

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.01.014

# 断路器充 SF<sub>6</sub> 或 N<sub>2</sub> 进行机械 操作试验的等价性研究

顾根泉, 聂海全, 王亚辉, 张朝辉, 张全民  
(河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001)

**摘要:**针对断路器内充 N<sub>2</sub> 代替 SF<sub>6</sub> 进行机械操作试验的等价性问题,提出了进行机械操作试验的等价条件,对等价条件的验证方法进行了分析。对断路器操动机构处和灭弧室处的运动特性同时进行了测试,利用断路器机械特性计算的方法和结果对设定的等价条件分别进行了对比分析,计算中考虑了传动零件弹性变形对断路器机械行程特性、速度特性的影响,并对传动零部件在操作中的弹性变形和受力进行了计算和对比分析,分析了 N<sub>2</sub> 和 SF<sub>6</sub> 在压缩或膨胀时的能量变化对灭弧室压力特性的影响。研究结果表明:机械操作试验的方法满足设定的等价条件,采用的计算分析方法可以用作对试验等价性进行对比分析的设计工具。

**关键词:**断路器;六氟化硫;氮气;等价性;机械特性

中图分类号:TM561.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)01-0066-05

## Equivalence of mechanical operation test for circuit breaker filled with SF<sub>6</sub> or N<sub>2</sub>

GU Gen-quan, NIE Hai-quan, WANG Ya-hui, ZHANG Chao-hui, ZHANG Quan-min  
(Henan Pinggao Electric Co., Ltd., pingdingshan 467001, China)

**Abstract:** Aiming at the equivalence problem of mechanical operation test of circuit breaker filled with N<sub>2</sub> instead of SF<sub>6</sub>, the equivalent conditions for the mechanical operation test were proposed. The verification methods of equivalent conditions were analyzed. The motion characteristics of the operating mechanism and the interrupter of the circuit breaker were tested at the same time. The method and results of the calculation of the mechanical characteristics of the circuit breaker were used to compare and analyze the set equivalent conditions. The influence of the elastic deformation of the transmission parts on the mechanical stroke characteristics and speed characteristics of the circuit breaker was considered in the calculation, and the elastic deformation and force of the transmission parts during operation were calculated and compared. The influence of the energy change of N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub> during compression or expansion on the pressure characteristics of the arc extinguishing chamber was analyzed. The results indicate that the method of mechanical operation test meets the set equivalent conditions. The calculation analysis method can be used as a design tool for comparative analysis of test equivalence.

**Key words:** circuit breaker; SF<sub>6</sub>; N<sub>2</sub>; equivalence; mechanical properties

## 0 引 言

SF<sub>6</sub> 气体绝缘性能好、灭弧能力强,是迄今为止最理想的绝缘和灭弧介质,广泛应用于电器设备中;SF<sub>6</sub> 气体又是一种价格昂贵的气体,也是一种温室气体,使

用中需要按照操作规程进行充入和回收<sup>[1-2]</sup>。

为减少 SF<sub>6</sub> 气体的使用量,在进行机械操作试验时,断路器常用高纯 N<sub>2</sub> 代替 SF<sub>6</sub>,并根据实测空载机械行程特性曲线的对比结果,对充入的 N<sub>2</sub> 气体压力值进行修正,但对等价性分析和验证还不充分。目

前, SF<sub>6</sub> 断路器的制造和测试技术已比较成熟, 很多公司对断路器的机械特性进行了仿真计算和测试研究。其中, 舒亮对断路器多体动力学仿真方法进行了研究, 提出了一种基于连续介质理论的断路器多体动力学仿真方法, 以弹性力学本构方程描述断路器各部件的应力、应变关系, 所提出的方法为提高断路器的机械可靠性及设计水平提供了一种新的指导方法; 孟凡刚对特高压断路器传动机构动态特性进行了研究, 建立了在冲击载荷作用下的连杆传动机构有限元模型, 该模型可准确模拟传动机构的传动特性。

本文将在上述研究基础上, 对断路器内充 SF<sub>6</sub> 或 N<sub>2</sub> 时进行机械操作试验的等价性作分析和讨论。

## 1 等价条件与验证方法

### 1.1 等价条件

参照 GB/T1984 高压交流断路器中对机械试验的有关规定<sup>[3]</sup>, 可设定断路器内充 N<sub>2</sub> 气体进行机械操作试验的等价条件为: 只要在整个试验范围内它同充 SF<sub>6</sub> 气体时断路器的试验等价或者不会更有利, 例如在下列几个方面:

- (1) 参考的机械行程特性;
- (2) 合闸和分闸机构的功率和强度;
- (3) 结构的刚度。

### 1.2 验证方法

断路器进行机械特性测试时, 可直接得到机械行程特性曲线, 以断路器内充 SF<sub>6</sub> 气体操作时的机械行程特性曲线作为参考机械行程特性曲线, 充 N<sub>2</sub> 气体操作时的机械行程特性曲线应在其 ±5% 上、下包络线限值以内, 这也是通常所用对等价性的分析方法。但高压断路器的尺寸较大, 操作时的作用力也较大, 由于传动零件存在弹性变形, 进行机械特性测试时, 在不同位置测得的机械行程特性曲线会不同。某型号断路器在操动机构处和灭弧室处测得的机械行程特性曲线如图 1 所示。

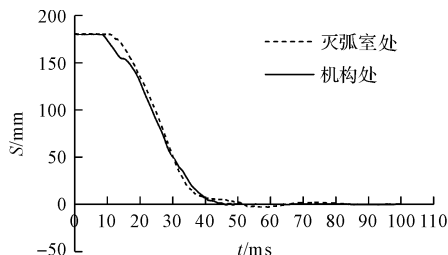


图1 机械行程特性曲线

图1中, 在操动机构处和灭弧室处测得的两条机械行程特性曲线存在明显差异, 须分别进行对比分析。

合闸和分闸的功率和强度, 应主要对比分析断路器合闸、分闸操作中速度与作用力的变化, 分析操作中断路器主要零部件的受力及变化, 保证其等价性。分析时不仅应对比分析平均速度, 还应对比分析断路器的合闸与分闸的最高速度及末速度。

断路器操作中的合闸速度和分闸速度一般是通过实测机械行程特性曲线间接得到, 计算时时间  $\Delta t$  的大小取值不同, 速度的数值会略有不同, 时间  $\Delta t$  的取值太小, 测量干扰及速度曲线的波动变化较大。由图1中在灭弧室处测得机械行程曲线得到的速度曲线如图2所示。

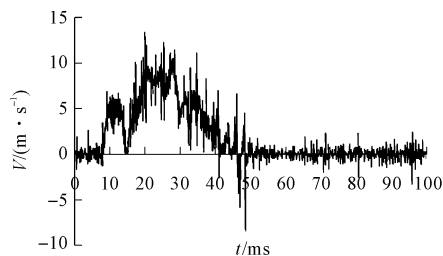


图2 速度曲线

图2中, 速度曲线湮没在强干扰中, 速度值  $V$  无法辨识, 此时时间  $\Delta t$  的取值应适当, 由此带来的问题是实际测试结果会存在一定的误差。

考虑结构的刚度, 应对断路器操作中主要零部件产生的弹性变形进行测量。图1中, 在断路器操动机构处和灭弧室处测得的二条机械行程特性曲线不同步, 开始时, 灭弧室处运动明显滞后, 在整个运动过程中, 二个部位除做相同的分闸运动外, 还存在相对运动, 其行程差值即为断路器传动系统的弹性变形  $\Delta X$ 。传动系统弹性变形如图3所示。

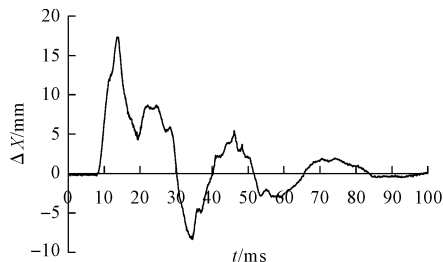


图3 传动系统弹性变形

断路器新产品在样机试验阶段, 可对断路器充 SF<sub>6</sub> 气体和 N<sub>2</sub> 气体时机械操作试验的等价性进行测试和对比分析。但断路器结构复杂, 其灭弧室封闭在一高压容器内, 且运动速度较高, 对操作过程中灭弧室动态压力及零部件受力、变形的测试存在较大困难<sup>[4-6]</sup>。上述参数的测试受产品结构的限制, 测量方法

也存在影响,所以,还应通过理论计算与试验结果进行相互验证。

断路器设计时要对其运动特性进行计算<sup>[7-9]</sup>,同时,分析其主要零部件的受力及动态变形,并与实际测量结果对比修正,对同类型断路器的等价性进行分析。断路器的机械操作试验是空载试验,进行空载计算也较为简便。

## 2 运动特性的计算方法

断路器的灭弧室与操动机构之间有各种传动零部件,其中绝缘拉杆相对较长,弹性模量相对较小,刚度较差,其机械性能与绝缘性能对断路器的可靠性影响较大<sup>[10-11]</sup>。

首先对断路器运动系统进行简化,将运动零部件的质量归化至绝缘拉杆的二端<sup>[12-13]</sup>,主要计算绝缘拉杆的受力与变形。

本文以特高压瓷柱式断路器分闸为例,其运动系统的简化如图 4 所示。

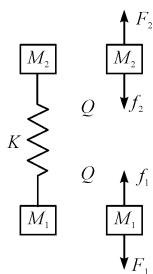


图 4 断路器运动系统简图

$K$ —绝缘拉杆的弹性系数; $M_1$ —归化至操动机构处的运动质量; $M_2$ —归化至灭弧室处的运动质量; $F_1$ —操动机构的作用力; $F_2$ —灭弧室的压气反力; $f_1$ —操动机构处的摩擦力; $f_2$ —灭弧室处的摩擦力; $Q$ —绝缘拉杆受到的作用力

绝缘拉杆受到的作用力  $Q$  与其变形成量  $\Delta X$  的关系为:

$$Q = K\Delta X \quad (1)$$

对同一台断路器及其操动机构,当断路器充入不同的气体时,应对断路器内充  $\text{SF}_6$  气体或  $\text{N}_2$  气体时的运动特性分别进行计算和对比分析。断路器内充  $\text{SF}_6$  或  $\text{N}_2$  时进行分闸操作,压气缸受到的压气反力取决于压气缸的尺寸和压气缸内气体的压力。

$\text{SF}_6$  压力按 Beattie-Bridgman 公式计算<sup>[14]</sup>:

$$p = 56.2rT(1+B) - r^2A \quad (2)$$

$$A = 74.9(1 - 0.727 \times 10^{-3}r)$$

$$B = 2.51 \times 10^{-3}r(1 - 0.864 \times 10^{-3}r)$$

式中: $p$ —气体压力; $r$ —气体密度; $T$ —气体温度。

$\text{N}_2$  压力按理想气体状态方程计算:

$$p = rRT \quad (3)$$

式中: $p$ —气体压力; $r$ —气体密度; $R$ —气体常数; $T$ —气体温度。

式(2)中, $\text{SF}_6$  气体压力  $p$  是气体密度  $r$  与温度  $T$  的函数;式(3)中, $\text{N}_2$  气体压力  $p$  也是气体密度  $r$  与温度  $T$  的函数。要计算压气缸内气体压力的变化,首先要计算气体密度  $r$  (或质量  $m$ 、体积  $V$ ) 和温度  $T$  的变化。

压气缸内气体的密度  $r$  为:

$$r = \frac{m}{V} = \frac{m_0 - \Delta m}{V_0 - \Delta V} \quad (4)$$

式中: $m$ —压气缸内气体质量; $V$ —压气缸容积; $m_0$ —压气缸内气体初始质量; $V_0$ —压气的初始容积; $\Delta m$ —在时间  $\Delta t$  内通过喷口排出的气体量; $\Delta V$ —在时间  $\Delta t$  内压气缸容积的变化量。

在时间  $\Delta t$  内压气缸排出的气体量  $\Delta m$ ,取决于灭弧室喷口的排气流量  $dm/dt$ ,可由气体动力学的有关知识求得<sup>[15]</sup>。

接下来计算压气缸内的气体温度。由气体变化过程的能量守恒关系可知,压气缸内气体一方面接受了外部机械功  $dW$ ,另一方面喷口流出气体带走了能量  $dQ$ ,气体内能的变化量为  $dU$ ,其能量平衡关系为<sup>[16-17]</sup>:

$$dW - dQ = dU \quad (5)$$

外部对压气缸内气体所作的机械功为:

$$dW = pA \frac{ds}{dt} dt = pdV \quad (6)$$

喷口流出气体带走的能量为:

$$dQ = hdm \quad (7)$$

气体内能的变化量为:

$$dU = d(C_v Tm) = C_v Tdm + C_v mdT \quad (8)$$

式中: $p$ —压气缸内气体压力; $A$ —压气缸截面积; $ds/dt$ —压气缸运动速度; $dV$ —压气缸容积的变化量; $h$ —气体的比焓; $dm$ —喷口排出的气体量; $C_v$ —气体的定容比热; $T$ —气体的温度。

所以,压气缸内气体的能量平衡方程可写为:

$$pdV - hdm - C_v Tdm = C_v mdT \quad (9)$$

气体的温度变化为:

$$T = T_0 + \Delta T \quad (10)$$

式中: $T_0$ —压气缸内气体的初始温度; $\Delta T$ —在时间  $\Delta t$  内,气体温度变化的增量。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验与计算结果

以断路器分闸操作为例,断路器分别充入相同压

力的 SF<sub>6</sub> 和 N<sub>2</sub>,对图 4 中的质点 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 的受力及运动分别进行分析和计算,得到操动机构处与灭弧室处的分闸机械行程特性曲线,如图 5 所示。

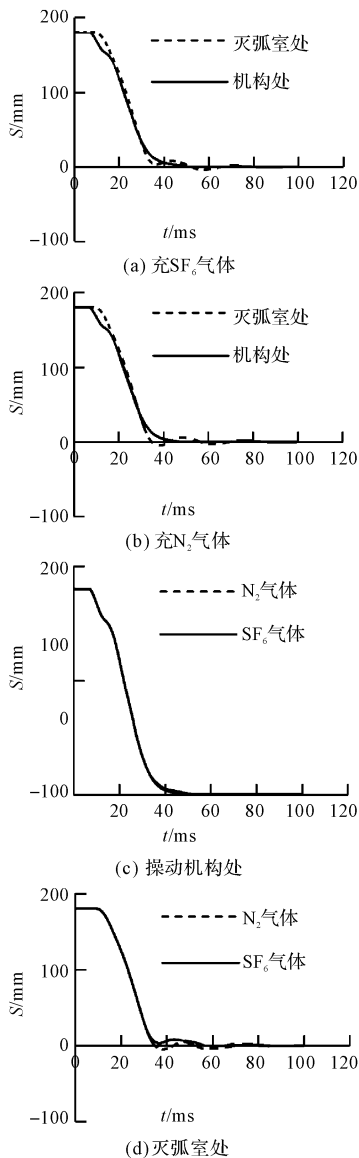


图 5 机械行程特性曲线

由图 5 可知:充 SF<sub>6</sub> 时的计算结果与实测机械行程特性曲线非常一致,充 N<sub>2</sub> 时的计算结果与实测机械行程特性曲线也非常一致,说明了计算结果的准确性。

再分别对比操动机构处与灭弧室处的机械行程特性曲线可知:操动机构处的机械行程特性曲线基本重合,灭弧室处的机械行程特性曲线在行程末段存在明显差异,充 N<sub>2</sub> 时存在过冲。

由于计算结果不受干扰的影响,进行对比分析较为方便。根据断路器分别充入相同压力的 SF<sub>6</sub> 和 N<sub>2</sub> 的计算结果,操动机构处与灭弧室处的速度与变形比较如图 6 所示。

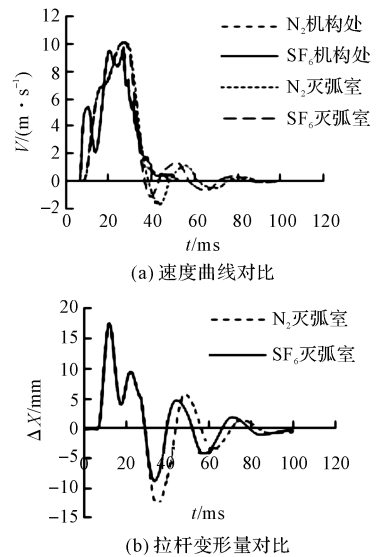


图 6 速度与变形比较

由图 6 可以看出:操动机构处的速度曲线基本重合,灭弧室处的速度曲线在加速阶段基本重合,最高速度也基本相同,在进入缓冲行程后曲线存在明显差异,充 N<sub>2</sub> 时速度较高,下降较慢,曲线滞后;两条曲线分别对应断路器充入相同压力的 SF<sub>6</sub> 和 N<sub>2</sub>,在前期加速阶段绝缘拉杆的动态变形基本相同,在后期缓冲阶段曲线存在明显差异,其中充 N<sub>2</sub> 气体时曲线对应的变形量大、振荡周期变长,这与实际测试结果也非常一致。

图 6(b) 中绝缘拉杆的动态变形量,也间接反映了分闸过程中绝缘拉杆受到的动态作用力,充 N<sub>2</sub> 气体时绝缘拉杆上的作用力较大。

### 3.2 对试验与计算结果的分析

由上述对比结果可以看出:操动机构处的机械行程特性曲线与灭弧室处的机构行程特性曲线不完全相同,断路器充入不同气体时的机械行程特性曲线也不完全相同,如果仅仅比较操动机构处的机械行程特性曲线,以断路器内充 SF<sub>6</sub> 气体时的机械行程特性曲线作为参考机械行程特性曲线,断路器在充入相同压力的 N<sub>2</sub> 气体时机械行程特性曲线与参考曲线差异很小,并在参考曲线的 ±5% 包络线限值以内,满足断路器标准的有关要求;而在灭弧室处的机械行程特性曲线差异明显,特别在行程末段,可能会超过出参考曲线的 ±5% 包络线限值。

如果再比较灭弧室处的速度曲线、结构的刚度或作用力,在缓冲阶段的差异更明显,充入额定压力的 N<sub>2</sub> 气体与充入额定压力的 SF<sub>6</sub> 气体的最高分闸速度基本相同,缓冲阶段速度较高,下降较慢,绝缘拉杆的变形量及受到的作用力较大,这表明试验不完全等价,



但也不会更有利。

产生上述差异的主要原因是:分闸操作时,压气缸内气体压力变化不同, SF<sub>6</sub> 气体压力较高, N<sub>2</sub> 气体压力较低, 修正 N<sub>2</sub> 气体充入压力后, 其机械行程特性曲线会稍接近参考曲线, 也不会完全等价, 也不会更有利。

高压断路器的机械操作试验是断路器处于空载(即主回路没有电压、电流)条件下进行的操作试验, 是验证高压断路器机械性能和动作可靠性的试验。在高压断路器进行型式试验时, 除了要验证高压断路器机械特性的稳定性外, 还要对断路器零部件的机械强度进行试验验证, 完成规定次数的操作, 试验工作量大、周期长。

由于迄今为止还无法完全靠设计来确定高压断路器的性能, 因此任何一种高压断路器产品的制造, 其性能都要通过试验来验证, 而且在高压断路器生产和运行过程中还需要不断的检查其各种工作特性, 以保证高压断路器的工作可靠性。虽然断路器充入 N<sub>2</sub> 气体和充入 SF<sub>6</sub> 气体的机械操作试验不完全等价, 但也不会更有利, 由前述设定的等价条件, 为简化试验和提高生产效率, 断路器在制造厂试验时, 应可以充入 N<sub>2</sub> 气体进行机械操作试验。

## 4 结束语

针对断路器内充 N<sub>2</sub> 代替 SF<sub>6</sub> 进行机械操作试验的等价性问题, 本文提出了进行机械操作试验的等价条件, 对断路器操动机构处和灭弧室处的运动特性同时进行了测试和计算分析。

研究表明, 为了试验方便, 断路器内可以充 N<sub>2</sub> 气体进行机械操作试验, 采用计算的方法对断路器充 SF<sub>6</sub> 或 N<sub>2</sub> 气体进行机械操作试验的等价性进行分析是有效的。

### 参考文献 (References):

[1] 张晓星, 肖焱艳, 黄杨珏. 低温等离子体处理 SF<sub>6</sub> 废气综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 16-24.

- [2] 吴军辉, 杨纪明. SF<sub>6</sub> 对大气的影 响[J]. 高压电器, 1998, 34(5): 31-33.
- [3] GB1984—2014. 高压交流断路器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [4] 林 莘, 狄 谦, 韩书谟. 252kVSF<sub>6</sub> 断路器灭弧室压力特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 111-116.
- [5] 林 莘, 吕祥鹏, 韩书谟. SF<sub>6</sub> 断路器空载开断的气压特性测试与研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 51-55.
- [6] 刘卫东, 吴俊勇, 黄瑜珑, 等. SF<sub>6</sub> 断路器强电流开断喷管内压力测量[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 131-136.
- [7] 王连鹏, 王尔智. SF<sub>6</sub> 断路器空载开断下液压操动机构与灭弧室联合仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 118-123.
- [8] 魏俊梅, 林 莘. SF<sub>6</sub> 高压断路器压力特性与机械特性耦合数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 111-116.
- [9] 舒 亮, 吴 浪, 吴桂初, 等. 一种断路器多体动力学仿真方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 41-48.
- [10] 张红军, 王文文, 张 强, 等. 断路器绝缘拉杆的动力学仿真分析与试验研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 83-87.
- [11] 李 靖, 赵鸿飞, 赵建沛, 等. SF<sub>6</sub> 高压断路器分合闸绝缘拉杆动态形变的测试分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 128-131.
- [12] 孟凡刚, 巫世晶, 张增磊, 等. 特高压断路器传动机构动态特性分析[J]. 中南大学学报, 2016, 47(5): 1519-1526.
- [13] 顾根泉. 断路器传动机构传动比的一种分析方法[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 123-127.
- [14] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [15] 赵承庆, 姜 毅. 气体射流动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [16] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [17] 刘绍峻. 高压电器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

[编辑: 周昱晨]

### 本文引用格式:

顾根泉, 聂海全, 王亚辉, 等. 断路器充 SF<sub>6</sub> 或 N<sub>2</sub> 进行机械操作试验的等价性研究[J]. 机电工程, 2019, 36(1): 66-70.

GU Gen-quan, NIE Hai-quan, WANG Ya-hui, et al. Equivalence of mechanical operation test for circuit breaker filled with SF<sub>6</sub> or N<sub>2</sub>[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(1): 66-70.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>