

舰载环境振动摇摆特性测试分析

程家军, 李春枝, 陈颖

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 目的 研究舰船在不同航行状态、不同海况下的振动和摇摆响应特性。方法 在舰船特征位置布设加速度传感器和倾角传感器,利用数据采集与分析系统对海上航行状态下舰船的振动加速度和摇摆角度信号进行数据采集和信号分析。结果 海上测试获取了大量实测数据,通过数据分析得到了某型舰船的振动和摇摆特性。结论 对舰船在一定条件下的典型振动特性和摇摆特性有了初步认识,为舰载环境条件的参数积累和武器系统在舰载环境下的适应性及可靠性研究提供了重要的参考和依据。

关键词: 振动; 摇摆; 数据处理

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.01.023

中图分类号: TJ83; TP274 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)01-0114-06

Testing Analysis of Vibration and Sway Characteristics in Shipboard Environment

CHENG Jia-jun, LI Chun-zhi, CHEN Ying

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To study the response characteristics of ship vibration and swing in different sailing status and different sea conditions. **Methods** Acceleration transducer and angle sensor were installed in specific locations in the ship, and the real-time vibration acceleration and swing angle parameters were measured by the data acquisition and analysis system while sailing in the sea. **Results** A large amount of measured values were obtained, by analyzing which the response characteristics of vibration and swing of a certain type of ship were researched. **Conclusion** A preliminary understanding on the typical vibration and sway characteristics of the ship under certain conditions was obtained, and the analysis results provide important reference and basis for the parameter accumulation in shipboard environment as well as the adaptability and reliability studies on the weapon systems in shipboard environment.

KEY WORDS: vibration; sway; data processing

舰船在海上环境下的振动摇摆特性是舰载环境技术研究的一项重要内容,是对舰载武器系统进行结构设计、开展舰载隔振缓冲和稳定平台技术应用的重要基础之一。在详细分析舰船海上环境特性及

影响因素的基础上,根据项目需求并结合海上测量的技术特点构建测试系统,开展了舰船振动、摇摆环境参数的测量工作,获取并深入分析了不同海况、不同海域、不同航行状态、不同船身位置的舰船典型振

收稿日期: 2014-08-31; 修订日期: 2014-12-10

Received: 2014-08-31; Revised: 2014-12-10

作者简介: 程家军(1964—),男,四川绵阳人,高级工程师,主要研究方向为动态测试技术。

Biography: CHENG Jia-jun(1964—), Male, from Mianyang, Sichuan, Senior engineer, Research focus: dynamic testing technology.

动和摇摆特性数据。为舰船海上环境参数积累、研究制定舰载环境条件、掌握舰载武器系统在海上环境下的低频制稳和高频隔振等关键技术提供了重要的第一手资料。

1 舰载环境特性分析

在海上航行或漂浮的舰船可看作是全自由弹性体,其机械物理特性复杂多变,除在航行时会受到来自海浪、船舱主发动机、螺旋桨和柴油发电机等内、外部各种周期或非周期性的振动干扰外,在作战环境下还承受各种舰载武器系统工作所引发的剧烈振动、冲击激励^[1-2]。

舰载武器系统同样会受到各种振动、冲击、摇摆、离心加速度、颠簸等各种形式机械力的作用,其中振动和冲击对武器系统的电子、光学设备性能及结构的影响尤为明显。其影响因素主要包括:设备在某一激振频率作用下产生共振,或因冲击产生的冲击力超过设备承受的强度极限而导致设备失效甚至损坏;在振动和冲击引起的结构应力远低于设备结构强度的情况下,海上环境下的长期振动和反复冲击也可能对舰载光电设备造成疲劳损伤^[3]。此外,应用惯性技术隔离舰船的角运动干扰,使舰载武器系统实现稳定平台功能,通过不断测量被稳定对象姿态和位置的变化,精确保持动态姿态基准,并通过探测设备实现对机动目标的稳定跟瞄^[3-4],也是武器系统舰载化的关键技术之一。为此,掌握和研究舰船在海上环境下的振动、冲击和摇摆特性,是对舰载武器系统进行抗振动冲击结构设计、采用隔振缓冲和稳定平台技术实现舰载安装的必不可少的重要环节。

2 测试项目及技术要求

舰载环境特性测试主要是测量舰船特定区域在海上航行状态下的振动响应参数和摇摆姿态参数。根据舰船海上航行的低频环境特点和舰船发动机等机电设备的工作特性,在各测试区域内,选取具有加强筋结构的特征部位安装加速度传感器和倾角传感器,对振动加速度信号和舰船摇角信号进行测量。

为保证各测点传感器安装方向和测量方向的统一,测量方向定义如下:沿舰船前进方向为 x 向(纵向),垂直海面并指向上方为 z 向(垂向),水平面内按右手法则确定方向为 y 向(横向)。

3 舰船测试技术状态

3.1 舰船技术指标

承担该次海上测试任务的是某型护卫舰,满载排水量为2 250 t;舰长为111.7 m,舷宽为12.1 m,吃水深度为4.8 m;最大航速为25 kn,续航力为4 000 n mile/18 kn;主机舱内安装2台12E390柴油机,持续功率为14 400马力,双轴传动;配备4台柴油发电机提供全舰其他动力、照明设备的工作。

3.2 舰船测试区域

根据舰载武器系统的技术特点,在舰船外部甲板适当部位选择相应的测试区域,分别位于舰船二层甲板的前部(测试区1)和三层甲板后部(测试区2,直升机机库顶部)。测试区1为半圆形区域,宽11.3 m,底边至弧顶长9.5 m,区内安装有2座37 mm炮;测试区2为长方形区域,长9.1 m,宽4.6 m,该区域中部安装有一部火控雷达。

3.3 舰船测试区域测点布设及传感器安装

武器系统在舰船上的安装部位必须具备足够的结构强度,且需减少舰载设备运行产生的振动、冲击及噪声等影响。为此在两个测试区中选择具有加强筋结构的特征部位,分别布设4个测点进行加速度响应测量:测试区1左右两侧的37 mm炮安装基座上各布设2个测点;测试区2中部火控雷达钢架基座的4个边角上各布设1个测点;此外,在各测试区中部布设1个测点,测量板壳结构的加速度响应并与其它测点进行对比。

每个测点安装3只单轴向低频加速度传感器,构成 x, y, z 等3个测量方向。两个测试区各用加速度传感器15只,进行振动加速度响应信号测量。

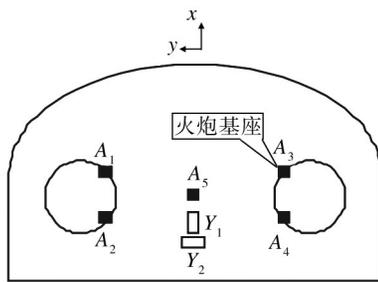
在测试区1和测试区2的中心部位分别布设1个摇角测点,每个测点安装2只单轴向倾角传感器,以实现舰船纵摇角度和横摇角度的测量。

图1中, A_1-A_5 为舰船振动加速度响应测点, Y_1 和 Y_2 为舰船摇摆角度测点。

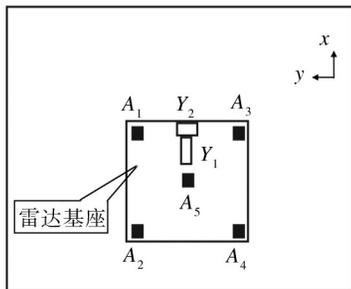
4 测试系统

4.1 测试系统组成

根据舰船海上航行的低频环境特性、测试项目



a 测试区1



b 测试区2

图1 测试区测点

Fig.1 Diagram of measuring points in the test area

及测试要求配置测试系统,包括高灵敏度低频加速度传感器、高精度倾角传感器、宽频响范围信号适调系统和多通道数据采集分析系统等。

表1 测试系统配套仪器

Table 1 Instruments in the test system

名称	型号	说明
低频加速度传感器	YD82	加速度信号测量
倾角传感器	LSOC-90	角度测量
信号适调系统	PCB 481A	信号调理
前置变换器	RD-35-R	为倾角传感器提供 ± 15 V 直流电源
数据采集分析系统	VXI/I-DEAS	数据采集、存储及信号分析

4.2 主要测试仪器性能指标

测试系统配套仪器、传感器和数据采集系统的各项技术指标满足舰船环境测量技术要求。

5 海上航行测试

海上航行期间,在不同海域、不同海况、不同时段、不同航速和不同航行状态下(航行、漂浮)对舰船振动特性、舰船摇摆特性等参数开展分批多组测量。

表2 测试系统主要技术指标

Table 2 Major technical parameters of the test system

名称	量程	频响范围/Hz	非线性误差/%
低频加速度传感器	0.0001g ~ 20g	0.1 ~ 1 000	<0.5
倾角传感器	0° ~ ± 90°	0 ~ 55	<0.05
信号适调系统	25 000 pC	0.4 ~ 10 000	<0.05
数据采集分析系统	± 0.01 ~ ± 20 V	0 ~ 20 000	<0.1

每组测量均不少于 30 min 的连续数据采集,并对测量时行经的海况、航速及对应时刻进行了详细记录。

6 振动、摇摆特性分析

对海上航行中采集记录的舰船振动响应数据和摇角数据进行归纳分类,从频域和时域对测试区内各测点总均方根值响应、频率响应分布和时域最大峰值等进行了分析,对不同海况、不同航速和航行状态、舰船不同部位的响应情况进行对比、分析。

6.1 加速度总均方根值响应分析

6.1.1 高速航行状态

高速航行状态下,测试区1纵向和横向的加速度响应量级相当,各加速度测点响应差异不大;垂向响应略高,最大为 0.0136g,不同测点其响应有所差异。在航速较为稳定的情况下,各航段加速度响应规律类似,所有测点具有相似的振动响应特征和变化趋势。

测试区2因位于舰船后部直升机机库顶部,且靠近舰船主发动机机舱,其振动响应和摆动幅度较测试区1均有所放大,各方向响应也略有不同,垂向响应最大,横向次之,纵向响应最小,加速度总均方根值最大为 0.035g。

不同时段内测试区1和测试区2各加速度测点在纵向、横向和垂向的总均方根值的响应分布情况如图2所示。

6.1.2 低速航行状态

低速航行状态各测试区内的加速度响应量级总体较低,总均方根值均小于 0.01g。与高速航行类似,测试区2的振动响应略高于测试区1。低速航行状态虽然航速、海况条件有所差异,但同一测试区不同时段其加速度响应量级相差不大,所有测点在不同时段的振动响应特征和变化趋势相近。

6.1.3 漂泊状态

因漂泊状态下舰船主发动机停机,各测试区内

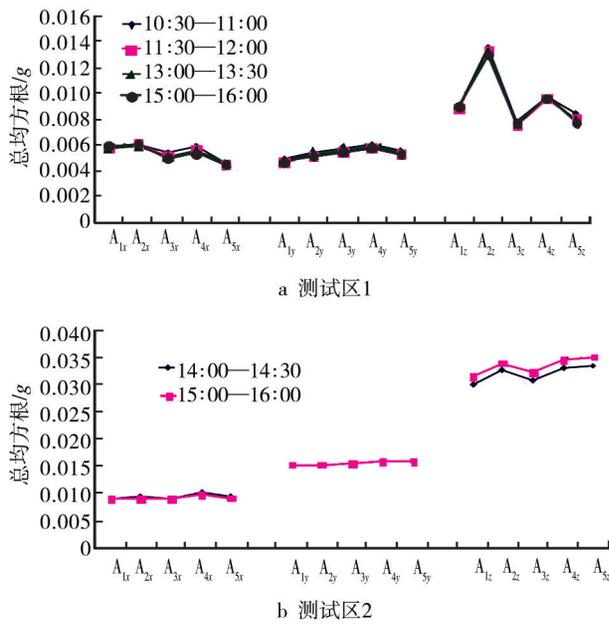


图2 高速航行状态测试区加速度总均方根值分布

Fig.2 Acceleration RMS distribution of the test area 1 and area 2 in the high-speed sailing status

的加速度响应在几种航行状态中量级最低,总均方根值均低于0.002g。该状态下的主要振源考虑为舰载发电机等机电设备工作、舰载武器和雷达系统及人员训练操演、舰船摇摆及海浪冲击船体等因素。

6.1.4 加速度总均方根值响应范围

测试区1加速度响应的总体分布情况如图3所示,各测试区域在不同航行状态下加速度总均方根值响应范围:纵向为0.0005g~0.01g,横向为0.0009g~0.016g,垂向为0.001g~0.035g。

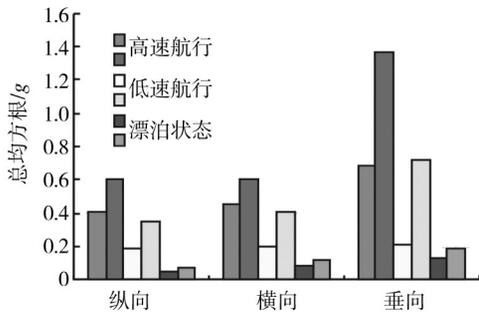


图3 测试区1加速度总均方根值总体分布

Fig.3 Overall distribution of acceleration RMS in the test area 1

6.2 加速度时域响应分析

加速度时域峰值反映了测量时段内曾经历过的最大加速度瞬时极值,其峰值响应具有一定的偶然性^[5]。在整个航行过程中,无论是高速航行、低速

航行还是漂泊状态,各加速度测点主要以低频响应为主,时域响应总体水平较低,只是在开启舰船主发动机、作战操演训练中开启雷达、转动火炮及舰上人员在测试区内活动时产生的瞬时冲击响应略大,其他时段均较为平稳。

某时段测试区1测点A₁在3个测量方向的加速度响应波形如图4所示。从时域波形看出,加速度响应信号以低频成分为主,同时在低频波形上叠加有高频响应信号。

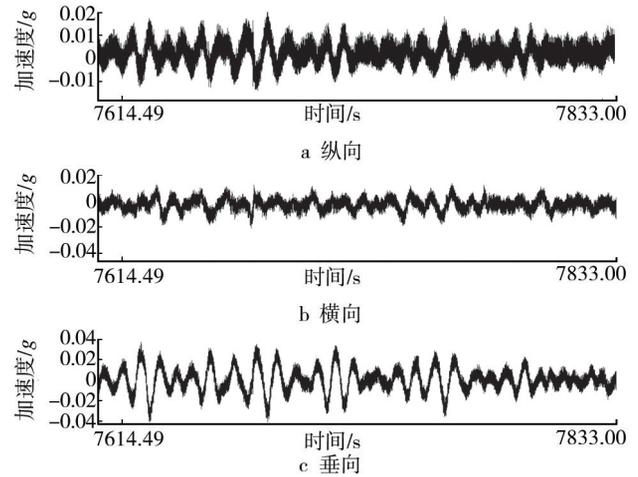


图4 高速航行状态时域加速度响应

Fig.4 The time domain acceleration response in high-speed sailing status

舰船高速航行状态、低速航行状态和漂泊状态下各测点在纵向、横向和垂向的时域加速度最大峰值响应统计见表3,最大峰值为0.64g。

表3 加速度最大峰值

Table 3 The maximum acceleration peak value

测量方向	高速航行	低速航行	漂泊状态
纵向	0.142	0.204	0.015
横向	0.137	0.182	0.030
垂向	0.639	0.308	0.029

6.3 加速度频率响应分析

对各种海况、各种航行状态下的测试数据进行频谱分析,可以发现,纵向、横向和垂向都具有极低的频响特性,而在200 Hz频率范围内局部频段的高频谐振也非常突出,个别谐振频率峰值较高。振源考虑为舰船主发动机运行、主轴和螺旋桨运转、柴油发电机等舰上设备工作时产生的振动为主要因素。

6.3.1 各测点之间频响对比

某时段高速航行状态下测试区1各测点的功率谱密度曲线如图5所示,纵向、横向各测点间的频响特性基本完全一致。在垂向中,安装在火炮基座上的A₁—A₄点频率响应相同,而测点A₅因安装位置无

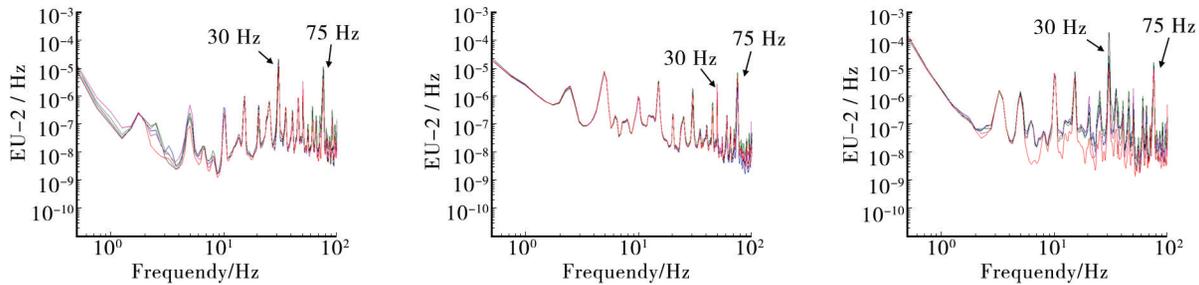


图5 高速航行状态A₁—A₃各测量方向频率响应

Fig.5 Frequency responses of A₁—A₃ in different measurement directions in high-speed sailing status

有典型低频特性外,在较宽频带内纵向、横向和垂向均出现明显的谐振峰,并以30和75 Hz响应最为明显,峰值最高。

6.3.2 不同航行状态频响对比

当舰船航速相同时,不同海况下浪涌的大小和海浪冲击船体的频率会有所不同,舰船摆动频率和幅度也会相应变化,会对极低频段的频响产生影响,但对高频谐振无贡献。

当航速改变时,主发动机转速发生变化,由此引起舰船谐振频率改变。此次航行中,低速巡航的航速从1 kn至11 kn,变化范围较大,由此激发的谐振频率成分较为复杂,影响的频率范围也较宽,总体上低速航行时谐振频率峰值较高速航行略有下降。

漂泊状态下舰船主发动机停止工作,此时主要振源仅来自舰载发电机等机电设备工作产生的振动干扰,因此在三种航行状态中,漂泊状态时的高频谐振峰值最小。

现以高速航行状态、低速巡航状态及漂泊状态下同一测点A₁在垂向的频率响应为例进行对比,低频段三种状态的频响幅值差异明显,高频谐振频率成分及响应峰值在三种状态也发生变化,以漂泊状态变化最为明显,如图6所示。

6.4 摇角数据分析

舰船的摇摆包含纵摇和横摇,角度方向定义为:+x向为纵摇正角度,-x向为纵摇负角度;+y向为横摇正角度,-y向为横摇负角度。

6.4.1 不同时段最大摇摆角度统计

表4给出了各种航行状态下不同时间段内舰船摇摆最大角度。摇摆角度与当时的海况(主要是浪

涌大小)、航速、舰船状态(航行或漂泊)及航向(是否迎浪航行)均有较大关系。从表中数据看出,横摇角最大22.7°,纵摇角最大6.19°。

加强筋结构,因此在局部频段与其它各测点存在细微差异,但其主要特征频率则完全相同。在各种航速和航行状态下,同一测试区内加速度测点之间频响特性非常相近。

以上述图3—5为例,同一测试区内各测点除具

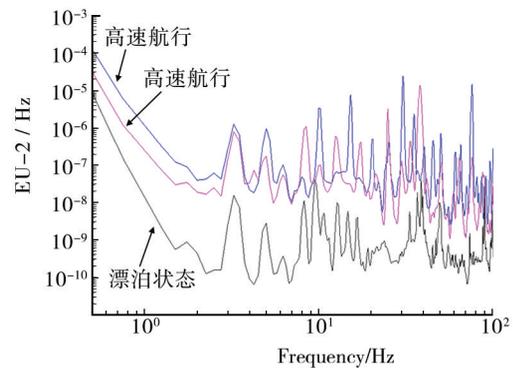


图6 A₁在三种航行状态下垂向频率响应

Fig.6 Vertical frequency responses of A₁ in three different sailing statuses

6.4.2 摇摆角度频响分析

对各种航行状态下舰船摇摆角度实测数据进行频谱分析发现,无论是纵摇或横摇,在不同时段均具有非常相近的频响特性。纵摇响应峰值的频率主要集中在0.14~0.25 Hz,横摇响应峰值的频率主要集中在0.09~0.19 Hz,其他频段的响应无论纵摇还是横摇均以较大斜率明显衰减。对比各航段不同时间段的横摇角和纵摇角的PSD曲线,舰船的横摇频率总体上低于纵摇频率,但横摇角的响应峰值明显大于纵摇角,这与摇角的时域分析结果一致。纵摇角和横摇角的时间历程和频率响应曲线示例如图7所示。

6.5 舰载环境总体特征

在该次海测所历经的海上环境下,所测舰船的

表4 不同航行状态舰船摇摆角度
Table 4 Ship swing angle in different sailing status

舰船状态	测量时段	海况/级	纵摇最大角/(°)		横摇最大角/(°)	
			正向	负向	正向	负向
高速航行	测量时段1	3	2.90	-3.17	8.35	-7.31
	测量时段2	3	3.00	-3.15	5.77	-6.94
	测量时段3	3	3.04	-3.95	5.33	-5.78
	测量时段4	3	1.25	-2.75	12.0	-10.2
低速航行	测量时段1	3	1.82	-2.25	8.23	-5.85
	测量时段2	2	0.65	-1.15	7.69	-4.80
	测量时段3	3~4	2.21	-2.38	13.1	-11.9
漂泊状态	测量时段4	3~4	6.19	-4.96	22.7	-11.4
	测量时段1	2	1.29	-2.00	8.60	-4.80
	测量时段2	2	0.32	-1.63	7.35	-2.21

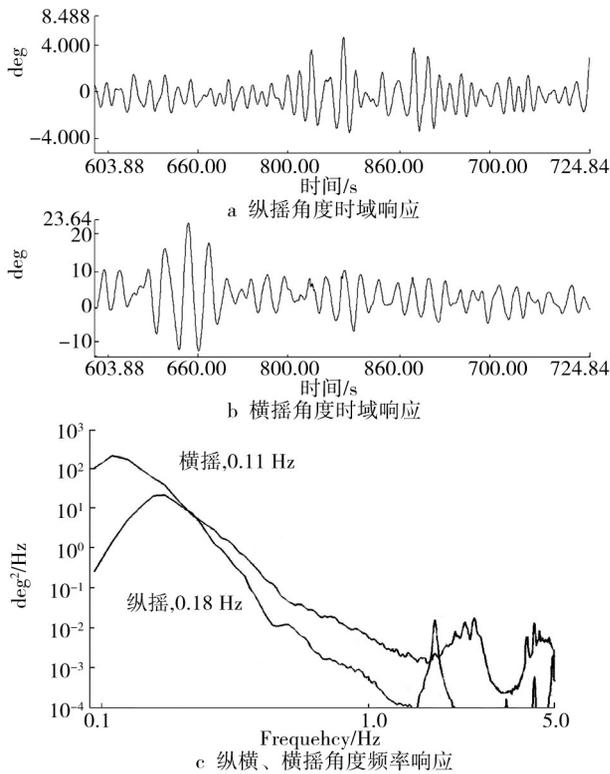


图7 纵摇和横摇的时间历程和频率响应曲线示例

Fig.7 Time history and frequency response curves of pitch and roll of the sample

振动加速度响应总体水平较低,舰船后部三层甲板测试区域的加速度响应明显要高于二层甲板前区。

1) 加速度总均方根值范围。测试区1:纵向为0.0005g~0.006g,横向为0.0009g~0.006g,垂向为0.0013g~0.014g;测试区2:纵向为0.0005g~0.01g,横向为0.0011g~0.016g,垂向为0.001g~0.035g。

2) 加速度最大峰值:纵向为0.2g,横向为0.18g,垂向为0.64g。

3) 频率响应分布:纵向、横向和垂向加速度响

应均具有典型的低频特性,而在5~200 Hz频率范围内的局部频段出现明显的高频谐振,某些谐振峰较为突出。低频响应主要由浪涌推动、海浪冲击和船体摇摆造成,高频谐振考虑为因舰船主发动机、舰载柴油发电机等机电设备运行、螺旋桨运转及舰载武器系统工作等因素所致。

因该次海上航行中海况较为恶劣,舰船摇摆明显,横摇和纵摇的角度均较大,且横摇角明显大于纵摇角。横摇角度范围:负向最大为-17.7°,正向最大为22.7°;纵摇角度范围:负向最大为-4.96°,正向最大为6.19°。纵摇频响为0.14~0.25 Hz,横摇频响:0.09~0.19 Hz,其他频段均明显衰减。

7 结语

通过开展舰船海上振动摇摆环境参数测量工作,研究了特定舰船的技术参数,具体分析了舰载环境及其影响因素,结合测试项目和海上测量的技术特点,针对性地组建测试系统实施测量,获取了大量舰船振动和摇摆响应数据。通过对实测数据的分析研究,对特定舰船在一定条件下的典型振动特性和摇摆特性有了初步认识。虽然受舰船型号、巡航航速、海情海况等诸多因素限制,该次海上测试所获取的测量数据样本种类及数量还不全面、有待完善,相应分析结果尚不具备普适性,但仍可为研究制定舰载环境条件、提升对舰载环境特殊性及其影响规律的认识提供数据支撑,为舰载武器系统在舰载环境下的适应性和可靠性研究等工作的深入开展打下技术基础。

(下转第130页)

Applications, 1994(3):20—21.

[7] 刘宇明, 丁义刚, 姜利祥, 等. 热缩套管绝缘性能辐照效应研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(1):59—61.

LIU Yu-ming, DING Yi-gang, JIANG Li-xiang, et al. Radiation Effects on the Insulation Properties of Heat-shrinkable Sleeves[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(1):59—61.

[8] 龚光福. 呼吸效应研究[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(3):

238—239.

GONG Guang-fu. The Research on Respiration Effect[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(3):238—239.

[9] 盛磊. 俄罗斯宇航工程中常用的胶粘剂[J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(2):48.

SHENG Lei. Main Adhesives Applied in Russian Aerospace [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2001, 22(2):48.

(上接第 81 页)
 备的防护等。

2) 要在使用工程装备中尽量避开和减少沙尘对装备的沾染。

3) 要科学保养、合理分解, 无沙操作和薄涂保护油。

4) 对各种装备进行遮盖, 避免阳光直射对装备的损坏。

实施保养时, 应及时清除车内外各机件上的尘土; 检查空气蒸气阀的性能和泄水管是否畅通, 内燃机启动 1 ~ 2 min 后, 敞开水箱盖, 以便冷却系中的空气逸出; 冷却系、内燃机润滑系、空气滤清器的清洗周期应适当缩短; 检查蓄电池通气孔, 并保持通畅; 沙漠地区气候多变, 昼夜温差大, 夜间停放工程装备时, 应注意保温, 防止发动机被冻坏; 露天停放工程装备时, 要注意遮盖, 防止沙尘进入各部机件的摩擦表面。

4 结语

国际维和是军队执行非战争军事行动中的一项

任务, 其他还有抗洪抢险、抗震救灾、抗击冰雪、道路抢修、重大活动安保、国际救援等, 各项行任务所处地域的气候和环境条件对实施工程装备保障都提出明确要求。通过对国际维和行动中特殊气候环境下工程装备技术管理相关问题研究分析, 针对环境特点和影响论证提出的工程装备技术管理及维护措施, 对实施多地域非战争军事行动工程装备保障提供了方法和依据, 将起到并具有较好的军事和经济作用和效益。

参考文献:

[1] 张国书, 彭卫东. 特殊条件下部队通用装备技术管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

ZHANG Guo-shu, PENG Wei-dong. The Troops General Equipment Technical Management on the Special Conditions [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2011.

[2] 陶西贵, 焦金锋, 王清波. 国际维和行动中工程装备保障问题与对策[J]. 工程装备研究, 2012(4):

TAO Xi-gui, JIAO Jin-feng, WENG Qing-bo. The Counter-measure of Engineering Equipment Support on International Peace-keeping Action[J]. Engineering Equipment Research, 2012(4):

(上接第 119 页)

参考文献:

[1] GJB 4.1—83. 舰船电子设备环境试验总则[S].

GJB 4.1—83. Environmental Testing General Ship Electronic Equipment[S].

[2] 李更年, 汤雪志. 舰船仪器结构的抗冲击振动性设计[J]. 舰船防化, 2008(4):40—43.

LI Geng-nian, TANG Xue-zhi. Design of Shock Resistance of Ship Instrument Structure[J]. Warship Chemical Defense, 2008(4):40—43.

[3] 张智永. 移动载体稳定跟踪平台测控技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.

ZHANG Zhi-yong. Study on Measurement and Control Technology of Tracking Mobile Carrier Stable Platform[D]. Changsha: National University of Defense Technology School, 2002.

[4] 王世虹. 舰载天线伺服系统抗摇摆方案研究[J]. 天线技术, 2003(2):47—49.

WANG Shi-hong. Research on the scheme of anti swing of Ship-borne antenna servo system[J]. Antenna Technology, 2003(2):47—49.

[5] 张令弥. 振动测试与动态分析[M]. 南京: 航空工业出版社, 1992.

ZHANG Ling-mi. Vibration Test and Dynamic Analysis[M]. Nanjing: Aviation Industry Publishing Company, 1992.