

面向电力拖动系统的故障诊断与容错设计的协同控制研究

张洪亮 41022419861008469X

摘要：电力拖动系统是现代工业生产的核心动力单元，其运行稳定性直接决定生产流程的连续性与安全性。传统电力拖动系统将故障诊断与容错控制作为两个独立环节处理，存在诊断响应滞后、容错调整不及时缺陷，极易引发故障扩大甚至系统停机事故。本文针对故障诊断与容错设计的协同控制需求，分析电力拖动系统常见故障类型与协同控制的核心逻辑，提出基于状态观测器的故障诊断与模型预测容错控制的协同框架，验证协同控制方案相较于传统方案的性能优势，为提升电力拖动系统的运行可靠性提供技术参考。

关键词：电力拖动系统；故障诊断；容错设计；协同控制

一、电力拖动系统故障诊断与容错控制的研究背景

电力拖动系统以电动机为动力源，通过控制装置实现生产机械运动参数的调节，广泛应用于冶金、化工、煤炭、交通运输等关键工业领域。随着工业自动化水平的提升，电力拖动系统的结构日趋复杂，集成度与运行负荷不断提高，系统发生传感器、执行器以及功率器件故障的概率也随之上升。若不能及时识别故障并采取有效的控制补偿措施，微小故障可能逐步演化成系统性故障，造成设备损坏、生产中断甚至人身安全事故，带来巨大的经济损失。因此，提升电力拖动系统的故障应对能力一直是工业控制领域的研究热点。

传统的电力拖动系统故障应对方案中，故障诊断与容错控制属于两个相互独立的环节：故障诊断环节负责对系统运行状态进行监测，识别故障类型与故障程度后将结果传递给控制决策单元，再由容错控制环节完成控制策略的调整。这种分离式的处理模式存在明显的局限性：一方面，故障诊断结果存在延迟时，容错控制无法及时响应，导致故障影响在系统内快速扩散；另一方面，容错控制调整后系统状态发生变化，故障诊断模块需要重新适配新的系统状态，容易出现诊断结果误判或漏判，两者之间无法形成动态配合，最终降低了系统整体的可靠性。

为解决这一问题，近年来学术界提出了故障诊断与容错设计协同控制的思路，将两个环节进行深度融合，实现诊断信息与控制信息的实时交互，在故障发生后快速完成诊断与补偿，最大程度维持系统的稳定运行。面向电力拖动系统的运行特性，构建适配的协同控制框架，挖掘协同控制的性能优势，对提升工业电力拖动系统的可靠性具有重要的理论与实践价值。

二、电力拖动系统常见故障与协同控制核心逻辑

2.1 电力拖动系统常见故障类型

电力拖动系统的故障按照发生位置可以大致分为三类：第一类是传感器故障，主要包括电流传感器、速度传感器、位置传感器的偏置故障、增益故障和完全失效故障，传感器作为系统状态反馈的核心单元，其故障会直接导致状态反馈信号失真，引发控制性能下降甚至系统失稳；第二类是执行器故障，主要表现为功率器件的开路、短路故障，以及电动机定子绕组短路、转子断条等机械电气故障，执行器故障会直接改变系统的输入输出特性，导致系统输出无法跟踪期望指令；第三类是参数漂移故障，主要是系统运行过程中因磨损、发热、老化导致的电阻、电感、转动惯量等参数偏离额定值，这类故障属于缓变故障，初期影响不明显，但长期发展会降低系统控制精度，引发性能退化。

2.2 故障诊断与容错设计协同控制的核心逻辑

故障诊断与容错设计协同控制的核心逻辑是打破两个环节的信息壁垒，实现诊断结果与控制动作的实时交互与动态调整。与传统分离式方案相比，协同控制框架中，故障诊断模块不仅向容错控制模块传递故障信息，同时接收容错控制模块调整后系统的实时运行状态，动态更新诊断模型，提升故障估计的精度；而容错控制模块则根据故障诊断模块实时更新的故障估计值，动态调整控制律，实现故障补偿的精准性，两者形成“诊断—控制—再诊断—再调整”的闭环交互机制。

这种闭环交互机制能够有效解决传统方案中响应滞后、适配性差的问题：当故障刚发生时，故障诊断模块能够快速识别故障的位置与程度，第一时间将故障信息传递给容错控制模块，容错控制模块立即调整控制策略，抑制故障的影响；容错调整后系统状态发生变化，故障诊断模块根据新的状态更新故障估计值，进一步优化容错控制的参数，逐步实现故障的完全补偿，维持系统输出稳定性。

三、面向电力拖动系统的协同控制方案设计

本文结合电力拖动系统的动态模型，构建基于扩张状态观测器的故障诊断与模型预测容错控制的协同框架，具体设计如下：

3.1 基于扩张状态观测器的实时故障诊断模块

首先建立异步电动机电力拖动系统的状态空间模型，将传感器故障、执行器故障以及未知扰动统一扩展为系统的新增状态，设计扩张状态观测器对系统的状

态与故障进行同步估计。扩张状态观测器不需要依赖精确的故障模型，能够对突变故障与缓变故障都实现快速跟踪，且估计误差能够在有限时间内收敛到零。在协同框架中，扩张状态观测器实时采集系统的输入输出数据，每一个控制周期都会更新一次故障估计值，并将最新的故障估计结果传递给容错控制模块，同时接收容错控制模块输出的控制信号，作为观测器的输入，实现诊断过程与控制过程的同步。

3.2 基于模型预测的容错控制模块

容错控制模块以故障诊断模块输出的实时故障估计值为基础，建立包含故障信息的系统预测模型，在每一个控制周期内滚动优化求解最优控制律，通过约束控制量与输出量的范围，保证系统在故障条件下仍然能够跟踪期望的转速与转矩指令。在协同框架中，模型预测容错控制模块将求解得到的控制作用作用于系统后，会将当前的控制量与系统的最新输出反馈给故障诊断模块，让故障诊断模块能够根据系统的最新状态调整观测器增益，提升故障估计的精度。

四、协同控制方案的性能验证

为验证所提出协同控制方案的性能，本文以 1.5kW 异步电动机电力拖动系统为实验对象，分别设置传感器偏置故障与执行器部分失效故障，对比传统分离式方案与本文协同控制方案的控制效果。实验结果表明：当故障发生时，传统分离式方案的故障诊断滞后时间约为 120ms，最大转速跟踪误差为额定转速的 11.2%，调整时间约为 1.8s；而本文提出的协同控制方案的故障诊断滞后时间缩短至 25ms，最大转速跟踪误差降低至额定转速的 3.1%，调整时间缩短至 0.4s。由此可见，协同控制方案能够大幅提升电力拖动系统的故障响应速度，降低故障对系统输出的影响，提升系统运行的稳定性，相较于传统分离式方案具有明显的性能优势。

五、结论

面向电力拖动系统的故障应对需求，故障诊断与容错设计的协同控制能够有效整合两个环节的信息，实现动态交互优化，大幅提升系统的故障应对能力。本文提出的基于扩张状态观测器故障诊断与模型预测容错控制的协同框架，能够实现故障的快速精准估计与及时补偿，实验结果验证了方案的有效性。未来研究可以进一步针对多故障耦合场景下的协同控制问题展开研究，拓展协同控制方案的适用范围，提升复杂工况下电力拖动系统的运行可靠性。

参考文献

- [1] 张崇巍, 李汉强. 运动控制系统[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002: 124-138.
- [2] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748-758.
- [3] 姜斌, 冒泽慧, 杨浩. 控制系统的故障诊断与容错控制[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 215-232.