

基于 MEMS 技术的工业设备振动监测系统研究

信敬科

(江苏安全技术职业学院 智能制造与应急装备学院, 江苏 徐州 221011)

摘要:随着工业设备监测节点的大规模增加以及监测时长的提升,如何在大规模振动信号中进行有效监测成为当前亟待解决的问题。因此,研究提出了一种微机电系统技术基础上的工业设备振动监测系统。通过微机电系统技术的加速度计以及哈希算法进行了监测系统终端设计,并结合边缘计算进行了系统程序开发。验证显示,研究提出的系统振动信号频域比与东华 DH5981 型号的数据采集卡增加了 4.49%,且提出的监测系统计算出的哈希码与实际振动信号一致,多个信号的监测评估结果与实际结果一致率高达 100%。结果表明,研究提出的微机电系统技术基础上的工业设备振动监测系统在大规模振动信号监测中具有可行性和有效性。利用微机电系统技术进行振动信号的采集,并结合哈希算法进行信号的处理与计算在工业设备的振动信号监测中具有积极的实践意义。

关键词:MEMS; 振动信号监测; 哈希算法; 工业设备; 信号采集

中图分类号:TP227

文章编号:1000-0682(2024)06-0075-06

文献标识码:A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.014

Research on industrial equipment vibration monitoring system based on MEMS technology

XIN Jingke

(College of Intelligent Manufacturing and Emergency Equipment, Jiangsu College of Safety Technology, Jiangsu Xuzhou 221011, China)

Abstract: With the large-scale increase of industrial equipment monitoring nodes and the improvement of monitoring duration, how to effectively monitor large-scale vibration signals has become an urgent problem to be solved. Therefore, a vibration monitoring system for industrial equipment based on Micro Electro-Mechanical System (MEMS) technology has been proposed in the study. The terminal of the monitoring system is designed through the accelerometer and hash algorithm of MEMS, and the system program is developed combined with edge computing. Verification shows that the frequency domain of the proposed system vibration signal has increased by 4.49% compared to the data acquisition card of Donghua DH5981 model, and the hash code calculated by the proposed monitoring system is consistent with the actual vibration signal. The consistency rate between the monitoring and evaluation results of multiple signals and the actual results is as high as 100%. The results indicate that the industrial equipment vibration monitoring system based on the proposed MEMS is feasible and effective in large-scale vibration signal monitoring. The use of MEMS for vibration signal acquisition, combined with hash algorithm for signal processing and calculation, has positive practical significance in vibration signal monitoring of industrial equipment.

Keywords: MEMS; vibration signal monitoring; hash algorithm; industrial equipment; signal acquisition

0 引言

随着科学技术的不断发展,工业设备越来越智能化,且集成规模越来越庞大。然而,工业设备的安全运行与性能保障问题逐渐突出,长时间工作、复杂工况条件,以及糟糕的运行场景导致工业设备的健

收稿日期:2024-05-07

基金项目:中国职业技术教育学会教学工作委员会职业教育教学改革项目(1910318)

第一作者:信敬科(1986—),男,汉,山东济宁人,讲师,本科,研究方向为智能机电、智能电梯。E-mail:motedance@163.com

康状况日益严峻^[1-2]。而工业设备的运行与企业的生产效能、人员安全以及产品质量等息息相关^[3]。因此,进行工业设备的监测研究具有极大的意义。张宏斌等针对工业设备的关键部件故障频发情况,在 LabView 诊断平台基础上进行了故障振动测试系统设计^[4]。李青等在加权证据理论基础上进行了齿轮箱油液振动故障诊断方法探索^[5]。相关研究者对工业设备的振动监测展开了多方面的研究,并取得了不错的成果。然而,随着智能技术的发展,微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)等技术逐渐被应用于工业设备的振动监测中。MEMS 是微电子技术基础上的微小型高科技装置,其具有小型化、低功耗、可靠性高、经济效益高且易于集成的优点,在消费电子、汽车工业、航空航天等领域得到了广泛的应用^[6]。因此,研究针对传统加速传感器在规模布置方面存在的局限性问题,在 MEMS 技术的基础上进行了工业设备振动监测系统设计。首先在 MEMS 技术的加速度计基础上进行工业设备振动信号采集,其次利用哈希算法、数据存储与通信等进行振动信号计算程序开发。针对振动信号的计算问题,研究进行了边缘计算中断的嵌入式程序设计。

1 基于 MEMS 技术的工业设备振动监测系统设计

1.1 基于 MEMS 技术的工业设备振动监测系统终端

为了进行有效的工业设备振动监测,研究在 MEMS 技术基础上进行了工业设备振动监测系统设计。首先利用 MEMS 进行振动信号的数据采集,其次利用感知哈希算法(Perceptual Hash Algorithm, PHA)进行采集数据的处理和存储以及通信。具体终端结构如图 1 所示。

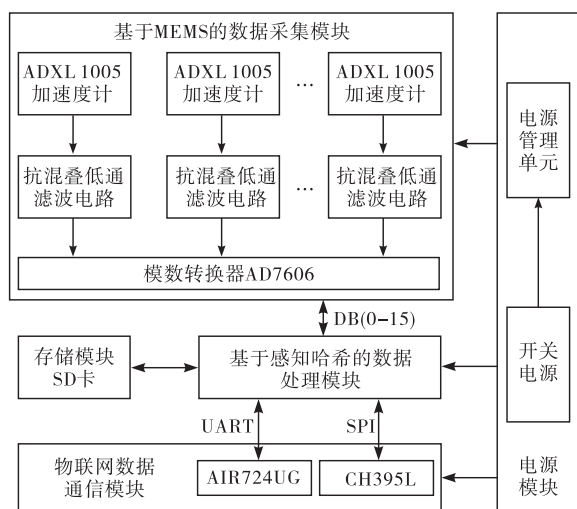


图 1 基于 MEMS 技术的工业设备振动监测系统终端结构图

图 1 中,该系统主要由数据采集、数据处理、物联网数据通信、数据存储和电源等 5 个模块构成。为了解决振动信号监测系统的低耗能、体积小、成本低以及便于大规模布设的需求,数据采集模块由 Adxl1005 型号的 MEMS 加速度计构成,并利用 8 个通道的同步采样芯片进行模数转换(Analog-to-Digital Conversion, ADC)。与传统的加速度计相比, MEMS 技术基础上的加速度计在应用过程中不需要额外供应恒流源电压,在大规模的工业设备振动监测中易于进行布设^[7-8]。同时,在 PHA 基础上的数据处理模块利用 TMS320F28335 芯片作为核心的计算环节。该芯片通过 DB(0-15) 并行串接口进行振动信号的接收,并通过边缘计算进行振动信号的设备状态哈希码计算。在此基础上,进一步将得到的哈希码通过串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI)存储到存储模块中,或通过 SPI/通用异步收发器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)接口传输给物联网数据通信模块。其中, MEMS 技术基础上的加速度计两侧电容的大小和惯性质量块之间的位置移动关系数学表达式如式(1)所示:

$$\begin{cases} A = \frac{\kappa_1 \kappa_2 C}{D - y} \\ B = \frac{\kappa_1 \kappa_2 C}{D + y} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 和 B 分别表示加速度计两侧的电容; κ_1 表示真空的介电常数; κ_2 表示相对的介电常数; C 表示极板之间的有效面积; D 表示极板之间的原始距离长度; y 表示惯性质量块的位置移动距离。输出的电压与质量块之间的位置移动关系数学表达式如式(2)所示:

$$z = \frac{y}{D} x \quad (2)$$

式中: z 表示输出电压; x 表示输入电压。因此,根据胡克定律和牛顿第二定律公式,进一步得出加速度和电压之间的关系数学表达式^[9-10]。具体如式(3)所示:

$$\begin{cases} F = ly = -mv \\ v = \frac{ly}{m} = \frac{lDz}{mx} \end{cases} \quad (3)$$

式中: F 表示作用力; l 表示弹簧具备的弹性系数数值; m 表示质量块的质量; v 表示加速度。在系统的数据处理模块,研究利用数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)型号 TMS320F28335 进行振动

信号的数据处理。该处理器配备有硬件乘法器,在一个单一指令的周期内,能够实现两次乘法运算^[11-12]。同时,研究对 TMS320F2833 处理器布设了 30 MHz 的外部晶振作为时钟源,并引入 2 个 22 pF 的贴片电容进行接地,以保证该处理器在运行过程中进行振动信号处理的安全性和有效性。对于系统的数据存储模块,研究利用具有 32 GB 内存容量的 Micro 安全数字卡 (Secure Digital memory card, SD) 进行数据存储。物联网数据通信模块则由 CH395L 芯片构成,同数据处理模块一样,也布设了 30 MHz 的外部晶振作为该芯片的时钟源。电源模块的印刷电路板采用“先复杂后简单、先大规模后小面积”的原则进行布置。在系统中断的电源线路布设过程中,退耦电容与电源的芯片之间距离应接

近,且线路占地面积应降到最低。由于两条走线之间的距离越大越有利于走线串扰发生概率的降低。因此,研究设定相近的两条走线之间的距离比走线的 3 倍线路宽度更大。

1.2 基于 MEMS 技术的工业设备振动监测系统程序

根据前文提出的 MEMS 技术基础上的工业设备振动监测系统终端架构,研究进一步进行了工业设备振动监测系统的程序开发与设计。由于工业设备的振动监测系统不仅兼具采集、保存和通信等功能,还承担着采集信号的处理和计算任务。因此,研究在 C 语言的基础上进行了监测系统的程序开发。首先进行了振动信号的采集程序开发。其中,ADC 进行数据读取与转换的流程如图 2 所示。

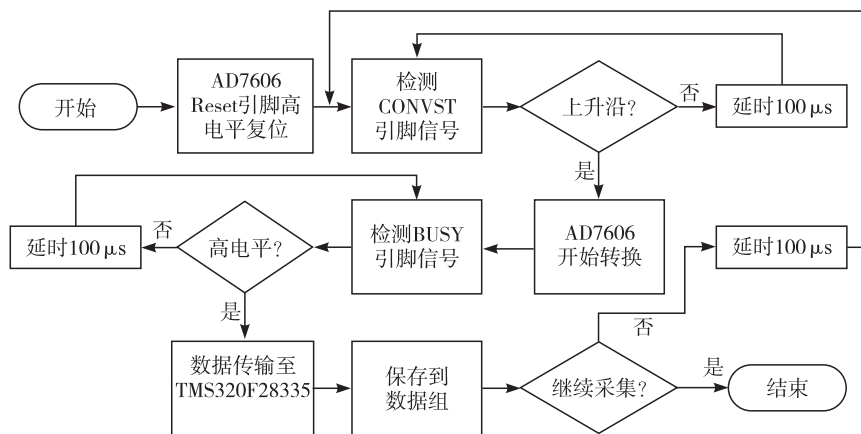


图 2 振动监测系统中 ADC 数据读取与转换流程

图 2 中,AD7606 芯片根据 DSP 控制的信号时序进行数据的读取与转换。通过引脚进行高电平的复位,并对引脚信号进行检测,判断其是否处于上升沿状态。若是,AD7606 开始进行转换,并检测 Busy 的引脚信号,判断其是否为高电平。反之延迟 100 μ s,重新进行 Convst 引脚信号的检测。若 Busy 的引脚信号输入高电平,则将数据传输至 TMS320F28335 芯片,并将数据保存到数据组中。反之则延迟 100 μ s,重新进行 Busy 引脚信号的检测。由于 TMS320F28335 不具有安全数字输入输出接口,因此研究利用串行外设接口中的 SD 卡进行数据存储,并将数据文件保存到文件分配表 (File Allocation Table) 系统^[13-14]。研究设计的工业设备振动监测系统终端采用 FAT32 文件系统对 SD 卡的嵌入,同时,利用 AIR724 进行 DSP 数据的接收、消息队列遥测传输的连接以及数据的无线发送,最后利用 PHA 进行振动信号的感知与计算。PHA 流程如图 3 所示。

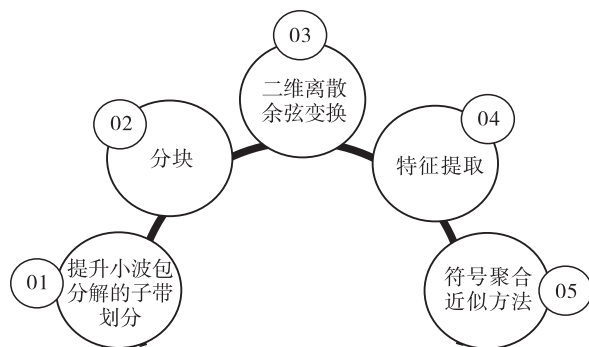


图 3 振动监测系统重 PHA 感知数据流程

从图 3 可以看出,PHA 首先将振动信号的数据利用提升小波包分解进行子带的划分。提升小波包分解由分裂、预测和更新构成。将原始信号进行分类,并根据序列的顺序进行偶数和奇数样本序列的分裂。根据分裂的序列,构造预测算子进行预测,并降低振动信号间的相关性。其次构造更新算子进行序列的更新,以得到近似的系数。具体公式如式 (4) 所示:

$$\begin{cases} p_{i,e}(n) = p_i(2n) \\ p_{i,o}(n) = p_i(2n+1) \\ d_{i+1} = p_{i,o} - q(p_{i,e}) \\ p_{i+1} = p_{i,e} + W(d_{i+1}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_i 表示样本序列; $p_{i,e}$ 表示偶数样本序列; $p_{i,o}$ 表示奇数样本序列; n 表示分裂次数; q 表示预测算子; d_{i+1} 表示细节系数; W 表示更新算子; p_{i+1} 表示近似系数。在进行振动信号的提升后, 利用二维的离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 进行数据冗余处理。利用 DCT 进行大规模的振动信号处理, 有利于降低振动信号数据的冗余程度以及计算复杂程度。且 DCT 比离散傅里叶变换相比计算耗能更低, 速度更快。DCT 数学表达式如式 (5) 所示:

$$T(s, r) = \frac{2}{\sqrt{MN}} \sum_{a=0}^{M-1} \sum_{b=0}^{N-1} f(a, b) g(s) g(v) \cos \frac{(2a+1)s\pi}{2M} \cos \frac{(2b+1)r\pi}{2N} \quad (5)$$

式中: M 和 N 表示矩阵二维尺寸; $T(s, r)$ 表示离散余弦变换后的系数; $f(a, b)$ 表示原始信号的像素值; $g(s)$ 和 $g(v)$ 表示归一化因子; s 和 r 表示频域的坐标。在此基础上, 从子带系数中进行特征向量

的提取, 并进行级联操作, 得到原始信号基础上的子带特征向量。最后利用符号聚合近似表示 (Symbolic Aggregate approach - Ximation, SAX) 进行数据感知处理。利用 SAX 进行子带特征向量的哈希码值计算, 并降低维数以便传输^[15]。SAX 首先利用标准归一化方法对时间序列进行处理, 以得到均值和标准差分别为 0 和 1 的新序列。其次将序列按照一定的规则分成若干个段, 对每个段内的数据进行聚合, 最终得到一个近似的结果。并利用均值大小的帧的平均值进行原始的时间序列表示, 并进行离散化, 将分布空间划分为多个区域, 用符号进行表示。

2 基于 MEMS 技术的工业设备振动监测系统验证分析

为了验证研究提出的 MEMS 技术基础上的工业设备振动监测系统有效性, 研究以齿轮接触疲劳试验机进行了系统终端有效性验证。设定电机的转速为 1480 r/min, 加载的扭矩为 420 N·M, 振动信号的采样频率为 20 kHz。同时, 研究引入东华 DH5981 型号的数据采集卡进行振动监测系统的性能对比。两种方法采集到的振动信号如图 4 所示。

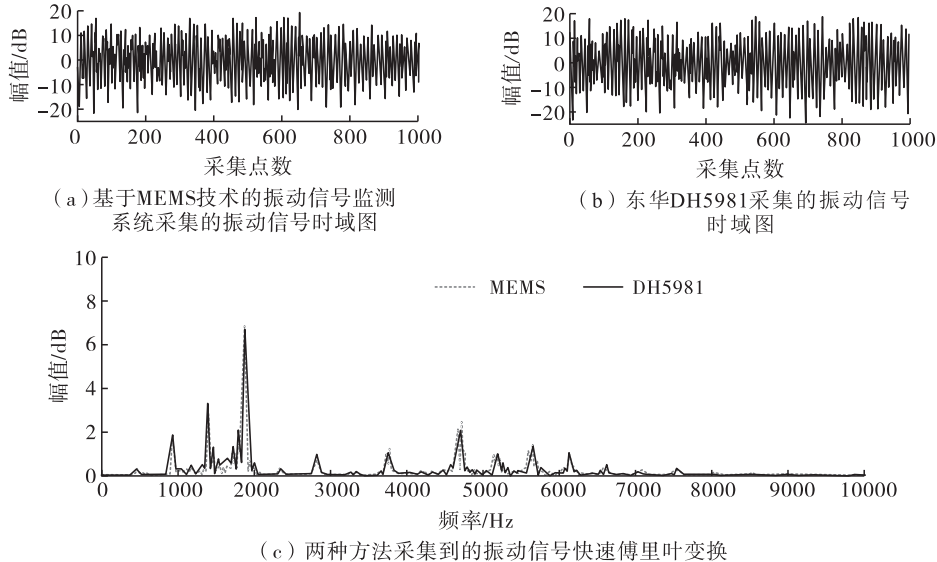


图 4 两种方法采集到的振动信号对比

从图 4(a) 和 (b) 两种方法采集到的振动信号时域图可以看出, 研究提出的振动监测系统采集到的振动信号幅值为 19.77 dB, 均值为 -0.02 dB, 东华 DH5981 采集到的振动信号时域图幅值为 18.92 dB, 均值为 -0.01 dB。整体来看, 两种方法采集到的振动信号包络趋向一样。研究提出的监测系统幅值比东华 DH5981 增加了 4.49%。对比图 4(c) 两种方

法采集到的振动信号快速傅里叶变换结果可以看出, 两种方法出现大倍数频率现象的频率在 467.75 Hz 附近, 与实际齿轮接触疲劳机的理论啮合频率相近。这说明研究在 MEMS 技术基础上提出的工业设备振动监测系统采集的振动信号有效。在此基础上, 研究利用美国凯斯西储大学轴承数据库中的振动信号进一步进行了监测性能验证。为了证实提出的振动监

测系统可行性,首先在正常运行的电机动力输出端的轴承振动信号中进行了验证。利用以太网的接口将振动信号传输给监测系统终端,计算其设备状态的哈

希码值,并将其映射到直角坐标系。具体结果如图 5 所示。

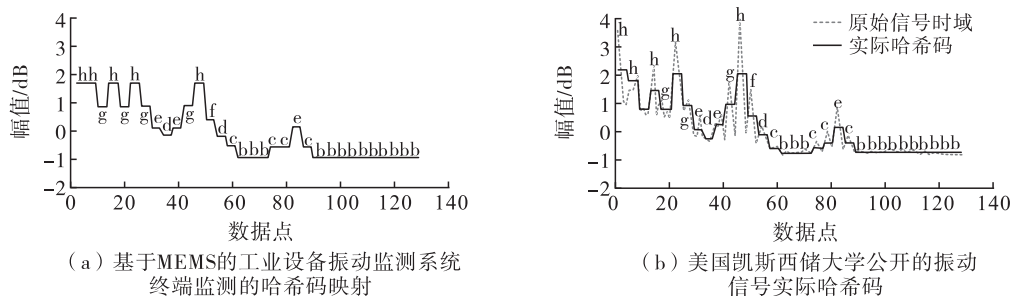


图 5 基于 MEMS 的工业设备振动监测系统终端验证

从图 5(a)可知,研究提出的监测系统得到的哈希码为“hhghghgedeghfdcbbbcccecbbbbbsbbb”。对比图 5(b)设置相同参数、利用 Matlab 进行仿真得到的原始振动信号时域图和实际哈希码可以看出,其结果与研究提出的监测系统得到的哈希码一致。这说明研究在 MEMS 基础上利用 PHA 进行振动信

号的感知与计算方法有效且可靠。最后研究选取了美国凯斯西储大学数据库中的电机正常振动信号 3 组、轴承内圈故障振动信号 3 组和轴承外圈故障振动信号 3 组进行数据评估,以验证监测系统在振动信号中的监测能力。具体结果如表 1 所示。

表 1 不同振动信号的参数计算结果和评估结果

数据编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
波形	1.25	1.23	1.25	1.40	1.40	1.46	1.62	1.63	1.95
峭度	2.95	2.76	2.88	5.57	5.42	7.45	7.59	7.96	22.53
脉冲	12.71	10.06	11.15	14.35	14.93	18.88	16.71	17.56	40.55
裕度	15.96	11.92	13.20	17.93	18.69	25.12	23.00	24.45	59.11
振动位移/mm	0.11	0.08	0.10	0.31	0.25	0.54	0.80	0.66	1.13
振动情况	正常	正常	正常	轴承内圈故障	轴承内圈故障	轴承内圈故障	轴承外圈故障	轴承外圈故障	轴承外圈故障

从表 1 可以看出,研究提出的系统对 9 组振动信号的监测结果与实际结果一致,且得到的参数计算结果符合电机的实际振动信号状况。这说明研究提出的 MEMS 基础上的工业设备振动监测系统能够准确评估设备的振动情况,在工业设备的振动信号监测中具有可靠性和有效性。

3 结论

为了实现大规模振动信号下的工业设备有效监测,研究在 MEMS 技术的基础上进行了工业设备振动监测系统设计。首先利用 MEMS 技术的加速度计进行数据采集,其次利用 PHA 进行振动信号的感知与处理。在此基础上进行了工业设备振动监测系统终端设计和程序开发。实验验证显示,研究提出的系统与东华 DH5981 型号的数据采集卡采集的振动信号傅里叶变换差异仅为 4.49%,且研究提出的系统采集信号频域更广。利用研究提出的系统对美国凯斯西储大学公开的轴承振动信号进行监测检验

显示,其得出的哈希码与实际哈希码一致,且多个信号的监测与评估结果与实际结果一致率高达 100%。结果表明,利用 MEMS 技术进行工业设备的振动信号监测具有有效性和可行性。研究提出的监测系统在齿轮箱轴承振动中具有积极的应用意义,且能够应对大规模信号的监测与评估。然而研究仅从振动信号的评估与监测方面进行了探索,对于工业设备的其他表现特征未深入分析。未来,将考虑从工业设备的作业声音、温度以及工作电流信息等进行设备的健康监测,以期提高工业设备的故障诊断效率。

参考文献:

- [1] 修晟,张愿,单伽铨. 基于视觉和振动监测数据融合的结构动态位移识别及其试验验证[J]. 工程力学, 2023, 40(11): 90-98.
- [2] HUO R, ZENG S, WANG Z, et al. A comprehensive survey on blockchain in industrial internet of things: Motivations, research progresses, and future challenges[J].

- [1] IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 88–122.
- [2] 何雨辰, 王云, 刘涛, 等. 基于公共特有序子空间提取的工业设备多模式运行过程故障检测方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1469–1478.
- [3] 张宏斌, 徐京明, 吴志东, 等. 机电设备振动测试系统设计[J]. 机械设计与制造, 2023, 385(3): 297–304.
- [4] 李青, 李钊阳, 王天钦, 等. 基于 DS 证据理论融合油液振动多参数的故障诊断方法研究[J]. 机械强度, 2023, 45(3): 534–540.
- [5] 张春宇, 刘福才, 程雪聪. 基于微机电系统与径向基函数的水下航行器姿态检测[J]. 计量学报, 2022, 43(9): 1135–1141.
- [6] 葛勇强, 曹晨, 陈家旺, 等. 基于 MEMS 传感阵列的海底地形形变原位监测装置[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(9): 1732–1739.
- [7] 王毓婷, 石云波, 张越, 等. 压阻式高 g 值加速度传感器温度补偿设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(4): 3–7.
- [8] FILCEK M. Frequency of harmony and the unified theory of everything. Across the universe towards human body and mind with discovery of neuroarchitecture vinci power Nap pendulum as the biotechnology of the future[J]. Journal of Biotechnology and Biomedicine, 2022, 5(3): 163–179.
- [9] 解浩东, 尚尧, 欧阳一毅, 等. 三轴加速度计佩戴身体不同位置不同运动条件下能量消耗的变异性[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(23): 3707–3713.
- [10] 王庆林, 裴向东, 廖林玉, 等. 多核数字信号处理器矩阵乘卷积算法性能评测[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(1): 86–94.
- [11] Logeshwaran J, Ramkumar M, Kiruthiga T, et al. SV-PA – the segmentation based visual processing algorithm (SVPA) for illustration enhancements in digital video processing (DVP)[J]. ICTACT Journal on Image and Video Processing, 2022, 12(3): 2669–2673.
- [12] 刘文选, 赵金东. 基于 Hyperledger Fabric 与星际文件系统相结合的数据存储框架[J]. 郑州大学学报(理学版) 2023, 55(1): 28–34.
- [13] 段晓聪. 基于无线传感网络分簇策略的分布式数据库加密存储研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(12): 1728–1732.
- [14] 张豹, 应励志, 余宇峰. 基于趋势特征的时间序列符号聚集近似表示方法[J]. 计算机应用, 2022, 42(1): 123–129.

(上接第 55 页)

- [4] LU X, ZHAO Y, JI H, et al. A new modular framework for high - level application development at HEPS. [J]. Journal of synchrotron radiation, 2024, 31 (2): 385 - 393.
- [5] 郭伟欣, 张志东. 基于 LabWindows/CVI 的多路电动机自动化综合测试系统设计[J]. 物联网技术, 2024, 14(03): 108 - 110 + 114.
- [6] CHRISTOPHER B, STELLA S. P007 Quality improvement project using a bespoke access database for trauma clinic and ward in - patients information recording and handover[J]. British Journal of Oral Maxillofacial Surgery, 2023, 61(10): e32 - e33.
- [7] 崔琼. 并行式自动测试系统程序设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [8] LI B, FAN X, CHEN J, et al. Software design of high precision filling test system based on LabWindows / CVI [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1518 (1): 012074.
- [9] ZHAO X, YAN T, HE W, et al. Component design of word report generation based on LabWindows/CVI [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1884 (1): 012074.
- [10] 李亚, 邵引平. 基于 LabWindows/CVI 的远程接口单元测试系统软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(07): 148 - 152 + 157.
- [11] 范晓光, 赵晶, 李小平, 等. USB 接口高速数据传输技术研究[J]. 军民两用技术与产品, 2019(03): 56 - 59.
- [12] 尹欣繁, 车兵辉, 章贵川, 等. 直升机风洞试验振动监控系统[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(04): 172 - 175.
- [13] 于思源, 汪波, 李阳. 基于多线程的动力驱动装置实时测控系统[J]. 测控技术, 2022, 41(06): 107 - 111.
- [14] 桑德一, 陆巍巍, 姚刚. 战场气象环境远程监控软件设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(05): 41 - 44.
- [15] 李宗然, 任元强. 航空结构多参量监测数据库管理软件设计与实现[J]. 现代电子技术, 2023, 46(16): 116 - 122.
- [16] 邢焕洲, 武锦辉, 刘吉. 基于 LabWindows/CVI 的多区间弹丸测速系统[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(02): 138 - 141.