

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.008

一种轴系及艏部结构振动监测的综合显控设备

邵德立, 蒋川东, 邹佳鑫, 曾 山, 麦东花

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了及时发现和处理轴系及艏部结构状态所引起的异常工况, 设计一套具有高可靠性、高安全性的综合显控设备。通过接线盒将轴系及艏部传感器组与综合显控设备进行电气连接, 实现对轴系及艏部结构振动各信号的监测和存储功能, 同时能实时显示轴系运行状态, 提示运行过程中的异常并反馈日志用于指导调试工作。结果表明: 该设备的功能和性能满足使用要求, 对于综合显控设备的设计、生产和制造具有一定的指导作用。

关键词: 轴系及艏部结构; 信号采集; 综合显控设备

中图分类号: U664.21 **文献标志码:** A

An Integrated Display and Control Equipment for Shafting and Stern Structure Vibration Monitoring

Shao Deli, Jiang Chuandong, Zou Jiaxin, Zeng Shan, Mai Donghua

(Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to find and deal with the abnormal working conditions caused by the shafting and stern structure in time, a set of integrated display and control equipment with high reliability and safety is designed. The shafting and the stern sensor group are electrically connected with the integrated display and control equipment through the junction box, so that the functions of monitoring and storing various signals of shafting and stern structure vibration are realized; and meanwhile, the running state of the shafting can be displayed in real time, the abnormality in the running process is prompted, and a log is fed back for guiding the debugging work. The results show that the function and performance of the equipment meet the requirements of use, which has a certain guiding role for the design, production and manufacture of integrated display and control equipment.

Keywords: shafting and stern structure; signal acquisition; integrated display and control equipment

0 引言

随着经济的不断发展和船舶运输行业的日益重要, 船舶的设计和装备需求也日趋复杂和多样化。轴系及艏部作为船舶的重要组成部分, 在船舶的动力传递、推进方向、速度和操纵性等方面发挥着至关重要的作用^[1-2]。设计综合显控设备, 用于船舶运行状态的监测, 对于提高其稳定性、安全性, 降低航行风险具有重要的意义。

综合显控设备是一种集成了多个功能和显示界面的控制系统, 已被广泛应用在船舶、飞机、电力、工业自动化系统等方面^[3-5]。方航等^[6]为配合某型装备工程的研制, 从产品的功能、设计和制造需求出发, 设计了一台集成显示和控制功能的综合显控箱并进行了整机的试制调试和样机功能性能验证。姜广顺等^[7]针对雷达显控系统修理过程中的诸多问题, 构建了一套专用综合检测设备, 在工厂的装备修理中验证了该设备检测准确、修理高效的性能。

张巩等^[8]设计了一种基于自供电轴系的监测系统, 解决了旋转轴系监测系统中传感器电路外部供电的问题。通过调研可知, 应用于其他场景的类似功能设备已有许多的论文可以参考, 同时已有相关研究人员设计轴系及艏部的监测系统^[9-12], 但针对轴系及艏部结构振动监测的综合显控设备仍然是值得探究的一个方向。针对这一特定场景, 笔者设计一套综合显控设备。

1 系统组成

笔者设计的综合显控设备是轴系及艏部结构振动监测系统的重要组成部分, 主要用于接收轴系及艏部传感器组数据, 实现全工况运行过程中轴系及艏部结构振动状态的实时连续监测、数据存储、状态显示及异常提示等功能。其系统组成如图 1 所示, 采用相同类型的多张卡配置, 用以满足设备对于位移信号、振动加速度信号以及转速信号的监测显示通道数量分别大于等于 13、25 和 1 的技术要求。

收稿日期: 2024-07-12; 修回日期: 2024-08-15

第一作者: 邵德立(1989—), 男, 湖北人, 硕士。

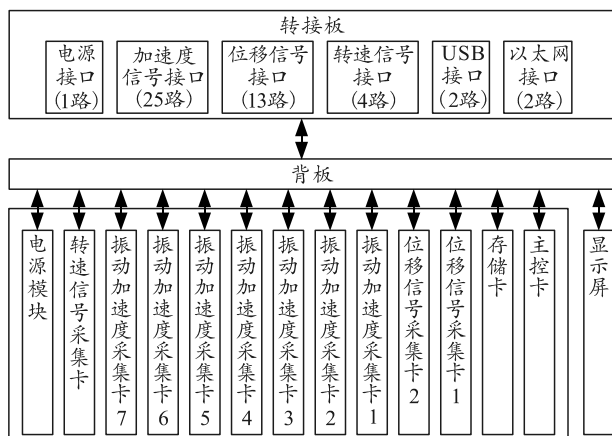


图 1 综合显控设备组成

2 功能设计与硬件实现

2.1 电源模块

电源模块选用定制的 AC/DC 电源, AC 220 V 输入, DC 24 V 输出。电源模块由高可靠、高性能的模块电源搭建而成, 保障了设备宽温工作环境, 同时电源模块采用输入输出电源完全隔离的方式, 并提供过热保护、过流保护、过载保护、过压保护功能。表 1 为本设计电源模块的性能参数。

表 1 电源模块电气性能

参数	规格
输入额定范围/V	AC176~AC264
交变电压频率/Hz	50
工作电压范围/V	AC198~AC242
输出电压/V	DC 24 $\pm$ 1.2
输出电流/A	16.67
效率/%	≥ 85
电压纹波/V	≤ 0.5

2.2 主控卡

笔者采用龙芯 2K1000 处理器^[13]为主控卡核心部件, 其主要优势为供电简单, 功耗小。芯片搭载国产中标麒麟操作系统^[14]作为信号处理平台, 内存采用 4 GB DDR3 内存。龙芯 2K1000 芯片一共有 16 种电源进行供电, 经过优化合并后, 本设计对该芯片的供电种类缩减为 7 种, 按照手册推荐设计上电时序, 确保主板上电正常。

图 2 为本设计主控卡的电源拓扑结构, 采用外部单 5 V 供电, 供电电流约为 4 A。3.3 V、1.5 V、1.1 V 电源由国微公司的开关电源 SM4644 从 5 V 降压产生; 3.3VSB 电源由国微公司的 LDO 电源 SM74401 从 5 V 降压产生; 1.1VSB 电源由国微公司的 LDO 电源 SM74401 从 3.3VSB 降压产生。

功能上, 所设计的板卡利用龙芯 2K1000 的 1 路 PCIE x4 接口连接至国微 SMQ7K325TFFG900 型

FPGA 芯片, FPGA 芯片再扩展出 10 路 LVDS 接口与 10 张采集卡连接, 完成采集卡与主控卡的数据通信; 另外一路 PCIE x4 接口连接至上海威固的 3U VPX 存储卡, 扩展 8 TB 的存储硬盘, 用于存储轴系运行状态; 网络功能通过龙芯 2K1000 芯片的 GMAC 接口与盛科公司的 PHY 芯片 SK21101 相连, 扩展 2 路 10/100M 自适应网络, 连接至网络连接器; 显示功能通过 1 路龙芯 2K1000 的 DVO 接口直接引出至屏幕连接器, 用于对显示功能的扩展; 存储功能扩展通过龙芯 2K1000 的 1 路 SATA2.0 接口连接至上海威固的 SSD 芯片 VGCR20MPB020064W, 用于扩展 64 GB 存储空间, 作为系统硬盘; 2 路 USB2.0 接口通过共模电感及 TVS 管保护后直接引出至调试连接器, 用于对外设的扩展; 调试功能通过龙芯 2K1000 的 1 路 UART 接口引出主板作为调试接口, 芯片选用国微公司的 RS232 收发器芯片 SM3232。主控卡组成及对外连接如图 3 所示。

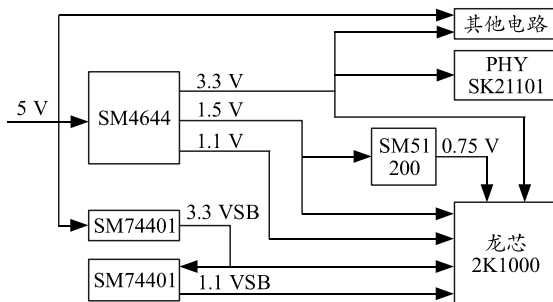


图 2 主控卡的电源拓扑

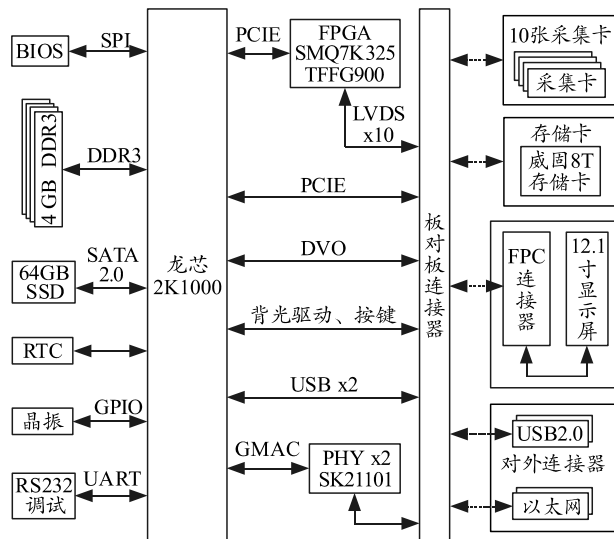


图 3 主控卡组成及对外连接

2.3 位移信号采集卡

横振与纵振位移信号(后文简称位移信号)由电涡流位移传感器^[15](后文简称位移传感器)产生。外部选用的位移传感器为株洲中航科技发展有限公司

ZA21 系列，包含前置器、探头及延伸电缆。在实际使用中，系统连接包括将传感器探头、延伸电缆、前置器以及监测仪表之间进行电气连接，以组成能投入工作的测量系统。

其中，位移信号采集卡的主要功能则是采集位移传感器的输出信号，将采集值转换为位移量，从而判断轴系位移情况，并将相关状态上报显示。图 4 为位移信号采集板卡的功能框图，2 张位移信号采

集卡完全相同。位移信号采集卡以 8 通道切换方式采集数据，通道输入阻抗为 $1\text{ M}\Omega$ ，输入范围 $\pm 10\text{ V}$ ，采用 LVDS 接口实现点对点方式的对外通信，支持输入通道过压保护，隔离方式为模数隔离；主控制器采用深圳国微的 SMQ4VLX25 型 FPGA 芯片，主频高达 400 MHz ；ADC 芯片选用成都华微公司的 HWD7274EAA 型号，分辨率为 12 位；板卡尺寸设计为 3U。

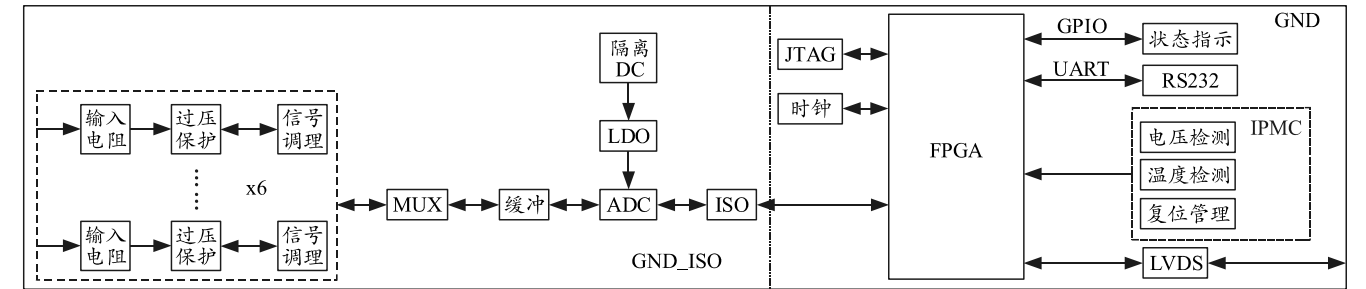


图 4 位移信号采集卡功能

对于每路采集通道，信号输入端设计 1 个 TVS 管，用于静电、浪涌防护，达到对后级电路的保护功能。同时设计了信号调理电路，主要由输入电阻衰减网络、跟随电路、开关切换电路、带通滤波电路及 ADC 驱动电路组成。位移信号通道采集电路设计如图 5 所示。

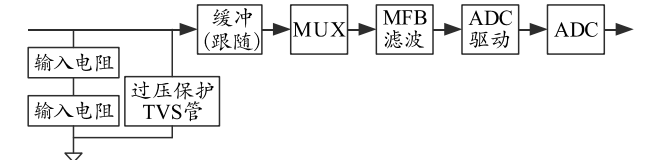


图 5 位移信号采集通道

电阻衰减网络用于实现输入阻抗匹配，将输入信号衰减至 ADC 可接受的范围内；跟随电路实现阻抗转换功能；开关切换电路实现多通道输入切换；带通滤波电路用于消除带外高频和低频噪声；ADC 驱动电路用于驱动后级的 ADC。

2.4 振动加速度信号采集卡

振动加速度信号由 ICP 加速度传感器^[16]产生，ICP 加速度传感器已内置电荷放大器，从而只需要外部采集电荷放大器的输出电压信号即可，大大降低了信号传输的损耗。

振动加速度信号采集卡主要功能则是产生驱动 ICP 传感器工作所需的激励信号，并采集 ICP 传感器的输出电压信号，将采集值转换为加速度物理量，并将相关状态上报显示。7 张振动加速度信号采集卡完全相同，板卡采用位移传感器相同的 FPGA 作为主控制器，主要负责数据采集、与主控板通信、

工程量转换及状态控制。振动加速度信号采集卡功能如图 6 所示。

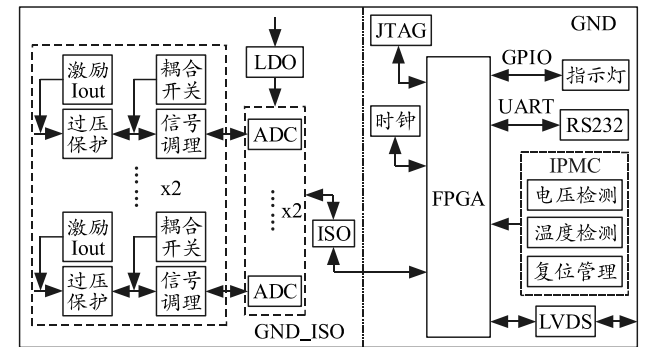


图 6 振动加速度信号采集卡功能

振动加速度采集卡以 4 通道同步方式采集数据，每通道采样率最高为 15.2 kS/s ，输入范围为 $\pm 10\text{ V}$ ，输出激励电流为 $2\sim 10\text{ mA}$ ；ADC 芯片选用型号为成都华微公司的 HWD7734MAI，分辨率为 24 位；对外通信方式、隔离方式、板卡尺寸采用与位移信号采集相同的设计。

此外，对于每路采集通道同样设计了信号调理电路，主要由恒流源电路、信号放大电路、滤波电路、偏置电路、耦合开关电路、ADC 驱动电路几部分组成。振动加速度信号通道采集电路设计如图 7 所示。

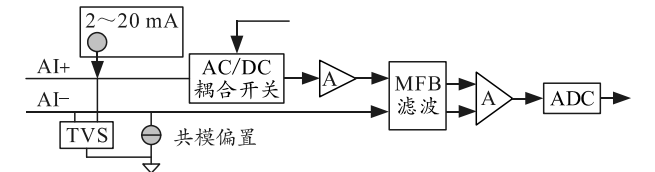


图 7 振动加速度采集通道

恒流源电路提供激励信号,同时针对不同传感器型号提供不同的输出电压;信号放大电路实现增益调节;滤波电路用于带外噪声滤除;偏置电路提供直流偏置,使传感器的输出信号始终为正并在器件接受范围内;耦合开关电路实现直流或交流信号耦合;ADC 驱动电路用于调节输出信号与 ADC 输入匹配。

2.5 转速信号采集卡

扭振信号是轴系及艏部结构中常见的振动信号,其信号的频率通常与旋转轴的转速有关^[17]。为了得到扭振信号的大小设计了转速信号采集卡,扭振信号由转速信号转换得到,转速信号则由转速传感器产生。转速信号采集卡通过采集外部转速传感器产生的矩形波信号,经过分析得到输出信号频率,来确定转过的角度或转动圈数,计算得到转速,从而得到扭振信号的大小。

转速信号采集卡采用同样的 FPGA 作为主控制器,主要负责数据采集、与主控板通信、工程量转换及状态控制。转速信号采集卡功能如图 8 所示。

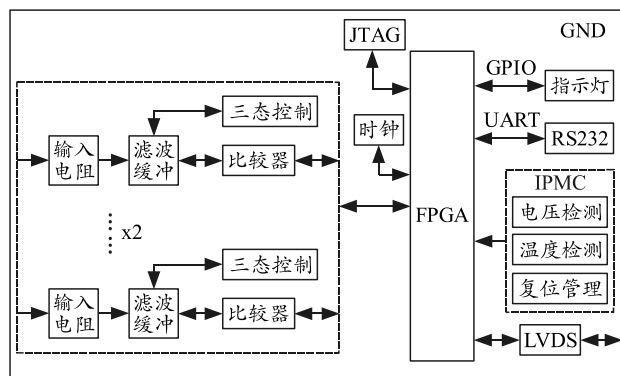


图 8 转速信号采集卡功能

转速信号采集卡采集 4 通道 DI 数据,每通道可配置启用和禁用;同时,为计算输入矩形波信号的频率,设计采用频率计数法实现,具体则选用比较器测量输入电平信号,FPGA 通过判断比较器输出电平变化产生的数字编码来统计输入信号频率。

2.6 存储卡,背板及转接板

存储卡主要用于外扩 8 TB 数据存储空间,板卡采用上海威固的 3U VPX 功能板卡,支持掉电保护功能,支持一键智能销毁功能。

背板在设备中为不易更换组件,主要用于完成功能板卡供电及板卡间的信号连接。本文中设备对外连接器与背板连接,采用无缆化设计形式,设计转接板进行对外信号连接。

3 系统软件设计

综合显控设备软件划分为应用软件、操作系统及各模块底层驱动软件 3 个层级。应用软件主要提供人机交互接口、数据计算、逻辑控制等功能;操作系统是底层驱动与应用软件间的接口,主要提供软硬件资源的管理、程序的控制;底层驱动包括主控卡的底层驱动、存储卡底层驱动及采集卡底层驱动,操作系统及应用软件都运行在主控卡上,同时主控卡用于接收采集卡发来的数据,完成轴系运行状态的显示,并且在轴系运行状态异常时进行提示;存储卡通过 PCIE 接口与主控卡通信,采集卡通过自定义 LVDS 接口与主控卡通信。图 9 为软件总体架构。

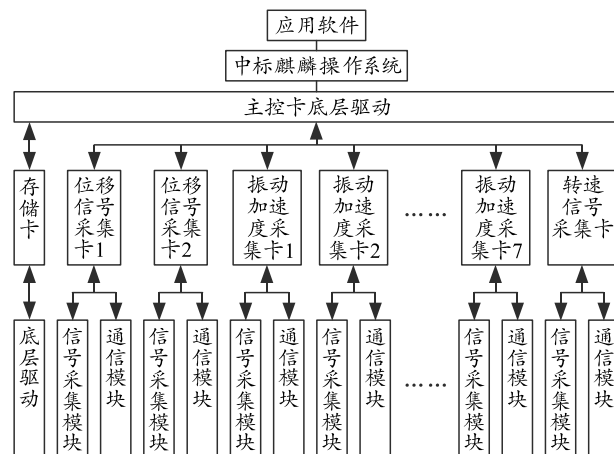


图 9 综合显控设备软件架构

4 机箱结构设计

4.1 外形设计

本文中设备的整机采用定制的一体化加固机箱,机箱后面板安装减振器,下底板出线。箱内功能板卡采用 3U 可插拔设计,显示屏设计为铰链结构,可左右进行翻盖。

如图 10 所示,为机箱结构,将显示屏所在前面板翻到左边后,即可对内部功能板卡进行插拔更换。机箱采用无缆化设计,内部分为 3 个隔层。最上方隔层用于放置滤波器和电源模块,中间隔层放置采集卡、存储卡和主控卡等功能板卡,最下方隔层放置对外转接板,功能板卡间通过背板进行信号传输与通信。系统组件中采集卡、存储卡、主控卡均能实现快速的拆卸更换。

4.2 散热设计

整机采用导冷的散热方式,整个机箱作为导热散热载体,机箱表面采用鳍片设计,增加机箱散热

面积。主控卡和电源模块为主要发热源，主控卡在腔体设计时增加导热凸台，帮助散热；同时对设备机箱进行热分析，电源模块靠机箱侧壁安装，及时将热量传导至箱体。

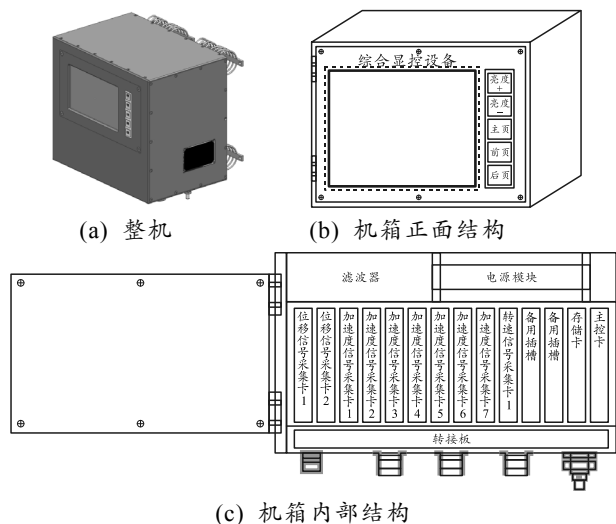


图10 机箱结构

5 结论

笔者遵循模块化、系列化、标准化的设计思想，采用成熟的工艺设计了一套用于轴系及艏部结构振动监测的综合显控设备，包含了电源模块、位移信号采集卡、加速度信号采集卡、转速信号采集卡、存储卡、主控卡、背板转接板和显示屏等组件。在满足设备功能和相关技术指标的基础上，考虑了元器件的国产化设计，质量等级均为工业级及以上，考虑了设备的结构和散热问题，提高了设备在应用中的环境适应性与安全性，为实际现场应用提供了质量保障，对于同类型的综合显控设备具有一定的设计参考价值。

参考文献：

[1] 徐野,熊鹰,黄政. 船舶桨轴舵及船体艏部耦合振动噪声数值研究[J]. 推进技术, 2020, 41(4): 942-950.
[2] 黄津津,方斌,杨勇. 船舶推进轴系扭转振动概述[J]. 船舶工程, 2023, 45(2): 4-15.

[3] 张扬,张丽,姚传亮. 某型飞机显控设备通电老炼检测系统的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4): 173-177.
[4] 汪赵中. 三维显控系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
[5] 聂华,张志远,范则阳,等. 一种信息高度集成化的电力综合显控台[P]. 中国专利: CN113659710A, 2021.11.16.
[6] 方航,向宇,严涛. 综合显控箱电路设计与技术验证[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(7): 142-147.
[7] 姜广顺,伏新卯,崔军峰,等. 基于PXI的某雷达显控系统综合检测设备[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(8): 123-126.
[8] 张巩,刘学广,谢政宇,等. 自供电旋转轴系监测系统设计[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2021, 22(2): 260-266.
[9] 王延之,吴军,陈作懿,等. 基于边缘计算的船舶轴系智能监测技术[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(8): 287-291.
[10] 付攀. 船舶推进轴系运行状态监测系统设计及实验测试[J]. 机械管理开发, 2022, 37(8): 208-209, 212.
[11] 黄维鑫,刘宏,林春,等. 一种用于航标船舶艏轴实时温度监测的装置[P]. 中国专利: CN216309217U, 2022.04.15.
[12] 刘夏青,温小飞,张怀越,等. 船舶轴系振动教学演示实验台架设计与实验分析[J]. 大学物理实验, 2013(5): 34-37.
[13] 王怀斌,梁争争,吕嫻嫻. 龙芯 2K1000 应用验证方法探究及验证模块设计[J]. 航空计算技术, 2023, 53(2): 96-100.
[14] 吴映铮,朱鹤骏,孙亮清. 基于中标麒麟操作系统的船舶电力监控系统设计开发[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2021, 44(4): 13-18.
[15] 孙艳秋. 电涡流传感器的技术优势及应用[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(3): 99-100.
[16] 赵双双. 微光学集成的高精度 MOEMS 加速度传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
[17] 冯晓辉. 船舶轴系扭振信号分析及应变测量系统开发[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.