

电接触理论 及其应用技术

郭凤仪 陈忠华 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

要 容 内

电接触理论及其应用技术

郭凤仪 陈忠华 编著

编 号 (CIP) 目 录 索 引 中 国

- 国家自然科学基金 (批准号: 50677027)
- 教育部留学回国人员科研启动基金 (教外司留 [2005] 383号)
- 教育部博士学科点专项科研基金 (编号: 20060147003)
- 辽宁省教育厅高等学校科研项目 (编号: 2004D045)
- 辽宁省教育厅高等学校科研项目 (编号: 05L175)
- 辽宁工程技术大学著作出版基金



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

电接触理论在电力系统和通信系统等领域的重要性日益突出,已引起广大科技工作者的高度重视。作者及其合作者以多年来的研究工作为基础,并结合国内外同行的许多研究成果编写了此书。

全书共分十章,分别介绍了电接触理论的几个主要问题,如接触电阻及其计算、电接触可靠性分析以及滑动电接触中的摩擦磨损等;讲述了电接触材料的研究现状、常用电接触材料的特性;深入地研究了银基触头材料的电弧侵蚀理论,具体包括电弧侵蚀的因素分析、形成机理、形貌特征及裂纹类型等内容;讨论了五种常用的银基触头材料的寿命预测与评判理论,以及三种不同保护电路对继电器触头电寿命的影响;论述了滑动电接触理论在电力机车受电弓滑板与接触网导线之间的具体应用,并详细介绍了自行研制的一种新型的受电弓滑板;最后,对自行研制高性能滑动电接触实验机的机械结构、控制电路和检测系统进行了介绍。

图书在版编目(CIP)数据

电接触理论及其应用技术/郭凤仪,陈忠华编著. —北京:中国电力出版社,2008

ISBN 978-7-5083-6099-7

I. 电… II. ①郭…②陈… III. 电接触-研究 IV. TM572

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第154698号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年7月第一版 2008年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13印张 218千字

印数0001—2000册 定价28.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着科学技术的发展,电接触理论在电力系统和通信系统等领域的重要性日益突出,已引起广大科技工作者的高度重视。

近年来,国内外同行在电接触理论及电接触材料方面做了大量卓有成效的工作,取得了显著成果。为了总结新成果,推广新技术,发展电接触学科,作者尝试编写了此书。

全书共分十章。第一章为电接触理论,简要介绍电接触理论的内涵、研究内容及研究现状,并以接触电阻、电接触可靠性以及滑动电接触为主题分别加以介绍。第二章为电接触材料,在讲述电接触材料的研究现状及常用电接触材料特性的基础上,介绍了触头材料的电弧侵蚀及寿命预测理论。在第三章至第六章研究了银基触头材料的电弧侵蚀理论,具体包括电弧侵蚀的因素分析、形成机理、形貌特征及裂纹类型等内容。第七章运用模糊综合评判理论,对五种常用银基触头材料进行了寿命预测,通过分析实验结果得出了一些有价值的结论,第八章则以专家系统为工具,以继电器触头为研究对象,对三种不同保护电路下继电器触头电寿命进行了实验研究。与第一章第五节的滑动电接触理论相呼应,第九章介绍了滑动电接触理论在电力机车受电弓滑板与接触网导线中的具体应用。从减小受电弓滑板和接触网导线的磨耗、延长其使用寿命的角度出发,研制了一种新型受电弓滑板,并对其进行了详细介绍。第十章对自行研制的高性能滑动电接触实验机的机械结构控制电路和检测系统进行了介绍。

本书引用、吸收了国内外同行在电接触理论及电接触材料等研究领域的许多学术成果,编者谨向他们表示深深的谢意和崇高的敬意。研究生董讷、刘丽英、臧义、李颖、刘伟然、么新鹏等做了大量的实验研究工作,王智勇、房川军、侯刚、王国伟、孙士宏、韩天锐等翻译了本书有关文献,王智勇参与了全书的编辑工作,在此向他们表示谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编 著 者

前言	1
第一章 电接触理论	1
第一节 概述	1
第二节 接触电阻理论及其计算	5
第三节 无载合分小电流触头接触电阻增加机理	12
第四节 电接触可靠性分析	18
第五节 滑动电接触理论	25
第二章 电接触材料	32
第一节 概述	32
第二节 触头材料电寿命的预测方法	43
第三章 影响触头材料电弧侵蚀的因素分析	49
第一节 触头表层金属的熔化与凝固特性	49
第二节 液态金属的黏度及表面张力	52
第三节 液态银对第二相粒子的润湿作用	54
第四节 液态金属的流动特性对熔层成分及形貌的影响	57
第五节 熔池的物质传输过程分析	66
第四章 银基触头材料电弧侵蚀特性与机理	70
第一节 试验设备与仪器	71
第二节 中小电流对称配对条件下的电弧侵蚀特性	73
第三节 非对称配对触头材料的电弧侵蚀特性	77
第四节 AgMeO 材料的电弧电压及燃弧时间	79
第五节 触头材料的物理冶金过程分析	81
第六节 触头材料电弧侵蚀模式与机理	86
第五章 触头材料的电弧侵蚀形貌特征	93
第一节 形貌特征是电弧侵蚀过程中各影响因素的集中表现	93
第二节 触头材料电弧侵蚀形貌特征的分类	94

● 第六章	银基触头材料的裂纹类型及形成机理	99
第一节	试验条件及试验内容	99
第二节	试验结果及分析	99
第三节	触头材料裂纹类型与机理分析	100
第四节	试验结果和讨论	105
第五节	数学分析	107
● 第七章	银基触头材料电寿命的模糊综合评判	110
第一节	银基触头材料电寿命的二级模糊综合评判	110
第二节	银基触头材料电寿命的二级模糊综合评判软件	123
● 第八章	不同保护电路对继电器电寿命的影响及其实验研究	129
第一节	不同保护电路对继电器电寿命的影响	129
第二节	不同保护电路下继电器电寿命的开断实验	137
● 第九章	双润滑铜基粉末冶金滑板的研究与设计	141
第一节	概述	141
第二节	研究背景简介	147
第三节	电力机车受电弓滑板与接触网导线相互作用规律分析	151
第四节	新型滑板的研制	163
● 第十章	高性能滑动电接触实验机研制	174
第一节	实验机机械部分设计	174
第二节	实验机控制电路设计	177
第三节	实验机检测系统电路设计	180
第四节	上位机及人机交互界面设计	187
第五节	软件流程框图	189
● 参考文献		190

第一章 电接触理论

第一节 概 述

一、电接触理论及其研究的内容和意义

(一) 电接触的定义和分类

任何一个电系统,都必须将电流(作为电的信号或电的能量)从一个导体通过导体与导体的接触处传向另一个导体,此导体与导体之间由接触而产生的电气连接,称之为“电接触”。近年来,也有学者认为“电接触”是指两个导体之间相互接触并通过接触界面实现电流传递或信号传输的一种物理、化学现象,或者认为“电接触”就是指两个导电组件因带电接触而产生的一种状态。在冶金学上,“电接触”是指用来产生接触的金属导电元件,由一对接触元件构成。

电接触按其工作原理的不同,一般可以分为三类:

(1) 固定电接触。即两接触元件只需在维修时才断开而在工作时间内固定接触在一起,既不做相对运动,也不相互分离。它们之间的电接触靠固定接触来维持。如:铆钉接触、焊接接触、螺栓接触等都是固定电接触的典型例子。

(2) 滚动和滑动电接触。即两接触元件通过二者的平移或旋转运动来实现静止接触件与运动接触件之间的电能或信号传输,是一种特殊的电接触形式。两接触元件能做相对滚动或滑动运动,却不相互分离,如载流轴承和电车之间的接触、电机的电刷和换向器之间的接触、电力机车受电弓滑板与接触网导线之间的接触等。

(3) 可分、合电接触。即两接触元件可以随时分离或闭合的一种电接触形式。通常将可分、合电接触中的两接触元件称为触头或触点。触头之间的接通与分断会导致所处电路中电流的接通与分断。各类开关器件中触头(触点)之间的接触就属于典型的可分、合电接触。

文献[4]还按照接触传导时是否会产生电弧现象,而将电接触分为无弧电接触(no arcing contact)、有弧电接触(arcing contact)和滑动电接触(sliding contact)三种类型。

各种不同形式的电接触无不起着接通、承载和分断电路电流的作用。研究

表明：电接触的产生、维持和消除的过程会伴随有接触元件局部高温、熔焊、磨损以及电弧放电等多种物理、化学作用。电接触现象就是上述过程中电、磁、热、力以及材料冶金效应相互作用的结果。电接触理论正是研究电接触的产生、维持和消除过程当中，两导体接触界面或导体与等离子体界面发生的物理化学过程的学科。

(二) 电接触理论的研究目的和意义

研究电接触理论的主要目的是在满足一定技术条件和经济效益的前提下，提高电接触的工作可靠性和工作寿命。

现代化大型复杂系统中所包含的电接触数目成千上万，一旦其中某个或几个工作不正常或失效，则将导致整个系统工作紊乱，甚至造成严重事故，其损失远远超过接触元件本身的价值。为此，研究电接触理论以提高电接触的工作可靠性具有十分重要的意义。

(三) 电接触理论涉及的问题

作为电器理论的重要组成部分，电接触理论已由一个专门研究电气电子可靠连接的科学逐步发展为集电弧物理、电磁场理论、计算机仿真、微观测试技术、电磁机构以及电工材料与制造等多门学科为一体的新兴交叉学科。

目前，电接触理论主要涉及下列几个问题：

- (1) 闭合触头的接触电阻及其发热问题
- (2) 触头分断失效问题
 - 1) 触头熔焊。
 - 2) 因触头表面材料转移造成的触头粘连。
 - 3) 开关电弧。
- (3) 绝缘强度低的问题
 - 1) 断开状态下触头间隙两端的绝缘强度。
 - 2) 并行导体之间的绝缘强度。
- (4) 触头微动产生的噪声问题
- (5) 严重的触头侵蚀问题

二、电接触学科的形成和发展

(一) 电接触学科的形成

电接触现象的研究虽然已有一百多年的历史，但形成一门独立的学科还是20世纪50年代以后的事。据有关文献报道，世界上最早关心电接触问题的单位是英国 Johnson Matthey 公司。19世纪50年代，由于在电信领域中继电器的

使用,研究者选用金属铂用作继电器触点,标志着电接触现象研究的开始。

1941年,R. Holm 出版了电接触学科的第一部著作——《电接触技术物理》(Die Technische Physik der Elektrischen Kontakte. Berlin: Springer, 1941),标志着电接触学科已经有了一个雏形。1958年,R. Holm 出版第三部著作——《电接触手册》(Electric Contacts Handbook. Berlin: Springer, 1958),标志着电接触作为一门独立的学科已初步形成。1967年,R. Holm 的最后一部著作——《电接触理论与应用》(Electric Contacts Theory and Application. Springer-Verlag, 1967)出版,标志着电接触作为一门独立学科已趋成熟。

(二) 电接触学科的发展

国际上关于电接触现象的研究最早始于1935年。在美国,电接触作为一门独立的学科研究始于1955年的第一届 Holm 学术年会(Holm Conf. on Electric Contact),至今已召开了53届。1961年召开了第一届关于电接触问题的国际学术会议,1964年开始成立国际电接触委员会(International Advisory Group on Electric Contact),负责每两年一次的国际电接触会议(ICEC),现已历时23届。此外,其他许多国际性学术会议也都涉及到电接触问题,如每两年在世界各地轮流举行的国际气体放电会议(International Conference on Gas Discharge)、每两年在世界各地轮流举行的国际游离化气体会议(International Conference on Phenomena in Ionized Gases)、每四年固定在波兰召开的开关电弧国际会议(International Conference on Switching Arcs)以及于美国召开的继电器年会(Annual National Relay Conference)等。日本原由东北大学倡导,后由真野国夫教授领导的日本机电元件研究会每月召开一次学术会议,到现在已有500多次。俄罗斯(原苏联)与东欧国家自20世纪70年代后大力发展这门科学,现也达到了很高水平。电接触科学在各国高等教育和科研中都得到很大发展。此外,IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies (IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology — Part A)、IEEE Transactions on Magnetics、IEEE Transactions on Advanced Packaging、IEEE Transactions on Plasma Science 等高水平期刊经常发表电接触类论文。

在电接触理论领域,国际上系统论述电接触理论的书籍较多,尤其是德国和日本,不断有新的学术专著出版,其中较为经典的几本著作主要包括:《电接触——理论及其应用》(Holm, R: Electric Contact — Theory and Application. Reprint of the 4th edition 1967, 3rd edition printing 2000, Springer),这是最原始的一本关于电接触理论基础方面的书籍,是早期电接触研究中的关键性著作。

《电接触——原理与应用》(Slade, P.: Electrical Contact-Principles and Applications. New York/Basel: Dekker Inc., 1999), 这是关于固定电接触、可分合电接触以及滑动电接触方面的综合性、权威性著作。《电接触——电接触物理及其应用简介》(em. o. Prof. Dr. Werner Rieder: Electrical Contacts — An Introduction to their Physics and Applications. A Publication of the Components, Packaging and Manufacturing Technology Society of IEEE, INC. 2006), 这是一本关于电接触物理及其应用的简介性书籍。

我国从20世纪50年代起,开始电接触方面的研究工作。1979年5月,在西安交通大学王其平教授和华中科技大学程礼椿教授的倡议下,正式成立了中国电工学会电接触及电弧研究会(挂靠西安交通大学),并定期进行学术交流,先后组织了九届学术年会(截止1998年)。而我国的另一个电接触研究学术团体——中国通信学会通信设备制造专业委员会电接触学组(挂靠北京邮电大学),也先后组织了十届学术年会(截止1999年),遗憾的是由于种种原因,由这两个学术团体组织的电接触与电接触材料的学术活动未能继续进行下去。从1981年起,在重要的国际电接触会议上,我国均有电接触方面的论文宣读或发表。此外,西安交通大学已举办了三届国际电接触、电弧、电器及其应用国际学术会议(International Conference on Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and Their Applications, 1989, 1993, 1997),北京邮电大学也举办过电接触与机电元件国际会议(International Conference on Electrical Contacts and Electromechanical Components, 1989),河北工业大学已经召开了两届电工产品可靠性与电接触国际会议(International Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contacts, 2004, 2007)。

1988年,程礼椿教授出版了我国第一部关于电接触理论及应用方面的著作——《电接触理论及应用》。2004年,由西安交通大学荣命哲教授出版了另一部关于电接触理论方面的著作——《电接触理论》。

(三) 我国电接触学科的研究现状

随着研究工作的不断深入,我国的电接触学科也有了很大发展。

首先,从早期的宏观上研究电路参数和弧隙参数对触头材料电弧侵蚀的影响,到现在从微观上研究触头材料本身的组织结构特性与电弧的相互作用关系,取得了大量的研究成果。

其次,从研究的内容来看,已涉及电连接器触点的基本现象和基本理论,包括:接触电阻和接触表面;关合与分断触头,包括:电弧现象,电弧截断,

侵蚀, 熔焊; 滑动电接触, 包括: 机械磨损、润滑、微震侵蚀、摩擦现象; 材料, 包括: 金属与合金、镀层、导电的聚合物、粘合剂与粘结材料、无铅焊料、新材料; 试验与测试, 包括: 寿命测试、可靠性、方法学的评估、建模、模拟和仿真; 机电元件与连接器, 包括: 开关、线路断路器(空气、真空)、固定接触、连接器、继电器、舌簧开关与舌簧继电器、微电机、光纤连接器与装置; 微机电器件, 包括: 微开关、纳米探头、微焊接; 电磁器件间的相互作用, 包括: 通信、宽带信号与传输、蜕化效应、电磁兼容; 实际应用, 包括: 汽车、通信、电力、仪表、传感器等众多研究领域, 且已取得了丰硕的研究成果。

最后, 从研究规模来看, 目前我国从事电接触理论及其应用、电接触材料及其应用方面的高等学校主要有: 西安交通大学、大连理工大学、北京邮电大学、清华大学、华中科技大学、国防科技大学、中南大学、福州大学、哈尔滨工业大学、沈阳工业大学、河北工业大学、辽宁工程技术大学和昆明理工大学等。科研院所主要有桂林电器科学研究所、昆明贵金属研究所等。还有为数不少的电工合金生产企业参加相关项目的研发。

通过几十年的基础理论及其应用研究, 在一定程度上缩小了我国与发达国家在电接触理论及其应用方面的差距, 我国在此领域的研究在国际上有一定影响。但也应看到, 由于电接触过程极为复杂, 目前仍然存在着许多问题需要进行深入的研究和解决。

第二节 接触电阻理论及其计算

一、接触电阻的本质

电流通过两导体电接触处的主要现象是在接触处出现局部高温。产生此现象的原因是由于在接触处存在一个附加电阻, 该电阻被称为接触电阻。

(1) 接触电阻由收缩电阻 R_s 和表面膜电阻 R_b 两部分组成。

(一) 收缩电阻 R_s

任何用肉眼看来磨得非常光滑的金属表面, 实际上都是粗糙不平的, 当两金属表面互相接触时, 只有少数凸出的点(小面)发生了真正的接触, 其中仅仅是一部分导电斑点才能导电。导体电阻与接触面接触情况如图 1-1 所示。当电流通过这些很小的导电斑点时, 电流线必然发生收缩现象。由于电流线的收缩, 电阻值相应增大。这个因电流线收缩而形成的附加电阻称为收缩电阻,

是构成接触电阻的一个分量。

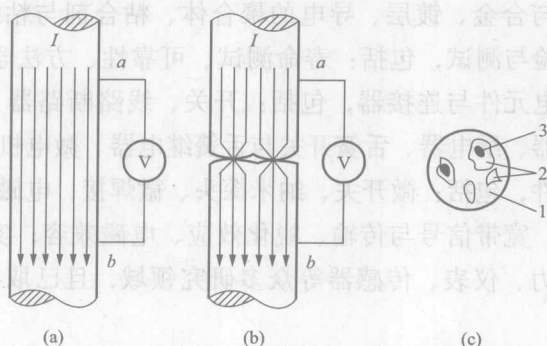


图 1-1 导体电阻与接触面接触状况

(a) 导体电阻；(b) 接触电阻；(c) 接触面

1—视在接触面；2—实际接触面；3—导电斑点

(二) 表面膜电阻 R_b

由于接触点上导体表面氧化膜、硫化膜、油膜、水膜及尘埃等的存在，改变了电流通路中的位势分布，影响自由电子的运动，也会引入一个额外电阻增量，这个电阻增量称为表面膜电阻，它是构成接触电阻的另一个分量。它的存在使接触电阻增大，并引起接触电阻不稳定，甚至破坏电接触连接的正常导电。为了减小膜电阻，可以增加接触压力把膜压碎。

在高压或低压强电流电器中，触头的接触压力通常都很大，足以将表面膜压碎且容易在膜间形成大于 10^6V/cm 的高场强将膜击穿，故接触电阻主要为收缩电阻。低压小容量电器中的主要问题则是表面膜电阻。

总起说来，接触电阻一般应包括三个部分：一个是接触元件一边的收缩电阻 R_{s1} ，另一个是接触面间的膜电阻 R_b ，第三个是接触元件另一边的收缩电阻 R_{s2} ，因三者 in 电路中是串联关系，故接触电阻 R_j 可用下式表示

$$R_j = R_{s1} + R_{s2} + R_b \quad (1-1)$$

如果两接触元件的材料相同，接触面两边的电流 - 电位场对称，则 $R_{s1} = R_{s2}$ 。令 $R_s = R_{s1} + R_{s2}$ ，则 $R_j = R_s + R_b$ 。如果接触元件表面不存在表面膜。例如真空中清洁金属表面的接触， $R_b \approx 0$ ，或者 $R_b \ll R_s$ ，则接触电阻 $R_j \approx R_s$ 。如果 $R_b \gg R_s$ ，则接触电阻 $R_j \approx R_b$ 。

在电器应用中，我们希望接触处的电阻尽可能地减少，而且保持长期稳定。

二、接触电阻的计算

(一) 收缩电阻 R_s 的计算

为了分析问题简便, 现假设:

(1) 导电斑点 A_c 为圆形, 它的尺寸比视在接触面积 A_a 小得多, 这种收缩区范围比导电斑点尺寸大得多的情况称为“长收缩”, 在作理论分析时, 可令收缩区延伸到无限远。

(2) 两个接触元件材料相同, 而且是均质的, 也就是说两个接触元件的电阻率是相等的 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ 。

(3) 忽略温度对电阻率的影响, 即在收缩区内各点的电阻率 ρ 为常数。

(4) 导电斑点 A_c 面上的电位处处相等, 并取此电位为零电位。

(5) 导电斑点 A_c 面上没有表面膜存在, 因而膜电阻等于零。

(6) 忽略热电势和接触电势。

在上述假定条件下, 两接触元件的收缩电阻对称并相等, 则接触元件在无限大空间内接触元件一边的收缩电阻 R_{s1} 和接触元件另一边的收缩电阻 R_{s2} 为

$$R_{s1} = R_{s2} = \frac{\rho}{4a} \quad (1-2)$$

式中: ρ 为电阻率; a 为导电斑点半径。

所以, 接触元件的总收缩电阻为

$$R_s = R_{s1} + R_{s2} = \frac{\rho}{2a} \quad (1-3)$$

从上式可见: 接触元件的总收缩电阻的大小与接触元件材料的电阻率成正比, 与导电斑点的直径成反比。如果二个元件接触表面中导电斑点有 n 个, 则收缩电阻为

$$R_s = \frac{\rho}{\sum_{i=1}^n 2a_i} \quad (1-4)$$

式中: a_i 为第 i 个导电斑点半径。

如果取 $\sum_{i=1}^n 2a_i = 2na_p$, a_p 为 n 个斑点半径的平均值, 则

$$R_s = \frac{\rho}{2na_p} \quad (1-5)$$

上式只有理论意义, 因为 n 、 a_p 的数值是非常难求的。

(二) 表面膜电阻 R_b 的计算

电接触表面上, 由于种种原因覆盖着一层导电性很差的物质, 例如金属氧化物、硫化物、灰尘、污物或夹在接触面间的油膜、水膜等。一般来说, 电接触表面氧化膜居多。而氧化膜多半是半导体, 电阻率很高。氧化物薄膜使接触电阻大大增加。

近代物理学告诉我们, 电子具有粒子和波动两种性质, 即所谓的波粒二相性。按经典理论, 一层绝缘膜, 不论厚度如何, 电子都不能穿过它而导电。但是, 根据量子力学理论, 电子作为波的性质, 却能穿透薄膜而导电, 这个效应叫做隧道效应。

由著名的薛定谔方程可知膜的隧道电阻率为

$$\sigma = \frac{U}{J} \quad (1-6)$$

式中: U 为接触面之间的电压; J 为流过膜的电流密度。

则电子穿过半径为 a 的斑点表面所遇到的膜电阻为

$$R_b = \frac{U}{I} = \frac{U}{J\pi a^2} = \frac{\sigma}{\pi a^2} \quad (1-7)$$

如果接触内表面有 n 个导电斑点, 平均半径为 a_p , 则总膜电阻为

$$R_b = \frac{\sigma}{\pi n a_p^2} \quad (1-8)$$

综上所述, 接触电阻的计算公式为

$$R_j = R_s + R_b = \frac{\rho}{2na_p} + \frac{\sigma}{\pi n a_p^2} \quad (1-9)$$

(三) 工程上接触电阻的计算

接触电阻 R_j 由两部分组成, 其值为收缩电阻和表面膜电阻之和, 即 $R_j = R_s + R_b$ 。但由于计算导电斑点数 n 和平均半径 a_p 非常困难, 所以工程上常用以下经验公式求接触电阻, 即

$$R_j = \frac{k_j}{(0.102F)^m} = k_j(0.102F)^{-m} \quad (1-10)$$

式中: F 为接触压力, N; R_j 为接触电阻, mΩ; m 为与接触形式, 压力范围和实际接触点的数目等因素有关的指数。实验证明: 在压力不太大的范围内, 对于点接触 $m=0.5$, 线接触 $m=0.5 \sim 0.8$, 一般取 $m=0.7$, 面接触 $m=1$; k_j 为与接触材料、表面状况等有关的系数, 其数值由实验确定, 见表 1-1。

表 1-1 各种触头材料的 k_j 值

触头材料	表面状况	k_j
Ag - Ag	未氧化	0.06
Al - Cu	未氧化	0.98
Cu - Cu	未氧化	0.08 ~ 0.14
Al - 黄铜	未氧化	1.90
AgCdO ₁₂ - AgCdO ₁₂	未氧化	0.17
AgCdO ₁₂ - AgCdO ₁₂	氧化	0.35

式 (1-10) 说明: R_j 与 k_j 、 m 及 F 等因数有关。但必须指出, 此公式的局限性很大, 不能概括各种因素对接触电阻的影响。不同研究者得出的 k_j 值和 m 值差别很大。因此, 工厂中还常采用测量接触电压的方法来实测接触电阻值。接触电压降是指通过一定电流时, 电接触连接处的电压降, 即

$$U_j = IR_j \quad (1-11)$$

式中: U_j 为接触电压降, mV; I 为通过电接触连接的电流, A; R_j 为接触电阻, mΩ。

三、影响接触电阻的主要因素

一般希望得到低值而稳定的接触电阻, 以保证电接触工作的可靠性。影响接触电阻的因素主要有接触形式、接触压力、温度、化学腐蚀、接触面的光洁度、导体材料性质等。

(一) 接触形式

电接触按接触形式可简单地概括为三类: 点接触、线接触和面接触。

接触形式对收缩电阻 R_s 的影响主要表现在接触点的数目上。一般说来, 面接触的接触点数 n 最多, 收缩电阻 $R_s = \frac{\rho}{2na_p}$ 最小。点接触的接触点数 n 最少, 收缩电阻应最大。线接触位于二者之间。

接触形式对膜电阻的影响, 主要表现在每个接触点上所承受的压力, 如果触头上外加压力为 F , 接触点数为 n , 则每个接触点上压力 F_1 应为

$$F_1 = \frac{F}{n} \quad (1-12)$$

由上式可见, 每个接触点上的压力 F_1 与接触形式有关。一般认为点接触的接触点数 n 最少。在触头外的接触压力 F 相同的条件下, 点接触形式下每个接触点所承受的压力最大, 也就是最容易把接触表面的表面膜破坏, 从而使膜

电阻 R_b 减小。反之，面接触的接触点数 n 最多，排除和破坏表面膜的能力小，膜电阻 R_b 就增大。线接触介于两者之间。

此外，接触形式对接触电阻的影响还与接触压力的大小有关。当接触压力较小时，面接触的接触电阻不一定比点或线接触的接触电阻小。表 1-2 的数据可说明这一点。

从表 1-2 可见，当接触压力较小时，面接触的接触电阻反而更大。

表 1-2 接触电阻 R_j 与接触形式的关系（铜）

接触形式	$R_j / \mu\Omega$	
	$F = 9.807 \text{ (N)}$	$F = 980.7 \text{ (N)}$
点接触	230	23
线接触	330	15
面接触	1900	1

(二) 接触压力

式 (1-10) 和表 1-2 都表明，接触压力 F 对接触电阻 R_j 有重要影响，没有足够的压力，只靠加大接触面的外形尺寸，并不能使接触电阻有明显的下降。

当增大接触压力 F ，材料受压超过弹性变形的极限，就会产生塑性变形，这时接触面增加，接触点也增加， $R_s = \frac{\rho}{2na_p}$ 减小。同时，增大接触压力可以压碎金属表面的薄膜，使膜电阻下降。所以，增大接触压力，可使接触电阻减小。

(三) 温度

接触点温度升高后，金属的电阻率增大，但材料的硬度有所降低，使有效接触面积增大，接触点增加。前者使 R_s 增大，后者使 R_s 减小。二者相互补偿，所以接触电阻变化甚微。但是，如果接触处通过的电流超过短路电流 I_s 时，温度会急剧升高，由于温度足够高，就会使接触面氧化，加剧氧化膜的生长变厚，使膜电阻 R_b 增大，导致发热更甚，形成恶性循环。为了使接触电阻保持稳定，电接触的长期工作允许温度规定得很低。

(四) 化学腐蚀

单独由化学作用引起的腐蚀，称为化学腐蚀。例如，金属与某些气体 (O_2 、 H_2S 、 SO_2 、 Cl_2 等) 接触时，在金属表面生成了相应的化合物，如氧化

物、硫化物、氯化物等。由于压合物薄膜特别是氧化膜的生成，使接触电阻 R_j 增大。

温度对化学腐蚀影响很大。例如铜触头温度提高到 100°C ，在空气中暴露 1h，其接触电阻增加约 50 倍。

工程上通常采用以下方法防止氧化或减小其影响：

- (1) 增大接触压力，压碎氧化膜（但是有限度）。
- (2) 设计触头时，使动、静触头在闭合时有相对滑动，以清除氧化膜。
- (3) 加覆盖层，如在 Cu 触头表面镀 Ag、Zn、Sn、Cd 等。Ag 的氧化膜与 Ag 相比电导率不相上下。Zn 的氧化膜有自动开裂的性能。Sn 对大气影响很稳定。Cd 对硫化气体和 Cl_2 的作用很稳定。

(五) 电化学腐蚀

当金属和电解质溶液接触时，由于化学作用而引起的腐蚀，称为电化学腐蚀。

各种金属的金属活泼性可按它们在电化电位顺序中的位置先后来决定。具有较负电化电位的金属，金属活泼性较大，容易被腐蚀。

在一般大气条件下，金属电化电位按其由负到正的顺序排列如下，称为电化电位顺序表。

Al Zn Cr Fe Cd Ni Sn Pb H Cu Ag Pt Au
(-) — — — — — (0) — — — — (+)

规定氢的电化电位为 0V，在它前面的金属具有不同的负电位（如 Al 的电化电位为 -1.34V ），在它后面的金属具有不同的正电位（如 Ag 的电化电位为 $+0.8\text{V}$ ）。

为了减小电化学腐蚀作用，不宜采用在电化顺序表中相距较远的金属构成电接触。在两种金属的接触面，用电镀或喷涂等方法，覆盖同一种金属，可以减少电化学腐蚀，但覆盖层金属应具有较稳定的化学性能及良好的电性能。例如有些电接触必须采用铜与铝接触时，可在铝表面用铜或银覆盖，或在铜和铝之间加上锌垫片。

(六) 材料的性质

构成电接触的金属材料性质直接影响接触电阻的大小，这些性质主要有材料的电阻率 ρ 、材料的硬度 H 、材料的化学性能等。

每个导电斑点表现的收缩电阻与 ρ 成正比。接触面上导电斑点的数目则由材料的接触硬度决定。根据对材料接触硬度 H 的定义，接触面上微小接触面