

空气开关电弧的数学模型及其特性的研究综述

李兴文, 陈德桂

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

Review of the Investigations on the Modeling and Characteristics of Air Switching Arc

LI Xing-wen, CHEN De-gui

(State key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 从空气开关电弧的平衡态化学组成、基本属性、建模与仿真、实验测试等角度, 综述了国内外空气开关电弧的数学模型及其特性的研究进展, 介绍了空气开关电弧物性参数的计算方法, 列举了多个有代表性的电弧数学模型以及各种电弧特性的测试手段及其应用, 最后指出了空气开关电弧研究所面临的几个问题。

关键词: 电弧; 建模与仿真; 测试; 磁流体动力学
中图分类号: TM501.2 **文献标志码:** A

Abstract: The paper reviews the recent progress of the investigations on the modeling and characteristics of air switching arc from the following points: chemical composition of the balance state; fundamental properties; arc modeling and simulation; experimental test, and so on. The calculation method for fundamental parameters, typical arc models and various measurement ways for arc characteristics are introduced briefly. In addition, some difficult problems of this field are pointed out.

Key words: arc; modeling and simulation; testing; magnetohydrodynamics

0 引言

等离子体是由大量带电粒子组成的非束缚态宏观体系^[1]。热等离子体是指完全或部分电离的气体, 属于低温等离子体范畴, 空气开关电弧是一种最典型的热等离子体^[2]。

1835年, 法拉第研究了气体放电基本现象; 1879年, 克鲁克斯提出“物质第四态”来描述气体放电中产生的电离气体; 1929年, 汤克斯和朗缪尔首次提出“Plasma”一词; 20世纪50到80年代, 人们建立了现代等离子体物理学, 包括以下3个相对独立的领域: 受控热核聚变等离子体物理、空间与天体

等离子体物理和低温等离子体物理与应用。此后, 随着低温等离子体在镀膜、表面改性、冶炼、有害物处理、光源、航天器推进等领域的应用, 使得等离子体物理的发展达到了新的高潮^[3-12]。

伴随着低温等离子体物理的发展, 对空气开关电弧这一低压电器科学中最核心和最关键的内容的研究也逐步深入, 主要包括: 空气开关电弧的基本属性、电弧的数学模型与仿真以及电弧特性的实验测试等内容。笔者主要介绍国内外在该领域的研究进展。

1 空气开关电弧的基本属性

空气开关电弧的基本特征是: 电场强度相当低(低于数 kV/m), 但电子和离子数密度非常高(大于 10^{23} m^{-3}); 一般满足局部热动平衡(LTE)条件, 且温度一般为 10 000 K 量级, 也就是 1 eV 数量级, 最高可达 25 000 K^[2]。对空气开关电弧基本属性的研究包括: 电弧与电极、器壁材料等相互作用影响下的等离子体平衡态化学组成、热动属性及传输参数、辐射特性及辐射数学模型等。对这些问题的研究, 不仅可以掌握其化学物理性质, 且为建立电弧的 MHD 模型提供物性参数, 从而分析空气开关电弧的物理特性。

1.1 空气开关电弧的平衡态化学组成、热动属性及传输参数

一般来说, 除了以下3个区域, 空气开关电弧满足 LTE 条件: 对流主导粒子碰撞过程的电极附近区域^[13]; 从电弧中心吸收辐射能量的边缘区域^[14]; 扩散率大于复合率导致局部化学不平衡的低温区电弧^[15]。

事实上, 对于电弧中心区域是否处于 LTE 状态, 仍然存在争议。文[7]利用汤姆森散射法测量氩电弧的气体温度、电子温度和电子数密度时发现, 即使在电弧中心区域, 也存在严重偏离 LTE 的情况。但是, 对空气开关电弧化学组成的分析以及热动属

收稿日期: 2007-05-25; 修回日期: 2007-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507016)。

作者简介: 李兴文(1978-), 男, 副教授, 研究方向为电弧电接触理论及其应用和电力电子技术。

性和传输参数的计算,均是在LTE条件进行的。

计算等离子体的化学组成,不仅是计算等离子体属性必要的第一步,也是认识等离子体化学过程的重要一环。计算温度从接近室温到等离子体的中心区域温度(约30000K)。在这个温度范围内,根据不同的化学反应,需要考虑很多不同的物质种类。LTE状态下,等离子体的局部化学组成仅取决于局部温度、压力和化学要素的浓度。平衡态化学组成的计算是基于质量守恒法则,可以用两种方法获得:如果仅考虑气态物种,可用Saha和Guldberg-Waage法;如果要考虑低温、多相时,利用最小吉布斯自由焓法,该方法是计算平衡态化学的标准技术^[3]。一旦等离子体的化学组成确定后,利用各种离子的质量、焓和数密度等数据,就可以计算出其热动属性,即焓、比热和密度等参数。

传输系数的计算是基于求解描述电子能量分布的玻耳兹曼方程,文[8]利用查普曼-恩斯柯方法对此进行了详细的分析和计算。

基于上述方法,文[9]计算了考虑电弧与产气材料相互作用后的90%空气-10%尼龙(Polyamide 6-6, PA6-6)混合电弧等离子体的物性参数;文[3]计算了考虑电弧与铜电极相互作用后的空气电弧等离子体的物性参数;文[10]分别计算了PA6-6等多种产气材料在高温电弧作用下分解后的化学组成及热动属性,并从理论上分析了材料属性对电弧特性的影响。

作为实例,图1为氩、氮、氧、氢和氢气的热导率随温度的变化曲线^[16]。

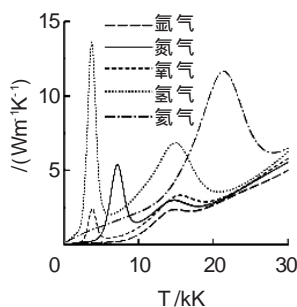


图1 不同气体的热导率随温度的变化

热导率在数量上由以下3部分组成:运动能量传输引起的运动热导率、内部能量传输引起的内部热导率和由于分子的分解和复合、电离等化学反应引起的能量传输而导致的反应热导率。从所示几种气体的热导率曲线可看出,除了峰值区域外,随着温度的升高,由于分解和电离的作用使得反应热导率增大。而且,一般来说,较轻的气体热导率比较重的气体高,而热导率高又有利于电弧的冷却,这也正是在低压断路器灭弧室器壁上布置电弧作用后能够产生氢气的材料,以提高其开断性能的主要原因之一。

1.2 空气开关电弧的辐射特性及辐射数学模型

辐射是包括空气开关电弧在内的热等离子体中

的一个重要现象和研究内容。一般来说,辐射的影响表现在以下3个方面:①在温度最高的区域,辐射常常是最重要的能量耗散方式;②辐射热传递是等离子体内部的一种有效能量交换方式;③等离子体辐射出的能量可以加热周围的气体或者侵蚀外部材料。

在LTE条件下,空气开关电弧的辐射规律可用式(1)所示的基尔霍夫公式来描述^[9]。其中K和K分别为发射和吸收系数;B为普朗克函数;ν为频率;h为普朗克常数;c为光速;T为温度。

$$\frac{K}{K} = B(T, \nu) = \frac{2h^3}{c^2(e^{h/(kT)} - 1)} \quad (1)$$

虽然式(1)所示的关系比较简单,但要严格计算空气开关电弧的辐射是非常困难的^[17]。这是因为:一方面需要在整个光谱范围内对每一个单元的发射和吸收进行计算;另一方面,光谱是由连续光谱和线光谱组成,而谱线取决于等离子体中的离子能量水平;此外,压力和温度对辐射有直接的影响。

目前,对空气开关电弧来说,常用的辐射模型有:净发射系数法(NEC)、P1模型、局部特性法(MPC)和简化公式法等。下面简要介绍这几种方法。

净发射是指一个等温球中发射和吸收能量之间的差值。图2为空气开关电弧中不同等离子体半径R_p时净发射系数n_{net}随温度的变化规律。可以看出,随着R_p的减小,n_{net}的数值增大。当R_p=0时,也就是对应于光学薄层等离子体,大约有90%的辐射能量被发射点1mm内的等离子体吸收^[2]。值得指出的是,很多学者对NEC方法进行了深入的研究,并得到了很有价值的数^[11,12],他们已将n_{net}与温度、压力和平均等离子体半径的关系做成了表格,以便于对开关电弧等离子体进行进一步研究。应该指出的是,虽然文[12]采用负发射系数法,考虑了边缘区域对电弧中心区域的辐射能量的吸收,在一定程度上完善了NEC模型,但是,从本质上讲,NEC方法可以比较理想地分析电弧中心区域的温度分布,而对温度较低的电弧边缘区域并不能得到较好的结果。

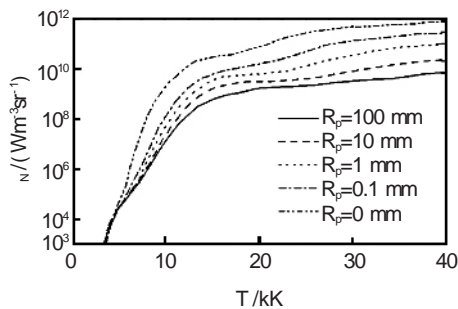


图2 空气开关电弧中等离子体半径对净发射系数的影响

P1模型最早应用于燃烧系统的数值模拟中。和NEC模型相比较,P1模型更适用于考虑等离子体边缘区域和器壁对辐射的影响。P1模型的一个基本假定就是:在一个给定的温度下,平均吸收系数在频域

内是一个常数^[13]。

Sevast Yanenko 早在 1979 年就提出 MPC 方法,但一直到近 10 年才应用到电弧等离子体的研究中^[14],其主要优点是可以更为精确地考虑电弧边缘较冷的区域对电弧中心区域辐射的吸收作用^[15]。MPC 方法的最基本原理是认为辐射的源点 X 和辐射路径上的任意点 Y 之间的温度变化总是线性的,这就可以简化与辐射频率有关的两个积分函数,也就是被称为局部特性函数的 S_{0m} 和 S_{1m} 。局部特征函数与两点的温度及间距有关,因此, MPC 方法能够考虑边缘区域对能量辐射的自吸收。而且在等离子体建模时,可以与流场解耦提前计算出辐射参数,这也是 MPC 方法的最大优点。

文[18]提出用一个简化公式来描述空气开关电弧中的辐射现象。该模型认为每一个控制体积均是一个独立的辐射发射源,并给出了单位体积发射功率 S_r 的表达式。将 S_r 带入能量守恒方程,就可以考虑辐射对电弧运动和特性的影响。该方法避免了繁琐的计算,并且适合于考虑三维时的情况。

2 空气开关电弧的建模与仿真

基于对空气开关电弧基本属性的研究,研究者通过二十多年的努力,逐步建立并不断完善电弧的磁流体动力学数学模型,使得数值仿真已成为一种研究电弧的有效手段。尤其是近年来,随着计算机科学、数值传热学等相关学科的发展,涌现出了很多优秀的计算流体力学(CFD)软件,如 Phoenix, Fluent, CFX, FLOW3D 等。这些软件本身是为解决流体力学和燃烧问题而开发的,但是随着其程序开放程度的不断提高,也为分析电弧这一高温、瞬变问题提供了条件,极大地促进了空气开关电弧仿真技术的进步和发展。

认为电弧等离子体处于 LTE 状态,考虑电弧产生的焦耳热和辐射的影响,用 Navier-Stokes 控制方程就可以建立空气开关电弧的链式、二维及三维磁流体动力学数学模型。然而,电弧弧根的运动及弧根电流密度分布规律、电极附近的鞘层物理等还不甚清楚,这使得现有的空气开关电弧模型均是针对弧柱区而言的^[9,16-30]。并且,研究主要集中在磁场对电弧的控制、尤其是电弧自身磁场的计算方法、电弧物性参数对电弧特性的影响、电弧背后击穿现象及其影响因素的分析等。下面对有代表性的空气开关电弧模型做介绍。

2.1 链式电弧数学模型

文[25]最早提出了开关电弧的链式数学模型,其基本思想是:不考虑气流的作用以及电弧的热效应,认为电弧是由一系列彼此相连的圆柱电流单元组成,每一个单元均受到磁场作用下的 Lorentz 力和

由周围气体的粘度引起的阻力作用,这两个力决定了电弧的运动速度,这样,就可以得到整个电弧运动的基本轨迹和形状。其本质上是一种场的方法,而且该方法只适用于磁驱电弧。文[19]在此基础上进一步完善了链式电弧数学模型,并将其应用到低压断路器的开断过程仿真中。与磁流体动力学模型相比,链式电弧模型的最大特点在于计算速度快。

2.2 Fievet 等人的二维 MHD 电弧数学模型

文[20]采用氮气的物性参数描述电弧属性,建立了一个封闭区域中的二维空气开关电弧 MHD 数学模型,利用该模型,分析了粘度等多种因素对电弧运动的影响,阐述了电弧停滞时间的机理,尤其是对电弧背后击穿现象进行了深入的研究,认为电弧后方剩余电流密度大小决定了是否会发生背后击穿,并给出电流密度的临界值为 5 A/cm。电弧背后击穿现象的发生,会严重影响低压断路器的限流性能和开断能力,同时也会加剧触头的侵蚀。20 世纪 90 年代中期,该问题是低压电器的一个研究热点,这也促进了电弧模型的发展。文[21]也通过建立二维 MHD 数学模型,仿真分析了电弧背后击穿现象,并能够同步模拟电弧运动过程中电弧电流、电压的变化。在此基础上,提出了在灭弧室中加入产气材料是抑制该现象的一个有效措施。

2.3 三维 MHD 电弧数学模型

文[16]于 1998 年在基于 Flow3D 软件的基础上,首次建立了较为完整的空气开关电弧三维 MHD 数学模型。其计算模型为具有平行跑弧道的 8 mm × 42 mm × 4.5 mm 封闭方盒,电流为直流 1 000 A,电位边界为 Neumann 条件,采用 Biot-Savart 方程来计算电弧自身产生的磁场,结果给出了在磁场作用下,电弧的位置、电弧电压、灭弧室内气压随时间的变化过程。接着,在已有模型的基础上,文[16]考虑非线性铁磁物质的影响,由于 Biot-Savart 方程仅适用于磁导率为常数的情况,这样就提出用向量位的方法计算区域内的磁场,进一步建立了可考虑铁磁栅片存在时的电弧模型,并分析了不同大小的铁片对电弧运动速度的影响。在其最新的研究中,仿真了电弧在栅片中的运动与分割过程,文[23]从理论上描述了电弧在栅片中的燃烧规律,指出电弧能否在栅片中产生新的弧根而形成一系列的短弧要满足一定的电弧电压条件。

2.4 器壁侵蚀型电弧数学模型

器壁侵蚀型电弧的概念最早起源于 SF₆ 高压断路器,通常在断路器的喷口区域布置 PTFE 材料,以提高断路器的开断能力。文[24]应用 Euler 方程,建立了圆管中器壁侵蚀型电弧的一维数学模型,简单分析了器壁产气对气流的影响;文[17]基于等温两区域模型,分析了器壁产气作用下电弧及蒸汽层的

温度范围。

近年来,发现在低压断路器的灭弧室中布置产气材料,有利于抑制电弧背后击穿现象,提高断路器的限流性能和弧后介质恢复强度,从而提高其开断能力。这使得器壁侵蚀型电弧成为当前低压电器领域的一个热点问题。

Andre Murphy 和 Gleizes 在器壁侵蚀型电弧的理论研究方面做了一些有意义的工作。文[10]主要研究了电弧对材料的作用,即产气材料高温分解后的化学组成及热动属性。和文[10]不同,文[3]进一步研究了器壁材料对电弧特性的影响,即考虑器壁材料分解和电极蒸发的影响,分析了混合气体的热动属性及传输参数。文[9]在计算出不同比例的空气和 PA6-6 混合气体的物性参数的基础上,建立了三维电弧模型,分析了外部磁场和等离子体输运特性对电弧运动过程的影响,该模型没有考虑器壁产气对质量、动量和能量守恒方程的影响。文[26]从能量平衡的角度来考虑器壁产气,并分析了吹弧磁场对电弧形状和运动的影响,但其依然采用空气的物性参数来建立电弧模型。文[28]利用文[27]得到的电弧对器壁材料的侵蚀率数据,同样以空气的物性参数作为电弧属性,建立了不可压缩的三维电弧模型。

值得指出的是,对于器壁侵蚀机理到底是热辐射还是热传导这一问题,文[27]和文[29]均认为是热辐射。但是,关于低压断路器中的电弧能量流向,目前还没有统一的认识。文[29]认为电弧能量的50%~80%辐射出去了;ZHOU 指出约70%的电弧能量是依靠辐射耗散的,然而,MARTIN 认为这个结论只有在大电流时成立,小电流时低于这个数值^[31]。因此,如何认识器壁侵蚀的机理问题尚需进一步研究。

此外,针对器壁侵蚀型电弧,笔者在已有工作的基础上,综合考虑灭弧室结构、产气材料性质以及与电弧之间的相互作用,建立了器壁侵蚀型电弧数学模型^[32]。同时,通过实验研究发现,将产气材料分别布置在阳极和阴极上时,通过光谱系统测量电弧的平均温度,发现仿制在阴极上时,电弧温度较低,这说明器壁侵蚀有极性效应,同时指出其侵蚀机理不完全是热辐射,而更多的是热传导^[33]。

3 结语

从以上可以看出,为了不断提高电器产品的性能,国内外学者对空气开关电弧的数学模型及其特性进行了长期、持续地研究,主要包括空气电弧基本物理特性、建模与仿真、实验测试等方面,不断地丰富着空气电弧理论,并推动着电器科学及技术的发展。

但是,在以下方面仍然存在一些问题,需要研究者进行进一步的工作,从而很好地解决它们。

(1) 引入器壁产气材料后,电弧与器壁材料之间

的相互作用机理仍不甚清楚,与磁驱电弧对应,气吹灭弧的物理过程还没有从理论上得到合理的解释。

(2) 对电弧弧根的运动及弧根电流密度分布规律、鞘层物理至今没有完整的、可信的描述。这涉及到电弧与电极的相互作用过程,以及电弧演变过程中能量的流向与电极的关系。这也阻碍了电弧建模的发展,客观上限制了模型的完整性。

(3) 辐射特性及辐射数学模型需要进一步的完善,从而提高电弧数值模拟的精度及计算速度。

(4) 目前的仿真研究不能直接应用到实际的产品开发,这一方面受到上述问题的制约,还有更多的因素,包括计算方法及其精度、计算机性能等。

参考文献:

- [1] 刘万东. 等离子体物理导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002.
- [2] GLEIZES A, GONZALEZ J J, FRETON P. Thermal Plasma Modeling[J]. J Phys D: Appl Phys. 2005, 38(9): 153-183.
- [3] MURPHY A B. Thermal Plasma in Gas Mixture [J]. J Phys D: Appl Phys. 2001, 34(20): 151-173.
- [4] HSU K C, ETEMADI K, PFENDER E. Impact of Cathode Evaporation on a Free-burning Arc [J]. J Phys D: Appl Phys. 1989, 22(11): 1692-1696.
- [5] CHAMMAN A, ELLOUMI H, MRABET B, et al. Effect of a Pulsed Power Supply on the Spectral and Electrical Characteristics of HID Lamps [J]. J Phys D: Appl Phys. 2005, 38(8): 1170-1171.
- [6] TANAKA Y, MICHISHITA T, UESUGI Y. Hydrodynamic Chemical Non-equilibrium Model of a Pulsed Arc Discharge in Dry Air at Atmospheric Pressure [J]. Plasma Sources Sci Technol. 2005, 14(1): 134-151.
- [7] SNYDER S C, LASSAHN G D, REYNOLDS L D. Direct Evidence of Departure from Local Thermodynamic Equilibrium in a Free-burning Arc-discharge Plasma [J]. Phys Rev E. 1993, 48(5): 4124-4127.
- [8] HIRSCHFELDER J O, CURTIS C F, BIRD R B. Molecular Theory of Gases and Liquids[M]. New York: Wiley, 1964.
- [9] SWIERCZYNSKI B, GONZALEA J J, TEULET P, et al. Advances in Low Voltage Circuit Breaker Modeling[J]. J Phys D: Appl Phys. 2004, 37(4): 595-609.
- [10] ANDRE P. The Influence of Graphite on The Composition and Thermodynamic Properties of Plasma Formed in Ablated Vapour of PMMA, PA6-6, PETP, POM and PE Used in Circuit-breakers [J]. J Phys D: Appl Phys. 1997, 30(3): 475-493.
- [11] AUBRECHT V, GROSS B. Net Emission Coefficient of Radiation in SF₆ Arc Plasmas [J]. J Phys D: Appl Phys. 1994, 27(1): 95-100.
- [12] ZHANG J F, FANG M T C, NEWLAND D B. Theoretical investigation of 12 kA DC Nitrogen Arc in a Supersonic Nozzle[J]. J Phys D: Appl Phys. 1987, 20(3): 368-379.
- [13] DERON C, RIVIERE P, PERRIN M Y, et al. Modeling Radiative Properties of LTE Air Atmospheric Plasmas[C]// 15th Int Conf on Gas Discharges and their Applications Toulouse, 2004: 145-148.

- [14] AUBRECHTT V, LOWKE J J. Calculations of Radiation Transfer in SF₆ Plasmas Using the Method of Partial Characteristics[J]. J Phys D: Appl Phys. 1994, 27(10): 2066-2073.
- [15] DIXON C M, YAN J D, FANG M T C. A Comparison of Three Radiation Models for the Calculation of Nozzle Arcs[J]. J Phys D: Appl Phys. 2004, 37(23): 3309-3318.
- [16] LINDMAYER M, SPRINGSTUBBE M. Three-dimensional Simulation of Arc Motion between Arc Runners Including the Influence of Ferromagnetic Material [J]. IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol. 2002, 25(3): 406-414.
- [17] RUCHTI C B, NIEMEYER L. Abation Controlled Arc[J]. IEEE Trans Plasma Sci. 1986, 14(4): 423-434.
- [18] KARETTA F, LINDMAYER M. Simulation of the Gasdynamic and Electromagnetic Processes in Low Voltage Switching Arcs [J]. IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol. 1998, 21(1): 96-103.
- [19] 张晋. 低压断路器电弧动态数学模型及开断特性可视化仿真技术的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1999.
- [20] Rachard H, Chevrier P, Henry D, et al. Numerical Study of Coupled Electromagnetic and Aerothermodynamic Phenomena in a Circuit Breaker Electric Arc [J]. Int J Heat Mass Transfer. 1999, 42(10): 1723-1734.
- [21] 陈旭. 低压断路器电弧等离子体数学模型及开断电弧背后转移现象的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2000.
- [22] DAUBE T, STAMMBERGER H, ANHEUSER M, et al. 3D Simulation of a Low-voltage Switching Arc Based on MHD Equations[C]// 14th Symp on Physics of Switching Arc. Brno, 2001: 45-50.
- [23] LINDMAYER M, MARZAHN E, MUTZKE A, et al. The Process of Arc-splitting between Metal Plates in Low Voltage Arc Chutes [C]// Proc 50th IEEE Hdm Conf. on Electrical Contacts. Seattle, 2004: 28-34.
- [24] GILLIGAN J G, MOHANTI R B. Time-dependent Numerical Simulation of Ablation-controlled Arcs [J]. IEEE Trans Plasma Sci. 1990, 18(2): 190-197.
- [25] HORINOUCHE K, NAKAYAMA Y, HIDAKA M, et al. A Method of Simulating Magnetically Driven Arcs[J]. IEEE Trans Power Delivery. 1997, 12(1): 213-218.
- [26] SCHLITZ L Z, GARIMELLA S V, CHAN S H. Gas Dynamics and Electromagnetic Processes in High-current Arc Plasmas[J]. J Appl Phys. 1999, 85(5): 2540-2555.
- [27] DOMEJEAN E, CHEVRIER P, FIEVET C, et al. Arc-wall Interaction Modeling in a Low-voltage Circuit Breaker [J]. J Phys D: Appl Phys. 1997, 30(15): 2132-2142.
- [28] 孙海涛. 低压断路器开断电弧三维动态MHD数学模型及影响开断特性因素的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [29] CHEVRIER P, BARRAULT M, FIEVET C, et al. Industrial Applications of High-, Medium- and Low-voltage Arc Modeling[J]. J Phys D: Appl Phys. 1997, 30(9): 1346-1355.
- [30] ZHOU X, THEISEN P. Investigation of Arcing Effects During Contact Blow Open Process [C]// Proc 44th IEEE Holm Conf Electrical Contacts. Arlington, 1998: 100-108.
- [31] MARTIN B, STANISLAV K, HASSAN N. Influence of Vapour Pressure on the Dynamics of Repulsion by Contact Blow-off[C]// Proc 21st Conf Electrical Contacts. Zurich, 2002: 268-275.
- [32] LI Xing-wen, CHEN De-gui, WANG Qian, et al. Simulation of the Effects of Several Factors on Arc Plasma Behavior in Low Voltage Circuit Breaker[J]. Plasma Science & Technology. 2005, 7(5): 3069-3072.
- [33] LI X, CHEN D, LIU H, et al. Imaging and Spectrum Diagnostics of Air Arc Plasma Characteristics [J]. IEEE Trans Plasma Sci., 2004, 32(6): 2243-2249.

(上接第268页) 结构形式。

(2) 产品的主要技术参数已达到国际先进水平。800 kV 级产品可用在海拔 2 000 m 或 3 000 m, 其绝缘性能是目前世界上最高水平。1 100 kV 级产品的绝缘水平也达到国际水平。

(3) 国产隔离开关在绝缘水平、通流能力、无线电干扰、接线端静拉力、短时耐受电流持续时间、开合母线转换电流、接地开关开合感应电流以及整体强度试验等方面, 都高于国外产品。

(4) 国产超高压隔离开关, 从 1985 年算起已有六千多组在全国电力系统中运行, 时间最长已达 20 年, 800 kV 特高压隔离开关已安全运行近两年, 总体情况良好。

(5) 在产品外观、可靠性、稳定性、耐用性、防腐性和免维护方面以及关键原材料的品质与跨国公司产品存在着差距。外购通用件如轴承、自润滑轴套、不锈钢万向接头及紧固件等的质量也有待提高。

3.2 发展的主要经验

(1) 要广泛应用新设备、新技术、新工艺, 诸如加工中心、数控机床、数控板材冲、剪、折弯机等, 要将 SF₆ 断路器的设计制造和质量管理的理念应用到隔

离开关产品上。“工艺出精品, 精品出效益”。

(2) 在超高压和特高压隔离开关设计、制造和管理工作中, 推广应用数字化制造技术, 如虚拟设计的应用, 以提高研发能力、缩短研发周期、降低产品成本、增强产品的市场竞争力。

参考文献:

- [1] 吴美潮. 中国电气进入特高压时期 [J]. 电气世界, 2005(7): 60.
- [2] 刘本粹. 加快西北 750 kV 电网工程建设全面推动“西电东送”北通道进程[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 9-15.
- [3] 钟振蛟. 谈户外高压隔离开关的技术发展与结构演变 [J]. 高压开关行业通讯, 1999(7): 26-34.
- [4] 钟振蛟. 我国超高压隔离开关的发展和水平 [J]. 电器工业, 2006(9): 42-48.
- [5] 李建基. 我国高压开关行业最新发展述评[J]. 电力系统装备, 2005(11): 15-22.
- [6] 林军英. 平高集团在百万伏产品征程中再迈新步 [J]. 高压开关行业通讯, 2006(11): 31-32.
- [7] 孟修丹. 西北 750 kV 工程产品报告 [J]. 电力系统装备, 2005(12): 15-21.
- [8] 宋 泉. 高压开关设备存在的问题及相关技术的发展与研究 [J]. 高压开关行业通讯, 2006(11): 21-29.