

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.01

烟气在线监测系统现状及思考

常颖, 刘文敬, 王振国, 韩瑞国

(天津市计量监督检测科学研究院, 天津 300192)

摘要: 固定污染源排放的烟气会对环境造成污染, 对其进行科学监测至关重要。本文介绍了现有的烟气在线监测系统, 包括空气质量自动监测系统、烟气排放连续监测系统、差分光学吸收光谱法在线连续监测系统、物联网下无线传感器网络技术在线监测系统等, 介绍了每个系统的组成、技术特点、监测方法、实际应用和发展方向, 并从量值溯源和远程校准两个方面对烟气在线监测系统与计量系统的关系进行了阐述。

关键词: 烟气; 在线监测技术; 计量; 固定污染源

中图分类号: TB99

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0001-04

Present Situation and Thoughts of On-line Flue Gas Monitoring Systems

CHANG Ying, LIU Wenjing, WANG Zhenguo, HAN Ruiguo

(Tianjin Institute of Metrological Supervision Testing, Tianjin 300192, China)

Abstract: The flue gas emitted from stationary pollution sources has greatly increased pollution to the environment, and it is very important to scientifically monitor the flue gas. In the paper, the authors introduce the status of the on-line flue gas monitoring systems, including automatic air quality monitoring system (AQMS), continuous emission monitoring system (CEMS) based on differential optical absorption spectroscopy (DOAS), on-line wireless sensor network monitoring system under the internet of thing. The structure of every on-line flue gas monitoring system, technical specification, practical applications and development direction have been described. And the relationship between the on-line gas monitoring systems and metrological systems is discussed in this paper.

Key words: flue gas; on-line monitoring technology; metrology; fixed pollution source

0 引言

固定污染源是指排放污染物的固定设施, 火电厂、冶金厂和水泥厂是主要的固定污染源企业。固定污染源排放的污染物主要是二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x) 和总悬浮颗粒物 (TSP), 这些污染物排入大气, 会造成光化学污染、酸雨等环境污染, 危害人体健康。

随着我国国民经济的迅猛发展, 环境污染已成为一个十分突出的问题, 频发的雾霾天气也使得治理和控制烟气中的有毒有害气体和颗粒物十分必要。烟气排放组分的复杂性和工业现场环境的恶劣性给烟气排放的监测带来极大的困难, 尤其是气态污染物含量的准确测量尤为突出。

我国工业烟气排放监测采用常规的方法, 一般是用烟气专用采样头深入烟道内进行样品的采集, 在实

验室中对采集的样品进行分析测定, 从而测出烟气中污染物的含量。烟气分析方法主要有奥式气体分析仪器法、色谱分析法、红外分析法等。奥式气体分析仪器法是利用不同溶液来吸收气体样品中的不同污染物组分, 从而达到定性定量测量的目的, 该仪器结构简单, 购买成本小但运行成本高, 试剂和人员对分析结果的准确度有很大的影响; 色谱分析法利用色谱柱将烟气样品中的污染物逐一分离, 根据色谱图进行面积归一化计算出各组分的含量, 分析精确度非常高, 但由于色谱柱特别容易阻塞, 对样品质量的要求也特别高; 红外分析法利用物质对不同波长红外线辐射的特征吸收来测定气体的浓度, 可以测定复杂气体组分的样品。目前的烟气分析仪不能提供长期、实时、系统的测试数据, 因而需要更加方便的在线监测方法来准确测定烟气中的污染物。

1 烟气在线监测系统

随着科学技术和网络技术的不断进步, 目前固定

收稿日期: 2016-02-26; 修回日期: 2015-03-15

作者简介: 常颖 (1986-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事环境与能源计量的研究。

污染源污染气体在线监测系统主要有空气质量自动监测系统 (AQMS)、烟气排放连续监测系统 (CEMS)、差分光学吸收光谱 (DOAS) 法在线连续监测系统、物联网下无线传感器网络技术在线监测系统等, 烟气在线监测系统的广泛应用和不断完善, 对于烟气在线监测技术的发展有着很大的促进作用。

1.1 空气质量自动监测系统 (AQMS)

空气质量自动监测系统 (Air Quality Monitoring System, 简称 AQMS) 需要在重点监控区域设置子监测点, 进行连续的空气质量管理, 定期与总站进行通讯和数据传输, 形成一个对该区域空气质量进行采样和测定的完整网络。自 1983 年北京市从美国 TE 公司引进 AQMS, 目前在内地约有 200 多个 AQMS 在运转。

AQMS 的组成主要有采样系统、监测仪器、校准设备、数据处理设备、通信设备和支持设备等, AQMS 的技术发展经历了以化学分析原理为基础的湿法 (上世纪 50 年代~90 年代) 到以物理光学原理为基础的干法 (上世纪 60 年代~现在) 到以差分吸收光谱为主的光谱技术法 (上世纪 80 年代~现在)。

湿法监测仪器的传感器采用库伦池, 基本原理是化学法和电化学法, 需要使用大量的溶液和试剂, 数据的准确性取决于试剂和人员操作, 因此逐渐被干法监测仪器所取代; 干法监测仪器的基本原理是物理法和物理化学气相法, 干法监测仪器在检出限、漂移、线性、重复性、精度等各项性能指标均优于湿法监测仪器, 且维护和修理更加方便, 数据受人员操作影响小; 差分吸收光谱为主的光谱技术将在 1.3 中进行详述, 区别于光谱技术, 湿法监测仪器和干法监测仪器被称为传统仪器。

近年来, 出现了新的监测仪器技术——大气探测激光雷达系统及技术。大气探测激光雷达系统主要由激光发射系统、望远镜接收系统和信号检测系统等组成, 具有易于接触探测点、探测范围广、探测隐蔽性强、可实现大范围实时探测等优点。差分吸收激光雷达 (Differential Absorption Lidar, 简称 DIAL) 技术即是一种大气探测激光雷达技术, 该技术可以测量城市上空的 NO_x , SO_2 , O_3 , CH_4 等气体组分的三维立体分布, 波长范围 1.59~1.64 μm , 测量光程可达几十公里, 可监测烟气的非法偷排, 但由于价格昂贵, 污染物的最低检测限也不太理想, 目前还在研究阶段。

AQMS 在运行中需要对监测子站进行优化设计, 组成“监测仪器—数据通信—计算机”网络, 可以迅速收集和处理监测数据, 得到区域污染现状和污染变

化规律, 供监测部门和研究人员使用。

1.2 烟气排放连续监测系统 (CEMS)

烟气排放连续监测系统又称固体污染源烟气排放连续监测系统 (Continuous Emissions Monitoring System, 简称 CEMS), 用于连续自动监测固定污染源的污染物排放浓度, 适用于火电厂等连续废气排放量的监测, 将仪器安装在固定污染源上, 可实时在线监测二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x)、颗粒物的排放浓度和排放量, 同时将监测的数据实时传送到环保监控中心。该系统需参照执行国家环境保护总局制定的 HJ/T 75-2007《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》和 HJ/T 76-2007《固定污染源烟气排放连续监测系统技术要求及检测方法》。CEMS 自上世纪 80 年代开始在我国大型火电厂安装使用, 目前全国已安装了 2 万多套。

CEMS 按照取样方法^[1]可分为三种: 稀释法 CEMS、直接抽取法 CEMS 和原位直接测量法 CEMS。其中稀释法需要使用干净干燥的空气进行稀释取样, 稀释探头是保障测量准确性的关键配件; 直接抽取法不需要稀释空气, 但前端需要带过滤器, 样气从烟道经过过滤器抽到分析仪器进行分析; 原位直接测量法是将监测仪器直接安装在烟道内对烟气进行测量, 不需要将样气从烟道中抽出。

针对不同污染物, CEMS 的分析测量方法更加多样。 SO_2 测量方法有紫外荧光法、非色散红外法 (Non-dispersive Infrared, 简称 NDIR 法)、紫外吸收法; NO_x 测量方法有不分光红外法、化学发光法 (Chemiluminescent Detector, 简称 CLD 法)、脉冲荧光法; 粉尘测量方法有激光散射法、 β 射线法、激光后散射法。

其中, 紫外荧光法测量 SO_2 是指烟气在 190~230 nm 紫外光下, SO_2 分子受激发生成激发态, 再由激发态返回基态时发出荧光, 测量荧光强度即可得到 SO_2 气体浓度, 此方法灵敏度高, 可检测到 10^{-12} 级别的低浓度气体, 适用于稀释法 CEMS; NDIR 法利用气体对红外线光谱能量的吸收在波长上具有选择性对气体进行定性定量测量, 具有很好的性价比, 可同时测定多种组分气体, 适用于直接抽取法 CEMS; CLD 法是烟气中的 NO 或者利用铂催化技术由 NO_2 转化的 NO 与臭氧发生反应, 发光强度与气体浓度成正比, 适用于稀释法 CEMS。

目前, CEMS 分析测量方法的发展方向主要有傅立叶红外监测法和线状光谱技术 (又称可调谐二极管激光分析技术)^[2], 傅立叶红外监测法是一种全谱分析技术, 利用红外光谱的吸收信息可以确定分子的化学成

分,达到准确的定性和定量分析,设定参数后不仅可以连续自动地进行 SO_2 和 NO_x 的监测,还可以监测出复杂烟气中其他化学组分的含量;可调谐二极管激光分析技术是一种新的痕量气体分析方法,它的线状光谱谱宽窄到 10^{-2}nm 数量级,可以有效地排除其他气体组分干扰。

CEMS 一般由气体分析仪,粉尘分析仪,温度、压力、流速监测仪,样气采集系统,样气预处理系统,保护反吹系统,自动标定系统,系统控制与数据采集系统等部分组成^[3]。随着计算机通信技术的发展,通用分组无线服务技术 (General Packet Radio Service, 简称 GPRS)、ADSL 宽带网络也相继应用在 CEMS 上,该系统实现了实时、远程、大数据量的数据采集和传输等功能,具有适应性强、安装方便、性能稳定等特点。

1.3 差分光学吸收光谱 (DOAS) 法在线连续监测系统

随着现代光谱测量技术的发展,不同于湿法和干法传统监测方法,由于光谱技术的探测灵敏度高,可达 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 级,分子光谱具有“指纹”特征,该技术在大气污染气体监测中得到日益广泛的应用,非常适合大范围的在线监测,相比于传统监测方法的费用和耗时都低很多。

差分光学吸收光谱 (Differential Optical Absorption Spectroscopy, 简称 DOAS) 是一种光谱监测技术,最早该技术用于研究大气层中的痕量气体成分 (如甲烷、臭氧等),可通过长光程吸收低浓度气体成分,达到准确测量的目的。DOAS 是被瑞典 OPSIS 公司于上世纪 80 年代作为商品推向市场的,用于环境空气监测和污染源监测。DOAS 遵循的理论基础是 Lambert-Beer 定律,该技术就本质来说是基于分子对光辐射的吸收,通过分析某一波段的吸收光谱来鉴别气体成分,并根据吸收强度来确定气体含量,进一步推演出微量气体的浓度。近年来国际出现了很多基于 DOAS 的新技术,例如 MAXDOAS, Tomographic DOAS 和 LP-DOAS^[4-6] 等。在烟气在线监测系统中,可测量 200 ~ 250 nm 附近的吸收光谱,来定性定量烟气中 SO_2 , NO , NO_2 和 NH_3 等有害气体组分,还可以用 DOAS 方法反演出上述气体的浓度^[7],消除烟气中烟尘、水汽等其他组分的影响。

DOAS 技术可以实现一台仪器多种痕量物质的高敏度实时测量,原则上从紫外到近红外波长区的任何一种光吸收物质都可以被探测到,使用时不需要用常规

气体校准,采用非接触测量的光谱技术校准,避免了测量对象的化学变化、采样器壁的吸收损失等误差源的影响^[8]。DOAS 技术已经在烟气排放监测领域得到广泛的应用,和其他传统光学监测方法相比,可同时监测多种成分,漂移小,污染物浓度在其量程范围内线性好,平时的维护和保养也相对简单。

1.4 物联网下无线传感器网络技术在线监测系统

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, 简称 WSN) 是由安装在监测区域的大量廉价传感器节点组成,传感器可以经过无线方式通信,因此 WSN 网络设计灵活,设备的位置可以随时变化,并能实现 WSN 跟互联网进行有线或者无线方式的连接。相比于传统的有线网络在线监测,WSN 具有安装、维护、管理方便,系统可随时扩展的优点。

物联网 (Internet of Things, 简称 IOT) 的概念是 Auto-ID 实验室于 1999 年提出的,将微小的识别装置放置在书、鞋、汽车等物体上,就可以知道物体的位置、状态等信息,实现智能化的管理,Auto-ID 实验室关于物联网的概念是以无线传感器网络和射频识别技术为支撑技术的。

物联网通过无线传感器网络技术、射频识别技术、纳米技术、智能嵌入技术、全球定位系统技术与互联网连接,可以实现智能化定位和监控。无线传感器网络技术下物联网在线监测系统无需人为操作,信息可以自处理,应用范围广泛,实现人类社会与物理系统的整合^[9]。

烟气在线监测系统由于地理范围广泛而分散,包含的信息量和数据量也更加巨大,需要由无线传感器网络技术组成一个物联网,通过传感器节点等感知设备获取监测仪器上的各种信息,如烟气浓度、烟尘浓度、温湿度、排气量等,并接入互连网络实时传送到监测部门。

2 烟气在线监测系统与计量系统的关系

2.1 烟气在线监测系统的量值溯源

目前烟气在线监测系统主要依据烟气分析仪检定规程^[10]在示值误差、重复性和稳定性等方面进行检定或校准,烟气浓度的基标准溯源到质量,通过称重法来实现气体浓度的定标,同时利用气瓶来实现各个仪器间的校准和量值的传递,该检定/校准方法对烟气在线监测系统的量值准确统一发挥了极其重要的作用。但这必然会带来以下几个问题:一是气瓶内的标准气体会受到气瓶内吸附的其他杂质气体的影响,而且带

来航空运输的难度；二是随着气瓶使用压力的降低，气瓶内气体的成分会发生改变，而且这个改变是不可控制的；三是称重法在获得 $10^{-6} \sim 10^{-12}$ 级别浓度的气体时所能达到的极限浓度和不确定度比较大。这些问题势必会导致测量烟气浓度的色谱或光谱仪器的量值不一致性，而光腔衰荡吸收光谱法（Cavity Ring-Dawn Spectroscopy, 简称 CRDS）是目前国际上公认的痕量气体成分准确测量的方案，可用于多种气体分子光谱的测量，利用 CRDS 技术测量空气污染物中 NO_2 的浓度低于 10^{-9} 量级^[11]；利用 CRDS 技术探测 CO_2 ，在实验室条件下能够检测 10^{-9} 甚至低于 10^{-9} 量级的气体浓度^[12]。2002 年以来，Tiger 推出了 MTO-1000, Laser-Trace 等系列产品，可检测 CH_4 , O_2 , NH_3 , C_2H_2 等气体，CRDS 在痕量气体检测方面的应用会越来越广泛^[13]。

不同于气瓶的称重法溯源到质量标准，CRDS 可以溯源到化学标准，反映单个分子的能级跃迁，最终决定目标气体浓度是空腔的衰荡时间和充满目标气体的衰荡时间之差，它的信噪比和灵敏度均比传统方法高 3~4 个数量级，见表 1。

表 1 直接吸收光谱与光腔衰荡光谱参数对比表

方法	光程/m	灵敏度	信噪比
直接吸收光谱	1	10^{-6}	1000 :1
光腔衰荡光谱	10 000	10^{-13}	1800 000 :1

化学计量的准确性来源于纯品，最好可达 7 个 9 至 10 个 9，是理想的新一代气体计量基标准，把气体成分溯源到分子的吸收谱线上，可以利用纯品的分子结构的吸收谱线信息来获得浓度信息，从而对标准气体进行准确定值，同时用标准气体来现场校准各种测量烟气浓度的仪器。目前国际上已经研发出基于稳频的快速扫描光腔衰荡光谱法（Frequency Stabilized CRDS, 简称 FARS-CRDS），FARS-CRDS 比 CRDS 的测量时间由原来的 100 s 缩短到 0.01 s，信噪比也由原来的 $10^4 :1$ 提高到了 $10^5 :1$ 。随着 CRDS 技术的不断发展，可以用该技术来进行烟气在线监测系统的化学计量溯源，对标准气瓶中的标准气体进行准确定值，使得用标准气体校准的在线烟气监测系统的相对不确定度更小，监测部门获得的监测数据更加准确。

2.2 烟气在线监测系统的远程校准

远程校准包括传统计量的几个要素：高等级计量标准、被校仪器、检定规程或校准规范、数据采集与数据处理，远程校准可借助网络传输技术由位于其他

地方的有关人员进行实时、异地、远程操作，按授权的不同，远程操作可以包括校准参数的设定、现场传感器信号的获取、数据处理及不确定度分析等^[14]。随着物联网信息技术的不断发展，远程校准^[15]可以更好地借助网络或其他通讯手段控制被校准仪器、传输标准信号和校准数据，可应用于烟气在线监测系统的校准。

首先将标准气体送到现场，经过远程培训的现场工作人员可以通过网络视频与计量站的专业人员进行沟通，通过物联网和互联网可以直接把数据传回计量站；当遇到技术问题时计量站可组织专家通过网络视频进行会诊，还可以直接得到仪器生产厂商的技术支持；温湿度环境数据也可以在物联网上监控，计量站根据监测数值修正自己的计量标准^[16]。

物联网下无线传感器网络技术在线监测系统的实现可以进一步促进远程校准的发展，实现计量机构数据与客户数据的远程或实时共享，避免了以往计量工作人员现场计量或送检计量的人为和环境误差，提高了计量工作的质量和效率。另外，远程校准自动化系统还可以对被校准仪器的异常状况进行实时监控与分析，及时发出报警信息，使得计量工作更加快捷有效。

3 结束语

近年来，随着网络化和智能化水平的不断提高，烟气在线监测技术也在不断发展进步。新技术新方法的不断出现，需要计量机构对现有理论、方法和规程规范等进行全面的系统研究，对计量基标准、计量标准设备、测量不确定度、结果报告等进行系统性完善和更新，以保证被校准仪器和监测数据的准确性和有效性，加快政府对烟气排放的监控进程。

参 考 文 献

- [1] 郜武. 烟气连续监测系统 (CMES) 技术及应用 [J]. 中国仪器仪表, 2009, 1 (1): 43-47.
- [2] 杨凯, 周刚, 王强, 等. 烟尘烟气连续自动监测系统技术现状和发展趋势 [J]. 中国环境监测, 2010, 26 (5): 119-121.
- [3] 胡春华, 郑玲哲. SO_x 、 NO_x 测定技术的最新进展 [J]. 环境科学与技术, 1999 (2): 46-48.
- [4] PLATT U. Mini MAX-DOAS-an introduction [R]. Bremen: Institute of Environmental Physics University of Heidelberg, 2006.
- [5] 刘文清. 环境污染光学遥测技术与仪器进展 [R]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005.

表2 自动测试与人工测试时间

测试板件	自动测试/s	人工测试/min
功率板	20	5
控制板	47	22
综合板	44	20
组合板	35	16
整机	35	15

能量管理单元自动测试系统的另一大优势还体现在老练测试的自动化上,传统人工老练测试需测试人员在每个老练周期对产品进行测试,整个老练时间往往几十小时甚至上百小时,对测试人员的精力与体能消耗巨大。测试系统则可自动化地完成老练测试,如图10所示,为能量管理单元I/O输出某通道的老练测试曲线,测试系统老练测试共设置8个周期,每周期共10h,其中通电9h,断电1h,在通电第4.5h时对被测产品进行测试。老练测试的前两个周期模拟供电欠压(20V),中间四个周期模拟供电正常(24V),最后两个周期模拟供电过压(30V)。

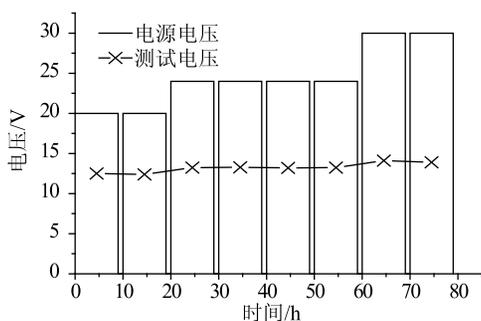


图10 能量管理单元 I/O 输出老练测试曲线

(上接第4页)

- [6] PLATT U, PERNER D, PATZ H. Simultaneous measurement of atmospheric CH_2O_2 and NO_2 by differential optical absorption [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84 (10): 6329-6335.
- [7] 郑朝晖, 刘文清, 宋炳超, 等. 差分光学吸收光谱(DOAS)技术在烟气监测中的应用研究 [J]. *量子电子学报*, 2001, 12 (18): 65-69.
- [8] 崔厚欣, 齐汝宾, 张文军, 等. 差分吸收光谱法大气环境质量在线连续监测系统的设计 [J]. *分析仪器*, 2008 (1): 7-11.
- [9] 宫红彩, 韩庆玉, 刘影, 等. 浅析无线传感器网络技术物联网中的应用 [J]. *企业技术开发*, 2012, 31 (8): 25-26.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. JJG968-2002 烟气分析仪检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2002.

5 结论

本文阐述了电动汽车能量管理单元电路板自动测试系统的设计与开发,对其系统架构、检测原理、设计思路进行了重点论述。该系统可实现4种不同类型板件及整机的自动化测试,可同时对四块同种板件同步进行测试。此外该系统测试精度高,速度快,激励信号输出分辨力为0.024%,激励信号电压转换速率可达 $1\text{ V}/\mu\text{s}$ 。

经过前期试验,对于各类板件及整机测试时间可控制在1min以内,其故障检出率可达到100%,不仅在速度上远胜于传统人工测试,可靠性方面也优于人工。

参考文献

- [1] 王莹. PCBA自动测试平台研究与软件系统设计 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [2] 朱夏川. 基于虚拟仪器的电路板测试系统的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [3] 吴震海. 大功率电机驱动器测试工装 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [4] Zhang Y, Qiao B, Chen L G. Design and Implementation of the Fuze Circuit Board Tester [C] //International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. Amsterdam, Netherlands: Atlantis Press, 2015.
- [5] Moreira J, Barnes H, Poisson V. PCB via field with embedded pitch transformation for ATE pogo pin blocks [C] //Signal and Power Integrity (SPI), 2015 IEEE 19th Workshop on. Berlin, Germany: IEEE, 2015: 1-4.
- [11] Bisson S E, Kulp T J, Levi O, et al. A broadly tunable high resolution IR cavity ring-down spectrometer based on difference frequency generation in orientation-patterned GaAs [J]. *SPIE*, 2004, 5337: 112-116.
- [12] 裘世鑫, 高晓明, 崔芬萍, 等. CO_2 的腔增强吸收与高灵敏吸收光谱研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25 (12): 1908-1911.
- [13] 阎文斌. 微量气体定量分析的新方法: 光腔衰荡光谱 [J]. *低温与特气*, 2007, 2 (25): 35-38.
- [14] 笪伟群. 走进网络化校准—远程校准技术初探 (之一) [J]. *计算机应用研究*, 2002, 19 (9): 23-26.
- [15] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS-CL25: 2014 检测和校准实验室能力认可准则在校准领域的应用说明 [S]. 北京: [出版者不详], 2014.
- [16] 陈伟. 远程计量校准技术研究 [J]. *计测技术*, 2007, 27 (S1): 25-27.