

1 绪论

1.1 电子设备热控制目的

随着电子技术的迅速发展,电子技术在军用和民用的各个领域得到了广泛的应用,为提高元器件和设备的热可靠性以及对各种恶劣环境条件的适应能力,使电子元器件和设备的热控制和热分析技术得到了普遍的重视和发展。

自1948年半导体器件问世以来,电子元器件的小型化、微型化和集成技术的不断发展,使每个集成电路所包含的元器件数超过了250000个,由于超大规模集成电路(VLSIC)、专门集成电路(ASIC)、超高速集成电路(VHSIC)等微电子技术的不断发展,微电子器件和设备的组装。

随着组装密度的提高,组件和设备的热流密度也在迅速提高,如图1-1所示。研究表明,芯片级的热流密度高达 $100\text{W}/\text{cm}^2$,它仅比太阳表面的热流密度低两个数量级,太阳表面的温度可达 6000°C ,而半导体集成电路芯片的结温应低于 100°C ,如此高的热流密度,若不采取合理的热控制技术,必将严重影响电子元器件和设备的热可靠性。

电子设备热控制的目的是要为芯片级、元件级、组件级和系统级提供良好的热环境,保证它们在规定的热环境下,能按预定的方案正常、可靠的工作。热控制系统必须在规定的使用期内,完成所规定的功能,并以最少的维护保证其正常工作的功能。

防止电子元器件的热失效是热控制的主要目的。热失效是指电子元器件直接由于热因素而导致完全失去其电气功能的一种失效形式。严重的失效,在某种程度上取决于局部温度场、电子元器件的工作过程和形式,因此,就需要正确地确定出现热失效的温度,而这个温度应成为热控制系统的重要判据,在确定热控制方案时,电子元器件的最高允许温度和最大功耗应作为主要的设计参数

1.2 电子设备的热环境

各类电子设备使用场所的热环境的可变性是热控制的一个必须考虑的重要因素,例如装在宇航飞行器上的电子设备在整个飞行过程中将遇到地球大气层的热环境、大气层外的宇宙空间的热环境等。导弹上工作的电子元器件所经受的环境条件比地面室内设备的环境条件恶劣得多,它们必须满足不同环境温度和特殊飞行密封舱的压力要求,除此之外,还有机械振动和电磁干扰等因素。

电子设备的热环境包括:

- a. 环境温度和压力(或高度)的极限值;
- b. 环境温度和压力(或高度)的变化率;
- c. 太阳或周围物体的辐射热;
- d. 可利用的热沉(包括:种类、温度、压力和湿度);

e. 冷却剂的种类、温度、压力和允许的压降（对由其他系统或设备提供冷却剂进行冷却的设备而言）。

在讨论热环境时，分析一下热沉是必要的，所谓热沉，是指一个无限大的热容器，它的温度不随传递到它的热能大小而变化，它可能是大地、大气、大体积的水或宇宙，又称热地。过去我们也称为“最终散热器”，也就是我们将在后面讨论的热电模拟回路中的接地点。对空用和陆用设备而言，周围的大气就是热沉。建筑物、设备掩体和地面运载工具主要受周围大气层温度的影响，温度范围为 $-50^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ ， -50°C 代表北极温度， $+50^{\circ}\text{C}$ 代表亚热带温度。从高原到深山峡谷的压力范围为 $75.8\text{kPa}\sim 106.9\text{kPa}$ ，太阳辐射力可达 $1\text{kW}/\text{m}^2$ ，长波辐射能约为 $0.01\sim 0.1\text{kW}/\text{m}^2$ ，静止空气的对流换热系数为 $6\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ，风速为 $27.8\text{m}/\text{s}$ 时的对流换热系数为 $75\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

导弹及低空、高空飞行器的环境条件，取决于围绕该设备的空气动力流动。当接近地球表面低速飞行时，除在深山峡谷地区压力可能增大外，其他条件近似等于上述条件。在超音速飞行时，边界层吸收的外部热量可使导弹或飞机的蒙皮温度达到相当高的程度。在接近海平面低马赫数飞行时，蒙皮温度可达 130°C ，在海拔 $10\sim 20\text{km}$ 的高度超音速飞行时，其温度与上述相当。在后一种条件下，由高的动压与低的静压，可能会引起大于 106.9kPa 的压力，而最小压力却低于上述最小压力值，使其遇到的压力范围扩大了。

军用、民用和直升飞机上的仪器设备，多数采用标准的密封或非密封的 ATR 机箱，利用喷气发动机压气机的冲压空气对 ATR 机箱进行强迫冷却。由于冲压空气的温度和压力较高，应在使用前使其通过冷却透平节流、冷却以及水分离等干燥处理。

航天器上的电子设备依靠向宇宙空间的热辐射实现散热，其空间环境温度为 -269°C ，没有空气，是高真空的环境。航天器要经受太阳的直接热辐射，行星及其卫星的反照，以及行星与卫星阴影区的深度冷却。故在航天器表面应有合适的涂层，它既可以吸收来自太阳的辐射热，又可以为航天器及电子设备提供极好的冷却。

在航天器内部，由于空间没有空气，导热和辐射是两种主要的热控制方法。在电子元器件允许的温度范围内，导热作用比辐射更显著。

舰船的环境条件比较好，外部环境温度不会超过 35°C ，其太阳辐射强度和对流换热系数与上述地面设备相似。但是，当潜艇高速航行时，与海水的换热系数可达 $10^5\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ，此时任何潮湿设备表面温度几乎与海水温度相等。

需要进行热控制的各类电子设备，在热设计时，必须同时注意对连续工作和取决于运载工具与任务的首次平均故障时间（MTTF）的要求，MTTF 反应了设备的可靠性。各种运载工具的额定时间需要考虑携带的燃料、通信与控制的最大距离及作用范围等。地面雷达和舰船上的电子元器件可能每天都工作，而导弹上的电子元器件一般为 $30\sim 300\text{s}$ （不包括扑获飞行状态），机载设备上的元器件则需 $3\sim 24\text{h}$ ，装甲车上的电子设备通常为 $6\sim 24\text{h}$ 。

由于电子技术的迅速发展，很难对所有的电子元器件规定一个通用的热环境，有关我国军用电子设备的环境条件等已在相应的国家标准^[1]和国家军用标准^[2]中有所规定。

1.3 电子设备热控制基本原则

1.3.1 热控制的基本要求

电子设备热控制是设备可靠性设计的一项重要技术。由于温度与元器件失效率的指数规律,随温度的升高,失效率迅速增加,因此,在进行热设计时,必须首先了解元器件的热特性,并根据 GJB/Z299《电子设备可靠性预计手册》提供的元器件基本失效率值。在此基础上,可以根据设备工作环境的类别和元器件质量等级等,预计元器件的工作失效率以及设备的可靠性。

a. 热控制应满足设备可靠性的要求。

高温对大多数电子元器件将产生严重的影响。过应力(即电、热或机械应力)容易使元器件过早失效,电应力与热应力之间有着紧密的内在联系,减少电应力(降额)可使热应力得到相应的降低,可以提高其可靠性。例如硅 PNP 晶体管,其电应力比为 0.3 时,在 130°C 时的基本失效率为 $13.9 \times 10^{-6}/h$,而在 25°C 时的基本失效率则为 $2.25 \times 10^{-6}/h$,高低温失效率之比为 6:1。在进行热控制系统设计时,应把元器件的温度控制在规定的数值以下。

b. 热控制应满足设备预期工作的热环境要求。

地面用电子设备的热环境包括:设备周围的空气温度、湿度、气压和空气流速,设备周围物体的形状和黑度,日光照射等。

机载电子设备的热环境包括:飞行高度、飞行速度、设备在飞机上的安装位置、有无空调舱、空调空气的温度和速度等。

c. 热控制应满足对冷却系统的限制要求。

对冷却系统的限制主要包括对使用的电源(交流或直流及功率)的限制、对振动和噪音的限制、对冷却剂进出口温度的限制及结构(安装条件、密封、体积和重量等)的限制。

d. 电子设备热设计应与电路设计及结构设计同时进行。

e. 热设计与维修性设计相结合。

f. 根据发热功耗,环境温度、允许工作温度、可靠性要求,以及尺寸、重量、冷却所需功率、经济性与安全等因素,选择最简单、最有效的冷却方法。

f. 热控制设计应保证电子设备在紧急情况下,具有最起码的冷却措施,关键部件或设备在冷却系统某些部件遭破坏或不工作的情况下,应具有继续工作的能力。

1.3.2 热控制基本原则

电子设备热控制系统设计的基本任务是在热源至热沉之间提供一条低热阻的通道,保证热量迅速传递出去,以便满足可靠性的要求。

a. 保证热控制系统具有良好的冷却功能,即可用性。要保证设备内的电子器件均能在规定的热环境中正常工作,每个元器件的配置必须符合安装要求。

由于现代电子设备的安装密度在不断地提高,它们对环境因素表现出不同的敏感性,且各自的散热量也很不一样,热设计就必须为它们提供一种适当的“微气候”(即人为地造成电子设备中局部冷却气候条件),保证设备不管环境条件如何变化,冷却系统都能按预定的方式完成规定的冷却功能。

b. 保证设备热控制系统的可靠性。在规定的使用期限内,冷却系统的故障率应比元器件的故障率低,例如美国银行里的计算机系统的技术规范规定,该系统每周工作五天,每天

工作十二小时，全年允许中断时间最多为六十分钟，而在任何十二小时的工作中，中断时间不得超过五分钟。这说明对热控制系统的可靠性要求是相当高的。特别是对一些强迫冷却系统和蒸发冷却系统，为保证设备正常可靠地工作，常采用贮备方案，来保证冷却系统的可靠性。同时要在系统中装有安全保护装置，例如流量开关，温度继电器，压力继电器等。

c. 热控制系统应有良好的适应性（相容性）设计中可调性必须留有余地，因为有的设备在工作一段时间后，由于工程上的变化，可能会引起热损耗或流体流动阻力的增加，则要求增大其散热能力，以便无须多大的变更就能增加其散热能力。

d. 热控制系统应有良好的维修性。为了便于测试、维修和更换元件，设备中的关键元器件要易于接近和取放。

e. 热控制系统应有良好的经济性。经济性包括热控制系统的初次投资成本，日常运行和维修费用等。热控制系统的成本只占整个设备成本的一定比例。

设计一个性能良好的热控制系统，应综合考虑各方面的因素，使其既能满足热控制的要求，又能达到电气性能指标，所用的代价最小、结构紧凑、工作可靠。而这样一个热控制系统，往往要经过一系列的技术方案论证之后才能达到。

1.4 电子设备热控制方法

电子设备的热控制，首先要从确定元器件或设备的冷却方法开始。冷却方法的选择直接影响元器件或设备的组装设计、可靠性、重量和成本等。要有效地控制元器件或设备的温度，必须首先确定它们的发热量、与散热有关的结构尺寸、工作环境条件及其它特殊要求（如密封、气压等）。

自然冷却（导热、自然对流和辐射换热的单独作用或两种以上换热形式的组合）的优点是可靠性高，成本低。它不需要通风机或泵之类的冷却剂驱动装置，避免了因机械部件的磨损或故障影响系统可靠性的弊病，因此，在考虑冷却方法是，应优先考虑自然冷却方法。

图 1-2 是根据设备的允许温升和热流密度确定冷却方法的选择图。由图可见，当温升为 60°C 时，自然冷却的热流密度小于 $0.05\text{W}/\text{cm}^2$ ，因此，这种冷却方法不可能提供 $1\text{W}/\text{cm}^2$ 的热流密度，甚至在温升为 100°C 时也是这样。如果用强迫空气冷却，则传热能力可提高一个数量级。若采用碳氟有机液蒸发冷却，可提供相当高的传热能力，且这种冷却剂有很高的介电特性，可使大多数功率元件直接浸入工作液进行冷却，其热流密将超过 $10\text{W}/\text{cm}^2$ ，而温升则小于 10°C 。

目前在一些热流密度不太高，而温升要求也不高的电子设备中，广泛地采用自然冷却方法。在一些热流密度比较大，温升要求比较高的设备中，则多数采用强迫空气冷却，此种方法与液体冷却、蒸发冷却相比较，具有设备简单、成本低的特点。因此，尽管强迫通风冷却系统的体积和重量大些，但对要求不十分严格的陆用设备还是非常合适的一种冷却方法。

设备内部元器件的冷却方法应使发热元器件与被冷却表面或散热器之间有一条低热阻的传热路径，冷却方法应简单、可靠性维修性好、成本低等。利用金属导热是最基本的传热方法，其热路容易控制。而辐射换热则需要较高的温差，且传热路径不易控制。对流换热需

要较大的换热面积，在安装密度较高的设备内部难以满足要求。

直接液体冷却适用于体积功率密度较高的电子元器件或设备。也适用那些必须在高温环境条件下工作、且元器件与被冷却表面之间的温度梯度又很小的部件。直接液体冷却要求冷却剂与电子元器件相容，能够承受由于液体的高介电常数和功率因数引起寄生电容的增加和电气损失的电路。其典型面积热阻为每平方厘米 $1.25^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。直接液体冷却可分为直接浸没冷却和直接强迫冷却。直接强迫液体冷却的热阻为每平方厘米 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，这种冷却方法的效率较高，但增加了泵功率和热交换器等部件。如果采用喷雾浸没冷却，可以减轻冷却设备的重量。

蒸发冷却适用于体积功率密度很高的设备或元器件，其热阻为每平方厘米为 $0.006^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

热电致冷是一种产生负热阻的致冷技术，其优点是不需要外界动力，且可靠性高。其缺点是效率低、重量大等。

热管是一种传热效率很高的传热器件，其传热性能比相同的金属导热能力高几十倍，且热管两端的温差很小。应用热管传热时，主要问题是如何减小热管两端接触界面上的热阻。冷却方法确定后，应仔细研究电子设备中各类电子元器件的热安装方案和设备的整体结构形式。从热控制要求出发，应尽量减小传热路径的热阻，合理分配各个传热环节的热阻值。正确布置发热元件与热敏元件的位置及间距。注意印制板组装件的放置方向和它们的间距，保证冷却气流均匀流过发热元器件，形成合理的气流通路

4 电子设备的强迫空气冷却

4.1 强迫空气冷却的基本形式

4.1.1 单个电子元件的强迫空气冷却

在整机机柜中只有单个电子器件需要冷却时，例如雷达发射机中的大功率磁控管、行波管、调制管、阻尼二极管等需要集中风冷，其热计算可以根据发热器件结构形状和气流流动方向与发热器件的相应关系，采用相应的换热准则方程。

$$(4-1)$$

式 (4-1) 中 Re 数的范围是 $180 < Re_t < 8000$ ，定性温度取流体温度，特征尺寸取 2δ (δ 为环形通道的间隙)。

为保证气流在环形间隙通道中呈紊流状态，必须设计一个比较合适的间隙。通常认为在环形通道中 $Re \geq 4000$ 时，就有足够的紊流，则

$$(m) \quad (4-2)$$

其中 ν 为空气的运动粘度 (m^2/s)， v 为环形通道中气流速度 (m/s)。

4.1.2 整机抽风冷却

整机的抽风可分为有风管和无风管两种型式,有风管的抽风,其风管可以装在机柜的后侧,也可以放在机柜的两侧,视具体情况而定。风道口的大小可根据每个分机或插箱的发热量来确定。

抽风冷却主要适用于热量比较分散的整机或机箱。热量经专门的风道或直接排到设备周围的大气中。抽风的特点是风量大,风压小,各部分风量比较均匀。因此,整机的抽风冷却常用在机柜中各单元热量分布比较均匀,各元件所需冷却表面的风阻较小的情况。由于热空气的密度较小,它有一个浮升力。因此,抽风机一般都装在机柜顶部或上侧面,出风口面向设备周围的大气。

图 4-1 单个元件通风冷却

当各单元有热敏元件时,就需要有专用的抽风管道。此时,上下各单元互不通气。为防止灰尘吸入,可在进风口处装滤尘装置。

当机柜中部或顶部各单元需要风冷,但没有热敏元件时,可采用设有专用抽风道的形式。为了便于气流流通,机柜底板以及中层各底板均需要开孔、开槽。为防止气流短路,只允许在机柜底侧开百叶窗或通风孔等。

4.1.3 整机的鼓风冷却

它也可以分为有鼓风管道和无鼓风管道两种。

整机鼓风的特点是风压大,风量比较集中。整机鼓风冷却通常在单元内热量分布不均匀,各单元需要专门风道冷却,风阻较大、元件较多的情况下,建议采用有风管形式,这样便于控制各单元的风量。

整机抽风或鼓风所需的风量应等于各个单元发热元件所需风量之和。根据热平衡方程,可得到整机的通风量为

$$\quad \quad \quad (\text{ m}^3 / \text{s}) \quad \quad \quad (4-3)$$

式中: ρ 为空气的密度(kg/m^3); c_p 为空气的比热($\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$); w 为总损耗功率(热流量)(w); Δt 为冷却空气的出口与进口温差($^\circ\text{C}$)。

空气的出口温度应根据单元内各元件允许的表面温度来确定。而元件的表面温度与冷却效果有关。因此, Δt 的确定涉及一系列的迭代计算。含有印制板的风冷系统, Δt 可取 10°C 左右。

这种风量计算方法比较保守,因为它已经忽略了机柜四周对大气的辐射和自然对流换热所散去的热量(假设机柜表面温度高于周围环境温度),因此,所得风量偏大。在精确计算时,应把这两项所散去的热量从总热量中减去,再求所需的风量。一般在强迫风冷时,辐射与自然对流散热量约占总散热量 10%左右