

电 接 触

〔民主德国〕 H. 霍夫特 编
H. G. 施奈德

DIAN
JIECHU

机械工业出版社

本书对电接触问题作了系统的论述，既注意理论分析，更着重实际应用，内容丰富，取材新颖，反映了许多国家的最新研究成果，是一本很有价值的参考书。

本书的第一篇详细论述了弱电接触的物理基础、材料、表面膜、可靠性和主要参数的自动测量技术，以及电子开关原理和耦合原理；第二篇主要讨论强电接触的温升、闭合状态下触头的能量转换、恢复电强度和触头材料在不同使用条件下的比较。

本书可供电子、电工和电接触材料的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

Elektrische Kontakte

Herbert Höft, Helmut Günther Schneider
AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1980

电 接 触

〔民主德国〕 H.霍夫特 H.G.施奈德 编

程积高 宋羽 译

王其平 校

责任编辑：李振标

封面设计：田淑文

责任印制：张俊民

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₃₂·印张 15¹/₂·字数337千字
1988年11月北京第一版·1988年11月北京第一次印刷

印数 0,001—1,870·定价 7.20元

ISBN 7-111-00698-4/TM·97

译者的话

电接触涉及到电子学、电工学、力学、化学、统计学、测试技术、开关电器以及材料及其制造工艺等专业领域。虽然国际上有关电接触的文献很多，但系统论述电接触的书籍却很少，仅有的几本经典著作也只是50~60年代的版本，国内至今尚无专著出版。

民主德国H.霍夫特和H.G.施奈德两位教授主编的《电接触》一书，是由经互会各国从事教学、科研、生产和使用维修部门的几十位专家编写的。书中系统地讨论了电接触的物理基础、材料及其制造工艺、表面膜、可靠性、主要参数的测试技术以及电子开关原理和耦合器原理等方面的内容；反映了近年来东欧各国电接触的新材料、新工艺、科研成果和实际应用的经验，内容丰富，取材新颖，很有参考价值。兹将全书译出，供我国从事电接触研究、生产和使用维修部门的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

本书第一篇的第6章和第二篇由宋羽同志译，其余由程积高同志译，全书由王其平教授审校。

译者水平有限，谬误之处，犹恐难免，请读者指正。

程积高 宋羽

1987年2月

序

电子学的重要性在各个技术领域内不断增长，因此需要大批量生产可靠而经济的元件。

电路的可靠性总是由其最薄弱的环节来决定的。随着集成度高的电路的发展，可靠性有了很大的提高。但电接触没有跟上这种发展。虽然可通过较高的集成度来减少相当一部分普通连接和接触部位，但随着电子学不断深入人类社会的各个领域，人们对接插元件的绝对需求量则由于把组件、开关和电键作为人和设备之间的通信辅助工具而在不断地增加。

所以，从各种不同的观点来看，都需要加强对电接触的科学研究，特别是对弱电接触可靠性的研究。因为机电式接触元件在适应微电子学方面是很有限的，所以在低功率时，人们亦很重视无触头的解决办法。

对强电接触，必须考虑能量密度及耐电弧磨损问题。

鉴于这些问题的重要性，所以，1976年11月在民主德国卡尔马克思城举行的第五届电接触会议上，与会者重新广泛地讨论了这些问题。

本书作为“深入研究资料”，叙述在目前有重要意义的电接触问题，是根据这次会议的论文选辑而成。

本书第一篇第1章的1.1节讨论电接触的物理基础（H.霍夫特著）。

在实际中，电路对接触上的能量转换（H.J.托尔著）、静态下表面膜的生成（J.乌尔比希著）或对由于有害物浓度

高引起的腐蚀进行模拟的问题 (A.克劳斯著), 同样都是重要的。前几年还有可能用贵金属来满足可靠性高的要求。今天, 材料使用的合理性则是处于重要的地位, 即既要考虑触头的尺寸, 又要考虑贵金属所占的比例 (D.吕利克、H.亨泽尔、G.贝尔著)。随着镀贵金属触头镀层厚度的减小, 对基体金属在与大气有害物浓度的关系中所起的作用加强了研究。经验证明, 必须考虑扩散的不同阶段 (H.霍夫特、A.黑斯内尔著)。这些过程影响到材料和镀层结构的选择, 也影响到与有害物浓度有联系的可靠性 (凯泽尔著)。用适当的经费就可做成即使在不利气候条件下也能工作的保护管接触。这些问题在经互会国家中受到了相当的重视 (O.W.科米茨基、A.皮特科夫斯基、B.米德青斯基等人著)。电接触的主要参量都有统计的特点, 所以必须高度重视自动测量技术。数字测量技术是试验和研究时所用的有效手段 (H.J.托尔、D.兰格、M.克劳斯、F.米勒著)。在一定范围内使用这种测量技术能够较快地和多方面得出可资应用的数据和判定。

除了机电式接触外, 本书也讨论了光电子耦合器型的无触头连接元件 (H.韦德尔、G.福格特、F.施瓦尔茨、U.埃米希等著), 以及以硅或玻璃半导体为基础的、业已开始用于实际的开关元件。半导体技术用于电气控制电路的优点很多 (G.埃贝斯特著)。玻璃半导体的应用可能性及其在技术上的重要性尚须进一步研究 (C.迪普曼、H.J.维尔茨巴著)。

本书第一篇所讨论的弱电接触的问题为: 电接触的物理基础、材料、表面膜、可靠性以及测量技术、电子开关原理和耦合原理。

本书第二篇讨论强电接触问题。主要有温升 (J.莫尔纳

著)、闭合状态下触头的能量转换 (E.瓦莱楚克著)、恢复电强度 (K.莫舍科夫著) 和触头材料在不同使用条件下的比较 (I.沙拉科夫等著)。

应当承认, 经互会国家的科研工作是协调一致地、有重点地进行的。对于工业实践而言, 强电流接触和弱电流接触一样重要, 所以我们在选编本书论文时尽可能兼顾了这点。当然接触问题比本书范围广泛得多, 本书的目的不是完整无缺地叙述这方面的所有问题, 而是局限在选出的几个重点问题, 使电工和电子专家、接触元件和开关设备的制造厂家以及用户能更好、更经济地解决有关问题。

H. 霍夫特

H.G. 施奈德

目 录

第一册 弱电技术的接触问题

序

译者的话

第 1 章 基础	1
1.1 电接触特性的科学基础 (H. 霍夫特)	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 接触电阻	1
1.1.3 表面膜的过热温度	9
1.1.4 容许电负荷	13
1.1.5 接触粘附	16
1.1.6 电磨损	17
1.1.7 无腐蚀条件下的寿命	23
1.1.8 接触材料上的表面膜	23
1.1.9 可靠性和材料	31
1.2 关于RCL电路中燃弧时间及转换能量的确定 (H. J. 托尔)	34
1.2.1 概述和问题的提出	34
1.2.2 燃弧时间的计算	37
1.2.3 电流-时间曲线	38
1.2.4 电流-时间曲线的测量	43
1.2.5 结语	44
1.3 静止接触的噪声 (K. 坦内贝尔格)	49
1.3.1 概述	49
1.3.2 噪声与电阻的关系	50
1.3.3 接触噪声与频率的关系	57
1.3.4 测量位置	57
1.3.5 测量	59

1.3.6	结语	6
1.4	弱电流技术的接触的不稳定性试验 (A. 克劳斯)	64
1.5	接触电阻的统计分析 (J. 乌尔比希)	74
1.5.1	概述	74
1.5.2	接触电阻的统计分布与接触压力和时间的关系	75
1.5.3	接触电阻与其离散性之间的关系	33
1.5.4	由接触电阻的平均值求故障概率	86
第2章	触头材料和工艺问题	89
2.1	通信技术的新型触头材料的试验 (H. 亨塞尔 U. 迪姆 H. 尤雷)	89
2.1.1	触头材料经济性和适用性的选择	89
2.1.2	在ATZ65号自动电话局中的运行试验	90
2.1.3	在试验室进行的寿命试验	90
2.1.4	在有害物质影响下触头性能的试验	93
2.1.5	触头测试仪	96
2.1.6	结语	97
2.2	关于发展银-钌基触头材料的金属学问题 (D. 吕利克)	98
2.2.1	概述	98
2.2.2	材料性能	99
2.2.3	触头性能	109
2.2.4	讨论和结论	114
2.3	触头材料AuAg ₁₇ Ni的应用研究 (G. 贝尔 W. 德恩克)	117
2.3.1	试验参数	118
2.3.2	开关触头的试验结果	120
2.3.3	开关装置的试验结果	123
2.3.4	对试验结果的评价	124
2.4	弱电流微型触头的制造和试验 (B. 克劳米勒)	126
2.4.1	概述	126

2.4.2	把Ag和AgPd30微型触头焊到德银扁簧 上的工艺试验	127
2.4.3	在MKS试验样品上进行电测量的结果	132
2.4.4	研究工作成果的经济效益	137
2.4.5	结语	137
第3章 镀层问题及使用条件		143
3.1	关于低温下镀层触头扩散的可能性 (A. 黑斯内尔)	143
3.1.1	概述	143
3.1.2	由于体积扩散引起的材料传送	143
3.1.3	薄镀层中扩散短路和扩散的特点	144
3.1.4	镀层系统的扩散模型	148
3.1.5	结语	157
3.2	在低温下Au-Ag系统的扩散 (A. 黑斯内尔 H. 斯坦格 G. 米勒 W. 布雷特施奈德)	160
3.3	硅对弱电流接触的影响 (H. 马丁)	163
3.3.1	概述	163
3.3.2	硅油的化学结构及对开关触头的影响机理	163
3.3.3	试验的实施	165
3.3.4	试验结果	167
3.3.5	对试验结果的总结	174
3.4	德意志邮电局通信设备运行室内的有害物浓度 (E. 凯塞尔)	178
3.4.1	概述	178
3.4.2	试验结果	179
3.4.3	对运行室的气候要求	183
3.4.4	对试验的气候要求	184
第4章 接触特性及可靠性		185
4.1	镀层的贵金属静触头发生故障的原因 (H. 霍夫特)	185
4.1.1	概述	185

4.1.2	贵金属镀层对接触电阻的影响	185
4.1.3	实用的贵金属镀层及其作用	188
4.1.4	镀层触头上的表面膜问题	193
4.2	在外来粒子影响下接触元件的稳定性 (O. W. 科米茨基 Ju. Sch. 比格洛夫 G. M. 科尔松斯基)	197
4.2.1	概述	197
4.2.2	结语	200
4.2.3	求 K_0 的试验步骤	202
4.2.4	在外来粒子掉入故障范围内时,求故障概率 的试验步骤	202
4.2.5	确定粒子从一给定表面区段到达故障范围的概率 的试验步骤	202
4.3	在大的电感性负载下微型电键寿命试验 (M. 克劳斯 H. J. 托尔 D. 兰格 R. 蒂莱 R. 里希特尔)	203
4.3.1	概述	203
4.3.2	试验回路及提出的任务	203
4.3.3	测量方法	205
4.3.4	试验结果及其讨论	206
4.3.5	结语	210
4.4	CR灭弧电路对电感性负载的保护管接点寿命的影响 (A. 皮特科夫斯基 T. 达布罗夫斯卡 W. 弗兰茹克)	212
4.4.1	概述	212
4.4.2	试验大纲	213
4.4.3	试验结果	215
4.4.4	对试验结果的分析	217
4.4.5	结语	217
4.5	液态氮介质中的保护管接点的一些特性 (B. 米德青斯基 T. 卓尔里尔茹克)	218

4.5.1	概述	218
4.5.2	舌簧继电器的耐压强度	219
4.5.3	开断能力和寿命	220
4.5.4	结语	227
4.6	高频接点的接触电阻 (R. 里希特尔)	228
4.6.1	触头的几何形状	228
4.6.2	高频接触模型	231
4.6.3	高频接触电阻的测量方法	232
4.6.4	在老化的高频接插元件上测量反射系数	234
4.6.5	用同轴谐振器测量衰减	236
第5章	测量技术	241
5.1	弱电流技术的接触研究中数字测量台的使用可能性和范围 (H. J. 托尔 D. 兰格 H. 霍夫特)	241
5.1.1	概述	241
5.1.2	动触头的主要参数	241
5.1.3	决定寿命的现象	243
5.1.4	接触回路电阻的测量	244
5.1.5	接触回路电阻的求值	248
5.1.6	对开断和关合过程中的触头进行测量	251
5.1.7	在开断的触头上测量	255
5.1.8	结语	256
5.2	弱电流接触的寿命和可靠性的自动测量台 (H. 托尔 D. 兰格 K. 舍费 M. 克劳斯)	258
5.2.1	概述	258
5.2.2	用恒定电流测量接触回路电阻	258
5.2.3	测量台的预计使用目的	261
5.2.4	接触回路电阻的自动测量台	261
5.2.5	子程序选择	267
5.3	接触电阻的自动测量台和计值 (F. 米勒 M. 维德曼)	

K. 阿斯穆斯).....	275
5.3.1 概述	275
5.3.2 自动测量装置的描述	276
5.3.3 测量序列的计值	276
5.3.4 结语	289
5.4 对操作中的触头统计的时间测量方法 (D. 兰格 K. D. 齐克曼特尔)	290
5.4.1 测量技术问题的提出	290
5.4.2 确定随机矩形脉冲序列参数的测量方法	292
5.4.3 运行试验和测量结果	299
5.5 接插元件自动试验设备的分析和控制装置 (W. 贝尔哈特 C. 克里斯克 H. J. 珀茨施 H. 罗斯内尔 G. 福格特 H. 韦德尔 F. 魏里希)	304
5.5.1 概述	304
5.5.2 结构和工作原理	305
5.5.3 插拔装置	306
5.5.4 测量台	308
5.5.5 结语	311
5.6 测量接触元件的接触回路电阻时热过程的应用 (J. 卡奇马雷克 H. J. 维尔茨巴)	313
第6章 电子开关原理	320
6.1 以半导体元件为基础的开关原理 (G. 埃贝斯特 R. 布鲁姆梅)	320
6.1.1 概述	320
6.1.2 双极型晶体管	321
6.1.3 阻挡层场效应晶体管 (SFET)	327
6.1.4 MIS晶体管 (MISFET)	329
6.1.5 晶闸管	332
6.1.6 集成电路	337

6.1.7	结语	339
6.2	玻璃半导体的工艺和特性 (H. J. 维尔茨巴 P. 弗罗钦斯基).....	341
6.2.1	概述	341
6.2.2	控制玻璃中可转换结构变化的可能性	343
6.2.3	非晶态的半导体材料	350
6.3	单稳态硫族化合物玻璃阈值开关的稳定性试验 (C. 迪普曼).....	352
6.3.1	概述	352
6.3.2	模型研究	353
6.3.3	稳定性问题	355
6.3.4	试验结果	356
6.3.5	使用比较	358
6.4	电子电路中可拆卸的光电子耦合器 (G. 福格特 H. 韦德尔).....	361
6.4.1	光电子耦合原理	361
6.4.2	作四端网路用的光电子耦合器	363
6.4.3	运行条件的分析	366
6.4.4	误差的影响	370
6.4.5	结语	373
6.5	几何形状和环境对可拆卸的光电子耦合器的影响 (F. 施瓦茨 K. 吉赛莱 G. 福格特 H. 韦德尔) ...	375
6.5.1	各种影响因素	376
6.5.2	几何参数的影响	376
6.5.3	环境参数的影响	383
6.5.4	结语	391
6.6	可拆卸的光电子耦合器的动态特性 (U. 埃米希 G. 福格特 H. 韦德尔).....	392
6.6.1	试验对象的限定	392
6.6.2	传输特性曲线——传输系数	393

6.6.3	非线性失真的测定	397
6.6.4	噪声特性	398
6.6.5	不同因素对上限频率的影响	405
6.6.6	上升时间	407

第二篇 强电流技术的接触问题

第 1 章	线接触温度的几种计算方法(J. 莫尔纳)	411
1.1	概述	411
1.2	线接触的温升微分方程	411
1.3	用热流网确定温度	413
1.4	计算结果与测量结果的比较	415
1.5	附录	417
第 2 章	强电流接触闭合状态下的接触电压 (E. 瓦尔丘克).....	420
2.1	概述	420
2.2	试验方法	420
2.3	电接触的伏安特性曲线	421
2.4	软化电压和熔化电压	423
2.5	接触电压的统计	427
第 3 章	充氮的灭弧室中双断口触头系统的 弧隙介质恢复强度(K. 莫舍科夫 D. 切尔内法)	429
3.1	概述	429
3.2	试验装置和研究条件	429
3.3	试验结果	430
3.4	对试验结果的讨论	430
第 4 章	直流接触器中Ag-CdO触头与Ag-Ni触头 的特性曲线比较(I. 查拉科夫 I. 卡萨 科夫 A. 克拉斯特夫 P. 布罗法)	434

4.1	概述	434
4.2	试验条件	435
4.3	试验结果	435
4.4	对试验结果的讨论	437
第 5 章	额定100A、500V的断路器中AgC、AgNi 和AgW触头材料的应用(K. 莫舍科夫 L. 佩切夫 G. 克里斯托夫 M. 卡萨科夫)	439
5.1	概述	439
5.2	试验方法及试验条件	439
5.3	试验结果	441
5.4	对试验结果的分析	444
第 6 章	烧结金属材料的强电流触头在液氮中的特性 (B. 米勒 H. 韦塞尔)	447
6.1	理论观点	447
6.2	试验装置	448
6.3	测量结果	449
6.4	结语	457
第 7 章	铜触头在氮气中持续运行时的情况 (K. 莫舍科夫 T. 伊万切夫)	45 ⁹
7.1	概述	459
7.2	试验条件和试验方法	459
7.3	试验结果	460
7.4	对试验结果的讨论	463
第 8 章	低电压混合式开关的使用范围(M. 明切夫 Zl. 克马洛法 I. 卡萨科夫 A. 克拉 斯特夫 I. 查拉科夫)	465
第 9 章	混合式接触器触头的寿命(Zl. 克马洛法 I. 查拉科夫 M. 明切夫)	471

第一篇 弱电技术的接触问题

第1章 基 础

1.1 电接触特性的科学基础 (H. 霍夫特)

1.1.1 概述

接触元件由许多零件（绝缘件、垫片、弹簧、触头）组成。对设计成熟的开关、电键、继电器、高频和低频接插元件来说，一般只有静止的或闭合的接触处才是接触元件的固有薄弱处。

接触部位的状况是由许多参数决定的，而在实际工程中往往没有完全或没有足够准确地掌握这些参数，部分原因则是由于考虑为此所需付出的代价和测量技术的不完善，而难于掌握这些参数。但只要经过精确的分析有可能得到可资应用的数据，当然这需要适当的研究费用和采用现代测量手段。下面扼要地介绍一下电接触特性的理论知识。

1.1.2 接触电阻

导体的电阻由下式计算

$$R = \int_{l_1}^{l_2} \frac{\rho dl}{A(l)} \quad (1)$$

如果电阻率 ρ 为常数，且横截面 A 与长度 l 无关，则

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

在 $\frac{2A}{2l} \approx 0$ 时，形状固定情况下的形状系数为

$$f = \int_0^{l_2} \frac{dl}{A(l)} \quad (3)$$

因此

$$R = \rho f \quad (4)$$

触头是有一定几何形状并表示电流通过的狭径的导电体。

在已知实际的接触面积时，可算出各种模型的形状系数。

表 1 列出了几种触头模型的形状系数。由表可知，电流收缩电阻的关系

表 1 不同触头模型的形状系数

序号	模型	f	备注
1	球形模型	$\frac{1}{\pi r_k}$	r_k —实际接触面的半径
2	椭圆形模型	$\frac{1}{2r_k}$	r_0 —导体的圆柱半径
	球形模型	$\frac{2}{\pi r_k} \frac{l_0}{r_0}$	l_0 —电流收缩长度

$$R_s = \frac{1}{r_k} \quad (5)$$

有决定性的意义，而比例系数在技术上的意义不大。在弱电技术中（接触压力 F_k 很小），球形模型已能得出足够精确的结果，而在强电技术中，则多用椭圆模型。实际接触面取决于接触压力 F_k 。虽然由于触头表面粗糙，实际接触面一般都象图 1 和图 2 那样由许多小接触点组成，但计算时可取完整的圆面积作为实际接触面，即