

化工过程自动化控制的故障诊断与应急处理策略

马守刚

新疆晶诺新能源产业发展有限公司 新疆 胡杨河 834034

【摘要】：现代工业连续化和规模化生产中，工业生产中的自动控制是其安全、可靠的重要保障。在化工、医药等过程行业，由各种传感器、控制器和驱动器组成的复杂自动控制系统，实现从原材料投入到成品产出的各个阶段对其进行精确监控和调控。该体系中任意一个节点的失效，都会很快导致产品质量下降，生产中断，致使安全事故。因此，如何对其进行快速、精确的故障诊断，并据此快速采取科学、高效的应对措施，是保证我国石化行业的本质安全性和经济性所面临的重要技术和管理难题。

【关键词】：化工过程；自动化控制；故障诊断；应急处理策略

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.008

随着企业规模的增大和过程的复杂度的提高，其内部的固有弱点和外界干扰的风险也随之增大。由于事故具有突发性、关联性和潜在的严重危害，使得事后维修和经验处置的方式已经很难适应当今社会对高可靠性和高安全性的苛刻需求。因此，建立一种系统化、智能化和前瞻性的故障诊断和紧急处置系统具有重要的现实意义。

1 化工过程自动化控制故障诊断与应急处理的研究意义

化工（包括医药）过程自动控制系统是现代流程工业的神经中枢，它通过对生产过程中的温度、压力、流速、液位和组分等进行连续监控和精确调控，保证了生产过程的稳定、安全和质量的一致性。然而，由于化工过程原料和产品种类繁多，工况苛刻，反应机理复杂，操作连续化等特点，使得其自动化控制系统在长期运行过程中，不可避免地会面临设备部件老化、信号传递干扰、软件逻辑错误、操作不当和外界异常工况冲击等多种隐患。如果控制系统出现故障，将会造成产品质量的波动，能源消耗的增加，甚至是停产，给企业带来直接的经济损失；严重的可能会导致材料泄漏，反应失控，引发火灾和爆炸等重大安全事故，对人身、财产和周围环境造成严重的威胁。因此，以化工过程自动控制为研究，开展故障诊断及应急处置策略研究，旨在建立一套能对潜在风险进行预警，快速定位故障根源，并有效实施应急干预的技术和管理体系。该体系的建立，不仅对提高生产过程的本质安全水平，实现由“被动应对”到“主动预防”的关键技术支持，对保证企业持续稳定运行，提升经济效益和核心竞争力具有重要意义，也是促进化工和制药工业向智能化、绿色化和安全化转型升级的重要基础^[1]。

2 化工过程自动化控制故障诊断与应急处理存在的问题

2.1 诊断迟滞：故障特征隐匿与预警能力不足

化工过程故障诊断信号具有极强的隐蔽性，使得其在工业生产中的应用变得越来越困难。在复杂的连续开采工艺中，个

别装置的初期异常常以较弱的参量偏差为特征，很容易被常规的产量变化和测试噪声掩盖。如某大型离心泵转子在初始磨损阶段，其振动信号的早期特征频率往往只是其 1.05-1.2，而常规的时间域监控方法很难对其进行有效辨识。目前大部分企业仍然依靠传统的定门限报警方式，如设置感应器内的温度超出过程卡的上限，就会发出警报。传统的基于动态门限的检测技术具有明显的滞后现象，一般只有当失效已经达到对生产质量和装置安全性产生威胁时，才会进行预警。一家乙烯生产的乙烯裂化机组轴向偏移的警报门限一般设置为 80 μm ，但由于轴向偏移由 30 μm 到 75 μm ，该系统无法发出警告，这时器件就有很大的定心或失衡问题。根据有关工业实例研究表明，如果使用常规的定门限预警方式，从事故发生到最后预警之间的间隔期一般为 4—8 个小时，已经错失、最优的介入时机^[2]。

2.2 处置被动：应急预案粗放与联动响应脱节

事故警报被启动后，整个事故处理过程中，一般都会出现粗疏的方案和“落实不到位”的现象。目前大部分的化工企业所制订的应急方案都是文本式的、一般性的，缺少针对具体设备和故障情景的详细的作业指导。如针对广义的“DCS 控制系统局部故障”，预案中仅规定手动和备份两种，而当某一聚合装置温控回路出现故障时，操作者应该怎样一步一步地判定传感器故障、执行机构卡滞或控制组件受损，并据此采取切除自动、手动调整输出或开启二次调节等具体的工作过程，而在方案中通常没有详细的、没有进行过演练的过程。由于其粗放的工作方式，使得紧急情况处理主要依靠驾驶员的个人经验和临时的决策，在紧急情况下很容易发生错误和延迟。更大的问题是，企业间的信息传递和协作反应之间的分离。当监控室的工作人员在发现任何不正常现象时，一般都会先用内线电话向巡视员核实，然后由地面工作人员用步话机或跑步返回监控室报告，这个来回的时间超过 10 分钟。而集中控制站、现场值班、设备维护等部门和生产调度部门缺乏一个统一的实时信息共享和统一的指挥系统。一家化工企业在一次事故中，由于阀门膜片断裂引起的气体泄漏事故，控制中心已经察觉到流动的不正常，但是由于缺少 DCS 屏幕上显示的阀门位置变化趋势和

周围气体探测器的监测结果,造成大量的浪费,维护部门在没有充分掌握实际工作状态的前提下就已经做好了带压力封堵的准备,这就加大了处理的风险^[3]。

2.3 维护低效:知识依赖经验与闭环管理缺失

在失效后的维修和知识管理中,过分依靠单个专家的经验,缺乏闭环机制。在化工生产中,很多“疑难杂症”的判断和解决都是依靠几个高级技术人员或老师傅在很长一段时间内总结出来的。这些经历都是非常私人的,是隐性的,如老师傅可以通过倾听离心泵转动时发出的最微小的差别或者接触到马达的壳体的温度,来对其进行初步的诊断。但是,这些知识很难实现标准化和数字化,更别说在不同的班组和工厂之间进行高效的传输和分享。随着一名资深技术人员的退役或者调离岗位,他所累积的设备失效管理技术也会随着时间的推移而丢失。在过程方面,大部分企业缺少对缺陷个案进行系统的记录和分析。一次事故处理完毕后,通常只填一份维修表格,并将已替换的零部件进行登记,而缺少对事故根源分析、处理过程决策逻辑、措施效果检验等方面的资料进行系统化的存档。

3 化工过程自动化控制故障诊断与应急处理的优化策略

3.1 预警前置:构建基于数据驱动的智能诊断模型

建立以数据为基础的智能化故障诊断方法,必须对分散控制系统(DCS)中所储存的工艺信息和实时信息进行系统集成。其取样速率通常在1秒到1秒之间。为达到高效的预报效果,需要对观测资料进行预处理,即利用邻近点的直线内插方法对观测资料进行拟合,并利用3 sigma原理中的Lakuda判据对观测值进行辨识和光滑。采用PCA、ICA等多变量统计学手段,对高维数据进行降维和特征抽取,去除共线性,突出其内在机理。然后,利用短时记忆网络(LSTM)或门控回路(GRU)等时序深度神经网络,对常态运行状态下的多元时序数据进行学习,构建典型工况下的动态标杆模型^[4]。

运用数学建模方法可以自动地识别出各参量之间的常态耦合和演化规律。在实践中,通过对标准模式下的当前时间窗进行重建和预报,并对其进行仿真分析。如在某一催化加氢装置监测过程中,若模型计算出的进口氢和床面温度的综合预报误差持续10次以上,即使个别指标仍然低于常规警戒上限,该系统也将提前发出警告,表明该装置有可能出现催化剂活性下降或分配不均匀等问题。工业实践表明,该技术可使重要水泵(高温、高压原料泵等)的故障预告时间提前72 h,虚警率比常规门限值下降40%左右。

3.2 处置协同:开发情景嵌入的数字演练与应急平台

以情境嵌入为基础,以构建真实可信的流程数字化孪生模型为基础,实现与突发事件的深度融合。以实际生产过程中的管线和仪器为基础,采用Aspen HYSYS、AVEVA过程仿真等

方法,结合现场生产过程中的设备数据表和设备配置逻辑,构建能体现过程机制的复杂动力学模型。模式需要与PI系统等实时数据库进行连接,并采用数据融合等方法进行校正,以保证模式与实际电厂的运行状况保持一致。该模型针对离心压缩机喘振、固定床反应热点失控和精馏塔液面溢出等多种已被检验过的典型事故场景数据库。在系统发生报警或确定发生错误时,系统可以根据场景的不同情况,进行数字化演习^[5]。

在演习启动之后,根据现场真实工作状态,模拟事故的演变,预测5—15分钟的压力、温度等重要参量的演变规律和对其造成的级联影响。系统按照预先设定好的突发事件知识地图,将各阶段作业推荐表向相应的操作员工作站及手机终端进行实时更新。列表中详细说明了需要操纵的阀门位号,目标开启或设置的调整量。对于导热油管道泄漏场景,系统将按照紧急停炉、切换备用炉、防渗漏模块、启动氮气清洗等顺序推送命令,并配有运行确定键。现场各种指示、现场反馈(真实的阀门定位)和随后的过程状态等信息,都可以在控制中心的大屏幕上实时显示,为指挥员提供决策依据和决策依据。通过经常性的浸入训练,作业小组处理较多的疑难问题,可将紧急应变能力提升30%—50%。

3.3 知识沉淀:建立标准化故障案例库与自学习机制

建立标准化故障案例库是将个人的经验转化为组织资产,并使其能够自主学习。该案例库的架构需要按照ISO 14224《石油、石化和天然气工业设备可靠性和维护数据的收集与交换》中的数据模式原理进行设计,其中包括:失效的装置(按照KKS或者PBS编码),失效模式(如腐蚀,磨损,堵塞,短路),产生故障的根源(5 Why分析的结论),故障发生前后的全流程数据快照(至少包括故障发生前1小时到故障后处置结束的数据),触发的警报顺序,采取的诊断方法,采取的应急作业步骤,处理结果(隔离成功与否,停产时间)和事后的维护档案。在新的错误处理结束后,由该系统指导有关人员使用结构化表格进行个案输入。而自主学习的机理是基于实例的累积^[6]。

通过Apriori等关联规则的方法,通过对典型案例进行统计,找出故障模式、工艺工况和装备型号等因素间的内在联系。如对“原材料含硫量超过1.5 wt%时,阀门阀芯处的腐蚀速度与流体流动速度的平方成正比”这一认识就可以发现。将新发现的规律转换成辅助的特征,或作为早期预警的准则。更高层次的自主学习表现为处理战略的最佳化。在此基础上,基于增强学习的方法,对各个作业环节的有效性进行评价,实现对标准化作业流程(SOP)的不断优化。如通过对多个“反应炉飞温”的实例进行研究,可以得出“当温度超出临界值后,采用优选的激冷剂,逐级减小给料能量,可以使冷却时间平均缩短25%”的思路。从过去的经验中不断地吸取和改善,可以让完整的缺陷管理系统与设备的运作一起发展,从而降低了完全依

靠少量专业人员的经验。根据前期企业的实际情况，经过 3 年多的实际应用，已形成的一套基于三年多的成功失效溯源模型，可为同类失效的溯源分析提供 70%以上的借鉴，极大地提高了处理的效率和精度（如表 1 所示）。

表 1 标准化故障案例库关键要素与实施效能

核心要素	关键内容	实施效能
案例结构	按 ISO 14224 标准设计字段	实现经验资产化
学习方法	关联规则与强化学习结合	优化 SOP，提升处置效率
应用效果	积累超三年有效案例	相似案例参考率超 70%

参考文献：

[1] 连建奎.某化工过程自动化安全仪表系统设计与应用[J].生物化工,2025, 11(04):154-156+163.

[2] 刘闻天,肖博,李金辉.化工生产过程安全隐患识别与预防技术研究[J].化工管理,2025,(22):121-124.

[3] 范建宏,吴豪.基于 PLC 的化工过程液位自动化控制系统设计[J].信息记录材料,2023,24(09):124-126.

[4] 梁敏涛.PLC 自动化控制系统在化工行业生产过程中的应用[J].广西物理, 2023,44(01):68-70.

[5] 李益玲.PLC 技术在化工装置电气自动化控制中的应用[J].造纸装备及材料, 2023,52(02):90-92.

[6] 刘晓燕,翟德铭.化工安全生产中自动化控制的应用[J].化工设计通讯, 2022, 48(07):133-135.

4 结语

综上所述，研究化工过程自动化控制的故障诊断与应急处理策略，为我国先进的流程企业建立起坚实的数字化安全壁垒。安全生产是企业实现长期稳定运行的重要前提，也是保证人民群众生命安全，防范重大环境风险的重要手段。它的意义在于，把安全管理工作的关口前移，提高科技防治的准确性。随着工业互联网、人工智能和流程工程等领域的深入发展，工业互联网将为实现更智能的故障诊断、预警和应急响应提供新的思路。