

[开关设备]

550 kV断路器灭弧室空载流场特性的研究

文/西安西电开关电气有限公司 张 建 赖苏琴

研究从计算流体力学的角度，利用数值仿真软件ANSYS-FLUENT，模拟550 kV断路器原有两种灭弧室结构分闸过程中的空载流场动态特性，通过对比两种结构的计算结果，总结流场规律，并参考样机型式试验中的测量数据，改进形成优化的灭弧室结构。

SF₆高压断路器灭弧室结构的发展趋势是从多断口到单断口，断口越少，结构越简单，机械配合难度低。从多断口到单断口结构，需要提高断口的耐压和开断能力，提高断口耐压需要增加断口距离，并保证电场均匀；提高断口开断能力，需要优化灭弧室的气体流动特性，提高气吹能力，增强电弧区域的能量传递效率。

数学仿真模型是研究SF₆高压断路器灭弧室流场特性的重要手段，利用它可针对不同灭弧室结构，计算分析其在分闸过程中的流场动态特性，包括气流马赫数、气体密度和流量的变化，以及不同的喷口形状、触头直径、压气缸直径和运动曲线等对于流场的影响等问题。

在上述背景下，主要工作内容有如下几个方面。

1) 根据550 kV断路器灭弧室的技术参数，建立SF₆气体流场数学模型，考虑湍流对流场特性影响的重要性，采用商用流体计算软件ANSYS-FLUENT作为求解平台，并围绕SF₆气流场求解，对其进行了二次开发的工作。

2) 分析单断口和双断口断路器的灭弧室，计算分析空载分闸过程中的流场动态特性，并通过对比两种结构的计算结果，总结流场规律，指导优化。

3) 结合仿真计算结果与样机型式试验中的测

量数据，通过改进形成优化的灭弧室结构，并从理论上对灭弧室的流场特性做出合理解释，供今后同类产品试验参考。

仿真模型

SF₆高压断路器开断过程中灭弧室内是一个气流场、热场和电磁场之间相互作用的复杂的物理现象，有学者采用磁流体动力学(MHD)理论，考虑到焦耳热、热传导、对流、热辐射、洛伦兹力和电磁场的相互作用，建立热态灭弧室模型，然而由于电弧辐射模型、湍流模型等理论基础的欠缺，以及没有试验数据的支撑，仅仅依靠经验对模型中关键参数进行设置，导致此类热态模型的准确度较低，且极其消耗计算资源，计算效率低下，不能满足企业对新产品开发的时间周期要求。

目前有实际意义的仿真方法是建立快速的灭弧室空载冷态气流场模型，对不同结构的空载流场特性进行仿真计算，类比各结构计算结果，取得定性的流场趋势，再进行样机的研究性试验，以计算和试验两者间的多次快速反复的互相校验，在较短周期内完成新产品开发。

按照以上思路，根据灭弧室的二维轴对称结构，建立了二维灭弧室空载气流场模型，模型中各控制方程如下所述。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

轴向动量守恒方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla(\rho \vec{v} w) - \nabla((\mu_l + \mu_t) \nabla w) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} + J_z B_\theta + \nabla(\bar{\tau}) \end{aligned} \quad (2)$$

径向动量守恒方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(\rho \vec{v} v) - \nabla((\mu_l + \mu_t) \nabla v) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} + J_z B_\theta + \nabla(\bar{\tau}) \end{aligned} \quad (3)$$

能量守恒方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho \vec{v} h) - \nabla \left(\left(\frac{k_l + k_t}{c_p} \right) \nabla h \right) \\ &= \sigma E^2 - q + \nabla(\bar{\tau} \vec{v}) \end{aligned} \quad (4)$$

以上各式中, p 是压力; ρ 是密度; $\vec{v}$ 是速度矢量; w 和 v 分别是速度轴向和径向分量; μ_l 和 μ_t 分别是层流和湍流黏性; h 是焓; k 是热导率; σ 是电导率; c_p 是定压比热; E 是电场强度; q 是热辐射; $\nabla(\bar{\tau})$ 是粘性项; $\nabla(\bar{\tau} \vec{v})$ 是黏性耗散项。

模型中选择Spalart-Allmaras湍流模型计算灭弧室的湍流,这是一种单方程湍流模型。在这个新方程里不必去计算和剪应力层厚度相关的长度尺度,所以计算效率较高。

单断口结构灭弧室流场动态特性

550 kV单断口罐式断路器为单气室压气式结构,开断能力50 kA。在保留原有主要结构情况下,升级试制63 kA开断能力的单断口断路器过程中,遇到困难,必须对原有结构进行优化改进。

按照原有单断口断路器的灭弧室结构,精确建立几何模型,设定此模型的边界条件,对SF₆气体流场在分闸过程中的动态特性进行了仿真研究。

根据灭弧室空载分闸过程中的实际工况,设置灭弧室基压、机构运动特性等边界条件和初始条件,仿真计算整个空载分闸过程的流场动态特性,计算结果如图1所示。

在图1中可以看到,分闸过程中,喷口内部出现明显的压力突变的蓝色区域,此为激波区域,激波面位于压力突然跳跃上升的截面处。在喷口未完全打开时,激波发生在静触头的侧面,喷口

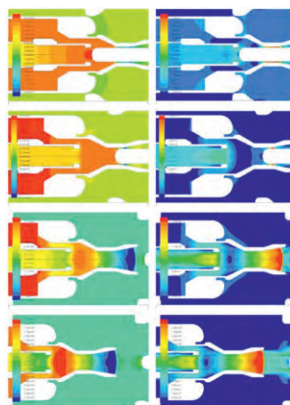


图1 单断口结构灭弧室空载分闸过程中压力和马赫数的动态分布

完全打开后,激波面贯穿于整个喷口内部。对应压力分布同时刻的马赫数分布,可看到激波的另一个重要特征,即气流通过激波面后流速由超声速突降到声速或亚声速。

图2和图3是分闸过程中灭弧室内压气缸、喉道和静弧触头前端等主要位置的压力和密度的变化过程。从图2、图3中可以看到,压气缸内的气体压力和密度经历一个较大范围的变化,最大可达到初始压力和密度的2倍至3倍之间,说明压气缸发挥了压气增压的作用,并在短燃弧到长燃弧时间的区间内维持在较高的水平,后期虽下降较快,但压力密度值没有低于前期的水平。静弧触

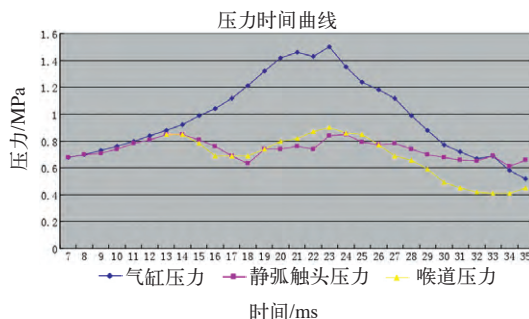


图2 单断口结构灭弧室空载分闸过程中压力变化曲线

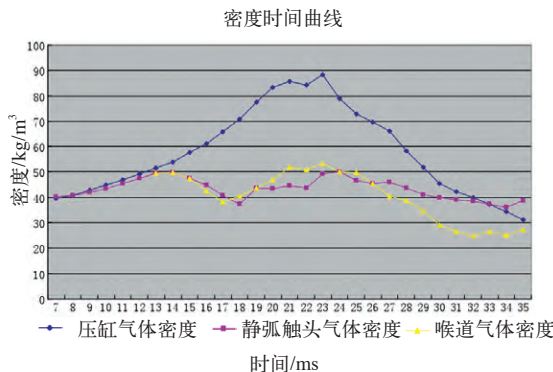


图3 单断口结构灭弧室空载分闸过程中密度变化曲线

头前端的压力和密度在短燃弧到长燃弧时间的区间内基本可保持在较稳定的水平。喉道位置的压力密度分布规律是在短燃弧到长燃弧时间的区间内,前期保持较好,到后期,特别是在长燃弧时间点附近压力密度值下降较快,且已明显低于初期的压力密度值。由于喉道是气流吹弧的核心区域,从气流角度分析,喉道的压力密度后期下降较快可能对长燃弧时间不利。

双断口结构灭弧室流场动态特性

550 kV双断口罐式断路器的开断能力是63 kA,按照双断口断路器的灭弧室结构,精确建立几何模型,设定此模型的边界条件,对SF₆气体流场在分闸过程中的动态特性进行了仿真研究。

根据灭弧室空载分闸过程中的实际工况,设置灭弧室基压、机构运动特性等边界条件和初始条件,仿真计算整个空载分闸过程的流场动态特性,计算结果如图4所示。

双断口断路器的灭弧室的特点是增设小喷嘴,并修改了大喷嘴上游区顶部内壁形状,使之与小喷嘴顶部外形相呼应,在大喷嘴未打开之前,即可产生强劲的径向气吹。从图4中可以看到,动弧触头中心孔内的排气效果相比单断口断路器的喷嘴有显

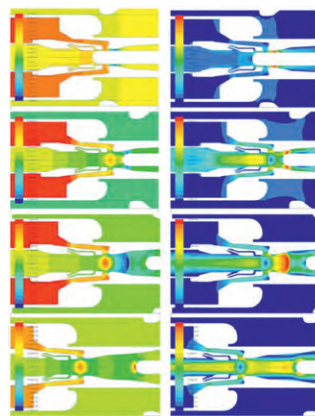


图4 双断口结构灭弧室空载分闸过程中压力和马赫数的动态分布

著的增强,有助于减小断路器开断的短燃弧时间。

图5和图6是分闸过程中灭弧室内压气缸、喉道、静弧触头前端等主要位置的压力和密度的变化过程。从图5、图6中可以看到,压气缸内的气体压力和密度的变化范围在2倍之内,并在短燃弧到长燃弧时间的区间内维持在较高的水平,后期下降也较平缓,压力密度值高于前期的水平。静弧触头前端的压力和密度在短燃弧到长燃弧时间的区间内基本可保持在较稳定的水平,且后期还有小幅的上升。喉道位置的压力密度分布规律是在短燃弧到长燃弧时间的区间内始终保持在稳定

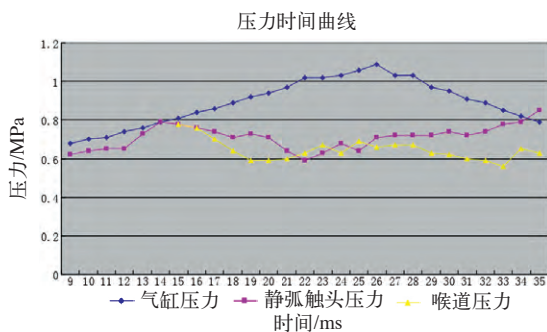


图5 双断口结构灭弧室空载分闸过程中压力变化曲线

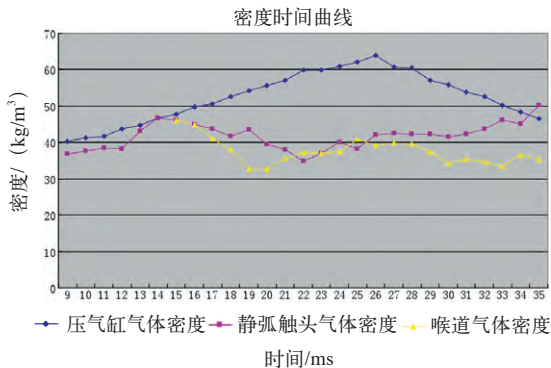


图6 双断口结构灭弧室空载分闸过程中密度变化曲线

的水平。总体上，双断口灭弧室对比单断口灭弧室，压力和密度的变化过程较为均匀和平缓。

优化后灭弧室流场动态特性

通过对比单断口和双断口断路器的灭弧室，得到喷嘴形状、压气缸直径、触头直径和分闸特性等因素与气流场动态特性之间的定性关系，在此定性关系的指导下，在优化设计中考虑了多种方案，包括对压气缸直径更改、触头直径更改、喷嘴下游加长、喉道缩短、喉道直径加大、上游

入口角度和下游张角更改、喷嘴尾部加导向和机构特性修改等，并对每种方案进行分闸过程中的流场仿真计算。

计算中压力边界条件按照63 kA开断能力单断口断路器样机型式试验所测量记录的数据设置，通过仿真计算与样机试验两种方法之间的多次互相校正与配合，目前已得到较好的试验结果。

图7~图9是几种优化方案分闸过程中，灭弧室的压气缸、静弧触头前端和喉道区域的压力变化曲线。

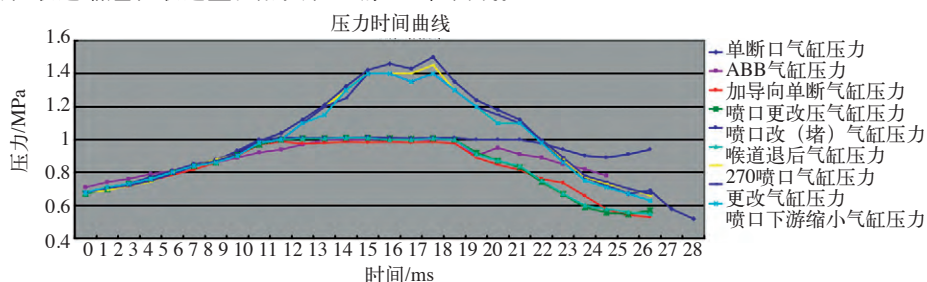


图7 几种优化方案空载分闸过程中压气缸压力变化曲线

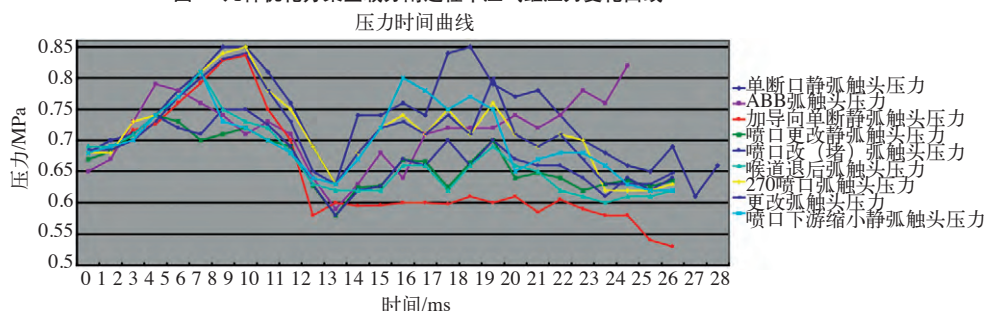


图8 几种优化方案空载分闸过程中静弧触头前端压力变化曲线

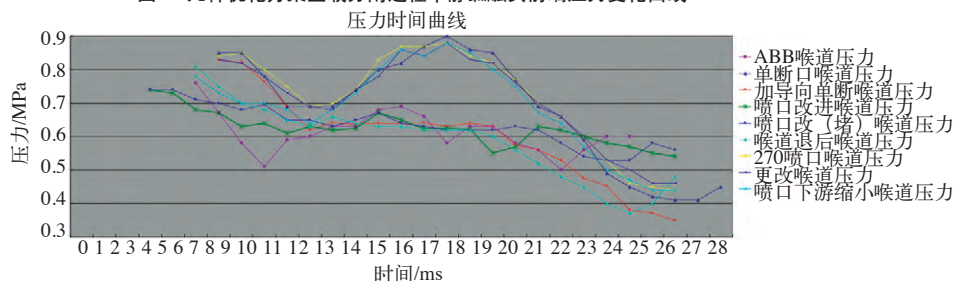


图9 几种优化方案空载分闸过程中压气缸压力变化曲线

通过压力变化曲线的对比，可以定性地得到几种优化措施对流场压力最大值的影响，归纳如下表所示。

表 几种优化措施对流场压力最大值的影响

优化措施	压气缸压力	静弧触头前端压力	喉道压力
加导向	降低30%	降低25%	降低30%
喷嘴加长	降低5%	降低10%	降低3%
张角扩大	降低2%	提高5%	降低3%
张角缩小	提高2%	降低3%	提高2%
喉道缩短	降低35%	降低25%	降低30%
喉径增大	降低10%	降低12%	降低15%

结束语

研究项目针对单断口和双断口断路器的灭弧室结构，在优化设计中考虑了多种方案，并对每种方案进行分闸过程中的流场仿真计算。

仿真计算结果用于指导63 kA开断能力单断口断路器样机的试制工作，通过仿真计算与样机试验两种方法之间的多次互相校正与配合，取得了较理想结果。EA

（收稿日期：2016.09.09）

（编辑：刘群彦）