doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240179

嵌入式轴系动态扭矩测量系统设计与研究

林建勇，高大湧，魏国崇，姚红良
（东北大学 机械工程与自动化学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：针对旋转机械轴系动态扭矩测量过程中存在的测试设备安装空间有限、测点单一及现场布线困难等问题，本文结合电阻应变测量技术与嵌入式系统，设计了一套无线动态扭矩测量系统. 首先，设计了应变电桥电路与信号放大电路，以实现应变信号的高效转换；其次，对系统外壳装置进行了结构设计与强度校核；然后，基于Keil 5平台开发STM32程序，实现了测量数据的无线传输及高速大容量存储；最后，在转子试验平台上进行验证，并将试验结果与AMESim仿真结果进行对比分析. 结果表明，该系统的测量误差小于3%，在900与1 500 r/min转速下的均方根误差分别为1. 50%和2. 34%. 验证了该系统的测量精度与可靠性，为旋转机械扭矩监测提供了一种有效的解决方案.

关 键 词：动态扭矩；应变检测；嵌入式；无线传输；离线存储
中图分类号：TH 17 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026（2026）02-0074-08

Design and Research of Embedded Dynamic Torque Measurement System for Shafting

LIN Jian-yong, *GAO Da-yong*, *WEI Guo-chong*, *YAO Hong-liang*
（School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YAO Hong-liang, E-mail: hlyao@mail.neu.edu.cn）

Abstract: To address the problems encountered in dynamic torque measurement of rotating machinery shafting, such as limited installation space of measuring devices, single measurement points, and difficulties in on-site wiring, a wireless dynamic torque measurement system was designed by integrating resistance strain measurement technology with an embedded system. First, a strain bridge circuit and a signal amplification circuit were designed to achieve efficient conversion of strain signals. Second, the structural design of the system housing and overall structure was completed, and strength verification was carried out. Then, based on the Keil 5 platform, an STM32 program was developed to realize wireless transmission, as well as high-speed and large-capacity data storage. Finally, experimental validation was conducted on a rotor test platform, and the experimental results were compared with AMESim simulation results. The results indicate that the measurement error of the proposed system is less than 3%. Under operating conditions of 900 and 1 500 r/min, the root mean square errors are 1. 50% and 2. 34%, respectively, verifying the measurement accuracy and reliability of the system. This study provides an effective solution for torque monitoring of rotating machinery.

Key words: dynamic torque; strain detection; embedded; wireless transmission; offline storage

在工程测试领域，旋转轴的动态测量是一项关键的测试技术[1-2]. 轴系的动态扭矩或应变可以反映出轴系传动过程中的材料特性、负载波动以及潜在的故障征兆等信息，通过监测转轴的动态扭矩可以实现对设备的故障诊断与寿命预警[3-4]. 因此，实现对转轴的动态扭矩测量，对诊断和监测旋转机械的运动特性、故障预警以及延长设备的使用寿命具有重要的工程意义[5-6].

收稿日期：2024-10-09
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52475094）.
作者简介：林建勇（1999—），男，山东冠县人，东北大学博士研究生.
通信作者：姚红良，E-mail：hlyao@mail.neu.edu.cn.

随着科技进步,汽车或特种车辆的传动系统向着高集成度、高转速的趋势发展,这也使轴系扭矩的测量空间越来越小.国内外学者针对动态扭矩测量问题进行了大量的研究[7-8].Chen 等[9]提出了一种利用电阻应变计和电容光栅耦合获得旋转轴扭矩的测量方法,电阻应变计获取测量信息,电容光栅传递信息,并通过仿真与试验验证了电阻电容耦合测试方法的可行性.Capelle 等[10]基于物理模型与测量,提出利用虚拟扭矩传感器获取测量数据的方法.Kakaley 等[11]介绍了一种非接触式可变磁阻(VR)扭矩测试方法,通过扭矩和轴向处理(TAP)算法从传感器信号中提取轴向平移,并利用轴向平移等信息得到转轴扭矩.刘翔等[12]提出了一种基于相位差原理的旋转轴扭矩测量方法,并通过理论分析和实验测试对该方法的可行性进行了验证.然而,随着集成度越来越高,车辆动力总成、发电机组等传动系统的测试空间越来越小,传统电阻电容或磁阻式测量方法无法在狭小空间中使用,且扭矩测试中的传动轴断轴测试有一定难度,也无法采用相位差的测试方法.

本文针对车辆动力总成、发电机组等狭小空间的传动系统扭矩测量过程中存在的测量设备安装空间受限、布线繁琐、测点单一等问题,设计基于电阻应变技术和嵌入式系统的动态扭矩测量系统,该系统具有多点位、分布式、离线以及无线测量等功能,可在不断轴的情况下实现动态扭矩的测量.

1　测量系统原理与总体设计

1.1　系统测量原理

电阻应变片的工作原理是电阻应变效应,能够将被测物体表面的微小形变转换为电阻的变化,测量系统通过信号调理电路将电阻信号转化成电压信号进行采集与分析[13-14].圆轴在旋转时受到扭矩的作用,轴表面会产生微小的扭转变形与应力,并且轴受到的主应力集中在与轴线成45°的方向,如图1所示,应变片1承受主压应力$\boldsymbol{\sigma}_1$,应变片2承受主拉应力$\boldsymbol{\sigma}_2$,将电阻应变片沿与轴线成45°的方向进行粘贴,然后接入惠斯通电桥电路,当圆轴受到扭矩的作用时,电桥的输出即可转换为扭矩的变化[15].

根据材料力学可得,当圆轴受到扭矩作用时,主压应力$\boldsymbol{\sigma}_1$和主拉应力$\boldsymbol{\sigma}_2$的绝对值相等,符号相反,其绝对值等于圆轴横截面上的最大切应力$\tau_{\max}$.

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{\sigma}_1=-\boldsymbol{\sigma}_2,\\&\left|\boldsymbol{\sigma}_1\right|=\left|\boldsymbol{\sigma}_2\right|=\tau_{\max}.\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

利用电阻应变片,可测量出此处的应变,进而根据胡克定律,得到最大切应力为

$$\tau_{\max}=\left|\boldsymbol{\sigma}_1\right|=\left|\boldsymbol{\sigma}_2\right|=\frac{E\varepsilon}{1+\mu}.\tag{2}$$

式中:μ为材料的泊松比;ε为轴表面应变;E为材料的弹性模量.

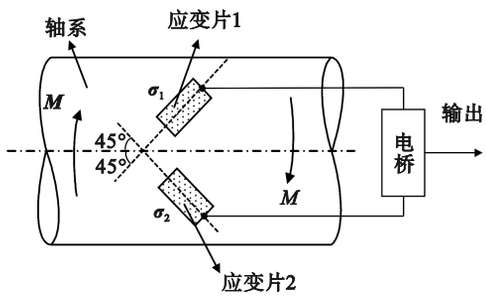


图1　电阻应变扭矩测量原理

Fig. 1　Principle of resistance strain torque measurement

引入抗扭截面模量W_{p},则扭矩值为

$$M=\tau_{\max}W_{\mathrm{p}}=\frac{E\varepsilon}{1+\mu}W_{\mathrm{p}}.\tag{3}$$

根据金属丝的电阻应变效应,电阻与应变的对应关系为

$$\frac{\Delta R}{R}=(1+2\mu+\lambda E)\varepsilon.\tag{4}$$

式中:R为应变片阻值;λ为压阻系数.

结合式(1)~式(4)可得

$$M=\frac{W_{\mathrm{p}}E}{(1+\mu)(1+2\mu+\lambda E)}\cdot\frac{\Delta R}{R}.\tag{5}$$

根据式(5)可知,圆轴扭矩与应变片阻值的变化量成正比关系,故可通过测量轴表面应变实现动态扭矩的测量.

1.2　系统总体设计

动态扭矩测量系统分为下位机与上位机两部分,下位机的功能是进行动态扭矩的数据采集与发送,主控芯片选用STM32F407VET6,主要外设包括数据采集模块、模数转换(AD)模块、缓存与发送模块等;上位机主要实现数据的接收与分析.整体设计如图2所示.

测量系统具有离线存储与无线测量两种工作模式.首先,电阻应变片采集转轴在旋转过程中的微小应变;然后,采集模块将电阻应变信号转换为单片机能够识别的电压信号,该信号经过

模数转换与量纲转换后,采用直接存储器访问(DMA)方式传输至芯片的随机存取存储器(RAM);最后,将数据离线存储至安全数字存储(SD)卡或者通过低功耗蓝牙(BLE)无线模块传输到上位机进行分析.

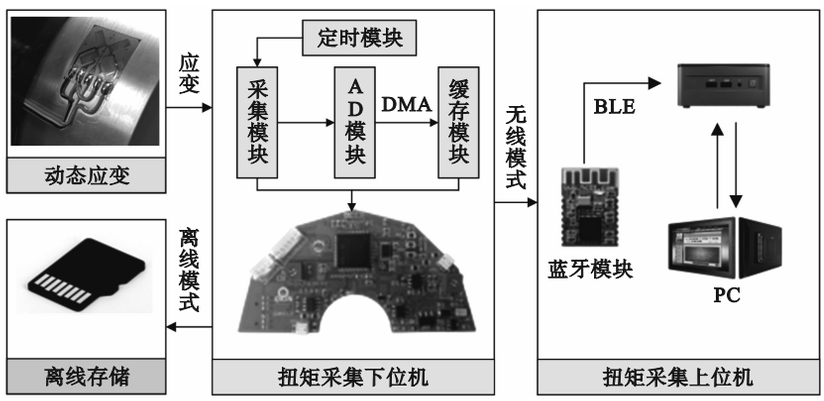


图2 动态扭矩测量系统

Fig. 2 Dynamic torque measurement system

2 系统硬件与结构设计

2.1 采集电路设计

测量系统的采集电路主要包括桥路转换电路、信号放大电路以及滤波电路,如图3所示.桥路转换电路的作用是将电阻应变片的电阻变化转换为电压变化;信号放大电路采用双运算放大器芯片(TLV9062)对电桥输出的微弱电压信号进行放大,使其转换为微控制器(MCU)可识别的电压信号范围;经过电阻-电容(RC)滤波电路进行信号调理,最后由嵌入式内置的AD模块完成数据采集.

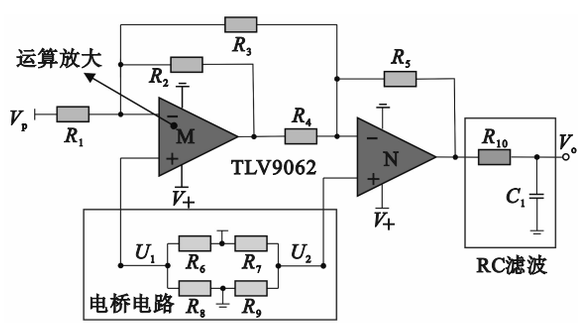


图3 测量系统采集电路

Fig. 3 Measurement system acquisition circuit

在图3的电桥电路中,R_1~R_5为运放电阻,R_6,R_7,R_8为350 Ω标准电阻,R_9为应变片电阻,R_{10}为滤波电阻,C_1为滤波电容,V_p为输入调平电压,V_o为系统输出电压,U_1和U_2为电桥输出电压,M为1级运算放大器,N为2级运算放大器.当轴系受到扭矩作用时,桥臂电阻会发生变化,导致电桥处于不平衡状态,此时电桥两端输出的电压差ΔU为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{V_{ex}}{2} K_s \varepsilon. \tag{6}$$

式中:K_s为电阻丝的灵敏系数;V_{ex}为电桥激励电压.

测量系统选择TLV9062芯片作为运算放大芯片,该芯片具有2个独立的运放通道,具备较低的噪声密度和较高的增益带宽,适用于高速信号的运算处理.使用该芯片设计2级差分运算放大电路,该电路具有较高的共模抑制比和增益调节机制.在设计过程中,需保证运放电阻R_1=R_4,R_2=R_5;电阻R_3用于设置增益系数.根据运放的虚短、虚断以及叠加原理,得到运放电路的输出电压V_o为

$$V_o = V_p + (U_2 - U_1)\left(1 + \frac{R_1}{R_2} + 2\frac{R_5}{R_3}\right). \tag{7}$$

引入电路增益系数G,其表达式为

$$G = 1 + \frac{R_1}{R_2} + 2\frac{R_5}{R_3}. \tag{8}$$

结合式(4)和式(7),可推导出输出电压与应变电阻变化呈线性关系,进而可根据电压变化反推出应变的变化.

2.2 系统结构设计

系统结构设计主要包括印制电路板(PCB)的外形与布局设计以及机械保护装置的结构设计.为使测量系统贴合轴系旋转过程中的圆截面,采用半圆弧型PCB板设计,如图4所示.该设计能够有效贴合轴系表面的曲线特征,提高系统与机械外壳保护装置的匹配性与集成性.

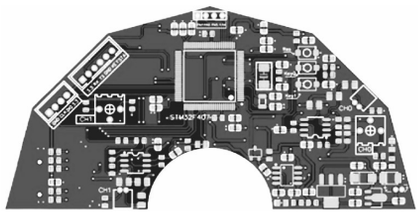


图4　印刷电路板形状设计

Fig. 4　Shape design of printed circuit board

外壳保护结构采用2个半圆装置相互扣合的设计思路,如图5所示.

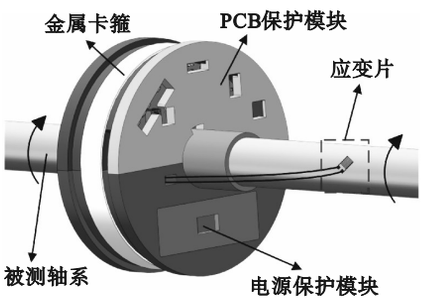


图5　测量系统外壳保护装置

Fig. 5　Measuring system housing protection device

装置主要由PCB保护模块与电源保护模块组成,二者之间通过榫卯结构连接并通过金属卡箍进行固定,可实现装置的快速拆卸与安装.接线端口均采用模块化设计,方便下载程序与调试,提高了电路板的测量稳定性.

2.3　机械结构强度分析

在轴系高速旋转的工况下,离心力会对测量系统的传感器、电子元件和机械结构产生较大的影响,甚至可能造成结构性破坏.因此对系统结构进行离心力强度校核,以验证其在高速旋转工况下能否保持结构的完整性与可靠性.使用ANSYS Workbench工具对系统结构进行有限元强度分析,将SolidWorks创建的三维模型导入Workbench中,并设置测量系统材料为聚乳酸(PLA),金属卡箍材料为结构钢,PCB保护装置与电源保护装置采用固定接触,并与金属卡箍建立固定连接,采用自由网格划分,将网格尺寸设置为1 mm,单元数为249 314,节点数为475 361.边界条件设置为圆柱形支撑,约束轴向和切向自由度,释放径向自由度,仿真极限转速为8 000 r/min.测量系统和卡箍的仿真结果分别如图6和图7所示.

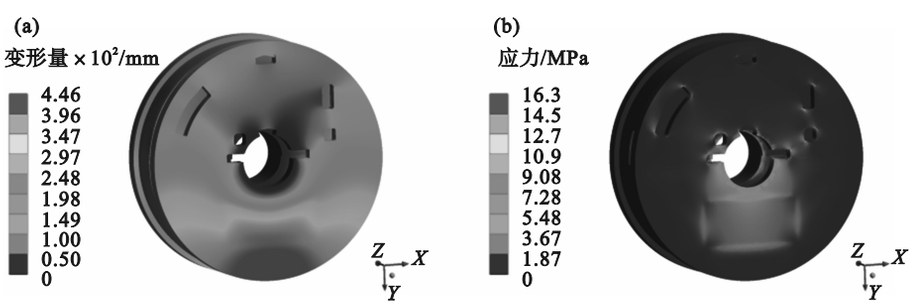


图6　机械外壳有限元仿真结果

Fig. 6　Finite element simulation results of mechanical housing

(a)—外壳结构变形分布;(b)—外壳结构应力分布.

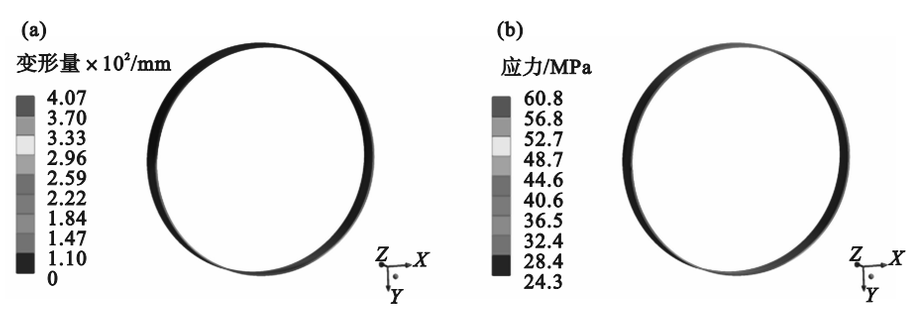


图7　金属卡箍有限元仿真结果

Fig. 7　Finite element simulation results of metal clamp

(a)—卡箍结构变形量分布;(b)—卡箍结构应力分布.

根据有限元仿真结果可得,外壳最大变形量为0.044 6 mm,集中于外壳边缘;最大等效应力为16.3 MPa.常见PLA材料的抗拉强度约为46.6 MPa,外壳结构的最小安全系数为2.86.金属卡箍最大变形量为0.040 7 mm,最大等效应力为60.8 MPa.卡箍采用的结构钢材料的屈服强度为250 MPa,

金属卡箍的安全系数为4.11.因此,测量系统外壳保护装置与金属卡箍均满足强度设计要求.

3 系统软件程序设计

3.1 主程序设计

系统的软件程序主要用于实现应变信号的采集与处理,并将测量数据离线存储至SD卡或通过无线方式传输至上位机进行分析.针对STM32微控制器的程序设计,采用Keil 5集成开发环境进行编程.首先,对系统进行初始化配置,包括系统时钟、定时器、通用输入输出端口(GPIO)以及外部中断等硬件资源的初始化;然后,配置模数转换模块的采集程序,并配合直接存储器访问的方式,实现应变信号的高速采集与传输,将采集数据存入微控制器的静态随机存取存储器(SRAM)中;最后,离线存储部分采用安全数字输入输出接口(SDIO)结合文件分配表(FAT)文件系统对SD卡进行数据写入,同时通过串行通信接口配合蓝牙无线模块实现测量数据的远程传输.系统的主程序流程如图8所示.

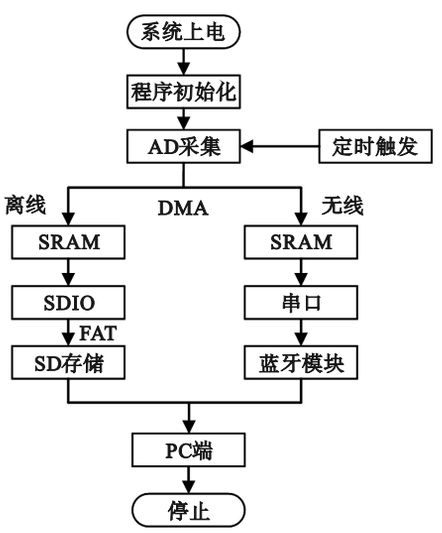


图8 系统主程序流程图

Fig. 8 Flowchart of the system's main program

3.2 高速存储程序设计

离线存储在数据采集过程中能够有效保证测量数据的完整性与独立性,具有重要的工程应用意义.在系统的多通道数据采集中,会产生大量的采集数据.为实现采集数据的可靠存储,本文将微控制器的SDIO接口与FAT文件系统相结合,并引入乒乓缓存算法机制,实现了基于SD卡的高速、大容量数据存储功能,从而保证了数据传输过程的实时性、连续性与完整性.

SDIO接口具有传输速率高、稳定性好的特点,适用于嵌入式系统中大规模数据的高速存储需求.为进一步提高系统的数据吞吐能力、减小存储延迟并降低数据丢失风险,本文采用乒乓缓存算法机制.该机制通过设置2个大小相等的缓冲区A(Buf A)和缓冲区B(Buf B),交替完成数据采集与存储操作.在缓冲区A进行数据采集与接收的同时,缓冲区B执行数据写入SD卡的操作,从而实现数据处理的并行化.乒乓缓存机制流程如图9所示.首先,初始化Buf A和Buf B两个缓存区;然后,设置缓冲标志位(Flag)用于指示当前工作缓冲区;最后,采集数据优先写入Buf A,当Buf A写满后,系统自动切换至Buf B继续写入,同时将Buf A中的数据写入SD卡;当Buf B写满后,再切换回Buf A.通过上述二者之间的交替切换方式,实现数据采集与存储过程的并行处理,提高系统的实时性与整体数据处理效率.

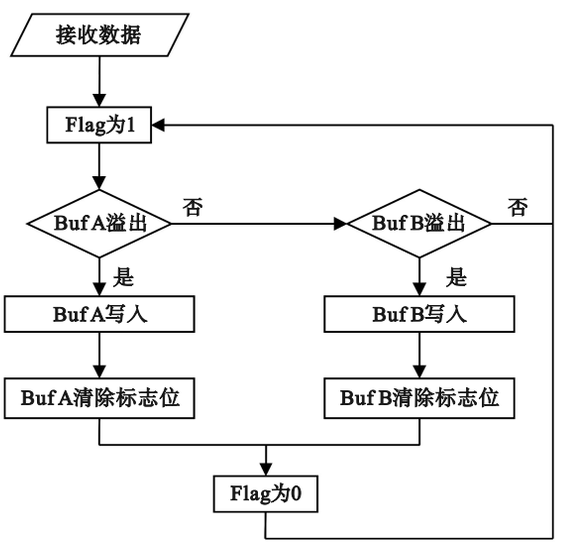


图9 乒乓缓存机制流程图

Fig. 9 Flowchart of ping-pong buffering mechanism

3.3 无线传输程序设计

无线传输具有实时性强、适合动态工况的特点.为减小测量过程中的布线难度和安装复杂性,系统采用蓝牙无线模块进行无线数据传输,该模块具有低功耗、易集成的特点,并支持串口透传功能.在串口端口配置文件(SPP)模式下,传输速率可达60 kB/s,满足实时传输的要求.在测量过程中,首先将蓝牙无线模块与上位机进行配对,并设置串口波特率、字长、奇偶校验等参数;然后STM32将采集数据通过串口通信的方式发送至蓝牙无线模块;最后蓝牙无线模块将数据发送至上位机进行处理与分析,其数据传输流程如图10所示.

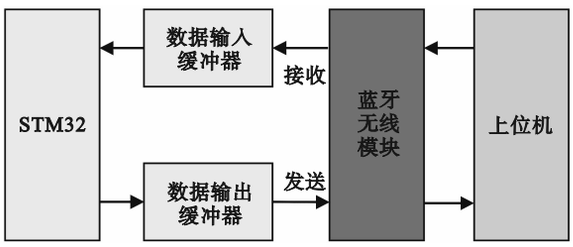


图 10　无线数据传输流程

Fig. 10　Wireless data transmission flow

4　动态扭矩仿真与测量试验

4.1　试验方案设计

动态扭矩测量方案如图 11 所示,测量平台主要由驱动电机、测量系统、扭矩激励装置、被测轴系、PC端等部分组成.驱动电机为调频电机,可提供不同的旋转速度,为系统提供稳定的转速;测量系统用于实时监测和测量转轴的动态扭矩,并将数据离线保存至SD卡存储设备或无线传输至PC端进行分析;扭矩激励采用偏心转子的形式,该装置安装在圆轴后端并绕圆轴旋转,为转轴提供周期性变化的动态扭矩;被测轴系通过3个轴承座与平台连接.试验平台的被测轴系与驱动电机以及扭矩激励转子之间采用联轴器进行连接,动态扭矩测量系统通过榫卯结构相互扣合连接,利用金属卡箍进行固定.测量系统采用模块化设计,使用2个质量相同的半圆结构组成,在测量前无需进行动平衡处理与布线操作,安装与拆卸快捷方便,较大程度上提高了测试效率.

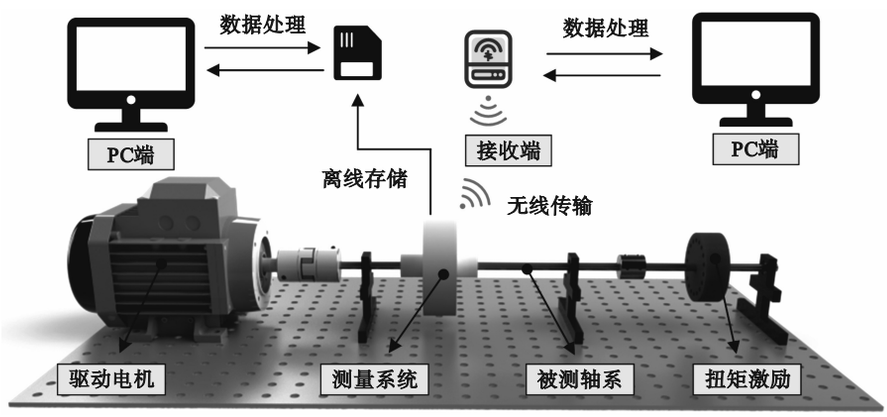


图 11　动态扭矩测量系统

Fig. 11　Dynamic torque measurement system

动态扭矩测量与仿真验证的整体方案如下:首先,利用MATLAB软件对不平衡块产生的扭矩激励进行仿真分析,并采用工程系统仿真软件AMESim建立转子试验装置的动力学模型;随后,将仿真所得扭矩激励输入到转子试验平台动力学模型,得到旋转轴在不同转速下的动态扭矩;最后,搭建转子动态扭矩试验平台,利用设计的测量系统对旋转轴扭矩波动进行测试,并将试验结果与仿真结果进行对比分析,验证系统的准确性与可靠性.

4.2　AMESim轴系仿真

采用MATLAB和AMESim软件进行试验平台的转子动力学仿真.使用MATLAB软件建立不平衡装置的数学模型,并仿真得到作用于轴系的扭矩激励,计算不平衡装置产生的离心力;该离心力由不平衡块的偏心质量在旋转过程中的离心加速度产生,其大小为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}=m\,\boldsymbol{\omega}^{2}\,r. \tag{9}$$

式中:m为不平衡块的质量;$\boldsymbol{\omega}$为转轴的角速度;r为偏心距.

离心力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}$作用在偏心距$r$上会产生扭矩激励$T(t)$,该激励是时间$t$的函数,对于稳定的旋转系统,扭矩激励表现为1个周期性变化的函数,该函数表示为

$$T(t)=m\cdot r^{2}\cdot\boldsymbol{\omega}^{2}\sin(\boldsymbol{\omega}t+\varphi). \tag{10}$$

式中,φ为初始相位.

式(10)表明,扭矩激励与不平衡块的质量、偏心距以及转轴的旋转频率相关,利用MATLAB软件得到不同旋转速度下的扭矩,并将其作为激励输入至AMESim软件进行分析.使用AMESim建立试验平台的动力学模型,依次完成章图模式、子模型模式、参数模式设置,最终在运行模式下仿真得到动态扭矩信号.

4.3　试验测试与分析

根据图11的动态扭矩试验方案搭建转子试验平台,该试验平台主要由调频电机、联轴器、支

撑轴承、应变片、测量系统以及扭矩激励装置组成.在安装过程中,保证电机输出轴、转轴、扭矩激励装置具有较好的对中性,试验平台如图12所示.应变片安装质量的好坏直接影响测量结果的精确性.首先对工件表面进行打磨处理,然后将应变片沿与轴线成45°的方向粘贴并保持固化,最后检查安装后的引线与应变片,保证应变片与转轴之间没有气泡、翘边以及脱胶现象.安装好应变片后,将测量系统安装在旋转轴上,并利用金属卡箍固定,开启测量系统的离线采集或无线传输模式.

使用变频器调节电机工作频率,依次将电机频率调节至5~40 Hz,试验平台中的不平衡质量块提供周期性变化的扭矩激励,去除扭矩中的直流分量,关注动态扭矩激励引起的扭矩与轴系应变波动,得到不同转速情况下的应变信号,并将该应变信号转换成扭矩信号,得到不同转速下的动态扭矩波动.选取转速为900,1 500 r/min的工况,将时域信号与频域信号的测试结果与AMESim仿真结果进行对比,结果分别如图13和图14所示.

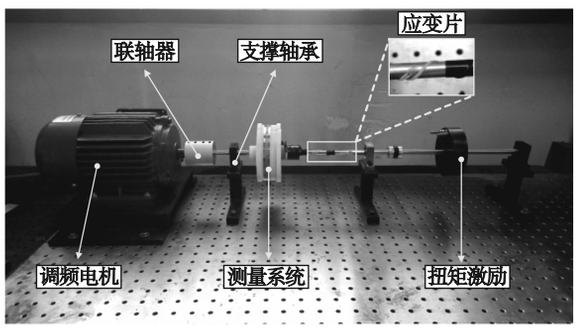


图12 动态扭矩测量试验平台

Fig. 12 Test platform for dynamic torque measurement

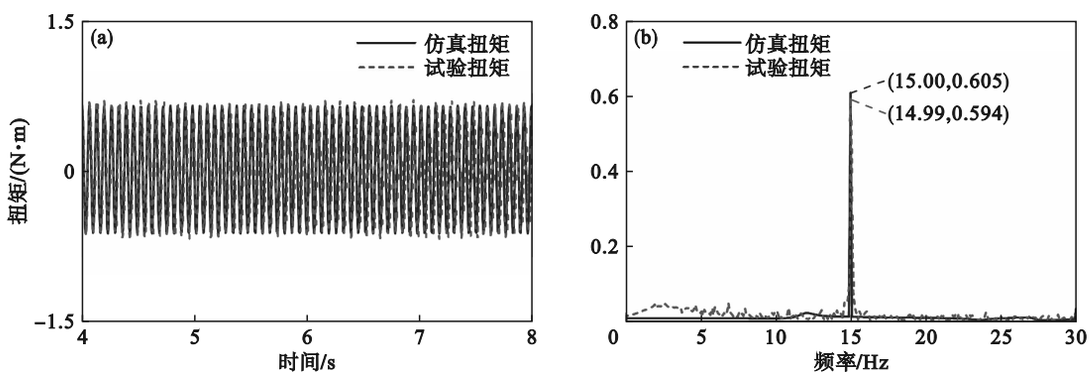


图13 电机转速为900 r/min的试验结果对比

Fig. 13 Comparison of test results at motor speed of 900 r/min

(a)—时域信号对比;(b)—频域信号对比.

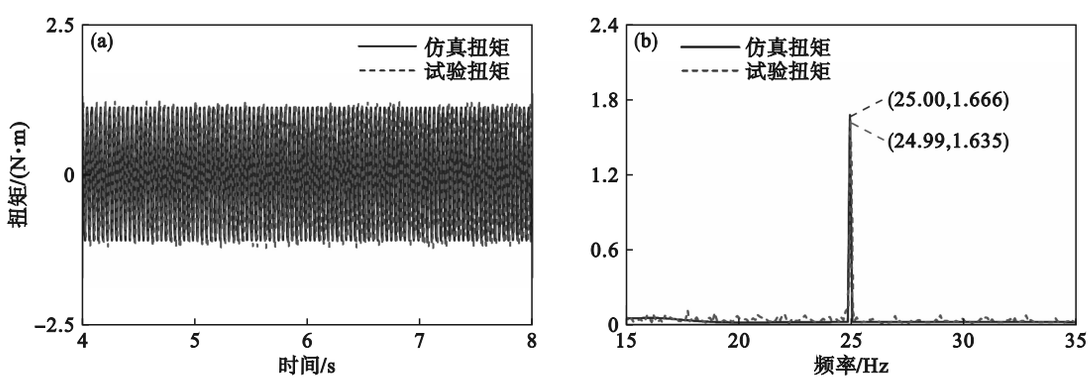


图14 电机转速为1 500 r/min的试验结果对比

Fig. 14 Comparison of test results at motor speed of 1 500 r/min

(a)—时域信号对比;(b)—频域信号对比.

将图13与图14的时域测量结果进行对比,可知测量系统采集的动态扭矩与AMESim仿真得到的扭矩变化趋势基本一致.将测量的时域数据平均分为25组,并计算每组数据的平均相对误差,结果如图15所示.系统整体测量相对误差小于3%,转速为900和1 500 r/min时的均方根误差分别为1.50%和2.34%.对时域数据进行傅里叶变换,得到的频域信息与仿真结果具有良好的一致性.综合对比发现,嵌入式扭矩测量系统可有效测量轴系动态扭矩变化.

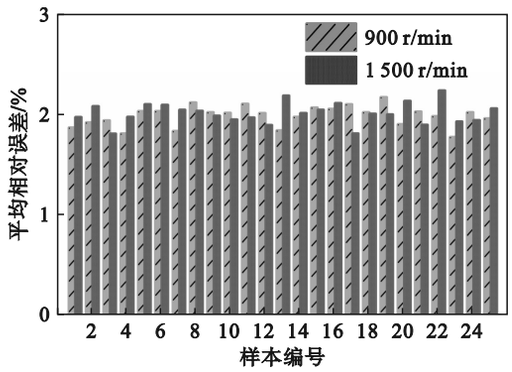


图 15　平均相对误差统计

Fig. 15　Mean relative error statistics

5　结　　论

(1)设计测量系统的硬件电路与机械结构,实现应变信号的稳定采集与放大,并通过强度校核保证系统在旋转工况下的结构安全性.

(2)设计系统软件,实现测量数据的无线传输与大容量存储功能,系统支持 32 GB 外部存储,能够满足多工况下的动态扭矩测量需求.

(3)通过转子试验平台对系统进行验证,并与 AMESim 仿真结果进行比较,该系统测量误差小于 3%,在 900,1 500 r/min 转速下的均方根误差分别为 1.50% 和 2.34%,验证了系统的测量精度与可靠性.

参考文献:

[1] Jweeg M J, Alnomani S N, Mohammad S K. Dynamic analysis of a rotating stepped shaft with and without defects [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 671(1): 012004.

[2] Zaitsev I, Bereznychenko V, Bajaj M, et al. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators [J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1634.

[3] Zhou P, Chen S Q, He Q B, et al. Rotating machinery fault-induced vibration signal modulation effects: a review with mechanisms, extraction methods and applications for diagnosis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 200: 110489.

[4] Wang Z L, Shi D W, Xu Y D, et al. Early rolling bearing fault diagnosis in induction motors based on on-rotor sensing vibrations [J]. *Measurement*, 2023, 222: 113614.

[5] 王成, 毛飞鸿, 侯威, 等. 基于动态扭矩测试的综合传动系统主轴低周疲劳寿命预测与验证[J]. 兵工学报, 2020, 41(7): 1262−1269.
(Wang Cheng, Mao Fei-hong, Hou Wei, et al. Low-cycle fatigue life prediction and validation of main shaft of power-shift steering transmission based on dynamic torque measurement [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(7), 1262−1269.)

[6] Tama B A, Vania M, Lee S, et al. Recent advances in the application of deep learning for fault diagnosis of rotating machinery using vibration signals [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(5): 4667−4709.

[7] Ge L F, Zhong J X, Huang J L, et al. A novel model predictive torque control of SRMs with low measurement effort [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(4): 3561−3570.

[8] Xia Z K, Fang G L, Xiao D X, et al. An online torque sharing function method involving current dynamics for switched reluctance motor drives [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(1): 534−548.

[9] Chen C X, Ma T H, Jin H, et al. Torque and rotational speed sensor based on resistance and capacitive grating for rotational shaft of mechanical systems [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106737.

[10] Cappelle C, Cattebeke M, Bosmans J, et al. Sensor selection for cost-effective virtual torque measurements on a wind turbine gearbox [J]. *Forschung Im Ingenieurwesen-Engineering Research*, 2021, 85(2): 325−334.

[11] Kakaley D E, Altieri R E, Buckner G D. Non-contacting measurement of torque and axial translation in high-speed rotating shafts [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138: 106520.

[12] 刘翔, 黄文平, 牛慧萍, 等. 基于相位差的转轴扭矩测量中的零位识别与处理[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(4): 49−54.
(Liu Xiang, Huang Wen-ping, Niu Hui-ping, et al. A method for zero point identifying and processing based on phase difference in the measurement of shaft torque [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2018, 38(4): 49−54.)

[13] Liu B K, Pang J, Tu X G, et al. Three components strain-gauge type aircraft surface friction resistance sensor: design, manufacturing, and calibration [J]. *Measurement*, 2023, 218: 113165.

[14] Bose A K, Zhang X Z, Maddipatla D, et al. Screen-printed strain gauge for micro-strain detection applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 12652−12660.

[15] Iriarte X, Aginaga J, Gainza G, et al. Optimal strain-gauge placement for mechanical load estimation in circular cross-section shafts [J]. *Measurement*, 2021, 174: 108938.