



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

电接触理论、 应用与技术

**Electrical Contacts
Fundamentals, Applications
and Technology**

[加] 米兰科·布朗诺维克 (Milenko Braunovic)

[白俄] 瓦乐里 V. 康奇兹 (Valery V. Konchits) 著

[俄] 尼克莱 K. 米西金 (Nikolai K. Myshkin)

许良军 芦娜 林雪燕 孔志刚 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电接触理论、应用与技术

Electrical Contacts Fundamentals, Applications and Technology

[加] 米兰科·布朗诺维克 (Milenko Braunovic)

[白俄] 瓦乐里 V. 康奇兹 (Valery V. Konchits) 著

[俄] 尼克莱 K. 米西金 (Nikolai K. Myshkin)

许良军 芦娜 林雪燕 孔志刚 译



机械工业出版社

本书分为3篇：第1篇为电接触基础，讲述了电接触的结构、机理及基本理论，电摩擦的基本形式与原理，常用电接触材料的基本性能和应用，电接触可靠性等；第2篇为电接触应用，介绍了电力连接器的结构、故障机理及预防措施，电子连接器的材料、结构、故障机理及预防措施等，从电摩擦学的角度阐述了在各种条件（参数）下的滑动电接触特性及机理；第3篇为诊断与监测技术，介绍了摩擦表面的电检测、评估方法，以及电网的监测技术。本书引用了大量相关领域近年来的研究成果，并附有大量参考文献，使读者在掌握电接触原理及应用的同时，也能获得对该领域研究背景和发展趋势的了解，为进一步的深入研究提供了便利。本书可作为电气设备科研与设计人员的参考书，也可作为高校机电自动化等相关专业高年级本科生和研究生的参考用书。

Electrical Contacts Fundamentals, Applications and Technology/by Milenko Braunovic, Valery V. Konchits, Nikolai K. Myshkin/ISBN: 9781574447279

Copyright © 2007 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版，并经其授权翻译出版。版权所有，侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-3672 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电接触理论、应用与技术/ (加) 布朗诺维克 (Braunovic, M.) 等著; 许良军等译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Electrical Contacts Fundamentals, Applications and Technology

ISBN 978-7-111-52424-3

I. ①电… II. ①布…②许… III. ①电触头 IV. ①TM503

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 301220 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张俊红 责任编辑: 张俊红 版式设计: 霍永明

责任校对: 陈延翔 封面设计: 马精明 责任印制: 李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 35.5 印张 · 796 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-52424-3

定价: 149.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

电连接是电力、电子设备与系统中必不可少且大量存在的环节，而电接触是电连接的核心。电接触是研究电连接可靠性的应用科学，作为一个专门的领域，在国际上已有60年的历史。电连接的质量与水平对设备与系统的可靠性有着重要的影响。与电连接相关的产品如连接器、继电器等在我国的生产和使用量都很大，且与日俱增。我国在此领域开展研究较晚，且投入的力量与国外相比明显不足，因此无论是基础研究还是应用研究水平与发达国家相比都存在着较大的差距。反映到产品中是性能指标、质量和可靠性水平偏低，进而导致了整个设备或系统水平的下降，对我国经济与科技的迅速发展产生了不可忽视的制约和影响。

电接触学属于交叉学科。它将物理、机械、电学、材料、化学、环境等多个学科的概念和理论应用于电连接可靠性问题，形成了电接触理论。电连接的最高境界是在导通电流的过程中让人们感觉不到它的存在，最低要求是不产生对其所在系统的不可忽略的影响。由此引出了电连接的稳定性、寿命等与可靠性相关的研究内容。

电连接可分为强电（电力）连接和弱电（电子）连接。强电连接的主要功能是能量传输，其中电弧与热效应问题是影响连接寿命和可靠性的主要因素；弱电连接的主要功能是传递信号，对这一类连接的故障或电连接可靠性问题，环境是主要的影响因素之一。

电连接与连接器的设计是工程技术人员最关注的问题，如果把电连接与连接器的设计分为功能设计和可靠性设计，后者是一般工程技术人员最易困惑、感觉难以把握的。原因是相对于功能设计，可靠性设计涉及的因素更多，结构、材料、制造工艺、工作环境乃至贮存环境等等的不同，均会对其产生影响。更为危险的是其中一些影响是不被认识或被忽略的。

本书分3篇：第1篇为电接触基础。讲述了电接触的结构、机理及基本理论；由于在可分离接触中，摩擦是不可避免的，且它对接触性能有重要影响。在第3章中重点介绍了摩擦、磨损与润滑的基本形式与原理；第4章讨论了常用电接触材料的基本性能和应用；第5章讨论了通过接触面的电流和热流引起对接触电阻的影响因素；第6章讨论了电接触中的可靠性问题。第2篇为电接触应用。其中第7章介绍了电力连接器的结构、故障机理及预防措施等；第8章介绍了电子连接器的材料、结构、故障机理及预防措施等；第9章从电摩擦学的角度阐述了在各种条件（参数，如电流、润滑等）下的滑动电接触特性及机理；第3篇为诊断与监测技术。介绍了摩擦表面的电检测、评估方法，以及电网的监测技术。

本书的特点是引用了大量相关领域近年来的研究成果，并附有大量参考文献。

IV 电接触理论、应用与技术

使读者在掌握电接触原理及应用的同时,可获得对该领域研究背景和发展趋势的了解,为进一步的深入研究提供了便利。

目前我国电接触方面的论著十分匮乏,尤其缺少全面、深入的关于电接触研究的专著。本书填补了这项空白。

本书第1~3章由林雪燕翻译,第4、8章由孔志刚翻译,第5、6、7章由芦娜翻译,其余由许良军翻译,全书由许良军统稿。在翻译工作中,博士研究生王新、王东,硕士研究生施夏峰等协助做了大量工作,在此表示感谢。

感谢作者提供了对原书的勘误资料及相关支持。

由于本书内容丰富,涉及多门学科,加之译者的水平、翻译的时间有限,译文中难免存在疏漏及不足,请读者指正。

许良军
于北京邮电大学

原 书 序

对电接触这一交叉学科的研究，在现代工程领域中是重要而容易被忽略的。科学家和工程师在他们的职业生涯中通过研究与实践，了解了电接触理论在所有电器设备成功运转中的关键作用。在现代社会中，所有的电力传输与电网、多数的控制系统与信息交换均依赖于至少一次经过电触点的电流流通。电接触失效将引起严重后果，如大都市的电力瘫痪，电话系统故障，甚至于飞机坠毁。

杰出的科学家、著名的工程师和发明家 Ragnar Holm，在他的著作《电接触》（1958年出版）中阐述了“电接触”理论并使之成为独立的学科。在《电接触》出版后的50年里，其中的预见与结论得到了充分的肯定。在当时，尽管电接触应用的需求急剧增加，如信息高速公路和集成电路的发展形成了对电接触应用的新挑战，电接触应用在微观领域出现了诸多问题，但并未在当时的研究人员和工程师中得到充分的认识。在继后的微机电系统和纳（米）机电系统技术领域，电接触理论与应用同样至关重要。

Holm 认为机械工程和摩擦学是电接触的关键环节。本书作者的目的是将电流传输、特别是将微/纳米级的新技术与机械工程和摩擦学的研究发展相结合。

本书充实了《电接触：原理与应用》（1999年 Marcel Dekker 公司出版），阐述了电接触的实际应用成果，并为机械和电气工程师的设计提供了有价值的信息。事实上，本书所含的内容不管对于电器设备的设计人员，还是对于研究关于导体间电流传输的研究生来说，都将是非常宝贵的信息资料。

本书作者有着多年的研究和实践经验。本书一个突出的与众不同的特点是融合了东西方在电接触领域的不同的研究方法与成果，并成功地将大量研究成果和工程数据清晰地展现给了全世界不同领域的读者。

Paul G. Slade

于纽约 Ithaca

前 言

本书详细阐述了可使诸多技术装备中的移动和固定的电接触达到和保持其可靠性要求的分析模型、工艺技术、方法与工具。例如汽车部件和飞机部件，大、小功率接触件，滑动和断路触点，电子和控制设备以及机电系统等。它提供了已有文献中很少论及的电接触摩擦性能的广泛描述，这些是研究人员和工程师很感兴趣的问题。

本书聚焦于连接中主要的机械和电气问题，涉及应用领域和结构与性能的关系。本书很好地平衡处理了电接触中的机械学和材料学，同时兼顾了其设计、开发和制造。本书提供了关于跨越接触界面的导电性以金属表面形貌、载荷和材料的力学物理性能为函数，以及考虑到材料性能和润滑效应的电性能与摩擦、磨损的内在联系的完整介绍。考虑了不同退化机理的危害作用，如应力松弛或蠕变、微动、热膨胀差异和金属中间相的形成，以及它们对运行成本、安全、网络可靠性、电力质量的影响，也对各种改善电接触的可靠性和运行能力的方法，包括毫米、微米和纳米级，做了讨论。

本书缩小了工程实践中在设计和优化接触性能上广泛使用的经验方法和与接触相关的摩擦、机电特性的理论之间的差距。从接触设计、研究和开发接触材料，表面涂覆和润滑以及贯穿于全书的各领域实际应用实例讨论了电接触中摩擦学问题的实用的解决方法和主要发展趋势。

本书提供了大量的接触材料、涂覆和润滑性能的参考图表，以及用于评估这些性能的各种测试方法。本书将成为专业研究人员、设计和研发工程师必不可少的实用工具。

本书扩展了电接触基本理论。各章中都包含了问题及解答。因而全书（或部分章节）既可作为参考书，也可用作研究生及高年级本科生的教材。

作者简介

Milenko Braunovic 博士 1962 年于南斯拉夫 Belgrade 大学毕业，并分别于 1967 和 1969 年在英国 Sheffied 大学获硕士和博士学位。1971 ~ 1997 年作为高级研究人员在 Hydro-Quebec 研究所 (IREQ) 工作，1997 年退休并建立了自己的科学顾问公司——MB Interface。1997 ~ 2000 年任加拿大电力联合会顾问。目前是加拿大魁北克 Boucherville 的研发负责人。

在过去的 30 年里，Milenko Braunovic 博士在 Hydro-Quebec 研究所和加拿大电力联合会做了大量的研究和管理工作，内容涉及电力接触、立交桥设计与评估、加速实验方法，以及电力连接摩擦学等领域。他还指导了形状记忆合金在电力系统应用的研发工作。Milenko Braunovic 博士撰写了 100 多篇论文和技术报告，包括在他擅长的科学领域撰写百科全书的相关部分及专著。此外，他多次在世界范围讲学，发表了大量的国际会议论文。

基于他对电接触研究与应用的贡献，Milenko Braunovic 博士于 1994 年获 Ragnar Holm 科学成就奖。基于他对电接触 Holm 会议长期的领导和组织工作，1999 年获 Ralph Armington 杰出贡献奖。他还于 1994 年获 IEEE CPMT 最佳论文奖。1990 年他在加拿大 Montreal 成功地主持了第 15 届国际电接触会议 (ICEC)，任美国 Chicago 第 18 届 ICEC 技术委员会主席。他是 IEEE、ASM、MRS、ASTM、TMS 高级会员。

Valery Konchits 博士于 1949 年 1 月 3 日出生于白俄罗斯 Gomel 市，1972 年毕业于 Gomel 国立大学，1982 年在俄罗斯 Kalinin 技术学院获摩擦学博士学位。

1972 年他加入白俄罗斯科学院 Gomel 金属-聚合物研究所，1993 年成为摩擦实验室主任，2001 年任 Gomel 金属-聚合物研究所副所长。

Valery Konchits 博士的研究领域主要有电接触的摩擦与磨损、接触界面的剥削现象，以及摩擦的电子物理诊断方法。他发表了 80 多篇论文，获得了 10 项专利。是专著《电接触摩擦学》(俄文，1986 年出版)的作者之一。

Nikolai Myshkin 教授于 1948 年出生于俄罗斯 Ivanovo，1971 年毕业于电力工程学院机电专业。1977 年在俄罗斯科学院力学所获博士学位，同年进入 Gomel 金属-聚合物研究所，1990 年起为摩擦学部主任。2002 年为 MPRI 主任。1985 年他在摩擦学领域获科学博士学位。1991 年成为材料科学教授。2004 年被选为白俄罗斯科学部成员。

1983 年他获得 USSR 国家青年科学家奖，1993 年获白俄罗斯科学部最佳研究奖，2004 年获俄罗斯政府科学技术奖。

Nikolai Myshkin 教授的研究领域主要有微纳米表面特性、固体接触机理、磨损

VIII 电接触理论、应用与技术

监测、摩擦中的电现象、摩擦测试设备以及航天工程。

他作为作者或合作者发表了 180 多篇论文，获得了 60 项专利。他作为作者之一撰写了《摩擦手册》（1979 年俄文版，1982 年英文版），专著《边界润滑的物理、化学和机理》（1979）、《电接触摩擦学》（1986）、《摩擦学中的声学 and 道学方法》（1991）、《机械中的磁场》（1993），《材料科学》（1989），英文《摩擦学导论》（1997）、和《摩擦学：原理与应用》（2002）。

Nikolai Myshkin 教授是白俄罗斯摩擦学会主席和国际摩擦委员会副主席，《摩擦与磨损》杂志副主编，以及《国际摩擦学》、《摩擦学报告》、《工业如何与摩擦》和《机械性与应用国际》杂志编委会委员。

目 录

| | |
|------|--|
| 译者序 | |
| 原书序 | |
| 前言 | |
| 作者简介 | |

第1篇 电接触基础

| | |
|-------------------------------|----|
| 第1章 电接触概述 | 2 |
| 1.1 引言 | 2 |
| 1.2 基本特征综述 | 4 |
| 第2章 接触机理 | 7 |
| 2.1 固体表面 | 7 |
| 2.2 表面形貌 | 8 |
| 2.3 测量表面参数的现代方法 | 15 |
| 2.4 光滑表面的接触 | 18 |
| 2.4.1 塑性接触和弹塑性接触 | 20 |
| 2.5 粗糙表面之间的接触 | 23 |
| 2.5.1 Greenwood-Williamson 模型 | 23 |
| 2.5.2 多级模型 | 26 |
| 2.5.3 弹性接触转变到塑性接触 | 29 |
| 第3章 摩擦学 | 31 |
| 3.1 摩擦 | 31 |
| 3.1.1 摩擦定律 | 31 |
| 3.1.2 实际接触面积 | 33 |
| 3.1.3 界面粘合(摩擦的粘着分量) | 33 |
| 3.1.4 摩擦时的变形 | 36 |
| 3.1.5 摩擦是运行条件的函数 | 38 |
| 3.1.6 初始位移 | 39 |
| 3.1.7 粘性滑动 | 40 |
| 3.2 磨损 | 41 |
| 3.2.1 磨损阶段 | 42 |
| 3.2.2 磨损的简化模型 | 43 |
| 3.2.3 磨损的基本原理 | 44 |
| 3.2.4 磨料磨损 | 45 |

X 电接触理论、应用与技术

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 3.2.5 粘着磨损 | 49 |
| 3.2.6 粒块形成 | 49 |
| 3.2.7 疲劳磨损 | 50 |
| 3.2.8 腐蚀磨损 | 51 |
| 3.2.9 微动磨损 | 53 |
| 3.2.10 脱层磨损 | 54 |
| 3.2.11 侵蚀 | 56 |
| 3.2.12 组合磨损方式 | 56 |
| 3.3 润滑 | 57 |
| 3.4 摩擦学目前的发展趋势 | 58 |
| 第4章 电接触材料 | 61 |
| 4.1 金属电接触材料 | 61 |
| 4.1.1 电接触材料的性能 | 61 |
| 4.1.1.1 铜 | 64 |
| 4.1.1.2 铝 | 66 |
| 4.1.1.3 银 | 67 |
| 4.1.1.4 铂 | 69 |
| 4.1.1.5 钯 | 69 |
| 4.1.1.6 金 | 69 |
| 4.1.1.7 铯 | 70 |
| 4.1.1.8 钨 | 70 |
| 4.1.1.9 镍 | 70 |
| 4.1.2 重载荷及中等载荷电接触金属及合金材料 | 71 |
| 4.1.3 轻载荷电接触的金属和合金材料 | 73 |
| 4.1.4 液态金属接触材料 | 74 |
| 4.1.5 弹性电接触材料 | 76 |
| 4.1.6 形状记忆合金及其在电接触中的应用 | 77 |
| 4.2 电接触用镀层 | 79 |
| 4.2.1 基本要求 | 79 |
| 4.2.2 表面工程技术 | 81 |
| 4.2.2.1 表面偏析 | 81 |
| 4.2.2.2 离子注入 | 82 |
| 4.2.2.3 电镀 | 83 |
| 4.2.2.4 化学镀 | 85 |
| 4.2.2.5 喷镀 | 85 |
| 4.2.2.6 化学沉积 | 86 |
| 4.2.2.7 刷镀 | 87 |
| 4.2.2.8 物理气相沉积技术 | 87 |
| 4.2.2.9 电火花沉积 | 88 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 4.2.2.10 中间过渡层 | 88 |
| 4.2.2.11 多层电接触 | 88 |
| 4.2.3 镀层材料 | 89 |
| 4.2.3.1 用于电源连接器的镀层(铜、铝连接) | 89 |
| 4.2.3.2 电子/电力工业镀层 | 92 |
| 4.3 复合电接触材料 | 98 |
| 4.3.1 转换设备复合电接触材料 | 98 |
| 4.3.2 用于滑动触点的自润滑复合材料 | 104 |
| 4.4 纳米材料 | 110 |
| 4.4.1 纳米材料总体性能 | 111 |
| 4.4.2 力学性能 | 112 |
| 4.4.3 电性能 | 117 |
| 4.4.4 磁性能 | 119 |
| 4.4.4.1 巨磁阻 | 120 |
| 4.4.4.2 弹道磁阻效应 | 122 |
| 4.4.5 纳米管 | 123 |
| 4.4.6 热稳定性 | 125 |
| 4.4.7 纳米材料表征技术 | 125 |
| 4.4.7.1 纳米压痕 | 126 |
| 4.4.7.2 扫描探针显微镜 | 127 |
| 第5章 通过接触面的电流和热流的传导 | 131 |
| 5.1 接触电阻 | 131 |
| 5.1.1 圆形和非圆形的 a 斑点 | 131 |
| 5.1.2 信号频率的影响 | 136 |
| 5.1.3 尺寸影响, 纳米级接触 | 137 |
| 5.1.4 表面膜的影响 | 140 |
| 5.1.5 接触形状的影响 | 145 |
| 5.1.6 粗糙接触的传导性 | 150 |
| 5.2 接触面的热效应 | 157 |
| 5.2.1 热传导理论的基本原理 | 158 |
| 5.2.2 热传导理论的基本问题 | 159 |
| 5.2.3 电流对接触斑点的加热 | 163 |
| 5.2.3.1 无膜金属接触 | 163 |
| 5.2.3.2 有表面膜的接触斑点的生热 | 166 |
| 5.2.3.3 带有隧道-导电膜的接触间隙的场强 | 169 |
| 5.2.4 摩擦生热公式 | 170 |
| 5.2.5 电接触的闪点 | 173 |
| 5.2.6 摩擦接触的瞬态热效应 | 175 |
| 5.2.6.1 热弹性的不稳定性 | 176 |

| | | |
|------------|-------------------|------------|
| 5.2.6.2 | 温度-摩擦系数引起的非稳定性 | 176 |
| 5.2.6.3 | 摩擦方式的变化与非稳定性间的关系 | 176 |
| 第6章 | 电接触中的可靠性问题 | 178 |
| 6.1 | 电接触可靠性的重要性 | 178 |
| 6.2 | 电接触的必要条件 | 179 |
| 6.3 | 影响电接触可靠性的因素 | 179 |
| 6.4 | 连接器的失效机理 | 181 |
| 6.4.1 | 接触面积 | 181 |
| 6.4.2 | 氧化 | 183 |
| 6.4.3 | 腐蚀 | 184 |
| 6.4.4 | 微动磨损 | 187 |
| 6.4.4.1 | 微动机理 | 188 |
| 6.4.4.2 | 影响微动的因素 | 189 |
| 6.4.4.3 | 电接触中的微动 | 190 |
| 6.4.4.4 | 接触载荷 | 191 |
| 6.4.4.5 | 运动频率 | 194 |
| 6.4.4.6 | 滑动幅值 | 194 |
| 6.4.4.7 | 相对湿度 | 194 |
| 6.4.4.8 | 温度 | 195 |
| 6.4.4.9 | 电流作用 | 196 |
| 6.4.4.10 | 表面加工 | 198 |
| 6.4.4.11 | 硬度 | 198 |
| 6.4.4.12 | 金属氧化物 | 199 |
| 6.4.4.13 | 摩擦系数 | 199 |
| 6.4.4.14 | 电化学因素 | 199 |
| 6.4.5 | 金属间化合物 | 199 |
| 6.4.6 | 电子迁移 | 205 |
| 6.4.7 | 应力松弛和蠕变 | 207 |
| 6.4.7.1 | 电流作用的本质 | 208 |
| 6.4.7.2 | 电流对应力松弛的作用 | 209 |
| 6.4.8 | 热膨胀 | 214 |
| 6.5 | 连接劣化的影响 | 214 |
| 6.5.1 | 接触剩余寿命的预测模型 | 216 |
| 6.5.2 | 接触劣化的经济影响 | 221 |
| 6.5.3 | 电源品质 | 223 |

第2篇 电接触应用

| | | |
|------------|-------------|------------|
| 第7章 | 电力连接 | 226 |
| 7.1 | 电力连接器的类型 | 226 |

| | |
|--------------------------|------------|
| 7.2 结构设计和退化机理 | 227 |
| 7.2.1 螺栓连接器 | 227 |
| 7.2.1.1 螺栓连接的磨损 | 231 |
| 7.2.1.2 铝连接器的微动磨损 | 233 |
| 7.2.1.3 金属间化合物 | 235 |
| 7.2.1.4 蠕变和应力松弛 | 236 |
| 7.2.2 母线-穿刺接触 | 238 |
| 7.2.3 压接式连接器 | 240 |
| 7.2.3.1 压接连接的退化机理 | 242 |
| 7.2.3.2 腐蚀 | 243 |
| 7.2.3.3 压接式连接器中的微动 | 245 |
| 7.2.4 机械连接器 | 245 |
| 7.2.4.1 接线螺钉连接器 | 245 |
| 7.2.4.2 绝缘刺穿连接器 | 249 |
| 7.2.4.3 楔形连接器 | 249 |
| 7.2.5 焊接连接器 | 250 |
| 7.3 减缓措施 | 252 |
| 7.3.1 接触面积-连接器设计 | 252 |
| 7.3.2 接触压力 | 254 |
| 7.3.3 表面预处理 | 256 |
| 7.3.4 机械接触装置 | 256 |
| 7.3.4.1 重新固定 | 259 |
| 7.3.4.2 双金属嵌入 | 260 |
| 7.3.4.3 过渡垫圈 | 260 |
| 7.3.4.4 多接触元件 | 261 |
| 7.3.4.5 形状记忆合金机械装置 | 261 |
| 7.3.4.6 自修复连接 | 262 |
| 7.3.5 润滑: 接触辅助化合物 | 262 |
| 7.4 安装程序 | 265 |
| 第8章 电子连接器 | 267 |
| 8.1 电子连接器的类型 | 267 |
| 8.2 电子连接器的材料 | 268 |
| 8.2.1 焊接材料 | 268 |
| 8.2.2 无铅焊料 | 269 |
| 8.2.2.1 锡 | 269 |
| 8.2.2.2 锡-银合金 | 270 |
| 8.2.2.3 锡-银-铋合金 | 270 |
| 8.2.2.4 锡-银-铜合金 | 271 |
| 8.2.2.5 锡-银-铜-铟合金 | 271 |

| | | |
|------------|--------------------------|------------|
| 8.2.2.6 | 锡-银-铈合金 | 271 |
| 8.2.2.7 | 锡-铋合金 | 272 |
| 8.2.2.8 | 锡-铜合金 | 272 |
| 8.2.2.9 | 锡-钢合金 | 273 |
| 8.2.2.10 | 锡-钢-银合金 | 273 |
| 8.2.2.11 | 锡-锌合金 | 274 |
| 8.2.2.12 | 锡-锌-银合金 | 274 |
| 8.2.2.13 | 锡-锌-银-铝-镓合金 | 274 |
| 8.3 | 电子连接器的失效机理 | 276 |
| 8.3.1 | 孔隙率 | 276 |
| 8.3.2 | 腐蚀/污染 | 278 |
| 8.3.2.1 | 孔隙腐蚀 | 278 |
| 8.3.2.2 | 蠕变腐蚀 | 279 |
| 8.3.2.3 | 变色 | 281 |
| 8.3.3 | 微动 | 283 |
| 8.3.4 | 摩擦聚合物 | 290 |
| 8.3.5 | 金属间化合物 | 292 |
| 8.3.6 | 蠕变和应力松弛 | 303 |
| 8.3.7 | 电子迁移 | 307 |
| 8.3.8 | 晶须 | 311 |
| 8.4 | 改善措施 | 314 |
| 8.4.1 | 镀层作用 | 315 |
| 8.4.1.1 | 金镀层 | 315 |
| 8.4.1.2 | 钯和钯合金 | 316 |
| 8.4.1.3 | 锡镀层 | 317 |
| 8.4.1.4 | 镍和镍基合金 | 317 |
| 8.4.2 | 润滑作用 | 318 |
| 第9章 | 滑动接触 | 321 |
| 9.1 | 电接触摩擦学 | 321 |
| 9.1.1 | 摩擦与电流之间的相互作用 | 322 |
| 9.1.2 | 边界膜的作用 | 322 |
| 9.1.3 | 提高滑动电接触可靠性的主要方法 | 323 |
| 9.1.4 | 滑动电接触发展中的摩擦物理学 | 325 |
| 9.2 | 干(无润滑)金属接触 | 328 |
| 9.2.1 | 小电流接触 | 328 |
| 9.2.1.1 | 摩擦条件下小电流和电场的影响 | 329 |
| 9.2.1.2 | 界面剪切效应 | 329 |
| 9.2.1.3 | 粘结、转移、磨损碎屑的形成及表面蜕变 | 331 |
| 9.2.2 | 大电流接触 | 336 |

| | | |
|---------|---------------------------|-----|
| 9.2.2.1 | 电流对于摩擦性能的影响 | 336 |
| 9.2.2.2 | 电场的影响 | 340 |
| 9.2.2.3 | 速度的影响 | 342 |
| 9.2.2.4 | 接触件材料组合的影响 | 342 |
| 9.2.2.5 | 滑动中的电塑效应 | 343 |
| 9.2.2.6 | 金属纤维电刷接触的摩擦及电流传递 | 345 |
| 9.2.3 | 接触电阻的稳定性、电噪声 | 349 |
| 9.2.3.1 | 常闭连接器的接触噪声 | 349 |
| 9.2.3.2 | 滑动接触的电噪声 | 350 |
| 9.3 | 润滑的金属接触 | 360 |
| 9.3.1 | 润滑要素的概述 | 360 |
| 9.3.2 | 润滑边界层的电性能 | 360 |
| 9.3.3 | 润滑接触的电导率 | 364 |
| 9.3.3.1 | 润滑剂对于接触斑点周围区域电导率的影响 | 364 |
| 9.3.3.2 | 润滑剂对于接触斑点电导率的影响 | 365 |
| 9.3.3.3 | 经过润滑处理后接触对电导率的实验研究 | 370 |
| 9.3.3.4 | 光滑润滑表面间的接触电阻 | 373 |
| 9.3.3.5 | 温度对接触电导率的影响 | 374 |
| 9.3.4 | 滑动电接触中的润滑因素 | 375 |
| 9.3.4.1 | 润滑剂影响的早期研究 | 376 |
| 9.3.4.2 | 润滑剂的耐用性 | 377 |
| 9.3.4.3 | 润滑剂的摩擦化学特性 | 379 |
| 9.3.4.4 | 速度对于小电流接触的影响 | 382 |
| 9.3.4.5 | 润滑剂对于接触性能的影响 | 382 |
| 9.3.4.6 | 大电流润滑接触中的电流导通情况及摩擦力 | 384 |
| 9.3.5 | 电接触润滑剂 | 388 |
| 9.3.5.1 | 滑动开关接触件的润滑剂 | 389 |
| 9.3.5.2 | 用于传感器中滑动接触的润滑剂 | 390 |
| 9.3.5.3 | 接触润滑剂的选择 | 392 |
| 9.4 | 复合接触 | 394 |
| 9.4.1 | 中间层对电特性的影响 | 394 |
| 9.4.1.1 | 中间膜层的结构和电特性 | 394 |
| 9.4.1.2 | 电流通过中间层的接触机理 | 399 |
| 9.4.1.3 | 复合金属接触面极性对电导率的影响 | 405 |
| 9.4.2 | 电流的“润滑”效应 | 408 |
| 9.4.2.1 | 电流对摩擦性能的影响 | 408 |
| 9.4.2.2 | 电流的“润滑”效应机理 | 410 |
| 9.4.2.3 | 电刷材料对带电摩擦性能的影响 | 413 |
| 9.4.3 | 电磨损 | 416 |

| | | |
|---------|---------------------|-----|
| 9.4.3.1 | 无电流接触磨损 | 416 |
| 9.4.3.2 | 电流在磨损中的作用 | 417 |
| 9.4.3.3 | 无电火花下的电磨损影响因素 | 420 |
| 9.4.3.4 | 洁净程度对电接触区域的影响 | 424 |
| 9.4.3.5 | 存在火花和电弧时的磨损 | 426 |
| 9.4.3.6 | 减少电磨损的方法 | 427 |

第3篇 诊断与监测技术

| | | |
|-------------|-----------------------------|------------|
| 第10章 | 摩擦学中的电检测方法 | 430 |
| 10.1 | 表面特征 | 430 |
| 10.2 | 接触区域与摩擦范围的判断 | 434 |
| 10.2.1 | 接触区域的形成 | 434 |
| 10.2.2 | 有氧化膜的滑动接触控制 | 438 |
| 10.2.3 | 金属接触点形成的实验研究 | 439 |
| 10.3 | 材料和润滑物的摩擦特性估测 | 442 |
| 10.3.1 | 表面膜的承载能力和润滑性能的估测 | 442 |
| 10.3.2 | 在不完全的润滑下的润滑中间层的抗剪强度估计 | 444 |
| 10.3.3 | 通过电气方法评估材料和润滑剂的热稳定性 | 446 |
| 10.3.4 | 表面涂层和表面膜的控制 | 448 |
| 10.3.5 | 测量和分析接触特性的新型系统 | 449 |
| 第11章 | 监测技术 | 454 |
| 11.1 | 热测量 | 456 |
| 11.1.1 | 红外线温度测量 | 456 |
| 11.1.2 | 红外线温度图像测量的基本特征 | 457 |
| 11.1.3 | 红外线热系统的类型 | 458 |
| 11.1.4 | 形状记忆效应温度指示器 | 462 |
| 11.1.5 | 温度胶 | 465 |
| 11.1.6 | 远程温度传感器 | 465 |
| 11.2 | 电阻测量 | 466 |
| 11.3 | 监测接触载荷 | 469 |
| 11.4 | 超声波测量 | 470 |
| 11.5 | 无线监测 | 471 |
| 11.6 | 监测和诊断技术的成本效益 | 474 |
| 附录 | | 476 |
| 附录 A | 粗糙表面的描述方法 | 476 |
| 附录 B | 形状记忆材料 | 483 |
| 附录 C | 电接触数据表 | 498 |
| 参考文献 | | 508 |