免产生尖角。尖角阻碍塑胶熔料的

流动，容易产生外观缺陷；同时在尖角处容易产生应力集中，降低零件强度，使得零件在承受载荷时失效。因此，在塑胶件的尖角处，应当添加圆角，使得零件光滑过渡。

1. 避免零件外部尖角

塑胶件外部圆角设计如图 3-4 所示。

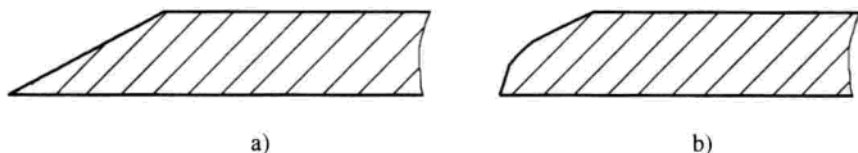


图 3-4 避免外部尖角

a) 原始的设计 b) 改进的设计

当然，避免零件外部尖角也不可一概而论。零件分型面处的圆角会造成模具结构复杂，增加模具成本，同时零件上容易出现断差，影响外观。在零件分型面处直角的设计较好，如图 3-5 所示。

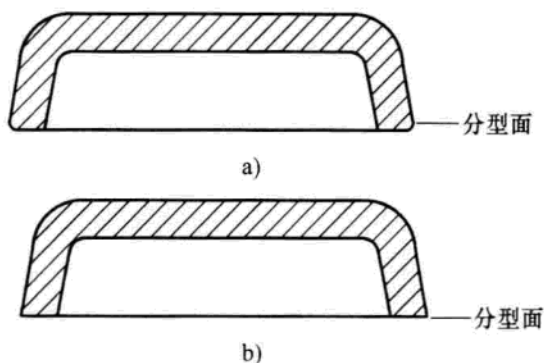


图 3-5 避免分型面上的圆角

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 避免在塑胶熔料流动方向上产生尖角

在塑胶件塑胶熔料方向上避免产生尖角，如图 3-6 所示，图中箭头的方向为塑胶熔料的流动方向。在原始的设计中，尖角易导致零件在注射过程中产生困气，局部的高温造成塑胶分解，在零件表面产生外观缺陷，同时尖角容易产生内应力；在改进的设计中，通过设计的优化避免尖角的

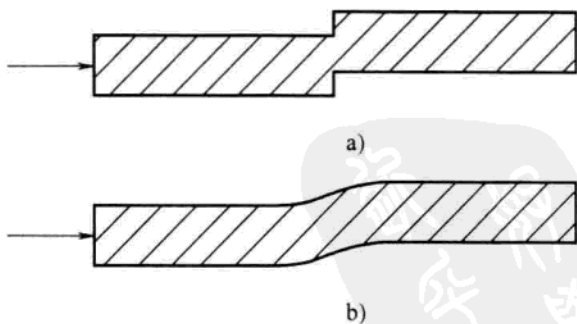


图 3-6 避免在塑胶熔料方向上产生尖角

a) 原始的设计 b) 改进的设计

产生，保证塑胶熔料的流动顺畅。

3. 避免零件壁连接处产生尖角

应力集中是塑胶件失效的主要原因之一。应力集中降低了零件的强度，使得零件很容易在冲击载荷和疲劳载荷作用下失效。

应力集中大多发生在零件尖角处。塑胶件应当避免尖角的设计，在尖角的地方添加圆角，以减轻和避免应力集中的发生。零件尖角容易出现在零件主壁与侧壁连接处、壁与加强肋连接处、壁与支柱连接处等。

零件内部圆角与应力集中系数的关系如图 3-7 所示。其中 t 为零件壁厚， R 为零件内圆角， P 为零件承受的载荷。

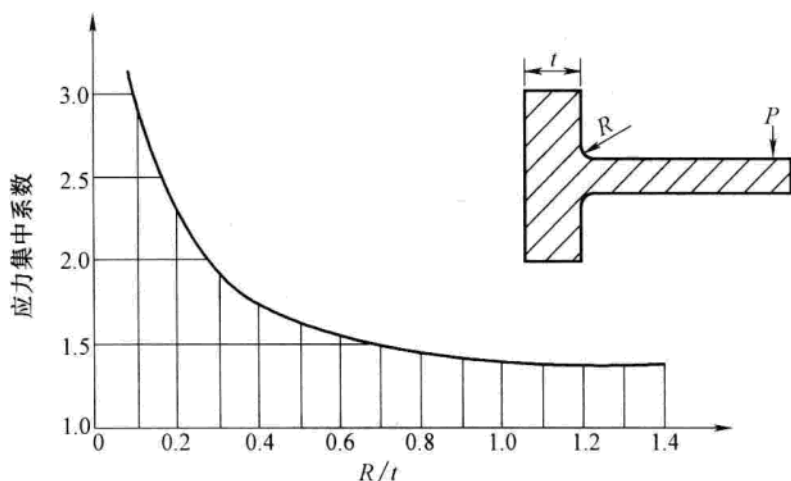


图 3-7 零件应力集中系数

由图 3-7 可见：

当 $R < 0.3t$ 时，应力急剧升高；

当 $R > 0.8t$ 时，则基本没有应力集中现象发生。

一般来说，零件截面连接处内部圆角 R 为 $0.5t$ ，外部圆角为 $1.5t$ ，既保证了零件的均匀壁厚，又减轻了零件连接处应力集中，如图 3-8 所示。当然，圆角也不可太大，否则容易使得零件局部壁厚太大，造成缩水。

3.3.3 脱模斜度

塑胶材料从熔融状态转变为固体状态将产生一定量的尺寸收缩，

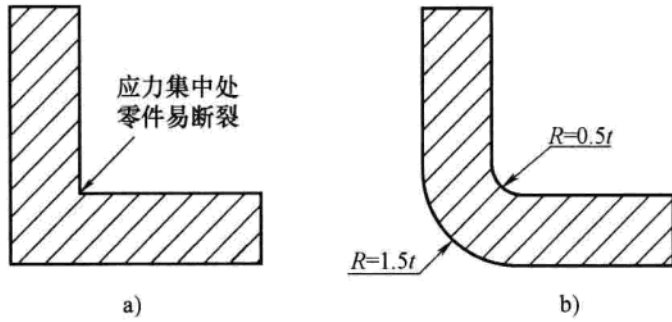


图 3-8 圆角的设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

零件因此而围绕公模和型芯产生收缩而包紧。为了便于塑胶件从模具中顺利脱模，防止脱模时划伤零件表面，与脱模方向平行的零件表面一般应具有合理的脱模斜度，如图 3-9 所示。

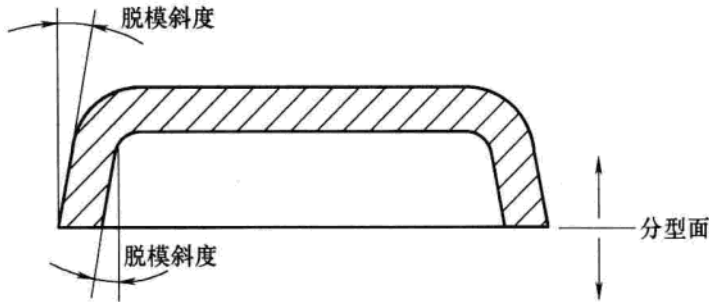


图 3-9 脱模斜度

塑胶材料、零件的形状和厚度、模具的表面处理和顶出机构等决定了脱模斜度的大小，零件脱模斜度大小的设计原则如下：

- 1) 零件若无特殊要求，脱模斜度一般取 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 。
- 2) 对于收缩率大的塑胶件应选用较大的脱模斜度。
- 3) 尺寸精度要求高的零件特征处应选用较小的脱模斜度。
- 4) 公模侧脱模斜度一般小于母模侧脱模斜度，以利于零件脱模。
- 5) 塑胶件壁厚较大时，成型收缩增大，因此脱模斜度应取较大值。
- 6) 咬花面和复杂面脱模斜度应取较大值，咬花的大小决定脱模斜度的大小。
- 7) 对于玻璃纤维增强塑料，脱模斜度宜取较大值。

8) 脱模斜度的大小与方向不能影响产品的功能实现。例如, 两个零件具有运动关系时, 需要考虑配合处的脱模斜度大小和方向, 否则会影响产品功能实现。某电器产品上按钮与面板的结构剖视图如图 3-10 所示, 按钮的功能是触发电器开关。产品设计要求按钮在运动过程中不会被面板卡住, 否则按钮不能触发开关, 以至于不能正确行使功能, 同时要求按钮在运动过程中不会左右摇晃, 手感好。这就要求按钮的运动路线是垂直的直线运动, 按钮与面板的配合面处必须保证上下间隙一致。在原始的设计中, 因为面板脱模斜度方向的错误, 按钮与面板配合面处上侧间隙大、下侧间隙小, 按钮在运动方向上始终只是依靠很小的一个平面与面板接触导向, 于是按钮在按动过程中会摇摇晃晃, 严重时会使按钮卡在面板中造成按钮不能触发开关; 在改进的设计中, 面板脱模斜度方向修改, 按钮与面板配合面处上侧和下侧间隙始终一致, 按钮的运动路线是垂直的直线运动, 按钮手感好, 也不会发生按钮被面板卡住而失效的

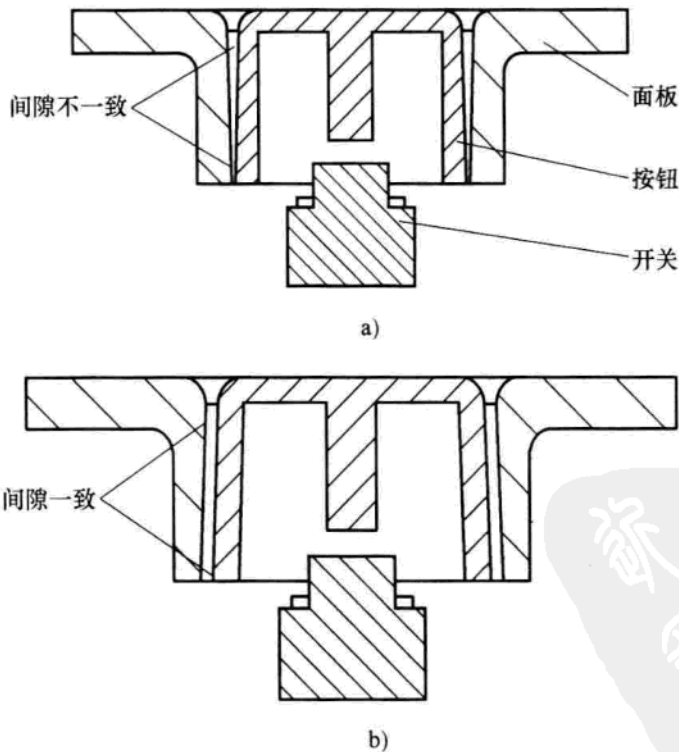


图 3-10 考虑到零件运动关系的脱模斜度设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

情况。

9) 零件某些平面因为功能需要可以不设置脱模斜度, 但模具则需设计侧抽芯结构, 模具结构复杂, 成本高。

10) 在零件功能和外观等允许的情况下, 零件脱模斜度尽可能大。较小的脱模斜度增加零件在顶出过程中表面划伤及损坏的可能性; 同时, 较小的脱模斜度要求模具表面抛光处理或复杂的模具顶出机构, 增加模具成本。

3.3.4 加强肋的设计

加强肋是塑胶件设计中必不可少的一个特征, 用于提高零件强度、作为流道辅助塑胶熔料的流动, 以及在产品中为其他零件提供导向、定位和支撑等功能。加强肋的设计参数包括加强肋的厚度、高度、脱模斜度、根部圆角以及加强肋与加强肋之间的间距等, 如图 3-11 所示。

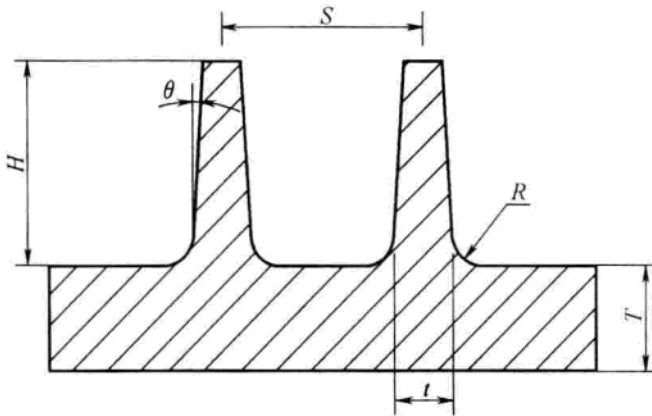


图 3-11 加强肋的设计

1. 加强肋的厚度不应该超过塑胶件壁厚的 50% ~ 60%

加强肋的厚度太大, 容易造成零件表面缩水和带来外观质量问题。加强肋的厚度太小, 零件注射困难, 而且对零件的强度增加作用有限。为了防止零件表面缩水 (特别是外观要求较高的零件), 常用塑胶材料加强肋厚度与壁厚比值不应该超过表 3-5 所示的数值。对产品内部零件或者外观要求不高的零件, 为了提高强度, 加强肋的厚度可以大于表中数值甚至接近零件的壁厚。通过调整浇口的位置

置让加强肋靠近浇口和调整注射工艺参数能够降低零件表面缩水程度。

对于薄壁塑胶件（零件厚度小于1.5mm），加强肋的厚度可以超过表中比值，甚至等于零件壁厚。加强肋厚度越小，表面缩水程度越小。

表 3-5 常用塑胶材料加强肋厚度与壁厚比值

塑胶材料	最小的缩水	较小的缩水
PC	50%	66%
ABS	40%	60%
PC/ABS	50%	50%
PA	30%	40%
PA（玻璃纤维增强）	33%	50%
PBT	30%	50%
PBT（玻璃纤维增强）	33%	50%

2. 加强肋的高度不能超过塑胶件壁厚的 3 倍

为了提高零件的强度，加强肋的高度越大越好。但加强肋的高度太大，零件注射困难，很难充满，特别是当加强肋增加脱模斜度后，加强肋的顶部尺寸变得很小时。加强肋的高度一般不超过塑胶件壁厚的 3 倍，即 $H \leq 3t$ 。

3. 加强肋根部圆角为塑胶件壁厚的 0.25 ~ 0.5 倍

如上一节所述，加强肋的根部需要增加圆角避免应力集中以及增加塑胶熔料流动性，圆角的大小一般为零件壁厚的 0.25 ~ 0.5 倍，即 $R = 0.25 \sim 0.5t$ 。

4. 加强肋的脱模斜度一般为 $0.5^\circ \sim 1.5^\circ$

为了保证加强肋能从模具中顺利脱出，加强肋需要一定的脱模斜度，一般为 $0.5^\circ \sim 1.5^\circ$ 。斜度太小，加强肋脱模困难，容易变形或刮伤；斜度太大，加强肋的顶部尺寸太小，注射困难，强度低。

5. 加强肋与加强肋之间的间距至少为塑胶件壁厚的 2 倍

加强肋与加强肋之间的间距至少为塑胶件壁厚的 2 倍，以保证加强肋的充分冷却，即 $S \geq 2T$ 。

6. 加强肋设计需要遵守均匀壁厚原则

加强肋设计需要遵守均匀壁厚原则。加强肋与加强肋连接处、加强肋与零件壁连接处添加圆角后，很容易造成零件壁厚局部过大。

如图 3-12 所示，加强肋与加强肋连接处增加圆角后会造零件壁厚局部过大，容易造成零件表面缩水。此时可在局部壁厚处做挖空处理，保持零件均匀壁厚，避免零件表面缩水的发生。

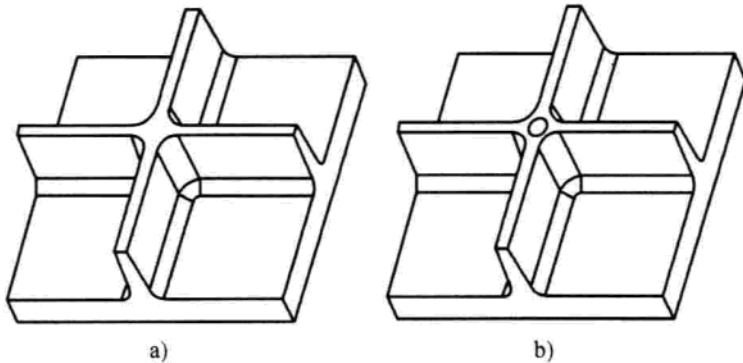


图 3-12 避免局部厚度过大

a) 原始的设计 b) 改进的设计

7. 加强肋顶端增加斜角避免困气

加强肋顶端应避免直角的设计。在注射过程中，直角的设计很容易造成顶端困气，造成注射困难和产生注射缺陷。如图 3-13 所示，

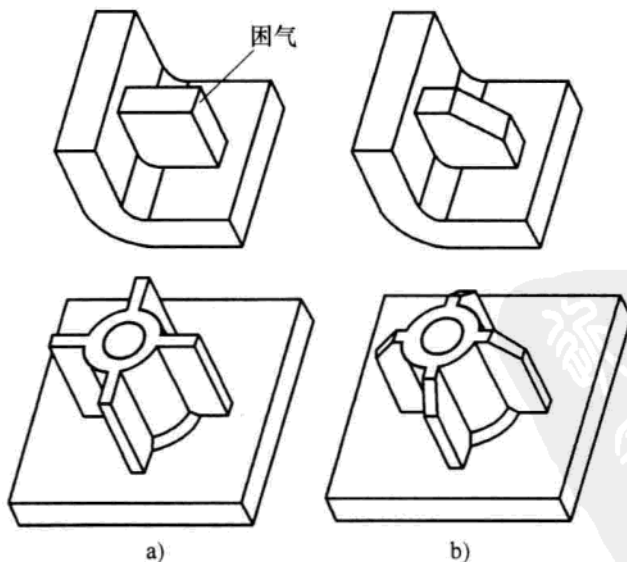


图 3-13 加强肋顶端增加斜角

a) 原始的设计 b) 改进的设计

可以在加强肋顶端增加斜角或圆角避免零件困气问题的产生。

8. 加强肋方向与塑胶熔料流向一致

加强肋方向应与塑胶熔料流动方向一致，确保熔料的流动顺畅，提高注射效率，避免产生困气等注射缺陷，如图 3-14 所示。

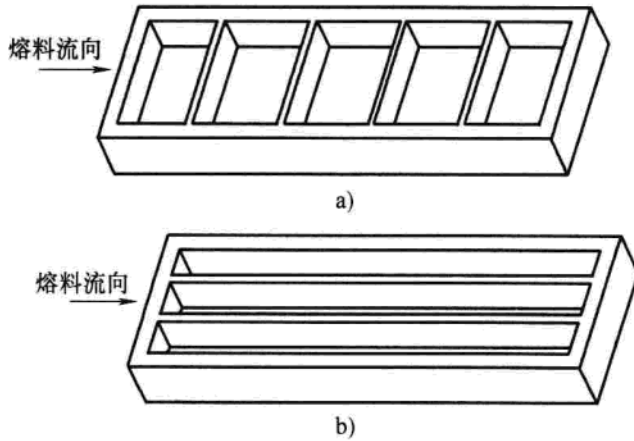


图 3-14 加强肋方向与塑胶熔料流向一致
a) 原始的设计 b) 改进的设计

3.3.5 支柱的设计

支柱在塑胶件中用于产品中零件之间的导向、定位、支撑和固定等。支柱的设计参数包括支柱的外径、内径、厚度、高度、根部圆角和脱模斜度等，如图 3-15 所示。

1) 支柱的外径为内径的 2 倍。

2) 支柱的厚度不超过零件壁厚的 0.6 倍。为避免零件表面缩水和产生气孔，支柱的厚度不应该超过零件厚度的 0.6 倍。

3) 支柱的高度不超过零件壁厚的 5 倍。支柱太高，脱模斜度的存在会使得顶部尺寸小，导致零件注射困难；如果保证顶部尺寸，又会造成支柱底部太厚，造成零件表面缩水和产生气孔。

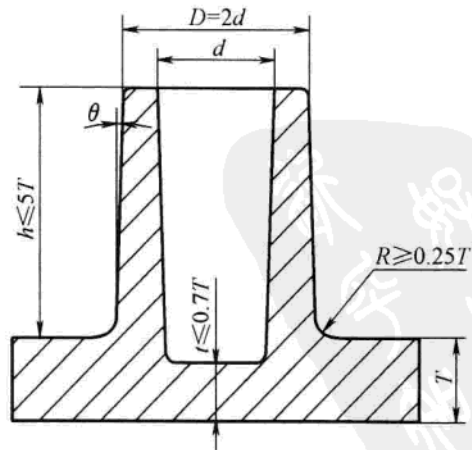


图 3-15 支柱的设计

因此，支柱的高度一般不超过零件壁厚的 5 倍，即 $h \leq 5T$ 。

4) 支柱的根部圆角为零件壁厚的 0.25 ~ 0.5 倍。如上一节所述，为了避免零件应力集中和使得塑胶熔料的流动顺畅，支柱的根部圆角为零件壁厚的 0.25 ~ 0.5 倍，即 $R = 0.25 \sim 0.5T$ 。

5) 支柱根部厚度为零件壁厚的 0.7 倍。为避免外观表面缩水缺陷的产生，支柱的根部厚度可设计为不大于零件壁厚的 0.7 倍，即 $t \leq 0.7T$ 。

6) 支柱的脱模斜度。一般来说，支柱内径的脱模斜度为 0.25° ，外径的脱模斜度为 0.5° 。但支柱也可以不用脱模斜度，在模具中使用套筒来脱模，但模具费用稍高。

1. 支柱与零件壁的连接

避免孤零零的支柱设计，通过加强肋把支柱与零件壁连接成一个整体，增加支柱的强度，并使得塑胶熔料的流动更加顺畅，如图 3-16 所示。

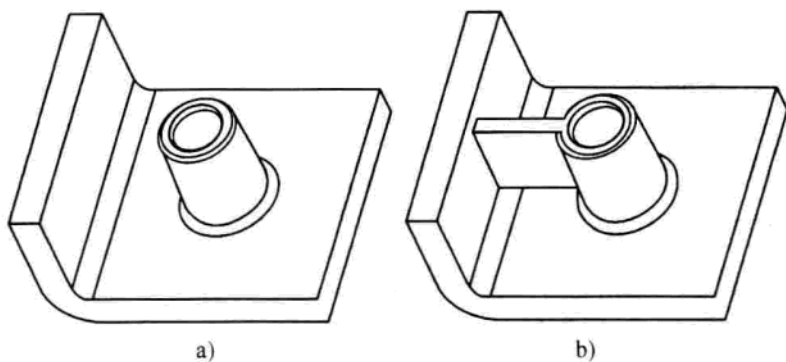


图 3-16 支柱与零件壁的连接

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 单独支柱四周添加加强肋

当支柱远离浇口时，在支柱上很容易产生熔接痕，熔接痕会降低支柱的强度。当支柱是自攻螺钉支柱时，由于强度不足，支柱常常在径向力作用下而发生破裂，对固定金属镶件的支柱也是如此，因此，需要在单独的支柱四周添加加强肋，增加支柱的强度，同时在加强肋与支柱的连接处添加一定的圆角。

单独支柱的加强肋补强设计如图 3-17 所示。

3. 支柱设计需要遵守均匀壁厚原则

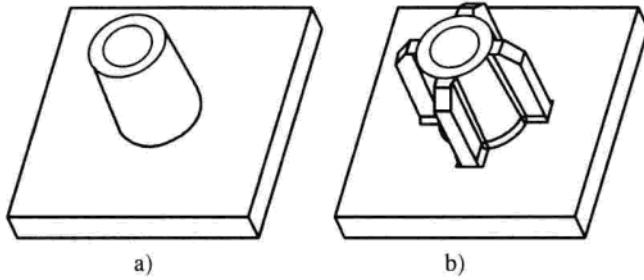


图 3-17 支柱四周添加加强肋

a) 原始的设计 b) 改进的设计

避免支柱过于靠近零件壁。当支柱过于靠近零件壁时，容易造成局部壁厚过大，导致零件表面缩水和产生气泡。支柱设计应当遵守均匀壁厚原则，如图 3-18 所示。

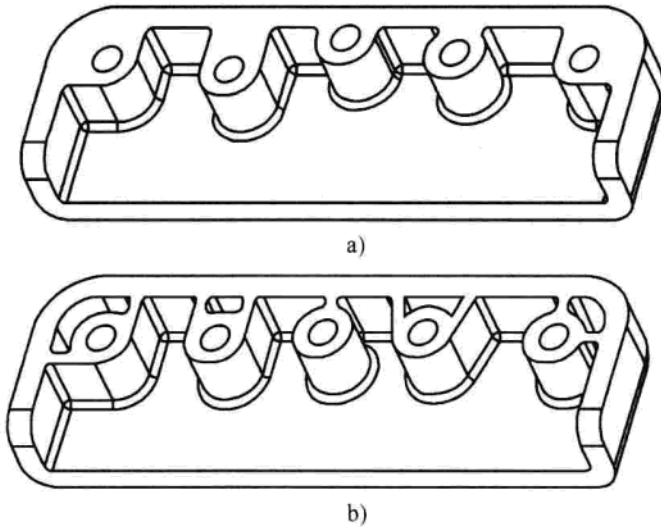


图 3-18 支柱设计需要遵守均匀壁厚原则

a) 原始的设计 b) 改进的设计

3.3.6 孔的设计

1. 孔的深度尺寸推荐

塑胶件的孔、槽以及凹坑是通过模具上的型芯成型的。型芯是模具上凸起的部分，型芯尺寸影响着模具的寿命和零件的质量等。在零件注射过程中，过高过长的型芯承受着较高的塑胶熔料冲击力，很容易引起型芯的位置移动，从而造成孔槽等尺寸误差大；或者在长期的冲击力之下，型芯容易发生折断而降低使用寿命。因此，塑

胶件的孔、槽以及凹坑等相关尺寸设计必须保证合适型芯的尺寸，从而保证模具寿命和提高零件质量等。

塑胶件上常见的孔大致可以分为不通孔、通孔和阶梯孔等3种。

当不通孔的直径小于5mm时，孔的深度不应该超过孔直径的2倍；当不通孔的直径大于5mm时，孔的深度不超过孔直径的3倍。

通孔比不通孔更容易制造，因为型芯可以分布在公母模两侧，通孔的深度可以适当加大。当通孔的直径小于5mm时，孔的深度不应该超过孔直径的4倍；当通孔的直径大于5mm时，孔的深度不超过孔直径的6倍。

不通孔和通孔的深度推荐值如图3-19所示。

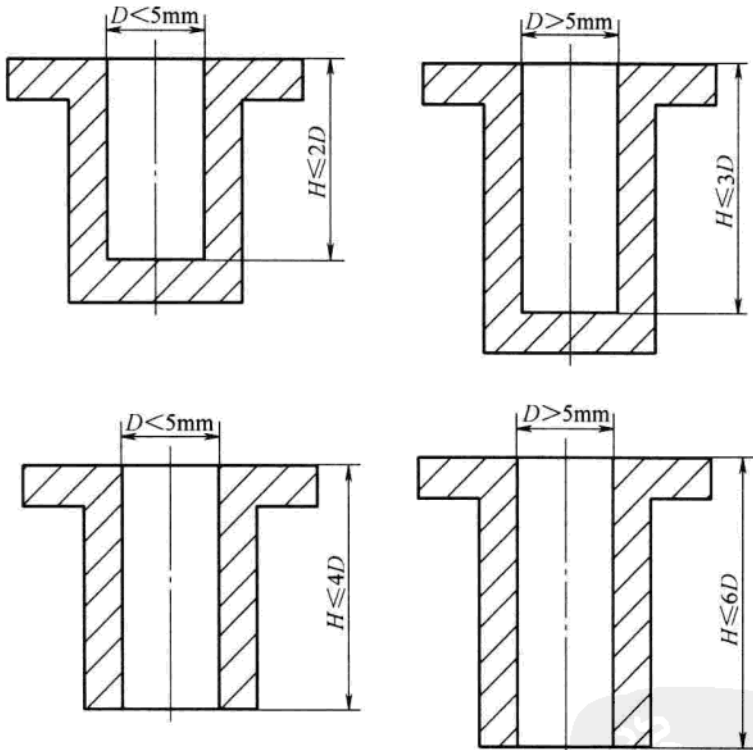


图 3-19 不通孔和通孔的深度

如果孔太深，可以用阶梯孔的方法成型，如图3-20所示。

2. 避免不通孔底部太薄

不通孔底部厚度至少应当大于不通孔直径的0.2倍，如图3-21a所示。底部太薄，不通孔强度低，同时背面容易产生外观缺陷。如果底部太薄，则可以考虑使用图3-21b所示的方法增强不通孔的强度。

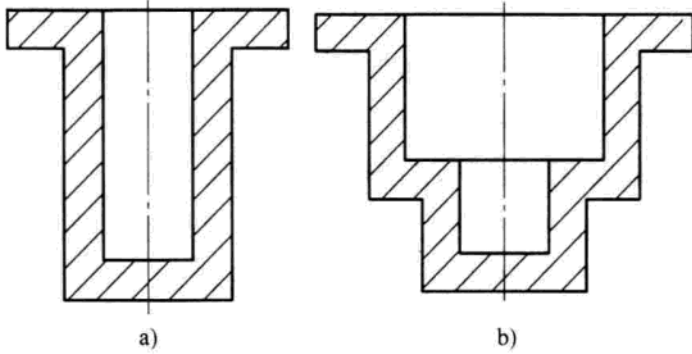


图 3-20 利用阶梯孔代替深孔

a) 原始的设计 b) 改进的设计

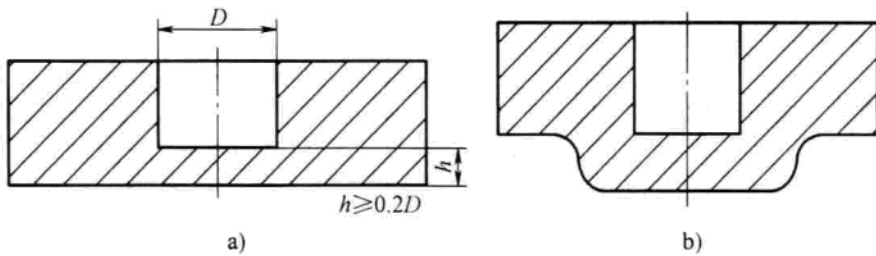


图 3-21 避免不通孔底部太薄

a) 避免孔底部太薄 b) 孔底部增强

3. 孔与孔的间距及孔与零件边缘尺寸推荐

孔与孔之间、孔与零件边缘之间的距离至少大于孔径或零件壁厚的1.5倍，即 $S \geq 1.5t$ （或 $1.5D$ ），取二者的最大值，如图3-22所示。

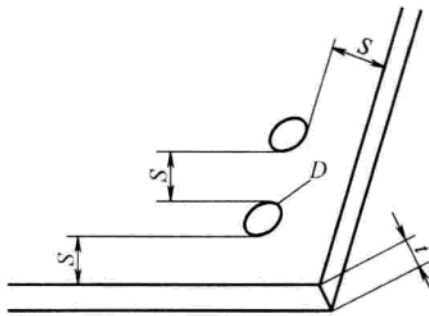


图 3-22 孔间距和孔与边缘的距离

4. 零件上的孔尽量远离受载荷部位

由于孔去除了材料，降低了零件的强度，同时孔的周围（特别

是有很多孔时)很容易产生熔接痕(见图3-23),零件的强度被进一步削弱。塑胶零件常常因为过多的孔而造成强度降低,因此在零件受载荷部位应尽量避免放置太多的孔。

5. 在孔的边缘增加凸缘以增加孔的强度

为了增加孔的强度和防止孔的变形,可以在孔的四周增加凸缘(见图3-24),对需要增加强度的长孔或槽也可以使用类似的设计。

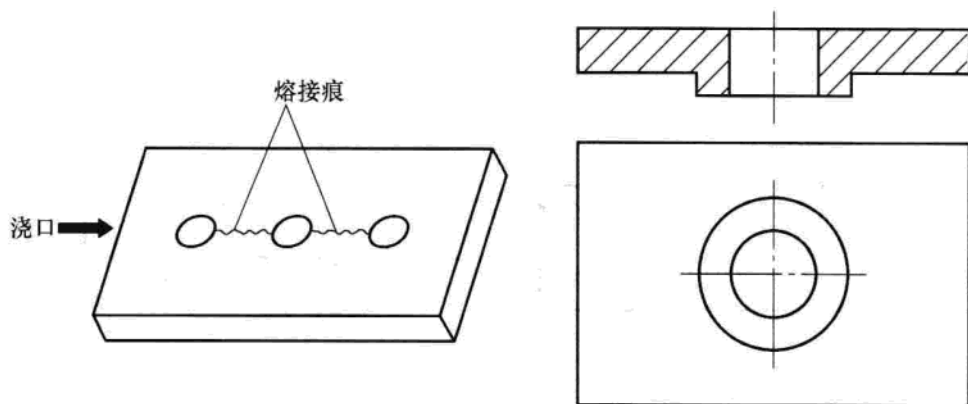


图 3-23 孔周围易产生熔接痕

图 3-24 孔周边增加凸缘以增加强度

6. 避免与零件脱模方向垂直的侧孔

为简化模具结构,降低模具成本,零件设计需要避免与脱模方向垂直的侧孔。孔的设计应尽量使得模具结构简单。

与零件脱模方向垂直的侧孔在模具上需要使用侧向抽芯机构,这会增加模具复杂度,造成模具成本的上升。在保证零件功能的前提下,可以通过设计优化来减少和避免侧向抽芯机构的使用。如图3-25所示的塑胶件,下侧的孔需要侧向抽芯机构,模具结构复杂;而上侧的孔由于设计优化则可以直接脱模,不需要侧向抽芯机构,模具结构简单。

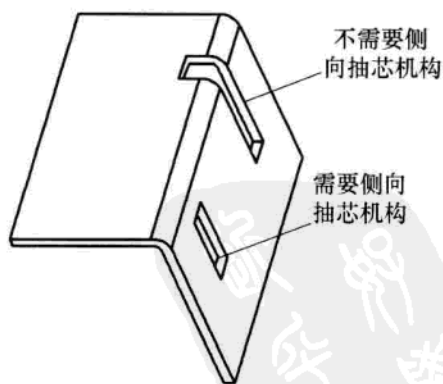


图 3-25 避免与零件脱模方向垂直的侧孔

7. 长孔的设计避免阻碍塑胶熔料的流动

长孔是指长而窄的孔。长孔的方向应该与塑胶熔料的流动方向一致，避免垂直于流动方向，以免阻碍塑胶熔料的流动。长孔的设计如图 3-26 所示。

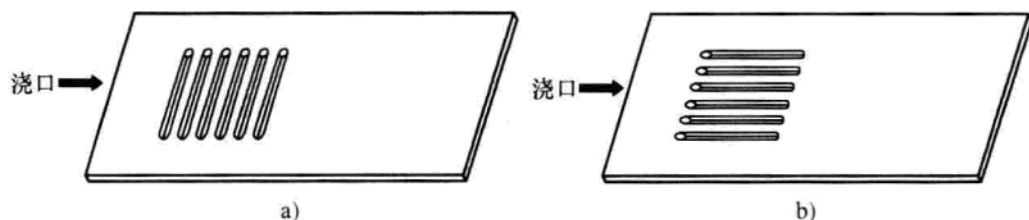


图 3-26 长孔方向与塑胶熔料流动方向一致

a) 原始的设计 b) 改进的设计

8. 风孔的设计

由于散热的需要，产品中常需要设计风孔。在一般情况下，风孔为圆孔时模具型芯为圆柱形，加工容易，模具成本低。

过多的风孔会造成零件强度降低，可以通过增加加强肋或凸缘等方法来增加风孔处零件的强度。

3.3.7 提高塑胶件强度的设计

塑胶件强度永远是机械工程师关心的一个主题。与金属零件相比，塑胶件强度一般比较低，但通过合理的零件设计，塑胶件强度可以大幅度增加，从而可以扩大塑胶件的应用范围。

1. 通过添加加强肋而不是增加壁厚来提高零件强度

零件设计时可以通过增加壁厚的方法来提高零件强度，但这往往是不合理的。零件壁厚增加不仅会增加塑胶件重量，而且容易使零件产生缩水、气泡等缺陷，同时增加注射生产时间，降低生产效率。为提高零件的强度，正确的方法是添加加强肋，而不是增加零件壁厚。添加加强肋既能提高零件强度，又可以避免零件发生缩水、气泡等缺陷以及生产效率较低等问题。当然，加强肋设计时相关尺寸必须遵循加强肋的设计原则，过大的加强肋厚度也会造成零件缩水、气泡等缺陷。

两种增加零件强度 2 倍的方法如图 3-27 所示。其一是增加壁厚，

其二是保持壁厚不变，添加加强肋。为达到零件强度增加 2 倍的目的，增加零件壁厚的方法需要增加 25% 的零件体积，而通过添加加强肋的方法仅仅需要增加 7% 的零件体积。由此可以看出，添加加强肋是提高零件强度最好的方法。

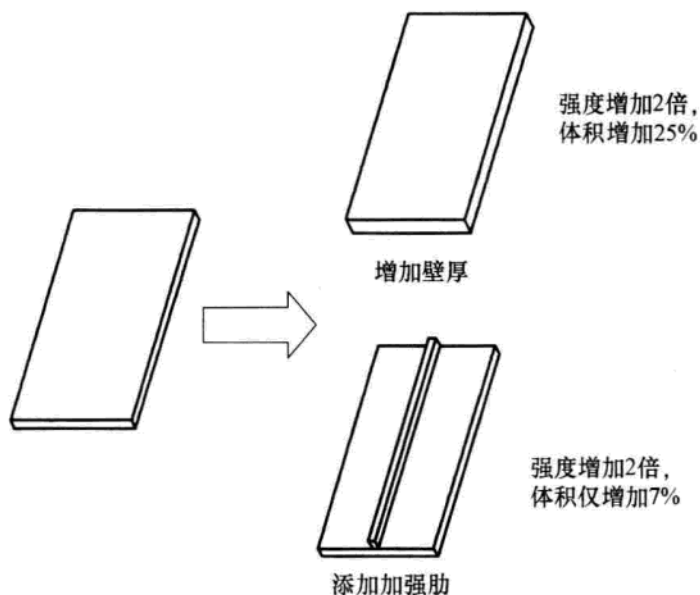


图 3-27 零件强度增加 2 倍的方法对比

2. 加强肋方向需要考虑载荷方向

需要注意的是，加强肋只能加强塑胶件一个方向的强度。加强肋方向需要考虑载荷方向，否则不能增加零件抵抗载荷的能力，如图 3-28 所示。

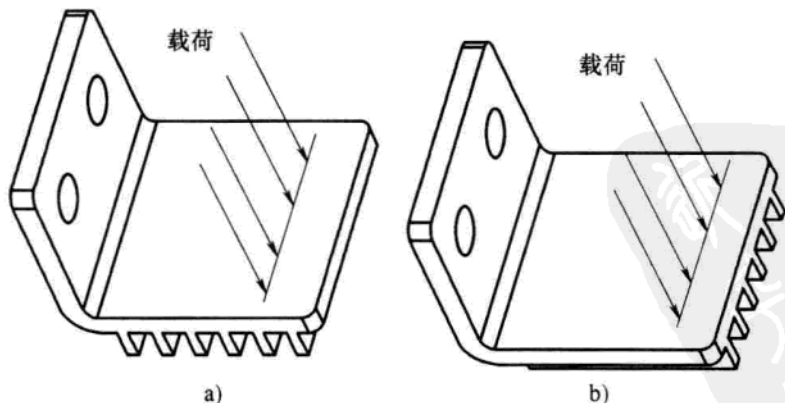


图 3-28 加强肋方向需要考虑载荷方向

a) 原始的设计 b) 改进的设计

如果零件承受的载荷是多个方向的载荷或扭曲载荷，可以考虑添加 X 形加强肋或发散形加强肋来提高零件强度，如图 3-29 所示。在日常生活中，塑胶凳子的背面常是通过 X 形加强肋或发散形加强肋来提高零件强度。

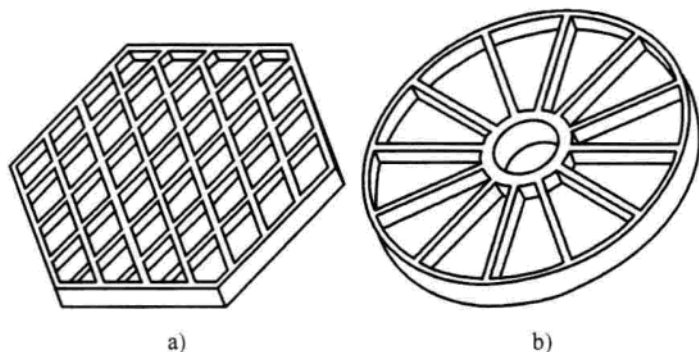


图 3-29 X 形加强肋和发散形加强肋

a) X 形加强肋 b) 发散形加强肋

3. 多个加强肋常比单个较厚或较高的加强肋好

多个加强肋的设计对零件强度的提高比单个较厚或较高的加强肋效果好，同时避免了零件表面缩水或加强肋顶端注射不满等质量问题，因此，当单个加强肋太高或太厚时，可以用两个较小的加强肋来替代，如图 3-30 所示。

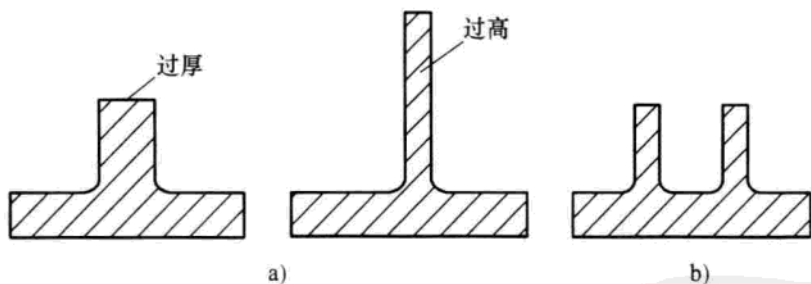


图 3-30 使用多个加强肋替代单个较厚或较高的加强肋

a) 原始的设计 b) 改进的设计

4. 通过设计零件增强剖面形状提高零件强度

通过设计零件增强剖面形状可以提高塑胶件的强度。常见的零件增强剖面包括 V 形、锯齿形和圆弧形，如图 3-31 所示。这种方法的缺点是零件不能提供一个平整的平面，在某些情况下不能使用。

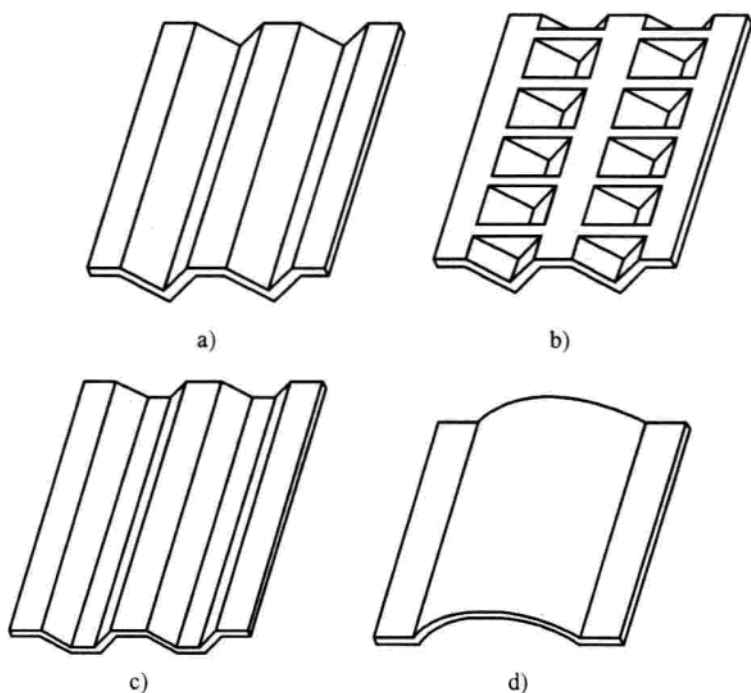


图 3-31 常见零件增强剖面

a) V形(一) b) V形(二) c) 锯齿形 d) 圆弧形

5. 增加侧壁和优化侧壁剖面形状来提高零件强度

避免平面型塑胶件设计。平面型的塑胶件强度非常低，可以通过四周增加侧壁来提高零件的强度，如图 3-32 所示。侧壁的形状可以是单纯的直壁。在条件允许时，曲面式侧壁或带增强剖面式侧壁更能提高零件的强度，如图 3-33 所示。

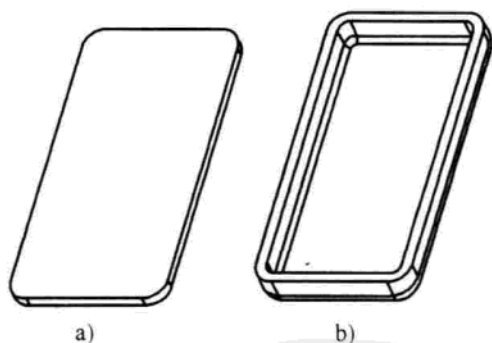


图 3-32 增加侧壁提高零件强度

a) 原始的设计 b) 改进的设计

6. 避免零件应力集中

零件应力集中常发生于零件尖角处、零件壁厚剧烈变化处、零件孔、槽及金属镶件处。零件应力集中会大幅降低零件的强度，使得零件在冲击载荷作用下发生失效。零件设计应当避免应力集中的发生。为防止零件应力集中，零件设计应严格遵循上述章节中的设计指南。

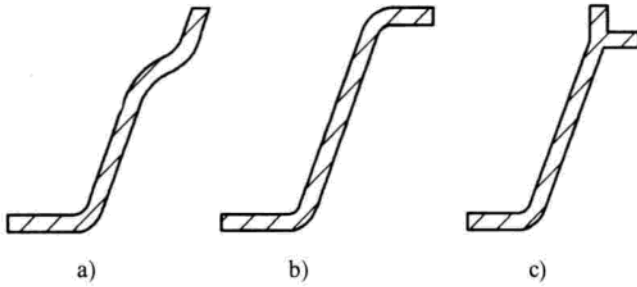


图 3-33 常见零件侧壁增强形状

a) 曲面式侧壁 b) 增强剖面式侧壁 (一) c) 增强剖面式侧壁 (二)

7. 合理设置浇口避免零件在熔接痕区域承受载荷

在零件注射过程中，塑胶熔料在经过孔、槽、支柱及零件尺寸较大处或者采用多个浇口时，塑胶熔料会有两个及两个以上的流动方向。当两个方向的塑胶熔料相遇时，在此区域产生熔接痕。

零件熔接痕区域是零件强度最低的区域之一，是最容易发生失效的区域，因此必须合理设置浇口的位置和数量，以避免零件在熔接痕区域承受载荷。如图 3-34 所示，在原始的设计中，浇口的位置使得熔接痕刚好处于零件所受载荷处，零件容易在载荷作用下失效；在改进的设计中，调整浇口的位置，使得熔接痕的位置避开零件所受载荷处，零件的可靠性大大增强。

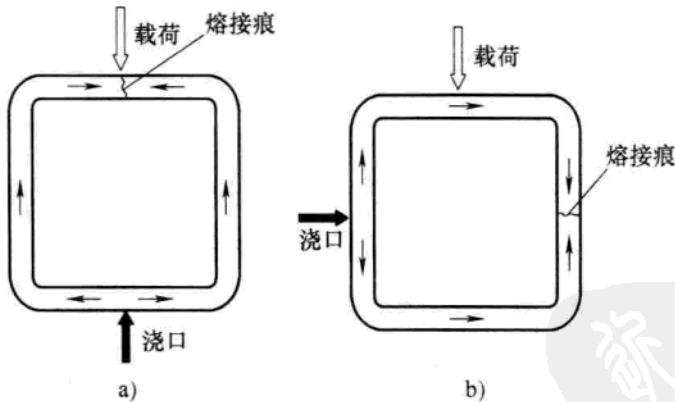


图 3-34 合理设置浇口，避免零件在熔接痕区域承受载荷

a) 原始的设计 b) 改进的设计

熔接痕的位置可以通过 Moldflow 等模流分析软件来预测。机械工程师可以在零件开模时，要求模具供应商提供零件的模流分析报告，从而合理地选择浇口的位置和数量。

8. 其他强度增强相关因素

1) 玻璃纤维增强塑料常用来代替普通塑胶材料来提高塑胶件强度。需要注意的是, 玻璃纤维增强塑胶只在玻璃纤维的方向上提高零件的强度。

2) 塑胶件承受压缩载荷的能力比承受拉伸载荷的能力强。

3) 在承受拉伸载荷时, 设计一致的零件剖面以均匀分散载荷。

4) 避免零件承受圆周载荷。零件承受圆周载荷时(如金属镶件处), 很容易发生破裂而失效。

5) 在承受冲击载荷时, 保持零件剖面的完整性, 避免在冲击载荷方向上零件剖面出现缺口和应力集中。

3.3.8 改善塑胶件外观的设计

在市场竞争日益激烈的今天, 产品外观成为吸引消费者购买产品的重要因素之一。由于塑胶材料本身以及注射工艺的特性, 塑胶件很容易产生缩水、气泡、熔接痕、困气、喷流等外观缺陷, 严重影响零件的外观质量。塑胶件发生外观质量问题的主要原因是零件设计的问题、模具设计的问题以及零件注射过程中注射工艺参数不正确的问题。对机械工程师来说, 首先需要从零件设计入手解决零件外观质量问题, 特别是当零件是产品外观零件时更应如此。产品内部零件的外观要求则可以适当放宽。

从零件设计的角度上, 除了零件设计需要满足上述章节的设计指南之外, 还可以从以下几个方面来提高塑胶件外观质量。

注: 本书把模具设计中浇口的选择和布局、模具通风和模具顶出结构等归结于零件设计, 并不是说机械工程师需要亲自进行模具设计, 而是因为机械工程师必须了解模具结构对零件外观质量(或者零件强度)的影响, 并检查零件模具结构是否对产品的外观(或者零件强度)产生负面的作用, 如果有则要求改进模具的设计, 因为模具工程师往往并不知道零件外观(或者零件强度)的要求。例如, 他们可能错误地设计和布置浇口, 以至于在产品重要外观面出现熔接痕, 此时机械工程师就需要指出模具设计的错误并要求其改正。

1. 选择合适的塑胶材料

塑胶材料的选取对产品的外观起着重要的作用，不同的塑胶材料有着不同的外观质量表现。例如，相对于非玻璃纤维增强的材料，玻璃纤维增强的材料注射成型后一般外观质量比较低，而且容易翘曲。

2. 避免零件外观表面缩水

零件表面缩水是塑胶件最容易发生的外观缺陷之一。缩水发生在零件壁厚较大处所对应的零件外表面，例如加强肋、支柱与壁的连接处所对应的零件外表面，如图 3-35 所示。

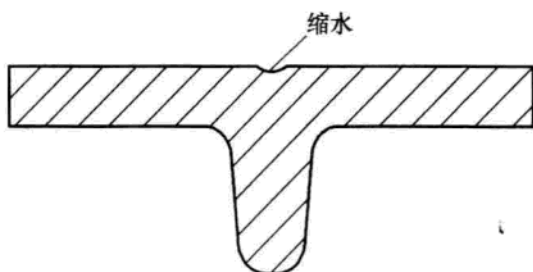


图 3-35 较厚的加强肋造成零件对应表面缩水

(1) 通过设计掩盖零件

表面缩水 在允许的情况下，可以通过 U 形槽、零件表面断差的设计以及表面咬花等方式来掩盖塑胶件表面缩水，如图 3-36 所示。

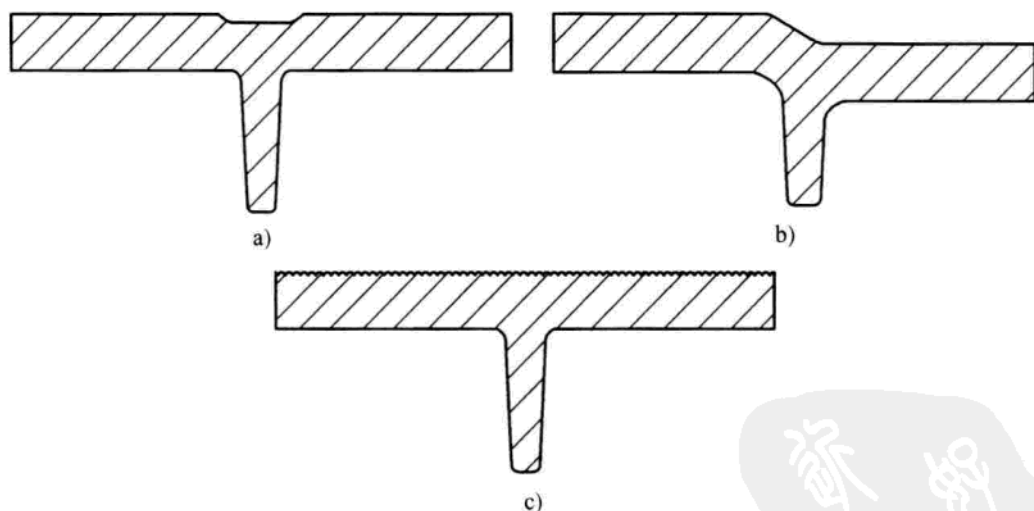


图 3-36 通过设计掩盖零件表面缩水
a) U 形槽 b) 表面断差 c) 咬花

(2) “火山口”设计 支柱壁厚处或加强肋壁厚处局部去除材料（我国台湾称之为“火山口”），可以大幅降低零件外观缩水的可能性，如图 3-37 所示。当然，“火山口”设计会在一定程度上降低

支柱或加强肋的强度。

(3) 合理设置浇口的位置 零件上离浇口越远处,越容易产生表面缩水。对于零件重要外观表面或对表面缩水要求高的区域,可以合理设计浇口的位置使其靠近该区域,减小零件表面缩水的

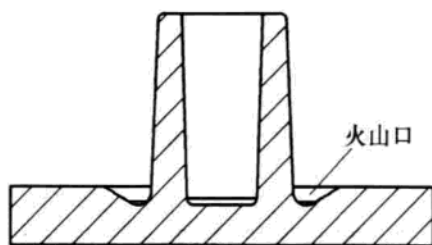


图 3-37 支柱和加强肋
“火山口”设计

同时,浇口的位置应使得塑胶熔料从壁厚处流向壁薄处,如图 3-38 所示。如果塑胶熔料从壁薄处流向壁厚处,壁薄处首先冷却凝固,壁厚处表面很容易缩水,内部则容易产生气泡。

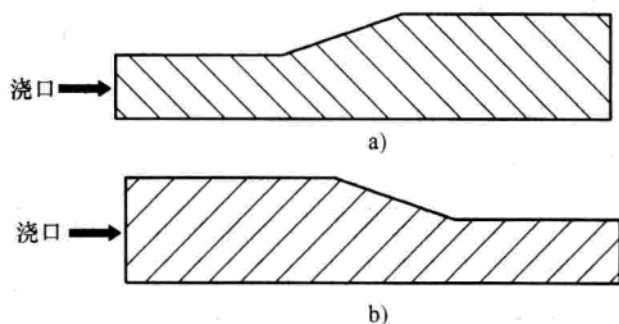


图 3-38 合理设置浇口的位置

a) 错误的浇口位置 b) 正确的浇口位置

3. 避免零件变形

零件变形不但造成零件尺寸精度差,容易产生装配问题和影响零件功能的实现,同时也影响零件的外观。零件发生变形的原因很多,主要包括四个方面:零件在塑胶熔料流动方向和横截面方向上不同的收缩比、零件不均匀的冷却、零件壁厚不均匀、零件几何特征不对称等。

(1) 零件在塑胶熔料流动方向和横截面方向上不同的收缩比

零件在塑胶熔料流动方向和横截面方向上不同的收缩比造成了零件的变形,如 3-39 所示。非玻璃纤维增强材料在塑胶熔料流动方向上收缩率比横截面方向上大,造成塑胶在塑胶熔料流动方向上收缩大,在横截面上收缩小,零件发生变形;而玻璃纤维增强材料则

刚好相反，在塑胶熔料流动方向上收缩率比横截面方向上小，造成塑胶在塑胶熔料流动方向上收缩小，在横截面上收缩大，零件发生变形。

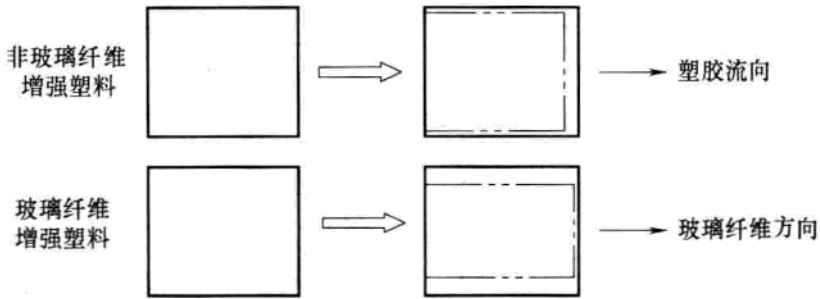


图 3-39 不同的收缩比造成零件变形

(2) 零件不均匀的冷却 零件在壁厚方向上不均匀的冷却会造成零件变形。不均匀的冷却一方面可能是因为注射模具流道设计不平衡造成的，另一方面可能是零件本身外侧的散热面积大于内侧的散热面积，外侧散热较慢、冷却较慢，而内侧散热较快、冷却较快（见图 3-40），零件变形的方向总是朝着较热的零件面。

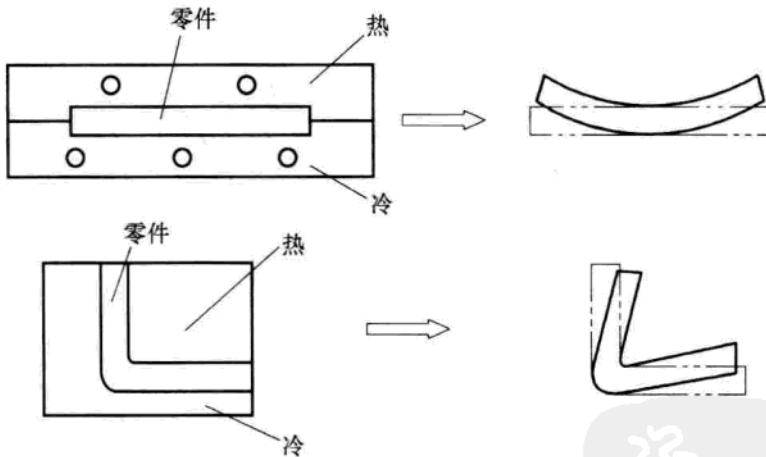


图 3-40 零件不均匀的冷却造成零件变形

(3) 零件不均匀的壁厚造成变形 塑胶件收缩率随着零件壁厚的增加而增加，不均匀壁厚造成的收缩差异是热塑性塑胶件发生变形的主要原因之一。具体地说，塑胶件剖面壁厚的变化通常引起冷却速率差异与结晶度差异，结果造成零件收缩差异与零件变形，如图 3-41 所示。

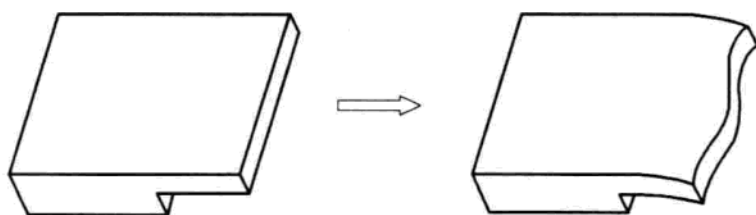


图 3-41 零件不均匀的壁厚造成零件变形

(4) 零件不对称的几何形状造成零件变形 零件不对称的几何形状会导致冷却不均匀和收缩差异,造成零件变形,如图 3-42 所示。

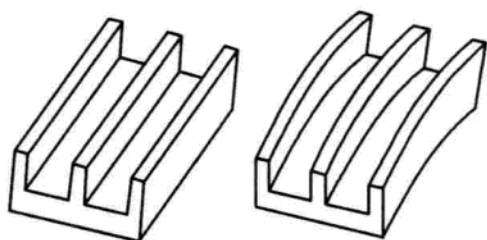
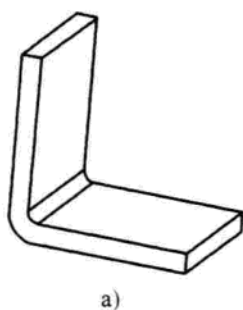


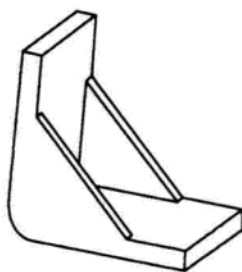
图 3-42 零件不对称的几何形状造成零件变形

(5) 预测零件变形趋势,通过设计减小零件变形 前面

讲述了零件变形的原因和方式,但这不是重点,产品设计重点是预测零件的变形趋势并通过零件设计优化减小甚至避免零件变形的发生,如图 3-43、图 3-44 所示。



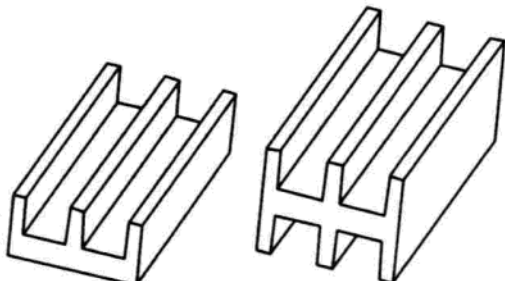
a)



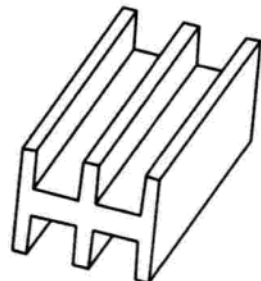
b)

图 3-43 添加加强肋减小零件变形

a) 原始的设计 b) 改进的设计



a)



b)

图 3-44 对称零件设计减小零件变形

a) 原始的设计 b) 改进的设计

4. 外观零件间美工沟的设计

两个外观塑胶件之间配合时,因为零件制造误差和装配误差的存在,两个零件之间的间隙和断差(指一个零件的表面高于另外一个零件的表面)总是会存在的,这会影响产品的外观,如图 3-45a 所示。

通过美工沟的设计可以掩盖两个外观塑胶件之间的间隙,从而

提高产品的外观质量。常用的美工沟的设计有两种，如图 3-45b 和图 3-45c 所示。美工沟的大小根据产品的尺寸而定，如计算机主机面板美工沟的大小为 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 。在两种美工沟设计中，第二种方法优于第一种。第一种美工沟的设计因为间隙的存在使得消费者有可能看到产品内部零件，同时没有防尘的作用。

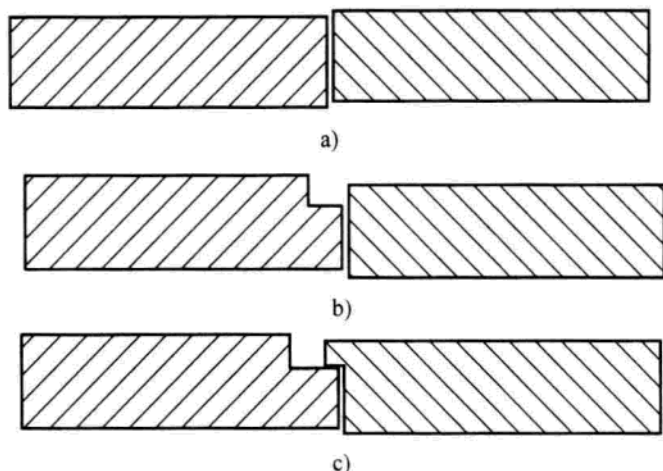


图 3-45 美工沟的设计

a) 间隙和断差永远存在 b) 美工沟的设计之一 c) 美工沟的设计之二

当两个外观塑胶件之间的关系是前后或上下关系时，例如手机的上下盖，此时断差成为影响零件外观的一个因素。如果后面或下面的零件高于前面或上面的零件时，产品就会变得非常难看，因此在这种情况下美工沟设计时应当使后面或下面的零件低于前面或上面的零件。

5. 避免外观零件表面出现熔接痕

熔接痕也是常见的塑胶件表面外观缺陷，需要避免。具体方法如下：

- 1) 塑胶件表面咬花可以部分掩盖熔接痕，但并不能完全掩盖熔接痕。
- 2) 喷漆可以掩盖熔接痕。
- 3) 合理设置浇口的位置和数量，避免在零件重要外观表面产生熔接痕。
- 4) 保证模具通风顺畅。

6. 避免外观零件表面出现断差或毛边

模具公母模交汇处、型芯与型芯交汇处、型芯与公母模交汇处等很容易出现断差或毛边，因此，机械工程师应当仔细检查模具结构中的分型面位置，避免在零件重要外观面出现断差或毛边，影响零件外观质量。

另外，应避免把顶出结构放置于零件的重要外观面处，这也会产生毛边。对于透明塑胶件更应特别注意。

3.3.9 降低塑胶件成本的设计

1. 设计多功能的零件

注射模具通常比较昂贵，设计多功能的塑胶件，能够分担模具成本，从而降低零件开发成本；同时，由于塑胶件可以具有复杂形状和内部结构，一个塑胶件往往可以替代两个甚至多个传统工艺方法加工的零件，而多个塑胶件在有些时候也可以合并成一个塑胶件以节省成本。

例如，在电子电器产品中，合理的电缆线走向和固定对产品的散热和电磁干扰等至关重要。电缆线固定一般通过专用的束线带或线夹来完成，而在塑胶件中增加一些简单的特征即可实现电缆线的固定，如图 3-46 所示，从而减少束线带或线夹的使用。

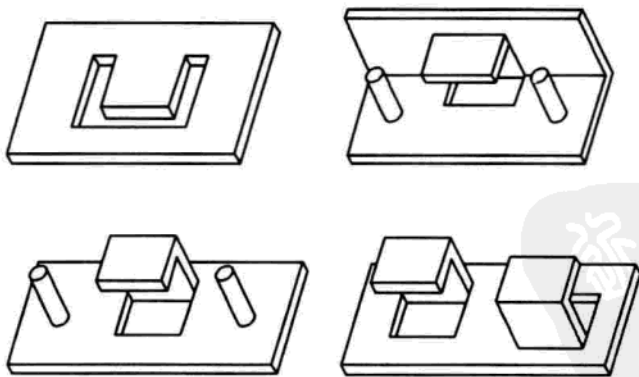


图 3-46 设计多功能塑胶件代替束线带或线夹

2. 降低零件材料成本

塑胶材料是石油工业的产品之一。随着石油资源储备的不断减

少，塑胶材料的价格也在不断增加。因此，在保证产品功能等的要求下，零件设计尽可能使用较少的材料。较少的材料能够降低零件成本，同时缩短零件注射加工的时间。在减少零件材料的使用时，需要注意：

- 1) 通过添加加强肋而不是增加壁厚的方法来提高零件的强度。
- 2) 零件较厚的部分去除材料。

3. 简化零件设计，降低模具成本

在第2章面向装配的设计中讨论过 KISS 原则。KISS 原则也适用于单个零件的设计，塑胶件的设计也是越简单越好。复杂的塑胶件形状和结构不但增加模具结构的复杂性，增加模具的成本，同时影响零件的质量和性能。

塑胶件应尽可能地设计成多功能的零件，但多功能的零件并不意味着复杂的零件。如果塑胶件多功能的设计反而造成了产品整体成本的上升，这恰恰违反了塑胶件多功能的目的，因为塑胶件多功能的目的之一就是降低产品成本。

4. 避免零件严格的公差

公差是与零件成本成正比的，公差越严格，零件成本越高。严格的零件公差要求更加精密的零件模具制造以及高精度的注射设备。在保证零件功能等前提下，应优化产品的设计，尽量避免使用严格的公差，对塑胶件也是如此。

5. 零件设计避免倒扣

倒扣是指零件无法正常脱模的特征，例如位于模具开模方向上侧的开口和侧面的凸台等。在模具中，倒扣通过侧向分型与抽芯机构来实现，而侧向分型与抽芯机构是模具中比较复杂的结构之一，同时也是增加模具成本的一个重要因素。常用的侧向分型与抽芯机构包括斜销和滑块。

为降低模具成本，零件设计避免倒扣是一个重要的手段。

(1) 有些外侧倒扣可以通过重新设计分型面来避免 如图 3-47 所示，重新设计分型面可使零件顺利脱模。

(2) 重新设计零件特征避免零件倒扣 很多零件倒扣特征可以通过特征的优化设计而去除，从而避免使用侧向抽芯机构，降低零

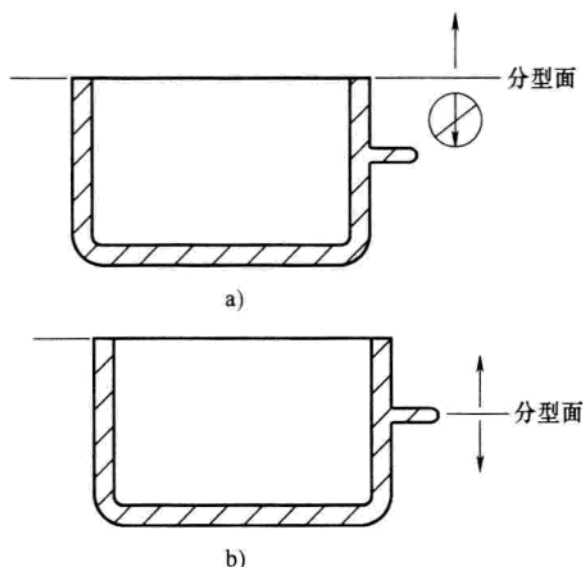


图 3-47 重新设计分型面避免零件倒扣

a) 零件不能脱模 b) 零件顺利脱模

件模具成本，如图 3-48 所示。

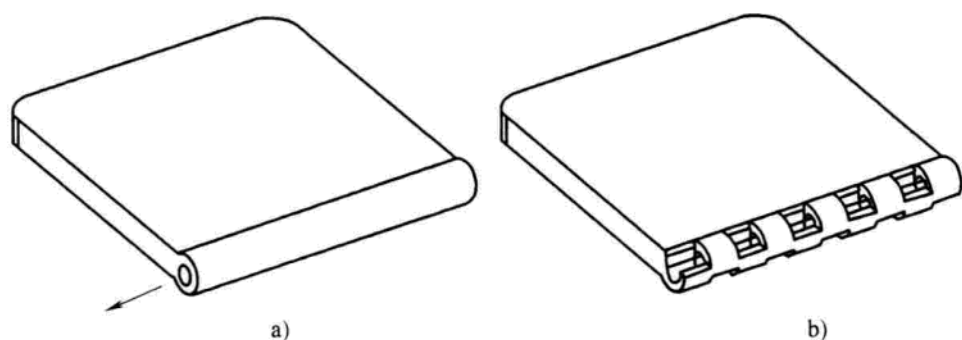


图 3-48 重新设计零件特征避免零件倒扣

a) 铰链口倒扣，需要侧向抽芯机构 b) 铰链口可以顺利脱模

如图 3-49 所示，原始的设计中，零件存在倒扣，需要通过斜销或滑块等侧向抽芯结构来脱模；通过零件特征的重新设计，可以避免使用侧向抽芯机构，在改进的设计中提供了四种方法，见图 3-49b、c、d 和 e。

6. 降低模具修改成本

当一副塑胶件注射模具制造完成后，再进行模具修改的成本非常高。不正确的塑胶件设计往往会增加模具修改次数，提高模具成本，从而增加零件和产品的成本。因此，塑胶件的设计需要尽量减

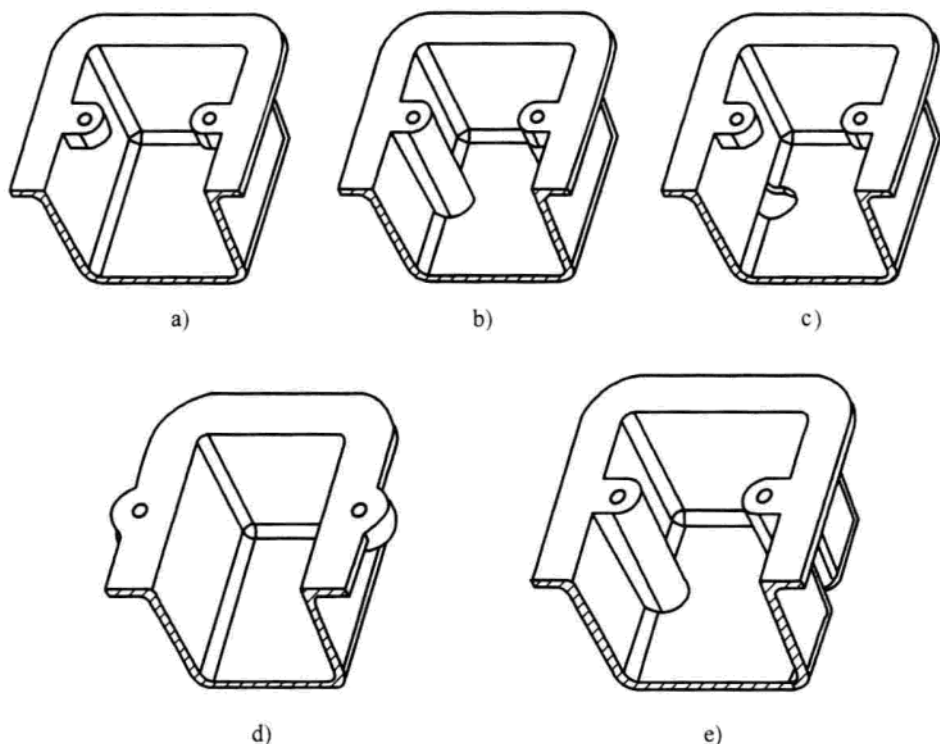


图 3-49 重新设计零件特征避免零件倒扣

- a) 原始的设计 b) 改进的设计一 c) 改进的设计二
d) 改进的设计三 e) 改进的设计四

少甚至避免模具的修改。

(1) 零件的可注射性设计 塑胶件设计时应当充分考虑零件的可注射性。零件可注射性好，零件注射成型后质量高，模具修改次数就少，模具修改费用低。如果塑胶件设计不考虑零件的可注射性，零件可注射性差，零件注射成型后质量低，模具修改次数多，模具修改费用就高。因此，塑胶件设计必须遵循本章所涉及的塑胶件设计指南。

(2) 减少产品设计修改次数 当然，模具修改还可能是因为塑胶件在整个产品中不能实现其应有的功能，因此在模具开发之前，机械工程师需要通过 CAE 分析和运动仿真、样品制作等手段来完善和优化零件的设计，确保零件设计万无一失后，再进行模具的设计和开发，从而可以减少模具制造完成后的产品设计修改。

(3) 避免添加材料的模具修改 模具去除材料比较容易，修改费用低；模具添加材料比较复杂，修改费用高。因此，塑胶件的设

设计修改最好是使得模具去除材料而不是添加材料，那么塑胶件的设计修改就应当是添加材料，而不是去除材料。在零件设计时，如果对零件的设计没有把握，则可以对零件尺寸保留一定的余量，然后通过去除材料来验证零件的设计。

7. 使用卡扣代替螺钉等固定结构

塑胶件的固定方式包括卡扣、螺钉、热熔和超声波焊接等。卡扣能够快速装配和快速拆卸，同时卡扣的成本最低，在满足产品装配以及功能的前提下，使用卡扣能够降低零件的成本。

8. 其他

- 1) 零件外观装饰特征宜向外凸出，模具加工时为下凹，加工容易。
- 2) 零件上文字和符号宜向外凸出，模具加工时为下凹，加工容易。

3.3.10 注射模具可行性设计

产品设计需要考虑注射模具结构的可行性和提高模具的使用寿命。

1. 卡扣等结构应为斜销（或滑块）预留足够的退出空间

卡扣是塑胶件常用的一种装配方式。斜销（或滑块）在零件脱模时有一个从卡扣中退出的行程，零件的设计需要为斜销（或滑块）的退出提供足够的运动空间，否则会出现斜销（或滑块）无法退出或者斜销（或滑块）在退出过程中与零件上其他特征（如支柱等）发生干涉的现象，如图 3-50 所示。

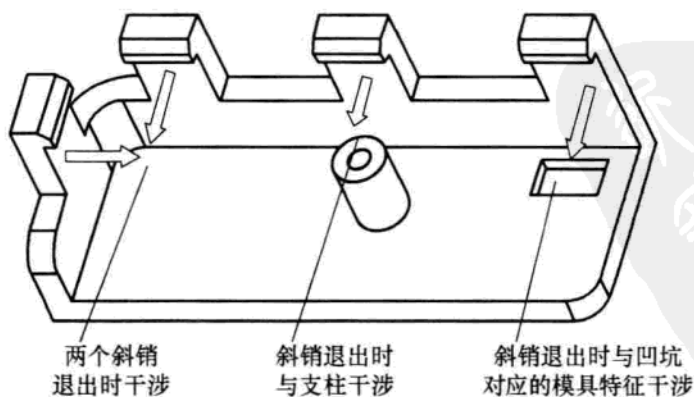


图 3-50 斜销应当有足够的退出空间

2. 避免模具出现薄铁以及强度太低的设计

在塑胶件中，如果两个特征距离非常近，那么在模具上相对应的部位就是一块薄铁，如图 3-51 所示。这容易造成模具强度低、寿命短，因此需要避免在模具上出现薄铁以及模具强度太低的零件设计。

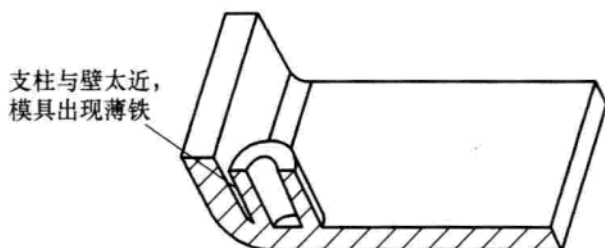


图 3-51 避免模具出现薄铁和模具强度太低

3.3.11 注射模具讨论要点

注射模具讨论是指机械工程师检查模具设计和模具结构并从产品设计的角度提出修改意见。一个优秀的机械工程师应当能够熟悉注射模具相关知识，清楚模具结构对产品的强度、功能和外观等方面产生的影响，并针对模具结构中分型面、浇口、顶针等设计作出正确的判断。

一般来说，在注射模具正式开始加工之前，模具供应商应当提供模具的设计图样，包括分型面、浇口、顶针等设计和模流分析报告。如果模具相关设计影响了零件强度、功能和外观等，机械工程师应要求模具供应商修改模具设计，否则，当模具加工完成后才发现问题的，再来修改模具就耗费时间和金钱了。以下是注射模具讨论要点。

1. 分型面的设计

分型面是注射模具公模和母模的分界线。分型面的选择一般需要注意以下几点：

- 1) 不得位于外观明显位置而影响产品外观质量。
- 2) 尽量避免倒扣的产生，简化模具结构，降低模具成本。
- 3) 便于零件脱模，一般应使得零件开模后零件留在公模侧，因为在公模侧设置脱模机构较容易。

4) 分型面应有利于保证塑胶零件的某些尺寸精度要求, 例如同轴度、平行度等, 特别是产品设计对这些尺寸精度有较高的要求时。

5) 对于高度较大、脱模斜度较小的特征可以中间分模。

6) 位于模具加工和产品后加工容易处。

7) 方便零件的咬花和抛光。

2. 浇口的选择

1) 浇口应设置在零件壁厚较大的部分, 保证充模顺利和完全。

2) 浇口应设置在使塑料充模流程最短处, 以减少压力损失、有利于模具排气。

3) 浇口的位置决定了熔接痕的位置, 可通过模流分析或经验判断产品因浇口位置而产生熔接痕处是否影响产品外观和功能, 可加设冷料穴予以解决。

4) 在细长型芯附近避免设置浇口, 以防止塑胶熔料直接冲击型芯产生变形错位或弯曲。

5) 大型或扁平产品建议采用多点进浇, 以防止产品翘曲变形和缺料。

6) 浇口尽量设置在不影响产品外观和功能处, 可在边缘或底部。对于透明的塑胶件更应当特别注意浇口位置的隐藏, 否则浇口会严重影响产品的外观。

7) 浇口尺寸由产品大小、几何形状结构和塑料种类决定, 可先取小尺寸再根据试模状况进行修正。

8) 一模多穴时相同的产品采用对称进浇方式, 对于不同产品在同一模具中成型时优先将最大产品放在靠近主流道的位置。

3. 顶出系统的设计

1) 为避免零件因顶出而变形, 顶出机构应设置于零件强度较高的位置, 如加强肋、零件边缘处等。

2) 顶出力和位置应均衡设置, 确保产品不变形、不顶破。

3) 顶出机构须设置在不影响产品外观和功能处, 对于透明的塑胶件更应该注意顶出机构及其位置的选择。

4) 尽量使用标准件, 安全可靠, 并且有利于制造和更换。

3.4 塑胶件的装配方式

塑胶件的装配方式大致可以分为卡扣、机械紧固和焊接三大类。每一类装配方法有各自的优缺点，见表3-6。机械工程师应当在产品设计的最初阶段就根据产品的装配要求和工厂现有装配设备和技术等选择合适的装配方式。

表3-6 塑胶件装配方式优缺点对比

装配方式	优点	缺点
卡扣	<ol style="list-style-type: none"> 1. 成本低 2. 可以拆卸 3. 设计灵活 4. 快速装配和拆卸 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 卡扣配合间隙的存在可能会使得固定不牢固和产生噪声 2. 不可用于有预紧力下的装配，长期受力下蠕变失效
机械紧固（自攻螺钉、螺钉、螺柱、铆钉）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 稳健的设计 2. 可以反复拆卸 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 支柱在扭力作用下破裂 2. 滑丝（自攻螺钉） 3. 成本中等
焊接（超声波焊接、振动焊接）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 强度高 2. 没有蠕变问题 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 需二次加工 2. 不可拆卸 3. 有些塑胶材料之间焊接性能差 4. 成本中等/较高

当然，塑胶件的装配方式可以是以上几种方式的组合，多种方式之间取长补短，会取得意想不到的效果。例如，卡扣和螺钉的组合，不但保证了良好的固定效果，同时装配简单、快速。

3.4.1 卡扣装配

客户要求采用无螺钉设计，于是我们使用卡扣装配，但做跌落测试时卡扣断裂了，我们不知道该怎么办。

——迷茫的工程师

卡扣是塑胶件装配方式中最简单、最快速、成本最低、最环保的装配方式。卡扣装配时无须使用螺钉旋具等辅助工具，装配过程简单，只需一个简单的插入动作即可完成两个或多个零件的装配。

1. 卡扣的分类

卡扣有多种分类方式。根据卡扣的形状，常用的卡扣可以分为直臂卡扣、L形卡扣、U形卡扣和圆周卡扣等，如图 3-52 所示。相对于直臂卡扣，由于有效长度的增加，L形和U形卡扣具有较大的弹性。

根据卡扣是否可以拆卸，卡扣分为可拆卸式卡扣和不可拆卸式卡扣，如图 3-53 所示。

根据卡扣的截面是否变化，卡扣分为直臂卡扣和锥形卡扣，如图

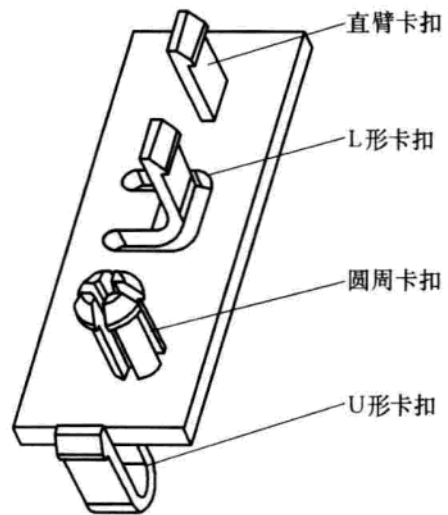


图 3-52 常用卡扣形状

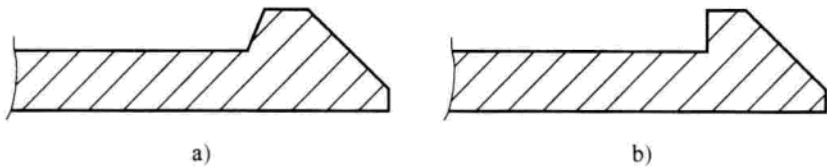


图 3-53 可拆卸式卡扣与不可拆卸式卡扣

a) 可拆卸式卡扣 b) 不可拆卸式卡扣

3-54 所示。锥形卡扣是从卡扣的根部开始变细，与直臂卡扣相比，在卡扣根部厚度相同的情况下，锥形卡扣能有效地减小卡扣的应力以及允许更大的变形量。锥形卡扣的另外一个应用是，当直臂卡扣强度不够时，可以在其根部增加材料形成一个锥形卡扣来增加强度。

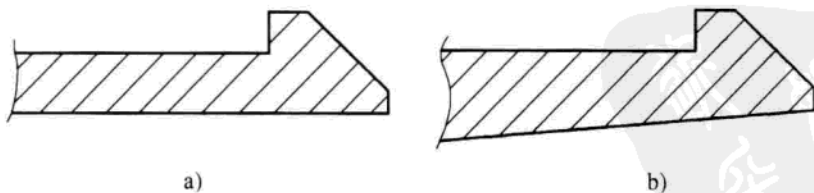


图 3-54 直臂卡扣与锥形卡扣

a) 直臂卡扣 b) 锥形卡扣

2. 卡扣设计注意事项

在进行卡扣设计之前，需要了解以下重要因素：

- 1) 使用塑胶材料的力学性能；
- 2) 要装配和拆卸的次数；
- 3) 装配过程中卡扣能够承受的应力和应变；
- 4) 装配后作用于卡扣的机械压力。

(1) 卡扣的尺寸 卡扣的尺寸需要保证卡扣具有足够的强度和弹性，使得卡扣在装配或拆卸过程中不会发生折断而失效，因此合理的卡扣尺寸设计至关重要。一个典型的直臂卡扣尺寸设计如图 3-55 所示。

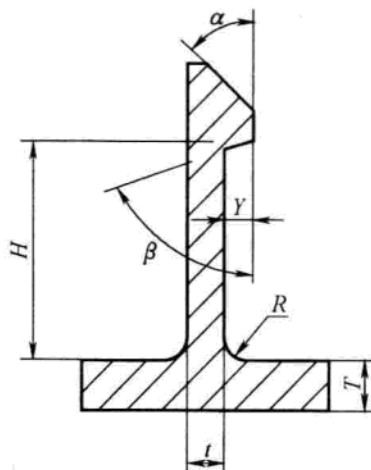


图 3-55 卡扣的尺寸

卡扣厚度 $t = (0.5 \sim 0.6)T$

卡扣的根部圆角半径 $R_{\min} = 0.5t$

卡扣的高度 $H = (5 \sim 10)t$

卡扣的装配导入角 $\alpha = 25^\circ \sim 35^\circ$

卡扣的拆卸角度 β :

$\beta \approx 35^\circ$ 用于不需外力的可拆卸的装配

$\beta \approx 45^\circ$ 用于需较小外力的可拆卸的装配

$\beta \approx 80^\circ \sim 90^\circ$ 用于需很大外力的不可拆卸的装配

卡扣的顶端厚度 $Y \leq t$

卡扣的厚度和高度是决定卡扣强度和弹性的主要因素。卡扣厚度太小则强度弱，卡扣不能承受较大的组装力；卡扣厚度太大则卡扣没有弹性，会因为是在装配过程中没有足够的偏移量而发生折断，同时卡扣对应的塑胶壁容易出现缩水缺陷。

不同的塑胶材料因为其弹性模量等参数不同，其卡扣的尺寸会有所不同，可以通过相关的公式计算出所需要的卡扣尺寸。当然，最好的办法是通过有限元分析来验证卡扣的尺寸设计是否满足受力需求。

(2) 卡扣根部增加圆角避免应力集中 卡扣最常见的失效方式是由于卡扣根部与零件壁尖锐连接，从而导致卡扣根部应力集中，以至于在装配或拆卸过程中发生断裂，因此卡扣根部需要避免尖角，至少保证卡扣厚度一半大小的圆角。卡扣的根部圆角设计如图 3-56

所示。

(3) 卡扣均匀分布

如果两个零件之间通过卡扣配合，那么卡扣需要均匀设置在零件的四周，以均匀承受载荷。如果零件容易发生变形，可以考虑让卡扣靠近零件容易变形的地方，如零件的角落处。

(4) 使用定位柱辅助零件装配和保证装配尺寸

精度 零件之间如果完全通过卡扣配合，由于卡扣尺寸精度较低，很难保证零件之间的装配精度要求，这是卡扣装配的缺点。此时，可以通过增加定位柱和定位孔来保证零件之间的装配尺寸和提高装配精度。

使用定位柱和定位孔还有另外两个好处。其一，在两个零件装配过程中，适当高度的定位柱和定位孔先与卡扣装配特征之间接触（也就是说，塑胶件上的定位柱高度高于卡扣的高度），可以为零件的装配过程提供导向，提高装配效率，此时定位柱的作用就起着导向的作用；其二，使用定位柱可以有效避免由于粗暴装配动作而发生的卡扣损坏。

定位柱的使用如图 3-57 所示。

(5) 卡扣设计避免增加模具复杂度 不合理的卡扣设计很容易增加注射模具的复杂度（见图 3-58a），零件需要侧向抽芯机构，增加模具成本。适当的卡扣设计优化就能简化模具结构（见图 3-58b）。在卡扣根部开孔就

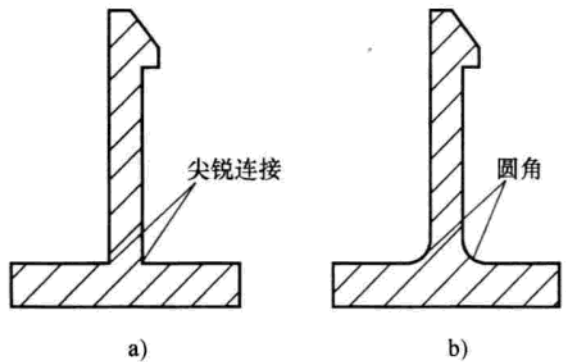


图 3-56 卡扣的根部圆角

a) 原始的设计 b) 改进的设计

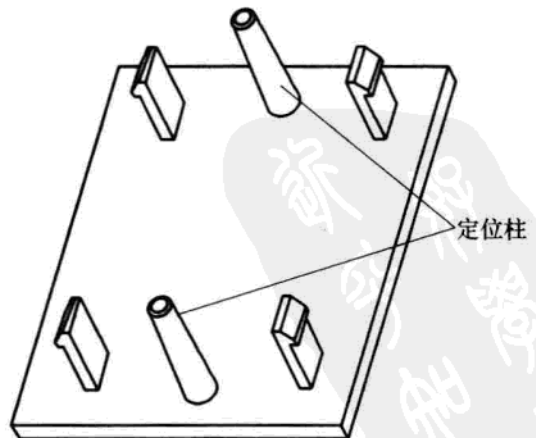


图 3-57 使用定位柱辅助卡扣装配

可避免倒扣，注射模具不需要侧向抽芯机构。

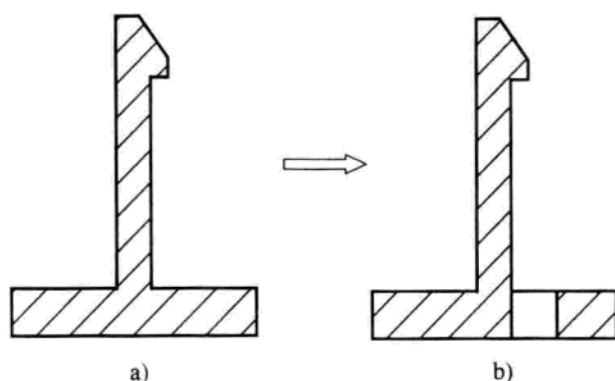


图 3-58 卡扣设计避免增加模具复杂度

a) 卡扣倒扣，需要侧向抽芯机构 b) 卡扣不需要侧向抽芯机构

(6) 卡扣设计需要考虑模具修改的方便性 卡扣设计一般需要经过多次的设计修改（包括修改卡扣的长度、厚度、偏移量等）才能满足零件的装配要求，因此，卡扣的设计尺寸可以稍微偏小，而不是一次性地把卡扣的尺寸做足，为之后的模具修改提供方便。

3.4.2 机械紧固

1. 紧固件装配

塑胶件可以通过标准的螺栓、螺钉和螺母等通用紧固件来实现装配。由于紧固件由铁或铜等金属构成，强度较高，而相对来说，塑胶件强度较低，因此在使用紧固件进行塑胶件的装配时，需要避免塑胶件承受较大的压应力而发生变形甚至折断。

在使用紧固件装配时，需要考虑到：

1) 避免使用过大的扭矩来进行装配。过大的扭矩容易造成塑胶件承受过大的压应力而失效。在装配线上，可以通过使用扭力螺钉旋具或扭力扳手等来控制装配过程中扭矩的大小。

2) 避免使用较小头型的螺栓（螺钉）。使用较大头型的螺栓（螺钉）、有肩螺栓或者使用垫圈来扩大塑胶件与紧固件的接触区域，从而减小塑胶件承受的压应力，如图 3-59 所示。

3) 避免使用平头螺钉或平头拉钉。这种圆锥形紧固件会造成塑胶件承受圆周应力而失效，如图 3-60 所示。

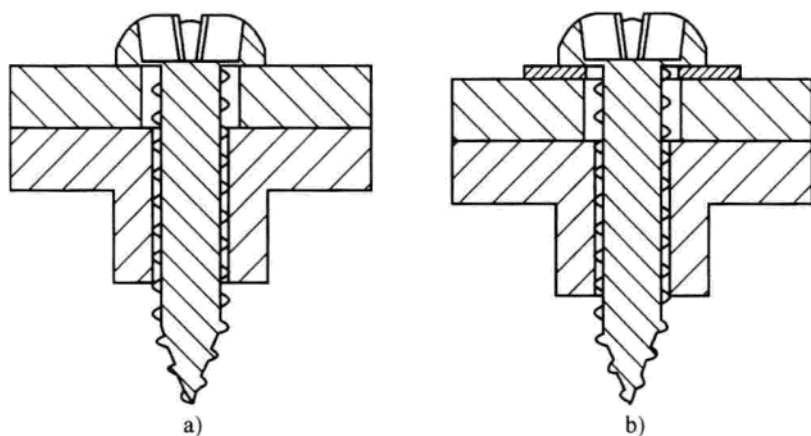


图 3-59 避免使用较小头型的螺栓（螺钉）

a) 原始的设计 b) 改进的设计

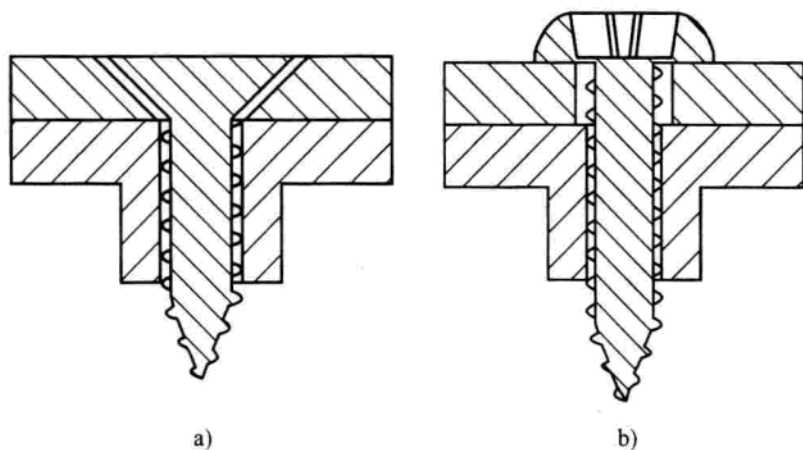


图 3-60 避免使用平头螺钉

a) 原始的设计 b) 改进的设计

4) 可以通过塑胶件的优化设计来避免塑胶件承受较大的应力，如图 3-61 所示。

2. 自攻螺钉

自攻螺钉 (self-tapping screw) 包括螺纹切削自攻螺钉 (thread-cutting screw) 和螺纹成形自攻螺钉 (thread-forming screw)，如图 3-62 所示。

螺纹切削自攻螺钉在螺纹尾端有一道或多道切削口，使之在旋入塑胶件的过程中，在塑胶件上切削出配合的阴螺纹。螺纹切削自攻螺钉常用于脆性较大或比较坚硬的塑胶中，例如热固性塑胶和高

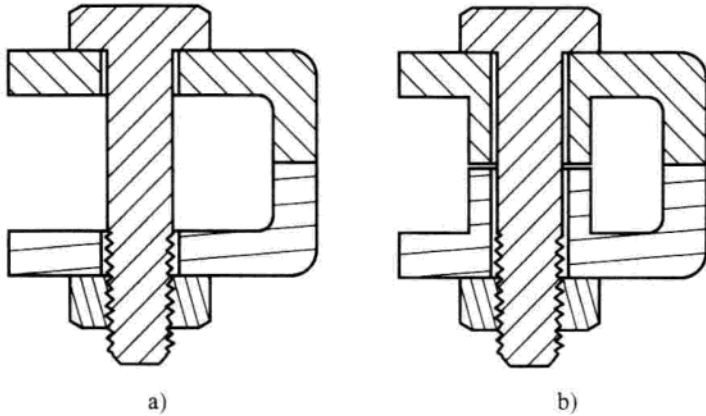


图 3-61 避免使塑胶件承受较大的应力

a) 原始的设计 b) 改进的设计

填充(50%以上)热塑性塑胶。

螺纹成形自攻螺钉在旋入塑胶件的过程中,通过强力在塑胶件上挤出配合的阴螺纹。螺纹成形自攻螺钉是大多数热塑性塑胶的最佳选择,但需要小心的是在螺纹成形自攻螺钉的旋入过程中,会产生较大的圆周应力,如果设计不当,很容易造成塑胶件破裂。

使用自攻螺钉装配时,需要考虑如下设计原则:

(1) 装配次数 自攻螺钉常用于塑胶件装配和拆卸次数不太多的场合。一般装配和拆卸次数不超过3次,可以使用自攻螺钉。当零件装配和拆卸次数太多时,自攻螺钉支柱孔很容易滑丝而造成固定失败。

(2) 自攻螺钉支柱的内径和外径 一般自攻螺钉支柱的内径为螺钉公称直径的0.8倍,外径为公称直径的2倍,例如M3自攻螺钉支柱内径为2.4mm,外径为6mm。支柱内径太小,螺钉锁入困难,支柱易破裂;而支柱内径太大,螺钉易滑丝,固定效果差。

支柱内径与塑胶材料和螺纹旋合长度有关系。对柔韧度高和不

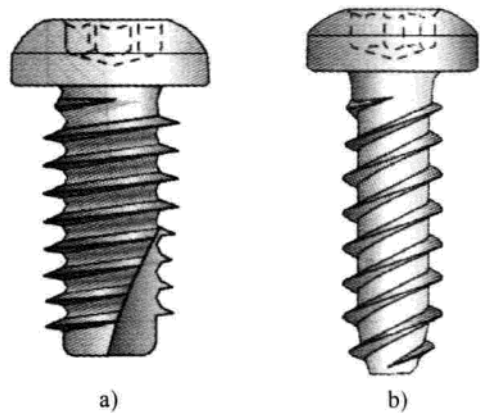


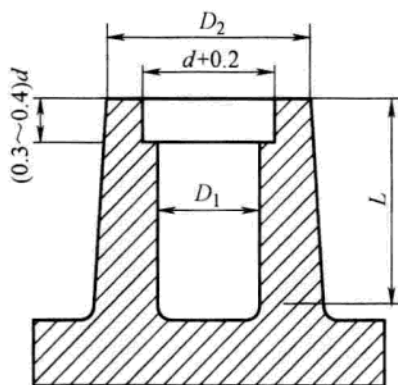
图 3-62 自攻螺钉的种类

a) 螺纹切削自攻螺钉

b) 螺纹成形自攻螺钉

易碎的材料，支柱的内径可适当减小，反之则加大；如果螺纹旋合长度较大，支柱内径则可适当加大。

很多塑胶材料供应商和自攻螺钉厂商对于支柱的内径等相关尺寸有相应的推荐值。某自攻螺钉厂商对其生产的不同类型的自攻螺钉针对不同的塑胶材料所提供的支柱尺寸推荐值如图 3-63 所示，其中 d 为螺钉的公称直径。当机械工程师对于支柱的内径等相关尺寸设计不是很明确时，可以向塑胶材料供应商和自攻螺钉厂商寻求帮助。



材料	支柱的内径 D_1			支柱的外径 D_2	最小螺纹旋合长度 L
	Plastite®45	PT®	Dleta PT®		
ABS	$0.80d$	$0.80d$	$0.86d$	$2.00d$	$2.00d$
PA6	$0.75d$	$0.75d$	$0.81d$	$1.85d$	$1.70d$
PA-GF30	$0.80d$	$0.80d$	$0.86d$	$2.00d$	$1.90d$
PBT	$0.75d$	$0.75d$	$0.81d$	$1.85d$	$1.70d$
PBT-GF30	$0.80d$	$0.80d$	$0.86d$	$1.80d$	$1.70d$
PC	$0.85d$	$0.85d$	$0.89d$	$2.50d$	$2.00d$
PC-GF30	$0.85d$	$0.85d$	$0.89d$	$2.20d$	$2.00d$
PET	$0.75d$	$0.75d$	$0.81d$	$1.85d$	$1.70d$
PET-GF30	$0.80d$	$0.80d$	$0.86d$	$1.80d$	$1.70d$
POM	$0.75d$	$0.75d$	$0.81d$	$1.95d$	$2.00d$
PP	$0.70d$	$0.70d$	$0.76d$	$2.00d$	$2.00d$
PS	$0.80d$	$0.80d$	$0.86d$	$2.00d$	$2.00d$

图 3-63 某自攻螺钉厂商提供的支柱尺寸推荐值

(3) 螺纹旋合长度不小于螺钉公称直径的2倍 螺纹旋合长度太小,螺钉抗拔出力小,固定效果差。自攻螺钉支柱的深度一般需要使得螺纹旋合长度不小于螺钉公称直径的2倍。

(4) 支柱的深度至少比螺钉长度大0.5mm 同时,支柱的深度比螺钉长度大0.5mm,防止螺钉顶部接触支柱根部,造成支柱根部损坏。

(5) 支柱顶部增加斜角或沉孔 支柱顶部应当增加斜角或沉孔,如图3-64所示。斜角或沉孔具有导向作用,使得自攻螺钉锁入过程顺利,同时为塑胶屑提供空间,防止塑胶屑溢出。沉孔的尺寸可以参考图3-63。

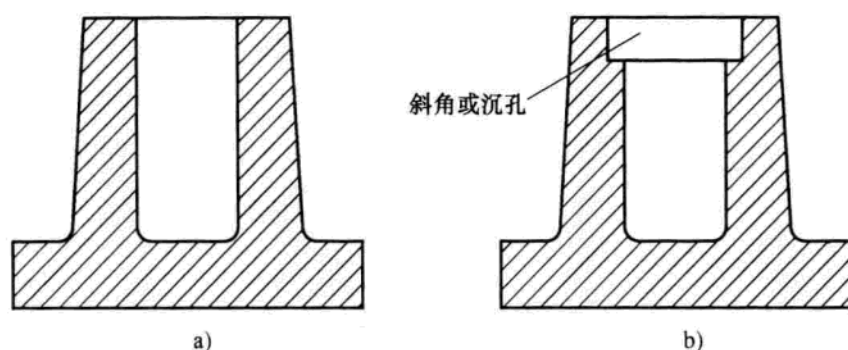


图3-64 支柱顶部斜角或沉孔的设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

(6) 支柱四周添加加强肋和圆角 自攻螺钉支柱最常见的失效模式是支柱不能承受自攻螺钉旋入过程中的圆周力而发生破裂,因此在支柱四周添加加强肋就非常必要。同时也应当在支柱与加强肋的连接处、支柱与主壁连接处添加一定的圆角以避免应力集中,提高支柱的强度,如图3-65所示。

(7) 合理的驱动扭矩 自攻螺钉在初次锁入支柱时,需要通过一定的驱动扭矩以驱动螺钉顺利锁入支柱中。驱动扭矩过小则螺钉不易锁入,驱动扭矩过大则有可能造成支柱的破裂。具体驱动扭矩的大小,可以咨询自攻螺丝厂商、并同制造工程师一起通过多次调试来获得;同时,在装配过程中可用扭力螺钉旋具或电动螺丝刀来控制 and 保证驱动扭矩的大小。

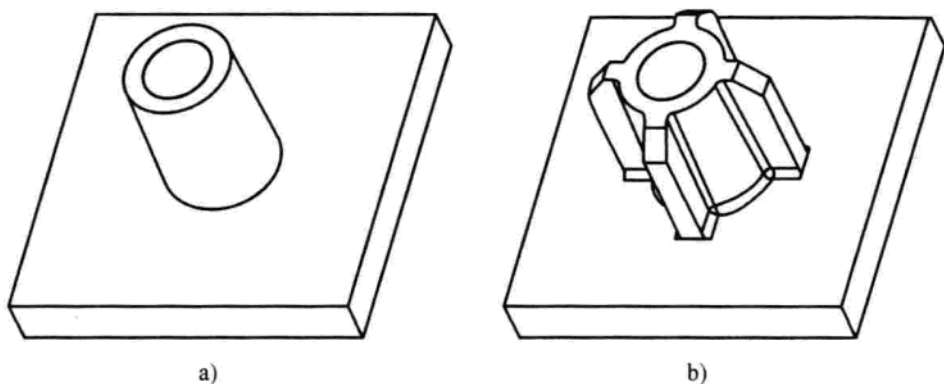


图 3-65 支柱四周添加加强肋

a) 原始的设计 b) 改进的设计

3. 埋入螺母

(1) 埋入螺母的安装方式 当塑胶件需要多次拆卸时，使用自攻螺钉不是一个最佳选择，此时可以选择在塑胶件中埋入螺母，然后再使用螺钉固定。当然，埋入螺母的成本较高。根据埋入螺母的安装方式，埋入螺母可分为超声波螺母/热熔螺母、压入螺母和模内镶嵌螺母，如图 3-66 所示。

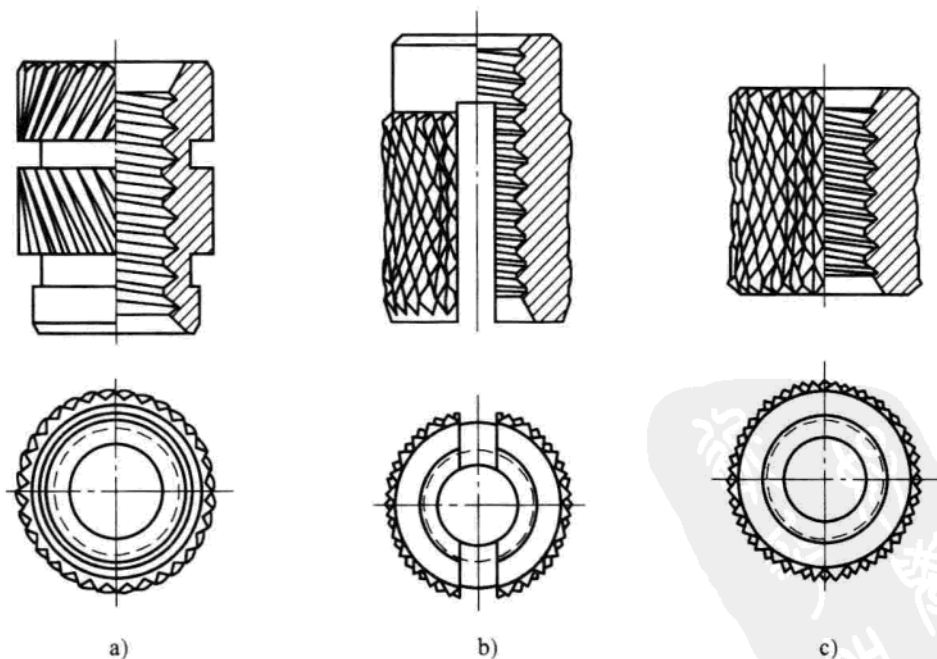


图 3-66 埋入螺母的种类

a) 超声波/热熔螺母 b) 压入螺母 c) 模内镶嵌螺母

(2) 安装方式对比 四种不同螺母安装方式的特点见表 3-7。

表 3-7 不同螺母安装方式对比

安装方式	定义	优点	缺点
超声波	使用超声波设备, 将超声波传至金属, 经高速振动, 使螺母直接埋入塑胶件内, 同时将塑胶熔化, 其固化后完成埋入	快速的螺母压入以及优良的螺母使用性能, 不产生内应力或产生较小内应力	超声波设备比较昂贵, 小批量生产时成本高
热熔	使用热熔设备, 将螺母周围的塑胶件熔化, 固化后完成螺母的埋入	较好的螺母使用性能, 不产生内应力或产生较小内应力	速度慢, 效率低
压入	利用螺母的弹性, 直接把螺母压入塑胶件相应的孔中, 完成螺母的埋入	无设备费用或仅需少量设备费用	有内应力产生
模内镶嵌	在注射模具型腔内放置螺母, 注射时塑胶熔料将螺母镶嵌于其中	安装效果优良, 使用性能好	难安装, 增加注射周期, 降低生产效率, 容易造成模具的损坏, 支柱易因内应力而破裂, 是埋入螺母的最后选择

(3) 螺母支柱设计指南

一般来说, 螺母周围塑胶材料的厚度为螺母外径的 $1/2 \sim 1$ 倍。如果螺母埋入支柱中, 支柱的直径应至少是螺母直径的 2 倍, 如图 3-67 所示。较小的壁厚和较小的支柱直径很容易影响螺母的使用性能。当机械工程师对支柱的尺寸设计不确定时, 可以咨询螺母的厂商, 很多厂商都会提供支柱的设计指南。

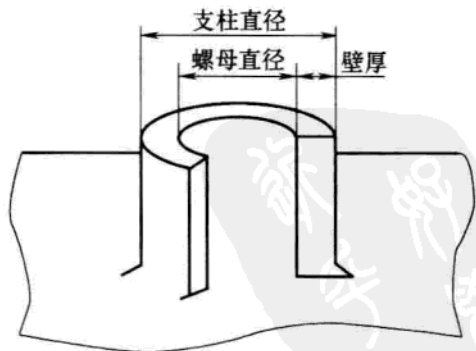


图 3-67 支柱的直径

对于模内镶嵌螺母，由于塑胶材料的热膨胀系数远大于金属，造成塑胶在冷却时产生较大的内应力，易导致支柱的破裂。因此，在选用模内镶嵌螺母时，产品设计应当注意减少内应力的产生和增加支柱的强度，避免支柱的破裂。

1) 螺母在使用时应当预热。

2) 支柱的四周添加加强肋以提高强度。

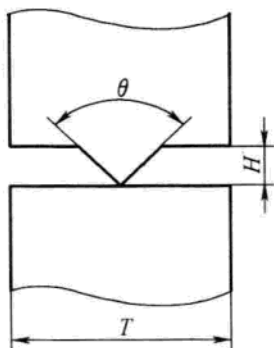
3) 螺母应当避免具有尖角，例如滚花等特征很容易造成支柱的破裂，对 PC 等缺口敏感材料尤其如此。

3.4.3 超声波焊接

超声波焊接是利用超声波振动频率，接触摩擦产生热能而使两个塑胶件在焊接面熔融而固定。超声波焊接是一种快捷、干净、有效的装配工艺，用于满足塑胶件高强度装配的一种装配技术，适用于多种类型的塑胶件的装配。正常情况下，超声波焊件具有较高的拉伸强度。

1. 导熔线设计

正确的导熔线是提高超声波焊接强度和品质，缩短生产周期的关键。导熔线是塑胶件焊接面上的一条三角形凸出材料，其基本作用是将振动能量聚集在三角形的尖端，其后累积的热量在整个焊接面形成均匀的塑胶熔流。正确的导熔线必须具备的条件是最初的接触面积不可太大，典型的导熔线尺寸如图 3-68 所示。



(单位: mm)

尺寸	无定形塑料		半结晶塑料	
	小零件	大零件	小零件	大零件
H	0.3 ~ 0.4	0.5 ~ 0.6	0.5 ~ 0.7	0.7 ~ 1.0
θ	60° ~ 90°		90°	

图 3-68 典型的导熔线尺寸推荐

错误的导熔线设计以及无导熔线的设计均不利于两个塑胶件之间的超声波焊接，如图 3-69 所示。

2. 焊接面设计

常用的焊接面包括平面式焊接面、阶梯式焊接面和沟槽式焊接面。

(1) 平面式焊接面 这种焊接方式属于普通的两平面焊接，在焊接平面上设计一条贯穿整个焊接平面的锥形体，如图3-70所示。这种焊接面设计的缺点是焊接完成后焊接处有毛边产生。

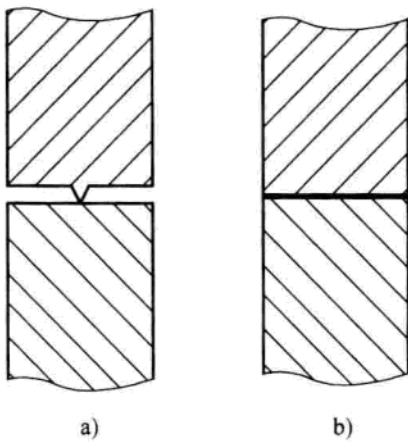


图 3-70 平面式焊接

a) 焊接前 b) 焊接后

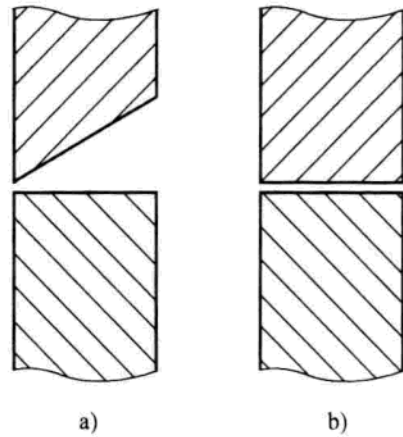


图 3-69 错误的导熔线设计

a) 错误的导熔线设计 b) 无导熔线的设计

(2) 阶梯式焊接面 这种结构由于熔融材料易于流入垂直间隙，因此其拉伸强度高于平面式焊接，而且具有很高的剪切强度，如图3-71所示。相对于平面式焊接面，由于焊接面积的减小，沟槽式焊接面的熔解强度比平面式焊接面低。阶梯式焊接面设计的最小壁厚要求是2mm。

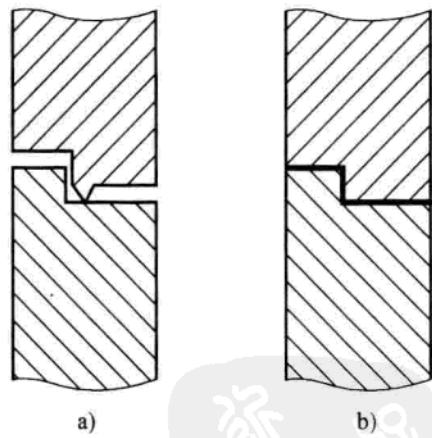


图 3-71 阶梯式焊接

a) 焊接前 b) 焊接后

(3) 沟槽式焊接面 这种焊接采用间距式移位焊接，设计时凹凸面保持一定的间隙和斜度，适用于要求完全密封的焊接。同时，沟槽式焊接面提供自定位功能，而且防止毛边的产生，如图3-72所示。沟槽式焊接面设计的最小壁厚要求是2mm。

3. 超声波焊接设计指南

设计超声波焊接时，需要考虑到以下原则：

(1) 正确的导熔线设计 导熔线的设计必须保证焊接面的初始接触区域较小，以降低超声波焊接过程所需的总能量，增加焊接强度，同时减少焊头与塑胶件接触时间，以减少焊接面毛边的产生。

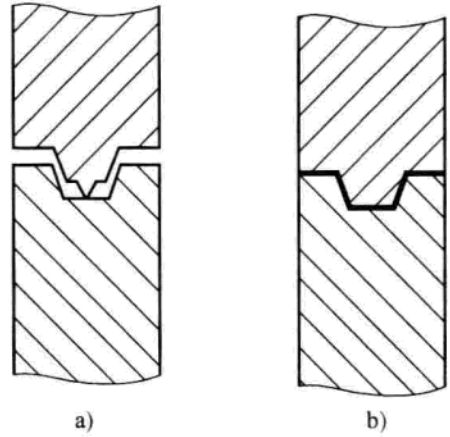


图 3-72 沟槽式焊接

a) 焊接前 b) 焊接后

(2) 设计定位特征 在两个塑胶件焊接面开始接触之前，在零件之间设计定位特征能够保证两个塑胶件的准确定位。这有利于提高超声波焊接的质量和提高了焊接的尺寸精度。定位特征包括定位柱、孔、凸台和边等，如图 3-73 所示。当然也可以设计辅助夹具来增加定位，作者不推荐这种方法，因为从面向制造和装配的产品设计理论来看，辅助夹具会带来产品成本的增加，不是一个最好的方法。

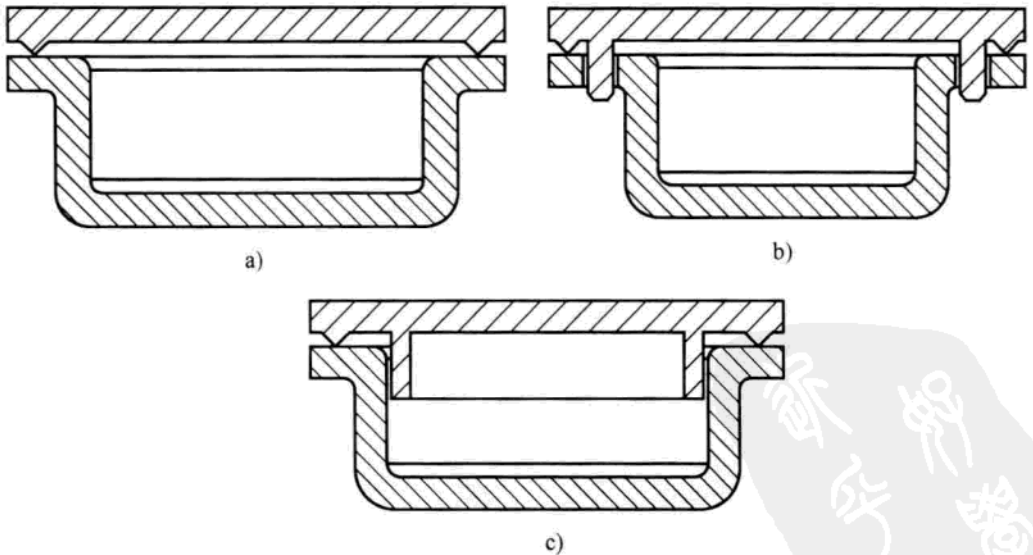


图 3-73 超声波焊接的定位

a) 没有定位的超声波焊接设计 b) 使用定位柱定位的超声波焊接设计

c) 使用凸台定位的超声波焊接设计

(3) 焊接面均匀一致并紧密接触 塑胶件的两个焊接面必须均匀一致并紧密接触, 尽可能保持在同一平面, 从而使得能量均匀传导, 有利于取得一致的焊接效果, 并减小毛边产生的可能性。

(4) 美工沟设计 在塑胶件焊接面的四周额外增加 $0.25 \sim 0.64\text{mm}$ 的间隙, 可以避免焊接时产生的毛边外露于塑胶件外表面, 同时可以使得塑胶件之间的变形不易被发现, 从而提高塑胶件的外观质量。

具有美工沟的阶梯式焊接如图 3-74 所示。

(5) 增加塑胶件焊接面与焊接头的面积 增加塑胶件焊接面与焊接头的接触面积有利于能量的传导, 增加焊接强度, 如图 3-75 所示。

(6) 把近程焊接作为第一选择 近程焊接是指焊接面距离焊接头接触位置在 6mm 内, 远程焊接是指焊接面距离焊接头接触

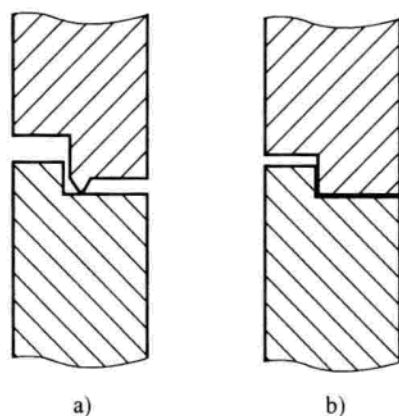


图 3-74 具有美工沟的阶梯式焊接
a) 焊接前 b) 焊接后

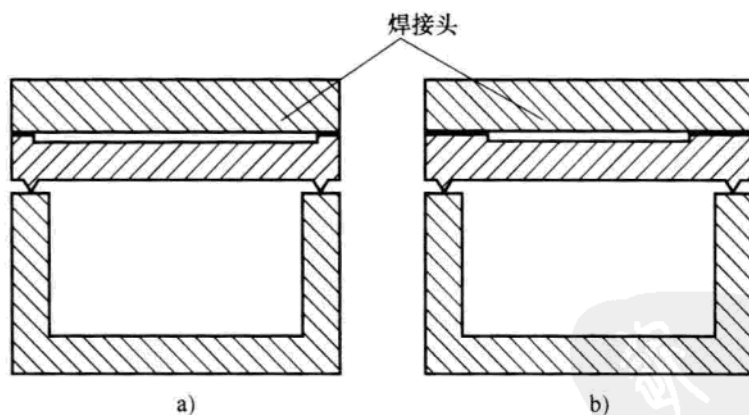


图 3-75 增加塑胶件焊接面与焊接头的接触面积
a) 原始的设计 b) 改进的设计

位置大于 6mm 。在设计塑胶件的超声波焊接时, 应当考虑到是否有足够的能量传达到焊接面。大多数的塑胶材料的近程焊接性能均强于远程焊接性能, 因此, 应尽可能把近程焊接作为第一选择, 远程

焊接作为第二选择，如图 3-76 所示。

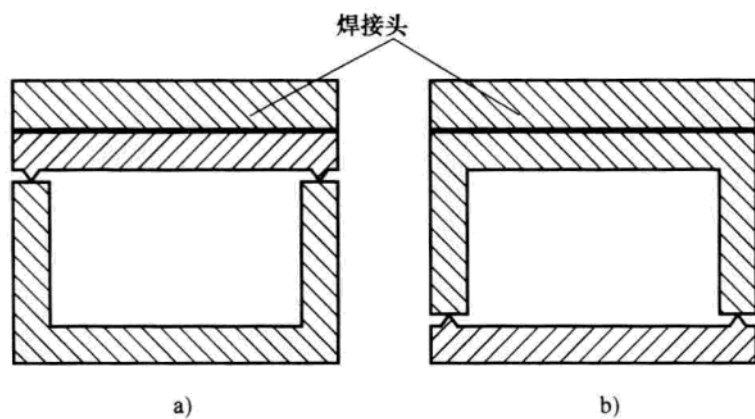


图 3-76 把近程焊接作为第一选择

a) 近程焊接 b) 远程焊接



第4章 钣金件设计指南

4.1 钣金

4.1.1 钣金的概念

钣金 (sheet metal) 是针对金属薄板 (厚度通常在 6mm 以下) 的一种综合冷加工工艺, 包括冲裁、折弯、拉深、成形、锻压和铆合等, 其显著的特征是同一零件厚度一致。

钣金具有重量轻、强度高、导电 (能够用于电磁屏蔽)、成本低、大规模量产性能好等特点, 目前在电子电器、通信、汽车工业、医疗器械等领域得到了广泛应用, 例如在计算机机箱、手机、MP3 中, 钣金是必不可少的组成部分。

随着钣金的应用越来越广泛, 钣金件的设计变成了产品开发过程中很重要的一环。机械工程师必须熟练掌握钣金件的设计技巧, 使得设计的钣金既满足产品的功能和外观等要求, 又能使得冲压模具制造简单、成本低。

4.1.2 冲压简介

冲压是将冲压模具安装在压力机 (例如冲床) 等设备上, 对板材、带材、管材和型材等施加外力, 使之产生塑性变形或分离, 从而获得所需形状和尺寸的钣金件的一种成形加工方法。

冲压模具按照加工要素可以分为冲孔模、落料模、折弯模、成形模、铆合模等, 按照工序组合程度可以分为工程模、复合模、连续模。

1. 工程模

工程模 (stage die) 是指压力机在一次冲压行程中, 在一个工位上只完成一道工序 (如冲孔、折弯、成形等) 的冲模。一个钣金件

需要一套或多套工程模完成冲压。零件越复杂，需要的工程模套数就越多。

2. 复合模

复合模（compound die）是指压力机在一次行程中，在一个工位上同时完成多道冲压工序的冲模。典型的复合模有冲孔落料复合模，模具在同一工位上完成冲孔和落料两道工序。

3. 连续模

连续模（progressive die）又称级进模，是指压力机在一次冲压行程中，在几个不同的工位上同时完成多道工序的冲模。有的钣金件只需要一套连续模就能够完成冲压。

工程模、复合模和连续模的优缺点见表 4-1。

表 4-1 工程模、复合模、连续模对比

类型	优点	缺点
工程模	<ol style="list-style-type: none"> 1) 模具简单，容易制作 2) 制作费用低，周期短 3) 各道工序没有加工方向限制 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 一个零件模具数量多 2) 一套模具使用一个压力机 3) 生产效率较低 4) 有半成品
复合模	<ol style="list-style-type: none"> 1) 零件同轴度较好，表面平直，尺寸精度较高 2) 生产效率高，且不受条料外形尺寸的精度限制 3) 可以充分利用短料和边角余料 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 模具零部件加工制造比较困难，成本较高 2) 凸凹模容易受到最小壁厚的限制，而使得一些内孔间距、内孔与边缘间距较小的零件不宜采用
连续模	<ol style="list-style-type: none"> 1) 易于实现自动化，生产效率高 2) 减少压力机的使用和零件半成品的运输和储存 	<p>模具结构复杂，制作精度要求高，周期长，成本高</p>

4.1.3 常用钣金材料介绍

适合于冲压加工的钣金材料非常多，本书介绍广泛应用于电子

电器行业的钣金材料。

1. 普通冷轧板 SPCC

SPCC 是指钢锭经过冷轧机连续轧制成要求厚度的钢板卷料或片料。SPCC 表面没有任何的防护,暴露在空气中极易被氧化,特别是在潮湿的环境中氧化速度加快,出现暗红色的铁锈,在使用时表面要喷漆、电镀或采取其他防护措施。

2. 镀锌钢板 SECC

SECC 的底材为一般的冷轧钢卷,在连续电镀生产线经过脱脂、酸洗、电镀及各种后处理制程后,即成为电镀锌产品。SECC 不但具有一般冷轧钢片的力学性能及近似的加工性,而且具有优越的耐蚀性及装饰性,在电子产品、家电及家具市场上具有很大的竞争性,例如目前计算机机箱普遍使用的就是 SECC。

3. 热浸镀锌钢板 SGCC

热浸镀锌钢板是指将热轧酸洗或冷轧后的半成品,经过清洗、退火,浸入温度约 460℃ 的熔融锌槽中,而使钢片镀上锌层,再经调质整平及化学处理而成。SGCC 材料比 SECC 材料硬、延展性差(避免深抽设计)、锌层较厚、焊接性差。

4. 不锈钢 SUS301

不锈钢 SUS301 中 Cr 的含量较 SUS304 低,耐蚀性较差,但经过冷加工能获得很好的拉伸性能和硬度,弹性较好,多用于弹片弹簧以及防止电磁干扰。

5. 不锈钢 SUS304

不锈钢 SUS304 是使用最广泛的不锈钢之一,因含 Ni,故比含 Cr 的钢有更好的耐蚀性、耐热性,且拥有非常好的力学性能,无热处理硬化现象,没有弹性。

4.2 设计指南

4.2.1 冲裁

冲裁是利用冲裁模,在压力机的作用下使板料分离的一种冲压

工艺方法。冲裁是冲孔、落料、切断、切口、割切等多种分离工序的总称。冲裁是冷冲压加工方法中的基础工序，它可以直接冲制出所需的成品零件，也可以为其他冷冲压工序制备毛坯。

1. 避免钣金外部、内部尖角

避免钣金外部形状出现尖角的原因有两个。其一是安全因素，钣金的外部尖角很锋利，容易造成操作人员在制造和装配产品的时候刮伤手指，同时也可能使得消费者在使用或者维修产品的过程中刮伤手指，造成人身伤害；其二是冲压模具因素，钣金的尖角对应模具上也是尖角，模具凹模上的尖角加工困难，同时热处理时易开裂，而且在冲裁时模具凸模的尖角处易崩刃和过快磨损，模具寿命显著降低。因此，钣金设计需要避免外部尖角，在钣金外部尖角处应当圆弧过渡，如图 4-1 所示。一般来说，圆角半径至少为钣金厚度的 0.5 倍，且不小于 0.8mm。图中 R 表示圆角半径， t 表示钣金厚度，以下同。

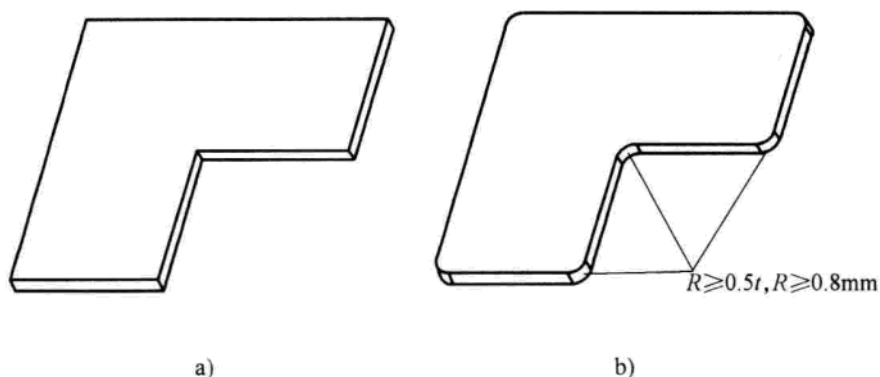


图 4-1 钣金外部圆角的设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

同钣金外部尖角需要圆弧过渡一样，钣金内部尖角也应圆弧过渡，如图 4-2 所示。圆角半径也至少为钣金厚度的 0.5 倍，且不小于 0.8mm。

2. 避免过长的悬臂和狭槽

钣金上应避免过长的悬臂和狭槽，否则冲压模具上相对应的凸模尺寸小，强度低，模具寿命短。一般来说，悬臂和狭槽的尺寸宽

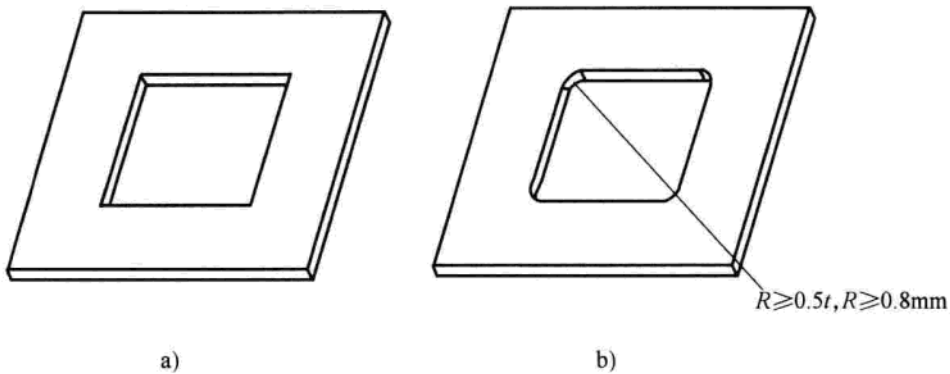


图 4-2 钣金内部圆角的设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

度不应小于零件壁厚的 1.5 倍，即 $A \geq 1.5t$ ，其中 A 表示悬臂或狭槽的宽度，如图 4-3 所示。

3. 钣金冲孔优先选用圆孔

钣金冲孔优先选用圆孔，模具加工较容易。风孔的选择包括圆孔、六边形孔和正方形孔，图 4-4 所示为圆形和六边形的风孔设计。圆孔的开孔率较低，散热效果较差。六边形风孔开孔

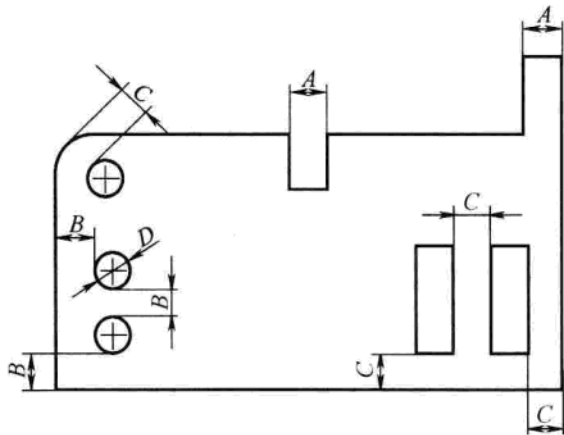


图 4-3 冲裁孔与槽的尺寸

率较高，散热效果较好，但六边形风孔模具加工较复杂。正方形风孔开孔率最高，但因为边角是直角，模具容易磨损。因此在设计风孔时需要综合考虑模具加工容易性和系统散热效果，在满足系统散热要求的前提下，优先选用圆孔。

4. 钣金冲裁孔间距与孔边距

当钣金冲裁孔与孔或边缘不平行时，孔间距或孔边距至少为钣金厚度的 1 倍，即 $B \geq t$ ，如图 4-3 所示。平行时，孔间距或孔边距至少为钣金厚度的 1.5 倍，即 $C \geq 1.5t$ ，如图 4-3 所示。

5. 钣金冲裁孔的大小

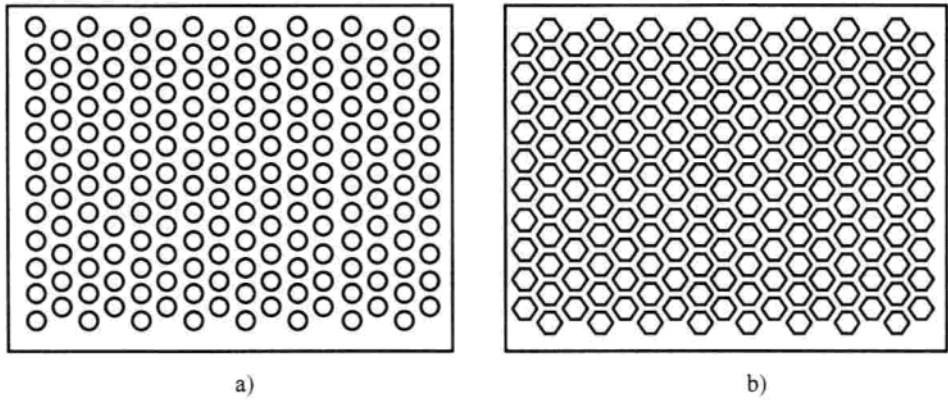


图 4-4 钣金风孔的设计

a) 圆形风孔的设计 b) 六边形风孔的设计

一般来说，钣金冲孔大小至少为钣金厚度的 1.5 倍。冲孔太小，模具凸模尺寸小，易折断或压弯，使用寿命低。当然冲孔最小尺寸与钣金材料相关，较软材料冲孔最小尺寸可以小于钣金厚度，而较硬材料（如不锈钢等）冲孔最小尺寸不应小于钣金厚度的 1.5 倍，即 $D \geq 1.5t$ ，如图 4-3 所示。

6. 避免孔与钣金折弯边或成形特征距离太近

钣金冲裁孔与钣金折弯边或成形特征的距离最小为钣金厚度的 1.5 倍加上折弯半径或成形半径，即 $E \geq 1.5t + R$ ，如图 4-5 所示，否则冲裁孔极易在折弯或成形时发生扭曲变形。

1) 当钣金冲孔距离折弯边或成形边特征太近时，可以考虑先折弯或成形，然后再冲孔，但这会增加模具的复杂度，增加模具成本。不推荐这样的做法。

2) 在钣金折弯或成形处增加工艺切口，用于吸

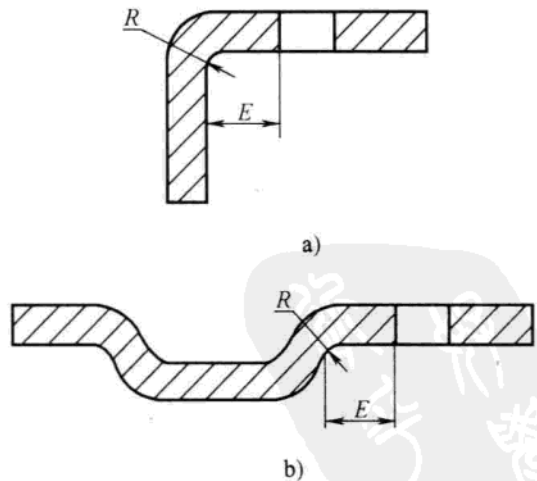


图 4-5 孔与折弯边和成形特征的距离

a) 孔与折弯边的距离

b) 孔与成形特征的距离

收钣金折弯或成形时的变形，从而保证钣金冲孔的质量，如图4-6上部所示。

3) 加大冲孔的尺寸，如图4-6下部所示。

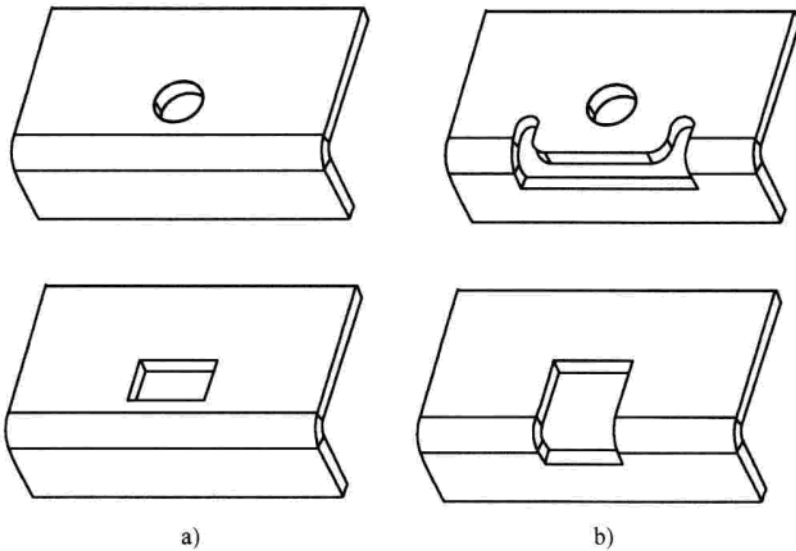


图4-6 当折弯离孔太近时
a) 原始的设计 b) 改进的设计

7. 避免钣金展开后冲裁间隙过小甚至材料干涉

机械工程师进行钣金设计时是三维设计，容易忽略钣金展开后冲裁间隙的检查验证，因此常常会发生钣金展开后冲裁间隙过小甚至发生材料干涉的现象。钣金结构越复杂，这种错误越容易发生。

以图4-6上部所示的工艺切口为例，如果工艺切口尺寸不合理，钣金展开后冲裁间隙过小，则冲裁模具凸模强度低，模具寿命短，如图4-7所示。

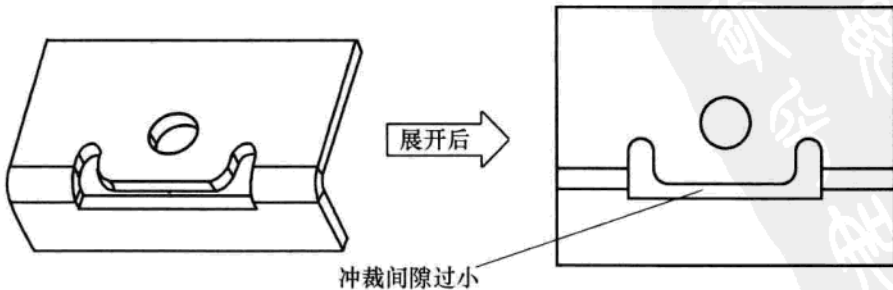


图4-7 避免钣金展开后冲裁间隙过小

钣金折弯宽度设计不合理，会造成钣金展开后材料干涉，如图 4-8 所示。

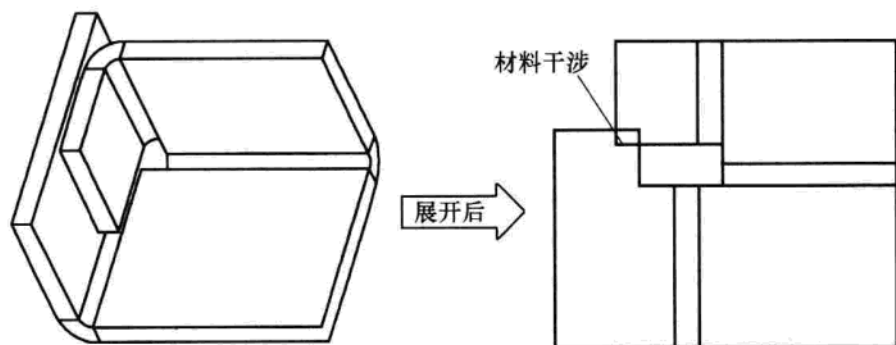


图 4-8 避免钣金展开后材料干涉

4.2.2 折弯

折弯是利用压力迫使材料产生塑性变形，从而形成有一定角度和曲率形状的一种冲压工序。常用的折弯包括 V 形折弯、Z 形折弯和反折压平等。

1. 折弯的高度

钣金折弯高度至少为钣金厚度的 2 倍加上折弯半径，即 $H \geq 2t + R$ ，如图 4-9 所示。钣金折弯高度太低，钣金折弯时容易变形扭曲，不容易得到理想的零件形状和理想的尺寸精度。

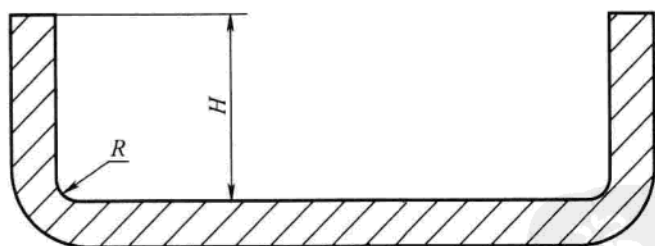


图 4-9 折弯的最小高度

当折弯为斜边时，最容易发生因折弯高度太小而造成折弯扭曲变形的情况。如图 4-10 所示，在原始的设计中，由于最左侧折弯高度太小，折弯时很容易发生扭曲变形，造成折弯质量低；在改进的设计中，可以增加左侧折弯的高度或者去除折弯高度较小的部分，这样钣金折弯时不会发生扭曲变形，折弯质量高。

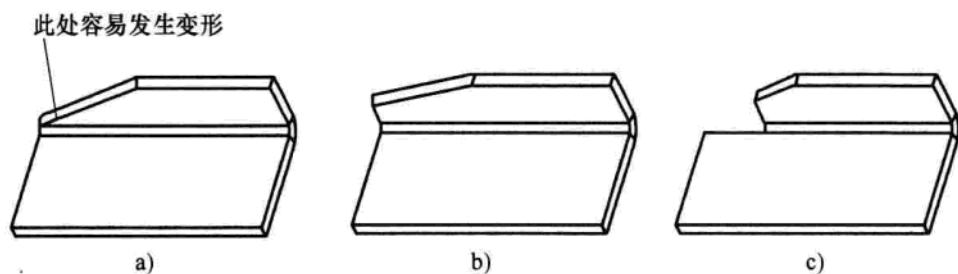


图 4-10 当折弯高度太小时

a) 原始的设计 b) 改进的设计一 c) 改进的设计二

2. 折弯半径

为保证折弯强度，钣金折弯半径应大于材料最小折弯半径。各种常用钣金材料的最小折弯半径 R_{\min} 见表 4-2，其中 t 为钣金厚度。

表 4-2 各种材料最小折弯半径（常温下）

材料		材料条件	
		软	硬
铝合金		0	$6t$
铍青铜		0	$4t$
黄铜		0	$2t$
镁合金		$5t$	$13t$
铁	不锈钢	$0.5t$	$6t$
	低碳钢，低合金钢	$0.5t$	$4t$
钛		$0.7t$	$3t$
钛合金		$2.6t$	$4t$

钣金原始和改进的折弯半径设计如图 4-11 所示。

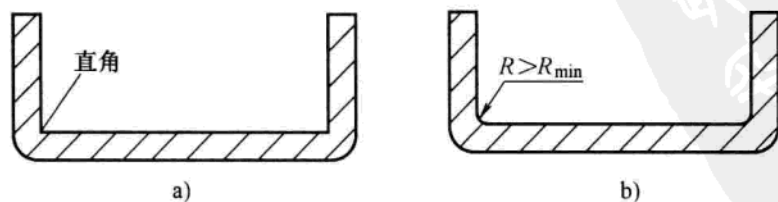


图 4-11 折弯半径应大于钣金材料最小折弯半径

a) 原始的设计 b) 改进的设计

当然，钣金折弯半径也不是越大越好。折弯半径越大，折弯反弹越大，折弯角度和折弯高度越不容易控制，因此钣金折弯半径需要合理取值。

另外，钣金模具制造商倾向于折弯半径为零，这样钣金折弯后不容易反弹，折弯高度和折弯角度的尺寸比较容易控制。但折弯半径为零的折弯很容易造成钣金折弯外部破裂甚至折断，同时钣金折弯强度相对较低，特别是对较硬的钣金材料，而且在生产一段时间之后模具上的直角会逐渐变圆滑，折弯尺寸也会变得难以控制。

为了降低折弯力和保证折弯尺寸，钣金模具制造商采用的另一个办法是在折弯工序之前预先增加压线工序，如图 4-12 所示。这样的设计同样也会造成钣金折弯强度相对较低和易断裂等缺陷。

压线工序是强行局部排挤材料，在钣金上面挤出一条沟槽，以利于折弯，确保折弯精度的一种冲压工序。

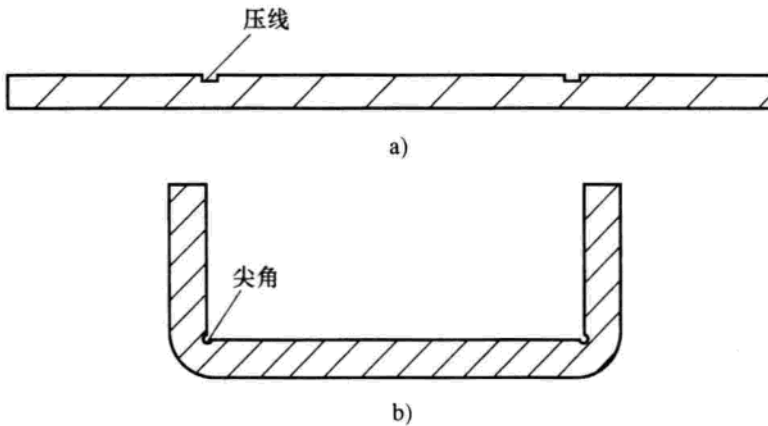


图 4-12 折弯时先压线易导致折弯强度低

a) 折弯前 b) 折弯后

3. 折弯方向

钣金折弯时应尽量垂直于金属材料纤维方向。当钣金折弯平行于金属材料纤维方向时，在钣金折弯处很容易产生裂纹，折弯强度较低，易断裂，如图 4-13 所示。

4. 避免因折弯根部不能压料而造成折弯失败

钣金折弯时，常因为其他特征与钣金折弯根部距离太近，造成不能压料而无法折弯或者折弯严重变形。一般来说，在钣金折弯根

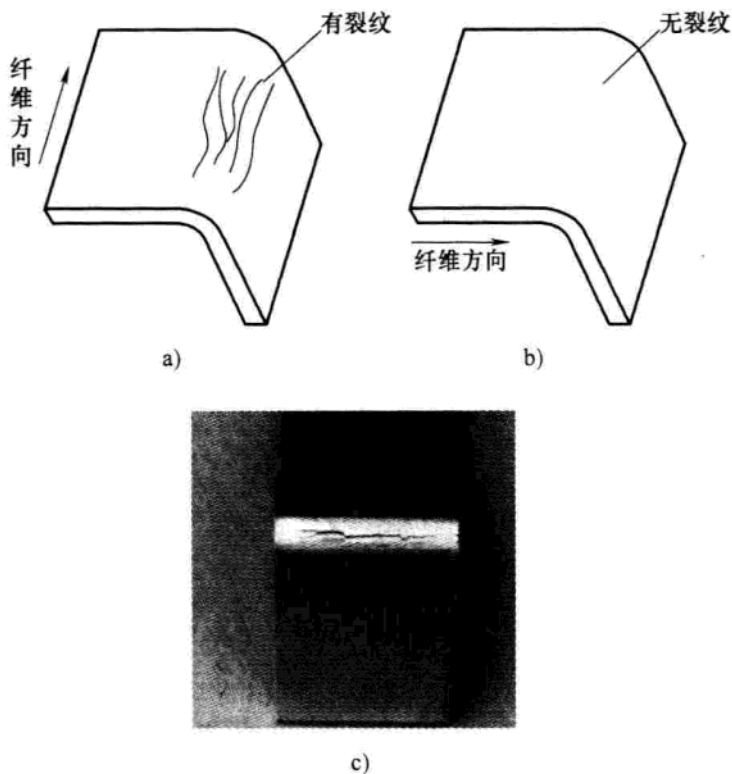


图 4-13 折弯应尽量与材料纤维方向垂直

- a) 折弯与纤维方向不垂直时 b) 折弯与纤维方向垂直时
c) 折弯与纤维方向不垂直时，产生裂纹的实例

部上方至少需要保证 2 倍钣金厚度加上折弯半径的距离上没有其他特征阻挡钣金折弯时的压料。图 4-14 上部所示原始的设计中，反折压平位置太靠近钣金折弯根部，造成钣金折弯时不能压料而折弯失败。图 4-14 下部所示原始的设计中，钣金抽牙太靠近折弯根部而造成折弯无法进行，此时可以把抽牙移动到远离钣金根部的位置，如改进的设计中第一个设计。如果因为设计要求，抽牙和折弯的位置都无法移动，那么可以在抽牙对应的折弯根部增加一个工艺切口，从而保证折弯顺利进行，如改进的设计中的第二个设计。

5. 保证折弯间隙，避免折弯干涉

由于钣金折弯公差的存在，在钣金折弯的运动方向上，需要保证一定的折弯间隙，以避免折弯时干涉而造成折弯失败。图 4-15 是一个具有复杂折弯钣金件的简化图，折弯顺序为上侧边先折弯，右

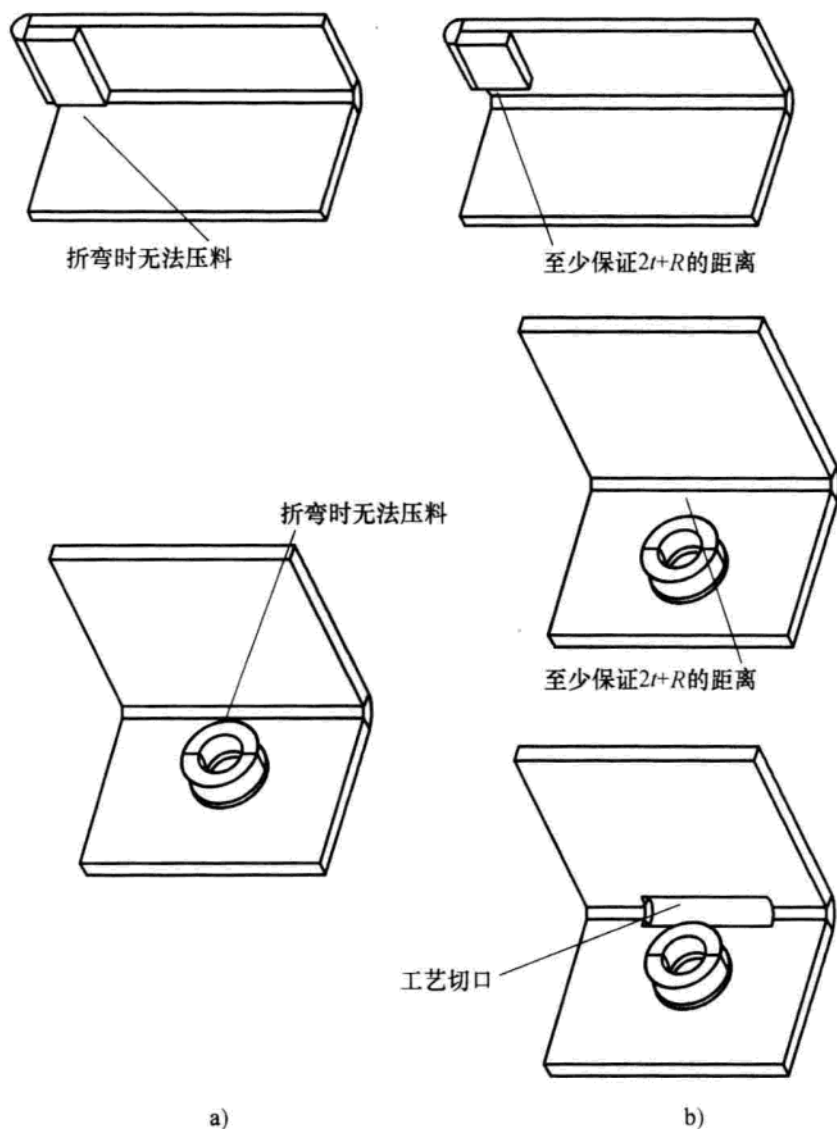


图 4-14 避免因折弯根部不能压料而折弯失败

a) 原始的设计 b) 改进的设计

侧边后折弯。在原始的设计中，两个折弯边没有间隙，当上侧边折弯完成后，再将右侧边折弯时，因为钣金折弯公差的存在，很可能造成右侧边在折弯过程中与上侧边干涉；在改进的设计中，右侧边与上侧边至少保留 0.2mm 的间隙（间隙的大小视折弯公差而定），可以有效避免折弯干涉。

6. 保证折弯强度

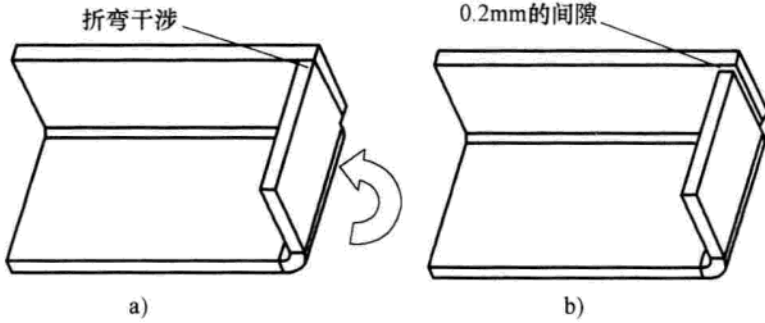


图 4-15 避免折弯干涉

a) 原始的设计 b) 改进的设计

钣金折弯时需要保证折弯强度。长而窄的折弯强度低，短而宽的折弯强度高，因此钣金折弯尽量附着在比较长的边上。如图 4-16 所示，同样功能的一个折弯，原始的设计中因为折弯附着在比较短的边上而折弯强度低，改进的设计中折弯附着在比较长的边上而折弯强度高。

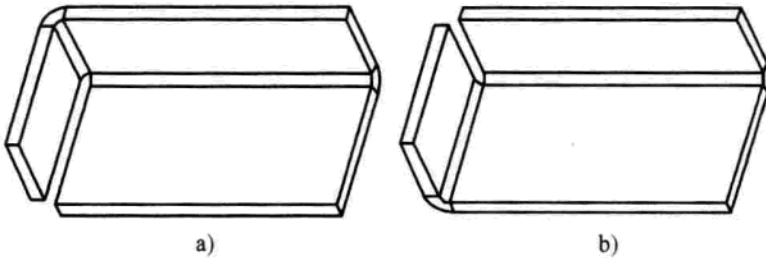


图 4-16 钣金折弯保证折弯强度

a) 原始的设计 b) 改进的设计

7. 减少钣金折弯工序

钣金折弯工序越多，模具成本就越高，折弯精度就越低，因此钣金设计应当尽量减少折弯工序。如图 4-16 所示，原始的设计中，钣金需要两个折弯工序；在改进的设计中，钣金只需要一个折弯工序就可以同时完成两个边的折弯。

8. 避免复杂的折弯

同样地，钣金折弯工序越复杂，模具成本就越高，折弯精度就越低，而且复杂折弯可能造成零件材料的浪费。因此，当钣金具有

复杂的折弯时，可以考虑将复杂的折弯拆分成两个零件，尽管这违背面向装配的设计中减少零件数量的原理，但这更可能带来产品成本的降低和产品质量的提高，当然，这样的设计需要通过严密的计算来验证。如图 4-17 所示，具有复杂折弯的钣金件被拆分成两个零件，两个零件通过拉钉、自铆或点焊等方式装配在一起。

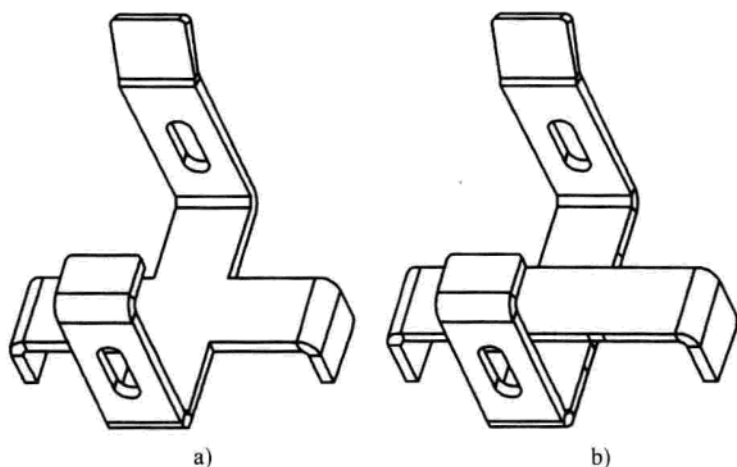


图 4-17 避免复杂的折弯

a) 原始的设计 b) 改进的设计

9. 多重折弯上的孔很难对齐

很多机械工程师一定有过这样的痛苦体会：为什么钣金折弯上的螺钉孔或拉钉孔总是对不齐，以至于无法固定螺钉或拉钉？

这是因为钣金折弯公差较大，特别是当钣金具有多重折弯时。钣金折弯公差见表 4-3。

表 4-3 钣金折弯公差

特征	公差/mm
一个折弯	0.15
两重折弯	0.25
三重折弯	0.36
四重折弯	0.44
五重折弯	0.51
六重折弯	0.59

可以看出，钣金折弯次数越多，折弯公差就越大。钣金的多重折弯很难保证尺寸的准确性，这就是钣金折弯上的螺钉孔、拉钉孔和自铆孔等很难对齐的原因。

因此，在产品设计中，机械工程师需要考虑到多重折弯公差较大的特点，避免对零件多重折弯上的特征要求过于严格的公差；同时优化钣金的设计，避免在零件装配中出现装配孔位对不齐、装配尺寸很难保证，甚至装配干涉等不良现象的发生。

钣金两个折弯上的孔因为折弯公差较大的原因很难对齐（见图4-18a），解决的办法有：

1) 将一个折弯上的孔设计成长圆孔或大孔，从而允许折弯较大的公差，保证零件的装配，见图4-18b、c。

2) 增加两个内定位孔，模具增加内定位，减小钣金在折弯时的公差，从而保证两个折弯上孔的对齐，见图4-18d。

3) 先折弯后冲孔，两个孔的尺寸精度可以保证，但这会增加冲压模具的复杂度，增加模具成本。一般不推荐这样的做法。

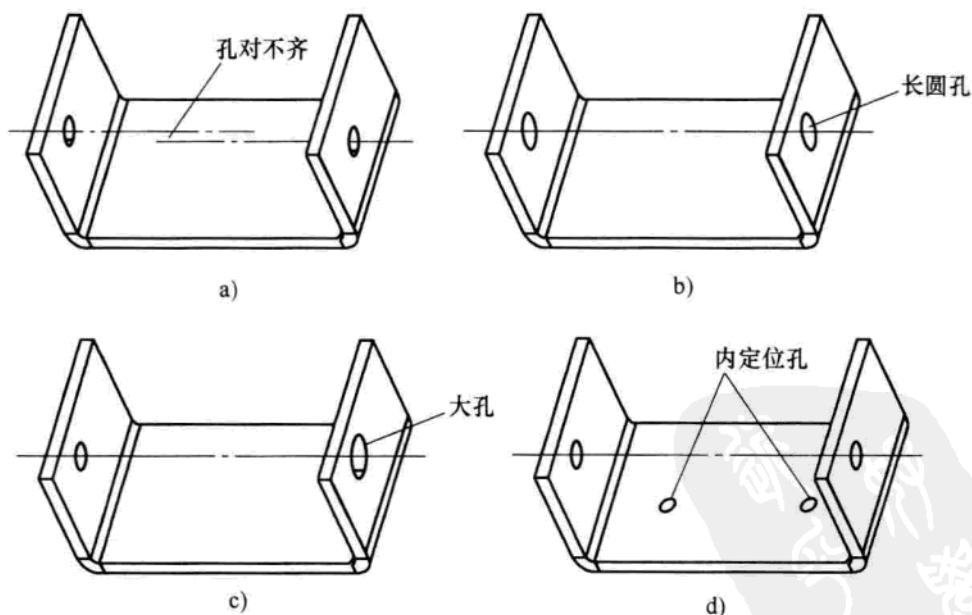


图4-18 优化设计避免钣金折弯孔对不齐

- a) 折弯上的孔很难对齐 b) 长圆孔的设计
c) 大孔的设计 d) 模具增加内定位孔

4.2.3 拉深

拉深是将一定形状的平板毛坯冲压成各种开口空心件，或以开口空心件为毛坯，减小直径，增加高度的一种冲压加工方法。

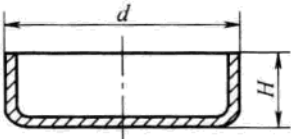
1. 拉深件的形状

拉深件的形状应尽量简单、对称。轴对称的拉深件在圆周方向上变形均匀，模具加工也容易，其制造性能最好。其他形状的拉深件，应尽量避免急剧的轮廓变化。

2. 拉深件的深度

根据钣金材料的性质，圆形拉深件的深度会有不同的限制，一般来说，深度一般不超过直径的 0.2 倍。常用金属材料可以拉深的最大深度值见表 4-4。深度太大，很容易拉破。拉深件设计时尽量使用较浅的拉深，较浅的拉深比较深的拉深具有更好的制造性能，成本较低。

表 4-4 常用金属材料的最大拉深深度

简图	材料	最大深度 H
	软钢	$\leq (0.15 \sim 0.20) d$
	铝	$\leq (0.10 \sim 0.15) d$
	黄铜	$\leq (0.15 \sim 0.22) d$

3. 拉深件的转角

拉深件各相邻壁的转角部分应当以合适大小的圆弧过渡，以防止模具相应部分易于磨损和产生应力集中，直角连接容易造成拉深件被刺破。如图 4-19 所示，拉深的根部圆角 $R_1 \geq t$ ，拉深的顶部圆角 $R_2 \geq 2t$ ，拉深转角处圆角 $R_3 \geq 4t$ 。在设计允许的情况下，上述圆角半径越大，拉深越容易。

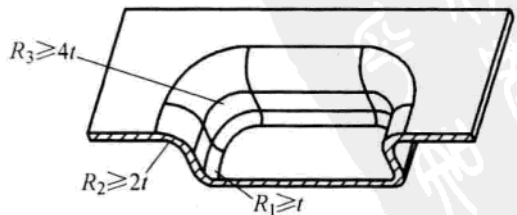


图 4-19 拉深件转角部分圆角过渡

4. 拉深件的尺寸精度

钣金在拉深时尺寸精度

不宜要求过高，同时因为钣金壁厚的变化，钣金在拉深时只能保证特征内部或外部的尺寸，而不能同时保证其内部和外部尺寸。

4.2.4 凸包

凸包是依靠材料的延伸使钣金件形成局部凹陷或凸起的冲压工序。凸包与拉深是完全不同的冲压工序，凸包中材料厚度的改变为非意图性的，即厚度的少量改变是变形过程中自然形成的，不是设计指定的要求。凸包也称为起伏成形，但作者认为凸包的称呼更为形象。

凸包是钣金件中常用的一个特征。较长的凸包可以作为加强肋提高零件的强度和减小零件变形，另外可以利用凸包来获得与钣金基准平面不同高度的特征，桥状的凸包也可以作为卡扣对零件进行固定。

1. 凸包的深度

凸包的深度一般不超过钣金厚度的3倍，即 $H \leq 3t$ ，如图4-20所示。深度太大，凸包容易变形甚至破裂。

2. 凸包的斜度

凸包的斜度一般不小于 15° ，即 $\alpha \geq 15^\circ$ ，如图4-20所示。较大的斜度能够保证零件凸包顺利成形，并减小钣金件变形的可能性。

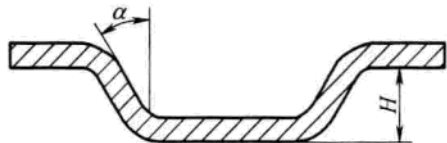


图4-20 凸包的深度与斜度

3. 凸包的转角

同拉深一样，凸包的转角部分应以圆角过渡。凸包的转角部分圆角设计可以参考拉深的设计，如图4-19所示。

4. 凸包与周围特征的距离

凸包与凸包、凸包与钣金边缘、凸包与折弯边的距离不宜太近，至少应保证两个钣金厚度以上的距离，否则凸包成形会存在质量问题，或者凸包会影响钣金的折弯质量。

凸包与折弯边的距离如图4-21所示。在原始的设计中，凸包与折弯边距离太近，凸包会影响折弯的质量；在改进的设计中，凸包与折弯边的距离 $E \geq 2t$ ，凸包不会影响钣金的折弯质量。

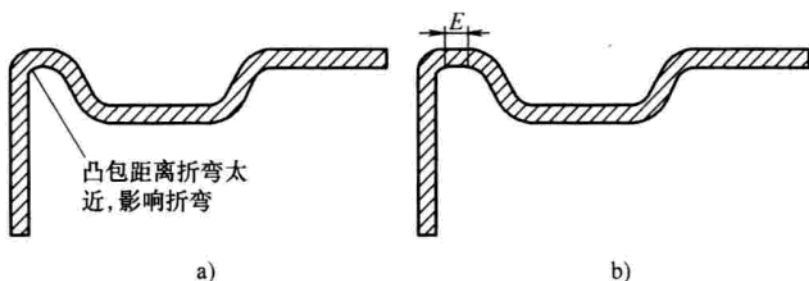


图 4-21 凸包与折弯边的距离

a) 原始的设计 b) 改进的设计

4.2.5 止裂槽

止裂槽用于钣金折弯和凸包等成形工序中，其作用是防止钣金在成形过程中材料撕裂和变形，产生毛边，带来安全问题；同时止裂槽能够减小成形力，辅助钣金折弯和凸包的成形。止裂槽的宽度一般应当大于钣金厚度的 1.5 倍，同时止裂槽的长度应当超过钣金成形的变形区域。

如图 4-22 所示，在原始的设计中，折弯时会在折弯的两端产生毛边；在改进的设计中，通过将折弯边外移或添加止裂槽来避免毛边的产生。

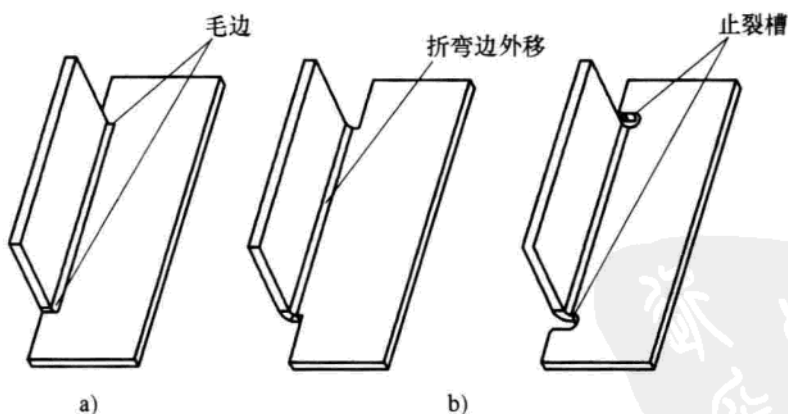


图 4-22 折弯止裂槽

a) 原始的设计 b) 改进的设计

常见的凸包止裂槽如图 4-23 所示。

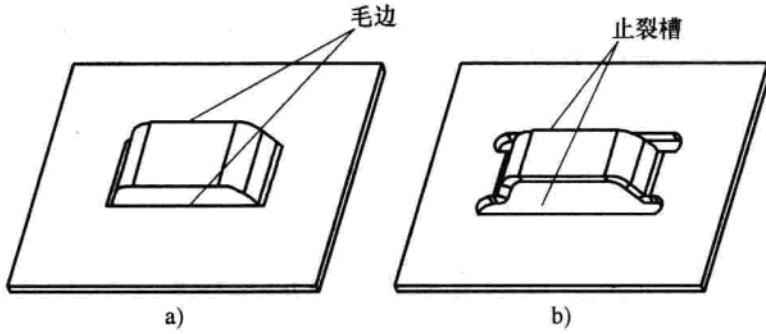


图 4-23 凸包止裂槽的设计
a) 原始的设计 b) 改进的设计

4.2.6 指明毛边的方向和需要压毛边的边

钣金冲裁过程如图 4-24a ~ c 所示。冲裁后钣金的断面包括四个部分：圆角带、光亮带、断裂带、毛边，如图 4-24d 所示。可以看出，冲裁断面并不是与钣金的冲裁方向完全平行，而是呈一定的斜度，同时断面除去很窄一部分光亮带以外，其余部分均粗糙无光泽，并有毛边和塌角。毛边的方向与冲裁的方向一致。

毛边会带来安全问题。毛边可能刮伤操作人员和消费者的手指，

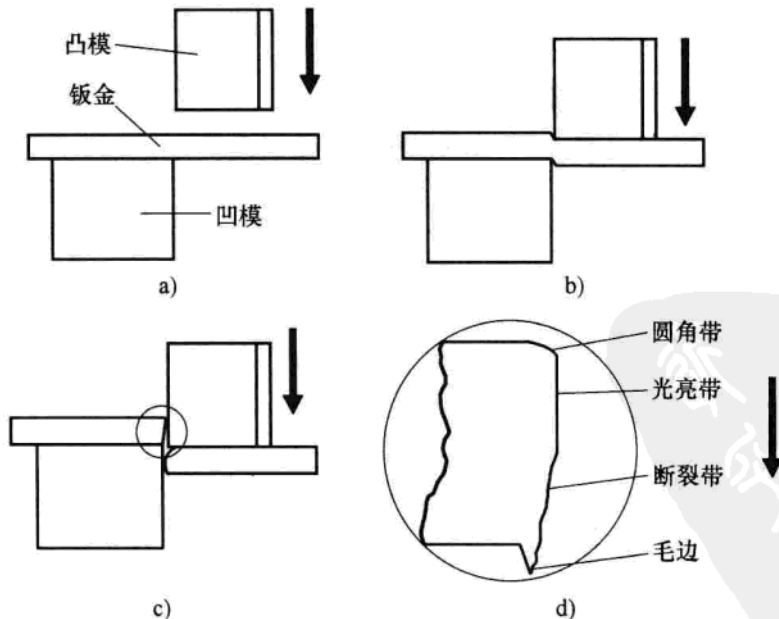


图 4-24 钣金的冲裁过程、断面的形状和毛边的方向

因此在产品阶段，就应当指明毛边的方向，并把毛边设置于钣金内部或者位于操作人员和消费者不容易接触的位置，而且要求毛边的高度不超过钣金厚度的 10%。

对于操作人员和消费者经常接触的边或者线缆接触的边，需要额外增加压毛边的工序，这也是必须在产品设计阶段就指明的。一旦冲压模具加工完成，再来增加压毛边的工序就会变得比较困难。当然，需要尽量避免对整个钣金边缘压毛边以降低模具成本。

4.2.7 提高钣金强度的设计

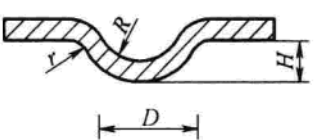
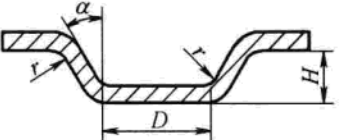
1. 避免平板的设计

同塑胶件一样，单纯的平板式钣金强度较低，特别是较软和较薄的材料；同时平板式钣金在受力时容易变形，产品设计应当避免这样的设计。针对平板式钣金，可以采用添加加强肋，增加折弯、翻边或反折压平来提高钣金的强度，如图 4-25、图 4-26 所示。

2. 添加加强肋

加强肋常用于增加钣金强度和减小钣金变形。常用的加强肋形状包括半圆形和梯形，其主要尺寸见表 4-5。但是，一个钣金件上的加强肋并不是越多越好，太多的加强肋反而会造成零件变形翘曲；同时，加强肋最好均匀对称布置在钣金件上，不均匀的加强肋设计也是造成零件变形翘曲的原因之一。

表 4-5 常用加强肋的主要尺寸

简图	R	H	r	D	α
	$(3 \sim 4) t$	$(2 \sim 3) t$	$(1 \sim 2) t$		
		$(1.5 \sim 2) t$	$(0.5 \sim 1.5) t$	$\geq 3H$	$15^\circ \sim 30^\circ$

利用加强肋来提高零件强度的设计如图 4-25 所示。

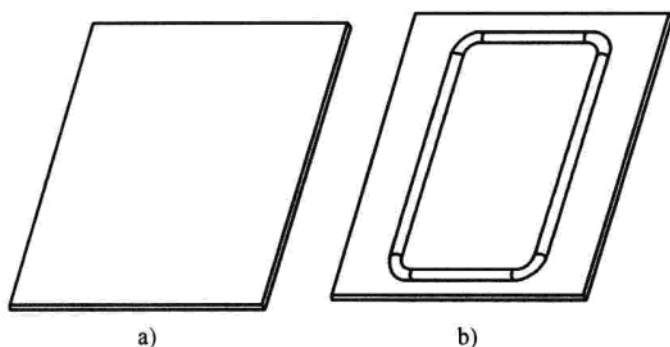


图 4-25 利用加强肋提高零件强度
a) 原始的设计 b) 改进的设计

3. 增加折弯、翻边或者反折压平

增加折弯、翻边或者反折压平可以提高钣金的强度，如图 4-26 所示。

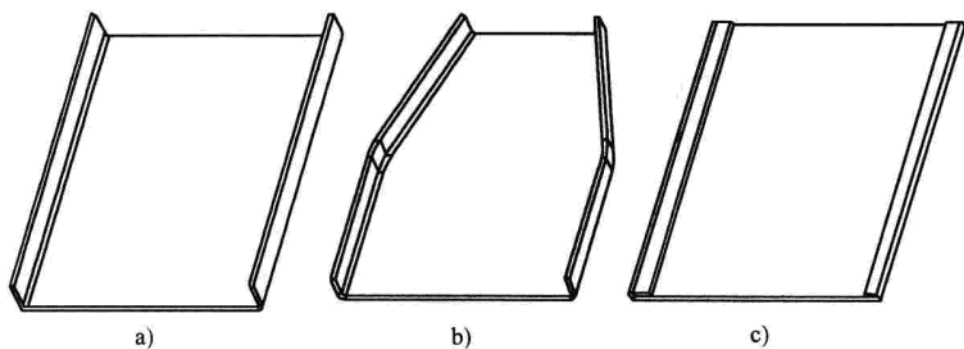


图 4-26 利用折弯、翻边和反折压平提高零件强度
a) 折弯 b) 翻边 c) 反折压平

4. 折弯处添加三角加强肋

在钣金折弯处添加三角加强肋可以增加折弯的强度，如图 4-27 所示。

5. 折弯边自铆或者通过拉钉等方式连接在一起

对于强度要求较高的钣金件，钣金折弯后折弯边之间通过自铆或者拉钉等方式连接在一起，把钣金的多个折弯边形成一个整体，可以大幅提高零件强度。如图 4-28 所示，钣金的三个折弯边通过拉钉连接在一起，钣金强度大幅度提高。

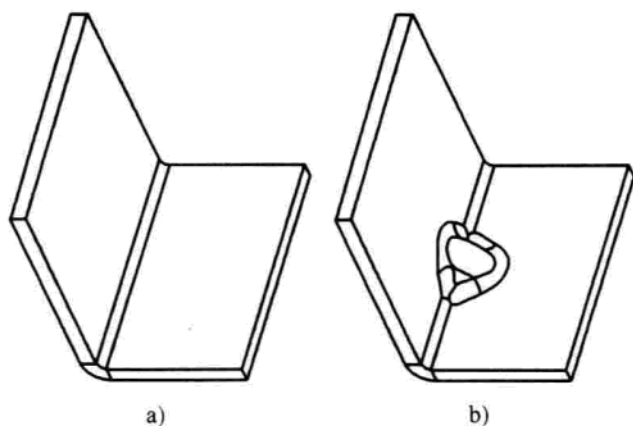


图 4-27 折弯处添加三角加强肋提高零件强度
a) 原始的设计 b) 改进的设计

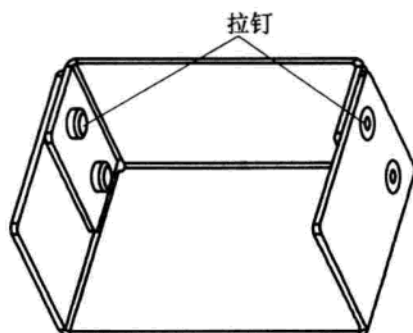


图 4-28 钣金折弯边通过拉钉连接在一起

4.2.8 降低钣金成本的设计

钣金件的成本主要来自于三个方面：材料、冲压模具以及劳动力成本。其中材料和冲压模具成本占有主要比例，降低钣金成本的设计主要从这两方面入手。

1. 钣金件的形状

钣金件的形状应当利于排样，尽量减少废料，提高材料使用率。合理的钣金形状设计可以使得钣金在排样时材料使用率高，废料少，从而降低钣金材料成本。如图 4-29 所示，稍微修改钣金的外形，就可以大幅提高材料的使用率，从而节约零件的成本。

2. 减小钣金外形尺寸

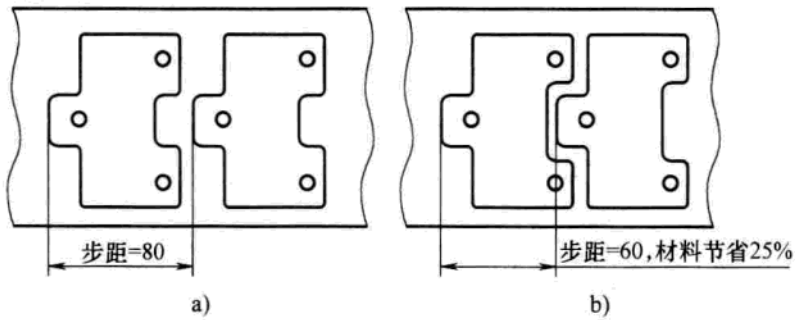


图 4-29 合理设计钣金形状、提高钣金材料利用率

a) 原始的设计 b) 改进的设计

钣金外形尺寸是决定钣金冲压模具成本的主要因素之一。钣金外形尺寸越大，冲压模具尺寸就越大，模具成本就越高，这在冲压模具包含多套冲压工序模时变得更为明显。

(1) 钣金上避免狭长的特征 狭长的钣金形状不但零件强度低，而且钣金在排样时材料浪费严重；同时狭长的钣金特征使得冲压模具尺寸加大，增加模具成本，如图 4-30 所示。

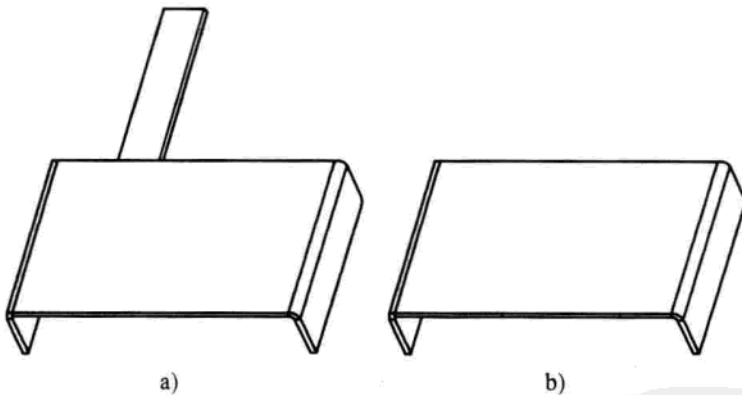


图 4-30 避免狭长的特征

a) 原始的设计 b) 改进的设计

(2) 避免钣金展开后呈“十”字形外形 展开后呈“十”字形外形的钣金在排样时材料浪费严重，同时增加冲压模具的尺寸，增加模具成本。如图 4-31 所示，在原始的设计中，钣金的四个折弯边均附着于钣金的底部四个边缘，钣金展开后呈“十”字形，在排样时材料浪费严重，同时钣金外形尺寸较大；改进的设计中钣金的后

两个折弯边附着于前两个折弯边，避免钣金展开后呈“十”字形，从而使得钣金可以合理排样，材料使用率提高30%以上，同时钣金外形尺寸减小，模具费用降低。

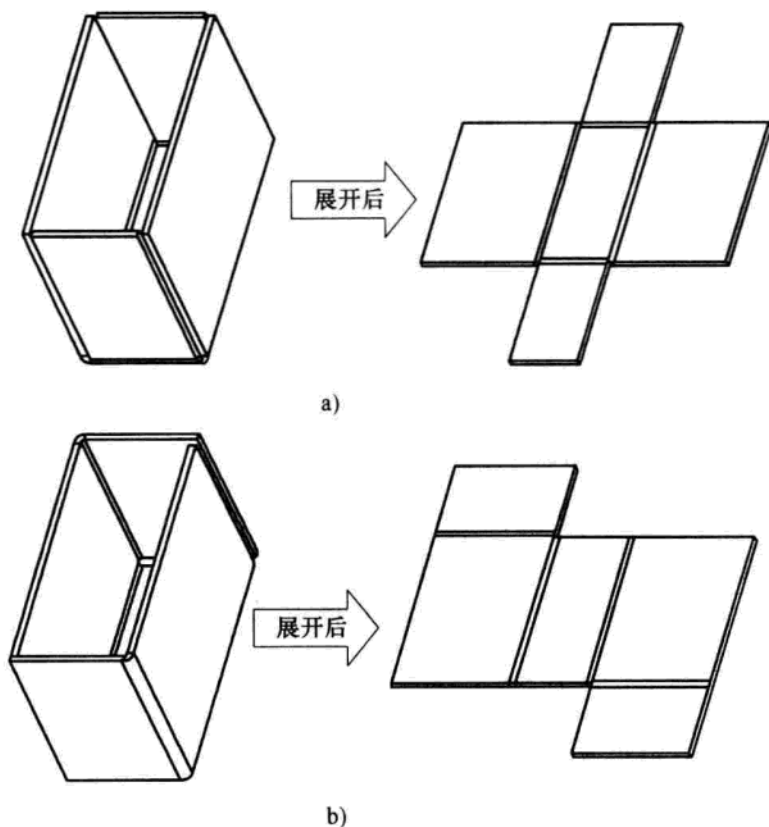


图 4-31 避免钣金展开后呈“十”字形外形

a) 原始的设计 b) 改进的设计

3. 钣金外形尽量简单

复杂钣金外形需要复杂的凸模和凹模，增加模具加工成本。钣金的外形应尽可能地简单，如图 4-32 所示。

4. 减少冲压模具工序数

冲压模具主要包括两种：工程模和连续模。一个钣金件的工程模可能包括多套工序模模具，如冲裁模、折弯模、成形模和压毛边模等。模具工序数越多，钣金模具的工序模套数就越多，冲压模具成本就越高。对于连续模也是如此。模具成本与模具的工序数成正比，因此，为降低冲压模具的成本，应当尽量减少模具的工序数。

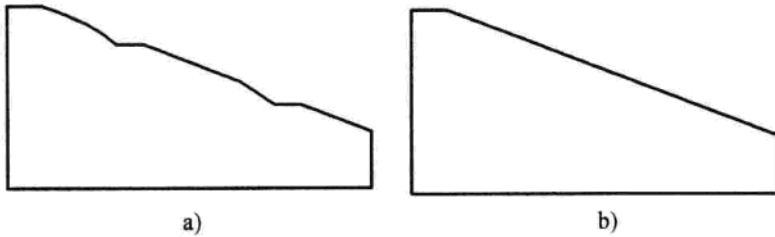


图 4-32 钣金外形尽量简单

a) 原始的设计 b) 改进的设计

1) 合理定义折弯的附着边，不合理的折弯附着边容易增加折弯工序。例如，如图 4-16 所示，在原始的设计中，钣金需要两个折弯工序；而在改进的设计中，通过更改折弯的附着边，钣金仅仅只需要一个折弯工序就可以同时完成两个边的折弯，改进的设计可以节省一套折弯工序模，从而降低模具成本。

2) 产品设计需要尽量避免复杂折弯。复杂折弯需要两套甚至多套折弯模，是冲压模具工序数增加的主要原因。可以通过设计的优化来避免复杂折弯。如图 4-17 所示，复杂的折弯通过零件的拆分减少冲压模具工序数，降低零件成本。

3) 产品设计需要尽量避免反折压平。反折压平至少需要两个工序，也就是说需要两套工程模。

4) 另外压毛边一般也需要单独的压毛边工序模。对于产品内部零件如果可以不压毛边，则尽量不压毛边。

5. 合理选择零件的装配方式

钣金装配方式很多，如 4.3 节所述，合理地选择钣金件装配方式与产品成本息息相关，常用钣金件装配方式的成本如下：

卡扣 ≤ 拉钉 ≤ 自铆 ≤ 点焊 ≤ 普通螺钉 ≤ 手拧螺钉

6. 合理利用钣金结构，减少零件数量

尽管冲压制造工艺不允许钣金具有复杂的结构，但在钣金结构所能达到的范围之内，应当合理利用钣金结构，合并钣金件相邻的零件，减少零件的数量，从而降低产品成本。

如图 4-33 所示，在原始的设计中，整个装配件包括 3 个零件，零件 A、B、C 之间通过焊接装配在一起，产品制造和装配费用高；

改进的设计中，合理利用钣金折弯，使得钣金件 A 能够合并零件 B 和 C 的功能，产品成本低。

如图 4-34 所示，在原始的设计中，除了螺栓外，整个装配件还包括 3 个零件，零件 B 通过两个螺栓固定在零件 A 上，零件 A 与零件 C 通过焊接固定；改进的设计中，合理设计钣金件 A，将零件 B 和零件 C 的功能合并到零件 A 上，从而减少零件的制造和装配费用，降低产品成本。

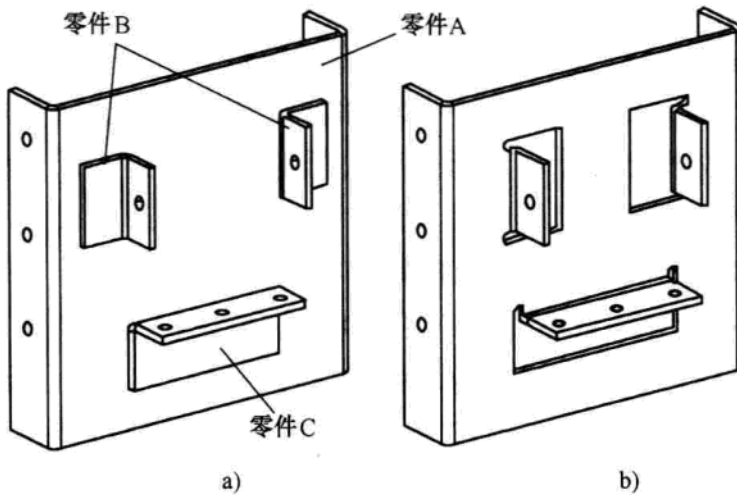


图 4-33 合理利用钣金结构，减少零件数量（一）

a) 原始的设计 b) 改进的设计

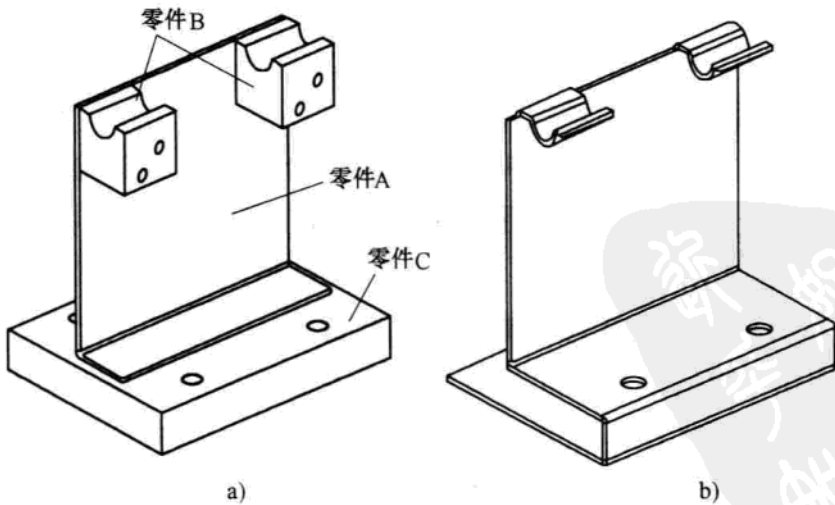


图 4-34 合理利用钣金结构，减少零件数量（二）

a) 原始的设计 b) 改进的设计

7. 标准化

钣金设计时尽量选用标准的孔、槽等，从而可以使用标准的冲压模具凸模和凹模，降低模具成本。

在选择钣金材料时，选用具有标准厚度和当地市场比较容易获得的钣金材料，也可以降低材料成本。

4.2.9 其他钣金设计考虑

1. 翻边转角处增加圆角

翻边转角处增加圆角可以避免在转角处挤料，圆角半径应至少为钣金厚度的4倍。当然，为了保证翻边的质量，可以使用较大的圆角，圆角越大翻边越容易，如图4-35所示。

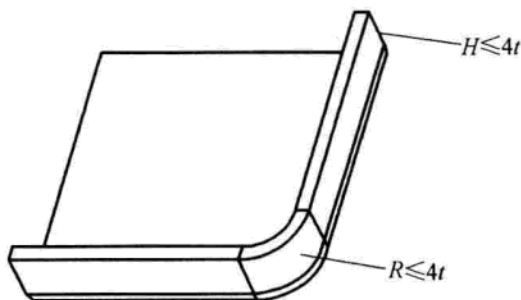


图 4-35 翻边转角处增加圆角

2. 曲线翻边高度

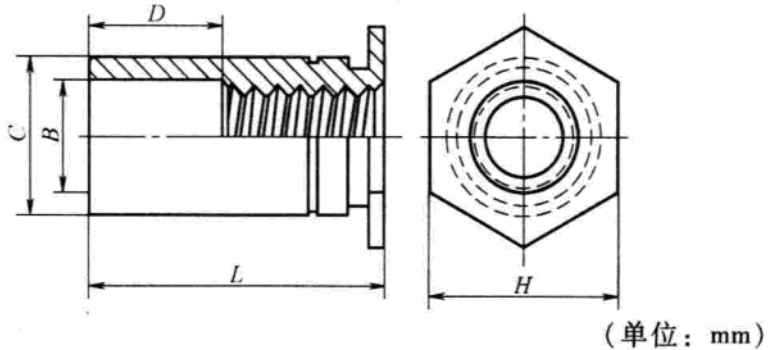
一般来说，曲线翻边的高度不宜超过钣金厚度的4倍，即 $H \leq 4t$ ，如图4-35所示。如果曲线翻边转角处圆角半径较大，翻边的高度可以相应地增加。

3. 正确设计与螺柱、螺母及手拧螺钉等配合的孔

螺柱、螺母及手拧螺钉等是钣金上常用的五金件，它们通过铆合方式固定在钣金上。钣金与五金件的配合孔需要正确设计，否则铆合后会存在五金件铆合不稳甚至脱落等质量缺陷。如果对配合孔的设计要求不清楚，可以向五金件的供应商寻求帮助。国际上比较著名的五金件供应商均会提供如何在钣金上设计配合孔，以及如何铆合等设计要求。

某五金件供应商的一款螺柱对钣金设计的要求如图4-36所示。

其中包括螺柱在钣金上配合孔的具体尺寸和配合孔中心与钣金边缘的最小距离等。



螺钉种类	B	$C_{-0.13}^0$	H	最小钣金厚度	钣金配合孔直径 $^{+0.08}_0$	最小配合孔到边缘距离
M3	3.25	4.2	4.8	1.02	4.22	6
M3.5	3.9	5.39	6.4	1.02	5.41	7.1
M4	4.8	7.12	7.9	1.27	7.14	8.4
M5	5.35	7.12	7.9	1.27	7.14	8.4

图 4-36 螺柱对钣金配合孔的设计要求

4.3 钣金常用装配方式

钣金的装配方式非常多,而钣金广泛应用于各种行业中,各行业具有各自常用的装配方式。以下将介绍在电子电器等行业广泛应用的钣金装配方式。

4.3.1 卡扣装配

同塑胶件的卡扣装配不同,因为大多数的钣金没有弹性(不锈钢 SUS301 除外),钣金装配并不能完全依靠卡扣来完成。卡扣装配常与其他钣金装配方式(例如螺钉)配合使用,起着快速装配和降低产品装配成本的作用。

卡扣装配的结构包括卡扣和卡槽。常用的卡扣和卡槽的形状如图 4-37 所示。产品设计可以选择合适的卡扣和卡槽形状进行配对选

用。根据面向装配的设计中的导向原则，卡扣或卡槽的前端最好增加一个 30° 的小折弯，以保证装配顺利。

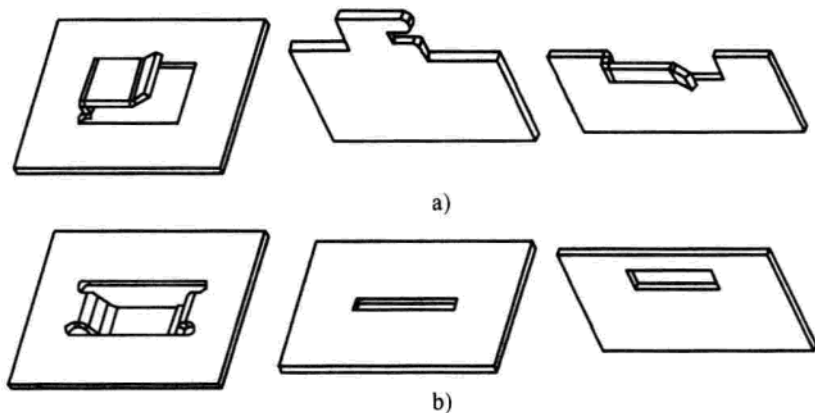


图 4-37 常见卡扣和卡槽

a) 卡扣 b) 卡槽

4.3.2 拉（铆）钉装配

拉钉装配是将拉钉插入两个零件的对应孔内，用拉钉枪拉动拉杆直至拉断使外包的拉钉套变形胀大，大于孔的直径，从而达到将两个零件装配在一起的目的。

常用的拉钉包括平头拉钉和圆头拉钉，其装配如图 4-38 所示。其中平头拉钉用于拉钉装配后拉钉头不能突出零件表面的场合，此时在零件上需要增加沉孔。钣金件通孔的尺寸一般比拉钉尺寸大 $0.1 \sim 0.3\text{mm}$ 。

当设计拉钉装配时，需要注意：

1. 避免拉钉尾部与其他零件干涉

如图 4-38 所示，拉钉的尾部一般会突出零件表面 $2 \sim 4\text{mm}$ ，这一点很容易被忽视而造成装配干涉等情况发生，严重时会带来产品质量问题。例如 PCB 常常固定在钣金上，如果拉钉的尾部接触到 PCB 上的电路或电子零部件，很容易造成短路，损坏 PCB。在进行面向装配的设计检查时需要特别注意这一点。

2. 平头拉钉头部表面需低于钣金表面

平头拉钉用于装配后拉钉不能高于钣金表面的场合，特别是当钣金表面有运动配合要求时。此时需要在零件上合理设计沉孔的尺

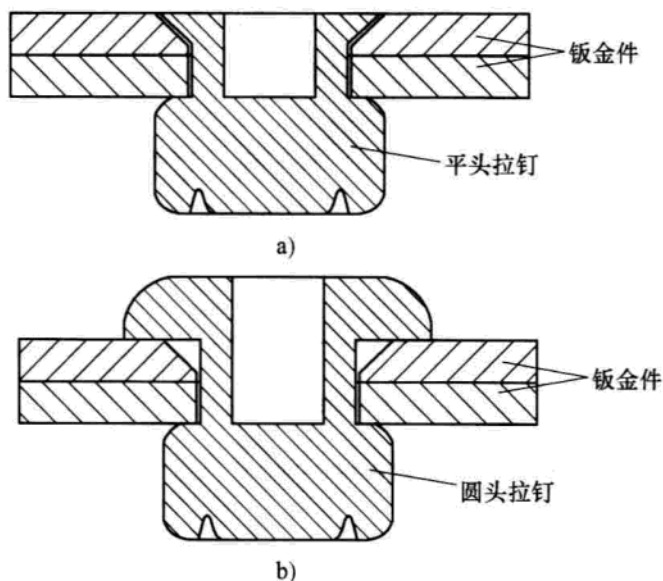


图 4-38 平头拉钉和圆头拉钉装配

a) 平头拉钉装配 b) 圆头拉钉装配

寸并在制造时管控沉孔的尺寸，否则拉钉头高于零件表面，会造成装配时发生干涉，或者造成零件运动时不顺畅。

3. 避免拉钉枪干涉

拉钉装配是通过拉钉枪来进行的，拉钉枪具有一定的尺寸大小，因此，在设计拉钉装配时需要考虑到拉钉枪的工作范围，避免在拉钉枪的工作范围内设计零件特征，否则拉钉枪工作时与这些特征干涉，会造成拉钉拉偏，甚至无法完成拉钉动作。由于拉钉枪的种类比较多，很难用具体的数字来描述拉钉枪的工作范围，机械工程师在进行拉钉装配设计时应当咨询拉钉枪的具体型号与尺寸。一般来说，距离拉钉中心线 8mm 的范围内（拉钉枪的大小不同，该尺寸范围大小可能会不同）和在拉钉的垂直方向上避免设计零件特征。

4.3.3 自铆

自铆的原理如图 4-39 所示，零件 A（带有沉孔）和零件 B（带有抽牙孔）配合，两个零件贴合在一起，然后通过模具冲头使得抽牙孔胀开，填充至沉孔的角孔内，从而使两个零件装配成一个整

体。

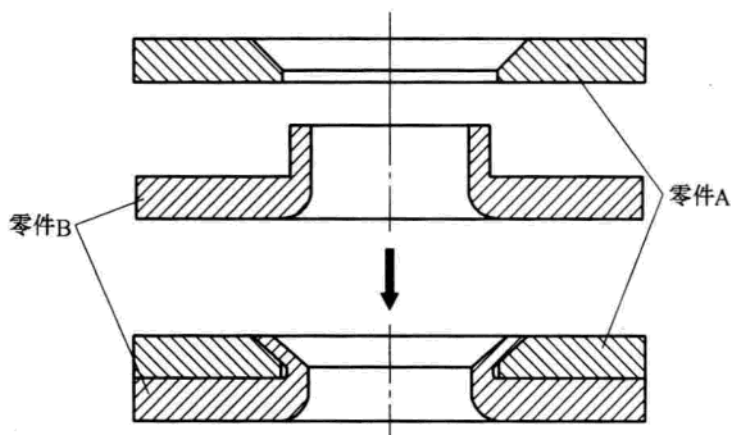


图 4-39 自铆装配

4.3.4 螺钉机械装配

钣金的螺钉装配是指在两个需要装配的零件中，其中一个零件上抽牙，另一个零件上冲孔，然后通过螺钉把两个零件固定。钣金的螺钉机械装配包括三种方式：

1. 抽牙孔 + 自攻螺钉装配

如图 4-40 所示，在零件 A 上抽牙孔，在零件上 B 冲孔，使用自攻螺钉，自攻螺钉在锁入的同时攻螺纹。

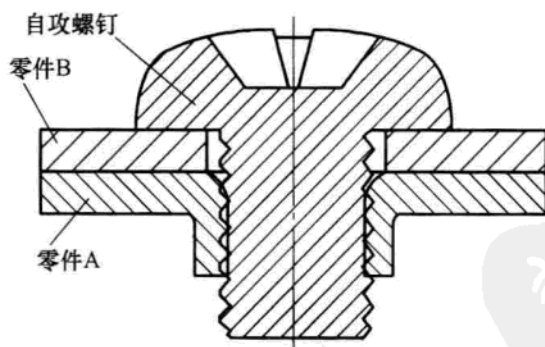
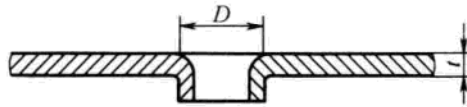


图 4-40 螺钉装配

对于零件 A 抽牙孔的内径，其尺寸可以参考所使用的自攻螺钉厂商或制造厂商提供的推荐数据。某自攻螺钉厂商提供的三角自攻螺钉对应的钣金抽牙孔数据如图 4-41 所示。



(单位: mm)

钣金厚度 t	0.5 ~ 0.69	0.7 ~ 0.99	1.0 ~ 1.49	1.5 ~ 2.49	2.5 ~ 3.0
螺钉种类	钣金抽牙孔的直径 D				
M2.5 × 0.045	2.22	2.23	2.24	—	—
M3 × 0.5	2.70	2.71	2.72	—	—
M4 × 0.7	3.57	3.59	3.61	3.64	—
M5 × 0.8	—	4.53	4.56	4.59	—

图 4-41 自攻螺钉对应钣金抽牙孔的尺寸

2. 抽牙孔 + 攻螺纹 + 螺钉装配

同第一种情况比较类似, 区别在于两点: 其一是对零件 A 完成抽牙后增加额外的攻螺纹工序; 其二是使用普通的机械螺钉而不是自攻螺钉就可以完成两个零件的装配。

零件 A 的抽牙孔的内径参考数值见表 4-6。

表 4-6 攻螺纹前抽牙孔内径 (单位: mm)

螺纹规格	M3	M3.5	M4	M5	4# - 40	6# - 32	8# - 32
抽牙高度	1.5	1.8	2.1	2.4	1.9	2.4	2.4
抽牙内径	2.6	3.2	3.6	4.6	2.4	3.2	3.6

3. 铆合螺母 + 螺钉装配

第三种装配方式需要在零件 A 上铆合螺母, 替代抽牙孔及攻螺纹, 如图 4-42 所示。

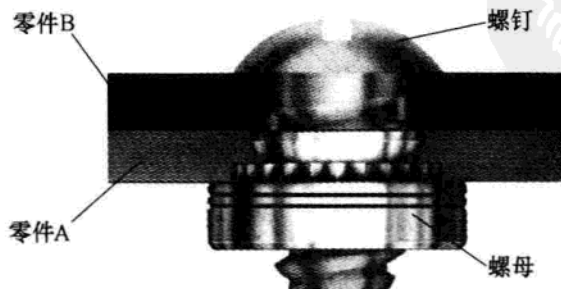


图 4-42 钣金铆合螺母 + 螺钉装配

4.3.5 点焊

点焊是两个钣金件在接触面处的一些点被焊接起来。焊接时，先把钣金件表面清理干净，然后把两个钣金件对齐装配好，压在两柱状铜电极之间，施加力压紧。当通过足够大的电流时，在零件的接触处产生大量的热，将中心最热区域的金属很快加热至高塑性或熔化状态，形成一个透镜形的液态熔池，继续保持压力，断开电流，金属冷却后，形成一个焊点。

1. 钣金件焊点的设计

为了提高点焊的效果，保证点焊的可靠性，常在点焊的一个钣金件上设计一排焊点，焊点的尺寸一般如图 4-43 所示。在焊接过程中，焊接头压在凸点处，施加压力通电后，焊点被熔化。

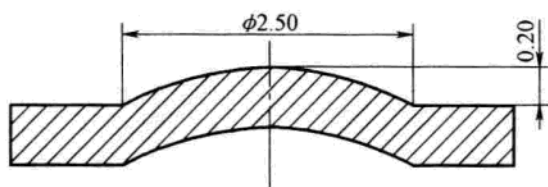


图 4-43 焊接凸点尺寸的设计

2. 两焊点的间距

通常两焊点的距离不超过 35mm（针对厚度在 2mm 以下的材料），偏小则过热，使工件容易变形；偏大则强度不够，使两个零件之间出现裂缝。

3. 使用定位特征

当钣金通过点焊装配时，应当在两个钣金件上添加定位特征（如定位柱和定位孔），以辅助钣金的点焊和提高钣金的装配尺寸精度。没有定位特征的辅助，钣金点焊时很容易移位，装配尺寸很难得到保证。

4.3.6 各种装配方式比较

以上各种钣金装配方式的优缺点见表 4-7。

表 4-7 钣金件装配方式对比

装配方式	使用设备	优点	缺点	使用要求
卡扣	无	1) 成本低 2) 能够快速装配与拆卸	不能完全固定零件，常需要和其他装配方式配合	
拉钉	拉钉枪	1) 操作方便，流动性好 2) 无需定位，可以自动定位 3) 可以返工	1) 需要在产品上增加沉孔，可能会增加冲模工序 2) 拉钉尾部会突出零件表面，干涉其他零件 3) 拉钉不能在有限的空间使用，拉钉枪如果被其他特征阻挡，则可能使得拉钉拉偏	在拉钉中心 8mm 左右的空间避位，以保证拉钉枪的正常工作
自铆	冲压铆合模具	1) 无需定位，可以自导向 2) 小批量生产可以手工制作	1) 需在产品上作沉孔及抽牙孔，可能增加冲压模具工序 2) 不可拆卸，一旦失效，整个装配件报废，增加成本 3) 质量不易保证，不良率较高	自铆孔中心离边不小于 6mm，自铆孔顶部空间一定范围内需避位
自攻螺钉	电动螺丝刀	可以拆卸，成本低	1) 拆卸次数有限 2) 如果抽牙滑扣，则整个装配件报废	螺钉顶部空间一定范围内需要避位
攻螺纹 + 螺钉	电动螺丝刀	装配较可靠，可以反复拆卸	增加攻螺纹工序，增加成本	螺钉顶部空间一定范围内需要避位
螺母 + 螺钉	电动螺丝刀	1) 最安全最可靠 2) 可以反复拆卸	成本很高	螺钉顶部空间一定范围内需要避位

(续)

装配方式	使用设备	优点	缺点	使用要求
点焊	点焊机	1) 无需前加工, 工艺简单 2) 无法自定位, 需要额外添加定位特征	1) 需焊接工具 2) 焊接结合力较小, 且容易脱焊 3) 不可拆卸, 一旦失效, 整个装配件报废, 增加成本 4) 使用范围有限, 不是所有的钣金材料均适合点焊	焊点中心离边不小于6mm; 焊点中心离折弯边不小于8mm



第 5 章 压铸件设计指南

5.1 压铸简介

5.1.1 压铸

压力铸造（简称压铸）是铸造的一种，是将熔融状态或半熔融状态的金属浇入压铸机的压室，在高压力的作用下，以极高的速度充填在压铸型腔内，并在高压下使熔融或半熔融的金属冷却凝固成形从而获得铸件的高效益、高效率的精密铸造方法。

简单地说，压铸是在高压作用下，使液态金属或半液态金属以极高的速度充填在压铸型腔内，并在压力下成形和凝固而获得铸件的方法。

压铸工艺的显著特点是高压、高速和高温。它常用的压射压力为几十到几百兆帕，充填速度约为 $10 \sim 50\text{m/s}$ ，有时甚至可达 100m/s 以上，充填时间很短，一般在 $0.01 \sim 0.2\text{s}$ 。压铸熔化金属的温度很高，锌合金的压铸温度为 400°C ，铜合金的压铸温度可达 1000°C 。理解压铸工艺的特点有助于设计压铸件来满足压铸工艺的要求。

5.1.2 压铸的优缺点

1. 压铸的优点

1) 生产效率高，生产过程容易实现机械化和自动化。一般冷室压铸机平均每小时压铸 $50 \sim 90$ 次，而热室压铸机平均每小时压铸 $400 \sim 900$ 次，生产效率高。

2) 压铸件的尺寸精度高，表面质量高。压铸件的一般公差等级为 GB/T 1800—2009 中的 IT13 ~ IT15，较高的精度能达到 IT10 ~ IT11，表面粗糙度 $Ra = 3.2 \sim 1.6\mu\text{m}$ ，局部可达 $0.8\mu\text{m}$ 。正因为压铸件的高尺寸精度和高的表面质量，要求不高的压铸件可以直接使用，

避免机械加工或者少采用机械加工，提高了合金的利用率，节省了大量的机械加工成本。

3) 压铸件的力学性能较高。金属熔体在压铸型内冷却速度快，又在压力下结晶，因此在压铸件靠近表面的一层晶粒较细、组织致密，强度和硬度都较高。

4) 可压铸复杂薄壁零件。压铸件可以具有复杂的零件形状，同时零件的壁厚可以较小，铝合金压铸件的最小壁厚为 0.5mm，锌合金压铸件最小壁厚可以达到 0.3mm。

5) 压铸件中可嵌铸其他材料的零件。这样可以节省贵重材料和加工成本，并可以获得形状复杂的零件和提高零件性能，减少装配工作量。

2. 压铸的缺点

1) 压铸件中容易产生气孔。由于压铸时金属熔体以非常高的速度充填模具型腔，而且模具材料又没有透气性，一般的压铸方法生产的压铸件容易产生气孔。由于气孔的存在使得压铸件不能通过热处理的方法提高强度以及在高温下使用；同时零件的加工余量不能太大，否则会去掉压铸件表面的硬化层，使得表层附近的气孔露出压铸件表面。

2) 不适宜小批量生产。压铸型复杂、成本大，所以一般仅适合于较大批量的生产。

3) 压铸高熔点合金时模具寿命较低。有的金属（如铜合金）熔点很高，对压铸型材料的抗热变形和热疲劳强度的要求很高，模具使用的寿命比较低。目前压铸件的材料主要是铝合金、锌合金和镁合金等，黑色金属很少使用压铸的方法加工。

3. 压铸的独特优势

与其他制造方法加工的零件相比，压铸件具有其独特的优势：

1) 与钣金件相比，压铸件的零件形状可以更加复杂，零件的壁厚可以变化，一个压铸件可以代替几个钣金件，从而简化产品结构。

2) 与塑胶件相比，压铸件在强度、导电性、热传导性和防电磁辐射等方面均有优势。

3) 与机械加工零件相比, 压铸件重量轻、加工成本低。

4) 与其他铸造方法相比, 压铸件产品尺寸精度高、表面质量好、生产效率高。

正因为上述压铸件的优点和独特的优势, 使得压铸件目前应用越来越广泛, 在笔记本电脑、手机、照相机、汽车、摩托车等很多产品中扮演重要的角色。在这些产品中, 压铸件作为时尚、环保、人性化和创新的卖点出现在消费者面前, 消费者也非常认可这样的产品。随着压铸技术的发展, 压铸件一定会得到更为广泛的应用。

5.1.3 关于压铸件的六大误解

尽管压铸件具有很多优点, 但是现在很多人一提到压铸件, 首先想到的就是价格昂贵、模具复杂、模具成本高、开发时间长等。这些误解导致在选择零件加工工艺方法时忽视压铸方法。压铸已经被证明是一种能够以较低成本制造复杂形状和高强度零件的加工方法。机械工程师在选择产品的加工方法时, 应当深入了解压铸工艺, 排除误解。

压铸件的六大误解包括:

1. 压铸型开发时间长

传统的思想认为压铸型复杂、开发时间长、模具修改不容易, 但是, 如今的压铸型设计可以依靠三维软件进行建模, 使用模流分析和热分析软件来模拟压铸的过程; 同时在压铸型开模之前, 使用快速原型或者数控加工方法等获得零件的样品来验证零件的功能性和可装配性等, 只有当零件通过验证后才正式开始压铸型加工, 从而避免压铸型的反复修改, 缩短压铸型的开发时间。

2. 压铸型费用较高

压铸工艺的特点决定了压铸模具材料必须能够承受较高的注射压力以及快速的冷热循环, 这就需要高等级的模具材料。另外, 压铸型的结构较为复杂, 因此一般来说压铸型费用较高。

但是, 由于压铸件具有高的尺寸精度和高的表面质量, 这就省去了二次加工的成本; 同时压铸件可以设计成较为复杂的形状, 使得一个压铸件可以替代其他多个加工方法制造的零件, 从整个产品

的角度来看产品成本是降低的。

当然，不合理的压铸件设计会造成高昂的模具费用，本章的目的之一就是讨论如何进行面向压铸的零件设计从而降低压铸型的成本。

3. 压铸型寿命短

压铸型必须承受高温高压和快速的冷热交换，因此一般认为其使用寿命比较短。但是这已经成为历史，材料技术的发展改变了这一观点，更高级别的模具钢材的出现以及特殊的表面处理能够显著改善模具的寿命。

4. 压铸件批量足够大才有经济性

一般来说，由于压铸型的成本较高，小批量的压铸件生产不具有经济性，但是当个或多个复杂的机加工零件或者其他制造方法制造的零件被重新设计合并成一个压铸件时，机械工程师会很惊奇地发现如此小批量的压铸件生产就已经具有经济性。

5. 压铸件的重量超过要求

因为压铸件材料是金属，机械工程师经常误以为压铸件的重量很大，于是在选择加工方法时，压铸常被排除在外，特别是当压铸件与塑胶件相比时。轻金属镁合金的出现改变了这一情况。现在镁合金正广泛应用于产品之中替代塑胶件，镁合金不但重量轻，而且具有良好的电磁屏蔽能力，同时产品呈现金属质感，大幅提高了产品的外观质量，例如时下正流行的具有镁合金外壳的笔记本电脑。

6. 压铸件表面粗糙、尺寸精度低

很多人误以为压铸同砂型铸造一样，表面粗糙，尺寸精度低，需要机械加工才能使用。其实压铸件表面质量和尺寸精度较高，如上节所述，压铸件的公差等级一般可达 GB/T 1800—2009 中的 IT13 ~ IT15，较高的精度能达到 IT10 ~ IT11，表面粗糙度 $Ra = 3.2 \sim 1.6\mu\text{m}$ ，局部可达 $0.8\mu\text{m}$ ，可以满足通用的零件要求。

5.2 常用压铸材料介绍

机械工程师在选择压铸材料时，应当根据产品的使用性能、工

艺性能、生产条件、经济性以及压铸材料的特点等各种因素，合理选择正确的压铸材料。常用的压铸材料包括铝合金、锌合金和镁合金等。

5.2.1 铝合金

铝合金是目前应用最多的压铸材料，广泛应用于汽车工业、摩托车工业、航空航天等。

铝合金的特点如下：

1) 铝合金的密度较小，仅为铁、铜、锌的 1/3 左右，比强度和比刚度高是其突出优点。

2) 铝合金具有良好的导电、导热性能。

3) 铝合金抗氧化腐蚀性能好。在空气中，铝的表面容易生成一层致密的三氧化二铝氧化膜，能阻止进一步被氧化。

4) 铝合金具有良好的压铸性能。铝合金压铸工艺简单，成形及切削加工性能良好，具有较高的力学性能及耐蚀性，是代替钢铁铸件最具潜力的合金。

5) 铝合金的高温力学性能很好，在低温下工作时同样保持良好的力学性能。

6) 铝合金的缺点是容易在最后凝固处产生大的集中缩孔。此外，铝合金与铁有很强的亲和力，易粘模，应在冷室压铸机上压铸。

铝合金的应用见表 5-1。

表 5-1 铝合金的应用

产品种类	应用
汽车、摩托车	汽车发动机缸体、缸盖、化油器壳体、齿轮泵、轮毂、汽车底盘、制动器踏板等
电动工具配件	电钻外壳、电机转子、保护罩、机头等
电子电器配件	微型马达座、手机外壳、计算机外壳、散热器、光驱架、电视接线盒等
其他	铝锅、机械连接件、电梯、装饰品

5.2.2 锌合金

锌合金的特点如下：

1) 锌合金具有优良的铸造性能、力学性能、韧性，在传统的机械件、五金件、锁具、玩具等行业应用很广。

2) 锌合金具有优良的电和热传导性能、良好的振动阻尼特性、良好的电磁屏蔽性能，在电子、电信、家电产品上应用不断增长。

3) 锌合金是一种通用、可靠、低成本的材料，易于压铸生产。锌合金具有良好的压铸性能，因此更容易压铸形状复杂、薄壁、尺寸精度高的产品。由于锌合金的薄壁铸造性能，可实现产品轻量化和降低成本的要求。

4) 与铝合金和镁合金相比，锌合金具有较高的抗拉强度、屈服强度、冲击韧度和硬度、较好的伸长率。

5) 锌合金压铸件表面非常光滑，可不作表面处理直接使用，同时也比较容易进行各种表面处理，如抛光、电镀、喷涂等，以获得更佳的表面质量。

6) 锌合金熔点低，在 385℃ 熔化，相比于铝合金和镁合金，锌合金最容易压铸成形。

7) 耐蚀性差。当锌合金成分中杂质元素铅、镉、锡超过标准时，将会逐渐老化而发生变形，表现为体积胀大、力学性能（特别是塑性）显著下降，时间长了就会破裂。

8) 时效性。使用时间过长，锌合金压铸件的形状和尺寸会稍有变化。

9) 锌合金不宜在高温和低温的工作环境下使用。锌合金在常温下具有良好的力学性能，但在高温下抗拉强度和低温下冲击性能都显著下降。锌合金容易老化，这是锌合金的应用范围受到限制的主要原因。锌合金的工作温度范围较窄，温度低于 -10℃ 时，其冲击韧度急剧降低，温度升高时，力学性能下降，且易发生蠕变，因此，受力零件的温度一般不超过 100℃。严格控制锌合金原材料的纯度和熔炼工艺过程，在锌合金中添加少量的 Mg 和适量的 Cu，可以减轻或消除老化现象及改善切削加工性能。

锌合金的应用主要分为两大类，见表 5-2。

表 5-2 锌合金的应用

产品种类	应用
结构用途类：作为结构零件，用于对机械强度、尺寸精度、铸件内部质量等要求高的场合	汽车化油器、支柱、门铰链、齿轮、框架和锁具等
装饰用途类：作为装饰零件，用于要求铸件表面质量高、表面光洁和造型美观的场合	玩具、灯饰、金属扣、浴室配件、照相器材等

5.2.3 镁合金

镁合金的特点如下：

1) 镁合金被称为“21 世纪的绿色工程材料”，其密度为铝合金的 2/3、钢铁的 1/4，但比强度和比刚度均优于铝合金和钢铁，远远高于工程塑料，是一种优良、轻质的结构材料。

2) 镁合金具有良好的能量吸收及振动吸收特性，用于产品外壳可以减少噪声传递，用于运动零部件可吸收振动，延长零件使用寿命。

3) 具有良好的电磁屏蔽性，可以提供电子产品的防电磁辐射性。

4) 刚性好，耐冲击。

5) 延展性好，易成形，可使产品设计具有灵活性，提升产品档次。

6) 镁合金熔点低，使得低温变形小，尺寸精度高，有利于一次开模成形；与铁的亲合力小，对模具的粘附现象小，有利于提高生产率和模具寿命；而且镁合金良好的流动性能有利于复杂件和细小件的生产。

7) 机械加工性能最好，所需切削力小、切削效果好、刀具使用寿命长。

8) 散热性好，仅次于铝合金。

9) 尺寸稳定性好，环境温度和时间变化对尺寸的影响小。

10) 可 100% 再生。

11) 镁合金在空气中易氧化，镁合金压铸件成形后必须经过表

面处理，提高耐蚀性，改善零件表面质量。常用的表面处理方法包括电镀、喷涂、阳极氧化等。同时镁合金有高温脆性大、热裂倾向大的缺点。

镁合金的典型应用见表 5-3。

表 5-3 镁合金的应用

产品种类	应 用
汽车	发动机盖、减振器、齿轮
笔记本电脑	机壳、散热组件、机构件
手机	外壳、支架
数码相机	机壳

5.3 设计指南

本章将详细介绍压铸件设计指南。在满足产品功能的前提下，应合理设计压铸件，简化压铸型结构，降低压铸成本，减少压铸件缺陷和提高压铸件零件质量。由于注射加工工艺来源于铸造工艺，因此压铸件设计指南在某些方面和塑胶件设计指南非常相似。

5.3.1 零件壁厚

1. 合适的零件壁厚

压铸件壁厚是压铸件设计时最重要的参数之一。压铸件壁厚与熔化金属的流动性、压铸件的质量、力学性能以及成本都有很大的关系。

压铸件壁厚太小，压铸时充填困难，容易出现充填不良。

压铸件壁厚太大，容易出现内部晶粒粗大，产生缩孔、气孔等缺陷，同时外表面产生凹陷，使得压铸件力学性能下降。薄壁铸件致密性好，相对提高了铸件强度及耐压性。另外，壁厚太大增加零件重量和浪费过多金属，造成成本增加。一般来说，压铸件的零件壁厚不应该超过 5mm。

合适的零件壁厚是指零件壁厚不能太小，同时零件壁厚不能太大。这里的零件壁厚是指在零件上任一区域的壁厚。铝合金、锌合

金、镁合金的所能达到的最小壁厚和合适壁厚推荐值见表 5-4。

表 5-4 铝合金、镁合金、锌合金的最小壁厚和合适壁厚

(单位: mm)

壁的面积 /cm ²	铝、镁合金		锌合金	
	最小壁厚	合适壁厚 (推荐)	最小壁厚	合适壁厚 (推荐)
≤25	0.8	2.0	0.5	1.5
>25 ~ 100	1.2	2.5	1.0	1.8
>100 ~ 500	1.8	3.0	1.5	2.2
>500	2.5	3.5	2.0	2.5

如果零件局部区域壁厚太大,应当使用掏空的设计使得零件整体壁厚均匀,这样既避免壁厚区域出现缩孔等缺陷,又减轻了零件重量,一举两得,如图 5-1 所示。

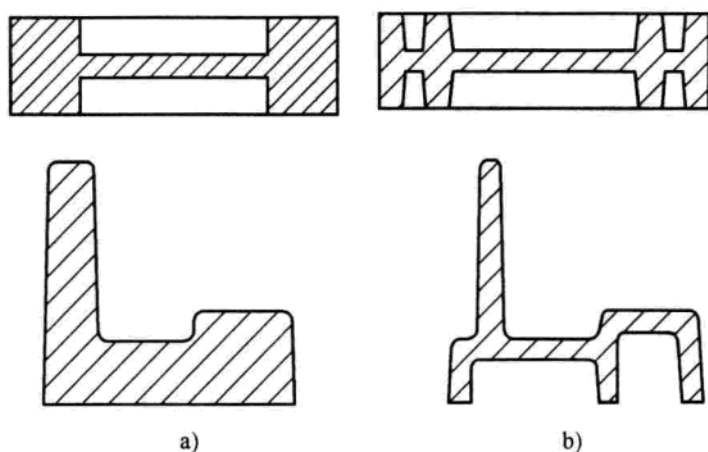


图 5-1 避免零件局部壁厚太大

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 零件壁厚均匀,壁厚变化处均匀过渡

在压铸件的各个截面,壁厚应当均匀。例如,零件壁厚设计是 2.5mm,那么在零件的任一截面区域零件壁厚都应该是 2.5mm 或接近 2.5mm。如果因为功能等其他要求,零件壁厚不能均匀,那么零件中壁厚处与壁薄处的壁厚比值不应超过 3。零件均匀壁厚的设计如图 5-1、图 5-2 所示。

如果零件中壁厚不均匀,应当避免零件壁厚的急剧变化。零件壁厚急剧变化,会影响熔化金属的流动性,成为发生熔化金属的流

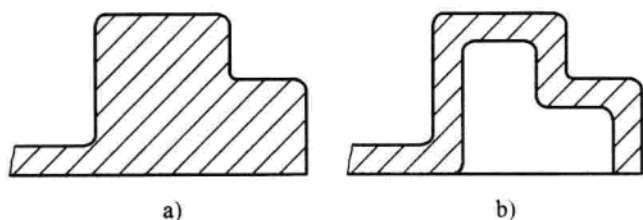


图 5-2 零件壁厚均匀

a) 原始的设计 b) 改进的设计

动不良以及熔化金属的折皱等缺陷的原因。另外，由于壁厚壁薄处凝固时间的不同，会产生不均匀的应力，容易造成零件发生龟裂以及变形。所以，如果零件中出现壁厚急剧变化的情况，应当考虑增加斜度减缓变化，使之均匀过渡，如图 5-3 所示。

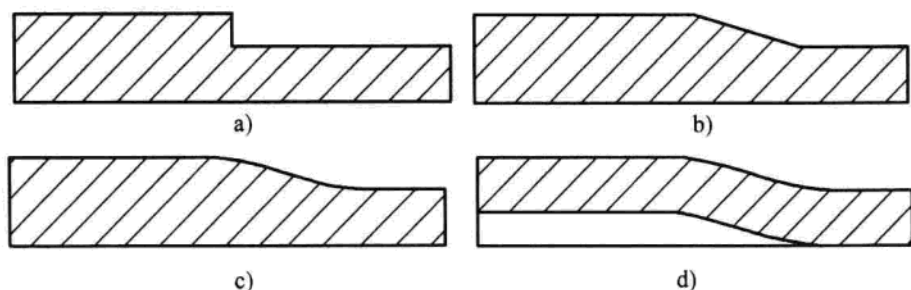


图 5-3 零件壁厚变化处均匀过渡

a) 最差的设计 b) 较好的设计一 c) 较好的设计二 d) 最好的设计

5.3.2 铸件最小孔

压铸成形能够直接压铸出深而小的孔，但并不是所有的孔都能压铸出，太小和太深的孔就很难压铸出，因为孔是通过压铸型的内型芯铸出，细而长的型芯在承受高温熔化金属的冲击和严重的热应力作用下，很容易发生变形、弯曲甚至折断。即使最小孔能顺利铸出，模具的维护费用会比较高，模具寿命短。

各种压铸合金所能铸出的最小孔径和最大孔深见表 5-5。

如果压铸件的孔太小或孔的深度超过表中的值，可以压铸出定位痕后再使用机械加工方法加工，但这会增加零件的成本。

另外，需要考虑孔与孔的距离、孔与槽的距离、孔与边缘的距离等，以保证压铸型具有足够的强度承受高温熔化金属的冲击和严

重的热应力作用。

表 5-5 铝、镁、锌合金的最小孔和最大孔深

(单位: mm)

压铸合金种类	最小孔径 d		孔深为孔径 d 的倍数			
	经济上合理的	技术上可行的	不通孔		通孔	
			$d > 5$	$d < 5$	$d > 5$	$d < 5$
铝合金	2.5	2.0	$4d$	$3d$	$8d$	$6d$
镁合金	2.0	1.5	$5d$	$4d$	$10d$	$8d$
锌合金	1.5	0.8	$6d$	$4d$	$12d$	$8d$

5.3.3 避免压铸型局部过薄

同铸件最小孔的道理一样,在铸件的任一位置,其对应的压铸型的强度都应该足够大。在进行铸件设计时,工程师很容易忽略这一点。如图 5-4 所示,在原始的设计中,支柱与壁的距离太近,造成此处模具很薄,强度低,在高温高压下很容易变形、弯曲和折断;改进的设计中,支柱离壁的距离至少大于 3mm,模具强度高,稳定性好。

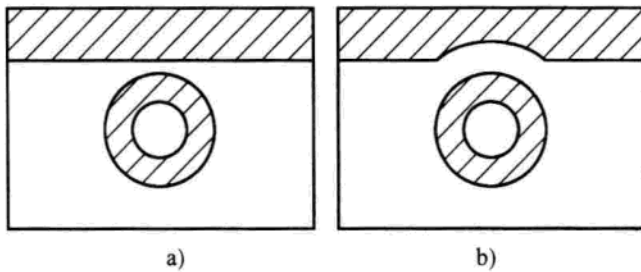


图 5-4 避免压铸型局部过薄

a) 原始的设计 b) 改进的设计

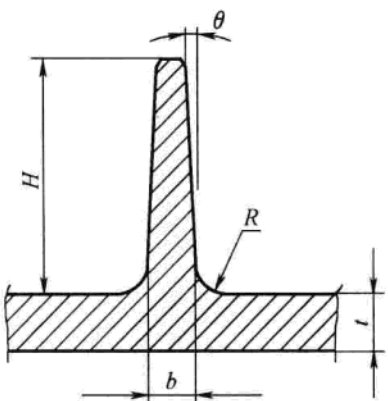
5.3.4 加强肋的设计

加强肋主要有两个作用:其一是增强产品的强度、防止零件变形(为了提高零件的强度,正确的方法是合理设置零件的加强肋,而不是增加零件壁厚);其二是辅助熔化金属的流动。

(1) 加强肋的尺寸 加强肋的设计需要符合相关的壁厚原则。如果加强肋的尺寸设计不合理,造成零件局部厚度太大或零件截面急剧变化,就容易使得零件局部产生气孔、缩孔和外表面凹陷等缺

陷，或者引起应力集中，导致零件龟裂。加强肋的设计参考尺寸见表 5-6。

表 5-6 加强肋的参考尺寸 (单位: mm)

	零件壁厚	t
	根部厚度	$b = (0.6 \sim 1) t$
	高度	$H \leq 5t$
	圆角半径	$b \leq R \leq 1.25b$
	脱模斜度	$\theta = 1^\circ \sim 3^\circ$

1) 加强肋的根部厚度一般不大于此处壁的厚度。

2) 加强肋的脱模斜度为 $1^\circ \sim 3^\circ$ 。

3) 加强肋的根部应当添加圆角，以避免零件截面急剧变化，同时辅助熔化金属流动，减少零件应力集中，提高零件强度。圆角半径一般接近于此处零件壁厚。

4) 加强肋高度不超过加强肋厚度的 5 倍。

(2) 避免平板式设计，添加加强肋提高零件的强度 加强肋是提高零件强度最好的方法。压铸零件应避免平板式设计。平板式零件强度低、容易变形，合理的加强肋设置可以提高零件的强度，同时可以减小零件的变形。通过添加加强肋来提高零件强度的设计如图 5-5 所示。

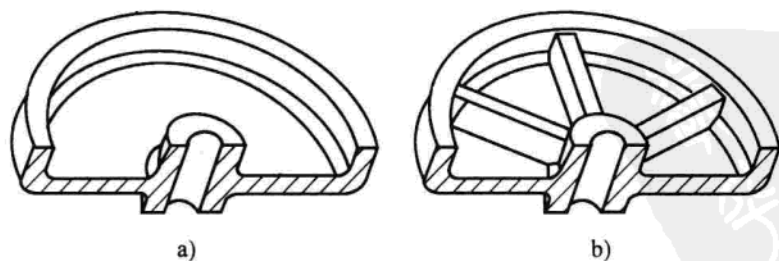


图 5-5 使用加强肋提高零件的强度

a) 原始的设计 b) 改进的设计

(3) 添加加强肋辅助熔化金属的流动，加强肋的方向与熔化金

属的流向一致 除了增加压铸件的强度之外，加强肋的另外一个作用是辅助熔化金属流动，提高零件的充填性能。加强肋的方向应当与熔化金属的流动方向一致。如果加强肋的方向与熔化金属的流动方向垂直，可能会造成金属流动的紊乱。图 5-5 所示改进的设计中，加强肋既增加了零件的强度，又辅助熔化金属的流动。

(4) 加强肋的位置分布要合理，尽量做到对称、均匀 加强肋的位置分布要合理，尽量做到对称、均匀，如图 5-6 所示。

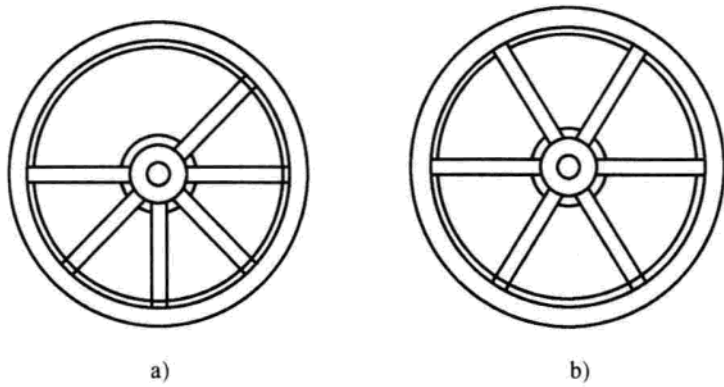


图 5-6 加强肋的位置应当对称、均匀

a) 原始的设计 b) 改进的设计

(5) 加强肋连接处避免局部壁厚太大 加强肋与加强肋的连接处、加强肋与主壁的连接处等位置容易出现局部壁厚太大的情况。合理的零件设计（例如使用掏空的设计）可以避免出现这种情况，如图 5-7 所示。

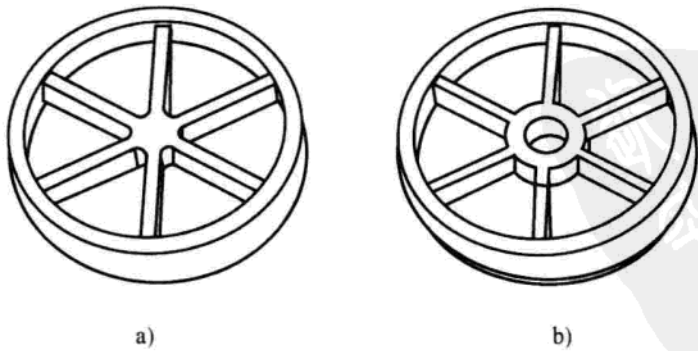


图 5-7 加强肋的相交处避免局部太厚

a) 原始的设计 b) 改进的设计

5.3.5 脱模斜度

熔化金属被注射到压铸型后，在凝固时由于收缩会产生对压铸型的抱紧力。为了顺利脱模，减小脱模阻力、推出力和抽芯力，以及减少对模具的损耗和提高铸件表面质量，在设计铸件时，铸件应当设置一定的脱模斜度。如图 5-8 所示，原始的设计中零件没有脱模斜度，零件很难脱模；改进的设计中零件具有脱模斜度，零件能够顺利脱模。

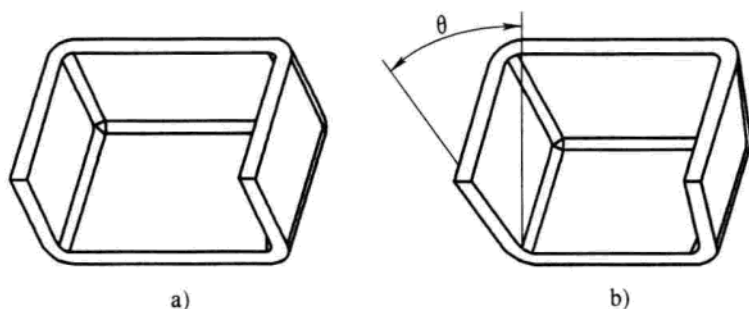


图 5-8 脱模斜度的设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

脱模斜度的设计原则是在允许的范围内，尽量取较大的脱模斜度，因为脱模斜度不足容易发生粘模以及拉模，造成零件外观表面缺陷。

需要注意的是铸件与注射零件不同，因为铸件没有弹性，铸件不能强行脱模。

常用的三种压铸合金材料铝合金、锌合金、镁合金与压铸型的粘着度不同，脱模斜度分别为：

铝合金与压铸型的粘着度较大，内表面脱模斜度一般取 1° ；

镁合金与压铸型的粘着度略小于铝合金，内表面脱模斜度一般取 0.75° ；

锌合金与压铸型的粘着度最小，内表面脱模斜度一般取 0.5° 。

铸件外表面的脱模斜度可以取内表面的脱模斜度的 2 倍，以保证零件脱模时留在公模侧。

5.3.6 圆角的设计

1. 避免外部尖角

压铸件应当避免外部尖角。外部尖角处不但因为太薄易发生充填不良、金属组织不致密、强度低，而且锋利的尖角容易带来安全问题，对操作人员和消费者造成人身伤害，因此，外部尖角处应当添加一定的圆角，如图 5-9 所示。



图 5-9 避免外部尖角

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 内部圆角设计

压铸件应当避免内部任意壁与壁的连接处产生尖角，尖角处应当设计成一定的圆角。壁与壁连接处的圆角对零件的性能与质量以及模具的寿命具有非常大的作用：

1) 辅助熔化金属的流动，减少涡流或湍流，改善充填性能，有利于气体排出。

2) 尖角容易使得压铸件产生应力集中而导致裂纹缺陷，即使在成形过程中避免了裂纹缺陷，应力集中也会使得零件在受力作用下而失效。压铸件圆角的设计避免产生应力集中，从而提高压铸件的强度。

3) 提高压铸模具的使用寿命。压铸件上的尖角在模具对应处也是尖角，很容易在压铸过程中发生损坏。

4) 当压铸件需要进行电镀时，圆角可获得均匀镀层，防止尖角处沉积。

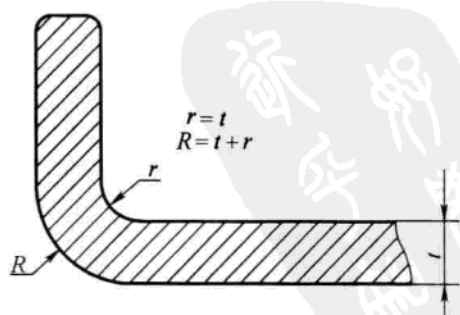


图 5-10 圆角的设计

圆角的大小一般如图 5-10

所示。内圆角半径的大小一般取零件的壁厚，外圆角半径的大小为零件的壁厚加上内圆角半径。圆角半径不能过大，圆角半径过大，零件局部区域太厚，容易产生缩孔、气孔和零件外表面凹陷等缺陷。

一个压铸件的内部圆角的典型设计如图 5-11 所示。

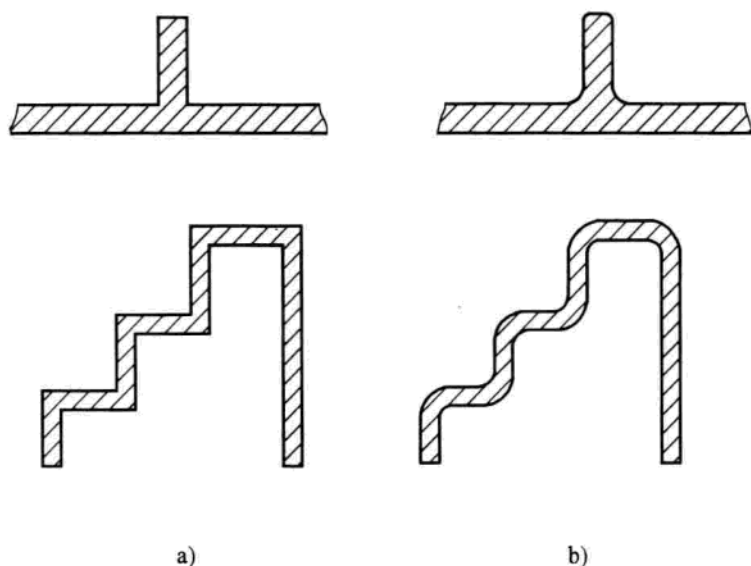


图 5-11 避免内部尖角

a) 原始的设计 b) 改进的设计

5.3.7 支柱的设计

1. 避免支柱离壁太近或者支柱之间太近

支柱的设计需要遵循均匀壁厚和避免局部壁厚太大等原则。支柱不能离零件壁太近，两个支柱之间距离不能太近，以免造成零件局部壁厚太大，从而使得零件产生凹陷、气孔和缩孔等缺陷，或者使得模具出现局部太薄、模具强度低、寿命短等问题。支柱的设计如图 5-12 所示。

2. 尽量降低支柱的高度

支柱的高度不能太大，否则支柱强度低，而且不易充填。

3. 支柱四周添加加强肋

支柱四周添加加强肋，可以提高支柱的强度和辅助支柱的充填，

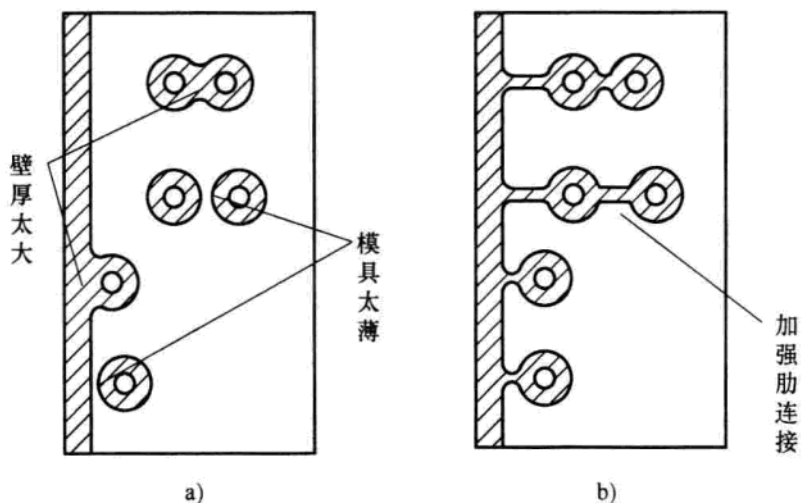


图 5-12 避免支柱与壁太近、支柱与支柱太近

a) 原始的设计 b) 改进的设计

避免孤零零的支柱设计，如图 5-13 所示。

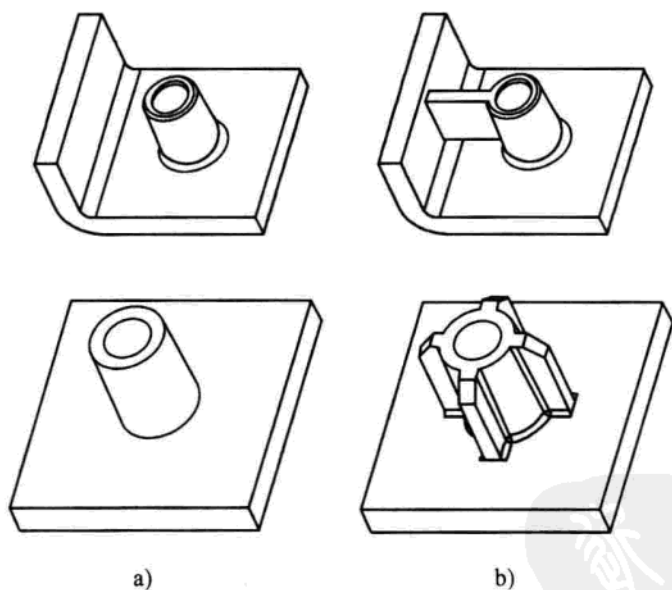


图 5-13 使用加强肋连接支柱与壁

a) 原始的设计 b) 改进的设计

4. 重新设计倾斜支柱以简化模具结构

如果支柱是倾斜的，合理的设计优化可以简化模具结构，降低模具成本，如图 5-14 所示。

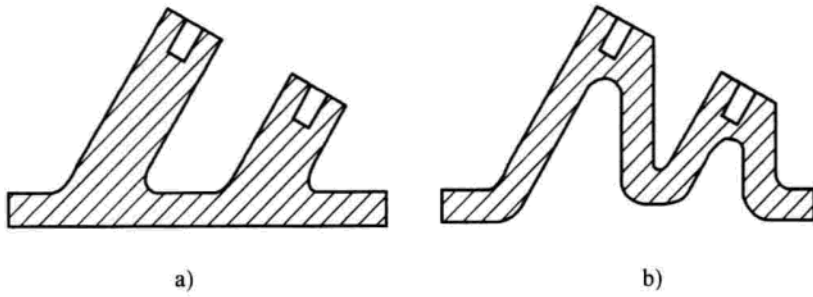


图 5-14 合理设计支柱以简化模具结构

a) 原始的设计 b) 改进的设计

5.3.8 字符

很多铸件在其表面上需要添加诸如商标、零件料号等字符，这些字符均可在铸件表面直接铸出。字符的设计需要符合以下原则：

1. 字符凸出于零件表面较好

字符凸出于铸件表面比字符凹陷于铸件表面好。字符凸出于铸件表面，对应于模具上就是凹陷，这样模具加工费用比较低，模具维护费用低。如果字符是凹陷于铸件表面，对应于模具上就是凸出，模具上字符周围的金属都需要去除，模具加工费用比较高，模具维护费用高。

字符的设计如图 5-15 所示。如果字符要求凹陷于零件表面，但是又不希望增加模具加工费用，那么可以通过增加一个凸台来实现，见图 5-15c。

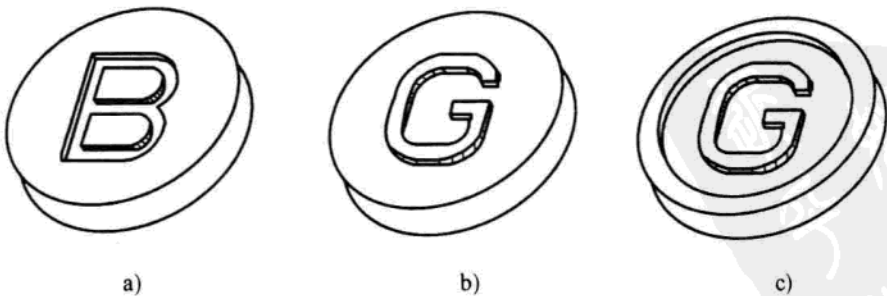


图 5-15 字符的设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计一 c) 改进的设计二

2. 字符的相关尺寸

字符的大小需要保证字符能够顺利充填，最小的字符宽度 $W = 0.25\text{mm}$ ，高度 $H = 0.25 \sim 0.50\text{mm}$ ，以及 10° 的脱模斜度 θ ，如图 5-16 所示。而字符一般不放置于侧壁，这样会造成字符倒扣，无法脱模。

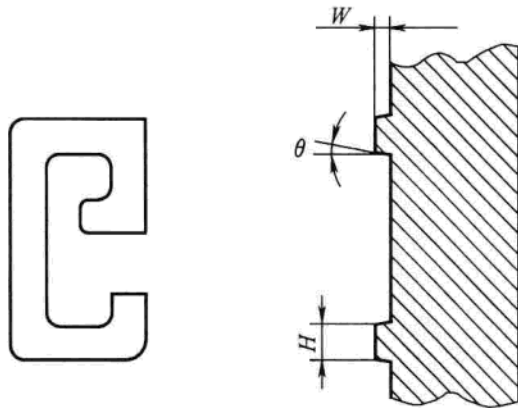


图 5-16 字符的相关尺寸

5.3.9 螺纹

1. 外螺纹避免全螺纹设计

设计外螺纹时，避免全螺纹的设计，而应在分型面处设计一个小的平面，如图 5-17 所示。全螺纹设计容易造成分型面两侧的螺纹对齐困难，因为在分型面处公母模不可能完全对齐。

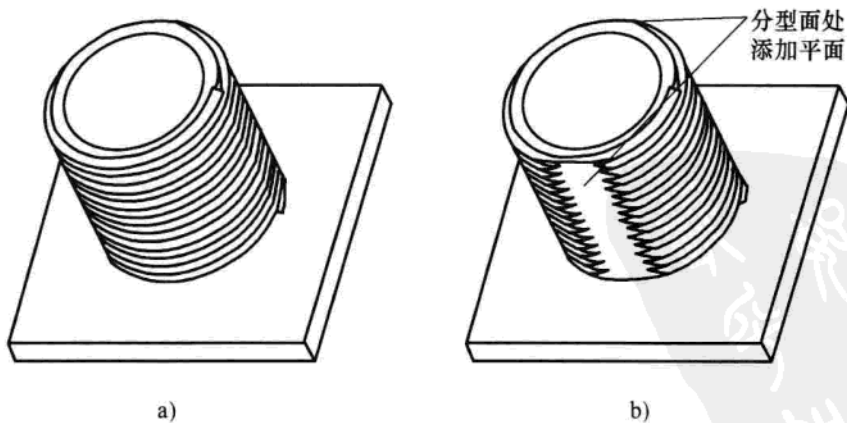


图 5-17 合理的外螺纹设计

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 内螺纹不宜直接铸出

内螺纹可以铸出，但这需要特殊的压铸型结构，使得其能够旋转从模具中脱出，这会造成模具和零件费用的增加。内螺纹一般使用机械加工的方法生成。

5.3.10 为飞边和浇口的去除提供方便

铸件飞边和浇口需要通过操作人员的手工操作、机械加工或者购买昂贵的专用设备来去除，成本较高。铸件的设计需要考虑飞边和浇口去除的方便性，不合理的零件设计会造成飞边和浇口的去除成本大幅提高，甚至超过压铸加工的成本。

1. 避免零件壁与分型面呈锐角

在零件型面线上，避免零件壁与分型面呈锐角。如果在连接处增加一段约 1.5mm 的平面，在飞边和浇口的去除过程中，飞边和浇口很容易被去除，如图 5-18 所示。

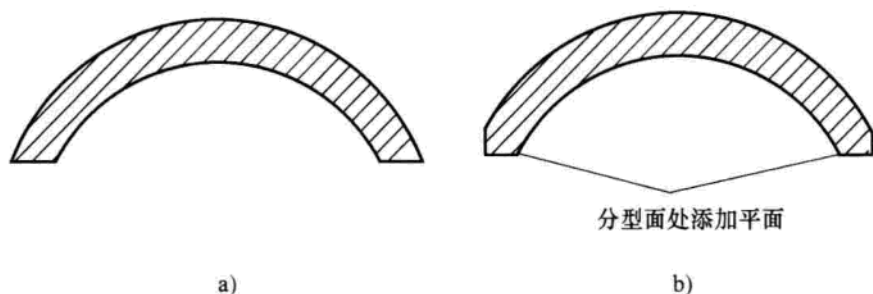


图 5-18 避免零件壁与分型面锐角连接

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 简化零件，避免复杂的分型面形状

飞边产生于分型面附近。复杂的分型面会造成飞边的去除困难，零件成本增加。通过简化零件形状、避免复杂的分型面形状，可以使得零件的飞边去除容易。如图 5-19 所示，在原始的设计中，飞边存在于锯齿形的四周，很难去除；而在改进的设计中，飞边存在于圆周形的一周，很容易通过手工或者机械加工去除。

3. 避免严格的飞边和浇口的去除要求

飞边和浇口去除要求越严格，去除的成本就越高，零件的成本也越高，因此在不影响零件的功能及外观等的前提下，应尽量避免

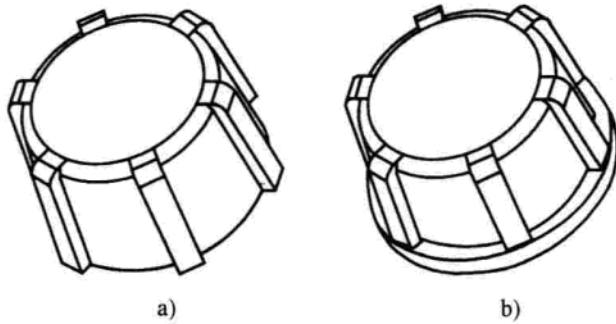


图 5-19 避免复杂的分型面形状

a) 原始的设计 b) 改进的设计

严格的飞边和浇口去除要求。

同时，合理设置零件的分型面，把飞边隐藏在零件不重要的外观面和非功能配合面上，可以允许宽松的飞边去除要求。

5.3.11 压铸件的公差要求

在“面向装配的产品设计”一章中我们讨论了公差，在塑胶件、在钣金件中也反复地讨论了公差。公差对于产品设计非常重要，因为公差就等于成本，公差越严格，成本就越高。对压铸件也是如此。不过因为压铸件会涉及二次加工即机械加工，而机械加工的成本比压铸工艺高，情况就变得较为复杂。但有一点是不变的，那就是在满足零件使用性能的要求下，合理地设置零件公差，可降低零件的总体成本。

1. 压铸件的尺寸公差精度

压铸件的尺寸公差精度受到分型面和抽芯机构的影响，在同一型腔内，压铸件的尺寸公差精度较高；在不同型腔内，压铸件的尺寸公差精度较低。

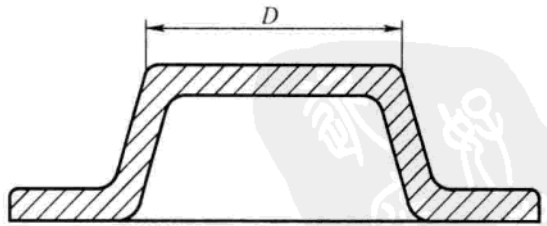


图 5-20 同一型腔内的尺寸

同时抽芯机构对压铸件的尺寸影响也较大。

(1) 同一型腔内的推荐尺寸公差 同一型腔内的尺寸是指尺寸仅仅在压铸型的同一型腔内，即公模或母模内，如图 5-20 所示，其

推荐尺寸公差见表 5-7。

表 5-7 同一型腔内的推荐尺寸公差 (单位: mm)

尺寸大小	铝、镁合金	锌合金	铝、镁合金	锌合金
	重要尺寸公差		非重要尺寸公差	
≤ 25	± 0.10	± 0.08	± 0.25	± 0.25
$> 25 \sim 300$, 每增加 25mm, 公差增加	± 0.038	± 0.025	± 0.05	± 0.038
> 300 , 每增加 25mm, 公差增加	± 0.025	± 0.025	± 0.025	± 0.025

(2) 不同型腔内的尺寸公差
不同型腔内的尺寸, 由于公、母模分开制作和配合精度以及胀模因素等原因容易产生变化, 如图 5-21 所示。此时, 尺寸公差除了表 5-7 所列的公差之外, 还需要再加上表 5-8 所列的尺寸公差。

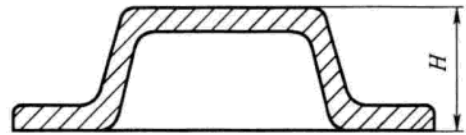


图 5-21 与分型面相关的尺寸

表 5-8 不同型腔内的尺寸附加公差 (单位: mm)

型腔投影面积/cm ²	铝、镁合金	锌合金
≤ 300	± 0.13	± 0.10
$> 300 \sim 600$	± 0.20	± 0.15
$> 600 \sim 1200$	± 0.30	± 0.20
$> 1200 \sim 1800$	± 0.40	± 0.30

(3) 与抽芯机构相关尺寸公差
由于抽芯机构的尺寸精度和配合精度会影响该尺寸的公差, 与抽芯机构相关的尺寸如图 5-22 所示。尺寸公差除了表 5-7 所列的公差之外, 还需要再加上表 5-9 所列的尺寸公差。

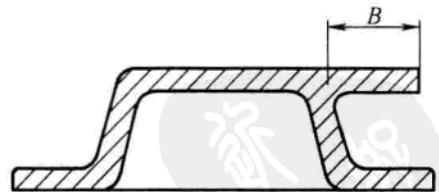


图 5-22 与抽芯机构相关的尺寸

2. 在满足零件使用性能下, 尽量降低压铸件的公差要求

在满足零件使用性能的前提下, 尽量使用宽松的压铸件公差,

表 5-9 与抽芯机构相关的尺寸附加公差 (单位: mm)

抽芯机构投影面积 / cm^2	铝、镁合金	锌合金
≤ 60	± 0.13	± 0.10
$> 60 \sim 120$	± 0.20	± 0.15
$> 120 \sim 300$	± 0.30	± 0.20
$> 300 \sim 600$	± 0.40	± 0.30

因为严格的公差会增加零件的成本:

1) 严格的零件公差必然意味着严格的模具公差, 模具成本必然增加。

2) 压铸型寿命会因为过高的公差要求而缩短。随着时间的推移, 压铸型的尺寸精度逐渐降低, 当不能满足零件严格的公差要求时, 压铸型就寿终正寝了。

3) 为了维持严格的零件尺寸公差, 压铸型必须经常维护和替换。

4) 使用更多的压铸型零件和高频率的压铸型尺寸检验来保证零件严格的公差, 这会增加零件成本。

5) 更高的压铸件不良率。

3. 为避免机械加工, 尽量提高公差要求

避免机械加工能够降低零件成本。在压铸工艺所能达到的尺寸精度范围内, 如果提高压铸件的公差要求可以避免机械加工, 那就尽量提高压铸件的公差要求, 从而降低零件成本。

4. 合理选择分型面, 提高重要零件尺寸的精度

影响压铸件公差的主要因素是模具的结构, 其中最主要的是分型面和抽芯机构的位置。在模具进行装配时, 模具的公母模和抽芯机构不可能完全吻合, 这就会影响相关尺寸的精度。对于重要尺寸, 可以合理选择分型面, 避免分型面对其尺寸精度产生影响, 从而提高其尺寸精度。如图 5-23 所示的零件, 其分型面有 A、B 和 C 三种选择, 不同的分型面对产品尺寸精度影响不同, 应当根据产品的尺寸精度要求合理选取分型面。

1) 如果 D_1 和 D_2 的同轴度很重要, 应选择 C—C 为分型面, D_1

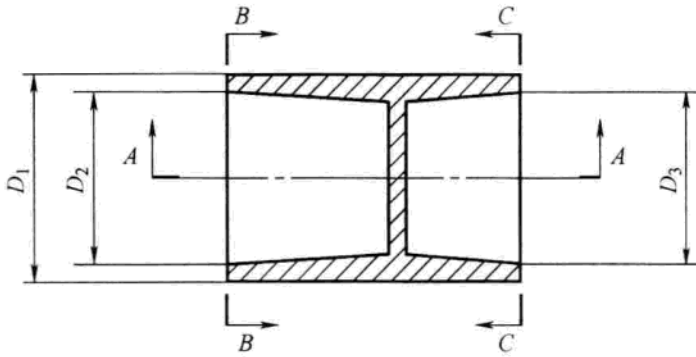


图 5-23 分型面的选择对尺寸精度的影响

和 D_2 处于同一个模具型腔中，同轴度很容易保证。但因为 D_1 和 D_3 处于不同的型腔中， D_1 和 D_3 的同轴度很难保证，容易偏心。

2) 如果 D_1 和 D_3 的同轴度很重要，应选择 $B-B$ 为分型面， D_1 和 D_3 处于同一个模具型腔中，同轴度很容易保证。但因为 D_1 和 D_2 处于不同的型腔中， D_1 和 D_2 的同轴度很难保证，容易偏心。

3) 如果需要保证 D_1 在左端或右端直径的一致，则选择 $A-A$ 为分型面。但因为 D_1 分别处在公母模中， D_1 的外观在分型面处上会出现断差和飞边；同时 D_2 和 D_3 与 D_1 处于不同的型腔中，三者的同轴度很难保证；另外， D_2 和 D_3 需要抽芯机构（模具结构复杂）。

5.3.12 简化模具结构，降低模具成本

1. 避免零件内部侧凹

压铸件的内部侧凹会阻止零件从压铸型腔中顺利脱出，一般需要通过侧抽芯机构或通过二次加工来获得，这会大幅增加模具或零件的成本，因此，避免零件内部侧凹可以降低模具或零件的成本。

如图 5-24 所示，可以通过四种方法来避免零件内部侧凹。

2. 避免零件外部侧凹

压铸件的外部侧凹阻止零件从压铸型腔中顺利脱出，也需要通过侧抽芯机构或二次加工来获得，这会大幅增加模具零件的成本，因此，应避免零件外部侧凹从而降低零件成本，如图 5-25 所示。

3. 避免抽芯机构受阻

压铸件的设计需要避免抽芯机构在运动过程中受到其他零件特

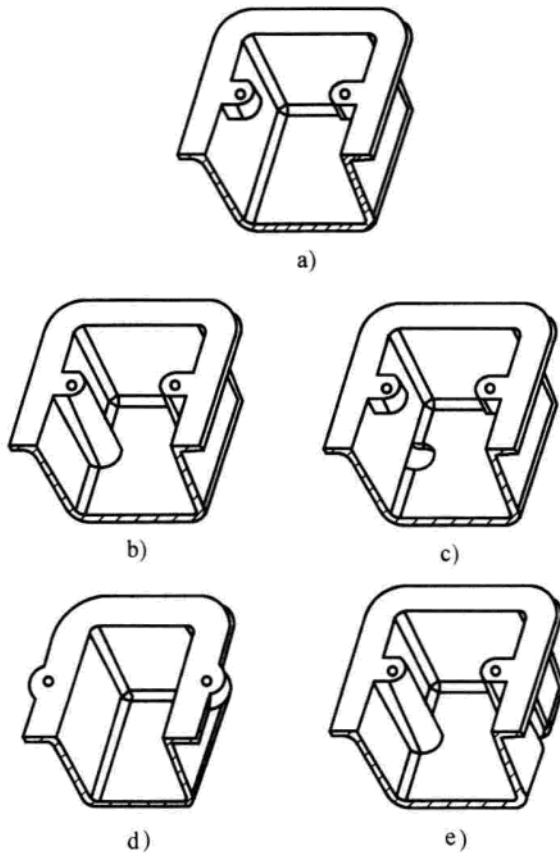


图 5-24 避免零件内部侧凹

a) 原始的设计 b) 改进的设计一 c) 改进的设计二
d) 改进的设计三 e) 改进的设计四

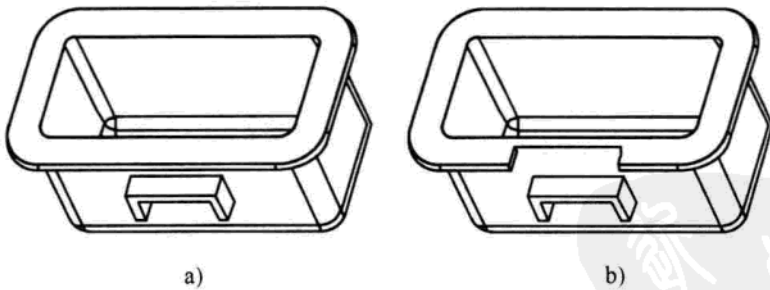


图 5-25 避免零件外部侧凹

a) 原始的设计 b) 改进的设计

征的阻挡，如图 5-26 所示。

4. 避免压铸分型面带圆角

如果铸件分型面带圆角，则压铸型较复杂，模具加工难，圆

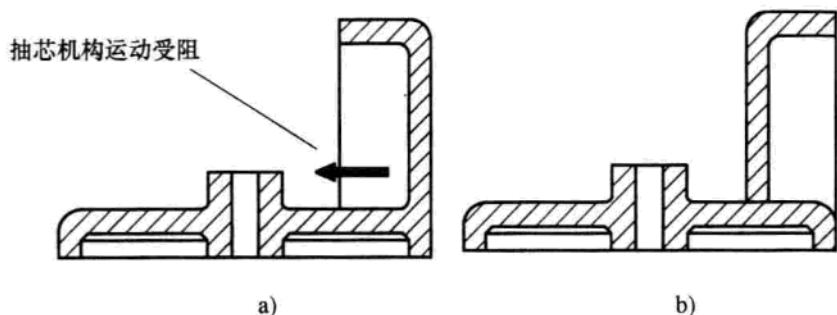


图 5-26 避免抽芯机构运动受阻

a) 原始的设计 b) 改进的设计

角处模具强度低，寿命下降，如图 5-27 所示。

5. 合理选择分型面， 简化模具结构

分型面的选择应当使得模具结构简单，模具便于加工，模具费用低。在图 5-23 所示的零件中，选择 A—A 为分型面，则零件 D_1 和 D_3 处均需要抽芯机构，模具结构复杂，模具费用高；选择 B—B 和 C—C 为分型面，则模具结构简单，模具费用低。

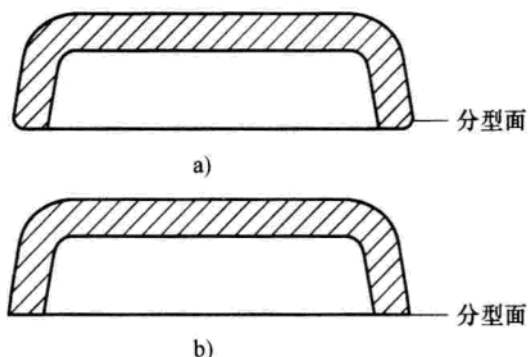


图 5-27 避免分型面带圆角

a) 原始的设计 b) 改进的设计

5.3.13 机械加工

1. 避免机械加工

压铸件应当尽量避免机械加工，因为：

1) 压铸件能够达到较高的尺寸精度和外观表面质量，在进行产品设计时，可以通过对压铸件提出宽松的尺寸和表面质量要求，从而避免机械加工。

2) 压铸件表层坚实致密，具有较高的力学性能。机械加工可能会破坏压铸件的表面致密层。

3) 压铸件内部有时会有气孔存在，机械加工后气孔外露，会影

响零件的应用。

4) 机械加工会大幅增加零件成本。

2. 压铸件设计便于机械加工和减小机械加工面积

如果机械加工无法避免，则应当设计压铸件使其便于机械加工和减小机械加工面积，从而减小机械加工的成本，如图 5-28 所示。

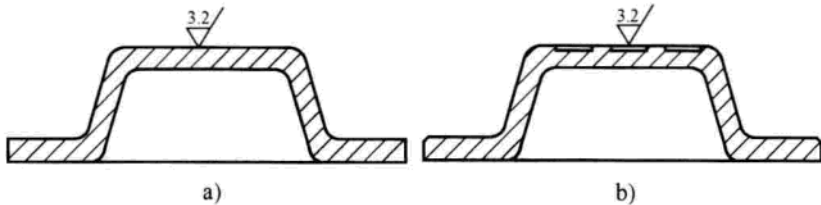


图 5-28 减小机械加工面积

a) 原始的设计 b) 改进的设计

3. 机械加工余量越小越好

为了提高压铸件的尺寸精度和外观表面质量，对零件的某些部分可以适当进行机械加工。从上文了解到压铸件外表层是致密层，而内部则相对比较疏松，同时存在气孔和针孔，因此压铸件的机械加工余量越少越好，防止破坏致密层。切削加工的表面机械加工余量见表 5-10。

表 5-10 表面机械加工余量 (单位: mm)

加工面最大尺寸	≤50	>50 ~ 120	>120 ~ 260	>260 ~ 400	>400 ~ 630
单面加工余量	0.3 ~ 0.5	0.4 ~ 0.7	0.6 ~ 1.0	0.8 ~ 1.4	1.2 ~ 1.8

孔的加工余量见表 5-11。对于螺钉孔，最好是先压铸出孔，然后攻螺纹或使用自攻螺钉，这样能够保证螺扣处在表面致密层区域。如果直接在压铸件上钻孔，螺扣容易因为内部疏松的结构而造成折断。

表 5-11 孔的加工余量 (单位: mm)

孔径	≤6	>6 ~ 10	>10 ~ 18	>18 ~ 30	>30 ~ 50	>50 ~ 80
加工余量	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30

5.3.14 使用压铸件简化产品结构，降低产品成本

在产品设计中，合理利用压铸件强度高、导电性好以及可铸出

复杂结构等优点，可以减少产品零件数量，简化产品结构，降低产品成本以及提高产品质量等。

1. 使用压铸件代替机械加工零件

利用压铸工艺成本低于机械加工工艺成本的特点，在满足零件强度及尺寸精度等的前提下，使用压铸件代替机械加工零件可以大幅降低零件成本，如图 5-29 所示。

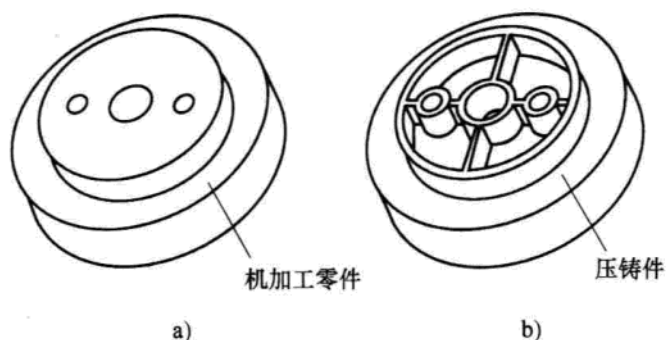


图 5-29 使用压铸件代替机加工零件

a) 原始的设计 b) 改进的设计

2. 使用压铸件减少零件数量，简化产品结构

在面向制造的设计指南中，最有效的简化产品结构和降低产品成本的方法是把多个零件合并成一个零件，减少零件数量。利用压铸件的优点，把多个由其他工艺制造的零件合并成一个压铸件正是这种方法的具体体现。

(1) 压铸件替代塑胶件 在使用塑胶件的同时又需要零件具有导电特性和电磁屏蔽性能时，常用的方法有：

- 1) 塑胶件喷导电漆或电镀等（不良率高）。
- 2) 使用导电塑胶（原料成本高）。
- 3) 增加不锈钢弹片。
- 4) 增加导电布、铜箔等导电零件。

利用压铸件的导电特性和优良的电磁屏蔽性能，可以使用压铸件代替上述四种方法。如图 5-30 所示，使用压铸件代替塑胶件与不锈钢弹片的组合，可以减少产品零件数量，简化产品设计，降低产品成本，提高产品质量。

(2) 压铸件替代钣金件和机械加工件 利用压铸件具有复杂零

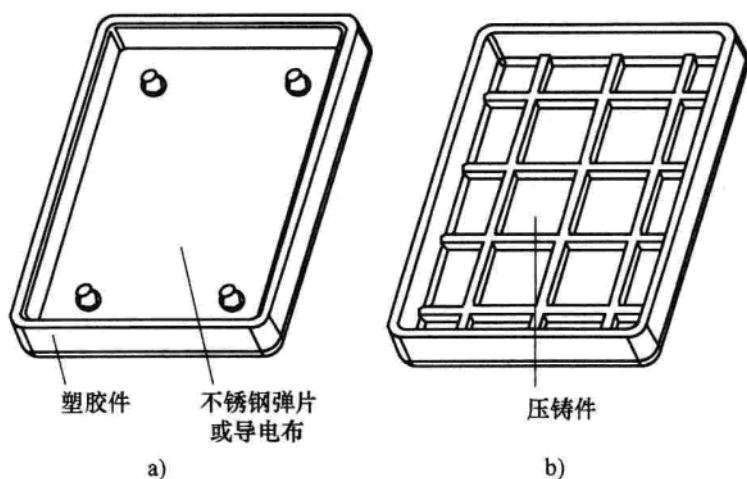


图 5-30 使用压铸件代替塑胶件

a) 原始的设计 b) 改进的设计

件结构的特点，可以使用压铸件代替钣金冲压件和机械加工件的组合，从而减少产品零件数量，简化产品设计，降低产品成本，提高产品质量。如图 5-31 所示，原始的设计中包括三个零件：钣金件、定位柱和衬套；改进的设计中使用一个压铸件就代替了上述三个零件。

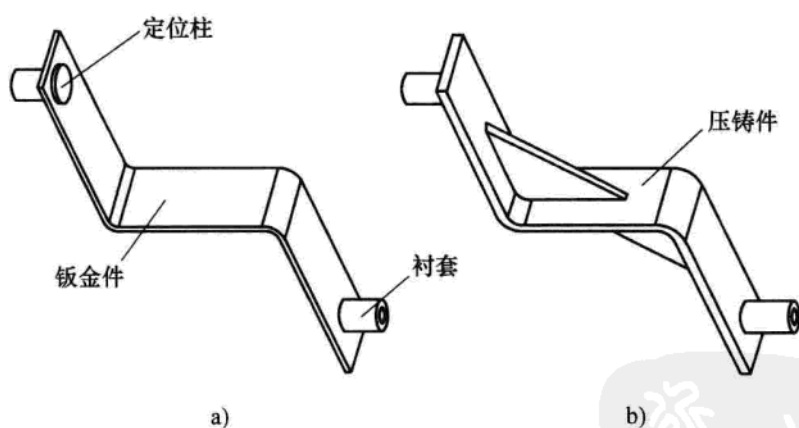


图 5-31 使用压铸件代替钣金件和机械加工件

a) 原始的设计 b) 改进的设计

第6章 公差分析

6.1 公差分析简介

6.1.1 引言

机械工程师在进行产品开发时，常常会碰到以下问题：

“设计时零件之间没有干涉，怎么装配时就干涉了？”

“每个零件的尺寸都在公差范围内，但零件怎么就是装配不上？”

“我作了公差分析，但零件无法达到尺寸精度，装配问题还是发生了。”

“每个零件尺寸的精度已经达到了制造能力的极限，但公差分析的结果依然不满足要求，我该怎么办？”

“公差分析没什么用，纯粹是为了应付客户。”

“我不会作公差分析，公差分析很难，需要经过专业的培训。”

本章将致力于解决以上问题并讲述公差分析的概念、目的、公差分析的详细步骤以及公差分析指南，并将提供公差分析的 Excel 计算表格。

6.1.2 公差的概念

机械工程师在进行产品设计时，会按照产品的功能要求定义零件的尺寸大小，但现实往往是比较残酷的，零件是不可能完全按照设计的尺寸制造出来的，总是存在一定的差距，这可能因为刀具的磨损、治具的不完美、加工条件的波动或操作员工的不熟练等。例如，在三维软件中，一个零件的长度尺寸为 100mm，随机从批量制造的样品中抽出零件进行长度测量，长度的测量值可能是 100.08mm，如图 6-1 所示。如果测量数据的精度向小数点后无限制扩展，零件的实际制造尺寸与设计尺寸永远也不可能完全一致。

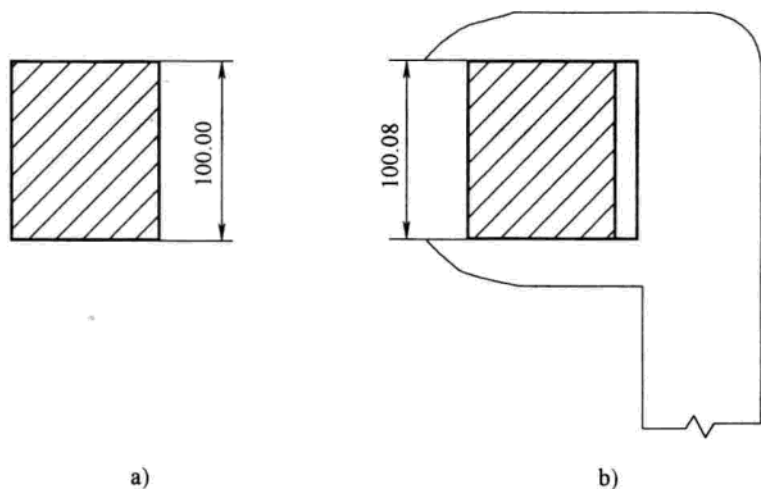


图 6-1 尺寸设计值与实际测量值

a) 设计值 · b) 测量值

公差就是零件尺寸所允许的偏差值。设定零件的公差即设定零件制造时尺寸允许的偏差范围。例如，对于图 6-1 中的尺寸设定为 $100 \pm 0.20\text{mm}$ ，则公差为 $\pm 0.20\text{mm}$ 。零件制造后，如果测量时发现零件尺寸超出这个偏差范围，那么该零件将被判为不良品。除了尺寸公差外，公差还包括形状公差和位置公差等。本章讨论的公差分析是针对尺寸公差进行的公差分析。

6.1.3 公差的本质

公差在产品设计中扮演着非常重要的角色。公差不仅仅是诸如 ± 0.20 、 $^{+0.20}_{-0.10}$ 、 $^{+0.20}_0$ 、 $^0_{-0.10}$ 等这一串数字而已，也不仅仅是二维图样上漂亮的点缀。公差是机械工程师和制造工程师沟通的桥梁和纽带，是保证产品以优异的质量、优良的性能和较低的成本进行制造的关键，这是公差的本质。

公差也是机械工程师和制造工程师之间的博弈。如图 6-2 所示，机械工程师希望产品公差尽可能地严格，以满足产品功能、性能、外观和可装配性等要求，实现设计意图，提供稳健性的设计，从而提高产品质量和客户满意度。制造工程师则刚好相反，他们希望产品公差尽可能宽松，从而可以灵活地选择产品制造工艺和方法，以较低的制造和装配费用、以普通的机器和夹具、以较低的不良率和

返工率进行制造。君不见在产品开发过程中，机械工程师和制造工程师常常为 0.01mm 的公差争论得面红耳赤？

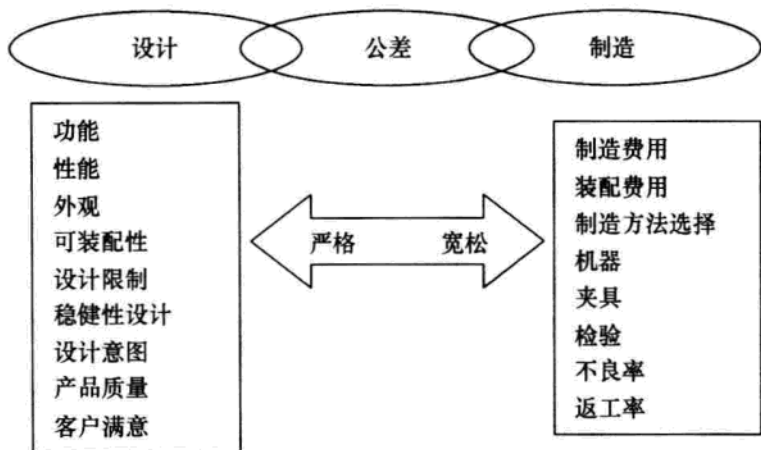


图 6-2 公差是产品设计和制造之间的博弈

因此，在产品设计中，应当合理选择和设定零件和产品的公差。公差的设计既要满足产品的功能和质量要求，又要满足产品制造成本的要求。公差分析正是基于这样的目的而产生。

6.1.4 公差分析的目的

公差分析是指在满足产品功能、性能、外观和可装配性等要求的前提下，合理定义和分配零件和产品的公差，优化产品设计，以最低的成本和最高的质量制造产品。

公差分析作为面向制造和装配的产品设计中非常有用的工具，可以帮助机械工程师实现以下目的：

- 1) 合理设定零件和产品的公差以降低零件和产品的制造成本。
- 2) 判断零件的可装配性，判断零件是否在装配过程中发生干涉。
- 3) 判断零件装配后产品关键尺寸是否满足外观、质量以及功能等要求。
- 4) 优化产品的设计。这是公差分析非常重要的一个目的。当通过公差分析发现产品设计不满足要求时，一般有两种方法来解决：其一是通过严格的零件公差来达到要求，但这会增加零件的制造成本；其二是通过优化产品的设计（例如增加装配定位特征）来

满足产品设计要求，这是最好的方法，也是公差分析的意义所在。

5) 公差分析除了用于产品设计中，还可用于产品装配完成后。当产品的装配尺寸不符合要求时，可以通过公差分析来分析制造和装配过程中出现的问题，寻找问题的根本原因。

6.2 公差分析的步骤

公差分析具体的步骤包括：

- 1) 定义公差分析的目标尺寸和判断标准。
- 2) 定义尺寸链。
- 3) 判断尺寸的正负。
- 4) 将非双向对称公差转化为双向对称公差。
- 5) 公差分析的计算。
- 6) 判断和优化。

6.2.1 定义公差分析的目标尺寸和判断标准

公差分析的第一步是定义公差分析的目标尺寸及其判断标准（即公差），明确公差分析的目的以及如何判断产品设计是否满足要求。

公差分析的目标尺寸可以包括零件之间的装配间隙、外观零件之间的配合间隙以及零件之间的功能装配尺寸等。

1. 零件之间的装配间隙

当检验两个或多个零件之间的可装配性时，即零件之间装配过程中不发生干涉，公差分析的目标尺寸为零件之间的间隙，如图 6-3

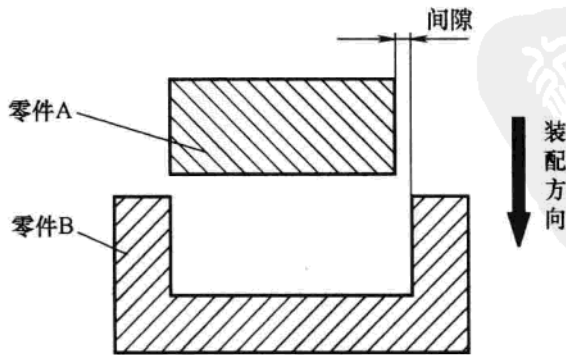


图 6-3 零件的装配间隙

所示。判断标准是：间隙 > 0 。当公差分析计算出的装配尺寸间隙 > 0 时，说明产品设计合理，零件装配时不会发生干涉；当间隙 ≤ 0 时，说明产品设计存在问题，在装配过程中零件很可能会发生干涉。

2. 外观零件之间的配合间隙

消费者对产品第一印象来自于产品外观，因此产品外观是吸引消费者的首要因素。产品外观零件除了使用先进的表面处理技术外，外观零件之间配合的美观度也是需要考虑的因素之一。例如，如果外观零件之间的间隙过大或过小，或者零件之间的间隙不均匀，这会破坏产品的美观，给消费者带来不好的印象。

在这种情况下，公差分析的目标尺寸是：外观零件之间的配合间隙。判断标准： $0.30\text{mm} \leq \text{间隙} \leq 0.60\text{mm}$ （具体公差大小视产品尺寸而定），如图 6-4 所示。

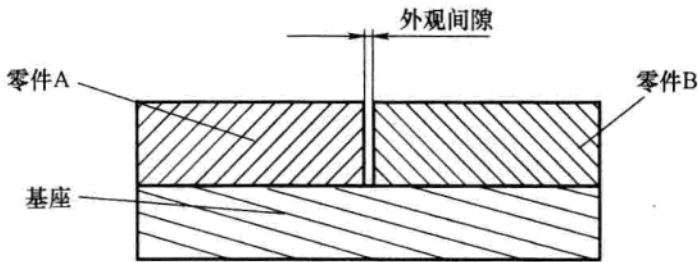


图 6-4 外观零件的配合间隙

3. 零件之间的功能装配尺寸

产品中包括重要的功能零件，只有当重要零件之间的装配尺寸达到要求时，产品功能才得以顺利实现。例如，某电源插头的金属引脚和对应插座只有当重叠到一定位置时，二者才能顺利导通，如图 6-5 所示。

此时，公差分析的目标尺寸是：零件之间的重叠尺寸。判断标准：重叠尺寸 $\geq 3.0\text{mm}$ （具体公差大小视不同情况而定）。

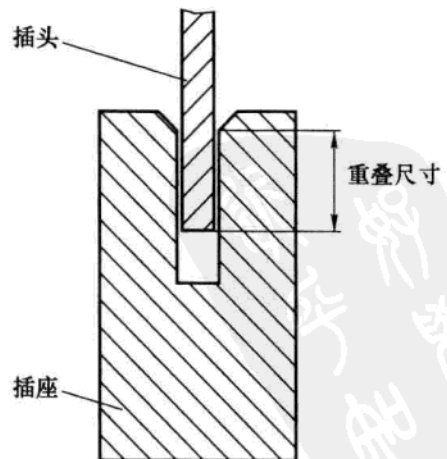


图 6-5 功能装配尺寸

6.2.2 定义尺寸链

当定义好公差分析的目标尺寸之后，下一步是根据产品的装配结构，定义目标尺寸的尺寸链。

尺寸链，是指在产品的装配关系中，由互相联系的尺寸按一定顺序首尾相接排列而成的封闭尺寸组。尺寸链有两个特征：一是封闭性，尺寸链是由多个尺寸首尾相连；二是关联性，组成尺寸链的每个尺寸都与目标尺寸有关联性，尺寸链中每个尺寸的精度会影响到目标尺寸的精度。也就是说，一个尺寸是不是属于目标尺寸的尺寸链，取决于该尺寸的精度变化是否影响目标尺寸的精度。

如图 6-6 所示， X 是目标尺寸，尺寸 A 、 B 、 C 、 D 、 E 和 X 组成目标尺寸的尺寸链。

判断尺寸链是否定义正确的标准之一是公差分析计算出的目标尺寸的名义值与目标尺寸的设计值一致，如果二者不一致，那么尺寸链必定定义错误。以图 6-5 的产品为例，目标尺寸 X 设计值是 0.5mm ，那么通过公差分析计算出来 X 的名义尺寸值也应该是 0.5mm ，如果是其他数值，则说明尺寸链定义错误。

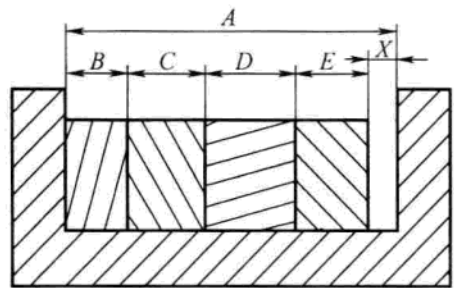


图 6-6 尺寸链

6.2.3 判断尺寸链中尺寸的正负

在进行公差分析时，尺寸链中的尺寸具有正负，尺寸的正负可以使用“箭头法”确定。箭头法是指从目标尺寸的任一端开始起画单向箭头，顺着整个尺寸链一直画下去，包括目标尺寸，直到最后一个形成闭合回路，然后按照箭头方向进行判断，凡是箭头方向与目标尺寸箭头同向的尺寸为负（-），反向的为正（+）。如图 6-7 所示，从目标尺寸 X 的一端开始画单向箭头， B 、 C 、 D 、 E 与 X 同向，为“-”； A 与 X 反向，为“+”。

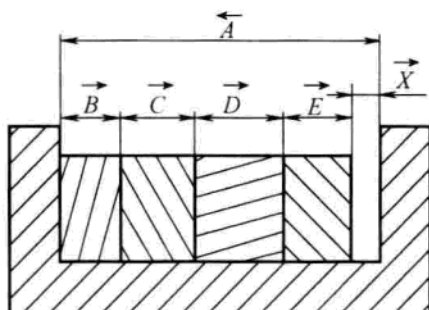


图 6-7 尺寸的正负

6.2.4 将非双向对称公差转换为双向对称公差

尺寸公差有多种表示方法，包括单向公差、双向不对称公差和双向对称公差等。单向公差是指尺寸的公差在尺寸名义值的一方，如 $100^{+0.20}_0$ mm 或 $100^0_{-0.20}$ mm。双向不对称公差是尺寸公差在尺寸名义值的上下方，但不对称，如 $100^{+0.20}_{-0.10}$ mm 或 $100^{+0.10}_{-0.20}$ mm。双向对称公差是指尺寸的公差在尺寸名义值上下方，并对称，如 100 ± 0.20 mm。

在进行公差分析时，为了方便计算，尺寸的公差只能是双向对称公差。如果公差不是双向对称公差，那么应当转化为双向对称公差。

例 6.1 将单向公差转化为双向对称公差。

1) 需要转化的公差为单向公差：

$$100^{+0.20}_0 \text{ mm}$$

2) 计算尺寸的最大值和最小值：尺寸的最大值等于尺寸的名义值与公差上限之和，尺寸的最小值等于尺寸的名义值与公差下限之和，即

$$\text{最大值} = 100 \text{ mm} + (+0.20) \text{ mm} = 100.20 \text{ mm}$$

$$\text{最小值} = 100 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 100 \text{ mm}$$

3) 计算尺寸的公差范围：尺寸的公差范围等于尺寸的最大值与最小值之差，即

$$\text{公差范围} = 100.20 \text{ mm} - 100 \text{ mm} = 0.20 \text{ mm}$$

4) 计算转换后的尺寸单边公差：转换后的尺寸单边公差等于公

差范围的一半，即

$$\text{单边公差} = 0.20\text{mm}/2 = 0.10\text{mm}$$

5) 计算转换化后的尺寸名义值：转换后的尺寸名义值为最小值与单边公差之和（或者最大值与单边公差之差），即

$$\text{尺寸名义值} = 100\text{mm} + 0.10\text{mm} = 100.10\text{mm}$$

因此最终的转换结果为

$$100.10 \begin{matrix} +0.10 \\ -0.10 \end{matrix} \text{mm}$$

6.2.5 公差分析的计算

常用的公差分析的计算模型有两种：极值法和均方根法。

1. 极值法

极值法是考虑零件尺寸最不利的情况，通过尺寸链中尺寸的最大值或最小值来计算目标尺寸的值。极值法具有以下五大特点：

(1) 不可能性 尺寸链中的零件尺寸同时为最大或最小的情况的可能性很小，因此极值法产生的结果在实际的产品制造和装配过程中发生可能性也很小，极值法并不能真实反映现实的产品制造和装配情况。

(2) 成本高 在给定的产品装配公差情况下，极值法要求零件精密的尺寸公差，零件不良率高，零件制造成本昂贵。

(3) 产品设计困难 极值法造成产品设计难度加大，特别是当目标尺寸的公差要求严格，同时尺寸链包含多个尺寸时。

(4) 风险最小 使用极值法不会产生不合格的产品，因为考虑了零件尺寸最不利的情况，极值法只应用于对产品品质要求非常苛刻的场合。

(5) 副作用 当使用极值法进行产品设计满足一方面的设计要求时，有可能会造成另外一方面的要求很难达到，这是极值法的副作用。例如，为了满足图 6-3 所示零件装配时不发生干涉，间隙大于 0 的要求，有可能造成尺寸链中的零件尺寸走向另外一个极端，即零件之间的间隙过大。

使用极值法，目标尺寸的名义值为尺寸链上尺寸的名义值之和，尺寸具有正负性，见式 (6-1)。

$$D_{asm} = \sum D_i \quad (6-1)$$

式中, D_{asm} 是目标尺寸的名义值; D_i 是尺寸链上尺寸的名义值, 具有正负性。

目标尺寸的公差为尺寸链上各个尺寸的公差之和, 见式 (6-2)。

$$T_{asm} = \sum T_i \quad (6-2)$$

式中, T_{asm} 是目标尺寸的公差; T_i 是尺寸链上尺寸的公差。

例 6.2 如图 6-6 所示, $A = 54.00 \pm 0.20\text{mm}$, $B = 12.00 \pm 0.10\text{mm}$, $C = 3.00 \pm 0.10\text{mm}$, $D = 16.00 \pm 0.15\text{mm}$, $E = 12.50 \pm 0.10\text{mm}$, 利用极值法求目标尺寸 X 的名义值和公差。

(1) 计算 X 的名义值 利用式 (6-1) 和 6.2.3 一节中各个尺寸的正负, X 的名义值为

$$\begin{aligned} D_X &= D_A + D_B + D_C + D_D + D_E \\ &= 54.00\text{mm} + (-12.00)\text{mm} + (-13.00)\text{mm} \\ &\quad + (-16.00)\text{mm} + (-12.50)\text{mm} \\ &= 54.00\text{mm} - 12.00\text{mm} - 13.00\text{mm} - 16.00\text{mm} - 12.50\text{mm} \\ &= 0.50\text{mm} \end{aligned}$$

(2) 计算 X 的公差 利用式 (6-2), X 的公差为

$$\begin{aligned} T_X &= T_A + T_B + T_C + T_D + T_E \\ &= 0.20\text{mm} + 0.10\text{mm} + 0.10\text{mm} + 0.15\text{mm} + 0.10\text{mm} \\ &= 0.65\text{mm} \end{aligned}$$

目标尺寸 X 的值为

$$0.50 \pm 0.65\text{mm}$$

最大值为

$$0.50\text{mm} + 0.65\text{mm} = 1.15\text{mm}$$

最小值为

$$0.50\text{mm} - 0.65\text{mm} = -0.15\text{mm}$$

2. 均方根法

(1) 统计分析法 统计分析法是基于这样的假设: 零件在大批量生产时, 其尺寸在其公差范围内呈正态分布。事实也是如此, 针对一个零件尺寸, 如果测量无数个零件, 并记录相同的尺寸出现的频率, 可以绘制出一张尺寸大小的频率图, 这张图形就是正态分布

图，如图 6-8 所示。多数的零件尺寸值都会向着图形的中心即尺寸的平均值聚集，离平均值越远，该尺寸值出现的可能性就越小。

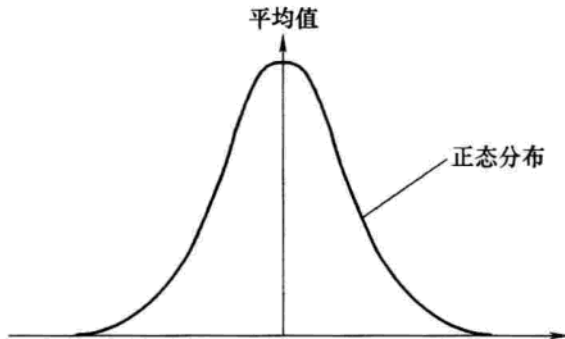


图 6-8 零件的尺寸符合正态分布

统计分析法进行公差分析的实质是多个呈正态分布的尺寸累积，因此目标尺寸也呈正态分布，如图 6-9 所示。

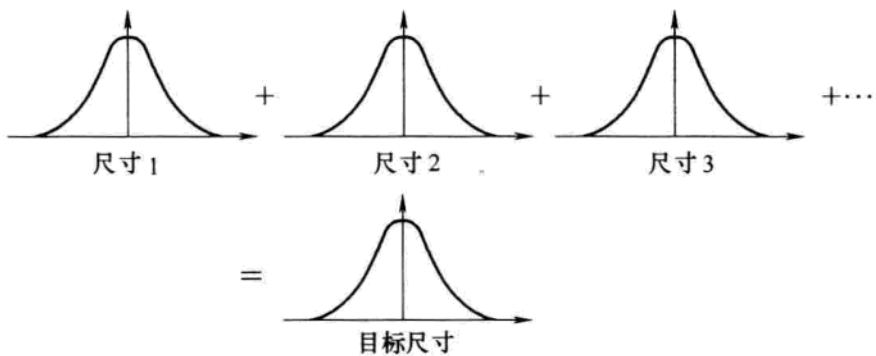


图 6-9 统计分析法的实质

统计分析法具有以下五大特点：

1) 接近真实性。因为统计分析法是根据零件尺寸制造实际情况的模拟，所以计算出来的结果与实际的产品装配情况比较吻合，真实度高。

2) 成本较低。同极值法相比，在满足相同目标尺寸判断标准的前提下，使用统计分析法对零件的公差要求比较宽松，零件的制造成本较低。

3) 产品较容易设计。由于不必考虑零件制造的最不利的情况，使用统计分析法时产品设计较容易。

4) 可能会有不合格品产生。尽管零件同时发生最大或最小的情况几率很小，但总是存在这种可能性，产品实际制造和装配后会可

能会出现产品不满足目标尺寸的判断标准，即产生不合格的产品。

5) 要求制程管控。统计分析法的前提是尺寸链中的尺寸符合正态分布，并满足一定的制程能力，那么为了保证产品的目标尺寸符合判断标准，必须对尺寸链中的尺寸进行制程管控，使得零件的制造尺寸与当初的假设一致。

(2) 均方根方法的计算 均方根法是统计分析法的一种。顾名思义，均方根法是把尺寸链中的各个尺寸公差的平方和开方即得到目标尺寸的公差。

使用均方根法，目标尺寸名义值的公式与极值法相同，见式(6-1)。目标尺寸的公差为尺寸链上各个尺寸的平方和开方，见式(6-3)。

$$T_{\text{asm}} = \sqrt{\sum T_i^2} \quad (6-3)$$

式中， T_{asm} 是所求目标尺寸的公差； T_i 是尺寸链上尺寸的公差。

例 6.3 在图 6-6 中， $A = 54.00 \pm 0.20\text{mm}$ ， $B = 12.00 \pm 0.10\text{mm}$ ， $C = 13.00 \pm 0.10\text{mm}$ ， $D = 16.00 \pm 0.15\text{mm}$ ， $E = 12.50 \pm 0.10\text{mm}$ ，利用均方根法求目标尺寸 X 的名义值和公差。

1) 计算 X 的名义值： X 的名义值的计算与极值法相同，为

$$\begin{aligned} D_X &= D_A + D_B + D_C + D_D + D_E \\ &= 54.00\text{mm} + (-12.00)\text{mm} + (-13.00)\text{mm} \\ &\quad + (-16.00)\text{mm} + (-12.50)\text{mm} \\ &= 54.00\text{mm} - 12.00\text{mm} - 13.00\text{mm} - 16.00\text{mm} - 12.50\text{mm} \\ &= 0.50\text{mm} \end{aligned}$$

2) 计算 X 的公差：利用式(6-3)， X 的公差为

$$\begin{aligned} T_X &= \sqrt{T_A^2 + T_B^2 + T_C^2 + T_D^2 + T_E^2} \\ &= \sqrt{0.20^2 + 0.10^2 + 0.10^2 + 0.15^2 + 0.10^2}\text{mm} \\ &= \sqrt{0.04 + 0.01 + 0.01 + 0.0225 + 0.01}\text{mm} \\ &= \sqrt{0.0925}\text{mm} \\ &= 0.30\text{mm} \end{aligned}$$

目标尺寸 X 的值为

$$0.50 \pm 0.30\text{mm}$$

最大值为

$$0.50\text{mm} + 0.30\text{mm} = 0.80\text{mm}$$

最小值为

$$0.50\text{mm} - 0.30\text{mm} = 0.20\text{mm}$$

6.2.6 判断和优化

当公差分析计算出目标尺寸的最大值和最小值后，可以根据目标尺寸的判断标准来判断产品的设计是否满足设计。

例 6.2 中以极值法计算出来的目标尺寸的最小值为 -0.15mm ，不满足判断标准（间隙 >0 ），产品设计不满足要求，因此需要优化产品设计以满足要求。

例 6.3 中以均方根法计算出来的目标尺寸的最小值为 0.20mm ，满足判断标准（间隙 >0 ），产品设计满足要求。

6.2.7 装配偏移

1. 装配偏移的含义

装配偏移是指由于孔与轴、孔与螺钉、定位孔与定位柱等之间间隙的存在使得零件具有一定的自由度，零件可以在产品中移动，造成零件的实际位置与名义位置存在一定的偏移。在图 6-10 中，孔与轴的名义位置见图 6-10a，孔与轴的中心对齐；但是由于孔与轴之间间隙的存在，轴可以在孔内任意方向偏移，向左偏移见图 6-10b，向右偏移见图 6-10c。

2. 含有装配偏移的尺寸链定义

装配偏移常被很多工程师忽视。如果在目标尺寸的尺寸链中包括装配偏移，那么尺寸链中就应当包括装配偏移，因为装配偏移会影响目标尺寸的值。但是，如何把装配偏移加入到尺寸链中并进行计算呢？需要把孔的尺寸、轴的尺寸和间隙的大小加入到尺寸链中吗？

三种含有装配偏移的尺寸链的定义方法，如图 6-11 所示。错误的尺寸链定义见图 6-11a、b：6-11a 中尺寸链忽略了装配偏移；6-11b 中尺寸链包括了孔的尺寸、轴的尺寸和间隙的尺寸，然而间隙的尺寸作为孔的尺寸与轴的尺寸之差，被重复计算。正确的尺寸链

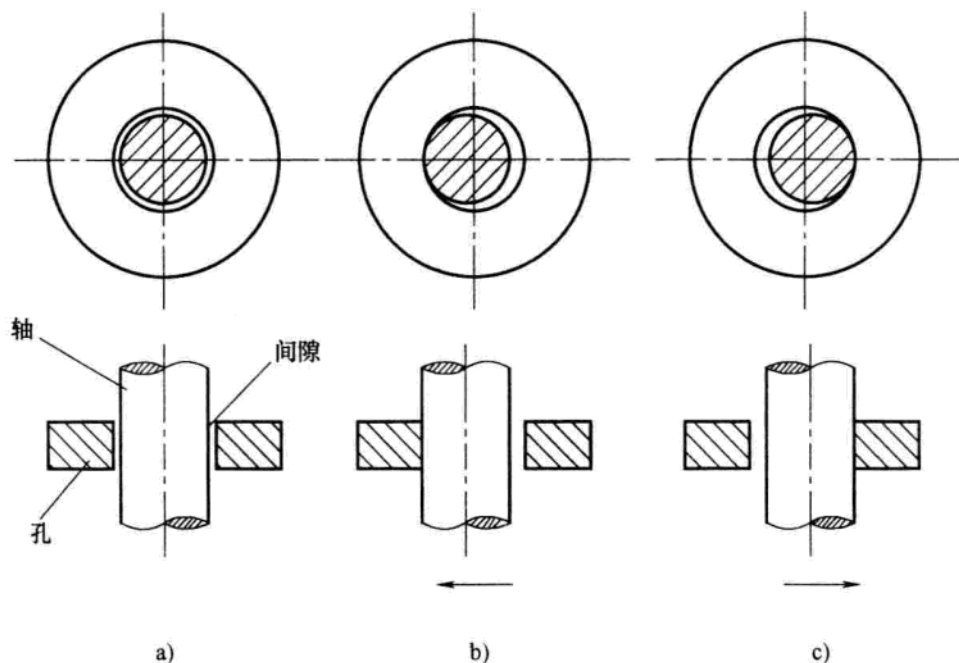


图 6-10 装配偏移

a) 轴与孔的名义位置 b) 轴向左偏移 c) 轴向右偏移

定义见图 6-11c，装配偏移作为一个单独的尺寸加入到尺寸链中，这才是正确的尺寸链定义。

3. 装配偏移的大小和公差

装配偏移值和公差的公式为

$$D_{\text{shift}} = 0$$

$$T_{\text{shift}} = \frac{(D_{\text{hole}} - D_{\text{pin}}) + (T_{\text{hole}} + T_{\text{pin}})}{2} \quad (6-4)$$

式中， D_{shift} 是装配偏移的值； T_{shift} 是装配偏移的公差； D_{hole} 是孔的直径； D_{pin} 是轴的直径； T_{hole} 是孔的公差； T_{pin} 是轴的公差。

4. 含有装配偏移的公差分析

在本质上，装配偏移依然是一个尺寸，只不过其大小为 0，公差通过式 (6-4) 计算。因此，含有装配偏移的公差分析与其他的公差分析没有什么不同。

例 6.4 如图 6-11c 所示， $A = 50.00 \pm 0.20\text{mm}$ ， $B = 49.70 \pm 0.20\text{mm}$ ，孔的尺寸为 $6.00 \pm 0.05\text{mm}$ ，轴的尺寸为 $5.90 \pm 0.05\text{mm}$ ，利用极值法和均方根法求目标尺寸 X 的名义值和公差。

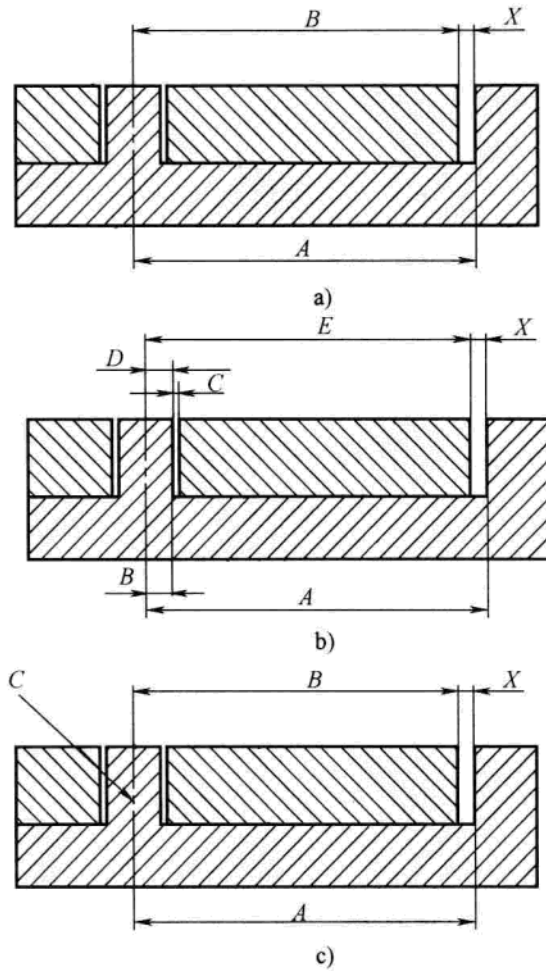


图 6-11 含有装配偏移的尺寸链定义

a) 错误的尺寸链一 b) 错误的尺寸链二 c) 正确的尺寸链

(1) 计算装配偏移的公差 通过式 (6-4), 装配偏移的公差为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{shift}} &= \frac{(6.00 - 5.90) + (0.05 + 0.05)}{2} \text{mm} \\
 &= \frac{0.10 + 0.10}{2} \text{mm} \\
 &= 0.10 \text{mm}
 \end{aligned}$$

(2) 计算 X 的名义值 通过式 (6-1), X 的名义值为

$$\begin{aligned}
 D_X &= D_A + D_B + D_{\text{shift}} \\
 &= 50.00 \text{mm} + (-49.70) \text{mm} + 0 \text{mm} \\
 &= 50.00 \text{mm} - 49.70 \text{mm}
 \end{aligned}$$

$$= 0.30\text{mm}$$

(3) 极值法计算 X 的公差 通过式 (6-2), X 的公差为

$$\begin{aligned} T_X &= T_A + T_B + T_{\text{shift}} \\ &= 0.20\text{mm} + 0.20\text{mm} + 0.10\text{mm} \\ &= 0.50\text{mm} \end{aligned}$$

目标尺寸 X 的值为

$$0.30 \pm 0.50\text{mm}$$

最大值为

$$0.30\text{mm} + 0.50\text{mm} = 0.80\text{mm}$$

最小值为

$$0.30\text{mm} - 0.50\text{mm} = -0.20\text{mm}$$

(4) 均方根法计算 X 的公差 通过式 (6-3), X 的公差为

$$\begin{aligned} T_X &= \sqrt{T_A^2 + T_B^2 + T_{\text{shift}}^2} \\ &= \sqrt{0.20^2 + 0.20^2 + 0.10^2}\text{mm} \\ &= \sqrt{0.04 + 0.04 + 0.01}\text{mm} \\ &= \sqrt{0.09}\text{mm} \\ &= 0.30\text{mm} \end{aligned}$$

目标尺寸 X 的值为

$$0.30 \pm 0.30\text{mm}$$

最大值为

$$0.30\text{mm} + 0.30\text{mm} = 0.60\text{mm}$$

最小值为

$$0.30\text{mm} - 0.30\text{mm} = 0\text{mm}$$

6.3 公差分析指南

6.3.1 明确目标尺寸及其判断标准

如 6.2.1 一节所述, 公差分析的第一步是明确公差分析的目标尺寸及其判断标准。这一步至关重要, 没有明确的目标, 后续的公

差分析就毫无意义，因此，在进行公差分析时，必须首先明确目标尺寸及其判断标准。

6.3.2 公差一致性

零件尺寸公差在各个环节中具有一致性，如图 6-12 所示。首先，各种制造工艺的制程能力决定了公差分析中尺寸的公差设定；其次，根据尺寸的公差设定，在零件二维图样中进行尺寸标注；最后，对标注的尺寸进行制程管控，使得其与公差分析中使用的公差设定一致。只有当零件的尺寸公差在上述各个环节中一致时，才能够保证公差分析的准确性，从而保证产品的质量。

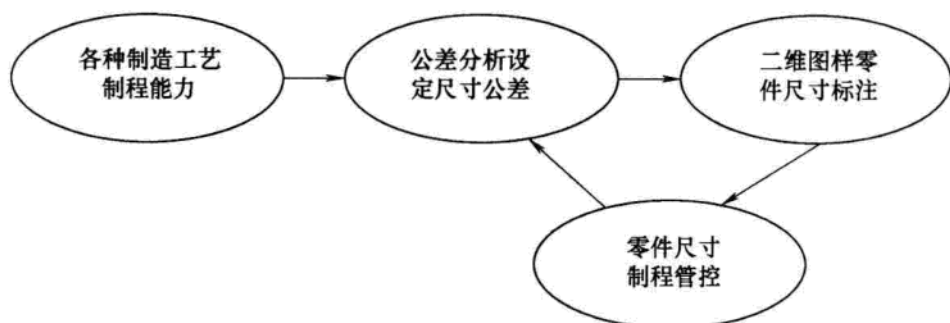


图 6-12 尺寸公差在各个环节中的一致性

1. 尺寸的公差设定

公差分析中零件的尺寸公差并不是随便设定的，零件的尺寸公差来源于零件的制造能力。不同的制造方法具有不同的制造能力，一旦零件的制造方法选定，零件尺寸的公差也被限定在一定的范围内。如果零件公差超过制造能力，产品的制造成本就会变得非常高甚至无法制造。

例如，如果零件是通过压铸工艺制造，那么在进行公差分析的零件公差设定时，零件公差必须符合相应的铸件所能达到的尺寸精度，具体的公差设定可以参考第 5 章。

在公差分析时，可以把相关制造方法所能达到的尺寸精度（尺寸精度最好得到制造工程师的确认）整理成文件或表格，公差设定时从这些文件或表格中直接选取，这样的公差分析就显得有理有据。

2. 二维图样上尺寸公差标注

机械工程师对零件的要求是通过二维图样中的尺寸公差标注传达给制造工程师的。尺寸公差必须准确反映机械工程师的设计意图。这需要注意两点：首先，进行公差分析的零件尺寸都必须在二维图样中进行标注；其次，二维图样中的零件尺寸公差必须与公差分析中的零件尺寸公差一致。如果尺寸标注错误，则会大大降低公差分析的准确性。

例如，在例 6.2 中，公差分析时尺寸 A 为 $54.00 \pm 0.20\text{mm}$ ，那么在二维图样中必须标注尺寸 A ，同时 A 的公差为 $\pm 0.20\text{mm}$ 。

3. 尺寸制程管控

公差分析中的尺寸都应当进行制程管控，因为公差分析是建立在一定的假设之上，这个假设就是零件的尺寸公差必须符合一定的制程能力。只有保证这些假设与实际制造情况完全一致，才能保证公差分析的准确性，否则，不论公差分析结果如何完美，不对零件尺寸公差进行管控，依然会出现不良品。

6.3.3 公差分析结果不满足判断标准时的解决方法

公差分析主要有两个目的：其一是分析当前的产品设计是否符合设计要求；其二是通过公差分析来优化产品的设计。

当公差分析的结果不满足目标尺寸的判断标准时，常用的方法包括以下 5 种：

1. 调整零件尺寸公差

最简单的方法是调整尺寸链的公差使得结果满足要求，这也是机械工程师最常用的方法。当然，这一定不是最好的方法，正如我们在上一节中所说，零件的尺寸公差不是想怎么调整就可以怎么调整的，尺寸公差取决于零件的制造工艺所能提供的制造精度。尺寸公差越严格，零件的制造工艺达到这样的精度就会花费越高的成本，甚至无论如何都达不到这样的精度，那么整个公差分析就毫无意义。通过设定过于严格的尺寸公差以使公差分析结果符合判断标准的做法无异于掩耳盗铃。

当然，在其他方法无法解决的情况下，调整零件尺寸公差，在

征求制造工程师的意见并且获得肯定的情况下，可以要求精密的零件公差。

2. 调整尺寸链中尺寸的值

调整尺寸链一个或多个尺寸的值，可以使得公差分析满足判断标准的要求。但需要注意的是，调整一个或多个尺寸的值，应以不牺牲产品的其他要求为前提。

在例 6.2 中，使用极值法计算出目标尺寸 X 的值为 $0.50 \pm 0.65\text{mm}$ ，最小值为 -0.15mm ，零件在装配时会发生干涉。此时可以调整尺寸 E 的值 $12.50 \pm 0.10\text{mm}$ 为 $12.30 \pm 0.10\text{mm}$ ，通过极值法计算此时 X 的值为 $0.70 \pm 0.65\text{mm}$ ，（见表 6-1，该公差计算表格来源于 6.4 节），最小值为 0.05mm ，零件在装配时不会发生干涉，产品设计满足要求。但是，此时最大值为 1.35mm ，当零件的公差走向另外一个极端时两个零件之间的间隙增大。如果刚好产品设计对此间隙又有设计要求，那么通过调整尺寸值来满足设计要求就需要非常谨慎。

表 6-1 调整尺寸链中尺寸值的公差分析结果

（单位：mm）

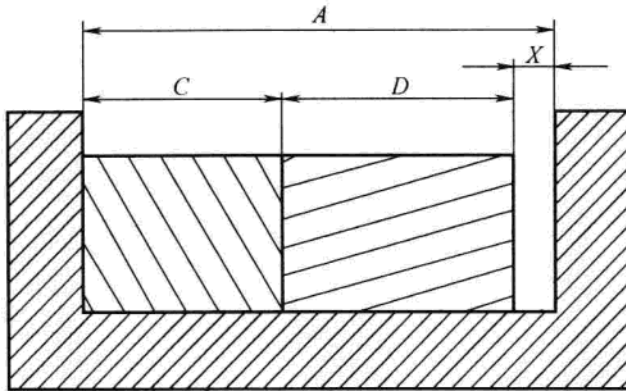
公差分析结果	名义值	公差	最小值	最大值
极值法	0.70	0.65	0.05	1.35
均方根法	0.70	0.30	0.40	1.00

3. 缩短尺寸链的长度

根据公差分析的计算过程可以看出，目标尺寸的尺寸链涉及的尺寸越多，公差累积就越多，计算出的结果就越大，产品设计越不容易符合判断标准，特别是当公差分析以极值法进行计算时。

此时，可以通过优化产品的设计，缩短尺寸链的长度，从而减少公差累积，使产品设计符合要求。

例如，例 6.2 中如果设计时减少尺寸 B 、 E ，缩短尺寸链的长度，如图 6-13a 所示，此时 C 为 $25.00 \pm 0.15\text{mm}$ ， D 为 $28.50 \pm 0.15\text{mm}$ ，公差分析的计算结果 X 为 $0.50 \pm 0.50\text{mm}$ ，如图 6-13b 所示（该公差计算表格来源于 6.4 节），与之前的结果 $0.50 \pm 0.65\text{mm}$ 相比，新的设计符合判断标准，装配质量大为改善。



a)

公差分析结果	名义值	公差	最小值	最大值
极值法	0.50	0.50	0.00	1.00
均方根法	0.50	0.29	0.21	0.79

b)

图 6-13 缩短尺寸链的长度

a) 尺寸链 b) 公差分析的结果

因此，在产品设计之初，明确目标尺寸和判断标准后，应尽量缩短尺寸链的长度。换句话说，如果两个零件之间的配合尺寸很重要，那么设计之初就只让两个零件互相配合，不要加入第3个、第4个、…、第 N 个零件。如同婚姻关系，第三者的介入会破坏婚姻的平衡，造成婚姻的失败。

4. 零件之间使用定位特征

如第2章所述，零件之间使用定位特征可以提高零件的装配效率和装配质量。本节将从公差分析的理论角度来论述使用定位特征如何达到上述目的。使用定位特征的设计是解决公差分析结果不能满足判断标准时的一个重要解决方法。

零件之间使用定位特征具有如下好处：

- 1) 定位特征可以实现较严格的尺寸公差。
- 2) 定位特征的尺寸可以放置于比较容易进行尺寸管控的区域。
- 3) 使用定位特征时可以减少和避免对其他尺寸的公差要求，只需严格管控定位特征的相关尺寸，就可以满足产品设计要求。

4) 因为定位特征精度高, 使用定位特征有利于减少零件之间的尺寸公差累积。

例 6.5 如图 6-14 所示, 零件 1 和零件 2 通过 4 颗螺钉固定, 零件 1 和零件 2 右侧的端面对齐是产品设计中的一个外观基本要求, 要求两个零件的端面对齐公差为 $0 \pm 0.30\text{mm}$, 即目标尺寸为 $0 \pm 0.30\text{mm}$ 。

在原始的设计中, 两个零件之间没有使用定位特征, 两个零件的装配图见图 6-14a。尺寸链见图 6-14b, 尺寸 A 为 $50.00 \pm 0.30\text{mm}$,

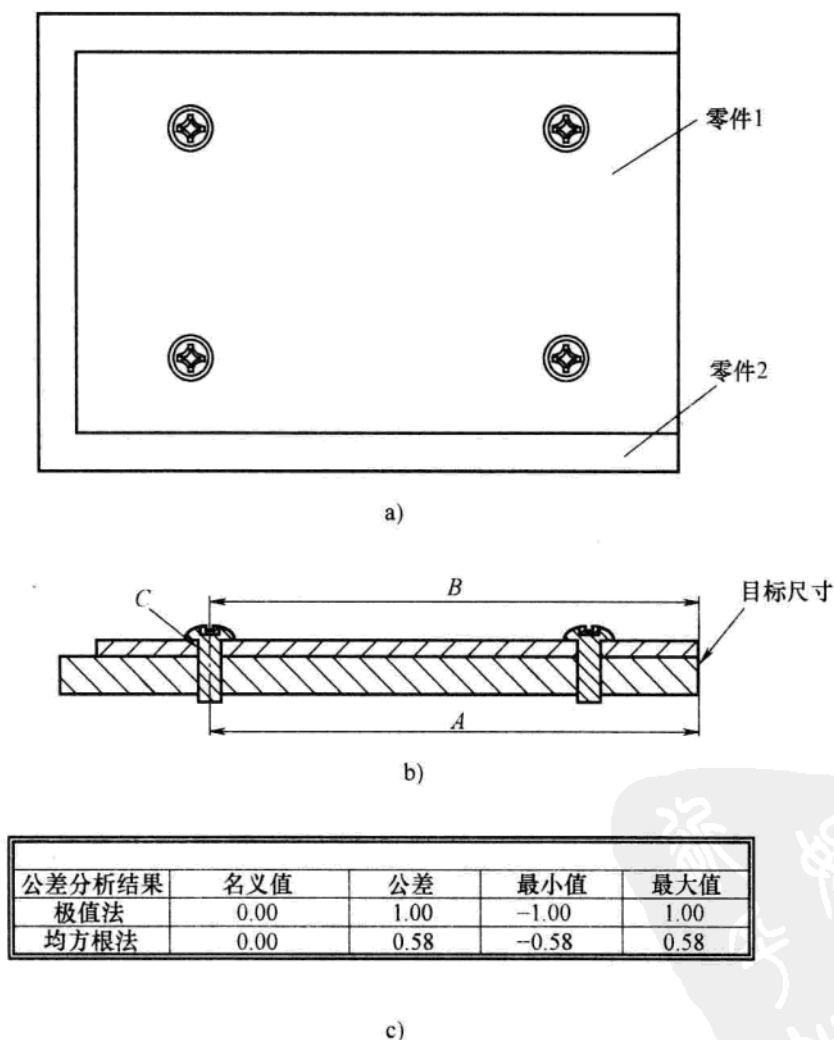


图 6-14 没有定位特征的零件装配

a) 零件装配图 b) 尺寸链 c) 公差分析结果

尺寸 B 为 $50.00 \pm 0.30\text{mm}$ 。M3 螺钉的直径为 $2.80 \pm 0.05\text{mm}$ ，零件 1 的螺钉孔一般设计为 $3.50 \pm 0.05\text{mm}$ 。螺钉与螺钉孔的间隙不能太小，否则会影响螺钉的锁紧过程，甚至造成螺钉的螺扣损坏。

公差分析的结果见图 6-14c，通过极值法计算的结果为 $0 \pm 1.00\text{mm}$ ，通过均方根法计算结果为 $0 \pm 0.58\text{mm}$ 。可以看出，产品设计不符合要求。

如图 6-15 所示，在改进的设计中，两个零件之间使用定位特征，

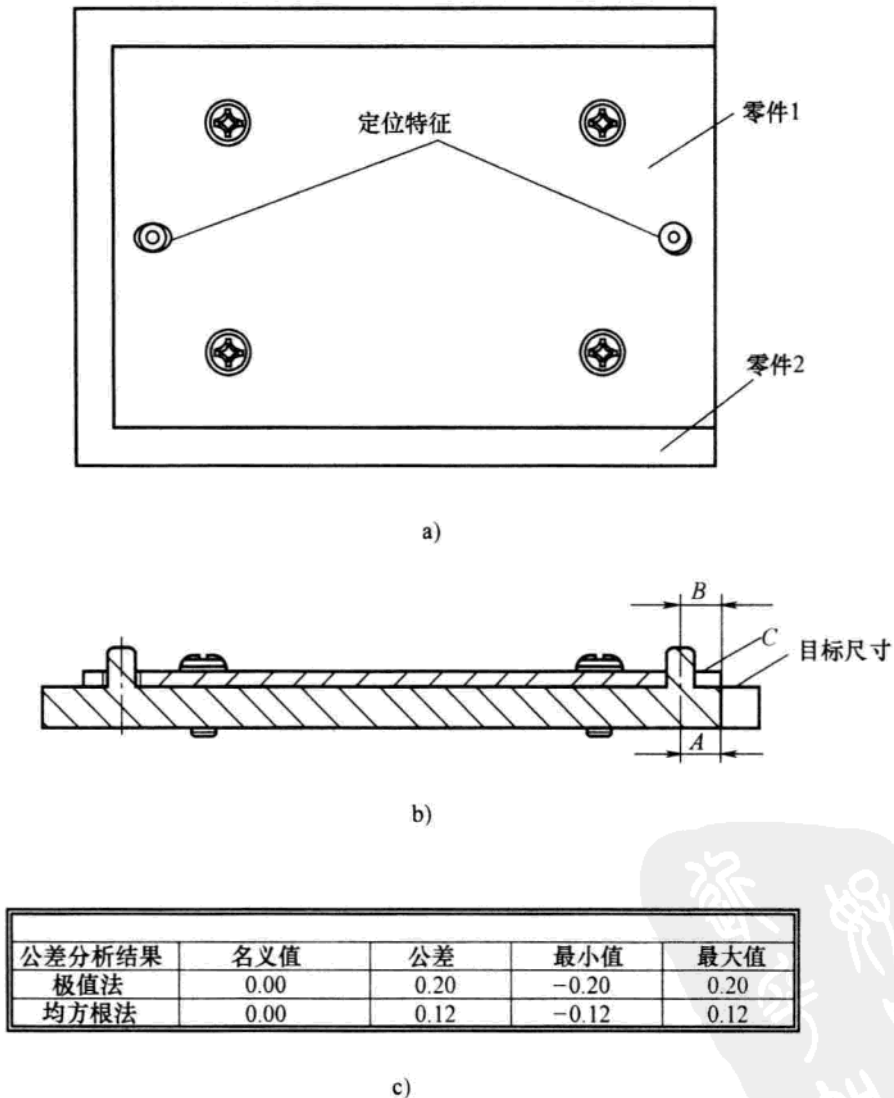


图 6-15 具有定位特征的零件装配

a) 零件装配图 b) 尺寸链 c) 公差分析结果

通过右侧的定位孔和定位柱实现定位，两个零件的装配图见图6-15a。尺寸链见图6-15b，其中尺寸A为 $5.00 \pm 0.05\text{mm}$ ，尺寸B为 $5.00 \pm 0.05\text{mm}$ 。零件1右侧的定位孔直径为 $4.0 \pm 0.05\text{mm}$ ，左侧定位孔为长圆孔。零件2的定位柱直径为 $3.9 \pm 0.05\text{mm}$ ，定位柱和定位孔之间可以具有较小的间隙以保证两个零件之间的相对位置精度。

公差分析的结果见图6-15c，通过极值法计算的结果为 $0 \pm 0.20\text{mm}$ ，通过均方根法计算结果为 $0 \pm 0.12\text{mm}$ 。可以看出，产品设计符合要求。

很显然，使用定位特征的产品设计减少了目标尺寸的公差累积，提高了产品装配质量。在进行尺寸制程能力管控时，只需管控定位孔和定位柱相关尺寸，而螺钉孔等其他尺寸就不必进行管控。而且当两个零件定位好之后，零件1的螺钉孔和零件2的螺孔已经对齐，此时再锁紧螺钉效率非常高。

有读者可能会问，为什么原始的设计进行公差分析时，尺寸链中的尺寸A是从零件端面到最远的那个螺钉孔开始，而在改进的设计中，尺寸A是从零件端面到最近的定位柱开始？为什么尺寸链中不加入螺钉相关的尺寸？

在原始设计中，在进行两个零件的装配时，除非特别指明，操作人员锁紧四颗螺钉的顺序都是随机的，可能先锁紧离端面最远的螺钉，也可能先锁紧离端面最近的螺钉。锁紧离端面最远的螺钉是最坏的情况，因为距离越远，尺寸A的公差会越大。因此，在公差分析时，尺寸A定义为从零件端面到最远的螺钉孔。

在改进的设计中，右端的定位柱是两个零件定位的第一特征，换句话说，右端的定位柱决定了两个零件之间的相对位置，而螺钉仅仅行使着自己应该行使的功能，即固定功能。

因此，在进行零件之间的装配设计时，就应当具有设计定位特征的意识，我国台湾工程师称之为“先定位再固定”，这样的设计能够大幅提高装配效率和装配质量。

5. 降低目标尺寸判断标准

在零件尺寸的公差已经相当严格，产品的设计已经优化的情况下，公差分析的结果依然不能满足判断标准，此时可以考虑调整目

标尺寸的判断标准（当然前提是目标尺寸的判断标准是主观的情况下，例如产品的外观零件之间的间隙等。如果目标尺寸的判断标准是客观的，例如两个零件之间在装配或运动过程中不发生干涉，那么判断标准是间隙必须大于0，此时判断标准无法调整）。有时这种判断标准由客户定义，那么一定需要对客户说明他们的判断标准过高，产品设计没办法达到他们的要求，否则等到产品设计制造出来，不良品出现后，再来商量调整判断标准，客户就不会轻易答应放宽标准了。

6.4 利用 Excel 进行公差分析

公差分析的计算可以通过手工计算，可以通过 Excel 表格计算，也可以通过公差分析软件进行计算。本书提供一种简单的公差分析 Excel 表格，可以解决大多数的一维线性公差分析问题。

如图 6-16 所示，公差分析 Excel 表格包括 5 个区域：

区域 1 为项目信息及目标尺寸判断标准相关信息。

区域 2 为尺寸链图形。在此区域添加尺寸链图形。

区域 3 为尺寸链中各尺寸的描述、所属零件、尺寸值、正负和公差等。

区域 4 为公差分析计算结果，结果为自动生成。

区域 5 为结论和设计优化建议区域，对比区域 4 中的计算结果和区域 1 中目标尺寸判断标准，判断产品设计是否满足设计需求。如果不满足设计要求，可以提出相关的设计优化建议。

在该 Excel 表格中，白色的区域为机械工程师的输入区域。在白色的区域中输入相关的信息和值，公差分析的结果就会在区域 4 中自动计算出来。

注：对于本章中的公差分析表格以及下一章的面向制造和装配的设计检查表，请读者发邮件至 joezhong@hotmail.com 向作者索取。

公差分析			
项目 XXX	名称 底座和上盖的间隙	设计者 XX	日期 年/月/日
目标尺寸	最小值 X	0.00	最大值 A
判断标准描述 两个零件之间的间隙必须大于0, 否则在装配过程中会发生干涉			
1. 项目及目标尺寸判断标准相关信息			
3. 尺寸链中各尺寸的值、正负及公差			
装配偏移			
孔		柱	
序号	描述	尺寸	公差
a	定位柱与孔	6.00	0.05
b			
c			
d			
e			
f			
		尺寸	公差
		5.90	0.05
		装配偏移公差 0.10	
4. 公差分析计算结果			
极值法		名义值	最小值
均方根法		0.30	-0.20
		0.30	0.00
		0.30	0.60
5. 结论及设计优化建议			
结论		使用均方根法计算结果符合设计要求	
设计优化		设计结果符合要求, 不必进行设计优化	

图 6-16 公差分析表格

第7章 面向制造和装配 的设计检查表

7.1 和谐的设计

在前面的章节中讲述了若干产品设计指南，在产品设计中这些指南都应当严格遵守。但是，产品开发是一门复杂的学问，产品制造和装配的技术也在不断地向前发展，而且产品开发所处的环境也不是一成不变的，不同客户对产品有着不同的要求，因此，对于任意一条产品设计指南，都不能盲目遵守，应随着设计条件的变化而灵活变通，否则会适得其反，产品开发反而会变成“更高的成本、更长的时间、更低的质量”。

同时，设计指南之间有时会互相冲突和矛盾。例如，在面向装配的设计中，为简化装配结构、提高装配质量，最有效的方法是减少零件数量，但零件数量的减少势必会增加现有零件的结构复杂度，这又不符合零件简单化的要求。

另外，设计指南与其他产品设计要求之间也会互相冲突和矛盾。例如，在塑胶件和钣金件设计指南中，为降低模具成本，推荐使用圆形的风孔，因为圆形孔相应的模具结构制造容易，但是，圆形风孔开口率低，通风效果差，并不利于产品的散热。产品散热则倾向于六边形孔，六边形孔开口率高，通风效果好，然而六边形孔相应的模具结构制造复杂，模具成本较高。

因此，当设计指南之间、设计指南与其他设计要求之间冲突和矛盾时，机械工程师不能盲目遵守某一条设计指南，而忽略其他指南或者其他设计要求。此时，机械工程师应当在各种设计指南之间、各种设计要求之间综合衡量，取得平衡，千万不能因为某一方面的利益而忽略另一方面的利益。产品设计需要具有大局观，只有这样，产品设计才是和谐的设计，才有可能达到“更低的成本、更短的时

间、更高的质量”，否则，机械工程师将会不得不在各种设计要求之间疲于奔命。

7.2 设计检查表

7.2.1 简介

为实现和谐的设计，实现产品开发“更低的成本、更短的时间、更高的质量”，作者开发了面向制造和装配的设计检查表。该检查表能够系统化地帮助机械工程师检查产品设计是否考虑来自于制造和装配方面的要求，避免出现顾此失彼的设计错误。

面向制造和装配的设计检查表包括四个方面的内容，与第2~5章的内容相对应，包括面向装配的设计检查、塑胶件设计检查、钣金件设计检查和压铸件设计检查，如图7-1所示。

7.2.2 使用方法

面向制造和装配的设计检查包括对产品可制造性和可装配性的检查。对面向装配的设计检查，其对象是整个产品的每一个装配工序。对于面向制造的设计检查，其对象是产品中的每一个零件。

1. 罚分标准

面向制造和装配的设计检查表使用方法非常简单。针对每一项设计指南，判断产品设计是否对产品成本、产品开发时间和产品质量造成影响，根据影响程度不同处以一定的罚分。罚分标准见表7-1。

表 7-1 罚分标准

罚 分 标 准	
0——遵守设计指南	不对产品成本、开发时间、产品质量造成影响
1——违反设计指南/没有影响	
2——违反设计指南/后果不严重	对产品成本、开发时间、产品质量造成影响
3——违反设计指南/后果中等	
4——违反设计指南/后果很严重	

在任一单项设计指南中，如果罚分超过3分，该项会自动显示为红色，提醒机械工程师注意产品设计严重违反该项设计指南，对产品成本、开发时间和产品质量造成较大影响，此时可能需要进行设计优化。另外，对整个产品或零件有一个总分统计，当总分超过12分时，总分项自动显示为红色，表示产品或零件设计严重违反多项设计指南，此时可能整个产品或者零件需要作彻底的设计优化。

产品开发中某装配工序的面向装配的设计检查罚分情况如图7-2所示。

2. 面向装配的设计检查表的使用

面向装配的设计检查表的对象是整个产品的每一个装配工序。装配工序最好能够模拟生产线上的实际装配情况，越详细越好，这样才能确保避免产品实际装配中出现错误，保证装配质量，提高装配效率。

例如，把大象装进冰箱，需要三个步骤：把冰箱门打开，把大象放进去，把冰箱门关上，如图7-3所示。如果把大象放进冰箱当成一个产品的装配，这三个步骤就是三个装配工序。在使用设计检查表对该装配进行检查时，其对象就是三个工序，对这三个工序按照装配的先后顺序逐一与设计指南进行对比，分析是否违反了设计指南，然后按照表7-1的标准进行打分，其部分结果如图7-4所示：

3. 面向制造的设计检查表的使用

面向制造的设计检查表包括塑胶件设计检查表、钣金件设计检查表和压铸件设计检查表。与面向装配的设计检查表不同，面向制造的设计检查的对象是产品中所有零件。其使用方法也很简单，根据零件的制造工艺，选择塑胶件、钣金件和压铸件某一种检查表，针对检查表中的每一项设计指南，检查零件是否满足该项设计指南，然后判断零件对产品成本、开发时间和产品质量是否有影响，处以一定的罚分，罚分标准见表7-1。

注：对于通过其他制造工艺制造的零件，读者可以自行设计相应的检查表。

装配工序		扣分		
面向装配的设计指南				
零件标准化	1. 五金零件标准化	0		
	2. 重复利用其他项目零件	0		
产品模块化		0		
设计一个稳定的基座	1. 最理想的装配是金字塔式的装配	1		
	2. 设计一个稳定的基座	0		
	3. 避免把大的零件置于小的零件之上	0		
零件容易被抓取	1. 避免零件过小、过滑、过热、过软	1		
	2. 设计抓取特征	0		
	3. 避免零件锋利的边、角	0		
避免零件缠绕	1. 避免零件互相缠绕	0		
	2. 避免零件在装配中卡住	0		
减少零件装配方向	1. 装配方向越少越好	2		
	2. 最理想的装配方向是从上至下	0		
设计导向特征		0		
先定位后固定		0		
避免装配干涉	1. 避免零件装配过程干涉			
	2. 避免运动件运动干涉	0		
为辅助工具提供空间		0		
为重要零部件提供装配止位		0		
宽松的零件公差要求	1. 合理设计零件间隙	0		
	2. 为关键尺寸缩短尺寸链			
	3. 使用定位特征	0		
避免零件欠约束和过约束	1. 避免零件欠约束	0		
	2. 避免零件过约束	0		
防错的设计	1. 零件仅具有唯一正确的装配位置			
	2. 零件的防错特征越明显越好	0		
	3. 相似零件合并, 如不能则等大零件的不相似性	0		
	4. 零件完全对称, 如不能则等大零件的不对称性	0		
	5. 设计明显防错标识	0		
	6. 最后的选择, 通过制程防错	0		
装配中的人机工程学	1. 避免视线受阻的装配	1		
	2. 避免装配操作受阻	0		
	3. 避免操作人员受到伤害	0		
	4. 减少工具的种类和特殊工具	0		
	5. 设计特征辅助装配	0		
线缆布局	1. 合理的线缆布局	0		
	2. 为线缆提供保护	0		
其他				
总分				
设计更改建议		该装配工序存在问题, 需重新设计零件的装配		

图 7-2 某装配工序的面向装配的设计检查扣分情况

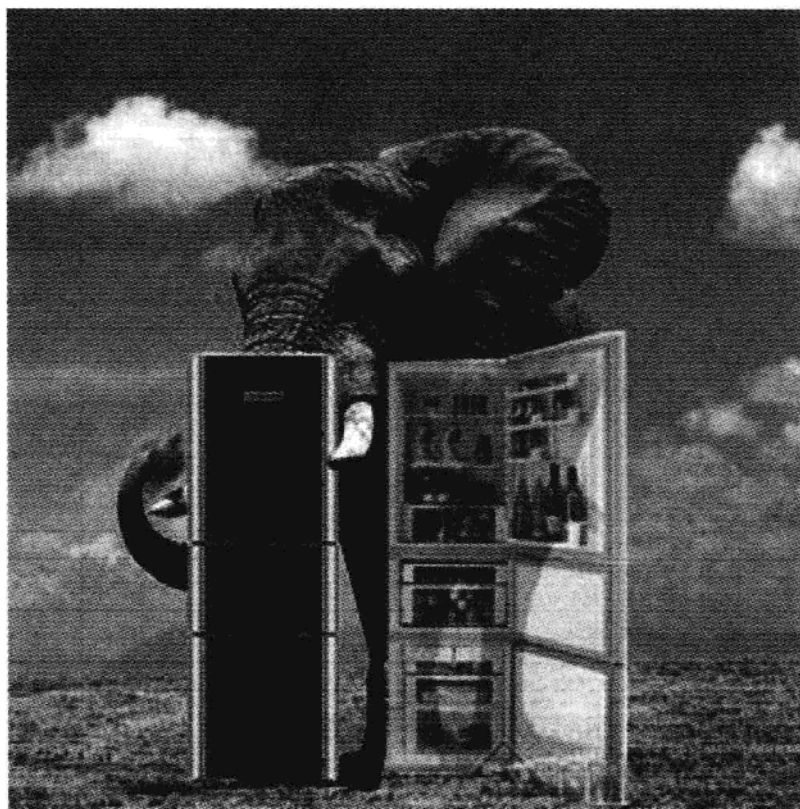


图 7-3 把大象装进冰箱

面向装配的设计检查				
装配工序		把冰箱门打开	把大象放进去	把冰箱门关上
面向装配的设计指南				
零件标准化	1. 五金零件标准化	0	0	0
	2. 重复利用其他项目零件	0	0	0
产品模块化		0	0	0
设计一个稳定的基座	1. 最理想的装配是金字塔式的装配	1	2	0
	2. 设计一个稳定的基座	0		0
	3. 避免把大的零件置于小的零件之上	0	0	0
零件容易被抓取	1. 避免零件过小、过滑、过热、过软	0		0
	2. 设计抓取特征	0	0	0
	3. 避免零件锋利的边、角	0	0	0
避免零件缠绕	1. 避免零件互相缠绕	0	0	0
	2. 避免零件在装配中卡住	0	0	0
减少零件装配方向	1. 装配方向越少越好	0	0	0
	2. 最理想的装配方向是从上至下	0		0
设计导向特征		0	2	0
先定位后固定		0	2	0
避免装配干涉	1. 避免零件装配过程干涉	0		
	2. 避免运动件运动干涉	0	0	0

图 7-4 面向装配的设计检查

为辅助工具提供空间		0	0	0
为重要零部件提供装配止位		0	0	0
宽松的零件公差要求	1. 合理设计零件间隙	0		0
	2. 为关键尺寸缩短尺寸链	0	0	0
	3. 使用定位特征	0	0	0
避免零件欠约束和过约束	1. 避免零件欠约束	0	0	0
	2. 避免零件过约束	0	0	0
防错的设计	1. 零件仅具有唯一正确的装配位置	0		0
	2. 零件的防错特征越明显越好	0	0	0
	3. 相似零件合并, 如不能则夸大零件的不相似性	0	0	0
	4. 零件完全对称, 如不能则夸大零件的不对称性	0	0	0
	5. 设计明显防错标识		0	0
	6. 最后的选择: 通过制程防错	0	0	0
装配中的人机工程学	1. 避免视线受阻的装配	0		0
	2. 避免装配操作受阻	0		0
	3. 避免操作人员受到伤害	0	0	0
	4. 减少工具的种类和特殊工具	0	0	0
	5. 设计特征辅助装配	0	0	0
线缆布局	1. 合理的线缆布局	0	0	0
	2. 为线缆提供保护	0	0	0
其他				0
	总分	1		4
	设计更改建议		该装配工序违反多项装配指南, 不能装配, 请重新设计该零件的装配	

图 7-4 (续)

某产品中部分塑胶零件的设计检查表的部分结果如图 7-5 所示。

塑胶件设计检查				
塑胶零件		上盖	下盖	面板
面向注射加工的设计指南				
零件壁厚	1. 具有合适的壁厚	0	0	0
	2. 尽可能选择较小的壁厚	0	0	0
	3. 壁厚均匀	0	0	2
避免尖角	1. 避免在塑胶流动方向产生尖角		2	0
	2. 避免在壁连接处产生尖角	0	0	1
脱模斜度	1. 收缩率大的零件脱模斜度大	0	0	0
	2. 尺寸精度要求高的特征脱模斜度小	0	0	2
	3. 公模侧脱模斜度一般小于母模侧	0	0	0
	4. 壁厚较大时脱模斜度较大	0	0	0
	5. 吹花面和复杂面脱模斜度较大	0	0	0
	6. 玻纤增强塑料脱模斜度较大	0	0	0
	7. 考虑零件的配合关系	0	0	0
	8. 特殊功能要求平面可以不需要脱模斜度	0	0	0
	9. 在功能和外观允许下, 脱模斜度尽可能取大	0	0	0

图 7-5 塑胶件设计检查

加强肋	1. 加强肋的厚度不应该超过塑胶零件厚度的50%-60%	1	1	
	2. 加强肋的高度不能超过塑胶零件厚度的3倍	0	0	0
	3. 加强肋根部圆角为塑胶零件厚度的0.25-0.5倍	0	0	0
	4. 加强肋的脱模斜度一般为 0.5° ~ 1.5°	0	0	0
	5. 加强肋与加强肋之间的距离至少为塑胶零件厚度的2倍	0	0	0
	6. 加强肋的设计需要遵守均匀壁厚原则	0	0	0
	7. 加强肋的顶端增加斜角避免困气	0	0	0
	8. 加强肋的方向与塑胶熔料的流向一致	0	0	0
支柱	1. 支柱的外径为内径的2倍	0	0	0
	2. 支柱的厚度不超过零件厚度的0.6倍	0	0	0
	3. 支柱的高度不超过零件厚度的5倍	0	0	0
	4. 支柱的根部圆角为零件壁厚的0.25-0.5倍	0	0	0
	5. 支柱根部厚度为零件壁厚的0.7倍	0	0	0
	6. 支柱的脱模斜度	0	0	0
	7. 保证支柱与零件壁连接	0	0	0
	8. 单独的支柱四周增加三角加强肋补强	0	0	0
	9. 支柱的设计需要遵守均匀壁厚原则	0	0	0
孔	1. 孔的深度不能太大	2	0	0
	2. 避免盲孔底面太薄	0	2	0
	3. 孔与孔的间距及孔与零件边缘尺寸避免太小	0	0	0
	4. 零件上的孔尽量远离零件受载荷部位	0	0	0
	5. 可以在孔的边缘增加凸缘增加孔的强度	0	0	0
	6. 避免与零件脱模方向垂直的侧孔	0	0	0
	7. 长孔的设计避免阻碍塑胶熔料的流动	0	0	0
	8. 风孔的设计	0	0	0

图 7-5 (续)

提高零件强度	1. 通过添加加强肋而不是增加零件壁厚来提高零件强度	1	0	0
	2. 加强肋的方向需要考虑载荷的方向	0	0	0
	3. 多个加强肋常常比单个较厚或者较深的加强肋好	0	0	0
	4. 通过设计零件剖面形状提高零件强度	0	0	0
	5. 增加侧壁和优化侧壁剖面形状来提高零件强度	0	0	0
	6. 避免零件应力集中	0	0	0
	7. 合理设置浇口避免零件在焊接痕区域承受载荷	0	0	0
	8. 其他强度增加相关	0	0	0
提高零件外观	1. 选择合适的塑胶材料	0	0	0
	2a. 通过设计掩盖零件表面缩水	0	0	0
	2b. “火山口”设计	0	0	0
	2c. 合理设置浇口的位置和数量	0	0	0
	3. 预测零件变形, 设计减小变形	0	0	0
	4. 外观零件之间设计美工沟	0	0	0
	5. 避免零件外观面出现熔接痕	0	0	0
降低零件成本的设计	6. 合理选择分模线避免零件重要外观面出现断差或者毛边	0	0	0
	7. 顶针避免设计在零件重要外观面	0	0	0
	1. 设计多功能的零件	1	0	0
	2. 降低零件材料成本	0	0	0
	3. 简化零件设计, 降低模具成本	0	0	0
	4. 避免零件严格的公差	0	0	0
	5. 零件设计避免倒勾	0	0	0
	6. 降低模具修改成本	0	0	0
	7. 使用卡勾代替螺钉等固定结构	0	0	0
注射模具可行性设计	8a. 零件外观装饰特征直向外凸出	0	0	0
	8b. 零件上文字和符号直向外凸出	0	0	0
其他	1. 卡勾结构应为斜销预留足够的运动空间	0	0	0
	2. 避免模具出现脚踏以及强度太低的设计	0	0	0
	总分	8	5	8
	设计更改建议	零件存在局部尖角, 需设计修改		加强肋厚度较大, 需修改设计, 以避免零件外表面缩水

图 7-5 (续)

参 考 文 献

- [1] 周瑾. 最后的铁匠 [J]. 山东画报, 2008.
- [2] G 布斯劳. 面向制造与装配的产品设计 [M]. 王知衍, 译. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [3] David G Ullman. The Mechanical Design Process [M]. 3rd ed. New York: McGraw - Hill, 2003.
- [4] Geoffrey Boothroyd. Assembly Automation and Product Design [M]. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2005.
- [5] David M Anderson. Design for Manufacturability & Concurrent Engineering [M]. Cambria: CIM Press, 2004.
- [6] James G Bralla. Design For Manufacturability Handbook [M]. 2nd ed. New York: McGraw - Hill, 1998.
- [7] Tom Drozda. Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Design for Manufacturability [M]. 4th ed. Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [8] Poli C. Design for Manufacturing [M]. London: Butterworth - Heinemann, 2001.
- [9] Devdas Shetty. Design for Product Success [M]. 8nd ed. Society of Manufacturing Engineers, 2002.
- [10] 机械设计手册编委会. 机械设计手册: 零件结构设计工艺性 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [11] Bryan R Fischer. Mechanical Tolerance Stackup and Analysis [M]. Boca Raton: CRC Press, 2004.

