

# 一种仿真 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室气流场的新方法

高 飞, 桂美景, 张俊民

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 本文提出基于格子 Boltzmann 方法的一种仿真 SF<sub>6</sub> 断路器开断过程的新方法。以 252 kV 压气式 SF<sub>6</sub> 断路器为研究对象, 建立灭弧室气流场格子 Boltzmann 方程, 推导出气流场的格子 Boltzmann 模型。通过耦合触头机械运动的开断过程, 仿真得到灭弧室内气流场的变化规律, 将喷口上游和喉部的压力变化曲线与试验结果对比, 二者有较好的一致性。结果表明, 格子 Boltzmann 方法可以用于研究 SF<sub>6</sub> 断路器开断过程气流场的演变过程。

**关键词:** SF<sub>6</sub> 断路器; 格子 Boltzmann; 灭弧室; 气流场; 电弧仿真

**DOI:** 10.12067/ATEEE2006006

**文章编号:** 1003-3076(2021)04-0074-07

**中图分类号:** TM247

## 1 引言

高压 SF<sub>6</sub> 断路器是控制和保护电网安全运行的关键设备, 已广泛运用在高压、超高压和特高压系统中。作为高压开关的主导产品, 其发展水平在一定程度上, 反映一个国家电力工业输变电设备的发展水平<sup>[1]</sup>。以灭弧室中电弧模型、电弧动态特性的研究为基础, 利用数值计算和分析技术研究灭弧室中各种物理现象及其相互影响, 深入分析断路器的开断性能, 可提高设计水平, 缩短设计周期, 为新产品的研制创造条件。但由于断路器开断过程是一个十分复杂的物理、化学过程, 涉及电弧及其物理性质的变化, 受到气流及电磁场等高度耦合的非线性参数影响。电流开断现象还未彻底研究清楚, 电弧模型、电弧特性、灭弧室气流特性和开断性能等关键问题仍缺乏深入细致的研究<sup>[2-3]</sup>。因此, 对断路器开断过程的数值计算和电弧特性的研究仍然是一项十分有意义的工作。

国内外针对断路器电弧模型的研究已经开展多年, 从早期的 CASSIE 和 MAYR 电弧模型<sup>[4]</sup>, 70、80 年代的一维、二维电弧模型<sup>[5-7]</sup>, 90 年代后期的磁流体动力学 (Magneto Hydro Dynamics, MHD) 模型, 到近几年引起充分关注的双温度模型<sup>[8,9]</sup>, 电弧模型的研究在不断深入细化。根据上述电弧模型的仿真

研究工作也逐渐展开, 主要为建立以磁流体动力学 (MHD) 为基础且不断修正和完善的电弧模型, 应用 CFD 软件包开展对 SF<sub>6</sub> 断路器喷口电弧和开断过程数值模拟<sup>[10]</sup>, 在研究多个湍流模型对喷口电弧模拟的影响<sup>[11]</sup>、喷口内激波的产生及对电弧的影响<sup>[12]</sup>、电弧与气流的相互作用<sup>[13]</sup>、喷口材料烧蚀及其蒸汽的影响<sup>[14]</sup>、弧后介质恢复<sup>[15]</sup>、电流过零期间电弧特性<sup>[16]</sup>、频率和涡流对电弧运动的影响<sup>[17]</sup>、电弧等离子体的温度场和电流密度<sup>[18]</sup>、灭弧室电极结构设计<sup>[19]</sup>等方面取得了进展。

当前 SF<sub>6</sub> 断路器开断过程的仿真是在磁流体基本方程和电磁场方程控制下完成的, 属于宏观数值模拟方法。由于电弧模型、MHD 方程及湍流模型为十分复杂的非线性微分方程, 一般需要在商用计算流体力学软件平台上进行二次开发求解, 数值求解方法多为有限差分法、流体网格法、有限元法、有限体积法等, 这些方法的网格处理及计算过程, 需要耗费大量的时间, 求解过程十分复杂, 在客观上限制了断路器开断过程仿真工作的深入开展, 并且难以从微介观层面上深入研究和认识开断过程中 SF<sub>6</sub> 电弧的时空演化规律和熄弧机理。

格子 Boltzmann 方法 (LBM) 是近年来得到广泛关注和迅速发展的一种介观模拟方法, 它基于分子动理论而建立, 具有清晰的物理背景, 是沟通宏观和

**收稿日期:** 2020-06-02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51877004)

**作者简介:** 高 飞 (1996-), 女, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为电弧仿真;

张俊民 (1962-), 男, 北京籍, 副教授, 博士, 研究方向为断路器、开关柜、电弧等技术 (通讯作者)。

微观的桥梁。在许多传统模拟方法难以胜任的领域,如多相多组分流<sup>[20]</sup>、等离子射流<sup>[21]</sup>、悬浮颗粒流<sup>[22]</sup>、氩弧等离子体焊接<sup>[23]</sup>、工程传热与湍流计算<sup>[24]</sup>等领域发挥着越来越重要的作用,成为研究流体力学的一种新方法。

本文采用 LBM 研究 SF<sub>6</sub> 断路器开断过程中灭弧室内气流场的演变规律。首先建立基于 LBM 的气流场方程,根据 D2Q9 模型对该方程中速度、时间和空间进行离散,得到气流场的二维格子 Boltzmann 模型;然后通过编程仿真断路器的开断过程,得到灭弧室内速度和压强演化规律,并与试验结果进行了比较。这是一项全新的建模和仿真工作,尚未见到国内外相关研究成果的报道。

## 2 数学模型

### 2.1 灭弧室气流场格子 Boltzmann 方程

灭弧室气流场的 Boltzmann 表达式如下:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla f = \Omega(f) \quad (1)$$

式中,  $f=f(x, v, t)$  为 SF<sub>6</sub> 粒子在  $t$  时刻的速度分布函数,  $x=(x, r)$  为位置矢量,  $v$  为微观速度矢量;  $\nabla = \partial_x x + \partial_r r$ ;  $\Omega(f)$  为分子间的碰撞算子。

式(1)可用 Lattice-Bhatnagar-Gross-Krook (LB-GK)<sup>[25]</sup>模型近似表示为:

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = \frac{-[f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)]}{\tau} - \frac{v}{r} f_i(x, t) \quad (2)$$

式中,  $e_i$  为格子系统内迁移速度;  $\tau = \frac{v_{cof}}{\theta_s^2} + 0.5$  为无量纲松弛时间,  $\theta_s$  为单位格速,  $v_{cof}$  为流体的运动黏性系数;  $f^{eq}$  为 SF<sub>6</sub> 粒子的平衡分布函数。

在 LBGK 模型中,应用最广泛的是由 Qian<sup>[26]</sup>等人提出 DdQq 系列模型。其中  $d$  代表空间维数,  $q$  代表离散速度数目。二维格子 Boltzmann 模型常用为 D2Q4、D2Q5 和 D2Q9。本文灭弧室视为轴对称的圆柱体,为保证模型的对称性、宏观的同向性和不可压 NS 方程中速度对压力的独立性,采用 D2Q9 模型对灭弧室气流场进行离散。

D2Q9 模型的构造如图 1 所示, SF<sub>6</sub> 粒子具有 9 个方向。

把节点上的粒子分为三种,静止粒子( $i=0$ )、在正交方向运动的粒子( $i=1, 2, 3, 4$ )和在对角线方向运动的粒子( $i=5, 6, 7, 8$ )。它们的速度分别定义为

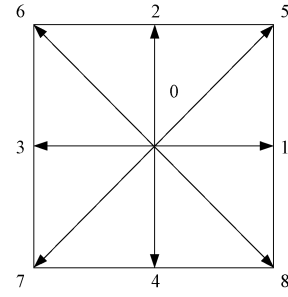


图 1 D2Q9 模型

Fig.1 D2Q9 model

$$e_i = \begin{cases} (0, 0) & i=0 \\ \left[ \cos \frac{(i-1)\pi}{2}, \sin \frac{(i-1)\pi}{2} \right] \theta_s & i=1, 2, 3, 4 \\ \sqrt{2} \left[ \cos \frac{(2i-1)\pi}{4}, \sin \frac{(2i-1)\pi}{4} \right] \theta_s & i=5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (3)$$

D2Q9 平衡分布函数由式(4)给出:

$$f_i^{eq} = \omega_i \rho \left[ 1 + \frac{e_i u}{\theta_s^2} + \frac{(e_i u)^2}{2\theta_s^4} - \frac{u^2}{2\theta_s^2} \right] \quad (4)$$

$$\omega_i = \begin{cases} 4/9 & i=0 \\ 1/9 & i=1, 2, 3, 4 \\ 1/36 & i=5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\omega_i$  为权重系数,与离散速度方向的矢量长度有关;  $u$  为粒子宏观速度。

在 LBM 方法中,通过分布函数与宏观变量之间的关系,所以可通过流场分布函数求出开断过程中灭弧室内 SF<sub>6</sub> 粒子的宏观密度  $\rho$ 、宏观速度  $u$  等参数如下:

$$\begin{aligned} \rho &= \sum_i f_i \\ \rho u &= \sum_i e_i f_i \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.2 无量纲化处理

在实际物理问题的数值模拟中,通常采用两种方法进行数据预处理,一是直接用实际物理单位计算,二是采用归一化的无量纲形式计算。为了编程和计算简便,本文采用后者。

计算过程中格子单位下的长度、密度、声速和时间分别表示为  $L, \rho, \theta_s$  和  $t$ , 实际物理单位下长度、密度、声速和时间分别表示为  $L', \rho', \theta_s'$  和  $t'$ , 其他物理量可以通过这些物理量之间的转换得到。格子单位与物理单位间的转换系数  $L_r, \rho_r, u_r, t_r$  分别表示为:

$$L_r = \frac{L'}{L} \quad (7)$$

$$\rho_r = \frac{\rho'}{\rho} \quad (8)$$

$$u_r = \frac{\theta'_s}{\theta_s} \quad (9)$$

$$t_r = \frac{L_r}{u_r} \quad (10)$$

格子模型中  $L$ 、 $\rho$ 、 $\theta_s$  是已知的, 实际物理量  $L'$ 、 $\rho'$  可通过灭弧室物理模型得到。  $\theta'_s = \sqrt{k_B T_s / m_s}$ 。由宏观雷诺数和格子雷诺数相等可得:

$$\text{Re} = \frac{uL}{\nu_{\text{coe}}} = \frac{u'L'}{\nu'_{\text{coe}}} \quad (11)$$

可得到运动黏性系数  $\nu_{\text{coe}}$  的转换系数  $\nu_{\text{coer}}$  可表示为:

$$\nu_{\text{coer}} = L_r u_r \quad (12)$$

由  $p = \theta_s^2 \rho$ , 可得压力的转换系数  $p_r$  表示为:

$$p_r = u_r^2 \rho_r \quad (13)$$

### 3 灭弧室气流场模拟

本文以 252 kV 压气式 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室区域为研究对象, 其喷口的计算区域如图 2 所示。

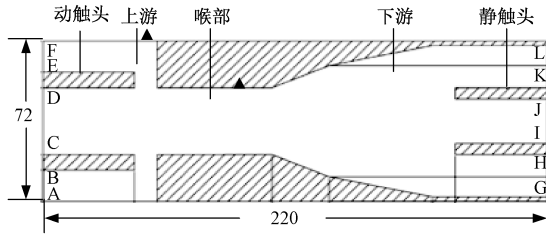


图 2 灭弧室计算区域

Fig.2 Arc extinguisher calculation area

如图 2 所示计算区域中, AB、EF 为气流的入口, LK、HG 为气流出口, CD 和 IJ 分别为动、静触头内部空心区域的气体出口, 喷口上游、喉部和下游如图所示。计算区域尺寸为 220 mm×72 mm, 在仿真中将其划分为 220×72 个网格, 每一小格为 1 mm, 网格交点为计算节点。

灭弧室填充 SF<sub>6</sub> 气体, 初始条件为: 气压为 0.7 MPa, 温度为 300 K, 速度为零。宏观边界条件为气流入口为压气室压力, 其增压随时间变化如图 3 所示; 气流出口为初始压力。固体边壁上的速度为零, 轴对称边界上的径向速度为零。LBM 模型下边界条件: 入口、出口和动、静触头空心区域出口采用压力边界条件, 固体边壁采用反弹格式, 具体方法参考文献[26,27]。

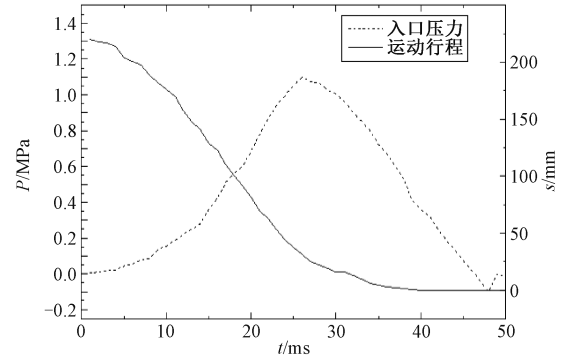


图 3 入口压力和触头运动行程随时间的曲线

Fig.3 Time-varying curve of inlet pressure and contactor travel

在断路器中, 实际运动是动触头与压气缸活塞同时运动。为了计算简便, 根据相对运动原理, 本文将运动处理成静触头运动, 其运动行程变化过程如图 3 所示。

灭弧室气流场仿真过程如图 4 所示。对气流场进行模拟时, 先根据特征流速, 算出雷诺数, 计算出相应的粘性系数, 得到松弛时间。然后通过 LBGK 方程, 给定边界及其内部速度、压强和温度等初始条件, 确定各节点的平衡分布函数, 进行碰撞、迁移运算。最后, 再结合边界条件, 输出各节点的速度、密度、压强和温度, 判断是否收敛。收敛则继续运算, 直到达到时间步数要求; 不收敛则结束运算, 调整相关参数。总之, 相比于传统的数值计算方法, 划分相同的格子数, LBM 仿真需要的计算时间比较短, 效率提高近 50%。

### 4 计算结果与分析

对空载开断过程气流场计算结果进行分析时, 根据动静弧触头及喷口位置的变化, 将气流特性变化分为具有代表性的三个时刻, 即触头分离初期、喷口打开后和喷口打开后期阶段。三个代表性时刻喷口气流场的速度矢量图与压力变化如图 5 所示, 其中压力变化图单位为 Pa, 速度矢量图中箭头的长短代表流速的大小, 箭头方向代表气流运动的方向。

分析开断过程不同时刻气流场可以看出, 从动静弧触头分离到主喷口打开前, 这个过程在 10~16 ms 之间 (见图 3)。由于主喷口仍被静弧触头封闭着, 来自压气室的气体进入动静弧触头之间的区域, 形成压力较高而流速很低的滞止区, 使喷口上游和喉部压力迅速增大, 此时气流通过空心动静触头流出, 达到横向吹弧的目的。在主喷口打开前, 由图 5

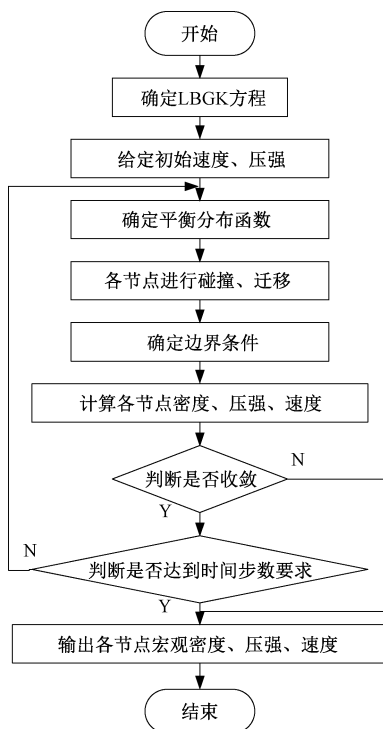


图4 灭弧室气流场仿真过程

Fig.4 Simulation process of air flow field in arc extinguishing chamber

(a)可知,喷口上游和喉部区一直保持较高的压力,为下阶段积累纵向吹弧能量。

主喷口刚打开至触头运动结束在 17~40 ms 之间,喷口上游和喷口喉部由于前阶段积聚的能量和压气室的压力作用,在主喷口打开的 1 ms 时间内,喉部上游增压瞬间达到峰值约为 1.054 MPa。随着触头开距达到最大,喷口气体完全释放,上游气压逐渐下降,最终恢复基压状态。

图 6、图 7 分别给出了空载开断过程灭弧室喷口上游和喷口喉部的压力测试和 LBM 的仿真结果的对比曲线,图 6 和图 7 中的压力为增压,通过在灭弧室内部相应测试点处铺设压力传感器,将压力数据传出测得,测试点如图 2 中三角形标记所示。

在空载开断情况下,忽略了电弧的影响,喷口上游与压气室连接较近,因此,喷口上游压力与压气室压力相似,但略低于压气室压力。喷口上游压力的 LBM 仿真结果与试验测试结果曲线基本吻合。

图 7 中喉部压力在 14 ms 前由于静弧触头挡住测试位置,压力维持不变;之后,在静弧触头与主喷口分离前,喷口喉部压力迅速上升,且在 18 ms 时压力增至最大;当主喷口打开后压力开始下降。在 20~38 ms 时段内 LBM 仿真压力比试验压力下降缓慢

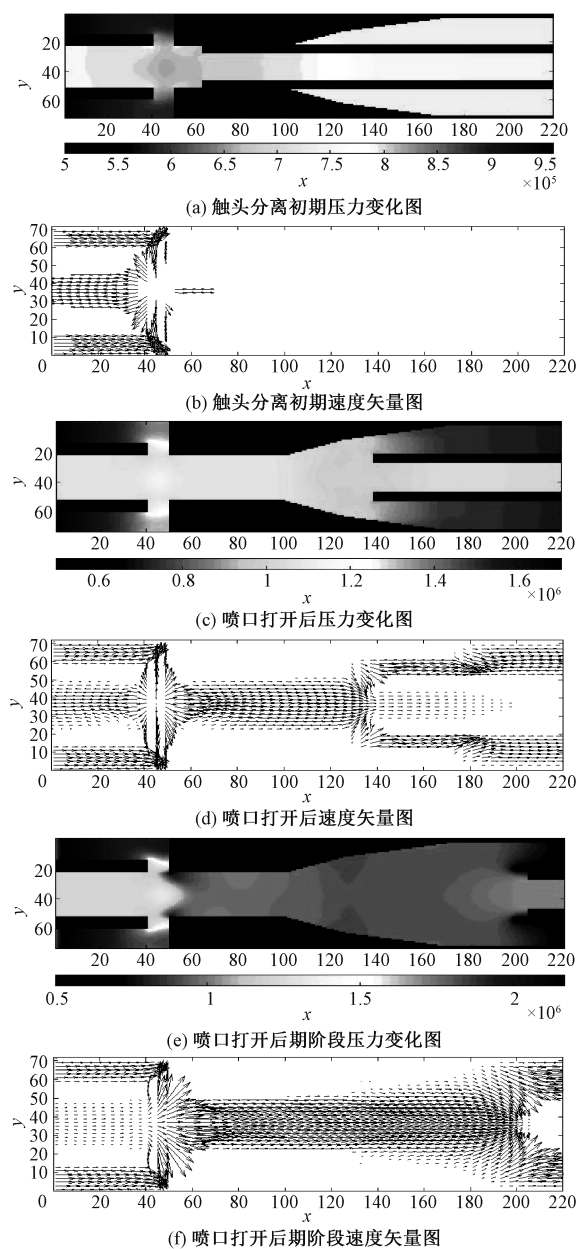


图5 空载开断过程气流场

Fig.5 Airflow field during no-load breaking process

且波动大,二者误差较大。误差产生的主要原因是喷口下游扩张区的固壁边界是复杂的弧状曲面和斜面组成,而 LBM 方法在处理如喷口等复杂的曲面边界问题易产生不稳定解,所以本文把弧状喷口边界近似为直线状,这可能导致喷口下游扩张角产生一定的误差。另外,固壁边界采用的反弹格式只有一阶精度,对于计算如主喷口打开后这种剧烈变化的气流,也会有较大的误差,但喷口喉部压力的整体变化趋势和试验测试结果相吻合。

LBM 仿真结果与试验测试结果最大压力比较见表 1。



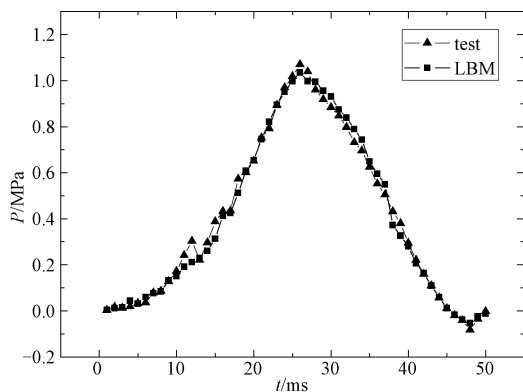


图 6 喷口上游压力对比图

Fig.6 Comparison chart of pressure upstream of nozzle

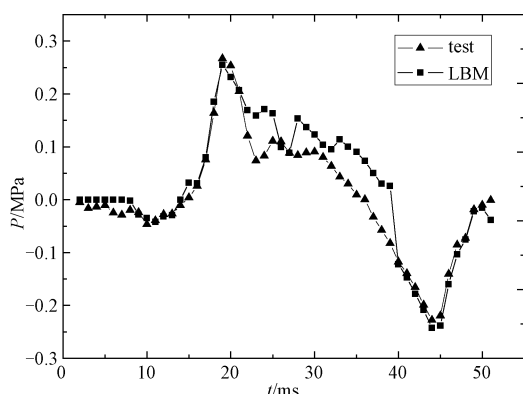


图 7 喷口喉部压力对比图

Fig.7 Comparison chart of pressure at throat of nozzle

表 1 252 kV 断路器开断过程压力试验测量  
与仿真结果比较

Tab.1 Comparison of pressure test measurement and  
simulation results during 252 kV circuit breaker breaking

测量点位置	最大压力 /MPa	最大压力行程 /mm
试验测量喷口上游	1.77	188
试验测量喷口喉部	0.966	119
LBM 仿真计算喷口上游	1.735	188
LBM 仿真计算喷口喉部	0.954	119

对比表 1 中,LBM 仿真计算的喷口上游压力最大值比试验测量压力小 0.035 MPa,误差为 1.98%,行程相等;喷口喉部压力比试验压力小 0.012 MPa,误差为 1.24%,行程相同。可见,LBM 仿真与试验测试的压力结果数据基本吻合,证明了采用 LBM 方法对 SF<sub>6</sub> 断路器空载开断过程建模和仿真的正确性。

## 5 结论

本文采用 LBM 方法仿真 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室空载开断过程气流场变化规律。首先建立灭弧室气流场格子 Boltzmann 方程,推导出气流场的 LBGK 模型,再确定模型初始条件和边界条件,建立 LBM 仿真算法。通过 LBM 仿真计算得出开断过程灭弧室气流场的变化规律;并将压力仿真结果与试验测试结果对比,虽然存在一定的误差,但其大小及变化比较吻合。结果表明 LBM 方法可应用于仿真 SF<sub>6</sub> 断路器空载开断过程。相比传统的有限元、有限体积法,LBM 方法在计算编程和处理复杂边界问题上,计算简单,易于并行和多物理场耦合,但目前在仿真断路器的开断过程方面尚处在探索阶段,有待于进一步的研究。

## 参考文献 (References):

- [1] 林莘,狄谦,韩书谟 (Lin Xin, Di Qian, Han Shumo). 252 kV SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室压力特性试验研究 (Research of pressure feature test in arc-quenching chamber of 252 kV SF<sub>6</sub> circuit breaker) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2008, 28 (15): 130-135.
- [2] 王伟宗,荣命哲, YAN J D, 等 (Wang Weizong, Rong Mingzhe, YAN J D, et al.). 高压断路器 SF<sub>6</sub> 电弧电流零区动态特征和衰减行为的研究综述 (Investigation of the dynamic characteristics and decaying behavior of SF<sub>6</sub> arcs in high voltage circuit breakers during current-zero period: A review) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (8): 2059-2072.
- [3] Zhang Junmin, Lu Chunrong, Guan Yonggang, et al. Calculation of nozzle ablation during arcing period in an SF<sub>6</sub> auto-expansion circuit breaker [J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18 (5): 506-511.
- [4] 王其平 (Wang Qiping). 电器电弧理论 (Electric arc theory) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: Machinery Industry Press). 1991.
- [5] Lowke J J, Ludwig H C. A simple model for high current arcs stabilized convection [J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46 (8): 3352-3360.
- [6] Hermann W, Kogelschatz U, Niemeier L, et al. Experimental and theoretical study of stationary high current arc in a supersonic nozzle flow [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1974, 7 (12): 1703-1722.

- [7] 荣命哲, 刘定新, 李美, 等 (Rong Mingzhe, Liu Dingxin, Li mei, et al.). 非平衡等离子体的仿真研究现状与新进展 (Research status and new progress on the numerical simulation of non-equilibrium plasmas) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (4): 271-282.
- [8] Bhigamudre V G, Trelles J P. Investigation of flow regimes in arc plasma-gas interactions using a two-temperature arc in crossflow model [J]. Physics of Plasmas, 2020, 27 (2), DOI: 10.1063/1.5113772.
- [9] Swanson B W, Roidt R M. Boundary layer analysis of an SF<sub>6</sub> circuit breaker arc [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1971, 90 (3): 1086-1093.
- [10] Yan J D, Fang M T C, Hall W. The development of PC based CAD tools for autoexpansion circuit breaker design [J]. Transactions on Power Delivery, 1999, 14 (1): 176-181.
- [11] Yan J D, Nuttall K I, Fang M T C. A comparative study of turbulence models for SF<sub>6</sub> arcs in a supersonic nozzle [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32 (12): 1401-1406.
- [12] Fang M T C, Kwan S, Hall W. Arc-shock interaction inside a supersonic nozzle [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996, 24 (1): 85-86.
- [13] Jiang X, Li X W, Zhao H, et al. Analysis of the dielectric breakdown characteristics for a 252 kV gas circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (3): 1592-1599.
- [14] Zhang J L, Yan J D, Fang M T C. Electrode evaporation and its effects on thermal arc behavior [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32 (6): 1352-1361.
- [15] Lin X, Wang F M, Xu J Y, et al. Study on the mathematical model of dielectric recovery characteristics in high voltage SF<sub>6</sub> circuit breaker [J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18 (3): 223-229.
- [16] Lu Y, Guo J, Jiang X. Simulation study on current-zero period phenomenon and analyse of high voltage gas circuit breaker [A]. 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) [C]. 2019. 19249942.
- [17] Yin J, Wang Q, Li X, et al. Numerical study of influence of frequency and eddy currents on arc motion in low-voltage circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8 (8): 1373-1380.
- [18] 胡辉, 杨旗, 包斌, 等 (Hu Hui, Yang Qi, Bao Bin, et al.). 基于 ANSYS 的空气电弧放电等离子体温度数值模拟 (Numerical simulation of arc plasma temperature based on ANSYS) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2009, 28 (2): 20-23, 28.
- [19] 刘东晖, 王季梅 (Liu Donghui, Wang Jimei). 新型的 126 kV 真空灭弧室电极结构的磁场计算及分析 (Magnetic field calculation and its analysis for new type of 126kV vacuum interrupter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2003, 22 (3): 73-76.
- [20] 许爱国, 张广财, 李英骏, 等 (Xu Aiguo, Zhang Guangcai, Li Yingjun, et al.). 非平衡与多相复杂系统模拟研究—Lattice Boltzmann 动理学理论与应用 (Modeling and simulation of nonequilibrium and multi-phase complex systems -Lattice Boltzmann kinetic theory and application) [J]. 物理学进展 (Progress in Physics), 2014, 34 (3): 136-167.
- [21] 胡盛德, 张海鸥, 夏卫生, 等 (Hu Shengde, Zhang Haiou, Xia Weisheng, et al.). 基于格子玻耳兹曼的等离子体射流中粉末热运动数值模拟 (Numerical simulation of powder heating and moving in plasma jet by lattice boltzmann method) [J]. 计算力学学报 (Chinese Journal of Computational Mechanics), 2007, 24 (4): 403-407.
- [22] Wan Gang, Jin Yong, Li Haiyuan, et al. Study on free surface and channel flow induced by low-temperature plasma via lattice boltzmann method [J], Plasma Science and Technology, 2016, 16 (3): 331-336.
- [23] Kima Yong-Jun, Luo Kang, Li Tae-Nam, et al. Double distribution function lattice Boltzmann modeling for energy transport in the DC argon arc plasma [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 70: 59-65.
- [24] 宣益民, 余凯, 吴轩, 等 (Xuan Yimin, Xu Kai, Wu Xuan, et al.). 基于 Lattice Boltzmann 方法的纳米流体流动与传热分析 (Flow and heat transfer simulation of nanofluids with lattice-boltzmann method) [J]. 工程热物理学报 (Journal Engineering Thermophysics), 2004, 26 (6): 1022-1024.
- [25] Qian Y H, Dhumieres D, Lallemand P, et al. Lattice BGK method foy naiver-stokes equation [J]. Euro physics Letter, 1992, 17 (6): 479-484.
- [26] 穆罕默德·阿卜杜勒马吉德 (Mohamad A A). 格子玻耳兹曼方法—基础与工程应用 (附计算机代码) (Lattice Boltzmann method fundamentals and engineering applications with computer codes) [M]. 北京: 电子工业出版社 (Beijing: Electronic Industry Press), 2015.
- [27] 凌凤如, 张超英, 陈燕雁, 等 (Ling Fengru, Zhang Chaoying, Chen Yanyan, et al.). LBM 中基于半程反

弹的统一边界条件研究 (A unified boundary condition based on the halfway bounce-back scheme in lattice boltzmann method) [J]. 广西师范大学学报 (自然科学

版) (Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition) ), 2020, 38 (1): 70-78.

## New method to simulate the airflow field of SF<sub>6</sub> circuit breaker

GAO Fei, GUI Mei-jing, ZHANG Jun-min

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

**Abstract:** This paper presents a new method for simulating the breaking process of SF<sub>6</sub> circuit breaker based on lattice Boltzmann method. Taking the 252kV gas-filled SF<sub>6</sub> circuit breaker as the research object, the lattice Boltzmann equation of the gas flow field in the arc-extinguishing chamber is established, and the lattice Boltzmann model of the gas flow field is derived. Through the coupling process of the mechanical movement of the contact, the variation of the airflow field in the arc extinguishing chamber is simulated, and the pressure change curve upstream of the nozzle and the throat is compared with the test results. The two have good consistency. The results show that the lattice Boltzmann method can be used to study the evolution of the airflow field during the SF<sub>6</sub> circuit breaker breaking process.

**Key words:** SF<sub>6</sub> circuit breaker; lattice Boltzmann; arc extinguishing chamber; air flow field; arc simulation;