

船用断路器抗颠簸分析与试验研究

王军¹, 杨炼², 于庆瑞^{1,3}, 孙涛², 黄文辉¹, 裴冠辉¹

(1. 甘肃省智能电器重点实验室, 甘肃 天水 741024; 2. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;

3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 船用断路器作为舰船电力系统重要的控制和保护设备, 直接影响舰船系统的安全可靠性能。由于工作环境的特殊性, 船用断路器不可避免地会受到海浪重复拍打引起的颠簸载荷。为探究颠簸载荷对断路器整机可靠性以及触头系统接触性能的影响, 以某型船用真空断路器为研究对象, 运用理论推导、数值分析和试验验证等方法探究断路器在颠簸载荷下的动态响应特性, 寻找船用断路器结构设计的薄弱环节和探究触头系统的颠簸规律, 为船用电器设备抗颠簸设计提供了理论依据和参考。

关键词: 船用断路器; 颠簸; 触头系统; 接触性能

Analysis and Experimental Study on Bump Resistance of Marine Circuit Breaker

WANG Jun¹, YANG Lian², YU Qingrui^{1,3}, SUN Tao², HUANG Wenhui¹, PEI Guanhui¹

(1. Gansu Key Laboratory of Intelligent Electrical Appliances, Gansu Tianshui 741024, China;

2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Marine circuit breaker, as an important control and protection equipment of shipboard power system, can directly affect the safe and reliable performance of the ship board system. Due to the special nature of the working environment, marine circuit breakers are inevitably subjected to bump loads due to repeated lapping of waves. In order to investigate the influence of the bump loads on reliability of the circuit breaker and the contact performance of the contact system, a certain marine vacuum circuit breaker is taken as the research object to explore the dynamic response characteristics of the circuit breaker under bump loads by the use of such methods as theoretical derivation, numerical analysis and test verification, find the weak link of the marine circuit breaker structure design and the bump regularity of the contact system, which has provided a theoretical basis and reference for the design of marine electrical equipment against bump.

Key words: marine circuit breaker; bump; contact system; contact behavior

0 引言

船用断路器是舰船电力系统中非常重要的控制和保护电气设备, 可以断开、接通和承载正常运行条件下的系统电流, 也可以承载和断开规定时间内异常条件下的故障电流^[1-8], 随着中国电力系统不断发展, 对断路器可靠性的要求越来越高^[9-12]。船用断路器直接关系到舰船供电系统的稳定性和可靠

性。利用计算机辅助设计, 模拟分析某船用断路器的抗颠簸性能, 根据结果确定最佳的虚拟样机设计, 进而改进产品性能, 加快设计进度, 提高设计质量, 最后通过试验验证仿真结果的准确性^[13-19]。

由于海浪、大风或武器攻击的瞬时性冲击引起的颠簸是舰船设备在航海作业时经常会遇到的环境条件^[20], 颠簸通常以惯性载荷的形式作用于舰艇设备, 颠簸加速度的主要方向是沿舰艇甲板的垂直

收稿日期: 2023-03-12; 修回日期: 2023-05-08

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项目(19DZ2252600)。

Project Supported by Program of the High Performance Computing Center, Shanghai University, and Shanghai Intelligent Computing System Engineering Technology Research Center (19DZ2252600).

方向,同一环境引起的颠簸加速度比其振动加速度要大很多^[21-22]。颠簸会引起设备作用力失衡、结构件破坏、紧固件松动断裂等永久性损伤。

文[23]对某一船载设备在颠簸载荷下的响应运用有限元软件进行了数值计算,对计算结果分析后发现了该船载设备在颠簸载荷作用下的薄弱环节并进行优化改进。文[24]提出了一种新型的方法—大质量法,对利用 Ansys 软件进行颠簸分析提供了一种新的思路。文[25]在集装箱船船艏部分施加半正弦载荷、三角形载荷和阶跃载荷等砰击载荷,对比分析了不同脉冲的载荷对加强筋动力响应的影响。在实体建模方面,文[26]通过建立无铅焊点三维有限元模型,对电子器件进行跌落冲击载荷下的应力应变动态计算与分析,得出加速度脉冲幅值、脉冲时间、阻尼以及不同种类冲击波波形对冲击响应的规律。文[27]通过仿真分析和试验验证等方法研究了船舶中压真空断路器的抗冲击性能,并对断路器应力危险部件进行了设计优化,提高了船舶断路器的抗冲击可靠性。

动静触头是断路器的重要部件,是影响其运行可靠性的关键部件^[28-30]。触头接触振动可能会导致电弧的产生,从而使触头熔焊和烧损,进而影响电接触性能和使用寿命。目前为止,学者们在分析触头系统的动态过程方面做了很多工作。陆俭国^[31]阐述了导致触头振动的各种原因,对电器吸合时由于动、静触头碰撞而引起触头振动的计算方法进行了讨论,并提出了触头振动的近似计算方法,最后还讨论了防止或减小触头振动的各种措施。金平等^[32]推导了耦合电路运动方程,分析并获得了触头的接触弹跳,并建立了触头接触碰撞能量平衡方程。

目前对船用断路器颠簸性能的研究不多,文中通过数值分析和试验验证相结合的方式分析研究颠簸对船用断路器性能的影响,缩短了船用断路器的研发周期,提高了结构设计合理性。

1 断路器虚拟样机建立

随着舰船技术的发展,舰船电力系统的容量和电压等级不断提高,12 kV 系统电压在大型舰船电力系统中得到广泛应用,其系统容量也越来越大。文中研究的船用断路器适用于 12 kV 系统,最大短路电流可达到 63 kA。

1.1 断路器基本结构及简化

船用断路器整体结构见图 1。

断路器模型由于设计结构复杂和零件数量多,不但会造成后续的网格划分质量低、计算量过大、

图 1 船用断路器结构

Fig. 1 Marine circuit breaker structure

零部件出现应力集中或奇异,甚至会造成求解不收敛和报错等情况。所以在此之前需要对模型做进一步的处理,处理包括以下方面:

1)为使其网格划分得合理有效,对绝缘子、出线座和灭弧室波纹管简化处理,去掉其螺纹或波纹结构,绝缘子简化前的模型见图 2(a),简化后的模型见图 2(b)。

2)为防止出现应力集中或应力奇异等问题,对断路器上比较尖锐的零部件进行去除尖角的简化处理。

3)为了减少后续分析的计算量,去除一些对分析影响很小的轻质量零部件,如螺栓、螺母和垫圈等。

图 2 绝缘子简化处理模型对比

Fig. 2 Comparison of insulator simplified processing models

1.2 材料特性

船用断路器的主要材料包括结构钢、紫铜、环氧树脂、陶瓷和铝合金。支撑绝缘子、变直机构的绝缘拉杆等材料为环氧树脂,真空灭弧室外壳为陶瓷材料。在断路器虚拟样机建模过程中,定义了上述材料的特性,并把材料属性添加到断路器虚拟样机的部件中。材料性能见表 1。

1.3 网格划分

应用 Creo 软件完成断路器虚拟样机的结构设计,结合断路器结构特点,对虚拟样机进行合理剖分和网格划分。为了提高计算效率选用了六面体结构网格。网格划分时在自动网格划分的基础上,

表1 断路器虚拟样机各材料性能
Table 1 Material properties of circuit breaker virtual prototype

材料	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	杨氏模量/Pa
结构钢	7.85 × 10 ³	0.30	2.0 × 10 ¹¹
紫铜	8.96 × 10 ³	0.34	1.1 × 10 ¹¹
环氧树脂	1.18 × 10 ³	0.38	3.0 × 10 ⁹
铝合金	2.70 × 10 ³	0.42	1.7 × 10 ¹¹
陶瓷	7.50 × 10 ³	0.32	7.6 × 10 ¹⁰

经过检查对局部网格进行了合理优化。网格划分完成后,通过检查网格质量确保满足分析要求。断路器虚拟样机网格划分见图3。

图3 断路器整机网格划分

Fig. 3 Circuit breaker whole machine meshing

1.4 模型约束与边界条件

船用断路器虚拟样机部件可分为静止部件和运动部件,其中静止部件主要有框架、侧板、支架等支撑部件。这些零部件通过螺栓固定连接。运动部件有弹簧、机构驱动件、传动主轴、变直机构、灭弧室动触头和软连接等,这些零部件通过定义相应的运动副进行约束。螺栓连接通过等效载荷法进行建模,固定面约束采用绑定约束,运动面约束采用刚体动力学接触约束。

该船用断路器在使用时,采用底面固定安装结构,因此,施加的边界条件为断路器下端4个螺栓孔的固定连接约束。

2 断路器触头颤震分析

2.1 颤震分析

断路器是线性的多自由度体系,利用振型分解和振型正交性的原理,将求解 n 个自由度弹性体系的颤震反应分解为求解 n 个独立的等效单自由度弹性体系的最大颤震反应,求得对应于每一个振型的

作用效应如弯矩、剪力、轴向力等,同时考虑了颤震激励与结构自身的运动特性之间的关系。

将断路器结构简化后,可对运动状态中各节点建立平衡微分方程

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -MI\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

式(1)中: M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; C 为阻尼矩阵; $\ddot{x}(t)$ 为质点相对于基础的加速度的列向量; $\dot{x}(t)$ 为质点相对于基础的速度的列向量; $x(t)$ 为质点相对于基础的位移的列向量; $\ddot{x}_g(t)$ 为颤震激励加速度列向量; I 为惯性力指标向量。

通过求各频率对应的振型,形成主振型向量,计算第 j 阶模态参与程度的振型参与系数,计算第 j 阶振型中第 i 个质点的作用为

$$F_{ji} = \alpha_j \gamma_j \varphi_{ji} G_i \quad (2)$$

式(2)中: α_j 为第 j 阶振型中自振周期的影响系数; φ_{ji} 为振型坐标; G_i 为质点 i 的重力。

2.2 颤震载荷

船用断路器工作环境特殊,工况复杂,不可避免地会受到外在碰撞和跌落等机械冲击,或间接受到海浪的拍打和撞击,虽然引起的冲击相应持续时间很短强度低,但重复发生次数较多,很可能不会对结构件及电子设备的功能性造成一定的影响。

根据GJB 4.8—1983舰船电子设备环境试验的规定^[33],以第一颤震等级为例,单个冲击激励波形见图4。

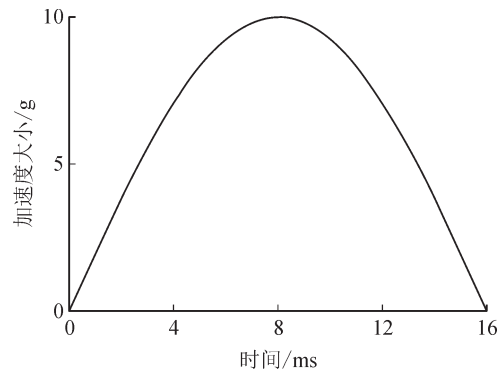


图4 单次加速度激励

Fig. 4 Single acceleration excitation

2.3 动触头应力响应

动触头作为断路器的核心部件,为了分析其应力变化最剧烈的部位,找到其抗颤震性能的薄弱部位,分别获取了分闸和合闸状态下动触头应力时间曲线及最大应力云图,见图5、6。

从图5、6可以看出,动触头在分闸状态下,受到载荷9ms后取得应力最大值14.45MPa,应力最大位置在动触头侧壁与固定板接触部分。在合闸状

态下,动触头在受到载荷 13 ms 后取得应力最大值 40.58 MPa,应力最大值在动触头上表面,最大应力远小于材料的许用应力。动触头能满足颠簸载荷作用下的强度要求。

2.4 动触头位移响应

断路器处于分闸状态时,动触头位移是反映触头系统绝缘性能的重要参数,此时动触头在重力、分闸弹簧预拉力和触头自闭力作用下处于平衡状态,当受到外界载荷时,动触头有可能向合闸方向运动导致触头开距减小甚至触头误触,从而引起绝缘击穿甚至触头烧蚀。断路器受到单个颠簸激励动触头的位移时间行程曲线见图 7。

图 5 分闸状态下动触头应力情况

Fig. 5 Stress on the movable contact in open state

图 7 分闸状态动触头位移时间曲线图

Fig. 7 Movable contact displacement-time curve in open state

从图 7 可知,动触头在载荷开始后的 18 ms 时刻位移到达最大值 1.92 mm,此时的触头开距为 9.08 mm,远大于可能产生击穿的触头开距。外界激励持续作用于绝缘拉杆,动触头的最小位移为 -0.2 mm,最后在平衡位置阻尼振荡直至响应结束。

3 颠簸影响参数研究

舰船在航行时由于海况的变化,颠簸的各个参数会发生变化,为探究颠簸各个参数对断路器触头系统响应情况的影响,本节针对各个参数展开单独研究。

3.1 加速度峰值对颠簸响应的影响

加速度大小是颠簸非常重要的参数,为得到加速度大小对断路器响应影响情况,保持颠簸其他参数不变,通过改变颠簸载荷的加速度峰值大小,提取分闸状态下动触头位移变化曲线来判定触头系统对峰值加速度变化的响应情况。

断路器处于分闸状态,保持冲击脉冲宽度都为相同的 16 ms,设置不同加速度 5g、7g、10g、15g 的半正弦颠簸脉冲载荷,得到不同加速度峰值下动触头位移时间曲线见图 8。

图 6 合闸状态下动触头应力情况

Fig. 6 Stress on the movable contact in close state

从触头系统分闸状态对不同脉冲宽度的响应情况来看,触头系统在颠簸下振动响应对窄脉冲宽度比宽脉冲宽度敏感。

4 试验对比研究

为了验证船用断路器的抗颠簸可靠性和颠簸仿真分析的准确性,对断路器进行了颠簸试验^[33-34],颠簸试验设备采用AIS1000气动冲击碰撞试验台,通过GKCHD430A高压开关测试仪监测断路器灭弧室动触头的运动特性,颠簸试验系统见图10。试验中,为监测断路器的颠簸加速度和动触头颠簸位移,在断路器上安装了位移传感器和加速度传感器,安装位置见图11。根据船用断路器的载荷要求,脉冲持续时间为16 ms,加速度幅值为10g,重复频率为60~80 r/min,总次数为3 000次,单次加速度激励见图4。

图8 不同加速度峰值下动触头位移时间曲线

Fig. 8 Movable contact displacement-time curve under different acceleration peaks

从图8可以看出4种载荷取得最大位移值为1.17、1.41、1.91、2.51 mm,到达峰值所需的时间分别为17、18、18.5、19 ms,可知随着颠簸加速度峰值增大,动触头位移幅值也随之增大,位移响应峰值所需时间变长,且加速度峰值越大,动触头自由振动的振幅越大和时间越久。在这4种烈度工况下动触头位移始终没有到达产生电弧的位置,说明分闸状态下断路器的性能稳定可靠。

3.2 脉冲宽度对颠簸响应的影响

断路器在受到颠簸时,由于海浪波长的变化,颠簸单次冲击脉冲时间也在变化,为了明确颠簸脉冲宽度参数对断路器主框架底座和触头系统响应的影响,故有必要研究加速度脉冲时间对断路器的影响。保持颠簸峰值加速度不变,设置不同脉冲宽度来探究对触头系统抗颠簸性能的影响。动触头位移与脉冲宽度关系曲线见图9。

图9 动触头位移与脉冲宽度关系曲线

Fig. 9 Movable contact displacement-pulse width curve

断路器处于分闸状态时,图9中4条曲线可以看出在不同加速度峰值下动触头位移变化趋势基本一致,在相同加速度峰值下,当脉冲宽度增大时,动触头位移值反而减小,且在16、20、24 ms脉冲宽度下动触头位移值变化量较大,随着脉冲宽度继续增加,位移值变化量越来越小。

图10 颠簸试验总览图

Fig. 10 General view of the bump test

图11 传感器安装位置

Fig. 11 Sensor installation site

仿真和试验结果进行对比的断路器底部和顶部加速度响应曲线以及动触头位移曲线图见图12-14,加速度数值模拟结果和试验结果误差小于8%,由于位移传感器安装环节间隙的影响,动触头位移模拟结果和试验结果偏差要大一些,但两者变化规律及

峰值具有一致性,试验验证结构表明了建立的模型较为准确,仿真分析数据可信。

图 12 断路器底部试验加速度与数值模拟加速度对比
Fig. 12 Comparison of test acceleration and numerical simulation acceleration at the bottom of circuit breaker

图 13 断路器顶部试验加速度与数值模拟加速度对比
Fig. 13 Comparison of test acceleration and numerical simulation acceleration at the top of circuit breaker

图 14 断路器动触头试验位移与数值模拟位移对比
Fig. 14 Comparison between the test displacement of movable contact of circuit breaker and that of digital simulation

5 结语

文中以某型号船用断路器为研究对象,通过建立断路器动力学模型,经分析其在时域和频域下的抗颠簸特性,发现断路器响应谱和瞬态的变形和零部件应力情况基本吻合,并未出现大位移,大变形

以及应力过大的现象。研究了载荷参数和断路器自身参数对断路器触头系统振动的影响规律,确定分闸位置触头系统对窄脉冲颠簸响应比较敏感。最后通过试验验证了仿真分析的可行性和研究结果的准确性,为船用电器设备抗颠簸设计和船用断路器触头接触可靠性提供了理论依据和研究方向。

参考文献:

- [1] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng. Principles and applications of high-voltage circuit breakers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [2] 穆艳,王永兴,邹积岩. 基于退化的真空断路器可靠性研究[J]. 高压电器,2020,56(10):130-134.
MU Yan, WANG Yongxing, ZOU Jiyang. Research on reliability of vacuum circuit breaker based on degradation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):130-134.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 魏亚军,李开灿,董振. 含逆变型分布式电源的配电网故障暂态分析[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(3):102-108.
WEI Yajun, LI Kaican, DONG Zhen. Transient analysis of faults in the distribution networks with inverter interfaced distributed generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3):102-108.
- [6] 骆通,何晋,管恩齐,等. 基于SABSO算法的含分布式电源配电网故障定位[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(5):174-180.
LUO Tong, HE Jin, GUAN Enqi, et al. Fault location of distribution network with distribution power supply based on SABSO algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5):174-180.
- [7] 吴跃斌,祁天星,马涛,等. 直流微电网故障限流特性分析[J]. 电网与清洁能源,2021,37(6):18-28.
WU Yuebin, QI Tianxing, MA Tao, et al. Analysis of fault

- current limiting characteristics of DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6): 18-28.
- [8] 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.
SHU Liang, WU Lang, WU Guichu, et al. A multi-body dynamic simulation method for circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 41-48.
- [9] 韩义, 丁兆帅. 基于 Ansys Workbench 的高压开关断路器传动机构强度仿真计算[J]. 东北电力技术, 2022, 43(1): 5-10.
HAN Yi, DING Zhaoshuai. Strength simulation calculation of high voltage switch circuit breaker transmission mechanism based on Ansys workbench[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(1): 5-10.
- [10] 刘建寅, 刘亚南, 王常龄, 等. 高压断路器操动机构典型故障模拟及其特征参量变化分析[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 7-13.
LIU Jianyin, LIU Yanan, WANG Changling, et al. Typical fault simulation and characteristic parameter variation analysis of operating mechanism for high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 7-13.
- [11] 苏湛威, 蔡定国, 连骏, 等. 用于断路器温升试验的大电流发生器研制[J]. 变压器, 2022, 59(11): 6-10.
SU Zhanwei, CAI Dingguo, LIAN Jun, et al. Development of high current generator for temperature rise test of circuit breaker[J]. Transformer, 2022, 59(11): 6-10.
- [12] 陈依泽. 振动状态下铁路信号继电器的可靠性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
CHEN Yize. Research on reliability of railway signal relay under vibration[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [13] 艾绍贵, 衣立东, 姚晓飞, 等. 126 kV 真空断路器操动机构机械可靠性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 77-85.
AI Shaogui, YI Lidong, YAO Xiaofei, et al. Research on mechanical reliability of operating mechanisms of 126 kV vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 77-85.
- [14] 杨秋玉, 王栋, 阮江军, 等. 基于振动信号的断路器机械零部件故障程度识别[J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2880-2892.
YANG Qiuyu, WANG Dong, RUAN Jiangjun, et al. Fault severity estimation method for mechanical parts in circuit breakers based on vibration analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2880-2892.
- [15] 李增光. 舰船推进轴系抗冲击分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
LI Zengguang. Research on the impact analysis of naval propulsion shaft system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [16] 张照辉, 魏钢, 杨庆, 等. 12 kV 真空断路器投切并联电抗器合闸预击穿电压的研究[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 1-6.
ZHANG Zhaohui, WEI Gang, YANG Qing, et al. Study of pre-strike overvoltage caused by 12 kV vacuum circuit breaker switching shunt reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 1-6.
- [17] 杨文强, 张蓬鹤, 张保亮. 高海拔微型断路器分断性能的数字仿真分析及应用[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 181-187.
YANG Wenqiang, ZHANG Penghe, ZHANG Baoliang. Numerical simulation analysis and application of breaking performance of high altitude miniature circuit breaker[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 181-187.
- [18] 刘天舒, 苏昊, 潘超. 交直流混杂环境下三相变压器绕组振动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 61-68.
LIU Tianshu, SU Hao, PAN Chao. Research on winding vibration of a three-phase transformer under an AC/DC hybrid environment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 61-68.
- [19] 杨文英, 刘兰香, 刘洋, 等. 考虑碰撞弹跳的接触器动力学模型建立及其弹跳特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1900-1911.
YANG Wenying, LIU Lanxiang, LIU Yang, et al. Establishing of contactor dynamic model considering collision bounce and analysis of influencing factors of bounce characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1900-1911.
- [20] 张昭辉. 颠簸摇摆载荷下船载管阀系统结构动力学分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
ZHANG Zhaohui. Structural dynamics analysis of shipboard tube valve system under bump and sway load[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [21] 施建荣, 张燕, 施诗. 论颠簸环境和颠簸试验[J]. 装备环境工程, 2009, 6(4): 61-63.
SHI Jianrong, ZHANG Yan, SHI Shi. On bumping environment and bumping test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(4): 61-63.
- [22] 张艳辉. 浅析舰载武器海洋环境适应性验证要求[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 8-11.
ZHANG Yanhui. Requirement on suitability verification of shipborne weapons in marine environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 8-11.
- [23] 于扬, 杨文芳. 某舰载显控台结构动力仿真分析[J]. 电子机械工程, 2011, 27(6): 58-61.
YU Yang, YANG Wenfang. Dynamic simulation analysis for a shipborne console structure[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011, 27(6): 58-61.
- [24] 陆秉权, 王立清, 艾尚茂. Ansys 动力分析中大质量法的应用[J]. 电站系统工程, 2002, 18(5): 63.

- LU Bingquan, WANG Liqing, AI Shangmao. Application about large mass method in Ansys dynamic analysis[J]. Power System Engineering, 2002, 18(5):63.
- [25] 邢新蕊. 集装箱船在砰击载荷作用下的动力响应及动力屈曲分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- XING Xinrui. Dynamic response and dynamic buckling analysis of container ship under slamming load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [26] 周新. 板级无铅焊点跌落冲击载荷下可靠性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- ZHOU Xin. Reliability analysis of plate lead-free solder joints under drop impact load[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [27] 黄镭, 王华敏, 涂煜, 等. 船舶中压交流真空断路器结构抗冲击性能研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(3): 253-261.
- HUANG Lei, WANG Huamin, TU Yu, et al. Anti-impact performance of marine medium voltage AC vacuum circuit breaker structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(3):253-261.
- [28] SHU L, WU L, WU G C, et al. A fully coupled framework of predicting the dynamic characteristics of permanent magnet contactor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(8):1-7.
- [29] BIAGINI V, BOLOGNESI P, MECHLER G, et al. Multi-domain mechatronic approach for the design of a vacuum contactor actuation drive[C]//2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM).Switzerland: IEEE, 2016:1126-1131.
- [30] CHENG S, CA Z. Design and optimization of energy-saving wind power grid-connected contactor based on Nano two-phase composite magnetic materials[C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment Switching Technology.China:ICEPE-ST 2017, 2017:209-212.
- [31] 陆俭国. 触头的振动及防振措施[J]. 机电元件, 1986(1):6-12.
- LU Jianguo. Vibration of contacts and anti-vibration measures[J]. Electromechanical Components, 1986(1):6-12.
- [32] 金平, 林鹤云, 房淑华, 等. 永磁接触器的快速磁场分析和动力学预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(36):16-21.
- JIN Ping, LIN Heyun, FANG Shuhua, et al. Fast magnetic field analysis and kinetic prediction model for permanent magnet contactors[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2010, 30(36):16-21.
- [33] 舰船电子设备环境试验颠簸试验: GJB 4.8—1983[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1983.
- Bump test of ship electronic equipment environment experiment: GJB 4.8—1983[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1983.
- [34] 舰船设备环境参数测量方法第3部分: 颠簸: CB/T 4389.3—2013[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2013.
- Method for measuring environment parameters for ship equipment part 3: Bump: CB/T 4389.3—2013[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, PRC, 2013.

王军(1976—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压开关成套设备产品技术(E-mail: gstswjun@163.com)。