

基于传感器的工业仪表信号采集与处理技术研究

张 琳

(广西壮族自治区特种设备检验研究院, 广西 南宁 530299)

摘要: 面对工业仪表信号的非平稳性, 研究基于传感器的工业仪表信号采集与处理技术, 提升工业仪表信号采集与处理能力。通过多传感器采集工业仪表信号, 采用改进自适应融合算法融合多传感器采集的工业仪表信号; 通过希尔伯特-黄变换方法分析融合后传感器的工业仪表信号, 利用经验模态分解工业仪表信号为多个 IMF 分量, 对每个分量实施 Hilbert 变换后, 得出 Hilbert 边际谱与 Hilbert 谱, 实现工业仪表信号采集与处理。实验结果表明: 该方法传感器的灵敏度均高于 0.9 ($v/^{\circ}C$), 具有高灵敏度的传感器能够更准确地感知和测量工业仪表物理量的变化。该方法的测量平均误差均低于 0.42% , 符合工业仪表信号采集和处理的需求, 提升工业仪表信号采集与处理能力。

关键词: 传感器; 工业仪表; 信号采集; 信号处理技术; 信号融合; 信号分析

中图分类号: TP311

文章编号: 1000-0682(2024)03-0111-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.020

Research on sensor based signal acquisition and processing technology for industrial instruments

ZHANG Lin

(Guangxi Special Equipment Inspection and Research Institute, Guangxi Nanning 530299, China)

Abstract: In the face of the non-stationary nature of industrial instrument signals, research on sensor based industrial instrument signal acquisition and processing technology is needed to enhance the signal acquisition and processing capabilities of industrial instruments. By collecting industrial instrument signals through multiple sensors, an improved adaptive fusion algorithm is used to fuse the industrial instrument signals collected by multiple sensors. By analyzing the industrial instrument signal of the fused sensor using the Hilbert Huang transform method, the industrial instrument signal is decomposed into multiple IMF components using empirical mode decomposition. After implementing the Hilbert transform on each component, the Hilbert marginal spectrum and Hilbert spectrum are obtained, achieving the acquisition and processing of industrial instrument signals. The experimental results show that the sensitivity of the sensors in this method is higher than 0.9 ($v/^{\circ}C$), and sensors with high sensitivity can more accurately perceive and measure changes in physical quantities of industrial instruments. The average measurement error of this method is less than 0.42% , which meets the requirements of industrial instrument signal acquisition and processing, and improves the ability of industrial instrument signal acquisition and processing.

Keywords: sensor; industrial instruments; signal acquisition; signal processing technology; signal fusion; signal analysis

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 广西壮族自治区科技厅科技计划项目—检验检测科技服务业集聚区特种设备公共服务平台建设(AD21238035)

第一作者: 张琳(1979—), 女, 黑龙江牡丹江人, 汉族, 硕士, 高级教师, 主要从事特种设备检验研究。

0 引言

工业生产过程的监测与控制直接关系工业生产的安全^[1-2]。工业仪表作为工业生产中的重要组成

部分,其信号采集与处理技术的优劣直接影响到工业生产的运行效果。因此,研究工业仪表信号采集与处理技术具有重要意义。工业仪表是一种将工业生产过程中的各种参数,如温度、压力、流量、电压等物理量转换为电信号的装置。这些电信号经过处理后^[3],可以反映出工业生产过程的实时状态,为生产人员提供重要的参考信息,以便于及时调整生产操作,保证生产过程的顺利进行。

因此相关学者开始对工业仪表信号采集与处理技术展开深入研究,王宇等人研究光频扫描的信号快速采集与处理方法^[4],采用光频扫描技术采集工业仪表信号,利用傅里叶变换实施信号处理。但该方法在某些工业环境中,可能会受到其他光源或电磁波的干扰,导致信号采集的误码率增加。王新强等人研究空间外差的信号处理方法^[5],利用空间外差超光谱仪采集工业仪表信号,通过相位解调法对采集信号实施处理。但该方法的缺点在于它需要高精度的相位检测,这可能需要昂贵的设备和复杂的电路设计。同时,相位解调的精度也可能受到信号噪声和失真的影响。

传感器技术增加信息可靠性,在各领域应用广泛。针对以往工业仪表信号采集与处理技术存在问题,研究基于传感器的工业仪表信号采集与处理技术,提升工业仪表信号采集与处理效果。

1 传感器的工业仪表信号采集与处理技术

1.1 信号采集

工业仪表信号包括温度信号、电压信号、流量信号、振动信号等,因此需要设置不同类型的多个传感器分别采集工业仪表的各种信号,提高工业仪表信号采集的质量。其中温度传感器负责采集工业仪表温度信号^[6],而光敏传感器主要采集工业仪表电压信号。光敏传感器结构图,见图 1。

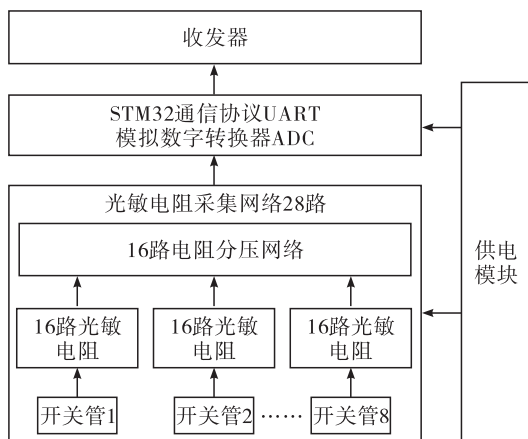


图 1 光敏传感器结构图

由图 1 可知,光敏传感器由收发器、供电模块、光敏电阻采集网络、STM32 UART 通信协议与模拟数字转换器 ADC 组成。光敏电阻采集网络为 16 路电阻分压网络,该网络的三极管数量为 8 个。通过主控核心芯片负责控制开关管 1 至开关管 8,为每个子采集电路提供电能,提供 ADC 采集数据的效率。

通过光敏传感器采集工业仪表的电压信号,其信号采集流程,见图 2。

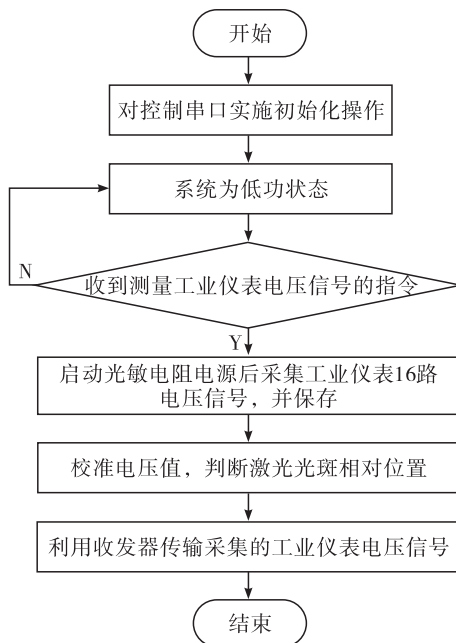


图 2 光敏传感器采集工业仪表的电压信号流程图

分析图 2 可知,光敏传感器接收控制器采集工业仪表的电压信号指令时,打开开关管 1,并关闭另外 7 路开关管,给 16 个光敏电阻提供电能供应,采集工业仪表的 16 个电阻电压。经过 8 次循环,完成工业仪表的 128 路电阻电压信号的采集工作。采用软件校准技术明确激光光斑位置,将采集工业仪表的电压信号经收发器传输到上位机^[7-9],由上位机中信号处理方法对工业仪表的电压信号实施处理。

1.2 信号处理

1.2.1 信号融合

通过多传感器采集工业仪表信号,通过改进自适应信号融合算法对多传感器采集的工业仪表信号实施融合,为传感器的工业仪表信号分析奠定基础。设置采集工业仪表信号的传感器数量为 m 个,每个传感器的加权系数都存在差异,其中 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2$ 分别表示 m 个传感器方差,按照各传感器采集的工业仪表信号测量值 Y_1, Y_2, \dots, Y_m ,通过自适应形式

寻找最佳加权因子 V_1, V_2, \dots, V_m , 输出最优的工业仪表信号融合值 \hat{Y} , \hat{Y} 表达式如下:

$$\hat{Y} = \sum_{q=1}^m V_q Y_q, q = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

加权因子满足条件为:

$$\sum_{q=1}^m V_q = 1 \quad (2)$$

总均方误差计算公式如下:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= E[(Y - \hat{Y})^2] \\ &= E[2 \times \sum_{q=1, o=1}^m V_q V_o (Y - Y_q)(Y - Y_o) + \\ &\quad \sum_{q=1}^m V_q^2 (Y - Y_q)^2] \end{aligned} \quad (3)$$

因各传感器采集的工业仪表信号测量值 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 为独立形式, 同时估值 Y 没有偏差, 此时 $E(Y - Y_q)(Y - Y_o) = 0, (q = 1, 2, \dots, m; o = 1, 2, \dots, m; q \neq o)$, 因此总均方误差简化公式如下:

$$\sigma^2 = E[\sum_{q=1}^m V_q^2 (Y - Y_q)^2] = \sum_{q=1}^m V_q^2 \sigma_q^2 \quad (4)$$

当总均方误差为最小情况下, 加权因子计算公式为:

$$V_q^* = 1/\sigma_q^2 \sum_{q=1}^m 1/\sigma_q^2 \quad (5)$$

最小均方误差表达式如下:

$$\sigma_{\min}^2 = 1/\sum_{q=1}^m 1/\sigma_q^2 \quad (6)$$

当估计值为常量时, 通过传感器采集的工业仪表信号均值可以作为此时最优估计值, 其表达式为:

$$Y'_q(g) = (1/g) \sum_{i=1}^g Y_q(i) \quad (7)$$

其中: 采集工业仪表信号时间点总数用 g 描述。目前真值估计值表达式如下:

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^m Y'_q(g) V_q \quad (8)$$

总均方误差表达式如下:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= E[\sum_{q=1}^m V_q^2 (Y - Y'_q(g))^2] \\ &= (1/g) \sum_{q=1}^m V_q^2 \sigma_q^2 = (1/g) \sigma^2 \end{aligned} \quad (9)$$

当通过 $Y'_q(g)$ 实施真值估计情况下, g 与采集工业仪表信号数量呈正比, 当采集工业仪表信号数量增加时, g 升高, 此时 σ^2 会随之降低。

但是自适应信号融合算法对于工业仪表部分特殊信号融合效果不佳^[10], 提出改进自适应信号融合

算法得出工业仪表信号最优估计值。

$$Y'_q(g) = \begin{cases} \beta Y_q(g) + (1-\beta) Y_q(g-1) & (\beta \in [0.1, g \geq 2]) \\ Y_q(g) & (g=1) \end{cases} \quad (10)$$

其中: β 表示均衡因子。

由公式 (10) 得出工业仪表信号最优估计值, 以 g 时刻传感器采集工业仪表信号相关性, 降低传感器测量工业仪表信号时生成的随机误差, 因此真值估计值表达式为:

$$Y' = \sum_{q=1}^m V_q Y'_q(g) \quad (11)$$

总均方误差表达式更新为:

$$\sigma'^2 = E[\sum_{q=1}^m V_q^2 (\beta^2 \left(\frac{(1-\beta)^{2g} - 1}{(1-\beta)^{2g} - 1} \right) (Y - Y_q)^2)] \quad (12)$$

均衡因子取值影响最优估计值的求解效率和信号融合效果^[11], 采用上述方法得出融合后工业仪表信号的最优估计值接近真值, 提高工业仪表信号处理能力^[12]。

1.2.2 传感器的工业仪表信号分析

采用希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 方法分析融合后传感器的工业仪表信号, 是信号处理有效的手段。该方法第一步是通过经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 工业仪表信号^[13]。EMD 分解工业仪表信号的具体过程如下:

(1) 寻找工业仪表信号中全部局部极小值点与极大值点;

(2) 通过样条插值函数将工业仪表信号中全部局部极大值连在一起生成上包络线 $s_{\max}(t)$;

(3) 计算局部极大值并组成下包络线 $s_{\min}(t)$, 两个包络线包括工业仪表信号全部信息;

(4) a_1 表示两个包络线平均值, 求出工业仪表信号 $y(t)$ 和两个包络线平均值的差 h_1 , 其表达式如下:

$$h_1 = y(t) - a_1 \quad (13)$$

(5) 判断 h_1 是否符合 IMF 条件, 若符合 IMF 条件, h_1 是第一个 IMF 分量; 若不符合 IMF 条件, 需要将 h_1 设置成传感器采集原始工业仪表信号, 重复步骤 (1) (2) 直至在迭代 l 次后, 其差值 $h_{1(l)}$ 是 IMF 分量后终止迭代, 表达式如下:

$$h_{1(l)} = b_1(t) \quad (14)$$

(6) 计算剩余工业仪表信号, 具体计算公式如下:

$$w_1(t) = y(t) - b_1(t) \quad (15)$$

(7) 此时原始工业仪表信号为 $w_1(t)$, 重复步骤(1)~(3), 当得出函数值符合以下条件时终止该步骤, 终止条件表达式如下:

$$\begin{aligned} w_1(t) - b_2(t) &= w_2(t) \\ w_2(t) - b_3(t) &= w_3(t) \\ &\vdots \\ w_{N-1}(t) - b_N(t) &= w_N(t) \end{aligned} \quad (16)$$

(8) 在求出 N 个符合 IMF 条件分量后, 得出工业仪表信号, 其表达式如下:

$$y(t) = w_N(t) + \sum_{i=1}^N b_i(t) \quad (17)$$

其中: 残余分量用 $w_N(t)$ 描述; 第 i 个 IMF 分量用 $b_i(t)$ 描述。

第二步是对各 IMF 分量实施 Hilbert 变换, 处理工业仪表信号每个 IMF 分量的瞬时幅值与瞬时频率^[14], 求出 Hilbert 边际谱与 Hilbert 谱。对公式(16)内 $b_i(t)$ 实施 Hilbert 变换, 其表达式为:

$$\hat{z}_i(t) = 1/\pi \int_{-\infty}^{\infty} [b_i(\eta)/t - \eta] d\eta \quad (18)$$

其中: 变量用 η 描述。

$b_i(t)$ 与 $\hat{z}_i(t)$ 组成解析工业仪表信号 $s_i(t)$, 其表达式如下:

$$s_i(t) = b_i(t) + \hat{z}_i(t) = c_i(t) e^{j\varepsilon_i(t)} \quad (19)$$

其中: 瞬时相位用 $\varepsilon_i(t)$ 描述; 瞬时幅值用 $c_i(t)$ 描述。

工业仪表信号信号的瞬时频率表达式如下:

$$f_i(t) = \frac{d\varepsilon_i(t)}{dt} * \frac{1}{2\pi} \quad (20)$$

幅值时频分布是 Hilbert 谱, 用 $H(\omega, t)$ 描述, 其表达式如下:

$$H(\omega) = RP \left[\sum_{i=1}^N c_i(t) e^{j\omega \int_0^t c_i(t) dt} \right] \quad (21)$$

其中: 工业仪表信号的实部用 RP 描述。Hilbert 谱颜色与工业仪表信号幅值呈正比。

Hilbert 边际谱表示工业仪表信号幅值与频率之间的关系, 其表达式如下:

$$\begin{aligned} h(\omega) &= \int_0^T H(\omega, t) dt \\ &= \int_0^T RP \left[\sum_{i=1}^N c_i(t) e^{j\omega \int_0^t c_i(t) dt} \right] dt \end{aligned} \quad (22)$$

其中: 工业仪表信号采集时间总和用 T 描述。

通过上述流程得出工业仪表信号分析结果可以作为工业仪表运行状态监测、故障检测的数据基础^[15]。

3 实验分析与结果

以某工业企业的工业仪表作为实验对象。该工

业仪表类型分布为液位计、温度计、流量计、压力表等。这些工业仪表主要表示工业设备的运行情况, 因此采用该文方法对工业仪表信号实施采集与处理, 验证该文方法的应用效果。实验使用的传感器包括光敏传感器、温度传感器、压力传感器、湿度传感器等多种传感器, 主要传感器参数, 见表 1 与表 2。

表 1 光敏传感器参数设置

参数	取值
传感器型号	SMD1206
峰值感光波长	860 nm
功耗	70 mW
光电流	20 ~ 45 μ A
发射极电压	22 V
集电极电压	6 V
关闭时间	15 ms
工作温度	-30 至 80 $^{\circ}$ C
开启时间	10 ms
暗电流	0.2 μ A

表 2 温度传感器参数设置

参数	取值
传感器型号	DS18B20
供电电压	4 ~ 6 VDC
测温区间	-50 至 120 $^{\circ}$ C
最低分辨率	0.061 5 $^{\circ}$ C
测温精度	± 0.5 $^{\circ}$ C
引线长度区间	0.05 m ~ 500 m
尺寸	6 \times 30 mm

选取传感器灵敏度作为测试该文方法的工业仪表信号采集效果的评价指标, 传感器的灵敏度越高, 表示传感器对于外界信号的变化越敏感, 能够检测到更微小的变化。设置在采样频率为 800 kHz, 灵敏度高于 0.9 (V/ $^{\circ}$ C) 时, 表明工业仪表信号采集效果最佳, 在不同频率下, 测试各种类型传感器的灵敏度, 测试结果见图 3。

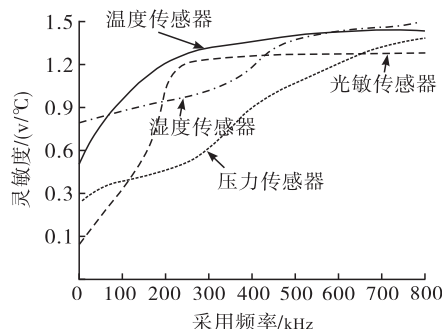


图 3 传感器的灵敏度测试结果

分析图3可知,该文方法采用的传感器的灵敏度随着采样频率的增加大体呈上升趋势,在采样频率为800 kHz时,温度传感器的灵敏度为1.4($\text{v}/^{\circ}\text{C}$)、光敏传感器的灵敏度为1.2($\text{v}/^{\circ}\text{C}$)、湿度传感器的灵敏度为1.5($\text{v}/^{\circ}\text{C}$)、压力传感器灵敏度为1.3($\text{v}/^{\circ}\text{C}$),说明该文方法采用的传感器均满足实验设置在采样频率为800 kHz,灵敏度高于0.9($\text{v}/^{\circ}\text{C}$)的条件,高灵敏度的传感器能够更准确地感知和测量工业仪表物理量的变化,能够捕捉到更细微的变动。

以光敏传感器为例,通过光敏传感器采集2023年3月1日—2023年3月10日的工业仪表电压值,设置电流1 mA,经过改进自适应信号融合算法得出工业仪表信号最优估计值即工业仪表电阻值,得出该文方法采集工业仪表电阻值和工业仪表电阻实际误差情况,对比结果见表3。

表3 采集电阻值和工业仪表电阻实际值误差对比

采集工业仪表信号时间	基本电压值/ mV	采集工业仪表电阻值/ Ω	实际工业仪表电阻值/ Ω	误差/%
2023/3/1	45.69	45.66	45.98	0.70
2023/3/2	45.89	45.88	45.99	0.24
2023/3/3	46.96	46.81	46.92	0.23
2023/3/4	47.95	47.02	47.51	1.03
2023/3/5	55.29	55.08	55.26	0.33
2023/3/6	66.15	66.02	66.12	0.15
2023/3/7	77.26	77.16	77.26	0.13
2023/3/8	88.13	88.09	89.12	1.16
2023/3/9	120.36	120.12	120.34	0.18
2023/3/10	150.02	149.88	149.92	0.03

分析表3可知,采用该文方法的传感器采集工业仪表电阻值,并利用改进自适应信号融合算法得出工业仪表信号最优估计值即工业仪表电阻值,与实际工业仪表电阻值相比,测量平均误差均低于0.42%。说明该文方法可真实反映出工业仪表电阻值,符合工业仪表信号采集和处理的需求。

通过传感器采集工业仪表的振动信号,采用该文的HHT方法分析处理采集工业仪表的振动信号,首先利用EMD分解工业仪表的振动信号,分解后的振动信号如图4所示。

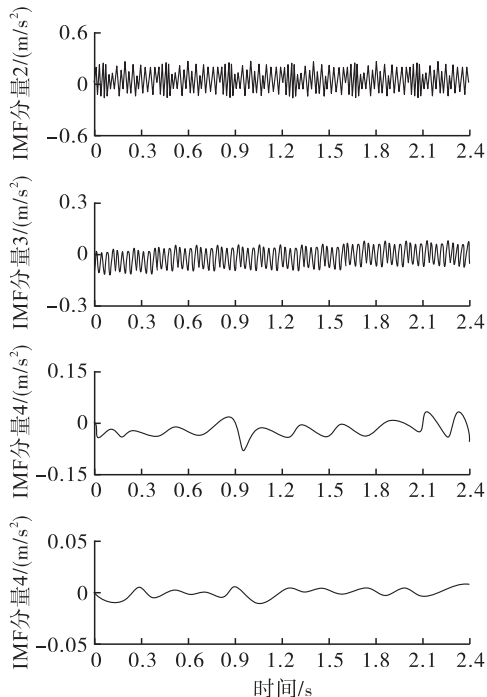
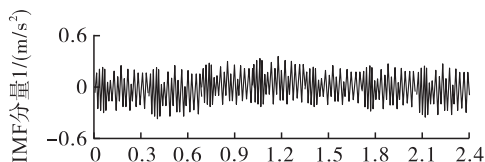


图4 EMD分解工业仪表的振动信号结果

分析图4可知,采用EMD方法将工业仪表的振动信号分解为4个IMF分量和1个残余分量,在IMF分量4和残余分量可明确分析出工业仪表振动信号波动加大,由此表明工业仪表可能存在振动故障信号。

需要对每个分量进行Hilbert变换,Hilbert变换描述工业仪表信号频率与时间关系,工业仪表振动信号的Hilbert谱,见图5。

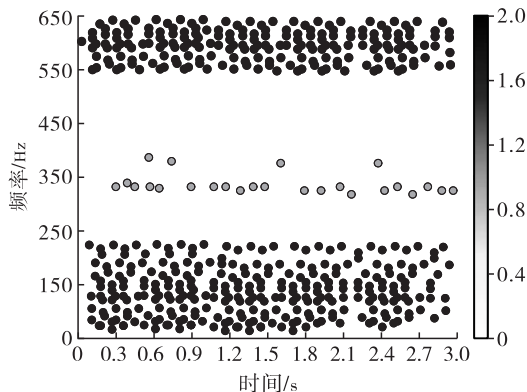


图5 工业仪表振动信号 Hilbert 谱

分析图5可知,工业仪表正常信号频率受工业仪表故障信号频率成分影响,工业仪表振动故障信号的频率主要集中在550~650 Hz与0~250 Hz,信号幅值最大,呈现分布不规则现象。依据Hilbert谱得出工业仪表振动信号Hilbert边际谱,工业仪表振动信号能量主要集中在低频高频部分,说明经该文方法信号分析得出该工业仪表振动信号为故障信号。

4 结论

该文研究了基于传感器的工业仪表信号采集与处理技术,通过对传感器技术和信号处理技术等方面的探讨,得出以下结论:

(1)传感器技术在工业仪表信号采集与处理中发挥着重要作用。通过对各种物理量的测量和转换,传感器能够将工业生产过程中的各种参数转换为电信号,准确采集工业仪表信号;

(2)通过该文信号分析方法分析处理工业仪表振动信号并判断工业仪表振动信号的类型,作为评价工业仪表运行状态的依据;

(3)基于传感器的工业仪表信号采集与处理技术具有广泛的应用前景。在工业生产中,通过对采集工业仪表信号分析得出设备状态,可以实现设备的远程监控,提高生产效率和安全性。

因此,基于传感器的工业仪表信号采集与处理技术是工业自动化和智能化发展的重要支撑,持续研究和改进该技术对于提高工业生产效率和质量具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘家乐,吴怀宇,陈志环.改进 YOLOv3 的工业指针式仪表检测方法[J].计算机工程与设计,2021,42(07):2001-2008.
- [2] 赵耀,霍雨佳,王军,等.核电厂安全级仪表在线监测系统技术研究[J].核动力工程,2021,42(02):183-187.
- [3] 张旻,吴琼,滕云田,等.激光干涉绝对重力仪数据采集与处理的时间优化方法[J].仪器仪表学报,2021,41(08):130-136.
- [4] 王宇,吴腾飞,周强,等.光频扫描干涉测距信号快速采集与处理方法[J].激光与光电子学进展,2023,60(01):146-155.
- [5] 王新强,胡峰,熊伟,等.基于空间外差的拉曼信号处理方法研究[J].光谱学与光谱分析,2022,42(01):93-98.
- [6] 杜光月,刘美丽,周蒙,等.基于多 DS18B20 传感器阵列的数据采集方法研究[J].电子器件,2023,46(01):16-21.
- [7] 张维星,党超群,张锁平,等.基于多传感器融合的波浪谱数据获取与传输方法研究[J].海洋与湖沼,2023,54(03):645-652.
- [8] 张韬,刘康,廖映华.基于 EtherCAT 协议的 FMS 多设备实时数据采集技术[J].机床与液压,2022,50(01):112-116.
- [9] 张合生,焦鹏,胡琪睿,等.基于 Jaya 优化标定的高精度数据采集方法[J].上海大学学报(自然科学版),2022,28(03):361-371.
- [10] 朱垠,宋欣,何建祥,等.基于小波降噪和自适应加权法的温室数据融合[J].江苏农业科学,2021,49(05):180-186.
- [11] 杨华芬,陈斌.大数据框架下基于改进自适应滤波算法的机械故障信号处理[J].机床与液压,2021,49(02):175-180.
- [12] 刘康,何明浩,韩俊,等.基于多传感器的雷达对抗侦察数据融合算法[J].系统工程与电子技术,2023,45(01):101-107.
- [13] 柴文浩,杨雅勋,张宇航,等.基于经验模态分解的预应力孔道缺陷信号分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2023,59(01):129-135+142.
- [14] 于森,张耀鲁,徐泽辰,等.基于 MEEMD-HHT 的分布式光纤振动传感系统信号特征提取方法[J].红外与激光工程,2021,50(07):207-218.
- [15] 谭光兴,王雨辰,符丹丹,等.基于中值滤波的 SBW 信号处理及控制策略[J].计算机仿真,2021,38(07):134-138.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277
网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱: gyybbjb@126.com