

仪器自主创新 (189 ~ 196)

国产在线傅里叶红外气体分析系统开发及其在垃圾焚烧监测领域的应用

查丽霞, 周新奇, 陈磊, 王郡艺, 王志敏, 彭衡蒂

(杭州谱育科技发展有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 傅里叶变换红外光谱技术 (FTIR) 因响应速度快、测量范围广、维护成本低和无痕检测等优点已被广泛应用于在线烟气监测领域。但该技术难度大, 进口设备长期占据超高的市场份额。为了打破这种局面, 开发了一种基于傅里叶变换技术的在线傅里叶红外气体分析系统。通过对比验证, 发现自制设备性能基本已达到进口主流设备同等水平。为了进一步验证实际使用情况, 分别在实验室和垃圾焚烧现场对气体性能进行验证, 其验证结果远优于相关标准的要求。此外, 在设备连续运行的 15 个月内, 对测量结果进行实时监控, 并与同一排口的 SICK (西克) FT 进行长期比对, 发现其长期测量趋势和测量结果具有高度一致性, 充分表明该分析仪在测量实际烟气时具有较高的准确性和可靠性, 可满足垃圾焚烧在线监测领域的需求。

关键词: 国产傅里叶变换红外光谱仪; 仪器开发; 在线监测; 长期数据比对

中图分类号: O657.33; TH74

文献标志码: B

文章编号: 1006-3757(2025)03-0189-08

DOI: 10.16495/j.1006-3757.2025.03.007

CSTR: 32263.14.j.1006-3757.2025.03.007

Development of Domestic On-line Fourier Transform Infrared Gas Analyser and Its Application of Waste Incineration Monitoring

ZHA Lixia, ZHOU Xinqi, CHEN Lei, WANG Junyi, WANG Zhimin, PENG Hengfu

(Hangzhou Puyu Technology Development Co. LTD., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) is widely used in the field of on-line flue gas monitoring due to its advantages such as high response speed, wide measuring range, low maintenance cost and traceless detection. However, due to the high technical difficulty, imported equipment has occupied a high market share for a long time. In order to break the situation, an on-line Fourier transform infrared gas analyser based on Fourier transform technology has been developed. Through comparison and verification, the performance of the self-made equipment has basically reached the same level as that of the imported mainstream equipment. In order to further verify the actual usage, the performance of the gas was verified respectively in the laboratory and at the waste incineration site, and the verification results were far better than the index requirements of the relevant standards. In addition, during the continuous operation of the equipment for 15 months, the measurement results were monitored in real time, and the long-term comparison was made with the SICK FT of the same outlet. The long-term measurement trend and measurement results were highly consistent, which fully demonstrated that the analyzer has high accuracy and reliability when measuring actual flue gas, meeting the requirements in the field of on-line monitoring for waste incineration.

Key words: domestic Fourier transform infrared spectrometer; instrument development; on-line monitoring; long-term data comparison

收稿日期: 2025-03-05; 修订日期: 2025-05-28

作者简介: 查丽霞 (1995—), 女, 中级工程师, 主要从事傅里叶红外应用研究, E-mail: lixia_zha@fpi-inc.com

通信作者: 周新奇 (1981—), 男, 高级工程师, 主要从事光谱技术与光谱仪开发, E-mail: xinqi_zhou@fpi-inc.com

随着仪器仪表行业的快速发展,烟气监测方法日益多样化.传统的烟气监测方法往往需要多台设备协同工作才能达到监测要求,如采用紫外法分析烟气中的 SO_2 和 NO_x ,虽然具有较高的可靠性,但紫外分析仪不能同时测量烟气中的 CO_x 、 HCl 和 HF 等有害组分,因此需要配置紫外差分吸收光谱仪、激光吸收光谱仪和电化学传感器等监测设备.这种组合测量的方法虽然能满足测量要求,但多台设备同时运行不仅使监测成本过高,而且后期维护的工作量也巨大,耗时耗力^[1-3].相较于其他测量方式,傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)因具有无痕测量、检出限低、响应速度快、维护成本低和可实现多种气体同时定量分析等优点,已成为烟气排放在线监测领域的理想监测手段^[4-5].据统计,目前全球傅里叶年复合增长率约为 6.1%,具有极大的市场应用前景,但由于我国对傅里叶分析仪的研究开发起步较晚,且设备技术难度较高,设备性能要求更高,与进口产品相比还存在诸多问题,进而导致进口产品长期占据我国市场上的绝对主导地位^[6-7],被大众所熟知的主要有赛默飞世尔科技(Thermo Fisher Scientific)、安捷伦科技(Agilent Technologies)和岛津(Shimadzu)、布鲁克(Bruker)等,其中布鲁克(Bruker)、Gaset、ABB(Asea Brown Boveri)和西克(Sick)等占据了我国在线环境监测领域的绝大市场.但随着我国技术的不断发展,国产设备也逐渐在环境监测、工业过程控制和实验室检测等领域崭露头角,其中在环境监测领域具有代表性的有聚光科技(FPI)、谱育科技(EXPEC)、雪迪龙(SDL)、皖仪科技(Waycal)和泽天春来科技(Tranlion)等,虽然其与进口产品还存在一定的差距,但已基本满足作为在线监测设备的使用要求.为了积极响应国产化替代号召,打破对进口产品的过度依赖,我公司通过自主研究,开发了基于傅里叶变换光谱技术的红外光谱仪(FTIR),并集成了 FTIR 在线监测系统,用于固定污染源和环境空气的在线监测.

本文介绍了 FTIR 光谱仪的核心部件迈克尔逊干涉仪的开发情况及其最终性能指标,进一步组装成 FTIR 在线监测系统,对其长期光学性能指标进行验证并对标进口产品,其结果表明自制设备性能已基本达到进口产品水平.为了验证具体使用情况,先对该系统进行实验室联调联测,完成测试后在垃圾焚烧厂进行长期烟气排放在线监测验证,并与进口设备(SICK FT)进行长期数据比对,其结果表现

出较高的数据准确度、可靠性以及良好的长期稳定性,充分说明该设备具有较高的可用性,也为在线傅里叶红外光谱仪的国产化替代提供了重要的借鉴意义.

1 国产在线 FTIR 光谱仪开发

FTIR 光谱仪是基于傅里叶变换原理的一种分析检测设备,主要由光源、干涉仪、气体池、检测器及其外围的硬件软件系统组成.这些组件相互协作,共同决定了光谱仪的性能,而光谱仪的性能直接决定产品的可用性.不同于其他形式的仪器设备,在线监测设备由于其特殊的数据连续性和可靠性要求,对光谱仪性能要求更高,因此在基于已有的 FTIR 分析仪的基础上,对干涉仪、气体池及扫描系统作进一步设计优化,进而开发出一款高性能的光谱仪.

影响 FTIR 光谱仪最终性能的因素有很多,但干涉仪的影响最为明显,其性能指标会直接影响光谱仪的光学性能指标和气体性能指标,进而影响设备的应用前景^[8].为了开发出高性能的干涉仪,可采用以下技术手段.首先,采用一体成型的干涉仪腔体,无需人工调试,降低结构件形变导致的光路偏移.其次,增加红外光源和干涉仪模块的高精度恒温控制系统(图 1),即通过加热装置和 PT100 进行温度控制,其温控精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,使得设备的光谱稳定性得到极大提升,如控温前后设备在 72 h 内基线倾斜率由 5% 提升至 2% 左右,对后续在线监测设备的集成和应用具有较大意义.最后,采用无摩擦轴承、角镜构建动镜和双摆角锥结构等设计,不仅显著增加了干涉仪的使用寿命,同时也保证了高质量的光谱数据.

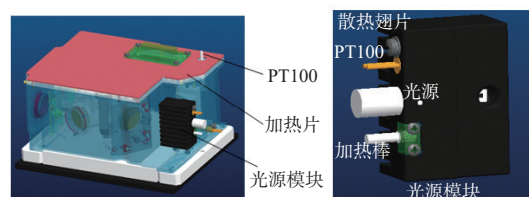


图 1 干涉仪恒温控制系统

Fig. 1 Thermostatic control system of interferometer

气体池是光谱仪的重要模块,为了进一步降低设备检出限,在原有设计的基础上,通过增加光线的反射次数来增加光程长度,进而降低检出限^[9].与

此同时, 类比干涉仪的设计原理, 将气体池镜片与腔体进行高精度匹配, 并采用空气层连接光路转接模块和场镜模块, 可有效减小材料形变导致的光路偏移(图2), 这种设计不仅保证了设备的高稳定性, 还保证了设备间的一致性, 优异的稳定性和一致性有利于后续应用研究工作的开展, 如定性定量光谱库的构建及复用。此外, 为了提升气体池模块的使用寿命, 对气体池内壁和镜片进行镀保护膜处理, 以适用于强腐蚀性气体的应用场景, 且辅以腔体滑动式安装设计, 实现气体池的无缝切换, 在保证使用寿命的同时, 也极大提高了后续维护的便利性。

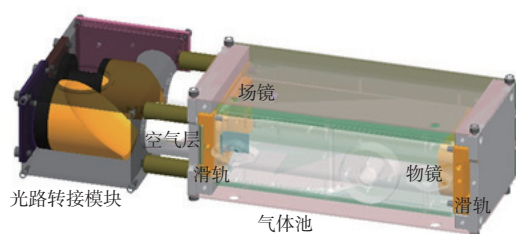


图2 气体池模块

Fig. 2 Gas cell module

除了对核心器件模块进行设计与优化外, 在扫描系统方面也设计出高速且稳定的系统控制(图3)。首先, 对音圈电机的控制采用自研的高速运动控制系统, 辅以无摩擦轴承, 这既保证了扫描的高速性又保证了采样的稳定性。其次, 采用双模拟数字(AD)数据采集的电路设计, 即采用双通道模拟数字转换器(ADC)同时采集激光和红外信号, 保证通道间时

域采样完全同步, 确保了光谱获取的准确性。

经过一系列的设计、验证和优化, 最终研发出稳定可靠的干涉仪模块以及对应的 FTIR 系统, 为了检验设备性能, 对自制产品性能依次进行验证。首先, 对自制干涉仪和光谱仪模块的几个关键指标进行测试验证, 并将这些测试结果对标进口主流产品的技术参数, 具体结果如表1所列。由表1可看出, 自制干涉仪和光谱仪的性能指标已基本达到进口主流产品的性能水平, 且部分技术指标优于进口产品。由于在线监测设备对长期稳定性要求较高, 为了进一步检验光谱仪的性能水平, 在系统环境下对其中几项长期性能指标进行验证, 即在连续运行72 h后, 对其72 h内的基线倾斜率、基线重复性、基线稳定性、波数准确度和波数稳定性指标进行测试, 具体检验方法参考标准 GB/T 21186—2007《傅立叶变换红外光谱仪》^[10], 并将该结果与同类型进口产品进行对标, 具体测试结果如表2所列。从测量结果可看出, 虽然自制设备在短期性能上与进口设备基本一致, 但在长期稳定性方面, 部分指标还是存在一定的差距, 因此后续还需作进一步提升改进。为了验证在该性能下的实际应用水平, 需进一步在实验室和实际应用现场进行气体性能测试。

2 试验部分

2.1 试验材料

高纯氮气(纯度 99.99%); SO₂ 标气(200 mg/m³,

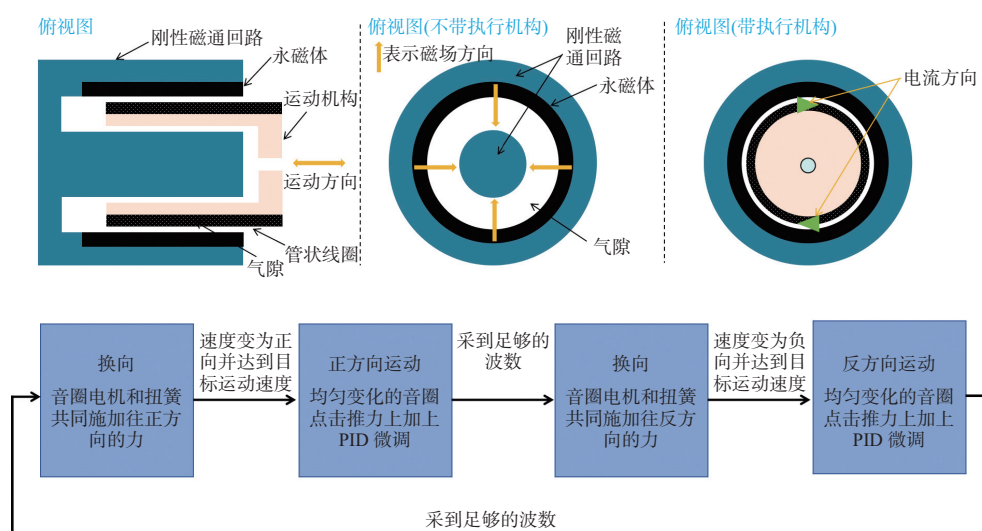


图3 高速扫描系统

Fig. 3 High-speed scanning system

表 1 核心光机技术参数的国内外对比情况

Table 1 Comparison of core opto-mechanical technical parameters at home and abroad

	关键技术指标	进口主流产品	自制产品
干涉仪模块	光谱范围/(cm^{-1})	800~4 500	600~4 500
	分辨率/(cm^{-1})	0.1~8	0.5~8
	信噪比	5 000:1	6 000:1
	扫描频率/(次/s)	≥ 64	≥ 70
光谱仪模块 (以 SO_2 计)	响应时间/s	<60	<50
	采集速度/(次/s)	≥ 1	≥ 1
	整机重复性/%	<0.5	<0.5
	检出限/(mg/m^3)	<0.5	<0.3
	气体池光程/m	5	5

表 2 长期光学性能指标参数的国内外对比情况

Table 2 Comparison of long-term optical performance index parameters at home and abroad

性能指标	波数范围/(cm^{-1})	进口主流产品	自制产品
基线倾斜率	全波段	2.15%	2.43%
基线重复性	2 500~2 600	99.8%	99.8%
基线稳定性	2 500~2 600	9.08×10^{-5}	2.55×10^{-4}
波数准确度	$\sim 1\,500$	$0.007\, \text{cm}^{-1}$	$0.01\, \text{cm}^{-1}$
波数稳定性	$\sim 1\,500$	0.001	0.003

99.99%); CO 标气 ($200\, \text{mg}/\text{m}^3$, 99.99%); NO 标气 ($200\, \text{mg}/\text{m}^3$, 99.99%); NO_2 标气 ($100\, \text{mg}/\text{m}^3$, 99.99%) 和 HCl 标气 ($100\, \text{mg}/\text{m}^3$, 99.99%)。以上试剂均购于杭州新世纪气体有限公司。

2.2 试验仪器

傅里叶红外在线监测系统 EXPEC 2000FT (单表型号为 EXPEC 1 630), 购于杭州谱育科技发展有限公司, 如图 4 所示 (光程: 5 m, 分辨率: $4\sim 8\, \text{cm}^{-1}$ 可调, 波数范围: $600\sim 4\,500\, \text{cm}^{-1}$ 可调, 线性误差: $\pm 2.0\%$ F.S., 零点漂移: $\pm 2.0\%$ F.S., 量程漂移: $\pm 2.0\%$ F.S.)。

2.3 实验室验证

首先需要对每一台傅里叶红外在线监测系统进行定量模型的构建, 即根据具体量程需求, 配置不同浓度梯度的单因子吸收光谱曲线, 针对该设备, 结合后续的应用场景和排放要求, 具体量程为 SO_2 : $0\sim 200\, \text{mg}/\text{m}^3$, NO : $0\sim 200\, \text{mg}/\text{m}^3$, CO : $0\sim 200\, \text{mg}/\text{m}^3$, NO_2 : $0\sim 100\, \text{mg}/\text{m}^3$, HCl : $0\sim 100\, \text{mg}/\text{m}^3$, CH_4 : $0\sim 100$



图 4 傅里叶红外在线监测系统 (EXPEC 2000FT)

Fig. 4 FTIR on-line monitoring system (EXPEC 2000FT)

mg/m^3 , HF : $0\sim 15\, \text{mg}/\text{m}^3$, NH_3 : $0\sim 15\, \text{mg}/\text{m}^3$, H_2O : $0\sim 40\%$ 。在完成定量模型的构建后, 为了进一步验证整个傅里叶红外在线监测系统的可用性, 在实验室阶段对 EXPEC 2000FT 进行联调联测, 即对定量模型中的 SO_2 、 NO 、 CO 、 NO_2 和 HCl 气体进行验证, 验证内容为整个系统的示值误差、响应时间、零点漂移和量程漂移, 具体验证方案参考各技术要求和相关标准等^[11-12], 其中示值误差、零点漂移和量程漂移的指标均要求小于 $\pm 2\%$ F.S., 响应时间小于 150 s, 结果均高于相关标准对应的指标要求。具体计算方法如下所示:

(1) 示值误差

待系统运行稳定后, 先进行待测组分的零点校准和满量程校准, 随后通入高浓度的标准气体 (其浓度为满量程的 80%), 待示值稳定后记录测量值, 并通入零点气体, 再次通入高浓度的标准气体, 重复该步骤, 记录三次测量值的平均值 $\bar{C}$, 并按照公式 (1) 计算示值误差 L , 随后再按照相同的方法分别测量中浓度和低浓度的示值误差 (其浓度分别为满量程的 50% 和 20%)。

$$L = \frac{(\bar{C} - C)}{R} \times 100\% \quad (1)$$

L —待测组分的示值误差, %; C —标准气体浓度标称值, mg/m^3 ; $\bar{C}$ —待测组分测量平均值, mg/m^3 ; R —待测组分满量程值, mg/m^3 。

(2) 响应时间

待系统运行稳定后, 先进行待测组分的零点校准和满量程校准, 随后通入零点气体至整个系统使

得管路无待测组分,最后按照要求通入满量程标准气体,待电磁阀切换时,用秒表开始记录,待测量结果上升至标准气体浓度标称值的90%时,结束秒表记录,将此段时间记为系统的响应时间 T 。

(3) 零点漂移与量程漂移

待系统运行稳定后,先进行待测组分的零点校准和满量程校准,随后分别通入零点气和量程气,待示值稳定后分别记录测量结果 Z_0 和 S_0 。在系统连续运行24 h/48 h/72 h后,再次通入零点气和量程气并记录稳定后的测量结果 Z_i 和 S_i ,按照公式(2)和(3)分别计算系统24 h/48 h/72 h零点漂移 Z_d 和24 h/48 h/72 h量程漂移 S_d 。

$$Z_d = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{R} \times 100\% \quad (2)$$

Z_d —待测组分24 h/48 h/72 h零点漂移,%; Z_0 —待测组分通入零点气体的初始测量值,mg/m³; Z_i —待测组分运行24 h/48 h/72 h后通入同一零点气体的测量值,mg/m³; R —待测组分满量程值,mg/m³。

$$S_d = \frac{S_i - S_{i-1}}{R} \times 100\% \quad (3)$$

S_d —待测组分24 h/48 h/72 h量程漂移,%; S_0 —待测组分通入量程气体的初始测量值,mg/m³; S_i —待测组分运行24 h/48 h/72 h后通入同一量程气体的测量值,mg/m³; R —待测组分满量程值,mg/m³。

2.4 现场安装验证

在完成实验室联调联测验证后,将该设备发往某市大型垃圾焚烧厂并按照相关要求安装,安装完成后进行系统验证,具体检测方法主要参考HJC-ZY80—2017《生活垃圾焚烧固定源烟气(颗粒物、SO₂、NO_x、HCl、CO)排放连续监测系统技术要求及检测方法》^[1],重点对SO₂、NO、NO₂、HCl和CO组分的示值误差、响应时间、零点漂移和量程漂移指标进行验证。

2.5 长期数据比对

在完成安装验证后,为了进一步验证设备在实际运行过程中的测量准确度和稳定性,除了每周一次的标气标定外,还需要对设备进行长期监测,以验证设备的长期可靠性,进行比对的设备为德国西克的傅里叶红外在线分析仪系统MCS100 FT,主要对其中的SO₂、NO、NO₂、HCl和CO组分的测量结果和变化趋势进行长期比对监测,以验证自制仪表

与系统在垃圾焚烧烟气监测领域的可用性。

3 结果与讨论

3.1 实验室验证

首先在实验室进行验证,待系统运行稳定后,对垃圾焚烧行业要求的SO₂、NO、CO、NO₂和HCl 5种气体组分依次进行满量程校准,采用上述测试方法对这5种气体组分的气体性能指标依次进行验证,包括示值误差、响应时间、24 h/48 h/72 h零点漂移和量程漂移,具体验证结果如表3所列,由表3可以看出,各因子高、中、低浓度的示值误差基本保持在±1% F.S.以内,远优于相关标准规定的±2% F.S.的要求,充分表明该模型和设备具有较高的测试准确度。关于响应时间性能指标,由于HCl具有一定的吸附性,其响应时间略长为137 s,其余各组分的响应时间均在100 s左右。由于零点漂移基本只受设备基线的影响,而该设备的待测组分零点漂移值基本控制在±1% F.S.以内,进一步说明该设备具有较高的基线稳定性。在量程漂移方面,虽然测量结果值略高,但仍完全满足±2% F.S.的技术指标要求。

3.2 现场安装校准

设备到达垃圾焚烧厂后,按照相关标准要求完成对设备的检查和安装,待系统运行稳定后进行72 h的联调联测(2023-06-02—05),即对SO₂、NO、CO、NO₂和HCl 5种气体组分的零点漂移、量程漂移、示值误差、系统响应时间和准确度依次进行验证,结果如表4所列。此外对标准要求的其他指标参数也依次进行测试。结果表明:气态污染物CEMS(SO₂、NO_x、CO、HCl)、氧气、颗粒物、流速、温度和湿度所有调试检测结果均符合《生活垃圾焚烧固定源烟气(颗粒物、SO₂、NO_x、HCl、CO)排放连续监测系统技术要求及检测方法》HJC-ZY80—2017中技术要求^[1]。

3.3 现场长期比对

在完成设备现场校准和验证后,对该垃圾焚烧厂的排口烟气进行实时监测,并与在同一排口持续稳定运行的西克在线傅里叶红外监测系统(SICK FT)进行同步测试,在2023-07—2024-10期间对SO₂、NO、CO、NO₂和HCl 5种因子的时间报表进行数据比对,具体趋势图如图5所示,由图5可

表 3 FTIR 在线系统气体性能实验室验证结果

Table 3 Laboratory verification results of gas performance of FTIR on-line system

气体	量程值/ (mg/m ³)	100% 满量程K值	示值误差/(%F.S.)			响应 时间/s	24 h验证/ (%F.S.)		48 h验证/ (%F.S.)		72 h验证/ (%F.S.)	
			20%	50%	80%		零点漂移	量程漂移	零点漂移	量程漂移	零点漂移	量程漂移
			满量程	满量程	满量程							
SO ₂	200	1.02	0.12	-0.45	0.57	92	0.57	-0.94	0.47	0.21	-0.78	-0.65
NO	200	1.02	-0.38	1.21	-0.56	87	-0.78	-1.09	-1.11	-1.01	-0.08	-0.40
CO	200	1.03	0.91	0.23	0.56	88	-0.31	-1.55	-0.05	0.35	-0.13	-0.31
NO ₂	100	1.05	-0.22	-0.59	0.73	108	0.27	0.79	-0.26	0.42	0.13	-0.19
HCl	100	1.04	-0.64	0.66	0.97	137	0.95	-0.84	0.21	0.62	-0.59	-1.14

表 4 烟气连续监测排放系统 72 h 调试报告汇总表

Table 4 On-site verification results of gas performance of FTIR on-line system

气体	项目名称	技术要求	检测结果	是否符合
SO ₂	零点漂移	不超过±2.5% F.S.	-0.34%	符合
	量程漂移	不超过±2.5% F.S.	0.70%	符合
	示值误差	不超过±2.5%(相对于满量程)	0.87%	符合
	系统响应时间	≤200 s	114 s	符合
	准确度	不超过±17 mg/m ³	5 mg/m ³	符合
NO _x	零点漂移	不超过±2.5% F.S.	NO: -0.7%; NO ₂ : 0.25%	符合
	量程漂移	不超过±2.5% F.S.	NO: 0.92%; NO ₂ : -1.0%	符合
	示值误差	不超过±2.5%(相对于满量程)	NO: 0.88%; NO ₂ : 0.58%	符合
	系统响应时间	≤200 s	NO: 104 s; NO ₂ : 144 s	符合
	准确度	不超过±12 mg/m ³	8 mg/m ³	符合
CO	零点漂移	不超过±2.5% F.S.	0.20%	符合
	量程漂移	不超过±2.5% F.S.	-1.43%	符合
	示值误差	不超过±2.5%(相对于满量程)	0.65%	符合
	系统响应时间	≤200 s	103 s	符合
	准确度	≤8 mg/m ³	8 mg/m ³	符合
HCl	零点漂移	不超过±2.5% F.S.	-0.26%	符合
	量程漂移	不超过±2.5% F.S.	-1.16%	符合
	示值误差	不超过±2.5%(相对于满量程)	-1.98%	符合
	系统响应时间	≤400 s	277 s	符合
	准确度	绝对误差≤24 mg/m ³	5 mg/m ³	符合

以看出, EXPEC 2000FT 与 SICK FT 的测量值和测量趋势基本一致, 说明自制设备的测量结果能够及时和准确地反应当前的烟气排放情况, 而且连续运行 15 个月后, 自制设备依然保持较好的数据可靠性, 充分说明该设备具有较好的长期稳定性, 可以用于生活垃圾焚烧监测领域.

4 结论

本试验自主研制傅里叶红外光谱仪(EXPEC 1630)并进一步集成傅里叶在线监测系统(EXPEC 2000FT), 在验证过程中该设备表现出较优的性能. 此外在实验室和垃圾焚烧厂分别对该系统进行气

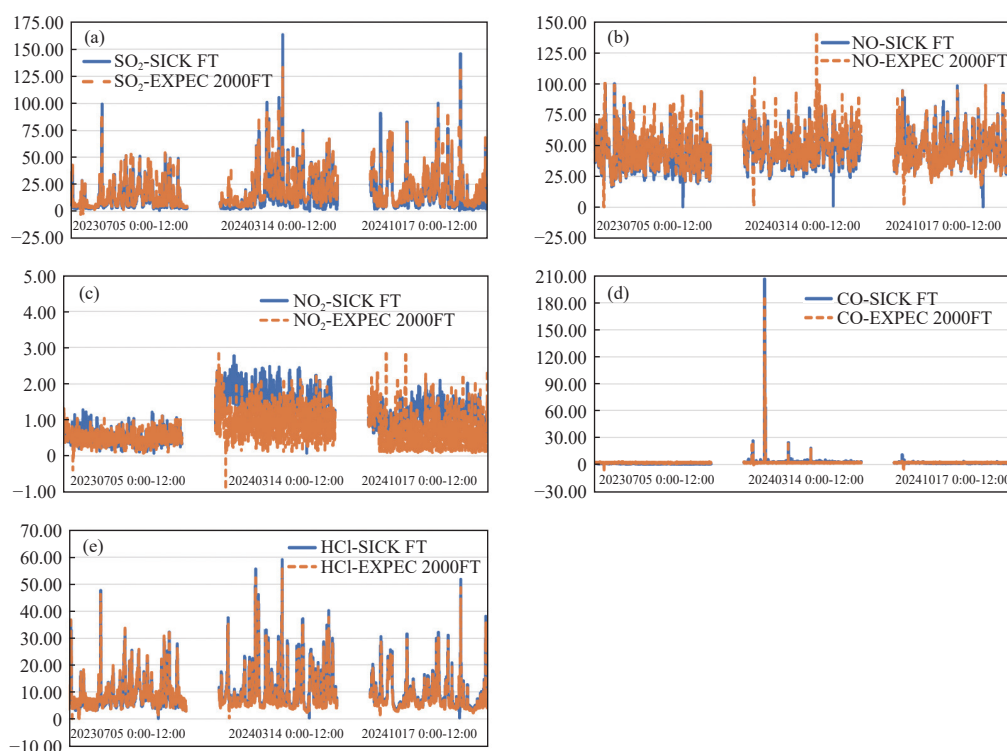


图5 EXPEC 2000FT 与 SICK FT 长期数据比对趋势图

Fig. 5 Trends in long-term data comparison between EXPEC 2000FT and SICK FT

体性能的验证,其测试结果均优于相关标准要求的合格值.同时还对该系统的测量数据进行长期跟踪,并定期与同一排口的进口傅里叶监测系统(SICK FT)的测量数据进行比对,以验证测量数据的长期准确度和稳定性,在经过近2年的跟踪比对验证,自制设备表现出较高的数据可靠性与数据稳定性,满足烟气排放实时监测的需求,对加快推动国产化替代进程具有重大意义.

参考文献:

- [1] 郭杰,张涵,于志伟,等.基于傅里叶变换红外光谱技术垃圾焚烧烟气在线监测[J].中国仪器仪表,2018(5): 63-66. [GUO Jie, ZHANG Han, YU Zhiwei, et al. On-line monitoring of waste incineration flue gas based on Fourier transform infrared spectroscopy[J]. China Instrumentation, 2018(5): 63-66.]
- [2] 梁美铃,何俊,姜玲,等.便携式紫外吸收法测定多种固定源废气中的SO₂[J].四川环境,2023,42(3): 16-20. [LIANG Meiling, HE Jun, JIANG Ling, et al. The determination of SO₂ in exhaust gas of various stationary sources by portable ultraviolet absorption method[J]. Sichuan Environment, 2023, 42(3): 16-20.]
- [3] 耿晔,王鹏,王刚.排放源废气CO₂连续监测分析方法解析[J].环境与发展,2024,36(1): 38-42. [GENG Ye, WANG Peng, WANG Gang. Analysis of continuous monitoring and analysis methods for CO₂ in exhaust gas from emission sources[J]. Environment and Development, 2024, 36(1): 38-42.]
- [4] 周新奇,马帅,刘妍,等.高温傅里叶变换红外气体分析仪研制与应用[J].分析测试学报,2020,39(10): 1299-1304. [ZHOU Xinqi, MA Shuai, LIU Yan, et al. Development and application of a high temperature gas analyzer based on Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(10): 1299-1304.]
- [5] 吕艳琼,李明圆,马召辉.便携式傅里叶红外分析仪在垃圾焚烧行业固定源气态污染物监测中的应用[J].云南冶金,2023,52(2): 103-107. [LÜ Yanqiong, LI Mingyuan, MA Zhaohui. Application of portable Fourier infrared analyzer on monitoring of gaseous pollutant from stationary source in waste incineration industry[J]. Yunnan Metallurgy, 2023, 52(2): 103-107.]
- [6] 李明.固体废物及垃圾焚烧烟气排放在线监测技术[J].资源节约与环保,2020(11): 65-66.
- [7] 潘玉珏.基于FTIR的多组分气体在线监测技术研究

- 究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2019. [PAN Yujue. Research on on-line monitoring technology of multi-component gas based on FTIR [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2019.]
- [8] 陶启贵. 基于 FPGA+ARM 的 FTIR 动镜控制技术研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2023. [TAO Qigui. Research on FTIR moving mirror control technology based on FPGA+ARM [D]. Hefei: Anhui University, 2023.]
- [9] 闫泽宇, 孙祚, 费宁, 等. 基于长光程气室的多组分气体监测系统 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(9): 49-55. [YAN Zeyu, SUN Zuo, FEI Ning, et al. Multi-component gas monitoring system based on long-path gas cell [J]. Metrology Science and Technology, 2023, 67(9): 49-55.]
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 傅立叶变换红外光谱仪: GB/T 21186—2007[S]. 北京: 中国机械工业出版社, 2007. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Fourier transform infrared spectrometer: GB/T 21186—2007[S]. Beijing: China Machinery Industry Press, 2007.]
- [11] 环境保护部. 环境监测仪器质量监督检验中心作业指导书: 生活垃圾焚烧固定源烟气 (颗粒物、SO₂、NO_x、HCl、CO) 排放连续监测系统技术要求及检测方法: HJC-ZY80—2017[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017. [Ministry of Environmental Protection. Environmental monitoring instruments quality supervision and inspection center operation instructions: Domestic waste incineration fixed source flue gas (particulate matter, SO₂, NO_x, HCl, CO) emission continuous monitoring system technical requirements and testing methods: HJC-ZY80—2017[S]. Beijing: China Environment Press, 2017.]
- [12] 环境保护部. 环境保护行业标准: 固定污染源烟气 (SO₂、NO_x、颗粒物) 排放连续监测系统技术规范: HJ 75—2017[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017. [Ministry of Environmental Protection. Environmental protection industry standard: Technical specification for continuous monitoring system of flue gas (SO₂, NO_x, particulate matter) emission from fixed pollution sources: HJ 75—2017[S]. Beijing: China Environment Press, 2017.]