

电子设备热循环 和振动故障预防

Preventing Thermal Cycling
and Vibration Failures in Electronic Equipment

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

航空工业出版社

电子设备热循环 和振动故障预防

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

航空工业出版社
北 京

内 容 提 要

本书旨在说明如何通过手工计算,去设计和分析评价低成本、高可靠性的电子系统。本书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于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。全书内容深入浅出、点面结合,其设计方法的基本应用范例很多,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作为设计参考书的工具书。

图书在版编目 (C I P) 数据

电子设备热循环和振动故障预防/(美)斯坦伯格
(Steinberg, D. S.) 著;常勇,丁其伯译. --北京:航
空工业出版社,2012.6

书名原文: Preventing Thermal Cycling and
Vibration Failures in Electronic Equipment
ISBN 978-7-5165-0028-6

I. ①电… II. ①斯…②常…③丁… III. ①电子设
备-热力学循环-故障-预防②电子设备-机械振动-故
障-预防 IV. ①TN07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 138162 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2012-1574

Copyright © 2001 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition, entitled *Preventing Thermal Cycling and Vibration Failures in Electronic Equipment*, ISBN 0-471-35729-4, 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.

电子设备热循环和振动故障预防

Dianzi Shebei Rexunhuan he Zhendong Guzhang Yufang

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 6 月第 1 版

2012 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 13.75

字数: 334 千字

印数: 1—3000

定价: 68.00 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

To my wife Annette and to my two daughters
Cori and Stacie

献给我的妻子安妮特以及两个女儿
科里和斯泰西

原版前言

本书提供的信息最初是为帮助提高由民用和军用电子工业使用的汽车、飞机、导弹、通信、娱乐电子设备的可靠性而开发的。这些团体均希望他们的电子设备在保持采购和保障费用不断下降的同时，其完备性和可靠性获得引人注目的改善。完成这些目标的一个方法就是执行汽车和航电系统完整性大纲或航电系统完整性大纲（AVIP）。这样一个大纲的要求已经在美国军用规范 MIL - A - 87244 文件中提出，以保证电子设备在全生命周期内能达到所希望的可靠性能。这一文件涵盖了若干关键领域，并推荐了一些有助于更好地理解由高温、热循环、振动、冲击和湿度引起的各种故障机理的详细分析和调查研究。调查研究的领域包括电子器件、焊点、电路板、连接和组装。

对许多电子设备故障的调查已经表明：大多数故障在本质上属于机械故障。通常，它们包括焊点、引线、器件、电路板、气密密封、黏结面、连接器和电缆的破裂。在制造工艺粗糙、设计实践欠佳和维修不当的条件下，这些故障常常是由综合的热、振动、冲击、湿气、沙尘环境的各种组合引起的。这些领域常常引起射频干扰（RFI）和电磁干扰（EMI）问题。

在过去 30 年里，本书提出的方法已经成功地应用于：在各种严酷环境的不同组合下工作的、各种各样的大大小小的电子系统。在各种环境下出故障之前，可用于评价和试验成熟的电子系统的机会很多。在许多这一类大纲中，可靠性是极为重要的，因为它涉及许多人的生活。为保证设计和制造方法的可靠性，大量的样机模型和后来的生产模型被制造、测量，并试验到破坏为止。如同因为复杂性的增加，设备成本开始迅速增加一样，电子设备制造商开始考虑在不降低可靠性的情况下降低这些成本的方法。

如今工业界的先驱们已经大大降低了他们的电子设备的成本，而同时又提高了他们的可靠性。这是通过使用强大的高速计算机和新的软件程序实现的。这些新计算机能够在几分钟时间内完成任务并解决复杂的问题，而这在以前几乎是不可能的，或者要花费太多的时间和金钱进行研究。

计算机的运用如此成功，以至于现在有些更高级的管理人员相信：实际上在这些计算机中能够找到所有技术问题的答案。某些人相信：已经没有任何必要为新的设计去制造和试验样机模型，以获取在严酷环境中工作的关键的可靠性数据。他们预料：通过取消新产品的模型制造和试验能够节省大量经费。新的波音 777 飞机就是一个突出的事例，这种飞机完全是用计算机设计的，而没有通常的样机模型的制造和试验。

许多管理人员并不了解波音公司已经利用它们自己的许多类似飞机的经验开发了巨大

的数据库，并且花费数百万美元从其他飞机制造商那里购置了数据库。这些信息可以通过计算机网络从其设计和试验工程师那里获取，这样，新的、类型相似的飞机所包含的风险就大大地降低了。

当独特的新设计被推出时，或者预期的环境非常严酷时，或者预期经受几种特殊的组合条件时，未经某种方式进行试验以验证产品可靠性就进行大规模生产并不是一个好的政策。这同样适用于新材料或新工艺的使用，或需要明显降低重量时。应进行某些类型的试验以保证产品的完整性。

本书的目的是说明如何在没有计算机帮助的情况下，通过手工计算，去设计、分析评价成本较低的和在严酷环境下可靠性得以提高的电子系统。所说明的方法全部经过在样机模型上进行的诸多试验的验证，以及在生产硬件上进行的鉴定试验的验证。对于大型复杂系统来说，一个好的计算机解决方法，总是优于快速的手工计算。但使用计算机的人们都知道 GIGO（无用输入无用输出）的说法。当你困倦时，以及必须将数百万个数据点输入计算机程序时，是很容易出错的。当正在生成一个计算机模型时，一次错误的输入数据能够毁掉一个月甚至几个月的努力工作。许多计算机用户常想寻找一种快速而简单的方法，来确定在他们的工作中是否出现了严重错误。本书中提出的快速方法常常用于这样的目的。计算机用户将这些快速方法称为睿智检查。

现场故障经验和试验经验已经证明：结构每经受一次应力反转，就会用掉它的部分寿命。这些应力反转或者应力循环，通常是由日常生活中的热循环、振动和冲击条件引起的。每次给诸如计算机、收音机、电视、移动电话、汽车或飞机一类的电子系统接通电源时，温度会升高。当断开电源时，温度会下降。这就形成了热循环应力。每当计算机、收音机或电视从制造厂发运给用户时，或者每当飞机或汽车用于运输时，它们就经受了振动。这就形成了许多振动应力循环。每个应力循环都会用掉系统承受载荷的结构要素的一部分疲劳寿命。当总的应力循环数达到系统最薄弱要素的临界水平时，就会出现故障。

本书的重点在于调查和分析三个重要的领域，以保证划算并可靠的电子系统。所调查研究的这些领域包括：

- (1) 了解热胀系数（TCE）的变化对电子组件在热循环环境下生成的位移、力和应力的会产生多大影响，以及这些因素对各种结构要素的疲劳寿命会产生多大影响。
- (2) 了解谐振条件对电子组件在振动和冲击环境下生成的动态位移、力、应力和疲劳寿命会产生多大影响。
- (3) 了解损伤累积的概念，以及能够如何使用这种概念来确定各种电子器件和组件由在热循环和振动环境中累积的不同的疲劳组合用掉的近似的疲劳寿命。

戴夫·S. 斯坦伯格

2001 年 1 月于加利福尼亚州西湖山庄

符 号 表

<i>A</i>	area (in ²), 面积 (in ²); amplification (dimensionless ratio), 放大倍数 (无量纲)		
<i>a</i>	length (in), 长度 (in)	<i>F</i>	force (lbf), 力 (lbf)
ASIC	application - specific integrated circuit, 专用集成电路	<i>f</i>	frequency (Hz), 频率 (Hz)
<i>B</i>	length (in), 长度 (in)	<i>f_n</i>	natural frequency (Hz), 固有频率 (Hz)
BGA	ball grid array, 球格阵列	FEM	finite element method, 有限元法
<i>b</i>	fatigue exponent, 疲劳指数; width (in), 宽度 (in)	<i>G</i>	shear modulus (lbf/in ²), 剪切模量 (lbf/in ²);
<i>C</i>	dynamic constant, 动态常数; length (in), 长度 (in)		acceleration in gravity units (dimensionless), 重力单位加速度 (无量纲)
CG	center of gravity, 重心	<i>g</i>	acceleration of gravity (386in/s ²), 重力加速度 (386in/s ²)
<i>c</i>	distance from neutral axis to outer fiber (in), 从中轴到外层纤维的距离 (in); damping coefficient (lbf · s/in), 阻尼系数 (lbf · s/in)	<i>H</i>	horizontal force (lbf), 水平力 (lbf)
<i>D</i>	plate stiffness factor (lbf/in), 平板刚度系数 (lbf/in); diameter (in), 直径 (in)	<i>h</i>	height (in), 高度 (in); thickness (in), 厚度 (in)
dB	decibel, 分贝	Hz	frequency (cycle/s), 频率单位 (赫 [兹], 循环数/秒 (cycle/s))
<i>D_{xy}</i>	plate torsional stiffness factor (lbf · in), 平板扭转刚度系数 (lbf · in)	<i>I</i>	area moment of inertia (in ⁴), 惯性矩 (in ⁴)
<i>d</i>	diameter (in), 直径 (in); length (in), 长度 (in)	<i>I_m</i>	mass moment of inertia (lbf · in · s ²), 转动惯量 (lbf · in · s ²)
DIP	dual - in - line package, 双列直插式封装	<i>J</i>	torsional form factor (in ⁴), 扭转方式因子 (in ⁴); shape of electrical lead wire, 电气引线形状
<i>E</i>	modulus of elasticity (lbf/in ²), 弹性模量 (lbf/in ²)	<i>K</i>	linear spring rate (lbf/in), 线弹簧刚度 (lbf/in); stiffness ratio (dimensionless), 刚度比 (无量纲); stress concentration factor, 应
ESS	environmental stress screen, 环境		

	力集中因子	R_n	fatigue - cycle ratio (dimensionless), 疲劳循环比 (无量纲)
L	length (in), 长度 (in)	R_c	damping ratio (dimensionless), 阻尼比 (无量纲)
LCCC	leadless ceramic chip carrier, 无引线陶瓷芯片载体	R_ω	frequency ratio (dimensionless), 频率比 (无量纲)
M	bending moment (lbf · in), 弯矩 (lbf · in)	rms	root mean square, 均方根
m	mass (lbf · s ² /in), 质量 (lbf · s ² /in)	r	radius (in), 半径 (in); relative position factor, 相对位置因子
N	number of fatigue cycles to fail, 故障前疲劳循环数	S	stress (lbf/in ²), 应力 (lbf/in ²)
N_0^+	number of positive zero crossings (Hz), 正零位交越数 (Hz)	S_b	bending stress (lbf/in ²), 弯曲应力 (lbf/in ²)
n	actual number of fatigue cycles accumulated, 实际累积的疲劳循环数	S_{CR}	critical stress (lbf/in ²), 临界应力 (lbf/in ²)
P	force (lbf), 力 (lbf)	S_e	endurance limit stress (lbf/in ²), 耐久极限应力 (lbf/in ²)
P , PSD	power spectral density (G ² /Hz), 功率谱密度 (G ² /Hz)	SMD	surface - mounted device, 表面安装器件
PCB	printed circuit board, 印制电路板	TCE	thermal coefficient of expansion (in/in/°C) ^① , 热胀系数 (in/in/°C)
PGA	pin grid array, 针格阵列	t	temperature (°C), 温度 (°C); thickness (in), 厚度 (in); time, 时间
Q	transmissibility (dimensionless ratio), 传输率 (无量纲); coupled transmissibility, 耦合传输率 (无量纲)	V	velocity (in/s), 速度 (in/s); vertical force (lbf), 垂直力 (lbf)
q	uncoupled transmissibility (dimensionless ratio), 非耦合传输率 (无量纲)	W	weight (lbf), 重量 (lbf)
R	ratio (Q/q), 比值 (Q/q); radius (in), 半径 (in); stress ratio (dimensionless), 应力比 (无量纲); sweep rate (oct/min), 扫描速率 (oct/min); miner's cumulative damage ratio (dimensionless), 米勒累积损伤比 (无量纲)	X	coordinate axis, 坐标轴; displacement (in), 位移 (in)
		Y	coordinate axis, 坐标轴; displacement (in), 位移 (in)
		Z	coordinate axis, 坐标轴; displacement (in), 位移 (in)

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

希腊符号

α	thermal coefficient of expansion (in/in/°C), 热胀系数 (in/ in/°C); angle (radians), 角	Δ	泊松比 (无量纲) difference, 差
	位移 (rad)	Ω	angular velocity (radians/sec), 角速度 (rad/s)
δ	displacement (in), 位移 (in)	σ	relation to rms stress, 均方根相 对应力
θ	angle (radians), 角位移 (rad)		
μ	Poisson's ratio (dimensionless),		

下标符号

a	aluminum, 铝	min	minimum, 最小
AV	average, 平均值	n	natural, 固有的, 自然的
b	bending, 弯曲	out	output or response, 输出或响应
c	component, 元件; ceramic, 陶 瓷	ST	shear tearout, 剪切撕裂
d	dynamic, 动态的	st	static, 静态的
e	endurance, 耐久性; epoxy, 环 氧树脂	t	tension, 拉力, 张力
in	input, 输入	tu	tensile ultimate, 拉伸极限
max	maximum, 最大	ty	tensile yield, 拉伸形变
		y	yield, 形变, 屈服
		0	maximum, 最大

目 录

符号表	(I)
第 1 章 电子系统故障物理特性	(1)
1.1 不同类型电子组件中的故障	(1)
1.2 分析和评价的领域	(1)
1.3 热循环环境对引线和焊点的影响	(2)
1.4 振动环境对引线和焊点的影响	(3)
1.5 可靠性的不同观点	(3)
1.6 焊点中的蠕变和应力消除	(4)
1.7 交变应力循环和温度对焊点的影响	(5)
1.8 PCB 结构自身的故障	(7)
1.9 PCB 电镀通孔中的故障	(8)
1.10 散布对结构材料疲劳寿命的影响	(8)
1.11 制造公差对疲劳寿命的影响	(9)
1.12 由热循环损伤和振动损伤引起的综合损伤	(10)
第 2 章 热膨胀位移、力和应力	(13)
2.1 使结构要素工作更灵活以降低力和应力	(13)
例题 1: 铝条中的轴向热膨胀	(14)
例题 2: 降低铝条内的轴向热膨胀力	(15)
2.2 由 PCB 中的 $x-y$ 热胀差引起的引线弯曲	(16)
2.3 电气引线的有效长度	(17)
2.4 内力迫使带固定端的引线弯曲和侧向移动	(17)
例题: 通孔安装元器件引线和焊点中的热循环位移、力和应力	(18)
2.5 安全比后悔更好	(21)
第 3 章 梁和其他简单结构的振动	(22)
3.1 振动环境中产生的动态力	(22)
例题: 变压器引线中的振动力和应力	(23)
3.2 简单结构固有频率确定	(23)
例题: 有端部质量的悬臂梁的固有频率	(24)
3.3 位移与频率和重力单位 (G 值) 的关系	(25)
例题: 根据频率和加速度求取位移	(26)
3.4 带集中载荷的梁的动态力和位移	(27)

例题：求取作用在梁上的动态位移和动态力的两种方法	(27)
3.5 匀质梁结构的固有频率	(28)
例题：钢梁和铝梁的固有频率	(29)
第4章 印制电路板和平板的振动	(31)
4.1 不同印制电路板的特性	(31)
4.2 振动对电路板边缘条件的影响	(31)
4.3 印制电路板的固有频率	(32)
例题：求取插入式电路板的固有频率	(34)
4.4 影响各种结构和平板传输率 Q 的条件	(34)
4.5 不同电子结构传输率 Q 的估算	(37)
例题：固有频率和输入 G 值对 Q 的影响	(37)
4.6 特型电路板的固有频率	(38)
例题：矩形平板的固有频率	(42)
第5章 热循环和振动环境中疲劳寿命的估算	(43)
5.1 电子结构中的疲劳故障和疲劳损伤	(43)
5.2 疲劳特性与疲劳曲线斜率的关系	(44)
例题1：PCB 上电感的振动疲劳寿命的变化	(45)
例题2：试验时间和加速度值变化的影响	(48)
5.3 焊点的热循环疲劳指数斜率 b	(48)
例题1：建立自动验证的寿命试验大纲	(49)
例题2：器件的热诱发力、应力和疲劳寿命	(49)
第6章 预防电子系统振动损伤的倍频程规则、缓冲器、阻尼器和隔振器	(55)
6.1 PCB 及其支撑结构之间的动态耦合	(55)
例题：振动对安装在电路板上的继电器的影响	(59)
6.2 利用缓冲器稳定严酷振动和冲击环境中的 PCB	(61)
例题：选择缓冲器解决 PCB 的振动问题	(63)
6.3 增加 PCB 的阻尼以降低谐振时的传输率 Q	(64)
6.4 材料阻尼特性	(64)
6.5 结构阻尼特性	(65)
6.6 黏弹材料的阻尼特性	(65)
6.7 振动隔离系统	(67)
6.8 精密仪表减振器的匹配安装	(68)
6.9 倍频程规则应用于隔离系统	(69)
例题：推荐带隔离器的系统使用的频率	(69)
第7章 热膨胀在轴向元器件引线中形成的位移、力和应力	(71)
7.1 安装在电路板上的电子器件	(71)
7.2 评价作为框架和排架的元器件引线	(71)
7.3 用于求取引线位移和力矩的叠加法	(72)

7.4	用于求取引线位移和力矩的应变能法	(75)
7.5	拉伸和弯曲时电气引线的有效长度	(78)
	例题: 在使用轴向引线进行表面安装和通孔安装的 ASIC 中的 热膨胀位移、力和应力	(79)
7.6	电气引线中的热循环弯曲应力	(81)
7.7	引线热循环的近似疲劳寿命	(81)
7.8	焊点热循环应力和疲劳寿命近似值	(81)
第 8 章	设计用于正弦振动的电子设备	(83)
8.1	正弦振动中的基本故障模式	(83)
8.2	具有非匀质横断面的梁结构	(84)
	例题: 具有非匀质断面的底座的固有频率	(85)
8.3	复合层压组合结构	(86)
	例题: 复合层压梁的固有频率	(86)
8.4	几何应力集中因子	(87)
	例题 1: 弯曲凹轴的疲劳寿命	(88)
	例题 2: 求解达到 10000h 寿命的输入振动量值	(93)
8.5	PCB 器件尺寸、位置和取向对疲劳寿命的影响	(93)
8.6	PCB 对于正弦振动的所希望的固有频率	(94)
	例题: 求解所希望的 PCB 的最低固有频率	(96)
8.7	正弦扫频振动通过谐振点时造成的损伤	(97)
	例题 1: 求取正弦扫频振动用掉寿命的百分比	(98)
	例题 2: 在两个频率之间扫频的时间	(99)
8.8	避免插入式 PCB 边缘导向件的松动	(99)
第 9 章	电子线路设计的随机振动评估	(101)
9.1	引言	(101)
9.2	如何区分随机振动与正弦振动	(102)
9.3	随机振动功率谱密度曲线	(103)
	例题: 求取输入 rms 加速度值	(103)
9.4	用分贝数表示斜率	(103)
9.5	求取成形随机振动输入曲线下的面积	(104)
	例题: 根据 PSD 曲线下的面积求取均方根输入 G 值	(105)
9.6	寻找输入 PSD 曲线的断点	(105)
	例题: 求取断点处的 PSD 值	(106)
9.7	随机振动高斯概率分布函数	(106)
9.8	利用三段技术分析随机振动	(107)
9.9	瑞利概率分布函数	(108)
9.10	单自由度系统对随机振动的响应	(108)
9.11	随机振动的正零位交越数	(109)

9.12	单自由度系统的动态位移·····	(109)
9.13	插入式 PCB 对随机振动的响应·····	(110)
	例题 1: 插入式 PCB 的动态响应和位移·····	(110)
	例题 2: 利用三段技术和米勒累积损伤比估算疲劳寿命·····	(110)
9.14	估算随机振动疲劳寿命的简化方法·····	(113)
	例题: 简化的随机振动疲劳寿命分析·····	(114)
9.15	用于随机振动的所希望的 PCB 的固有频率·····	(114)
	例题: 求取所希望的 PCB 的最低固有频率·····	(115)
9.16	忽略输入均方根 G 值而集中考虑输入 PSD 量值·····	(116)
第 10 章	随机振动和热循环疲劳损伤的综合·····	(118)
10.1	引言·····	(118)
	例题: 电子线路的热循环和振动疲劳寿命·····	(118)
10.2	引线 and 焊点中的随机振动疲劳损伤比·····	(119)
10.3	引线 and 焊点中累积的总的振动疲劳损伤比·····	(124)
10.4	引线 and 焊点中的热循环疲劳损伤·····	(124)
10.5	焊点中累积的热循环疲劳总损伤·····	(128)
10.6	米勒引线振动损伤加上引线热循环损伤·····	(128)
10.7	米勒焊点振动损伤加上焊点热循环损伤·····	(129)
10.8	为提高焊点疲劳寿命而建议的设计更改·····	(129)
10.9	为提高焊点疲劳寿命而建议的结构更改·····	(129)
第 11 章	表面安装器件中的热循环故障·····	(131)
11.1	引言·····	(131)
11.2	用于评价小型 LCCC 焊点中的热膨胀力和应力的平衡方程·····	(132)
	例题 1: 快速热循环条件下小型表面安装 LCCC 上的焊点中的 力、应力和疲劳寿命·····	(133)
	例题 2: 为减小力和应力而增加的柔软 J 形引线·····	(135)
11.3	J 形铜引线中的弯曲应力·····	(136)
11.4	求取带有许多电接触件的元器件引线和焊点中的热循环力和 应力的简化分析方法·····	(137)
	例题: 求取表面安装器件焊点中的热循环力和应力的简化方法·····	(137)
11.5	评价在热循环环境下表面安装球格阵列上焊点中的力和应力·····	(139)
	例题: 球格阵列中的焊点力和应力·····	(139)
第 12 章	动态力和 PCB 位移对器件引线和焊点中的应力和疲劳寿命的影响·····	(142)
12.1	安装在 PCB 上由引线支撑的重、大器件·····	(142)
	例题: 安装在 PCB 上的变压器暴露于振动和冲击条件下时, 引线和 焊点中的力、应力和疲劳寿命·····	(144)
12.2	振动期间 PCB 的弯曲位移在器件引线和焊点中产生相对运动和应力·····	(148)
	例题: 振动时由于器件随 PCB 弯曲的相对运动而在变压器产生的	

引线 and 焊点中的动态力、应力和疲劳寿命	(150)
12.3 引线上上下跳动的振动器件的力、应力和疲劳寿命	(154)
例题：在引线上跳动的器件的振动疲劳寿命	(156)
第 13 章 安装在 PCB 上的长器件、高器件和小器件的疲劳寿命	(159)
13.1 靠近 PCB 自由边安装的长器件的振动疲劳寿命	(159)
例题：靠近 PCB 自由边安装的长器件的引线 and 焊点中的相对动态 位移、应力和疲劳寿命	(161)
13.2 在引线中增加应变消除措施以降低动态力和应力	(164)
例题 1：将上一例题的引线中增加应变消除措施后，求取相同的 5.5G 的峰值正弦振动输入下的新的疲劳寿命	(164)
例题 2：当 PCB 自由边的相对边由支撑边改为固定边时，求取 长器件的振动疲劳寿命	(166)
13.3 改进 PCB 的结构从而提高疲劳寿命	(168)
13.4 在 PCB 上安装的高大器件的振动疲劳寿命	(170)
例题：高高地安装在 PCB 之上的晶体管的随机振动和热循环疲劳寿命 ..	(170)
13.5 通孔安装在 PCB 上的有小型轴向引线器件的问题	(175)
例题：小型轴向引线器件中的热膨胀故障	(175)
第 14 章 电气触点中的磨损和接触表面的侵蚀	(177)
14.1 引言	(177)
14.2 磨损侵蚀和氧化之间的区别	(178)
14.3 影响长连接器接触件疲劳寿命的参数	(180)
14.4 提高现有生产硬件连接器疲劳寿命的方法	(180)
14.5 润滑对连接器接触件疲劳寿命的影响	(182)
14.6 连接器接触件的振动疲劳寿命试验大纲的结果	(183)
例题：估算音叉式接触件的振动疲劳寿命	(185)
第 15 章 故障和故障分析的历史案例	(187)
15.1 引言	(187)
15.2 自旋陀螺小悬臂轴中的故障	(187)
15.3 铝铸件中的深度穿透裂纹故障	(188)
15.4 带聚亚胺酯涂层的片状陶瓷电阻器和电容器的故障	(189)
15.5 表面安装变压器在热循环和振动试验中的故障	(191)
15.6 通孔齐平安装变压器引线中的故障	(192)
15.7 小型轴向引线通孔安装器件中的故障	(193)
15.8 微处理器引线 and 焊点中的热循环故障	(194)
15.9 通过降低热胀系数来减少器件故障	(194)
15.10 在一个焊点故障中有错的一方赢得了数百万美元的官司	(195)
15.11 在热循环和振动中楔形压块为什么常常会变松	(197)
15.12 由振动中的颤振引起的继电器故障问题	(197)
参考文献	(199)

第1章 电子系统故障物理特性

1.1 不同类型电子组件中的故障

电子系统在制造和组装过程中使用了许多不同的金属和塑料。要生产出划算并且可靠的产品，就必须了解这些材料的物理特性以及它们的工作环境。在电子系统中，与器件温度过度相关的故障在所有故障中比例最高。如果通电时有器件开始冒烟，可以得出结论：系统中存在温度过高。半导体器件通常是由其焊接温度能力额定的，其典型值在 150 ~ 200℃ 范围内变化。安全因子通常适用于可将最大允许焊接温度限定为低于其最高制造额定值 50℃ 之处。

在某些应用中，例如，在 20000 ~ 30000ft^① 的深度钻油，可用于电子装置冷却剂的是其周围温度约为 200℃ 的泥浆。用于石油钻探设备的电子装置必须具有很高的额定值，因此通常使用额定值为 200℃ 的器件。这些系统必须保持很低的电力消耗，以使焊接温度保持在 204℃ 以下。当钻头钻过石块时，电子装置部分能够经受高达 $20G_{\text{rms}}$ 的随机振动量值。如果电子装置出现故障，就必须拆除全部 20000 ~ 30000ft 长的钻探管道，以更换有缺陷的电子装置部分。然后还必须将这些管道重新装入钻孔内。这是一个非常耗时也很费钱的过程，因此电子装置必须可靠以节省时间和金钱。

用于军事和航空航天器件的焊接温度通常限定为 100℃ 左右。为了达到用于洛克希德的 F-22 新战斗机的极高的可靠性要求，半导体器件的焊接温度被限定为 65℃ 左右。

来自美国空军的硬件故障率研究已经证明：军用飞机电子系统中的全部故障，约有 40% 是来自飞机各处安装的各种各样的电连接器，此外约有 30% 发生在电缆与线束的连接处，20% 是在电子器件中发现的，还有 10% 是由其他因素引起的。对军用飞机的环境故障率的研究已经证明：全部电子设备故障中约有 55% 是与热事件（如高温和热循环）相关的。另外，约有 20% 的故障是由振动引起的、20% 的故障是由湿度引起的，还有 5% 的故障是由沙尘引起的。

汽车制造商设计他们的发动机舱内的电子设备时必须使其能在 140℃ 的环境温度下连续工作。电子设备必须防止在暴雨时从街道上溅起的、能够在各种电子器件上形成水蒸气的雨水。

1.2 分析和评价的领域

要对电子系统进行分析 and 评价，必须获得电子系统中最关键的机械结构要素的位移、

① 1ft = 0.3048m。——译者注