

基于 TDLAS 原位和多声道超声波的 烟气碳排放监测

张 杰¹, 李军状¹, 祝业青¹, 魏 晗¹, 马修元¹, 丁艳军², 倪 震³

(1. 国电环境保护研究院有限公司, 江苏 南京 210031; 2. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084;
3. 浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:针对当前火电机组碳排放监测中的 NDIR 冷干法浓度测量存在取样延时, 单点皮托管流速仪测量代表性差, 矩阵流量计系统复杂, 故障率高, 低流速测量精度差等问题, 采用 TDLAS 技术和超声波技术实现烟气二氧化碳浓度和流速同步测量。基于 TDLAS 原理结合原位方式实现二氧化碳浓度快速测量, 基于超声波时差法结合多声道方式实现烟气流速测量, 将浓度和流速测量结果传输至碳排放服务器进行排放量计算、存储和传输。该系统在某火电机组进行应用示范, 整套设备安装至脱硫后水平烟道处, 稳定运行后, 采用第三方便携设备对测量结果进行比对测试, 浓度测量准确度小于 2%, 流速测量相对误差小于 2%。

关键词:碳排放; 可调谐二极管激光吸收光谱; 原位; 超声波; 多声道

中图分类号: TK74

文章编号: 1000-0682(2026)01-0076-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.01.014

Monitoring of flue gas carbon emission based on TDLAS in situ and multi-channel ultrasonic technology

ZHANG Jie¹, LI Junzhuang¹, ZHU Yeqing¹, WEI Han¹, MA Xiuyuan¹, DING Yanjun², NI Zhen³

(1. State Power Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Jiangsu Nanjing 210031, China;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310058, China)

Abstract: In response to the problems of sampling delay in the concentration measurement of NDIR cold drying method, poor representativeness of single point pitot tube flowmeter measurement, complex matrix flowmeter system, high failure rate, and poor accuracy at low flow rate measurement in the current carbon emission measurement of thermal power units, TDLAS technology and ultrasonic technology are adopted to achieve synchronous measurement of flue gas carbon dioxide concentration and flow velocity. The system is based on TDLAS principle combined with in-situ method to achieve rapid measurement of carbon dioxide concentration, and based on ultrasonic time difference method combined with multi-channel mode to achieve flue gas flow velocity measurement. The concentration and flow velocity measurement results are transmitted to the carbon emission server for emission calculation, storage, and transmission. The developed system was applied and demonstrated in a thermal power unit. The entire equipment was installed at the chimney, and after stable operation, a third-party portable device was used to compare and test the measurement results. The concentration measurement accuracy was less than 2%, and the flow rate measurement relative error was less than 2%.

Keywords: carbon emission; tunable diode laser absorption spectroscopy; in situ; ultrasonic; multi-channel

收稿日期: 2025-09-19

基金项目: 江苏省产业前瞻技术研发项目 (BE2023017-4)

第一作者: 张杰 (1973—), 男, 河北保定人, 高级工程师, 研究方向为环境保护及碳排放。E-mail: 12051884@ceic.com

0 引言

为实现双碳目标,2020年生态环境部公布的《生态环境监测规划纲要(2020—2035年)》文件中规定温室气体监测遵循“核算为主、监测为辅”的原则,并规定在火电行业率先开展CO₂排放在线监测试点工作。2021年9月和2023年9月,生态环境部先后印发了《碳监测评估试点工作方案》和《深化碳监测评估试点工作方案》的通知,火电行业约114台机组相继开展CO₂排放在线监测工作^[1-2]。

碳排放在线监测通过测量二氧化碳浓度和烟气流速得到二氧化碳排放量。现有烟气二氧化碳浓度测量主要沿用传统CEMS中的非分散红外技术结合冷干法预处理方式^[3-5],该方法技术成熟,通用性强,但由于其预处理过程中采用较长取样管线导致存在测量延时,尤其在深调状态下浓度测量无法跟上流速测量。

烟气流速测量主要包括压差法和时差法2种原理。压差法测量基于机械能守恒原理,通过测量烟气总压和静压得到动压进而得到烟气流速。压差法当前应用主要包括单点皮托管式和矩阵式、轮巡式及阵列式多点皮托管,压差法测量原理简单,但由于烟气流速分布不均匀,导致单点皮托管测量代表性不足,矩阵式、轮巡式和阵列式提高了测量的代表性,但多点皮托管测量点位较多,存在堵塞的概率较高,系统复杂,维护量较大,且压差法在流速较低时测量偏差较大。时差法通过测量超声波在顺流和逆流中传播的时间差得到烟气流速,该方法得到的是线平均流速,具有系统简单,代表性好,流速测量范围大等优点^[6-9]。

现有碳排放计量系统中存在以下问题:首先浓度测量存在延时导致浓度和流速的乘积存在计量偏差;其次由于浓度为干基值,流速为湿基值,计量过程中需要进行湿度折算,而当前湿度测量精度较低,允许误差范围较大,在碳计量折算中湿度折算1%的偏差便会导致1%的计量偏差。

针对上述存在的问题,文中采用可调谐二极管激光吸收光谱技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)结合原位热湿方式进行CO₂浓度快速测量,采用多声道超声波时差法进行烟气流速测量,进而实现CO₂浓度和烟气流速同步测量的碳排放计量。在该系统中,CO₂浓度在湿基状态下进行测量,无需进行湿度折算,消除了湿度测量不准带来的计量偏差。

1 TDLAS 原位二氧化碳浓度在线监测装置

1.1 TDLAS 测量原理及 CO₂ 谱线选择

TDLAS技术基于吸收光谱原理,不同的分子具有不同的能级差,能级跃迁中选择性吸收相应波长的光子。通过激光光源扫描待测分子吸收谱线,得到被待测气体吸收后的透射光强,进而反演出气体浓度、温度等参数^[10-12]。

TDLAS测量过程中谱线选择原则主要考量吸收强度和抗干扰性。从吸收强度来讲,CO₂吸收谱线主要集中在1.5 μm和2.0 μm处,其中2.0 μm处谱线吸收强度较强,比1.5 μm处谱线高2个数量级,但由于2.0 μm处谱线对应二极管激光器成本较高,且烟气中CO₂浓度较高,因此选用1.5 μm处吸收谱线。从抗干扰性来讲,烟气中成分主要包括CO₂, H₂O和CO。其中CO₂浓度约为10%~15%, H₂O浓度约为8%~15%, CO浓度一般小于1%。基于HITRAN光谱数据库选择6359.967 cm⁻¹处吸收谱线,图1中对应该波段CO₂, H₂O和CO的谱线吸收强度,图中显示,CO气体在该谱线处无明显吸收, H₂O在该处附近存在吸收谱线,但并未完全重叠,以CO₂浓度和H₂O浓度均为10%仿真计算, H₂O产生的影响小于5‰。

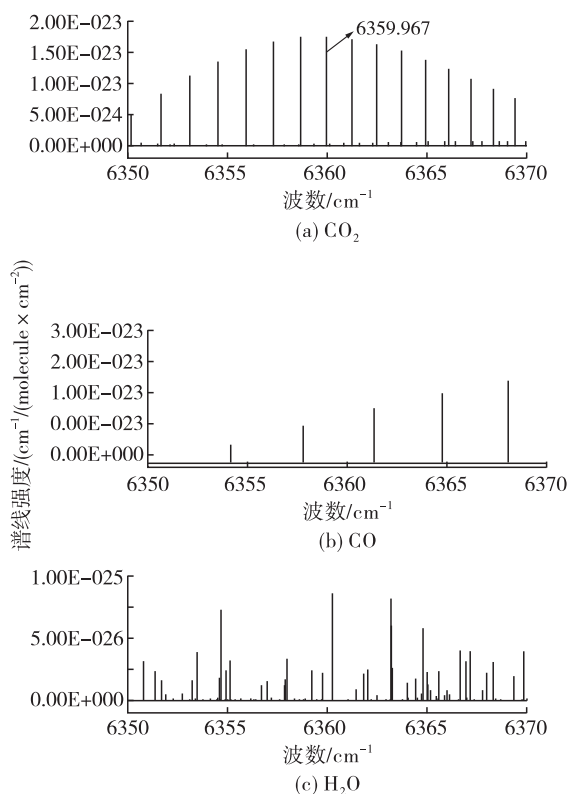


图1 1572.3 nm处CO₂, CO和H₂O分子吸收谱线强度对比

1.2 TDLAS 原位二氧化碳浓度测量原理

TDLAS 原位测量原理如图 2 所示,整个测量过程在烟道就地完成。在射流泵作用下,烟气经过加热和过滤后进入多次反射气室,激光器发射的激光经光纤传输并由准直器整形成平行光后射入多次反射气室被待测气体多次吸收后被光电探测器完成光电转换传输至数据采集部分进行浓度反演。

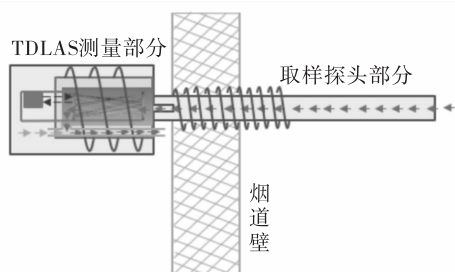


图 2 TDLAS 原位 CO₂ 装置测量原理图

1.3 TDLAS 原位二氧化碳浓度测量装置硬件结构

TDLAS 原位测量装置硬件结构如图 3 所示,主要包括激光发射/接收单元、取样探头、赫里奥特池、分析控制单元、配电单元及辅助设备 6 部分,其中激光发射/接收单元包括准直器、光电探测器、光学调整装置;取样探头包括取样管,过滤器,伴热保温、机箱保护罩;赫里奥特池包括激光多次反射密封池及附属的伴热圈和隔热层;分析控制单元包括激光器、激光分束器、激光驱动器、数据采集处理模块、显示屏、通讯及控制模块、温控器;配电单元包括配电箱、空气开关、接线端子排等;辅助设备包括电源线、信号传输线、焊接法兰等。

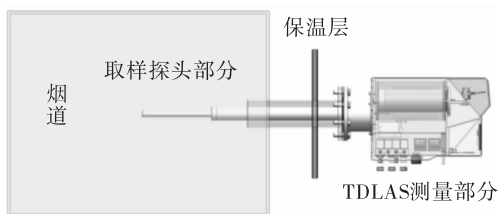


图 3 TDLAS 原位 CO₂ 测量装置硬件结构图

1.4 TDLAS 原位二氧化碳浓度测量装置实验验证

使用 CO₂ 标准气体对测量装置进行验证,将测量装置中依次通入纯氮气、23.1%, 13.1% 和 6.03% 不同浓度的 CO₂ 气体,测量结果如图 4 所示。测量结果显示,6.03% 浓度气体测量结果均值为 6.08%,绝对偏差为 +0.05%,13.1% 浓度气体测量结果均值为 13.16,偏差为 +0.06%,23.1% 测量结果均值为 23.09%,绝对偏差为 -0.01%,由此验证装置测量的准确性。

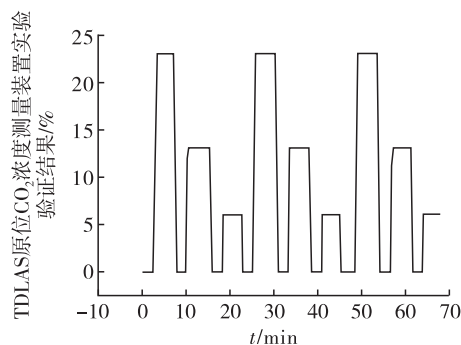


图 4 TDLAS 原位 CO₂ 测量装置实验验证结果

2 超声波时差法烟气流速在线监测装置

2.1 超声波时差法流速测量原理

超声波时差法利用声波在流体介质中顺流传播和逆流传播的速度差进行流体速度测量,原理如图 5 所示,在待测装置两侧安装一对超声波换能器,2 个换能器之间的连线与待测介质流速方向的夹角为 θ ,假如待测流体介质流速为 v ,2 个换能器之间的距离为 l ,超声波在该静止流体介质中的传播速度为 c ,那么超声波在顺流方向传播时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{l}{c + v \cos \theta} \quad (1)$$

超声波在逆流方向传播时间 t_2 为:

$$t_2 = \frac{l}{c - v \cos \theta} \quad (2)$$

通过公式(1)可得到:

$$c = l/t_1 - v \cos \theta \quad (3)$$

通过公式(2)可得到:

$$c = l/t_2 - v \cos \theta \quad (4)$$

将式(3)和式(4)相减,可得到流体流速 v 为:

$$v = \frac{l/t_2 - l/t_1}{2 \cos \theta} \quad (5)$$

由上述过程可知,流体流速与超声波在静止流体介质中的传播速度无关,可消除温度等参数对超声波传播速度的影响^[13-15]。

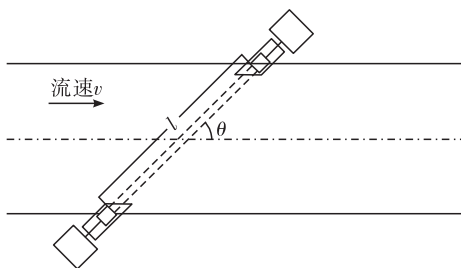


图 5 超声波时差法流速测量原理图

与单点皮托管测量单点流速不同,超声波时差法得到的是线平均流速,大大提高了流速测量的代

表性。为了进一步得到流速的面分布,在一个烟道截面安装多声道换能器得到不同线平均流速,如图 6 所示,进一步表征烟气截面流速分布。

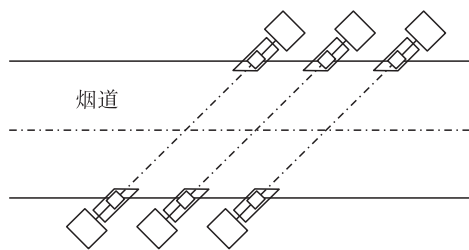


图 6 多声道超声波时差法流速测量原理图

2.2 超声波流速测量装置硬件结构

超声波流速测量装置硬件结构如图 7 所示,主要包括探头模块、吹扫模块和主机模块,其中探头模块内安装换能器,用于电能和机械能之间的转换,吹扫模块用于对探头模块进行吹扫用以保证探头的清洁,主机模块包括电气部分和主控部分,用于系统供电、控制换能器信号的发射与接收、流速计算、存储和传输。

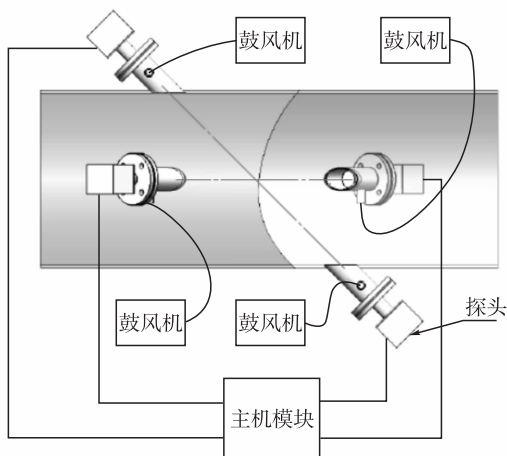


图 7 超声波流速测量装置硬件结构图

将所研制超声波流速仪安装于风洞进行测试,风洞截面为 800 mm * 800 mm,长度为 2 米,风洞风速为 1 m/s, 2 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s 和 30 m/s 时,超声波流速测量装置结果对应为 0.99 m/s, 2.01 m/s, 5.01 m/s, 10.0 m/s, 20.01 m/s 和 30.02 m/s,由此验证了超声波流速测量装置的准确性。

3 现场应用

CO₂浓度和烟气流速同步测量的碳排放计量系统如图 8 所示,将原位 CO₂浓度测量装置和烟气流速装置安装于脱硫后水平烟道。浓度、流速、温压湿等烟气参数测量结果通过 RS485 方式传输至碳排

放量服务器进行计算、存储和传输。

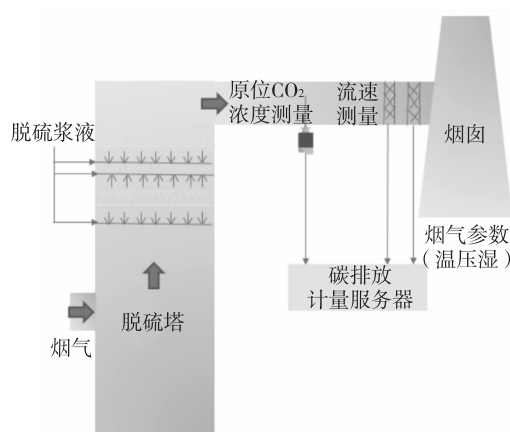


图 8 CO₂浓度与烟气流速同步测量的碳排放监测原理

现场安装实物如图 8 所示,烟气流向从上向下,将整个烟道在左右方向分为 3 个区域,每个区域安装 1 对超声波换能器,每个换能器旁边配备 1 个风机,用于对换能器表面进行吹扫。TDLAS 原位 CO₂浓度测量装置安装于烟道就地,碳排放服务器安装于原脱硫 CEMS 小间,通过光缆将信号传输至 DCS。



图 9 碳排放监测系统现场安装实物

三声道超声波流速仪测量结果如图 10 所示,该结果显示各声道流速趋势一致,且随机组负荷变化而改变。

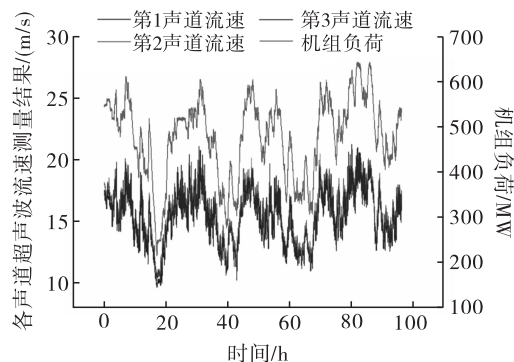


图 10 各声道超声波流速与负荷关系

通过烟气 CO₂浓度和烟气流速计算得到 CO₂排放量,连续运行 168 个小时排放量与机组负荷曲线如图 11 所示,对排放量与负荷数据进行 Spearman

相关性分析,结果显示相关性系数为0.987。

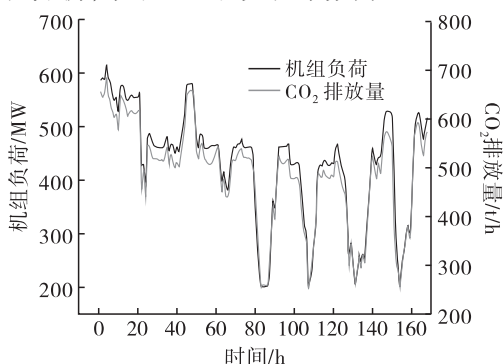


图11 CO₂排放量与负荷之间的连续运行关系曲线(168 h)

系统稳定运行过程中,采用青岛崂应便携式CO₂浓度监测设备和经过校验的皮托管流量计对CO₂浓度和烟气流速进行了比对测试,结果分别如表1和表2所示,CO₂浓度相对准确度小于2%,烟气流速相对误差小于2%,采用不同测量装置进一步验证了系统的测量准确性。

表1 CO₂浓度准确度比对结果

序号	TDLAS 原位 CO ₂ 浓度 在线监测装置测量结果/%	便携式仪表测量结果/%
1	14.15	14.20
2	14.13	14.18
3	14.29	14.41
4	13.80	14.09
5	13.91	14.16
6	13.96	14.09
7	13.93	14.08
8	13.87	14.02
9	14.07	14.19

表2 烟气流速准确度比对结果

序号	多声道超声波流速仪 测量结果/(m/s)	便携式仪表测量 结果/(m/s)
1	17.93	17.00
2	17.82	18.50
3	18.06	18.30
4	17.91	17.20
5	18.00	17.20

4 结论

该文在分析当前烟气碳排放在线监测中浓度测量和流速测量存在的不足基础上,基于TDLAS结合原位热湿预处理方式进行CO₂浓度快速在线监测,基于多声道超声波技术进行烟气流速分布式在线监测,实现了烟气CO₂浓度和烟气流速同步测量。首先使用标气对CO₂浓度测量装置进行了准确度验

证,偏差小于标准气体标称值的1%,然后将所研制装置于某火电机组进行了现场应用示范。现场应用结果显示,CO₂排放量在线监测结果与机组负荷趋势一致,相关系数为0.987。采用便携式设备对CO₂浓度和烟气流速进行对比测试,CO₂浓度相对准确度小于2%,烟气流速相对误差小于2%。

系统具有以下优点:(1)CO₂浓度测量装置采用原位方式测量,相比冷干法取样路径大大缩短,实现了浓度和流速同步测量,消除了由于浓度和流速测量时间不匹配导致的计量偏差;(2)采用多声道超声波方法实现烟气截面流速测量,提高了流速测量的代表性;(3)CO₂浓度和烟气流量测量结果均为湿基状态,无需进行湿度折算,消除了当前CO₂排放监测系统中由于湿度测量误差带来的计量偏差;(4)系统简单,施工量小,无需建立专门的CEMS小间。未来可将该系统应用于更多火电机组及其他行业碳排放计量中。

参考文献:

- [1] 姚顺春,支嘉琦,付金杯,等. 火电企业碳排放在线监测技术研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(06):97-108.
- [2] 宋明光,李小江,孙友源,等. 基于在线监测法的火电机组碳排放分析[J]. 洁净煤技术,2024,30(S1):464-473.
- [3] 李博,王东滨,刘通浩,等. 固定污染源烟气CO₂和流量在线监测分析[J/OL]. 大气与环境光学学报,1-21[2025-09-01]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.04.20250211.1405.002>.
- [4] 解婷婷,孙友源,郭振,等. 火电机组碳排放连续监测技术研究与应用综述[J]. 发电技术,2024,45(05):919-928.
- [5] 宋航. 固定源碳排放数据实时在线监测与处理系统设计[D]. 南昌:南昌大学,2023.
- [6] 吴昊,任鑫,朱俊杰. 发电行业二氧化碳排放监测技术现状与综述[J]. 热力发电,2023,52(07):1-13.
- [7] 梁思达. 多通道超声波流速仪的设计与研究[D]. 保定:华北电力大学,2021.
- [8] 张春雷,舒安杰,赵良,等. 美国火电CO₂排放连续监测的发展应用及启示[J/OL]. 中国环境监测,1-17[2025-09-01]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2861.X.20250605.1557.002>.
- [9] 谢子立,卢志民,姚顺春,等. 大口径管道烟气流量测量方法综述[J]. 热力发电,2024,53(04):112-124.
- [10] Reid J, Labrie D. Second harmonic detection with tunable diode lasers - comparison of experiment and theory [J]. Appl. Phys. B, 1981, 26(3):203-210.

(下转第102页)

- 软件,2025,42(2):48-53+80.
- [3] 许耀博,杨信强,徐广超,等. 基于格拉姆角差场和 CNN-BiGRU 的变压器故障识别法[J]. 电子科技,2025,38(4):73-79.
- [4] 沈博. 干式变压器绕组热点温度自动预测方法研究[J]. 自动化仪表,2025,46(6):73-76+82.
- [5] 汪孔屏,尹骏,孟鑫,等. 10 kV 干式变压器专用隔振装置的设计与优化研究[J]. 电力电子技术,2025,59(6):32-36.
- [6] 韩文文,谭政,张昆,等. 基于多传感器的干式变压器故障诊断系统设计[J]. 国外电子测量技术,2024,43(9):173-181.
- [7] 朱觉文,王长海,梁才,等. 基于光纤光栅的抗偏载压力环传感研究及其工程应用[J]. 传感技术学报,2024,37(10):1700-1708.
- [8] 朱云鸿,张旭,娄小平,等. 一种基于光纤光栅传感器的机械手远程操控手套[J]. 仪器仪表学报,2024,45(7):148-155.
- [9] 刘繁,李志强,谭跃刚,等. 光纤光栅高温应变测量及工作温区调控方法[J]. 压电与声光,2023,45(4):579-583.
- [10] 陈思,盛戈隼,张立静,等. 基于绕组等效热参数的干式变压器温度场分布快速仿真方法[J]. 高电压技术,2025,51(1):97-109.
- [11] 张旭博,姚雪美,徐贺杨,等. 多通道热电偶温度采集系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2025,33(4):270-276+321.
- [12] 刘波,姜盈盈,邹冰妍,等. 基于示波器的热电偶响应时间采集系统分析[J]. 自动化与仪表,2024,39(9):106-109.
- [13] 贺俊,李新娥,崔春生,等. 基于改进天鹰优化算法的热电偶动态补偿方法[J]. 探测与控制学报,2024,46(3):79-85.
- [14] 黄善杰,赵劲松,王岭雪,等. 低辐射率物体红外测温的研究进展[J]. 红外与毫米波学报,2025,44(2):241-257.
- [15] 柳皓,马强,付强,等. 基于改进 YOLOv4 的智能变电站二次设备稳态 AR 红外测温技术[J]. 计算技术与自动化,2024,43(2):35-40.
- [16] 苏戈,张垒,赵艳涛,等. 考虑 SF₆ 透射率校正的 GIS 设备红外测温技术[J]. 光学与光电技术,2023,21(4):98-106.

(上接第 56 页)

- [16] 李慧捷,袁浩宇,解臣硕,等. 基于自适应耕深调节的后悬挂调平系统方法研究[J]. 中国水稻科学,2025,1-15.
- [17] REN H P, WANG X, FAN J T, et al. Adaptive backstepping control of a pneumatic system with unknown model parameters and control direction[J]. IEEE Access,2019,7: 64471-64482.
- [18] 丁佳莉. 融合 PID 与 LQR 控制算法的智能机器人控制模型构建[J]. 自动化与仪器仪表,2025(04):136-140.
- [19] 王丹,孔天继,杨璟荣. 基于改进遗传算法的直角机器人分拣控制策略研究[J]. 仪表技术与传感器,2024(12):100-106.
- [20] 徐龙,丁萁琦,谭帅,等. 筒形阀电气液压同步控制系统控制策略优化[J]. 水电与新能源,2024,38(11):59-61.
- [21] 张森,韦明,王豪. 改进 BP 神经网络 PID 控制的机械臂电液伺服系统[J]. 自动化与仪表,2025,40(04):23-28.
- [22] 陈慧蓉,丁美玲. 基于模糊 PID 控制算法的温度控制系统[J]. 科技创新与生产力,2024,45(09):103-105+109.
- [23] 肖浩,李涛. 基于 PSO-模糊 PID 电液伺服系统控制[J]. 机床与液压,2025,53(10):139-144.
- [24] 吴娇,于宽,马雪莹,等. 基于 STM32 的多路控制智能机械臂[J]. 物联网技术,2025,15(06):81-84.
- [25] 徐贺杨,洪应平,杨松霖,等. 基于 FreeRTOS 和增量式 PID 的实时温度控制系统优化设计[J]. 测试技术学报,2025,39(03):346-353.
- [26] 杜海龙,罗贤峰. 基于增量式 PID 的全静压控制系统设计[J]. 现代电子技术,2025,48(12):6-12.

(上接第 80 页)

- [11] PENG Z M, DING Y J, CHE L, et al. Odd harmonics with wavelength modulation spectroscopy for recovering gas absorbance shape[J]. Optics Express,2012,20(11):11976-11985.
- [12] 周佩丽,谭文,彭志敏. 基于 TDLAS 的烟气中 CO 浓度混合取样式在线监测[J]. 仪器仪表学报,2019,40(11):233-240.
- [13] 陶冶,李强,张爱丽,等. 超声波流速仪在烟气流速测量中的应用[J]. 中国环境监测,2014,30(06):179-183.
- [14] ZHOU H, JI T, WANG R, et al. Multipath ultrasonic gas flow-meter based on multiple reference waves[J]. Ultrasonics,2018,82:145-152.
- [15] 邓诚. 网络型多声道超声波气体流量计设计与实验研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.