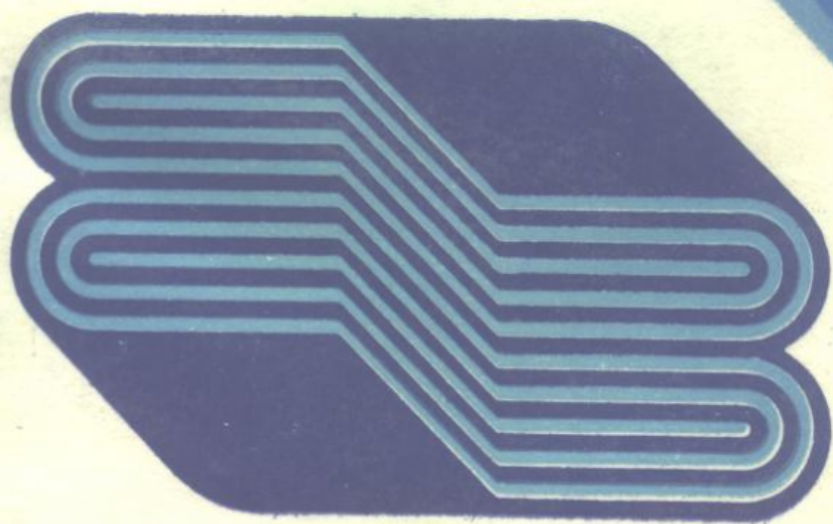


电子设备 可靠性热设计指南

● 徐维新 主编



电子工业出版社



电子设备 可靠性热设计指南

徐维新 王宏利 编著
高立志 王建华



电子工业出版社

京新登字055号

内 容 提 要

本书简明扼要地阐述了电子产品可靠性热管理、设计、试验和评定等技术和各种准则。

本书适用于电子产品管理、设计、生产、试验的工程管理和技术人员作为指南。

2420/14

电 子 设 备 可靠性热设计指南

徐维新 王宏利 编著
高立志 王建华

*

电子工业出版社出版

(北京市万寿路 邮政编码 100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

北京通县运河印刷厂印刷

*

开本787×1092毫米1/32 印张6 字数 140千字

1995年3月第1版 1995年3月第1次印刷

印数 1~1000册 定价 8.0元

ISBN7-5053-2663-5/IN·785

目 录

第一章 热管理的效益	1
§ 1.1 不完善热管理的损失	1
§ 1.2 成功的热管理的钥匙	5
§ 1.2.1 建立热管理规范	6
§ 1.2.2 聘用热管理专家	6
§ 1.2.3 在系统级进行热管理的任务	7
§ 1.2.4 热管理的全过程	7
§ 1.2.5 各学科间的密切合作	7
§ 1.3 小 结	9
第二章 具体的热管理任务和指标	10
§ 2.1 热管理的任务	10
§ 2.1.1 初步设计阶段	12
§ 2.1.2 方案论证和选择阶段	14
§ 2.1.3 全尺寸研制阶段	15
§ 2.1.4 生产阶段	16
§ 2.2 适当的热管理任务的确定	16
§ 2.2.1 拟定投标要求	17
§ 2.2.2 检查热管理任务实施的方法	19
§ 2.3 小 结	21
第三章 热管理程序的剪裁	22
§ 3.1 剪裁的原则	22
§ 3.2 剪裁的方法	23

§ 3.2.1	冷却系统的超额设计	24
§ 3.2.2	重点分析热敏感/功耗大的器件	25
§ 3.2.3	核实工作温度是否低于允许的上限	26
§ 3.2.4	与类似的硬件系统比较分析	27
§ 3.2.5	其它方法	28
§ 3.3	忽视热分析和热试验的危险	29
§ 3.4	小 结	30
第四章	温度对可靠性的影响	31
§ 4.1	温度对失效率的影响	31
§ 4.1.1	器 件	31
§ 4.1.2	部 件	33
§ 4.1.3	现场试验	34
§ 4.2	热致失效模式	35
§ 4.3	完善的热设计成本—效益	37
§ 4.4	小 结	38
第五章	传热原理	39
§ 5.1	基本概念	39
§ 5.1.1	温 度	39
§ 5.1.2	热 阻	39
§ 5.1.3	功 耗	39
§ 5.1.4	散热器	40
§ 5.2	冷却问题	41
§ 5.3	传热的方式	42
§ 5.3.1	传 导	43
§ 5.3.2	对流传热	45
§ 5.3.3	热辐射	49
§ 5.4	电学模拟	50

§ 5.5 冷却剂的附加热效应	51
§ 5.6 小 结	52
第六章 要求的热环境	54
§ 6.1 定义热环境的必要性	54
§ 6.2 典型的热环境	57
§ 6.2.1 空中系统的热环境	57
§ 6.2.2 地面和海面工作系统的典型热环境	58
§ 6.3 美国军用规范	58
§ 6.3.1 航空电子设备的一般规范 ——MIL—E—5400	58
§ 6.3.2 军用电子设备气候变化极限 ——MIL—STD—210	59
§ 6.3.3 极限气候条件下材料的研究、试验和鉴定 ——AR70—38	60
§ 6.3.4 环境试验方法——MIL—STD—810	61
§ 6.3.5 指数分布产品的可靠性试验 ——MIL—STD—781	61
§ 6.4 小 结	61
第七章 电子设备的热设计	62
§ 7.1 热阻的分类	62
§ 7.1.1 内部热阻	62
§ 7.1.2 外部热阻	62
§ 7.1.3 系统热阻	63
§ 7.2 外部热阻	63
§ 7.2.1 器件的直接冷却	64
§ 7.2.2 电路板的应用	66
§ 7.2.3 用空气强迫冷却的方法	66

§ 7.2.4 热 管	72
§ 7.3 系统的热路	73
§ 7.3.1 辐射和自然对流冷却法	74
§ 7.3.2 空气强迫对流冷却法	75
§ 7.3.3 液体强迫对流冷却法	75
§ 7.3.4 相变法	77
§ 7.3.5 强迫对流装置	79
§ 7.4 致冷系统	81
§ 7.4.1 气体循环致冷	82
§ 7.4.2 蒸气循环冷却	83
§ 7.4.3 半导体致冷器	83
§ 7.5 电子设备冷却的趋势	84
§ 7.6 小 结	85
第八章 热分析	86
§ 8.1 热分析	86
§ 8.2 预计方法	87
§ 8.2.1 解析法	87
§ 8.2.2 数值法	89
§ 8.3 热分析的等级	90
§ 8.3.1 初步分析	91
§ 8.3.2 较细致的分析	92
§ 8.3.3 细致分析	92
§ 8.4 计算机程序	93
§ 8.4.1 特定的热分析计算机程序	93
§ 8.4.2 最优化的热可靠性计算机程序	94
§ 8.5 完成热分析的步骤	94
§ 8.5.1 热分析	94

§ 8.5.2 热分析的信息	94
§ 8.5.3 热分析的成本	95
§ 8.6 小 结	96
第九章 热测试	97
§ 9.1 热测试的目的	97
§ 9.2 对热设计方案在各阶段的热测试	98
§ 9.3 热测试方案的设计	98
§ 9.3.1 保证测试的真实性	98
§ 9.3.2 测试仪器、测试参数及测量点的选择	100
§ 9.4 测温方法	102
§ 9.5 小 结	104
第十章 环境应力筛选	106
§ 10.1 热应力筛选	106
§ 10.2 温度测量的必要性	107
§ 10.3 热筛选的等级	108
§ 10.3.1 器件级的热筛选	108
§ 10.3.2 部件级的热筛选	109
§ 10.4 明确筛选温度	110
§ 10.5 热筛选加速热致失效的和失效模式	111
§ 10.6 小 结	112
第十一章 生产阶段的热评定	113
§ 11.1 生产阶段热评定的目的	113
§ 11.1.1 生产阶段热管理的任务	113
§ 11.1.2 确定产品允许温度上限	113
§ 11.1.3 确定检查的程序	115
§ 11.1.4 对修改建议的评价	115
§ 11.2 热检查技术	116

§ 11.3 小 结	117
第十二章 热设计准则	119
§ 12.1 对冷却方法的要求	119
§ 12.2 器件的布局/安装	121
§ 12.2.1 尽量分散安装高功耗器件	122
§ 12.2.2 把器件尽可能安装在温度最低处	122
§ 12.2.3 把热敏感的器件安装在最冷处	123
§ 12.3 装配设计准则	124
§ 12.3.1 热路要短	124
§ 12.3.2 接触面积要大	125
§ 12.3.3 用导热率较高的材料减小热阻	126
§ 12.3.4 减小接触面热阻的方法	127
§ 12.3.5 减小辐射热阻的方法	128
§ 12.4 风扇的选择和安装准则	128
§ 12.5 冷却剂通道的设计准则	130
§ 12.6 小 结	132
第十三章 改善热设计能提高设备的可靠性	133
§ 13.1 热致失效的成本	133
§ 13.2 修改热设计的成本	134
§ 13.3 改善现役设备热设计的途径	134
§ 13.4 改进热设计成功的实例	135
§ 13.5 小 结	138
附录I 单位换算系数	139
附录II 常用公式及数据	143
附录III MIL—HDBK—217C的修正因子	153
附录IV 常见的热设计器件温度的近似估计	160

第一章 热管理的效益

对于一个系统，如果能成功地进行热管理，就能以较小的投资获得长期的巨大的效益。本章将首先通过一个简单的例子说明没有完善的热管理导致潜在的高费用，然后着重说明一个成功的热管理包括的基本要素。

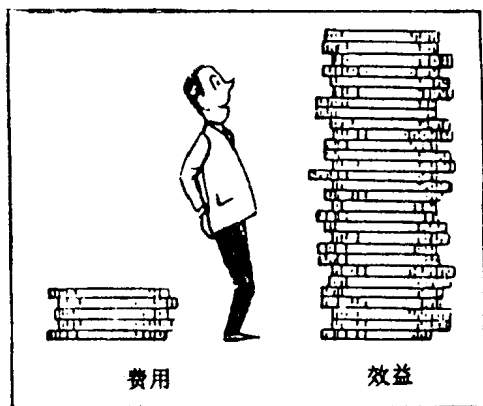


图1.1 热管理的成本和效益

§ 1.1 不完善热管理的损失

现代军事电子系统研究的重要课题是尽可能地降低系统的全寿命费用，尽可能地提高系统的可靠性。然而，由于缺乏完善的热管理而导致系统增加不必要的费用的例子屡见不鲜。虽然情况各不相同，但是归结起来不外乎以下3种原因。

1. 管理者没有认识到合理的热管理的重要性；
2. 承包者(生产者)没有称职的热管理工程师；
3. 可靠性工程师缺乏完善热管理和设计的技术资料。

为了说明由于上述原因导致系统费用的增加，举一个简单例子。签订一项合同：设计和制造一个简便易行的系统，该系统由安装在一个壳体里的3个部件组成。从表面上来看，好象不需要主动冷却。而仔细一想，不论从哪个角度来看都会发生问题。

这个系统的设计如图1.2所示。每个器件的样品都做出来了，并进行了检验和模拟试验，都没有出问题。但是，在整机试验中，这些器件都多次发生故障。承包者的可靠性工程师正确地判断出发生故障的原因是器件的温度过高，并建议进行

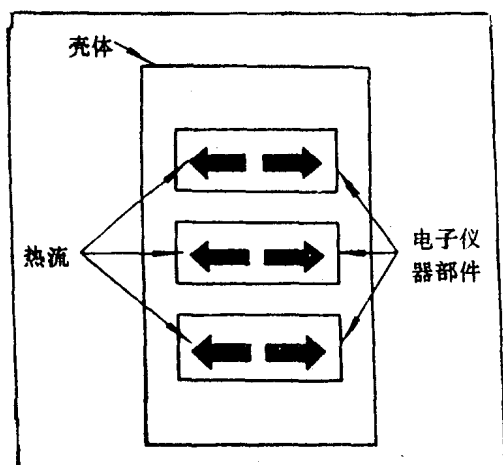


图1.2 比较简单的电子系统，最初设计未采取冷却措施，因局部过热而失效

强制冷却。

碰巧承包者没有或缺乏热管理知识，在他看来几乎没有必要进行热管理，只要在壳体顶部开一个窗口装一台风扇就能把一切问题都解决了。

尽管如此简单，如果修改设计如图1.3所示，就会导致很大的浪费。因为需要给风扇留出一块空间，因此使器件的安装位置变化，有的器件还需重新排列；要吸进冷空气，排出热空气，就要在壳体上开口；为使空气通过器件到风扇，还需在壳体内设计通道；当然还需为风扇提供电源。

除了昂贵的成本之外，修改设计好象很理想。于是，修改系统的设计，通过了试验，投入了生产，制造了几百个这样的系统。

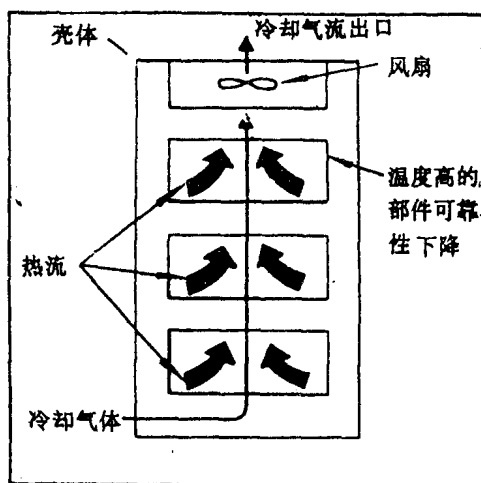


图1.3 第一次修改设计，冷却气体依次流过各器件，因下游部分器件高温而降低了可靠性

可是，随着系统运行时间的增长，系统的故障反而越来越急剧地增加，而且增加的原因仍然是热引起的。

这次请来了一个有经验的热工程师，他们很快地发现了问题。问题就在于虽然加装了风扇，但冷却空气通道的设计错误，它使冷却空气串联地流过各器件，致使空气温度逐渐地提高，到了下游变成了热气流。于是，下游的器件散热较加风扇前更困难，因此故障率随时间的增长而急剧地增加。

通过第二次修改设计将冷却空气通道改成如图1.4所示的并列的形式。当然又要花很多钱，造成浪费。但问题并未解决。聘用的热工程师走了，承包者无法检查工厂的工作质量和组合件。碰巧又发生了这种事：在进气口处安装了一个尺寸太大的传感器，妨碍了空气流入。由于冷却空气流量不足，因此器件仍然过热。不言而喻，如果这个错误不彻底纠正，承包者就还

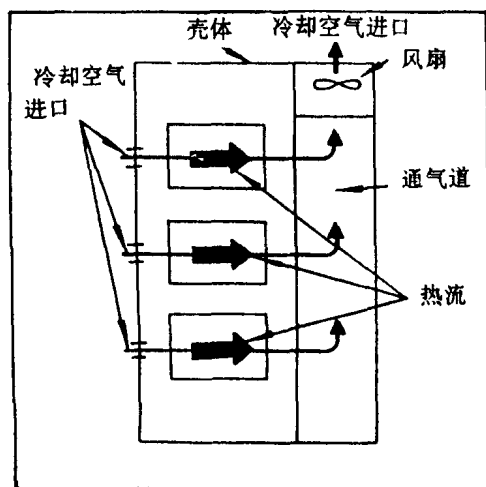


图1.4 在第二次修改设计中，冷却空气并列地流过器件，但因在进口处安装的温度传感器太大，结果器件温度还是太高

要浪费大量的钱，而且信誉会名落孙山。

在上述过程中，由于所有的方法都不能解决热的问题，因此要有一个详尽的设计热管理。一个完整的热设计可以节省费用3倍以上。它通过节省研制费用、生产费用、工作费用和维修费用等来实现。

§ 1.2 成功的热管理的钥匙

那么成功的热管理方案的钥匙是什么呢？从上述例子中可以推测出成功的钥匙至少有5把：

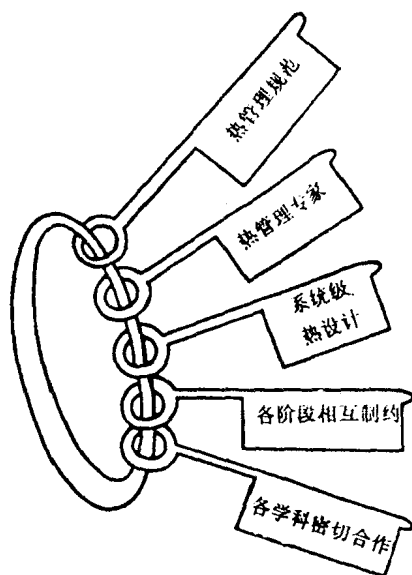


图1.5 热管理成功的5把钥匙

1. 建立热管理规范；
2. 聘用热管理专家；
3. 采用系统级热设计的程序；
4. 进行全过程的热管理；

此外还有第五把钥匙，即要考虑各学科间的密切合作。

§ 1.2.1 建立热管理规范

在热管理规范中，要明文规定热管理的任务和要求，规定操作者记录的数据和报告形式，规定承包者和使用者为实现可靠的热管理所需的主要设备和仪器。

投标要求中关于热管理指标包含许多内容。它要求承包者必须制定一个热管理计划，进行成本预算，以及预计设计和生产过程中为实现热管理指标所采取的措施。

§ 1.2.2 聘用热管理专家

在实现热管理的过程中，使用者和承包者都必须聘用热管理专家。使用者的可靠性经理必须懂得从起草招标公告和评价投标报告到设计评审的实施情况，都必须请热管理专家参加，如图1.6所示。承包者必须懂得在起草投标报告时，在选择最经济最可靠的热管理方案时，以及在热设计和生产中都必须尽早地请热工程师参加，以便使设计很快以最小的代价达到要求。经常出现相反的情形，即热管理工程师参加工作过晚，以致没有必要的时间内来完成最佳设计。急急忙忙地拼凑的结果必然是留下隐患，不但造成人力物力浪费，而且可能丧失中标机会。

§ 1.2.3 在系统级进行热管理

由于电子器件的温度不仅受电子器件本身设计的影响，而且受系统设计的影响。因此，可靠性工程师必须有权力和责任干预影响电子器件温度 and 影响系统可靠性的系统级决策。热管理工程师也必须具有直接地或通过可靠性工程师间接地干预上述决策的权力。

§ 1.2.4 热管理的全过程

在工程上，热管理必须贯穿于设计生产的全过程。热管理从初步研究、方案对比

和完成草图阶段开始，直到试制定型阶段为止的整个过程。在生产阶段也必须坚持热管理。即使出现设计和制造改型，也要坚持热管理。



图1.6 使用方和承包方的热工程师参加设计是热管理成功的一把钥匙

§ 1.2.5 各学科间的密切合作

如图1.7所示，在整个设计过程中，必须贯彻设计工程师(电

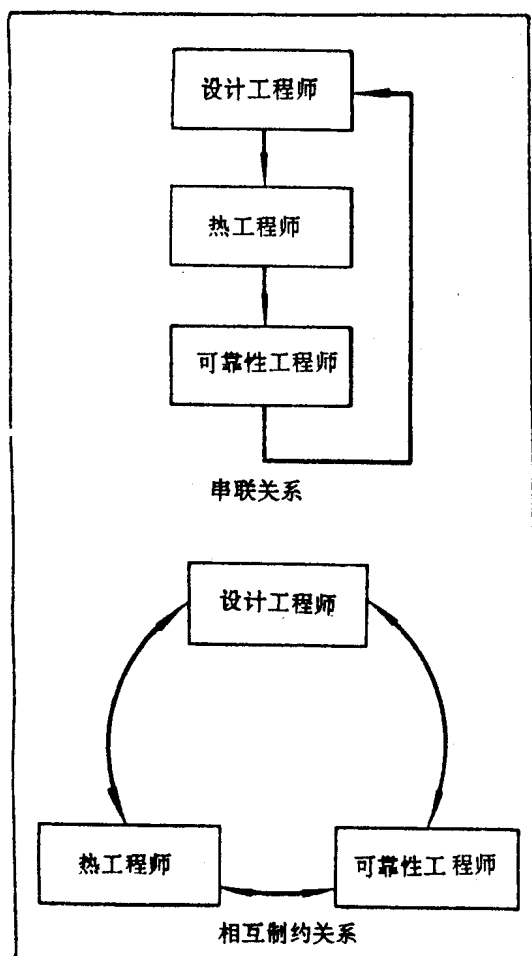


图1.7 为了节约时间和钱，设计工程师、热工程师和可靠性工程师之间的关系，相互制约较串联好