

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.007

操动机构缓冲对断路器传动系统的影响分析

刘 煜, 韩国辉, 雷 琴, 胡月萍

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 高压断路器中, 操动机构通过传动系统来带动灭弧室运动, 以实现断路器的分闸、合闸功能, 但是传动系统也可能对传递的运动造成不良影响。文中以某型号高压断路器为研究对象, 对其机械特性的测试结果进行分析, 用新的视角论述传动系统、操动机构特性之间的匹配性关系, 通过优化二者的匹配性, 改善断路器的性能, 为后续的设计提供设计参考。

关键词: 操动机构; 传动系统; 刚性; 过冲; 机械特性

Influence Analysis of Buffering Performance of Operating Mechanism on the Transmission System of Circuit Breaker

LIU Yu, HAN Guohui, LEI Qin, HU Yueping

(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: transmission system is used to connect interrupter and operating mechanism in high voltage circuit breaker, to do opening, closing. But the transmission system may also have a negative impact on the movement of transmission. In this paper, a certain type of CB is taken as the research object, the test results of mechanical characteristics are analyzed, and the matching relationship between transmission system and operating mechanism characteristics is discussed from a new perspective. By optimizing the matching between the two, the performance of circuit breaker is improved, which can provide design reference for future design.

Key words: operating mechanism; transmission system; rigidity; overshoot; operation characteristics

0 引言

在电网系统中, 断路器起着控制输电线路通断和安全保护的重要作用, 其在电力系统中起到关合、承载和开断正常回路条件下的电流的作用, 并能在规定的时间内关合、承载和开断异常回路条件下的电流。操动机构通过相应的传动系统, 带动灭弧室进行分合闸操作^[1-2]。在整个断路器的运动环节中, 传动系统起着传递能量, 并按照需求改变力的大小及方向的作用, 它与操动机构共同决定了灭弧室的机械运动特性。但是由于触头的运动特性无法方便的测量, 在实际的试验与工程中都是以操动机构的运动特性来代替触头的运动

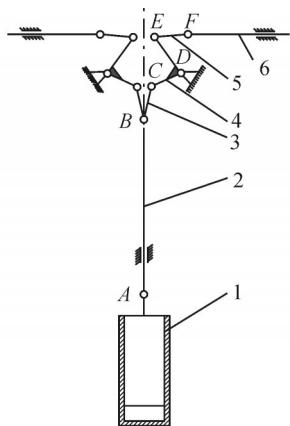
特性, 这就会带来一定的偏差。通常这种偏差不会影响产品的正常运行, 但是当偏差达到一定程度后会导致机构行程曲线无异常但灭弧室中发生碰撞的恶性事故发生^[3]。为此, 笔者以某断路器为研究对象, 以一种新的视角分析该产品机械特性设计中的不足, 分析其动机构设计与传动系统设计中的匹配性提升的方式, 为断路器机械特性设计提供了参考。

以某型号断路器为例, 其传动结构见图1。该断路器为串联双断口结构, 使用液压操动机构驱动。机构的活塞杆1与绝缘拉杆2直接相连, 当活塞杆1在液压缸中做上下方向直线运动时, 在绝缘拉杆2、连板3的带动下, 拐臂4绕着D点进行平面

收稿日期: 2019-08-07; 修回日期: 2019-10-11

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(高压断路器钣金弹簧操动机构和特高压碟簧液压机构研制)。

Project Supported by State Grid Science and Technology(Development of Sheet Metal Spring Operating Mechanism and UHV Hydraulic Spring Operating Mechanism for High Voltage Circuit Breaker).



1—活塞杆；2—绝缘拉杆；3—连板；4—拐臂；
5—连板；6—动触头。

图1 断路器传动系统简图

Fig. 1 Circuit breaker's transmission diagram

转动而改变了运动的方向,并最终带动动触头6进行水平方向的直线运动。

1 试验结果分析

在上述的传动系统中,绝缘拉杆2往往会是一个细长杆结构,且刚度偏低,在断路器进行分合闸操作中往往会存在形变,从而影响灭弧室的动作特性。为考核传动机构对机械特性的影响,测量绝缘拉杆两端的机械特性将是一个可实现的重要手段。笔者在断路器样机上进行了实际测试,断路器的机械特性测试平台采用德国 KoCoS 公司的 ACTAS 2.50,测试中选取两个直线传感器,分别布置在A点与B点进行测量。其机械特性曲线见图2。

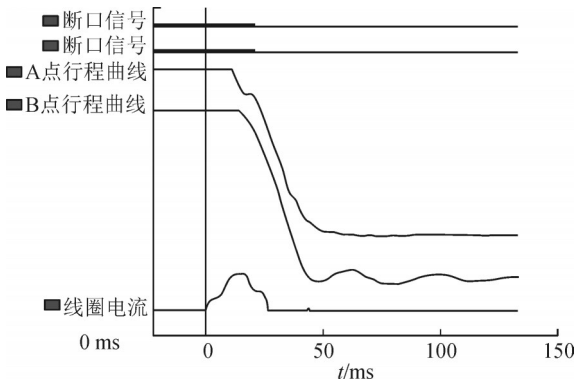


图2 断路器分闸机械行程曲线

Fig. 2 Circuit breaker's opening stroke curve

图2中:A点测得的机械行程曲线在上方;B点测得的机械行程曲线在下方。通过测试可以发现,B点测得的分闸行程曲线不仅存在约2.8 ms的启动延迟,还存在严重的下冲及回弹现象。但是该款机构在另一款断路器上却不存在过冲问题,见图3。两种断路器的灭弧室等都相同,区别在于绝缘拉杆的长度差距较大,一款超过9 m,另一款则只有2 m。

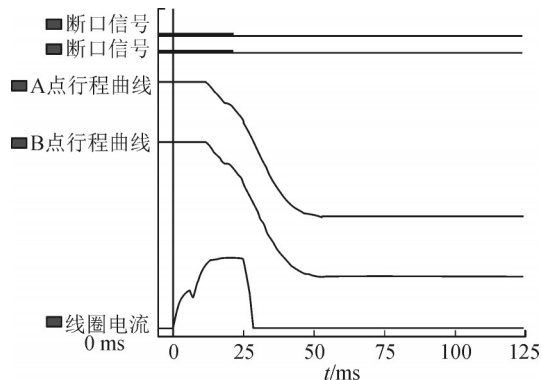


图3 短拉杆断路器分闸机械行程曲线

Fig. 3 Short-rod circuit breaker's opening stroke curve

这两种情况下A、B两处如此差异明显的行程曲线表明了传动系统对断路器的机械特性起着关键作用。

2 过冲问题分析

断路器的分合闸过程是一个短暂的剧烈运动过程,以分闸过程为例,从液压操动机构接到分闸命令到操动机构分闸到底(A点)不到60 ms,最大速率可达15 m/s,但是整个运动行程只有180 mm。这就意味着整个传动系统在运动的加速及减速过程中,会受到剧烈的冲击。这期间,传动环节间隙碰撞力又会激起机构构件的弹性振动,并使得弹性变形增大,并最终体现在传动系统的薄弱环节上^[4-8]。

2.1 薄弱环节分析

根据材料力学的相关知识,材料的应力 σ 、应变 ε 与弹性模量 E 的关系为

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

由式(1)可知:在相同的作用力下,材料的弹性模量越大,越不容易发生变形^[9]。在传动环节中活塞杆1、连板3和5以及拐臂4都是采用优质钢材,其弹性模量可达到206 GPa。绝缘拉杆2采用的是复合材料,其弹性模量约在20~52 GPa,远低于其余传动环节中选用的钢材,因此图1中B点也就可能是分闸过程中柔性变形最大的节点^[10-14]。

2.2 缓冲压力碰撞冲击假设

断路器分合闸过程是一个剧烈运动的过程,尤其是在分闸缓冲阶段,液压机构的缓冲腔压力会急剧的变化,以实现系统的“软着陆”^[15-17]。典型的分闸缓冲曲线见图4。缓冲压力作用的时间仅有不到20 ms,但是压力峰值可以达到110 MPa。

短时、剧烈的力学波动,可以考虑用碰撞的思路去分析相关过程,以分闸过程为例,分闸启动时以及分闸缓冲介入时,都可以视为一种碰撞,当碰撞发生时,接触点的速度会发生改变,但是由于碰撞的时间比较短,无法得出准确的碰撞时间,须要

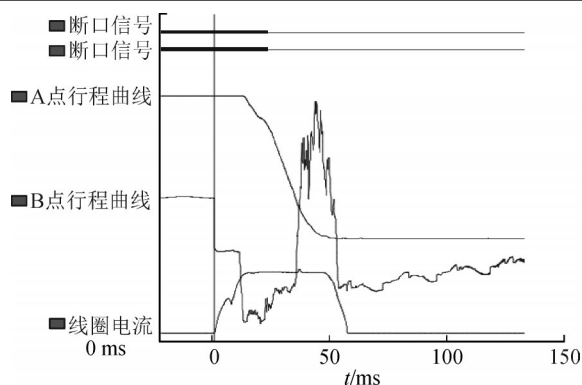


图4 缓冲压力实测曲线

Fig. 4 Buffer pressure curve

通过动量定理来计算接触碰撞力^[18-19]。在碰撞过程中接触力 F_c 对时间的积分可得到冲量 P , 如此, 由碰撞产生的能量损失也可用 F_c 做的负功来表示, 或者用冲量 P 与接触力 F_c 之间的微分关系来表达, 跟据功—能转化关系, 接触力 F_c 所做的功 E_L 与系统内的动能变化 ΔT 相同, 其转化关系为

$$\begin{cases} P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int F_c(t) dt \\ E_L = - \int F_c(t) \delta dt = - \int F_c(t) d\delta = - \iint \delta dP \\ \Delta T + E_L = 0 \end{cases} \quad (2)$$

通过相关的计算, 可以帮助传动系统在分闸过程中的受力状态, 帮助寻找影响过冲现象的关键因素。

2.3 绝缘拉杆压稳分析

由于液压机构分闸缓冲介入后会产生类似碰撞的效果, 给运动系统一个很大的反力, 这必然导致一个结果: 整个传动系统将会受到更加剧烈的缓冲反力。

2.3.1 压稳临界力

在分闸末段绝缘拉杆为受压状态, 而绝缘拉杆属于典型的细长杆, 压力过大可能会出现失稳现象, 因此, 可进行拉杆受压稳定性校核。

压杆稳定的临界力采用欧拉公式进行计算, 即

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (3)$$

式(3)中: E 为压杆材料的弹性模量; I 为压杆横截面的惯性矩; μ 为长度因数; l 为压杆两个支撑之间的长度。

绝缘拉杆截面是环形结构, 见图5。该截面对 X 或 Y 轴的惯性矩是

$$I_x = \int y^2 ds = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{64} \quad (4)$$

该绝缘拉杆的导向结构见图6。

由图6可知, 压杆两端为转动及导向约束, 可以等效为两端固定的情况。这种约束的长度因数 μ 为0.5。导向中共有4节套管, 绝缘拉杆支撑之间的最

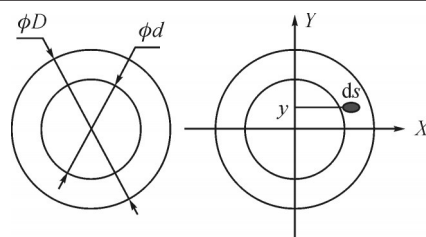


图5 绝缘拉杆截面形状

Fig. 5 Section of insulating rod

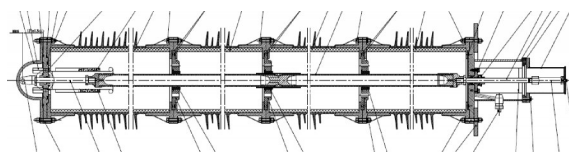


图6 绝缘拉杆的导向结构

Fig. 6 Guide structure of insulating rod

大距离 l 2.8 m, 空心拉杆外径 D 为 73 mm, 内径 d 为 61 mm, 带入式(3)可计算出压杆稳定的临界力 F_{cr} 为 187 kN

2.3.2 缓冲段绝缘拉杆受力

按照碰撞的相关理论, 可从冲量入手, 在估算中, 可按式(5)计算出在缓冲段的拉杆平均受力为

$$F = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} = \frac{m \times \Delta s}{\Delta t^2} \quad (5)$$

式(5)中: m 为运动部分质量; Δv 为缓冲段的平均速度; Δt 为缓冲段的运动时间; Δs 为缓冲段的行程。

从图2的曲线上读取出的数据后计算可得

$$F_{冲击} = \frac{m \times \Delta s}{\Delta t^2} \approx 21.2 \text{ kN} < F_{cr} \quad (6)$$

按此种方法绝缘拉杆不应存在失稳的风险。

2.3.3 整体失稳分析

在考虑套管中部支撑时, 绝缘拉杆是安全的, 但是绝缘拉杆与导向盘不会始终接触, 如果不考虑4节套管之间的支撑导向的作用, l 值将为整个绝缘拉杆的长度 9.8 m, 其余参数不变, 这时有

$$F_{cr1} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \approx 15.1 \text{ kN} < F_{冲击}$$

此时绝缘拉杆可能存在失稳的风险。

3 优化设计

根据上述的问题分析, 改善过冲可通过提高临界力或降低平均受力来实现, 其中提高临界力可通过减小绝缘拉杆的柔性来实现, 而通过改进机构的分闸缓冲特性以降低平均受力则是一个比较便捷的方式。借助计算机辅助的方法对操动机构的分闸缓冲特性进行仿真可以迅速直观的对比缓冲特性的改变。

多级缓冲结构见图7。该液压操动机构采用的是多级台阶缓冲的方式, 优化改进的重点思路就是

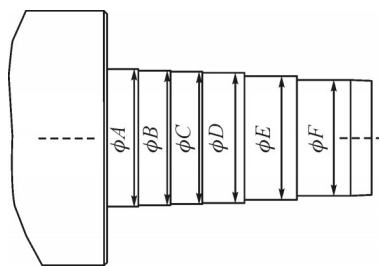


图7 多级缓冲结构

Fig. 7 Multilevel buffer structure

延长缓冲作用时间,加长缓冲段长度,优化前后的缓冲尺寸见表1。

表1 缓冲段长度

名称	A	B	C	D	E	F	总长
优化前	6	6	6	8	10	10	50
优化后	8	8	8	8	15	14	65

借助于计算机仿真手段^[20-23],可以先行对优化后的缓冲结构与优化前进行对比。行程曲线对比与缓冲压力曲线对比分别见图8、9。

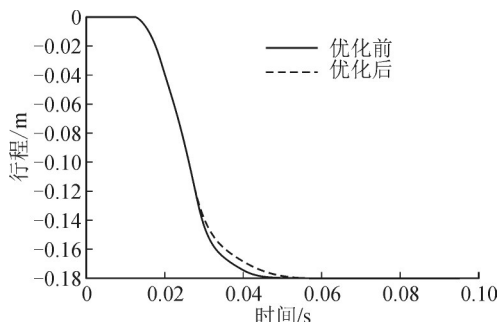


图8 行程曲线对比

Fig. 8 Comparison of stroke curves

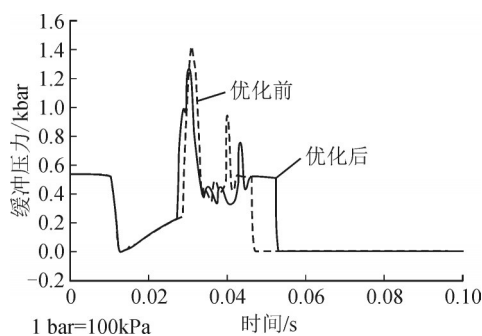


图9 缓冲压力曲线对比

Fig. 9 Comparison of buffer pressure

从仿真曲线上可以发现,优化后的缓冲结构明显的延长了缓冲压力的作用时间,此时,缓冲阶段的冲击力为

$$F_{\text{优化后}} = \frac{m \times \Delta s}{\Delta t^2} \approx 15 \text{ kN} < F_{\text{cr1}} \quad (7)$$

此时无失稳风险。

4 优化后的试验结果

按照上述分析,针对该断路器产品优化改进了缓冲结构,以延长缓冲力接入的时间,减小缓冲时对绝缘杆的冲击力,按照优化后的缓冲结构组织样机进行了实测,其测试结果见图10。

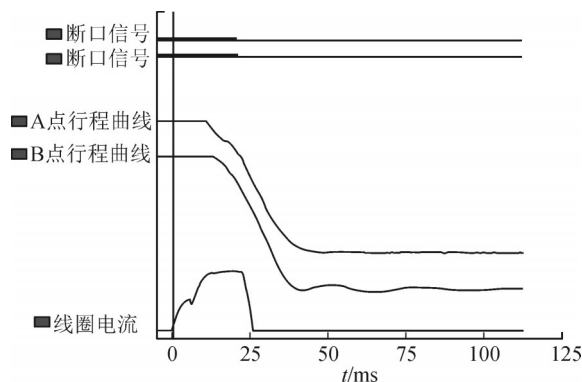


图10 优化后断路器分闸机械行程曲线

Fig. 10 Optimized circuit breaker's opening stroke curve

优化前后的过冲回弹的实测数据对比见表2。

表2 B点过冲量与回弹量对比

Table 2 Comparisons of overshoot rebound of point B mm

名称	过冲量	回弹量
优化前	14.42	10.82
优化后	4.37	3.16

从图10和表2中可以看出,优化缓冲后,过冲量与回弹量都得到了显著降低,虽然测量设备与测量方法等可能不是太完善,但是上述过程仍然可以说明通过降低对传动系统柔性环节的冲击可以有效改善产品性能。

5 结语

传动系统的刚性不足会严重影响断路器的机械特性。刚性差的传动机构会使断路器产生较大的过冲现象,灭弧室运动也会产生较大的时间滞后,不利于设计人员把握真实的灭弧室运动特性。文中以一种新的视角,以碰撞的方式解读液压机构缓冲、绝缘拉杆的关系,从整体的角度考虑绝缘拉杆的稳定性,给出了一种通过优化操动机构的缓冲等方式,减少对传动系统中柔性环节冲击力的方法,为断路器机械特性设计提供了新的参考。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节容,钱家骊,等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. High

- voltage circuit breaker's principle and application[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2000.
- [2] 赵智大. 高电压技术[M]. 第3版. 北京:中国电力出版社, 2013.
- ZHAO Zhida. High voltage technique[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [3] 王永良, 彭新奇, 程铁汉. 传动机构对高压断路器动作特性的影响分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8):200-204.
- WANG Yongliang, PENG Xinqi, CHENG Tiehan. Influence analysis of transmission mechanism on high voltage circuit breaker's operation characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):200-204.
- [4] 张策. 机械动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- ZHANG Ce. Dynamics of machinery[M]. Beijing:Higher Education Press, 2000.
- [5] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 第4版. 北京:机械工业出版社, 2015.
- LI Bin. SF₆ high voltage equipment design[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [6] 巫世晶, 孟凡刚, 李小勇, 等. 百万伏断路器传动机构有限元建模与分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(8):121-127.
- WU Shijing, MENG Fangang, LI Xiaoyong, et al. Finite element modeling and analysis of transmission mechanism for megavolt circuit breaker[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2016, 44(8):121-127.
- [7] 杨武. 高压断路器机构动力学特性及关键状态参数在线检测方法的研究[D]. 西安:西安交通大学, 2002.
- YANG Wu. Research on online dynamics characteristics and key state parameter method for mechanism of high voltage circuit breaker[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [8] 张增磊, 巫世晶, 赵文强, 等. 含间隙高速多连杆机构动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2014(14):66-71.
- ZHANG Zenglei, WU Shijing, ZHAO Wenqiang, et al. Dynamic characteristics of high-speed multi-link transmission mechanisms with clearance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(14):66-71.
- [9] 刘鸿文. 材料力学I[M]. 北京:高等教育出版社, 2017.
- LIU Hongwen. Mechanics of materials I[M]. Beijing: Higher Education Press, 2017.
- [10] 王之军, 刘亚培, 王刚. 基于Ls-Dyna的高压断路器传动系统瞬态动力学仿真与试验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3):52-58.
- WANG Zhijun, LIU Yapei, WANG Gang. Transient dynamic simulation and experimental study on high voltage circuit breaker transmission system based on Ls-Dyna[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3):52-58.
- [11] 陈超华, 周克民. 刚性机构与柔性机构性质的探讨[J]. 机械研究与应用, 2012(2):22-25.
- CHEN Chaohua, ZHOU Kemin. Discussion on the nature of the rigid mechanism and compliant mechanism[J]. Mechanical Research & Application, 2012(2):22-25.
- [12] ZIANI A, MOULAI H. Hybrid model of electric arcs in high voltage circuit breakers[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 92(11):37-42.
- [13] 陈杰. 特高压断路器连杆传动机构非线性特性研究[D]. 武汉:武汉大学, 2013.
- CHEN Jie. Study on linkage mechanism's nonlinear characteristics of ultra-high voltage circuit breaker[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [14] 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(自然科学版), 2016, 47(5):1519-1526.
- MENG Fangang, WU Shijing, ZHANG Zenglei, et al. Dynamic characteristic analysis of transmission mechanism of ultra-high voltage circuit breaker[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(5):1519-1526.
- [15] 雷琴, 王永良, 李宁, 等. 碟簧液压操动机构的建模与仿真[J]. 液压与气动, 2015(1):92-100.
- LEI Qin, WANG Yongliang, LI Ning, et al. Modeling and simulation of hydraulic spring operating mechanism[J]. Chinese Hydraulic & Pneumatics, 2015(1):92-100.
- [16] 苑舜. 高压断路器液压操动机构[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- YUAN Shun. High voltage circuit breaker's hydraulic operating mechanism[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [17] 陈保伦. 液压操动机构的设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- CHEN Baolun. Design and application of hydraulic operating mechanism[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [18] 王国庆. 考虑碰撞、非线性阻尼和构件弹性的机构动力学理论与应用研究[D]. 西安:西安理工大学, 2002.
- WANG Guoqing. Theory and application research of elastic mechanism dynamics concerning impact and nonlinear damping[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2002.
- [19] 巫世晶, 李菲, 赵文强, 等. 含多间隙副特高压断路器传动机构动力学特性研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13):1719-1724.
- WU Shijing, LI Fei, ZHAO Wenqiang, et al. Research on driving mechanism dynamics in UHV breaker with multiple clearance joints[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(13):1719-1724.
- [20] 张作状. 液压弹簧操动机构缓冲结构的仿真研究[J]. 液压与气动, 2018(4):115-119.
- ZHANG Zuozhuang. Simulation on the buffer structure of

- [15] 柳永玉. 1 000 kV SF₆标准电压互感器的绝缘设计和电场计算分析[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 4-7.
LIU Yongyu. Calculation and analysis for electric field intensity of 1 000 kV SF₆ gas insulated voltage transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 4-7.
- [16] 林 莘, 蔡 强, 徐建源. 基于区域分解法的1 100 kV隔离开关大规模电场计算问题[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 1-5.
LIN Xin, CAI Qiang, XU Jianyuan. Large scale of electric field calculation of 1 100 kV disconnecter based on domain decomposition method[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 1-5.
- [17] 盛剑霓. 工程电磁场数值模拟[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
SHENG Jianhong. Numerical simulation of engineering Field[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991.
- [18] 武 奇, 楼 丹. 几种隔离开关断口屏蔽罩的电场计算[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 31-34.
WU Qi, LOU Dan. Electric field calculation of three types of isolator shields for disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 31-34.
- [19] 刘晓明, 赵云学, 温吉斌. 超高压断路器出线套管电场数值计算与绝缘分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(1): 28-32.
LIU Xiaoming, ZHAO Yunxue, WEN Jibin. Numerical calculation of electric field and analyses of insulation performance for bushing of extra-high voltage SF₆ circuit breaker[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(1): 28-32.
- [20] 韩社教, 马西奎, 戴 栋. 有限元-解析结合解法在无界轴对称静电场问题数值解中的应用[J]. 电工技术学报, 2001, 16(5): 1-5.
HAN Shejiao, MA Xikui, DAI Dong. Applications of hybrid FEM—analytic approach in unboundary axisymmetrical electrostatic field computation[J]. Journal of Electrical Technology, 2001, 16(5): 1-5.
- 王 瑜(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要从事智能开关设备的研发和可靠性研究。

(上接第47页)

- hydraulic spring operating mechanisms[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018(4): 115-119.
- [21] 魏忠永, 赵鸿飞, 刘 伟. 高压断路器液压操动机构油缸缓冲过程仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 216-221.
WEI Zhongyong, ZHAO Hongfei, LIU Wei. Cushion process of the hydraulic cylinder of hydraulic operating mechanism for high voltage circuit breaker[J]. Journal of agricultural machinery, 2010, 41(6): 216-221.
- [22] 丁孺琦, 徐 兵, 刘 伟, 等. 百万伏大功率操动机构液压系统优化设计[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(9): 4-8.
DING Ruqi, XU Bing, LIU Wei, et al. The optimization design of hydraulic operating mechanisms for 1 100 kV high voltage circuit breakers[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32(9): 4-8.
- [23] 刘 伟, 徐 兵, 杨华勇. 超高压断路器液压操动机构分合闸特性研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(10): 4-7.
LIU Wei, XU Bing, YANG Huayong. Study on the opening and closing characteristics of super-high voltage circuit breaker with hydraulic operating mechanism[J]. Machine Tool & Hydraulic, 2008, 36(10): 4-7.
- 刘 煜(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事断路器操动机构设计工作。