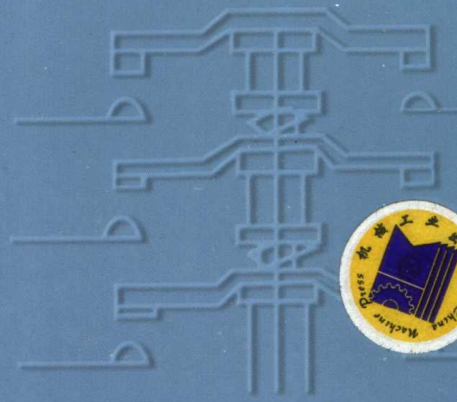
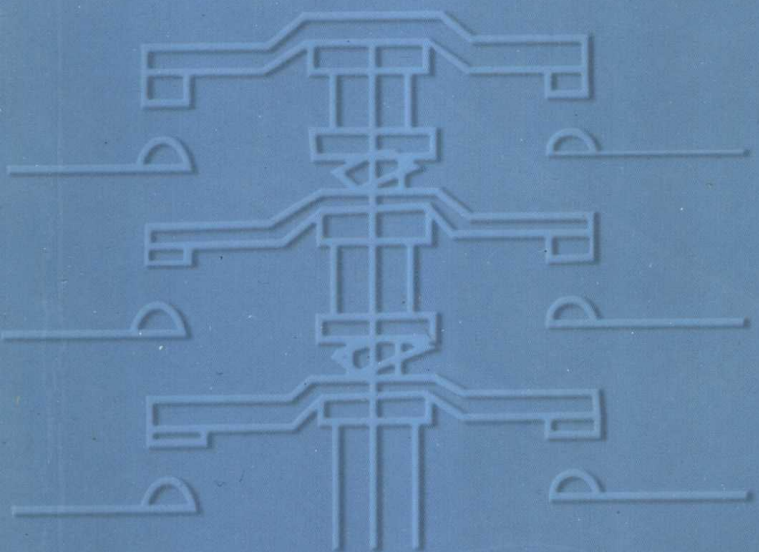


电接触理论

荣命哲 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电 接 触 理 论

荣命哲 编著



机 械 工 业 出 版 社

电接触技术在电力系统、自动控制系统和信息传递系统等领域的应用日益广泛。电接触理论正是研究电接触产生、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受机械、环境、气体放电作用所发生的各种现象的专门学科。本书是以作者及其合作者的研究工作成果为基础,并力图反映近年来国际上的有关研究成果和发展动态而完成的。全书共分八章。

本书分别论述了静态接触和受电弧作用下的电接触热过程数学模型;介绍了使用场合对电接触材料要求和电接触材料的种类与特性;主要研究了触头间电弧放电与触头材料之间的相互作用机理;介绍了重要的电接触材料性能测试方法;弱电技术及高压断路器中的电接触问题的特殊性。

图书在版编目 (CIP) 数据

电接触理论/荣命哲编著. —北京:机械工业出版社,
2004.3

ISBN 7-111-14089-3

I. 电... II. 荣... III. 接触器—理论 IV. TM572

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 015026 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:林春泉 版式设计:张世琴 责任校对:李汝庚

封面设计:陈沛 责任印制:施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm × 1168mm $1/32$ · 6.375 印张·167 千字

0 001—3 000 册

定价:16.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

电接触技术在电力系统、自动控制系统和信息传递系统等领域的应用日益广泛。由于使用场合和条件的不同，对电接触的要求存在较大差异。因此，电接触现象是一纷繁复杂的物理化学过程。电接触理论正是研究电接触产生、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受机械、环境、气体放电作用所发生的各种现象的专门学科。它涉及电磁场理论、气体放电及等离子体科学、传热学、冶金学、金属材料制造及数学建模等科学，是一门新兴的具有边缘性特点和关系面很广的学科。

20世纪50年代，电接触理论作为一门独立的学科问世以来，国际上对电接触的研究相当活跃，许多大型、定期召开的国际学术会议以此为主题，另一些大型国际学术会议也涉及电接触研究，因而有关文献极多，系统论述电接触理论的书籍也不少，尤其是德国和日本，不断有新的学术专著出版，而国内这方面的著作却甚少。

电接触理论是开关电器重要的基础理论之一。鉴于此，西安交通大学电器教研室10多年来，在电接触理论及应用领域进行了大量深入、系统的研究工作。本书就是以这些研究成果为基础，并力图反映近年来国际上有关研究成果和发展动态而完成的。全书共分八章。

研究接触电阻是所有电接触技术必然遇到的课题，与传统的电接触书籍不同，本书第2章没有简单地从宏观上论证接触电阻与接触电压及其接触区域最高温升的相互关系，而是从微观上研究了导电斑点内电流密度的分布，通过求解电场分布求得了触头体内焦耳内热源的分布，并建立数学模型，简述了受接触电阻热效应而在触头体内形成的温度场及其特性。

电接触元件的可靠性和工作寿命受到电接触材料性能的显著影响。电接触材料性能则由材料的组成和制造工艺决定。第3章在介绍电接触材料性能、使用场合对电接触材料要求之后，较详细地讨论了电接触材料的种类与特性。

对在开关电器领域广泛应用的可分离电接触，研究触头间电弧放电与触头材料之间的相互作用机理有着重要的理论价值和实际意义。本书第4章主要研究了电弧能量作用及触头材料的响应过程。从阳极型、阴极型电弧及其特性，金属蒸气电弧与气体电弧及其转换，电弧停滞时间及电弧运动特性，电弧等离子体喷流及其特性，电弧对电极的热流输入和电弧力效应等五个方面，分析与电接触性能密切相关的极间电弧特性。从材料过热、材料转移、电弧侵蚀、触头熔焊等基本现象，分析触头材料对电弧能量作用的响应过程。鉴于接通电路过程中电接触现象的特殊性，单列一节说明。

电接触材料性能的试验及诊断意义很大，难度也很大。进一步研究合适的测试方法和诊断技术仍然是重要的课题。本书除第5章较系统地介绍了一些电接触材料性能的测试方法以及电子显微技术外，其他章节也陆续介绍了一些新型专门测试装置。

与第2章静态接触数学描述相呼应，第6章则主要讨论了可分离电接触中，电弧热流作用下触头热过程的数学模型，既反映了数学模型发展的曲折历程，又有最新研究成果的论述。

弱电技术中的电接触问题及高压断路器中的电接触理论和触头材料具有特殊性，各列一章说明。

滑动电接触中的主要问题是机械摩擦和磨损，限于篇幅，本书未涉及这一领域中现象的讨论。

由于作者水平有限，书中不当之处以至错误在所难免，敬希读者指正。

2003年12月 作者
于西安交通大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电接触及其学科的研究内容和意义	1
1.2 电接触学科的形成和发展	4
第 2 章 静态电接触及其数学描述	6
2.1 接触电阻的物理模型	6
2.2 导电斑点电流密度分布	10
2.3 电触头体内电场及焦耳内热源分布	14
2.4 静态电接触热过程的数学模型及其求解	15
第 3 章 电接触材料概论	23
3.1 电触头的用途	23
3.2 对电接触材料基本特性的要求	24
3.3 电接触材料的分类与特性	27
第 4 章 电弧能量作用及电接触材料的响应	33
4.1 引言	33
4.2 电极间发生的电弧放电及其特性	34
4.3 电触头材料的温升特性	68
4.4 电触头材料转移	70
4.5 电触头材料的电弧侵蚀机理	80
4.6 电触头粘附与熔焊	104
4.7 接通电路过程中的电接触特性	108
4.8 电触头电弧侵蚀表面形貌特征	113

第 5 章 电接触性能的试验、诊断及触头的选用	125
5.1 概述	125
5.2 接触电阻及其影响因素的测试方法	126
5.3 材料侵蚀、转移、熔焊特性的试验及诊断	129
5.4 电子显微分析技术在电接触研究中的应用	132
5.5 触头材料的选用	138
第 6 章 电接触动态数学模型	140
6.1 概述	140
6.2 电弧热源对电触头的热流输入	141
6.3 移动边界及材料热电参数	144
6.4 数学模型及其求解	146
第 7 章 复合镀层接触件的电接触	148
7.1 引言	148
7.2 静态接触的复合镀层接触件的电接触	149
7.3 振动环境下复合镀层接触件的电接触	151
7.4 插拔过程中复合镀层接触件的电接触	161
7.5 复合镀层接触件的磨损	163
7.6 复合镀层的组成原则及各镀层的作用	173
第 8 章 高压断路器中的电接触现象及触头材料	176
8.1 对高压断路器触头材料的要求	176
8.2 真空断路器触头材料性能	179
参考文献	183

第 1 章 绪 论

1.1 电接触及其学科的研究内容和意义

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。如果电接触是靠两个导体固定接触而维持，称之为固定电接触；如果电接触靠两个导体滑动接触而维持，称为滑动电接触；如果电接触的产生和消除（两导体的接触和分离过程）导致两导体所处电路电流的接通和分断，则称为可分离电接触。

传递电流或输送信号的两导体称为触头或触点，根据一定的电流方向，也可称为阳极和阴极。在电力系统、自动控制系统和信息传递系统中，电接触现象随处可见，大量使用的各类开关电器中的触头直接执行接通和切断各种电路并承载正常工作电流的职能，属于典型的可分离电接触；各种电连接器及母线的连接等属于固定电接触；集电环、电刷、电力机车的受电弓与馈电线等属于滑动电接触。固定电接触和滑动电接触只有电接触的维持过程，而可分离电接触还有电接触的产生和消除过程（伴随电路的接通和分断过程）。

电接触的产生、维持和消除过程是一纷繁的物理、化学过程，尤其是可分离电接触，由于在两导体间，依据不同的电气条件，常常发生不同形式的气体放电，因而问题变得更加复杂多变。在两导体的接触界面或导体与等离子体界面发生的过程是电、磁、热、力及材料冶金效应相互作用的综合结果。

电接触理论正是研究电接触产生、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。这一学科涉及电弧物理、电磁场理论、计算机仿真、微观测

试技术、电磁机构、电工材料与制造等。其研究的最终目的是在满足一定的经济效益前提下，提高电接触的工作可靠性和工作寿命。

电接触理论研究及应用的主要内容包括：

1. 电接触现象的基础理论研究 主要研究电接触的产生、维持和消除过程中的一些物理、化学现象。如电接触维持状态下，接触电阻尤其是表面膜电阻部分的增值机理，以及由于接触电阻引起的温升现象，甚至熔焊；电接触产生和消除过程中出现的触头材料侵蚀和转移等。

2. 电接触材料 不同的电接触形式，或不同的电气、机械工作条件，对电接触材料的要求各有侧重。因而在节省贵金属的前提下，研制开发适合相应要求的电接触材料一直是电接触理论和应用研究中的重要课题。新型电接触材料的开发，必须以电接触现象的理论研究为基础，主要从材料的组成和制造工艺两方面改善电接触材料的性能。

3. 电接触试验和诊断技术 电接触诊断技术是开展电接触试验研究的重要手段。电接触产生、维持和消除过程中发生的全部现象的观察、测试都需要借助先进的诊断技术。例如关于接触电阻和导电斑点区域温升的测试技术；关于电极间电弧特性的测试技术；关于触头材料侵蚀转移的定量测试；关于电接触材料接触表面形貌特征及电接触材料组织和成分的测试技术。

4. 电接触现象的数学模型化研究 随着计算机技术的普及和发展，许多复杂的物理、化学过程得以采用计算机模拟或仿真。科学的发展总是要由试验研究逐步过渡到数学模型化阶段。应当认为，实验测试是数学模型化的基础。但是，在现代工程技术中，许多无法实验测试的过程或因费用太高而难以进行测试的物理现象常采用计算机技术来模拟整个过程，以获得对过程特性的了解和掌握。近年来在电接触理论及其应用的研究中，数学模型化方面取得了引人瞩目的进展。尤其是在由接触电阻引起的电场和温度场的分布，由电弧引起的电触头材料电弧侵蚀热过程的

数学模型化方面已取得不少成绩。尽管如此，仍有许多尚待研究和解决的问题。

鉴于可分离电接触较固定接触和滑动接触更为复杂，本书主要针对可分离电接触即开关电器中的电接触问题而展开，重点讨论如下问题。

(1) 开关电器中的基本电接触现象 主要是触头接通和分断电路过程中触头之间的电弧特性、电弧与电极材料的相互作用机理、触头材料的侵蚀和转移和电触头的熔焊等。

(2) 对开关电器触头材料的基本要求和材料选用原则，以及典型触头材料的电接触特性。

(3) 电接触诊断技术简介。

(4) 电接触数学模型化研究，主要是静态电接触温度场分布及触头电弧侵蚀热过程的数学分析。

(5) 固定接触有其特殊性，主要问题是关于接触电阻，尤其是接触电阻中的表面膜电阻生成机理的研究。本书针对弱电领域中电接触问题专列一章说明。

(6) 本书最后一章专门讨论高电压强电流条件下，电接触现象及电接触材料。

滑动接触中的主要问题是机械摩擦和磨损，限于篇幅，本书未涉及这一领域中一些现象的讨论。

现代电力系统、自动控制系统和通信系统的发展对工作可靠性的要求越来越高，这些系统中的电接触数日常在数十万个以上，如果其中一个或几个失效，将导致整个系统工作紊乱。

电触头和灭弧系统被称为开关电器的“心脏”，它直接执行接通和分断电路以及承载正常工作电流的职能。各类电器的关键性能，如配电电器的分断能力、控制电器的工作寿命、继电器的可靠性，无不决定于触头的工作性能和质量。

因此，在涉及电工技术、电子技术、通信技术、自动控制技术和航空航天技术的各个领域，电接触既承担了重要的电能传递和信号输送的重要职能；同时由于其工作条件的恶劣，又是整

个系统工作可靠性最薄弱的环节和容易发生故障的部分。加强电接触基本现象和基础理论的研究，开发质优价廉的电接触材料，最终提高电接触的工作可靠性和工作寿命有着重大的实用意义。相信电接触技术的不断提高，必将推进相关领域理论水平和技术水平的不断提高。

1.2 电接触学科的形成和发展

电接触现象受到关注，几乎与电工学同时起步。据参考文献[1]，世界上最早关心电接触问题的是英国 Johnson Matthey 公司。19 世纪 50 年代，由于电信用途中继电器的使用，研究者选用金属铂用作继电器的触头，标志着关于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^[2]，电接触技术物理（Die Technische Physik der Elektrischen Kontakte. Berlin: Springer, 1941）标志着电接触学科初步形成。

1958 年，R. Holm 出版了电接触手册^[3]，标志着电接触作为一门独立学科的形成。

从 1955 年开始，美国电气与电子工程师学会（IEEE），以电接触学科的奠基人 Holm 的名字命名，每年召开一次关于电接触的学术会议（Holm Conf. on Electric Contact），并出版论文集。1961 年召开了第一届关于电接触问题的国际学术会议，并从 1964 年起，每两年在世界各地轮流召开。

此外，其他许多国际性学术会议也都涉及到电接触现象，如每两年在世界各地轮流举行的国际气体放电会议（Int. Conf. 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（Int. Conf. on Phen in Ionized Gases），每四年固定在波兰召开的开关电弧国际会议（Int. Conf. on Switching Arcs），及于美国召开的继电器年会（Annual National Relay Conf.）。

我国从 20 世纪 50 年代起，已开始电接触方面的研究工作。1979 年 5 月，正式成立了中国电接触及电弧研究会，并定期举

行学术交流。此外，西安交通大学已举办 3 届国际电接触、电弧、电器及其应用国际学术会议，北京邮电大学也举办过电接触方面的国际学术会议。从 1981 年开始，在重要的国际电接触会议上，均有我国电接触方面的论文宣读或发表。1988 年，华中理工大学程礼椿教授出版了中国第一部关于电接触理论及应用方面的著作^[4]。

第 2 章 静态电接触及其数学描述

2.1 接触电阻的物理模型

当两导体相互接触并实现电能传递或信号输送时，无论两导体的接触表面经过怎样的精细加工，其在微观上总是凹凸不平的，如图 2-1 所示。真正发生接触只能是一个或多个微小的点或小面，并非是两导体宏观重叠接触的面积。在电接触研究中，通常将两导体（或触头、触点）宏观重叠的面积称为名义接触面或视在接触面，而将实际接触面称为接触斑点，即使在接触斑点接触区域内，由于触头表面通常覆盖有一层表面膜，所以真正能够传导电流的区域只是那些金属直接接触或金属与导电的表面膜接触的区域，这些区域称为导电斑点。因为电接触学科的奠基人 R. Holm 假定导电斑点是半径为 a 的圆形区域，所以在国际电接触学术界导电斑点又称为 a 斑点，如图 2-2 所示。

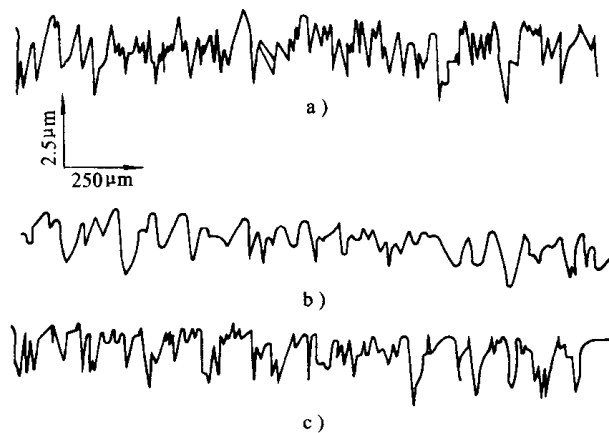


图 2-1 接触表面

a) 仅仅磨光 b) 先磨光然后轻轻抛光 c) 先磨光再用细砂纸轻擦

由于上述原因，当电流通过电接触元件时，实际上电流将集中流过那些极小的导电斑点，因而在导电斑点附近，电流线必将发生收缩，如图 2-3 所示。

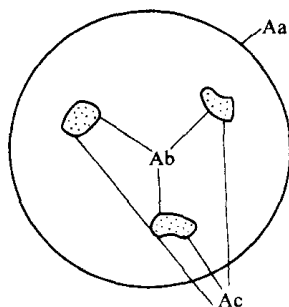


图 2-2 接触斑点

Aa—视在接触面 Ab—实际接触面 Ac—导电斑点

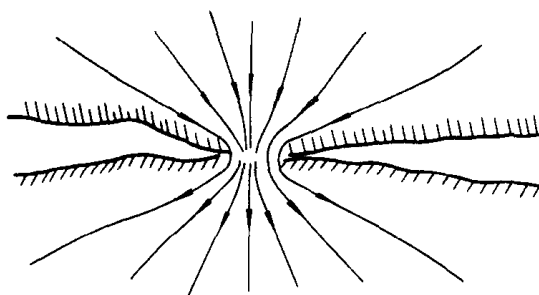


图 2-3 导电斑点附近电流线发生收缩效应

由于电流线在导电斑点附近发生收缩，使电流流过的路径增长，有效导电面积减小，因而出现局部的附加电阻，称为“收缩电阻”。如果电流通过的导电斑点不是纯金属接触，而是存在可导电的表面膜，则还存在另一附加电阻，称为膜电阻。这两部分附加的总电阻称为接触电阻。

可以证明^[3]，收缩电阻与导电斑点尺寸之间有下列的简单关系

$$R_c = \frac{\rho}{2a} = \frac{\rho}{d} \quad (2-1)$$

式中 R_c ——收缩电阻；

a , d ——导电斑点的半径和直径；

ρ ——接触元件材料的电阻率。

当电流通过导体与导体的接触处时，由于接触电阻的存在，在电流收缩区两端必然会出现一定的电压降，这个电压降称之为“接触压降”。同时，由于接触电阻产生焦耳热，使收缩区的温度升高，常超过收缩区外导体的温度。导电斑点上的温度超过收缩区外导体的温度的数值称之为斑点的“超温”。根据电位—温度理论（称 $\varphi-\theta$ 理论），斑点的“超温”与“接触压降”成简单的函数关系

$$\theta = \frac{U^2}{8 \lambda \rho} \quad (2-2)$$

式中 θ ——导电斑点的超温；

U ——接触压降；

$\overline{\lambda \rho}$ ——两接触导体材料的热导率与电阻率乘积的平均值。

不过，式（2-1）仅适用于单个 a 斑点收缩电阻的计算。如果接触面内的 a 斑点不止一个，并且假定各个 a 斑点之间距离足够大，则通过 a 斑点的电流的相互作用可以忽略不计。这样可把接触面中各电流传导路径相加，这种多斑点的收缩电阻为

$$R_c = \frac{\rho}{2 \sum a_i} \quad (2-3)$$

如各个 a 斑点相距很近，则需考虑通过各个 a 斑点的电流的相互作用^[5]，如图 2-4 所示。

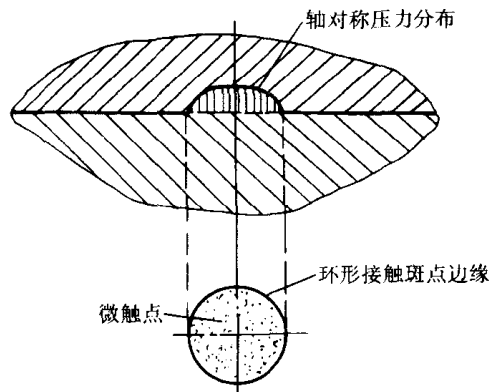


图 2-4 环形接触斑点示意图

令 b_{ii} 表示第 i 个 a 斑点流过单位电流对第 i 个 a 斑点电位的贡献, 令 b_{ij} 表示第 j 个 a 斑点流过单位电流对第 i 个 a 斑点电位的贡献, 则第 i 个 a 斑点的电位 V_i 可由下式表示:

$$V_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} I_j \quad (2-4)$$

式中 n ——a 斑点个数;

b_{ii} ——第 i 个 a 斑点的收缩电阻自有部分;

b_{ij} ——第 i 个 a 斑点和第 j 个 a 斑点收缩电阻的共有部分。

由静电场类比方法可推导得

$$b_{ii} = \frac{\rho}{2a_i}, \quad b_{ij} = \frac{\rho}{2\pi S_{ij}}$$

式中 S_{ij} —— i 个与第 j 个斑点的间距。

因为所有 a 斑点的电位相等, 且等于两导体间接触压降的一半, 即 $V_i = U/2$, 故

$$V = 2 \sum_{j=1}^n b_{ij} I_j = \frac{\rho}{2} \left(\frac{I_i}{a_i} + \frac{2}{\pi} \sum_{j \neq i} \frac{I_j}{S_{ij}} \right) \quad (2-5)$$

Greenwood 求得的收缩电阻表达式为^[5]

$$R_c = \rho \left(\frac{1}{2 \sum a_i} + \frac{3\pi}{32n^2} \sum \sum \frac{1}{S_{ij}} \right) \quad (2-6)$$

上述公式的误差随着 a 斑点个数的增加而减少, 当斑点个数达极限情况时, 上式可演化为 Holm 最早提出的多斑点收缩电阻的形式, 即

$$R_c = \rho \left(\frac{1}{2na} + \frac{1}{2a} \right) \quad (2-7)$$

式中 a ——a 斑点半径;

α ——包含全部 a 斑点的包络线半径。

电接触材料表面常因吸附、氧化、腐蚀以及环境效应等因素的污染而形成表面膜。对于中重负载用电接触元件, 由于机械的作用特别是电弧的作用, 表面膜极易破坏, 因此表面膜的生成和破坏并不特别引人注目。然而在弱电接触领域, 由于表面膜生成

后不易破坏，故对使用于弱电技术领域的电接触材料为能达到高的接触可靠性，不允许表面膜生成或存在。

弱电技术领域的电接触研究，主要集中在表面膜的生成机理及从电接触材料本身的组分和制造工艺入手而提高其接触可靠性这两大方面。表面膜的生成机理较为复杂，它与各种环境效应密切相关。

2.2 导电斑点电流密度分布

触头承载的电流实际只能从两个触头接触所形成的一个或数个导电斑点流过，在这些导电斑点区域形成了极大的电流密度。由于转化为热量的功率损耗与电流密度的二次方成正比，当电器所控制的电路系统出现过载或短路时，巨大的电流密度就会产生巨大的焦耳热，造成触头熔焊乃至整个触头系统失效。不仅如此，触头静态接触时的温升还对液态金属桥形成的材料转移^[6]、金属蒸气电弧向气体电弧的转换规律^[7]及电器触头系统的设计都有着极为重要的影响。

研究电触头静态电接触时的温升，必须首先获取导电斑点及收缩区电流密度的分布，因为影响电触头发热的主要热源——焦耳热的分布主要受到电流密度的影响。本节介绍 Park 等关于导电斑点区域电流密度分布研究的结果^[8]。

Park 的研究应用了 Greenwood 关于导电斑点内相距很近的多个斑点电流相互影响的思想^[5]，对任意 a 斑点 i ，有

$$V_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} I_j \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-8)$$

为求解此方程组，假定

- 1) 每个 a 斑点的电位相等，即 $V_i = V$ ；
- 2) 如图 2-5 所示，在每一环上的 a 斑点具有相同的半径，此半径为一等效值；
- 3) a 斑点在每一环上均匀分布，流过同一环上 a 斑点的电流相等；