

文章编号:1001-5078(2025)03-0408-06

· 红外技术及应用 ·

基于近红外技术的非接触式酒精度检测系统

曹志群¹, 项高鹏¹, 胡临天², 廖梓宏¹

(1. 黑龙江科技大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 计算机与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要: 酒精浓度的非接触式测量具有便捷快速, 实时跟踪等特点, 在酒业生产等领域具有重要的研究意义。本文基于酒精溶液近红外吸收光谱特性, 使用 1300 nm 波长的激光二极管和光电探测器开发了此套以 STM32 单片机为内核的酒精度快速检测系统。铟镓砷二极管探测器与配套硬件捕捉与转换光电信号, 以检测电压差值反映酒精溶液的红外吸收, 与酒精度多项式拟合建立检测模型, 经温度修正后存入主控系统实现酒精浓度预测。实验表明, 检测系统对样本组的拟合优度为 0.9996, 对验证组检测的平均标准偏差为 0.158, 远低于传统酒精计的 0.5。结果表明, 该检测系统相比于市场上现有红外检测系统具有检测精度高、稳定性强、连续检测的特点, 可在不破坏酒精样液的前提下实现对浓度的快速检测, 满足市场上的工业标准与需求, 对制酒业等相关行业具有重要应用价值。

关键词: 光学; 非接触式测量; 近红外吸收光谱特性; 近红外检测技术; 温度修正; 酒精度检测
中图分类号: TH74; TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.013

Non-contact alcohol content detection system based on near-infrared technology

CAO Zhi-qun¹, XIANG Gao-peng¹, HU Lin-tian², LIAO Zi-hong¹

(1. School of Science, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: The non-contact measurement of alcohol concentration has the characteristics of convenience, rapidity, and real-time tracking, which is of great research significance in the field of alcohol production. In this paper, based on the near-infrared absorption spectral characteristics of alcohol solution, a set of rapid alcohol concentration detection system with STM32 microcontroller as the kernel is developed by using a laser diode and a photodetector with a wavelength of 1300 nm. An indium gallium arsenic diode detector is used with the supporting hardware to capture and convert the photoelectric signal, and the infrared absorption of the alcohol solution is reflected by the detection voltage difference. Furthermore, a detection model is established by fitting with the alcohol polynomial, and the temperature correction is deposited into the main control system to realize the alcohol concentration prediction. The experimental results show that the goodness-of-fit of the detection system for the sample group is 0.9996, and the average standard deviation of the test for the validation group is 0.158, which is much lower than that of the traditional alcohol meter of 0.5. The results show that the detection system has the characteristics of high detection accuracy, strong stability and continuous detection compared with the existing infrared detection systems on the market, and can achieve the rapid detection of the concentration without destroying the alcohol sample, which meets the industrial standards and demands

基金项目: 校内博士启动经费项目 (No. 702/000009020367) 资助。

作者简介: 曹志群 (1982 -), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电功能材料与器件方面的研究。E-mail: 273448358@qq.com

收稿日期: 2024-04-30

in the market, and has important application value for the alcohol industry and other related industries.

Keywords: optics; non-contact measurement; near infrared spectroscopy characteristics; near infrared detection technology; temperature correction; alcohol content detection

1 引言

中国酒业历史悠久,样式繁多。在相关行业中,酒精度(酒精含量)是酒产品的重要检测指标之一^[1]。目前国内酒精度的测定方法主要采用 GB 5009.225—2016《食品安全国家标准酒中乙醇浓度的测定》中的酒精计法或密度瓶法^[2],随着现代精密分析仪器的的发展与应用,气相色谱法、近红外光谱分析等方法也被逐渐应用于酒精度的测量^[3]。其中,酒精计法需对样液加热蒸馏,使用精密酒精计读取酒精溶液的体积分数^[4];密度瓶法需在恒温条件下,使用同一密度瓶分别测量计算等体积样液与蒸馏水的质量比值,进而得出样液的相对酒精度^[5-6]。两种检测方法虽所需设备简单,但均需提前对样液进行预处理,所需样液多,检测时间长^[7],检测过程费时费力且测定精度只能保留一位小数^[8]。气相色谱法虽满足精度要求,但操作繁琐且仪器造价昂贵^[9]。

近红外光谱法是指在红外谱区域(780~2526 nm)内,乙醇分子官能团对红外光不同的程度吸收而产生不同光谱吸收峰位置及强度,以此建模实现对含氢有机物定量分析的方法^[10]。目前可通过各类专用型酒精分析仪在2~3 min内完成样液酒精度的无损检测^[11],该方法因快速、准确、稳定的特点而在近几十年备受关注并快速发展。但检测过程均依赖于各类专用型的近红外光谱仪,如 Antaris II 傅立叶变换 NIR 光谱仪(美国 Thermo Fisher 公司)、快速酒精分析仪(比利时 Unisensor 公司)和 Anton Paar 酒精分析仪等,这些仪器造价昂贵且操作繁琐,致使工业上急需一套便捷集成的酒精度快速检测系统。尽管市面上虽有一些 AT89C52, ARM 的单片机检测装置^[12],但检测精度低^[13]。

本文基于近红外检测技术,使用差分检测的分析方式开发了一套以 STM32F103C8T6(后文简称 STM32)为主控系统的酒精度快速检测系统。装置使用激光二极管和光电探测器捕捉与转换光电信息,通过酒精度定量分析可在 1.5 s 内实现对样液酒精度的检测^[14]。相比于传统的近红外检测技术,本装置检测操作便捷、检测结果精确,硬件一体式,

具有极大的市场应用价值。

2 检测系统设计

2.1 系统结构构建

本文所提出的酒精度快速检测系统,由近红外光准直发射模块^[15]、比色皿卡槽、铟镓砷二极管探测器、温度传感器、滤波电路、二级放大电路、ASD1256 芯片、STM32 单片机和 OLED 显示屏组成。其中,铟镓砷二极管探测器、二级放大电路、滤波电路、ASD1256 芯片通过 PCB 板集成连接,可实现非接触式酒精浓度快速检测^[16]。将各元器件整合后的实物图如图 1 所示。

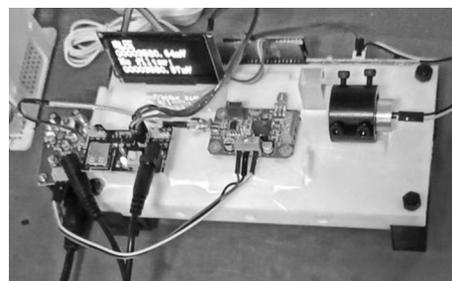


图 1 装置实物图

Fig. 1 Actual drawing of the installation

红外激光二极管的芯片材料为 InGaAsP,发射源前配有可调焦的准直镜。工作时外接 12 V、0.8 A 的直流稳压源,通过可调螺母拼接在 3D 打印的一体式底座上。探测器集成模块捕捉发射源的红外光进行光电信号转换后,输入 PCB 板内的滤波电路和二级放大电路进行信号的噪声过滤和放大调偏。ASD1256 芯片读取放大电压后通过 SPI 总线发送给主控系统,该系统采用 ARM Cortex-M3 内核,具有低功耗、高性能等优点。主控系统进行信息处理与计算后控制 OLED 显示屏展示检测电压值^[17]。系统硬件与功能框图如图 2 所示。

2.2 近红外光波长的选定分析

近红外光谱可反应含氢基团的伸缩、振动、弯曲等能级跃迁所引起的倍频和合频吸收^[18]。酒精溶液中乙醇分子的化学式为 C₂H₅OH,共包含三类含氢基团:甲基氢(-CH₃-)、亚甲基氢(-CH₂-)和羟基氢(-OH),其化学键分别为:一个 C-C 键、三个 C-H 键、两个 C-H 键、一个 C-O 单键和一个

O-H 单键。水分子的化学式为 H_2O , 其化学键只含有 2 个 O-H 键。由于不同化学键对不同波长红外光的吸收特性不同^[19], 因此, 选用的红外光波长对实验结果的精确度有着不可忽视的影响。

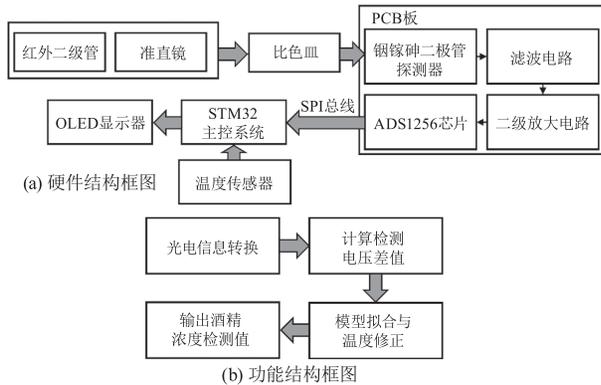


图 2 检测系统结构框图

Fig. 2 Detection system structure diagram

王晓飞团队依据此原理进行了酒精含量近红外光谱检测最佳分析谱段的研究^[20], 分析了 58 个酒精样本的归一化透过率光谱图, 发现 1200 ~ 1350 nm 谱段的近红外光为酒精度定性反应的敏感谱段, 在该谱段内溶液的酒精度越高, 光谱的透射率也越高。

在酒精度定性反应的敏感谱段内, 比对 1200 nm、1300 nm 和 1350 nm 三种波长二极管。在室温 25 °C 下, 使用 AQ2140 型号的安藤光学万用表测试二极管的相对辐射强度。结果表明, 1300 nm 波长的二极管相对辐射强度最强为 1.0 A. U, 吻合最大红外归一化透过率对应的红外波长, 则装置红外模块使用 1300 nm 波长二极管检测效果最佳。

3 检测模型构建

3.1 材料与方法

3.1.1 实验材料与样本

实验材料: 无水乙醇(色谱纯)、离子水。

实验样本: 在室温 25 °C 下, 将无水乙醇与离子水按体积配置比以 5.0 % vol 为浓度梯度, 从 30.0 % vol 至 80.0 % vol 共配置 11 组浓度溶液作为实验组; 再相同配置 39.17 %、50.10 %、59.89 %、69.66 %、78.15 % 五组标准酒精度溶液作为验证组。

3.1.2 实验方法

酒精度定量分析模型的构建分多项式拟合和温度修正两部分。多项式拟合时, 依次将实验组的酒

精溶液加入比色皿, 计算 OLED 显示屏前后显示检测电压的差值, 等效酒精溶液的红外吸收。对 11 组实验样本平行实验, 并在更换样液时充分烘干比色皿, 得各组检测电压差值, 与酒精度多项式拟合, 得初步定标方程模型。

为解决温度对酒精溶液红外吸收的影响, 再对酒精度定标模型进行温度修正^[21], 模型构建思维框图如图 3 所示。

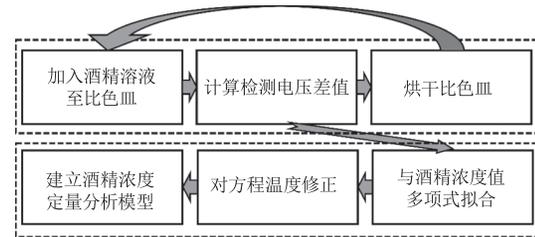


图 3 模型构建结构框图

Fig. 3 Model construction structure diagram

3.2 酒精度定量分析模型的构建

(1) 数据采集与预处理

采集实验组中每个样本在加入比色皿前后 OLED 显示的检测电压值, 计算每个样本对应的检测电压差值等效溶液的红外吸收, 实验组检测结果如表 1 所示。

表 1 实验组的测试数据

Tab. 1 Test data for the experimental group

Sample number	Alcohol concentration / % vol	Detect voltage differences / mV
1	30	1769
2	35	1713
3	40	1675
4	45	1625
5	50	1581
6	55	1532
7	60	1480
8	65	1426
9	70	1378
10	75	1319
11	80	1257

由表 1 知, 当实验样本的酒精度定量增加时, 检测系统所计算的检测电压差值定量减小, 表明酒精溶液的红外吸收量与浓度值之间存在对应关系, 由此, 本文使用多项式拟合建立变量之间的对应关系。

(2) 红外吸收定量建模

对样本数据进行多项式拟合,其酒精度与检测电压差值的多阶拟合效果如图4所示。表2为不同拟合阶数下的误差均值平方和(SSE)和拟合优度。

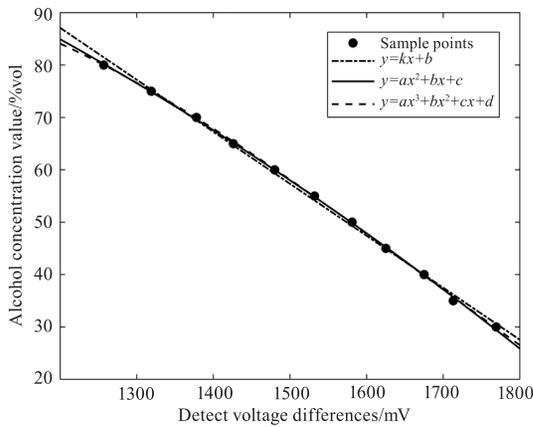


图4 拟合效果对比图

Fig. 4 Comparison of fitting effects

表2 不同拟合阶数的拟合效果

Tab. 2 The fitting effect of different fitting orders

Order	SSE($\times 10^{-5}$)	R^2
I	6.103	0.9978
II	1.225	0.9996
III	0.8873	0.9997

由表2可知,二阶拟合建模时的均方误差和拟合优度相近三阶,优于一阶。结果表明,二阶为实验样本的拟合峰值,采用二阶多项式拟合建模时的拟合效果最佳,方程为:

$$y = -2.908x^2 \times 10^{-5} - 0.01124x + 140.3 \quad (1)$$

式中, x 为酒精溶液的检测电压差值; y 为装置检测的酒精度。

(3) 温度修正多项式方程

为消除温度对酒精溶液红外吸收的影响,将检测系统置于恒温箱内,设置温度梯度做平行实验,求解单位温度变化对检测结果产生的精度漂移,予以抵消修正。

将实验样本置于不同恒温条件(25℃~30℃)的温度区间,以1℃为温度梯度)下,分析温度对酒精溶液红外吸收的影响,实验结果如图5所示。

由图5知,温度对酒精溶液红外吸收的影响呈平移关系,温度上升1℃,检测电压差值平均漂移1.88 mV。由此,引入温度变量 t 加入模型,抵消温度对检测结果产生的偏差,使修正后的定量分析模型可在常规温度下实现浓度检测。

修正单位为 1.88,修正后的酒精度检测模型为:

$$y = -2.908[x - 1.88(t - 25)]^2 \times 10^{-5} - 0.01124[x - 1.88(t - 25)] + 140.3 \quad (2)$$

式中, t 为温度; x 为酒精溶液的检测电压差值; y 为装置检测的酒精度。

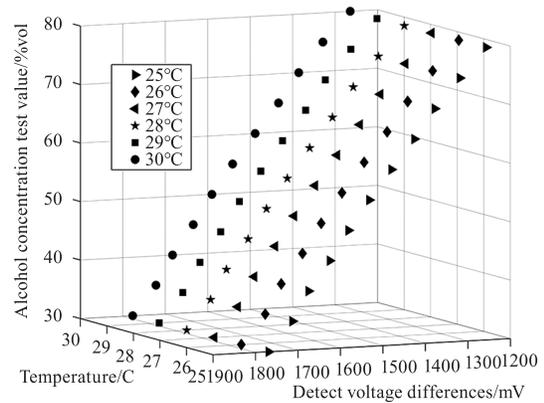


图5 温度变化造成红外吸收的偏移量

Fig. 5 Temperature changes cause an offset in infrared absorption

4 检测结果分析

4.1 温度修正的定量分析

在主控系统内,分别存入经温度修正前后的两种酒精度定量分析模型,在五种恒温条件(25℃、26℃、27℃、28℃、29℃)下,检测65.14%的标准浓度酒精溶液,分析温度变化对检测结果造成的影响,检测结果如图6所示。

由图6知,温度上升导致酒精溶液的红外吸收也上升,从而导致检测结果的精度降低,加入温度变量至定标模型抵消了温度变化对检测结果的偏差,检测精度与稳定性显著提升。

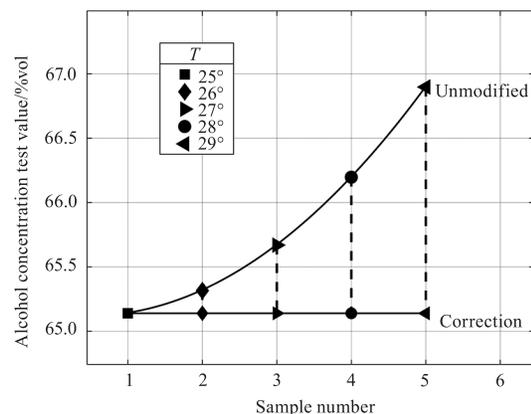


图6 温度修正前后酒精浓度检测结果的比较

Fig. 6 Comparison of alcohol concentration test results before and after temperature correction

4.2 检测精度的定量分析

在 25 ℃ 下,检测验证组酒精溶液的酒精精度,由表 3 知,酒精度的检测值与标准值的绝对值平均标准偏差(RM-SEP)为 0.158,表明本方案所开发的酒精浓度快速检测系统具有良好的检测能力,超过常规分析方法的精度要求。

表 3 验证组检测结果

Tab. 3 Verify the test results of the group

Sample number	Standard value/vol	Detected values/vol	Error value/vol
1	39.17	39.34	+0.17
2	50.09	49.95	-0.14
3	59.82	59.97	+0.15
4	69.52	69.41	-0.11
5	78.05	78.27	+0.22

5 结论

本方案基于酒精溶液近红外吸收光谱特性,使用差分检测的分析方式,以 1300 nm 波长的激光二极管和光电探测器组合设计了此套一体式酒精度快速检测系统,可在 1.5 s 内完成对样液酒精度的快速检测,检测用时少,系统搭建造价低。检测模型进行了温度修正,稳定性与实用性显著提升。对验证组的检测结果平均标准偏差为 0.158,远低于传统酒精计的 0.50,说明该检测系统具有较好的检测精度与较广的应用价值。

参考文献:

- [1] Yuan Qiang, Ji Zhe, Wang Dan, et al. Rapid determination of alcohol content in healthcare liqueur by near-infrared spectroscopy[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2021(8):126-130. (in Chinese)
袁强,吉喆,王丹,等.近红外光谱法快速测定养生酒的酒精度方法研究[J].*酿酒科技*,2021(8):126-130.
- [2] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准酒中乙醇浓度的测定:GB 5009.225—2016[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [3] Hu Yaoqiang, Guo Min, Ye Xiushen, et al. Indirect determination of liquor alcohol content based on near-infrared spectrophotometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022,42(2):410-414. (in Chinese)
胡耀强,郭敏,叶秀深,等.近红外光谱法间接测定白酒酒精度[J].*光谱学与光谱分析*,2022,42(2):410-414.
- [4] Huang Yuanyuan, Xiao Meng, Peng Jinlong, et al. Alcohol content determination of Chinese rice wine using alcolyzer wine[J]. *China Brewing*, 2014, 33(4):139-141. (in Chinese)
黄媛媛,肖蒙,彭金龙,等.快速酒精仪在黄酒酒精度分析中的应用[J].*中国酿造*,2014,33(4):139-141.
- [5] Hu Huixiang. Rapid determination of condiment liquor by near infrared spectroscopy alcohol quality [J]. *Modern Food*, 2019(8):138-143. (in Chinese)
胡徽祥.近红外光谱法快速测定调味料酒中的酒精度[J].*现代食品*,2019(8):138-143.
- [6] Tang Weizu, Li Li, Zhang Hui. Rapid detection of alcohol content and density of Huangjiu by near-infrared spectroscopy [J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2023(4):121-125. (in Chinese)
唐慰祖,李丽,张辉.近红外光谱法快速检测黄酒酒精度及密度的研究[J].*酿酒科技*,2023(4):121-125.
- [7] Song Guangjun, Zeng Yue, He Junjie, et al. Rapid monitoring of alcohol content in fermentation process of litchi wine by raman spectroscopy[J]. *China Brewing*, 2021, 40(7):184-188. (in Chinese)
宋光均,曾悦,何俊杰,等.拉曼光谱快速监测荔枝酒发酵过程酒精度的研究[J].*中国酿造*,2021,40(7):184-188.
- [8] 孙谦,王加华,潘璐,等.葡萄酒发酵液中酒精含量的快速检测方法[C]//2007年中国农业工程学会农产品加工及贮藏工程分会学术年会暨中国中部地区农产品加工产学研研讨会,2007:27-30.
- [9] 曾莹,盛俊.气相色谱法测定白酒的酒精度[J].*化工管理*,2018(30):201-202.
- [10] Diao Juanjuan, Li Wei, Li Li, et al. Rapid detection of alcohol in wine by near infrared optical fiber spectroscopy [J]. *Food and Drug*, 2021, 23(1):6-10. (in Chinese)
刁娟娟,李玮,李莉,等.近红外光纤光谱法快速检测葡萄酒中酒精度[J].*食品与药品*,2021,23(1):6-10.
- [11] Peng Bangzhu, Long Minghua, Yue Tianli, et al. Determination of alcohol concentration in distilled spirit based on PLS-FT-NIRS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(4):233-237. (in Chinese)
彭帮柱,龙明华,岳田利,等.用偏最小二乘法及傅立叶变换近红外光谱快速检测白酒酒精度[J].*农业工程学报*,2007,23(4):233-237.
- [12] Huang Yong, Zhang Shuqun, Huang Changzhao, et al.

- Manufacture of near infrared spectrometer base on ARM embedded-system[J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(11):127-129. (in Chinese)
- 黄泳,张树群,黄常钊,等. 基于 ARM 嵌入式近红外光谱仪器的研制[J]. *微计算机信息*, 2008, 24(11):127-129.
- [13] Zhou Yang, Liu Jie, Wang Jiyuan. Design of portable infrared alcohol concentration based on DSP and FPGA [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2015, 31(5):167-169. (in Chinese)
- 周杨,刘杰,王纪元. 基于 DSP 和 FPGA 的便携式红外酒精浓度检测系统设计[J]. *科技通报*, 2015, 31(5):167-169.
- [14] Zhang Suishuan, Li Yanlei. Determination method of alcohol content during wine fermentation[J]. *China Brewing*, 2016, 35(1):161-164. (in Chinese)
- 张虽栓,李延垒. 葡萄酒酿造过程酒精度检测方法研究[J]. *中国酿造*, 2016, 35(1):161-164.
- [15] Zhao Leihong, Pan Dongning, Li Yingjie, et al. A non-contact alcohol measurement method based on neural network correction algorithm [J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(2):192-197. (in Chinese)
- 赵雷红,潘冬宁,李英杰,等. 基于神经网络校正算法的酒精非接触测量方法[J]. *红外技术*, 2021, 43(2):192-197.
- [16] Li Qingbo, Jia Zhaohui. Research on chlorophyll content non-contact measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(1):29-33. (in Chinese)
- 李庆波,贾召会. 叶绿素含量非接触式检测方法研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(1):29-33.
- [17] Liu Jianzhao, Wang Ning. Design of analog illuminometer based on single chip microcomputer [J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(1):56-62. (in Chinese)
- 刘建钊,王宁. 基于单片机的模拟光照度计设计[J]. *光学仪器*, 2021, 43(1):56-62.
- [18] Feng Junqin, Zhou Yuchang, Liu Guixiong, et al. The optical characteristics of alcohol and alcoholicity detection [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2006, 23(2):253-257. (in Chinese)
- 冯军勤,周誉昌,刘桂雄,等. 酒精的光学特性及浓度检测[J]. *光谱实验室*, 2006, 23(2):253-257.
- [19] Wang Tian, Wu Wei, Zhang Ziyunxin. Design of non-contact measurement system for ethanol concentration using near infrared spectrometry characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(12):174-180. (in Chinese)
- 王添,吴卫,张紫芸馨. 利用近红外吸收光谱特性实现酒精浓度的非接触式测量系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(12):174-180.
- [20] Wang Xiaofei, Liu Guili, Bao Yanfei, et al. The best analysis spectrum band detecting alcohol concentration based on NIRS [J]. *Information Technology*, 2012, 36(3):30-32. (in Chinese)
- 王晓飞,刘桂礼,鲍艳妃,等. 酒精含量近红外光谱检测的最佳分析谱段[J]. *信息技术*, 2012, 36(3):30-32.
- [21] Wang Ting, Han Zhiyang, Yu Yue, et al. Temperature correction method for gas concentration measurement based on TDLAS Technology [J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(2):208-213. (in Chinese)
- 王婷,韩志洋,俞跃,等. 基于 TDLAS 技术气体浓度测量的温度修正方法[J]. *激光与红外*, 2024, 54(2):208-213.