

SF₆ 断路器空载开断下液压操动机构 与灭弧室联合仿真研究

王连鹏, 王尔智

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110023)

INVESTIGATION OF JOINT SIMULATION UNDER NO LOAD BREAKING FOR HYDRAULIC ACTOATOR AND ARC-QUENCHING CHAMBER OF SF₆ CIRCUIT BREAKER

WANG Lian-peng, WANG Er-zhi

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

ABSTRACT: The 252kV SF₆ circuit breaker is taken as the investigation subject. Under full considering various factors that influence on moving properties of hydraulic actuator, the kinetic mathematical models have been established based on the energy conservation law. The properties of output pressure and velocity have been simulated and analyzed, which are regarded as the boundary conditions for calculating unsteady and compressible gas flow, and the flow law of gas blast in the arc quenching chamber during breaking process has been simulated and analyzed. The influences on gas flow and breaking properties caused by flow rate of hydraulic output system have been investigated. So that, a method for adjusting the breaking property of SF₆ circuit breaker is given from mechanistic kinetic point of view.

KEY WORDS: SF₆ High voltage circuit breaker; Hydraulic actuator; Numerical analysis; Interruption performance

摘要: 该文以 252kV SF₆ 高压断路器作为研究对象, 在全面考虑了影响液压操动机构运动特性的各种因素后, 从能量守恒规律出发建立了液压操动机构的动力学数学模型, 仿真并研究了液压操动机构的输出压力与速度特性, 并以此作为计算灭弧室内非定常、可压缩吹弧气体流动的边界条件, 对开断过程中灭弧室内的气体流动规律进行了计算机仿真。分析了吹弧气体的运动规律, 研究了改变液压操动机构的输出流量对灭弧气体流动特性及对断路器开断特性的影响, 从而从机构动力学的角度出发, 给出一种能够调节断路器开断特性的方法。

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).

关键词: SF₆ 高压断路器; 液压操动机构; 数值计算; 开断特性

1 引言

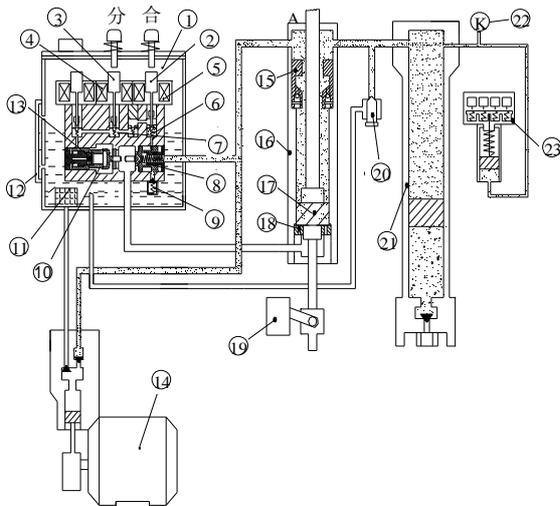
压气式 SF₆ 高压断路器的开断特性取决于开断过程中操动机构的输出特性和灭弧室内电场的分布及吹弧气体的流动规律。目前, 对 SF₆ 高压断路器开断特性的研究, 多集中于在给定的操动机构的输出压力与速度特性的情况下, 对灭弧室内的电场和气流场的分布规律的研究。对综合考虑操动机构与灭弧室的联合作用下, 研究其吹弧气体的流动规律, 所见研究工作较少, 而且大多是根据牛顿第二定律, 列出系统作用力方程, 对运动系统进行了仿真。大多没有考虑液压操动机构的传动效率和运动副及摩擦等因素的影响。

本文以 252kV SF₆ 高压断路器作为研究对象, 对决定其开断特性的操动机构的输出特性和灭弧室内吹弧气体的流动特性进行了联合仿真研究。首先, 全面考虑了影响液压操动机构运动特性的各种因素, 从能量守恒规律出发, 建立了液压操动机构的动力学数学模型, 通过质量归一化的处理后, 根据所建立的力学数学模型, 仿真并分析了液压操动机构的输出压力与速度特性。其次, 考虑吹弧气体是一种跨音速流动的实际, 计及了吹弧气体流动中粘性的存在, 采用了描述灭弧室非定常、可压缩吹弧气体流动规律的 *N-S* 方程。用已求得的液压操

动机构的输出压力与速度特性作为计算吹弧气体流动的边界条件，对开断过程中吹弧气体流动进行了计算机仿真，分析了吹弧气体流动的规律和特点，研究了调节液压系统输出流量对 SF₆ 断路器开断特性的影响，从机构动力学的角度出发，给出一种能够调节断路器开断特性的方法。

2 样机的选择

本论文选择的仿真样机为 252kV 压气式 SF₆ 断路器，所配用的液压操动机构如图 1 所示。操动机构的分合闸功是利用液压油作为动力传递的介质，控制阀系统作为液压放大转换元件，首先通过一级阀将电机机械转换器输出的机械信号转换为液压信号，然后，充分利用液压阀动作迅速、功率放大增益高等优点，通过几级液压放大，驱动液压缸活塞带动负载工作。断路器的灭弧室结构如图 2 所示，行程为 200mm，由液压缸活塞的压力带动灭弧室喷口及动触头运动。根据操动机构和灭弧室可动部件的结构尺寸及材质，通过计算所得的可动部件的质量如表 1 所示。图 1 与图 2 在 A 点通过四杆传动机构相连接。



注：1-油箱；2-合闸一级阀杆；3-分闸一级阀杆；4-分闸线圈；5-合闸线圈；6-一级合闸阀；7-一级分闸阀；8-二级合闸阀；9-安全阀；10-二级分闸阀；11-油过滤器；12-油标；13-钢球；14-电机组合泵；15-合闸缓冲装置；16-工作缸；17-工作缸活塞；18-分闸缓冲装置；19-辅助开关；20-高压放油阀；21-储能筒；22-压力表；23-压力开关

图 1 液压操动机构原理图

Fig. 1 The sketch of hydraulic actuator

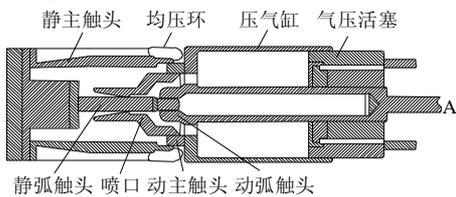


图 2 灭弧室结构图

Fig. 2 The structure sketch of arc-quenching chamber

表 1 可动构件质量
Tab. 1 The mass of movable parts

名称	质量/kg	名称	质量/kg
动主触头	2.3	压气缸	15.8
传动杆 1	1.9	连杆 1	4203
传动杆 2	25.5	连杆 2	3.96
连接件	7.4	液压主轴	19.

3 数学模型及仿真

3.1 概述

仿真计算分为相互关联的两部分：一部分是根据操动机构的动力源及驱动部分的结构、尺寸及质量，依据机构动力学原理，求出操动机构的输出压力特性及分闸速度特性；第二部分是操动机构的输出压力特性和分闸速度特性作为对气流场数值模拟的输入条件，对灭弧室流场进行模拟。因此数学模型分为两部分：操动机构的数学模型和灭弧室吹弧气体流动的数学模型。

3.2 操动机构的数学模型

本论文是从机构动力学的能量守恒原理出发，列写机构动力学方程。根据图 1 的结构图，操动机构驱动部分所受的力为：液压机构操作力 F_d ，转动构件旋转力 J_w (它由参与断路器在分闸运动过程中操动机构的杆件组成)，机构分闸接近结束时的缓冲力 F_h ，运动构件的摩擦力 F_f ，压气室的气压反力 F_y ，电弧的电动斥力 F_c (空载开断下 $F_c=0$)，各构件的运动副力矩 M_c 以及驱动灭弧室可动部分以分闸速度 v_D 运动时所受的力。各运动构件的行程如表 2 所示。

表 2 各力作用积分限值
Tab. 2 The integral limits of different force

变量	d_1	d_2	x_1	x_2	h_1	h_2
数值/mm	0	200	0	200	157	200

根据能量守恒原理，液压机构操作力所作的功转变为它推动各构件运动所作的功^[1]。故有

$$\int_{d_1}^{d_2} F_d dx = \sum J_i \omega_i^2 + 3 \int_{x_1}^{x_2} F_y dx + \int_{h_1}^{h_2} F_h dx + 3 \int_{h_1}^{h_2} F_c dx + F_f X_f + \sum \int_0^a M_c dq + 3mv_D^2 / 2 \quad (1)$$

式中 F_f 为摩擦力，其大小可由经验公式确定；最后一项为动触头动能，其中 v_D 为动触头速度；系数 3 代表三相高压电。 F_d 与液流管道参数及压力有关，计算公式为^[2]

$$F_d = h[(p_f S_H - p_c S_L) - (S_H \sum k_{1i}^2 x_{1i} + S_L \sum k_{2i}^2 x_{2i}) v_D^2] \quad (2)$$

式(1)中缓冲腔的缓冲压力 p_h ，压气缸反力 F_y ，构件运动副力矩 M_c 的表达式如下

$$p_h = \left(\frac{sv}{Kf}\right)^2, f = f_0 \left(1 - \frac{x}{L_0}\right)^2, f_0 = \frac{sv_0}{K} \sqrt{\frac{s}{F + mv_0^2/2L_0}} \quad (3)$$

$$F_y = \int_s (p - p_0) ds \quad (4)$$

$$p = rRT \quad (5)$$

$$M_c = FL \sin \alpha \quad (6)$$

式(2)~(6)中 h 为液压机构效率, 其范围为 0.93~0.97, 文中取 $h=0.95$; p_f 为储能器压力, 数值为 32MPa, p_c 为大气压强; S_H 、 S_L 分别为液压缸两侧的工作面积, 分别为 2826mm²和 2044mm²; k_{1i} 、 k_{2i} 分别为高压油侧和低压油侧各油管道中油的流速与动弧触头速度之比值, 液压油流速由 $Q_p=Av$ 确定, 其中 Q_p 为选定的液压泵的额定流量, 不同的断路器, 其型号不一样, 流量也不同, A 为液压油流经任一位置的管道截面积, v 为液压油的流速; x_{1i} 、 x_{2i} 分别为液压机构中高压油侧和低压油侧各管道的压力损失系数, 计算公式为 $x=Il/d$, 其中 $I=0.3$; v_D 为动弧触头速度; J_i 、 w_i 分别为各转动构件的等效转动惯量和角速度, 其中 J_i 的计算方法详见参考文献[1]; p_h 为缓冲腔压力; F 为作用在活塞上的外力; s 为缓冲腔有效面积; m 为活塞及运动部件质量, 根据各零件的几何尺寸计算后得 29.4kg; f 为节流口通流面积, 其直径大小可以调节; F_c 为电动斥力, 其所做功的大小与燃弧时间长短和导电杆的体积有关^[3], 且电动斥力在合闸时为阻力, 分闸时为动力, 本文讨论的工作情况为空载状态, 所以此项数值为零; p 为压气室内气体压强, 初值为 0.6MPa; p_0 为压气室外气体压强, 初值为 0.6MPa; S 为压气室内压力作用面积。

此外, 随着动触头的运动, 压气室内的气体也在发生变化。在开断过程中随着活塞的运动, 压气室内气体体积和质量逐渐减小^[4-5]。压气室的体积和气体质量为

$$V^{n+1} = V^n - S \cdot v_D \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$m(t) = m_0 - \int q dt \quad (8)$$

其中, V 为压气室体积; q 为气体流量。

在对操动机构的输出压力特性和分闸速度特性进行模拟计算时, 各活动构件的质量需归算到动弧触头上, 其计算公式为

$$m_{igh} = m_i \left(\frac{v_i}{v_D}\right)^2 + J_i \left(\frac{w_i}{v_D}\right)^2 \quad (9)$$

3.3 操动机构输出特性的仿真及结果分析

在具体的仿真过程中, 首先应根据本模型断路

器灭弧室的开距综合考虑计算精度、计算时间等因素, 确定计算液压操动机构输出特性的位移步长。在整个行程 200mm 中, 以固定位移 5mm 为步长进行仿真。然后根据操动机构的动力学模型(1)~(9)进行输出特性的仿真计算。数学模型中的某些参数是作为技术数据给出的, 有些标准件的额定参数, 如各种控制阀、液压泵等在数值计算前, 须查找相关的机械设计手册给出。另有一些参数, 诸如 k_{1i} 、 k_{2i} 、 m_i 、 J_i 、 w_i 和 F_y 等是与机构的输出压力和速度有关的变化量, 须在数值求解的迭代过程中逐渐确定。其主要的计算过程如图 3 所示。

根据以上计算方法, 所得数值模拟样机操动机

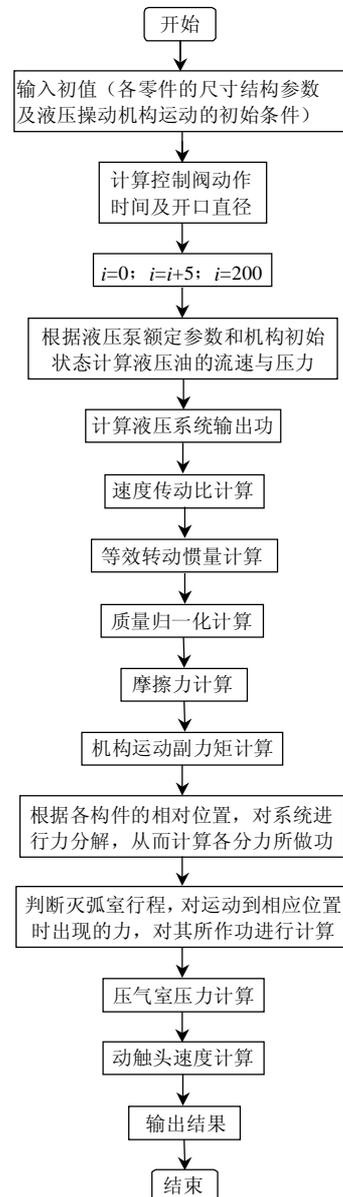
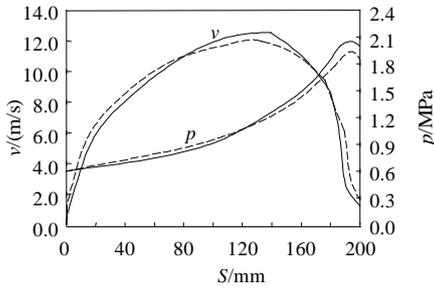


图 3 液压操动机构开断特性计算流程图
Fig. 3 Flow chart of the computational process for interruption performance of hydraulic actuator

构的输出压力特性和分闸速度特性如图 4 所示。



注：v—分闸速度；t—分闸时间；p—压力特性
虚线为工厂提供的试验数据，实线为本文仿真结果

图 4 分闸特性曲线

Fig. 4 The chart of interruption performance

从图 4 可以看出，在分闸起始阶段，由于动弧触头与静弧触头尚未分离，即超行程阶段，如图 2 所示，当灭弧室内的可动部分向右运动时，压气室的体积减小，压气室内气体在压气活塞的机械压缩作用下，其气体压力逐渐升高，此时产生的高压气体只能由喷口喉部的下端而与静弧触头的上端面所形成的极窄缝隙流向喷口的下游，在此处产生气流堵塞现象。因此气体流出量很小，大部分气体留在压气室内，气体压力升高。但由于超程较短，而且此阶段速度较低，产生的阻力作用不是很明显，阻力所做功之和较小，液压机构的输出功相对较大，因此速度的增加趋势很快。随着动弧触头与静弧触头的分离，即行程的逐渐增大，压气室的体积进一步减小，此时的高压气流不但可以通过上面所说的窄缝隙流向喷口的下游，而且还可以通过辅助喷口流出。由于在触头分离后的一段时间内，喷口尚未完全打开，灭弧室内气体流量受到一定的限制，压气室内的压力仍继续升高，系统的运动阻力也继续增大。但由于此阶段操动机构的作用力和系统阻力所做功大小相近，故分闸速度上升趋势变缓，使模型断路器的速度维持在一较高的数值附近。当喷口打开后，灭弧室内的气体流动通道变得通畅，压气室内的压力开始下降。随后分闸运动进入缓冲阶段，由于本机的缓冲机构为二级缓冲，在图 4 中的 v-p 特性曲线上速度有两次急剧下降，最后分闸过程结束。

3.4 灭弧室吹弧气体流动的数学模型

SF₆ 高压断路器开断过程中，吹弧气体是一种非定常、可压缩、变边界的气体流动。由于这种气体流动是跨音速度，应该考虑气体的粘性。因此，吹弧气体的流动是用 N-S 方程来描述的^[6]。即

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_1}{\partial z} + \frac{\partial G_1}{\partial r} + S_1 = \frac{\partial F_V}{\partial z} + \frac{\partial G_V}{\partial r} + S_V \quad (10)$$

其中，

$$U = \begin{bmatrix} r \\ ru \\ rv \\ re \end{bmatrix}, F_1 = \begin{bmatrix} ru \\ ru^2 + p \\ ruv \\ ru(e + p/r) \end{bmatrix}, G_1 = \begin{bmatrix} rv \\ ruv \\ rv^2 + p \\ rv(e + p)/r \end{bmatrix},$$

$$F_V = \begin{bmatrix} 0 \\ t_{zz} \\ t_{zr} \\ ut_{zz} + vt_{zr} + k \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix}, G_V = \begin{bmatrix} 0 \\ t_{zr} \\ t_{rr} \\ ut_{zr} + vt_{rr} + k \frac{\partial T}{\partial r} \end{bmatrix},$$

$$S_1 = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} ru \\ ruv \\ rv^2 \\ rv(e + p/r) \end{bmatrix}, S_V = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 0 \\ t_{zr} \\ t_{rr} - t_{qq} \\ ut_{zr} + vt_{rr} + k \frac{\partial T}{\partial r} + Q \end{bmatrix}$$

u、v 为气体轴向速度和径向速度；p、r 为气体压力和密度；Q 为电弧影响的源项；e 为单位质量总内能； $e = p / [(g-1)r] + (u^2 + v^2) / 2$ ；g 为比热比； t_{ij} 为粘性应力张量的各分量，分别为

$$t_{zz} = (m + m_t) \left(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{v}{r} \right)$$

$$t_{zr} = (m + m_t) \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right), t_{rz} = t_{zr}$$

$$t_{rr} = (m + m_t) \left(\frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{v}{r} \right)$$

$$t_{qq} = (m + m_t) \left(\frac{4}{3} \frac{v}{r} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial r} \right)$$

式中 动力粘性系数 m 的计算采用 Sutherland 公式

$$\frac{m}{m_0} \approx \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + T_s}{T + T_s}$$

和气体状态方程 $p = rRT$ ，其中 $R = b R_{SF6}$ ，b 为修正系数， R_{SF6} 为 SF₆ 气体常数。修正系数 b 与灭弧室温度有关，空载开断下可认为 $b=1$ 。

3.5 空载开断下灭弧室吹弧气体流动的计算机仿真及结果分析

SF₆ 高压断路器在不同的负载开断下，其压气室的反力特性是不同的^[7-9]，灭弧室内的温度分布也不相同，导致吹弧气体的流动特性存在明显的差别。但是空载开断下，对一台断路器来说，其气体流动特性却是唯一的。由于本论文是研究操动机构输出特性与灭弧室气体流动的关系，为简便起见，又不失其一般性，本文选择空载开断来研究，同时

不计及湍流的影响。这样,在操动机构与灭弧室联合仿真时, $N-S$ 方程中与电弧有关的项取为零。

在数值仿真过程中,将3.3节求得的液压操动机构的输出压力与速度特性,作为对流场仿真的输入条件。在行程为200mm的全程上,取每1mm的进程所对应的时间进程作为时间步长,对灭弧室吹弧气体的流动进行仿真。图5分别给出了20%、40%、60%、80%、100%开距下马赫数的分布规律。

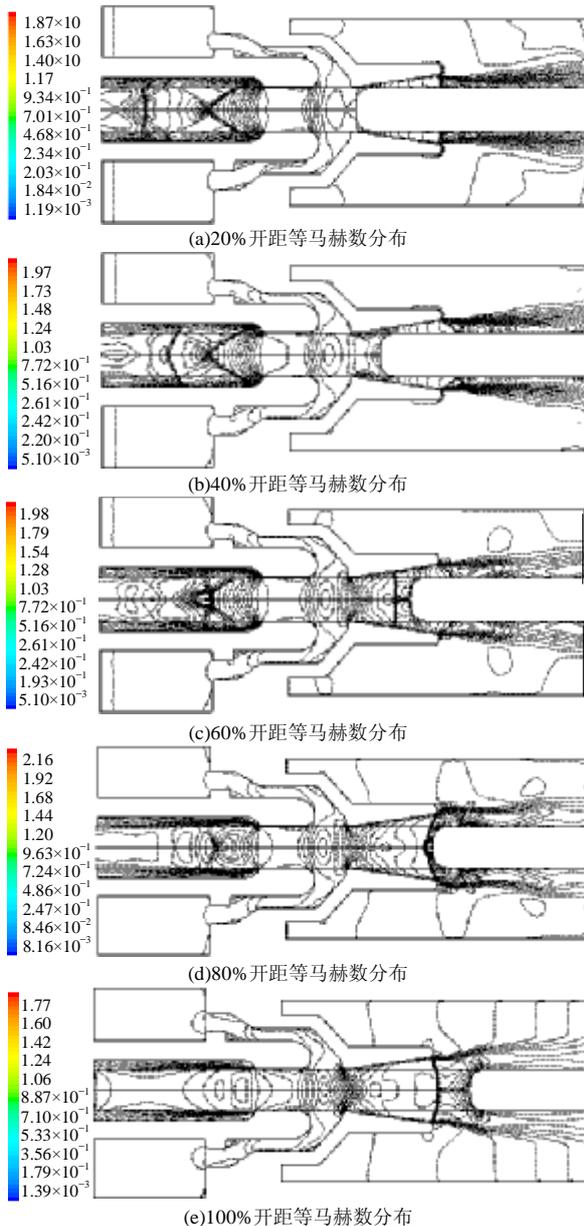


图5 不同开距下气流场等马赫数分布图

Fig. 5 The diagram of equal Mach number distribution at different stroke

从这些分布规律可以看出:

(1)20%开距下喷口的喉部基本上还处于堵塞状态,气流在上游压力作用下,从喉部的比较窄的狭缝中流出,因此全场域气体流速比较低。仅从狭

缝流出的气体得到加速,但在喷口的出口处,在2.1mm距离上马赫数由1.84降到0.24,形成了一个正激波。

(2)40%开距下,超音速流得到了较快的发展。但由于静弧触头的阻碍作用,超音速区仍在由喷口与静弧触头之间形成的气流通道上,激波仍发生在喷口的出口处,在1.6mm距离上马赫数由1.92降至0.25。

(3)60%开距下,超音速区已发展到喷口喉部的下游区,并在喷口下游区形成正激波线,在1.3mm距离上马赫数由1.98降至0.44。激波的存在减缓了超音速流的发展,使喷口内的气体密度升高,有利于提高介质恢复强度。

(4)80%开距下,吹弧气体的流动较少受到静弧触头的阻力,气体流速进一步加快。但由于喷口出口外的空间范围大,使得气体在喷口出口处速度立即降下来,形成一个完整的激波面,在0.9mm距离上马赫数由2.14降至0.19。

(5)100%开距下,喷口已完全退出静弧触头,喷口外的大范围空间必然使流速从80%开距的情况下减慢下来。而且,在分闸过程接近尾声时,由于二级缓冲机构的介入,使得分闸速度迅速降低,从而导致压气室压力下降。反映到灭弧室内则是气体流速减慢,马赫数减小,激波强度降低。此时,主激波在1.1mm的距离内,马赫数从 $M=1.74$ 下降到 $M=0.64$ 。

4 液压操动机构对灭弧室气流控制的研究

在压气式 SF_6 断路器中,在实现高效的吹弧作用中,拉法尔喷口起着核心作用^[10]。它的作用是使吹弧气体的流动由上游的亚音速流动转变成超音速流动,以实现电弧能量快速地输运出去,达到熄弧的目的。不同电压等级和开断容量的断路器有着不同的喷口结构和形状。对此,已有相当数量的研究^[11-13]。但研究操动机构对吹弧气体流动的影响,所见文献报道较少。本文研究了用调节液压系统的输出流量(可由阀门实现),实现对吹弧气体流动的控制。

在液压系统的输入和输出管道上设置流量调节阀^[14],并选择调节阀的出口直径分别为16mm、15mm、14mm、11mm,将其分别编号为1、2、3、4。在灭弧室内任取两点 $A(x=260, y=5)$, $B(x=310, y=10)$,在不同阀门直径下,对气流场进行仿真。

图6和图7分别给出了在流量调节阀的不同直

径下, 液压操动机构相应的输出压力与速度特性曲线和灭弧室 A、B 两点上马赫数的变化曲线。可知, 改变调节阀的直径, 可明显地改变液压操动机构的输出压力和速度特性以及场域吹弧气体的流速。调节阀出口直径的微小增加, 可有效地提高分闸速度和压力以及吹弧气体的流速^[15]。这对短路开断时, 加快电弧能量的向外输运是有益的。因此, 在对某一产品进行短路开断试验时, 可以用改变调节阀的出口直径来满足对产品短路试验的要求。然而, 在产品的设计时, 还必须综合考虑因增大调节阀的输出流量对缓冲机构、系统的操作功等所带来的影响。

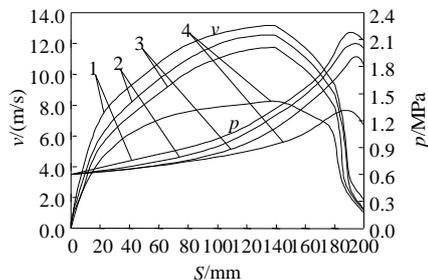


图 6 不同调节阀直径下的分闸特性曲线

Fig. 6 The pressure and velocity property under different diameters of pilot valve

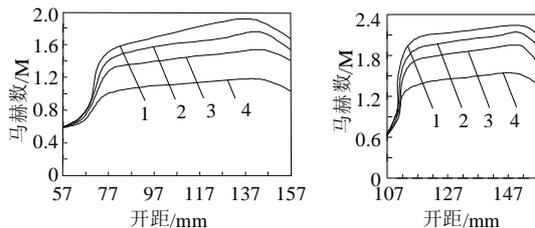


图 7 不同调节阀直径下 A、B 两点马赫数随行程变化的曲线

Fig. 7 The variation of Mach number curve with breaking course under different diameters of pilot valve

5 结论

本文以 252kV 压气式 SF₆ 高压断路器为研究对象, 对其液压操动机构与灭弧室在空载开断下进行了联合仿真研究。在全面考虑了影响液压操动机构运动特性的各种因素下, 从能量守恒的定律出发, 建立了液压操动机构的动力学方程, 仿真计算了操动机构的输出压力与速度特性, 并以此作为输入条件, 对灭弧室吹弧气体流动在全程开断下进行了仿真研究。分析了吹弧气体的流动规律, 研究了改变调节阀的直径对液压操动机构输出特性及吹弧气体流动的影响。从而给出一种通过改变调节阀直径来提高断路器开断性能的方法。

参考文献

- [1] 唐锡宽, 金德闻. 机械动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.
- [2] 官忠范. 液压传动系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [3] Okamoto M, Ishikawa M, Suzuki K *et al.* Computer simulation of phenomena associated with hot gas in puffer type gas circuit breaker [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1991, 6 (2): 12-18.
- [4] Park Y, Fang M T C. Mathematical modeling of SF₆ puffer circuit breakers I: high current region[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 1991, 24(2): 45-67.
- [5] Trepanier J Y, Zhang X D, Pellegrin H *et al.* Application of computation fluid dynamics tools to circuit breaker flow analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 10(4): 111-134.
- [6] 朱自强, 吴子牛. 应用计算流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [7] 杨武, 荣命哲, 王小华. 考虑电动力效应的高压断路器动力学特性仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 103-107.
Yang Wu, Rong Mingzhe, Wang Xiaohua. Dynamic simulation of high-voltage circuit breaker considering electrodynamic force[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 103-107.
- [8] 张敬菽, 陈德桂, 刘洪武. 低压断路器操作机构的动态仿真与优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 102-107.
Zhang Jingshu, Chen Degui, Liu Hongwu. Dynamic simulation and optimum design of low-voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 102-107.
- [9] 娄建勇, 荣命哲, 邹洪超, 等. 单线圈单稳态永磁式接触器机构动力学特性仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 120-124.
Lou Jianyong, Rong Mingzhe, Zou Hongchao *et al.* Simulation on mechanism dynamic characteristics of single coil and single stable position contactor with permanent magnet[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 120-124.
- [10] 杨武, 荣命哲, 王小华. 结合机构动力学特性仿真将 ANN 用于高压断路器机构状态识别初探[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 128-131, 158.
Yang Wu, Rong Mingzhe, Wang Xiaohua. Initial study on high voltage circuit breaker's mechanical condition reorganization with ANN combining mechanism dynamic features simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 128-131, 158.
- [11] 蔡彬, 陈德桂, 吴伟光, 等. 开关柜耐受最大冲击载荷的冲击动力学研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 124-130.
Cai Bin, Chen Degui, Wu Weiguang *et al.* Research of shock dynamics on withstanding the maximal shock load in switchgear assemblies[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 124-130.
- [12] 李建基. 高中压开关设备实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [13] 曹荣江, 顾霓鸿. 高压交流断路器的运行条件[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1999.
- [14] 苑舜. 高压断路器液压操动机构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [15] 宋俊, 殷庆文, 刘树敏, 等. 液压优化理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

收稿日期: 2005-07-15.

作者简介:

王连鹏 (1975-), 男, 博士研究生, 研究方向为高压断路器操动机构仿真与优化;

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