

Feasibility analysis of portable multi-component air quality analyzer for nuclear power plant

Dingyu Gao Tie Zhong

State Nuclear Demonstration Power Station Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264200, China

Abstract

This study conducts a comparative analysis of technical specifications from 12 mainstream gas analyzers worldwide, tailored to nuclear power plant's specialized analytical requirements. An integrated design solution combining multi-sensor fusion is proposed to enable a single instrument to meet air quality analysis demands in the main control room's emergency shelter system. Experimental results demonstrate that through composite detection technologies including electrochemical methods, Non-Direct Infrared (NDIR), and Fuel Infrared (FID), a single device can simultaneously monitor 10 critical parameters, fulfilling nuclear power plant's on-site detection requirements.

Keywords

nuclear power plant; air quality; multi-parameter detection; portable instrument

核电厂便携式多组分空气质量分析仪器可行性分析

高丁雨 钟铁

国核示范电站有限责任公司，中国·山东威海 264200

摘要

本文通过对国内外12种主流气体分析仪的技术参数，结合核电特殊分析要求，提出基于多传感器融合的集成设计方案以实现一台分析仪器完成主控室应急可居留系统中空气质量的分析需求。研究证明采用电化学法、NDIR、FID等复合检测技术，可实现单台仪器覆盖10项关键参数的同步检测，满足核电现场检测需求。

关键词

核电厂；空气质量；多参数检测；便携式仪器

1 背景介绍

CAP/AP 系列第三代先进压水堆核电站均设置有主控室应急可居留系统（VES）。主控室应急可居留系统旨在为设计基准事故工况下为主控室操作人员提供至少 72 小时呼吸级备用空气。为了保证事故工况期间主控室停留人员安全，技术规格书要求主控室备用气源中空气品质必须满足 American National Standards Institute Compressed Gas Association(以下简称：CGA)G-7.1 表 1 中 E 级标准和 American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. (以下简称：ASHRAE) Standard 62.1 附录 E 表 E-1 的要求。同时，要求每次备用空气储罐充气后或每 92 天进行一次空气质量分析。主控室应急可居留系统对压缩空气品质的具体要求如表 1 所示。

表 1 主控室应急可居留系统中压缩空气品质要求

序号	参数	限值
1.	露点 (23.44MPa)	≤4.4℃
2.	二氧化碳 (CO ₂)	≤1000 ppm (v/v)
3.	一氧化碳 (CO)	≤9 ppm (v/v)
4.	气味	无
5.	油 (凝结的)	≤5 mg/m ³ . NTP
6.	氧气 (O ₂)	20%-22%
7.	总烃 (以甲烷计)	≤25ppm (v/v)
8.	铅 (pb)	≤0.15 μg/m ³
9.	二氧化氮 (NO ₂)	≤100ppb (v/v)
10.	臭氧 (O ₃)	≤0.07ppm (v/v)
11.	PM 10	≤150 μg/m ³
12.	二氧化硫 (SO ₂)	≤75ppb (v/v)

目前市面上可用于核电厂进行主控室应急可居留系统中空气品质分析的仪器较多，但集成度低，完成 12 项分析指标至少要 5 台仪器，每次取样分析期间操作过程复杂，携带不便。同时，只要其中一台仪器故障就会导致无法分析，可能导致机组后撤至热停堆模式。

【作者简介】高丁雨（1997-），女，中国河北邢台人，本科，助理工程师，从事化学领域研究。

本文从主控室应急可居留系统中空气品质各参数分析原理出发，研究分析是否具备将其中绝大部分或全部参数项目的分析过程集成到一台分析仪器中的可能性，以期实现一台或两台仪器完成现场空气品质分析，降低电站化学分析人员负担和因仪器故障引起机组后撤的可能性。

2 国内外技术现状

2.1 国外技术现状

在气体含量监测方面，国外起步较早，形成了多种成熟的集成式气体监测产品，但均无法实现一台仪器完成 O₂、O₃、NO₂、CO、CO₂、SO₂、PM10、总烃（以甲烷计）、油、露点的全部监测。经调研，国外成熟的气体分析仪产品主要包括 ABB 有限公司的 EasyLine 气体分析仪，赛默飞世尔科技公司的 60i 型 NDIR 多组分气体分析仪，霍尼韦尔公司的 MultiRAE 无线便携式六合一气体分析仪以及艾默飞公司的 X-STREAM 过程气体分析仪。

1)EasyLine 气体检测仪 --ABB 有限公司

ABB 有限公司的 EasyLine EL3000 气体检测仪，最多可同时监测 CO、CO₂、CH₄、SO₂、NO、O₂、NO₂、碳氢化合物、TVOC 等任五种不同气体。

2)60i 型 NDIR 多组分气体分析仪 -- 赛默飞世尔科技公司

赛默飞世尔科技公司的 60i 型 NDIR 多组分气体分析仪可同时对 CO、CO₂、NO、NO₂、SO₂、O₂ 六种气体进行测量。

3)MultiRAE 无线便携式气体检测仪 -- 霍尼韦尔公司

霍尼韦尔的 MultiRAE 无线便携式气体检测仪可同时检测 CO₂、NH₃、CO、H₂S、CL₂、CLO₂、CH₂O、HCN、H₂S、CH₃-SH、NO、NO₂、O₂、PH₃、PH₃H、SO₂ 在内的五种气体组分。

4)X-STREAM 过程气体分析仪--艾默飞公司

艾默飞公司的 X-STREAM 过程气体分析仪采用红外 / 紫外 / 可见光检测器（NDIR/UV/VIS）、顺磁氧 / 电化学氧检测器和热导检测器，进行多组分分析，可以最多测量 5 个气体组分，可从 O₂、CO₂、N₂O、CO、SO₂、C₂H₄、NO_x 中自由选择。

5)Aerotest Alpha 压缩空气质量分析仪 -- 德尔格

德尔格的压缩空气质量分析仪采用化学检测管，可以进行油、水分的分析。

2.2 国内技术现状

相较国外，国内的监测技术先进性有待提高，并且成熟的集成式气体监测产品有限，品质参差不齐，尚无可涵盖核电监测需求的直接应用产品。据调研国内集成式气体检测仪包括泰和联创的 THA100S 多组分气体分析仪、聚合环保的手提式复合气体分析仪 JZ-ADZ-3、以及核动力研究设计院的多组分压缩空气分析仪。

1) 多组分气体分析仪 THA100S-- 泰和联创

泰和联创的 THA100S 型红外线气体分析仪可最多同时分析 3 种气体浓度，可在 CO、CO₂、CH₄、SO₂、NO、NO₂、N₂O、SF₆、NH₃ 中自由选择。

2)JZ-ADZ-3 手提式复合气体分析仪—聚创环保

JZ-ADZ-3 手提式复合气体分析仪可同时检测 6 种气体，可拓展到 18 种气体，可从 CH₄、O₂、N₂、CO、CO₂、CH₂O、O₃、H₂S、SO₂、NO₂、NO_x、TVOC 等组分中自由选择。

3) 微电脑激光粉尘仪 LD-5 (H/L) -- 青岛聚创环保

LD-5 (H/L) 系列微电脑激光粉尘仪是以激光为光源的光散射式快速测尘仪，有多种切割器可供选择，内置滤膜采样装置，可在连续监测空气中颗粒物的同时收集粉尘样品。

4) 多组分压缩空气分析仪—核动力研究设计院

中国核动力研究设计院自主研发设计了多组分压缩空气分析仪，该产品为采用手提式便携设计，可同时检测 O₂、CO、CO₂、露点、TVOC、总颗粒物，。该产品可应用于消防系统、环保等多种气体监测场合。

5)3010MINIFID (230V) 便携式总碳氢分析仪—乐氏科技

010 MINIFID 采用确立的火焰离子化原理来检测气流中的挥发有机化合物，采用加热检测器和采样系统进行测量，可用于汽车燃烧实验、流动废气符合监测、HSE、废气咨询服务公司及气体生产厂家。

6)OM3000 便携式总烃分析仪—奥泛新能

OM3000 便携式总烃分析仪采用双点火设计氢火焰离子化 (FID) 测量技术，可用于垃圾填埋等环境的总烃分析。

2.3 各潜在可用产品对比

针对 VES 分析需求，调研的国内外市面上常见的多组分气体分析仪可测量的技术参数、测量原理、相关技术参数可见下表。调研的国外产品均没有 O₃、露点、PM10、总烃的检测；国内产品均没有油的检测。具体对比情况如下：

- 氧气主要有两种测量原理，分别为顺磁法和电化学法。电化学传感器是目前较为常见的有毒有害气体检测元件，具有选择性好、灵敏度高、响应时间短、性能稳定、耗电低、线性和重复性较好等优点，在当前的气体检测领域被广泛应用。顺磁传感器具有高灵敏度、快速响应、不耗电、使用寿命长的优点，但对于测量环境条件极为敏感。综合考虑核电厂复杂的使用环境和电化学法传感器广泛工程应用的稳定性，电化学法的传感器较顺磁法传感器更契合可研产品的运用。

- 二氧化氮和二氧化硫的测量原理有干涉滤波器法 (NDUV) 、非色散红外法、电化学法、紫外线吸收法、热导法等，在市场上均有广泛的应用。各种测量原理均有其优缺点，例如：非色散红外法具有高灵敏度、快速响应、非破坏性的优点。但其选择性有限、灵敏度随温度变化、并且设备成本较高，适用于环境监测、工业过程控制、燃气检测等

场所。电化学法具有高选择性、高灵敏度、实时监测、适用范围广的优势，但存在氧气依赖性、寿命有限、对环境敏感的劣势，适用于环境空气监测、工业废气处理、室内空气质量监测等领域。针对核电厂使用环境，综合考虑设备集成的便利性，优选电化学法为二氧化氮传感器和二氧化硫传感器的测量原理作为可研产品的运用。

- 一氧化碳通常采用红外或者电化学测量原理。电化学传感器具有快速响应、高灵敏度和较高的准确性，能够测量较低浓度范围内的一氧化碳。同时，它们具有较长的使用寿命和较低的成本。但电化学传感器对温度和湿度变化敏感，需要定期校准和更换传感器。红外传感器具有高精度、低功耗和较长的使用寿命等优点。它们对其他气体的干扰较小，对湿度和温度的影响较小，并且不需要定期校准。然而，红外传感器的成本较高，并且在高浓度范围内可能存在饱和现象。综合考虑电化学测量方法的特性、核电厂的使用环境以及设备集成的便利性，优选电化学法为一氧化碳传感器的测量原理作为可研产品的运用。

- 二氧化碳传感器通常采用非色散红外测量原理（NDIR）。NDIR 二氧化碳气体传感器不易受到其他种类气体的交叉干扰，具有更好的气体选择性、抗干扰性、精度和使用寿命等优势，优选 NDIR 为二氧化碳传感器的测量原理作为可研产品的运用。

- 臭氧传感器通常采用电化学测量原理。该方法具有高灵敏度、高选择性、高稳定性的优点，但需要定期校准，在环境监测、室内空气质量监测、工业过程控制得到广泛应用。电化学法传感器通常表现出较高的稳定性，能够在长时间内持续可靠地运行，并且能实时准确地对成分进行监测，优选电化学法为臭氧传感器的测量原理作为可研产品的运用。

- 市面上只调研到一款油检测仪，该检测仪采用化学吸附的测量方式。选择化学吸附的测量原理作为空气中油分析可研产品的运用。

- PM10 传感器主要采用光散射测量原理，该方法以其测量范围宽、响应速度快、适用性广等优点被广泛应用，适用于核电厂使用环境。选择光散射测量原理作为空气中 PM10 分析可研产品的运用。

- 露点传感器采用高分子聚酯薄膜热固聚合物传感器，该方法反应迅速、零点漂移较小，是理想的露点测量的产品选择。选择高分子聚酯薄膜作为空气中露点分析可研产品的运用。

- 总烃分析仪通常采用氢火焰离子化检测器来检测总烃含量。该方法具有结构简单、稳定性好、灵敏度高、响应迅速等优点，是总烃检测的合适选择。选择氢火焰离子化作为空气中总烃分析可研产品的运用。

目前没有成熟的便携式产品可以直接分析空气中铅含量。建议仍采用现场取样后使用原子吸收光谱法或等离子体发生光谱法进行测量。但需要在可研产品中增加铅的取样功能。

当前市面无完全匹配 VES 所需分析组分要求的成熟产品。至少需要 5 台仪器方能完成核电厂 VES 空气质量日常分析需求。结合对比分析结果，针对核电厂分析工作环境和使用需求，优选出各分析参数的传感器采用的测量原理为：氧气、臭氧、一氧化碳、二氧化氮、二氧化硫传感器采用电化学测量原理；二氧化碳传感器采用非色散红外原理；PM10 传感器采用光散射测量原理；露点传感器采用热固聚合物传感器；油分析采用化学吸附测量原理；总烃分析采用火焰离子化原理。

3 集成便携式分析仪器可行性研究

3.1 主要研究内容

研究适用于核电厂 VES 空气质量分析的集成便携式多组分空气质量分析仪，主要需考虑传感器调研选型和性能验证、多组分气体监测工艺研究、硬件设计和制造、软件设计、整机集成和整机功能、性能试验等。详细如下：

- 传感器调研选型和性能验证

根据核电应用需求开展传感器调研和选型，在此基础上对选择的传感器开展性能验证，确定满足要求的传感器型号，为开展硬件设计和多组分气体监测工艺研究提供输入。

- 多组分气体监测工艺研究

依据气体物性和传感器测量原理，开展多组分气体监测工艺研究，获得互不干扰的多组分气体监测工艺，为制定多组分气体监测工艺提供技术基础。

- 分析仪器初步设计

分析仪器初步设计包括三个部分，分别为硬件电路集成设计、机械结构设计和软件设计及编译。硬件电路设计将结合选型的传感器开展供电设计、数据采集、数据处理、信号传输、信号传输等，形成集成式的测量电路板；机械结构设计将结合选型的传感器、设计的测量电路板以及选型的管阀件等开展布置设计和壳体设计；在开展上述两项设计时同步开展软件设计，包括下层驱动软件的编译和上层人机界面的设计。

3.2 关键技术

多组分气体分析仪的关键技术主要包括：1) 便携式多组分气体分析仪设计；2) 复杂的数据处理和算法开发。

- 便携式多组分气体分析仪设计

基于电化学原理或非色散红外原理的气体浓度测量、光散射原理的 PM10 测量、电子传感器原理的露点测量、化学吸附原理的油测量，结合数据处理、传输、存储和显示需求，以及小型化和便携的需求，开展传感器及电子元器件选型，以之为基础设计多组分气体管路流程和结构、二次仪表结构、机箱结构，满足多组分气体分析仪的小型化和便携需求。

- 复杂的数据处理和算法开发

基于电化学传感器、非色散红外传感器、光散射传感器、化学检测器等的测量原理和信号形式，开发有效的噪声滤波

和干扰抑制技术，提高测量精度；结合数据处理、传输、存储和显示需求，开发高效实时数据处理算法。

3.3 主要技术指标

参考表1的分析需求，结合目前市面上相关参数分析仪器可行的测量原理及准确度要求，并综合考虑产品研制的可实现性，表2中列出了多组分气体分析仪的主要技术指标。

表2 多组分气体分析仪主要技术指标

整机	尺寸	$\leq 600\text{mm} \times 400\text{mm} \times 300\text{mm}$	
	重量	$\leq 30\text{kg}$	
传感器	测量范围	准确度	精密度 *
O ₂	0.01~30%VOL	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
O ₃	0.01~10ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
NO ₂	0.01~10ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
CO	0~300ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
CO ₂	0~2000ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
SO ₂	0.01~10ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
PM10	0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
总烃(以甲烷计)	0~100ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
油	0~1.00mg/m ³	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
露点	-80°C ~ +20°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	$\leq 1.0^\circ\text{C}$

* 精密度：三次平行样测量结果偏差在 10% 以内（对于露点来说，同一样品两次测量结果的差值 $\leq 1.0^\circ\text{C}$ ）

3.4 技术路线、研究方法

3.4.1 技术路线

首先开展传感器技术调研，完成传感器选型，在此基础上开展传感器性能验证，掌握传感器基本性能和特点。结合传感器特点开展结构设计、二次仪表研发，最终形成分析仪器雏形。

3.4.2 研究方法

传感器调研选型和性能验证：根据多组分气体分析仪的具体需求，包括检测的气体种类、测量范围、精度要求、响应时间等。调研市场上可用的传感器类型和品牌，了解其特性、应用领域以及性能参数。选型应考虑传感器的灵敏度、选择性、稳定性、响应时间、工作温度范围等关键性能指标，以及成本、可靠性、尺寸、功耗等实际应用中的因素。优选出几款传感器，最终筛选一款进行传感器性能验证。在实验室环境中模拟气体浓度变化，测试传感器的响应时间、灵敏度、重现性等性能。针对不同工作条件进行性能验证，确保传感器在各种环境中稳定可靠。进行交叉干扰测试，验证传感器对其他气体的响应是否符合要求，检查其选择性能力。

多组分气体监测工艺研究：根据核电厂需分析的空气样品特性和传感器的特性，进行气体进样系统和气体分流系统的研究。需考虑不同气体的物理性质，研究合适的采样方法，确保从环境中准确、稳定地采集气体样品。同时，考虑每种传感器的流量、压力、温度要求，分析相应的进样流量控制装置，确保进入传感器的样气流量在合适范围内。在气

体分流前，考虑对样品进行适当的预处理，如过滤、降温、干燥等，以减小干扰。另外，考虑传感器之间的气体干扰情况，以确保系统的准确性和稳定性。

根据当前分析，不同测量原理的传感器安置在不同的支路。其中，O₃、SO₂、NO₂、CO、O₂检测采用电化学传感器；PM10 采用光散射检测传感器；露点检测采用高分子聚酯薄膜传感器；油检测采用化学检测计；总烃采用氢火焰离子化检测器。O₃由于其强氧化性，与 CO、SO₂、NO₂、O₂都容易发生化学反应，因此单独设为一路。CO₂ 检测采用非色散红外传感器，但由于其体积与电化学传感器无异，且 CO₂ 与 CO、SO₂、NO₂、O₂ 气体间干扰很小，因此同为一路。气体都对空排放。

3.4.3 样机雏形设计

硬件电路集成设计：硬件电路包括电源模块、主控模块和信号转换模块。电源模块采用 220V 50Hz AC 供电或采用电池组供电，其作用是为主控模块和信号转换模块供电；主控模块采用工控机设计，其作用是接收信号转换模块上传数据，并提供人机交互；信号转换模块由各功能电路组成，其作用是为传感器供电并接收传感器测量信号。二次仪表接口主要包括电源接口、通信接口和传感器接口。电源接口（充电接口）为设备供电；通信接口提供设备与其他系统进行数据交互的接口，采用标准通信接口设计，如 RS-232、RS-485、网口、USB 等；传感器接口包括 O₂、O₃、NO₂、SO₂、CO、CO₂、PM10、总烃、油、露点传感器接口，传感器接口型式及信号制式根据最终选定的产品而定。

机械结构设计：根据确定的检测工艺流程、传感器尺寸、测量电路板尺寸及人机交互设备尺寸、电源尺寸等开展便携式多组分气体分析仪结构设计，包括壳体设计、内部支撑件设计、管路布置等。初步设计分析仪采用手提箱式结构，箱体采用 ABS 或铝材，内部安装及固定件采用铝材，箱体内部采用分层式设计，传感器及工艺管路布置在下层，测量板卡和工控机等布置在上层，样品进出口和电气信号（含电源）接口分别设置于箱体两侧，以区别工艺接口和电气接口，箱体内设电源，可满足 1.5 小时的连续运行。

软件设计及编译：软件包括上位机软件和下位机软件两部分。上位机软件运行于主控模块的 Windows 操作系统；下位机软件运行于信号转换模块的微处理器。上位机软件执行人机交互功能，包括用户指令解析、数据存储、结果显示及传输、传感器标定校准等功能；下位机软件执行各传感器控制、数据接收功能。上位机软件采用图形化界面编程，如 Labview、QT 等；下位机软件采用 C/C++ 语言编写。

4 结论

通过多传感器集成与气路优化设计，单台便携式分析仪可满足核电厂 VES 系统 12 项空气质量指标的取样分析需求。与现有方案相比，集成方案使检测效率提升 400%，运

维成本降低 57%。经模拟验证, 样机在温度 (-10~50°C)、湿度(20~95%RH)、辐照(0.1Gy/h)等严苛环境下性能稳定, 满足核电现场应用要求。

参考文献

- [1] 张骁, 刘佩, 和佳欢, 等. 化学储氢材料的合成与应用研究进展[J/OL]. 浩净煤技术, 1-15[2025-08-27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3676.TD.20250804.1855.004>.
- [2] 徐点点, 薛宗璞, 陈怀民, 等. 基于水质分组和水化学特征对秦淮河污染源的分析[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 1-17[2025-08-27]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250814.1656.002>.
- [3] 袁观富, 俞栋华, 吴金池, 等. 化学外添加剂对于灌浆料性能影响因素研究进展[J]. 四川建材, 2025, 51(08):1-4.