

气体开关电弧物性参数计算及特性仿真研究与应用

李兴文, 贾申利, 张博雅

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 电弧物理与特性控制是电力开关设备领域的基础和关键科学技术问题, 几十年来国内外学术界和工业界开展了大量的研究工作, 有力地支撑了高性能电力开关设备的研发和行业的技术进步。本文面向高、低压气体开关, 针对空气、SF₆及其替代气体, 从电弧物性参数(包括热动属性、输运系数、碰撞截面、热态临界击穿场强等)、电弧磁流体动力学建模仿真及其应用、不同因素对电弧特性的影响及其控制规律等几个方面, 系统综述了国内外的相关研究现状及进展情况, 并提出了需进一步深入研究的若干问题, 包括: 电弧物性参数的实验测量方法、考虑弧后非平衡击穿过程的三维气体开关电弧数学模型、直流故障电弧的物理特性及高效检测技术、新型 SF₆ 替代气体灭弧技术等, 从而为我国气体开关电弧理论、高效灭弧技术、新型电力开关设备的研究提供一定的参考与借鉴。

关键词: 电弧; 磁流体动力学; 空气; SF₆ 替代气体; 等离子体参数

Research and Application on Physical Parameters Calculation and Behavior Simulation of Gas Switching Arc

LI Xingwen, JIA Shenli, ZHANG Boya

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

Abstract: Arc physics and characteristic control are the basic and important technological issues in the field of electric power apparatus. Enormous studies have been carried out in academic and industrial institutions in recent decades, which strongly support the development of high-performance power switchgear and the technological advancement. This paper reviews the recent research progress in high and low-voltage gas switchgear with air and SF₆ and their alternative gases from the following aspects: physical parameters (including thermodynamic properties, transport coefficient, collision cross section, thermal critical breakdown field strength and so on), arc Magneto-Hydro-Dynamical (MHD) model simulation and its application, effects of different factors on the arc characteristics and its control regulations and so on. Besides, some issues are proposed and should be deal with in further study, involving the experimental measurement of arc plasma thermodynamic parameters, the arc model of three-dimensional gas switchgear considering the non-equilibrium breakdown process in the post-arc period, the physical characteristics of DC fault arc and the efficient detection technology, the arc extinguishing technology of SF₆ alternative gas. Some valuable references are expected to provide for exploration on the gas switchgear arc theory, arc extinguishing technology and new power switchgear equipment.

Key words: arc; magneto-hydro-dynamics; air; SF₆ alternatives; plasma properties

0 引言

电力开关是电力系统的重要设备, 发挥着不可替代的控制与保护功能。以 SF₆ 为绝缘和灭弧介质的高压断路器主要应用于 110 kV 及以上系统, 而以空气为绝缘和灭弧介质的低压断路器主要应用于交流 1 200 V 和直流 1 500 V 及以下系统。

电力开关能否成功开关, 取决于如何使上万度

的高温电弧在短时间内熄灭, 并承受快速上升瞬态恢复电压的冲击, 条件苛刻、机制复杂, 涉及电磁、流体、机械运动诸多物理过程, 对开关电弧物理与特性控制的理解与掌握是提高电力开关性能的基础和核心。

基于此, 长期以来国内外围绕气体开关电弧开展着持续深入研究, 本文从气体电弧物性参数的基础研究、空气和 SF₆ 及其替代气体磁流体动力学建模仿真与实验研究、气体电弧的特性控制等几个方面, 综述了气体开关物理与特性控制方面的研究工作, 以期对相关研究提供参考。

1 气体电弧物性参数

气体开关电弧是一种典型的热等离子体, 它的运动过程是一个涉及电磁场、气流场、温度场、辐射场等多场耦合的物理、化学过程。如何能够建立描述电弧动态特性的数学模型一直是电弧理论的重要组成部分, 经过近 30 年的努力, 磁流体动力学(magneto-hydro-dynamics, MHD)模型已成为研究电弧物理及特性控制的有效手段, 而这在很大程度上得益于人们在电弧物性参数的研究及相关数据库的建立。

电弧等离子体的物性参数主要包括等离子体的粒子组成, 热力学性质(包括质量密度、焓和定压比热), 以及输运系数(包括电导率、热导率和粘性系数)。目前, 人们已经基本建立了常用气体介质物性参数数据库, 包括空气、SF₆、CO₂、N₂, 以及氟化气体(如 CF₃I、c-C₄F₈ 和 C₃F₈)等。近年来, 新型环保气体, 如 C5-PFK、C4-PFN 及其与 CO₂ 等缓冲气体混合后的物性参数也受到了国内外研究人员的广泛关注。

1.1 热动属性和输运参数

对于气体电弧等离子体来讲, 一般认为电弧中心区域处于局部热力学平衡(local thermodynamic equilibrium, LTE)状态, 可采用单一温度来描述; 而在电极附近、电弧边缘、低温区等不满足 LTE 甚至局部化学不平衡(non local chemical equilibrium, N-LCE)条件, 这样就需要考虑非平衡度的影响、建立双温度模型。

以 Murphy、Gleize、Andre 等人为代表, 国际上围绕气体电弧的物性参数, 开展了大量深入的研究。

1.1.1 空气电弧

Murphy 等人提出了计算热等离子体输运系数和物性参数的计算方法, 获得了压力 0.01~2 MPa, 温度 300~30 000 K 下纯空气、空气和氮气、氩气以及氧气等气体混合下的等离子体物性参数, 并提出了双气体组合扩散系数的概念, 简化了扩散过程的计算, 且保证了计算的准确性^[1-2]。

在电力开关设备中, 不可避免地存在电弧对电极、栅片及灭弧室内其他材料的烧蚀作用, 因此研究多组分混合气体电弧的物性参数具有重要的意义。因此, Gleizes 等人不仅计算了纯空气的物性参数, 而且提出了在考虑金属蒸气和产气材料烧蚀蒸汽情况下, 计算空气与其混合后等离子体的计算方

法, 获得了空气与金属铜、银、铁等以及产气材料 PA66 蒸汽混合后的等离子体物性参数^[3-4]。Andre 等人计算了 PA6-6、PMMA、PETP、POM 和 PE 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^[5-6]。

根据以上工作, 可以归纳计算 LTE 条件下等离子体输运系数和物性参数的基本方法和步骤如下: 依据吉布斯自由能最小原理获得不同压力, 不同温度条件下空气电弧等离子体组分。

其次, 在求得电弧等离子体各种粒子的配分函数和组分之后, 运用标准的热力学关系即可直接求得各种热力学参数。在等离子体中, 粒子通过碰撞相互作用。混合等离子体的速度分布函数的变化可由 Boltzmann 方程描述, 又由于等离子体的宏观性质(温度、压力、速度、浓度等)通量可以由粒子的速度分布函数决定, 因而输运系数可以通过求解 Boltzmann 方程求解。然而, 即使在非常简单的理想气体情况下, Boltzmann 方程的求解相当复杂, 因为它是一个非线性积分微分方程。为了简化计算, 采用 Chapman-Enskog 方法计算混合等离子体的输运系数, 该方法中使用了引入一阶微小扰动的麦克斯韦分布函数, Boltzmann 方程的解通常表示为 Sonine 多项式展开式, 从而产生一个线性方程组, 该方程组可以适当地求解以获得不同的输运特性。根据 Devoto 的方法^[7], 将电子和重粒子完全解耦, 并使用三阶近似来计算电子的电导率和平动热导率, 一阶近似值求取粘性系数, 其他性质均使用二阶近似计算。

1.1.2 SF₆ 及 SF₆ 替代气体电弧

研究 SF₆ 替代气体的热动属性和输运参数采用和空气类似的方法。早期国内外学者对 SF₆ 替代气体的研究主要针对 CF₃I、N₂、压缩空气、CF₄、CO₂ 及其混合气体。Tanaka 等人报道了 CO₂-O₂ 和 CO₂-H₂ 混合物的物性参数, 并指出在 CO₂ 中添加 O₂ 和 H₂ 可以提高特定温度范围内气体混合物的电导率^[8]。Yokomizu 等人介绍了 CO₂ 和 CF₃I 混合的热导率和电导率, 并模拟了电流零点附近电弧电导的衰减过程, 研究发现在 CO₂ 中加入 CF₃I 可以提高混合气体的热开断能力^[9]。Cressault 等人计算了在 300~50 000 K 温度范围和 0.1~3.2 MPa 的压力范围内与 CO₂、空气和 N₂ 混合的 CF₃I 的物性参数^[10]。

在 SF₆ 混合气体研究方面, Gleizes 等人给出了 1 000~15 000 K 温度范围内不同混合比例 SF₆-N₂ 的

电导率和热导率, 并将计算结果代入求解电子数密度、温度等的宏观参数方程, 计算得到了混合物的温度分布, 并证明了反应热导率对稳态等离子体参数和暂态电弧衰减行为具有重要影响^[11], 同时也对 $\text{SF}_6\text{-CF}_4/\text{C}_2\text{F}_6$ 的物性参数进行了仿真计算^[12]。Haghighi 等人利用 Lennard-Jones 12-6 势能函数推导计算了 $\text{SF}_6\text{-CO}_2/\text{O}_2/\text{CF}_4/\text{N}_2/\text{CH}_4$ 等混合气体的粘性系数和扩散系数^[13]。

同样地, 关于 SF_6 与金属蒸汽和 PTFE 混合物的物性参数也是研究的重点之一, 比如: 空气- $\text{Fe}/\text{Cu}/\text{Ag}/\text{Al}$ ^[14-15]、 $\text{CO}_2\text{-Cu}$ ^[16-17]、 $\text{SF}_6\text{-Cu}$ ^[18]和空气/ $\text{CO}_2/\text{SF}_6\text{-PTFE}$ ^[19]。PTFE 对 SF_6 和 CO_2 等气体电弧等离子体物性参数的影响研究表明: PTFE 的烧蚀不仅有助于增加灭弧室内的压力, 而且使得定压比热和热导率在低温范围内有所增加, 因此可以有效地增强灭弧介质的冷却能力。与 SF_6 混合物不同的是, 在 5 000 K 以下的温度范围内, PTFE 的加入会导致 CO_2 混合物中定压比热峰值的显著增大并向低温移动, 这更有利于提高 CO_2 的能量耗散效率。

目前, 关于 C4-PFN 和 C5-PFK 基本物性参数的研究仍然是该领域的一个重要问题。付钰伟等运用密度泛函理论探索了 C5-PFK 可能生成的粒子, 并用 DFT-(U)B3LYP/6-311G(d,p) 基组对各粒子进行了结构优化、振动频率分析及能量计算, 计算涉及包括反应物、生成物及过渡态在内的 48 种粒子^[20]。吴翊等应用计算化学及断键分析理论初步获得了 C4-PFN 和 C5-PFK 的粒子组分及其配分函数和生成焓等基础参数^[21]。仲林林等也计算了 C5-PFK、C4-PFN 及其混合物的热力学参数^[22]。

本课题组也研究了 C5-PFK- CO_2 混合气体的热力学参数和输运系数, 典型结果如图 1—图 3 所示, 计算温度范围为 300~30 000 K, 压力范围为 0.05~1.6 MPa。同时还研究了 C5-PFK- CO_2 混合气体在不同混合比和不同压力下的物性参数变化, 并与 SF_6 的物性参数进行了比较。研究发现, 随着 C5-PFK 浓度的增加, C5-PFK- CO_2 混合气体的大多数物性参数, 例如热导率、粘度和电导率变得更接近于 SF_6 的热物理性质。计算结果为进一步研究 C5-PFK- CO_2 混合气体的电弧磁流体仿真提供了依据^[23]。

1.2 碰撞截面

气体间隙放电击穿的第一阶段是气体介质中的自由电子在电场加速下形成电子崩, 进而能够达到自持放电, 最终导致气体击穿。因此, 研究气体

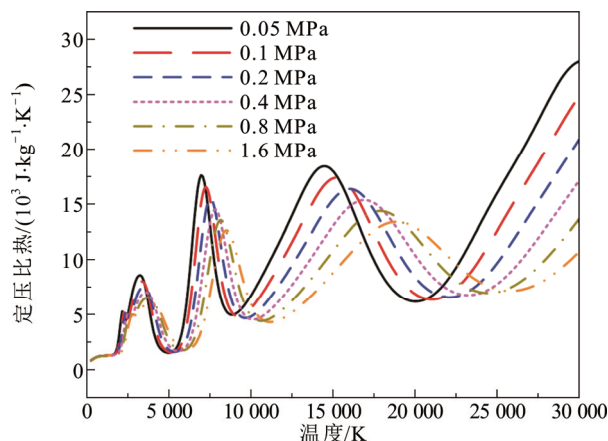


图 1 不同压力下 90% CO_2 -10% $\text{C}_5\text{-PFK}$ 混合气体等离子体的定压比热

Fig.1 Specific heat variation with temperature and pressure of 90% CO_2 -10% $\text{C}_5\text{-PFK}$

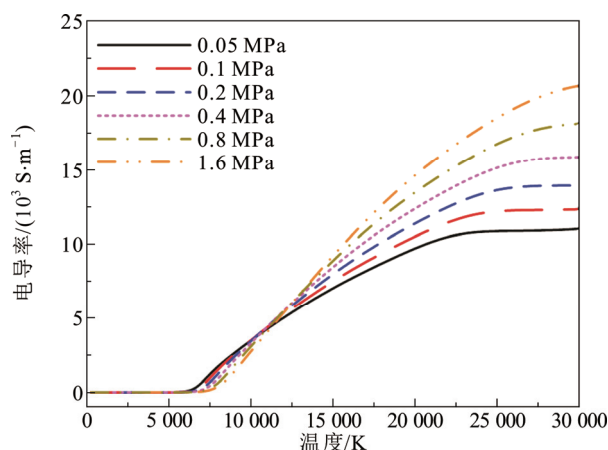


图 2 不同气体压力下 90% CO_2 -10% $\text{C}_5\text{-PFK}$ 混合气体等离子体的电导率

Fig.2 Conductivity variation with temperature and pressure of 90% CO_2 -10% $\text{C}_5\text{-PFK}$

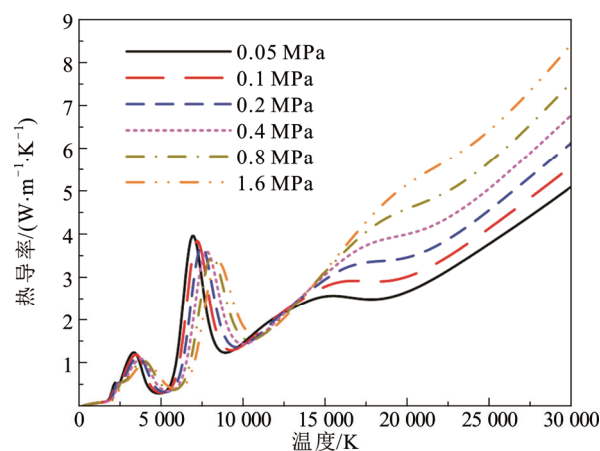


图 3 不同气体压力下 90% CO_2 -10% $\text{C}_5\text{-PFK}$ 混合气体等离子体的热导率

Fig.3 Thermal conductivity variation with temperature and pressure of 90% CO_2 -10% $\text{C}_5\text{-PFK}$

的电击穿特性,就要首先研究其电子崩的发展情况。这其中发生的反应主要包括粒子电离、电子吸附等。弧后阶段,断路器中介质的击穿强度与此时留存在灭弧腔体中的热态气体在外界电场作用下发生的电子碰撞过程紧密相关。

电子碰撞电离和吸附是气体电击穿过程中的重要碰撞过程,而电子碰撞电离和吸附碰撞截面是 SF_6 及其替代气体的绝缘强度数值计算研究的基本输入参数。 CO_2 及其他气体的一些碰撞截面结果如图 4 和图 5 所示^[24-26]。 SF_6 对于非常低能量的电子有比其他气体分子(CF_3I 除外)更大的吸附截面,这意味着它更容易吸附低能电子并降低自由电子的密度,这也是 SF_6 具有良好绝缘性能的原因之一。

针对 C5-PFK 和 C4-PFN,本课题组应用量子物理和计算化学理论,改进了 Deutsch-Märk(DM)方法,计算得到了 C5-PFK 和 C4-PFN 的电子碰撞电离截面^[24],这也为理论研究新型环保气体的绝缘强度提供了一定的数据基础。在碰撞截面的实验研究方面,主要有两种方法:一种是通过测量气体的电子输运参数,然后由此推导气体的各种碰撞截面;另一种是通过电子束实验,分辨气体与一定流强的电子束碰撞后的粒子种类和数目,根据碰撞截面的定义来求取。在第一种方法中,一般通过稳态汤逊法^[27-29](steady-state Townsend, SST)或脉冲汤逊法^[30-32](pulsed Townsend, PT)测量气体电子输运参数(室温下电离反应速率系数 α 、吸附反应速率系数 η 和电子漂移速度 v_e),然后通过不同的方法求取相应的碰撞截面^[33-34]。Franck 课题组通过脉冲汤逊实验的数据获得了 C5-PFK^[31]和 C4-PFN^[32]的电子吸附截面。Fedor 等人通过粒子束实验测量了不同气体的电子碰撞电离^[35]和吸附截面^[36],其中 C4-PFN 的电离截面与文献^[23]的计算结果较为相符,也在一定程度上验证了理论计算的可行性。同时,对于热态下需要考虑的一些自由基如 CF_3 等,由于它们在常规实验条件下很难稳定存在,因此开展基于量子力学的理论计算是很有效的方法^[37]。

1.3 热态临界击穿场强研究

在高压断路器弧后介质恢复阶段,灭弧室内部气体温度高达数千 K,且存在着较高的温度和压力梯度,电场分布也不均匀,这样在恢复电压的作用下,电极间极有可能发生弧后电击穿而导致开断失败。为了评估高压断路器的电开断能力,研究气体的热态临界击穿场强是必备的基础数据。

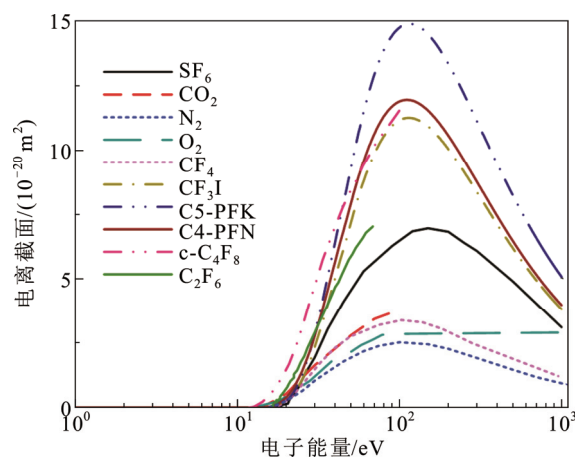


图4 SF_6 及其部分替代气体的电子碰撞电离截面^[24-26]

Fig.4 Ionization cross sections for SF_6 and other alternatives^[24-26]

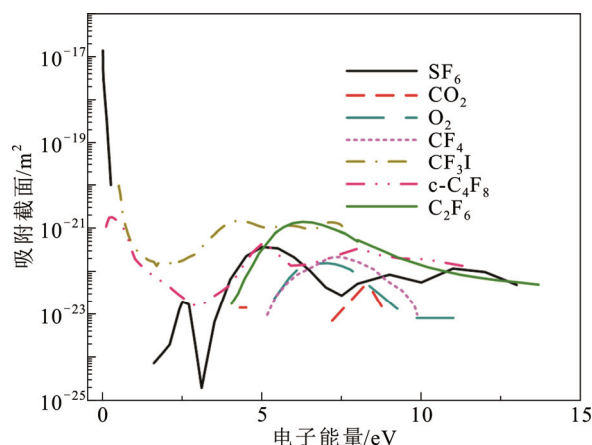


图5 SF_6 及其部分替代气体的电子碰撞吸附截面^[24-26]

Fig.5 Attachment cross sections for SF_6 and other alternatives^[24-26]

对于热态气体,通常采用 Boltzmann 分析法来计算其临界击穿场强。对于 Boltzmann 方程的求解,可采用两项近似或多项近似。通常,对于电场强度较低且电子与重粒子之间的作用以弹性碰撞为主的情况,两项近似法可以达到足够的计算精度,同时计算量和计算难度远低于多相近似法,因此,采用两项近似法来求解 Boltzmann 方程是比较常用的方法^[38]。

相比于冷态气体,在热态气体中,温度的升高一方面影响了电子的平均能量,另一方面,也会导致气体分子组分发生变化,因此,热态气体的临界击穿场强与冷态存在较大的差异。对热态气体的临界击穿场强进行计算的步骤为:1) 基于最小吉布斯自由能原理,计算热态气体在局域热力学平衡下的组分;2) 求解 Boltzmann 方程,获得电子能量分布函数(EEDF);3) 基于电子能量分布函数,计算电

离与吸附反应速率, 取电离与吸附反应速率相等条件下的电场强度为临界击穿场强。

气体是否发生电击穿, 主要取决于电子与重粒子之间的相互作用, 当电子与重粒子之间的电离碰撞频率超过吸附碰撞, 则电子数量增长, 发生电击穿, 反之则不会发生电击穿。电子能量分布函数对于电子与重粒子作用的影响至关重要。

热态气体电击穿特性实验研究方面, Seeger 等利用电弧产生热态 SF_6 气体, 在热气体上施加电压来得到不同温度和压力下热态 SF_6 气体的击穿电场。但是, 由于实验中 SF_6 气体的温度与压力是通过电弧 MHD 仿真确定的, 可能引起结果的较大偏差, 此外气体的均匀性也难以得到保证^[39]。Belevtsev 等利用激光加热气体, 研究了 SF_6 及其与 C_2H_6 等混合气体的临界击穿场强, 然而由于此时热态气体基本未发生热分解, 而是处于激发态, 与弧后灭弧室内强烈的热分解情况相差较大, 从而不能反映弧后热气体电击穿的问题^[40]。

在热态气体的临界击穿场强计算方面也有较大的进展。如 Yan^[41]、Cliteur^[42]、Yousfi^[43]等人分别计算了 SF_6 气体在不同温度和压力下的临界击穿场强; 本课题组也系统计算了 $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 、 $\text{SF}_6\text{-CF}_4$ 、 $\text{CF}_3\text{I-CF}_4$ 混合气体等的临界击穿场强, 建立了较为完善的数据库^[44-47], 一些典型结果如图 6 所示。

可以看出, 近年来国内外在 SF_6 替代气体电击穿特性方面开展了大量的研究, 主要集中在 N_2 、 CO_2 、空气等常见气体, 以及 CF_3I 与 $\text{c-C}_4\text{F}_8$ 具有较高绝缘强度的气体, 而对 $\text{C}_5\text{-PFK}$ 和 $\text{C}_4\text{-PFN}$ 等新型气体的热态击穿场强数据研究报道还相对较少, 需要进一步深入探索和研究。

2 低压空气开关电弧物理与特性控制

以空气为绝缘与灭弧介质的低压电器主要包括: 断路器、接触器、隔离开关、故障电弧保护设备等, 目前正朝着大容量、小型化、高性能、智能化等方向发展。特别是随着风力和光伏发电系统的迅速发展, 对低压电器在长寿命、低成本、非工频运行等方面提出了更高的要求。而对空气开关电弧物理的深入理解, 以及在此基础上实现电弧特性的有效控制是其中的关键问题。

2.1 空气开关电弧的 MHD 建模与仿真

2.1.1 空气电弧二维 MHD 仿真

在二维 MHD 空气电弧的建模上, Merck 等人

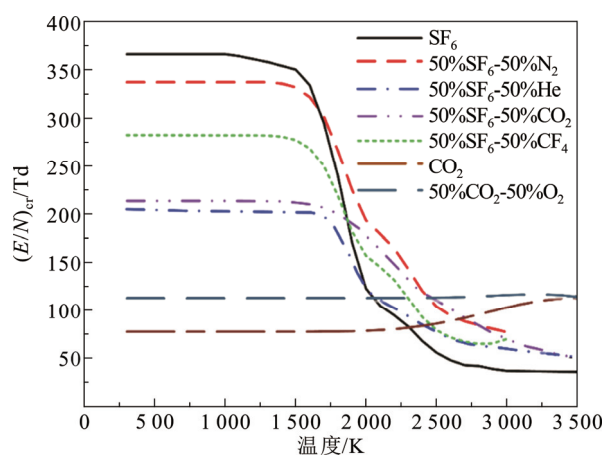


图 6 0.4 MPa 下不同气体的热态临界击穿场强

Fig.6 Critical dielectric breakdown field variation with temperature for various gases at 0.4 MPa

建立了二维 MHD 仿真模型, 将流体计算中的 3 个守恒方程与热化学方程和 Maxwell 方程进行耦合, 通过此耦合模型分析了微型断路器中电弧在电弧停滞阶段的电弧电压和灭弧室内的压力, 并和实验结果进行了对照, 结果表明和实验结果较为符合^[48]。Fievet 等人建立了二维 MHD 电弧模型, 在计算中, 考虑了焦耳热、辐射、洛伦磁力以及电弧与电极之间的相互作用, 分析了电弧背后击穿现象的物理机制^[49]。Lago 等人建立了电弧和电极相互作用的统一模型, 此模型结合了与阴阳极相邻的一维非平衡鞘层模型、二维弧柱模型和固体电极模型, 其鞘层模型中有效电阻率使用近似的电荷扩散方程来求解^[50]。近期 Lindmayer 通过二维 MHD 仿真, 分析了在燃弧期间, 不同能量耗散方式热传导、对流和辐射对电弧冷却作用的影响, 并指出对流作用在电弧运动过程中起主要作用, 对流能量主要加热了周围冷气体。当电弧运动到壁面时, 能量主要耗散方式以热传导为主。这为灭弧室的进一步优化设计提供了思路^[51]。本课题组也在国内较早针对低压断路器灭弧室优化设计开展了电弧建模仿真研究, 利用建立的二维 MHD 模型分析了出气口大小、产气材料、铁磁材料以及金属蒸气等多种因素对电弧特性的影响^[52-54], 并结合实验研究, 发明了多种基于气吹灭弧的空气电弧特性控制方法, 并在我国新一代低压断路器研发中得到推广应用。

2.1.2 空气电弧三维 MHD 仿真研究

在二维 MHD 建模仿真研究的基础上, 为了进一步考虑低压电器灭弧系统的不对称性, 研究人员

也建立了空气开关电弧的三维 MHD 模型。

Lindmayer 等人在国际上率先建立了平板电极间的三维电弧 MHD 模型,研究了电弧运动过程中的气流场和电磁场的作用^[55]。在此基础上研究了栅片切割电弧过程和弧根形成过程,提出了用非线性电压-电流密度曲线来模拟电弧弯曲过程以及近极压降^[56]。本课题组针对微型断路器、塑壳断路器等,建立了三维电弧 MHD 模型,仿真研究了电弧背后击穿现象^[57]、灭弧室内压力变化^[58]、产气材料对电弧运动的影响^[59]。荣命哲教授课题组通过三维 MHD 平板电极模型,对空气电弧的稳态过程和动态特性进行了分析,特别是考虑了涡流和铁蒸汽的影响^[60-61]。

除上述简化的平板间电弧模型外,人们也针对实际的低压断路器产品结构开展了大量的建模仿真工作。文献[62]分析了灭弧室壁面放置产气材料 PA66 前后电弧演变过程,通过结果可以看出,在壁面放置产气材料 PA66 以后电弧运动速度加快,电弧更早的进入栅片区域并被栅片切割,提高电弧电压。文献[63]分析了在灭弧室侧壁放置永久磁铁对电弧开断性能的影响,发现永久磁铁产生的磁场能够提高断路器电弧开断能力。文献[64]还着重对比分析了是否考虑动触头运动过程对双断点塑壳断路器仿真结果的影响。

可以看出,经过国内外学者多年的研究,空气开关电弧 MHD 模型从二维发展到三维、从简化模型发展到实际断路器灭弧室结构,极大地推动了空气开关电弧理论的研究,丰富了人们对于空气开关电弧特性的认识,更重要的是为相关产品的优化设计提供了理论和技术参考,从而成为有效提高产品性能的重要手段。

2.2 空气开关电弧特性的实验研究

与上述电弧 MHD 建模仿真相互协同,针对空气开关特性的实验研究,国内外也取得了较大的进步。

McBride 等研发了一套二维光纤阵列测试系统,针对微型断路器、详细研究了电弧运动过程中的电弧背后击穿现象以及不同结构对灭弧特性的影响^[65-66]。本课题组进一步研制了带聚焦透镜的二维光纤阵列测试系统,结合光谱诊断、激光补光技术等,实验研究了产气材料性质、极性、灭弧室结构等对电弧开断特性的影响^[67-69]。

CCD 也是用于观测空气电弧运动过程的常用

设备。文献[70]通过 CCD 对低压断路器燃弧过程中电弧图像进行拍摄,并分析了其背后击穿过程;文献[71]通过 CCD 和滤波器的配合拍摄电弧图像,通过特定波长下电弧图像,研究了不同触头材料和触头运动速度时直流空气电弧动态特性。文献[72]将拍摄到的二维图像通过光强运算转化为三维图像,研究了低压断路器中的弧根转移以及电弧被栅片切割的过程。

文献[73-74]研制了一种栅片电压测量设备,通过此设备测量了各个栅片之间的电压,以此来判断各栅片对电弧的切割过程,并对电弧熄灭后重燃过程进行了研究。文献[75]研究了不同电流下电弧对不同材料组成的栅片的烧蚀过程以及开断波形,分析了不同金属蒸气对空气电弧运动的影响。

2.3 不同因素对空气开关电弧特性的影响

在传统的磁驱电弧理论中,如何通过触头灭弧系统的设计提高或者降低作用在动触头上的电动斥力并增大作用在电弧上的吹弧磁场,实现动触头与操作机构运动的配合,缩短操作机构和脱扣器的动作时间等,是提高断路器性能的主要手段^[76]。

20 世纪 90 年代日本三菱公司提出了 VJC(vapor jet cooling)效应的概念,也即在低压断路器触头区域设置产气材料,通过电弧侵蚀产气材料降低电弧温度,从而大幅度提高了断路器的开断能力。随后,器壁侵蚀型电弧成为低压电器理论研究的热点问题,在此基础上,人们又在传统磁驱空气电弧理论的基础上,进一步提出了“气吹灭弧”的思想,并通过灭弧室的结构优化设计,充分发挥气吹灭弧的效能,使得小型化低压断路器的开断性能实现了一次大的飞跃。

近年来,伴随着新能源和直流电力系统的发展,直流开断成为低压电器领域的重要研究内容,实现直流无极性开断和直流小电流开断是低压电器行业的关键问题,人们又将永久磁铁引入低压电器的灭弧室中,实现了磁驱和气吹对空气电弧的协同控制,较好地解决了这些问题。

常用的产气材料有: PA66/PA6、POM、PTFE、PMMA 和 PBT 等。文献[77-78]分别通过仿真和实验的方法对比分析了 PA66、PMMA、PTFE 和 POM 4 种材料对低压断路器开断性能的影响,结果表明:对电弧电压和灭弧室气压提升较高的为 PA66 和 POM 两种材料。为了对 POM 和 PA66 材料的性能做更进一步的对比分析,文献[79]提出了一个评价

指标, 即电弧电压峰值与灭弧室气压峰值的比值; 并指出产气材料的存在可以提高弧后介质恢复强度, 从而减小了弧后重燃的可能性。应该指出的是, 大多数产气材料在高温电弧的作用下, 会产生碳颗粒, 从而降低灭弧室内的绝缘强度, 因此 Andre 等人通过计算对比了几种常用产气材料的碳沉积量, 指出 POM 的碳沉积量最少, PMMA 和 PA66 次之, PE 材料最多^[80]。

本课题组还分析了不同引弧板结构对双断点断路器灭弧性能的影响, 发现在引弧板上加 U 型槽后, 有利于电弧的拉长并进入栅片, 提高电弧电压, 从而利于电弧的开断; 同时, 对框架断路器将引弧板由直板形改为圆弧钩状后, 能够提高电弧电压和熄弧电压, 从而不利于弧后重燃^[81]。

Lindmayer 的研究结果表明, 通过外加永久磁铁的方法, 除了可增加电弧所受的洛伦磁力、使其快速进入栅片区域外, 还可以增加电弧运动过程中的对流, 增加弧柱能量耗散, 有利于电弧的冷却和开断^[51]。

2.4 低压直流故障电弧的特性研究

电气回路连接松动、动物抓咬、自然灾害等会造成绝缘破损或老化、触点松动等, 从而引发并联或串联故障电弧, 严重威胁电力系统的安全稳定运行, 且串联故障电弧的防护难度更大。与交流系统不同, 对直流配用电系统和光伏发电系统来说, 产生的直流故障电弧由于无自然过零点, 发生串联故障电弧危害更大、检测和保护的需要更为迫切, 因此成为低压电器领域当前的国际研究热点问题之一。

针对低压直流故障电弧的检测, 人们提出了欧拉法、(快速)傅里叶变换、电磁噪声法等等。由于小波变换(wavlet transform, WT)具备良好时频局部化性质的变换基, 能够将时域信号转换到变换域以提升信号的稀疏性, 近年来开始被应用于低压直流故障电弧的检测之中^[82-85]。

小波包分解(wavelet packet decomposition, WPD)使用两滤波器同时划分上一层得到的近似信号和细节信号。WPD 每进行一层分解相应的时频面被划分地更加精细, 对高频信息具有更好的频率分辨率, 可以对信号的时频信息进行更为恰当的分析, 定义为^[86]

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{k,n} \Psi_{k,n}(t), d \& \Psi \in L^2(R) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为待分析信号; d 为变换后得到的系数; k 为母小波伸缩的指标; n 为母小波平移的指标; Ψ 为变换所选用的母小波。

2.4.1 基于小波包分解的特征量构建方法

如图 7 所示, 对图上方蓝线所示的电流信号进行 WPD 分析, 频段内直接输出的小波系数结果如图下方绿线所示, 在故障电弧发生时刻存在具有局部极大值的脉冲, 后续幅值在 0 附近来回振荡。由于存在许多重叠, 这些小波系数无法直接识别系统状态。为了实现有效的故障电弧检测, 应建立适当的特征量, 以获得正常和故障电弧状态之间更显著的差异^[87]。对于以下分析, 首先采用现有研究常用的 Db9 小波基进行分析, 并组合下述的特征量 $F_j(t_n)$ 进行故障电弧识别

$$F_j(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} C^2(t_0 + k\Delta t) \quad (2)$$

式中: $C(t)$ 为某一频段的一维小波系数矩阵; j 为按顺序对小波特征量进行编号; t_0 为时间窗的起始时刻; t_n 为时间窗的结束时刻; N 为时间窗内的采样点数; Δt 为采样时间; k 为采样点数的计数变量。

所得特征量 $F_j(t)$ 的输出结果如图 7 中间的红线所示, 式(2)成功地将所有故障电弧时间窗内严重重叠的小波系数转变为一致上升的幅值增加模式。 $F_0(t)$ 为具有全局性的大脉冲, 能够捕获故障电弧的发生时刻。同时, 故障电弧发生后, 所选频段上的特征值明显增大, 大幅减少的重叠能更好地反映故障电弧的特征。I 阶段时域电流的波动并未在特征量上明显反映, 表明光照强度的变化仅会带来较低的频率干扰, 该系统暂态也能得到有效区分。因此, $F_0(t)$ 能够反映故障电弧发生后频谱能量的增加, 是正确识别系统状态更理想的选择。

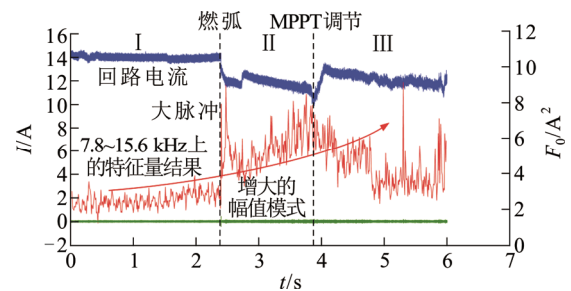


图 7 直流故障电弧电流及其 Db9 小波特征输出结果

Fig.7 DC arc fault current and its Db9 wavelet-based detection variable results

2.4.2 基于Db9小波基的小波包分解方法在故障电弧检测中的局限性分析

如图8所示,对于后续更高的频带,之前上升的幅值增加模式不再维持。逆变器会给故障电弧信号注入额外的干扰因素,故障电弧电流信号在较高的频带内开始显示出减小的幅值。对于 $F_1(t)$,II阶段故障电弧发生时的脉冲消失,该频带II、III阶段的特征值与I阶段相比开始显著减小,会出现不变甚至减小的幅值模式,最终造成严重的重叠。这些现象表明,如果只采用这些频带进行故障电弧检测,可能会触发误判。

当开关噪声干扰对故障电弧信号的影响不大时,会出现另一种故障电弧幅值不变的情况。如图8下方的绿线所示, $F_2(t)$ 在II、III阶段的故障电弧幅值基本与正常状态的I阶段处于同一水平。这些重叠与故障电弧状态分离的要求背道而驰,导致故障电弧检测困难。因此,应采取一些措施来发现这些中高频段内被开关噪声干扰的故障电弧特征,尽可能地分离故障电弧与正常状态,恢复特征量在这些中高频段上不断增大的幅值模式,实现更好的故障电弧检测性能^[88]。

2.4.3 Rbio3.1小波基提升故障电弧检测效果的分析

如图9所示,较图上方蓝线所示的Db9小波特征 F_{Db} 而言,图下方绿线所示的Rbio3.1小波特征输出结果 F_{Rbio} 有着较为显著的提升。Rbio3.1小波基具有较好的对称性,可在特征分析结果的II阶段初期恢复大脉冲,便于检测算法更好地捕获故障电弧的发生时刻。然而,处于正常状态的系统暂态也会造成电流信号的奇点。因此,扩大故障电弧与正常状态下特征值的分离程度更为关键。

在保持对称性的前提下,Rbio3.1具有双正交性,提高了重建精度,有利于通过基于重建系数的 $F_f(t)$ 来传递故障电弧特性。与此同时,Rbio3.1小波的提升能力有利于提高该类小波基的消失矩和正则性。由于具有很高的消失矩,Rbio3.1可以清晰地反映故障电弧的扰动,从而使得II、III阶段的特征值显著增大,这表明Rbio3.1分离了重叠的正常和故障电弧状态下的特征幅值。因此,在建立的Rbio3.1时频映射平面上,特征量恢复了故障电弧发生时刻的脉冲并实现了可见的故障电弧分离,成功地将不变甚至减小的幅值模式提升为期望的幅值增大模式,这一时频特性对实现精确的故障电弧检测具有重要的意义^[89]。

3 高压 SF₆ 及其替代气体电弧物理与特性控制

SF₆气体广泛应用于高压电力设备中,但由于其较强的温室效应和较高的液化温度,使得寻求环境友好且绝缘和灭弧性能优良的SF₆替代气体成为高压电器领域的热点问题之一。

高压SF₆断路器按照灭弧室结构一般可分为压气式、自能膨胀式以及旋弧式等。以图10所示的自能膨胀式断路器为例,短路电流开断过程中,弧触头间气体被加热电离后产生温度可达上万开尔文、气压可达数兆帕的炽热电弧,电弧对喷口材料等产

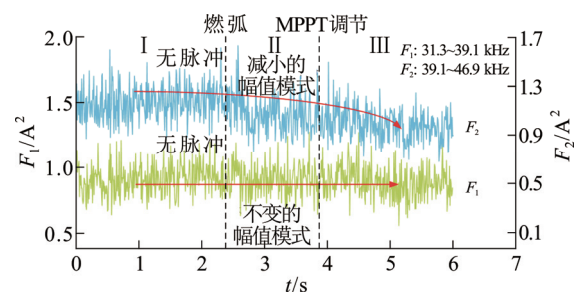


图8 在31.3~46.9 kHz频段上的Db9小波特征输出结果

Fig.8 Db9 wavelet-based detection variable results in the frequency band of 31.3~46.9 kHz

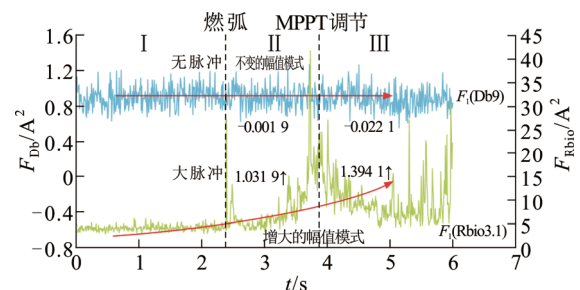


图9 在31.3~39.1kHz频段上的Rbio3.1小波和Db9小波特征输出结果

Fig.9 Rbio3.1 wavelet-based and Db9 wavelet-based detection variable results in the frequency band of 31.3~39.1 kHz

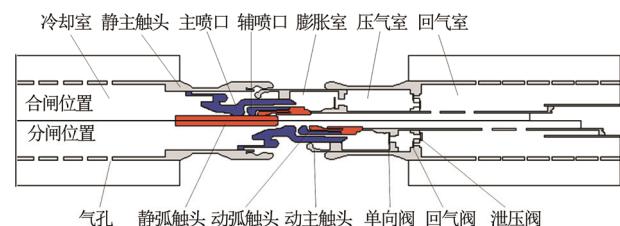


图10 145 kV自能式高压SF₆断路器结构模型图

Fig.10 Geometry of 145 kV high-voltage auto-expansion SF₆ circuit breaker

生烧蚀作用并受到来自喷口上游气体的气吹冷却作用, 实现短路电流过零开断及故障切除。

3.1 SF₆ 气体电弧 MHD 仿真及应用

与上述空气开关电弧类似, MHD 建模仿真已成为研究 SF₆ 电弧物理与特性控制的有效手段。国内外学者已经开展了大量的工作。Gleizes 等重点关注了辐射过程对于电弧温度场的影响, 对净辐射系数进行了修正^[90]。Verite 等将外部电路与断路器电磁场进行耦合, 研究了双压式和旋弧式高压 SF₆ 断路器短路开断过程中的电弧特性^[91]。李一滨等基于二维 MHD 电弧模型, 研究了喷口限制电弧中温度场、气流场、电磁场之间的相互作用^[92]。Girard 等则考虑了燃弧过程中多种粒子之间的碰撞电离、复合和化学反应过程^[93], 建立了双温度 MHD 电弧模型。王伟宗等也基于双温度 MHD 电弧模型, 对比了局域热力学平衡与非局域热力学平衡状态下电弧衰减过程中的特性差异^[94]。Fujino 等则将三维 MHD 电弧模型应用于旋弧式 SF₆ 断路器中, 对外磁场作用对于短路开断过程中电弧等离子体的旋弧过程的影响进行了分析^[95]。

喷口是气体断路器灭弧室的重要组成部分, 在开断过程发挥着气流控制的关键作用。最近, Petchanka 等研究了多次开断过程中的喷口累积烧蚀过程, 并考虑了 PTFE 蒸发焓的压力依赖性建立了仿真模型^[96], 计算结果与实验获得了很好的一致性。Yan 等多年来长期致力于电弧模型的研究, 最近, 他们重点关注了不同湍流模型和辐射模型对于仿真结果的影响, 并讨论了 5 种湍流模型和 3 种辐射模型的优缺点^[97-99]。Freton 等采用了几种方法计算了燃弧过程中灭弧室内的自感应磁场, 提供了一种可用较低的计算成本获得较高磁场计算精度的方法^[100]。Dhotre 等则将 MHD 计算与数值优化算法结合, 对一台 GCB 的喷口结构进行了优化设计^[101]。

本课题组在 SF₆ 气体电弧 MHD 仿真方面也开展了一定的研究工作, 分别针对压气式和自能膨胀式高压 SF₆ 断路器建立了二维 MHD 电弧仿真模型, 考虑了喷口烧蚀、辐射输运、湍流以及阀片运动等过程, 系统的研究了压气式和自能膨胀式断路器开断过程中的电弧演变过程^[102-103]。同时还将电弧 MHD 模型与电路方程进行耦合, 并在高压直流转换开关^[104]以及带有高耦合分裂电抗器的并联高压 SF₆ 断路器中获得了应用^[105]。

3.2 高压气体断路器开断特性的评估方法

在电流过零期间, 焦耳加热逐渐衰减, 弧柱温度也在热传递作用下由燃弧期间数万开尔文快速下降至数千开尔文。电流过零后弧隙等离子体温度依然较高, 弧隙处于热恢复阶段。此阶段触头间尚可能存在导电通道, 在瞬态恢复电压和消电离过程的竞争作用下可能会产生弧后电流。对于 SF₆ 电弧来讲, 热恢复阶段的持续时间约为数微秒, 弧后电流为数百毫安。若焦耳加热强度高于热耗散能力, 则弧隙发生热击穿; 若弧后电流减小归零, 则弧隙恢复介质状态, 进入电恢复阶段。电恢复阶段中, 在恢复电压和介质冷却过程的竞争作用下, 若弧隙带电粒子数目迅速增多, 形成自持性放电, 则发生电击穿现象。断路器只有在经历了热恢复和电恢复阶段而不发生击穿时, 才可以成功开断短路电流。

在弧后热击穿特性研究方面: 马志瀛等通过分析交流电流过零后电流波形, 将电弧零区现象分为 4 种类型, 并认为交流电弧熄灭时的介质强度恢复过程是一个多阶段的过程^[106]; 由于瞬态恢复电压作用下的弧后电流的持续时间较短, 幅值较低, 通过常规方法对其直接测量时精度低、误差大。荷兰 KEMA 实验室研制出了分辨率极高的零区测量设备, 可以准确地测量 50mA 级别的弧后电流, 从而为学者检测零区行为提供了一种有效的手段^[107]; Smeets 等通过研究混合断路器在电流零区附近的电流和电弧电压, 认为电流过零前 200 ns 或者 500 ns 的电弧电导(G_{200} 和 G_{500})也可以用于判定 SF₆ 断路器的开断能力, 并根据电弧电压和电流的测量结果总结出了 KEMA 电弧模型^[108-109]; Urai 等结合 KEMA 电弧模型和电力系统软件 EMTP, 分析了断路器断口并联电容对热开断能力的影响, 计算出所研究的断路器开断能力提高至 80kA 时需要并联的电容的大小^[110]; Nishiwaki 等结合双串联 Mayr 电弧模型的参数和 EMTP 软件计算了不同恢复电压作用下 CO₂ 断路器的弧后电流, 分析了不同电弧参数下的临界弧后电流^[111]。

在弧后电击穿特性研究方面: 关盛楠等计算了空载开断时灭弧室内的气流场变化情况, 结合电场计算, 分析了光滑壁面和“收-放”壁面的喷口结构对湍流的形成和介质恢复特性的影响^[112]; Seeger 等结合 MHD 模型和基于流注理论的经验公式计算得到电流零点后流注初始电压和流注贯穿电压的变化曲线^[113]; 基于 1.3 节热态临界场强的计算结果数据,

结合电弧 MHD 仿真, 多个课题组对 SF₆ 断路器弧后电击穿特性开展了深入研究^[114-116]。

本课题组结合 MHD 电弧模型、零区模型和热态气体临界击穿场强数据, 提出了高压气体断路器热-电联合的开断特性评估方法。评估方法框图如图 11 所示。评估方法的具体实施步骤为: 1) 根据电弧磁流体动力学仿真得到的电流过零前电弧电压和电流, 提取零区模型的参数; 2) 基于零区模型求解恢复电压作用下的弧后电流, 根据弧后电流是否归零判定弧隙是否发生热击穿; 3) 如未发生热击穿则将弧后电流加载至磁流体动力学仿真模型, 并以热恢复阶段计算结束时灭弧室内温度和压力的分布作为弧后电击穿评估的初始条件; 4) 气流场仿真计算弧后灭弧室内压力和温度分布; 5) 比较灭弧室内各点处由恢复电压引起的场强 E_a 与热态气体的临界击穿场强 E_{cr} , 确定灭弧室内各点发生电击穿的概率。

3.3 SF₆ 替代气体电弧特性

SF₆ 替代气体的研究大致经历的 3 个阶段: CO₂、干燥空气、N₂ 等常规单一气体及与 SF₆ 的混合气体, CF₄、CF₃I、c-C₄F₈ 等及与其他介质的混合气体, 新型氟化酮、氟化腈类及与空气、CO₂ 等的混合气体。

Matsumura 等人研究了 CO₂ 作为灭弧介质的开断性能, 发现对于峰值 1.1 kA 的短路电流, 当断路器的充气压力由 0.2 MPa 提高至 0.6 MPa 后, 电弧能量耗散系数从 0.32 kW 提高到 0.78 kW, 而电弧时间常数则从 1.3 μs 降至 0.7 μs^[117]。Uchii 等通过实验测量了 SF₆、CO₂ 以及 CO₂ 混合气体的弧后电流, 从而对这些气体的开断能力进行了比较, 结果表明在 CO₂ 中加入 O₂ 或 CH₄ 可以提高其热开断能力并降低其弧后电流^[118]。Stoller 等采用一套简单的双压实验装置对几种气体的热开断性能进行了比较, 并得到了如下的排序: 空气 < CO₂ < SF₆^[119]。

CF₃I 气体的绝缘强度和灭弧能力与 SF₆ 接近, 并且其 GWP 与 CO₂ 接近, 但是其沸点较低, 因此通常与其他气体混合后作为绝缘与灭弧介质使用。Kasuya 等设计了一套实验腔体, 通过实验测量了多种气体的电弧时间常数和能量耗散系数, 电弧时间常数从低到高依次为 SF₆ < CF₃I < CO₂ < H₂ < 空气 < N₂, 而能量耗散系数从高到低依次为 H₂ > SF₆ > CO₂ > 空气 > N₂ > CF₃I^[120]。Katagiri 等研究了 CF₃I 与 N₂ 和 CO₂ 混合物对不同电流的相对开断能力, 结果表明: CF₃I 与 N₂ 和 CO₂ 混合物不能用于气体断路器开断大电

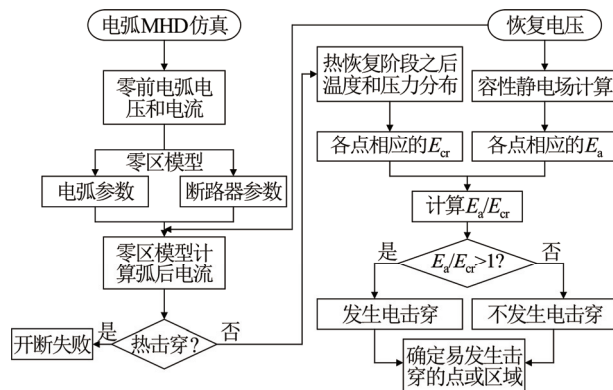


图 11 开断特性的综合评估框图

Fig.11 Comprehensive evaluation block diagram of the interruption characteristics

流, 可用于绝缘和开断小电流; 对于 1 kA 或 3 kA 这样的小电流, 当 CF₃I 的摩尔分数超过 20% 或 30% 时, CF₃I-CO₂ 混合物的近区故障开断性能接近纯 CF₃I 的近区故障开断性能^[121]。

针对 SF₆ 混合气体, 国内外也开展了长期研究。Grant 等发现在 SF₆ 中添加少量的 N₂ 可以提高临界恢复电压上升率, 当 SF₆ 分压相等时, 69% SF₆-31% N₂ 混合气体的临界 RRRV 高于纯 SF₆ 气体^[122]。Tsukushi 等采用压气室断路器研究了 SF₆ 混合气体的电流开断能力, 发现对于 15 kA 的短路电流, 300 kPa SF₆-200 kPa N₂ 混合气体的临界电流变化率 di/dt 约为纯 SF₆ 气体的 76%^[123]。Hyosung 公司通过实验发现 75% SF₆-25% N₂ 混合气体的开断性能与纯 SF₆ 气体相当^[124]。本课题组采用一台 126 kV 压气式高压 GCB 样机, 对不同混合比例下 SF₆-CO₂ 混合气体开展了实验研究, 发现当混合气体中 SF₆ 的摩尔分数分别为 0%、20% 和 50% 时, SF₆-CO₂ 混合气体的开断性能分别约为纯 SF₆ 的 39%、45% 和 70%^[125]。CF₄ 气体的液化温度较低, 且灭弧性能较好, 在极寒地区(最低温度低于 -40℃), 以 SF₆-CF₄ 混合气体作为灭弧介质的断路器不会发生凝露现象, 在马尼托巴湖水电站中已经有大量的 SF₆-CF₄ 混合气体断路器在服役, 包括 115 kV/40 kA 的 GCB、两种 245 kV/40 kA 的罐式 GCB、550 kV/40 kA 的 GCB 以及 800 kV/40 kA 罐式 GCB^[126-127]。

近几年来, 新型环保气体 C4-PFN((CF₃)₂CFCN) 和 C5-PFK(CF₃COCF(CF₃)₂) 气体被广泛关注。ABB 公司对 C5-PFK 气体开展了深入研究: 发现充气压力在 0.7~0.8 MPa 下的 C5-PFK-CO₂-O₂ 混合气体的绝缘强度与 0.6 MPa 充气压力下的 SF₆ 气体相当,

而其 SLF 开断能力则大约为 SF_6 气体的 80%~86%; 通过将一台 245 kV 的 GIS 降容至 170 kV, 以 C5-PFK- CO_2 - O_2 混合气体作为绝缘与灭弧介质开展了 L90 型式试验, 并测量了其弧后电流, 发现 C5-PFK 混合气体在开断 SLF 短路电流后的弧后电流的峰值和持续时间与纯 SF_6 非常接近, 而其热开断能力则较纯 SF_6 低约 20%; 还采用断路器模型开展了弧后介质恢复强度实验, 测量了不同电流大小下 C5-PFK- CO_2 - O_2 混合气体的弧后介质恢复速度, 实验结果表明 C5-PFK 混合气体的弧后介质恢复速度明显优于 CO_2 气体, 电流开断能力约比 SF_6 低 30%; 采用一台 245 kV 高压 GIS 中的隔离开关单元, 分别采用 SF_6 和 C5-PFK- CO_2 - O_2 混合气体开展了母线转换电流开断实验, 实验结果表明 C5-PFK 混合气体存在一定的老化过程, 其燃弧时间随开断次数增加而减小^[128-130]。

GE 公司重点关注了 C4-PFN 混合气体, 采用一台 420 kV 隔离开关开展了母线转换电流开断实验, 其中 SF_6 和 C4-PFN- CO_2 混合气体的充气压力均为 0.55 MPa。研究结果表明, C4-PFN 混合气体的平均燃弧时间(约 12 ms)低于 SF_6 气体(约 15 ms)^[131]。

Ye 等人对 SF_6 、C5-PFK- CO_2 - O_2 以及 CO_2 - O_2 混合气体的燃弧过程分别进行了 MHD 仿真, 然后提出采用虚拟质量流量作为评判气体热开断性能的指标^[132]。同时也有研究表明: 在混入 C4-PFN 或 C5-PFK 后, 混合气体的介质恢复速度得到显著提升, 发现 C4-PFN 混合物的介质恢复性能优于 C5-PFK 混合物和 CO_2 混合物, 当击穿延时 $<100\ \mu\text{s}$ 时, 介质恢复强度提高幅度介于 40%~100%之间^[133]。

4 结论与展望

1) 针对常规气体, 已有了较为完整的气体电弧物性参数数据库, 为电弧磁流体动力学建模仿真和电弧物理特性的研究提供了重要基础, 但仍需要在已有理论计算的基础上, 进一步研究物性参数的实验测量方法。

2) 电弧磁流体动力学建模仿真不仅是研究电弧理论和特性控制技术的重要手段, 而且已在高压 SF_6 开关和低压空气开关产品研发和优化设计中逐步得到应用, 但在考虑电弧弧根移动的三维建模、弧后非平衡态击穿特性仿真等方面仍需进一步完善和发展。

3) 故障电弧的检测技术及相关的设备研究已

取得了一定的进展, 但是针对直流配用电系统发展的需求, 对于直流故障电弧物理特性及不同系统参数的影响, 以及高效、低误动和拒动率的检测算法研究仍需进一步深入。

4) C4-PFN 和 C5-PFK 等新型 SF_6 替代气体已在高压电力开关设备表现出较大的应用潜力, 但针对其电弧开断特性的研究相对较少, 需要从气体性质与灭弧室结构、机构运动特性等相互匹配的角度研究新一代高压断路器灭弧技术。

参考文献 References

- [1] MURPHY A B. Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasmas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1994, 14(4): 451-490.
- [2] MURPHY A B. Transport coefficients of air, argon-air, nitrogen-air, and oxygen-air plasmas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1995, 15(2): 279-307.
- [3] TEULET P H, GONZALEZ J J, MERCADO-CABRERA A, et al. One-dimensional hydro-kinetic modelling of the decaying arc in air-PA66-copper mixtures: I. Chemical kinetics, thermodynamics, transport and radiative properties[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(17): 1-15.
- [4] GLEIZES A, CRESSAULT Y, TEULET P H. Mixing rules for thermal plasma properties in mixtures of argon, air and metallic vapours[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2010, 19(9): 1-13.
- [5] ANDRE P. Composition and thermodynamic properties of ablated vapours of PMMA, PA6-6, PETP, POM and PE[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29: 1963-1972.
- [6] 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]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(3): 475-493.
- [7] DEVOTO R. Simplified expressions for the transport properties of ionized monatomic gases[J]. Physics of Fluids, 1967, 10(10): 2105-2112.
- [8] TANAKA Y, YAMACHI N, MATSUMOTO S, et al. Thermodynamic and transport properties of CO_2 , CO_2 - O_2 , and CO_2 - H_2 mixtures at temperatures of 300 to 30, 000 K and pressures of 0.1 to 10 MPa[J]. Electrical Engineering in Japan, 2008, 163(4): 18-29.
- [9] YOKOMIZU Y, OCHIAI R, MATSUMURA T. Electrical and thermal conductivities of high-temperature CO_2 - CF_3I mixture and transient conductance of residual arc during its extinction process[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(21): 215204.
- [10] CRESSAULT Y, CONNORD V, HINGANA H, et al. Transport properties of CF_3I thermal plasmas mixed with CO_2 , air or N_2 as an alternative to SF_6 plasmas in high-voltage circuit breakers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44 (49): 495202.
- [11] GLEIZES A, RAZAFINIMANANA M, VACQUIE S. Transport coefficients in arc plasma of SF_6 - N_2 mixtures[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(7): 3777-3787.
- [12] CHERVY B, RIAD H, GLEIZES M. Calculation of the interruption capability of SF_6 - CF_4 and SF_6 - C_2F_6 mixtures. I. Plasma properties[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996, 24(1): 198-209.
- [13] HAGHIGHI B, DJAVANMARDI A H, PAPARI M M, et al. Prediction of the transport properties of SF_6 with O_2 , CO_2 , CF_4 , N_2 and CH_4 mixtures at low density by the inversion method (part II)[J]. Journal of

- Theoretical & Computational Chemistry, 2008, 3(1): 69-90.
- [14] CRESSAULT Y, HANNACHI R, TEULET P, et al. Influence of metallic vapours on the properties of air thermal plasmas[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2008, 17(3): 035016.
 - [15] LI X, CHEN D, RONG M, et al. Study of the influence of Cu vapour on air arc characteristics[C]//2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh, USA: IEEE, 2007: 140-145.
 - [16] BILLOUX T, CRESSAULT Y, BORETSKI V, et al. Net emission coefficient of CO₂-Cu thermal plasmas: role of copper and molecules[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 406(1): 012027.
 - [17] GUO X, LI X, MURPHY A B, et al. Calculation of thermodynamic properties and transport coefficients of CO₂-O₂-Cu mixtures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(34): 345203.
 - [18] RAYNAL G, VERGNE P, GLEIZES A. Radiative transfer in SF₆ and SF₆-Cu arcs[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(3): 508.
 - [19] JAN C, CRESSAULT Y, GLEIZES A, et al. Calculation of radiative properties of SF₆-C₂F₄ thermal plasmas—application to radiative transfer in high-voltage circuit breakers modelling[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 47(1): 015204.
 - [20] FU Y, WANG X, LI X, et al. Theoretical study of the decomposition pathways and products of C5-perfluorinated ketone (C5 PFK)[J]. AIP Advances, 2016, 6(8): 085305.
 - [21] WU Y, WANG C, SUN H, et al. Evaluation of SF₆-alternative gas C5-PFK based on arc extinguishing performance and electric strength[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(38): 385202.
 - [22] ZHONG L, RONG M, WANG X, et al. Compositions, thermodynamic properties, and transport coefficients of high-temperature C₅F₁₀O mixed with CO₂ and O₂ as substitutes for SF₆ to reduce global warming potential[J]. AIP Advances, 2017, 7: 075003.
 - [23] LI X, GUO X, MURPHY A B, et al. Calculation of thermodynamic properties and transport coefficients of C₅F₁₀O-CO₂ thermal plasmas[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(14): 143302.
 - [24] XIONG J, LI X, WU J, et al. Calculations of total electron-impact ionization cross sections for Fluoroketone C₅F₁₀O and Fluoronitrile C₄F₇N using modified Deutsch-Märk formula[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(44): 445206.
 - [25] CHRISTOPHOROU L G, OLTHOFF J K. Electron interactions with CHF₃, CF₃I, and c-C₄F₈[M]. New York, USA: Springer US, 2004.
 - [26] Plasma data exchange project[EB/OL]. <http://www.lxcat.laplace.univ-tlse.fr/LPDEPhwl>. 2016-09-12.
 - [27] 龙云翔, 郭立平, 沈震宇, 等. SF₆替代气体 C₄F₇N-N₂ 电离特性的稳态汤逊法研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1064-1070.
LONG Yunxiang, GUO Liping, SHEN Zhenyu, et al. Investigation of ionization characteristics of C₄F₇N-N₂ gas mixtures as alternative gas to SF₆ by steady-state Townsend method[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1064-1070.
 - [28] NECHMI H E, BEROUAL A, GIRODET A, et al. Effective ionization coefficients and limiting field strength of fluoronitriles-CO₂ mixtures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24: 886-892.
 - [29] AINTS M, JÖGI I, LAAN M, et al. Effective ionization coefficient of C5 perfluorinated ketone and its mixtures with air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51: 135205.
 - [30] HAEFLIGER P, FRANCK C. Detailed precision and accuracy analysis of swarm parameters from a pulsed Townsend experiment[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89: 023114.
 - [31] CHACHEREAU A, HÖSL A, FRANCK C M. Electrical insulation properties of the perfluoroketone C₅F₁₀O[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51: 335204.
 - [32] CHACHEREAU A, HÖSL A, FRANCK C M. Electrical insulation properties of the perfluoronitrile C₄F₇N[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51: 495201.
 - [33] PETROVIĆ Z L, DUJKO S, MARIĆ D, et al. Review article: measurement and interpretation of swarm parameters and their application in plasma modelling[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42: 194002.
 - [34] RABIE M, HAEFLIGER P, CHACHEREAU A, et al. Obtaining electron attachment cross sections by means of linear inversion of swarm parameters[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48: 075201.
 - [35] RANKOVIĆ M, CHALABALA J, ZAWADZKI M, et al. Dissociative ionization dynamics of dielectric gas C₃F₇ CN[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2019, 21: 16451-16458.
 - [36] ZAWADZKI M, CHACHEREAU A, KOČIŠEK J, et al. Electron attachment to hexafluoropropylene oxide (HFPO)[J]. The Journal of Chemical Physics, 2018, 149: 204305.
 - [37] DEMESH S S, KELEMEN V, REMETA E Y. Elastic electron scattering by the CF₃ radical in the 1–1000 eV energy range[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2017, 50: 135201.
 - [38] HAGELAAR G J M, PITCHFORD L C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models[J]. Plasma Sources Science & Technology, 2005, 14(4): 722-733.
 - [39] SIMKA P, SEEGER M, VOTTELER T, et al. Experimental investigation of the dielectric strength of hot SF₆[C]//10th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Bangalore, India: ICPADM, 2012: 24-28.
 - [40] BELEVTSSEV A A, FIRSOV K N, KAZANTSEV S Y, et al. On the temperature dependence of the critical reduced electric field in SF₆ and mixtures of SF₆ with C₂H₆[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(5): 1368-1735.
 - [41] YAN J, FANG M, LIU Q. Dielectric breakdown of a residual SF₆ plasma at 3000 K under diatomic equilibrium[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(1): 114-119.
 - [42] CLITEUR G J, HAYASHI Y, HAGINOMORI E, et al. Calculation of the uniform breakdown field strength of SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(6): 843-849.
 - [43] ROBIN-JOUAN P, YOUSFI M. New breakdown electric field calculation for SF₆ high voltage circuit breaker applications[J]. Plasma Science & Technology, 2007, 9(6): 690-694.
 - [44] ZHAO H, LI X, JIA S, et al. Dielectric breakdown properties of SF₆-N₂ mixtures at 0.01–1.6 MPa and 300–3000 K[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(14): 143301.
 - [45] LI X, ZHAO H, JIA S, et al. Study of the dielectric breakdown properties of hot SF₆-CF₄ mixtures at 0.01–1.6 MPa[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(5): 053302.
 - [46] LI X, ZHAO H, WU J, et al. Analysis of the insulation characteristics of CF₃I mixtures with CF₄, CO₂, N₂, O₂ and air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(34): 345203.
 - [47] LI X, ZHAO H, JIA S. Dielectric breakdown properties of SF₆-N₂ mixtures in the temperature range 300–3000 K[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(44): 445202.
 - [48] MERCK W F H, ZATELEPIN V N. The gas dynamics of current-limiting devices during immobility time[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(5): 947-953.
 - [49] CHEVRIER P, BARRAULT M, FIEVET C. Hydrodynamic model for electrical arc modelling[in circuit breakers][J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4): 1824-1829.
 - [50] LAGO F, GONZALEZ J J, FRETON P, et al. A numerical modelling

- of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(6): 883-897.
- [51] LINDMAYER M. Cooling Mechanisms of switching arcs under transverse magnetic fields in comparison with arcs without magnetic blast[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(2): 444-450.
- [52] LI X, CHEN D, WU Y, et al. A comparison of the effects of different mixture plasma properties on arc motion[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(22): 6982-6988.
- [53] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的磁流体动力学建模及特性仿真[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(21): 31-37.
LI Xingwen, CHEN Degui. Magnetohydrodynamics modeling and characteristics simulation of air switching arc[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(21): 31-37.
- [54] LI X, LI R, SUN H, et al. Ferromagnetic material effects on air arc behavior[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(3): 463-469.
- [55] KARETTA F, LINDMAYER M. Simulation of the gasdynamic and electromagnetic processes in low voltage switching arcs[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 1998, 21(1): 96-103.
- [56] RIB J, LINDMAYER M, KURRAT M. Simplification of the arc splitting process in numerical gas flow simulation[C]// *Proceedings of 26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC)*. Beijing, China: IET, 2012: 245-249.
- [57] 陈旭, 陈德桂. 低压限流断路器背后击穿现象的数值模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(3): 16-19.
CHEN Xu, CHEN Degui. Research on simulation of the back commutation in low-voltage current-limiting circuit breaker[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(3): 16-19.
- [58] 戴瑞成. 低压灭弧室中电弧动态特性的仿真分析与实验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
DAI Ruicheng. Simulation and experimental research on the arc dynamic characteristics in low voltage arc quenching chamber[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2009.
- [59] 李兴文, 陈德桂, 孙海涛. 考虑器壁侵蚀影响的空气电弧特性仿真研究[J]. *低压电器*, 2006(4): 5-9.
LI Xingwen, CHEN Degui, SUN Haitao. Simulation on the air arc characteristics concerning the influence of wall ablation[J]. *Low Voltage Apparatus*, 2006(4): 5-9.
- [60] 吴翊, 荣命哲, 杨茜, 等. 低压空气电弧动态特性仿真及分析[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(21): 143-148.
WU Yi, RONG Mingzhe, YANG Qian, et al. Simulation on dynamic characteristic of arc in low voltage circuit breaker modelling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(21): 143-148.
- [61] YANG F, WU Y, RONG M, et al. Low-voltage circuit breaker arcs—simulation and measurements[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(27): 273001.
- [62] SHIN D, GOLOSNOY I O, MCBRIDE J W. Arc modelling for switching performance evaluation in low-voltage switching devices[C]// *Proceedings of 28th International Conference on Electrical Contacts (ICEC)*. Edinburgh, UK: [s. n.], 2016: 41-46.
- [63] GALVAN E, RODRIGUEZ J J. Study of the influence of permanent magnets in the interruption process of the electrical arc in MCB[C]// *Proceedings of the 63rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Denver, USA: IEEE, 2017: 75-79.
- [64] RÜMLER C H, NARAYANAN V R T. Arc modeling challenges[J]. *Plasma Physics and Technology*, 2015, 2(3): 261-270.
- [65] WEAVER P M, PECHRACH K, MCBRIDE J W. The energetics of gas flow and contact erosion during short circuit arcing[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2004, 27(1): 51-56.
- [66] WEAVER P M, MCBRIDE J W. Magnetic and gas dynamic effects on arc motion in miniature circuit breakers[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology Part A*, 1994, 17(1): 77-85.
- [67] LI XINGWEN, CHEN DEGUI, DAI RUICHENG, et al. Study of the influence of arc ignition position on arc motion in low-voltage circuit breaker[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(2): 491-497.
- [68] 刘洪武, 陈德桂, 李兴文, 等. 采用自聚焦透镜的开关电弧运动形态光纤测试系统[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(9): 126-131.
LIU Hongwu, CHEN Degui, LI Xingwen, et al. Optical fiber measurement system for the motion of arc using self-focus lens[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(9): 126-131.
- [69] 李兴文, 陈德桂, 汪倩. 低压断路器电弧仿真试验和研究[J]. *电器与能效管理技术*, 2010(24): 1-7.
LI Xingwen, CHEN Degui, WANG Qian. Simulation experiments and research of arc for low voltage circuit breaker[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2010(24): 1-7.
- [70] FIÉVET C, BARRAULT M, PETIT P, et al. Optical diagnostics and numerical modelling of arc re-strikes in low-voltage circuit breakers[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997, 30(21): 2991-2999.
- [71] YOSHIDA K, SAWA K, SUZUKI K, et al. Influence of contact materials and opening velocity on various characteristics of DC high voltage arc[C]// *Proceedings of the 63rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Denver, USA: IEEE, 2017: 209-214.
- [72] NAGATA T, MATSUOKA S, KUMADA A, et al. Two-dimensional temperature distribution measuring system for air arc based on spectroscopic measurement[C]// *Proceedings of 21th International Conference on Gas Discharges and their Applications*. Nagoya, Japan: [s. n.], 2016: 9-12.
- [73] HAUER W, ZHOU X. Re-ignition and post arc current phenomena in low voltage circuit breaker[C]// *Proceedings of 26th International Conference on Electrical Contacts*. Dresden, Germany: IEEE, 2014: 398-403.
- [74] 李兴文. 低压电器空气电弧的近期研究进展[J]. *电器与能效管理技术*, 2018(22): 21-28.
LI Xingwen. Research progress on air arc of low voltage electrical appliances[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2018(22): 21-28.
- [75] ZHANG Z, VALDEMARSSON S, JOHANSSON E, et al. Novel DC arc chute design using laminated splitter plates[C]// *Proceedings of 22th International Conference on Gas Discharges and their Applications*. Nagoya, Japan: IEEE, 2018: 415-418.
- [76] 李兴文. 低压断路器开断过程中的动力学问题研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
LI Xingwen. Investigation on the dynamics problems of interruption process in low voltage circuit breakers[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2006.
- [77] RANADE M S, KALE A, SINGH A K. A three dimensional CFD analysis to investigate the effect of ablative materials and venting arrangement on arc characteristics in low voltage circuit breakers[C]// *Proceedings of the 59th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Newport, USA: IEEE, 2013: 1-9.
- [78] NAKANO T, TANAKA Y, NAKAGAWA T, et al. Spallation occurrence from polyamide materials irradiated by thermal plasma with water absorption[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(38): 385501.
- [79] 陈德桂. 低压断路器的开关电弧与限流技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- CHEN Degui. Switching arc and current limiting technology in low voltage circuit breakers[M]. Beijing, China: Mechanical Industry Press, 2006.
- [80] ANDRE P, BUSSIERE W, DUFFOUR E, et al. Effects of dielectric material on arc plasma pressure and ablation measurement in high-power apparatus[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, 39(1): 197-201.
- [81] 汪 倩, 屈建宇, 李兴文. 引弧板对桥式双断点断路器灭弧性能的影响[J]. *高电压技术*, 2017, 43(3): 163-168.
- WANG Qian, QU Jianyu, LI Xingwen. Influences of arc plate on arc-quenching performance of bridge-shape double-break circuit breaker[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(3): 163-168.
- [82] 陈思磊, 李兴文, 屈建宇. 直流故障电弧研究综述[J]. *电器与能效管理技术*, 2015(15): 1-6, 45.
- CHEN Silei, LI Xingwen, QU Jianyu. Overview of research about DC arc fault[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2015(15): 1-6, 45.
- [83] NGUI W K, LEONG M S, HEE L M, et al. Wavelet analysis: mother wavelet selection methods[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 393: 953-958.
- [84] KIM I S. On-line fault detection algorithm of a photovoltaic system using wavelet transform[J]. *Solar Energy*, 2016, 126: 137-145.
- [85] HE C, MU L, WANG Y. The detection of parallel arc fault in photovoltaic systems based on a mixed criterion[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2017, 7(6): 1717-1724.
- [86] CHEN S, LI X, QU J. Overview of research about DC arc fault[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2015(15): 1-6, 45.
- [87] BIN G, GAO J, LI X, et al. Early fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet packets—empirical mode decomposition feature extraction and neural network[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 27: 696-711.
- [88] CHEN S, LI X, MENG Y, et al. Wavelet-based protection strategy for series arc faults interfered by multicomponent noise signals in grid-connected photovoltaic systems[J]. *Solar Energy*, 2019, 183: 327-336.
- [89] CHEN S, LI X. Experimental study and feature improvement of DC series arc faults with switching noise interference[C]//64th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and 29th International Conference on Electric Contacts. [S.l.]: IEEE, 2018: 135-142.
- [90] GLEIZES A, GONZALEZ J J, RAZAFINIMANANA M, et al. Influence of radiation on temperature field calculation in SF₆ arcs[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 1992, 1(2): 135-140.
- [91] VERITE J C, BOUCHER T, COMTE A, et al. Arc modelling in circuit breakers: coupling between electromagnetics and fluid mechanics[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, 31(3): 1843-1848.
- [92] 李一滨, 王其平, 杨 涌. 喷口电弧二维磁流体动力学(MHD)数学模型[J]. *西安交通大学学报*, 1998, 32(6): 1-4.
- LI Yibin, WANG Qiping, YANG Yong. A 2-D magnetohydrodynamic mathematical model of nozzle arc[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1998, 32(6): 1-4.
- [93] GIRARD R, BELHAOUARI J B, GONZALEZ J J, et al. A two-temperature kinetic model of SF₆ plasma[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 32(22): 2890-2901.
- [94] WANG W, YAN J, RONG M, et al. Theoretical investigation of the decay of an SF₆ gas-blast arc using a two-temperature hydrodynamic model[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(6): 1-16.
- [95] FUJINO T, TAKAHASHI T, ISHIKAWA M, et al. Three-dimensional numerical simulation of rotary arc plasmas under externally applied magnetic fields[C]//Proceedings of the XVII International Conference on Gas Discharges and their Applications. Cardiff, UK: [s.n.], 2008: 169-172.
- [96] PETCHANKA A, REICHERT F, GONZALEZ JJ, et al. Modelling of the deformation of PTFE-nozzles in a high voltage circuit breaker due to multiple interruptions[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49 (13): 135201.
- [97] DIXON C, YAN J, FANG M. A comparison of three radiation models for the calculation of nozzle arcs[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(23): 3309.
- [98] ZHANG Q, LIU J, YAN JD, et al. The modelling of an SF₆ arc in a supersonic nozzle: II. current zero behavior of the nozzle arc[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(33): 335501.
- [99] LIU J, ZHANG Q, YAN J, et al. Analysis of the characteristics of DC nozzle arcs in air and guidance for the search of SF₆ replacement gas[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(43): 435201.
- [100] FRETON P, GONZALEZ JJ, MASQUÈRE M, et al. Magnetic field approaches in dc thermal plasma modelling[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(34): 345202.
- [101] DHOTRE MT, YE X, LINARES F, et al. Multiobjective optimization and CFD simulation for a high-voltage circuit breaker[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(4): 2105-2112.
- [102] 姜 旭. 高压SF₆断路器开断过程中的气流场特性仿真及实验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2014: 8-10, 52-53.
- JIANG Xu. Simulation and experimental studies on the characteristics of gas flow field in HV SF₆ CBs during interruption process[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2014: 8-10, 52-53.
- [103] 郭 泽, 马 平, 朱 凯, 等. 短路电流对自能膨胀式高压SF₆断路器电弧开断过程中阀运动特性的影响[J]. *高电压技术*, 2015, 41(9): 3164-3170.
- GUO Ze, MA Ping, ZHU Kai, et al. Influence of short-circuit current on motion characteristics of valves during breaking process of high-voltage auto-expansion SF₆ circuit breaker[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(9): 3164-3170.
- [104] 李兴文, 郭 泽, 傅明利, 等. 高压直流转换开关电流转换特性及其影响因素[J]. *高电压技术*, 2018, 44(9): 2856-2864.
- LI Xingwen, GUO Ze, FU Mingli, et al. Current commutation characteristics and its influential factors for high-voltage direct current transfer switches[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(9): 2856-2864.
- [105] GUO Z, LI X, SU H, et al. Interrupting characteristics of paralleled SF₆ circuit breakers with a highly coupled split reactor[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, 7(5): 768-776.
- [106] 马志瀛. 交流电弧电流零区现象及其分析[J]. *西安交通大学学报*, 1983, 17(3): 74-81.
- MA Zhiying. Current-zero period phenomena of AC arc and its analysis[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1983, 17(3): 74-81.
- [107] VAN LANEN EPA, POPOV M, VAN DER SLUIS L, et al. Vacuum circuit breaker current-zero phenomena[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(5): 1589-1593.
- [108] SMEETS RPP, KERTESZ V, DUFOURNET D, et al. Interaction of a vacuum arc with an SF₆ arc in a hybrid circuit breaker during high-current interruption[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(4): 933-938.
- [109] AHMETHODZIC A, SMEETS RPP, KERTESZ V, et al. Design improvement of a 245 kV SF₆ circuit breaker with double-speed mechanism through current zero analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2496-2503.
- [110] URAI H, OOSHITA Y, KOIZUMI M, et al. Estimation of 80 kA short-line fault interrupting capability in an SF₆ gas circuit breaker based on arc model calculation[C]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Cardiff, UK: IEEE, 2008:

- 129-132.
- [111] NISHIWAKI S, KOSHIZUKA T, UCHII T, et al. Discussions on post arc current of a CO₂ circuit breaker[C]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Cardiff, UK: IEEE, 2008: 125-128.
- [112] 关盛楠, 王尔智, 刘海峰, 等. SF₆ 高压断路器喷口中的湍流及其对介质恢复特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 31-35. GUAN Shengnan, WANG Erzhi, LIU Haifeng, et al. Turbulent flow and its influence on dielectric recovery property in arc nozzle of SF₆ high voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 31-35.
- [113] SEEGER M, SCHWINNE M, BINI R, et al. Dielectric recovery in a high-voltage circuit breaker in SF₆[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(39): 1-12.
- [114] KIM H K, CHONG J K, SONG K D, et al. Analysis of dielectric breakdown of SF₆ gas circuit breaker during large current interruption[C]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Cardiff, UK: IEEE, 2008: 177-180.
- [115] YOUSFI M, ROBIN-JOUAN P, KANZARI Z. Breakdown electric field calculations of hot SF₆ for high voltage circuit breaker applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 12 (6): 1192-1200.
- [116] UCHII T, NISHIWAKI S, BOGGS S. Effects of hot SF₆ on post-arc circuit breaker design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 19(1): 124-130.
- [117] MATSUMURA T, MOROOKA I, YOKOMIZU Y, et al. Arc Parameters in CO₂-blast quenching chamber with high-pressure storage tank of different pressures[J]. Vacuum, 2006, 80(11): 1305-1310.
- [118] UCHII T, HOSHINA Y, KAWANO H, et al. Fundamental research on SF₆-free gas insulated switchgear adopting CO₂ gas and its mixtures[C]// Proceedings of International Symposium on Ecotopia Science (SETS07). Nagoya, Japan: [s.n.], 2007: 516-520.
- [119] STOLLER P C, SEEGER M, IORDANIDIS A A, et al. CO₂ as an arc interruption medium in gas circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(8): 2359-2369.
- [120] KASUYA H, KAWAMURA Y, MIZOGUCHI H, et al. Interruption capability and decomposed gas density of CF₃I as a substitute for SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1196-1203.
- [121] KATAGIRI H, KASUYA H, MIZOGUCHI H. BTF interruption capability of CF₃I-CO₂ mixture[C]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Cardiff, UK: IEEE, 2008: 105-108.
- [122] GRANT D M, PERKINS J F, CAMPBELL L C, et al. Comparative interruption studies of gas-blasted arcs in SF₆/N₂ and SF₆/He mixtures[C]//4th International Conference on Gas Discharge and Their Applications. Swansea, UK: [s.n.], 1976: 48-51.
- [123] TSUKUSHI M, NAKAGAWA Y, HIRASAWA K, et al. Application of theoretical calculation for puffer pressure rise of gas mixtures in puffer type blast circuit breakers[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Switching Arc Phenomena. Lodz, Poland: [s.n.], 1981: 198-202.
- [124] SONG WP, YANG DI, CHUNG YH. A study of large current interrupting capability of SF₆/N₂ mixtures[C]//Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, USA: IEEE, 2002: 457-459.
- [125] ZHAO H, LI X, ZHU K, et al. Study of the arc interruption performance of SF₆-CO₂ mixtures as a substitute for SF₆[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2657-2667.
- [126] MIDDLETON R, KOSCHIK V, HOGG P, et al. Development work for the application of 245 kV circuit breakers using a SF₆/CF₄ gas mixture on the Manitoba Hydro System[C]//Canadian Electrical Association Station Equipment Subsection. Toronto, Canada: [s.n.], 1994.
- [127] MIDDLETON B, HYDRO M. Cold weather applications of gas mixture (SF₆/N₂, SF₆/CF₄) circuit breakers: a user utility's perspective[C]//The US Environmental Protection Agency's Conference on SF₆ and the Environment: Emission Reduction Strategies. Manitoba, Hydro California: [s.n.], 2000.
- [128] TEHLAR D, DIGGELMANN T, MÜLLER P, et al. Ketone based alternative insulation medium in a 170 kV pilot installation[C]//CIGRE Colloquium. Nagoya, Japan: CIGRE, 2015.
- [129] MANTILLA J, CLAESSENS M, KRIEGER M. Environmentally friendly perfluoroketones-based mixture as switching medium in high voltage circuit breakers[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2016: 1.
- [130] STOLLER P C, DOIRON C B, TEHLAR D, et al. Mixtures of CO₂ and C₅F₁₀O perfluoroketone for high voltage applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 2712-2721.
- [131] KIEFFEL Y, BIQUEZ F, PONCHON P, et al. SF₆ Alternative development for high voltage switchgears[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [132] YE X, DHOTRE M T, MANTILLA J D, et al. CFD analysis of the thermal interruption process of gases with low environmental impact in high voltage circuit breakers[C]//Electrical Insulation Conference. Seattle, Washington, USA: IEEE, 2015: 375-378.
- [133] LI X, ZHAO H, MURPHY A B. SF₆-alternative gases for application in gas-insulated switchgear[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(15): 153001.



LI Xingwen
Ph.D., Professor
Corresponding author



JIA Shenli
Ph.D., Professor



ZHANG Boya
Ph.D.

李兴文(通信作者)

1978—, 男, 博士, 教授, 博导
长期从事高电压与大电流、脉冲功率与放电等离子体方面的教学和科研工作
E-mail: xwli@mail.xjtu.edu.cn

贾申利

1968—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事开关电弧现象、新型开关技术、脉冲功率与等离子体方面的科研工作
E-mail: sljia@mail.xjtu.edu.cn

张博雅

1990—, 男, 博士, 讲师
主要从事高电压与大电流方面的科研工作
E-mail: zhangby@xjtu.edu.cn