

# 空分设备化验数据自动化采集系统的可靠性分析

梁燕君

河南安阳钢铁集团动力作业部 河南 安阳 455000

**摘要：**工业4.0和智能制造背景下，空分设备自动化与智能化水平提升，化验数据对质量控制和安全运行至关重要。本文以空分设备化验数据自动化采集系统为研究对象，阐述其作用与架构，分析硬件故障、软件缺陷等风险源，构建多层次可靠性评估模型，提出综合可靠性提升策略。系统性可靠性设计与管理可提升系统稳定性与可信度。

**关键词：**空分设备；自动化采集系统；化验数据；可靠性分析；容错设计

## 引言

空气分离制氧技术是现代工业重要一环，产品应用广泛。制氧过程复杂，化验数据是衡量分离效果等的关键。传统化验数据采集方式滞后、低效，构建高效精准可靠的化验数据自动化采集系统（ADAS-LA）是必然趋势。但自动化系统有新风险，故障可能导致严重后果。对ADAS-LA进行可靠性分析，是保障安全生产和精益管理的战略要求，本文旨在剖析其可靠性问题并提出解决方案。

## 1 空分设备化验数据自动化采集系统的架构与功能

一个典型的空分设备ADAS-LA是一个集成了传感、通信、计算与控制技术的复杂信息物理系统（CPS），其基本架构通常可分为以下四个层次：

### 1.1 现场感知层

该层是系统的数据源头，主要由各类高精度在线分析仪表和传感器构成。在空分设备中，关键设备包括：（1）在线气相色谱仪（GC）：用于实时分析产品气（氧、氮、氩）及污氮、废气等流路中的组分纯度及微量杂质（如甲烷、乙炔等碳氢化合物）。（2）微量氧/水分析仪：用于监测高纯气体中的痕量氧或水分含量<sup>[1]</sup>。（3）压力/温度/流量变送器：用于监测精馏塔、换热器、压缩机等关键设备的运行状态参数。这些设备通过4-20mA模拟信号、Modbus、HART或Profibus等工业总线协议，将原始数据传输至下一层。

### 1.2 数据采集与边缘计算层

该层通常由可编程逻辑控制器（PLC）、远程终端单元（RTU）或工业网关组成。其主要功能包括：（1）数据汇聚：从现场感知层收集所有原始数据。（2）信号调理与预处理：对模拟信号进行滤波、线性化处理，并将数字信号进行格式转换。（3）边缘计算：执行初步的数据校验、简单逻辑判断（如超限报警）和数据压缩，减轻上层系统的计算负担。（4）协议转换：将不同协议的

数据统一转换为上层系统（如DCS或SCADA）可识别的标准协议（如OPCUA）。

### 1.3 中央监控与数据管理层

该层是系统的核心，通常集成在工厂的分布式控制系统（DCS）或数据采集与监视控制系统（SCADA）中。其主要功能包括：（1）数据存储：将采集到的化验数据存入历史数据库（如PISystem、OSIsoft）或实时数据库，形成完整的生产数据档案。（2）数据可视化：通过人机界面（HMI）实时展示关键参数的趋势图、报警信息和设备状态。（3）高级分析：为上层的先进过程控制（APC）和制造执行系统（MES）提供高质量的数据输入，支持能效优化、质量预测和故障诊断等高级应用。

### 1.4 应用与决策支持层

该层是系统价值的最终体现，连接着企业的业务系统。化验数据在此被用于：（1）工艺优化：根据实时纯度数据自动调整精馏塔回流比、膨胀机负荷等参数，以实现最优能效。（2）质量控制：确保出厂产品符合客户合同规定的纯度标准。（3）安全联锁：当检测到碳氢化合物浓度超过安全阈值时，自动触发停车联锁，防止爆炸事故。（4）报表与追溯：自动生成质量报告，满足ISO等质量管理体系的审计要求。

由此可见，ADAS-LA贯穿了从物理世界到数字世界的全过程，其任何一个环节的失效都可能对整个制氧过程产生连锁反应。

## 2 可靠性风险源识别与分析

### 2.1 硬件层面的风险

在硬件层面，长期运行的严苛环境是最大的威胁。在线分析仪表，尤其是其内部的色谱柱、传感器探头等核心元件，在低温、高压及高纯介质的持续作用下，不可避免地会发生性能老化与漂移，导致测量结果出现系统性偏差。若维护周期不当或校准不及时，这种偏差将长期存在，误导整个控制系统。此外，作为数据处理中

板的PLC、工业网关等控制器，其内部的CPU、电源模块或I/O卡件同样存在硬件失效的风险，一旦发生故障，将导致其所辖区域的数据流完全中断<sup>[2]</sup>。而遍布全厂的信号线缆与连接器，在振动、腐蚀乃至鼠害等因素的侵蚀下，极易出现破损、松动或接触不良，引发信号干扰、衰减甚至彻底中断，成为系统可靠性的物理瓶颈。

## 2.2 软件与固件层面的风险

软件与固件层面的风险则更为隐蔽且难以排查。分析仪或PLC内部的嵌入式软件可能存在未被发现的逻辑缺陷或边界条件处理漏洞，这些缺陷在特定的、罕见的工况组合下被触发，可能导致设备死机或输出完全错误的数据。不同厂商设备间的驱动程序或通信协议实现往往存在细微差异，这些差异在系统长期运行后可能因累积效应或特定指令的交互而引发兼容性问题，造成间歇性的通信中断。同时，运行上位监控软件的操作系统若未能及时修补已知的安全漏洞，则可能成为恶意软件的突破口，导致系统崩溃或关键数据被恶意篡改。

## 2.3 网络与通信层面的风险

在网络与通信层面，空分设备日益复杂的网络环境带来了新的不确定性。ADAS-LA通常需要与视频监控、办公网络等其他系统共享工厂骨干网带宽，在网络高负载时段，关键的化验数据包可能因拥塞而延迟甚至丢失，破坏了数据的实时性。若核心网络设备如交换机、路由器缺乏冗余设计，其单点故障将直接导致大面积数据流中断。此外，工厂内大型电机、变频器等设备运行时产生的强大电磁场，会对邻近的通信线路构成严重干扰，导致数据传输过程中出现误码，影响数据的完整性。

## 2.4 数据安全与完整性风险

在工业互联网时代，数据安全与完整性风险日益凸显。ADAS-LA一旦接入更广泛的网络，便可能面临来自外部的网络攻击。攻击者有可能通过中间人攻击等方式篡改化验数据流，向控制系统注入虚假信息，从而误导操作员做出错误决策，甚至蓄意制造生产事故。另一方面，用于存储历史数据的服务器若遭遇硬盘物理损坏或数据库软件故障，可能导致关键的历史化验记录永久丢失，这不仅影响日常的质量追溯，更会在发生安全事故后，因缺乏关键证据而使事故原因分析陷入困境。

## 2.5 人为与管理层面的风险

最后，人为与管理因素同样是不可忽视的风险源。维护人员未能严格按照规程对分析仪进行定期标定和预防性维护，是导致数据失准的最常见原因。在系统升级、参数调整或故障处理过程中，工程师的误操作，如错误配置数据采集点或设置不当的量程，也可能引入系

统性错误。更为严重的是，如果工厂缺乏一套清晰、高效的应急预案，当ADAS-LA突发故障时，操作团队将手足无措，无法及时切换至备用的手动分析模式，从而大大延长故障的影响时间，放大其负面影响。

## 3 可靠性评估模型构建

为量化评估ADAS-LA的可靠性，可采用多层次的评估模型。

### 3.1 基于故障树分析（FTA）的定性评估

故障树分析（FTA）是一种有效的定性评估工具。它采用自上而下的演绎逻辑，以“化验数据不可用”这一最顶层的失效事件为起点，系统地剖析所有可能导致该事件发生的直接原因，并将这些原因作为新的中间事件继续向下分解，直至追溯到无法再分解的基本事件，如“GC硬件故障”、“PLC电源模块失效”或“通信线缆被鼠咬断”等。通过绘制完整的故障树，可以直观地识别出系统中最薄弱的环节和风险最高的失效路径，为可靠性设计的重点方向提供清晰的指引。

### 3.2 基于可靠性框图（RBD）的定量评估

在定性分析的基础上，可靠性框图（RBD）则提供了定量评估的手段。RBD将复杂的ADAS-LA抽象为由多个功能组件通过串联、并联等逻辑关系连接而成的模型。对于数据采集这一关键功能路径，通常可建模为串联结构，即任何一个环节失效，整个数据流即告中断。每个组件的可靠度可以通过其历史平均无故障时间（MTBF）来估算，公式为 $R = e^{-t/MTBF}$ 。整个串联系统的可靠度即为各组件可靠度的乘积。通过RBD模型，不仅可以计算出系统在特定任务周期内的整体可靠度，还能模拟引入硬件冗余（即并联结构）后对系统可靠度的提升幅度，从而为投资决策提供量化依据。

### 3.3 关键性能指标（KPIs）

除了理论模型，建立一套可量化的关键绩效指标（KPIs）体系对于持续监控和改进系统可靠性至关重要。数据可用率是最核心的指标，它直接反映了系统能够正常提供数据的时间占比。数据准确率则通过定期将自动化采集结果与标准物质分析或权威的离线实验室结果进行比对，来衡量数据的可信度<sup>[3]</sup>。平均修复时间（MTTR）表征了运维团队的响应与修复能力，是衡量系统韧性的重要指标。此外，报警有效率（即真实有效报警占总报警数的比例）能够有效揭示系统是否存在频繁误报或危险漏报的问题，是评估系统智能性和可靠性的的重要维度。

## 4 可靠性提升策略

针对上述风险源和评估结果，可采取以下综合策略

来提升ADAS-LA的可靠性:

#### 4.1 硬件冗余与高可用性设计

在硬件设计上,冗余是提升可靠性的基石。对于直接关联到人身和设备安全的关键测量点,例如碳氢化合物分析,应采用“三取二”(2oo3)的表决逻辑,即三个独立的测量通道中至少有两个同时确认危险状态,才触发最终的联锁动作,这能有效避免单点故障导致的误停车或更危险的拒动作。同样,作为系统核心的PLC控制器、网络交换机和服务器等,都应采用热备冗余架构,确保主备设备间数据实时同步,实现故障时的无缝切换。此外,为所有关键设备配备不间断电源(UPS),可以抵御电网波动或短时断电带来的冲击,保障系统在电力异常情况下的持续运行。

#### 4.2 软件容错与健壮性增强

软件层面的可靠性提升依赖于健壮的容错设计。系统应在数据处理流程中嵌入多层次的校验与异常检测机制。例如,通过设定物理极限(如氧气纯度不可能超过100%)进行合理性检查,对超出范围的数据自动标记为无效并触发报警。更进一步,可以采用基于统计过程控制(SPC)或机器学习的方法,对数据流进行实时监控,识别出异常的突变或缓慢的漂移趋势,从而在故障完全发生前发出预警。同时,在嵌入式和上位机软件中普遍应用看门狗(Watchdog)机制,能够自动检测并恢复因软件缺陷导致的进程挂起或死循环,极大增强了系统的自愈能力。对于软件更新,必须建立严格的版本管理和灰度发布流程,在隔离环境中充分验证后,再谨慎地推广到生产环境。

#### 4.3 网络安全纵深防御

面对日益严峻的网络安全威胁,必须构建纵深防御体系。首要原则是实现OT(运营技术)网络与IT(信息技术)网络的严格隔离,通过部署工业防火墙,仅开放必要的、受控的通信端口。在此基础上,对所有联网设备进行安全加固,包括关闭非必要服务、应用强密码策略、及时修补系统漏洞,并对关键数据通信链路实施加密<sup>[4]</sup>。此外,部署专门的工业网络入侵检测系统(IDS),能够实时监控网络流量,识别潜在的攻击行为。配合全面的系统日志审计功能,记录所有关键操作

和访问行为,为安全事件的事后追溯与分析提供完整证据链。

#### 4.4 标准化运维与人员赋能

最终,再先进的技术也离不开人的执行。必须建立一套标准化、精细化的运维管理体系。这包括制定详尽的预防性维护计划,利用计算机化维护管理系统(CMMS)对分析仪校准、设备点检等任务进行闭环跟踪。编写清晰、易懂、覆盖所有操作场景的标准化操作规程(SOP),确保任何级别的操作员都能在规范指导下正确操作。尤为重要的是,要打破传统专业壁垒,对仪表、工艺、电气和IT等不同背景的人员进行交叉培训,培养一支既精通工艺原理又掌握自动化技术的复合型运维团队,从根本上提升系统的整体可靠性水平。

### 5 结语

空分设备化验数据自动化采集系统是连接物理生产世界与数字智能世界的桥梁,其可靠性是空分设备安全、稳定、高效运行的生命线。本文通过系统性地剖析ADAS-LA的架构、识别多维度的风险源、构建科学的评估模型,并提出了一套涵盖硬件、软件、网络、管理和人员的“五位一体”可靠性提升策略。研究表明,可靠性并非单一技术问题,而是一项复杂的系统工程,需要从设计、建设、运维到管理的全生命周期进行统筹规划和持续改进。未来,随着人工智能、数字孪生等新技术的融入,ADAS-LA的可靠性保障将向预测性维护、自愈性网络等更高阶形态演进,为制氧工业的高质量发展提供更强大的数据驱动力。

### 参考文献

- [1]周剑峰,刘林林.现代制氧技术综述[J].化工设计通讯,2025,51(06):20-23.
- [2]牟万勤,安飞鹏,牛新杰.空分设备空分装置自动化控制系统升级及远程集中监控的实现[J].工业控制计算机,2024,37(04):155-156.
- [3]刘玲云,孟庆轩,郑安荣.制氧机流量监测与控制系统研究[J].自动化应用,2025,66(01):16-19.
- [4]王庆,兰娜.破解制氧装置运行难题实现机组性能全面优化[N].中国冶金报,2025-08-21(005).