

电子工程实用技术丛书

开关电源 实用技术

热设计 电磁兼容
PCB布局布线



© 周志敏 纪爱华 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子工程实用技术丛书

开关电源实用技术

——热设计、电磁兼容、PCB 布局布线

周志敏 纪爱华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以开关电源可靠性设计为主线,突出实用性,结合国内外开关电源的应用和发展现状,全面系统地阐述了开关电源可靠性最新设计技术。全书分为三部分共6章,系统地讲述了开关电源热设计术语及热设计概述、开关电源热设计要点、开关电源电磁兼容性测试、开关电源的抗干扰设计、PCB概述及设计、开关电源PCB电磁兼容性设计及可靠性试验等内容。本书题材新颖、实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值,是从事开关电源可靠性设计的工程技术人员的必备读物。

本书可供电信、信息、航天、军事及家电等领域从事开关电源可靠性设计的工程技术人员阅读,也可供高等院校、职业技术学院相关专业的师生参考阅读。

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

开关电源实用技术:热设计·电磁兼容·PCB布局布线/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2015.5

(电子工程实用技术丛书)

ISBN 978-7-121-25174-0

I. ①开… II. ①周… ②纪… III. ①开关电源-基本知识 IV. ①TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第298418号

策划编辑:富 军

责任编辑:韩玉宏

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

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:787×1092 1/16 印张:16 字数:410千字

版 次:2015年5月第1版

印 次:2015年5月第1次印刷

印 数:3000册 定价:48.00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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着电子技术的快速发展，电子设备的应用领域越来越广泛，种类也越来越多，而电子设备都离不开可靠的电源，电源性能的优劣直接关系到整个电子设备的安全性和可靠性。电子设备的小型化和低成本化使电源以轻、薄、小和高效率为主要发展方向，因而对电源的要求更加灵活多样。

目前，我国通信、信息、家电、国防等领域的电子设备普遍采用开关电源，开关电源的开发、研制和生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。在全球倡导节能环保、提高能效的背景下，开关电源的设计正面临着前所未有的挑战。为此，本书结合国内外开关电源技术的发展动向，系统地讲述了开关电源可靠性设计中应掌握的设计方法、设计原则等内容。本书将开关电源热设计、电磁兼容设计、PCB 布局和布线设计融于一体，力求做到通俗易懂和结合实际，使得从事开关电源可靠性设计的工程技术人员可以从中获益，读者可以以此为“桥梁”，系统地了解 and 掌握开关电源的设计和应用技术。此书是从事开关电源可靠性设计的工程技术人员必备参考书。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平、陈爱华等。本书在写作过程中无论从资料收集还是技术信息交流上都得到了国内外的专业学者和同行及开关电源制造商的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间短，加之作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第一部分 开关电源热设计

第 1 章 开关电源热设计术语及热设计概述	3
1.1 热设计术语及热传递方式	3
1.1.1 热设计术语	3
1.1.2 热传递方式	7
1.2 开关电源热设计及热管理概述	11
1.2.1 热设计的目的及层次	11
1.2.2 热管理的目的及散热增强方式	13
1.3 表面贴装元器件及 PCB 的热设计	15
1.3.1 表面贴装元器件的热设计	15
1.3.2 PCB 的热分析与热设计技术	19
第 2 章 开关电源热设计要点	27
2.1 开关电源热设计的规则、方法及散热器设计要点	27
2.1.1 开关电源热设计的原则、程序及相关参数	27
2.1.2 开关电源热设计的规则及方法	32
2.1.3 开关电源散热器设计要点	35
2.2 开关电源发热及散热方法	47
2.2.1 开关电源发热及环境温度	47
2.2.2 开关电源产品的分类及安装技术	49

第二部分 开关电源的电磁兼容设计

第 3 章 开关电源电磁兼容性及测试	59
3.1 开关电源电磁兼容性及研究、现状、设计要点	59
3.1.1 电磁兼容性	59
3.1.2 开关电源的电磁兼容性研究、现状及设计要点	64
3.2 开关电源电磁兼容性测试	70
3.2.1 EMC 测试技术	70
3.2.2 开关电源 EMC 测试方法及波形	78



3.2.3	LISN 及共模与差模分离测量	86
第 4 章	开关电源的抗干扰设计	93
4.1	开关电源的电磁干扰	93
4.1.1	开关电源中的电磁干扰源	93
4.1.2	开关电源中 EMI 的传播方式	101
4.2	开关电源 EMC 的设计	108
4.2.1	开关电源 EMI 抑制技术	108
4.2.2	开关电源电磁兼容新技术	118
4.2.3	开关电源电路的电磁兼容设计实例	122
4.3	开关电源滤波器设计及应用要点	125
4.3.1	EMI 噪声及 EMI 滤波器	125
4.3.2	开关电源滤波器的参数及设计要点	130
4.3.3	开关电源滤波器的规格及特性	135
4.3.4	开关电源滤波器的选择	139
4.3.5	开关电源滤波器的有效安装方法	143

第三部分 开关电源的 PCB 设计

第 5 章	PCB 概述及设计	149
5.1	PCB 概述	149
5.1.1	PCB 的功能、特点及相关工艺技术	149
5.1.2	PCB 的分类	153
5.2	开关电源 PCB 设计	154
5.2.1	开关电源的 PCB 设计步骤及设计规范	154
5.2.2	PCB 布局设计	158
5.2.3	飞线与 PCB 布局	161
5.2.4	PCB 布线设计	162
5.2.5	PCB 互连设计	174
5.2.6	PCB 焊盘	175
5.2.7	开关电源 PCB 设计要点	186
第 6 章	开关电源 PCB 电磁兼容性设计及可靠性试验	194
6.1	开关电源 PCB 电磁兼容性设计	194
6.1.1	开关电源信号完整性设计方法	194
6.1.2	开关电源 PCB 抗干扰设计	202



6.1.3	PCB 中带状线、电线、电缆间的串音和电磁辐射	215
6.1.4	开关电源 PCB 电磁兼容性设计要点	218
6.1.5	开关电源 PCB EMC 辅助设计的软件方法	220
6.1.6	PCB 分层堆叠在控制 EMI 辐射中的作用	223
6.1.7	PCB 表面积层技术及技术动态	226
6.2	PCB 质量评价及可靠性试验	230
6.2.1	PCB 质量评价	230
6.2.2	PCB 可靠性试验	232
附录 A	电磁兼容术语	237
附录 B	PCB 基本名词解释	241
参考文献	247

第一部分 开关电源热设计

第1章

开关电源热设计术语及热设计概述



1.1 热设计术语及热传递方式

1.1.1 热设计术语

1. 基本热设计术语

1) 温升

温升指功率器件温度与环境温度的差。如果忽略温度变化对空气中物体的非线性影响,可以将一般在环境温度下测量获得的温升直接加上最高可能的环境温度,获得在最高可能的环境温度下的功率器件近似温度。例如,测得某功率器件温升为 40°C ,则在 55°C 最高环境温度下,该器件的温度将为 95°C 。

2) 热耗

热耗指功率器件正常运行时产生的热量。热耗不等同于功耗,功耗指功率器件的输入功率。一般功率器件的效率比较低,大部分功率都转化为热量。计算功率器件温升时,应根据其功耗和效率计算热耗,当仅知道大致功耗时,对于小功率设备,可认为热耗等于功耗,对于大功率设备,可近似认为热耗为功耗的75%。为给设计留一个余量,有时直接用功耗进行计算。

3) 热流密度

热流密度指单位面积上的传热量,单位为 W/m^2 。

4) 体积功率密度

体积功率密度指单位体积的热流量,单位为 W/m^3 。

5) 导热系数

导热系数是表征材料导热性能的参数,它表明单位时间、单位面积、负的温度梯度下的导热热量,单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

6) 对流换热系数

对流换热系数反映两种介质间对流换热过程的强弱,表明当流体与壁面的温差为 1°C



时，在单位时间通过单位面积的热量，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

7) 黑度

黑度表征物体的辐射力接近绝对黑体辐射力的程度，为实际物体的辐射力与同温度下黑体的辐射力之比，在 0 与 1 之间。它取决于物体种类、表面状况、表面温度及表面颜色。表面粗糙、无光泽，则黑度大，辐射散热能力强。黑度一般用 ε 表示，无单位。

8) 热力学

热力学研究物质的热平衡状态，确定系统由一种平衡状态变到另一种平衡状态所需的总热量。

9) 传热学

传热学研究能量的传递速率，是热力学的扩展，传热问题必须基于热力学和传热学才能解决。

10) 热对流

热对流指流体由质点发生相对位移而引起的热交换。自然对流质点位移是由于流体内部密度差引起的，使轻者浮、重者沉。

11) 热辐射

热辐射指由于热（温差）的原因而产生电磁波在空间传递，热辐射不仅是能量转移，也伴随着能量形式的转移。辐射传热不需要任何介质作为媒介，可以在真空中传播。

12) 热阻

热阻指热量在热流路径上遇到的阻力，一般用 R 表示，即 $R = \Delta t / Q$ ，单位为 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

13) 特征尺寸

特征尺寸指在对流换热准则数中代表热表面的几何尺寸，一般用 D 表示，单位为 m 。

14) 雷诺数

该数反映了流体流动时的惯性力与粘滞力的大小之比，是说明流体流态的一个相似准则，一般用 Re 表示，无单位。

15) 普朗特数

该数是说明流体物理性质对换热影响的相似准则，一般用 Pr 表示，无单位。

16) 格拉晓夫数

该数反映了流体所受的浮升力与粘滞力的相对大小，是说明自然对流换热强度的一个相似准则，一般用 Gr 表示，无单位。

2. 热单位

热是能量的形态之一，与动能、电能及位能等一样，热能的单位用 J （焦耳）表示。电子设备若持续发热，热量连续不断流动时，用“每秒的热能量”来表示会更容易理解，单位为 J/s ， J/s 也可用 W （瓦特）表示。能量既不会突然生成，也不会突然消失，它们不是传递到其他物质就是转换为其他形态的能量。例如， 100J 的能量可使 100g 水的温度升高约



0.24℃，这并不是通过升高水的温度消耗了100J的能量，而是在水中作为热能保存了起来。能量无论在何处都一定会以某种形态保存起来。能量既不会凭空消失，也绝不会凭空产生，这就是最重要的能量守恒定律。

3. 比热容

比热容即为比热，是单位质量物质的热容量。单位质量的某种物质温度升高1℃吸收的热量叫作这种物质的比热容，用字母 C 表示。比热容是一个复合单位，是由质量、温度和热量的单位组合而成的。在国际单位制中，比热的单位是 $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ，读作焦每千克摄氏度。

4. 热阻

热阻是物体对热量传导的阻碍能力，单位为 $^\circ C/W$ 。物体持续传热功率为1W时，导热路径两端的温差，即为该物体的热阻。热阻一般常用 θ 或 R 表示。由热阻可以判断及预测功率器件的发热状况。热阻大，表示热不容易传递，因此功率器件所产生的温度就相对高；热阻小，表示功率器件中的热量向外界传导快。热路和电路参数对应关系见表1-1。

表1-1 热路和电路参数对应关系

热 路	电 路
热耗 P ，单位为W	电流 I ，单位为A
温差 $\Delta T = T_2 - T_1$ ，单位为 $^\circ C$	电压 $U_{AB} = U_A - U_B$ ，单位为V
热阻 $R_{th} = \Delta T/P$ ，单位为 $^\circ C/W$	电阻 $R = U_{AB}/I$ ，单位为 Ω
热容 $C = WC_p$ ，单位为cal/ $^\circ C$	电容 C ，单位为F
热阻串联 $R_{th} = R_{th1} + R_{th2} + \dots$	电阻串联 $R = R_1 + R_2 + \dots$
热阻并联 $1/R_{th} = 1/R_{th1} + 1/R_{th2} + \dots$	电阻并联 $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$

两个名义上相接触的固体表面，实际上接触仅发生在一些离散的面积元上，如图1-1所示。在未接触的界面之间的间隙中常充满了空气，热量将以导热和辐射的方式穿过该间隙层。与理想中真正完全接触相比，这种附加的热传递阻力称为接触热阻。降低接触热阻的方法主要是增加接触压力和增加界面材料（如硅脂）填充界面间的空气。在涉及热传导时，一定不能忽视接触热阻的影响，需要根据应用情况选择

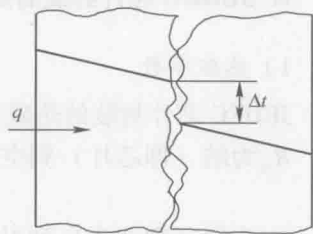


图1-1 两个相接触的固体表面

合适的导热界面材料，如导热脂、导热膜、导热垫等。

5. 封装热传标准及定义

早期的电子热传工业标准主要是SEMI标准，该标准定义了IC封装在自然对流、风洞及无限平板的测试环境下的测试标准。自1990年之后，JEDECJCS1委员会邀集厂商及专家开始制定新的热传工业标准，针对热管理方面提出多项标准。和SEMI标准相比，新的热传工业标准虽然基本测量方法及原理相同，但内容更为完整，此外也针对一些定义进行了更清楚的说明。



SEMI 标准中定义了两种热阻值, 即 R_{ja} 及 R_{jc} 。其中, R_{ja} 是测量在自然对流或风洞环境下从芯片界面到大气中的热传。由于测量是在标准规范条件下进行的, 因此对于不同的基板设计及环境条件有不同的结果, 此值可用于定性比较封装散热的容易程度。 R_{jc} 是指热由芯片界面传到 IC 封装外壳的热阻, 在测量时需接触一等温面, 该值主要用于评估散热片的性能。

随着封装形式的改变, 在新的 JEDEC 标准中增加了 R_{jb} 、 ψ_{jt} 、 ψ_{jb} 等几个测量参数。其中, R_{jb} 为在几乎全部热由芯片界面传到测试板的环境下, 由芯片界面到测试板上的热阻, 该值可用于评估 PCB 的热传效能。 ψ_{jt} 为热传特性参数, 其定义如下。

(1) ψ 和 R 的定义类似, 但不同之处是 ψ 是指在大部分的热量传递的情况, 而 R 是指全部的热量传递。在实际的电子系统散热时, 热会由封装的上下甚至周围传递, 而不一定会由单一方向传递, 因此 ψ 的定义比较符合实际系统的测量情况。

(2) ψ_{jt} 是指部分的热由芯片界面传到封装上方外壳时所产生的热阻, 该值可用于实际系统产品由 IC 封装外表面温度预测芯片界面温度。

(3) ψ_{jb} 和 R_{jb} 类似, 是指在自然对流及风洞环境下, 部分热由芯片界面传到下方测试板时所产生的热阻, 可用于由板温去预测结面温度。

虽然标准中的各种热阻测量值可应用于实际系统产品的温度预测, 但是实际应用时仍然有很大的限制。使用标准的 R_{ja} 、 R_{jb} 、 ψ_{jt} 、 ψ_{jb} 等测量参数对系统产品的温度进行预测时, 需注意标准测试条件所用的测试板尺寸、铜箔层及含铜量, 还应注意测量时所采用的自然对流及风洞环境和实际系统的差别。

一般来说, 由实验测量的热阻值或热传参数主要用来对 IC 封装散热效能进行定性比较, 即不论由哪家封装厂封装, 只要符合标准方式, 就可以比较其散热状况, 这对于了解 IC 封装散热设计或热传状况有很大帮助。此外, 实验测量值也可用于数值模拟的验证及简化。

6. JEDEC 芯片封装的热阻及热性能参数

1) 热阻参数

JEDEC 芯片封装的热阻参数如下。

R_{ja} 为结 (即芯片) 到空气环境的热阻:

$$R_{ja} = (T_j - T_a) / P \quad (1-1)$$

R_{jc} 为结 (即芯片) 到封装外壳的热阻:

$$R_{jc} = (T_j - T_c) / P \quad (1-2)$$

R_{jb} 为结 (即芯片) 到 PCB 的热阻:

$$R_{jb} = (T_j - T_b) / P \quad (1-3)$$

2) 热性能参数

ψ_{jt} 为结到封装顶部的热参数:

$$\psi_{jt} = (T_j - T_t) / P \quad (1-4)$$

ψ_{jb} 为结到封装底部的热参数:

$$\psi_{jb} = (T_j - T_b) / P \quad (1-5)$$



式中, T_j 为芯片结温 ($^{\circ}\text{C}$); T_a 为空气环境温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_b 为芯片根部 PCB 表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

热阻参数 R_{ja} 是封装的品质度量, R_{ja} 只能应用于芯片封装的热性能品质参数 (用于性能好坏等级的比较), 不能应用于实际测试、分析中的结温预计分析。

从 20 世纪 90 年代起, 相对于 R_{ja} 更需要对实际预计芯片温度有价值的热参数, 为适应此要求而出现 3 个新参数: ψ_{jb} 、 ψ_{jt} 和 R_{jc} 。

ψ_{jb} 可运用于热分析中的结温分析, ψ_{jt} 可运用于实际产品热测试中的结温预计, R_{jc} 是结到封装表面离结最近点的热阻值。在 R_{jc} 的测量中, 应设法使得热流“全部”由封装外壳通过。

ψ_{jt} 与 R_{jc} 完全不同, 并非是功率器件的热阻值, 只是个数学构造物, 是结到顶部的热特征参数, 因为不是所有热量都是通过封装顶部散出的。在实际应用中, ψ_{jt} 对于由芯片封装上表面测试温度来估计结温有有限的参考价值。

R_{jb} 是用来比较板上表面安装芯片封装热性能的品质参数, 针对的是 2S2P (双信号层、双隐蔽式电源层) PCB, 不适用于板上有不均匀热流的芯片封装。 R_{jb} 与 ψ_{jb} 有本质区别, $R_{jb} > \psi_{jb}$ 。与 ψ_{jt} 同理, ψ_{jb} 为结到 PCB 的热特征参数。

1.1.2 热传递方式

电子产品完全遵守能量守恒定律, 从电源流入的电能在产品内部转换为热能, 然后只会向周围的物体及空气中传递。接通电源后一段时间内, 转换的大部分热能会被用于提高装置自身的温度, 而排出的热能仅为少数。之后, 装置温度升高到一定程度时, 输入的能量必须与排出的能量一致, 否则温度便会无止境上升。热能传递有 3 种方式, 分别为传导、对流及热辐射。传导与对流表面文字相似, 但意义绝不相同。

1. 传导

传导是指热能在物体 (固体) 中的传递, 不同的材料热传导系数不同, 其热传导作用也不同。材料的热传导能力与导热系数、导热方向的截面积和温差成正比, 与导热的长度和材料厚度成反比。传导散热需要有较高热导率的材料或介质, 铝和铁的导热性都很出色, 常用铝合金或铜作为散热器材料, 对于大功率器件可以外加材料厚度较厚的散热器。如果用数值表示物质导热性, 树脂为 0.2~0.3, 铁为 49, 铝为 228, 铜为 386。这个数值就是该物质的热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。越容易导热的物质, 该数值越大。

如果用一句话来表述热导率的含义, 即有一种长 1m、横断面积为 1m^2 的材料, 其两端的温度差为 1°C 时, 会流动多少瓦热能。其单位 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 可写成:

$$\frac{\text{W} \times \text{m}}{\text{m}^2 \times ^{\circ}\text{C}} \rightarrow \text{W} \frac{\text{长度}(\text{m})}{\text{断面面积}(\text{m}^2) \times \text{温度差}^{\circ}\text{C}} \quad (1-6)$$

导热过程中传递的热量按照 Fourier 导热定律计算:

$$Q = \lambda \times A(T_h - T_c) / \delta \quad (1-7)$$

式中, A 为与热量传递方向垂直的面积, 单位为 m^2 ; T_h 与 T_c 分别为高温面与低温面的温度; δ 为两个面之间的距离, 单位为 m ; λ 为材料的导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, 表示了该材



料导热能力的大小。

一般,固体的导热系数大于液体,液体的导热系数大于气体。例如,常温下纯铜的导热系数高达 $400\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,纯铝的导热系数为 $236\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,水的导热系数为 $0.6\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,而空气仅为 $0.025\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 左右。因为铝的导热系数高且密度低,所以散热器基本都采用铝合金加工,但在一些大功率芯片的散热器中,为了提升散热性能,常采用铝嵌铜散热器或铜散热器。

2. 对流

对流是指运动着的流体流经温度与其不同的固体表面时,与固体表面之间发生的热量交换的过程,是在流体和气体中的热能传递方式。对流是最复杂的一种传热方式,热传输的速度与物体的表面积、温差、流体的速度和流体的特性有如下函数关系:

$$Q_c = h_c \times A_s \times (T_s - T_a) \quad (1-8)$$

式中, Q_c 为对流的热传输速度; h_c 为热传输系数; A_s 为物体的表面积; T_s 为固体的表面温度; T_a 为环境温度。

热传输系数受固体的形状、物理特性,流体的种类、黏性、流速,以及温度、对流方式(强制对流或自然对流)等因素的影响。对于空气介质不同对流方式的热传输系数见表1-2。

表 1-2 对于空气介质不同对流方式的热传输系数

对流方式	热传输系数
自然对流	$0.0015 \sim 0.015\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
强制对流	$0.015 \sim 0.15\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$

从表1-2中可以看出,强制对流可以大大提高热传输系数,从而提高散热效果。

对流换热是电子设备散热中应用最广的一种换热方式。根据流动的起因不同,对流换热可以分为强制对流换热和自然对流换热两类。前者采用泵、风机或其他外部动力源作为运动的动力,而后者通常是由于流体自身温度场的不均匀造成不均匀的密度场,由此产生的浮升力成为运动的动力。

在终端产品中主要是采用自然对流换热,自然对流换热分为大空间自然对流(如终端外壳和外界空气间的换热)和有限空间自然对流(如终端内的单板和终端内的空气换热)。值得注意的是,当终端外壳与单板的距离小于一定值时,就无法形成自然对流。例如,手机的单板与外壳之间就只是以空气为介质的热传导。对流换热的热量按照牛顿冷却定律计算:

$$Q = h \times A (T_h - T_c) \quad (1-9)$$

式中, A 为与热量传递方向垂直的面积,单位为 m^2 ; T_h 与 T_c 分别为固体表面与流体的温度, h 是对流换热系数。自然对流时,换热系数在 $1 \sim 10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 量级,实际应用一般不会超过 $3 \sim 5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;强制对流时,换热系数在 $10 \sim 100\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 量级,实际应用一般不会超过 $30\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。



3. 辐射

辐射是指热量经由红外线、光及电磁波等从物体表面传递的方式。太阳的热量穿过真空宇宙到达地球，这也属于辐射。辐射中热量是否易于吸收和放出，取决于物体表面的温度及颜色等。就颜色而言，黑色容易吸放热量，而白色较难。

辐射能量的大小与材料的热辐射系数（相对于黑体表面辐射系数的降低系数）、物体散热的有效表面积和热能的大小有关。在材料有相同热辐射系数的条件下，无光泽或暗表面比有光泽或光亮的表面热辐射更强。由此可以得知，选择散热器或散热面时，无光泽表面的散热器其散热效果会更好。相互靠近的元器件或发热装置（如大功率器件、变压器等），彼此都会吸收对方的热辐射能量，若要降低相邻元器件的热辐射影响就必须将发热元器件彼此分开，加大两者之间的距离。

如果用数值来表示，即为热辐射率（没有单位），其数值范围为0~1，从理论上讲，全黑物质为1，铝为0.05~0.5，铁为0.6~0.9，黑色树脂为0.8~0.9。

辐射是通过电磁波来传递能量的过程，热辐射是由于物体的温度高于绝对零度时发出电磁波的过程，两个物体之间通过热辐射传递热量称为辐射换热。物体表面之间的热辐射计算是极为复杂的，其中，最简单的两个面积相同且正对着的表面间的辐射换热量计算公式为：

$$Q = A \times 5.67e^{-8} / (1/\varepsilon_h + 1/\varepsilon_c - 1) \times (T_h^4 - T_c^4) \quad (1-10)$$

式中， A 为与热量传递方向垂直的面积，单位为 m^2 ； T_h 与 T_c 分别为固体表面与流体的温度； ε 是表面的黑度或发射率，该值取决于物质种类、表面温度和表面状况，与外界条件无关。

辐射换热不是线性关系，当环境温度升高时，在终端温度与环境温度相同温差条件下会散去更多的热量。塑料外壳表面喷漆，PCB表面涂敷绿油，表面黑度都可以达到0.8，这些都有利于辐射散热。对于金属外壳，可以进行一些表面处理来提高黑度，强化散热。

对辐射散热最大的一个错误认识是认为黑色可以强化热辐射，通常散热器表面的黑色处理也助长了这种认识。实际上，当物体温度低于 1800°C 时，有意义的热辐射波长为 $0.38 \sim 100\mu\text{m}$ ，且大部分能量位于红外波段 $0.76 \sim 20\mu\text{m}$ 范围内，在可见光波段内，热辐射能量比重并不大。而颜色只与可见光吸收有关，与红外辐射无关，因此夏天人们穿浅色的衣服可降低太阳光中的可见光辐射的吸收。

4. 散热方式的选择

常见的散热方式有散热片散热和风扇散热两种方式。有时散热的程度不够，有时又过度散热了，那么何时应该散热、哪种方式散热最合适可以依据热流密度来评估，热流密度 = 热量/热通道面积。设计中应按照《GJB/Z27-92 电子设备可靠性热设计手册》中规定的冷却方法，如图1-2所示，根据可接受的温升要求和计算出的热流密度，得出可接受的散热方式。

对于密封设备，则应该用体积功率密度来估算，体积功率密度 = 热量/体积。图1-3所示为温升要求为 40°C 时，不同体积功率密度所对应的散热方式。

按照图1-3可以得出散热方式的选择顺序：自然冷却→导热→强迫风冷→液冷→蒸发冷却。体积功率密度低于 $0.12\text{W}/\text{cm}^3$ 时，可采取传导、辐射、自然对流等方法冷却；体积

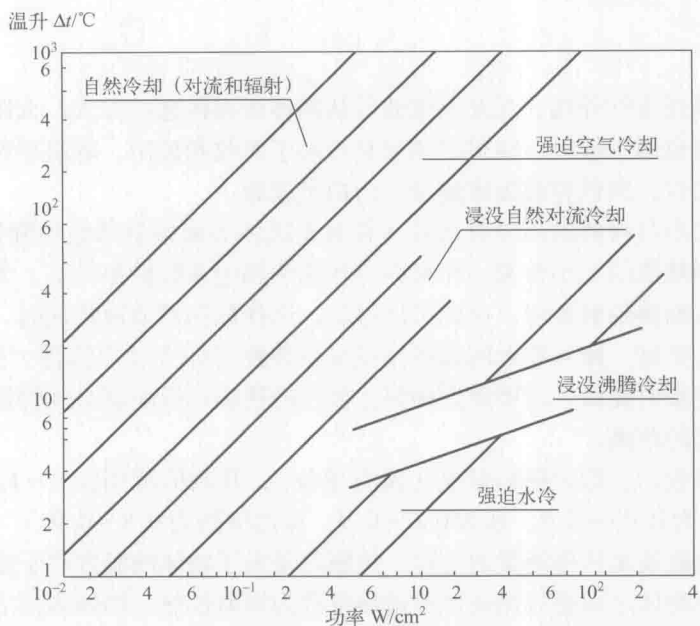
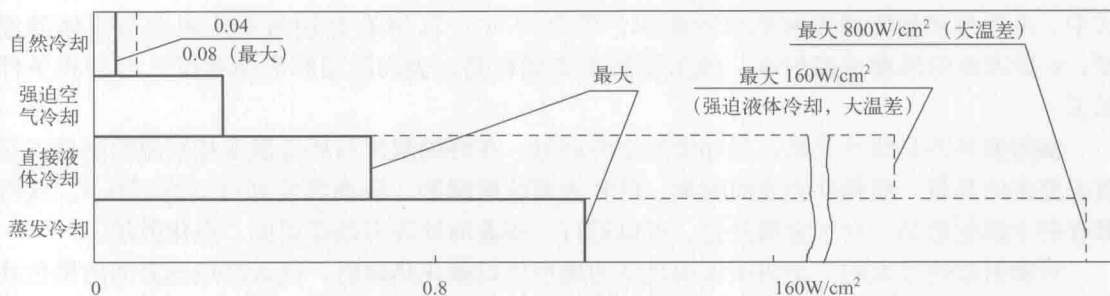
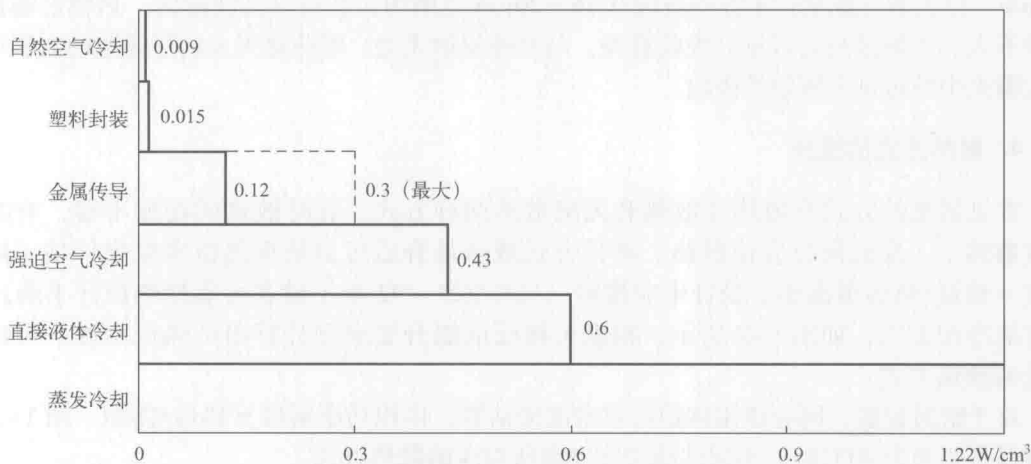


图 1-2 冷却的方法



(a) 热流密度



(b) 体积功率密度 (适用于密封单元内部的冷却)

图 1-3 温升为 40°C 时, 各种散热方式的热流密度和体积功率密度