

密封式继电器触点电弧有限元仿真

王海英¹, 单证维¹, 顾博扬²

(1. 哈尔滨理工大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 大连理工大学 运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为了研究密封式电磁继电器触点的工作电弧对继电器使用寿命造成影响的问题, 依据电磁热力学理论, 采用电磁热力学有限元仿真的研究方法, 首先建立了密封式继电器铜基触点在工作状态下的数学模型, 确定了电弧的电磁流体动力学模型. 考虑到多种影响因素下的边界条件, 给出了基于 ANSYS 的电磁热力学仿真, 并分别研究了热力学环境下的静态电弧仿真分析和动态电弧仿真分析, 然后利用 MATLAB 进行了数值曲线拟合分析. 研究得出了该种型号继电器工作时触点电弧的极限温度以及在不同温度下的电弧电压特性.

关键词: 继电器; 触点; 有限元; 电弧; 数值分析

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.01.020

中图分类号: TM581 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2016)01-0100-06

Sealed Relay Contact Finite Elementsimulation of Electric Arc

WANG Hai-ying¹, SHAN Zheng-wei¹, GU Bo-yang²

(1. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The problem of the service life of the relay is harmful to the relay contact. This experiment is based on the electromagnetic theory and the finite element simulation method. First of all, we established the sealed relay copper-based contact in the working state of the mathematical model, determined the arc of the electromagnetic fluid dynamics model, considering the various influencing factors of boundary conditions is given, and the electromagnetic thermodynamics simulation is based on ANSYS. Respectively, to study the thermodynamic environment under the static arc simulation analysis and dynamic arc simulation analysis, we use MATLAB numerical curve fitting analysis. The limiting temperature of the contact arc and the arc voltage characteristics at different temperatures were studied.

Keywords: relay; contact; finite element; arc; numerical analysis

0 引 言

作为电气设备的重要组成部分, 继电器已经成

为普遍受到人们重视的电气控制工具. 在某些特殊生产条件下, 比如超高温、高压、强电磁干扰、强化学腐蚀时, 就要求必须使用密封式继电器, 密封式继电器在工作时产生的电弧与常见的低压继电器在空气

收稿日期: 2015-05-13

基金项目: 哈尔滨市学科带头人基金(2014RFXXJ032).

作者简介: 王海英(1969—), 女, 博士, 教授, 硕士研究生导师;

单证维(1990—), 男, 硕士研究生, E-mail: 2320430832@qq.com.

中工作时产生的电弧有很多不同之处^[1-3]。

国内外众多学者对继电器触点电弧进行了不同思路的研究。比如: 国内方面, 臧春艳针对航天密封电磁继电器稳态电弧中的电离过程和电弧特性进行了研究。吴细秀研究了银合金触头在电弧热、力作用下的电弧侵蚀模型, 研究了熔池流动特征和材料飞溅现象, 揭示了飞溅侵蚀量与电弧能量、触头材料性质之间的定量关系。国外方面, Lindmayer 建立了低压空气灭弧室平行电极之间电弧的三维模型, 研究了外加磁场作用下电弧位置、电弧电压随时间的动态变化过程。Gleizes 仿真了三维静态和动态电弧, 得到了不同介质中电弧运动特性。Schlitz 仿真了平行电极间自由燃烧电弧特性, 从能量平衡角度研究了器壁产气材料对电弧的影响。继电器的电弧研究常规方法有实验和仿真两种方法。本文以仿真为主, 实验验证为辅^[4-7]。

综合考虑这些因素, 对密封式继电器的触点就提出了更高的技术要求, 在密封式继电器的工作过程中触点的开断电弧问题居于核心地位^[8-11]。

密封式继电器触点电弧与普通继电器触点电弧相比主要区别在于以下 4 点: ①密封式继电器大多处于直流回路中, 相比于普通继电器大多处于交流电流回路中, 在工作状态时电压和电流没有零点, 所以客观上加大了触点电弧被拉断的难度; ②密封式继电器没有灭弧室, 触点电弧必须直接拉断或者在磁力作用下拉断; ③在密闭条件下不能利用材料产气促进电弧自动熄灭; ④在热和力共同形成的热力学环境下, 极限低温和高温等因素影响了继电器触点的导热性能, 在力学环境下, 又相当于在电弧上增加了外部受力^[12-15]。

由此可见对密封式继电器触点电弧问题的研究是一个非线性的过程, 需要反复进行试验, 多次总结经验, 在理论推导和实验仿真方面进行严谨细致的研究。

为了解决上述问题, 本文选取了某型号的密封式电磁继电器触点为研究对象, 综合考虑了能量方程、动量方程、质量方程、流体控制方程、静磁场泊松方程和静电场拉普拉斯方程, 建立了密封式继电器触点电弧的电磁动力学模型^[16-18]。并且为了便于实验研究, 在不影响实验结果准确性的前提下进行了多种合理假设。把密封式继电器工作时的多种影响因素设置为边界条件。基于以上理论对密封式继电器触点电弧进行热力学有限元仿真并且采集参数

利用 MATLAB 进行数值拟合, 对各项参数指标的数值进行分析, 完成实验研究。

1 继电器触点电弧建模

1.1 电磁流体动力学模型

在密封式电磁继电器的工作过程中, 继电器的触点部分处于多场耦合作用之下, 在这个作用的过程之中需要考虑的因素包括: 电位、电流密度、触点自身磁场、吹弧磁场、触点蒸汽浓度、电阻热、洛伦兹力以及其他影响因素^[19]。涉及到的知识包括: 等离子体的物理特性、流体动力学、受力分析等。除此之外还有触点的蒸发和温度压力等条件。密封式继电器触点电弧多场耦合关系如图 1 所示。

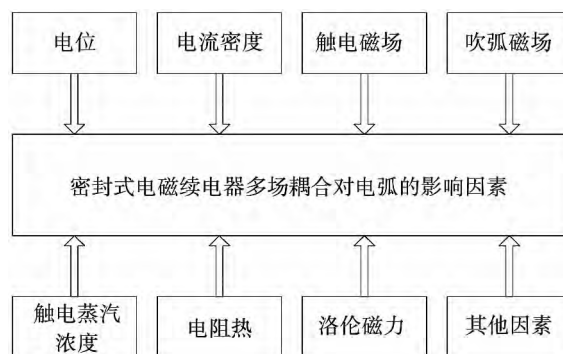


图 1 密封式继电器触点电弧多场耦合关系

继电器触点电弧由弧柱、阳极弧根和阴极弧根 3 部分组成。为了对密封式继电器进行数学建模就必须考虑实验研究的主要影响因素忽略次要因素, 进行合理假设。在该实验中我们就必须要求在热力学条件下所有电弧周围的等离子体都使用统一的热力学温度单位来衡量。所有粒子都必须满足 LTE 条件, 即局部热力学平衡条件。基于触点电弧的流体力学知识, 电弧的气体动力学方程式表述如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = S_{\text{Cu}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} u_i) = \text{div}(\mu \text{grad} u_i) - \frac{\partial p}{\partial X_i} + X_i + [\nabla \times (\bar{B} + \bar{B}_d)]_i + \rho \bar{a}_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} h) = \text{div}\left(\frac{\varphi}{C_p} \text{grad} h\right) + \frac{|\bar{J}|^2}{\sigma} - S_r \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)分别为电弧等离子体的质量守恒方程、动量方程和能量方程。其中: ρ 表示等离子体的密度; $\bar{u}$ 表示流体速度矢量; S_{Cu} 表示触点材料铜带来的密度增量; p 表示压强; X_i 表示坐标轴 i

分量; $\vec{J}$ 表示电流密度矢量; $\vec{B}$ 表示电磁感应强度矢量; $\vec{B}_e$ 表示吹弧磁感应强度矢量; h 表示热力学单位焓; φ 表示热导率; C_p 表示定压比热容; σ 表示电导率; S_r 表示辐射条件下损失的热量值. 上述 3 个公式是进行流体力学有限元仿真的核心公式,可以说所有的电磁流体力学仿真都是围绕这 3 个方程进行的^[2].

本文的研究对象是铜基合金触点,铜基触点蒸汽进入电弧区域经过流动过程,铜基触点分布的质量浓度方程为

$$\frac{\partial \rho C_{Cu}}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} C_{Cu}) = \text{div}(\rho D_{\text{gas-Cu}} \text{grad} C_{Cu}) + S_{Cu} \quad (4)$$

式中: C_{Cu} 表示铜蒸汽的质量百分比; $D_{\text{gas-Cu}}$ 表示电弧气体和铜之间的等效扩散系数. 在密封式继电器工作引起电弧时,电流、电压和磁场强度是我们必须考虑的条件,电压与电流的关系满足拉普拉斯方程和安培定律方程,电场方程如下:

$$\text{div}(\sigma \text{grad} \theta) = 0 \quad (5)$$

$$\vec{J} = -\sigma \text{grad} \theta \quad (6)$$

式中 θ 表示触点仿真网格单元电位. 电弧等离子体的磁场求解可以利用矢量泊松方程求解,磁感应强度又可以利用式(8)计算. 磁场计算式如下:

$$\text{div}(\text{grad} \vec{A}_i) = -\mu_0 \vec{J}_i \quad (i = x, y, z) \quad (7)$$

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (8)$$

式中: $\vec{A}$ 表示磁矢位; A_i 为磁矢位在 i 方向的各个分量; μ_0 表示真空磁导率. 由于电场方程和磁场方程都属于扩散式方程,所以可以利用有限单元法在 ANSYS 中进行有限元分析计算.

1.2 几何模型

因为密封式电磁继电器的触点采用的是圆柱形触点,所以在本实验中建立的触点几何模型示意图如图 2 所示,具体的模型图可以在 CREO 软件中建立,因为 CREO 已经和 ANSYS 有限元分析软件建立了无障碍数据转换接口,可以很方便的将 CREO 中的几何模型导入 ANSYS 软件中进行有限元分析和计算. 图中 A 表示触点的阳极表面, B 表示触点的阴极表面, C 表示触点的阳极侧面, D 表示触点的阴极侧面,密封式继电器工作时阳极触碰阴极,阳极触点和阴极触点产生电弧,电弧高度设为 H_0 ,其初始值 $H_0 = 0.3 \text{ mm}$. E 表示触点区域外部边界, F 和 G 分别是上下边界. 本实验中的计算区域直径 4 mm,阳极表面 A 和阴极表面 B 的直径均为 3 mm.

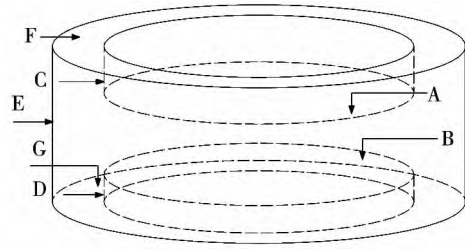


图2 继电器触点组几何模型示意图

1.3 边界条件

若要进行有限元分析,设置边界条件是其中不可或缺的一步,在本实验中需要考虑压力边界条件、温度边界条件、电磁场边界条件和铜蒸汽浓度边界条件共 4 方面的内容.

首先是压力边界条件,在 E、F 和 G 三处设置为压力的出口,压力值等于触点保护气体的压力值. 然后是温度边界条件,触点阳极 A 和阴极 B 的电极厚度设置为 2 mm,内壁的最高温度小于等于铜基触点电极的沸点 2567 K,其余各表面设置为室温 25℃. 电磁边界条件由两部分构成,分别是电位条件和磁位条件. 电磁边界条件的数学表达式如下:

$$j(x, y) = -J_{\max} \exp[-\varnothing \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}] \quad (9)$$

$$\frac{\partial \vec{A}_i}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

式中: $J_{\max}$ 表示最大电流密度; $\varnothing$ 为电弧电流对应常数. 求解动态电弧时,阳极电位的边界值为 0. 得出电流 I 与常数 $\varnothing$ 的关系,然后利用 MATLAB 进行数值曲线拟合,确定阴极触点的边界条件. 为了简化磁场计算的复杂性,设在继电器内壁上,磁矢位各分量法向方向梯度均为 0. 最后是铜蒸汽浓度边界条件,由于密封式继电器工作时产生的电弧蒸汽主要在阳极触点和阴极触点产生,其他位置不产生铜蒸汽的边界条件设置为 0. 因此铜蒸汽浓度边界条件应遵循如下表达式:

$$C_{Cu} = M_{Cu} / (M_{Cu} + M_{\text{gas}}) \quad (11)$$

式中: M_{Cu} 表示铜蒸汽质量; M_{gas} 表示起保护作用的气体质量.

2 继电器触点电弧仿真分析

2.1 静态电弧仿真分析

所谓静态电弧仿真就是保持阴极触点和阳极触点之间的距离不变,忽略与电弧相关的各参数随时

间的变化过程,忽略等离子体电导率和热导率对电弧参数的影响. 在 ANSYS 软件的流体力学仿真模块中进行计算,不考虑时变相,忽略铜基触点烧蚀量. 所得到的电磁流体动力学模型的解就是静态下的电弧仿真分析结果. 假设在静态下密封式继电器触点之间为铜蒸汽(Cu_{gas})和氮气(N_2)组成的混合气体. 求解电磁流体动力学模型,经仿真计算得到触点间距 0.3 mm,电流 40 A,铜蒸汽摩尔浓度由 0 ~ 100% 时的电弧温度场云图和电位云图如图 3 和图 4 所示,由温度场和电位场云图得到的各项参数可以得到相对应的在不同铜蒸汽浓度下电弧的温度曲线和电弧电压曲线,如图 5 和 6 所示.

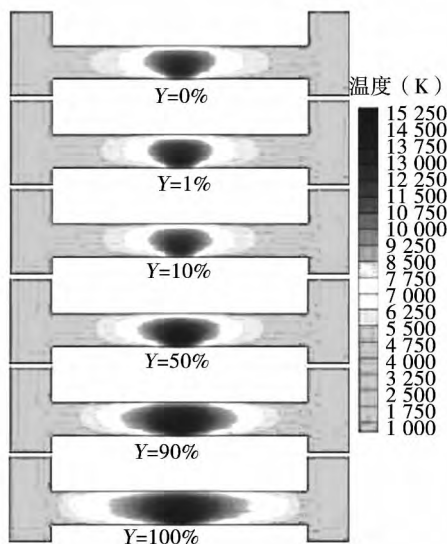


图 3 静态电弧仿真温度场云图

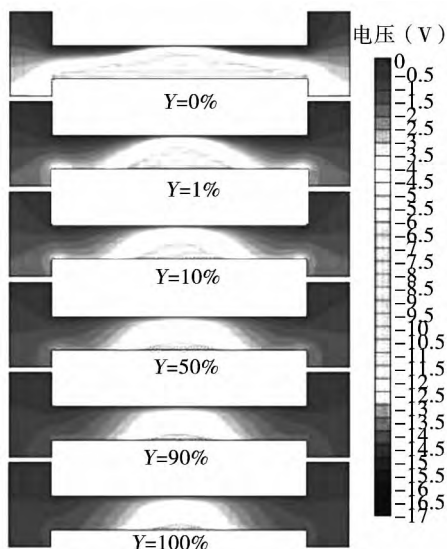


图 4 静态电弧仿真电位云图

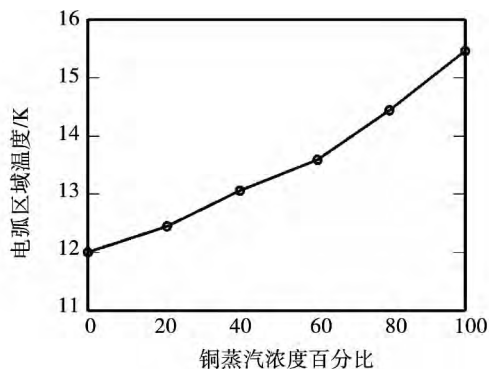


图 5 不同铜蒸汽浓度下的电弧温度曲线

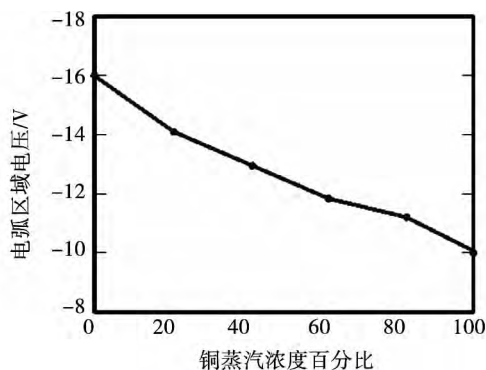


图 6 不同铜蒸汽浓度下的电弧电压曲线

由电弧温度场云图和电压云图我们可以看出,当电弧区域的铜蒸汽浓度为 0% 时电弧的温度值为 12 kK,随着工作时间的延长,铜蒸汽的浓度由 0 一直增加到 100%,电弧区域的最高温度达到约 15.5 kK. 相对应的,随着铜蒸汽浓度的增加,电弧区域的电压由 -16 V 下降到约 -10 V.

2.2 动态电弧仿真分析

动态电弧仿真分析选取继电器触点在纯氮气(N_2)做保护气的环境下进行,以 300 mm/s 的速度进行电弧分断测试. 分断电流为 40 A,触点间的初始距离为 3 mm,时间单位为毫秒(ms),如图 7 所示即为从 0.001 ms 的时刻,每隔 0.4 ms 所记录的电弧温度云图.

从电弧的温度云图中可以看出,在触点间分段速度保持不变的情况下,随着工作时间由 0 ms ~ 4 ms,电弧区域的最高温度由 11 kK 下降到约 5 kK.

2.3 热力学环境下电弧仿真分析

在进行了密封式继电器触点电弧的静态和动态电弧的一般性分析之后,我们来对热力学环境下的触点电弧进行热力学环境下的电弧仿真分析. 本文所设计的热力学环境选取极限高温环境作为研究对象,当电流为 40 A 时电弧的温度和电位云图如图 8 所示.

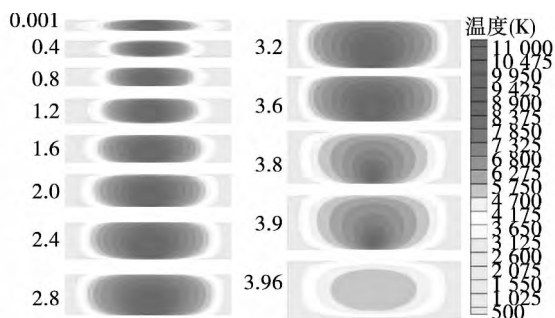


图7 在300mm/s速度下电弧的温度云图

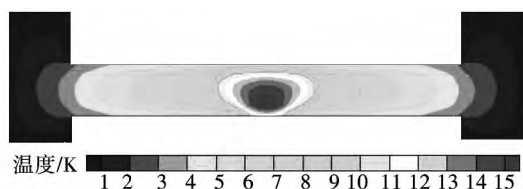


图8 电流为40A时电弧的温度云图

接下来对不同温度下的继电器触点电弧进行计算,以1kK、5kK和15kK为例,可以得到这3个温度值下的电弧区域电压曲线图,如图9所示。

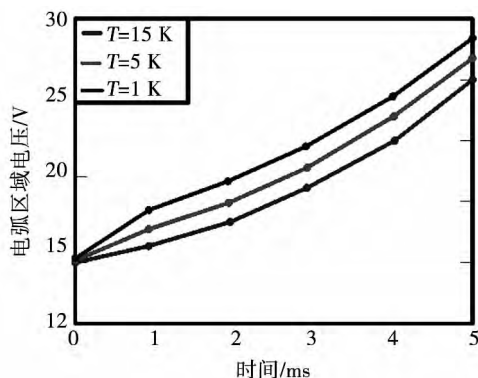


图9 不同温度下的电弧区域电压

由电弧温度云图、电位云图和MATLAB拟合曲线我们可以看出,在工作电流保持40A不变时,随着时间由0s~5s,电弧区域温度分别为1kK、5kK和15kK时,所对应的电弧区域工作电压都是由15V按照统一的变化规律逐渐升高到25V、26.4V和28V。

2.4 实验验证

为了验证密封式电磁继电器触点电弧有限元仿真的准确性,在密封实验环境下对电磁继电器触点工作时的温度和伏安特性进行监测,测得电弧区域的工作的极限高温约为11.3kK,极限低温为5.1kK。并且在1kK、5kK和15kK的情况下,选取5ms的接触时间,所对应的最高工作电压为25.7V、

26.9V和28.4V。由继电器在工作时的温度数值以及电压可知,采用本试验所设计的有限元仿真方法得出的参数与真实工况下的参数值基本一致。此外本文所采用的仿真方法要比传统的模糊评价方法更具有针对性更加准确合理。

3 结 语

本文以某型号密封式继电器触点电弧的有限元仿真为例,给出了继电器触点进行有限元仿真试验的三维物理模型,基于电磁学和流体力学相结合的知识,运用热电耦合的实验思想,进行合理假设,通过ANSYS完成有限元仿真并且利用MATLAB进行数值曲线拟合,得到了以下结论:

1) 本文所研究的某种型号密封式继电器,在触点电弧工作区域的铜蒸汽浓度由0%~100%的过程中,继电器触点工作的极限温度约为15.5kK,不会超过16kK。与此同时电弧区域的电压有6V的压降。

2) 该种型号的继电器触点动态工作时,在0~4ms时间内,电弧区域的瞬间极限高温为11kK,极限低温为5kK。

3) 在热力学环境下,该种型号继电器触点电弧在1kK、5kK和15kK的情况下,选取5ms的工作时间,所对应的最高工作电压为25V、26.4V和28V,而且电弧电压的变化规律是基本一致的。

参 考 文 献:

- [1] 王新鑫,樊丁,黄健康,等. 双钨极耦合电弧数值模拟[J]. 物理学报,2013,22:412-421.
- [2] 戈宝军,安万强,陶大军,等. 氮冷驱动电机转子端部温度场仿真[J]. 哈尔滨理工大学学报,2014(4):1-5.
- [3] 杨飞,荣命哲,吴翊,等. 考虑栅片烧蚀金属蒸气的栅片切割空气电弧仿真与实验研究[J]. 物理学报,2011(5):502-510.
- [4] ADAM Pacey, COLIN G. Macpherson, KEN J W McCaffrey. Linear Volcanic Segments in the Central Sunda Arc, Indonesia, Identified Using Hough Transform Analysis: Implications for arc Lithosphere Control upon Volcano Distribution[J]. Earth and Planetary Science Letters,2013:369-370.
- [5] LI C M, ZHU R H, LIU J L, et al. Effect of Arc Characteristics on the Properties of Large Size Diamond Wafer Prepared by DC Arc Plasma Jet CVD[J]. Diamond & Related Materials,2013:39-41.
- [6] KIRAN D V, CHO D W, SONG W H, et al. Arc Behavior in Two Wire Tandem Submerged Arc Welding[J]. Journal of Materials Processing Tech.,2014:21-27.

- [7] SHI Chuanwei, ZOU Yong, ZOU Zengda, et al. Physical Characteristics of Twin-wire Indirect Arc Plasma [J]. Vacuum, 2014: 107 - 109.
- [8] 王伟宗, 吴翊, 荣命哲, 等. 局域热力学平衡态空气电弧等离子体输运参数计算研究 [J]. 物理学报, 2012(10): 272 - 281.
- [9] 陈松, 管伟明, 张昆华, 等. Ag/La₂NiO₄ 基电触头在直流大电流条件下电弧侵蚀的实验与有限元研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009(1): 131 - 137.
- [10] 王巨丰, 黄志都, 王嫵蕾, 等. 基于链式的爆炸气流场耦合电弧动态模型 [J]. 中国电机工程学报, 2012(7): 154 - 160, 204.
- [11] 林莘, 王娜, 徐建源. 动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012(16): 157 - 164.
- [12] 陈维江, 颜湘莲, 贺子鸣, 等. 特高压交流输电线路单相接地潜供电弧仿真 [J]. 高电压技术, 2010(1): 1 - 6.
- [13] 陈喆歆, 吴翊, 杨飞, 等. 低压断路器电弧仿真研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2014(10): 10 - 17.
- [14] 颜湘莲, 陈维江, 李志兵, 等. 输电线路潜供电弧自熄特性仿真 [J]. 高电压技术, 2012(10): 2735 - 2741.
- [15] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015(7): 57 - 64.
- [16] 柴彤彤, 李志勇, 冯立, 等. 氩氦等离子体电弧特性的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2015(5): 175 - 177, 180.
- [17] 彭宏亮, 刘开培, 陈宜皇. 后置低通滤波器对冲击负荷电能计量的影响 [J]. 电测与仪表, 2015(8): 1 - 4, 15.
- [18] 付友, 王宁会, 王志强, 等. 基于噪声信号的电弧炉冶炼氧化镁运行状态分析 [J]. 电工技术学报, 2015(5): 15 - 22.
- [19] 董华军, 杨海军, 郭英杰, 等. 一种具有横纵磁场的新型真空灭弧室触头三维磁场仿真 [J]. 电工技术学报, 2015(5): 111 - 118.
- [20] 江国学, 王小平, 姜韬. 基于流体动力学的外加磁场对焊接电弧运动行为的仿真分析 [J]. 电焊机, 2015(4): 21 - 25.

(编辑: 温泽宇)