文章编号:1674-2974(2026)04-0163-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026180

多场耦合下双断点塑壳断路器电弧运动特性分析

董海燕[1],梁博[1],燕宁宁[1],窦建明[2†],王思润[3],林小军[4]
(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730070;
2. 兰州交通大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730070;
3. 天水长城开关厂集团有限公司,甘肃 天水 741018;
4. 兰州工业学院 机电工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:双断点塑壳断路器具有快速分断与双弧运动的特点,作为短路保护的关键设备广泛应用于牵引变电所低压配电系统中.本文以运动学与磁流体动力学(magnetohydrodynamics,MHD)理论为基础,建立机械-电磁-热-流多场域耦合的双断点塑壳断路器双电弧仿真模型,通过考虑操纵系统的机械运动,采用参数化拟合函数控制导电桥旋转分断,实现机械运动与电弧行为的同步耦合,以温度、气压、电流密度为表征参数探究分断双弧由生长、迁移到熄灭的全时空演化轨迹.结果表明:在机构驱动下导电桥旋转分断、双断点打开,同时空气间隙被击穿,左、右灭弧室内形成双电弧,经运动生长、弧柱切割,最终实现熄灭;导电桥的机械运动呈显著非线性特性,分断时间为3.2 ms,熄弧时间为3.5 ms;双弧温度与电流变化相关,电弧热量与功率同步变化呈“Λ”形分布;受双弧热力差与栅片阻碍的影响,左、右灭弧室的双流漩涡与双压空洞对熄弧产生影响,若干短弧的形成与电流的衰减致使电弧电阻急剧增大并促进熄弧.仿真与试验所得的电弧电流与电弧电压特性曲线变化趋势基本一致,验证了该模型的准确性.

关键词:双断点塑壳断路器;磁流体动力学;多场耦合;机械运动;双电弧;熄弧时间
中图分类号:TM561 **文献标志码**:A

Analysis on arc motion characteristics of double-break molded case circuit breaker under multiphysics coupling

DONG Haiyan[1], LIANG Bo[1], YAN Ningning[1], DOU Jianming[2†], WANG Sirun[3], LIN Xiaojun[4]
(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. China Tianshui Changcheng Switchgear Group Co., Ltd., Tianshui 741018, China;
4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China)

* **收稿日期**:2025-04-29
基金项目:甘肃省科协创新驱动助力工程项目(GXH20240328-21), Gansu Association for Science and Technology Innovation-driven Power-assisted Project (GXH20240328-21);甘肃省自然科学基金资助项目(24JRRA237), Gansu Natural Science Foundation Project (24JRRA237);甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2023CYZC-72), Gansu Provincial Higher Education Industry Support Program (2023CYZC-72);兰州市科技发展指导性计划项目(2025-5-010), Guiding Plan Project for Science and Technology Development in Lanzhou City (2025-5-010)
作者简介:董海燕(1987—),女,甘肃和政人,兰州交通大学副教授
† 通信联系人,E-mail: lgy_116@163.com

Abstract: The double-break molded case circuit breaker (MCCB) has the characteristics of rapid breaking and double-arcs motion. As the key equipment of short-circuit protection, it is widely used in the low-voltage distribution system of a traction substation. In this paper, the simulation model of the double-arcs of a double-break MCCB coupled with mechanical-electromagnetic-thermal-flow multi-physics is established based on the theory of kinematics and magneto hydrodynamics (MHD). By considering the mechanical motion of the operating system, the parametric fitting function is used to control the rotation and breaking of the conductive bridge, so as to realize the synchronous coupling of mechanical motion and arc behavior. The temperature, pressure and current density are taken as the characterization parameters to explore the full time-space evolution trajectory of the breaking double arcs from growth, migration to extinction. The results show that the conductive bridge is rotated and broken, and the double breakpoints are opened. At the same time, the air gap is broken down, and the double arcs are formed in the left and right arc extinguishing chamber driven by the mechanism, which is finally extinguished by motion growth and arc column cutting. The mechanical motion of the conductive bridge is significantly nonlinear; the arc breaking time is 3.2 ms; and the arc extinguishing time is 3.5 ms. The temperature of double-arcs is related to the change of current, while the arc heat and power exhibit synchronous changes with a "Λ"-shaped distribution. Due to the influence of the thermal difference between the two arcs and the splitter plates obstruction, the double flow vortices and the double pressure cavities in the left and right arc extinguishing chambers have an impact on arc extinguishing. The formation of several short arcs and the attenuation of current cause a sharp increase in arc resistance and promote arc extinguishing. The variation of arc current and voltage characteristic curves obtained by simulation and experiment is basically the same, which verifies the accuracy of the model.

Key words: double-break molded case circuit breaker; magnetohydrodynamics; multi-physics coupling; mechanical motion; double-arcs; arc extinguishing time

双断点塑壳式断路器(molded case circuit breaker, MCCB)具有快速分断与双弧运动的特点,其广泛应用于牵引变电所低压配电系统,能够快速切断短路电流,并实现对电气设备的安全保护[1-3].断路器开断过程中,操纵系统驱动导电桥发生旋转,左右触头分离并伴随炽热双弧萌生,随着电弧生长被栅片阵列切割熄灭,构成完整的熄弧过程[4-6].上述过程不仅包含机械运动、电弧演变、材料烧蚀等变化,还涉及机械场、电磁场、气流场等多场域的实时耦合.其中,机械运动作为断路器分断熄弧的核心驱动力之一,直接影响电弧的动态行为与分断特性,此外,触头断口数量也是影响断路器性能的重要因素之一,其直接决定电弧的分配方式与熄灭效率.因此,在分析断路器机械特性的前提下探究分断双弧的运动特性,不仅为电弧机理研究奠定理论基础,也为断路器结构优化提供技术参考.

近年来,国内外学者通过数值模拟与试验对比分析了电弧动态演变规律及影响因素[4,7-9].赵振等[10]提出一种基于等效洛伦兹力曲线一阶导数的步长自适应顺序耦合法,分析了短路分断过程中各运动单元的机械特性.文献[11-12]通过将电磁场及电路方程与机械运动方程进行耦合迭代求解,探讨了短路电流条件下电动斥力对断路器开断过程的影响.上述研究虽然考虑操纵系统的机械运动,并实现了断路器分断运动的机电耦合,但对电弧的动态演变及特性未能深入研究.Iturregi等[13]未考虑触头分断运动,仅建立了简化灭弧系统的电弧动态仿真模型,分析了不同工况下单电弧的演变.彭世东等[14]建立了永磁体作用下灭弧室内磁场与电弧的耦合模型,揭示了栅片材料与结构对单电弧特性的影响.尽管学者未考虑断路器的机械动作,但对电弧的动态行为进行了详细探讨.而吴翊等[15]建立了触头垂直运动的空气电弧模型,通过对弧柱温度与流场分布的探究,进一步分析了触头运动速度对弧柱压降的影响.李静等[16]建立直流空气接触器电磁操动机构与灭弧系统联合仿真模型,在实现操动机构运动-结构-电磁耦合的基础上,讨论了触头运动特性对接触器开断性能的影响.上述研究实现了断路

器开断过程中机械-电磁等场域的耦合，并对电弧的动态行为进行了深入分析，但其大多对灭弧结构进行了简化，且主要聚焦触头垂直运动下的单电弧特性探究，对旋转式双电弧现象的研究相对较少，这在一定程度上限制了对双断点断路器性能的理解与优化. 黄一凡等[17]考虑外部负载与触头垂直运动的影响，探讨了不同工况下的双弧行为. Wang等[5]建立两款低压断路器的仿真模型，以温度和压力为表征参数分别探究了单弧和双弧的动态演变及其特性，然而，以上研究均未揭示双弧形成机制与对断路器性能的影响. 黄翀阳等[18]根据电弧动态行为发现，串联断口间隙的差异会影响各断口间的电弧能量分布，而刘洪武等[19]指出两个断口间若存在电弧能量不平衡问题，则会引起触头磨损加剧，从而增加弧后介质击穿风险并导致开断失败. 尽管这些研究阐明了多断口电弧分布对断路器性能的影响，但对双弧特性的研究目前仍显不足，为了弥补这一短板，有必要深入探讨双分断电弧的演变规律及其驱动机理. 数值模拟能够更为直观地展示电弧的动态行为，而对比模拟预测与试验数据，能够更加有效地验证模型的可靠性和准确性，文献[20-21]建立多场耦合的断路器开断模型，结合试验分析了引弧板对提高断路器限流性能的机理. Xu等[22]提出一种基于多域顺序耦合的断路器电气性能研究方法，并通过试验探究了断路器的分断能力. 李静等[23]根据分断试验探究了分断速度、外施横向磁场对弧根演变规律的影响. Cho等[24]通过试验研究了外部温度和磁场对断路器分断特性和介质恢复强度的影响，上述研究通过结合试验与仿真的方法，有效地验证了相关理论. 研究表明，电弧的动态特性受系统机械运动、灭弧室结构、断口数量等多种因素的影响，为此，应综合考虑这些因素，深入探究分断双弧的全时空演变轨迹，考察不同阶段物理场分布以及电弧行为变化，这将为断路器的优化设计与灭弧性能提升提供坚实的理论依据.

综上所述，本文基于运动学与磁流体动力学(MHD)理论，建立多场域耦合下双断点断路器的分断双弧仿真模型，该模型主要体现了两个特点：

1)在探究操纵系统机械特性的基础上，采用参数化拟合函数控制导电桥分断行为，实现机械运动与电弧行为的同步耦合.

2)构建双断点断路器的双电弧仿真模型，探究分断双弧由生长、迁移到熄灭的全时空演变轨迹，搭建分断试验平台，分析试验过程，以验证模型的准确性.

1　研究方法与模型建立

1.1　研究方法

断路器开断过程包括操纵机构的动作响应与电弧等离子体的生长变化，深入探究机构机械运动与电弧动态行为，对于理解断路器的分断机制至关重要. 借助运动学软件ADAMS以及多物理场耦合仿真平台COMSOL Multiphysics进行分断电弧动态特性分析，多物理场耦合关系如图1所示. 具体而言，在探究操纵系统机械特性的基础上，以运动函数控制导电桥旋转分断，当导电桥旋转、左右触头打开后，空气间隙被击穿并形成双电弧，此时电弧产生大量焦耳热，在焦耳热与电磁力作用下灭弧室中气体流动并伴随能量传递，同时影响电弧温度、压力等特征参数变化. 基于上述物理变化的描述，本文建立了多场域耦合的双弧模型，进而分析多场耦合作用机制与双弧动态特性.

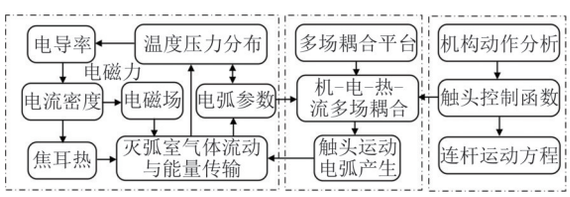


图1　分断电弧多物理场耦合框图

Fig.1　Multi-physics coupling block diagram of breaking arc

1.2　操纵机构运动分析

1.2.1　机构运动过程分析

断路器操纵机构的运动一般分为手动分合闸、自动分闸以及再扣过程，其中，自动分闸过程是实现熄弧最为关键的动作环节，能够提供对电力系统和电气设备的安全保护，机构简化模型如图2所示. 在短路故障发生时，断路器首先进行故障诊断与判定，确认故障持续存在时，脱扣器随即触发，操纵机构执行自动分闸动作，随后在杠杆弹簧驱动下，由各连杆配合带动转轴与导电桥旋转，最终完成整个分断过程.

1.2.2　机构动力学分析

操纵系统的机械分断动作是一个四连杆变五连杆的过程，其运动状态如图3所示. 初始阶段，轴C

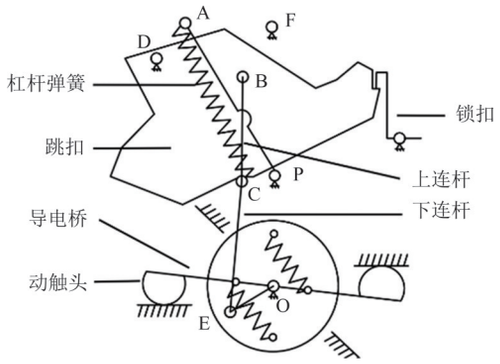
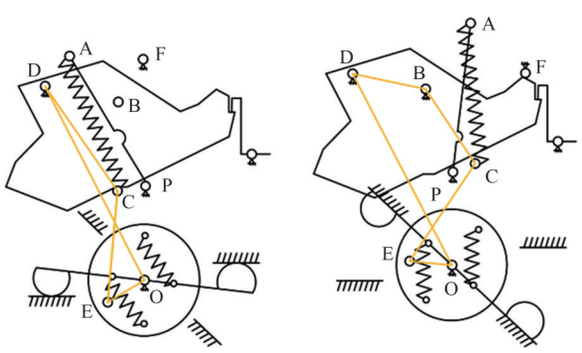


图 2 操纵机构简化模型

Fig.2 Simplified model of control mechanism

被压紧在跳扣上，即上连杆与跳扣相对静止，此时触头机构是由 OE、CE、OD、CD 组成的四连杆机构，如图 3(a)所示. 当脱扣器判断故障、转动一定角度后完成解扣，跳扣失去约束，其限位作用消失，系统变成由 OE、CE、BC、BD、OD 组成的五连杆机构，如图 3(b)所示. 随着导电桥在连杆的带动下开始分断，此阶段触头压力消失，在杠杆弹簧力和各轴摩擦力偶矩作用下各连杆配合动作使导电桥运动，直到触头分断到最大角位移，各连杆达到平衡状态，最终完成整个分断运动[25].



(a)四连杆闭合状态 (b)五连杆分断状态

图 3 机构运动状态分析图

Fig.3 Analysis diagram of mechanism motion state

以断路器分断响应时五连杆运动状态进行机构动力学分析，如图 4 所示. 在机构自动分闸过程中，五杆机构有两个自由度，将 θ_1、θ_2 作为广义坐标，采用广义坐标法进行机构力矩等分断特性参数的分析.

杠杆弹簧拉力为 F，可将 F 分解为 F_{CH} 和 F_{CB}，杠杆弹簧作用力对 O 点的力矩由 F_{CH} 提供，根据式(1)可知分力 F_{CH} 为

$$F_{CH} = F\frac{\sin\eta_2}{\sin(\eta_2+\eta_1)} \tag{1}$$

通过式(2)计算杠杆弹簧作用力 F 对于 O 点的

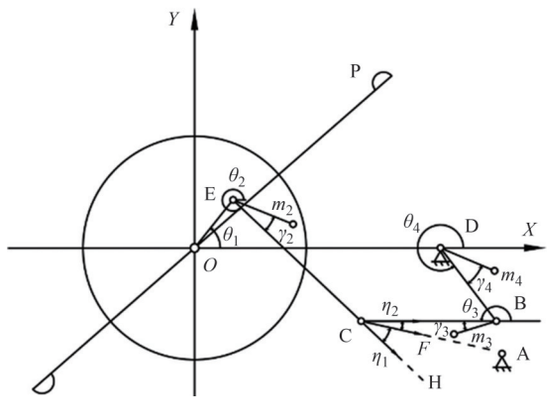


图 4 五连杆运动简图

Fig.4 Five-link motion diagram

力矩为

$$M_F = F_{CH}\times L_{OE}\sin(\theta_2-\theta_1) \tag{2}$$

各个轴的等效摩擦力矩 M_{fx} 由式(3)可知：

$$M_{fx} = F_x\times f_x\times\rho_x \tag{3}$$

由式(4)得出五连杆机构中的等效力矩 M 等于触头机构中各个杆上作用的力矩代数和：

$$M = M_F - \sum_i M_{fx} \tag{4}$$

触头作用的分断时间 t 由式(5)推导得出：

$$t = \int_{\theta_0}^{\theta}\frac{1}{|\omega_1|}\mathrm{d}\theta \tag{5}$$

式中：θ_1、θ_2 分别是机构连杆 OE、EC 与水平轴的夹角；η_1、η_2 分别是弹簧分力 F_{CH} 和 F_{CB} 与 F 的夹角；ω_1 是连杆 OE 角速度；θ 是触头运动角度；θ_0 是触头初始角度；f_x 为各轴处的等效摩擦系数；ρ_x 为各轴半径；F_x 为各轴分力.

分析开断过程中操纵系统的动作原理与连杆运动关系，是明确断路器分断机制和运动过程的关键步骤，同时也是实现多场耦合与深入探究电弧行为的前提条件.

1.3 仿真模型与控制方程

1.3.1 几何模型

根据旋转式双断点 MCCB 的主要结构特点，建立左右灭弧空间近似对称的灭弧室几何模型，如图 5 所示.

模型初始状态下各材料物理参数如表 1 所示. 定义灭弧栅片为金属铁，导电桥和静触板为金属铜，动静触头为银氧化物，灭弧介质为空气.

1.3.2 基本假设

电弧放电是一个复杂的物理过程，涉及电磁场、机械场和气流场等多场域的耦合交互. 因此，本文构建了多物理场耦合的分断电弧仿真模型，该模

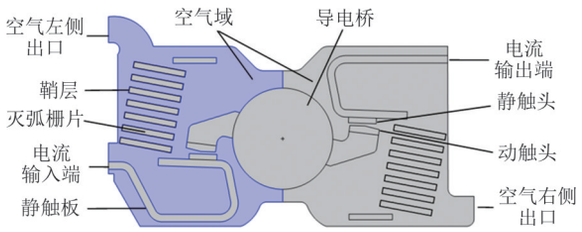


图 5　灭弧室几何模型

Fig.5　Geometric model of arc extinguishing chamber

表 1　模型材料物理参数

Tab.1　Physical parameters of model materials

材料	参数	数值
铜	密度/(kg·m^{-3})	8 940
	电导率/(S·m^{-1})	5.998×10^{7}
	比定压热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	385
钢	密度/(kg·m^{-3})	7 850
	电导率/(S·m^{-1})	4.032×10^{6}
	比定压热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	475
银氧化物	密度/(kg·m^{-3})	10 530
	电导率/(S·m^{-1})	6.300×10^{7}
	比定压热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	235
空气	密度/(kg·m^{-3})	1.204
	电导率/(S·m^{-1})	1×10^{-14}
	比定压热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	1 005
	相对磁导率	1

型考虑导电桥在分断过程中的旋转运动，旨在深入探究分断双弧动态演变规律. 为更真实地反映电弧分断的实际工况，准确模拟其动态变化特性，并提高仿真计算效率与收敛性，本文对电弧运动过程进行相关假设[26]：

1）在小尺度灭弧空间内气流速度慢，雷诺数低，电弧流动形式为层流且为不可压缩流动.

2）电弧的形成涉及复杂的微观粒子运动，忽略起始过程可避免引入过多不确定性，因此不应考虑电弧的起始产生过程.

3）电弧高温下能量传递充分，系统稳定且动态平衡特征明显，满足局部热力学平衡状态.

4）电弧等离子体弧柱区域完全电离，其物性参数可视为与温度和压力相关的函数.

在实际电弧分断过程中，受非平衡效应的影响，在空气与金属栅片交界处形成电导率高于空气的近极鞘层，为体现栅片切割电弧时所产生的近极压降与微观粒子间的相互作用，本文在栅片表面设置厚度为0.1 mm的鞘层区域，将鞘层电导率的变化定义为与温度相关的函数关系. 通过引入该鞘层假设，能够更真实地模拟电弧的动态行为，使仿真结果更贴近实际物理过程. 鞘层区温度与电导率关系如图6所示.

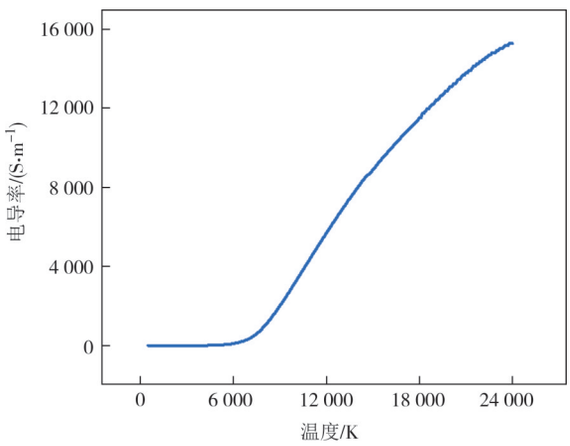


图 6　鞘层区温度与电导率关系

Fig.6　Relationship between sheath temperature and electrical conductivity

1.3.3　外电路模型

本文简化电弧的外电路模型电路如图7所示. 将外电路模块等效为*RL*串联电路，以实现灭弧室内复杂物理现象与外部电路间的同步耦合，并确保外部电路与电弧间相互作用机制的准确描述.

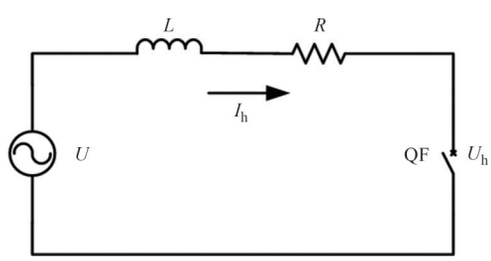


图 7　外电路模型电路图

Fig.7　External circuit model circuit diagram

根据基尔霍夫第一定律，外电路方程为

$$U_h = U - RI_h - L\frac{dI_h}{dt} \tag{6}$$

式中：U_h为电弧电压；U为电源电压；I_h为电弧电流；R和L分别为外部电阻和外部电感.

电弧电流的迭代过程如式(7)，即下一个时间步长的电流等于该时间步长的电流加上电流在Δt中的变化值，表达式为

$$I_h^{(i+1)} = I_h^{(i)} + \frac{\Delta t}{L}\left[U - U_h\left(I_h^{(i)}\right) - RI_h^{(i)}\right] \tag{7}$$

式中：$I_h^{(i)}$和$I_h^{(i+1)}$分别为步骤i和步骤i+1的电弧电流；由于电弧电流I_h和电弧电压U_h之间存在复杂的函数关系，所以U_h可以表示为I_h的函数，即$U_h\left(I_h^{(i)}\right)$.

1.3.4 MHD电弧模型

MHD电弧模型以电磁学、热力学、流体力学为理论基础，根据式(8)~式(14)构建关于空气电弧的质量守恒、动量守恒、能量守恒以及麦克斯韦方程组，以此探究电弧在各场域中的动态耦合与相互作用[27].

1)电磁场控制方程：根据式(6)、式(7)电弧电流与电压变化耦合迭代求解电流密度$\boldsymbol{J}$和电场强度$\boldsymbol{E}$，电磁场控制方程为：

$$\begin{cases}\nabla\cdot\left(-\sigma\nabla\varphi\right)=0\\ \boldsymbol{E}=-\nabla\varphi-\dfrac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t}\\ \boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E}\\ \nabla\times\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B}\end{cases}\tag{8}$$

式中：φ为电势；σ为电导率；$\boldsymbol{A}$为矢量磁位；$\boldsymbol{B}$为磁感应强度.

2)质量守恒方程：通过质量守恒描述电弧等离子体在运动中的连续性.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho\boldsymbol{u}\right)=0\tag{9}$$

式中：ρ为电弧等离子体密度；t为时间；$\boldsymbol{u}$为电弧等离子体运动的速度矢量.

3) 动量守恒方程：电弧在惯性力、压力、黏性力以及洛伦兹力作用下发生动态迁移，依据动量守恒原理求解模拟区域内流速$\boldsymbol{u}$与压强p的变化.

$$\rho\left(\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}\right)=\nabla\cdot\left\{-p\boldsymbol{I}+\mu\left[\nabla\boldsymbol{u}+\left(\nabla\boldsymbol{u}\right)^{\mathrm{T}}\right]-\frac{2}{3}\mu\left(\nabla\cdot\boldsymbol{u}\right)\boldsymbol{I}\right\}+\boldsymbol{F}\tag{10}$$

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}\tag{11}$$

式中：p为压力；μ为动力黏度；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵；$\boldsymbol{F}$为洛伦兹力；$\boldsymbol{J}$为电流密度；$\boldsymbol{B}$为磁感应强度.

4) 能量守恒方程：根据式(8)中电流密度$\boldsymbol{J}$计算空气电弧及灭弧区域的焦耳热、电子焓热以及空间热辐射变化.

$$\rho\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)+\nabla\left(\rho H\boldsymbol{u}\right)=\nabla\left(\frac{\lambda}{c_{\mathrm{p}}}\nabla H\right)+S_{\mathrm{H}}\tag{12}$$

$$S_{\mathrm{H}}=\frac{1}{\sigma}\boldsymbol{J}^{2}-S_{\mathrm{rad}}+S_{\phi}\tag{13}$$

$$S_{\phi}=\frac{\partial}{\partial T}\left[\frac{k_{\mathrm{B}}T}{2e}\left(\frac{\lambda}{c_{\mathrm{p}}}+5\right)\right]\left(\nabla T\cdot\boldsymbol{J}\right)\tag{14}$$

式中：H为热焓；λ为热导率；c_{p}为定压比热；T为温度；S_{H}为能量源项；$(1/\sigma)\boldsymbol{J}^{2}$为焦耳热项；$S_{\mathrm{rad}}$为总体积辐射能量；$S_{\phi}$为电子焓传递项；$e$为电子电荷；$k_{\mathrm{B}}$为玻尔兹曼常数.

1.3.5 边界条件

边界条件是求解方程组的必要条件，合理的边界条件能够为方程组的求解提供良好的收敛性和精度.

1) 电路边界条件：定义灭弧室左侧静触板为电流输入端，右侧为输出端，静触板通过电流模块的终端接口与外部电路相连，并在该接口处设定初始参数，根据文献[5]以及试验测量数据，设定电阻为0.149 3 Ω，电感为0.82 mH，电压有效值为239 V，初始电流有效值为803 A，右侧静触板接地电势为0 V.

2)磁场边界条件：鉴于双断点断路器灭弧室左右近似对称的特殊构造，本文在灭弧室左右空气域分别施加大小相同、方向相反且均匀分布30 mT的外施磁场，以模拟磁驱双弧的作用效果.

3)压力和温度边界条件：模型左右出口压力边界设置为一个标准大气压1.01×10^{5} Pa；灭弧室空气域初始温度为293.15 K.

4)热边界条件：定义左侧灭弧空间中动、静触头分别为阴极与阳极，右侧灭弧室设定相反动、静触头为阳极与阴极.由于阳极正离子在电场的加速下撞击阴极并被其吸收，此过程中阴极表面产生热量，随着阴极被加热，更多的电子在阴极发射.由能量守恒方程，根据式(15)~式(18)定义阴极的热边界条件：

$$-\boldsymbol{n}\cdot\left(-\lambda\nabla T\right)=-\left|\boldsymbol{J}_{\mathrm{elec}}\right|\phi_{\mathrm{c}}+\left|\boldsymbol{J}_{\mathrm{ion}}\right|U_{\mathrm{ion}}\tag{15}$$

$$\left|\boldsymbol{J}_{\mathrm{ion}}\right|=\left|\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{n}\right|-\left|\boldsymbol{J}_{\mathrm{elec}}\right|\tag{16}$$

$$\left|\boldsymbol{J}_{\mathrm{elec}}\right|=\left|J_{\mathrm{R}}(T)\right|\tag{17}$$

$$J_{\mathrm{R}}(T)=A_{\mathrm{R}}(T)^{2}\exp\left(-\frac{e\phi_{\mathrm{eff}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)\tag{18}$$

阳极表面释放的热量主要通过电极的热传导进行消散，阳极的热边界条件由式(19)得出：

$$-\boldsymbol{n}\cdot\left(-\lambda\nabla T\right)=\left|\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{n}\right|\phi_{\mathrm{s}}\tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{J}_{\mathrm{elec}}$为电子流密度；$|\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{n}|$为面电流密度的模；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{ion}}$为离子电流密度；$J_{\mathrm{R}}(T)$为Richardson-Dushman电流密度；$\phi_{\mathrm{c}}$为阴极材料表面功函数；$\phi_{\mathrm{s}}$为阳极材料表面功函数；$\phi_{\mathrm{eff}}$为电极表面有效逸出功；$U_{\mathrm{ion}}$为等离子体

电离电位;A_R为理查德森常数.

2　数值模拟与结果分析

2.1　机构运动结果分析

在ADAMS动力学软件中建立断路器机械运动模型,根据试验测量设定各项参数,其中杠杆弹簧刚度系数为30 N/mm,预载荷为−180 N,预载荷时弹簧长度为30.13 mm,动触头预压力为4.5 N,在此基础上探讨自动分闸过程中操纵系统的分断动作及其机械特性.导电桥的角速度与角位移变化曲线如图8所示.

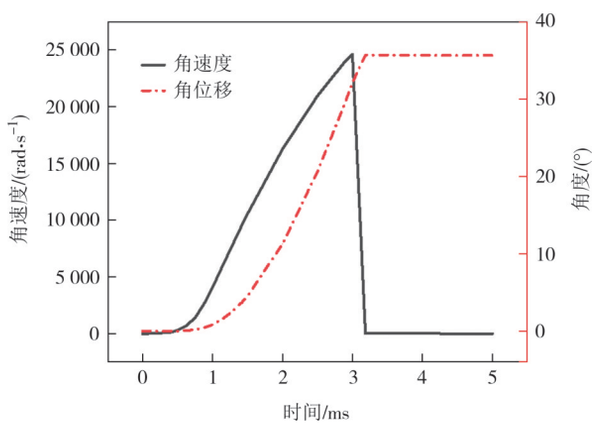


图8　导电桥角速度与角位移

Fig.8　Angular velocity and angular displacement of conductive bridge

从图8可知,机构完成解扣后由连杆配合,在杠杆弹簧作用下由上下连杆配合带动转轴与导电桥同步转动.初始0.0 ms至0.8 ms阶段,导电桥由静止转为运动状态,其运动趋势变化较缓;在0.8 ms到3.2 ms时段,随着杠杆弹簧力的完全释放,导电桥快速旋转分断;到3.2 ms时导电桥在灭弧室卡槽约束下转动最大角位移为35.6°,抵达分断极限,机构连杆在插销及各轴限位作用下达到平衡状态,至此结束整个自动分闸运动.

从操纵机构单元被解扣开始,到机构系统形成平衡为止,以图8中导电桥旋转角速度为数据集构建拟合分断函数,导电桥角速度ω关于运动时间t的表达式如式(20)所示,构建了导电桥运动角速度随时间变化的函数,定量化描述了导电桥从初始转动至最终停止的运动过程.在COMSOL Multiphysics动网格模块中,定义导电桥为旋转域,设定导电桥中心为旋转轴基点,将式(20)作为域边界条件控制导电桥的分断行为,在此基础上开展多物理场耦合下分断双弧运动特性的仿真分析.

$$\omega(t)=\begin{cases}4\,165t^2-1\,360t, & 0\leqslant t<0.8\\ -1\,535t^2+16\,356t-10\,525, & 0.8\leqslant t<3.0\\ -123\,640t+395\,648, & 3.0\leqslant t<3.2\\ 0, & 3.2\leqslant t\leqslant 5\end{cases}\tag{20}$$

2.2　双弧运动特性分析

在分断过程中,电弧的动态演变行为通常有以下阶段:

1)触头分断初期,电弧形成于动、静触头间.

2)触头旋转分断,在驱动力作用下,电弧弯曲向灭弧栅片方向运动.

3)触头运动停止,电弧进入栅片被切割,最终电弧熄灭.本文以温度、气压及电流密度为主要特征参数,分析双电弧的动态演变及运动特性.

2.2.1　温度特性

电弧放电伴随空气电离、热量释放等物理现象,探究电弧的温度变化有助于解析电弧动态特性.不同时刻的双弧温度变化如图9所示.

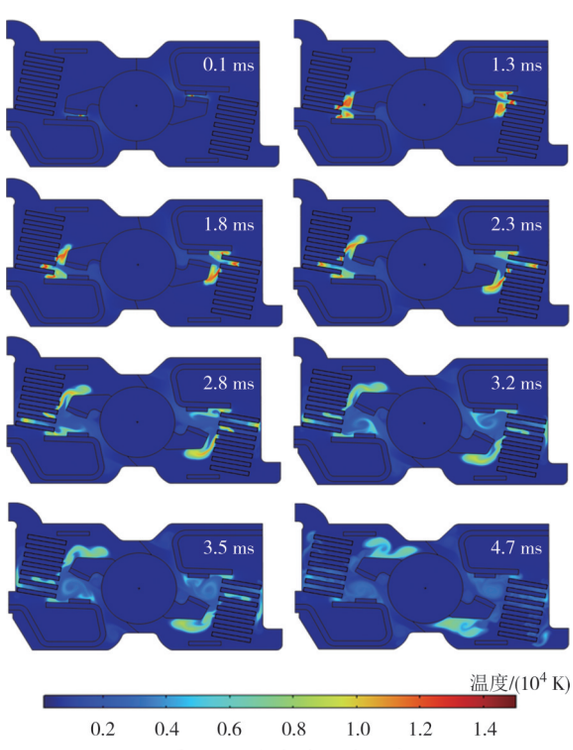


图9　不同时刻双弧温度

Fig.9　Double-arcs temperature at different times

从图9不同时刻电弧温度分布可知,当转轴带动导电桥开始旋转,动、静触头分离的同时空气间隙被击穿,双弧形成并逐渐生长,初始阶段电弧半径

较小,弧根位于两触头间.导电桥经快速转动,触头间距增大,电弧被纵向拉伸,同时在磁场和流场作用下电弧弯曲向灭弧栅片发生迁移,此过程中,电弧从静触头表面跃迁至引弧板,且引弧板与动触头表面弧根处的电流密度较大,能量较为聚集,因此弧根温度高于弧柱温度,弧根局部温度接近 16 000 K.随着电弧扩散,弧柱半径继续增大,到 3.2 ms 导电桥旋转停止,此阶段电弧在栅片阵列的挤压切割下分裂成若干小段,并在各栅片间剧烈燃烧,由于电弧电流衰减、能量耗散以及温度下降,3.5 ms 时电弧完全熄灭,结束整个运动过程.

能量的转换与耗散是电弧放电现象的核心物理机制,图 10 为不同时刻电弧热量与功率变化曲线.由图分析可知,电弧热量与功率变化近似为正相关关系,且二者呈“Λ”形分布,并表现为先增大后减小趋势.初始阶段,随着电弧的形成与电弧电压的快速增长,电弧热量与功率二者同步上升,到熄弧后期,由于电弧电阻的增加以及电流的衰减,电弧热量和功率随之下降,这一变化加速了熄弧进程的完成.

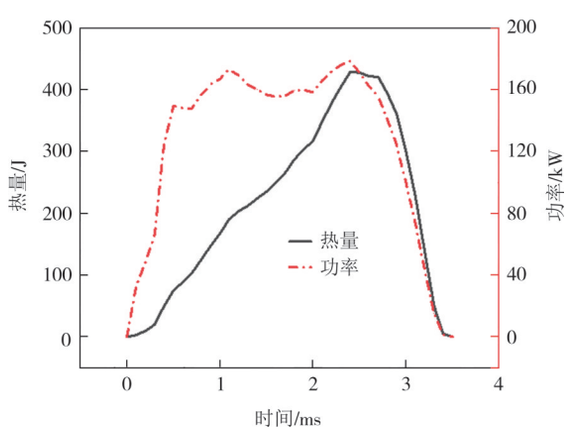


图 10 电弧热量与功率

Fig.10 Arc heat and power

2.2.2 气压特性

灭弧室内气压波动与流速变化能够反映电弧动态行为及其力学特性.图 11 为不同时刻灭弧室气压变化,结合热力学原理,气体系统中温度高的区域密度低,流速快的区域压强小.在电弧运动过程中,高温电弧经过区域密度变小,其后方气体密度增大,基于气体密度梯度,高密度区域向低密度区域的定向流动形成气流,这种变化使得电弧后方压强较低.然而,由于弧柱前后压力差及栅片阵列的阻碍作用,使得气流无法快速扩散,进而在灭弧室内部聚集,到熄弧后期在灭弧室左右形成气流漩涡与气压空洞,气流漩涡与气压空洞的形成进一步阻碍了灭弧室内残余高温气体的有效逸散,同时也对熄弧的可靠性产生了影响.

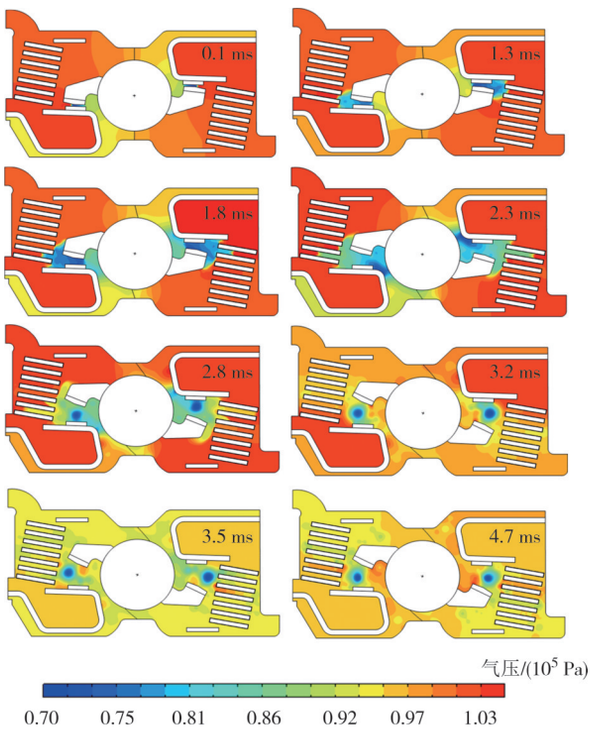


图 11 不同时刻灭弧室气压

Fig.11 Pressure of arc extinguishing chamber at different time

图 12 为灭弧室内气体平均流速变化.分析可知,随着电弧的生长及其释放热量的增加,灭弧室内气体流速逐渐增大.当栅片切割弧柱时,栅片阵列对电弧运动产生一定的抑制作用,这种阻碍不仅增强了电弧与栅片间的相互作用,还加剧了灭弧室内气体的扰动与能量的交换,导致气流场的复杂性显著提升,并促使气体流速到达峰值.随着熄弧进程的推移,电弧能量逸散且温度降低,灭弧栅对电弧阻碍作用随之减弱,这使得灭弧室内气流速度逐渐减小.

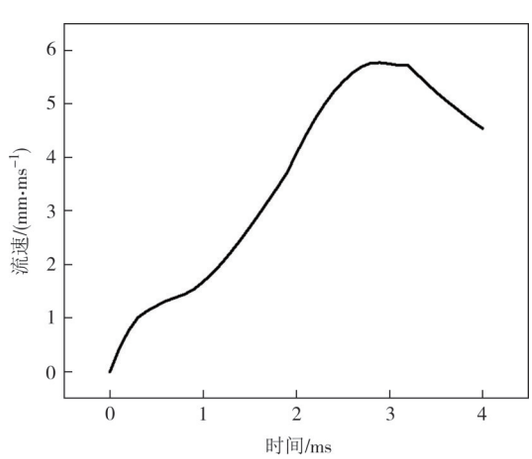


图 12 灭弧室气体平均流速

Fig.12 Average gas velocity of arc extinguishing chamber

2.2.3　电流密度特性

电弧的本质是空气电离形成导电通道而引发的气体放电现象，深入理解电弧电流密度变化对于探索其熄灭机制至关重要，图 13 为不同时刻电弧电流密度的空间分布. 从图 13 可知，随着电弧的形成与生长，阴、阳极弧根在金属表面移动，而弧柱受磁场作用在空气域中发生迁移，由于弧根是电弧与金属部件的接触区域，其形态更加凝聚并在金属表面形成斑点，因此弧根区域具有更大的电流密度与更高的聚集能量，相比之下，弧柱作为电弧能量传递与逸散的主体单元，其生长更加充分. 随着熄弧的继续，栅片阵列切割弧柱形成若干短弧，可以发现短弧弧根两端亮度更高，这是由于电弧与金属栅片接触时，在该区域形成新的弧根斑点，使得此处粒子发射更为活跃，其电流密度也更大. 此过程中，短弧对栅片的烧蚀作用加剧，这不仅促使了电弧能量的迅速逸散，也加快了整个熄弧进程.

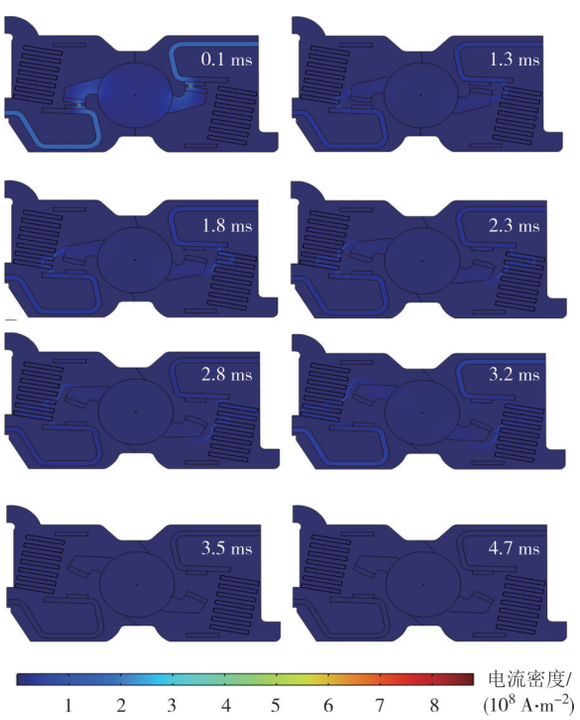


图 13　不同时刻电弧电流密度

Fig.13　Arc current density at different times

电阻特性是衡量电弧变化的关键指标，电弧电阻变化曲线如图 14 所示.

从图 14 可知，电弧生长运动阶段电阻变化较为平缓，可以将其视为电导率较高、电阻偏低的一个等效电阻，当电弧被切割后近似视为若干个串联的等效电阻，此阶段电弧电压增加较缓，到熄弧后期，电弧电流快速减小，致使电弧电导率急剧下降且电阻迅速增大. 结合图 10 分析，到“功率下降”阶段电弧电阻显著增大，这是电弧温度下降以及游离作用大幅度减弱的结果.

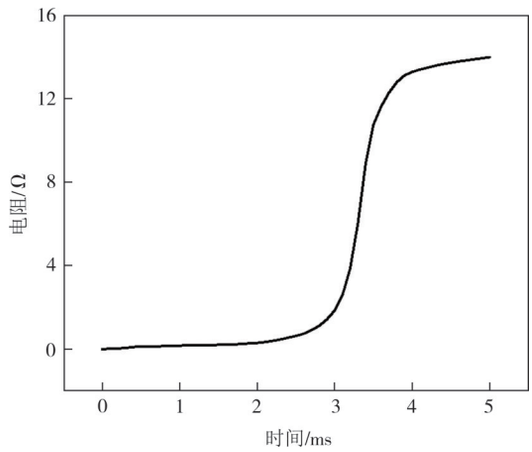


图 14　电弧电阻

Fig.14　Arc resistance

3　短路分断试验

3.1　试验平台

短路分断试验电路如图 15 所示，试验设备及型号如表 2 所示. 其中，由试验变压器提供测试电压，通过负载阻抗装置调节阻抗参数，选项开关用于选择不同的测试模式，而数据采集处理系统负责电量变换与数据采集，记录试验过程中各项电气参数，同时在电气试验平台上进行数据标定与处理，使用空调样机和温湿度计将环境温度控制在 20 ℃，以确保试验结果的准确性.

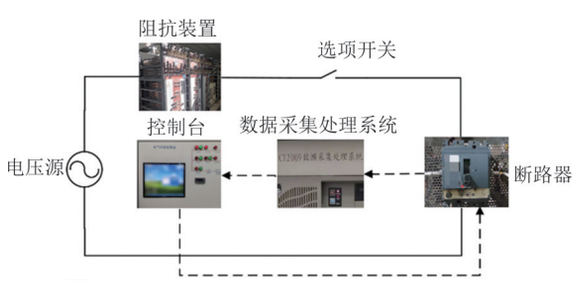


图 15　分断试验电路图

Fig.15　Breaking test circuit diagram

3.2　试验过程及结果分析

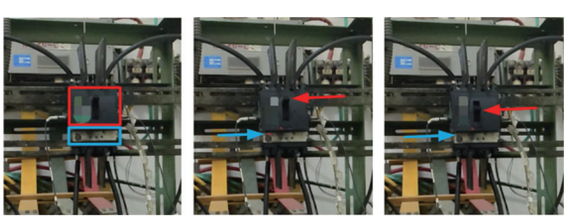
分断试验过程如图 16 所示，其中红色方框与箭头代表手柄位置及其动作状态，而蓝色方框和箭头表示脱扣器位置与响应状态. 图 16(a)表示分断之前，断路器置于安全封闭的测试空间并固定在铁架

表 2 分断试验设备与型号

Tab.2 Breaking test equipment and model

设备	型号
冲击试验变压器	ISJ-10000/11
阻抗装置	I-10 kV/4 kA
数据采集处理系统	CY2009
控制台	—
选项开关	ZHN-10
温湿度计	WSB-2

台上,各极之间插装绝缘板保证分断绝缘可靠,此时手柄位于合闸位置,脱扣器指示灯未亮;图 16(b)是分断响应过程中,在控制台发出命令后,断路器进行保护故障判断,此时脱扣器指示灯亮起,而手柄依旧在合闸位置尚未动作;图 16(c)是分断完成阶段,随着脱扣器完成保护判断并实现解扣,指示灯熄灭,操纵机构动作带动导电桥旋转分断,手柄下落至中间位置,在此期间灭弧室内的电弧运动同步进行,最终完成断路器的分断熄弧.



(a)分断之前 (b)分断响应 (c)分断完成

图 16 故障分断过程

Fig.16 Fault breaking process

仿真模拟与分断试验中电弧电流和电压变化如图 17 所示,在分断过程中,电弧电流呈持续下降趋势,而电弧电压先缓慢上升后急剧下降.从动、静触头分离时刻开始电弧电压建立,随着电弧在触头间燃烧生长,电弧电流从初始值开始变化,此阶段电弧电压保持较低水平;随着触头进一步打开,电弧受导电桥旋转而被纵向拉伸,并因电磁力作用产生横向弯曲运动,电弧电压随触头间距增大与弧柱长度变化而逐渐升高;随着弧柱被分割成若干短弧,电弧电压增大速率变快,此阶段电弧电流继续周期性变化;随着时间推移,电流的快速衰减与电弧电阻的急剧增加,导致电弧电压骤降,电弧最终无法维持等离子体形态熄灭.

仿真与试验结果对比发现,电弧电压与电弧电流变化趋势一致但存在数值偏差,此偏差主要受断路器机械性能扰动、电弧运动轨迹变化以及传感器测量误差等影响.试验数据表明,本文建立的多物

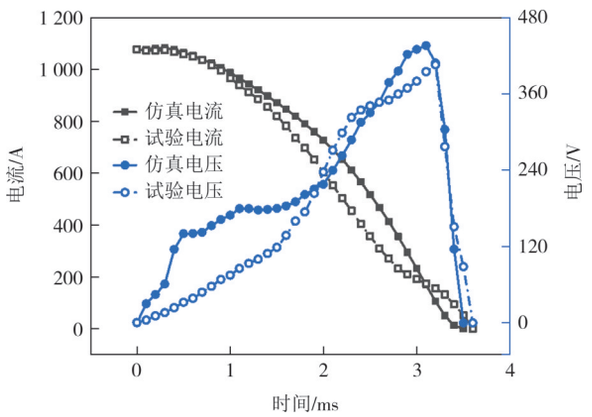


图 17 电弧电流与电压

Fig.17 Arc current and voltage

理场耦合模型能够较为合理地反映电弧动态行为及相关特性.分析断路器分断过程中的机械响应与电弧特性,可为优化设计断路器结构提供理论依据与技术参考.

4 结 论

本文建立的多场域耦合的双电弧仿真模型考虑操纵系统与电弧行为的同步耦合,从而探究了电弧动态演变规律,主要结论如下:

1)在自动分闸过程中,导电桥在机构驱动下发生旋转分断,角速度呈先增后减的变化趋势,其机械运动呈显著非线性特性,分断时间为 3.2 ms,最大角位移达到 35.6°,采用参数化拟合函数控制导电桥的分断,实现了系统机械运动与电弧行为的同步耦合.

2)在导电桥开始旋转、双断点打开的同时空气间隙被击穿,左右灭弧室内形成双电弧,在气流场与电磁场协同作用下,双电弧经历电弧萌生、运动生长以及切割弧柱等变化,随着电弧电流衰减、能量耗散及温度降低,最终实现了双弧的熄灭,整个熄弧时间为 3.5 ms.

3)电弧热量与功率变化呈正相关关系,二者近似为“Λ”形分布特征,受高温电弧迁移的影响与栅片阵列的阻碍作用,左、右灭弧室形成的双流漩涡与双压空洞对熄弧产生了影响,其内部气体流速呈先增后减趋势,若干短弧的形成使得电弧电阻急剧增大,并加快了电弧能量的逸散.

4)分断试验中电弧电流总体呈衰减趋势,电弧电压先缓慢上升后急剧下降,仿真与试验所得的电

弧电流与电弧电压变化趋势一致,说明本文模型能够较为合理地反映电弧行为特征.

参考文献

[1] PENG S D,LI J,CAO Y D,et al. Research on arc root stagnation when small current is interrupted in self-excited circuit breaker [J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(11): 114002.

[2] KOLIMAS Ł, ŁAPCZYŃSKI S, SZULBORSKI M, et al. Low voltage modular circuit breakers: FEM employment for modelling of arc chambers [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2020, 68(1): 61-70.

[3] 张照资,高偲智,汪倩,等.自触型低压混合式直流断路器系统设计与开断特性研究[J].中国电机工程学报,2024,44(11):4544-4555.
ZHANG Z Z, GAO C Z, WANG Q, et al. System design and breaking characteristics research of self-triggered low voltage hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4544-4555. (in Chinese)

[4] XIONG D Z, CHEN S D, XIAO Y, et al. Simulation study on arc motion process of DC miniature circuit breakers [J]. AIP Advances, 2023, 13(10):105112.

[5] WANG Q, GE S W, CAO W D, et al. Study of arc interruption characteristics under rated current in low voltage circuit breakers [J]. Energies, 2023, 16(10): 4114.

[6] LIN J Y, WU J W, XIA S W, et al. Multiobjective optimization of key parameters for the chamber of low-voltage DC circuit breakers based on MHD[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2025, 53(1): 88-98.

[7] ZHOU Y H, CHEN Z N, HUANG Y F, et al. Modeling and analysis of breaking arc for AC air circuit breakers in high-altitude environment[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, 52(8): 3257-3269.

[8] WANG Y J, XU N, WANG L J. Numerical simulation and analysis of contact erosion by high-current and low-voltage air arc considering the movement of arc [J]. AIP Advances, 2023, 13(5): 055213.

[9] 李静,郭沛鑫,彭世东,等.基于改进结构的自激式直流空气断路器小电流开断能力提升方法[J].电工技术学报,2024,39(22):7278-7290.
LI J, GUO P X, PENG S D, et al. Enhance small current breaking performance of self-excited DC air circuit breaker based on an improved structure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 (22): 7278-7290. (in Chinese)

[10] 赵振,张树有.低压断路器分断过程电磁-运动耦合问题求解[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(11):1913-1921.
ZHAO Z, ZHANG S Y. Study of the electromagnetic-dynamics interaction of the breaking process of low-voltage molded case circuit breaker[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(11): 1913-1921. (in Chinese)

[11] 纽春萍,陈德桂,张敬菽,等.电动斥力作用下低压断路器分断特性的研究[J].电工技术学报,2005(7):34-38.
NIU C P, CHEN D G, ZHANG J S, et al. Research on the breaking characteristics of low-voltage circuit breaker with the effect of electrodynamic repulsion force[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005(7): 34-38. (in Chinese)

[12] 张敬菽,陈德桂,刘洪武,等.计及电动斥力效应的低压塑壳断路器机构动力学仿真[J].西安交通大学学报,2004(4):343-347.
ZHANG J S, CHEN D G, LIU H W, et al. Dynamic simulation of operating mechanism in low-voltage molded case circuit breaker considering electrodynamic force[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004(4): 343-347. (in Chinese)

[13] ITURREGI A, BARBU B, TORRES E, et al. Electric arc in low-voltage circuit breakers: experiments and simulation [J]. IEEE Transactions On Plasma Science, 2017, 45(1): 113-120

[14] 彭世东,李静,曹云东,等.耦合磁场直流空气断路器栅片特性对灭弧性能的影响研究[J].电工技术学报,2022,37(21):5587-5597.
PENG S D, LI J, CAO Y D, et al. Research on the effect of splitter plate material and structure on arc extinguishing performance with coupling magnetic field [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5587-5597. (in Chinese)

[15] 吴翊,荣命哲,王小华,等.触头打开过程中低压空气电弧等离子体的动态分析[J].电工技术学报,2008,23(5):12-17.
WU Y, RONG M Z, WANG X H, et al. Dynamic analysis of low-voltage air arc plasma during contact opening process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 12-17. (in Chinese)

[16] 李静,袁志曹,曹云东,等.触头运动特性对直流接触器开断性能影响[J].电机与控制学报,2023,27(11):79-89.
LI J, YUAN Z C, CAO Y D, et al. Influence of contact motion characteristics on breaking performance of DC contactor [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27 (11): 79-89. (in Chinese)

[17] 黄一凡,王立军,王凯,等.不同磁场条件下直流接触器电弧开断特性的仿真研究[J].高压电器,2024,60(2):102-107.
HUANG Y F, WANG L J, WANG K, et al. Simulation research on arc breaking characteristics of DC contactor under different magnetic field conditions [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 102-107. (in Chinese)

[18] 黄翀阳,刘晓明,曹云东,等.双断口直流真空断路器非同期开断电弧特性分析[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3480-3489.
HUANG C Y, LIU X M, CAO Y D, et al. Analysis of vacuum arc characteristics with double-break DC-VCB on asynchronous[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (9): 3480-3489. (in Chinese)

[19] 刘洪武,谢心意,何艳峰,等.双断点断路器开断过程燃弧能

量的不平衡问题[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 61-65.
LIU H W, XIE X Y, HE Y F, et al. Influence of unbalance arcing energy between two breaks of a double-break MCCB [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 61-65. (in Chinese)

[20] 季良, 刘颖异, 周翔, 等. 利用开断模型分析引弧板对低压断路器电弧运动的影响[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 27-35.
JI L, LIU Y Y, ZHOU X, et al. Influence of different arc run-on end tab on the arc movement process of low voltage circuit breaker with interruption model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 27-35. (in Chinese)

[21] LIU Y Y, YUAN H W, CHEN D G, et al. Experiment and simulation research on the influence of different main contact system on the interruption performance of control and protective switch[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1556-1563.

[22] XU J H, CHEN Q Y, ZHANG S Y, et al. Electrical performance design for circuit breakers based on multi-domain sequential coupling[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series B, 2020, 101(2): 139-152.

[23] 李静, 刘凯, 曹云东, 等. 直流接触器分断过程中弧根演变及对重燃的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1241-1251.
LI J, LIU K, CAO Y D, et al. Arc root development and its influence on arc reigniting during the breaking process of the DC contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1241-1251. (in Chinese)

[24] CHO Y M, PARK H J, LEE H J, Analysis of short-circuit and dielectric recovery characteristics of molded case circuit breaker according to external environment [J]. Electronics (Basel), 2022, 11(21): 3575

[25] 周光照. 双断点塑壳断路器触头机构的优化设计与可靠性研究[D]. 温州:温州大学,2016.
ZHOU G Z. Optimal design and reliability research of double-break MCCB contact mechanism [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2016. (in Chinese)

[26] 段薇, 李静, 张兴菲, 等. 器壁材料对直流塑壳断路器电弧开断行为的影响[J]. 电工技术学报, 2025, 40(16): 5343-5354.
DUAN W, LI J, ZHANG X F, et al. The influence of wall materials on the arc interruption behavior of DC molded case circuit breakers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(16): 5343-5354. (in Chinese)

[27] 李军丽, 张友鹏, 赵斌, 等. 高铁站内机械绝缘节电场分布建模与仿真研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(6): 144-154.
LI J L, ZHANG Y P, ZHAO B, et al. Modeling and simulation study on electric field distribution of mechanical insulated rail joint in high-speed railway station [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2025, 52(6): 144-154. (in Chinese)