



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

“十一五”国防特色规划·教材

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

余建祖 高红霞 谢永奇 编著

电子设备热设计及 分析技术 (第2版)



北京航空航天大学出版社



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

“十一五”国防特色规划·教材

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

电子设备 热设计及分析技术

(第2版)

余建祖 高红霞 谢永奇 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

“电子设备热设计及分析技术”是为解决电子元器件及设备的温升控制问题而发展起来的新学科。

本书系统介绍电子元器件、组件及整机设备或系统的热设计、热分析技术及其相关理论,其中包括电子设备热设计的理论基础概述,电子设备用肋片式散热器及冷板设计,机箱和电路板的传导冷却及风冷设计,微电子元器件与组件的热设计,电子设备的辐射冷却和相变冷却,热管散热及热电制冷在电子设备热设计中的应用,电子设备的瞬态冷却,电子设备热设计技术的新进展等。对上述各种热设计及分析技术所涉及的传热学和流体力学的基础理论,本书都用相当篇幅简明、扼要地进行了介绍。书中给出大量公式、曲线、图表和具体的技术参数,各部分内容均配有实际设计计算例题,供工程应用时参考。

本书可作为高等院校相关专业研究生教材,亦可供从事电子设备热设计、结构设计和可靠性技术研究的科研工作者、工程技术人员以及从事飞行器与其他运载工具的热控制、环境控制和低温制冷工程的专业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电子设备热设计及分析技术/余建祖,高红霞,谢永奇编著. —2版. —北京:北京航空航天大学出版社, 2008. 11

ISBN 978-7-81124-491-5

I. 电… II. ①余…②高…③谢… III. 电子设备—温度控制—设计 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 167927 号

电子设备热设计及分析技术(第 2 版)

余建祖 高红霞 谢永奇 编著

责任编辑 宋淑娟 王 实

刘晓明 张冀青

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@buaa.edu.cn

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:26.5 字数:594 千字

2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-491-5 定价:45.00 元

第2版前言

本书第1版自2002年出版至今不过6年,但这期间我国航空航天事业取得了巨大进步和发展,与航空航天技术密切相关的电子设备热设计及分析技术,也受到越来越广泛和前所未有的高度重视。有航空航天的应用需求作为强大动力,借助材料、电子、热科学等学科迅猛发展所获得的丰硕成果,许多新理论、新技术、新材料和新工艺不断被应用到电子设备热控制领域,极大地推动了电子设备热设计及分析技术的进步。笔者在这6年的教学和科研工作中,对电子设备热控制技术日新月异的发展深有感触,也因此萌发对本书第1版进行修改,以适应科技发展新形势要求的想法。

此次利用国防科技工业局(原国防科工委)征集出版“十一五”国防特色学科专业教材的机会,根据“精练内容,反映学科前沿科学技术成果,加强理论联系实际,培养创新思维能力”的原则对原书进行修改再版。第2版增添了“电子元器件与组件的热设计”一章,在“电子设备热设计技术的新进展”一章中,增添了“纳米流体强化传热研究”、“多功能机/电/热复合结构热控制概念的研究”、“几项有应用前景的微小卫星热控新技术”,以及“射流冷却技术研究”等内容。此外,第2版删掉了第1版第五章(电子元件的安装和冷却技术),对第1版第一、二、三、六、八、九、十章的内容进行了精练和更新。第2版还在每章后有针对性地列出了思考题和习题,在附录中列入了“电子设备热性能实验大纲与指导书”的内容,这些思考题、习题以及实验课内容如果运用得当,对学生掌握和领会本书核心内容,强化创新思维能力和培养工程素质将起到积极作用。总之,第2版保留了第1版的特色和基本内容,但在理论严谨、结构合理、文字精练以及先进性、实用性和学术性等方面均有所提高。

全书由余建祖主持修订,高红霞讲师和谢永奇博士后参加了本书的修订工作,高红霞还撰写了附录的有关内容。席有民博士、李明博士、张涛博士、迟澎涛博士、杨晟博士,以及袁建新、曹学伟、李林蔚、赵然、周懿、范俊磊和敖铁强等研究生为本书的再版做了大量工作,在此谨致衷心谢意。

“电子设备热设计及分析技术”是一门综合多学科的新技术,其领域宽广,理论和应用研究方兴未艾。此次再版虽进行了一些修改和更新,但限于作者水平,本书的缺点和错误仍在所难免,热忱期望读者予以批评指正。

余建祖
2008年10月

第1版前言

自从硅集成电路问世以来,电路的集成度增加了几个量级,相应的,每个芯片产生的热量也大幅度增加。功率增加,体积缩小,热密度急剧上升,电子设备的温度迅速增高,从而使电子设备的故障越来越多。今天,集成电路的散热问题已成为计算机微型化的关键。电子设备因过热发生的故障,使得设备(或系统)性能下降,对军事电子系统和设备可靠性的影响尤为巨大,甚至造成灾难性后果。因此,为适应现代电子设备的冷却需要而迅速发展起来的热设计及热分析技术,受到了广泛重视。

电子设备热设计指对电子设备的耗热元器件以及整机或系统采用合适的冷却技术和结构设计,以对它们的温升进行控制,从而保证电子设备或系统正常、可靠地工作。

鉴于电子设备热设计问题在保证军用、民用电子设备的性能及可靠性方面的重要性和广泛适用性,以及在计算机微型化中的关键作用,美国于20世纪70年代即开始投入人力、物力进行研究。美国政府和军方从那时起颁布了一系列有关电子设备热管理和热设计的规范,并明确规定从方案论证阶段起,就必须分析过热引起的各种后果和危险程度,提供最佳热设计方案,并要求在整个设计过程中,电子设备设计工程师、热设计工程师和可靠性工程师要相互制约,密切合作,将热管理贯穿于电子系统和设备设计生产的全过程。目前,电子设备的热设计技术,已成为电子元器件、设备和系统可靠性设计的一项重要内容。国内电子行业已愈来愈重视电子产品的可靠性热设计,尤其在研究用于航空航天等部门的高可靠性电子元器件时更是如此。

对军用电子设备设计方案的热分析包括两条重要的要求,即:

- ① 预计各器件的工作温度,包括环境温度和热点温度;
- ② 使热设计最优化,以提高可靠性。

显然,热分析的目的是以最好的经济效益获得热设计所需的准确信息,因此,热分析是热设计的基础。由于热分析不需消耗硬件,因此热分析较热测试成本低,这使得热分析法还被广泛用于预测许多器件热可靠性的温度和故障以及为需要进行热测试的产品和器件确定最有效的测试方案。随着计算机软、硬件技术的发展,热分析技术的精度越来越高,成本越来越低,它在提高电子设备可靠性热设计的质量、降低系统全寿命费用方面正起着越来越重要的作用。

本书是为适应现代电子设备热设计及分析技术迅猛发展的需要而编写的。书中系统介绍了电子元器件、组件及整机设备或系统的热设计、热分析技术及其相关理论,其中包括电子设备热设计的理论基础概述,电子设备用肋片式散热器及冷板设计,机箱和电路板的传导冷却,



电子元件的安装和冷却技术,机箱及电路板的风冷设计,电子设备的辐射冷却和相变冷却,热管传热及热电制冷在电子设备热设计中的应用,电子设备的瞬态冷却及电子设备热设计技术的新进展等。

本书特点:

① 将现代集成电路的结构设计技术与热设计技术紧密结合,并提供了从分离元件到大规模集成电路,从设备到系统进行这样综合设计的广泛工程实例,从而为将热管理贯穿于电子设备设计的全过程指出了正确途径。

② 突出了分析问题和解决问题的方法。书中对各种热分析、热设计技术所涉及的传热学和流体力学的基础理论,都用相当篇幅简明、扼要地进行了介绍。对各种电子元器件及设备的热应力、热点温度、稳态和瞬态温度分布以及冷却工质流动阻力的分析计算方法,都进行了深入细致的阐述,并结合工程实例,提出了降低热点温度、释放热应变和进行热匹配设计等的具体措施。书中还通过大量实例,介绍了设计各种高效、可靠冷却系统既实用而又能有效降低成本的具体方法。

③ 在总结我国在这一领域的技术成果的同时,注意吸取国外的研究成果和最新技术成就。书中吸收了国内外资料提供的大量公式、曲线、图表和具体技术参数,以供读者在工程应用时参考。

本书还力求反映国内外目前采用的一些先进的热设计技术及其发展状况,并对近年来国内外开展的大型航天器毛细抽吸两相流体回路(CPL)的研究,对军用飞机电子设备吊舱环境控制技术的研究,以及对为了解决微细化和高密度化电子器件的散热问题而发展起来的微细尺度换热器及电子薄膜传热性能的研究,进行了介绍和探讨,以使读者跟上时代前进的步伐。

④ 对在卫星、导弹、飞机、潜艇等特殊环境中工作的电子设备的热特性及热设计技术,给予了一定篇幅的论述和研究,以满足在国防领域进行电子设备结构设计和热设计的工程技术人员的需要。

国防科工委可靠性工程技术研究中心电子元器件失效分析及测试室主任高泽溪教授仔细校阅了全书并提出了宝贵意见,国防科工委可靠性工程技术研究中心和北京航空航天大学电子工程系的有关专家,提供了有益的资料和富有建设性的建议,余雷、赵增会、王永坤、李琳和高红霞等同志为本书的出版做了大量工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处,请读者批评指正。

作 者
2000年10月

目 录

第 1 章 电子设备热设计的理论基础概述	1
1.1 引 言	1
1.2 热源与热阻	2
1.3 传热的基本方式及有关定律	3
1.3.1 导热(热传导)	3
1.3.2 对流换热	4
1.3.3 辐射换热	7
1.4 热控制方法的选择	10
1.5 稳态传热	13
1.6 瞬态传热	13
1.7 耗散功率的规定	14
1.8 电子器件的理论耗散功率	15
1.8.1 理论耗散功率	15
1.8.2 有源器件的耗散热	15
1.8.3 无源器件的耗散热	17
思考题与习题	19
第 2 章 电子设备用肋片式散热器	20
2.1 概 述	20
2.2 肋片散热器的传热性能	21
2.3 针肋散热器及其他断面肋	25
2.4 肋片参数的优化	27
2.5 散热器在工程应用中的若干问题	30
2.5.1 散热器的热阻	30
2.5.2 散热器与元器件的合理匹配	31
思考题与习题	38



第3章 电子设备用冷板设计	40
3.1 概 述	40
3.2 冷板的结构类型	40
3.2.1 冷板常用肋片形式	41
3.2.2 盖板、底板及隔板	44
3.2.3 封 条	44
3.3 冷板传热表面的几何特性	45
3.4 无相变工况下冷板传热表面的传热和阻力特性	47
3.4.1 传热和阻力特性的经验关系式	48
3.4.2 扩展表面的试验数据和关系式	50
3.4.3 强迫液体流动的基本方程	52
3.5 冷板的压力损失	53
3.6 冷板传热计算中的基本参数和方程	54
3.7 冷板的设计计算	56
3.7.1 冷板的校核性计算	56
3.7.2 冷板的设计性计算	57
3.8 冷板式强迫液体冷却系统	62
3.8.1 液体冷却系统用泵	63
3.8.2 存储和膨胀箱	64
3.8.3 液体冷却剂	65
思考题与习题	69
第4章 机箱和电路板的传导冷却	71
4.1 集中热源的稳态传导	71
4.2 均匀分布热源的稳态传导	72
4.3 铝质散热芯电路板	75
4.4 非均匀截面壁的机箱	77
4.5 二维热阻网络	79
4.6 空气接触面的热传导	82
4.7 接触面在高空的热传导	85
4.8 电路板边缘导轨	86
思考题与习题	88



第 5 章 机箱和电路板的风冷设计	91
5.1 引 言	91
5.2 印制电路板机箱的自然对流冷却	91
5.2.1 印制电路板之间的合理间距	91
5.2.2 自然对流换热表面传热系数的计算式	93
5.2.3 自然对流热阻网络	97
5.2.4 自然冷却开式机箱的热设计	97
5.2.5 自然冷却闭式机箱的热设计	99
5.2.6 闭合空间内空气的等效自然对流换热表面传热系数	101
5.2.7 高空对自然对流散热的影响	103
5.3 印制电路板机箱的强迫通风设计	106
5.3.1 风机的选择	106
5.3.2 风道设计	113
5.3.3 高空条件对风扇冷却系统性能的影响	116
5.3.4 强迫对流换热表面传热系数的实验关联式	119
思考题与习题	123
第 6 章 电子元器件与组件的热设计	126
6.1 电子元器件热设计	126
6.1.1 管芯的热设计	126
6.1.2 封装键合的热设计	127
6.1.3 管壳的热设计	128
6.1.4 元器件在印制电路板上的安装	130
6.1.5 大功率元件的安装	136
6.1.6 罐封组件	138
6.1.7 元器件引线应变的释放	140
6.2 多芯片组件的热设计	144
6.2.1 多芯片组件热设计的概念及原则	144
6.2.2 多芯片组件的热控制方法	146
6.2.3 多芯片组件热控系统的应用实例	149
思考题与习题	152



第7章 电子设备的辐射冷却	155
7.1 电子设备辐射传热	155
7.2 宇宙空间的辐射传热	159
7.3 宇宙空间中 α/ε 对温度的影响	160
7.4 辐射传热的简化方程	162
7.5 对流和辐射的综合传热	163
7.6 大型机柜内的密封组件	165
7.7 等效环境温度在可靠性预测中的应用	169
7.8 扩大表面积以提高有效发射率	171
7.9 可展开式热辐射器在航天器上的应用	172
思考题与习题	174
第8章 电子设备的相变冷却	176
8.1 相变参数的定义	176
8.2 相变传热的基础理论	178
8.2.1 液体的沸腾方式	178
8.2.2 池沸腾曲线	180
8.2.3 池沸腾关联式	181
8.2.4 流动沸腾	184
8.2.5 蒸发	189
8.2.6 凝结	190
8.2.7 熔化和凝固	193
8.3 液—气相变冷却系统	194
8.3.1 浸没式相变冷却系统	194
8.3.2 间接式相变冷却系统	199
8.3.3 液—气相变冷却系统的设计	200
8.3.4 应用液—气相变冷却系统的注意事项	204
8.4 固—液相变冷却系统	205
8.4.1 固—液相变冷却系统的应用	205
8.4.2 固—液相变冷却系统的材料	206
8.4.3 固—液相变冷却系统的结构形式及热特性	208
8.4.4 快速热响应固—液相变储热装置设计概念的探讨	210
8.4.5 翅片/泡沫金属高效相变储能装置的实验研究	214



思考题与习题	220
第 9 章 热管散热器的设计	222
9.1 概 述	222
9.1.1 热管及其工作原理	222
9.1.2 热管的类型	223
9.1.3 热管的性能和特点	223
9.2 普通热管的毛细现象及阻力特性	225
9.2.1 普通热管的毛细现象	225
9.2.2 普通热管的阻力特性	226
9.3 普通热管的传热性能	229
9.3.1 热管的传热极限	229
9.3.2 热管的传热(温度)特性计算	232
9.4 重力辅助热管和可变导热管	238
9.4.1 重力辅助热管	238
9.4.2 可变导热管	239
9.5 热管设计	241
9.5.1 设计技术要求	241
9.5.2 工质选择	242
9.5.3 吸液芯	244
9.5.4 管壳设计	249
9.6 热管在电子设备热控制中的应用	251
思考题与习题	258
第 10 章 热电制冷器	259
10.1 概 述	259
10.2 热电制冷的基本原理	260
10.2.1 珀耳帖效应	260
10.2.2 塞贝克效应	261
10.2.3 汤姆逊效应	261
10.2.4 焦耳效应	262
10.2.5 傅里叶效应	262
10.2.6 平衡中的塞贝克、珀耳帖和汤姆逊效应	262
10.3 制冷器冷端净吸热的基本方程	264



10.4	最大抽吸热设计方程	266
10.5	最佳性能系数设计方程	271
10.6	最佳性能系数电流的推导	272
10.7	多级制冷器的性能	274
10.8	简化假设的影响	276
10.8.1	忽略汤姆逊电压	276
10.8.2	温度损失	277
10.8.3	结电阻的影响和并联热路	278
10.9	热电制冷器的结构设计	278
10.10	热电制冷器设计计算的工程实例	282
10.11	热电制冷在电子设备热控制中的应用	286
10.11.1	电子设备热电冷却箱	287
10.11.2	光电器件的直接冷却	289
10.11.3	热电-热管组合冷却系统	293
	思考题与习题	293
第 11 章	电子设备的瞬态冷却	295
11.1	瞬态传热的几个概念	295
11.1.1	简单绝热系统	295
11.1.2	热容量	296
11.1.3	时间常数	296
11.1.4	峰值热阻和瞬态热阻	297
11.2	加热期间的瞬态温升	298
11.3	不同时间常数下的温升	301
11.4	冷却期间瞬态温度的变化	302
11.5	温度循环试验的瞬态分析	303
11.6	用拉普拉斯变换求解元件的瞬态温度	313
11.7	工程实例——电子设备吊舱瞬态热载荷分析与计算	319
11.7.1	吊舱传热的数学模型	319
11.7.2	典型飞行剖面计算	323
11.7.3	采用“蓄冷节能”的设计思想确定吊舱设计热载荷	325
11.7.4	结 论	326
	思考题与习题	326



第 12 章 电子设备热设计技术的新进展	328
12.1 毛细抽吸两相流体回路(CPL)/环路热管(LHP)的研究	328
12.1.1 引 言	328
12.1.2 CPL 的工作原理及组成	332
12.1.3 LHP 的组成和功能	335
12.1.4 CPL/LHP 的特点	338
12.2 电子设备吊舱的环境控制技术	339
12.2.1 蒸气压缩制冷的吊舱环控系统	340
12.2.2 逆升压式冲压空气循环制冷的吊舱环控系统	342
12.2.3 逆升压回冷式冲压空气循环制冷的吊舱环控系统	343
12.2.4 系统比较及发展前景	345
12.3 微尺度换热器的理论和实验研究	346
12.3.1 微尺度换热器产生的背景及相关问题的探讨	346
12.3.2 矩形微槽内 FC-72 的单相流动和换热实验研究	348
12.3.3 大过载加速度环境下涡旋微槽传热与流动特性研究	352
12.4 电子薄膜热物性参数测量与分析	356
12.4.1 引 言	356
12.4.2 实验方法	357
12.4.3 稳态方法测量薄膜导热系数 λ 和发射率 ϵ	357
12.4.4 瞬态方法测量薄膜热扩散率 a 和比热容 ρc	358
12.4.5 实验结果及分析	359
12.4.6 结 论	361
12.5 纳米流体强化传热研究	361
12.5.1 引 言	361
12.5.2 纳米流体介质导热机理初探	362
12.5.3 纳米流体的制备	364
12.6 多功能机/电/热复合结构热控制概念的研究	365
12.6.1 新世纪航天器的发展趋势和多功能结构设计	365
12.6.2 多功能结构热控制的新概念	367
12.6.3 热控制方案的研究	367
12.6.4 结 论	369
12.7 几项有应用前景的微小卫星热控新技术	370
12.7.1 智能型热控涂层	370



12.7.2	高导热复合材料	371
12.7.3	微型热管	373
12.7.4	热开关	374
12.7.5	自主适应的电加热控温技术	376
12.7.6	基于热技术的微机电系统(MEMS)	376
12.7.7	微型百叶窗技术	377
12.8	射流冷却技术研究	378
12.8.1	基本原理	378
12.8.2	国内外研究情况	379
12.8.3	主要研究内容	380
12.8.4	应用前景	381
	思考题与习题	381
附录	电子设备热性能实验大纲与指导书	383
附录 A	空气自然对流冷却条件下电子元件热特性测量	384
附录 B	空气强迫对流冷却条件下电子元件热特性测量	388
附录 C	相变储能装置热控制条件下电子元件热特性测量	390
附录 D	涡旋微槽液冷条件下电子元件热特性测量	393
附录 E	电子薄膜热物性参数测量	397
参考文献		402

第 1 章 电子设备热设计的理论基础概述

1.1 引言

电子设备热设计指对电子设备的耗热元件以及整机或系统采用合适的冷却技术和结构设计,以对它们的温升进行控制,从而保证电子设备或系统正常、可靠地工作。

近几十年来,电子设备在军用和民用方面的应用大大增加,不断的实践使人们逐渐认识到需要对电子元件进行热封装和热设计,同时也促进了热控制技术的发展。例如,为了改善真空管的冷却,进一步发展了加强表面对流换热技术和进行大功率行波管冷却剂(液体)通道的研制;为了安装小型电子元件并使其良好地散热,对各种冷板的设计技术进行了广泛研究。晶体管的采用大大减少了总的功耗;但是晶体管结温的稳定性要求,使得对电子设备的设计要有新的热约束条件。因为结温与晶体管的效率和可靠性成反比,而在卫星、导弹、飞机、潜艇等特殊环境中工作的电子设备,对其密集程度和可靠性方面的要求比地面设备更为严格,因而也更需要解决好散热问题。为此研究和开发了诸如浸没冷却、强化沸腾传热、热管及热电制冷器件等更新的技术。自 20 世纪 80 年代以来,由于微电子技术和大规模集成电路技术的迅速发展,以及对减少电子设备维护时间及费用所提出的更高要求,又一次推动了热控制技术的发展。各种新型冷却剂不断涌现,相变传热技术得到更广泛使用,研究和开发了毛细抽吸两相流体回路(CPL)/回路热管(LPH)、多功能机/电/热复合结构、智能型热控涂层、高导热复合材料、热开关及自主适应的电加热控温等一系列带有强烈航空航天产业特色的热控技术。微细化和高密度化是微电子器件的发展方向,虽然器件管芯尺寸的缩小,使得芯片上每个单管的功耗减少;但是,由于集成度的提高和封装管壳的小型化,整个芯片的功率密度却比以前高得多。研究表明,当微电子器件的功率密度超过 20 W/cm^2 时,常规的热控制方法根本满足不了芯片的散热要求,由热因素引起的可靠性问题变得更加突出。为了解决高密度微电子器件的散热问题,发展了微尺度换热器、微型热管、微型记忆合金百叶窗、纳米流体等微细尺度热控技术,推进了新型电子元器件、电子薄膜材料以及相关生产工艺的发展,拓展和更新了传统的传热理论和制冷技术。

防止电子元件严重的热失效是热控制的基本目的。热失效可以定义为一个规定的电子元件,直接由于热的原因而导致完全失去其电子功能。严重热失效,在某种程度上取决于局部温度场及元件的工作过程和形式。因此,要精确确定可能出现故障的温度是困难的。然而,通过失效分析和实验验证,还是可以确定大多数通用元器件的允许工作温度上限的。在进行电子



设备热设计的方案论证时,可以根据元器件允许的最高工作温度及最大耗散功率,确定热控系统应采用的传热方式、冷却剂类型、冷却剂流量和入口温度等。

本章简要介绍与电子设备热设计有关的传热学概念及基本定律,以及电子元件及设备各种热控制技术及其适用范围,而对各种热设计和分析技术所涉及的更进一步的理论知识,将结合有关内容在各章介绍。

1.2 热源与热阻

在工业领域中,电子设备一般都是依靠电流的流动与控制来完成各种功能。电流在诸如电阻器、二极管、集成电路、混合电路、晶体管、微处理器、继电器、双列直插式组件、大规模集成电路和超大规模集成电路等电子元、部件中流动均能产生热量,只要电流连续流动,热量就不断产生。随着热量的积聚,若不找出一条流通过路将热量导走,元件的温度便会上升。如果热流路径不畅通,温度就会不断上升,直到元件毁坏,电流中断为止;如果热流路径良好,温度可以一直上升到稳态平衡点,在这一点上,从元件中导走的热量等于电流在其中流动所产生的热量,以后温度便保持稳定。

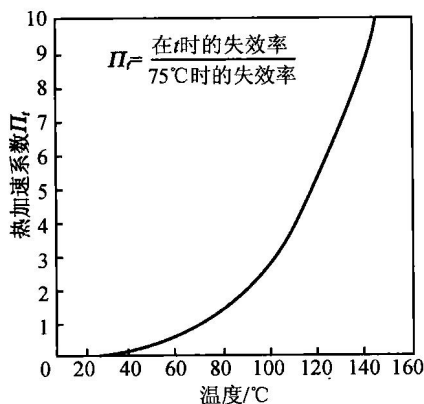


图 1-1 双级数字装置的热加速系数

电子设备(或系统)的可靠性研究表明,随着温度的增加,元器件的失效率呈指数增长(图 1-1),这在不同程度上降低了设备的可靠性。温度的上升轻则使元器件的电参数发生漂移变化。例如,双极型元器件的反向漏电流和电流增益上升,MOS 器件的跨导下降。重则可加速元器件内部的物理、化学过程,激活某些潜在缺陷,导致器件寿命缩短或使器件烧毁。例如,高温引起的热电正反馈效应,会导致双极型器件二次击穿而失效;高温会使铝金属化的晶粒长大,加速铝的电迁移,导致铝条开路或短路;高温可促使铝-硅互熔加快,造成浅 PN 结短路,等等。同样,温度剧变(如温度循环或冲击)也使电子元件的失效率增加。如温度剧烈变化在具有不同热膨胀系数的材料之间形成热不匹配应力,造成芯片与引脚之间的键合失效、管壳的密封失效以及元器件中某些材料的热疲劳劣化等。因此,热设计的目的,就是要消除或削弱热因素对电子元器件性能和可靠性的影响。

从上面的分析可以看出,应用电子元器件时受到的热应力可以来自元器件内部,也可以来自元器件的外部。来自元器件内部的热应力主要取决于耗散功率的大小,以及元器件自芯片至壳体热流路径的通畅程度;由外部因素引起的热应力则取决于工作环境通过导热、对流和热辐射的形式传给元器件热量的多少,元器件焊接装配时所经受的温度变化,以及电子元器件



(或设备)与大气环境或其他物体产生相对运动时,由于摩擦等原因所引起的温升。

如同电流流过电路会受到电阻的阻碍一样,热流自芯片流向外部环境也会受到阻碍,称为热阻。如果将电子元器件的热流路径以封装(壳体)外表面为界划分为内、外两部分,与它们对应的热阻分别称为内热阻和外热阻,那么可以认为,电子元器件热设计的原则就是自芯片至耗散环境之间,构建一条热阻尽可能低的热流路径。显然,要降低热流路径的热阻,一般要从控制电子元器件内热阻和控制电子元器件或整机设备外热阻两方面着手。

控制电子设备的外热阻可以采取 1.1 节中提到的各种强化传热的方法和制冷技术,包括空气或液体冷却剂的自然对流或强制对流,相变传热(液体蒸发与沸腾吸热、固体熔化吸热、固体升华吸热),热电制冷和热管传热等。

近几年来,随着功率密度的增加及对计算机等电子设备微型化的要求,控制电子设备外热阻的方式已不能满足要求,如何降低电子元器件的内热阻已成为热设计专家研究的热点问题。主要探索方向包括合理选用电子元器件的材料,严格生产工艺,乃至直接在大规模集成电路的芯片上采取冷却措施等。计算机微型化的要求促进了微细尺度传热理论的发展和微细尺度换热器及电子薄膜导热性能的研究,拓展和更新了传统的传热理论和制冷技术。将这些新理论、新技术应用于电子元器件的温度控制,是电路设计工程师和热设计工程师需要充分重视和研究的课题。

1.3 传热的基本方式及有关定律

热传递有三种基本方式:导热(热传导)、对流和辐射。在电子设备的热设计工作中,与这些传递方式有关的一些概念和定律是至关重要的。

1.3.1 导热(热传导)

在物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热(或称热传导)。例如,物体内部热量从温度较高的部分传递到温度较低的部分,以及温度较高的物体把热量传递给与之接触的温度较低的另一物体都是导热现象。

导热现象的规律已经总结为傅里叶定律,即在导热现象中,单位时间内通过给定截面的热量与垂直于该截面上的温度变化率和截面面积成正比,其数学表达式为

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1-1)$$

式中: Φ ——热流量, W;

A ——垂直于热流方向的截面面积, m^2 ;

$\partial t / \partial x$ ——温度 t 在 x 方向的变化率;