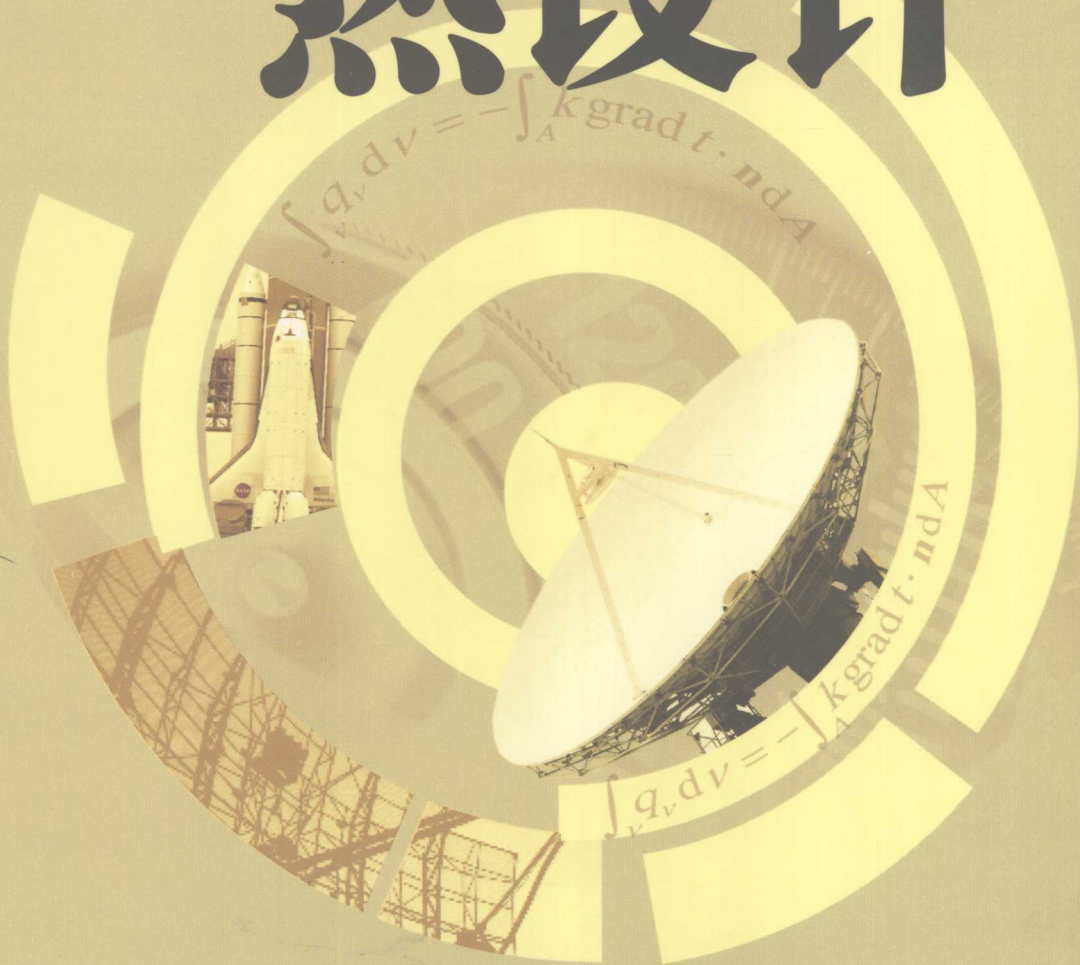


电子设备

赵焯爻 著

热设计



内容简介

电子机械工程丛书

本书是作者多年从事电子产品热设计工作的经验总结，也是作者多年从事电子产品热设计工作的经验总结。本书共分五章，第一章介绍电子产品热设计的基本概念，第二章介绍电子产品热设计的基本原理，第三章介绍电子产品热设计的基本方法，第四章介绍电子产品热设计的基本应用，第五章介绍电子产品热设计的基本案例。

电子设备热设计

本书共分五章，第一章介绍电子产品热设计的基本概念，第二章介绍电子产品热设计的基本原理，第三章介绍电子产品热设计的基本方法，第四章介绍电子产品热设计的基本应用，第五章介绍电子产品热设计的基本案例。本书可作为从事电子产品热设计工作的工程技术人员、设计人员和管理人员的参考书，也可作为高等院校相关专业师生的教材。

本书共分五章，第一章介绍电子产品热设计的基本概念，第二章介绍电子产品热设计的基本原理，第三章介绍电子产品热设计的基本方法，第四章介绍电子产品热设计的基本应用，第五章介绍电子产品热设计的基本案例。

赵焯爻 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

8822882 (010) 8822888

内 容 简 介

电子设备热设计是芯片级、元件级、组级和系统级可靠性设计的一项关键技术。本书对电子设备热设计基本理论、基本要求和设计准则，电子设备的热分类、冷却方法的选择，各种冷却技术及热测试技术等进行了详细的论述。

全书内容包括传热学的基本理论，自然冷却设计技术（包括机壳设计、印制板组装件的热设计、微电子功率器件低热阻设计、散热器的优化技术），强迫通风冷却设计技术（风冷空心印制板的热设计、大型机柜的热设计、通风系统阻力计算方法、通风机的选择与应用、结换因素对风冷效果的影响），强迫液体冷却（热交换器的设计计算及冷却液和泵的选择），几种高效冷却技术（蒸发或相变冷却、冷板技术、热管传热、热电制冷等）的设计计算与应用。此外，还介绍了计算机辅助热分析的基本理论（数值传热学与数值计算方法）和热分析程序设计技术等。

本书可作为高等学校相关专业的教材，也可供从事电子元器件及电子产品结构设计与研究的工程技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电子设备热设计 / 赵惇爻著. —北京：电子工业出版社，2009.3
(电子机械工程丛书)

ISBN 978-7-121-08103-3

I. 电… II. 赵… 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（2009）第 004273 号

策划编辑：李 洁 (lijie@phei.com.cn)

责任编辑：李 洁 特约编辑：王占禄

印 刷：北京京师印务有限公司
装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：15.5 字数：394 千字

印 次：2009 年 3 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：35.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

电子机械工程丛书编委会

主任 王小谟

副主任 段宝岩

委员 罗群 龚振邦 施浒立 季馨

周德俭 俞惟铨 黄大贵 程辉明

叶渭川 陈慧宝 李文海 史金飞

赵惇爻 蒋全兴 童时中 卢世济

主编 段宝岩

副主编 龚振邦、施浒立、季馨、周德俭

编辑部主任 叶渭川 高平

编辑部副主任 黄进 李洁



出版说明

《电子机械工程》丛书(以下简称“丛书”)是由中国电子学会电子机械工程分会与电子工业出版社共同策划、组织编写的一套系列技术丛书。由于电子机械工程是电子和机械为主的多学科交融的学科,涉及专业面极广,因此,这套“丛书”将是一套开放性“丛书”,为今后拓展留下空间。

参加“丛书”编写的作者均为高等院校、科研院所的知名专家与学者,“丛书”是专家们集体智慧的结晶,是他们长期实践经验的总结,是一套集理论与实践相结合的上乘之作。

本套“丛书”内容丰富,涵概了电子机械工程涉及的主要方面。第一批先出版的分册主要体现了以下四个方面的内容:

- 介绍了电子设备环境适应性设计,如电磁兼容性设计、电子设备热设计、抗振动冲击设计、防腐蚀设计等;
- 介绍了电子设备各种类型的天线系统和结构及机电系统的伺服控制;
- 介绍了电子产品的电气互联技术;
- 介绍了电子产品人机工程和色彩设计。

本套“丛书”写作严谨,定义准确,语言简练,图文并茂,公式齐全,案例丰富,集设计性、实用性、新颖性于一体,既是电子机械工程科技工作者的设计指南,也是高校电子机械工程专业及相关专业师生极好的教材和参考书。

岑定娟 编 主

中国电子学会电子机械工程分会
电子工业出版社

平 高 川 鄂 世 升 主 隔 隔 隔 隔

岳 李 世 黄 升 主 隔 隔 隔 隔

电子机械工程主要研究电子装备机械结构与制造等,其特点在于如何使系统或装备在复杂的机械环境、电磁环境以及热环境中满足对其电性能的要求,并具有高的可靠性。飞速发展的电子信息技术已成为我国现代化建设的一个关键技术。电子信息技术的实现依赖于电子装备的性能,包括电磁性能和机械结构性能。机械结构不仅是电性能实现的载体和保障,而且往往制约着电性能的实现。随着电子装备向高频段、高增益;高密度、小型化;快响应、高指向精度方向的发展,这种制约作用愈加凸显。电子机械工程即专门研究为实现电子装备性能,进行机械结构与制造的学科,是一门多学科相交融的学科。具体可分为如下四个方面:

一 机械结构因素对电性能的影响:如天线伺服驱动系统的结构谐振频率限制了控制系统的带宽;摩擦、间隙、弹性变形等对控制系统性能的影响;天线结构变形和反射面误差影响天线的效率;微波器件的加工精度与表面粗糙度对微波器件的影响等;实际上微波器件的结构设计与电气设计已经密不可分。因此必须清楚透析这些影响的机理与规律,才能正确设计结构,确保电子装备的性能优良。这是一个多种物理场的耦合问题,可归结为机械、电子、控制的耦合理论以及耦合问题的建模和求解。

二 电子设备对各种恶劣环境的防护:包括电子设备在强烈的振动与冲击下可靠工作,防止失效;在严酷环境下电子设备的温度控制,使电子元、器件温度不超过允许值;电子设备抵御外界电磁干扰的能力和避免自身对环境的电磁污染等。其特点在于使系统或装备在复杂的机械环境、电磁环境以及热环境中满足对其电性能的要求,并具有高的可靠性。此外,还有防潮、防霉、防盐雾腐蚀以及防原子、防生物化学武器等。涉及机械学、传热学、电磁场理论、环境科学、化学、材料学等多门学科。因此在电子设备的设计中必须将各种防护措施综合、统一来考虑。

三 电子组装技术:即如何将成千上万的电子元器件正确而有效地连接、组装及布局,组成一个性能满足要求的整机或系统。在组装过程中,内部要考虑各电子元器件间的互相影响;外部要考虑各种环境因素的影响,最终确保其高可靠性、易维修性及易操作性。目前电子组装技术已发展到表面安装、三维组装及微组装。其中,电路、结构、工艺密不可分。此外为了使操作人员能高效地工作,人机工程学也不容忽视。

四 电子精密机械设计:为实现电子设备的功能,往往需要精密机械,甚至大型机械与结构。典型的如雷达天线、射电望远镜天线、计算机外部设备、机器人等。雷达天线是一种典型的精密机械,其精度与精密机床相比毫不逊色;直径几十米、上百米的全可动抛物面反射器结构高精度的要求,工程上很难实现;计算机外部设备如绘图机、扫描仪、打印机等,其设计是典型的机、光、电一体化设计。这里的电子精密机械设计不同于一般概念上的精密机械设计,是为了满足电子设备性能要求的机电综合性设计。

特别需要指出的是军用电子设备与系统,由于要适应条件苛刻、问题突出、要求严格、更新快的战争环境,在民用产品中罕见应用的代价高昂的许多尖端新技术,率先在军事装备中获得广泛应用。在未来战争中电子战与信息战将起着至关重要的作用,这将赋予电子机械工程在加强现代化国防建设中更重大的责任,也将使电子机械工程面临新的挑战。

为系统总结我国在电子机械工程领域的研究工作,中国电子学会电子机械工程分会特组

织编写了《电子机械工程》丛书，旨在服务于我国电子机械领域的科学研究和装备研制工作。
希望该丛书的出版将对我国电子机械工程技术的发展起到积极的促进作用。

西安电子科技大学校长
中国电子学会电子机械工程分会主任委员

刘宝岩

前 言

随着科学技术的发展和电子信息时代的到来，具有高技术性能和高可靠性的各类电子产品，在国民经济的各个领域得到了广泛的应用。由于微电子技术的迅猛发展，以及多芯片模块（MCM）、高密度三维组装技术和电子组装的微型化的出现，使电子设备的热流密度越来越高，芯片级已达 $300\text{W}/\text{cm}^2$ 。为适应高组装密度、高可靠性的要求，成功地研究了一些高效传热技术，诸如零热阻热管传热技术、热电制冷技术、相变冷却技术、冷板技术、低热阻技术以及微通道散热技术等。基于数值计算技术的不断完善，电子设备计算机辅助设计与分析技术也得到了长足的发展，目前电子设备热设计正处在一个技术革新的崭新时代。

编写本书就是要适应高科技发展的需要，为提高电子产品的热可靠性提供比较完整的热设计基本理论、热设计技术和热测试方法。

本书是根据作者多年来从事电子设备热设计教学实践与科研的成果而编写的，也是对多年从事电子设备热设计实践的经验总结，在编写过程中还吸收了国内外先进的热设计技术，力求使本书内容更加科学、充实与完善，具有一定的先进性、实用性，为工程设计提供比较实用的设计方法。

计算机辅助设计作为一种高新技术，在工程设计中得到了广泛的应用。本书利用数值传热的基本理论和数值计算方法，对电子产品的计算机辅助热设计与分析进行了比较详细的论述。

在本书的编写过程中，朱敏波副教授为“计算机辅助热分析”的部分内容提供了仿真计算实例；严惠娥副教授、任康高级工程师绘制了全书的图稿；陈国强、李欢欢两位硕士研究生打印了全书文稿，作者在此谨向关心和支持本书出版的同志和朋友表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，编写时间仓促，错误之处在所难免，竭诚欢迎广大读者批评指正。

赵悼旻

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 电子设备热设计的目的	(1)
1.2 电子设备的热环境	(2)
1.3 电子设备的热分类	(3)
1.3.1 按冷却剂与被冷却元器件之间的配置分类	(3)
1.3.2 按传热机理分类	(4)
1.4 电子设备热设计基本原则	(8)
1.4.1 热设计的基本要求	(8)
1.4.2 热设计的基本原则	(9)
1.5 电子设备冷却方法的选择	(10)
第 2 章 电子设备热设计理论基础	(12)
2.1 导热	(12)
2.1.1 导热基本定律	(12)
2.1.2 导热微分方程	(14)
2.1.3 平壁导热	(16)
2.1.4 圆筒壁传热	(18)
2.1.5 接触热阻	(19)
2.2 对流换热	(20)
2.2.1 对流换热概述	(20)
2.2.2 量纲分析及其在对流换热中的应用	(22)
2.2.3 定性温度与特征尺寸	(25)
2.2.4 自然对流换热计算	(26)
2.2.5 强迫对流换热计算	(28)
2.3 辐射换热	(33)
2.3.1 热辐射的基本概念	(33)
2.3.2 热辐射的基本定律	(34)
2.3.3 两物体之间的辐射换热计算	(38)
2.3.4 辐射换热的网络分析	(41)
2.4 传热	(43)

2.4.1	平壁的传热	(43)
2.4.2	通过圆筒壁的传热	(44)
2.4.3	通过肋壁的传热	(44)
2.4.4	肋的温度分布及其换热效率	(46)
第3章	电子设备的自然冷却	(50)
3.1	电子设备自然冷却的结构因素	(50)
3.1.1	电子机箱机壳的热设计	(50)
3.1.2	机壳通风孔面积的计算	(52)
3.1.3	电子设备内部电子元器件的热安装技术	(52)
3.2	印制板组装件的自然冷却设计	(56)
3.2.1	印制板印制导体尺寸的确定	(56)
3.2.2	印制板上电子元器件的热安装技术	(57)
3.2.3	减小电子元器件热应变的安装技术	(58)
3.2.4	印制板导轨的热设计	(59)
3.2.5	印制板组装件的热计算	(60)
3.3	半导体功率器件用散热器热计算	(62)
3.3.1	晶体管的散热分析	(62)
3.3.2	散热器的设计与应用	(65)
3.3.3	微通道散热器	(65)
3.3.4	散热器优化设计	(67)
3.4	高密度组装电子器件的低热阻技术	(68)
3.4.1	基板技术	(68)
3.4.2	有机介质材料	(69)
3.4.3	芯片的微焊接技术	(70)
3.4.4	热介质材料对内热阻的影响	(71)
3.4.5	集成电路的热分析	(71)
第4章	电子设备的强迫通风冷却	(75)
4.1	强迫通风冷却设计基本原则	(75)
4.2	强迫空气冷却的基本形式	(76)
4.2.1	单个电子元器件的强迫空气冷却	(76)
4.2.2	整机抽风冷却	(76)
4.2.3	整机鼓风冷却	(77)
4.2.4	大机柜中屏蔽插盒的通风冷却	(78)

4.2.5	空心印制板的通风冷却	(80)
4.3	通风管道设计及压力损失计算	(83)
4.3.1	通风管道设计	(83)
4.3.2	通风系统压力损失计算	(84)
4.3.3	压力损失的速度头计算方法	(87)
4.4	通风机的选择与应用	(92)
4.4.1	通风机的分类	(92)
4.4.2	通风机的功率和效率	(93)
4.4.3	通风机特性曲线	(94)
4.4.4	系统(风道)阻力特性和通风机工作点的确定	(95)
4.4.5	通风机的选择	(95)
4.4.6	通风机的串并联	(95)
4.5	结构因素对风冷效果的影响	(96)
4.5.1	通风机的位置	(96)
4.5.2	风道结构形式	(97)
4.5.3	元器件的排列	(98)
4.5.4	热源位置	(98)
4.5.5	漏风的影响	(98)
4.5.6	紊流器	(99)
4.6	射流冲击冷却	(100)
第5章	电子设备的液体冷却	(104)
5.1	直接液体冷却	(104)
5.1.1	发热的电子元器件直接浸入冷却液体(无蒸发)	(104)
5.1.2	元器件或组件直接浸入冷却液(有蒸发)	(105)
5.1.3	直接强迫液体冷却	(105)
5.2	间接液体冷却	(106)
5.2.1	导热模块	(106)
5.2.2	机箱(柜)空气-液体冷却	(108)
5.3	泵与热交换器	(110)
5.3.1	泵的选择	(110)
5.3.2	热交换器	(110)
5.4	冷却剂	(114)
5.4.1	评价标准	(114)

(08)	5.4.2	直接液体冷却的冷却液	(116)
(88)	5.4.3	间接液体冷却的冷却液	(116)
(85)	5.5	液体冷却系统的设计	(116)
(45)	5.6	液体冷却系统的控制	(118)
第 6 章		冷板设计	(121)
(56)	6.1	冷板的结构	(121)
(52)	6.1.1	气冷式冷板	(121)
(88)	6.1.2	液冷式冷板	(123)
(40)	6.1.3	储热式冷板	(123)
(20)	6.1.4	热管冷板	(124)
(20)	6.1.5	各类冷板的选用原则	(124)
(26)	6.2	冷板的换热计算	(125)
(60)	6.2.1	冷板的换热计算	(125)
(30)	6.2.2	冷板的换热系数和效率	(127)
(5)	6.3	冷板的设计	(128)
(29)	6.3.1	均温冷板的校核计算	(128)
(80)	6.3.2	均温冷板的设计计算	(129)
(80)	6.3.3	非均温冷板的换热计算	(131)
(9)	6.4	冷板的应用	(132)
第 7 章		电子设备的蒸发冷却	(133)
(44)	7.1	蒸发冷却的基本原理	(133)
(40)	7.1.1	蒸发冷却换热计算	(134)
(40)	7.1.2	冷凝热计算	(135)
(2)	7.2	蒸发冷却系统分类	(136)
(20)	7.2.1	直接蒸发冷却	(136)
(60)	7.2.2	间接蒸发冷却	(137)
(60)	7.2.3	消耗性蒸发冷却	(137)
(8)	7.3	蒸发冷却系统的组成	(138)
(01)	7.3.1	电子管(发射管)	(138)
(01)	7.3.2	蒸发锅	(139)
(01)	7.3.3	冷凝器	(140)
(41)	7.3.4	控制保护设备	(140)
(4)	7.4	蒸发冷却系统的设计计算	(140)

7.5	蒸发冷却的应用	(145)
7.5.1	单个功率元器件的浸渍蒸发冷却	(145)
7.5.2	高热流密度组件的浸渍蒸发冷却	(145)
7.5.3	利用蒸发冷却,保持电子器件恒温	(146)
7.5.4	固态相变冷却的应用	(147)
7.6	汽-水两相流冷却系统	(148)
7.7	超蒸发冷却	(150)
7.7.1	蒸发效应	(150)
7.7.2	过蒸发器与超蒸发器	(150)
第8章	热电制冷	(152)
8.1	热电制冷的基本原理	(152)
8.2	热电制冷的热计算	(154)
8.3	串联型热电制冷器	(157)
8.4	热电制冷器的结构	(159)
8.5	热电制冷在电子设备中的应用	(161)
第9章	热管	(163)
9.1	热管原理	(163)
9.1.1	热管工作原理	(163)
9.1.2	最大传热量	(166)
9.2	热管的特性与分类	(166)
9.2.1	热管的特性	(166)
9.2.2	热管的分类	(167)
9.3	热管的结构与材料	(169)
9.3.1	管壳	(169)
9.3.2	管心	(170)
9.3.3	工作液	(172)
9.4	热管传热性能	(173)
9.4.1	热管传热等效热路图	(173)
9.4.2	热管的传热极限	(174)
9.4.3	热管的典型性能	(177)
9.5	热管的设计与应用	(177)
9.5.1	热管的设计	(177)
9.5.2	热管的应用	(183)

9.6	热管的制造工艺	(185)
9.6.1	机械零部件加工	(185)
9.6.2	清洗	(185)
9.6.3	管心的加工与组装	(185)
9.6.4	焊接与检漏	(186)
9.6.5	工作液(工质)的充装	(186)
第 10 章	计算机辅助热分析	(187)
10.1	数值传热学的应用	(187)
10.1.1	导热问题的数值计算	(187)
10.1.2	导热问题计算机辅助分析	(188)
10.1.3	对流换热的数值计算	(189)
10.2	数值计算方法	(191)
10.2.1	微分方程的离散	(191)
10.2.2	控制容积法离散三维对流—扩散方程	(193)
10.3	计算机辅助热分析建模技术与要求	(196)
10.4	计算机辅助热分析程序设计	(197)
10.4.1	输入及数据维护模块	(198)
10.4.2	网格生成及显示模块	(198)
10.4.3	数值计算模块	(198)
10.4.4	结果输出及显示模块	(198)
10.5	常用热分析软件及仿真实例	(199)
10.5.1	几个主要热分析软件	(200)
10.5.2	ICEPAK 软件仿真实例	(202)
第 11 章	电子设备热测试技术	(208)
11.1	温度测量	(208)
11.2	流体的压力测量	(216)
11.2.1	液柱压力计	(216)
11.2.2	弹簧式压力表	(218)
11.3	空气和液体流量的测量	(218)
11.3.1	皮托管测定法	(219)
11.3.2	热球风速仪	(220)
11.3.3	转子流量计	(220)
11.3.4	涡轮流量变送器	(221)

11.3.5 孔板流量计	(222)
附录 A	(226)
附录 B	(227)
附录 C	(228)
附录 D	(229)
参考文献	(230)

第1章

绪论

本章要点

电子设备热设计是可靠性设计的一项关键技术。热设计的目的是要保证电子元器件及设备在规定的热环境下，能安全正常的工作。掌握热设计的基本原则，正确选择电子设备的冷却方法，对提高电子设备的热可靠性至关重要。本章对热设计的基本原则及冷却方法进行详细的论述。

1.1 电子设备热设计的目的

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，为提高电子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，电子元器件和设备的热设计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250 000个。由于超大规模集成电路（VLSIC）、专用集成电路（ASIC）、超高速集成电路（VHSIC）、无引线器件、表面贴装和多芯片模块（MCM）等微电子技术，在结构、工艺、组装等诸多领域的不断发展，使微电子器件及设备的组装密度和功率密度在迅速提高，如图1-1所示。

研究表明，芯片级的热流密度高达 $300\text{W}/\text{cm}^2$ ，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，若不采取合理的热设计技术，必将严重影响电子元器件和设备的热可靠性。

电子设备热设计的目的是为芯片级、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。热控制系统必须具有在规定的使用期内，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。

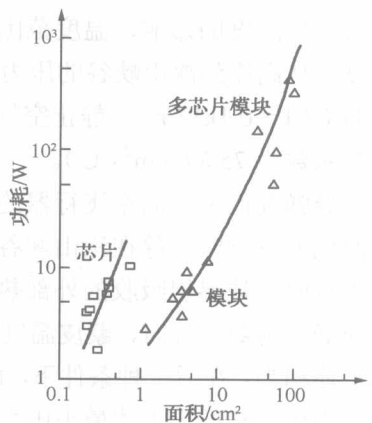


图1-1 芯片与器件的热流密度

防止电子元器件的热失效是热设计的主要目的之一。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，需要正确地确定出热失效的温度，而这个温度应成为热设计系统的重要判据，在确定热设计方案时，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热环境的可变性是热设计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要恶劣得多，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：

- ① 环境温度和压力（或高度）的极限值；
- ② 环境温度和压力（或高度）的变化率；
- ③ 太阳或周围物体的辐射热；
- ④ 可利用的热沉（包括：种类、温度、压力和湿度）；
- ⑤ 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，周围的大地就是热沉。建筑物、设备掩体和地面运载工具主要受的是周围大气层温度的影响，温度范围为 $-50\sim+50^{\circ}\text{C}$ ， -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 $75.8\sim 106.9\text{kPa}$ ，太阳辐射可达 $1\text{kW}/\text{m}^2$ ，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变化。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，由于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、民用和直升机上的仪器设备，多数采用标准的密封或非密封的 ATR（机载运输）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