

电子设备冷却技术 (第2版)

Cooling Techniques for Electronic Equipment, Second Edition

(美)戴夫·S.斯坦伯格 (Dave S. Steinberg) 著
李明锁 丁其伯 译

航空工业出版社

电子设备冷却技术

(第2版)

(美) 戴夫·S. 斯坦伯格 (Dave S. Steinberg) 著
李明锁 丁其伯 译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

应用广泛的电子设备的功率密度越来越大,而其体积却越来越小。因此,努力降低设备中元器件的工作温度以及各种元件结合部位的温度,一直是提高产品可靠性设计工作的重点。本书阐述了高温和温度循环对电子设备元件与电路板和机箱的力、应力及疲劳寿命的影响。其内容包括电子设备机箱结构和电路板的冷却设计、元器件安装和冷却、强迫空气冷却、焊点和电镀通孔的热应力分析、热循环环境的疲劳寿命预计、电子系统瞬态冷却计算、热管和液体冷却系统、大型安装架和机柜的有效冷却,以及有限元数学分析方法的应用。全书内容深入浅出,点面结合,其设计方法的基本应用范例较多,工程实用性很强,是一本既可作为高等院校的教学参考书,又可供广大工程技术人员设计参考的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

电子设备冷却技术:第2版/(美)斯坦伯格
(Steinberg, D. S.) 著;李明锁,丁其伯译. --北京:
航空工业出版社,2012.7

书名原文:Cooling Techniques for Electronic
Equipment, Second Edition
ISBN 978-7-5165-0039-2

I. ①电… II. ①斯… ②李… ③丁… III. ①电子设
备-冷却装置 IV. ①TN605

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第152637号

北京市版权局著作权合同登记
图字:01-2012-1575

Copyright © 1991 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.
Authorized translation from the English language edition, entitled *Cooling Techniques for Electronic Equipment, Second Edition*, ISBN 978-0-471-52451-9, by Dave S. Steinberg, published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

电子设备冷却技术(第2版) Dianzi Shebei Lengque Jishu (Di 2 Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2012年7月第1版

2012年7月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:22.25 字数:538千字

印数:1—3000

定价:108.00元

译 者 序

近30年来,可靠性工程已经成为非常热门也非常成熟的一个学科。为提高电子设备的基本可靠性和使用可靠性,人们耗费了大量的人力、物力,致力于产品的可靠性试验工作。但我们知道,产品可靠性首先是设计出来的,为此,许多院校的专业团队也编写并出版了大量包括可靠性设计手册在内的、涉及可靠性设计理论的书籍,同时培养了大批可靠性专业设计和试验人才。近几年,我们在阅读这些专业图书的同时,还有幸拜读了由戴夫·S. 斯坦伯格(Dave S. Steinberg)著、约翰·威利(John Wiley & Sons)公司出版的系列专著:《电子设备振动分析(第3版)》、《电子设备冷却技术(第2版)》和《电子设备热循环和振动故障预防》。这套专著从耐振动设计和耐热设计的视角,立足于电子设备基本部件设计的简化分析计算,系统性地阐述了电子设备可靠性设计问题。它们的一个共同特点是,内容阐述立论严谨,由小到大,点面结合,层层深入,丝丝入扣,所提供的分析计算方法基本应用范例很多,工程实用性很强,实属不可多得的工具类图书。为此,我们在中航出版传媒有限责任公司(航空工业出版社)的大力支持下,组织将这3部专著一并翻译出版,奉献于此,如能对各位读者的可靠性工程设计工作有所助益,将不胜欣慰。

其中,《电子设备振动分析(第3版)》在分析了振动、冲击和声噪声载荷对电子设备结构要素,特别是PCB的动态影响之后,又在介绍延长PCB疲劳寿命的倍频程规则、缓冲和阻尼特性的基础上,阐述了电子设备的耐振动、冲击设计技术,特别是电子机箱的设计技术。分析了制造方法对设备可靠性的影响,以及振动夹具设计对振动试验特性的影响。最后介绍了环境应力筛选技术在提高电子设备可靠性特性中的应用。

《电子设备冷却技术(第2版)》阐述了高温和温度循环对电子设备元件、电路板和机箱的力、应力及疲劳寿命的影响。其内容包括电子设备机箱结构和电路板的冷却设计、元器件安装和冷却、强迫空气冷却、焊点和电镀通孔的热应力分析、热循环环境的疲劳寿命预计、电子系统瞬态冷却计算、热管和液体冷却系统、大型安装架和机柜的有效冷却以及有限元数学分析方法的应用。

《电子设备热循环和振动故障预防》详细分析了热循环条件下热胀系数的变化和振动条件下谐振频率对电子组件产生的位移、力和应力大小的影响。阐述了累积疲劳损伤的概念,并介绍了如何应用这种概念来计算各种电子元件和组件、元件引线和焊点,在热循环和振动环境中累积的不同疲劳组合下用掉的疲劳寿命,从而给出了预防电子设备热循环和振动故障的设计方法和寿命预计方法。

这几部专著的译本均承蒙资深专家丁其伯在技术上做了细致的通校。另外,王莉、马慧鹏和段玉思等同仁,为这几部专著的文图整理工作也付出了许多心力,在此一并表示谢意。唯囿于作者水平,译本中或仍有某些不当之处,敬请读者不吝指正。

中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所

2012年6月

原 版 前 言

多年来，电子工业界一直在努力通过降低电子元件工作温度和结合部位的温度，来改善电子系统的可靠性。与此同时，还存在一个要求减小这些电子组件的尺寸并降低它们的成本的强大压力。因为功率密度的增大像体积的减小一样迅速，这些发展也带来了一些问题。其结果是现在许多电子系统都要求采用更为独特的冷却技术，以及专用风扇、液体冷却、热管和热电冷却，以使结合部位温度保持在 100°C 以下。

MIL-HDBK-217 指出：有许多电子元件，当它们工作在其额定功率的 50% 左右时，如果它们的热点温度升高 20°C 的话，这些元件的故障率有可能增大一倍。因此电子设备制造商通过改善冷却技术来降低元件的热点温度，以提高这些系统的可靠性。但是降低元件的热点温度和结合部位温度，并不能使其故障率降低到所预期的水平。这就意味着，这些电子组件在工作时，还有其他力和机理会影响它们的可靠性。

多年来，对不同电子系统的许多故障的检查表明，除了高温之外，还有一些其他的重要因素也常常导致这些系统迅速失效。这些因素中，有些是对热胀系数在电子组件中如何产生高作用力和应力的机理缺乏了解，有些是对热循环应力和损伤、振动循环应力和损伤，以及它们对电子元件、电气引线、焊点和电镀通孔的影响缺乏了解。

电子系统中有许多故障是由于电气引线中热胀系数的差异很大，且缺乏恰当的约束或没有合理地消除应变引起的。还有许多故障是由于在使用振动环境下，当电路板的谐振频率受到激励时，在电路板中形成的动态位移过大引起的。因此，本书已增补了这些内容，以促进人们更好地了解其他故障机理对复杂电子系统可靠性的影响。并介绍了在热循环和振动循环环境中的累积损伤概念，以说明如何利用米勒（Miner）累积疲劳损伤定理，来近似计算工作在不同综合环境中的多种系统的损伤总量和疲劳寿命。

本书介绍有限元方法的一章，说明了可以利用这些方法来设计和分析电子设备，以改善其在恶劣的热环境和振动环境中的可靠性。增加的环境应力筛选（有时称为“振动和老练”试验）一章，说明了如何将电子设备暴露于热循环和振动之中，以改善电子硬件的可靠性，而又不需掉设备太多的有效寿命。

戴夫·S. 斯坦伯格

1991 年 9 月于加利福尼亚州西湖山庄

符 号 表

A	面积 ($\text{ft}^2, \text{in}^2, \text{cm}^2$)		$\text{in/s}^2, 980\text{cm/s}^2$)
a	热胀系数 ($\text{in/in/}^\circ\text{C}$); 长度 ($\text{ft}, \text{in}, \text{cm}$)	H	水 (H_2O) 的落差 (in, cm); 高度 ($\text{ft}, \text{in}, \text{cm}$)
b	长度 ($\text{ft}, \text{in}, \text{cm}$); 材料疲劳指数; 温差 ($^\circ\text{F}, ^\circ\text{C}$); 疲劳曲线上的直线斜率	h	对流因子 ($\text{Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}), \text{cal}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$); PCB 的厚度 (in)
Btu	英制热量单位, (单位) 热量	inHg	汞柱高度 (压力单位)
C	热容量 ($\text{Btu}/^\circ\text{F}, \text{cal}/^\circ\text{C}$)	inH ₂ O	水柱高度 (压力单位)
$^\circ\text{C}$	摄氏度 (温度单位)	I	惯性矩 (in^4)
cal	卡, (单位) 热量	IC	集成电路
cfm	立方英尺每分钟, 体积流量	J	体积因子 (无量纲)
CIC	铜-因瓦 (铁镍) - 铜	K	应力集中因子; 热导率 ($\text{Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}), \text{cal}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$)
C_p	比热容 ($\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}), \text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$); 损伤因子	K	热力学温度, K (开氏度)
D	尺寸 ($\text{ft}, \text{in}, \text{cm}$); 平板刚度因子 ($\text{lbf} \cdot \text{in}$); 损伤因子	K'	热导 ($\text{Btu}/(\text{h} \cdot ^\circ\text{F}), \text{cal}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$)
d	长度 ($\text{ft}, \text{in}, \text{cm}$)	L	长度 ($\text{ft}, \text{in}, \text{cm}$)
DIP	双列式封装, 电子元件	LCCC	无引线陶瓷芯片载体
e	(热) 辐射系数 (无量纲)	M	弯曲力矩 ($\text{lbf} \cdot \text{in}$)
e	自然常数, 2.71828	N	故障前疲劳循环数
E	弹性模量 (lbf/in^2)	N_R	雷诺数 (Re , 无量纲)
F	塑性变形	n	实际疲劳循环数
f	频率 (Hz); 视角因数或百分比因子 (无量纲)	P	力 (lbf); 功率谱密度 (G^2/Hz); 压力 ($\text{lbf/in}^2, \text{gf/cm}^2$)
$^\circ\text{F}$	华氏度 (温度单位)	P'	气压数 (无量纲)
ft	英尺	PCB	印制电路板
G	重量 ^① 流量 ($\text{lb}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2), \text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$); 重力加速度单位, 无量纲	PLCC	塑料引线芯片载体
g	重力加速度 ($32.3\text{ft/s}^2, 386$	PGA	针栅阵列
		PSD	功率谱密度 (G^2/Hz)

① 本书“重量”均为质量 (mass) 概念。——译者注

psi	lbf/in ² , 磅力每平方英寸	SF	安全因子, 无量纲
Q	功耗 (W, Btu/h、cal/s); 谐振时的传输率 (无量纲); 振动传输率 (无量纲)	S	斜率(°F/h, °C/h); 应力 (lbf/in ²)
q	每单位长度的热流 (Btu/(h · ft), cal/(s · cm))	T	热力学温度 (°R, K, 旧称绝对温度)
R	热阻 (h · °F/Btu, s · °C/cal, °C/W, °C · in/W); 气体常数 (53.3ft/°R, 2924cm/K); 米勒疲劳损伤比, 无量纲; 半径 (ft, in, cm); 比值, 实际疲劳循环数/故障前疲劳循环数	t	温度 (°F, °C)
°R	热力学温度, °R (兰氏度—兰金温标, 1°R = $\frac{5}{9}$ K)	TCE	热胀系数
r	PCB 上的相对位置	tanh	双曲线直线区间
RFI	射频干扰	T_i	时间 (h, min, s)
rms	均方根	Torr	大气压, mmHg
RTV	室温硫化, 室温固化	V	速度 (ft/min, cm/s)
		VP	速压 (inH ₂ O (英寸水柱), cmH ₂ O (厘米水柱))
		W	重量 (lb, g); 重量流量 (lb/h, lb/min, g/s); 宽度 (ft, in, cm)
		X	位移 (in)
		Z	气流流阻 (inH ₂ O (lb/min) ²); 位移 (in)

希腊符号

α	热胀系数 (in/in/°C) ^① ; 日光吸收系数 (无量纲)	μ	黏度 (lb/(ft · h), g/(cm · s))
β	体积弹性模量 (1/°R, 1/K)	ρ	密度 (lb/ft ³ , lb/in ³ , g/cm ³); 每单位面积质量 (lb · s ² /in ³)
Δ	温差或压差, 温度变化或压力变化	σ	斯忒藩—玻耳兹曼常数 (Btu/(h · ft ² · °R ⁴), cal/(s · cm ² · K ⁴)); 空气密度与标准密度比 (无量纲)
δ	翅片厚度 (ft, in, cm)	τ	时间常数 (h, min, s)
η	厚度效率因子 (%)		
θ	元件连接电阻 (°F/W、°C/W)		

① 按国家标准, in/in/°C即 in/(in · °C), 本书不作改动。——译者注

下 标 符 号

a	周围的，环境的	L	损失（损耗）
AG	气隙	LM(lm)	对数平均
ALT	高度	min	最小
av	平均的	n	净的
c	对流，元件，综合的	o	初始条件
cr	关键的	r	辐射的
Cu	铜	s	表面，静态的，太阳的
e	终端，等效的，环氧，环境	s - a	外表面
eff	有效的	SL	海平面
H	热，液压的	ss	稳态
hs	热点	std	标准
i	接合面，内部	t	总的
j	连接	trans	晶体管
jc	连接到壳体	v	速度

目 录

符号表	(I)
第 1 章 冷却要求的评价	(1)
1.1 热源	(1)
1.2 热传输	(1)
1.3 稳态热传递	(3)
1.4 瞬态热传递	(3)
1.5 飞机、导弹、卫星和航天飞机用电子设备	(4)
1.6 船舶和潜艇用电子设备	(5)
1.7 通信系统和地面保障系统用电子设备	(6)
1.8 个人计算机、微型计算机和微处理器	(7)
1.9 电子设备冷却规范	(8)
1.10 功耗的规定	(8)
1.11 尺寸单位和换算系数	(9)
第 2 章 电子机架的设计	(14)
2.1 成形板金属电子组件	(14)
2.2 带整体式冷板的浸焊机箱	(15)
2.3 带冷却翅片的石膏模和熔模铸造	(16)
2.4 压模铸造机箱	(17)
2.5 大型砂铸	(17)
2.6 大型机柜的挤压成形截面	(17)
2.7 电子机箱中的湿度考虑	(18)
2.8 敷形涂覆	(19)
2.9 密封电子机箱	(19)
2.10 标准电子机箱尺寸	(22)
第 3 章 机箱和电路板的传导冷却	(24)
3.1 稳态传导的集中热源	(24)
3.2 安装在支架上的电子元件	(25)
3.3 例题——安装在支架上的晶体管	(25)
3.4 稳态传导的均匀分布的热源	(29)
3.5 例题——PCB 上集成电路的冷却	(31)

3.6	带铝散热芯体的电路板	(32)
3.7	例题——沿 PCB 散热板的温升	(33)
3.8	如何避免带金属散热条的 PCB 的翘曲	(33)
3.9	带不均匀薄壁截面的机箱	(34)
3.10	例题——沿不均匀箱壁的热流动	(35)
3.11	二维模拟电阻网络	(38)
3.12	例题——在电源散热器上的二维传导	(38)
3.13	空气接合面两边的热传导	(43)
3.14	例题——螺接接合面两边的温升	(45)
3.15	例题——小气隙两边的温升	(46)
3.16	接合面两边在高空的热传导	(47)
3.17	高空气体释放	(49)
3.18	电路板边缘导向件	(50)
3.19	例题——PCB 边缘导向件两边的温升	(51)
3.20	通过金属盖板的热传导	(52)
3.21	辐射状热流	(52)
3.22	例题——通过圆柱壳体的温升	(53)
第4章	电子元件的安装和冷却技术	(55)
4.1	不同类型的电子元件	(55)
4.2	元件在 PCB 上的安装	(56)
4.3	例题——PCB 插件上的集成电路热点	(58)
4.4	如何安装大功率元件	(62)
4.5	例题——将大功率晶体管安装在散热板上	(64)
4.6	大功率元件的电气绝缘	(65)
4.7	例题——将晶体管安装在散热支架上	(66)
4.8	元件引线的应变消除弯角	(67)
第5章	自然对流和辐射冷却实用指南	(72)
5.1	自然对流如何求取	(72)
5.2	垂直板的自然对流	(74)
5.3	水平板的自然对流	(74)
5.4	通过自然对流传热的热量	(75)
5.5	例题——垂直板自然对流	(75)
5.6	自然对流条件下的湍流	(76)
5.7	例题——电子机箱的热损耗	(77)
5.8	自然对流冷却的翅片表面	(79)
5.9	例题——电子机箱的冷却翅片	(80)
5.10	自然对流模拟热阻网络	(81)

5.11	PCB 的自然对流冷却	(83)
5.12	密封气室的自然对流系数	(84)
5.13	例题——贴近箱壁的 PCB	(85)
5.14	自然对流的高空效应	(86)
5.15	例题——PCB 在高空的冷却	(87)
5.16	电子设备的辐射冷却	(89)
5.17	辐射视角因数	(92)
5.18	例题——混合电路的辐射热传递	(95)
5.19	例题——双场效应晶体管开关的连接温度	(97)
5.20	太空的辐射热传递	(98)
5.21	太空中 α/e 对温度的影响	(100)
5.22	例题——电子机箱在太空的温度	(101)
5.23	简化的辐射热传递方程	(101)
5.24	例题——电子机箱的辐射热损失	(102)
5.25	对流和辐射热传递的综合	(104)
5.26	例题——飞机座舱内的电子机箱	(104)
5.27	可靠性预计用的等效环境温度	(106)
5.28	例题——RC07 电阻器的等效环境温度	(107)
5.29	外表面有效辐射强度的增强	(108)
第 6 章	电子设备的强迫空气冷却	(110)
6.1	强迫冷却方法	(110)
6.2	风扇冷却气流的方向	(110)
6.3	静压和速压	(113)
6.4	用速位差表示的损失	(115)
6.5	例题——风扇入口的气流损失	(115)
6.6	电子机箱气流流阻曲线的建立	(116)
6.7	例题——风扇冷却的电子机箱	(117)
6.8	空心 PCB	(128)
6.9	电子设备的空气冷却风扇	(130)
6.10	空气过滤网	(132)
6.11	断路开关	(132)
6.12	静压损失表图	(133)
6.13	高空条件	(134)
6.14	例题——在 30000ft 高空的风扇冷却机箱	(135)
6.15	其他的对流系数	(138)
6.16	例题——TO-5 晶体管的冷却	(140)
6.17	外部气源的调节冷却空气	(141)

6.18	例题——冷却气流曲线的绘制	(141)
6.19	不同高度条件下的静压损失	(142)
6.20	例题——在 65000ft 高空的静压降	(144)
6.21	不同高度条件下的总压降	(149)
6.22	例题——通过电子机箱的总压损失	(149)
6.23	翅片冷板和热交换器	(150)
6.24	多翅片热交换器中的压力损失	(151)
6.25	翅片效率因子	(152)
6.26	例题——带翅片热交换器空心 PCB	(154)
6.27	不希望有的气流反向	(163)
6.28	迎面吹风冷却	(166)
6.29	例题——大功率机柜的迎面吹风冷却	(168)
6.30	高度对热交换器性能的影响	(173)
6.31	例题——不同高度和功率条件的热交换器温度	(174)
第 7 章	引线、焊点和电镀通孔的热应力	(178)
7.1	引言	(178)
7.2	航空电子完整性大纲	(178)
7.3	电子设备的热胀系数	(178)
7.4	例题——表面安装变压器引线和焊点中的热循环应力	(179)
7.5	热膨胀力和热膨胀应力的化简	(183)
7.6	通孔安装的 $X-Y$ 热膨胀应力	(184)
7.7	例题——通孔安装电阻的热应力	(184)
7.8	小型轴向引线元件的通孔安装	(188)
7.9	例题——小型玻璃二极管中诱发的轴向力	(188)
7.10	PCB 抗弯刚度对引线应力的影响	(190)
7.11	例题——如何减小 PCB 弯曲产生的引线力	(191)
7.12	Z 轴膨胀对电镀通孔可靠性的影响	(192)
7.13	例题——铜电镀通孔中的热膨胀应力	(193)
7.14	芯片载体的表面安装技术	(194)
7.15	例题——表面安装陶瓷芯片载体中的焊点应力	(196)
7.16	芯片载体引线中的弯曲应力	(202)
7.17	热膨胀引起的 DIP 引线的短路效应	(202)
7.18	Z 轴热膨胀对元件引线和通孔安装元件焊点的影响	(204)
7.19	例题——在 PCB 上的通孔安装变压器	(204)
7.20	焊点剪切应力的减小	(206)
第 8 章	在热循环和振动环境中疲劳寿命的预计	(209)
8.1	疲劳的产生	(209)

8.2	焊接的物理特性	(210)
8.3	缓慢的循环疲劳和快速的循环疲劳	(211)
8.4	热循环疲劳寿命的估算	(213)
8.5	例题——表面安装变压器焊点的疲劳寿命	(214)
8.6	引线和焊点中的振动疲劳	(215)
8.7	PCB 的谐振频率	(215)
8.8	例题——PCB 插板的谐振频率	(216)
8.9	希望的正弦振动的 PCB 谐振频率	(217)
8.10	例题——希望的正弦振动的 PCB 的谐振频率	(218)
8.11	随机振动疲劳寿命	(218)
8.12	例题——希望的随机振动的 PCB 谐振频率	(219)
8.13	米勒累积损伤疲劳比	(219)
8.14	例题——在几种不同的热循环环境中累积的损伤	(220)
8.15	在综合环境中工作的电子系统	(222)
8.16	例题——在振动和热循环环境中累积的疲劳	(222)
8.17	电源元件	(228)
8.18	例题——装在 PCB 上的电源变压器的随机振动疲劳和热循环疲劳的 综合	(228)
8.19	在低温下振动和热循环的叠加	(235)
8.20	表面安装 LCCC 器件的热循环疲劳寿命	(236)
8.21	例题——热循环的 LCCC 焊点疲劳	(236)
第 9 章	电子系统的瞬态冷却	(238)
9.1	简单的绝热系统	(238)
9.2	例题——变压器的瞬变温升	(238)
9.3	热容量	(239)
9.4	时间常数	(239)
9.5	加热循环瞬变温升	(240)
9.6	例题——散热器上的晶体管	(240)
9.7	不同时间常数的温升	(243)
9.8	例题——晶体管达到其稳定温度 95% 所需的时间	(244)
9.9	冷却周期瞬变温度变化	(245)
9.10	例题——晶体管和散热器冷却	(245)
9.11	温度循环试验的瞬态分析	(246)
9.12	例题——温度循环试验中的电子机箱	(249)
9.13	例题——降低过热点温度的方法	(253)
9.14	例题——对 PCB 上放大器的瞬态分析	(254)
第 10 章	急冷作业的特殊应用	(259)
10.1	新技术——要注意的方法	(259)

10.2	热管	(259)
10.3	热管中的性能降低	(260)
10.4	典型热管性能	(261)
10.5	热管应用	(262)
10.6	直接和间接液体冷却	(264)
10.7	强迫液体冷却系统	(265)
10.8	液体冷却系统用泵	(267)
10.9	储压箱和膨胀箱	(267)
10.10	液体制冷剂	(267)
10.11	简单液体冷却系统	(268)
10.12	间接液体冷却用元件的安装	(268)
10.13	强迫液体冷却基本流动方程	(269)
10.14	例题——水冷冷板上的晶体管	(272)
10.15	固态热电冷却	(278)
第11章	大型安装架和机柜的有效冷却	(280)
11.1	大型控制柜的诱发通风冷却	(280)
11.2	大型机柜的气流损失	(280)
11.3	上浮压力和压力损失	(281)
11.4	例题——大型机柜的诱发通风冷却	(281)
11.5	有多个气流隔层的大型机柜的自然冷却	(284)
11.6	例题——有诱发通风的机柜中的冷却空气的温升	(285)
11.7	诱发通风系统的警告说明	(287)
11.8	有叠放式抽斗的高机柜	(288)
11.9	例题——有7层叠放式抽斗的控制柜的诱发通风冷却	(289)
11.10	集装在密封机壳内的电子设备	(292)
11.11	在大型控制柜内的小型封装模块	(294)
11.12	例题——密封在抗射频干扰壳体内的小型PCB	(296)
11.13	小型封装模块测试数据	(300)
11.14	串联和并联气流风道内的压力损失	(303)
11.15	例题——串联和并联气流网络	(303)
第12章	建立数学模型的有限元方法	(308)
12.1	引言	(308)
12.2	有限元分析的步骤	(309)
12.3	奇异性	(310)
12.4	建立引线、焊点和电镀通孔的模型	(311)
12.5	机架和电路板的建模方法	(318)
第13章	环境应力筛选技术	(322)
13.1	引言	(322)

13.2	在热循环和振动期间累积的损伤·····	(323)
13.3	处于热循环和振动环境中的系统·····	(323)
13.4	单轴和多轴振动·····	(324)
13.5	电子机架内的电路板的取向·····	(324)
13.6	制定有效环境应力筛选大纲所需要的参数·····	(325)
13.7	例题——建立商用电子系统的有效筛选·····	(327)
13.8	例题——建立军用电子系统的有效筛选·····	(329)
参考文献·····		(333)

第1章 冷却要求的评价

1.1 热源

为完成各种奇特的功能，实际上全世界每种大型产业的电子设备都取决于电流和对电流的控制。每当电流在阻性元件内流动时，元件总会发热。电流或电阻的增大会使该元件发热量上升。电流流动有多久，元件的发热就有多久。发热时，阻性元件的温度也随之升高，除非能够找到使热量离开该元件的流动通道。如果热流通道不好，温度就可能继续升高，直至该阻性元件被烧坏或电流停止流动。如果热流通道是好的，温度也可能上升，直至稳定在某一温度点时为止，在该温度点上，离开元件的热量等于电流在该元件上流动时产生的热量。

在电阻器、二极管、集成电路（IC）、混合电路、晶体管、微处理器、继电器、双列式封装（DIP）、超大规模集成电路（VHSIC）、无引线陶瓷芯片载体（LCCC）和塑料引线芯片载体（PLCC）一类电子元件用元器件中，电流流动时都会产生热量。

电子元件和电子系统的尺寸正在快速地减小，而它们的复杂性和能力却继续以惊人的速度增加。此外，功率在增大而体积在缩小。这就使功率密度得以奇迹般地增大，其结果是温度快速上升，从而使故障数大大增加。

因此必须控制每一个元件的温度以保证得到一个可靠的电子系统。如果工作温度升得太高，电子设备就可能功能失常。当温升较小时，功能失常可能引起简单的超差情况，而当温升较大时，功能失常可能造成严重故障。

热量总是由热区流向冷区的。通常电子元件总是热源，因此电子元件通常也总是电子系统内的最热点（在瞬态条件下以及温度循环试验期间，电子元件也可能不一定是系统内的最热点）。因此，在电子系统中的基本热传递问题是，通过提供良好的热流通道将热源引向终端热沉（通常是周围的空气），来消除内部产生的热量。

图1-1所示为一个战斗机用的平视显示器的电子机箱。

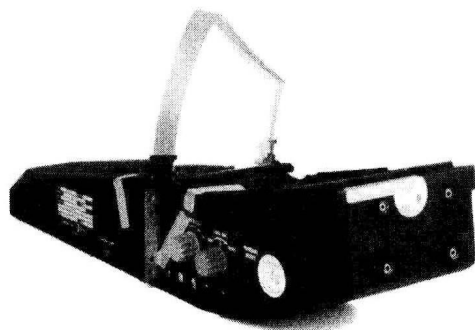


图1-1 战斗机平视显示器的电子机箱
（系联合飞机公司诺顿分部提供）

1.2 热传输

能够传输热量的基本方法有三种：传导、对流和辐射。了解这些基本的热传递方法的