

控制与保护开关电器气吹短路电弧 动态仿真研究*



柳悦(1993—),女,硕士研究生,研究方向为低压电器虚拟样机技术。

- 柳悦¹, 郭其一¹, 黄世泽², 应云茂³, 刘兵⁴, 王梦超⁵
 (1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804;
 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
 3. 浙江中凯科技股份有限公司, 浙江温州 325604;
 4. 镇江大全伊顿电器有限公司, 江苏镇江 212200;
 5. 上海上实龙创智慧能源科技股份有限公司, 上海 200040)

摘要: 通过建立保护开关电器(CPS)灭弧室的仿真模型,并利用Fluent软件分析气吹电弧的动态过程。分析了出口直径、出口位置和灭弧栅片数目对电弧运动特性的影响,并依据结果提出了优化CPS分断过程的方法。

关键词: 控制与保护开关; 气吹; 电弧; 短路分断; 仿真

中图分类号: TM 564 文献标志码: A 文章编号: 2095-8188(2017)19-0008-05

DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2017.19.002

Research on Air-Blast Dynamic Simulation of Short-Circuit Arc for Control and Protective Switching Device

- LIU Yue¹, GUO Qiyi¹, HUANG Shize², YING Yunmao³, LIU Bing⁴, WANG Mengchao⁵
 (1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
 3. Zhejiang Jonk Technology Co., Ltd., Wenzhou 325604, China;
 4. Zhenjiang DAQO Eaton Electrical System Co., Ltd., Zhenjiang 212200, China;
 5. Shanghai SIIC-Longchuang Smarter Energy Technology Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: The simulation model of control and protective switching device(CPS) arc extinguishing chamber was established and the dynamic process of gas blowing arc was analyzed by FLUENT software. This paper also analyzed the influence of the exit diameter, the outlet position and the number of the arc extinguishing grid on the arc motion characteristics and put forward a method to optimize the CPS breaking process based on the results.

Key words: control and protective switching device(CPS); air-blast; electric arc; short circuit breaking; simulation

0 引言

控制与保护开关电器(Control and Protective Switching Device, CPS)作为一种新型低压电器产品,能够接通、承载和分断正常条件下和规定范围

内过载条件下的电流,且能够在规定时间内承载并分断规定的非正常条件下的电流,如短路电流^[1-4]。其中分断非正常电流的能力称为CPS的短路分断能力,是衡量CPS性能的一个重要技术指标。CPS在短路发生时,触头打开并在触头之

郭其一(1961—)男,教授,研究方向为新型低压电器及智能配电技术。

黄世泽(1983—)男,助理教授,研究方向为低压电器虚拟样机技术。

* 基金项目: 国家自然科学基金(61703308)

间的空气介质中燃起电弧^[5]。电弧从产生到完全熄灭的总时间称为燃弧时间,燃弧时间的长短直接体现了CPS分断性能的好坏^[6],且高温电弧会灼伤触头,降低CPS的可靠性和工作寿命^[7]。气吹作为调控CPS电弧的一个重要手段,能够利用高温产生的灭弧室内外气压差,驱动电弧进入灭弧栅片,加快熄弧,提高短路分断性能^[8-9]。目前的气吹研究主要以塑壳断路器为主要研究对象,分析气吹的过程和仿真方法^[10-11]。对于CPS的气吹燃弧调控控制方法几乎没有。本文以KBO系列CPS为研究对象,运用Fluent软件分析了气吹对电弧熄灭的动态影响,并通过改变相关参数研究灭弧室结构对电弧运动特性的影响,进而提出了提高CPS分断能力的方法。

1 CPS 短路分断过程及气吹灭弧原理

1.1 CPS 接触组结构

CPS的短路保护装置也称为主回路接触组。主回路接触组的内部结构示意图如图1所示。接触组中触头系统局部放大图如图2所示。触头系统包括动静导电回路、触头支持和宝塔弹簧等部件。

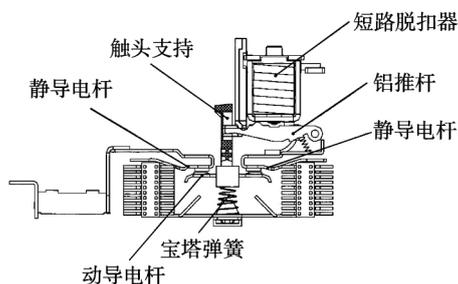


图1 主电路接触组构成示意图

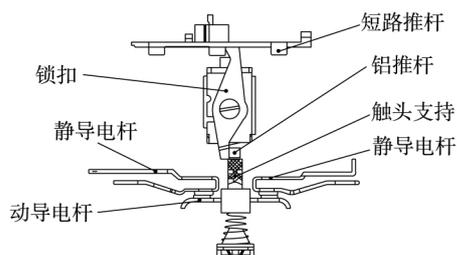


图2 触头系统局部放大图

1.2 CPS 短路分断过程

CPS的整个分断过程可以看成是电动斥力、气动斥力、机械动力和弹簧弹力等协调配合的过程。

(1) 当CPS通过电流时,根据电流的大小,动触头和动导电杆上受到电动斥力的作用。还未发生短路故障时,电流较小,产生的电动斥力也较小,不足以克服宝塔弹簧的反力,所以触头保持静止闭合状态。

(2) 当短路故障发生时,在CPS动静触头之间流过短路电流,电动斥力随短路电流增大而增大。当电动斥力增大到等于触头压力时,动静触头开始分离,触头斥开,产生电弧,形成电弧电流,但是由于电弧还未达到开始运动的极限长度,故相对于动静触头不做位移。动静触头分离之后,由于动导电杆和静导电杆之间通过短路电流产生的洛伦兹力,使得动触头斥开的距离越来越大。

(3) 当电弧达到起弧长度,电弧就进入运动阶段,此时电弧受到的驱动力主要来自磁吹力和气吹力。其中气吹力就是外界与灭弧室内气压差形成的气流,一边是冷却电弧,另一边产生对电弧向外界的驱动力。磁吹力与气吹力两者结合使电弧进入灭弧室并被灭弧栅片切割成若干段,此时电弧电压快速上升;当电弧电压超过电源电压瞬时值,电弧电流被强制减小,最终降低为零,电弧熄灭^[12]。

1.3 CPS 气吹灭弧基本原理

CPS的气吹灭弧主要依靠的是电弧产生能量使灭弧室的压力增加。当灭弧室内开始呈现电弧时,电弧的能量将大部分用于加热灭弧室内的气体,根据理想气体状态方程:

$$pV = mRT \quad (1)$$

式中: p ——灭弧室内压力;

V ——灭弧室体积;

m ——灭弧室气体质量;

R ——普通气体常数;

T ——灭弧室温度。

设在 dt 时间内,电弧供给灭弧室的能量为 dQ ,气体通过出气口消耗的能量为 dE ,则根据能量平衡方程,灭弧室内温度和压力上升的能量为

$$d(mC_v T + pV) = dQ - dE \quad (2)$$

$$dQ = K_p u_{arc} i dt \quad (3)$$

式中: C_V ——气体定容比热容;

K_p ——电弧能量转换成压力上升部分的比例系数;

u_{arc} ——电弧电压;

i ——电弧电流。

出气口消耗的能量为

$$dE = K/(K-1) (p/\rho) \alpha \rho_n v_n dt \quad (4)$$

式中: K ——气体绝热指数;

ρ ——出气口的气体密度;

A ——出气口面积;

α ——气体摩擦因数和收缩系数;

ρ_n ——出气口的气体密度;

v_n ——出气口的气体速度。

将式(1)、式(3)、式(4)代入式(2),可得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R}{(C_V + R)V} (K_p u_{arc} i - \frac{K}{K-1} \frac{p}{\rho} \alpha \rho_n v_n A) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,灭弧室压力的变化率随电弧供给的能量、灭弧室内气体密度增大而增大,而随出气口面积的增加而减小。

在电弧刚刚产生的初级阶段,电弧供给灭弧室的能量大于气体通过出气口消耗的能量,灭弧室内气压不断增大,产生的压力与灭弧室外大气压之间的压力差就可以形成由灭弧室通过出气口的气流。这个气流有两种作用:一是对电弧产生冷却作用;另一种是对电弧产生驱动力,迫使电弧进入灭弧栅片。采用气吹以后,CPS灭弧室内电弧熄灭速度变快,这就大幅度提高了CPS的分断性能。

2 分析对象

本文研究对象为KB0系列CPS的灭弧室气吹模型。该灭弧室位于静导电板和动导电板之间,如图3所示,并有若干灭弧栅片用来切断电弧。电弧在灭弧室中产生,并由气吹力驱使电弧向出气口方向移动。KB0系列的灭弧室3D模型,如图4所示,有两个对称的带有出气口的灭弧室。本文的仿真模型中只选取一个灭弧室,并参考实物模型尺寸将其设置成只带一个出气口的半封闭单元,最终得到一个用于仿真的2D灭弧室模型,如图5所示。

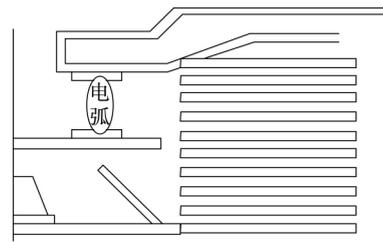


图3 灭弧室位置图

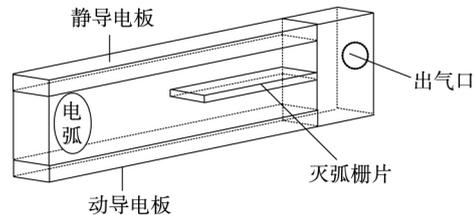


图4 灭弧室3D模型

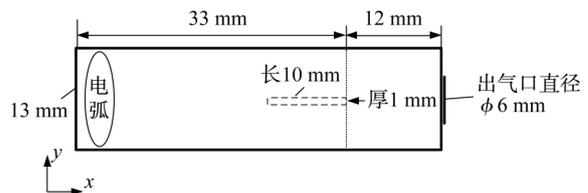


图5 灭弧室2D简化模型

3 基于 Fluent 的气吹电弧仿真

根据产品的设计参数,本文将灭弧室模型出气口设置为压力出口并将其直径设置为6 mm、入口设置为压力入口并将其直径设置为13 mm。在仿真中设定电弧温度为20 000 K,外界气温为300 K,为了简化模型,将外界气体设置为空气,灭弧室内气体设置成电离气体,粘性模型选择k-epsilon(2eqn),并统一选择温度最高点为电弧当时的位置。应用Fluent进行气流场的仿真,仿真过程如图6所示,最终得到电弧运动速度、电弧中心点压强以及电弧位置,分别如图7~图9所示。其中电弧位置由电弧最高温度确定。

根据图6的电弧位置可以看出,在0.000 2 s左右灭弧栅片开始切割电弧,在0.000 35 s以前电弧中心点已经离开灭弧室。根据图7、图8的仿真曲线可以看出,在电弧开始运动时,电弧中心点所受的压强会有一个极短的上升阶段,即在初期电弧就已经获得了大部分的能量,因此前期的产能过程并不明显。以电弧通过出气口不断消耗

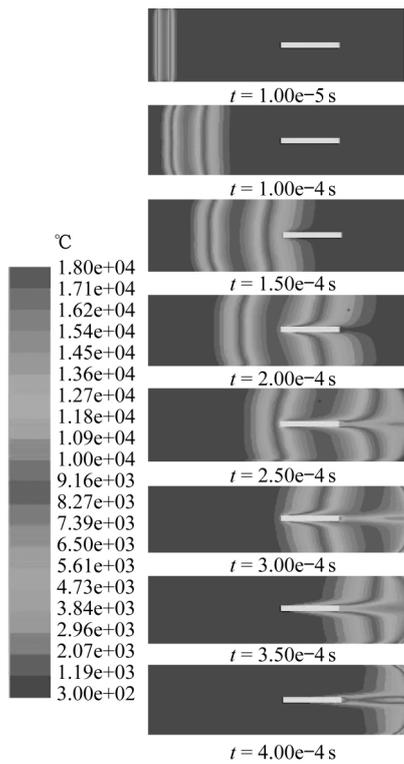


图6 Fluent 仿真灭弧室变化过程

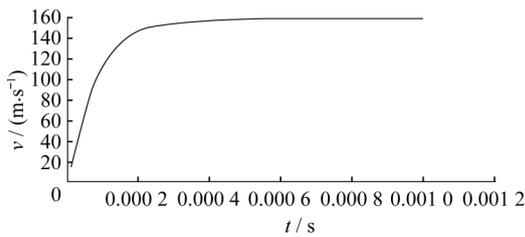


图7 电弧运动速度曲线

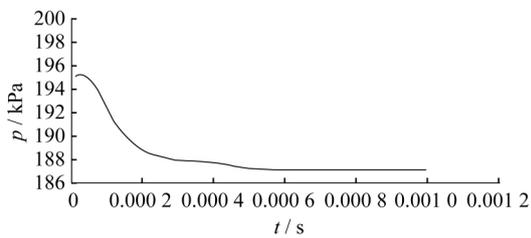
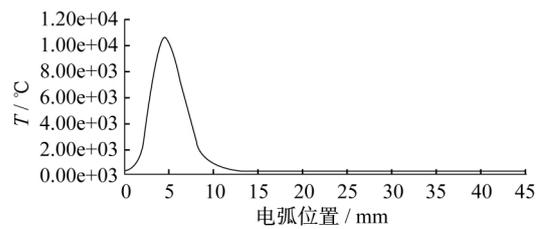
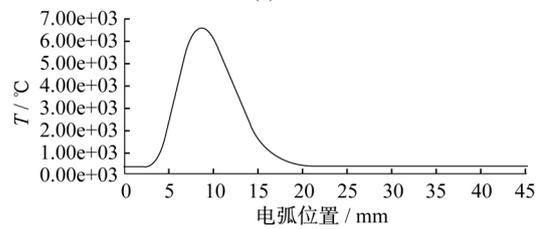


图8 电弧中心点所受压强

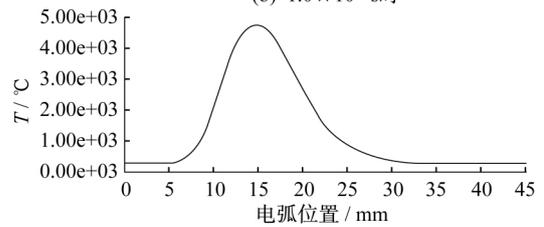
能量 dE 为主, 灭弧室内的气压不断减小, 但灭弧室外依旧存在气压差, 电弧依靠这个气压差在前期持续加速运动, 在接触到灭弧栅片时, 灭弧栅片对电弧有一定的阻碍作用, 且电弧已经消耗大部分能量, 所受的大气压力已经明显减小, 故后期运动速度基本保持稳定。



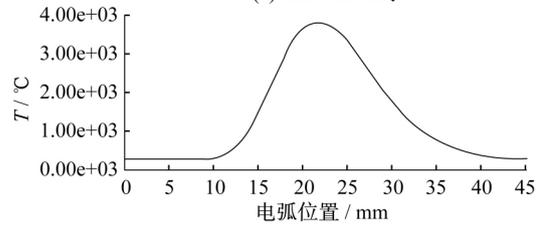
(a) 5.0×10^{-5} s时



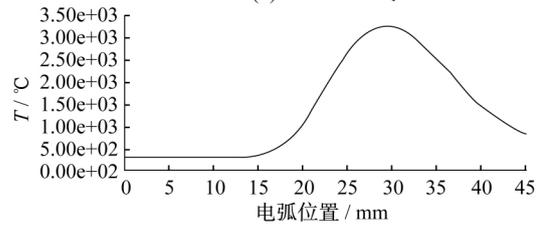
(b) 1.0×10^{-4} s时



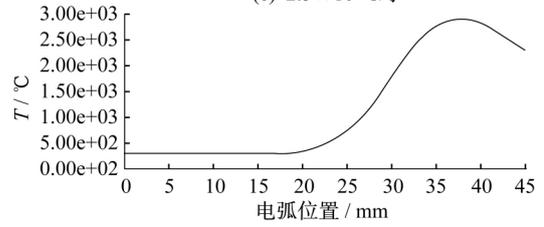
(c) 1.5×10^{-4} s时



(d) 2.0×10^{-4} s时



(e) 2.5×10^{-4} s时



(f) 3.0×10^{-4} s时

图9 固定时间间隔下的电弧位置

4 结构参数对气吹电弧的影响分析

4.1 出气口直径对气吹电弧的影响

保持灭弧室模型参数以及 Fluent 仿真平台

设置基本不变,改变出气口的直径为 4、8 mm。提取相应的电弧运动速度、位移曲线如图 10、图 11 所示。

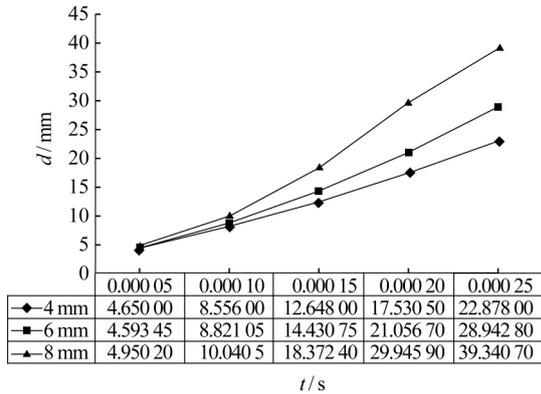


图 10 不同出气口直径下的电弧位移对比曲线

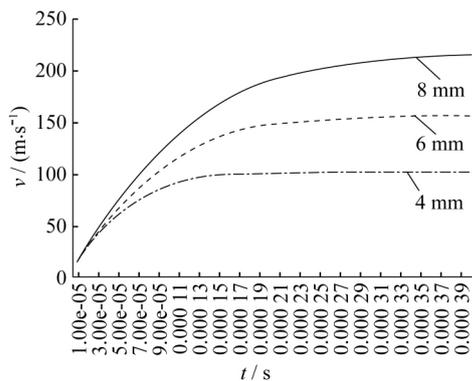


图 11 不同出气口直径下的电弧运动速度对比曲线

忽略前期增压过程,结合图 10 与图 11 可知,在一定范围内增大出气口直径有利于加快电弧熄灭。随着出气口直径的增大,由于气吹作用产生的驱动力能有效地加快电弧的运动速度,相同时间内电弧的位移也增大。当然灭弧室的出气口直径也不是越大越好,由于本课题仿真前提设置中,假设通过电弧的燃烧已经给灭弧室内气体提供了大部分的能量,前期只存在少量的增压过程,但并没有在仿真中明显体现,若深入考虑前期的增压过程,出气口直径太大,在前期灭弧室增压的过程中,压力的变化率会明显减小,造成内外气压差较小而影响电弧的运动速度。

4.2 灭弧栅片对气吹电弧的影响

Fluent 仿真平台设置基本保持不变,增加 2 片灭弧栅片,灭弧室的简化原理图如图 12 所示。

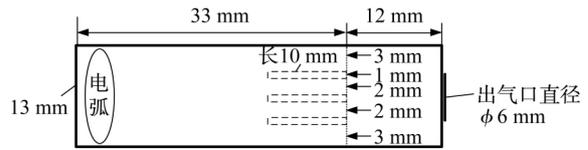


图 12 增加了灭弧栅片后的灭弧室模型

提取增加灭弧栅片后仿真的电弧运动速度并与原模型进行对比,如表 1 所示。

表 1 电弧运动速度对比

| 时间/s | 增加灭弧栅片数目后的电弧运动速度/(m·s ⁻¹) | 原模型电弧运动速度/(m·s ⁻¹) |
|----------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 5.00E-05 | 62.954 94 | 65.319 010 |
| 0.000 10 | 107.343 34 | 110.704 940 |
| 0.000 15 | 131.253 34 | 135.473 140 |
| 0.000 20 | 141.507 35 | 146.726 920 |
| 0.000 25 | 145.980 71 | 151.822 400 |
| 0.000 35 | 148.854 27 | 154.977 950 |
| 0.000 40 | 149.473 11 | 155.708 709 |

从表 1 中数据可知,在外界条件相同的情况下,增加栅片的数目,对气流场起阻碍作用而影响气吹,使得电弧运动速度有所下降。

5 结 语

本文基于 FLUENT 仿真软件对 KBO 系列的 CPS 灭弧室气流场进行建模,模拟在气吹作用下电弧的运动速度、运动位置等;并且通过改变灭弧室出气口直径、灭弧栅片数目进一步分析灭弧室结构对气吹电弧的影响机理。仿真结果表明,适当地增大出气口直径(即出气口面积)可以加快电弧的熄灭,而增加灭弧栅片的数目则阻碍了电弧运动,降低了电弧熄灭的速度。因此,在设计时,可以考虑适当增大出气口面积,减少灭弧栅片的数目促进电弧的熄灭,加快 CPS 的短路分断速度。

【参考文献】

[1] 胡景泰,曾萍,周勇,等.多功能集成化电器—控制与保护开关电器(CPS)的发展与应用[J].低压电器,1997(6):3-9.

(下转第 17 页)

弧故障的诊断。主要结论如下:

(1) 线路发生故障电弧时,反映在电流波形上会发生相应的畸变。线性负载与非线性负载存在一定的差异。

(2) 通过数学形态学梯度来定量衡量正常电流与串联故障电弧的差异,构造故障电弧的特征向量。

(3) 采用 ELM 对电流信号的特征向量进行分类识别,实现了串联电弧故障诊断,诊断率高达 97.5%。该方法具有良好的泛化能力。

【参考文献】

- [1] 公安部消防局. 中国消防年鉴(2014) [M]. 昆明: 云南人民出版社 2014.
- [2] 杨凯 张认成 杨建红,等. 基于分形维数和支持向量机的串联电弧故障诊断方法[J]. 电工技术学报 2016 31(2): 70-77.
- [3] GIUSEPPE P, LUIGI M, MARCO L. Simplified arc-fault model: the reduction factor of the arc current [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013 49: 1703-1710.
- [4] 蓝会立 张认成. 基于小波分析的故障电弧伴生弧声特征提取[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 57-62.
- [5] KO W S, MOON W S, BANG S B, et al. Analysis of ignition time/current characteristics and energy when series arc-fault occurs at rated 220 V [J]. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers 2013 62(8): 1184-1191.
- [6] MA S H, GUO J W, BAO J Q. Identification method of low-voltage series arc fault based on harmonic component relative change coefficient [J]. Applied Mechanics and Materials 2013(331): 144-147.
- [7] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: Theory and applications [J]. Neurocomputing 2006 70(1/2/3): 489-501.
- [8] HUANG G B, SIEW C K. Extreme learning machine with randomly assigned RBF kernels [J]. International Journal of Formation Technology 2005 11(1): 16-24.
- [9] 任志新. 多脉冲自耦变压整流器(ATRU)的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学 2008.
- [10] 刘妹. 数学形态学在信号处理方面的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学 2006.
- [11] 陶兴龙. 数学形态学和分形理论在图像去噪和边缘提取中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学 2013.
- [12] 何星 王宏力 陆敬辉,等. 基于优选小波包和 ELM 的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2013 (11): 2614-2619.
- [13] 李彬 李贻斌. 基于 ELM 学习算法的混沌时间序列预测[J]. 天津大学学报 2011(8): 701-704.
- 收稿日期: 2017-07-01
-
- (上接第 12 页)
- [2] 曾萍 胡景泰. 新型电器—多功能集成化的“KB0 系列控制保护开关” [J]. 电气传动 2001(6): 49-52.
- [3] 黄世泽 郭其一 陈杨,等. CPS 短路分断能力仿真及试验[J]. 电力自动化设备 2016(5): 149-153.
- [4] 黄世泽 郭其一 章敏娟,等. 控制与保护开关电器电磁机构运动轨迹仿真研究[J]. 低压电器 2013 (11): 5-9.
- [5] 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): 146-151.
- [6] 崔芮华 李超 李振平. 磁场作用下分断初速度对直流分断电弧两相燃弧时间影响的研究[J]. 电器与能效管理技术 2016(22): 6-9 + 49.
- [7] 张冠生. 电器理论基础 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [8] 陈德桂. 低压电器研发工作的若干动态[J]. 低压电器 2013(5): 1-6.
- [9] 刘婉莹 张国钢 张鹏飞,等. 低压电器空气灭弧室气流场特性的仿真研究[J]. 低压电器 2013(3): 6-10.
- [10] 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试验研究[J]. 物理学报 2011(5): 502-510.
- [11] AOYAMA Y, ODADA T, TAKAYAMA S. Spectroscopic analysis for the arc quenching effect of ablation gas on arc immobility phenomena [C] // Thirty-Sixth IEEE Conference on Electrical Contacts, and the Fifteenth International Conference on Electrical Contacts, 1990: 586-591.
- [12] 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 2007.
- 收稿日期: 2017-06-25