

化工自动仪表在危险化学环境中的可靠性分析

刘 勇

中科合成油内蒙古有限公司 内蒙古鄂尔多斯 010321

摘 要: 化工自动化设备是化工生产的重要设备, 在生产过程中起着监控、控制、管理等重要作用, 它的可靠性直接影响着生产的安全、效率和质量。随着化学工业的不断发展, 生产过程越来越复杂, 越来越危险, 对自动化化工设备的要求也越来越高。这类仪器需要工作在高温、高压、强腐蚀性气体、易燃易爆等极端环境中, 一旦出现故障, 就会造成重大安全事故, 造成巨大的经济损失。因此, 对危险化学环境下化工自动化仪器的可靠性进行深入研究, 对确保化工安全高效运行具有重要意义。

关键词: 化工自动仪表; 危险化学环境; 可靠性; 提升策略

对化工自动化设备进行可靠性分析, 是化工安全研究中的一个重要课题。在恶劣的化学环境下, 仪器的可靠性会受到各种因素的影响, 出现仪器性能降低, 甚至故障, 影响整个生产系统的正常运转。在此基础上, 系统地分析各种典型失效情况, 并提出有效地提升可靠性措施极为关键, 可提高仪器的运行稳定与安全。与此同时, 随着科学技术的发展, 新材料、新工艺、新方法的不断涌现, 为提高化工自动化仪器的可靠性提供了新的思路和方法^[1]。鉴于此, 开展危险化学环境下化工自动化设备的可靠性研究, 不仅对解决当前面临的现实问题具有重要意义, 而且对我国化工行业的技术开发与安全管理具有重要的理论意义与应用价值。

一、化工自动仪表危险化学环境中的典型失效模式

(一) 物理性失效

化工自动化仪器在恶劣的化学环境下, 其物理失效形式主要是机械结构的损伤和材料的疲劳。由于长期工作在高温、高压、强腐蚀等苛刻环境中, 仪表壳体、传感器、执行器等机械零部件易受到物理冲击与磨损, 造成结构变形、密封失效或连接松动。此外, 腐蚀介质对仪表材料的冲蚀作用也是物理失效的一个重要因素, 会导致材料强度下降、疲劳寿命缩短, 从而影响仪表的精度与可靠性^[2]。

(二) 电气性失效

电气故障是危险化学环境下化工自动化设备的另一种典型故障模式, 这种故障多发生在仪器的电路系统上, 主要表现为短路, 断线, 接触不良, 信号干扰等。在有腐蚀性气体或液体的环境下, 电子元器件及接线极易发

生腐蚀, 引起绝缘性能降低、电阻值改变, 从而引发电气故障。另外, 高温环境还会加速电子元器件的老化, 缩短其使用寿命^[3]。

二、危险化学环境中提升化工自动仪表可靠性的策略

(一) 优化仪表材料与结构设计, 增强环境适应性

化工自动化设备长期暴露于强腐蚀、高温、高湿等极端环境中, 材料和结构的匹配是保证其可靠运行的基础。材料学理论认为, 金属材料的腐蚀速度与其化学组成和微观结构有很大关系, 如在酸性氯盐环境中, 普通碳钢的腐蚀速度可以达到0.5~1.5 mm; 而高分子材料, 需要考虑的是抗膨胀和抗老化。同时在结构设计上, 根据流体动力学原理, 仪表腔体结构的不合理, 会造成介质滞留, 加剧腐蚀, 进而严重影响仪器的使用寿命和测量精度。因此选用适当的材料和科学的结构设计对提高仪器的环境适应性具有重要意义^[4]。

在具体实施过程中, 需要对不同的化学环境进行精确匹配, 如在强酸环境中, 可选择铬、钼等元素含量较高的Hastelloy (哈氏合金) 作为仪表壳体和内部关键部件, 在浓度为60%, 温度为80℃的硫酸环境中, 腐蚀速度小于0.05 mm/年; 镍基合金 (如Inconel 718) 具有优异的高温强度和抗氧化性能, 可承受700℃以上的高温以及10MPa以上的压力, 所以适合在高温高压的环境中使用。同时, 为提升仪表的可靠性, 还需对仪器结构进行优化设计, 采用全封闭结构, 使核心元件与外界隔绝, 如采用双层密封结构, 使仪器的防护等级达到IP68, 可有效防止化学物质的入侵。而且在结构设计中, 还应

预留一定的膨胀空间，以应对因温度变化而引起的材料热胀冷缩，防止结构变形破坏。另外，在仪器制造过程中，还可以利用表面处理技术来提高材料的性能，通过化学镀镍磷合金工艺，在仪表表面制备出一层硬度高达HV500-800的均匀致密防护层，通过1000小时的盐雾测试，发现其表面不会出现明显的腐蚀，可大大提高仪器在恶劣化学环境下的耐腐蚀性能。这些措施的实施，可有效提高化工自动化仪器在恶劣环境下的可靠性和稳定性。为充分展示不同环境下适用材料的关键性能指标，可参考表1：

表1 不同环境下适用材料的关键性能指标

环境类型	适用材料	关键性能指标
强酸性环境	哈氏合金 C-276	在60%硫酸、80℃环境中， 腐蚀速率≤0.05mm/年
高温高压环境	Inconel 718	可承受温度700℃以上， 压力10MPa以上
高湿度、盐雾环境	316L不锈钢	盐雾试验1000小时， 表面无明显腐蚀

(二) 构建智能运维管理体系，实现预防性维护

化工自动化设备的可靠性管理正在由传统的事后维护向智能预防维修转变。根据可靠性理论，仪器失效率随时间的变化呈“浴盆曲线”分布，早期故障多由设计制造缺陷引起，偶然失效阶段失效率相对稳定，而随着部件老化而加剧的耗损性失效。智能运维系统通过对数据的实时采集和分析，能够在不确定的故障阶段对潜在的风险进行准确地识别，从而将其扼杀在萌芽状态^[5]。同时，利用大数据建立故障预测模型，可以有效地延长仪器的使用寿命，减少维修费用。

在具体实施过程中，需要建立智能化运维管理系统，首先要建立健全的传感网络，并在关键部位安装温度、振动、压力等传感器，实现对仪表运行状态的实时监测。例如，将振动传感器安装到流量仪表轴承上，实现千次/s的振动信号采集，并对其频谱变化进行分析，可以提前发现轴承磨损等故障隐患。同时还应构建数据处理和分析平台，运用大数据分析技术，对所收集的数据进行深度挖掘，并利用机器学习算法建立仪器性能预报模型，如利用长短时记忆网络(LSTM)对仪器未来性能变化趋势进行预测，当发现仪器性能指标偏离正常范围时，给出预警。在此基础上，还可结合维修知识库和专家经验，构建智能维修决策系统。比如，当压力仪表发生测量值波动异常报警时，系统会自动检索历史故障案例和维修记录，推荐检测仪器引压管有没有堵塞，

传感器有没有损坏，并给出具体的维护步骤和备件清单。建立智能化的运维管理系统，可使化工自动化仪器由被动维护向主动维修转变，有效提高仪器的可靠性和工作效率。

(三) 完善行业标准与规范，确保质量与安全

标准化是保证自动化化工设备可靠运行的制度基础，目前，在化工仪器行业中，除了GB/T 33691-2017等通用标准外，在危险化学品介质中还存在着一些空白。从质量控制理论的角度看，在仪器设计、制造和验收过程中，由于缺乏统一的标准，容易造成技术指标不统一，从而增加了系统集成的风险。例如，如果防爆仪器的保护水平不明确，可能会在氢气爆炸(爆炸极限为4.0%-75.6%)环境下，某些仪器可能不能满足防爆要求，存在安全隐患。因此建立和完善的行业标准体系，是规范市场，保证安全的重要措施。

在具体实施过程中，需要从多个维度对技术要求进行细化，如材料标准中需明确规定，与强腐蚀性介质接触的仪表零件，必须按ASTM G31标准进行浸蚀试验，并在模拟工作条件下72小时内进行质量损失率不大于0.1%；结构设计规范中，仪表壳体必须经过IP69K的检测，在80℃，8 MPa高压水枪的喷射下不会发生泄漏；性能试验规范要求仪器能在-40℃~85℃范围内连续工作1000小时，相对湿度95%，测量误差不大于±0.5%。在此基础上，构建第三方认证体系，对仪器产品进行SIL 2(安全完整性等级)认证，保证在恶劣环境下故障概率小于 10^{-3} - 10^{-2} 次/小时。同时，还应推进标准动态更新机制，每3-5年根据新技术的发展对标准内容进行修订。完善的行业标准和规范，可为化工自动化仪器的生命周期管理提供定量依据，统一技术门槛，推动企业技术升级，从制度上保证危险环境下仪器的可靠性和安全性，促进行业的健康发展。

(四) 采用冗余与容错设计，增强系统可靠性

冗余性和容错性设计是提高自动化化工设备可靠性的重要途径。根据系统可靠度理论，采用并联结构可以显著降低系统失效率，如两个传感器并联结构可以将系统故障概率降低到单个传感器的1/10。容错设计采用数据校验和智能切换机制，保证局部故障对整个系统的正常运行没有影响^[6]。在恶劣化学环境中，由于电磁干扰引起的信号异常、机械振动引起元件松动等，使仪器面临突发故障的风险更大，冗余和容错设计可以有效提高仪器的抗干扰能力和故障处理能力。

在具体实施过程中,可采用三层冗余结构,以压力测量仪器为例,可采用3套独立压力传感器(0-10 MPa量程,精度0.1% FS),确保其输出信号经独立隔离电路传送到控制器。该控制器采用三选二投票算法,当有一组传感器数据偏离0.5 MPa以上时,将其屏蔽,取其余两组信号的平均值为有效数据。对于执行器,可采用主/备用双电磁阀,在主阀响应时间大于1秒的情况下(正常响应时间 ≤ 0.3 秒),在50毫秒内自动切换并投入运行。在此基础上,引入卡尔曼滤波等容错控制算法,实现传感器数据的实时滤波,消除噪声的影响,保证数据的准确性。同时,还应构建故障诊断专家系统,在发现冗余零部件故障的情况下,自动生成故障位置报告,帮助维护人员快速处理故障。通过硬件冗余配置、软件算法优化和智能控制策略,可建立多层可靠性保障系统,保证化工自动化仪表在复杂危险环境下的稳定运行,保证生产安全。

(五) 加强对员工的专业培训,提高操作和维修技术水平

在化工自动化仪表的可靠性管理中,人为失误是造成系统失效的主要原因,而不规范的操作和不及时的维修则会引起连锁反应。从认知心理学的观点来看,操作者对仪器原理的了解程度和操作技巧的熟练程度,直接影响到操作者判断和处理异常状况的能力。因此,对人员进行系统的培训,提高人员的专业素质,是减少人为风险、保证仪器可靠性的重要手段。

在具体实施过程中,企业要建立分层次的培训制度,如对新进员工进行为期两周的基本理论培训,主要内容有:压力、温度和流量测量原理、《危险化学品安全管理条例》等;实践训练方面,要求学员在模拟训练平台上完成100个小时的实际操作训练,掌握仪器校准(标定误差 $\leq 0.2\%$)、接线和故障排除等基本技能,并获得证书。同时在职员工每个季度都要参加一次专门的培训,例如对智能仪器进行物联网数据解释,数字孪生远程维修等;而且每年都需要举行一次应急演练,模拟仪器的突发故障情况,要求操作者15分钟内完成故障定位和应急处置。在此基础上,还应建立培训效果评价机制,通

过理论考核(合格线85分)、实操分(满分100)、实战考核(满分100分)等多个维度进行考核,把培训结果和绩效考核相结合,激励员工不断提高自己的职业素质。同时,公司还定期邀请业内专家来公司进行技术讲座,为员工提供先进技术和典型案例,开阔员工的技术视野。加强员工的专业训练,通过知识传授、技能培训和考核激励等方式,对操作人员和维修人员的专业素质进行系统的提高,可降低人为因素引起的仪器故障,为化工自动化设备的可靠运行提供人力支持,对确保化工企业的安全生产具有重要意义。

结束语

在危险化学环境下,对化工自动化仪器进行可靠性研究具有重要意义,不仅可以有效地防止和减少化工生产安全事故,保证员工的生命安全,提高企业的经济效益,而且可以促进化学工业的技术进步与可持续发展。随着科技水平的不断提高,对化工自动化仪器可靠性的研究也越来越趋向于智能化和精确性。这些措施的实施将为化工自动化仪器在复杂环境中的应用提供新的思路和方法。同时,加强相关标准、规范的制定和完善,有利于提高我国化工行业的安全管理水平,推动我国化学工业健康、稳定发展。

参考文献

- [1] 齐明轩.浅析化工仪表自动控制系统的故障和维护[J].中国设备工程,2025,(05):54-56.
- [2] 刘智超.石油化工水处理工艺中自动检测分析仪表探讨[J].化工管理,2022,(06):96-98.
- [3] 周晓静.化工仪表自动控制系统故障及其维护技术分析[J].电子测试,2020,(22):117-118+59.
- [4] 罗向东.化工自动化仪表检修与维护措施研究[J].现代制造技术与装备,2020,56(10):85-86.
- [5] 詹雨.石油化工仪表中的自动化控制技术探析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(17):218-219.
- [6] 郝励.预防性维护措施在化工仪表自动化设备中的实施[J].化工管理,2020,(18):140-141.