

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.005

船用断路器抗冲击性能分析与优化研究

于庆瑞^{1,2}, 谷腾飞³, 王 军¹, 孙 涛³, 张 炜¹, 耿英三²

(1. 甘肃省智能电器重点实验室, 甘肃 天水 741018; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;

3. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 船用断路器是舰船电力系统中的重要基础器件,其在动力学冲击载荷作用下的性能将直接关系到整个舰船电力系统的安全。为了研究影响断路器抗冲击性能的因素,文中建立了断路器模型,运用动力学设计分析法(DDAM)和时域分析法进行仿真研究。针对结构强度不足的现象,进行了优化设计,并通过冲击试验来予以验证。所得结论和方法对进一步提高断路器抗冲击性能提供了参考。

关键词: 抗冲击; 船用断路器; 时域分析; DDAM

Analysis and Optimization Study on Shock-resistance Performance of Marine Circuit Breaker

YU Qingrui^{1,2}, GU Tengfei³, WANG Jun¹, SUN Tao³, ZHANG Wei¹, GENG Yingsan²

(1. Gansu Key Laboratory of Intelligent Electrical Appliances, Gansu Tianshui 741018, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. EMSD and automation College, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Marine circuit breaker is an essential basic device in power system of ship, and its performance under the dynamic shock load is directly related to the safety of the entire power system of the ship. For studying the factors affecting the shock resistance of circuit breaker, the circuit breaker model is set up in this paper, and the dynamics design analysis method(DDAM) and the time domain analysis method are used for simulation and study. The design is optimized for the insufficient structural strength and verified by the shock test. The conclusions and methods obtained provide references for further improving the shock resistance of the circuit breaker.

Key words: shock resistance; marine circuit breaker; time domain analysis; dynamics design analysis method (DDAM)

0 引言

冲击是造成船用断路器失效的重要原因之一。舰船设备易遭受到接触式爆炸或非接触式爆炸产生的冲击作用而丧失功能^[1]。断路器作为电力系统中重要的控制设备,其工作的稳定性和可靠性对保证电力系统的稳定有着极为重要的作用^[2-13]。因此,开展对断路器抗冲击性能的研究就显得十分必要。文中研究的某型船用断路器额定电压 12 kV,额定电流 3 150 A,额定短路开断电流 63 kA,适用于 10 kV、50 Hz 船用电力系统。

从国内外研究资料来看,断路器发生拒分和拒合故障中由机械故障所导致的各种故障所占比例最大^[14]。目前,对于船用断路器抗冲击性能的研究较少,多数研究集中在断路器的机械特性或电气性能方面。如文[15]对液压操动机构的缓冲器进行了理论分析与仿真。文[16]中建立了速度特性、超程和弹跳之间的函数关系,通过对数值方面的校核实现了超程和弹跳的有效抑制。文[17]基于涡流原理设计了一种短冲程快速排斥机构来实现对动触头接触或分离时的反向速度的动态抑制。文[18]将模型组合成多域模型来探究机械部分的摩擦参数和

收稿日期:2024-08-15; 修回日期:2024-10-17

基金项目:上海大学高效能计算中心,上海智能计算系统工程技术研究中心科技资助项目(19DZ2252600)。

Project Supported by Science and Technology Project of the Computing Resources and Technical Support Provided by High Performance Computing Center, Shanghai University, Shanghai Intelligent Computing System Engineering Technology Research Center (19DZ2252600).

电气部分的参数对于分合闸的操动机构分合特性的影响。文[19]基于电—热—结构多物理场有限元法对断路器灭弧室瓷套在不同膨胀条件下瓷套的应力分布进行了分析,揭示了瓷套断裂的故障机理。文[20]分析了断路器支柱瓷套管在组合工况作用下的应力应变情况,并通过拉力测试来测量支柱瓷套管在不同拉力下的偏移量为支柱绝缘子的结构设计和可靠性奠定了理论基础。文[21]交流滤波器用断路器合闸电阻投切过程中存在的间歇性缺陷进行分析,提出了合闸电阻间歇性放电缺陷的有效判别方法以及对断路器合闸电阻存在缺陷的改善措施

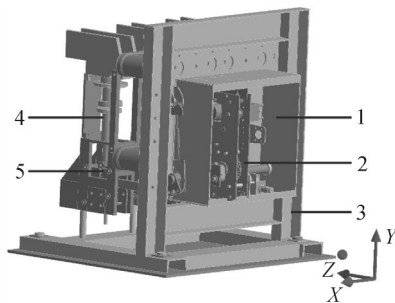
综上所述,目前缺乏对船用断路器的抗冲击可靠性进行考察和评估。文中从仿真的角度出发,建立了断路器三维模型,对断路器进行了基于DDAM法和时域分析法的冲击分析,来模拟船用断路器的冲击工况,并比较了两种分析方法的计算结果。最后,针对断路器结构在冲击作用下的薄弱部位进行了优化设计,研究结果为船用断路器设备抗冲击能力的提升提供了参考。

1 断路器动力学建模

断路器主要由一次主回路、变直传动机构和操动机构组成^[22-27]。通过脱扣器将弹簧能量释放而经过传动机构带动灭弧室动触头实现断路器合闸和分闸操作,相应部件的材料属性见表1。文中在原始模型的基础上,对模型做出简化,如删除与分析无关或者关系较小的元器件及其他微小特征。为研究冲击工况对操动机构的影响以及操动机构对触头的影响,因此不宜对操动机构做过多简化,主要是将单向离合器机构和电磁铁机构及各内部模块等效为重心一致且等质量的实体。设备简化前质量为524 kg,简化后为496 kg,简化前后的质量偏差为5.3%,小于有限元仿真前处理要求的6%。采用实体单元进行网格划分,共生成1 027 361个网格,405 771个节点。以旋转副、固定副和移动副为主来添加约束,共计添加了264个约束,其有限元模型见图1。

表1 主要零件材料参数

Table 1 Material parameters of main parts				
部件	材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
灭弧室连接杆	45号钢	210	0.269	335
支撑架	Q235A	193	0.230	235
主回路支撑板	Q235A	193	0.230	235
动静触头	铜	119	0.326	343



1—主回路支撑板; 2—操动机构; 3—支撑架;
4—灭弧室; 5—变直传动机构。

图1 断路器结构示意图

Fig. 1 Circuit breaker simulation model

2 DDAM仿真冲击结果与分析

DDAM是将复杂的线弹性系统简化为承受给定冲击输入的质量弹簧系统,以此求解力和变形。具有占用资源少,计算速度快的特点,目前是舰船设备抗冲击计算中的主流方法^[28-30]。

2.1 冲击谱的设计

断路器设备安装在船体中,依据文[31],典型的DDAM设计冲击谱公式为:

$$A_0 = 196.2 \times \frac{(17.01 + m_a)(5.44 + m_a)}{(2.72 + m_a)^2} \quad (1)$$

$$v_0 = 1.52 \times \frac{5.44 + m_a}{2.72 + m_a} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: A_0 为标称加速度; v_0 为标称速度; m_a 为模态质量。其设计冲击输入值见表2。

表2 冲击加速度设计值

Table 2 Design value of impact acceleration

冲击方向	弹性设计		弹塑性设计	
	A_a	v_a	A_a	v_a
垂向	1.0 A_0	1.0 v_0	1.0 A_0	0.5 v_0
横向	0.4 A_0	0.4 v_0	0.4 A_0	0.2 v_0
纵向	0.2 A_0	0.2 v_0	0.2 A_0	0.2 v_0

经式(1)、(2)计算,在3个方向上的冲击加速度见表3-5。

表3 纵向(Z方向)冲击加速度

Table 3 Longitudinal (Z-direction) impact acceleration

模态序号	频率/Hz	模态质量/kg	模态质量百分比/%	冲击设计加速度值/($m \cdot s^{-2}$)
1	26.3	334.6	63.60	75.6
3	58.8	43.1	8.20	177.5
2	36.6	28.6	5.45	110.8
178	485.4	13.7	2.60	259.0
184	501.2	12.4	2.30	308.1

表4 横向(X方向)冲击加速度

Table 4 Lateral (X-direction) impact acceleration

模态 序号	频率/ Hz	模态质 量/kg	模态质量 百分比/%	冲击设计加速 度值/(m·s ⁻²)
5	75.3	102.9	23.9	109.3
4	73.2	125.7	19.5	223.9
8	89.0	50.7	9.6	241.1
7	87.1	46.3	8.7	220.7
24	296.3	32.8	6.2	291.4

表5 垂向(Y方向)冲击加速度

Table 5 Vertical (Y-direction) shock acceleration

模态 序号	频率/ Hz	模态质 量/kg	模态质量 百分比/%	冲击设计加速 度值/(m·s ⁻²)
13	91.8	74.4	20.3	176.3
19	119.7	55.5	14.1	360.5
22	280.4	105.3	10.5	538.1
119	342.0	51.9	10.8	1 029.6
124	369.0	40.1	7.6	1 113.4

由表3-5可知,XYZ 3个方向的总模态质量参与因子分别为84.09%、81.03%、82.15%,符合模型质量大于80%的要求。为模拟实际工况,将表3-5中的冲击谱加载到断路器支撑架底部来进行仿真计算。

2.2 冲击仿真结果分析

根据表3-5的冲击环境,基于有限元法对断路器进行DDAM冲击响应分析。为了考核设备的应力破坏情况,定义了无量纲“失效系数” η ,其公式为

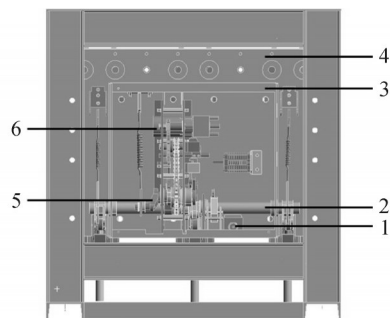
$$\eta = \frac{\sigma_{\text{Mises}}}{\sigma_s} \quad (3)$$

式(3)中: σ_{Mises} 为考核点应力峰值,MPa; σ_s 为考核点材料的屈服极限,MPa。

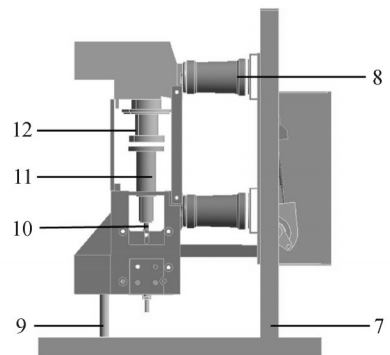
根据应力云图综合考虑各个方向上的应力响应情况,在断路器上选择了响应较为剧烈的12个部件进行考核,见图2。

根据12个考核部件的应力情况,取每个部件上的最大值来计算其在3个方向上的 η 值,见图3。

结合垂向引力分析和图3可知,垂向载荷作用下的最大应力发生在主回路支撑板与框架连接处,为273.5 MPa,超出了材料的屈服强度。此外,垂向冲击下支撑架和灭弧室支撑杆应力响应变化明显,而在横向和纵向载荷作用下设备整体应力响应较小,局部也未发生超过屈服强度的现象。由此可见,在垂向冲击工况下的支撑架、主回路支撑板以及灭弧室支撑杆是整机系统中的薄弱部位,需对其进行材料强度校核。



(a) 断路器参考点正视图

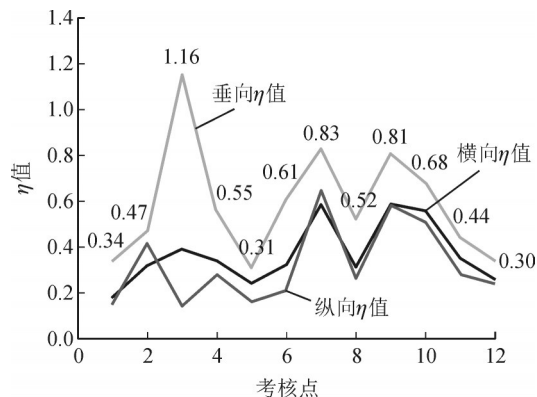


(b) 断路器参考点左视图

1—缓冲器; 2—传动轴; 3—框架; 4—主回路支撑板;
5—单向离合器; 6—储能电机; 7—支撑架; 8—支撑绝缘子;
9—灭弧室支撑杆; 10—动触头接头; 11—动触头; 12—静触头。

图2 设备考核点示意图

Fig. 2 Diagram of equipment assessment points

图3 设备在不同考核部件上的 η 值Fig. 3 η values for equipment on different assessment components

3 时域仿真冲击结果与分析

3.1 时域冲击输入

上节分析是基于DDAM来对断路器进行抗冲击仿真,具有分析效率高的特点。但不能考虑非线性效应、间隙效应和阻尼效应对于分析的影响^[32-34]。为了弥补此方面的不足,本节使用时域分析法来对断路器进行瞬态分析。在进行冲击试验时,根据GJB 1060.1—91的要求^[35],在无实测冲击信号时可用半正弦或半三角时间历程曲线代替;在有实测信

号时,优先选用实测冲击信号,根据实际测试冲击数据,选取其中载荷激励最大,严酷度最高的冲击信号进行加载,实测冲击信号见图4。

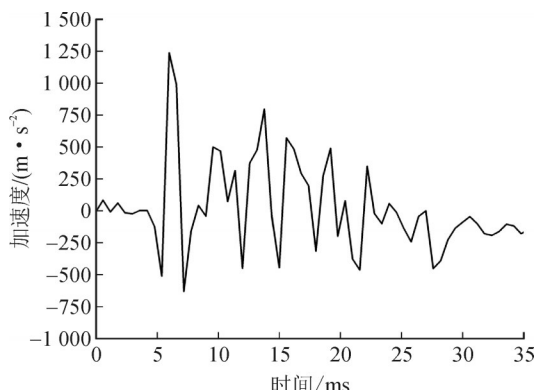


图4 实测冲击加速度信号

Fig. 4 Measured shock acceleration signal

3.2 时域冲击仿真结果分析

将由试验测得的加速度数据采用激励的形式施加于设备底部,其求解后结果见图5。

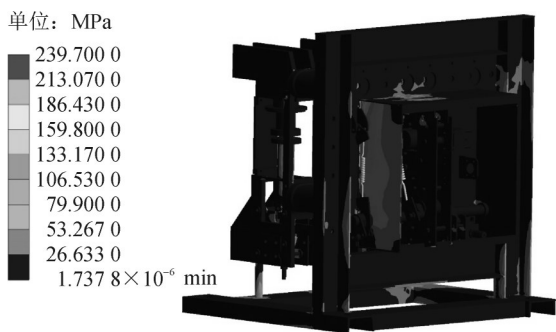


图5 断路器响应云图

Fig. 5 Circuit breaker response cloud diagram

按照文中第二章的数据处理方法,对在时域分析法下的断路器12个参考点的应力情况做求 η 值处理,并与DDAM垂向冲击下的数据进行对比,见图6。

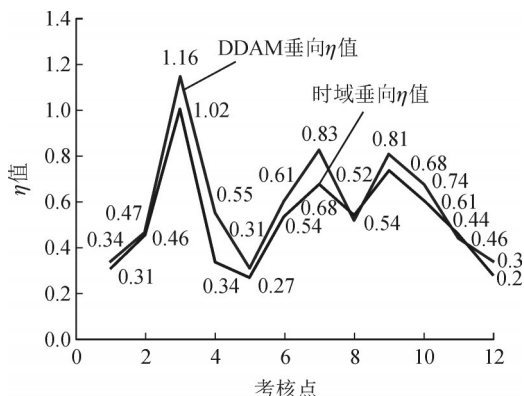


图6 不同考核部件处的 η 值

Fig. 6 η values at different assessment components

从图6可以看出,DDAM与时域分析法的 η 值趋势基本相同,表明在不同考核点处的应力分布基本一致。因此,通过 η 值比较也验证了用DDAM进行

抗冲击应力分析的有效性。相较于DDAM,时域分析法还综合考虑了各种非线性条件和阻尼效应的影响,其计算结果更为合理和详细。但是就响应剧烈程度而言,DDAM要明显高于时域分析法,即用DDAM来对结构进行校验会使得结构更趋于安全。

4 断路器抗冲击优化设计

根据计算结果,在垂向冲击工况下断路器会发生应力过大的情况,需进行必要的优化改进。优化的基本思想是在保证设备具有足够抗冲击能力的前提下,降低断路器整体质量,减小冲击惯性,提高断路器抗冲击可靠性。其具体优化方案有:①支撑架和框架处应力冗余较多,对其进行尺寸优化,减轻重量;②框架上侧板进行加厚处理来满足使用要求,增大灭弧室支撑杆半径以满足载荷传递的需要;③对支撑架底部增设加强筋来分散应力分布,改善应力集中情况,其优化参数见表6。

表6 优化参数

Table 6 The optimization of parameters

优化目标	设计变量名	初值/mm	上限/mm	下限/mm
主回路支撑板厚度	B	4	6	3
支撑架厚度	A	5	6	3
支撑架加强筋高度	H	0	80	20
框架上侧板厚度	T_1	2	5	2
灭弧室支撑杆半径	T_2	6	14	7

优化后得到3组较优样本点见表7,寻优迭代过程见图7。

表7 优化样本点

Table 7 The optimised sample points

样本组	A	B	H	T_1	T_2
第1组	4.527	4.762	73.534	4.000 0	6.486 0
第2组	3.439	3.413	66.955	4.864 5	7.164 3
第3组	4.527	3.817	74.140	4.812 5	7.524 6

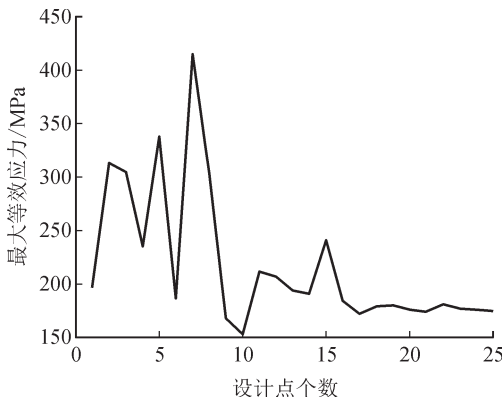


图7 应力优化迭代过程

Fig. 7 Stress optimisation iterative process

出于对加工难易和降低设备重量的考虑,选取第2组数据作为优化参数,圆整后所取的最终尺寸结果见表8。按表8中的尺寸结果来对相应结构进行重新建模。

表8 相应结构的模型尺寸

Table 8 Model dimensions of the corresponding structures			
优化部位	数值	优化部位	数值
A/mm	3.4	T_1/mm	5.0
B/mm	3.4	T_2/mm	7.2
H/mm	67.0	—	—

由于操动机构内部的部件失效系数较低,故可将操动机构和触头系统部分通过质量点的方法予以代替。然后再次对设备进行垂向冲击仿真,求解结果见图8。

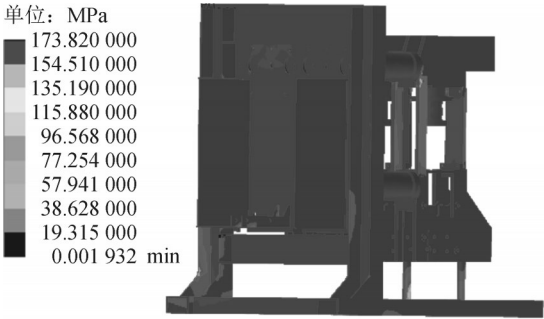


图8 优化后的冲击应力云图

Fig. 8 Optimized impact stress cloud diagram

优化后冲击工况下的最大应力由 273.5 MPa 下降到 173.82 MPa,降幅达到 37.18%,对应的失效系数由 1.16 降低至 0.74,力学性能有所提高。通过合理优化支撑架和主回路支撑板厚度,结构整体质量由 496 kg 降低至 468.7 kg,降幅达到 5.5%,有效的降低了断路器整体的重量。此外,断路器的失效系数得到了明显的下降,说明原先的设计属于过强设计,优化后断路器的抗冲击可靠性得到了提高。

5 断路器抗冲击试验

为验证优化后设备的抗冲击性能,同时对所建立的断路器模型的准确性进行验证。对断路器进行了抗冲击试验,试验设备采用 803-014CS-1500 中量级冲击机,冲击试验平台见图9。

通过加速度传感器监测断路器整体的冲击情况,加速度传感器的安装位置见图10。

在试验过程中,对设备进行了完整的冲击动响应测量,将试验与仿真数据进行了对比。有限元仿真及试验的底部加速度载荷与设备顶部的加速度

响应峰值见表9,其波形见图11、12。



图9 断路器冲击试验台

Fig. 9 Circuit breaker impact test bench



(a) 底部加速度传感器 (b) 顶部加速度传感器

图10 加速度传感器安装位置

Fig. 10 Installation location of acceleration sensor

表9 试验与仿真响应峰值对比

Table 9 Comparison of peak test and simulation response			
参数	试验结果/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	仿真结果/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	误差/%
底部载荷	1 190	1 123	5.6
顶部响应	773	724	6.7

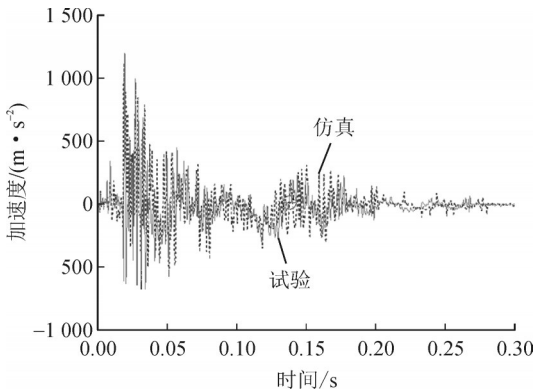


图11 底部加速度响应曲线

Fig. 11 Bottom acceleration curve

由表9对比可知,试验载荷略高于仿真载荷,与设备加速度响应中的试验结果略大于仿真结果的趋势保持一致。载荷峰值偏差 5.6%,顶部加速度响应峰值偏差 6.3%;且仿真与试验的加速度曲线趋势基本一致,表明了所建立模型的准确性。仿真中底

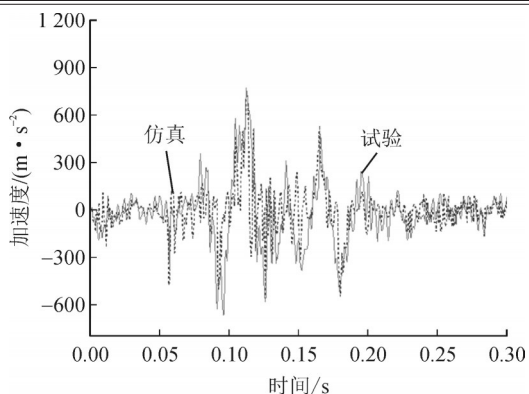


图12 顶部加速度响应曲线

Fig. 12 Top acceleration curve

部和顶部的冲击加速度级与试验结果相差不大,但均略小于试验结果,主要是仿真仅考虑了断路器沿垂直方向的冲击情况,而实际情况应是5个方向的叠加。此外,对设备内部一些零部件的简化也对计算精度产生了影响。

6 结语

文中通过DDAM与时域分析两种方法对断路器进行了抗冲击仿真分析,并与试验进行了对比,验证了所建立模型的准确性。针对仿真分析中存在的局部结构强度不足的问题,采用了尺寸优化的方式来合理分配尺寸厚度,避免出现应力过大的同时降低设备重量情况,提高了断路器抗冲击可靠性。冲击下的最大应力下降到173.82 MPa,降幅达到37.18%,结构整体质量减少了27.3 kg。本研究为后续同类产品的设计及优化提供了理论支撑与参考。

参考文献:

- [1] 侯世红. 某舰载机柜抗冲击仿真计算[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(7): 110-113.
HOU Shihong. Simulation calculation of shock resistance for a shipborne cabinet[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(7): 110-113.
- [2] 王军龙, 杨欢红, 张劲松, 等. 基于低能量直流的真空断路器短路开断能力评估[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 23-28.
WANG Junlong, YANG Huanhong, ZHANG Jinsong, et al. Short - circuit breaking capacity evaluation of vacuum circuit breaker based on low-energy DC[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 23-28.
- [3] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠. 基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 108-113.
HUANG Jian, HU Xiaoguang, GONG Yunan. Machinery fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the Chinese

Society for Electrical Engineering, 2011, 31(12): 108-113.

- [4] 韦宝泉, 李泽文, 余勇祥, 等. 高压断路器容性投切合回路时序控制系统设计实验教学研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 257-264.
WEI Baoquan, LI Zewen, YU Yongxiang, et al. Experimental teaching research on the design of sequence control system of synthetic circuit for capacitive current switching[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 257-264.
- [5] 王婷, 梁梦婕, 张佳颖. 550 kV 高压断路器分合闸电磁铁的仿真建模和故障诊断研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(2): 63-68.
WANG Ting, LIANG Mengjie, ZHANG Jiaying. Research on modeling and fault diagnosis of the opening/closing electromagnet of the 550 kV high voltage circuit breaker[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2019, 35(2): 63-68.
- [6] 孙瑞, 章宝歌, 张振, 等. 新型多端口高压直流断路器拓扑对避雷器的影响[J]. 电瓷避雷器, 2023(4): 27-37.
SUN Rui, ZHANG Baoge, ZHANG Zhen, et al. Influence of new multi-port HVDC circuit breaker on lightning arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4): 27-37.
- [7] 陈家超, 张勇军, 黄国权, 等. 计及保护和断路器告警信息可信度的电网故障诊断优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 28-36.
CHEN Jiachao, ZHANG Yongjun, HUANG Guoquan, et al. Optimal model of power grid fault diagnosis considering reliability of protection and circuit breaker alarm information[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 28-36.
- [8] 杨瑞, 张航, 张广东, 等. 330 kV 输电线路断路器取消合闸电阻适应性研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 165-171.
YANG Rui, ZHANG Hang, ZHANG Guangdong, et al. Adaptability of cancellation of the closing resistance of circuit breaker for 330 kV transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 165-171.
- [9] 邱鹏锋, 周思佳, 马宏明, 等. 恶劣环境下多参量融合的断路器操动机构辅助开关研究[J]. 西安工程大学学报, 2023, 37(6): 69-77.
QIU Pengfeng, ZHOU Sijia, MA Hongming, et al. Research on the auxiliary switch of circuit breaker operating mechanism based on multi parameter fusion in harsh environments[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(6): 69-77.
- [10] 邱方驰, 李基民. 基于快速检测和速断控制的智能断路器毫秒级保护方案[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 144-149.
QIU Fangchi, LI Jimin. Msec protection scheme of intelligent circuit breaker based on fast detection and quick break control[J]. Electrical Measurement & Instrumenta-

- tion, 2023, 60(4): 144-149.
- [11] 吴思源, 柯 飒, 李婉卿, 等. 基于故障仿真分析的高压直流断路器测试要求的确定方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 53-58.
- WU Siyuan, KE Sa, LI Wanqing, et al. Method to determine experimental requirements of HVDC circuit breaker based on fault simulation analysis[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 53-58.
- [12] 夏 冰, 陈 昊, 韩晨磊, 等. 断路器故障预警装置研制与健康评估系统开发[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 19-27.
- XIA Bing, CHEN Hao, HAN Chenlei, et al. Research on circuit breaker fault warning equipment and development of health evaluation system[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(10): 19-27.
- [13] 徐靖东. 高压断路器电寿命诊断方法的对比分析[J]. 陕西电力, 2013, 41(3): 56-60.
- XU Jingdong. Analysis on high voltage circuit breaker electrical life diagnosis method[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(3): 56-60.
- [14] CARVALHO A, CORMENZANA M L, FURUTA H, et al. International enquiry on reliability of high voltage equipment, part 2, reliability of high voltage equipment[R]. Paris: CIGRE, 2012.
- [15] 杨 武, 荣命哲, 陈德桂, 等. 基于机构动力学特性仿真的高压断路器优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(12): 1211-1214.
- YANG WU, RONG Mingzhe, CHEN Degui, et al. Optimum design of high-voltage circuit breakers based on mechanism dynamic features simulation[J]. Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(12): 1211-1214.
- [16] 徐建源, 雷 伟, 汤 庚, 等. 永磁机构真空断路器分闸触头过冲与反弹抑制方法的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 22-27.
- XU Janyuan, LEI Wei, TANG Geng, et al. Research on opening contact overshoot and rebound suppression methods of vacuum circuit breakers with permanent magnet actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 22-27.
- [17] JIANG Wentao, LIU Xiaoming, CHEN Hai, et al. Electromagnetic buffer characteristics of operating mechanism of vacuum circuit breaker[C]//IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Tianjin, China: IEEE, 2020: 1-2.
- [18] 赵洪山, 赵 阳, 宋 玮, 等. 基于结构分析的断路器操作机构的建模及仿真分析[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 32-40.
- ZHAO Hongshan, ZHAO Yang, SONG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of operating mechanism for circuit breaker based on structural analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8): 32-40.
- [19] 袁开明, 舒乃秋, 杨松伟, 等. 3AT型断路器灭弧室瓷套断裂故障机理分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(2): 174-179.
- YUAN Kaiming, SHU Naiqiu, YANG Songwei, et al. Study on fracture failure mechanism of 3AT circuit breaker arcing chamber porcelain bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(2): 174-179.
- [20] 姚灿江, 徐 刚, 郭海涛, 等. 高压断路器用支柱瓷套管特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 34-40.
- YAO Canjiang, XU Gang, GUO Haitao, et al. Characteristics of pillar porcelain bushing for high voltage circuit breaker[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 34-40.
- [21] 马飞越, 牛 勃, 黎 炜, 等. 750 kV 交流滤波器用断路器合闸电阻故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 145-151.
- MA Feiyue, NIU Bo, LI Wei, et al. Fault analysis of circuit breaker's closing resistor for 750 kV AC filter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 145-151.
- [22] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167.
- GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.
- [23] 陈志刚, 刘东超, 崔龙飞, 等. 基于T型灰色关联度的高压断路器操作机构状态评估[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 93-99.
- CHEN Zhigang, LIU Dongchao, CUI Longfei, et al. Condition assessment of high voltage circuit breaker operating mechanism based on T-type grey correlation degree[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 93-99.
- [24] 常 广, 王 毅, 王 玮. 采用振动信号零相位滤波时频熵的高压断路器机械故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 155-162.
- CHANG Guang, WANG Yi, WANG Wei. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers utilizing zero-phase filter time-frequency entropy of vibration signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 155-162.
- [25] 钟 伟, 杨欢红, 赵恒亮, 等. 基于RF特征优选的AEA-ResNet柱上断路器运行状态诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 150-158.
- ZHONG Wei, YANG Huanhong, ZHAO Hengliang, et al. Operation status diagnosis of pole-mounted breakers based on RF feature optimization and AEA-ResNet[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 150-158.
- [26] 曹宇鹏, 罗 林, 王 乔, 等. 基于卷积深度网络的高压真空断路器机械故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 39-47.

- CAO Yupeng, LUO Lin, WANG Qiao, et al. Fault diagnosis of high-voltage vacuum circuit breaker with a convolutional deep network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 39-47.
- [27] 辛忠良, 霍明霞, 贾鹏举, 等. 基于经验小波变换和相关向量机的断路器机械故障诊断[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 97-103.
- XIN Zhongliang, HUO Mingxia, JIA Pengju, et al. Circuitbreaker mechanical fault diagnosis based on empirical wavelet transform and relevance vector machine[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 97-103.
- [28] 郭 君, 孙占忠, 黄式璋, 等. 舰艇气瓶基座结构抗冲击性能评估方法[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(3): 90-96.
- GUO Jun, SUN Zhanzhong, HUANG Shizhang, et al. Shock resistance evaluation method of ship air bottle-base connection structure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(3): 90-96.
- [29] 齐雅薇, 刘统章, 常倩倩. 某新型大功率船用汽轮机抗冲击特性研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(7): 137-144.
- QI Yawei, LIU Tongzhang, CHANG Qianqian. Study on impact resistance characteristics of a new high-power marine steam turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7): 137-144.
- [30] 冒如权. 舰船设备抗冲击可靠性分析[J]. 环境技术, 2021, 39(2): 79-83.
- MAO Ruquan. Analysis of impact reliability of ship equipment[J]. Environmental Technology, 2021, 39(2): 79-83.
- [31] 周马俊, 薛 斌, 薛 程, 等. 基于遗传算法改进的DDAM风机隔振装置抗冲击仿真实验[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(1): 140-144.
- ZHOU Majun, XUE Bin, XUE Cheng, et al. Simulation experiment of anti - impact of vibration isolation device of DDAM fan based on genetic algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(1): 140-144.
- [32] 耿盼盼. 舰用燃气轮机抗冲击数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- GENG Panpan. Simulation on shock resistance analysis of marine gas turbine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [33] 刘沛鑫. 舰船压力容器在水下爆炸冲击条件下的响应特性[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- LIU Peixin. Response characteristics of a ship's pressure vessel in conditions of underwater explosion impact[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [34] 韩少燕. 舰用燃机抗冲击分析方法与模型简化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- HAN Shaoyan. Anti-shock analysis method and simplified models of marine gas turbines[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [35] 舰船环境条件要求机械环境: GJB 1060.1—91[S]. 1991.
- General requirement for environmental conditions of naval ships mechanical environments: GJB 1060.1—91[S]. 1991.
- 于庆瑞(1972—), 男, 硕士, 正高级工程师, 长期从事中高压开关设备技术研究工作(E-mail: tsyuqr@sina.com)。
- 王 军(1976—), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为高压开关成套设备产品技术(通信作者)(E-mail: gdstswjun@163.com)。

(上接第40页)

- time domain PCA feature reduction[C]//UKSim-AMSS 19th International Conference on Computer Modelling & Simulation(UKSim). Cambridge, UK: IEEE, 2017: 21726845.
- [26] LI Yang, ZHANG Rui, GUO Yinjing, et al. Nonlinear soft fault diagnosis of analog circuits based on RCCA-SVM[J]. IEEE Access, 2020(8): 60951-60963.
- [27] 鄢仁武, 林 穿, 宋微浪, 等. 基于EEMD和卷积神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 213-220.
- YAN Renwu, LIN Chuan, SONG Weilang, et al. Research on circuit breaker fault diagnosis based on EEMD and convolutional neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 213-220.
- [28] 曹瑞峰, 刘子华, 袁 婷, 等. 基于改进SVM的新能源电站故障诊断方法[J]. 浙江电力, 2023, 42(11): 11-20.
- CAO Ruifeng, LIU Zihua, YUAN Ting, et al. A fault diagnosis method for new energy power plants based on an improved SVM[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(11): 11-20.
- [29] 白 浩, 钟振鑫, 李 巍, 等. 基于CEEMD和NTEO的故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 50-59.
- BAI Hao, ZHONG Zhenxin, LI Wei, et al. A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 50-59.
- 李 琮(1989—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事电网设备故障诊断、配电网运行分析等方面研究(E-mail: powerdsp339@163.com)。