

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0024-05

# 一种应用于连续体机械臂的分布式接近传感器模块设计

王一萌, 许立松, 郭健

(南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094)

**摘要:**为解决连续体机械臂在复杂作业场景中的精确定位难题与动态避障需求,保障其运动控制的稳定性与可靠性,针对其柔性弯曲、空间受限的特定物理结构,设计了一种低成本分布式接近传感器模块并详述其实现方法。在电源供给层面,模块采用线性稳压器 TLV767 构建稳压电路,可输出稳定的 2.8 V 工作电压。核心控制单元选用超低功耗微控制器 STM32L431,通过硬件 IIC 与软件模拟 IIC 双重接口实现与 4 个 TOF 距离传感器 VL6180X 的高效通信,可在 0~200 mm 之间实现 1 mm 分辨率的距离测量,能精准捕捉周边环境信息。通信与供电一体化设计方面,STM32L431 通过 CAN 总线接口搭配增强型 CAN 通信芯片 TCAN1044,构建与相邻传感器模块及上位机的双向通信链路,同时借助 CAN 通信插座为稳压电路补充供电,适配分布式系统的模块化需求。存储模块采用工业级 I<sup>2</sup>C EEPROM 芯片 M24C64,确保参数持久可靠。结构设计上,采用圆形半开口造型,大幅优化连续体机械臂曲面安装的空间适配性。针对环境噪声、目标表面反射差异及强光干扰导致的测量误差问题,引入 SG 平滑滤波算法进行数据预处理,实测可显著降低环境噪声、目标表面特性、环境光照等因素对测量结果的影响,提升了数据稳定性,为机械臂的运动决策提供了精准感知依据。

**关键词:**连续体机械臂;分布式;距离传感器;Savitzky-Golay 平滑滤波;去噪;CAN 总线

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0024-05

## A distributed proximity sensor module design for continuum manipulator

WANG Yimeng, XU Lisong, GUO Jian

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** To address the challenges of precise positioning and dynamic obstacle avoidance for continuum robotic arms in complex operational scenarios, and to ensure the stability and reliability of their motion control, this paper designs a low-cost distributed proximity sensor module and details its implementation method, tailored to its flexible bending and spatially constrained physical structure. At the power supply level, the module uses a linear regulator TLV767 to build a voltage-stabilizing circuit that outputs a stable 2.8 V operating voltage. The core control unit is an ultra-low-power microcontroller STM32L431, which achieves efficient communication with four TOF distance sensors VL6180X through both hardware IIC and software-simulated IIC interfaces. This allows distance measurement within a 0–200 mm range with 1 mm resolution, accurately capturing surrounding environmental information. For integrated communication and power supply design, the STM32L431 uses a CAN bus interface paired with an enhanced CAN communication chip TCAN1044 to establish a bidirectional communication link with adjacent sensor modules and the host computer. Simultaneously, it utilizes the CAN communication socket to supplement the voltage regulator's power supply, meeting the modular demands of a distributed system. The storage module employs an industrial-grade I<sup>2</sup>C EEPROM chip M24C64 to ensure persistent and reliable parameter storage. In terms of structural design, a circular semi-open shape is adopted to greatly optimize spatial adaptability for mounting on the curved surfaces of continuum robotic arms. To address measurement errors caused by environmental noise, variations in target surface reflectivity, and strong light interference, the SG smoothing filter algorithm is introduced for data preprocessing. Experimental results show that this significantly reduces the impact of environmental noise, target surface characteristics, and ambient light on measurement results, improving data stability and providing accurate perception for the robotic arm's motion decision-making.

**Keywords:** continuous robotic arm; distributed; distance sensor; Savitzky-Golay smoothing filtering; denoising; CAN bus

柔性连续体机器人与传统的刚性机器人相比,具有良好的灵活性,在狭窄空间和复杂路径的场景更加适用<sup>[1]</sup>。

其中以仿生学原理为基础、自由度高、活动非常灵活的中心弹力杆支撑的绳驱连续体机械臂,可以在末端搭载

工具进入空间狭小、结构密封的恶劣环境进行相关作业,这可以极大地提高生产效率,而且可以把人从危险恶劣的有害环境中解放出来,提高生产安全,具有较高的经济效益与社会效益<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2024-10-20;录用日期:2024-11-19

基金项目:江苏省重点研发计划重点项目(BE2021016)

作者简介:王一萌(2000—),男,硕士研究生,研究方向:连续体机械臂感知与控制。

通信作者:郭健(1974—),男,教授,研究方向:智能控制与智能系统。

引用本文:王一萌,许立松,郭健.一种应用于连续体机械臂的分布式接近传感器模块设计[J].自动化技术与应用,2026,45(4):24-28.(WANG Yimeng, XU Lisong, GUO Jian. A distributed proximity sensor module design for continuum manipulator[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(4):24-28.)

连续体机械臂的应用场景大多为狭小非结构的黑暗环境,在使用机械臂时为了提高连续体机械臂的操作精度,配合弥补视觉传感器的角度限制,实现对障碍物的主动感知,完成主动避障和运动轨迹规划,需要在机械臂上加装接近传感器来检测臂身与环境之间的相对距离,增加机械臂的适应性。为此本文设计了一种应用于连续体机械臂的分布式接近传感器模块,可以在机械臂臂身上间隔安装,实现机械臂对环境的主动感知,示意图如图 1 所示。

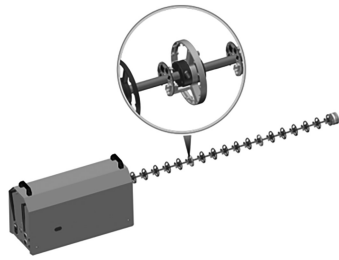


图 1 连续体机械臂安装接近传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a continuum robotic arm equipped with a proximity sensor

当机械臂在距离障碍物 0~100 mm 之间行动时,臂身与环境的距离是非常重要的信息。在实际控制中,检测反馈的距离信息会对机械臂自身的运动规划、轨迹行进和避障产生重要影响<sup>[3-4]</sup>。因此在连续体机械臂上对接近传感器的设计提出了较高的要求:

- 1) 体积小。连续体机械臂的直径和内部空间较小,其安装的接近传感器的体积也必须足够紧凑。
- 2) 测量最近距离小。机械臂工作中会靠近环境中的障碍物,所以传感器测量的最近距离要小,以满足机械臂近距离工作的精准度。
- 3) 方便安装与维修。在机械臂内部的小空间安装,需要设计成足够的便捷,并方便维修更换。

基于上述要求,本文设计了一种应用于中心弹性杆支撑的绳驱连续体机械臂,结构简单、稳定性好、易拆卸维修、重复定位精度高且易实现批量化生产的分布式接近传感器模块。

### 1 实现方案

基于连续体机械臂的分布式接近传感器模块主要由稳压电源单元,中心处理单元,传感器单元和 CAN 总线通信单元构成。系统的结构框图如图 2 所示。

整个传感器模块通过 CAN 总线通信插座输入外部电源,然后通过稳压电源单元的线性稳压器 TLV767 系列芯片转换,完成后可以为整个模块提供稳定的 2.8 V 电源。

中心处理单元选用了超低功耗 80 MHz 控制器 STM32L431 系列,通过硬件 IIC 与软件模拟 IIC 与 4 个距离传感器 VL6180X 进行通信,同时采用 M24C64 的存储芯片存储 VL6180X 的初始化与校准信息进行初始化和校准工作,并采集传感器的测距结果。

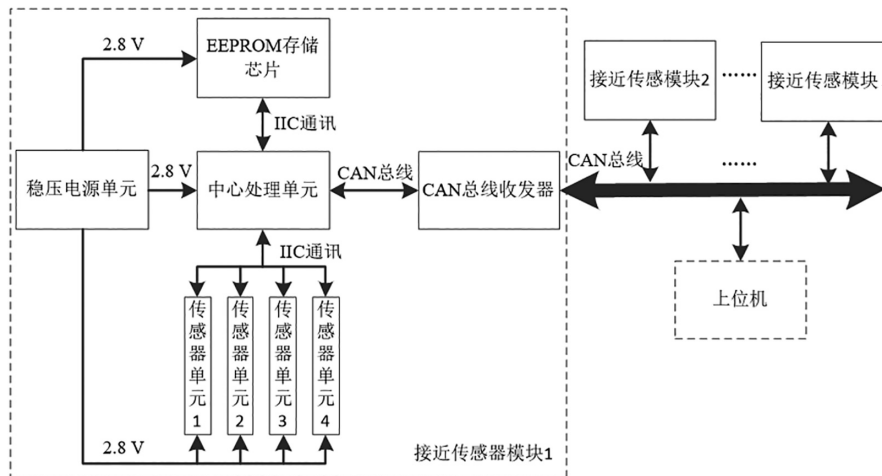


图 2 模块功能框图

Fig. 2 Module function block diagram

为了提高整个模块的测量精度,降低系统的复杂度,减少目标物体颜色、表面的测量影响,达到微型化模块的目标,选用了 ST 公司基于 TOF 技术的低功率距离传感器芯片 VL6180X,与其他方法相比具有体积小、精准度高、适应黑暗环境等优势<sup>[5]</sup>,保证了在近距离上的测量精度。可以精确测量光线从传感器照射到最近物体然后反射到传感器所用时间计算距离,实现 0~100 mm 的精准测距。

CAN 总线通信单元连接了主控芯片上面的 CAN 总线接口与 CAN 通信 TCAN1044 系列芯片,能够实现当前模

块与相邻接近传感器模块和上位机双向通信。

### 2 硬件模块设计

#### 2.1 稳压电源单元

在稳压电源单元电路上选择使用了线性稳压器 TLV767 系列芯片,通过 CAN 总线通信单元的插座由上位机提供 5 V 电源电压,经过线性稳压器转换后可以获得稳定的 2.8 V 输出电压,供给中心处理单元,传感器单元和 CAN 通信单元。

## 2.2 传感器单元

VL6180X 参数如表 1 所示。此传感器单元通过 IIC 通信的方式与中心处理单元上的 IIC 插座相连,并由该插座向传感器单元提供 2.8 V 电源电压。每一个中心处理单元都对应了 4 个传感器单元,每个传感器单元之间间隔 90°以满足绕连续体机械臂一周 360°方向的距离感知测量。

表 1 VL6180X 主要参数

Tab. 1 Main parameters of VL6180X

参数	数值
测量量程	0~100 mm
最大外形尺寸	4.8 mm×2.8 mm×1.0 mm
红外波长	850 nm
供电	2.6~3.0 V
分辨率	1 mm

## 2.3 中心处理单元

### 2.3.1 存储单元

中心处理单元需要存储传感器单元的初始化数据和校准数据,每次重现上电后由中心处理芯片从存储单元进行数据读取并通过 IIC 通信传输给传感器单元,使其初始化后开始正常工作。存储芯片选择了 M24C64 系列芯片。同样使用稳压电源单元输出的 2.8 V 稳定电压供电。

### 2.3.2 主控芯片

为实现传感器模块微型化、集成化和批量化生产,以及便于中心处理单元的结构设计与实际安装,主控芯片选择了 STM32 超低功耗系列 MCU 中的 STM32L431 系列芯片,其封装为 48 引脚的 UFQFPN48(7 mm×7 mm)封装,十分小巧,适合在机械臂内部小空间使用,并围绕该芯片进行了必要的外围电路设计。

## 2.4 CAN 总线通信芯片

CAN 总线通信芯片其负责进行接近传感器模块之间的通信及各模块与上位机之间的通信。CAN 总线的芯片选择了 TCAN1044 系列,支持 CAN 和 FD CAN 通信,仅有 2.9 mm×2.8 mm 大小,适合在机械臂内部小空间使用。同时在 CAN 总线通信插座上留出外部 5 V 供电口,以供给稳压电源单元。

## 3 软件设计

### 3.1 软件实现方式

应用于连续体机械臂的分布式接近传感器模块软件包括传感器初始化校准、距离数据读取、数据处理与滤波、模式指令生成与输出、机械臂碰撞预警等,实现连续体机械臂的运动避障和环境感知的功能。软件工作流程如图 3 所示。

总体流程如下:上电后由中心处理单元读取存储在 M24C64 芯片上的初始化参数与校准配置,通过 IIC 通信对接近传感器进行初始化配置和校准,然后通过上位机进行传感器模式选择,默认为连续测量;连续从传感器中读取距离数据转化为毫米单位并进行平滑滤波减少其他扰动的影响,并通过碰撞距离阈值判定是否有碰撞可

能,若有预警则重新规划机械臂运动轨迹以避免碰撞。

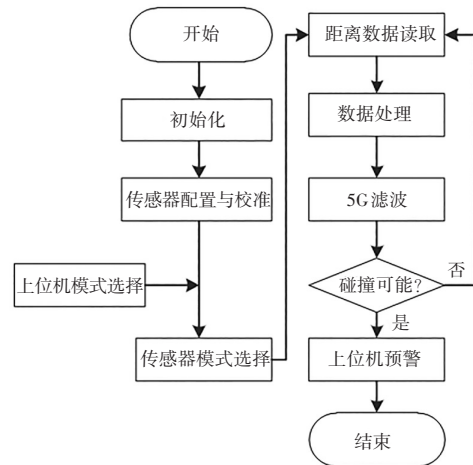


图 3 软件工作流程图

Fig. 3 Software workflow diagram

### 3.2 SG 平滑滤波

VL6180X 在实际使用中,由于环境噪声、目标表面的特性、环境光照等因素的影响,传感器可能会产生一些不稳定的数据,这可能会导致距离测量的不准确。为了解决这个问题,保证数据的稳定性及后续决策的准确性,在此选择了 SG(Savitzky-Golay)平滑滤波,它在保留数据整体趋势的同时,有效地去除噪声和波动,具有更好的平滑效果和更高的保留信号特征的能力<sup>[6]</sup>。

SG 平滑滤波<sup>[7-9]</sup>是对待处理数据中某一连续  $2m + 1$  个数据点(即宽度为  $2m + 1$  的窗口中的数据点)选用某一拟合阶次  $n$  进行最小二乘多项式拟合,进而将拟合得到的曲线在数据窗口中心点处的取值作为滤波后值,并移动窗口,重复此过程,从而达到对所有数据进行平滑的目的<sup>[10-12]</sup>。

假设一个窗口内数据为  $x[i], i = -m, \dots, 0, \dots, m$ , 其中  $i$  的取值为  $2m + 1$  个连续的整数,则可以构造一个  $n$  阶多项式( $n \leq 2m + 1$ )来拟合这组数据,即

$$f(i) = \sum_{k=0}^n b_{nk} i^k + b_{n0} + b_{n1}i + b_{n2}i^2 + \dots + b_{nn}i^n \quad (1)$$

则拟合的数据点与原数据点的残差平方和为

$$E = \sum_{i=-m}^m [f_i - x(i)]^2 = \sum_{i=-m}^m \left[ \sum_{k=0}^n b_{nk} i^k - x(i) \right]^2 \quad (2)$$

要使得拟合结果最优,则需要残差平方和  $E$  最小,即  $E$  对该多项式的系数  $b_{nk}$  求偏导为 0,即

$$\frac{\partial E}{\partial b_{nk}} = \frac{\partial \left\{ \sum_{i=-m}^m \left[ \sum_{k=0}^n b_{nk} i^k - x(i) \right]^2 \right\}}{\partial b_{nk}} = 2 \sum_{i=-m}^m \left[ \sum_{k=0}^n b_{nk} i^k - x(i) \right] i^r = 0, r = 0, 1, \dots, n \quad (3)$$

可以解得

$$\sum_{i=-m}^m x(i) i^r = \sum_{k=0}^n b_{nk} \sum_{i=-m}^m i^{k+r} \quad (4)$$

令

$$F_r = \sum_{i=-m}^m x(i) i^r \quad S_{k+r} = \sum_{i=-m}^m i^{k+r} \quad (5)$$

则有

$$F_r = \sum_{k=0}^n b_{nk} S_{k+r} \quad (6)$$

在确定需要拟合的单边点数  $m$ , 多项式的阶次  $n$  以及待拟合的数据  $x[i], i = -m, \dots, 0, \dots, m$ , 就可以通过式(5)和式(6)即可求出多项式的系数  $b_{nk}$ , 从而得到该多项式。拟合出来的多项式用来求取该窗口内的中心点估计值, 而对于在这之后的点, 不断移动窗口拟合即可<sup>[13]</sup>。

并且在此基础上, 为了处理滤波器的边界效应, 确保在滤波器应用时, 边界处的效果与其他位置一样平滑, 可以在数据边界处进行多项式插值进行数据填充。对于前边界的数据填充, 假设我们需要填充  $k$  个数据点, 填充点的  $x$  坐标可以选择为负数, 表示这些点在已知数据点的左侧, 即

$$x_{\text{left}, j} = x_1 - j, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

则填充的边界值为

$$x(\text{left}, j) = b_0 + b_1 x_{\text{left}, j} + \dots + b_n x_{\text{left}, j}^n \quad (8)$$

相应的对于数据右边界值也进行相同的填充即可。

并为确保系统的实时性, 平滑滤波处理的延迟需控制在可接受范围内。较大的窗口会导致更平滑的结果, 但可能会导致信号的瞬态响应被抑制; 较小的窗口会更敏感于高频噪声, 但能更好地保持信号的瞬态特征。

并且多项式阶次会影响每次拟合时的计算复杂度, 考虑到系统的计算时间和延迟两个实时性指标, 以及机械臂接近感知的通信频率要求, 通过仿真实验确定了窗口大小为 9 即  $m = 4$ , 同时选择了多项式阶次为 3, 这足以平滑大多数信号, 同时保持计算效率。

### 4 结构设计

中心弹性杆支撑的绳驱连续体机械臂其机械结构主要包括了中心支撑 NiTi 合金杆、中心圆盘和驱动绳索。机械臂上间隔盘等距分布, 固结在中心弹性杆构成机械臂整体形状的同时提供中心杆弯曲形状的刚度支撑。通过驱动绳索穿过间隔盘上的绳孔拉动驱动盘使中心弹性杆发生弯曲变形来达到控制的目的。

其中间隔盘的直径为 60 mm, 加上穿过间隔盘的驱动绳索的限制, 使得机械臂内部留给接近传感器模块的安装和使用空间并不充裕。因此考虑到机械臂的结构和安装接近传感器模块的便捷, 将其中心处理单元结构设计示意图如图 4 所示。

中心处理单元尺寸最大外径为 42 mm, 其中缺口宽度 10 mm, 螺孔 2.7 mm, 可以用于 2.5 mm 螺钉固定在间隔盘前, 使得中心弹性杆可以在半圆形缺口处通过, 充分利用了机械臂内部空间, 完成接近传感器模块的功能实现。且在板上预留了 2 个 CAN 总线通信接口, 方便与前后的接近传感器模块进行通信; 预留了一个 SWD 下载接口, 方便烧录程序; 预留了 4 个 IIC 通信接口, 方便与 4 个传感器通信。以垂直向下为  $0^\circ$ , 将 4 个传感器顺时针布置在

$0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  4 处, 每 4 个传感器连接于一个对应的中心处理单元, 各中心处理单元之间通过 CAN 总线连接于上位机。

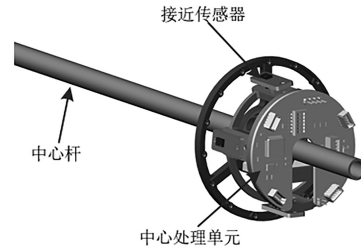


图 4 单个接近传感器模块安装示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a single proximity sensor module installation

### 5 试验验证

利用三轴小型滑台龙门架作为试验器材, 可以准确控制传感器与测量目标板之间的实际距离作为实际距离真值, 实物照片如图 5 所示。

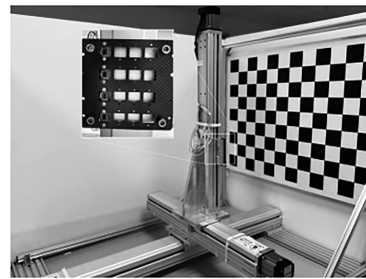


图 5 接三轴小型滑台龙门架实物照片

Fig. 5 Actual photo of the three-axis small gantry stage

用已校准的接近传感器模块进行距离测量, 对于测量距离 10、30、50、70、90 mm 分别进行了静态测量试验, 测量结果的均方根误差如表 2 所示, 测量结果是接近传感器模块所感知到的距离, 测量误差即测量结果与实际距离的差值。试验结果误差曲线如图 6 所示。

表 2 测量均方根误差

Tab. 2 Measurement root mean square error

测量距离/mm	原始均方根误差	SG 均方根误差
10	0.483 0	0.283 9
30	0.658 3	0.402 4
50	0.752 8	0.318 1
70	0.930 9	0.627 2
90	1.224 7	0.769 5

从表 2 和图 6 可以看出, 接近传感器模块的测量精度在测量范围为  $0 \sim 50$  mm 时维持在  $\pm 1$  mm 之内, 在  $50 \sim 100$  mm 时维持在  $\pm 3$  mm 之内, 且经过 SG 平滑滤波与原数据处理相比表现出了更好的精度和稳定性, 可以保证测距数据的稳定性及后续决策的准确性, 帮助机械臂有效地感知周围障碍物的距离, 避免机械臂脱离规划轨迹, 导致不必要的碰撞。

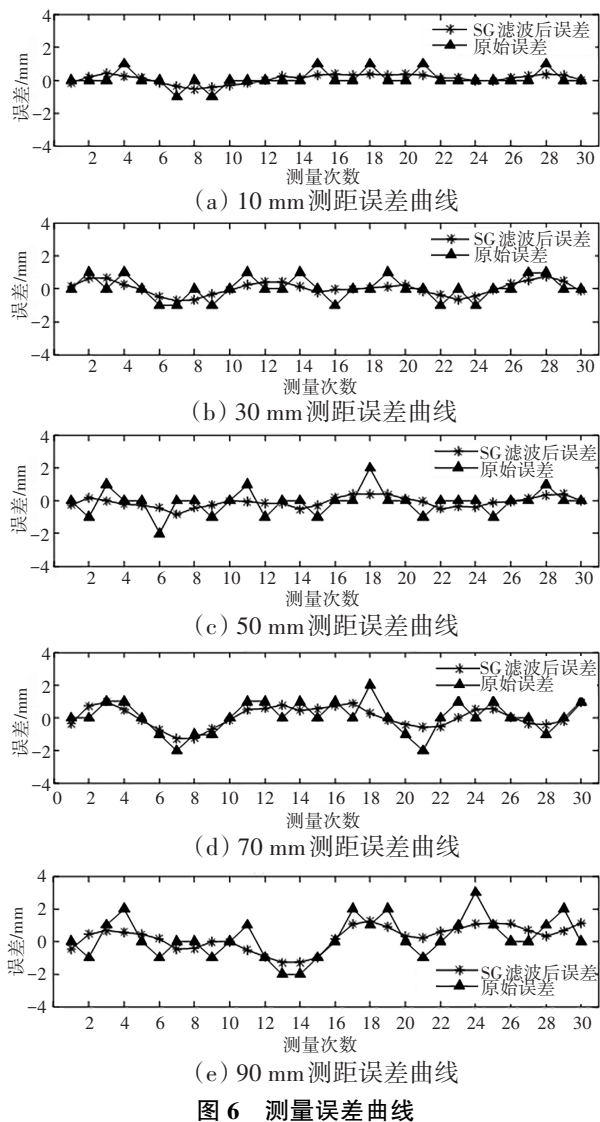


Fig. 6 Measurement error curve

## 6 结论

本文介绍了基于STM32L431系列微控制器和VL6180X

测距传感器的连续体机械臂接近传感器模块的设计过程,首先对稳压电路单元、中心处理单元,传感器单元和CAN总线通信单元等硬件电路进行了详细的介绍。然后对其软件实现和中心处理单元的结构设计进行了说明,使用SG平滑滤波处理测量数据。最后通过试验验证了接近传感器模块的精准度,验证了接近传感器模块的设计成果,可以用于连续体机械臂的智能感知和避障的控制。

## 参考文献

- [1]王爽,任晗,李桢,等.基于绳驱动的多段柔性连续体机械臂的运动学与实验研究[J].科学技术与工程,2023,23(19):8249-8255.
- [2]彭光兵.蛇形机械臂的设计与运动控制策略研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [3]姜力,周扬,孙奎,等.七自由度冗余机械臂避障控制[J].光学精密工程,2013,21(6):1795-1802.
- [4]王裕基,孙富春,刘华平,等.基于距离传感器的双边遥操作[J].机器人,2010,32(6):705-710.
- [5]叶益诚,田敏,谢勇,等.基于TOF测量的红外光电测距传感器研制[J].仪表技术与传感器,2023(12):21-24.
- [6]QUAN Q, CAI K. Time-domain analysis of the Savitzky-Golay filters [J]. Digital Signal Processing, 2012, 22(2): 238-245.
- [7]王婧瑶,王红军.基于Mask R-CNN与SG滤波的手势识别关键点特征提取方法[J].电子测量与仪器学报,2021,35(9):41-48.
- [8]宁鸿章,谭鑫,李宇航,等.空-谱维联合 Savitzky-Golay 高光谱滤波算法及其应用[J].光谱学与光谱分析,2020,40(12):3699-3704.
- [9]王红珂,吴剑剑,关雅静,等.基于分布式光纤的压力管道壁厚监测及强度评价[J].自动化技术与应用,2026,45(1):96-101.
- [10]李阿龙.流域水库群联合防洪调度研究及应用——以黄河中下游水库群为例[D].郑州:华北水利水电大学,2021.
- [11]杜中刚,孙永厚,刘夫云,等.考虑坐标获取的试验模态分析的惯性参数识别方法[J].振动与冲击,2023,42(7):89-98,153.
- [12]侯强,王璨,单莹.基于紫外成像技术的高压电晕智能识别方法[J].自动化技术与应用,2025,44(12):75-79.
- [13]郭云鹏,张弓,侯至丞,等.采用SG平滑滤波的 Stewart 平台主从控制研究[J].自动化仪表,2019,40(2):30-33,38.

(上接第10页)

- [16]欧阳晨曦,赵志高,李旭东,等.海水可变速抽水蓄能与风电联合运行优化研究[J].水利水电快报,2023,44(5):65-72.
- [17]赵熙临,周红玉,付波,等.考虑风速随机性的风电-抽水蓄能微网一次调频方法[J].电网与清洁能源,2023,39(1):111-119.
- [18]刘森,张建,李青春,等.面向端对端电能交易的抽水蓄能电站能量交易优化决策模型[J].水力发电,2022,48(4):75-79,93.
- [19]滕云,孙鹏,罗桓桓,等.计及电热混合储能的多源微网自治优化运行模型[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5316-5324,5578.
- [20]刘文军,赵琰,张东,等.抽蓄联合全可再生能源孤岛微网配置优化模型[J].可再生能源,2020,38(9):1266-1271.

- [21]李高,丘翊仙,郭仁宏.基于动态模式分解的海上风电35kV集电线路交叉故障定位方法[J].自动化技术与应用,2025,44(11):92-96.
- [22]刘兴杰,郭栋,王凯龙.基于电气外特性的光伏发电系统模型等效方法[J].电工技术学报,2014,29(10):231-238,265.
- [23]张瑞友,王超慧,陈勇强.基于控制思想求解非线性规划问题的李雅普诺夫方法[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(9):1217-1225,1245.
- [24]唐湘黔,钱淑渠,武慧虹.混杂免疫多目标优化算法及对动态经济环境调度问题优化[J].计算机应用研究,2023,40(9):2720-2728.