



多电飞机断路器电弧机理及灭弧技术研究综述

蒋原 李擎 苗磊 吕萌 武建文 陈明轩

Overview of the arc mechanism and extinguishing in the circuit breaker of a more-electric aircraft

JIANG Yuan, LI Qing, MIAO Lei, L Meng, WU Jian-wen, CHEN Ming-xuan

引用本文:

蒋原, 李擎, 苗磊, 吕萌, 武建文, 陈明轩. 多电飞机断路器电弧机理及灭弧技术研究综述[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(4): 611–620. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.02.28.002

JIANG Yuan, LI Qing, MIAO Lei, L Meng, WU Jian-wen, CHEN Ming-xuan. Overview of the arc mechanism and extinguishing in the circuit breaker of a more–electric aircraft[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(4): 611–620. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.02.28.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.02.28.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电弧炉内长电弧等离子体的数值模拟

Numerical simulation of a long arc plasma in an electric arc furnace

工程科学学报. 2020, 42(S): 60 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.04.08.s04>

变频矢量控制系统入侵检测技术

Intrusion detection techniques of variable–frequency vector control system

工程科学学报. 2019, 41(8): 1074 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.08.013>

基于SiC功率器件的大功率DC–DC变换器

High–power DC–DC converter based on SiC power device

工程科学学报. 2017, 39(8): 1224 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.08.012>

变极性电弧焊接的电流换向过程影响因素试验研究

Experimental research on factors influencing the current commutation process of variable–polarity arc welding

工程科学学报. 2019, 41(4): 505 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.011>

电弧炉炼钢炉渣成分实时预报模型

Real–time prediction model of slag composition in electric arc furnace steelmaking

工程科学学报. 2020, 42(S): 39 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.04.05.s12>

自然场景文本检测技术研究综述

Text detection in natural scenes: a literature review

工程科学学报. 2020, 42(11): 1433 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.03.24.002>

多电飞机断路器电弧机理及灭弧技术研究综述

蒋原^{1,2,3)}, 李擎^{1,2,3)}✉, 苗磊^{1,2)}, 吕萌^{1,2)}, 武建文⁴⁾, 陈明轩⁵⁾

1) 北京科技大学自动化学院, 北京 100083 2) 北京科技大学工业过程知识自动化教育部重点实验室, 北京 100083 3) 北京科技大学顺德研究生院, 佛山 528399 4) 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191 5) 三峡科技有限责任公司, 北京 100031

✉通信作者, E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn

摘要 多电飞机指次级功率从机械能、液压能、气压能等传统的多能源体制统一为电能体制的飞机, 具有系统结构简单、可靠性高、可维护性高和能源利用率高等优点, 其电力系统最先进的架构为 360 ~ 800 Hz 变频交流电源和 270 V 直流电源, 目前已在空客 A380、波音 B787、F-22 等多电飞机中应用。但随着用电功率的增加, 多电飞机的配电、用电网络以及线缆布局将变得更复杂, 发生短路等电气故障的概率明显加大。故障电流产生的电弧不仅严重影响线缆和用电设备的寿命、可靠性和安全性, 还将限制航空电力系统扩容和飞行性能提升。多电飞机断路器是灭弧的关键器件, 通过分析断路器中电弧放电过程的复杂机理, 可有助于提升其灭弧性能。为深入推进多电飞机电力系统中断路器电弧理论与灭弧技术研究的开展, 首先分析了民用和军用多电飞机电力系统的结构以及电气故障保护的难点, 然后分别归纳了航空变频交流断路器和 270 V 直流断路器中电弧理论与灭弧技术的研究现状, 最后预测了未来航空保护电器灭弧技术的发展趋势。

关键词 多电飞机; 航空 270 V 直流电力系统; 变频电力系统; 航空断路器; 电弧

分类号 TM56

Overview of the arc mechanism and extinguishing in the circuit breaker of a more-electric aircraft

JIANG Yuan^{1,2,3)}, LI Qing^{1,2,3)}✉, MIAO Lei^{1,2)}, LÜ Meng^{1,2)}, WU Jian-wen⁴⁾, CHEN Ming-xuan⁵⁾

1) School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes (Ministry of Education), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) Shunde Graduate School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528399, China

4) School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

5) China Three Gorges Technology Co., Ltd., Beijing 100031, China

✉ Corresponding author, E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn

ABSTRACT A more-electric aircraft refers to an aircraft whose secondary power is unified from the traditional multi-energy, such as mechanical energy, hydraulic energy, and pneumatic energy, to the electrical energy, which has the advantages of a simple system structure, high reliability, high maintainability, and high energy efficiency. The most advanced architecture of its power system is the 360–800 Hz variable frequency AC power supply and the 270 V high-voltage DC power supply, which have been applied in the Airbus A380, Boeing B787, F-22, and other more-electric aircraft. As power consumption increases, the power distribution, power network, and cable layout in a more-electric aircraft become more complex, and the probability of electrical faults such as short circuits increases. The arc generated by fault current not only severely affects the life, reliability, and safety of cable and electrical equipment but also limits the

收稿日期: 2022–02–28

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52177127); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2020A1515110725); 航空科学基金资助项目(2020Z025074001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-19-035A1)

capacity expansion of an aviation power system and the improvement of flight performance. The circuit breaker in a more-electric aircraft is a key device for arc extinguishing. Analyzing the complex mechanism of the arc-discharging process in a circuit breaker helps improve the arc-extinguishing performance. To further promote research on the arc mechanism and extinguishing technology of circuit breakers in more-electric aircraft power systems, in this paper, the structure of civilian and military more-electric aircraft power systems and the difficulties in the electrical fault and protection are first analyzed. Then, the research status of the arc-extinguishing technology of the aviation variable frequency AC circuit breaker and the 270 V high-voltage DC circuit breaker are summarized. For an intermediate-frequency vacuum arc, the instantaneous input power inside the gap and at the anode increases with the current frequency, which indicates that the half-wave input power increases with the frequency and proves that the transition state arc is an important source of anode ablation during intermediate-frequency arcing. Under the same current condition, the frequency increases. On the one hand, when the value of di/dt increases, the arc-extinguishing ability decreases with increasing frequency. On the other hand, intensifying the skin effect leads to an increase in the arc center pressure, arc contraction, and magnetic field hysteresis, which is not conducive to arc extinguishing. In addition, the metal vapor density vaporized by droplets reduces the recovery strength of the dielectric after the current zero, which is not conducive to arc extinguishing. For the 270 V DC arc, air, nitrogen, helium, hydrogen, and other gas are presently used in aviation power systems, among which hydrogen is the research hotspot. Finally, future research trends of arc extinguishing technology for aviation circuit breakers are predicted.

KEY WORDS more-electric aircraft; aviation 270 V DC power system; variable frequency power system; aviation circuit breaker; arc

面向未来, 飞机的次级功率将从传统的多能源体制(机械能、液压能、气压能等)统一为电能体制, 即多电飞机. 多电飞机具有结构简单、可靠性高、可维护性高和能源利用率高等优点, 广泛采用电力作动(Motor drives)、起动/发电(Start/Generator, S/G)一体化、电除冰(Electric de-ice)和电防冰(Electric anti-ice)等技术.

电能的广泛应用对于提高飞行系统的可靠性、容错能力、功率密度和飞行性能具有重要的意义. 与此同时飞机的用电功率也大幅提高, 传统的 400 Hz 恒频交流电源和 28 V 低压直流电源已无法满足用电需求. 由此发展了容量和功率密度更高的航空 360 ~ 800 Hz 变频交流电源和 270 V 直流电源, 但也带来了电气故障频发、故障电弧不易熄灭等新的问题. 电弧会使断路器切断故障电路的时间延长, 不仅造成用电设备过热受损、存在火灾的隐患, 还将对外辐射电磁干扰、影响导航装置等机载设备工作, 因此灭弧技术尤为关键. 本文对多电飞机电力系统断路器电弧机理与灭弧技术的研究现状进行归纳和梳理.

1 多电飞机电力系统

1.1 多电飞机电力系统的发展现状

美国空军自 20 世纪 90 年代初就提出在飞机上实现兆瓦级发电功率的目标, 并为此先后实施了“多电飞机”和“高功率飞机”等多项研发计划; 近年来国内也在积极推进多电飞机的研发工作, 近年完成首飞的大型飞机“三剑客”——运-20、

AG600 和 C919 均不同程度地采用了多电技术^[1-4]. 典型的多电飞机电力系统结构如图 1 所示.

对于民用或大型运输多电飞机, 目前最先进的供电方案是发动机直接驱动变频发电机, 产生频率在中频 360 ~ 800 Hz 内变化的交流电能. 变频交流电源系统由交流发电机单元和控制单元构成, 交流发电机直接由发动机附件传动机匣驱动, 不需要恒速传动机械装置和恒频电力电子变换装置. 其系统具有结构简单、重量轻、体积小、功率密度高、可靠性高、寿命周期费用低、维修性良好、能量转换效率高等特点. 诸多优点使得变频电力系统已经在空客 A380 和波音 B787 等国际最先进的民用飞机中得到应用. 例如空客 A320ME、A380 和波音 B787 飞机的主发电机都使用了变频变速的三相四线制交流供电系统, 主发动机(Main engine, ME)、辅助动力系统(Aux power unit, APU)以及应急涡轮发电机(Ram air turbine, RAT)等的功率如表 1 所示^[5]. 在国内, 重大项目“大飞机专项”也采用了变频电源技术: 我国自主研发的重型军用运输飞机运-20 采用了变频发电系统; 中国商用飞机有限责任公司主持研究的大型飞机 C919, 其大容量变频发电系统采用了相电压 115 V/360 ~ 800 Hz 的方案.

当前军用多电飞机中最先进的供电方案是 270 V 直流系统, 一般由开关磁阻发电机或者同步电动机加整流器产生 270 V 直流电源. 例如美军 F-14A 战斗机、S-3A 和 P-3C 反潜机局部采用了 270 V 直流供电技术, F-22、F-35 战斗机以及 RAH-66

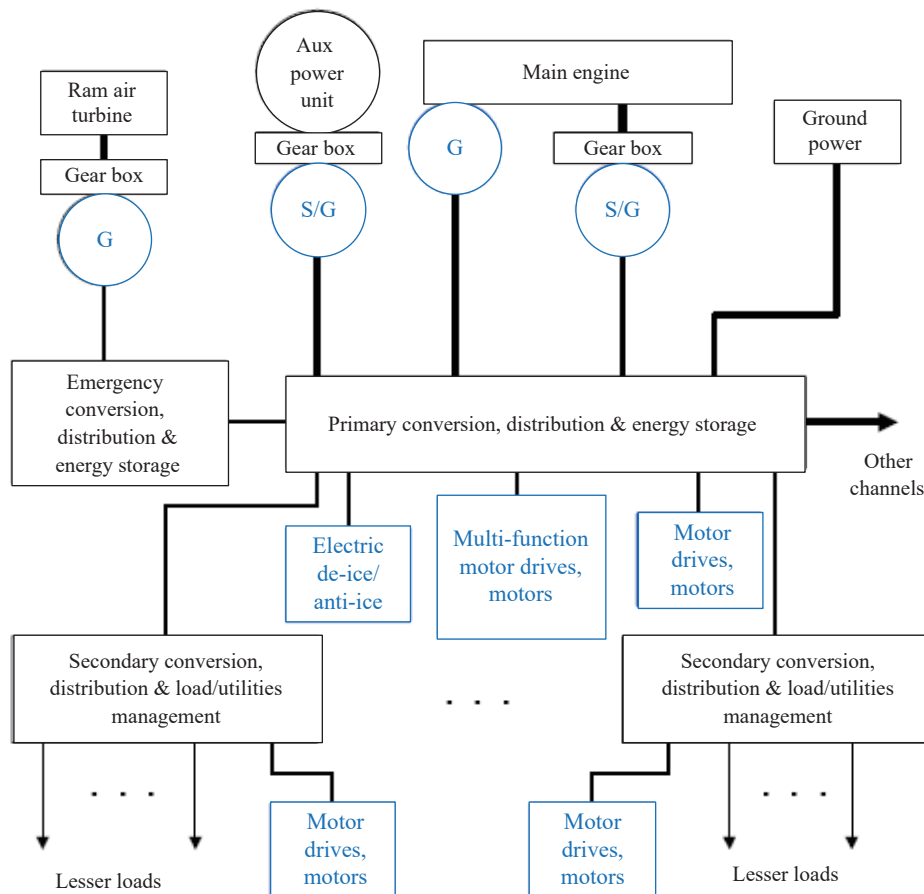


图 1 多电飞机的电力系统结构

Fig.1 Electrical power system of a more-electric aircraft

表 1 典型民用多电飞机的变频电力系统

Table 1 Variable frequency power supply system of a typical civil more-electric aircraft

Type	Power of ME/(kV·A)	Phase voltage /V	Frequency of ME /Hz	Power of APU/(kV·A)	Frequency of APU/Hz	Power of RAT/(kV·A)
A320ME	4×75	115	360–800	2×120	400	2×80
A380/C919	4×150	115	360–800	2×120	400	70
B787	4×250	230	360–800	2×225	400	10

侦察/攻击直升机则整体装备了 270 V 直流供电系统, 具体参数如表 2 所示^[1]. 此外, 我国第四代歼击机也采用了直流电源系统. 在民用飞机上, 波音公司的 B787 飞机的主电源虽然采用变频交流发电机, 但通过自耦变压整流器构成了 4×150 kW 的大功率±270 V 直流供电网络, 为电机控制器等电力电子装置供电.

表 2 典型军用多电飞机的直流电力系统

Table 2 270 V DC power supply system of a typical military more-electric aircraft

Type	Power of ME/kW	Power of APU/kW	Voltage level/V	Short-circuit current/kA
F-22	2 × 65	22	270	2.5
F-35	2 × 125	200	270	5

1.2 多电飞机中的电气故障及保护难点

多电飞机的电力系统一般包含发电、配电和用电三个环节. 以图 2 所示 B787 飞机的电力系统为例, 其发电环节包括 4 台变频起动发电机 (Variable frequency starter generator, VFSG)、2 台辅助起动/发电机 (Auxiliary starter generator, ASG) 和 1 台冲压空气涡轮发电机 (Ram air turbine, RAT) 作为应急发电机; 配电环节由自耦变压器 (Auto-transformer unit, ATU)、变压整流器 (Transformer rectifier unit, TRU)、自耦变压整流器 (Auto-transformer rectifier unit, ATRU) 分别形成变频交流 (Alternative current, AC) 115 V、直流 (Direct current, DC) 270 V 和 DC 28 V 网络, 各网络分别连接对应的汇流条; 用电环节即负载, 包括 AC 和 DC 负载, 从相应的汇

流条取电^[6], 汇流条上配有起控制作用的接触器 (Contactor, C). 随着用电需求的增加, 飞机的配电、用电网络以及线缆布局也将变得更加复杂, 电气故障可能出现在网络的任何地方, 如图 2 中红

色箭头所示. 特别是发生接地或短路故障时, 短路电流及开断过程产生的电弧对线缆、用电设备都将产生严重的危害^[7-8]. 因此在发电、配电和用电环节中必须配备起到保护作用的断路器 (Breaker, B).

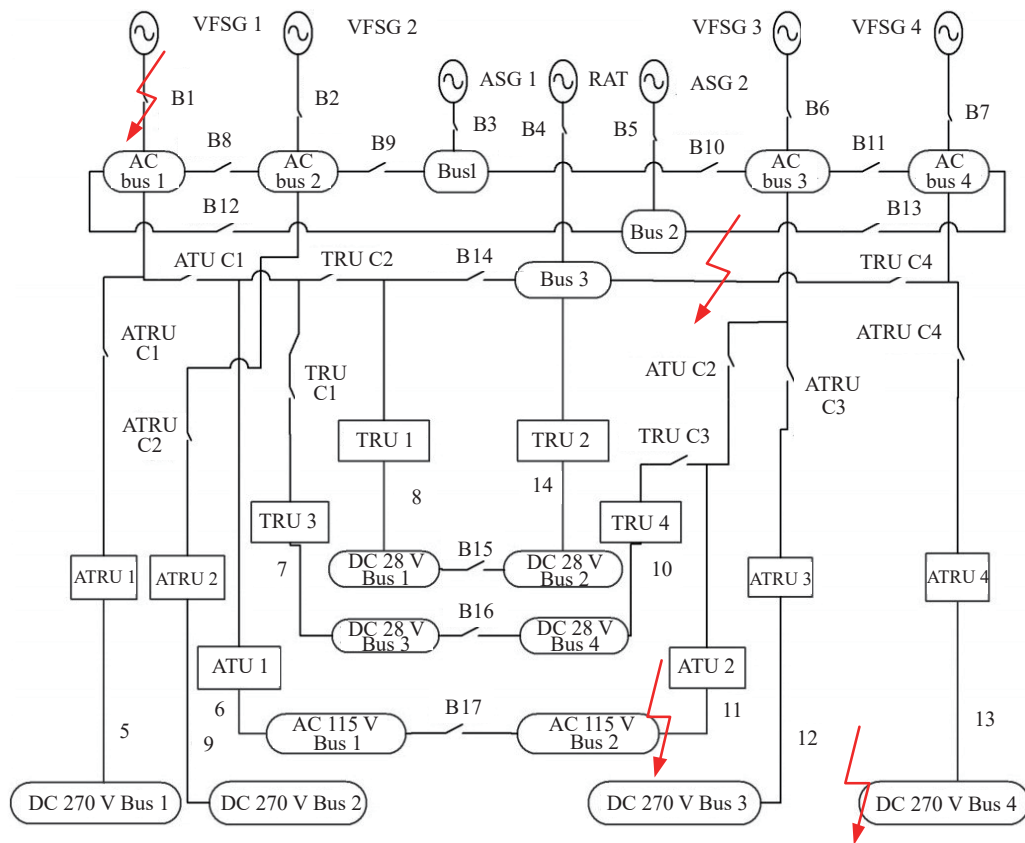


图 2 B787 飞机的电气结构

Fig.2 Electrical power structure of the B787

断路器是指能够自动或者人工重复关合、承载和开断正常电流、故障电流和故障电弧的大功率电器, 具有控制和保护的双重作用^[9]. 由于航空供电系统运行环境恶劣, 断路器开断故障电流时更容易产生电弧, 原因如下: 供电传输线路有分布电感, 加上电力作动器等感性负载, 开断时会产生很高的过电压; 机内空间有限, 要求其断路器开距小, 安全电压阈值降低^[10-13]; 战斗机飞行高度达到 20 km 时, 空气压力仅为标准大气压的 5.5% 左右, 户外潮湿且温差大, 断路器的绝缘能力下降. 由故障电流产生的电弧会使断路器触头产生熔化的金属桥、加剧触头的电磨损、破坏灭弧装置的绝缘性能, 如图 3 所示, 这不仅严重影响断路器的使用寿命和可靠性, 还给机载设备用电带来安全隐患^[14-17].

由此可见航空断路器的灭弧技术对于保证多电飞机安全飞行和可靠用电具有极其重要的意

义, 但同时也存在较大的技术难度. 具体而言, 对于航空变频电力系统中的断路器, 中频 360 ~ 800 Hz 频率比工频 50 Hz 增加 7 ~ 16 倍, 使得电流过零时的变化率 di/dt 增加, 导致电弧燃烧更稳定, 灭弧过

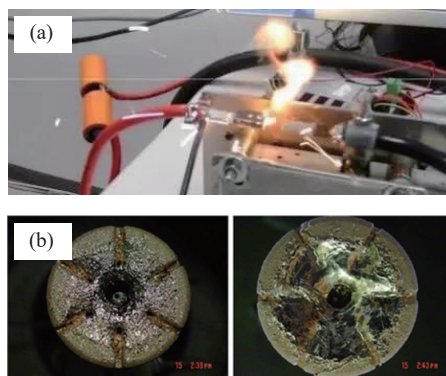


图 3 电弧的危害. (a) 电弧带来火灾隐患; (b) 电弧烧蚀断路器触头表面

Fig.3 Arc hazard: (a) fire hazards by arc; (b) ablated contact surface of circuit breaker by arc

程将更加困难^[18]。而对于 270 V 直流系统中的断路器, 灭弧技术难点集中表现在两个方面: 一是直流系统没有电流自然过零点, 交流断路器的灭弧原理和技术将不再适用; 二是大量电力作动器等感性负载中储存着巨大的能量, 故障电流被切断后将产生极高的过电压发生弧后击穿放电, 在空间有限的条件下显著地增大了绝缘设计难度^[19]。

2 多电飞机断路器的电弧机理与灭弧技术

多电飞机断路器的核心部件是灭弧室。通过分析断路器中电弧放电过程的复杂机理, 以此优化灭弧性能, 既是提升多电飞机断路器灭弧能力的关键, 也是当下电器学领域的前沿研究方向之一。

2.1 变频交流断路器的电弧机理与灭弧技术

针对航空变频交流电力系统的电流故障保护, 国内尚无专用的断路器, 仍沿用空气断路器灭弧。其工作原理是使电弧在气流场和磁场的驱动作用下从触头区域进入灭弧区域, 电弧被充分拉长并被栅片切割, 利用近极压降效应和冷却作用熄弧^[20-21]。由于航空工作环境对部件的体积和重量有严格要求, “拉长”电弧式电器的灭弧能力将极大地受限于灭弧装置的尺寸, 未来必将被取代。波音公司在 B787 飞机中已经使用了新型的变频交流断路器, 具体灭弧技术方案尚未对国内公开。

借鉴地面民用电力系统断路器的使用经验, 相比空气、SF₆、油等常见灭弧介质, 真空断路器更符合航空变频 360 ~ 800 Hz 电力系统的灭弧需求, 体现在: (1) 扩散型真空电弧能量低、电流过零时载流子消散速度快、弧后介质强度的恢复速度为 kV·μs⁻¹ 级, 适合电流频率提高的工况; (2) 耐压强度高, 灭弧能力强, 可靠性高, 在 35 kV 以下电压等级的配电开关中所占份额多达 90%; (3) 体积和重量比同等开断容量的空气开关少 30% 以上; (4) 接触电阻为 μΩ 级, 功耗小于同电流等级下的固态功率控制器^[22-23]。

关于真空断路器开断故障电流产生中频 360 ~ 800 Hz 电弧的原因, 目前认为是由触头蒸发出的金属蒸气形成放电通道导致的, 这一过程宏观上和工频 50 Hz 电弧是类似的^[24-25]。但在微观的电弧机理方面, 由于频率提高至 360 ~ 800 Hz 引起燃弧半波和介质恢复时间缩短, 在等离子体满足完全电离、准中性、局部热力学平衡、磁流体等效等基本假设条件下^[26-27], 真空电弧的形态演变过程、弧后金属蒸气的来源以及等离子体的扩散方式均发生改变^[28-32], 使得工频时的电弧形态划分、阳极斑

点、阳极烧蚀、弧后重击穿等经典理论不再完全适用^[33-37], 因此众多学者对中频真空电弧展开了专门研究。

在中频真空电弧燃弧特性的研究方面, 文献^[38]分析了纵向磁场中的中频真空电弧形态, 认为虽然阳极表面熔化, 但产生阳极斑点的可能性很小, 且电流频率越高可能性越小。文献^[39]认为当电流频率提高至中频后, 过渡态电弧随着频率的增加而出现更为集聚的外观, 由于电弧的演变及运动速度加快, 接触式探针法难以获得有效的等离子体微观参数, 而利用非接触式光谱法获得电流峰值时刻的电子温度为 0.5 ~ 3 eV, 电子密度为 10²⁰ ~ 5.3 × 10²¹ m⁻³。由此可以解释中频真空电弧的燃弧特性, 相比于工频, 电流频率的提高使得过渡态弧柱内部的电子温度更低、电子密度更高, 电流密度也因此提高, 弧隙内部和阳极瞬时输入功率提高, 说明半波输入功率随着频率的增加而增大, 也证明了过渡态电弧是中频燃弧期间阳极烧蚀的重要来源。本项目组在航空中频真空电弧燃弧机理深耕多年, 发现在实验中小开距中频真空电弧大多处于扩散态, 并未出现明显的集聚态, 触头表面也未发生严重的大面积熔化; 中频时纵磁触头内电弧扩散均匀, 平板触头内电弧活动剧烈, 根据 Bennet 箍缩理论推断压力梯度是影响真空电弧形态和形成等离子体射流的主要原因, 并仿真证明了电流过零时, 触头中心区域磁场滞后更明显, 如图 4 所示, 阻碍中频真空电弧扩散和熄灭^[40]。

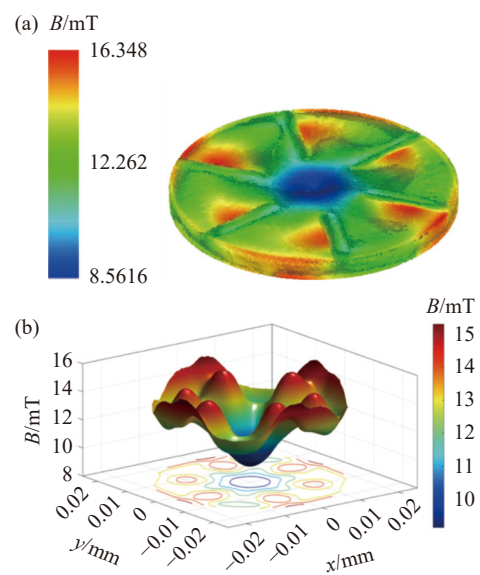


图 4 中频真空电弧的磁场仿真计算。(a) 中频真空电弧区域的磁场分布; (b) 开距中间平面的磁场分布

Fig.4 Magnetic field simulation of an intermediate-frequency vacuum arc: (a) magnetic field distribution in the intermediate-frequency vacuum arc region; (b) magnetic field distribution in the middle plane

在关于中频真空电弧弧后过程研究方面, 文献 [41] 建立了考虑燃弧过程因素的连续过渡模型, 发现随着频率增加, 当慢速离子占主导时, 鞘层生长较慢, 不利于电弧熄灭. 文献 [42] 发现在燃弧电流峰值为 23 kA、电流变化率为 $300 \text{ A} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 条件下, 真空断路器无法在电流零点可靠熄弧, 且真空间隙的弧后介质恢复过程存在一定的随机性和分散性. 本项目组的研究表明电流频率为 500 Hz 时, 随着电流值增加, 纵向磁场可使阴极斑点加速向外扩散, 开断时间缩短; 随着频率增加, 中频真空开关的开断能力下降, 开断失败后触头表面的烧蚀、金属液滴喷射和电场集中等现象, 与中频真空电弧的击穿点大概率出现在触头边缘处联系紧密 [43-44].

上述研究工作主要关注了频率提高后真空电弧的形态变化、熄灭条件、磁场调控及触头烧蚀等现象, 对介质恢复及弧后击穿的机理研究较少. 为进一步深入研究中频真空电弧的弧后过程, 本项目组建立了考虑 Stefan 流的金属液滴蒸发相界面模型 [45]. 研究发现中频真空电弧发生弧后击穿时, 伴随有大量金属液滴从弧隙向外喷溅, 如图 5 所示, 图中 t 代表拍摄电弧图像的时间, i 代表对应的电弧电流, 弧隙内部压力梯度约为 $7.9 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{mm}^{-1}$; 金属液滴的寿命为 1.6 ~ 2.8 ms, 影响寿命的因素有液滴半径、喷射速度和灭弧室尺寸; 金属蒸气的分布以液滴为中心向外递减, 蒸气密度可达到 $2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 上述关于金属液滴蒸发情况的量化描述, 为探明中频条件下触头如何产生金属液滴、金属液滴喷溅如何受电弧放电影响以及金属液滴喷溅如何影响中频真空断路器电弧熄灭能力等问题的机理提供了重要依据.

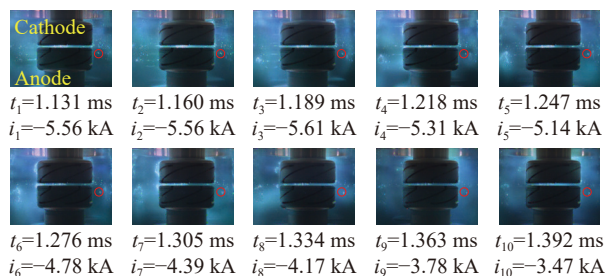


图 5 中频弧后击穿过程中的金属液滴喷射现象

Fig.5 Metal droplet jetting during post-arc breakdown at intermediate frequency

综上所述可以得到中频真空电弧灭弧过程受以下因素影响: 一是当频率增加时, 相对小的电流值就会达到较大的电流变化率, 如果认为 di/dt 也有阈值, 那么频率增加将使电流开断变得更为困难, 同

样电流条件下电弧熄灭困难, 灭弧能力将随频率增加而下降; 二是随着频率增加, 集肤效应加强, 引起电弧中心压力增加、电弧更收缩和磁场大幅度滞后 [40], 增强了电弧的稳定性和能量密度, 不利于电弧熄灭; 三是由液滴蒸发的金属蒸气密度降低了中频弧后介质恢复强度, 不利于灭弧.

2.2 航空 270 V 直流断路器的电弧机理与灭弧技术

直流断路器中的电弧可看作特殊条件下的交流电弧, 由于直流系统没有电流自然过零点, 无法利用能量最低原理使电弧熄灭, 需要额外的灭弧措施, 因此在航空断路器体积有限的条件下增加了灭弧难度.

美国军方针对多电飞机 270 V 直流断路器电弧机理与灭弧技术的研究起步较早, Avionics Magazine 在题目为《270 V 直流断路器/接触器解决方案与成本性能问题》的技术报告中, 首次介绍了美国 LEACH 公司和 GIGAVAC 公司联合开发的可成功开断 10 倍过流的 270 V 直流断路器/接触器, 该断路器/接触器可用于航空航天领域, 但使用何种灭弧方案未曾公开 [19].

国内关于直流 270 V 断路器电弧机理与灭弧技术的研究源于航天 28 V 继电器灭弧技术的基础, 常用的灭弧介质包括空气、氮气、氦气、氢气等气体. 空气灭弧需要借助磁吹、栅片等灭弧结构, 本质是拉长电弧, 利用近极压降效应和冷却作用熄弧, 特殊工况下体积受限; 氮气是空气的主要成分, 稳定性强, 在灭弧室中产生充入氮气提高压力, 利用吹弧原理灭弧; 氦气是一种惰性气体, 化学性质不活泼, 利用其稳定性强特点来灭弧, 但一旦受激发可释放 He^{2+} 、 HeH 等离子及分子, 形成放电通道; 氢气与氮气、氦气气体相比, 分子质量轻、运动速度快, 并且氢气的导热系数约为空气导热系数的 6.69 倍, 作为灭弧介质, 会有助于弧道的冷却, 氢气的电弧电位梯度值约为空气的 5 倍, 当电流过零值瞬间, 利于熄灭电弧 [46]. 文献 [47] 建立了航天用继电器的电弧微观模型, 对局部热力学平衡态和热力学平衡态条件下氮气混杂铜蒸气、氧气等杂质时的电弧输运参数进行了计算, 结合电弧光谱分析, 总结了航天密闭继电器电弧的燃弧规律, 填补了国内这一研究领域的空白. 更进一步, 文献 [48] 和 [49] 建立了航天继电器银触头在氮气、氢气、氦气中形成电弧和熄灭电弧过程的磁流体动力学 (Magneto hydrodynamic, MHD) 模型, 结合实验研究了抑制航天继电器电弧的措施,

研究表明对于航天 28 V 直流系统, 氢气或者氢气-氮气混合气体是较为理想的灭弧介质, 配合永磁体吹弧, 可以显著提高继电器的灭弧性能及触头使用寿命。

在上述航天继电器气体介质灭弧研究的基础上, 本项目组在密闭灭弧室内对空气、氢气、氮气、氢气-氮气混合气体断路器样机进行了直流 270 V 电弧实验研究, 结果表明: 当实验条件为 270 V/53 A 时, 氢气的燃弧时间仅为 400 μs , 空气的燃弧时间达到 1.6 ms, 氢气电弧的能量低于空气电弧, 利于灭弧; 氢气-氮气混合气体的最大开断电流可达到 1800 A, 其熄灭电弧的能力远大于纯氮气^[50-52]。除对灭弧气体进行研究外, 也有文献对触点结构、磁场吹弧、栅片等灭弧措施展开研究。文献^[53]研究了在直流 270 V 桥式触点断路器中的电弧射流, 通过仿真计算等离子体温度分布和电流密度分布, 认为体积力和接触面的共同作用是产生电弧射流的主要原因, 为优化直流 270 V 气体断路器结构提供了依据。文献^[54]实验研究发现外加横向 50 mT 磁场、触点分断速度大于 0.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 270 V 直流断路器灭弧效果较好。文献^[55]通过实验获得了较为理想的灭弧参数包括 50 mT 的横向磁感应强度、0.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的触点分断初速度、14 片铜灭弧栅片以及 3 mm 的间距。为进一步提升航空 270 V 直流条件下的灭弧性能, 本项目组提出了一种耗散功率变化的 Mayr 电弧修正模型, 能够准确描述触头打开时电弧电压及运动速度的动态变化过程, 为灭弧栅片和磁吹系统的优化设计提供了参考依据^[56]。

除采用气体介质灭弧, 近年也有学者将民用配电技术领域的直流灭弧技术应用于航空 270 V 直流断路器。根据关键开断器件的不同, 目前普遍应用的直流断路器分为三种: 基于机械开关的强迫分断式直流断路器、全固态式直流断路器、机械开关与固态开关结合的混合式直流断路器^[57]。

强迫换流式断路器主要依靠机械开关实现电路的开断, 利用谐振电流人工过零, 形成瞬时电流过零点使电弧自然熄灭^[58]。针对航空 270 V 直流灭弧, 文献^[59]和^[60]利用短间隙真空灭弧室进行高频开断实验, 研究发现强迫开断时纵向磁场利于降低电弧能量。在与航空直流断路器类似的船舶直流断路器研究中, 文献^[61]发现电流过零时刻的 di/dt 对电弧熄灭特性有显著影响, di/dt 过高, 电弧在电流过零后难以熄灭。但强迫分断式直流断路器结构复杂、体积大, 应用于航空环境有较

大难度。

全固态断路器仅含有电力电子开关元件, 可以实现快速开断, 是近年来成为直流配电断路器的重要研究方向^[62]。文献^[63]设计了分断故障电流为 50 A 的 270 V 直流固态功率控制器样机, 实验测试平均故障间隔时间为 28762 h, 但分断 50 A 故障电流在实际航空 270 V 直流电力系统中应用价值不大。目前通流能力弱、通态损耗大是制约全固态直流断路器推广的关键瓶颈。

自然换流混合式断路器包括机械开关和电力电子开关两种元件, 综合了以上二者的优点: 开关通态损耗小、开断速度快、可靠性高、使用寿命长。文献^[64]研究了一种适用于 270 V 直流电力系统的混合断路器, 仿真研究了换流时的能量缓冲和吸收过程, 实验验证了绝缘栅双极型晶体管 (Insulated gate bipolar transistor, IGBT) 过载耐受力是决定混合断路器灭弧成功的关键因素。本项目组提出的一种自然换流混合式断路器, 其结构如图 6(a) 所示, 机械开关 S 使用真空开关, 固态开关支路中使用 IGBT 器件 T_1 作为换流元件; 利用四个二极管 $D_1 \sim D_4$ 组成全桥整流电路, 实现双极性导通功能; 由电阻 R_0 和电容 C_0 组成的缓冲支路配合压敏电阻 R_V 响应动作时间, 可以有效减缓 du/dt 。仿真灭弧过程如图 6(b) 所示, 其中 u_{CB} 为断路器触点间电压, i_{CB} 为断路器流过的总电流, 故障电流从零时刻开始逐渐上升至 1000 A, 直流断路器在 15 ms 附近开始切断电弧, 当 i_{CB} 过零时, 故障形成的电弧熄灭, u_{CB} 稳定至 270 V。

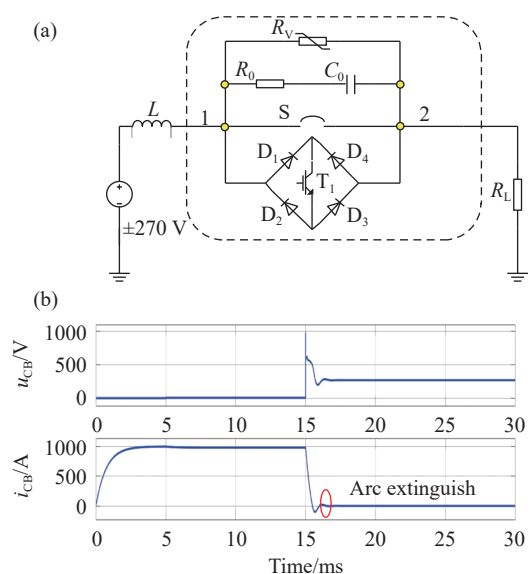


图 6 一种自然换流混合式断路器。(a) 断路器结构; (b) 灭弧过程的仿真

Fig.6 Hybrid circuit breaker with natural commutation: (a) structure of the circuit breaker; (b) simulation of the arc-extinguishing process

3 结论与展望

多电飞机电力系统故障电流产生的电弧不仅严重影响线缆和用电设备的寿命和可靠性, 还给安全飞行带来巨大隐患. 目前针对变频交流电力系统, 真空断路器产生的电弧能量低、弧后介质强度恢复速度快, 有较大的应用潜力, 关于中频真空电弧机理及灭弧技术的研究是当下热点; 而对于 270 V 直流电力系统, 由于没有电流自然过零点, 无法利用能量最低原理使电弧熄灭, 需要额外的灭弧措施, 因此在航空断路器体积有限的条件下增加了灭弧难度. 未来可从以下方面进一步展开研究:

(1) 密闭式直流断路器体积小, 将氢气等介质与物理手段相结合, 具有较好的灭弧效果, 可考虑在气体介质成分、灭弧触点形式、磁场吹弧强度、灭弧栅片结构等方面进行电弧 MHD 仿真与故障实验深度融合研究, 以指导断路器的优化设计, 进一步提升灭弧能力.

(2) 自然换流混合式断路器通过主回路、固态支路及缓冲支路三者的动作配合, 可快速、有效分断故障电流和熄灭电弧, 具备作为航空直流电力系统保护电器的潜力. 分断过程中电弧临界发生条件、换流及升压暂态特性、能量缓冲与吸收等过程的物理机制尚未完全掌握, 还需深入研究.

参 考 文 献

- [1] Sarlioglu B, Morris C T. More electric aircraft: Review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft. *IEEE Trans Trans Electrification*, 2015, 1(1): 54
- [2] Liu Z J, Song C C, Liang J Y, et al. Advances in modeling and control of probe-drogue aerial refueling. *Chin J Eng*, 2021, 43(1): 150
(刘志杰, 宋丛丛, 梁金源, 等. 空中加油机加油软管系统建模和控制研究进展. 工程科学学报, 2021, 43(1): 150)
- [3] Yan Y G, Qin H H, Gong C Y, et al. More electric aircraft and power electronics. *J Nanjing Univ Aeronaut & Astronaut*, 2014, 46(1): 11
(严仰光, 秦海鸿, 龚春英, 等. 多电飞机与电力电子. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 11)
- [4] Fu Q, Chen X Y, Zheng Z L, et al. Research progress on visual perception system of bionic flapping-wing aerial vehicles. *Chin J Eng*, 2019, 41(12): 1512
(付强, 陈向阳, 郑子亮, 等. 仿生扑翼飞行器的视觉感知系统研究进展. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1512)
- [5] Jiang Y, Li Q. *Vacuum Circuit Breaker for Aviation Variable Frequency Power System: Theory and Application of Arc in Electrical Apparatus*. Singapore: Springer Press, 2021
- [6] Fan Z Y, Tan Z, Liu T. Research on fault transmission modes for electrical system of more electric aircraft. *Mod Electron Tech*, 2018, 41(24): 48
(樊智勇, 谭卓, 刘涛. 多电飞机电气系统故障传递模式研究. 现代电子技术, 2018, 41(24): 48)
- [7] He C. Research on fault location method of aircraft wire based on time-frequency reflection. *Electron Test*, 2018(15): 53
(何超. 基于时域反射的飞机线路故障定位方法研究. 电子测试, 2018(15): 53)
- [8] Li Q, Hu W Y, Li J Y, et al. A survey of person re-identification based on deep learning. *Chin J Eng*, 2022, 44(5): 920
(李擎, 胡伟阳, 李江昀, 等. 基于深度学习的行人重识别方法综述. 工程科学学报, 2022, 44(5): 920)
- [9] Liu M L, Hu X R. Selection and analysis of protection device for civil aircraft distribution. *Civ Aircr Des Res*, 2008, 22(4): 21
(刘麦玲, 胡兴荣. 民用飞机配电网保护装置的选择分析. 民用飞机设计与研究, 2008, 22(4): 21)
- [10] Ding X, Tang G F, Han M X, et al. Design and equivalence evaluation of type test for hybrid DC circuit breaker. *Power Syst Technol*, 2018, 42(1): 72
(丁晓, 汤广福, 韩民晓, 等. 混合式高压直流断路器型式试验及其等效性评价. 电网技术, 2018, 42(1): 72)
- [11] Wu Y, Rong M Z, Zhong J Y, et al. Medium and high voltage DC breaking technology. *High Volt Eng*, 2018, 44(2): 337
(吴翊, 荣命哲, 钟建英, 等. 中高压直流开断技术. 高电压技术, 2018, 44(2): 337)
- [12] He J J, Yuan Z, Zhao W T, et al. Review of DC circuit breaker technology development. *South Power Syst Technol*, 2015, 9(2): 9
(何俊佳, 袁召, 赵文婷, 等. 直流断路器技术发展综述. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9)
- [13] Zhai G F, Bo K, Zhou X, et al. Investigation on breaking arc in DC high-power relays: A review. *Trans China Electrotech Soc*, 2017, 32(22): 251
(翟国富, 薄凯, 周学, 等. 直流大功率继电器电弧研究综述. 电工技术学报, 2017, 32(22): 251)
- [14] Li X W. Research progress on air arc of low voltage electrical appliances. *Electr & Energy Manag Technol*, 2018, 22: 12
(李兴文. 低压电器空气电弧的近期研究进展. 电器与能效管理技术, 2018, 22: 12)
- [15] Muratović M, Kapetanović M, Ahmethodžić A, et al. Nozzle ablation model: Calculation of nozzle ablation intensity and its influence on state of SF₆ gas in thermal chamber // *Proceedings of the IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. Bologna, 2013: 692
- [16] Li K, Gao Z C, Wu Y, et al. Remaining lifetime prediction of AC contactor based on statistical regression and nonlinear Wiener process. *Trans China Electrotech Soc*, 2019, 34(19): 4058
(李奎, 高志成, 武一, 等. 基于统计回归和非线性Wiener过程的交流接触器剩余寿命预测. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4058)
- [17] Cui R H, Wang Y, Wang C Y, et al. Series arc fault identification

- method in aviation lines based on multi-information fusion. *Trans China Electrotech Soc*, 2019, 34(Suppl 1): 118
(崔芮华, 王洋, 王传宇, 等. 基于多信息融合的航空线路串联故障电弧识别方法. *电工技术学报*, 2019, 34(增刊1): 118)
- [18] Tong Z A, Wu J W, Li K. Numerical simulation of intermediate-frequency vacuum arc. *IEEE Access*, 2020, 8: 143085
- [19] Wu S X. New generation 270V DC contractor for military or aeronautics & astronautics use. *Electrotech Electr*, 2009, 29(11): 43
(吴世湘. 军事或航空航天用新一代270V直流接触器. *电工电气*, 2009, 29(11): 43)
- [20] Xu Z H. *Theoretical Basis of Electrical Appliances*. Beijing: China Machine Press, 2014
(许志红. 电器理论基础. 北京: 机械工业出版社, 2014)
- [21] Niu C P, Ding J W, Yang F, et al. The influence of contact space on arc commutation process in air circuit breaker. *Plasma Sci Technol*, 2016, 18(5): 460
- [22] Wang J H, Geng Y S, Liu Z Y, et al. High voltage level vacuum switching technology. *High Volt Apparatus*, 2017, 53(3): 1
(王建华, 耿英三, 刘志远, 等. 高电压等级真空开断技术. *高压电器*, 2017, 53(3): 1)
- [23] Zong T Y, Li Z B, W J, et al. Experimental study on electrical contact performance under different pairing. *Electr Eng Mater*, 2017(6): 3
(宗天元, 李震彪, 魏江, 等. 非对称配对触头材料的电性能试验研究. *电工材料*, 2017(6): 3)
- [24] Rich J A, Farrall G A. Vacuum arc recovery phenomena. *Proc IEEE*, 1964, 52(11): 1293
- [25] Jenkins J E, Sherman J C, Webster R, et al. Measurement of the neutral vapour density decay following the extinction of a high-current vacuum arc between copper electrodes. *J Physics D Applied Physics*, 1975, 8(12): L139
- [26] Wang L J, Huang X L, Zhang X, et al. Modeling and simulation of high-current vacuum arc considering the micro process of anode vapor. *J Phys D Appl Phys*, 2017, 50(9): 095203
- [27] Jia S L, Yang D G, Wang L J, et al. Investigation of the swirl flow on anode surface in high-current vacuum arcs. *J Appl Phys*, 2012, 111(4): 043301
- [28] Miller H C. Anode modes in vacuum arcs: Update. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2017, 45(8): 2366
- [29] Zalucki Z, Janiszewski J. Transition from constricted to diffuse vacuum arc modes during high AC current interruption. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1999, 27(4): 991
- [30] Matsui Y, Sano A, Komatsu H, et al. Vacuum arc phenomena under various axial magnetic field and anode melting // *Proceedings of the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Braunschweig, 2010: 324
- [31] Liu Z X, Xiu S X, Wang X, et al. The characteristics of vacuum arc in the process of transition to diffuse mode under transverse magnetic field. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2019, 47(8): 3554
- [32] Ma H, Zhang Z Q, Liu Z Y, et al. Effect of six pure metals cathode on constricted characteristics of high-current vacuum arcs subject to axial magnetic field. *J Phys D: Appl Phys*, 2019, 52(26): 265201
- [33] Wang L J, Wang Y, Huang X L, et al. Experiments and simulation studies on anode erosion process in vacuum arc under axial magnetic field: A review. *High Volt Eng*, 2019, 45(7): 2343
(王立军, 王渊, 黄小龙, 等. 纵向磁场下真空电弧中阳极烧蚀过程的实验及仿真研究综述. *高电压技术*, 2019, 45(7): 2343)
- [34] Liu L H, Zhuang J W, Xu G S, et al. The characteristics of vacuum arc in the process of DC interruption using butt contacts and TMF contacts. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42(6): 1736
- [35] Ge G W, Cheng X, Su K, et al. Investigation on the magnetic arc control of multi-break VCBs // *Proceedings of 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Greifswald, 2018: 287
- [36] Mo Y P, Shi Z Q, Jia S L, et al. Experimental investigation on the postarc current in vacuum circuit breakers and the influence of arcing memory effect. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2019, 47(8): 3508
- [37] Li S M, Geng Y S, Liu Z Y, et al. Discharge and breakdown mechanism transition in the conditioning process between plane-plane copper electrodes in vacuum. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2019, 26(2): 539
- [38] Wang J, Wu J W, Zhu L Y. Properties of intermediate-frequency vacuum arc under axial magnetic field. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2009, 37(8): 1477
- [39] Wang J, Wu J W, Zhu L Y. Arc behavior of intermediate-frequency vacuum arc on axial magnetic field contacts. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39(6): 1336
- [40] Jiang Y, Wu J W, Ma S L, et al. Appearance of vacuum arcs in axial magnetic field and butt contacts at intermediate frequencies. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2019, 47(2): 1405
- [41] Ding C, Yuan Z, He J J. Effect of vacuum arc cathode spot distribution on breaking capacity of the arc-extinguishing chamber. *Jpn J Appl Phys*, 2017, 56(10): 106001
- [42] Peng Z D, Yang C G, Li B, et al. Analysis and test of the high current forced commutation interruption characteristics for a DC vacuum circuit breaker. *High Volt Eng*, 2020, 46(2): 603
(彭振东, 杨晨光, 李博, 等. 直流真空断路器大电流强迫换流分断特性分析与验证. *高电压技术*, 2020, 46(2): 603)
- [43] Chen Z Q, Duan X Y, Liao M F, et al. Influences of arc parameters on the repeated interruption performances of laser triggered vacuum switch. *Trans China Electrotech Soc*, 2019, 34(21): 4501
(陈占清, 段雄鹰, 廖敏夫, 等. 电弧参数对激光触发真空开关重频开断特性的影响. *电工技术学报*, 2019, 34(21): 4501)
- [44] Jiang Y, Wu J W, Jia B W. Reignition after interruption of intermediate-frequency vacuum arc in aircraft power system. *IEEE Access*, 2020, 6: 8649
- [45] Jiang Y, Wu J W, Li Q, et al. Influence of metal vapor on post-arc breakdown for intermediate frequency vacuum arc. *Vacuum*, 2021, 193: 110551
- [46] Ishikawa M, Ikeda H, Yanabu S, et al. Numerical study of delayed-zero-current interruption phenomena using transient analysis

- model for an ARC in SF₆ flow. *IEEE Power Eng Rev*, 1984, 4(12): 40
- [47] Zang C Y. *Research on Static-State Arc Plasma Ionizations and Arc Characteristics for Aerospace Relays* [Dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006
(臧春艳. 航天继电器稳态电弧等离子体电离过程与电弧特性研究[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2006)
- [48] Zhou X. *Simulation and Experiment Research on Electrical Arc and Its Extinguishing Methods in Aerospace Relay* [Dissertation]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011
(周学. 航天继电器分断电弧及其抑制措施的仿真和实验研究[学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011)
- [49] Zhou X, Cui X L, Chen M, et al. Thermodynamic properties and transport coefficients of nitrogen, hydrogen and helium plasma mixed with silver vapor. *Plasma Sci Technol*, 2016, 18(5): 560
- [50] Xin C, Wu J W, Liu B. Investigation of DC arc in hydrogen and air // *Proceedings of the 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*. Matsue, 2013: 1
- [51] Xin C, Wu J W, Liu B, et al. Plasma characteristics of DC hydrogen-nitrogen mixed gas arc under high pressure. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42(10): 2722
- [52] Xin C, Wu J W. Experimental study on the breaking process of DC hydrogen-nitrogen mixed gas arc. *Trans China Electrotech Soc*, 2015, 30(13): 117
(辛超, 武建文. 直流氢气-氮气混合气体电弧开断过程实验研究. *电工技术学报*, 2015, 30(13): 117)
- [53] Zhai G F, Bo K, Chen M, et al. Investigation on plasma jet flow phenomena during DC air arc motion in bridge-type contacts. *Plasma Sci Technol*, 2016, 18(5): 485
- [54] Li Z P. *Research on the Technology of Arc Suppression of 270V Aviation DC Circuit Breaker* [Dissertation]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015
(李振平. 270V航空直流断路器灭弧技术的研究[学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2015)
- [55] Li C. *Research on Breaking Arc Restraining Factors of Bridge-Type Contact under 270V and DC* [Dissertation]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016
(李超. 270V桥式触点直流分断电弧抑制因素的实验研究[学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2016)
- [56] Jia B W, Wu J W, Kong G W, et al. Arc motion characteristics of H₂-N₂ mixed gas switch with magnetic field // *Proceedings of the 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*. Xi'an, 2017: 268
- [57] Xu Z, Xiao H Q, Xu Y Z. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers. *High Volt Eng*, 2018, 44(2): 347
(徐政, 肖晃庆, 徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究. *高电压技术*, 2018, 44(2): 347)
- [58] Song X C, Shi Z Q, Liu C, et al. Experimental investigation on the characteristics of drawn vacuum arc in initial expanding stage and in forced current-zero stage. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2011, 39(6): 1330
- [59] Liu B, Wu J W, Xin C. Study on dynamic characteristic in force interrupted DC vacuum arc. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42(10): 2382
- [60] Liu B, Wu J W, Xin C, et al. Research on the reignition condition for DC arc forcing interruption // *Proceedings of the 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Tomsk, 2012: 169
- [61] Liu L H, Zhuang J W, Wang C, et al. A hybrid DC vacuum circuit breaker for medium voltage: Principle and first measurements. *IEEE Trans Power Deliv*, 2015, 30(5): 2096
- [62] Liu W, Ma H C, Zhang H T, et al. Development of solid hybrid DC circuit breaker for DC distribution network. *South Power Syst Technol*, 2016, 10(4): 37
(刘伟, 马海超, 张海涛, 等. 配电网用全固态混合式直流断路器研发. *南方电网技术*, 2016, 10(4): 37)
- [63] Meng K. *Research on 270V DC Solid-State Power Controller* [Dissertation]. Xi'an: Xidian University, 2019
(蒙凯. 270V直流固态功率控制器研究[学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2019)
- [64] Huo W L, Wu J W, Li D G, et al. Interruption transient characteristics and experimental research of aero 270V DC hybrid breaker. *Proc CSEE*, 2017, 37(4): 1062
(霍文磊, 武建文, 李德阁, 等. 航空270V混合式断路器分断瞬态特性及实验研究. *中国电机工程学报*, 2017, 37(4): 1062)