

〔美〕阿伦 D.克劳斯 艾弗兰·巴科恩 著

电子设备的 热控制与分析

赵悼父 秦荻辉 王世萍 译

国防工业出版社

电子设备的热控制与分析

〔美〕 阿伦 D. 克劳斯 艾弗兰·巴科恩 著
赵惇父 秦荻辉 王世萍 译

国防工业出版社

(京)新登字号106号

内 容 简 介

随着电子元器件在各种环境中的广泛应用,电子设备的热控制与分析已成为电子元器件、设备和系统可靠性设计的一项主要内容,因此人们越来越重视电子产品的热控制技术。

本书系统地阐述了国外目前采用的一些先进的热控制技术及其发展状况。其中包括传热学与流体力学的基本概念,电子元器件热环境的分析与研究,电子元器件、印制电路板、微波设备、微电子与惯性导航设备的热控制与热分析技术,以及一些新型的冷却技术与方法。

本书实用性强、理论联系实际、通俗易懂。书中除了提供一些简明的计算方法之外,还给出了一些实用的热控制技术和方法,并有一些实例供读者参考。

本书可作为从事电子设备结构设计、可靠性设计的工程技术人员参考书,也可供使用和维护电子设备的技术人员参考,同时对高等院校有关专业的师生也有一定的参考价值。

Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment
Allan D. Kraus Avram Bar-Cohen McGRAW-HILL BOOK COMPANY

1983

电子设备的热控制与分析

〔美〕阿伦 D. 克劳斯 艾弗兰·巴科恩 著

赵博受 秦爱群 王世哲 译

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京昌平长城印刷厂印装

850×1168毫米 32开本 22印张 578千字

1992年2月第一版 1992年2月第一次印刷 印数: 0 001—1500 册

ISBN 7-118-00858-3/O·65 定价: 20.00元

译 者 的 话

本书是根据美国阿伦D.克劳斯 (Allan D. Kraus)教授和艾弗兰·巴科恩 (Avran Bar-Cohen)教授合著的《电子设备的热控制与分析》一书翻译的。书中的内容是根据美国国家科学基金会的传热学专题会议及麻省理工学院有关课程所讨论的内容和形式编写的。

本书的内容比较新颖、丰富。书中介绍了目前采用的一些先进的电子设备热控制技术及其发展趋势。书中包括传热学和流体力学的一些基本概念,电子元器件热环境的分析研究,电子元器件、印制电路板、微波设备、微电子设备及惯性导航设备的热控制和热分析技术,以及一些新型的冷却技术等。书中还阐述了热控制与可靠性的关系。

本书可作为从事电子设备结构设计、可靠性设计工程技术人员的主要参考书。在我国的一些高等院校中已设置了专门的“电子设备热设计”课程,因而本书也可作为电子设备结构专业的教师和学生的参考书。

电子设备的热控制与分析技术,已作为电子元器件、设备和系统可靠性的一项主要内容。国内电子行业,已愈来愈重视电子产品(包括电子元器件和整机)的可靠性热设计,尤其是研究高可靠性的电子元器件。在其研制工作的初期,就应特别重视元器件的热设计问题,这样就可以使电子设备或系统的可靠性得到一定的改善和提高。

本书由西安电子科技大学赵惊受译第1、10、14、15、17、18、21、23章,秦获辉译第3、6、7、8、9、16、19、20章,王世萍译第2、4、5、11、12、13、22章。叶尚辉教授校阅了部分译稿。在翻译过程中,还得到杨俊、赵树芳、胡林祥教授

等的热情帮助和指导，在此表示衷心的感谢。由于译者水平所限，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

译 者

前 言

现代电子元件的冷却是先进的热控制技术应用的主要领域之一。热设计的发展使得电子逻辑电路和微波器件的可靠性及封装密度有了很大的改进。因此,在开展热封装设计的过程中,热控制技术 & 特殊决定的选择,常常会对电子系统或装置的可靠性及成本带来深远的影响。

如果要把实验室里研制成功的样机变为有竞争力的商品,应该在产品或系统研制的最初阶段进行合理的热设计。如果对热设计不给予足够的重视,产品的寿命将会缩短,从而不能满足用户(军用或民用)的技术要求,或者大大增加部件更换和维修费用。相反,如果对热设计提出过高的要求,也会增加产品的成本。

上述这些因素已被电子设备热控制的工业界和学术界人士广泛认识到,要想在本世纪 80 年代和 90 年代继续处于竞争的有利地位,必须把先进的热控制技术及预测技术迅速加以推广和应用。美国国家科学基金会于 1977 年在佐治亚州亚特兰大市召开的“电子设备传热方向”专题研究会议,以及有关大学及专业协会开设的电子设备冷却方面短期课程的迅速增加,都证明了这一观点的正确性。

本书是在响应 80 年代电子设备热控制技术的挑战过程中编写的。其内容和形式都是根据 1977 年美国国家科学基金会专题会议上讨论的内容以及 1977~1978 年间麻省理工学院夏季学期课程内容来确定的。因此,本书的目的是为了加强从事一般的和先进的热控制结构的热分析及封装设计人员的物理概念,提高建立数学模型的能力。本书分为“电子设备热设计的依据”、“传热学及流体力学基础”、“热控制技术”及“热设计在电子系统中的应用”等四部分。

从整体来看, 本书提供了有关电子设备热分析和热设计的独特方法, 可供封装工程师使用; 也可以作为有关院校电气和电子工程专业高年级学生和研究生(两学期)的教科书。具有传热学和流体力学知识的机械工程师及学生, 只需学习本书的第一、三、四篇。例如, 将本书作为机械专业高年级学生一学期的课本, 就可以这样使用。

在过去的 10 年间, 我们明显地看到, 通过对设计过程每一阶段的研究及运用确保设计成功所需的技术, 就能大大地提高工程系统综合与设计的效率。根据这种发展情况以及为了满足产品开发时对正规设计及优化设计理论的应用不断增长的需要, 像本书这样的热设计专著, 一定要包括对该论题的详细论述, 如本书第三章所做的那样。

作者在构成本书的哲学思想和文体时, 用了非洲的一句谚语: “若给一个挨饿的人一条鱼, 那末只能满足他一天, 若教他如何钓鱼, 则能使他再也不会挨饿。”由此, 作者真诚地希望本书能为那些职业工程师及工科学生提供工具, 帮助他们确定现有热控制技术的范围及限度, 并确立获取更新技术的奋斗目标。我们相信, 要达到此目的, 首先应确定电子设备热控制问题及解决它的物理和概念性的限制因素(第一篇), 然后确定从电子元件散热的传热机理(第二篇)。在此基础上, 可以建立适用于各种热形态的数学模型及经验关系式的理论基础, 也可以确定各种热优化的可能性及建立数学模型(第三篇)。把热控制技术应用到各种电子系统, 如微波设备、印制电路板、微电子设备、惯性系统的情况将在第四篇中予以讨论。

本书的出版, 如果没有我们的老师和同事们以及这一领域的前辈们, 公开的和非公开的、直接的和间接的贡献是不可能的。在凡是可能的地方, 我们均尽量注明了他们的成果。我们特别要感谢在对本书的体例、形式和内容方面与我们进行了多次讨论, 给了我们很大帮助的沃伦 M. 斯诺(Warren M. Rohsenow)教授和阿瑟 E. 伯格利斯(Arther E. Bergles)教授, 他们是我们的

老师、同事和朋友。理查德·朱 (Richard Chu), 欧文·弗里德 (Erwin Fried), 罗伯特·洛特 (Robert Lott) 和威廉 A. 史密斯 (William A. Smith) 提出了很宝贵的建议。还要特别感谢阿瑟 E. 伯格利斯教授, B.B. 米凯克 (B.B. Mikic) 教授, 迈克尔·科瓦奇 (Michael Kovac) 教授和迈克尔·约范诺维奇 (Michael Yovanovich) 先生, 分别为第 19、4、23、9, 1 各章的编写所给予的帮助。感谢唐纳德 L. 科克伦 (Donald L. Cochran) 先生和艾弗兰·马克威思 (Avran Markowitz) 先后提供的电子设备冷却技术专业的基本知识。感谢希姆肖恩·马克威思 (Shimshon Markowitz) 讲授这种基本知识, 以求自我领会。我们很幸运, 半球出版社碰巧指定了安妮·希普曼 (Anne Shipman) 负责本书的出版工作, 她确实是一位优秀的编辑。我们非常感谢琳达·费德施皮尔 (Linda Federspiel), 莉莉·兰 (Lili Lang) 和奥娜·尼伦伯格 (Orna Nirenberg) 在誊清手稿和描图方面仔细又认真的工作。没有我们的夫人露丝·克劳斯 (Ruth Kraus) 和安妮特·巴科恩 (Annette Bar-Cohen) 的耐心、谅解、支持和鼓励, 这样一部著作的出版是不可能的。最后, 我们要特别感谢露丝·克劳斯, 她作了极为大量的细致的校对工作。

阿伦 D. 克劳斯

艾弗兰·巴科恩

目 录

第一篇 电子设备的热设计依据

第一章 电子元件的热特性及热环境	3
1.1 引言	3
1.2 热控制的目的	4
1.3 热环境	10
1.4 典型电子元件的热特性	17
1.5 热控制技术	24
1.6 符号表	27
参考文献	28
第二章 可靠性	30
2.1 引言	30
2.2 概率、可靠性及失效率	31
2.3 更换及非更换试验	32
2.4 平均无故障工作时间	33
2.5 系统的可靠性	34
2.6 串-并联系统	38
2.7 失效率和元件的温度	40
2.8 符号表	41
参考文献	41
第三章 概念的建立	42
3.1 引言	42
3.2 设计过程	44
3.3 发现创见性构思的障碍	49
3.4 克服妨碍构思的障碍	54
参考文献	60

第二篇 传热学和流体力学基本定律

第四章 稳态导热	63
4.1 引言	63
4.2 导热的一般方程	63
4.3 无热源的简单形式	67
4.4 电热比拟	68
4.5 发热的简单形式	69
4.6 无热源的多层壁导热	71
4.7 总传热系数	74
4.8 可变导热系数——简单形状	78
4.9 复杂形状的分析方法	80
4.10 复杂的形状——保角变换	83
4.11 复杂的形状——离散热源	87
4.12 其它方法	90
4.13 其它坐标系	90
4.14 导热系数	92
4.15 符号表	93
参考文献	95
第五章 瞬态导热	96
5.1 引言	98
5.2 小元件的加热	98
5.3 各种小元件的热输入情况	99
5.4 经典的(解析的)方法	105
5.5 模拟法	115
5.6 数值法	118
5.7 图解法	120
5.8 瞬态导热计算方法的比较	121
5.9 符号表	124
参考文献	126
第六章 对流换热	127
6.1 引言	127

X

6.2	对流的流体力学	128
6.3	对流换热系数——理论基础	133
6.4	强迫对流换热系数——经验公式	144
6.5	自然对流	153
6.6	空气的热特性	162
6.7	符号表	163
参考文献		165
第七章 辐射换热		167
7.1	引言	167
7.2	单色辐射力	167
7.3	维恩位移定律	170
7.4	总辐射——斯忒藩-波耳兹曼定律	171
7.5	发射率与吸收率——基尔霍夫定律	173
7.6	实验室的黑体	175
7.7	辐射强度与兰贝特余弦定律	177
7.8	黑体之间的换热	179
7.9	角系数代数法	185
7.10	非黑体表面之间的辐射换热	187
7.11	完整的辐射方程	189
7.12	用网络法计算封闭体辐射热	190
7.13	符号表	193
参考文献		194
第八章 蒸发、沸腾和冷凝		195
8.1	引言	195
8.2	蒸发	195
8.3	沸腾	199
8.4	凝结	211
8.5	符号表	220
参考文献		223
第九章 接触热阻		225
9.1	引言	225
9.2	简化模型	225

9.3 接触表面的几何性质	227
9.4 影响接触热阻的因素	229
9.5 名义上平直的粗糙固体之间的接触	230
9.6 接触传热系数的关系式	233
9.7 真空中光滑而有波纹的表面	233
9.8 真空中名义上平直面实际上粗糙的表面	234
9.9 真空中粗糙而有波纹的表面	237
9.10 填隙流体的效应	238
9.11 符号表	241
参考文献	243
第十章 热交换器	244
10.0 单位	244
10.1 引言	244
10.2 紧凑型热交换器的分类	246
10.3 传热和流动摩擦数据	254
10.4 肋片及总通道效率	265
10.5 总传热系数	266
10.6 $\epsilon-N_{tu}$ 方法	267
10.7 设计步骤	270
10.8 例题——液体—空气热交换器	271
10.9 符号表	298
参考文献	300
第十一章 通风	301
11.0 单位	301
11.1 引言	301
11.2 摩擦损失和系统阻力	302
11.3 系统阻力曲线	307
11.4 风扇动力学	308
11.5 风扇与系统的匹配	315
11.6 工作在高空状态	318
11.7 高空时风扇——驱动系统	323
11.8 恰当的风扇使用方法	325

11.9 符号表	326
参考文献	328
第十二章 量纲分析及实验数据的相互关系	329
12.1 引言	329
12.2 量纲分析——换热系数	336
12.3 用柏金汉 π 定理的量纲分析	336
12.4 符号表	339
参考文献	346

第三篇 热控制技术

第十三章 元件的典型直接风冷	343
13.1 引言	343
13.2 通道中的自然对流	344
13.3 定型流动极限——自然对流	345
13.4 自然对流风冷的综合关系式	349
13.5 自然对流的最佳板间距	357
13.6 自然对流的讨论	361
13.7 通道中强迫对流冷却	363
13.8 符号表	383
参考文献	385
第十四章 扩展表面	387
14.1 引言	387
14.2 矩形断面的纵向肋	389
14.3 矩形断面的环形肋	391
14.4 其它断面的肋	392
14.5 最佳尺寸	394
14.6 纵向肋的比较和优化设计的关键	395
14.7 扩展表面簇的分析	397
14.8 符号表	401
参考文献	401
第十五章 冷板	405
15.0 单位	405

15.1	引言	405
15.2	紧凑式热交换器表面	406
15.3	设计方程	406
15.4	对数平均温差和效率 ϵ 及 N_{tu} 函数	407
15.5	空气的传热特性	408
15.6	冷板热交换器的设计方法	409
15.7	例题: 两边均匀热负荷	409
15.8	单边热负荷的修正	414
15.9	例题——单边热负荷	418
15.10	叠层芯子	421
15.11	等温表面的注释	422
15.12	符号表	423
参考文献		425
第十六章 浸没冷却		426
16.1	引言	426
16.2	分类	426
16.3	发表的文献	430
16.4	热特性与工作范围	435
16.5	预测浸没冷凝器的性能	451
16.6	浸没冷凝器的应用	458
16.7	结束语	462
16.8	符号表	462
参考文献		464
第十七章 热管		466
17.1	引言	466
17.2	工作原理	466
17.3	工作液	468
17.4	芯子结构	468
17.5	控制型热管分类	472
17.6	传热极限	477
17.7	传热极限的计算	478
17.8	例题	482

17.9 热管性能.....	487
17.10 例题	489
17.11 符号表	493
参考文献	496
第十八章 热电致冷器	497
18.1 引言.....	497
18.2 热电效应.....	497
18.3 致冷器冷端净吸热的基本方程.....	503
18.4 最大抽吸热设计方程.....	506
18.5 最大抽吸热致冷器的设计方法.....	514
18.6 最佳性能系数设计方程.....	516
18.7 最佳性能系数电流的推导.....	518
18.8 最佳性能系数致冷器设计方法.....	520
18.9 串联型致冷器.....	522
18.10 简化假设的影响	526
18.11 符号表	529
参考文献	531
第十九章 增强冷却技术	532
19.1 引言.....	532
19.2 单相自然对流.....	533
19.3 单相强迫对流.....	535
19.4 大容滞沸腾.....	537
19.5 强迫对流沸腾.....	539
19.6 自然对流冷凝.....	541
19.7 强迫流动冷凝.....	542
19.8 小结与展望.....	543
19.9 符号表.....	543
参考文献	544

第四篇 电子系统的应用

第二十章 惯性制导设备的冷却	549
20.1 引言.....	549

20.2	惯性平台	549
20.3	万向架固定式惯性平台	549
20.4	捷联式平台	554
20.5	液浮陀螺仪	555
20.6	陀螺仪的热问题	557
20.7	解决部件的热梯度问题	557
20.8	获得部件温度控制的方法	558
20.9	惯性设备温度控制系统	560
20.10	铁芯变压器	561
20.11	箔绕变压器	562
参考文献		563
第二十一章 晶体管 and 真空管的冷却		564
21.1	引言	564
21.2	晶体管分类	565
21.3	热电比拟电路	565
21.4	大量生产的散热器	568
21.5	针肋散热器	573
21.6	例题	575
21.7	自然对流情况下, 没有屏蔽罩的电子管的冷却	578
21.8	电子管的屏蔽罩	581
21.9	真空电子管的强迫对流冷却	585
21.10	例题	589
21.11	符号表	595
参考文献		597
第二十二章 微波设备的液体冷却		598
22.1	引言	598
22.2	选择冷却液的准则	599
22.3	按传热特性选择流体	602
22.4	水负载的微波吸附作用	606
22.5	行波管冷却系统的设计实例	614
22.6	设计余量	619
22.7	关于例题的注释	623

22.8 电操纵天线的热控制	623
22.9 符号表	632
参考文献	634
第二十三章 微电子设备和印制电路板	636
23.1 引言	636
23.2 热控制原因	638
23.3 从结点到管壳的传热	640
23.4 对流和辐射作用的修正	645
23.5 扩展角的注释	651
23.6 印制电路板中的热流	653
23.7 印制电路板的视在热导	656
23.8 单位方阻法	658
23.9 非均匀热负荷输入的印制电路板	661
23.10 从电路板到机壳的导热	667
23.11 大规模集成电路封装的传导冷却	667
23.12 超高速集成电路 (VHSIC)	672
23.13 总结	685
23.14 符号表	686
参考文献	688