

# 低压断路器中空气电弧运动的仿真及实验研究

杨茜, 荣命哲, 吴翊

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西省 西安市 710049)

## Simulation and Experimental Research on Air Arc Motion in Low-voltage Circuit Breaker

YANG Qian, RONG Ming-zhe, WU Yi

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

**ABSTRACT:** The mathematical model of 3-dimensional air arc plasma under the effect of external magnetic field is set up based on magnetic hydro-dynamics(MHD). Considering the characteristics of anode and cathode, reasonable current density distributions are imposed and a method related to natural electrical conductivity of the arc plasma is used to determine the arc root position. By adopting the commercial computational fluid dynamics(CFD) package based on control-volume method, the above MHD model is solved and verified using images recorded by a high-speed camera. The characteristics of the motion of the arc plasma are described, and the propagation and reflection of pressure wave are considered as the reason of motion in arc chamber. In addition, double-vortices induced by cathode jetting and the 'tail' at the back of the arc plasma are described in detail.

**KEY WORDS:** air arc plasma; magnetic hydro-dynamics; arc root position; electrical conductivity

**摘要:** 以磁流体动力学(MHD)为基础建立了三维空气电弧等离子体在外部磁场作用下运动时的数学模型。考虑到阴极和阳极各自的特点, 提出了更加合理的电流分布边界条件; 采用一种与电弧等离子体自身电导率密切相关的方法确定电弧的弧根位置。利用基于有限容积法的商业软件对上述模型进行求解, 并利用高速数字摄像机进行了相关的实验, 对仿真结果进行验证, 充分证明模型的有效性, 揭示了空气电弧在外部磁场作用下, 在低压断路器的灭弧室中的运动规律, 并指出压力波在灭弧室中的传播和反射是产生这种运动规律的原因。此外, 对阴极喷流所形成的双漩涡和电弧等离子体后部的“尾巴”这2种物理现象进行了详细的描述。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50477025); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划基金(教人司[2002]123号)。

Project Supported by National Natural Scievnce Foundation of China (50477025).

**关键词:** 空气电弧等离子体; 磁流体动力学; 电弧弧根位置; 电导率

## 0 引言

低压断路器用于接通和分断电路中的电流, 当电路中出现故障电流时, 断路器的触头迅速地打开, 在触头间产生电弧, 电弧稍作停滞, 在外界磁场和气动力的作用下, 沿着导轨向栅片运动, 随后电弧被栅片分成几个短弧, 导致电弧电压急剧升高, 电弧随之被熄灭。能否使电弧快速地到达栅片, 可靠地被熄灭是评价低压断路器性能的一个重要标准。电弧在灭弧室中的运动过程, 是一个气流场、电场、磁场和热场相互耦合, 共同作用的复杂现象。基于以上的原因, 过去的研究者们主要通过实验的手段对此现象进行研究<sup>[1-4]</sup>。

近年来, 计算机技术、计算流体力学(CFD)商业软件和电弧等离子体物理研究工作的发展, 使得人们利用计算机数值分析对电弧等离子体的研究成为可能, 开始探索以磁流体动力学为基础的电弧模型的建立<sup>[5-8]</sup>。文献[9]对考虑与没考虑电弧自身所产生的磁场时的电弧模型进行了对比, 建立了三维电弧自由燃烧时的数学模型; 文献[10]建立了在外界磁场和产气材料作用下的三维电弧运动时的数学模型, 但是作者将弧根固定在电极上, 没有研究电弧在受到外界磁场作用时弧根位置的变化情况; 文献[11]建立了1/4的对称的简化灭弧室模型, 认为弧根位于电极上温度最高的区域, 这种方法并没有将弧根位置和电弧等离子体介质本身的特性有效地结合起来; 文献[12]提供了整个的简化灭弧室模型, 对阴极和阳极采用了相同的电流分布边界条件来研究电弧的运动情况, 这种方法并没有考虑到阴极和阳极各自的特点, 此外, 该文献只提

供了仿真结果并没有进行相关的实验研究。

本文建立了简化的低压断路器的灭弧室中三维空气电弧等离子体在外部磁场作用下运动时的磁流体动力学的数学模型,并针对阴极和阳极各自的特点分别提出了合理的电流分布边界条件,采用了一种与电弧等离子体介质本身电导率密切相关的方法来确定弧根位置。利用基于有限容积法的商业软件包 FLUENT 对上述模型进行了求解,并利用 Kodak 高速数字摄像机记录了电弧在外部磁场作用下的运动情况,对仿真结果进行了验证,充分证明了模型的有效性,揭示了空气电弧在低压断路器的灭弧室中的运动规律,并指出压力波在灭弧室中的传播和反射是产生这种运动规律的原因。此外,对于电弧等离子体在运动过程中,由于阴极喷流所形成的双漩涡和电弧后部的“尾巴”这2种物理现象进行了描述。本文对于认识电弧等离子体在外部磁场作用下,在低压断路器灭弧室中的运动情况,从而进一步提高和改进低压断路器的性能具有深刻的意义。

## 1 数学模型和边界条件

### 1.1 数学模型的基本条件

本文空气的热力学参数和传输特性参数均取自文献[13]。文中分别从气体动力学过程、电磁过程、辐射过程3个方面建立三维空气电弧等离子体的数学模型,采用当今流行的计算流体动力学软件 FLUENT,利用 Pantankar 的有限容积法<sup>[14]</sup>对数学模型进行求解。此数学模型基于以下几个假设:

(1) 电弧等离子体满足局部热力学平衡条件(LTE),可以用统一的热力学温度描述其不同粒子的温度。

(2) 电弧等离子体是牛顿流体,并且是层流<sup>[12,15-16]</sup>。

(3) 不考虑电极金属蒸气及器壁有机蒸气的影响。

(4) 电弧起始于具有恒定间距的2个电极之间。

### 1.2 气体动力学过程

电弧等离子体中的气流场由质量、动量和能量守恒方程组进行描述,守恒方程组如下所述:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{r}\mathbf{v}) &= 0 \\ \frac{\partial(\mathbf{r}\mathbf{v}_i)}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{r}\mathbf{v}\mathbf{v}_i) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ h \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) \right] + (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_i \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\mathbf{r}H)}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{r}\mathbf{v}H) - \text{div}(I \text{grad}T) &= \\ \frac{\partial p}{\partial t} + V - S_R + \frac{1}{s} \mathbf{J}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $t$ 为时间; $x_i$ 、 $x_k$ 分别为直角坐标系的各分量; $v_i$ 为速度在 $i$ 方向( $i=x,y,z$ )的各分量; $p$ 为压力; $T$ 为温度; $H$ 为动态焓; $h$ 为热焓; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $V$ 为粘性耗散项; $S_R$ 为辐射项; $\mathbf{r}$ 为等离子体的密度; $h$ 为粘度; $c_p$ 为定压比热; $I$ 为热导率; $s$ 为电导率。

与一般流体相比较,仿真电弧等离子体时,在其动量方程的源项中考虑了它在磁场中所受到的力,即洛伦兹力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ,在其能量方程的源项中考虑了由于焦耳热项 $(1/s)\mathbf{J}^2$ 和辐射项 $S_R$ 所产生的影响,在能量方程的源项中,粘性耗散项 $V$ 并没有产生另外的热量,而是直接转化成了热能,因此一般将其忽略<sup>[11]</sup>。

### 1.3 电磁过程

在电磁过程中需要考虑电弧等离子体中的电位、电流和磁感应强度的关系。其中,电位与电流的关系一般用如下的方程组进行考虑:

$$\text{div}(\mathbf{s} \text{grad} f) = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = -\mathbf{s} \text{grad} f \quad (5)$$

式中 $f$ 为电位。

本文利用矢量磁位法来处理电弧等离子体中的磁场。在电弧等离子体中,矢量磁位和电流密度之间的关系如下:

$$\nabla^2 A_i = -\mathbf{m}_0 J_i (i=x,y,z) \quad (6)$$

式中: $A_i$ 为磁矢位在 $i$ 方向( $i=x,y,z$ )的各分量; $\mathbf{m}_0$ 为真空中的磁导率。

### 1.4 辐射过程

电弧等离子体中的辐射现象是一个非常复杂的过程,电弧中心部分的高温区向外辐射能量,边缘处的低温区对一部分辐射能量存在自吸收现象,另一部分辐射能量到达器壁对器壁进行烧蚀,还有一小部分能量损失在灭弧室的外部空间。另一方面,电弧等离子体的光谱由连续光谱和线光谱组成,其中的线光谱与原子和分子的能级有关。由于以上所述的辐射现象的复杂性,采用经验公式对辐射项进行处理<sup>[11]</sup>:

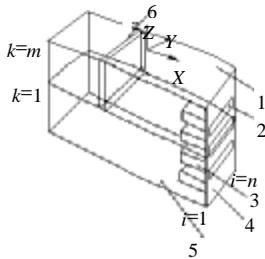
$$S_R = 4ka(T^4 - T_0^4) \quad (7)$$

式中: $S_R$ 为每个基本网格单元内由于辐射所发射出

的能量； $a$ 为一个常数，其值为  $5.670\ 57 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； $k$ 为衰减系数，与网格单元内的压力有关； $T$ 为网格单元内的温度； $T_0$ 为外部环境的温度，一般设为 300K。

### 1.5 几何模型和边界条件

本文所建立的低压断路器的灭弧室是简化的灭弧室，它的几何尺寸为  $45\text{mm} \times 8\text{mm} \times 9\text{mm}$ ，其几何模型如图 1 所示。上壁面为阴极，下壁面为阳极，右侧有 4 片尺寸为  $8.55\text{mm} \times 7\text{mm} \times 1\text{mm}$  的陶瓷栅片，最右边为 3 个尺寸为  $7\text{mm} \times 1\text{mm}$  的出气孔。



1—阴极；2—出气孔；3—栅片；4—灭弧室器壁；  
5—阳极；6—基本片段

图 1 简化灭弧室的几何模型图

Fig. 1 The geometry of simplified arc chamber

网格的剖分间距在  $x, y, z$  方向上分别为 0.225、0.5、0.5mm，为了节约计算时间，建模时采用了 1/2 的对称模型，整个计算模型由 28800 个基本网格单元所组成。本文计算所采用的电弧等离子体的总电流  $I$  为 150A，阴极作为发射极，向阳极发射电子，阴极面上的电流密度分布满足

$$j(r) = J_{\max} \exp(-br) \quad (8)$$

在直角坐标系中为

$$j(x, y) = J_{\max} \exp(-b\sqrt{x^2 + y^2}) \quad (9)$$

式中： $x, y$  为直角坐标； $J_{\max}$  为  $1.2 \times 10^8 \text{A} \cdot \text{m}^{-2[16]}$ ； $b$  为由  $I = 2\pi \int_0^{R_c} j(r)rdr$  所确定的常数， $R_c = 3\text{mm}$ 。

阳极作为接收极，接收由阴极所发射的电子，因此将恒定的零电位作为阳极的电位边界条件，将 3500K 作为铜电极的温度边界条件。在出气孔处，环境温度(300K)和压力(101 325Pa)作为出口处的边界条件。灭弧室器壁的温度设为环境温度 300K；为了简化磁场计算的复杂性，设在器壁上，沿法向方向，电位的梯度和磁矢位各分量的梯度均为零。在计算中，所采用的时间步随着运行情况的不同而变化，最小为  $3 \times 10^{-7}$  秒，整个计算过程在一台 Veriton 7500 单机上持续进行了 140 多个小时。

### 1.6 电弧弧根位移的确定方法

在低压断路器的灭弧室中，电弧等离子体在气流场和磁场的共同作用下沿着导轨向灭弧栅片运动，电弧弧根的位置和电弧等离子体介质本身的特性密切相关，弧根沿着导轨的位移曲线并不是线性变化的，不能用简单的公式进行描述。文献[11]认为弧根位于电极上温度最高的区域，这种方法只是将电弧弧根的位置和电极表面的温度联系起来，并没有将弧根的位置和电弧等离子体介质本身的特性有效地结合起来。在文献[12]中，认为阴极和阳极具有相同的电流分布特点，将两极的弧根位置均与电弧等离子体介质本身的电导率相联系，这种方法有效地将弧根位置和电弧等离子体介质本身的特性结合起来，但它并没有考虑到阴极和阳极各自的特点，只是简单的将阳极和阴极进行了同等对待，用与对待阴极相同的方法来处理阳极。

实际上，阴极作为发射极向阳极发射电子，而阳极作为接收极接收电子，因此本文在考虑弧根位移时，仅考虑阴极的弧根位置，在阴极斑点的中心处施加  $j(x, y) = J_{\max} \exp(-b\sqrt{x^2 + y^2})$  的电流密度分布，将零电位作为阳极的电位分布条件，阳极的弧根位置根据灭弧室内电弧等离子体温度场的分布自动地进行调整。将灭弧室沿  $XY$  平面均匀地分成上下两部分，剖分网格沿  $X$  轴将上部灭弧室分成了若干个基本片段，如图 1 中标注所示。电弧在外界磁场作用下沿导轨运动的过程中，在每一时刻，阴极弧根的  $X$  坐标位于具有最大平均电导率的位置， $Y$  坐标为零，也就是说将具有最大平均电导率处确定为阴极斑点的中心，电流密度  $j(x, y) = J_{\max} \exp(-b\sqrt{x^2 + y^2})$  围绕着此中心在阴极上呈指数分布。因此，电弧等离子体温度场的分布不同，具有最大平均电导率的位置会动态地随之变化，电弧弧根也会随之在阴极面上沿着  $Y=0$  这条直线移动。平均电导率的计算方法由式(10)所确定。

$$\bar{s}(X) = \int_1^m \int_1^n \frac{s}{N} dYdZ \quad (10)$$

式中： $\bar{s}(X)$  为沿  $X$  方向每一个基本片断的平均电导率； $N$  为每个基本片段所包含的等离子体的基本网格单元数； $Y, Z$  方向的积分限如图 1 所示。

这种确定弧根位置的方法考虑了阴极和阳极各自的独特之处，并且将弧根位移和电弧等离子体介质本身的特性有效地结合起来，更能充分反映电弧运动的本质特征。

### 2 仿真结果和实验结果分析

本文计算了电弧总电流为 150A 时，在沿 Y 轴 -5mT 磁场的的作用下，电弧等离子体在如图 1 所示的灭弧室中的运动情况。

以电弧等离子体不受任何外界磁场作用时的静态仿真结果作为电弧在 t=0 时刻的初始状态，如图 2 中第一幅图所示。在 t=0 时刻，施加外部磁场，电弧等离子体在外部磁场的的作用下开始运动。图 2 为电弧在整个运动过程中，灭弧室的 XZ 对称面上温度场的分布图。由图 2 可见，电弧等离子体在外部磁场的的作用下，受到洛仑兹力的作用而向灭弧栅片运动，在运动的过程中，电弧受到气流场的作用而发生弯曲，在电弧高温区的尾部拖着一条“尾巴”。

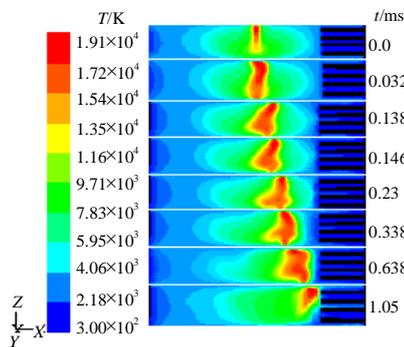


图 2 电弧等离子体运动过程中灭弧室 XZ 对称面上温度场的分布图

Fig. 2 The temperature distribution on the XZ symmetry plane of arc chamber during motion process

在灭弧室的 XY 对称面上，电弧等离子体在运动的过程中由于受到气流场的“冲刷”作用，使得电弧中心处高温区的前端呈圆形，如图 3 所示。

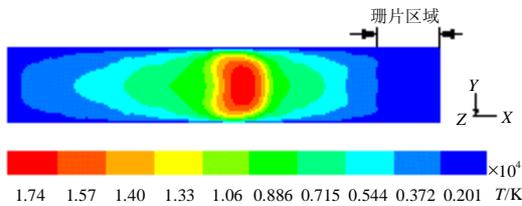


图 3 电弧等离子体运动过程中灭弧室 XY 对称面上温度场的分布图

Fig. 3 The temperature distribution on the XY symmetry plane of arc chamber during motion process

由阴极喷射出来的等离子流在运动的过程中，在灭弧室 XY 对称面上产生了 2 个明显的漩涡，其中速度矢量场中的最大速度为 80m/s，如图 4 所示。

为了验证模型的有效性，利用 Kodak 高速数字摄像机来记录电弧的影像，它的最大拍摄速度为 12000 幅/秒。图 5 记录了由上述高速摄像机拍摄的电弧等离子体在-5mT 磁场作用下，在如图 1 所示

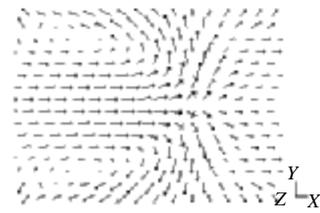


图 4 电弧等离子体运动过程中灭弧室 XY 对称面上速度矢量所产生的双漩涡

Fig. 4 The double vortices on the XY symmetry plane of arc chamber during motion process

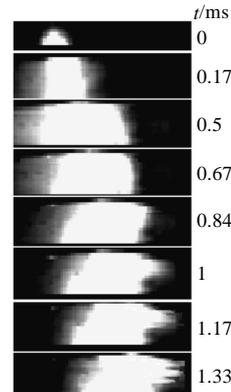


图 5 高速摄像机记录的电弧等离子体在 -5mT 磁场作用下的运动情况

Fig. 5 The images of air arc plasma under the effect of -5mT magnetic field recorded by a high-velocity camera in the arc chamber during motion process.

在仿真计算过程中，将每次迭代中弧根的位置输出到数据文件以获得弧根位移的仿真曲线，利用高速数字摄像机所记录的电弧影像来获得弧根位移的实验曲线。在电弧的整个运动过程中，弧根位移的仿真曲线和实验曲线的对比如图 6 所示。

在仿真曲线中，在 t=0 时刻，电弧受到外界磁场的的作用开始运动，初始运动的速度比较大，即在 a-b 段的位移曲线较陡；0.08ms 以后，即从 b 点开始，位移曲线变的比较平缓，说明电弧在 0.08ms 以后的运动速度开始变小，这是因为电弧在刚开始

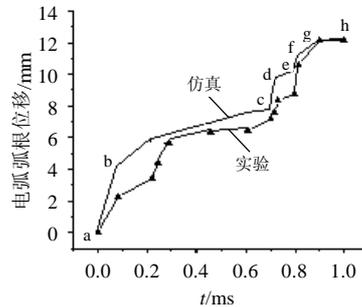


图 6 在 -5 mT 磁场作用下，电弧弧根位移的仿真结果和实验结果的对比

Fig. 6 The comparison of simulation and experimental results on arc root positions under the effect of -5mT magnetic field

运动时距离栅片有 13.5mm, 此时不受任何阻挡, 运动的速度较大; 压力波在灭弧室内以声速 340m/s 传播, 大约经过 0.0397ms 到达右侧的栅片, 也就是经过 0.0794ms 后, 由于碰到栅片而反射回来的压力波又到达电弧, 对电弧产生阻挡作用, 因此在仿真曲线上, 电弧从  $t=0.08\text{ms}$  开始, 即 b 点开始以平稳的速度向栅片运动, 正如仿真曲线中的 b-c 段所示; 当电弧运动到  $t=0.69\text{ms}$  时, 即 c 点, 此时电弧距离右侧的出气孔很近, 在电弧前端的气体可以容易地通过出气孔排出灭弧室, 减小了对电弧的阻挡作用, 这时电弧的运动速度开始加大, 正如仿真曲线中 c-d 段所示; 接下来经过很短的时间以后, 由于受到反射波的阻碍作用, 电弧的运动又开始变慢, 如仿真曲线中的 d-e 段所示; 电弧在运动的过程中交替的加速(e-f 段)、减速(f-g 段); 当电弧弧根运动到大约 13ms 处时(g 点), 此时电弧已经到达了灭弧室的右端, 开始进入栅片; 接着弧根的位移基本保持不变(g-h 段)。

由图 6 中的仿真曲线和实验曲线的对比可见, 由仿真所获得的电弧弧根位移曲线与实验结果大体相符, 充分证明了模型的有效性。但是仿真数据比实验数据略大, 在 0.1~0.2ms 之间相差较多。这是因为基于有限的计算条件, 剖分网格不可能太细, 电弧弧根从一个位置变化到下一个位置时, 弧根呈跳跃性的变化, 这样导致了仿真结果和实验结果之间的差距。

### 3 结论

(1) 以磁流体动力学(MHD)为基础建立了三维空气电弧等离子体在外部磁场作用下运动的数学模型, 在发射极阴极施加了指数分布的电流密度; 在接收极阳极, 施加了统一的零电位作为电位分布条件; 将弧根位置与电弧等离子体自身电导率相关联。实验结果与仿真结果的一致性表明了这种处理方法是实际有效的。

(2) 利用基于有限容积法的商业软件对上述模型进行求解, 并利用 Kodak 高速摄像机记录了电弧在外部磁场作用下的运动情况, 对仿真结果进行了验证, 揭示了空气电弧在外部磁场作用下在低压断路器的灭弧室中“快速-平缓-快速”的运动规律, 压力波在灭弧室中的传播和反射是产生这种运动规律的原因。

(3) 将计算流体动力学软件和实验研究有机

的结合, 可以成为研究低压断路器中电弧等离子体现象的一个强有力的工具, 从而进一步提高和改进低压断路器的性能。

### 参考文献

- [1] Lindmayer M, Paulke J. Arc motion and pressure formation in low voltage switchgear[J]. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 1998, 21(1): 33-39.
- [2] McBride J W, Pechrach K, Weaver P M. Arc motion and gas flow in current limiting circuit breakers operating with a low contact switching velocity[J]. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2002, 25(3): 427-433.
- [3] 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): 126-132. 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): 126-132(in Chinese).
- [4] 刘洪武, 陈德桂, 李志鹏. 不同因素对气吹式塑壳断路器开断电弧运动影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 154-159. Liu Hongwu, Chen Degui, Li Zhipeng. Experimental investigation of the influence of several factors on the motion of interruption arc in MCCB with gas-driven arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 154-159(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 杨涌, 王其平. SF<sub>6</sub> 断路器喷口电弧熄灭过程的数字模拟[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 9-13. Yang Yong, Wang Qiping. Computer aided numerical analysis of arcing process in SF<sub>6</sub> circuit breaker nozzle[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 9-13(in Chinese).
- [7] 荣命哲, 杨茜, 范春荣. 高压自能式 SF<sub>6</sub> 断路器电弧能量作用过程仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 92-97. Rong Mingzhe, Yang Qian, Fan Chunduo. Simulation of the process of arc energy-effect in HV auto-expansion SF<sub>6</sub> circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 92-97(in Chinese).
- [8] 张俊民. 喷口电弧与喷口材料蒸气相互作用的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 206-209. Zhang Junmin. Mathematical model of the interaction between nozzle model and PTFE vapour[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 206-209(in Chinese).
- [9] Schlitz L Z, Garimella S V, Chan S H. Gas dynamics and electromagnetic processes in high-current arc plasmas[J]. J. Appl. Phys., 1999, 85(5): 2540-2546.
- [10] Schlitz L Z, Garimella S V, Chan S H. Gas dynamics and electromagnetic processes in high-current arc plasmas[J]. J. Appl. Phys., 1999, 85(5): 2547-2555.
- [11] 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, 1998, 21(1): 96-103.
- [12] Swierczynski B, Gonzalez J J, Teulet P, et al. Advances in low-voltage circuit breaker modeling[J]. J.phys.D:Appl.Phys., 2004, 37(4): 595-609.
- [13] Yos J. Revised transport properties for high temperature air and its components[R]. Avco Space Systems Division, Technical Release, 1967.
- [14] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [15] Gonzalez J J, Gleizes A. Mathematical modeling of a free-burning arc in the presence of metal vapor[J]. J.Appl.Phys., 1993, 74(5): 3065-3070.
- [16] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free-burning high-intensity argon arc[J]. J.Appl.Phys., 1983, 54(3): 1293-1301.

---

收稿日期: 2006-03-29。

作者简介:

杨茜(1977—), 女, 博士研究生, 主要从事低压断路器中电弧等离子体的研究, [yangqian@eyou.com](mailto:yangqian@eyou.com);

荣命哲(1963—), 男, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电弧与电接触理论、成套开关电器状态监测、电弧等离子体在环保中的应用;

吴翊(1975—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为低压断路器中电弧等离子体的研究。

(编辑 车德竞)