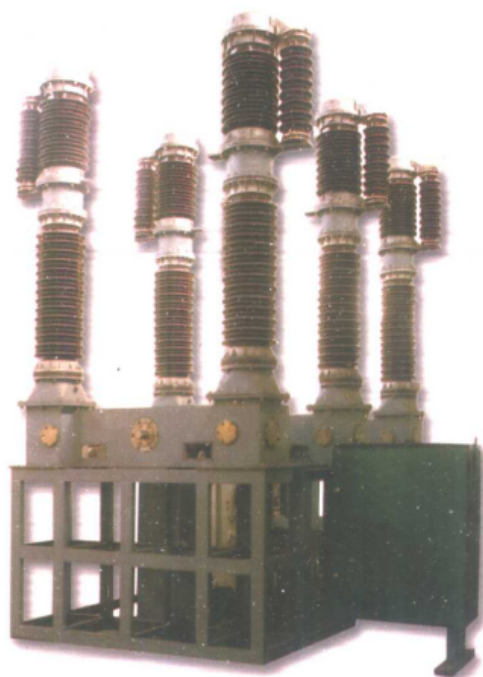


大容量真空开关理论 及其产品开发

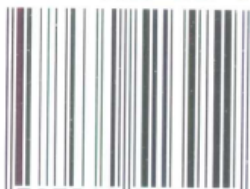
王季梅 苑舜 主编



西安交通大学出版社

责任编辑 / 吴寿镗 杨鸿森 封面设计 / 伍 胜

ISBN 7-5605-1395-6



9 787560 513959 >



ISBN7-5605-1395-6/TM·49 定价: 25.00 元

大容量真空开关理论 及其产品开发

王季梅 苑舜 主编

西安交通大学出版社

内容简介

本书的基本材料选自最近几年来国内有关研究真空电弧理论及其应用的主要文献,包括由本书编者和其他高等院校博士生导师们和研究院、所的专家们撰写的科学研究论文,以及与真空开关产品开发的有关资料。内容包括具有指导意义的真空电弧理论研究方向的专论和我国当前高压真空断路器方面主要产品开发现状。从而说明我国真空开关的发展水平。

本书可供从事电力部门、电工制造部门以及有关研究院、所专家们和工程技术人员参考,亦可作为高等院校电器、输配电等相关专业教学和科研参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大容量真空开关理论及其产品开发/王季梅,苑舜主编. —西安:西安交通大学出版社,2001.10

ISBN 7-5605-1395-6

I. 大… II. ①王… ②苑… III. ①真空开关—理论②真空开关—产品—开发 IV. TM561.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001) 第 041514 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)

陕西宝石兰印务有限责任公司印装

各地新华书店经销

*

开本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:12.5 字数:317 千字

2001 年 10 月第 1 版 2001 年 10 月第 1 次印刷

印数:0 001~2 000 定价:25.00 元

发行科电话:(029)2668357,2667874

前 言

近几年来,有关研究真空电弧理论及其应用的高等院校的博士生导师们,他们在指导博士研究生的过程中曾选编了和编写了不少这方面的材料,同时有关研究真空开关的研究院、所的专家们,他们在工作实践过程中也曾编写了一些这方面的材料。编者认为能及时地将这些材料选编成册是很有意义的。为此目的发起了本书的编写工作。

本书主要选自西安交通大学、大连理工大学、北方交通大学和华中科技大学等电器专业博士研究生的部分论文资料和博士生导师们本人编写的材料,同时吸收了东北电力科学研究设计院和西安高压电器研究所专家们所编写的有关真空开关研究和产品开发工作的材料。

本书内容总共分 17 章。第 1,4,8,15,17 章选自王季梅提供的内容;第 2 章选自吴维忠专家提供的文章;第 3,5,6,7,9,14 章选自邹积岩博导提供的内容,并仔细地作了修改和补充等工作;第 10 章选自王毅博导提供的内容;第 11,12,13 章选自苑舜提供的内容;第 16 章选自元复兴专家提供的文章。最后汇总后由王季梅和苑舜执笔完成。

本书可作为有关电力部门、电工制造部门以及有关研究院、所专家们和工程技术人员参考用书,也可作为高等院校相应专业的师生的教学参考用书。

编者

2001 年 4 月于西安

目 录

前 言

第 1 章 大电流真空电弧收缩现象和阳极斑点形成的理论分析

- 1.1 大电流真空电弧的收缩现象 (1)
- 1.2 阳极斑点形成的理论和分析 (12)

第 2 章 真空电弧燃弧过程中的放气和吸气现象的分析

- 2.1 概论 (22)
- 2.2 燃弧过程中的气体释放 (24)
- 2.3 真空电弧生成物的吸气 (28)
- 2.4 $\tau < \tau_m$ 时燃弧期间的动态真空度 (31)
- 2.5 $\tau > \tau_m$ 时燃弧期间的动态真空度 (38)
- 2.6 弧后吸气作用 (41)
- 2.7 结论 (42)

第 3 章 真空电弧与其电极表面的热过程研究

- 3.1 触头表面热过程的显热容模型 (45)
- 3.2 CuCr 触头电侵蚀的计算 (54)
- 3.3 触头表面液池中的物理过程 (57)
- 3.4 熔池凝固特性及对表面形貌的影响 (61)
- 3.5 结论 (62)

第4章 真空电弧熄灭后的介质强度恢复过程的研究

- 4.1 弧后真空间隙介质强度恢复的现象与分析方法… (66)
- 4.2 介质恢复时间的理论计算…………… (73)
- 4.3 介质强度恢复时间的测量…………… (84)
- 4.4 介质恢复研究的分析与结论…………… (87)

第5章 真空灭弧室经大电流开断后的绝缘耐压测试研究

- 5.1 弧后绝缘耐压的实验研究…………… (89)
- 5.2 真空灭弧室关合操作后的绝缘变化…………… (96)
- 5.3 大电流开断后绝缘劣化机理分析 …… (101)
- 5.4 结论 …… (106)

第6章 真空灭弧室内部电场分布的设计

- 6.1 程序介绍 …… (109)
- 6.2 计算实例及分析 …… (114)
- 6.3 结论 …… (119)

第7章 真空灭弧室的击穿统计特性研究

- 7.1 击穿统计特性的实验研究 …… (121)
- 7.2 击穿统计特性的理论分析 …… (125)
- 7.3 真空击穿的面积效应 …… (131)
- 7.4 弧后重击穿统计特性 …… (133)
- 7.5 结论 …… (137)

第8章 真空灭弧室在开断过程中对电场影响的计算与分析

- 8.1 具有导电情况下的电场方程 …… (142)

8.2	真空灭弧室在开断电流时电导对电场影响的计算与分析	(144)
8.3	弧后残余电荷对真空灭弧室内电场的影响	(150)
8.4	结论	(156)

第 9 章 线圈型纵向磁场结构真空灭弧室的磁场计算与测量

9.1	纵向磁场触头的磁场计算	(158)
9.2	磁屏蔽对弧隙内磁场的影响	(173)
9.3	真空灭弧室内的磁场测量	(178)
9.4	结论	(183)

第 10 章 真空断路器用 CuCr 触头材料的改性研究

10.1	概论	(185)
10.2	目前制造 CuCr 触头材料的几种新方法简介	(186)
10.3	CuCr 触头材料等离子熔炼的实验研究	(187)
10.4	CuCr 触头材料的深冷处理	(191)

第 11 章 真空断路器机械特性的研究

11.1	分闸运动特性	(196)
11.2	用真空电弧数学模型分析触头最佳分闸运动特性	(202)
11.3	合闸速度特性分析	(212)
11.4	真空断路器合分闸操作对击穿性能的影响	(218)
11.5	通过燃弧时间的统计分析对真空断路器机械特性进行评估	(227)

第 12 章 真空断路器操动机构的优化设计和分析

- 12.1 真空断路器操动机构优化基础…………… (235)
- 12.2 动力源设计及优化…………… (238)
- 12.3 传动机构优化分析…………… (262)
- 12.4 弹簧操动机构中凸轮优化设计方法…………… (272)

第 13 章 110kV 双断口真空断路器机构设计

- 13.1 整体机构的确定…………… (281)
- 13.2 机构运动分析…………… (284)
- 13.3 机构运动精度分析…………… (287)
- 13.4 机构动力精度分析方法…………… (290)
- 13.5 63kV 单断口真空断路器整机设计 …… (292)

第 14 章 真空触发开关

- 14.1 真空触发开关的基本原理与结构…………… (296)
- 14.2 TVS 的触发 …… (303)
- 14.3 TVS 的导通与关断 …… (312)
- 14.4 TVS 介质恢复 …… (319)

第 15 章 杆式手操作真空负荷开关的研制

- 15.1 结构和操作过程…………… (325)
- 15.2 性能测试及分析…………… (331)
- 15.3 结论…………… (338)

第 16 章 10kV 大容量和 110kV 高电压真空断路器的开发

- 16.1 10kV、4000A 和 50kA 真空断路器的开发 …… (341)
- 16.2 导向与缓冲装置…………… (347)

16.3	110kV 高电压真空断路器的开发	(349)
------	-------------------------	-------

第 17 章 真空发电机断路器的研制

17.1	发电机断路器的发展现状	(356)
17.2	真空发电机断路器的工作原理	(359)
17.3	真空发电机断路器用真空隔离器、真空灭弧室及操动机构的研究	(360)

第 1 章 大电流真空电弧收缩现象和阳极斑点形成的理论分析

一般来说,真空开关在开断大电流的过程中如出现电弧的收缩现象和形成阳极斑点,就可认定真空开关的开断能力已达到了极限。研究真空电弧的收缩现象和阳极斑点的形成,其目的正是为了提高真空开关的开断能力。因此从理论上分析这一现象的原因具有重要的现实意义。

1.1 大电流真空电弧的收缩现象

1.1.1 大电流真空电弧的物理模型

大电流真空电弧与一般真空电弧一样可以按图 1-1 所示的原理示意图划分为四个区域。

1. 阴极等离子体区 在这个区域内,由阴极斑点提供大量金属蒸气;在金属蒸气粒子的相互碰撞作用下,发生金属蒸气的电离,形成高密度的等离子体。

2. 阴极喷射区 阴极等离子体区形成的高密度等离子体不断向触头间隙进行喷射的区域。每个阴极斑点各自独立地向触头间隙喷射等离子体,在大电流真空电弧的分析中可将阳极等离子体区和阴极喷射区两个区域合称为阴极斑点区。

3. 弧柱等离子体区 由阴极斑点区向弧柱中喷射的等离子

体形成弧柱等离子体区。Schellekens H. 测量结果表明^[1]：弧柱中粒子的自由行程要比触头间隙小得多。为此可以利用磁流体动力学方程来描述真空电弧的弧柱过程。

4. 阳极鞘层区 是弧柱等离子体区向阳极过渡的区域。在这个区域内存在着阳极电场,它是由集聚于阳极表面附近较高密度的正离子形成的。

在大电流真空电弧中,阴极斑点区的厚度大约为 1mm,阳极鞘层区的厚度大约为离子平均自由程的几倍,接近 0.1mm。

由于每个阴极斑点流过的电流大致相等,并且阴极斑点在阴极表面作高速运动,因而可以将大电流真空电弧理想化,即认为从阴极表面向触头间隙喷射的等离子体是一束均匀的磁流体。在未出现阳极斑点前,阳极表面只有极少量的金属蒸发,这样可以不考虑阳极对弧柱的影响。

基于文献[2]给出的解释,在工频情况下的大部分燃弧时间内,电流相对变化率与特征时间的乘积小于 1%,在这样的情况下可将燃弧过程作为似稳态来处理。

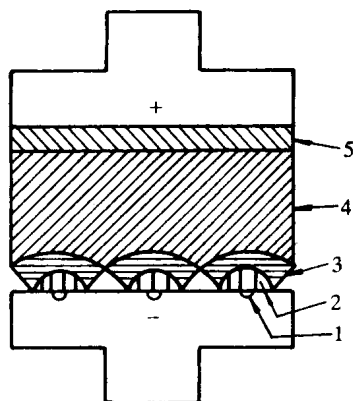


图 1-1 大电流真空电弧的原理示意图

- 1—阴极斑点;2—阴极等离子体区;
- 3—阴极喷射区;4—弧柱等离子体区;
- 5—阳极鞘层区

1.1.2 弧柱等离子体基本传输方程

在大电流真空电弧中,弧柱中的电流密度较大,其特性主要为各种粒子碰撞过程所主导,这样就可以利用磁流体动力学方程组来描述弧柱等离子体的各种传输过程^[3]：

质量守恒方程

$$\partial n / \partial t + \nabla (nv) = S \quad (1-1)$$

动量守恒方程

$$nm[\partial \mathbf{v} / \partial t + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}] = -\nabla P + qn(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{R} \quad (1-2)$$

能量守恒方程

$$\rho dU/dt = \nabla (k \nabla T) - \nabla (Pv) + \nabla q_r + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} - E_m \quad (1-3)$$

电流传输方程

$$\mathbf{J} = \sigma_0[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \beta(\mathbf{J} \times \mathbf{B})] \quad (1-4)$$

此外,当 $\partial \mathbf{D} / \partial t = 0$ 以及 $\partial \mathbf{B} / \partial t = 0$ 时,麦克斯韦电磁场方程可写作

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (1-5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1-6)$$

式中 n ——流体的粒子密度;
 m ——粒子质量;
 $\mathbf{v}$ ——流体的速度矢量;
 S ——粒子源产生率;
 P ——弧柱中的压强;
 q ——电荷量;
 $\mathbf{E}$ ——电场强度;
 $\mathbf{B}$ ——磁感强度;
 $\mathbf{R}$ ——包括粘滞力和摩擦力的内力;
 ρ ——流体的质量密度;
 U ——系统内能;
 σ_0 ——电导率;
 k ——热传导系数;
 T ——磁流体温度;
 q_r ——辐射热;

J ——电流密度；

E_m ——包括蒸发热、分解热等内耗散；

β ——霍尔系数；

μ_0 ——真空磁导率。

本章将利用上述质量守恒、动量守恒、能量守恒、麦克斯韦电磁场和电流传输方程等进行大电流真空电弧收缩现象分析。

1.1.3 弧柱中自生磁场传输方程的推导

弧柱中自生磁场是指电弧电流自身产生的旋向磁场。在大电流真空电弧的弧柱中存在着热扩散与自生磁场产生的收缩作用。通过计算自生磁场在弧柱中的分布,可以求得弧柱中电流分布。

1. 弧柱中自生磁场传输方程的推导

在推导弧柱中自生磁场传输方程时,假定电弧电流为轴对称分布,这样求解区域就为电弧轴向截面的一半。根据上节给出的基本方程,在图 1-2 所示的坐标系中,可以列出以下各式

$$\mathbf{B} = -B_\varphi \mathbf{e}_z - B_z \mathbf{e}_\varphi \quad (1-7)$$

$$\mathbf{v} = v_0 \mathbf{e}_z \quad (1-8)$$

$$\mathbf{J} = -j_r \mathbf{e}_r + j_\varphi \mathbf{e}_\varphi - j_z \mathbf{e}_z \quad (1-9)$$

式中 $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$ ——坐标系的单位矢量；

B_φ, B_z ——磁感强度的旋向和轴向分量；

v_0 ——流体的速度；

j_r, j_φ, j_z ——电流密度的 3 个分量。

由式(1-4)及(1-5)可以得到

$$(\nabla \times \mathbf{B})/\mu_0 = \sigma_0[(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \beta(\mathbf{J} \times \mathbf{B}) + \mathbf{E}] \quad (1-10)$$

对式(1-10)两端求旋度,并将式(1-6)代入可以得到

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) &= \sigma_0 \mu_0 \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \\ &\quad \sigma_0 \mu_0 \beta \nabla \times (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \end{aligned} \quad (1-11)$$

将式(1-11)展开可以得到旋向分量

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r B_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 B_\varphi}{\partial z^2} = \mu_0 \sigma_0 v_0 \frac{\partial B_\varphi}{\partial z} + \mu_0 \sigma_0 \beta \left[\frac{\partial}{\partial z} (j_\varphi B_z) + \frac{\partial}{\partial z} (j_z B_\varphi) + \frac{\partial}{\partial r} (j_r B_\varphi) \right] \quad (1-12)$$

由电流连续性方程可以得到

$$j_r = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B_\varphi}{\partial z} \quad (1-13)$$

$$j_z = \frac{B_\varphi}{\mu_0 r} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B_\varphi}{\partial r} \quad (1-14)$$

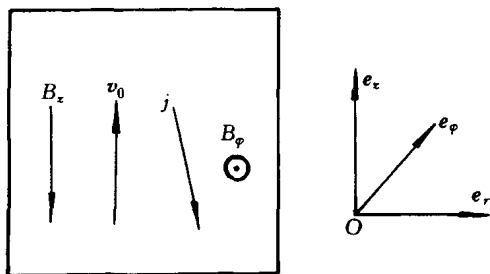


图 1-2 求解区域及参考坐标系

由式(1-4)可以得到

$$j_\varphi = -\frac{\sigma_0 \beta}{\mu_0} B_z \frac{\partial B_\varphi}{\partial z} \quad (1-15)$$

将式(1-9)至(1-11)代入式(1-8)中可以得到

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r B_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 B_\varphi}{\partial z^2} (1 + \beta^2 \sigma_0^2 B_z^2) - \left(v_0 + \frac{2 B_\varphi \sigma_0 \beta}{r} \right) \frac{\partial B_\varphi}{\partial z} = 0 \quad (1-16)$$

利用相似参数法处理式(1-16),并令

$$\bar{R} = R/R_0 \quad (1-17)$$

$$\bar{Z} = Z/D \quad (1-18)$$

$$\bar{B}_\varphi = B_\varphi/B_0 \quad (1-19)$$

$$\bar{B}_z = B_z/B_0 \quad (1-20)$$

式中 R_0 为电极半径, D 为电极开距, $B_0 = \mu_0 I / (2\pi R_0)$, 其中 I 为电弧电流。将式(1-17)至(1-20)代入式(1-16)可以得到

$$K_c^2 \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial (\bar{r} \bar{B}_\varphi)}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{\partial^2 \bar{B}_\varphi}{\partial \bar{z}^2} \left(1 + \frac{R_{me}^2 \bar{B}_z^2}{4K_c^2} \right) - \left(R_{mm} + \frac{R_{me} \bar{B}_\varphi}{\bar{r}} \right) \frac{\partial \bar{B}_\varphi}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (1-21)$$

式中 $K_c = D/R_0$;

$$R_{me} = \sigma_0 \mu_0 \beta j_0 D;$$

$$R_{mm} = \sigma_0 \mu_0 V_0 D;$$

$$\beta = 1/en_e;$$

j_0 —阴极表面平均电流密度;

并且称 R_{me} , R_{mm} 为磁雷诺数。

2. 边界条件的确定

1) 阳极表面边界条件的确定

由式(1-4)可以得到

$$j_r = -\sigma_0 [E_r + V_0 B_\varphi + \beta(j_\varphi B_z + B_\varphi j_z)] \quad (1-22)$$

$$j_\varphi = -\sigma_0 \beta j_r B_z \quad (1-23)$$

$$j_z = -\sigma_0 (E_z + j_r B_\varphi) \quad (1-24)$$

由电流连续性方程可以得到

$$r \left(\frac{\partial j_r}{\partial r} + \frac{\partial j_z}{\partial z} \right) - j_r = 0 \quad (1-25)$$

将式(1-13)与式(1-14)代入式(1-25)的偏导项中, 并将式(1-22)代入式(1-25)的 j_r 中, 得

$$\partial B_\varphi / \partial z - \sigma_0 \mu_0 [E_r + V_0 B_\varphi + \beta(j_\varphi B_z + B_\varphi j_z)] = 0 \quad (1-26)$$

据文献[5]给出的测量结果, 可以计算出在 $0 \sim 10^3 \text{ V/m}$ 数量

级范围内的阳极表面径向电场强度 E_r 。设由阴极发射出来的等离子体的速度为 $7.4 \times 10^3 \text{ m/s}$ 和电子平均漂移速度为 $7.2 \times 10^3 \text{ m/s}$ [6]。因而可以忽略径向电场强度项的作用,将阳极表面近似成为等电位面。这样式(1-26)可以简化为

$$\partial B_\varphi / \partial z - \sigma_0 \mu_0 [V_0 B_\varphi + \beta(j_\varphi B_z + B_\varphi j_z)] = 0 \quad (1-27)$$

将式(1-13)、(1-14)、(1-23)代入式(1-27)得

$$\frac{\partial B_\varphi}{\partial z} (1 + \sigma_0^2 \beta^2 B_z^2) - \frac{\sigma_0 \mu_0 \beta B_\varphi}{r} \frac{\partial(r B_\varphi)}{\partial r} - \mu_0 \sigma_0 V_0 B_\varphi = 0 \quad (1-28)$$

利用上述的相似参数法可以将式(1-28)推导成为:

$$\frac{\partial \bar{B}_\varphi}{\partial \bar{z}} \left(1 + \frac{R_{me}^2 \bar{B}_z^2}{4K_c^2} \right) - \left[R_{mm} + \frac{R_{me}}{2\bar{r}} \frac{\partial(\bar{r} \bar{B}_\varphi)}{\partial \bar{r}} \right] \bar{B}_\varphi = 0$$

式(1-28)为一非线性的第三类边界条件。

2) 其他边界的边界条件

阴极表面:在阴极表面上,由于每个阴极斑点通过的电流大致一定,而且阴极斑点在阴极表面高速运动,故可以将阴极表面电流密度近似视为均匀分布,因而有

$$\bar{B}_\varphi(\bar{r}, 0) = \bar{r} \quad (1-30)$$

触头轴线上:在触头轴线上,电流密度数值不可能为无穷大,因而对应的磁感强度数值必定等于零,即

$$\bar{B}_\varphi(0, \bar{z}) = 0 \quad (1-31)$$

电弧边界上:为了分析方便起见,现假设弧柱半径为一直圆柱,并且弧柱半径等于触头半径,而且电弧电流全部在该半径以内,这样在弧柱边界上有

$$\bar{B}_\varphi(1, \bar{z}) = 1 \quad (1-32)$$

上述方程式(1-21)、(1-29)~(1-32)可构成一个非线性偏微分方程的定解问题。