

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.031

转动惯量对断路器弹簧机构系统性能优化分析

宋广民, 韩国辉, 刘宇, 郭良超, 惠勇锋, 李美荣

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 断路器是电网系统的重要开关设备, 500 kV 及以下电压等级的断路器通常采用弹簧操动机构作为其驱动装置。提高弹簧操动机构的输出效率, 降低弹簧操作功, 能够改善弹簧操动机构零部件的受力状况, 对提高断路器开关的可靠性具有重要意义。文中对断路器弹簧操动机构的运动零部件转动惯量进行分析, 通过仿真优化和试验验证的方法, 得到运动零部件转动惯量对高压断路器弹簧操动机构性能的影响, 为后续断路器弹簧操动机构的设计与优化指明方向, 具有一定的指导意义。

关键词: 高压断路器; 弹簧操动机构; 转动惯量; 优化设计

Optimization Analysis the System Performance of the Spring Operating Mechanism of Circuit Breaker by the Rotational Inertia

SONG Guangmin, HAN Guohui, LIU Yu, GUO Liangchao, HUI Yongfeng, LI Meirong

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

Abstract: As an important switching equipment of power grid system, circuit breaker with voltage level of 500 kV and below usually uses spring operating mechanism. Improving the output efficiency of the spring operating mechanism and reducing the spring operating work can improve the force condition of the parts of spring operating mechanism, which is of great importance for improving the reliability of the circuit breaker switch. In this paper, the rotational inertia of moving parts has been analyzed in spring operating mechanism of circuit breaker, through the method of simulation optimization design and test verification, the effect of the rotational inertia of moving parts in spring operating mechanism of circuit breaker has been obtained. It has a certain guiding significance for the design and optimization of spring operating mechanism of circuit breaker.

Key words: high voltage circuit breaker; spring operating mechanism; rotational inertia; optimization design

0 引言

随着电力技术不断革新, 电力系统向着高电压、远距离、大容量等方向发展, 电网的安全运行问题日显突出^[1]。在电网运行系统中, 断路器的作用是不仅可以切断或闭合电路中的空载电流和负荷电流, 而且当系统发生故障时通过继电保护装置, 切断过负荷电流和短路电流, 防止事故扩大, 保证电网的安全可靠运行^[2-3]。弹簧操动机构是断路器的驱动部件, 通过接收外部的分、合闸指令电信号, 带动断路器动触头迅速动作, 从而完成断路器的

分、合闸任务, 所以, 弹簧操动机构的工作性能直接决定了断路器的分、合闸参数特性和可靠性^[4-10]。因此, 优化弹簧操动机构的性能, 对断路器乃至电网的安全稳定运行, 起到至关重要的作用。

1 原理介绍

文中介绍的弹簧操动机构分、合闸动作原理见图1。图1的弹簧操动机构处于分闸已储能状态。

合闸过程: 合闸锁扣系统10打开, 与合闸锁闩9脱离, 在合闸弹簧1的作用下, 通过合闸链条2、合闸链条接头7带动飞轮齿轮4和合闸凸轮19一起转

收稿日期: 2019-06-01; 修回日期: 2019-08-04

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).

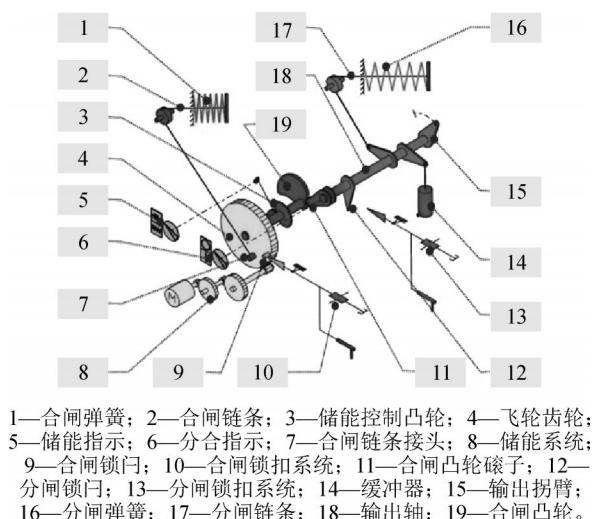


图1 弹簧操动机构动作原理

Fig. 1 The action principle of spring operating mechanism

动,推动合闸凸轮滚子11,使输出轴18转动,通过输出拐臂15带动灭弧室动触头动作,完成断路器的合闸操作。与此同时,给分闸弹簧16储能,为分闸操作做准备。

分闸过程:分闸锁扣系统13打开,分闸弹簧16通过分闸链条17拉动输出轴18反向转动,通过输出拐臂15带动灭弧室动触头反向动作,完成断路器的分闸操作,这时缓冲器14被压缩,起到分闸缓冲的作用。

2 优化设计方法

随着断路器电压等级的提高,断路器用弹簧操动机构的操作功也在不断增大,这就导致了高压断路器弹簧操动机构各个零部件受力增大,可靠性降低,严重制约了弹簧操动机构在高压断路器中的应用^[11-14]。

目前,各个弹簧操动机构生产厂家在设计大功率弹簧操动机构时,为了追求其可靠性,导致运动零部件大而笨重,严重降低了弹簧操动机构的输出效率。输出效率的降低,导致为了满足断路器特性参数要求,其操作功将进一步增大,各个相关零部件受力也随之增大,可靠性降低。

文中以提高弹簧操动机构的输出效率为目标,以降低弹簧操动机构的操作功内耗为切入点,通过合理优化弹簧操动机构运动部件转动惯量的方法,提高其输出效率,降低其操作功,改善各个零部件的受力状况,提高弹簧操动机构的可靠性。

文中以合理优化断路器用弹簧操动机构中飞轮齿轮的转动惯量为例,通过仿真计算,得到不同转动惯量下,弹簧操动机构的整体性能,以及对断

路器的合闸时间、合闸速度、合闸能量等特性参数的影响规律,并通过试验验证,为后续断路器用弹簧操动机构的设计提供合理有效的设计改进方法,具有重要意义。

3 仿真分析

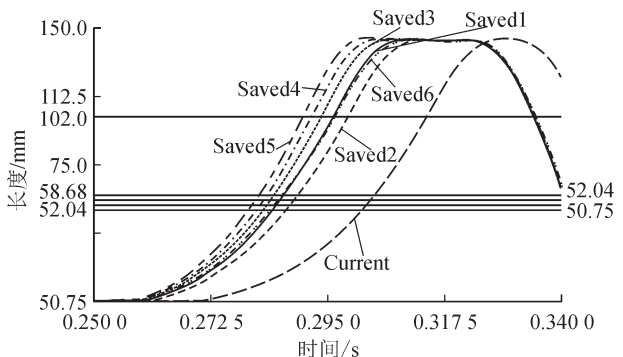
文中通过改变断路器弹簧操动机构中飞轮齿轮的转动惯量为研究对象,在合闸弹簧力值 F 不变的情况下,通过修改飞轮齿轮密度的方法,进行断路器系统性能的优化仿真分析^[15-18],仿真模型见图2。



图2 弹簧操动机构仿真模型

Fig. 2 The simulation model of spring operating mechanism

通过仿真得到飞轮齿轮的100%、90%、80%、70%、60%转动惯量条件下的合闸特性曲线参数,见图3。



Saved2—飞轮齿轮100%转动惯量; Saved1—飞轮齿轮90%转动惯量; Saved3—飞轮齿轮80%转动惯量; Saved4—飞轮齿轮70%转动惯量; Saved5—飞轮齿轮60%转动惯量; Saved6—Saved3工况下降低操作功; Current—合闸临界速度特性。

图3 断路器合闸特性曲线

Fig. 3 The closing characteristic curve of circuit breaker

根据GB/T 1984—2014和DL/T 402—2016标准中对断路器合闸时间、合闸速度的定义可知:断路器运动到刚合点位置的时间为断路器的合闸时间,断路器运动到刚合点前10 ms至刚合点位置时间段的平均速度为断路器的合闸速度^[19-20]。

根据图3的断路器特性曲线仿真结果,对图3进行刚合点测量分析,得到不同飞轮齿轮转动惯量条件下的断路器特性参数仿真数据表,见表1。

表1 断路器特性参数仿真数据表

Table 1 The simulation data table of characteristic parameter of circuit breaker

转动惯量/ %	合闸时间/ ms	合闸减少时间/ ms	合闸速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	合闸减少速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
100	299.1	—	4.33	—
90	296.1	3.0	4.41	0.08
80	293.9	2.2	4.63	0.22
70	292.2	1.7	4.90	0.27
60	290.3	1.9	5.13	0.23

从表1可以看出:飞轮齿轮转动惯量在减小10%、20%、30%、40%时,仿真合闸时间分别减少3、5.2、6.9、8.8 ms,仿真合闸速度分别增加0.08、0.3、0.57、0.8 m/s,由此可以判断,通过降低断路器弹簧操动机构中运动零部件的转动惯量可以降低合闸时间,提高合闸速度,对断路器的通断、灭弧参数意义较大。

通过上文的仿真结果可知:降低转动惯量可以缩短合闸时间,提高合闸速度,而在实际应用中,断路器的时间、速度特性参数往往在技术条件中给定,文中以断路器的合闸速度不变为目标,在降低转动惯量后,验证断路器弹簧操动机构合闸操作功的降低情况,为机构中各个零部件的受力情况提供理论依据。

以飞轮齿轮90%转动惯量降低至80%转动惯量为例进行了仿真计算,通过表1数据可知,假定断路器的合闸速度按照飞轮齿轮90%转动惯量时的4.41 m/s给定,改进飞轮齿轮转动惯量80%(转动惯量减少10%)时的速度为4.63 m/s,可通过仿真降低合闸弹簧参数中的初始预压力的方法,降低合闸速度0.22 m/s。文中在使用同一组合闸弹簧的前提下,通过多次试验修改合闸弹簧的预压力值,仿真得到断路器的特性曲线见图3中Saved6曲线,合闸速度与90%飞轮齿轮转动惯量时特性曲线中的合闸速度接近,此时合闸弹簧预压力值减少870 N,合闸操作功可降低230 J。由此试验可知,在合闸速度一定的情况下,可以通过优化断路器弹簧操动机构运动零部件的转动惯量来提高弹簧操动机构的输出效率,降低断路器合闸所需的弹簧操作功,改善机构零部件的受力工况,提高断路器弹簧操动机构的可靠性和稳定性。

另外,由于断路器弹簧操动机构合闸过程中给分闸弹簧储能,从仿真结果可知,减小飞轮齿轮的转动惯量可以提高合闸启动速度,缩短合闸时间,但飞轮齿轮惯量减小也会导致合闸末期的速度减

弱,有可能导致合闸失败,无法实现分闸。文中通过仿真得到合闸完成的临界速度的方法,见图3特性曲线Current,合闸时间314.3 ms,合闸时间增加15.2 ms,合闸速度4.08 m/s,合闸减少速度0.25 m/s。由此可知,合闸速度必须大于4.08 m/s时,合闸可以顺利完成,不会对分闸产生影响。

同时,在降低断路器弹簧操动机构飞轮齿轮转动惯量的同时,也必须要对飞轮齿轮的强度进行校核,使其满足强度要求,保证断路器弹簧操动机构的可靠性和稳定性。

4 强度校核

文中对断路器弹簧操动机构的飞轮齿轮转动惯量进行优化设计,根据表1的数据分析,将飞轮齿轮的转动惯量减少至原转动惯量的80%,改进前后飞轮齿轮的对比图见图4。

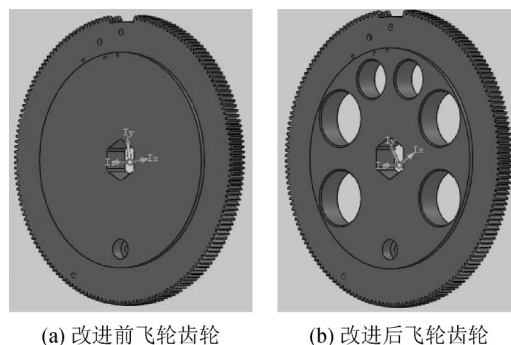


图4 飞轮齿轮转动惯量优化前后对比图

Fig. 4 Comparison the rotational inertia of fly wheel gear between before and after

通过飞轮齿轮的转动惯量计算,得到改进前的飞轮齿轮绕转动中心的转动惯量为 $698\ 712\times 10^3(\text{k}\cdot\text{mm}^2)$,改进后的飞轮齿轮绕转动中心的转动惯量为 $566\ 898\times 10^3(\text{k}\cdot\text{mm}^2)$ 。改进后飞轮齿轮绕转动中心的转动惯量为改进前飞轮齿轮绕转动中心转动惯量的81.1%。对改进后的飞轮齿轮进行工况动力学仿真计算,得到飞轮齿轮受力仿真结果见图5。

此飞轮齿轮材料采用45号钢,其许用抗拉强度 $\geq 600\text{ MPa}$,屈服强度 $\geq 355\text{ MPa}$ 。而文中通过仿真计算得到飞轮齿轮最大受力值为115.88 MPa,许用屈服强度是飞轮齿轮最大受力值的3.06倍,可以满足设计要求。

5 试验验证

采用上文研究的方法,在同一台断路器弹簧操动机构样机上,分别安装见图4的改进前、后的飞轮齿轮,采用高压开关机械特性测试仪(生产厂家:KOCOS,型号:ACTAS P6)进行机械特性对比测试^[21],

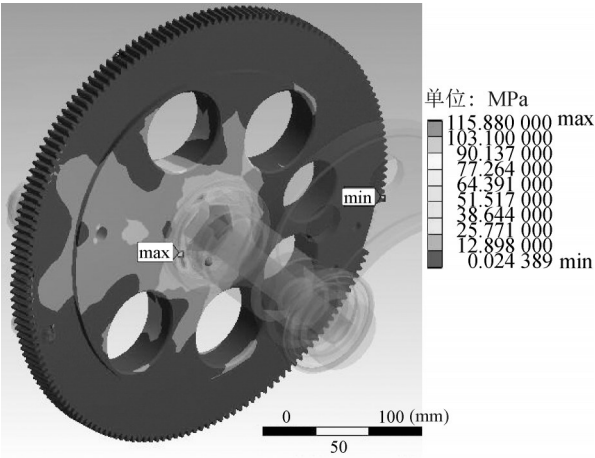


图5 改进飞轮齿轮受力仿真结果图

Fig. 5 The force simulation results of improved fly wheel gear

验证上文断路器弹簧操动机构的优化仿真结果,得到断路器合闸特性曲线见图6。

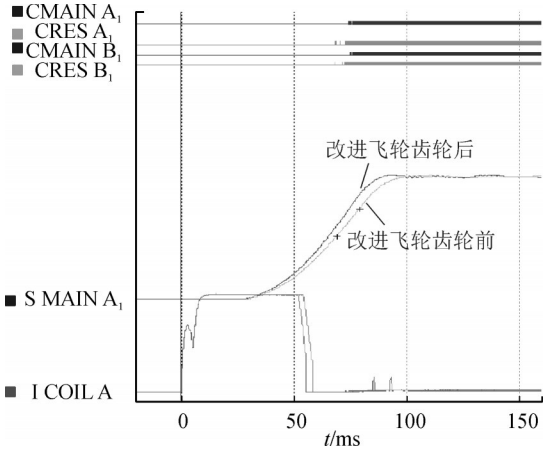


图6 断路器合闸特性曲线

Fig. 6 The closing characteristic curve of circuit breaker

图6中横坐标为断路器动作时间,纵坐标为断路器动作位移。对比图中的两条特性曲线可以看出:改进飞轮齿轮后比改进飞轮齿轮前断路器到达刚合点位置的时间缩短,断路器运动特性曲线的斜率变大,合闸速度提高。通过对图6的特性曲线进行数据分析,得到改进飞轮齿轮前、后断路器特性曲线的具体参数表2。

通过断路器试验验证的特性曲线图和数据参数表,可得出以下结论。

5.1 转动惯量对合闸时间的影响

从图6、表2中可以得出:在合闸弹簧能量相同的情况下,当飞轮齿轮绕转动中心的转动惯量由100%减少到80%时,合闸时间由98.21 ms降低至93.88 ms,合闸时间减少了4.33 ms。

此试验结果与表1中仿真得到的飞轮齿轮绕转动中心的转动惯量由100%减少到80%时,合闸时间

表2 试验特性曲线数据参数表

Table 2 Data parameter table of test characteristic curve

飞轮齿轮转动惯量/%	合闸时间/ms	合闸减少时间/ms	合闸速度/(m·s ⁻¹)	合闸减少速度/(m·s ⁻¹)
改进前 100	98.21	—	3.33	—
改进后 80	93.88	4.33	3.66	0.33

降低5.2 ms相比,缩短合闸时间的结果基本吻合,具有一定的研究价值。

5.2 转动惯量对合闸速度的影响

从图6、表2中可以看出:在合闸弹簧能量相同的情况下,当飞轮齿轮绕转动中心的转动惯量由100%减少到80%时,合闸速度由3.33 m/s提高至3.66 m/s,合闸速度提高了0.33 m/s。

此试验结果与表1中仿真得到的飞轮齿轮绕转动中心的转动惯量由100%减少到80%时,合闸速度提高0.3 m/s相比,提高合闸速度的结果基本吻合,具有一定的研究价值。

5.3 转动惯量对合闸弹簧能量的影响

假定改进飞轮齿轮前的断路器合闸时间和合闸速度是标准值,更换飞轮齿轮后,通过合闸弹簧预压缩量减少15 mm,合闸弹簧力值降低1305 N,对应合闸操作功降低345 J。得到断路器特性曲线与改进飞轮齿轮前图6中的浅蓝色断路器特性曲线几乎重合。

在断路器的实际运行过程中,要求断路器的合闸速度一定,通过降低断路器弹簧操动机构飞轮齿轮转动惯量的办法可降低合闸弹簧力值,使各相关零部件受力减少,提高断路器弹簧操动机构的可靠性。

在改进后的飞轮齿轮上进行合闸临界速度试验测试,得到合闸速度降低至2.7 m/s时,会出现合闸卡滞现象,而本试验断路器的合闸速度设计要求为(3.5±0.5) m/s,此合闸临界速度在设计要求的速度下限外,即不会出现卡滞现象发生,也不会影响分闸操作正常动作。

6 结语

目前,大多数设计人员往往忽视了运动零部件转动惯量对弹簧操动机构性能的影响,尤其是在设计大功率弹簧操动机构时,为了追求其可靠性,导致运动零部件大而笨重,严重降低了弹簧操动机构的输出效率。

文中以飞轮齿轮为例,通过选择合适的材料、合适的零部件结构工艺和热处理工艺等措施,对断

路器弹簧操动机构中各个运动零部件的转动惯量进行优化,通过仿真分析和试验验证,得到转动惯量对断路器特性参数的影响数据。然后根据断路器的特性参数要求,在满足分合闸速度的情况下,可以降低断路器系统的分、合闸弹簧能量,使弹簧操动机构各零部件的受力减小,提高弹簧操动机构的整体可靠性,有利于电网安全稳定运行。

但是在减小断路器弹簧操动机构运动零部件的转动惯量时,不能以转动惯量更小为目的,导致零部件的强度不符合设计要求,必须通过动力学分析软件对改进零部件进行强度校核,保证其零部件满足设计使用要求,达到合理优化断路器弹簧操动机构的目的,提高断路器弹簧操动机构的整体性能。

同时也需要考虑机构转动惯量对合闸特性曲线的影响,避免由于转动惯量减小导致合闸临界速度提高,合闸临界速度落入断路器设计合闸速度内,导致断路器合闸不到位,导致无法进行分闸操作。

文中论证了对产品运动部件转动惯量进行优化的必要性,为后续断路器弹簧操动机构的设计与优化提供参考依据,具有很好的指导意义。

参考文献:

- [1] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
LIN Xin. Modern high voltage electric apparatus technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] 赫尔曼·科赫. GIS(气体绝缘金属封闭开关设备)原理与应用[M]. 钟建英, 林 莘, 张友鹏, 译. 北京:机械工业出版社, 2017.
KOCH H. Principles and applications of GIS(gas-insulated substations)[M]. ZHONG Jianying, LIN Xin, HANG Youpeng, Translated. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [3] 罗学琛. SF₆气体绝缘全封闭组合电器(GIS) [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
LUO Xuechen. Gas insulated switchgear(GIS) of SF₆ [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [4] 黎 斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
LI Bin. SF₆ high voltage apparatus design[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [5] 陈保伦, 文亚宁. 断路器弹簧操动机构介绍[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 75-80.
CHEN Baolun, WEN Yaning. Introduction of spring operating mechanism for CB[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 75-80.
- [6] 楼家法. 高压开关机构设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
LOU Jiafa. High-voltage switchgear mechanism design[M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [7] 王 振. 高压电器中的开关设计分析[J]. 价值工程, 2012, 31(20): 80-81.
WANG Zhen. Switch design of high voltage electric appliance[J]. Value Engineering, 2012, 31(20): 80-81.
- [8] 苑 舜. 高压断路器弹簧操动机构[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
YUAN Shun. Spring operating mechanism for CB[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [9] 李建基. 高压断路器及其应用[M]. 北京:中国电力出版社, 2004: 184-204.
LI Jianji. High voltage circuit breaker and its application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 184-204.
- [10] 林 莘. 现代高电压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1990.
LIN Xin. Technology of modern high voltage appliance[M]. Beijing: China Machine Press, 1990.
- [11] 王连鹏, 王尔智. 真空断路器弹簧操动机构优化设计与可靠性分析[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 166-169.
WANG Lianpeng, WANG Erzhi. Optimal design and reliability analysis of the spring actuator for vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(3): 166-169.
- [12] 崔景春, 袁大陆, 杜彦明. SF₆断路器操动机构的运行可靠性和选型探讨[J]. 高压电器, 2001, 37(2): 1-4.
CUI Jingchun, YUAN Daliu, DU Yanming. Investigation on operational reliability and type selection of actuator for SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(2): 1-4.
- [13] 张义民, 黄贤振. 机械产品研发的可靠性规范[J]. 中国机械工程, 2010, 21(23): 2773-2785.
ZHANG Yimin, HUANG Xianzhen. The reliability of the mechanical product development[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(23): 2773-2785.
- [14] 杨慧钦. 提高高压断路器可靠性的动向[J]. 高压电器, 1998, 34(2): 61-64.
YANG Huiqin. To enhance the reliability of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 1998, 34(2): 61-64.
- [15] 李增刚. ADAMS入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
LI Zenggang. ADAMS detailed introduction and example [M]. Beijing: National Defense University Press, 2006.
- [16] 郭卫东. 虚拟样机技术与ADAMS应用实例教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2008.
GUO Weidong. Virtual prototyping technology and ADAMS application example tutorial[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008.
- [17] 康 庄. 高压开关操动机构虚拟样机建模与动态仿真研究[D]. 上海:华东理工大学, 2010.

- KANG Zhuang. Research on ADAMS modeling and dynamic simulating of operating mechanism of highvoltage circuit breaker[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2010.
- [18] 崔彦彬, 高志, 曹云鹏. 基于ADAMS的高压断路器操动机构动力学仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2006(4): 66-67.
- CUI Yanbin, GAO Zhi, CAO Yunpeng. Dynamics simulation study on application ADAMS for the operating device for HV circuit[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006(4): 66-67.
- [19] 高压交流断路器:GB 1984—2014[S]. 2014.
- High - voltage alternating - current circuit - breakers: GB 1984—2014[S]. 2014.
- [20] 高压交流断路器订货技术条件: DL/T 402—2007[S]. 2007.
- Specification of high voltage alternating - current circuit - breakers: DL/T 402—2007[S]. 2007.
- [21] 贾一凡, 殷晓刚, 姚晓飞, 等. 智能化高压开关机械试验测试用位移传感器的分析与研究[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 58-63.
- JIA Yifan, YIN Xiaogang, YAO Xiaofei, et al. Analysis and study on displacement transducer for testing in mechanical test of intelligent high-voltage switch[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 58-63.
- 宋广民(1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压开关及操动机构设计与研发工作。