

SF₆高压断路器喷口中的湍流及其对介质恢复特性的影响

关盛楠, 王尔智, 刘海峰, 李莉, 曹云东
(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省沈阳市 110023)

Turbulent Flow and Its Influence on Dielectric Recovery Property in Arc Nozzle of SF₆ High Voltage Circuit Breaker

GUAN Sheng-nan, WANG Er-zhi, LIU Hai-feng, LI Li, CAO Yun-dong

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: In fluid mechanics, the complex flow path will lead to a birth of turbulent flow. Therefore, the nozzle contour of circuit breaker affect directly the production and development of the turbulent flow in blowing gas flow. Various turbulent flow models and nozzle contours have been chosen in numerical simulation to analyze the influences on controlling effect on gas flow and dielectric strength recovery properties, which are caused by turbulent flow, from macro viewpoint. The results show that the gas flow is represented as laminar flow in flat nozzle contour and turbulent flow in scraggling nozzle contour; The development of turbulent flow is good for the control effect of super-sound velocity gas flow and the dielectric strength recovery properties.

KEY WORDS: SF₆ circuit breaker; nozzle; turbulent flow; dielectric strength recovery property

摘要: 在流体力学中, 当流体遇到流路复杂的情况会产生湍流。断路器喷口的形状结构对吹弧气体中湍流的产生和发展具有最直接的影响。该文从宏观角度, 选择不同的湍流模型, 在改变喷口型面结构下, 通过数值模拟, 分析湍流的产生及湍流对SF₆高压断路器吹弧气体流动及介质恢复特性的影响。光滑喷口壁面吹弧气体的流动表现为层流; 凸凹不平的喷口壁面吹弧气体的流动表现为湍流; 对存在有湍流的不同喷口, 湍流发展得越充分, 越有利于控制超音速流的发展, 从而有利于提高介质强度恢复速度。

关键词: SF₆断路器; 喷口; 湍流; 介质恢复特性

0 引言

自然界和工程问题中的流体运动大多表现有湍流。由于湍流运动极其复杂, 具有不稳定性、

随机性、非线性以及变化急剧等特征^[1], 一个多世纪以来, 人们花费大力气通过不同的假设或近似去研究湍流的运动规律, 取得了丰富的研究成果, 形成了研究湍流的不同方法。这些方法中, 普遍应用的是在N-S方程基础上, 采用时间平均法把湍流运动看作由时间平均运动和瞬时脉动运动2个运动叠加而成^[2]。在湍流的数值模拟方法上有直接数值模拟法^[3-4]、大涡模拟法^[5-8]、零方程模型法^[9-10]、一方程模型法^[11-12]、 $k-\varepsilon$ 两方程模型法等。其中 $k-\varepsilon$ 两方程模型法是目前对流体运动数值模拟湍流的方法中使用最为普遍的方法。针对问题的不同性质, $k-\varepsilon$ 模型法又派生出多种 $k-\varepsilon$ 法^[13-15]。

在SF₆高压断路器流场的数值模拟中, 考虑湍流影响时, 基本上采用的是 $k-\varepsilon$ 两方程模型^[16-17]。但是, 喷口结构对湍流的形成及湍流对SF₆高压断路器开断过程中吹弧气体流动和介质恢复特性影响的研究经文献检索, 尚未见有关报导。

本文从宏观的角度, 以252和550kV SF₆高压断路器开断过程中吹弧气体的流动规律及介质恢复特性为研究对象, 利用前人的研究成果有针对性地选择不同的湍流模型, 并改变喷口结构, 通过数值模拟研究湍流的形成, 以及湍流对吹弧气体流动及对介质恢复特性的影响。研究结果对SF₆断路器气流场介质恢复特性的数值模拟以及喷口的优化设计具有参考意义。

1 湍流数学模型

目前对湍流的模拟已形成多种数学模型, 对SF₆断路器气流场的数值模拟应用较多的是N-S方

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477050)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50477050).

程加 k - ε 方程,即

非定常可压缩 N-S 方程

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_I}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial y} + \mathbf{S}_I = \frac{\partial \mathbf{F}_V}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_V}{\partial y} + \mathbf{S}_V \quad (1)$$

k - ε 二方程模型

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{D}_I}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{H}_I}{\partial y} + \mathbf{L}_I = \frac{\partial \mathbf{D}_V}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{H}_V}{\partial y} + \mathbf{L}_V + \mathbf{L} \quad (2)$$

对 N-S 方程

$$\mathbf{U} = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho e]^T$$

$$\mathbf{F}_I = [\rho u \quad \rho u^2 + p \quad \rho uv \quad \rho v(e + p/\rho)]^T$$

$$\mathbf{G}_I = [\rho v \quad \rho uv \quad \rho v^2 + p \quad \rho v(e + p/\rho)]^T$$

$$\mathbf{F}_V = [0 \quad \tau_{xx} \quad \tau_{xy} \quad u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + \lambda \partial T / \partial x]^T$$

$$\mathbf{G}_V = [0 \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yy} \quad u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + \lambda \partial T / \partial y]^T$$

$$\mathbf{S}_I = \alpha / y [\rho u \quad \rho uv \quad \rho v^2 \quad \rho v(e + p/\rho)]^T$$

$$\mathbf{S}_V = \frac{\partial}{\partial y} [0 \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yy} - \tau_{\theta\theta} \quad u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + Q]^T$$

式中: ρ , p , T 分别为气体密度, 压力和温度; u , v 分别为气体轴向速度和径向速度; Q 为考虑电弧影响的源项, 空载开断下 $Q=0$; e 为单位质量的总内能, $e=C_V T + \frac{u^2 + v^2}{2}$; C_V 为气体定容比热系数; τ_{ij} 为

粘性张量的各个分量, $\tau_{xx} = \mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$,

$\tau_{yy} = \mu \left(\frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$, $\tau_{\theta\theta} = \mu \left(-\frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$,

$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$; λ 为导热系数; R 为气体常数;

β 为修正系数, 与气体温度有关, 空载开断下 $\beta=1$ 。

对 k - ε 二方程

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \rho K \\ \rho \varepsilon \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_I = \begin{bmatrix} \rho K u \\ \rho \varepsilon u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_I = \begin{bmatrix} \rho K v \\ \rho \varepsilon v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_V = \begin{bmatrix} \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \\ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_V = \begin{bmatrix} \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \\ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_I = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho k v \\ \rho \varepsilon v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_V = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \\ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} P - \rho \varepsilon \\ (C_1 P - C_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{K} \end{bmatrix}, \quad P = -\frac{2}{3} \rho \cdot k \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\alpha}{y} v \right) -$$

$$\frac{2}{3} \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\alpha}{y} v \right)^2 + 2 \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{\alpha}{y^2} v^2 \right] +$$

$$\mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2.$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍能耗散率; μ_t 为湍流粘性, 由下式给出:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: $C_\mu=0.09$; $C_1=1.44$; $C_2=1.92$; $\sigma_k=1.0$; $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

2 数值模拟及湍流对气体流动和介质恢复特性影响的研究

湍流可看作由大尺度涡旋和小尺度涡旋叠加而成, 分别形成流体低频脉动和高频脉动。对湍流的高频脉动的数值模拟: 一是要求剖分网格非常细密, 例如对 SF₆ 断路器灭弧室 (100 mm×100 mm) 计算网格节点要求多达 10¹⁰ 之多, 在普通计算机上不可能实现; 二是高频脉动对 SF₆ 断路器气体流动的宏观影响较小, 因此本文不予以考虑。对低频脉动分量, 最好是用大涡模型, 但需在三维下进行数值模拟, 由于普通计算机的资源有限, 加上耗时巨大, 也很难实现。考虑到湍流是由于内、外界的扰动而产生的, 并且湍流的理论已证明, 二维扰动较三维扰动更易于使气体的流动失去稳定性^[1], 加之考虑到计算机的资源有限, 因此本文的数值模拟是在二维下进行的。

其次, 考虑到湍流的复杂性, 尽管本课题组已开发出用于对 SF₆ 断路器气流场进行数值模拟的计算软件 (有限体积加 TVD 格式), 为使对湍流及其影响的数值模拟更具说服力, 本文采用计算流体软件 Fluent 经二次开发再与本课题组所开发的电场数值计算和液压操动机构数值计算的软件相结合为平台, 对湍流及其影响进行研究。

(1) 喷口结构与湍流的形成。

本文以 252 kV, 50 kA 的压气式 SF₆ 断路器的喷口为研究对象。首先对 252 kV SF₆ 断路器喷口下游: ① 仰角为 21.4°, 长为 71 mm; ② 两段式喷口: 仰角分别为 21.4°、10.4°, 长度分别为 58、58 mm; ③ 仰角为 10.4°, 长度为 116 mm, 3 种光滑壁面的喷口结构 (见图 1(a)~3(a)), 采用 N-S 加 k - ε 方程进行数值模拟, 求得的介质恢复特性如图 1(b)~3(b) 所示, 图中虚线表示层流下的介质恢复特性, 实线表示在数值模拟中加入湍流模型后的介质恢复特性。从数值模拟结果看, 对光滑壁面的喷口结构, 加入湍流模型后的介质恢复特性远不如层流下的介质恢复特性。这说明光滑壁面的喷口结构的气体流动表现为层流流动, 加上湍流模型反而不能真实地反映气体的流动规律。最能说明问题的是国外某公司

的SF₆断路器产品，其灭弧室对气流的控制卓有成效，它的喷口即为图 2 的两段式结构，如果其空载介质恢复特性如图 2 的实线所示，它不可能具有良好的开断性能。文献[18]中对湍流的实验研究成果也说明：光滑壁面的流道，流体流动表现为层流(见后面的分析)。这也从另一方面证明光滑的喷口壁面气体流动主要表现为层流的客观事实。在本论文的研究中，除选择湍流的k-ε模型外，还用零方程、一方程的湍流模型进行研究，所得结果大致相同。

改变喷口型面，设置局部“放-收”结构，使喷口下游变成凸凹不平的壁面，对湍流的影响进行研究：①对两段式喷口，在接近喉部处设置一个“放-收”结构，如图 4(a)；②对仰角为 10.4°，下游长

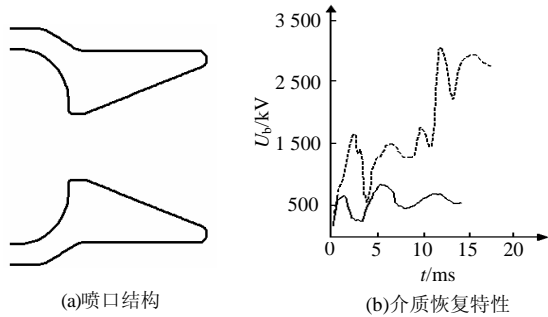


图 1 仰角为 21.4°，长为 71 mm 的喷口及其介质恢复特性
Fig. 1 Arc nozzle with 21.4° angle of elevation, 71 mm length and its dielectric recovery property

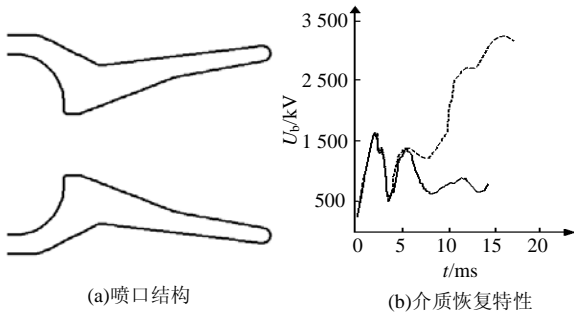


图 2 两段式的喷口及其介质恢复特性
Fig. 2 Arc nozzle with “two-segment” contour and its dielectric recovery property

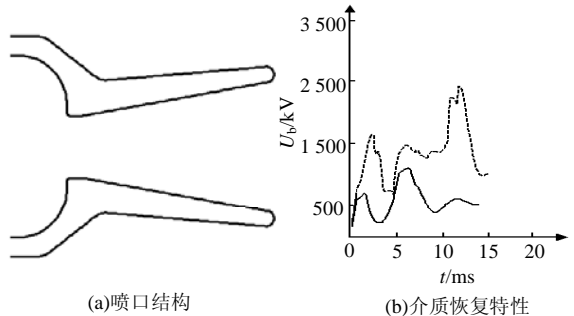


图 3 仰角为 10.4°，长为 116 mm 的喷口及其介质恢复特性
Fig. 3 Arc nozzle with 10.4° angle of elevation, 116 mm length and its dielectric recovery property

为 92.59 mm 的喷口，在接近喉部处设置 2 个“放-收”结构，如图 5(a)；③对仰角为 10.4°，下游长度为 92.59 mm 的喷口，分别在接近喉部和接近出口处各设置一个“放-收”结构，如图 6(a)；④550 kV 单断口SF₆断路器具有 3 个“放-收”的喷口结构，如图 7(a)。对上述 4 种喷口型面结构，利用N-S方程加k-ε方程及电场数值计算模型，以 2 mm 为步距，在 200 mm 全开距(252kV)和 260 mm 全开距(550 kV)下进行介质恢复特性的数值模拟，其结果如图 4(b)~7(b)所示。

比较图 1(b)~3(b)与图 4(b)~7(b)可以看出，喷口下游凸凹不平的壁面，其湍流下的介质恢复特性较光滑壁面的介质恢复特性大为提高，说明在喷口下游设置“放-收”结构会使气体流动由层流转为湍流。从宏观上看，这一结构是易于理解的，正像在河道存在有凸凹不平的河底时，水流流经凹陷处一定会产生涡旋一样。德国学者 Feindt E.G.在文献[18]中对如图 8 “收-放”管的中心圆柱上均匀地粘固以小砂堆，研究小砂堆高度对流体流动的影响。得出了“收-放”管的中心圆柱体为光滑柱面时，流体

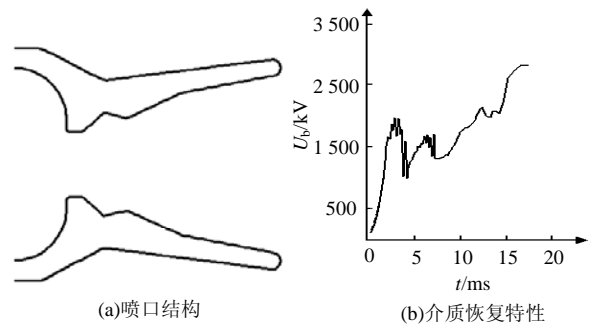


图 4 两段式设置一个“放-收”结构的喷口及其介质恢复特性

Fig. 4 Arc nozzle with “two-segment” and a local “divergence-convergence” contour and its dielectric recovery property

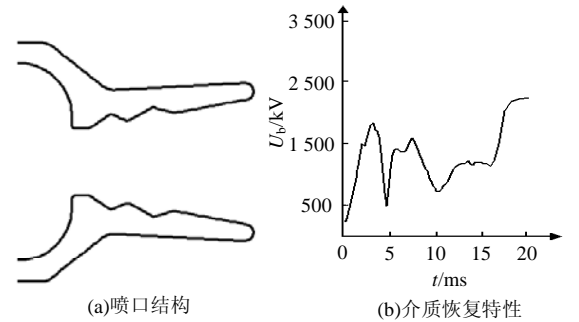


图 5 仰角为 10.4°，长为 92.59 mm，在喷口前部设置 2 个“放-收”结构的喷口及其介质恢复特性
Fig. 5 Arc nozzle with 10.4° angle of elevation, 92.59 mm length and two local “divergence-convergence” contour at forefront of nozzle and its dielectric recovery property

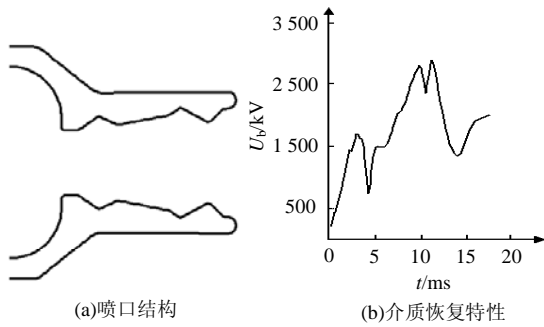


图6 仰角为10.4°, 长为92.59mm, 在喷口前后各设置1个“放-收”结构的喷口及其介质恢复特性

Fig. 6 Arc nozzle with 10.4° angle of elevation, 92.59 mm length and two local “divergence-convergence” contour at front and back of nozzle and its dielectric recovery property

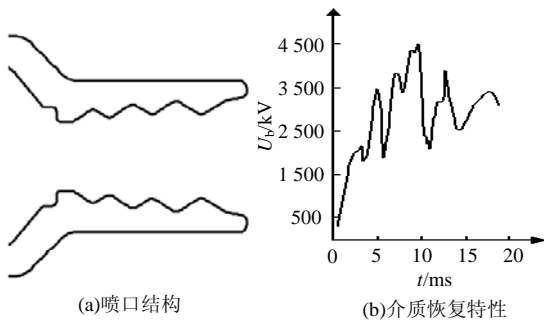


图7 具有三级“放-收”结构的550 kV SF₆ 断路器喷口及其介质恢复特性

Fig. 7 Arc nozzle with three local “divergence-convergence” contour of 550 kV SF₆ circuit breaker and its dielectric recovery property

的流动表现为层流, 而壁面越粗糙即砂堆越高, 由层流转换为湍流的临界雷诺数越低, 也就是砂堆越高越容易从层流转化为湍流。带有局部“放-收”结构的喷口情况与该研究结果十分类似, 只是凸凹不平的壁面是在喷口的壁面上形成的。

由图4~7还可看出, 局部“放-收”结构的数量和位置不同, 其湍流对介质恢复特性的影响也不同, 这表明湍流一旦形成有一个发展过程。图7中550 kV 断路器的喷口结构, 3个“放-收”结构均匀地分配在喷口下游型面上, 气体流经喷口使湍流得到充分发展。图6中252kV 断路器的喷口, 2个局部“放-收”结构分别设置在喷口下游的两侧时的湍流要比2个局部“放-收”结构设置在喉部附

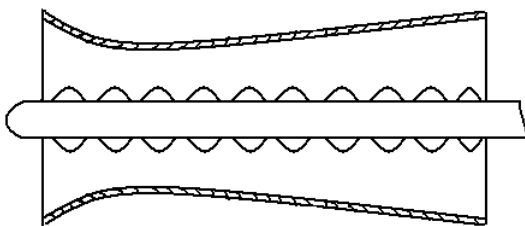


图8 中心圆柱上粘固以小砂堆的“收-放”管
Fig. 8 “Divergence-convergence” nozzle with small sand hills on its mandril

近时湍流发展得充分, 因为两“放-收”结构相邻设置在喉部附近时, 湍流形成后向喷口出口方向流动时会因壁面光滑无阻力而逐渐削弱。由图5(b)与图6(b)湍流下的介质恢复特性比较可见, 湍流发展得越充分, 越有利于提高介质恢复特性。

(2) 湍流对气体流动及介质恢复特性的影响。

由图4(a)~7(a)喷口结构的气流场的数值模拟发现, 几乎在所有开断行程下: 湍流的存在使喷口内局部区域的流速增高, 压强和密度降低, 但能抑制气流整体流速。现仅以图2(a)和图4(a)的结构在60%的开距下作说明, 在352 mm光滑壁面处, 层流的最高流速 $Ma=1.029$, 亚音速区流速较高 ($Ma=0.98$), 有局部“放-收”结构的型面下(即有湍流存在下)局部 Ma 达到1.42, 但亚音速区气流速度控制在较低亚音速 ($Ma=0.61$), 见图9和图10。

根据介质恢复强度 $U_b=(E/N) \cdot (U/E)pN_0(T_0/T)$, 计算每一步距下的 U_b 就是在场域内找出 p/E 最小值点。虽然湍流使每一步距下局部流速增高、压力下降, 但能抑制气流整体流速, 因此有利于提高气流整体密度。

比较图11和图12 2种喷口结构下的等马赫数分布可以看出, 图12 喷口下无论气体的最高流速还是整体流速都比图11低。这说明在喷口都存在湍流的情况下, 湍流发展得越充分, 越可减缓吹弧气体的流速, 越能有效控制超音速区的发展, 从而

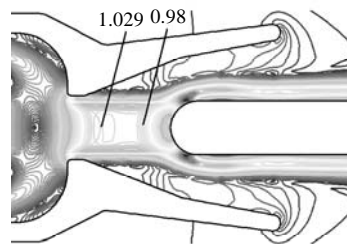


图9 两段式型面喷口在60%开距下的马赫分布
Fig. 9 Mach number distribution at 60% stroke of arc nozzle with “two-segment” contour

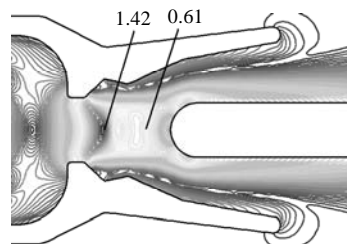


图10 两段式有局部“放-收”结构的喷口在60%开距下的马赫分布
Fig. 10 Mach number distribution at 60% stroke of arc nozzle with “two-segment” and a local “divergence-convergence” contour

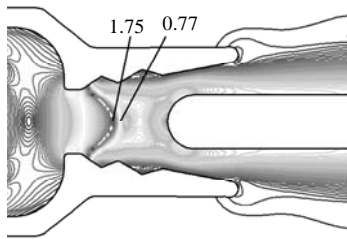


图 11 仰角为 10.4°, 长为 92.59 mm, 在喷口前部设置 2 个“放-收”结构的喷口 60%开距下马赫数分布图
Fig. 11 Mach number distribution at 60% stroke of arc nozzle with 10.4° angle of elevation, 92.59mm length and two local “divergence-convergence” contour at forefront of nozzle

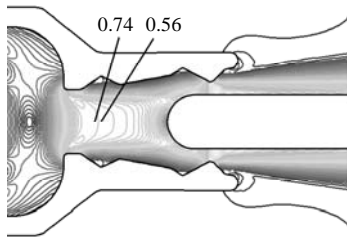


图 12 仰角为 10.4°, 长为 92.59 mm, 在喷口前后各设置 1 个“放-收”结构的喷口 60%开距下马赫数分布图
Fig. 12 Mach number distribution at 60% stroke of arc nozzle with 10.4° angle of elevation, 92.59mm length and two local “divergence-convergence” contour at front and back of nozzle

有利于介质恢复特性的提高。因此可以理解日立公司 550 kV 单断口 SF₆ 断路器采用三级“放-收”型面结构的道理。

3 结论

本文通过对介质恢复特性的数值模拟, 研究了 SF₆ 高压断路器喷口型面对湍流的形成作用以及湍流的存在对吹弧气体流动和介质恢复特性的影响, 得到如下结论:

(1) 光滑型面的喷口吹弧气体的流动主要表现为层流。

(2) 喷口上的“放-收”型面结构或者凹凸不平的壁面结构是喷口中形成湍流的重要因素; 局部“放-收”结构的数量、尺寸和位置设置影响着湍流在喷口中的发展。

(3) 对存在湍流的喷口, 湍流发展得越充分, 越有利于对超音速流的控制, 因而有利于提高介质恢复特性。

参考文献

- [1] 常梓雄, 董增尚. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [2] Versteeg H K, Mulalasekela W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. New York: Wiley, 1995.
- [3] Piller M, Nobile E, Thomas J. DNS study of turbulent transport at low

- Prandtl numbers in a channel flow[J]. Journal of Fluid Machines, 2002, 45(8): 419-441.
- [4] Wissink J G. DNS of separating low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming waves[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 626-635.
- [5] Abbott M B, Basco D R. Computation fluid dynamics-an introduction for engineers[M]. England: Longman Scientific and Technical, 1984.
- [6] 苏铭德, Friedrich R. 用大涡模拟检验湍流模型[J]. 应用数学和力学, 1994, 15(11): 991-997.
Su Mingde, Friedrich R. The examination of turbulence modeling with LES database[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1994, 15(11): 991-997(in Chinese).
- [7] 苏铭德, 康钦军. 亚临界雷诺数下圆柱绕流的大涡模拟[J]. 力学学报, 1999, 31(1): 100-105.
Su Mingde, Kang Qinjun. Large eddy simulation of the turbulent flow around a circular cylinder at sub-critical reynolds numbers [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1999, 31(1): 100-105(in Chinese).
- [8] Lu XY, Dalton C, Yang J F. Application of large eddy simulation to an oscillating flow past a circular cylinder[J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 1997, 119(3): 519-525.
- [9] Chen C J, Jaw S Y. Fundamentals of turbulent modeling [M]. Washington: Taylor and Francis, 1998.
- [10] 杨培志, 顾小松. 零方程湍流模型在列车车厢内气流数值模拟中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(1): 26-39.
Yang Peizhi, Gu Xiaosong. Application of zero equation turbulence model for numerical simulation of air distribution in train compartment[J]. Engineering Science, 2006, 8(1): 26-39(in Chinese).
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [12] 陶文铨. 计算流体力学与传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [13] 陈义良. 湍流计算模型[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1991.
- [14] Aubin J, Fletcher D F, Xuereb C. Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD: The influence of the modeling approach [J]. Turbulence Model and Numerical Scheme, Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(5): 431-445.
- [15] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [16] 荣明哲, 杨茜, 范春朵. 高压自能式 SF₆ 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): 93-95.
Rong Mingzhe, Yang Qian, Fan Chunduo. Simulation of the process of arc energy-effect in HV auto-expansion SF₆ circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 93-95(in Chinese).
- [17] 曹云东. 高压 SF₆ 断路器介质恢复特性的计算与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2001.
Cao Yundong. Calculation and analysis of dielectric recovery property of SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2001(in Chinese).
- [18] Feindt E G. Untersuchungen uber die abhängigkeit des umschlages lamnar turbulent vonder oberflachenrauigkeit und der drackverteilung [J]. Schiffbautechn, 1957, 50(8): 180-203.

收稿日期: 2007-04-28。

作者简介:

关盛楠(1981—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压 SF₆ 断路器开断特性的计算机仿真, huaike@163.com;

王尔智(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事高压电器理论研究及高压断路器开断特性的数值模拟工作。

(编辑 车德竞)