

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208992

一种识别球阀门故障的扭矩测量平台设计及研究

张亦孟^{1,2} 林伟国² 马更生¹ 高晓勇¹

(1.北京机电工程总体设计部 北京 100000; 2.北京化工大学 北京 100000)

摘要: 球阀门是一种使用球体作为关闭件的阀门,以其易操作性,易维修性和多功能性广泛用于工业领域。为了解决球阀门在运行过程中安全性难以检测的问题,设计了一种扭矩测量平台,旨在通过对球阀门撬杆弯矩的采集、处理与分析,对球阀门的安全状态进行监测和识别。球阀门撬杆扭矩测量平台针对撬杆转动球阀门时产生的弯曲变形进行测量,由信号放大、有源低通滤波、数据采集板卡等模块组成。基于 MATLAB 设计并开发了测量平台软件,实现球阀门撬杆扭矩数据的处理、存储与数据图的绘制。实验表明:使用支持向量机算法对扭矩测量平台采集球阀门的 8 种状态数据进行分类,正确率为 91.67%。对球阀门故障的自动识别与预警提供了强大的数据支撑。

关键词: 球阀门;撬杆;扭矩测量平台;故障识别

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and research of a torque measuring platform for identifying valve door faults

Zhang Yimeng^{1,2} Lin Weiguo² Ma Gengsheng¹ Gao Xiaoyong¹

(1. Beijing Electromechanical Engineering General Design Department, Beijing 100000, China;

2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100000, China)

Abstract: Ball valve door is a kind of use of ball as a closing valve, with its easy operation, easy maintenance and versatility is widely used in the industrial field. In order to solve the problem that it is difficult to detect the safety of ball valve doors during operation, a torque measuring platform is designed in this paper, which aims to monitor and identify the safety state of ball valve doors by collecting, processing and analyzing the bending moment of ball valve door skid bar. The valve lever torque measuring platform is composed of signal amplification, active low-pass filter, data acquisition board and other modules to measure the bending deformation caused by the valve lever rotation. The software of measuring platform is designed and developed based on MATLAB to process and store the torque data of ball valve door lever and draw the data graph. The experimental results show that the support vector machine algorithm is used to classify 8 kinds of state data of ball valve door collected by torque measuring platform, and the accuracy rate is 91.67%. It provides powerful data support for automatic identification and early warning of valve door faults.

Keywords: ball valve door; pry bar; torque measuring platform; fault identification

0 引言

阀门是工业生产过程中不可或缺的控制设备之一^[1-3],其广泛的应用于使用介质控制的各个工业领域中。其规格品种众多,可分为球阀、蝶阀、旋塞阀等多种类型,其中球阀通常用于对管道通断的开闭以及开闭的程度进行控制,使用面极广。

球阀门经常作为各种危险品的控制部件,作为控制着有毒害性、腐蚀性等危险性质的介质的阀门,如果发生失

效、泄露等故障,会引起相当程度的危险,甚至引起重大的安全事故。

国内对于球阀安全性的相关研究在逐步跟进。彭俊杰^[4]、赵广宇^[5]、黄燕等^[6]、陈林等^[7]分别对阀门故障、管道球阀故障、核电站阀门故障等故障的类别、原因以及应对方式进行了总结与归纳。黄燕等^[6]研究了阀门故障的分类方法,根据阀门故障的特点、故障的影响程度、故障的起因以及机械产品故障模式的特点,从多个维度,对球阀门故障进行了细致的分类,并且对故障的成因进行了详细的探讨。

收稿日期:2022-02-10

在球阀故障检测方面,项美根等^[8]介绍一种扭矩采集系统,该系统可以采集阀门的扭矩,使用传感器对阀门扭矩数据进行采集,并通过计算机对采集到的数据进行输出。通过这种方法对阀门的力矩进行连续测试。翁滨^[9]将电隔离应用到了阀门扭矩数据采集中,通过实验证明,采用这种方式的扭矩数据采集系统具有更好的精确度和稳定性。曾杰等^[10]对核电站电动阀门故障原因和故障信息表现形式进行了分析,使用阀门的故障特征量表表征阀门的故障状态。

目前国内外尚无对球阀在使用过程中检测其安全性的普适性标准。仅通过各个国家制定的相关标准对出厂球阀进行压力测试来对球阀的合格性进行检测,但是这些措施仍然难以确保球阀在运行过程中长期处于安全状态^[11]。因此,若能准确采集并识别关键球阀在运行过程的状态信号,并在此基础上,通过对球阀运行状态进行识别以防止球阀故障或者失效具有重要的意义。

本文设计了一种扭矩测量平台。通过在撬杆上布置应变传感器,获取撬杆在球阀不同状态下的扭矩信号,为后期实现自动识别球阀的状态提供了有效的数据支撑,以解决球阀开关在运行过程中安全状态测定问题,从而避免安全问题的发生。

1 扭矩测量平台设计方案

1.1 测量平台总体架构

扭矩测量平台需要将撬杆的弯矩作为输入,将其转化为数字信号输出到计算机上的数据采集与处理软件。因此,需要使用应变传感器将撬杆的应变转换为电阻变化,通过使用惠斯通桥捕捉到微量的电阻变化,将其转化为电压信号。由于电压值通常比较小,难以保证对电压的准确测量,通常的做法使用放大模块进行处理。使用放大模块将微量的电信号放大,由于在放大电信号的同时,也放大了信号中自带的噪声。在测量平台中需要加入滤波模块,以尽可能剔除系统采集及放大过程中造成的噪声。由于数据采集板卡内的 MCU 无法直接接收模拟量信号,因此数据先由模数转换模块进行处理,再将处理后的数据传输给主控单元,主控单元对数据处理后使用 USB 转换芯片将数据传输到 PC 机的 USB 接口中。

因此,测量平台由应变传感器、放大模块、滤波模块以及数据采集板卡组成,如图 1 所示。

1.2 弯矩传感器的制作

在测量材料应变时通常选用电阻应变片作为传感器进行测量,根据上述的分析可知,本文首先需要设计并制作一个撬杆,用于模拟实际应用中的撬杆来驱动球阀进行转动,然后在撬杆上选取合适的测点布置应变传感器,同时设计电路将传感器的输出信号转换成可供采集的电压信号。

1) 弯矩的测量原理

本文采集的数据源于控制球阀转动的撬杆的弯矩。根据材料力学原理,撬杆在阀门扭矩的作用下将会受到相

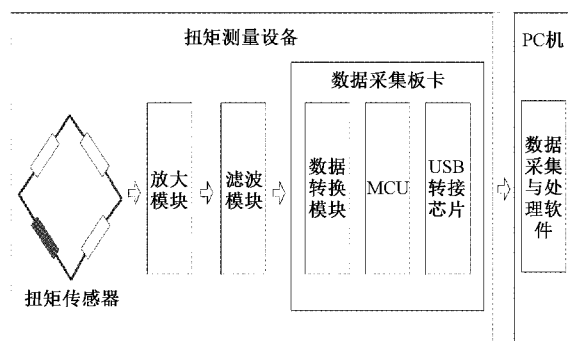


图 1 扭矩测量平台组成图

应的弯矩,撬杆在弯矩的作用下产生弯曲和变形,并在撬杆上伴随产生对应的应力和应变,应变在材料力学原理中的定义如下:

$$\epsilon_M = \frac{y}{\rho} \quad (1)$$

其中, ϵ_M 为受弯矩 M 下撬杆产生的应变, y 为应变表面到撬杆中性轴的距离,一般为撬杆的半径, ρ 为撬杆中性轴的曲率半径。由纯弯曲的静力有:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I_z} \quad (2)$$

其中, E 为撬杆的弹性模量, I_z 为撬杆截面对中性轴的惯性矩。将式(2)代入到(1)中,有:

$$\epsilon_M = \frac{M \cdot y}{E \cdot I_z} \quad (3)$$

在材料不变的情况下,撬杆的弹性模量及其惯性矩为常量。由式(3)可知,撬杆弯矩与单元体收到的应变成线性关系。因此,可以通过测量撬杆的应变来反应对其应变矩的变化趋势。

2) 传感器原理及选型

如前文所述,撬杆扭矩数据的采集可以通过采集撬杆的应变数据实现^[12-14]。因此,可以通过电阻式应变传感器来将撬杆的应变信号转换为电信号进行处理与转换。

电阻式应变传感器通过内置可重复使用的敏感元件,将被测试物件的弹性应变利用电阻应变效应转换为电阻变化,再通过转换电路将电阻转换为电压或电流信号输出。电阻式应变片的工作原理基于电阻应变效应^[15-17]。一段金属丝的阻值表达式如下:

$$R_0 = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

金属材料的电阻变化率有如下公式:

$$\frac{\Delta R_0}{R_0} = (1 + 2\mu + \lambda E)\epsilon_0 \quad (5)$$

对于特定的材料,其压阻系数、泊松比和弹性模量为固定值,即对于同一材料, $(1 + 2\mu + \lambda E)$ 为定值。令 $K_0 = 1 + 2\mu + \lambda E$, 有:

$$\frac{\Delta R_0}{R_0} = K_0 \epsilon_0 \quad (6)$$

K_0 即为灵敏系数。通过式(6)可知,金属丝电阻的变化率与金属丝产生的应变以灵敏系数为参数呈线性相关。

电阻式应变片种类繁多,按照应变计类别可以分为箔式和特殊用途两种,按照基底材料可以分为酚醛类、环氧类、聚酰亚胺类和玻璃纤维浸胶类,也可以按照敏感栅的形状结构、材料补偿系数等分类。

根据本文所设计的球阀扭矩测量平台的需求及实验环境,选择电阻式应变传感器的型号为BF350-3AA(11),其详细参数如表1所示。

表1 BF350-3AA(11)参数表

型号名称	BF350-3AA(11)
应变计类别	箔式
基底材料	酚醛
标称阻值/ Ω	350 ± 3
基底尺寸/mm	9.6×3.5
敏感栅尺寸/mm	3.2×2.5
适合温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-30 \sim 60$
室温极限应变/ $(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	20 000
温度补偿系数	11

3) 传感器测量电路设计

在实验中和实际使用中,由撬杆应变引起电阻传感器的变化是非常微小的,普通的电阻测量设备无法精确地测量如此微小的电阻变化,因此,本文使用惠斯通电桥^[18-22]对电阻的变化率进行测量,采用3个350欧姆固定电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和应变传感器 R_4 搭建一个典型的惠斯通测量电路。桥路中B、D点为供电端,由外部电源提供恒定电压 E ,由A、C点引出测量端,输出电压值为 U 。传感器的连接方式见图2。

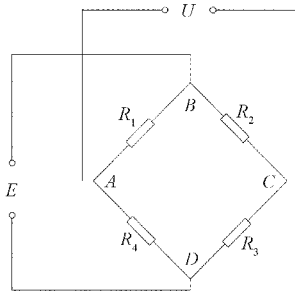


图2 传感器连接方式图

当电桥平衡时,获得电路中A、C两个点的电压差 U 的值为:

$$U = U_A - U_C = \frac{R_1 R_1 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \quad (7)$$

在撬杆上没有弯矩存在的情况下,理论上 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$,其中 R_4 为应变传感器电阻,此时输出电压值 $U = 0$,但是在实际状况下,组成传感器的应变片的阻值与

其他3个固定电阻的阻值之间存在一定差异,同时应变片在粘贴过程中存在一定的误差,造成在无扭矩情况下电桥依然不平衡,存在一个初始值 U_0 。

当撬杆转动时,应变片受弯矩的影响产生的应变影响产生形变,进而阻值发生变化,应变片产生阻值变化将引起输出电压的变化。设应变片阻值变化为 ΔR ,电压的变化为 U' ,根据式(7)有:

$$U' = \frac{R_1(R_4 + \Delta R) - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4 + \Delta R)} E \quad (8)$$

$$U' = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} E \quad (9)$$

其中,为各电阻及应变传感器的电阻值,如上文所述, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$,带入到式(8)得出式(9)为应变电阻变化与电压变化之间的关系。

设 E 为2.5V,当电阻值为350 Ω ,电阻变化在0~100 Ω 之间时,应变片电阻变化与电压变化的函数图像如图3所示。

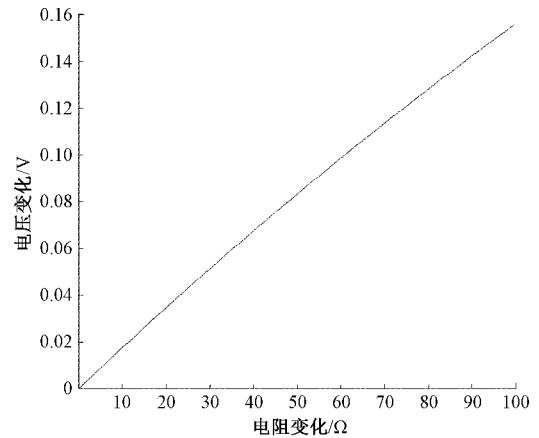


图3 电阻变化与电压变化函数图像

可以看出,尽管应变电阻的变化不是电压的线性函数,但是,由于应变电阻的变化范围较小,在很短的一段曲线上,可以将其视为线性的,并且在计算电压时误差可以忽略不计。

在本文的实验中,采用如图4所示的电路完成对惠斯通电路的实现。

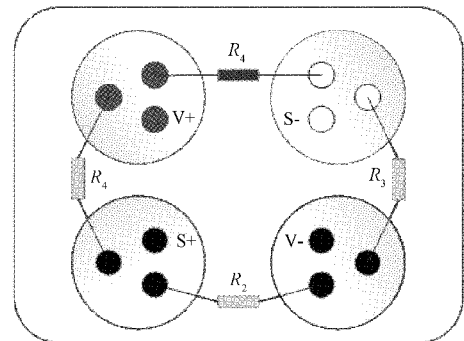


图4 实验传感器电路的实现

该电路由两个板子组成,上层为 4 组引脚,每组 3 个;下层在引脚间连接电阻和导线。这样的电路设计,一方面可以防止电阻和导线外露导致漏电和短路的危险,并且使杂乱的电路显得整洁美观;另一方面,增强了电路的可拓展性,在后续实验中可以简单地电阻和传感器的更换变换电路,或者扩展传感器的数量;该电路能够将传感器电路从传感器测量平台中独立出来,从而方便矫正设备,尤其是放大模块造成的系统误差。搭建完的电路如图 5 所示。

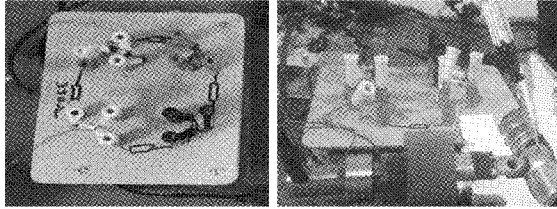


图 5 传感器测量电路搭建完成图

1.3 信号放大模块

应变传感器将撬杆弯曲过程中的应变转换为电压变化,其大小一般为几毫伏甚至更小,因此需要在系统中配置放大模块,将传感器输出的电信号进行放大处理,将毫伏级的电压放大至可以传输及处理的程度。本文中选用的仪表放大器是 ADI 公司的 AD620,它具有诸多良好的性能,如通过一个外接电阻就能实现一万范围内的增益,该芯片具有失调漂移小、低直线偏移低,以及低噪声的特性,作为前置放大器时能够保证不会引入过多的噪声,因此选取 AD620 作为测量平台的前置放大器,对电信号进行放大处理。

AD620 内部结构如图 6 所示。

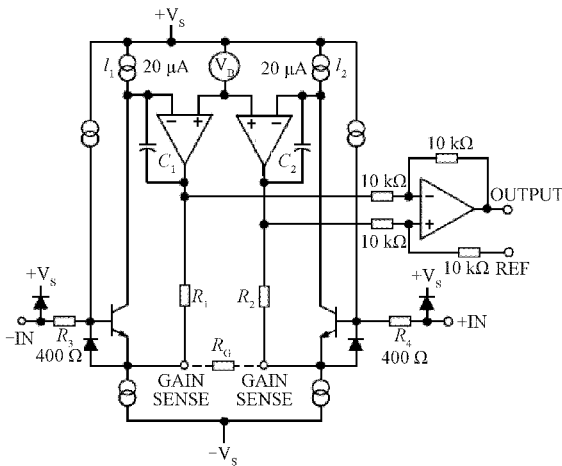


图 6 AD620 内部结构

AD620 的放大增益为:

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1 \quad (10)$$

根据式(10),有:

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1} \quad (11)$$

其中, R_G 即为需要对其增益进行控制的外部电路中电阻的阻值。根据系统设计和实际传感器输出信号的幅值范围的需求,本文将 G 设置为 1 000,根据式(11)计算得出:

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{1000 - 1} \approx 49.5 \Omega \quad (12)$$

根据式(12)计算结果,如果想要达到预期 1 000 倍的放大增益,需要选用阻值为 49.4 Ω 的电阻作为外部增益电阻,但是在市面上没用符合该阻值的标准电阻,所以可以选择通用阻值为 49.9 Ω 的电阻作为外部增益电阻。经过计算,外部增益电阻为 49.9 Ω 放大倍数为:

$$G = \frac{49.5 \text{ k}\Omega}{49.9 \Omega} + 1 \approx 992 \quad (13)$$

下面本文使用 Multisim14 对设计电路进行模拟仿真,仿真原理如图 7 所示。

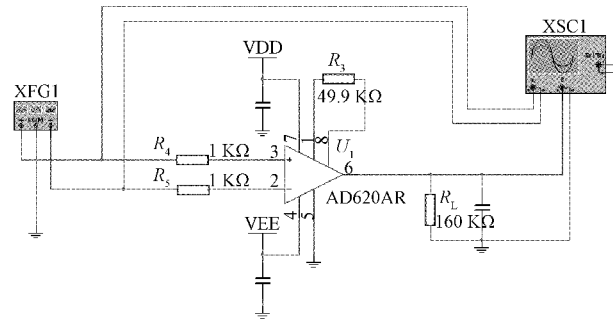


图 7 放大模块电路仿真原理

这里假定输入 1 KHz, V_{pp} 4 mV 的信号。通过模拟滤波器的 A 通道表示输入, B 通道表示输出,从对比波形看,输入与输出的电压比,也即放大倍数为 992,满足设计。

仿真波形图如图 8 所示。

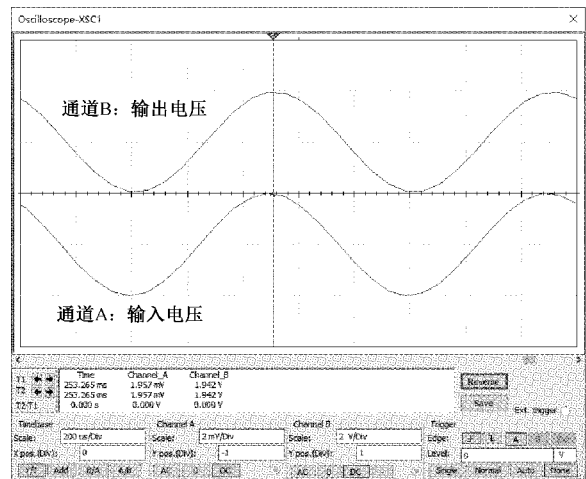


图 8 放大模块电路仿真波形图

1.4 有源低通滤波模块

为了降低外界噪声对传感器信号造成干扰对测量结果造成影响,同时提高系统的可靠性,在信号调理电路中增加

一个滤波器电路是非常有必要的。

应变片测量的主要是低频信号,本文使用 UAF42 设计一个低通滤波器(50 Hz),将高频杂波干扰滤除。

利用 UAF42 设计的低通滤波电路如图 9 所示。

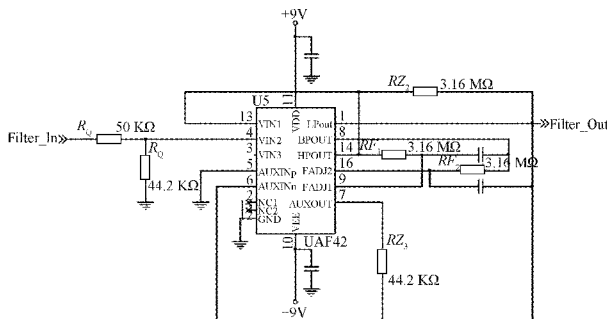


图 9 UAF42 滤波电路图

使用 TI 公司推荐的一款滤波器设计软件 filter42 对设计的滤波器幅频响应特性进行验证,并确定最优的滤波器特性参数和外围电阻电容值。此软件可以根据系统需求快速完成滤波器设计。根据系统需求,在软件中设置滤波器为低通滤波器,巴特沃斯类型, f-3db 的频率为 50 Hz。输入上述参数后,此软件自动计算出 UAF42 外围配置电阻的参数值(电阻的精度为 1%,前文电路中的各个电阻即是通过此软件计算所得)。如图 10 所示。

Component	Library	Value	Quantity	Value	1.3dB	Phase (deg)
Type	Reference	Value	Quantity	Value	Reference	Reference
Subckt	C Res	50	1	50	1.3dB	0
Sub	FPZ	50	1	50	1.3dB	0
Ckt	1					

图 10 UAF42 滤波组件值表

同时 filter42 软件可以生成仿真数据波特图,如图 11 所示。

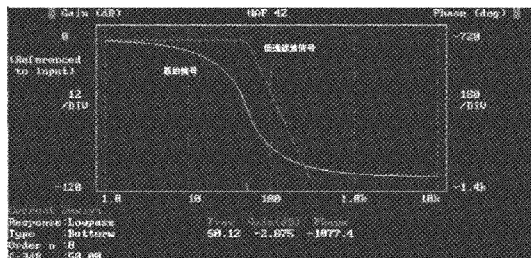


图 11 UAF42 仿真波形图

从仿真数据输出可以看出,在低通滤波时, f-3 dB 值为 50.00,也即此频率下,信号的衰减值为 3 dB,与设计预期一致。

1.5 数据采集板卡

如图 12 所示,数据采集板卡用于接收滤波模块传输的模拟信号,并将该模拟信号转换为数字量数据后转发给 PC 机上的数据采集与处理软件。数据采集板卡使用 ST 公司

的 STM32F103 作为主控单元,配置有 ADI 公司的 AD7606 芯片作为数模转换模块用于数据采集,最多可支持 8 通道信号的同步采样;板卡集成 USB 转换芯片,可通过 miniUSB 口即可实现数据采集卡与 PC 机的数据通讯;数据采集卡的供电电源输入采用 5 V 直流电源。

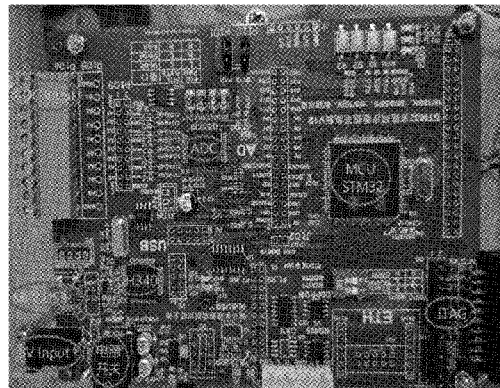


图 12 数据采集板卡图

1.6 系统供电设计

扭矩测量平台系统内传感器、滤波、放大等主要模块需要低压直流进行供电,需要设计一套供电系统,将交流电转换为可供系统内各模块使用的直流电。

供配电系统首先采用一个直流稳压电源,使用直流稳压电源进行交值变换,输出电压为 ± 12 V,然后通过 7809、7909、AD584 模块转换为可供传感器电路、放大模块,滤波模块所需的直流电。

1) 交直流转换模块

交直流转换模块是供配电系统的重要组成部分,它的作用是将输入的交流电进行转换,输出为本实验平台中需要的直流电。在本实验平台中,采用 HIECUBE 公司生产的 HA-12N10B-2539 型封装式电源模块,如图 13 所示。因为其具备交直两种用法,可以满足将输入的交流电转换为直流电的需求。同时,作为分装式电源它还具有安全可靠等特点。在工程控制等领域,使用的较为广泛,表 2 是 HA-12N10B-2539 型封装式电源模块的相关参数。



图 13 HA-12N10B-2539 型封装式电源模块

该模块提供 3 种类型的外围电路,分别是典型必接电路、低纹波应用电路和 EMC 应用增强型电路,为了提高采集数据的精度,在这里本文选用 EMC 增强型电路作为模块的外围电路,如图 14 所示。

表 2 HA-12N10B-2539 型封装式电源模块参数表

序号	项目	参数
		85 V~265 V AC
1	电压范围/频率	100 V~370 V DC 50/60 Hz
2	输出直流电压/电流	±12 V/1 A
3	额定功率	24 W
4	输出电压精度	±1%
5	负载调整率	±0.8%

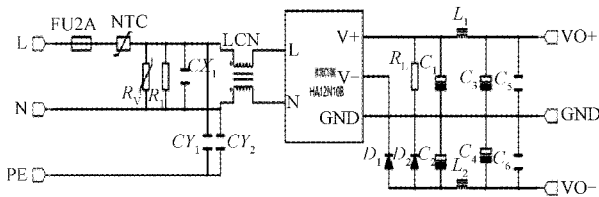


图 14 EMC 增强型电路图

2) 滤波及放大模块供电模块

由于系统中滤波和放大模块需要±9 V 的供电,因此本文需要配置一组线性稳压器,将交直流转换模块输出±12 V 电压转换为±9 V 电压输出给相关模块,在本次设计中本文选用 7809、7909,同时在稳压器的输入和输出使用具有良好滤波特性的钽电容进行电源滤波处理。此处本文选用 7809 和 7909 分别得到+9 V 和-9 V 电压,使用电脑 USB 接口提供+5 V 电压用于给 MCU 和 ADC 采集模块供电,详细如图 15 所示。

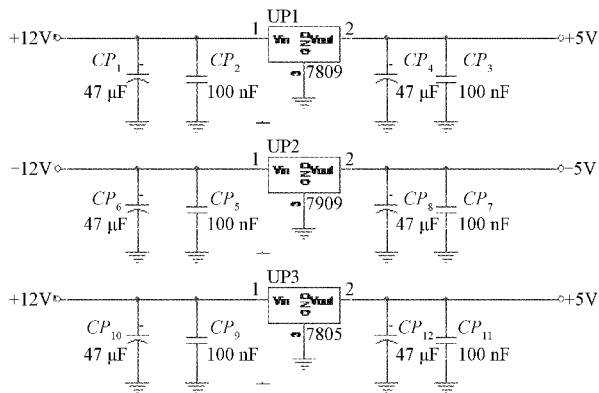


图 15 滤波及放大供电模块

3) 应变传感器供电模块

考虑到模数转换模块的输入电压范围,在本文中,选用 2.5 V 作为应变传感器的供电电压,这样就需要在交直流转换模块和线性稳压模块的基础上,为应变传感器再配置一个电压源,完成应变传感器的供电工作。

为确保测量结果的准确性和稳定性,在设计中选用 ADI 公司的 AD584,AD584 作为电压源的优势在于其低耗能上,AD 584 可以仅适用 100 μA 的电流,利用特殊的引脚

提供低功耗信号控制电源的开启与关闭。除此之外,AD584 还提供了可编程 4.5~30 V 的大范围电压输出,具有很强的灵活性。如图 16 所示,是应变传感器供电模块的原理图。

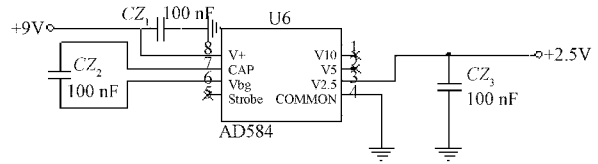


图 16 应变传感器供电模块原理图

2 实验分析

2.1 阀门故障状态模拟及数据采集

完成传感器的布置后,将传感器连接至扭矩测量设备,并将扭矩测量设备连接至 PC 机。如前文所述,实验时应变传感器将感测到的阀杆扭矩信号传递至扭矩测量设备,经由扭矩测量设备中的放大、滤波等模块,传递给数据采集板卡,数据采集板卡将数字信号传递到 PC 机,由 PC 机上的数据采集与处理软件对数据进行显示、处理和存储,搭建完成后的系统如图 17 所示。

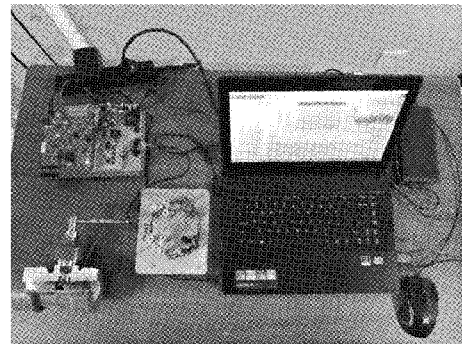


图 17 系统搭建完成图

为了检验扭矩测量平台的有效性,同时也为球阀故障状态的识别模型的训练和故障预测采集数据,本文对球阀的多种不同状态进行了模拟与数据采集。本文对球阀状态分为零位、正常开关过程、阻滞开关过程和卡死 4 种类型共 8 种状态进行模拟。

本文依次对球阀在零位、关-开(正常)、关-开(故障)、关-开(阻塞-800 目)、关-开(阻塞-600 目)、关-开(阻塞-300 目)、关-开(阻塞-150 目)、关-开(阻塞-60 目)8 种状态进行数据的采集,每种状态采集 10 s,采样频率为 100 Hz。10 s 的采集时间足够球阀由关状态旋转至开状态,又不会由于阀杆旋转过快导致数据采集过少或精确度降低。依次采集上述 8 种状态为一组实验,8 种状态的依次采集可以保证 8 种状态的数据采集时能够将其他因素的影响降至最低,保证了结果的可复现性和可对比性。

数据采集过程如下:

1)首先球阀处于零位,将撬杆平稳放置在球阀开关上,进行10 s的数据采集;

2)将球阀复位,然后使用撬杆平缓地将球阀开关从关闭旋转至开启,在旋转过程中,进行10 s的数据采集;

3)将球阀复位,再将一个小金属棒作为阻塞物放置在球阀的阀座和球体中,模拟球阀的故障状态,然后使用撬杆平缓地将球阀开关从关闭向开启旋转,旋转至最大处,进行10 s的数据采集;

4)将球阀开关状态复位,取出金属棒后将球阀的阀座与球体之间垫入裁剪好的60目的砂纸,再次使用撬杆平缓地将球阀开关从关闭旋转至开启状态,进行10 s的数据采集;

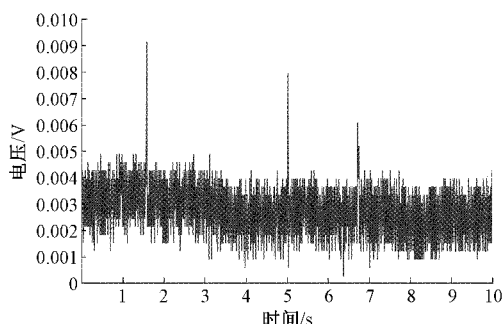
5)取出球阀内的砂纸,依次换入裁剪好的150目、300目、600目、800目的砂纸,重复上次操作,进行10 s数据采集。

以上为一组8种状态的采集方法。本文共进行了30组实验,共采集了240组球阀在零位、关-开(正常)、关-开(故障)、关-开(阻塞-800目)、关-开(阻塞-600目)、关-开(阻塞-300目)、关-开(阻塞-150目)、关-开(阻塞-60目)8种情况下的数据,数据经由数据采集与处理软件显示、存储在PC上。状态的实测信号显示图示例如下。其中,横坐标为时间,单位为秒(s);纵坐标为电压,单位为伏(v)。因为在阀门故障识别处理时,仅关注扭矩的变化,而无需确切求解扭矩的具体数值,因此,无需进行电压与扭矩的物理量转换,使用电压作为代替即可。

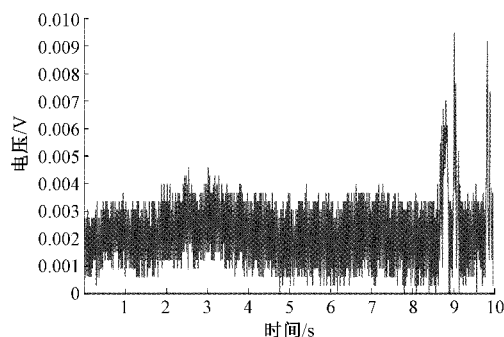
1)零位状态模拟

零位状态用来模拟球阀开关处于静止状态的数据。数据采集过程中保持球阀开关处于零位状态通过传感器采集10 s数据。

如图18所示,为按照上述方法采集到的球阀处于零位状态下的传感器输出信号图,两张图均为从采集到的30组数据中随机选取。从图中可以看出,球阀处于零位状态下,传感器输出平稳,波形无起伏,幅值基本在0~0.005 V之间波动。同时,可以看到,零位状态下的传感器输出信号由于信号幅值较小,因此受到噪声与抖动的影响相对剧烈。



(a) 零位状态下的传感器输出信号



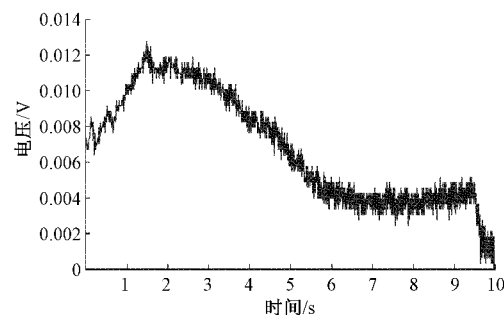
(b) 零位状态下的传感器输出信号

图18 球阀处于零位状态下的传感器输出信号

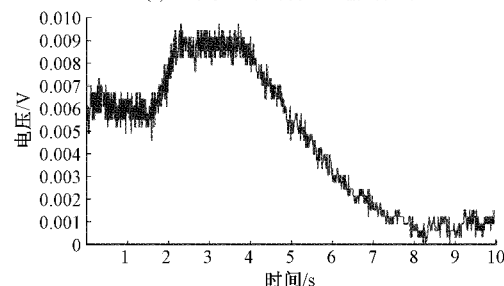
2)正常开关过程状态模拟

正常开关过程用于对球阀开关正常使用过程进行模拟,即正常使用的情况下球阀从开状态或关状态转动至另一状态的过程。在数据采集过程中,使用经过验证正常的球阀教学件在10 s的数据采集时间段内,将球阀从开状态转动至另一状态,并使用传感器对撬杆的弯矩进行数据采集。

如图19所示,为按照上述方法采集到的球阀处于正常状态下的传感器输出信号图,两张图均为从采集到的30组数据中随机选取。从图中可以看出,球阀处于正常情况进行开关时,传感器信号输出波形走势变化平缓,无尖峰。



(a) 正常状态下的传感器输出信号



(b) 正常状态下的传感器输出信号

图19 球阀处于正常状态下的传感器输出信号

3)阻滞开关过程状态模拟

如第1章所述,在球阀的使用过程中,可能由于管道施工中残留的泥沙或介质中自带的固体颗粒等原因,导致球阀的开关过程存在一定程度的阻力,阻滞开关过程就是对这一状态的模拟,如图20所示。

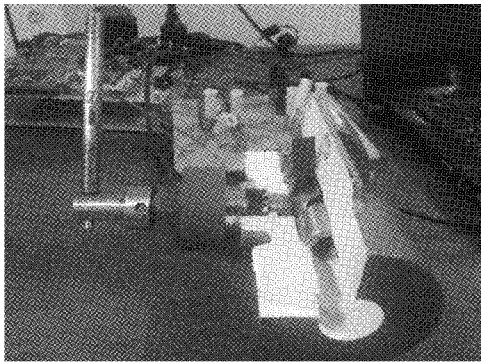


图 20 阻滞开关过程模拟

本文通过在球阀的球体与阀座之间垫入不同参数的砂纸来模拟球阀的残留物体对球阀的开关过程造成的阻力。通过采用不同参数的砂纸来模拟球阀阻滞程度的大小。砂纸的标准衡量单位为目数,目数代表砂纸每平方英寸上的孔数目,因此,目数越大,孔径越小,砂纸的粗糙程度也就小,造成的摩擦力也就越小。数据采集过程中采用的砂纸目数如表 3 所示。

表 3 砂纸目数与粒径大小对应表

砂纸目数	粒径大小/ μm
60 目	250
150 目	106
300 目	48
600 目	23
800 目	18

在数据采集过程中,将不同目数的砂纸统一裁剪为长 5.5 cm 宽 1.2 cm 大小的纸片,垫入球阀的球体与阀座之间,再将球阀在 10 s 内从开状态或关状态旋转至另一状态,同时使用传感器对撬杆的弯矩进行数据采集。

图 21 为分别采用不同型号砂纸进行球阀阻滞状态模拟的传感器输出信号波形图。每种砂纸型号都进行了 30 组实验,文中仅选取每种状态中的一种作为代表。

可以看出,不同于零位或正常状态的传感器信号输出,在阻滞状态下,传感器输出信号波形起伏相对较大,且有明

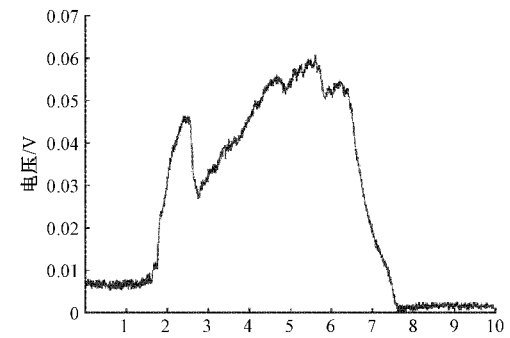
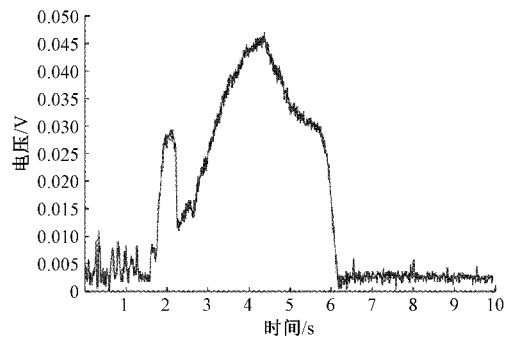
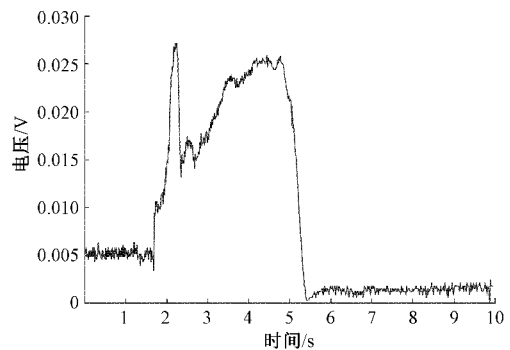
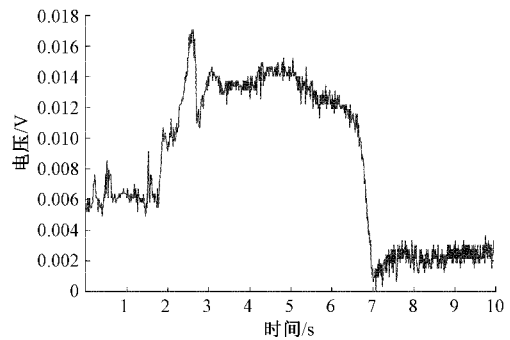
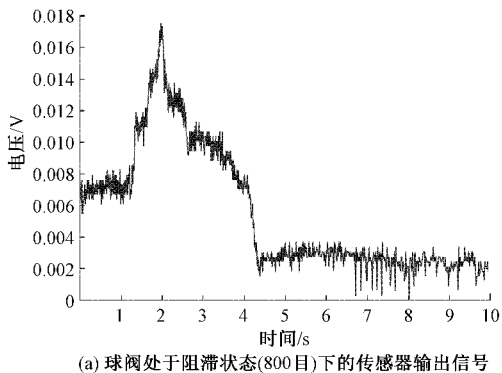


图 21 球阀处于不同阻滞状态下的传感器输出信号

显的尖峰。随着砂纸目数的减小,也就是球阀阻滞状态下摩擦力的逐渐变大,传感器信号波形输出呈现出更加平缓的走向,高幅度的波形宽度也在增加。这种变化趋势较为明显,结合球阀正常状态到卡死状态的波形图可以看出,阻滞状态的传感器信号输出波形图可以看作球阀正

常状态和卡死状态之间的一种中间状态:摩擦力小时,波形呈现出尖峰,且更偏向于正常状态的波形,而摩擦力相对较大时,波形更加平缓,且偏向于卡死状态的波形。

4) 卡死状态模拟

卡死是球阀开关中常见的故障类型,由于球阀门中存在障碍物等原因,导致球阀门无法正常从开状态或关状态旋转至另一状态,如图22所示。在数据采集过程中,使用金属杆作为阻碍物,通过将小金属杆插入教学件球体的孔洞中,使球阀门无法正常旋转来对卡死状态进行模拟。数据采集过程中在10 s内尽力旋转球阀门,并通过撬杆上的应变传感器进行弯矩感测并实现数据采集。

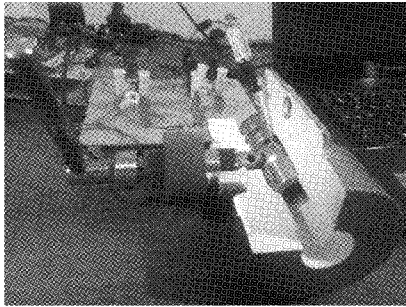
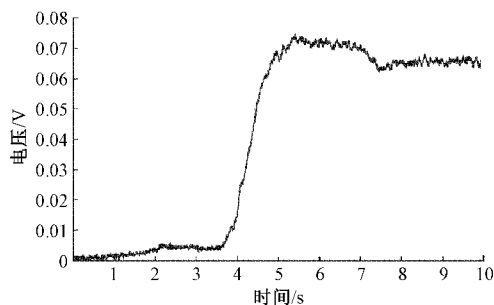
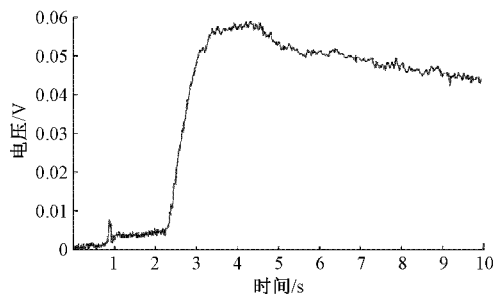


图22 卡死状态模拟

图23为按照上述方法采集到的球阀处于卡死状态下的传感器输出信号图,两张图均为从采集到的30组数据中随机选取。从图中可以看出,球阀门处于卡死状态下进行开关时,传感器信号输出走势呈现出先低后高的趋势,且无尖峰。



(a) 卡死状态下的传感器输出信号



(b) 卡死状态下的传感器输出信号

图23 球阀处于卡死状态下的传感器输出信号

2.2 阀门故障识别

本文采用模式识别方法,对扭矩测量设备采集到的球阀数据进行分类,以实现球阀状态的自动识别,实现球阀故

障的自动检测。对球阀进行故障检测分为:球阀信号预处理、数据的信号特征提取以及对数据分类识别3个步骤。

借助本文所述的扭矩测量平台,采集了前文所述的8种不同状态下(球阀正常到卡死)的实验数据共240组,每组实验数据包含1000个数据点。实验数据的详细情况如表4所示。

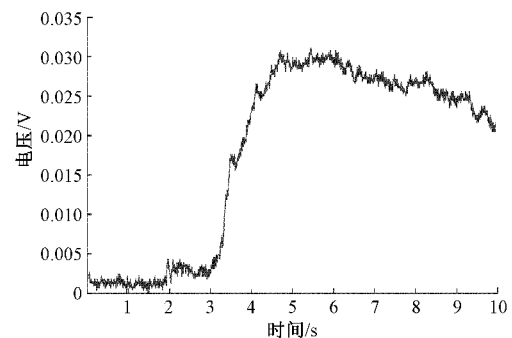
表4 球阀扭矩数据采集表

球阀所处位置	球阀状态	数据数量
关-开	正常	30组×1000点
	卡死	30组×1000点
	阻滞(800目)	30组×1000点
	阻滞(600目)	30组×1000点
	阻滞(300目)	30组×1000点
	阻滞(150目)	30组×1000点
零位	阻滞(60目)	30组×1000点
	—	30组×1000点

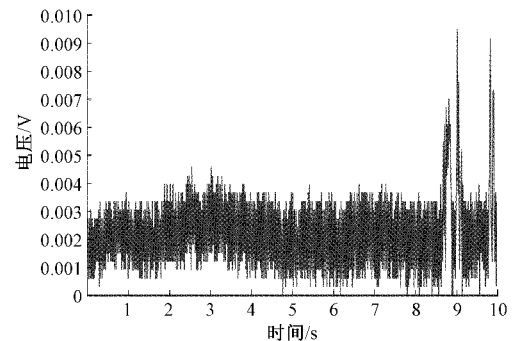
1) 数据预处理

由于数据传输、传感器误差或失真等原因,经由扭矩测量设备所采集的传感器输出信号可能会存在离群值、误差等噪声数据。用于模式识别的数据需要进行去离群值和无效数据,弱化噪声等预处理,并将数据的格式进行统一规则化,使数据更加干净,更能表征球阀的真实状态,也更便于后续处理。

实验中扭矩测量平台所采集的球阀开关数据具有较强的信号抖动,如图24所示。



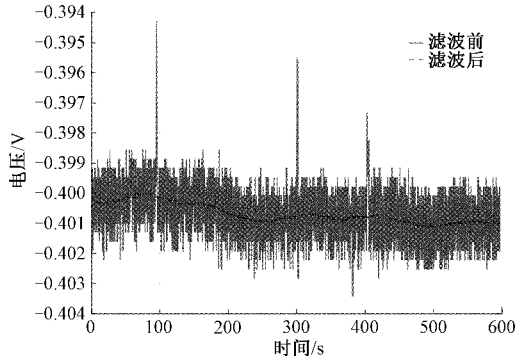
(a) 带有抖动的传感器输出信号



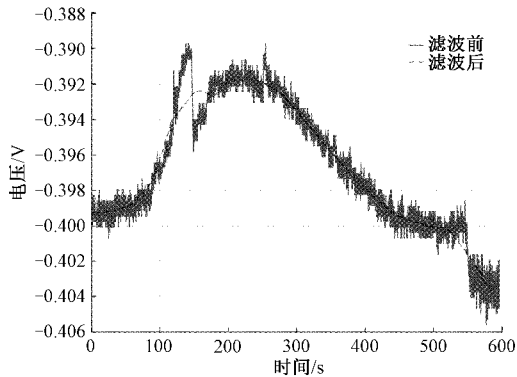
(b) 带有抖动的传感器输出信号

图24 传感器输出信号中的抖动

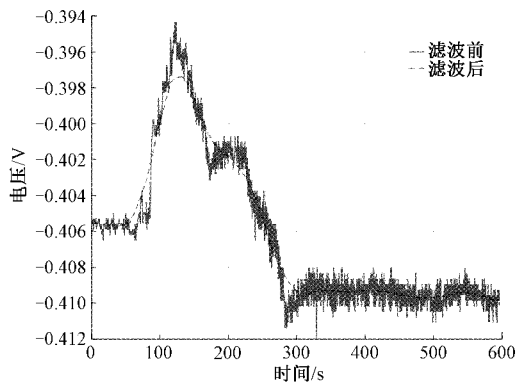
因此,需要先对数据进行滤波以去除信号抖动以及噪声。本实验中,不同采样时刻的数据地位均等,且噪声数据对时间变化不敏感。因此朴素滑动平均法比较适用。对实验数据采用朴素滑动平均法进行滤波后的结果如图 25 所示。



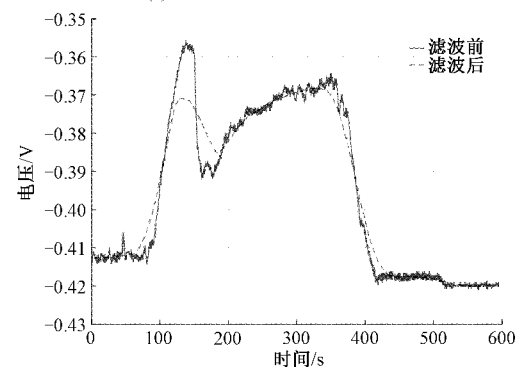
(a) 零位状态信号滤波图



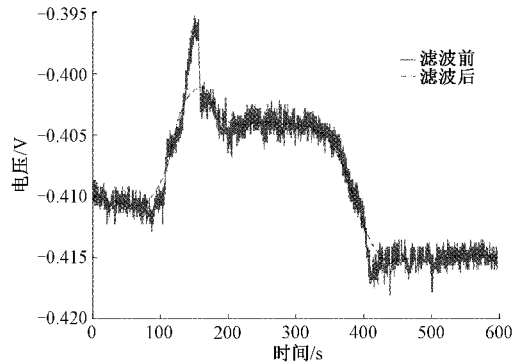
(b) 正常状态信号滤波图



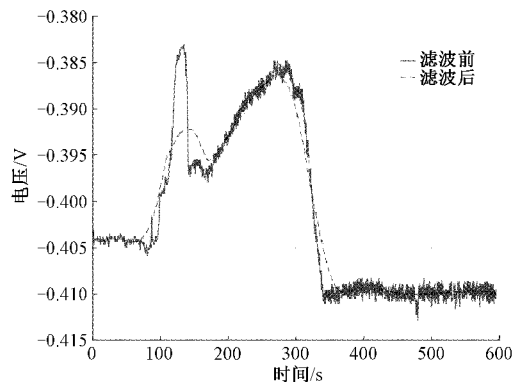
(c) 阻滞(800目)状态信号滤波图



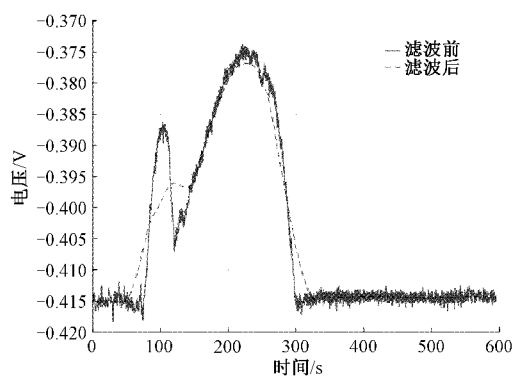
(d) 阻滞(60目)状态信号滤波图



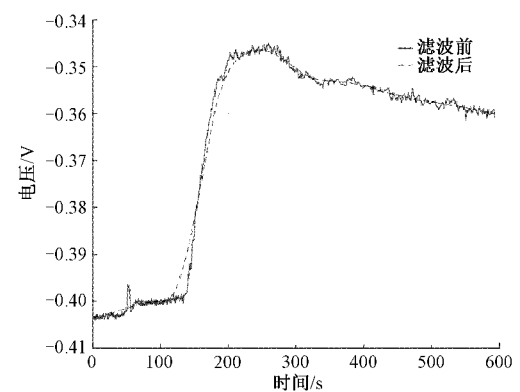
(e) 阻滞(600目)状态信号滤波图



(f) 阻滞(300目)状态信号滤波图



(g) 阻滞(150目)状态信号滤波图



(h) 卡死状态信号滤波图

图 25 传感器输出信号滤波图

朴素滑动滤波对其他干扰信号进行了有效的抑制,并且较好的保留了原始信号的特征。

2) 信号特征提取

信号特征提取意在获取能够代表数据背后抽象意义的特征。在模式识别中,获取数据的表征十分重要。获取准确有价值的数据表征是能够进行有效模式识别的基础,在本文中,为了方便对数据信号特征进行考察,选取统计学中最常用的3个数据特征进行提取、观察并进行实验,分别为数据的均值特征、方差特征和极差特征。

均值能够衡量信号的平均大小,计算公式为:

$$x = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (14)$$

极差能够衡量信号的变化范围,计算公式为:

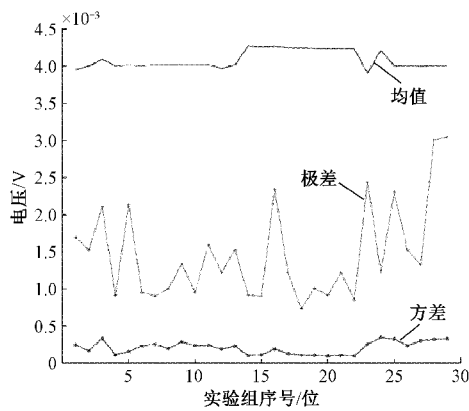
$$R = \max(x_i) - \min(x_i) \quad (15)$$

方差表示数据以均值为中心出现离均值距离大小分布的情况,计算公式为:

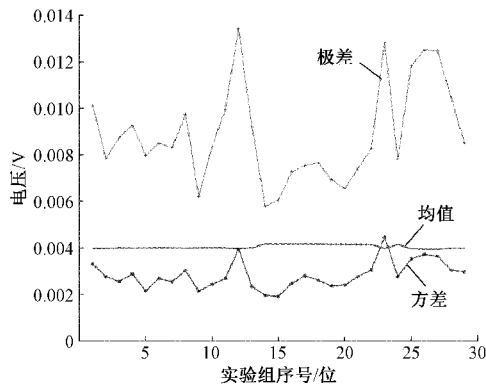
$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n} \quad (16)$$

对采集到的数据提取特征值,其不同维度的特征值如图26所示。

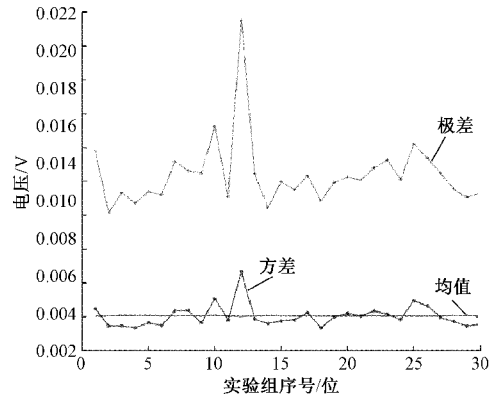
图27~29分别为每种特征所有数据的分布图,数据中实验序号以30个为一组以虚线隔开,分别代表零位、正常开关、800目、600目、300目、150目、60目、卡死的8种状态的数据。通过所有数据的特征值的横向对比,更能看出



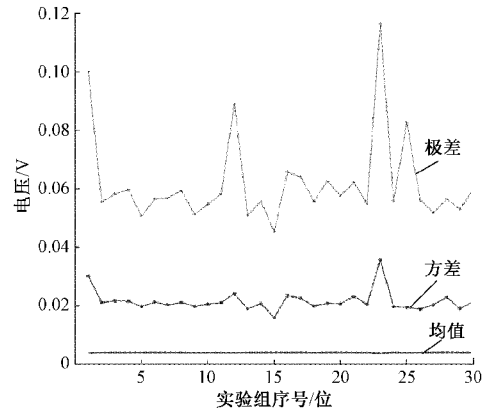
(a) 零位状态信号特征值



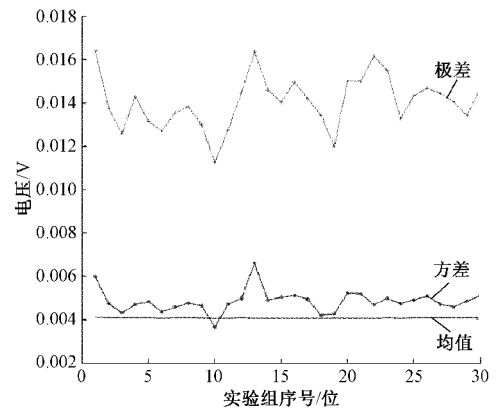
(b) 正常状态信号特征值



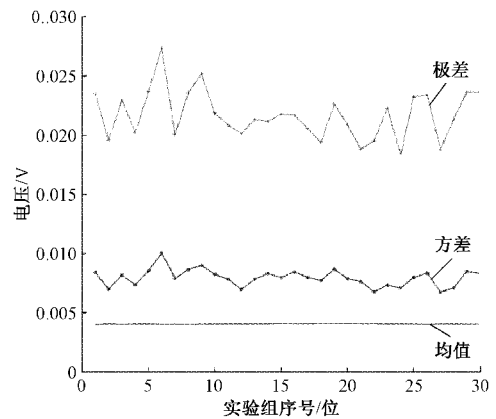
(c) 阻滞(800目)状态信号特征值



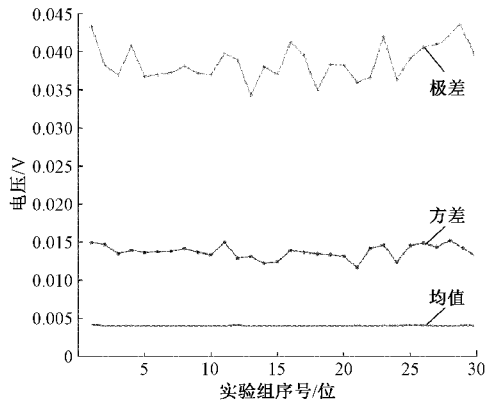
(d) 阻滞(60目)状态信号特征值



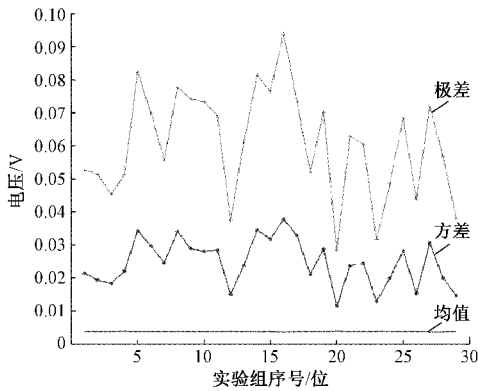
(e) 阻滞(600目)状态信号特征值



(f) 阻滞(300目)状态信号特征值



(g) 阻滞 (150目) 状态信号特征值



(h) 卡死状态信号特征值

图 26 特征值示意图

各种状态之间存在着明显的阶梯上升的趋势,且随着幅值的增大,各特征值都出现比较明显的波动。不同状态下采集到的数据具有相对明显的特征,其特征值存在不同情况下波动,特征值的幅值上也存在一定的差异。

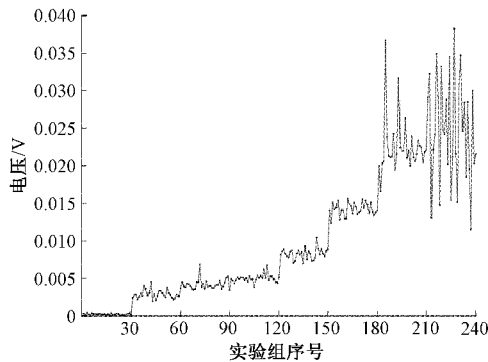


图 27 均值特征值曲线图

3) 分类识别

针对这些特征值,本文使用采集到的数据集进行了多种类型的模式识别训练,以挑选最好的模式识别方法对问题进行建模,训练结果如图 30 所示。

将全部的数据通过 MATLAB 的全部线性模型训练,虽然不能确定算法的优劣,但是可以粗略地选出相对合适的算法,快速地建立 baseline。对于全部已有的数据集,使

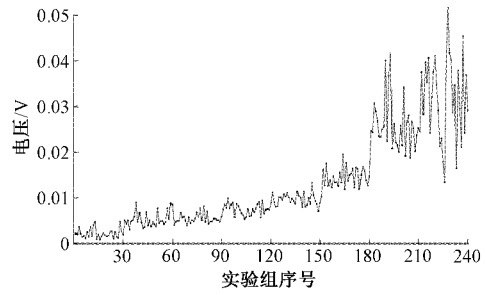


图 28 方差特征值曲线图

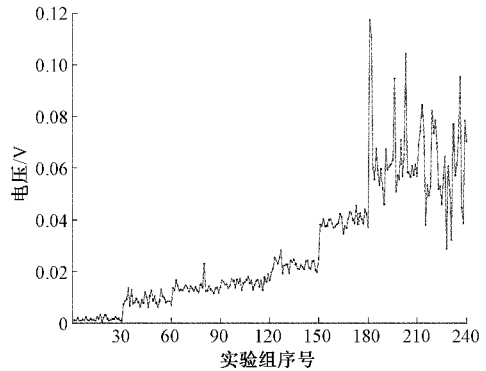


图 29 极差特征值曲线图

1.1	树	准确度: 84.2%
上次更改:	粗糙树	3/3 特征
1.2	树	准确度: 84.2%
上次更改:	中等树	3/3 特征
1.3	树	准确度: 48.3%
上次更改:	粗糙树	3/3 特征
1.4	线性判别	准确度: 87.1%
上次更改:	线性判别	3/3 特征
1.5	二次判别	准确度: 87.9%
上次更改:	二次判别	3/3 特征
1.6	朴素贝叶斯	准确度: 86.7%
上次更改:	高斯朴素贝叶斯	3/3 特征
1.7	朴素贝叶斯	准确度: 84.6%
上次更改:	核朴素贝叶斯	3/3 特征
1.8	SVM	准确度: 88.3%
上次更改:	线性 SVM	3/3 特征

图 30 使用采集数据进行训练的多种模式识别训练准确率

用全部线性方法进行多次建模,不断地进行迭代比较,在绝大多数情况下,支持向量机算法都能够表现出优于其他算法的分类准确率。图 30 为采用本文最终数据集的训练效果图,可以看到,粗略地预训练下,支持向量机方法的表现要优于其他方法;另一方面,采集到的训练样本数量足够大而本文选取的特征数较小的情况下,可以通过使用基于复杂核函数的支持向量机来获得更好的预测性能。因此,本文采取支持向量机(SVM)算法来对不同的阀门状态数据进行识别。

MATLAB 对模式识别具有强大的支持,通过使用 MATLAB 的分类识别工具箱,可以快速方便地进行支持向量机算法的实现,如图 31 所示。

分类识别的流程如图 32 所示。

将球阀的 8 种状态分别依次标记为 1~8 作为数据的

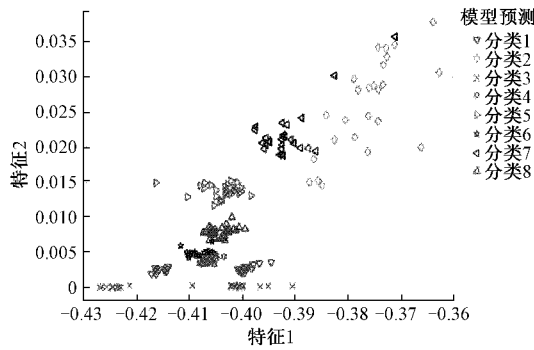


图 31 使用 MATLAB 分类识别工具箱实现 SVM 算法

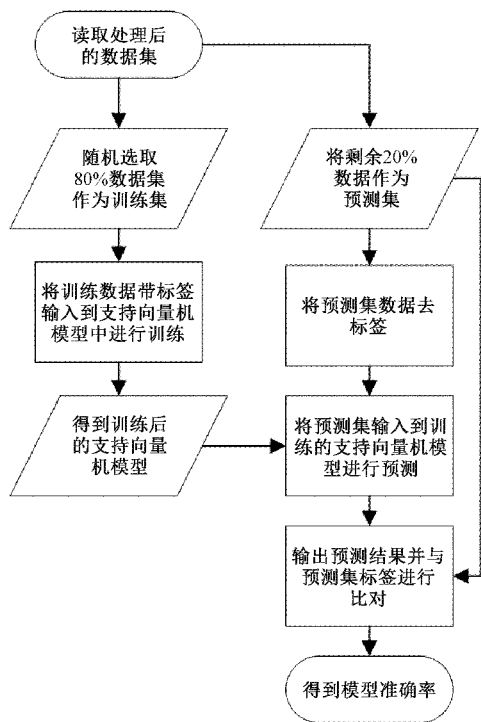


图 32 分类识别流程图

预测标签,以上文数据的 3 个特征作为输入。将实验采集到的数据集中每类随机选出 80% 作为训练数据,20% 作为预测数据。在这个比例下,每种状态含有 24 组训练集和 6 组预测集,既保证了能够有足够的数据对模型进行训练,又能保证合理的预测集数量,使预测结果具有一定的普适性,不会因为随机性而造成预测结果波动过大,缺乏代表性。

随机选出 80% 的数据,组成一个矩阵,每一行代表一组数据,第一列代表该组数据的均值特征,第二列代表该组数据的方差特征,第三列代表该组数据的极差特征,第四列为该组数据的标签,该组数据所代表的球阀门状态。标签对应状态如表 5 所示。

训练数据的散点图如图 33 所示,训练数据通过提取获得的三种特征量能够较好地对 8 种不同的类别进行聚类,因此易于得到良好的训练结果。

表 5 球阀扭矩数据采集表

标签	标签对应状态
1	零位状态
2	正常开关状态
3	阻滞(800 目)开关状态
4	阻滞(600 目)开关状态
5	阻滞(300 目)开关状态
6	阻滞(150 目)开关状态
7	阻滞(60 目)开关状态
8	卡死状态

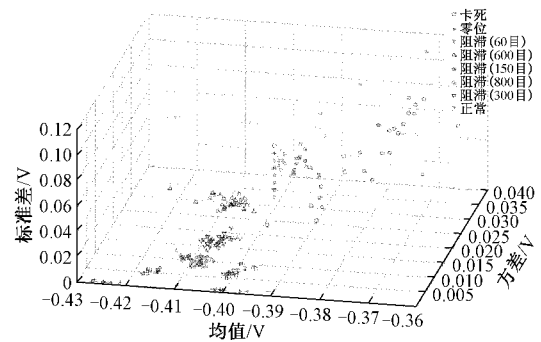


图 33 练集训练结果散点图

如图 34 所示,为训练集训练结果的混淆矩阵图,矩阵图的每一行代表了真实标签的预测数量,矩阵图的每一列代表了预测标签的数量。

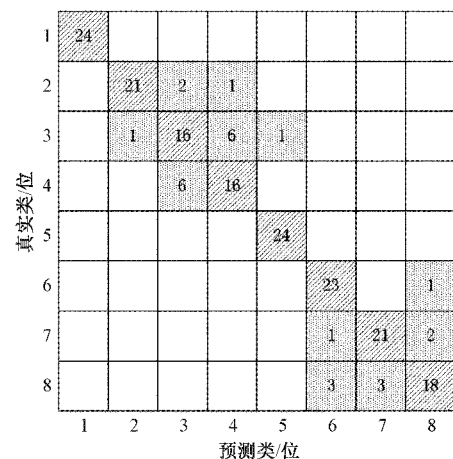


图 34 训练集训练结果混淆矩阵图

矩阵中由斜线标注的方格代表了真实标签与预测标签一致的数量,也即预测正确的数量;由点阵标注的方格标签代表了将真实标签(纵坐标)特征值预测为错误(横坐标)的数量。矩阵图反映了模型在训练集上的预测准确度,以及容易混淆的标签类。从图 34 中可以看出,真实类为 2,3,4 和 6,7,8 之间的标签之间容易发生混淆预测。但是从总体上看,训练集的训练结果能够较好的预测球阀门的运行状态和故障。

接下来将训练好的模型导出,用于对预测集进行测试。MATLAB 支持 GUI 式的模型导出。将测试集样本输入到模型中,对模型的准确性进行验证。测试集样本以及其对应的标签如表 6 所示。

将测试集数据输入到模型中后,得到模型的分类识别结果,对球阀数据的分类识别结果如图 35 所示。

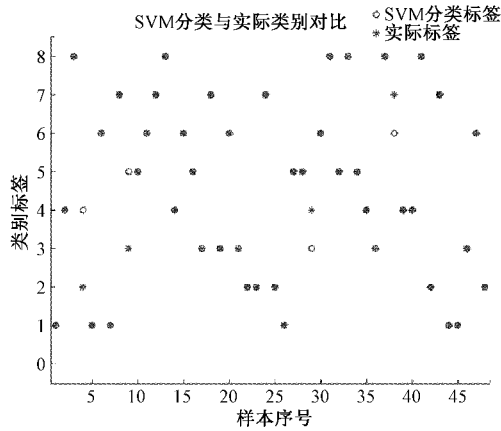


图 35 球阀数据的分类识别结果图

表 6 预测集样本对应标签表

样本序号	真实标签	样本序号	真实标签
1	1	25	2
2	4	26	1
3	8	27	5
4	2	28	5
5	1	29	4
6	6	30	6
7	1	31	8
8	7	32	5
9	3	33	8
10	5	34	5
11	6	35	4
12	7	36	3
13	8	37	8
14	4	38	7
15	6	39	4
16	5	40	4
17	3	41	8
18	7	42	2
19	3	43	7
20	6	44	1
21	3	45	1
22	2	46	3
23	2	47	6
24	7	48	2

如图 34 所示,对于 8 类标签每类 6 组预测集共 48 组数据,共分类正确 44 组,分类准确率的计算公式如下:

$$acc = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8}{total} \quad (17)$$

其中,acc 代表支持向量机的分类准确率, $T_1, T_2, T_3, \dots, T_8$ 分别代表支持向量机模型在类数据上分类正确的个数, total 代表预测数据集总数据量。根据式(17),模型进行分类正确率为 91.67%。共有 4 个分类错误的点,分别为:将阻滞状态(800 日)错误识别为阻滞状态(600 目);将阻滞状态(800 目)错误识别为阻滞状态(300 目);将阻滞状态(600 目)错误识别为阻滞状态(800 目);将阻滞状态(60 日)错误识别为阻滞状态(150 日)。这四组数据均为阻滞状态分类错误,对故障识别与预警影响轻微,同时也说明本方法还有一定的改进空间。总体上看,对于预测数据,支持向量机能够实现比较好的分类结果,实现对球阀门故障的识别与预警。

3 结 论

针对球阀门在运行时安全性难以测定的问题,本文探讨了扭矩测量的数学模型,论证了由对撬杆的弯矩测量代替对球阀门阀杆的扭矩测量,进而识别阀门故障的可行性。设计并搭建了一种扭矩测量平台,实现了不同状态下转动球阀所用撬杆的扭矩数据的采集,对采集到的数据进行了基于支持向量机的故障状态分类模型建立及分类识别实验。测试结果表明:本文提出的基于扭矩测量的阀门故障识别方法能够对球阀门的运行状态实现准确识别,并有助于对球阀门的故障进行预测。

参考文献

- [1] 赵剑. 我国阀门行业现状与发展趋势研究[J]. 产业科技创新, 2020, 2(28): 1-2.
- [2] 张威. 阀门密封技术研究现状及发展趋势分析[J]. 阀门, 2020(5): 21-24.
- [3] 景旭东. 阀门的管理和检修[J]. 科技风, 2019(10): 169-170.
- [4] 彭俊杰. 核电站气动截止阀常见故障及维修[J]. 现代制造技术与装备, 2018(6): 2.
- [5] 赵广宇. 固定球阀密封结构概述[J]. 中国设备工程, 2018(10): 112-113.
- [6] 黄燕, 周密, 黄卫星, 等. 阀门故障分析及其分类[J]. 阀门, 2007(6): 41-44.
- [7] 陈林, 王兴松, 张逸芳, 等. 阀门故障诊断技术综述[J]. 流体机械, 2015(9): 36-42.
- [8] 项美根, 项晓明, 徐永杰, 等. 阀门启闭扭矩连续测试装置的试验与研究[J]. 阀门, 2007(5): 15-17.
- [9] 翁滨. 静态扭矩传感器在阀门扭矩测试中的应用[J]. 阀门, 2016(3): 41-42.

- [10] 曾杰,刘才学,张思强,等. 电动阀门故障特征分析及检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13): 171-176.
- [11] 曲佳,何其伟,兴成宏. 远程监测与故障诊断系统中石油炼化企业的应用[J]. 风机技术, 2011(2): 59-61.
- [12] 李志鹏,王博男,孟旭,等. 电磁式扭矩传感器原理、研究现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 1-14.
- [13] 谢琛,傅骁,段发阶,等. 高精度反力矩测量系统研制及标定[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 29-37.
- [14] SMITH D A, ZUO D, MEHTA K C. Characteristics of wind induced net force and torque on a rectangular sign measured in the field [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 133: 80-91.
- [15] 谢艳,贾雨龙,郝红斌,等. 一种小型应变片电阻自动测量仪设计[J]. 电子设计工程, 2021, 29(20): 52-56.
- [16] 丰远,边健,刘慧,等. 基于电阻应变效应的惠斯通电桥测量重量实验[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2020, 20(10): 45-48.
- [17] CAI M C, SHI H J, YU T. A dislocation-based constitutive description of strain-rate effect on the deformation resistance of metals [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(4): 1087-1094.
- [18] 张丽琴,徐士涛. 惠斯通电桥原理及应用研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2018, 34(7): 88-90.
- [19] 郭鹏腾,王瑾. 基于改良惠斯通电桥和滑动滤波算法的电子秤设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 97-101.
- [20] CASTRO H F, CORREIA V, PEREIRA N, et al. Printed whcatstone bridge with embedded polymer based piczoresistive sensors for strain sensing applications[J]. Additive Manufacturing, 2018, 20: 119-125.
- [21] TAN X, LV Y J, ZHOU X Y, et al. High performance AlGa_N/Ga_N pressure sensor with a Wheatstone bridge circuit [J]. Microelectronic Engineering, 2020, 219: 111143.
- [22] YAN S H, CAO Z Q, GUO Z X, et al. Design and fabrication of full wheatstone-bridge-based angular GMR sensors[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1832.

作者简介

张亦孟, 硕士, 工程师, 主要研究方向为运载器电气综合与健康管理。

E-mail: zhangyimeng1990@vip.sina.com

林伟国(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为智能检测与故障诊断。

E-mail: linwg@mail.buct.edu.cn

马更生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为检测技术与自动化装置、控制系统综合设计等。

E-mail: 471841394@qq.com

高晓勇, 硕士, 研究员, 主要研究方向为检测技术与自动化装置、控制系统综合设计、电磁兼容、健康管理等。

E-mail: 1556267543@sina.com