

大型石化厂界区开路式苯系物检测系统建设与应用研究： 实时监测、超标溯源与协同治理范例

洪烨华

上海赛科石油化工有限公司，上海市，201507；

摘要：针对大型石化企业苯系物（特别是苯）污染严重、手工监测滞后以及污染源溯源困难等问题，本文以某大型石化企业开路式苯系物检测系统建设项目为研究对象，详细阐述了基于紫外差分吸收光谱法（DOAS）的直射式长光程开路检测系统在厂界区环境大气监测中的技术原理、系统架构、实施方案与运行成效。通过在厂区东、西边界部署两套开路式系统，实现了对苯、甲苯等七种苯系物因子的实时、长路径监测。项目投运后，成功将环境中苯浓度稳定控制在 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，远低于国家标准限值，显著改善区域环境空气质量。研究表明，该系统不仅具备显著的环境与健康效益，其成功实践对推动化工园区环境监测体系建设与企业协同治理具有重要示范价值。

关键词：石化厂界；开路式检测系统；苯系物；实时监测；污染溯源

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 07. 040

石化工业作为国家经济支柱产业，其生产过程中苯、甲苯、二甲苯等芳香烃类化合物（统称苯系物）的广泛使用与排放，对周边环境空气质量及人体健康构成严重威胁。苯已被国际癌症研究机构（IARC）列为 I 类致癌物（人类致癌物）。我国《石油化学工业污染物排放标准》（GB 31571-2015）对企业边界大气污染物浓度提出了严格限值（苯 $\leq 0.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ ）。

1 引言

1.1 背景介绍

某大型石化企业（以下简称“公司”）自 2004 年建成环境监测实验室，依托 LIMS（实验室信息管理系统）实现了废水、废气、厂界大气、噪声等监测数据的现代

化管理，并与 SAP、PI（Plant Information System）系统集成。然而，传统的定点监测站结合手工采样分析的模式存在显著局限：时效性差（无法捕捉瞬时泄漏）、空间覆盖不足（单点难以代表区域）、溯源能力弱。尤其 2018 年公司大气监测站成为地方化工区苯浓度最高站点，且周边企业同样涉及苯系物，传统手段无法有效甄别污染是源于厂界区内还是界区外，导致责任界定困难，制约了精准治理。

1.2 项目建设情况

为解决上述痛点，实现厂界区苯系物污染的实时、连续、大范围监测与精准溯源，公司实施了厂界区开路式苯系物检测系统建设项目（表 1），在厂区东、西边界部署两套直射式长光程开路系统。

表 1 厂界苯系物开路监测项目基本情况

项目要素	立项背景/计划阶段	实际完成情况
立项背景	苯系物频繁超标；手工监测滞后；无法溯源内外污染源	-
主要目标	实时监测厂界苯系物；实现泄漏溯源与超标溯源；支撑污染治理	达成目标
主要工程内容	1) 新增 2 套开路系统（含 4 发 4 收、气相五参数仪等） 2) 配套电气仪表电缆、土建（平台、地坪）	按计划完成
总体运行情况评价	-	设备运行良好，数据平稳，目标达成，环境质量稳定优良

2 开路式苯系物检测系统核心技术原理

2.1 紫外差分吸收光谱法（DOAS）基础

开路式检测系统的核心是紫外差分吸收光谱法（Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOA

S）。其物理基础是 Beer-Lambert 定律：当一束光穿过待测气体时，特定波长的光会被气体分子选择性吸收，吸收强度与气体浓度成正比。DOAS 技术的精髓在于其对吸收光谱的差分处理：

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) * \exp[-\sigma(\lambda) * c * L]$$

其中：

$I_0(\lambda)$ ：光源发射的原始光强（波长 λ 的函数）

$I(\lambda)$ ：接收器测量的透射光强

$\sigma(\lambda)$ ：目标气体的吸收截面（特征“指纹”）

c ：目标气体的浓度

L ：有效光程（发射端与接收端之间的距离）

DOAS 通过对实测光谱 $I(\lambda)$ 与参考光谱 $I_0(\lambda)$ 进行高分辨率比对，并利用数学滤波（如多项式拟合）分离出气体分子的窄带精细吸收结构（由目标气体分子电子振动能级跃迁决定）与宽带缓变部分（主要由瑞利散

射、米散射、仪器响应等引起）。差分处理极大地抑制了缓变成分干扰，显著提高了对目标气体特征吸收光谱识别的灵敏度和选择性。

2.2 检测方法技术对比与选择依据

开放式苯系物检测系统核心技术为紫外差分吸收光谱法（DOAS），其优势在于非接触式长光程测量（路径长度达数百米），可实现对厂界区域苯系物的空间积分浓度监测（路径平均浓度），避免点式采样的局部局限性。

表 2 与传统方法的性能对比

技术参数	开放式 DOAS	实验室顶空-气相色谱法	便携式气相色谱法
响应时间	秒级实时监测	2 - 4 小时（含前处理）	≤1 小时
检出限	苯：0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （光程 200m）	苯：0.14 - 0.24 $\mu\text{g}/\text{L}$ （水样）	苯：1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （现场）
多组分同步能力	苯系物 7 种（单次扫描）	8 种苯系物+硝基苯类（需衍生化）	单次≤5 种
适用场景	开放区域面源污染	水/固体废物实验室分析	突发泄漏现场筛查

3 系统架构、建设与实施方案

3.1 系统整体架构与设备配置

本项目采用成熟的开放式光程 DOAS 系统（System 300），在厂区东、西两侧边界各部署一套开放式苯系物检测系统，实现对两条关键厂界线的覆盖。

（1）监测主体：

发射端（2 套/系统）：EM150 发射器（非防爆）+ 太阳能供电系统（含电池板、蓄电池，保障≥10 天断电运行）。

接收端（2 套/系统）：RE150 接收器 + PS150-1 电源箱（220VAC）。

（2）核心分析单元：AR500 分析仪及数据处理软件（内置 DOAS 反演算法）、多路器（MX004）。

（3）光路保障：专用化学光纤（OF60S-2，FS60S-5）。

（4）校准关键：针对不同苯系物的专用校准图谱（I G002，覆盖苯、对二甲苯、间二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯、乙苯）。

（5）气象辅助：ST002 气相五参数分析仪（实时测量温度、湿度、气压、风向、风速），为浓度计算与污染扩散分析提供必需的气象参数。

3.2 系统部署与数据流

（1）空间部署：

东侧边界：部署 1 套系统（包含 2 个发射端 Tx、2 个接收端 Rx），重点监控靠近废水回用处理场、化工

罐区、苯乙烯装置的区域。

西侧边界：部署 1 套系统（包含 2 个发射端 Tx、2 个接收端 Rx），监控靠近聚乙烯、聚丙烯装置及受西侧外部潜在影响的区域。

基础设施：新建 4 座发射端平台、2 座接收端平台及配套地坪。

（2）数据流与集成：

AR500 分析仪完成光谱分析与浓度反演。

浓度数据及气象参数通过 Modbus 通讯协议上传至现场局域网。

数据进一步上传至公司环保监控平台和 PI 实时数据库。

平台进行数据实时显示、报警管理、历史存储、统计分析，并与化工区监测平台实现数据共享。

超标事件触发报警，数据可快速用于溯源分析，指导运转经理团队排查内部装置或通报外部企业。

3.3 系统关键设备的技术参数优化

在原配置（表 3.1-1）基础上补充核心部件运作逻辑：

（1）紫外光源（EM150）

采用脉冲氙灯（波长范围 200 - 400 nm），通过光学斩波器消除环境光干扰，光源稳定性误差≤0.5%。

寿命瓶颈：初期氙灯寿命仅 1,000 小时（约 42 天），后升级为金属卤化物灯（寿命≥8,000 小时），降低更换频率。

(2) 光谱解析单元 (AR500)

内置偏最小二乘法 (PLS) 算法, 匹配苯系物紫外特征吸收峰 (苯: 253.7 nm; 甲苯: 261.5 nm; 二甲苯: 267 nm)。

校准图谱 (IG002) 要求每季度用 NIST 标准气体验证, 确保反演浓度误差 $\leq 5\%$ 。

3.4 数据溯源与协同分析的扩展功能

系统通过污染热力图生成与多源数据融合提升溯源能力:

(1) 空间定位算法:

东西边界两套系统构成双基线监测网络, 结合风速风向数据, 通过浓度梯度反演模型定位污染源, 定位精度达 50 米内。

示例: 当年西侧边界苯浓度突升事件中, 系统识别梯度峰值位于 1 号路北侧, 溯源至相邻企业储罐泄漏 (经共享数据确认)。

(2) 平台集成扩展:

PI 系统新增苯系物排放总量核算模块, 关联生产装置阀门开度、物料平衡数据, 实现“浓度异常 $\rightarrow$ 工艺参数核查”闭环管理。

3.5 运行管理与保障

为确保数据质量与系统稳定, 公司制定了严格的运行管理制度, 涵盖:

(1) 日常数据审核流程: 依据化工园区空气污染自动监控信息管理系统数据审核规则。

(2) 仪器运行情况检查流程: 定期巡检, 关注光强、信号质量等关键参数。

(3) 数据审核及异常情况处理流程: 对异常数据 (如负值、突升突降) 进行识别、标记、核查原因。

(4) 突发污染事件期间应急审查流程: 事件发生时, 加强数据审核频次与溯源分析力度。

4 项目运行效果与效益分析

4.1 环境质量改善成效

项目于当年 12 月建成, 次年 1 月正式投运。系统运行稳定, 监测报告数据平稳。关键成效体现在苯系物 (尤其是苯) 浓度的显著改善与稳定控制:

(1) 浓度达标与低位稳定: 如表 3 所示 (示意数据), 系统投运后:

公司大气监测站 (传统点式) 和新建厂界开路系统检测到的环境苯浓度均稳定低于 $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.1\text{ mg}/\text{m}^3$)。

该数值远低于国家《石油化学工业污染物排放标准》(GB 31571-2015) 规定的企业边界苯浓度限值 $0.4\text{ mg}/\text{m}^3$ 。

表明厂区及周边大气环境质量处于稳定且良好的状态。

表 3 厂界苯系物检测系统投运前后监测数据对比 (示例)

监测位置/时段	苯浓度典型范围($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	是否达标($\leq 400\mu\text{g}/\text{m}^3$)	备注
公司大气监测站(传统点式, 项目实施前)	报告为区域最高值(超标)	否	触发项目建设
公司大气监测站(项目实施后)	<100	是(远低于标准)	投运后效果显著
厂界开路系统(东侧边界, 项目实施后)	<100 (相对较高区域)	是(远低于标准)	靠近罐区、苯乙烯装置
厂界开路系统(西侧边界, 项目实施后)	<100 (较低区域)	是(远低于标准)	靠近聚烯烃装置, 偶受南侧扩散影响 (北侧略高)

(2) 空间分布揭示污染特征: 系统数据揭示了污染的空间差异:

东侧 (6 号路、9 号路): 靠近废水处理场、罐区、苯乙烯装置, 苯浓度相对较高 (但仍远低于标准)。

西侧 (1 号路): 靠近聚烯烃装置, 苯浓度较低。

西侧浓度梯度: 1-8 月数据显示 1 号路北侧浓度高于南侧, 分析认为受风向影响, 南侧苯乙烯装置/罐区的污染物可能向北侧扩散。这种精细的空间分辨能力是传统点式监测无法提供的宝贵信息。

4.2 综合效益分析

项目的实施带来了显著的多维度效益:

(1) 环境与健康效益:

污染物减排: 通过实时监测与快速溯源, 促进及时发现并消除泄漏点, 有效减少了苯系物的无组织排放。

环境质量保障: 成功将厂界及周边大气苯浓度控制在极低水平 ($<100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$), 显著降低了环境风险和对周边居民、企业员工的健康威胁。

智能化监控: 实现了厂界区域大气污染物浓度的集中式、智能化、网络化监控。

(2) 社会效益:

明确污染责任: 有效区分厂界区内、外污染来源,

避免了企业间因污染问题产生的纠纷和推诿扯皮,促进了区域和谐。

提升监测与应急能力:大幅增强了对潜在环境问题的早期发现能力和对突发环境事件的快速响应与处置能力。

促进协同治理:公司主动协助邻企处理废气的举措,树立了良好的企业社会责任形象,为区域内污染协同治理提供了范例。

(3) 经济效益(间接):

避免罚款与停产风险:有效监控和达标排放降低了因环境违规导致的行政处罚、停产整顿风险。

降低泄漏损失:及时发现泄漏有助于减少物料损失。

提升管理效率:自动化在线监测显著降低了对人工定期巡检和手工采样的依赖,节省了人力成本。

5 结论

开放式系统通过长光程 DOAS 技术与智能反演算法的结合,解决了石化厂界苯系物实时监测与溯源难题。技术细节的深化表明:光源稳定性优化、多参数环境补偿及空间定位算法是保障数据精准的核心,而标准化的质控流程与平台协同分析进一步强化了环境风险管控能力。该项目是开放式 DOAS 技术在大型石化企业中的成功应用典范,为其他同类企业起到了积极示范作用。

参考文献

[1] 张晓淳, 潘锦. 空气中苯系物的测定方法比对[J]. 广州化工, 2014, 42(5): 132-133.

作者简介: 洪烨华, 出生年月: 1983 年 11 月, 性别: 男, 民族: 汉族, 籍贯: 湖北省蕲春县, 学历: 大学本科, 职称(现目前的职称): 工程师, 研究方向: 项目管理、工程技术管理。