

工业自动化控制系统中的故障诊断与容错设计

李晓华

山西经济管理干部学院 山西太原 030024

摘要: 在现代自动化系统中,快速准确地识别和响应故障,是提高生产效率的一个重要因素。本文通过对工业自动化控制系统故障诊断的机理和方法的研究,提出了基于模拟式故障检测和统计分析的故障检测方式,二者互补,使诊断结果具有更高的准确性,错误报警率得到大幅降低。通过对工业自动化控制系统中容错控制策略的分析,提出了基于专家系统的复杂且等级分明的递阶智能容错控制系统,该方法在发生故障时能够实现及时响应,保护系统基本功能或功能不被破坏,防止扩散、降低停机时间。

关键词: 故障检测;故障诊断;递阶容错控制

一、工业自动化控制系统概述

自动化控制系统能够最大程度保证工业生产安全稳定,提高生产效率,然而工业生产具有流程复杂以及具有一定的危险性等特点,自动化控制系统在运行的过程中不可避免会遇到故障。工业自动化控制系统故障诊断方法和容错控制对策的开展,对提高工业自动化控制系统可靠性和保证生产安全有很重要的研究价值。

根据工厂自动化控制系统的需要,其主要监控的对象就是煤气转换、压缩机群、催化剂转换器、净水过滤器模块、乙醇生成反应罐等重点部位,当这些设备处于最佳范围内稳定运行,这样就能够大幅提高产品的品质及有效提升制造的效果。要保证这些重点部位的稳定运行,就需要对其关键指标如温度、压强、流速、液位等持续地监视与调节,并对控制参数进行监管,以保证变换反应的顺利进行。

二、工业自动化控制系统故障诊断

(一) 故障诊断基础理论

1. 故障类型与模式

工业自动化控制系统可能遭遇多种异常情况,主要分为设备故障、程序异常和信号传输中断三大类。故障的原因:设备故障是由于检测器件故障、驱动器件故障、线路过载等原因引起;程序错误的原因:编码错误、系统崩溃、病毒入侵等原因。协议兼容问题常引发的网络波动以及网络波动引起的通讯故障,常在实际过程中以

各种形式的症结表现,如数据参数非正常、传输数据的失真、运行长时间的延长甚至系统性故障等等。因而,要实现对系统的有效管理,首先必须准确地辨识各种故障的表征以及内在联系。

2. 故障机理分析

首先是故障成因及发展的机理分析,故障机理分析是这一块包含了物理学、化学、电子工程等内容。比如传感器故障可能是物质老化、外界影响、测量误差累积造成的;执行器故障可能是机械损伤、电气异常、错误控制策略造成的。这种问题的剖析建立出故障和系统状态联系关系,为后续的故障识别奠定扎实基础。

3. 数据采集与处理

数据采集是故障诊断的第一步,即对系统不同层次上的各种状态指标、动作数据以及参数等信息进行采集。系统信息的采集在工厂自动化管理中通常采用传感器、动作部件、控制器等装置对系统进行信息获取,然后再对数据进行预处理。如去噪、降维、校验、标准等,以剔除其中异常点和噪声。

4. 信号处理与特征提取

故障诊断的核心环节在于信号处理和特征识别。借助数据采集后的计算与解析过程,可以提取出设备运行异常的关键参数指标。在工业控制系统中,常用的信号处理技术主要包括波形特征分析、频域特性研究以及时频联合解析等多元化方法。时间域方法主要是观察信号在时间上的变化特点(如均值、均方值、最大值)进行分析;运用傅里叶变换将信号变换后进行频率的分析和观察,主要在频率域进行分析;时频域方法集二者方法的优点于一身,对信号从时间及频谱上都有一定的观察;

作者简介: 李晓华(1981.08-),女,汉族,山西吕梁,讲师,研究生,工学硕士学位,研究方向:电子信息技术及仪器专业。

主要目的是提取经过预处理后的信号中反映故障状态的关键信息作为下一步故障辨识过程的参考。

(二) 常见故障诊断方法

1. 基于模型的故障诊断技术

①首先需要建立整体数学模型，工业自动化管理系统当中，往往包括物理模型、数学模型及状态空间表述等。物理模型用于对系统所处的物理环境和系统的物理特性以及系统的行为特性进行描述。系统变量之间的联系是通过数学方程表示的；而描述系统动态响应的状态变量则是利用状态方程和输出方程的状态空间来描述的。所以，需要为后续的故障检测建立较为精确的数学模型，并对此模型进行物理本质上的认知。

②在构建系统的数学模型时，要对其故障信息进行提取，即其表现出来系统状态量、输出量变化或异常因素等。所谓“异常因素”，指现实的输出与预测的输出偏差，用于监视系统的异常状态。分析研究该“异常因素”，便能揭示该系统故障的关键特征。

③以模型为基础的故障诊断技术目的是为了对故障进行诊断并定位它的发生位置。获取了系统中的故障特征，采用它们进行故障的确认和诊断，这通常是一个包含故障特征的归类、聚类 and 识别过程，通过与已知故障模式的相似度大小就可以确定故障的类型及其位置；也可采用故障图表分析法、故障模式影响分析等深入的确定故障位置的分析方法。

2. 统计方法

①基础步骤的参数估计与假设检验是统计方法的关键所在。通过对历史数据的统计，可以求得系统参数，如均值、方差以及相关度等。然后通过这些参数进行假设检验，判定实际系统的状况是否满足预定值，如果在实际运行中显著不符合，则很可能意味着系统出现故障。

②时序数据处理的关键价值体现在其实际应用层面。在工业自动化领域，这类数据主要包括机械装备的运行日志、监测装置采集的数值等信息。通过这种分析方法，不仅能够掌握数据随时间的演变趋势，还能有效识别出异常状况。常用的时间序列分析方法主要有自回归模型、滑动平均模型、自回归滑动平均模型等，可以用于故障检测中发现系统周期性变化趋势、趋势性变化、随机性的波动等特性。

③SPC，对生产过程的品质进行控制的管理方法，是在生产作业自动化环境中，为处理生产过程中可能出现的任何问题或偏差而设计出的一套方法，包括建立控制图、评价过程能力及提供建议等环节。通过对控制图

的观察来了解产品的变异性，及时发现存在的问题；对过程能力的评价则是了解过程是否达到所设定的标准，从而判断出还需要采取措施加以改善的环节。根据SPC提供的改善意见有针对性地采取一些改进措施，以提高生产效率，达到提高系统稳定性和可靠性的目的。

3. 知识驱动方法

①专家系统是一种模仿专业技术人员决策过程的智能化平台。在工业自动化控制领域，这类系统能够处理传统数学模型难以解析的异常状况。其核心组件通常包含知识存储模块、逻辑推演引擎以及人机交互界面等关键部分。

知识库是作为知识类领域的数据库，保存了大量的学者研究经验，从而为后续的研究提供了一定的根基。基于知识库推理引擎是运用逻辑的计算和规则的匹配进行问题的辨识，得出具有专业知识性质的决断。该专家系统融入了具有专业的行业专家认识结构以及他们的相关经验数据，大大提高检测故障的效率以及准确性，其工作流程包含了从知识存储、问题解决的一整套完善循环流程保证了诊断的高效以及专业性。

②在专家系统中，规则推理和案例推理是两种常用的推理方法。规则推理以预先设置的规则为基础开展推理诊断，其主要规则是对系统故障和症状的相关关系进行描述。根据当前的症状进行匹配，结合规则库对系统中存在的潜在问题进行推测。利用历史案例进行推理分析是案例推理的前提，工业自控系统中有历史故障案例，可以将这些案例保存到案例库中，当出现了新的故障时，可以将故障与案例库中的案例进行匹配，找到相同的解决案例。

4. 故障诊断设计

本部分的任务主要通过非正常情况，也就是出现的问题系统通过合理的科学手段实施系统的问题发现、定位及识别工作，是工业自动化的重要部分。基于这个基本理论，在这一理论下首先进行故障种类及模式的研究工作，故障可以由硬件、软件以及人为操作不当等多种因素所致；其次对故障分析，这是决定故障出现原因的主要步骤，即物理或者逻辑基础，这一步主要利用传感器网络实时取得的系统运行信息作为系统分析工作的数据基础。信号处理以及特征提取技术主要是从嘈杂的信号中提取出显著特征，比如频率以及幅度等，可以用作故障诊断依据的量化指标。基于模型的思路主要是为建立系统的数学模型，然后比较实际与预期之间的差异，判断是否出现问题；基于统计技术主要是利用以往的经验对算法进行训练，从而寻找出不正常的行为；基于知

识驱动的方法则是将专家经验以及规则集进行结合，实现智能诊断。

模拟式故障检测方法需要基于系统的正确并且精确的时变行为，以便即时监测真实输出之间的差异大小并及时判断故障类型和故障位置。该方法优势是可准确地模拟系统的真实特性并发现系统中各种复杂的非线性相互作用，可以很好地应用于系统故障早期诊断。结合机器学习算法和统计学技术利用以往故障的经验结果建立分类器，从而对新故障类型有更好的适应性，两层次结构使诊断结果具有更高的准确性，错误报警率得到大幅降低。

三、工业自动化控制系统容错控制策略

(一) 容错控制的主要方法

采用故障容错技术需要其他很多技术的支持，最常见的3项技术包括：通过硬拷贝冗余、通过软拷贝冗余以及二者结合使用来实现最佳效果。硬拷贝冗余是通过使用额外物理装置（传感器或执行器等）代替关键装置或系统而实现，其可保证系统的可靠工作并避开故障发生。当然这种方法简单直观但成本高且系统的复杂性也较高且维护更为困难。

(二) 容错控制策略设计

1. 突发性故障与隐性故障的区分

工业自动化控制的容错策略的制定首先要对故障进行准确的定义，特别是瞬态故障以及隐性故障。对于瞬态故障，如机械系统突然损坏，电源突然断电等情况需要系统的做出快速反映及时予以恢复。尽管危险故障是由于长期磨损、老化或是缺陷造成的，并且其成长过程缓慢，但是在发生时造成的后果比较严重。在出现故障的时候要根据不同的故障做出处理的方法，例如对突发性故障，可以进行实时监控，并且快速作出调整；对于潜在的缺陷故障，可通过经常的检查、设备的状态测试和预警式维修等方法在故障出现之前发现并处理好。

2. 递阶智能容错控制系统设计

阶梯型智能故障免疫系统的思路就是将该系统划分为多个层次，每个层次就可以完成不同层级的故障检测、故障诊断与故障控制。在工业自动化控制系统中，可以更好的解决一些复杂性问题。低层解决的主要是基础故障判断与隔离问题，例如分析传感器故障并能迅速定位。高层负责定义故障类型、评估故障对体系的冲击度，判断故障的类型与程度对体系冲击深度；底层负责设计/执行总策略，根据中层的结果选择具体的维修策略（点修复）、体系重构或者紧急停车等措施。这种分层化的结构既可以提高体系应对故障的能力、增强体系的适应能力

与扩充能力，也可以根据不同体系的故障做出智能化、合理的决策。

复杂且等级分明的递阶智能容错控制系统设计和实施是实现机械设备智能化自我调节维修的核心。将传统的控制过程和智能控制有机组合，加强智能调节和自修复能力，提高系统稳定性。递阶智能容错控制系统设计是运用理解并仿制被控制对象，结合数字化副本（机械运动规律、电磁特征、扰动因素等），加上以往经验以及专业性的知识库，预测传感器偏差、执行机构阻塞、通讯误差等可能出现的故障及其可能对系统的影响程度。

在进行组织层级划分时采取由下到上的分级方式，其中最低层为用PLC/或PAC实现现场设备级的诊断检测（如限界点监视），中间层采用基于规则的推理式故障诊断组件（如模糊逻辑分类器），最上层采用自动调节、自动补偿式控制器（如采用神经网络修正器），形成自监视、自判断、自决定、自执行的循环。对容错算法设计时，通过在线学习算法实现对智能容错算法的功能，比如采用强化学习的方法训练故障处理策略库，可使得系统可根据故障的发展情况及时更改容错参数和补偿参数，并使其为最优状态。还需要人工干预选项，以应对特殊情况，对于方法设计完毕后，采用硬件在环测试其稳定性以及抗干扰情况，虚拟场景下注入各类复杂的故障以评估容错的响应速度和正确率，确保在实际使用的情况下满足ISO13849-1标准的安全完整性等级。

结束语

对工业自动化控制系统故障诊断、容错管理策略的研究对于产品质量和工作效率具有重要的意义。通过对各种故障及原理的进一步剖析，结合最新的故障诊断技术及诊断工具，可以实现故障的有效发现并准确判定，设计与实施容错管理策略在发生故障时能够实现及时响应，保护系统基本功能或功能不被破坏，防止扩散、降低停机时间。

参考文献

- [1] 于清刚. 西门子控制系统在工业水处理系统中的应用[J]. 自动化应用, 2024, 65(5): 55-57.
- [2] 柳训鲲. 工业仪表及自动化控制系统常见故障原因分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(15): 25-27.
- [3] 王旭元, 张占庭. 工业系统锅炉安全改造与PLC自控设计[J]. 内蒙古石油化工, 2022, 48(4): 1-4; 22.