

汽轮机转速变送器故障下的容错控制策略设计与验证

高峰

国家电力投资集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂, 贵州 纳雍 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2026020014

摘 要 : 汽轮机身为电力生产以及工业驱动范畴内的核心动力装置, 转速属于保障其安全平稳运转的关键参量, 转速变送器则是转速信号采集和传送的核心组件。本文实施汽轮机转速变送器故障状况下的容错控制策略探究。首先整理转速变送器的典型故障类别及特征, 搭建基于信号特征剖析的故障诊断机制; 在此根基之上, 设计融合冗余配置与自适应补偿的复合容错控制策略, 借助“三取二”冗余表决排除单点故障干扰, 联合自适应观测器达成故障状态下的转速估算与控制补偿; 最终通过半物理仿真和现场工况模拟验证策略的有效性。研究成果显示, 所设计的容错控制策略可迅速辨别变送器故障类别, 在故障工况之中能维持机组转速稳定, 规避系统失控, 为汽轮机的安全可靠运转提供技术支持。

关 键 词 : 汽轮机; 转速变送器; 故障诊断; 容错控制; 冗余配置

Design and Verification of Fault-tolerant Control Strategy for Turbine Speed Transmitter

Gao Feng

Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Nayong Power Plant, Nayong, Guizhou 553303

Abstract : As a core power plant in electricity generation and industrial drive systems, steam turbine speed serves as a critical parameter for ensuring safe and stable operation. The speed transmitter acts as the central component for collecting and transmitting speed signals. This study investigates fault-tolerant control strategies for steam turbine speed transmitters under fault conditions. First, it categorizes typical transmitter faults and their characteristics, establishing a fault diagnosis mechanism based on signal feature analysis. Building upon this foundation, a composite fault-tolerant control strategy integrating redundancy configuration and adaptive compensation is designed. Utilizing a "three-out-of-two" redundancy voting mechanism to eliminate single-point failures, combined with adaptive observers, the strategy achieves speed estimation and control compensation during fault states. The effectiveness of the strategy is validated through semi-physical simulation and field condition modeling. Research findings demonstrate that the proposed fault-tolerant control strategy can rapidly identify transmitter fault categories, maintain stable turbine speed under fault conditions, prevent system instability, and provide technical support for the safe and reliable operation of steam turbines.

Keywords : steam turbine; speed transmitter; fault diagnosis; fault-tolerant control; redundant configuration

引言

汽轮机作为能量转换的核心装置, 广泛应用于火力发电、核能发电以及大型工业生产领域, 其运转稳定性直接关联到整个生产系统的安全和效益。转速作为汽轮机运行状态的核心表征参量, 不仅决定着机组的发电效率, 更是保障机组不出现超速飞车等恶性事故的关键监控指标。转速变送器承担着将汽轮机转子的机械转速转化为电信号并传送至控制系统的任务, 是转速闭环控制与安全保护系统的“感知器官”^[1]。然而, 汽轮机运行环境严苛, 长期处于高温、高压、强电磁干扰和持续振动的工况之下, 转速变送器极易出现各类故障, 造成转速信号异常。倘若控制系统无法有效应对这类故障, 可能引发调速阀误调节、保护系统拒动或误动等状况, 严重时会造成机组停机、设备损坏甚至人员伤亡。目前, 常规的故障处理方式多依靠停机检修, 不仅对生产连续性产生影响, 而且难以应对突发性故障。因此, 设计一套能够实时识别转速变送器故障并自动实现容错控制的策略, 对提升汽轮机运行的可靠性和安全性具有重要现实意义。

一、汽轮机转速变送器典型故障分析

（一）信号传输异常故障

信号传输异常是现场最为常见的故障类别，主要源自变送器与控制系统之间的连接线路问题。由于汽轮机运行过程中存在持续振动，接线端子容易出现松动、氧化等接触不良现象，致使转速信号间歇性中断或波动；若线路长期处于高温环境之中，绝缘层容易老化破损，引发线路短路或断路，使转速信号完全丢失或出现严重失真。这类故障的典型表现为：控制系统接收的转速信号频繁跳动，或突然固定为某一恒定数值，与机组实际运行状态不相符；当振动加剧或环境温度变化时，故障现象会更为显著^[2]。

（二）传感器本体失效故障状况

传感器本体出现失效情形，主要是因内部元件产生老化现象、发生损坏问题或者出现安装偏差状况所造成。对于磁电式转速变送器而言，其内部线圈在经历长期工作之后，存在出现断路情况或者短路问题的可能性，这会使得装置无法对转子的转速变化进行感应操作，进而让输出信号的幅值趋向于零数值；光电式变送器的发光二极管元件或者光敏三极管元件一旦发生损坏情况，便会造成转速信号产生无输出的现象；除此之外，在对传感器进行安装操作时，若与转子之间的间隙调整未达恰当状态，或者安装位置出现偏差情况，将会致使感应信号出现减弱现象，进而产生转速测量偏差过大的问题。此类故障所呈现出的特征较为稳定，大多表现为信号处于持续异常的状态，且不受外界工况波动情况的影响，仅仅依靠线路检查工作无法将故障排除^[3]。

（三）环境干扰类故障情形

汽轮机所处的周围环境存在强电磁状况，像发电机、电动机等设备在运行过程中所产生的电磁辐射，会对转速变送器的信号传输工作造成干扰影响。此类故障并非由于变送器或者线路出现物理损坏问题所导致，而是电磁干扰作用叠加在正常转速信号之上，使得输出信号中出现杂波成分，进而导致控制系统所接收的转速数值产生波动现象。与其他类型的故障相比较，环境干扰类故障的表现具有随机性特点，当干扰源停止工作运行或者机组负荷进行调整操作时，信号波动情况有可能会暂时得到缓解，这就给故障诊断工作带来了一定程度的难度^[4]。

二、容错控制策略的设计内容

（一）故障诊断机制的构建工作

故障诊断环节是容错控制工作的前提条件，需要实现对故障的实时识别操作以及准确定位工作。本文采用基于信号特征分析与冗余校验工作相结合的诊断方法，具体的实现方式如下所示：其一为信号特征提取工作，通过控制系统对转速变送器输出信号的幅值参数、频率参数以及稳定性参数进行实时采集操作，设定正常信号的特征阈值范围，当信号参数超出阈值范围时，触发故障预警机制；其二为冗余信号校验工作，借助“三取二”冗余配置的转速变送器对三路转速信号进行采集工作，通过对三路信号的一致性进行对比分析来实现故障判断工作。若其中一路

信号与另外两路信号之间的偏差过大，并且这种偏差状态持续的时间超过设定阈值，则判定该路变送器存在故障问题；若三路信号均出现异常波动情况，但波动趋势呈现出一致性，则优先判定为环境干扰类故障问题。通过这种双重诊断机制，能够有效区分不同类型的故障，为后续的容错控制工作提供准确的依据支撑^[5]。

（二）冗余容错及信号重构举措

针对信号传送异常状况、传感器本身失效这类确定性故障情形，运用冗余布置和信号重构相融合的容错手段。于硬件配置层面，采用三套独立的转速变送器对同一转子的转速信号实施采集操作，三套变送器的安装地点相互独立分开，防止由于局部振动现象或者温度异常情况而造成多套同时失效后果。在信号处理方面，依据“三取二”的表决逻辑原理对三套信号开展筛选工作：当三套信号均处于正常状态时，选取三套信号的平均数作为控制输入信号，以此提升测量精准程度；当判断某一套信号出现故障问题时，自动去除故障信号，采用另外两套正常信号的平均数作为输入内容；若两套信号发生故障情况，则启动预先设置的备用信号重构策略规划，借助机组其他相关参数数据（像蒸汽流量数值、进汽压力数值、机组振动数值）和转速之间的关联联系，初步估算转速数值，保证控制信号不会中断停止。

（三）自适应补偿控制算法构思

针对环境干扰类故障问题以及冗余信号不足情况下的转速估计偏差状况，设计自适应补偿控制算法内容。该算法以汽轮机的运行机理模型为基础依据，通过实时收集进汽阀开度大小、蒸汽压力数值、机组负荷情况等可观测参数信息，构建转速自适应观测装置。当转速变送器信号出现轻微波动现象或者重构信号存在偏差问题时，观测装置根据当前机组运行状态情形，实时修改转速估计数值；同时，按照故障诊断结果情况调整控制参数的权重比例，增强控制系统对信号波动的抗干扰能力水平。比如，当检测到环境电磁干扰现象时，自动加大转速反馈信号的滤波系数数值，减弱杂波产生的影响效果；当采用重构信号进行控制操作时，适当提高控制算法的鲁棒性参数数值，避免因估计偏差问题而导致调速阀过度调节情况。通过这种自适应调整方式，确保在故障工况条件下，转速控制的稳定性和准确性程度。

（四）容错控制逻辑整合工作

将故障诊断环节、冗余表决过程、信号重构操作与自适应补偿功能整合到汽轮机控制系统当中，构建完整的容错控制逻辑体系。控制逻辑的运行流程如下所示：首先，实时收集三套转速信号以及机组相关运行参数信息；其次，通过故障诊断机制判断转速变送器工作状态情况；若未检测到故障问题，则采用正常信号开展常规控制操作；若检测到故障问题，则根据故障类型启动对应的容错策略方案，完成故障信号去除、有效信号筛选或者信号重构工作；最后，通过自适应补偿算法修改控制信号，驱动调速执行机构产生动作，实现转速的稳定控制目标。同时，在控制逻辑当中设置故障报警功能模块，当检测到故障情况时，及时向操作人员发出报警提示信息，并记录故障发生时间节点、故障类型等相关信息内容，为后续检修工作提供依据支持。

三、容错控制策略验证

（一）验证平台搭建

半物理仿真平台由汽轮机仿真模型构建的参数载体、转速变送器模拟模块形成的信号发生体、故障注入模块组成的故障施加体及实际控制系统构成的逻辑载体组合而成。其中，汽轮机仿真模型以现场机组的运行参数作为基础框架，能够对不同负荷条件下的转速变化特征进行动态复现；转速变送器模拟模块可针对磁电式能量转换装置、光电式信号传输设备等不同原理的变送器输出形态实施信号仿真；故障注入模块通过软件指令编程与硬件开关组件的协同控制，能够对信号传输路径中的断路现象、接触节点的不良状态、电磁环境的干扰效应等典型故障类型开展场景构建；实际控制系统选用现场普遍应用的分散控制系统（DCS）作为逻辑载体，将预先设计的容错控制策略嵌入系统内核，以此保障验证结论与工程实践的一致性关联。

（二）故障模拟与验证过程

基于现场设备运行中的常见故障类型，规划设计三组验证性试验项目，分别针对信号传输链路的断路故障、连接节点的接触不良故障以及电磁环境的干扰故障开展模拟验证。第一组试验以单路转速变送器的信号断路故障作为模拟对象。在机组保持额定转速的稳定运行工况下，通过故障注入模块对某一路变送器的输出信号实施切断操作。在此工况下，容错控制逻辑应当对该路信号的异常状态进行快速捕捉，自动执行故障信号的剔除程序，并切换至另外两路正常信号实施控制策略。验证工作的重点在于监测故障诊断环节的响应时长、转速参数的波动范围以及控制系统的调节过程，确保在故障发生后，转速指标不出现显著偏移，维持在额定范围的合理区间。第二组试验针对接触不良故障开展模拟验证，通过故障注入模块对接线端子的通断频率进行控制调节，构建信号传输的间歇性中断场景。在验证过程中，需要观察容错控制逻辑对间歇性故障的识别精准度，排查是否存在误报警现象或正常信号的误剔除情况；同时，对转速信号的波动幅度以及调速阀的动作特性进行检测分析，确保控制系统能够通过信号滤波算法与冗余校验机制，实现转速参数的稳定维持。第三组试

验以电磁干扰故障作为模拟目标，通过故障注入模块向转速信号中叠加随机杂波成分，复现现场电磁环境的干扰效应。验证工作的核心在于观察自适应补偿算法的实际作用效果，判断在滤波系数调整后，信号波动是否得到有效抑制，转速控制的精度指标是否满足工程应用的规范要求。

（三）验证结果剖析

试验成果显示，所构思的容错控制策略能够精确辨别各类转速变送器故障，故障诊断回应及时，无显著误判或漏判状况。于单路信号断路故障情形中，系统可迅速剔除故障信号，借助冗余信号达成稳定控制，转速波动微弱，未形成调速阀过度调节的局面；在接触不良故障状况下，通过信号稳定性判别与冗余校验，有效防范了间歇性信号对控制系统的作用，转速保持稳定；在电磁干扰故障状况下，自适应补偿算法经由调整滤波系数，大幅削弱了杂波干扰，保障了转速控制精度。除此之外，策略的集成逻辑简明清晰，与现有控制系统兼容性优良，无需对机组原有控制架构实施大幅改造，具备较强的工程实用特性。

四、结论

本文针对汽轮机转速变送器在恶劣运行环境中的常见故障，设计了一套融合故障诊断、冗余容错与自适应补偿的复合容错控制策略。通过梳理转速变送器的三类典型故障特征，搭建了信号特征分析与冗余校验相联合的故障诊断机制，实现了对故障的精确辨别与定位；基于“三取二”冗余配置设计了信号重构规划，保障故障状态下控制信号的持续性；通过自适应补偿算法的构思，增强了系统对干扰与估计偏差的抗干扰能力。半物理仿真与工况模拟验证成果表明，该策略能够有效应对各类转速变送器故障，维系机组转速稳定，且具备良好的工程兼容特性。未来的研究方向可围绕两个方面铺展：一是进一步优化故障诊断算法，结合人工智能技术提升对复杂多故障叠加场景的诊断能力；二是拓展容错控制的适用范畴，将转速变送器容错控制与机组其他关键参数的容错控制相联合，搭建全参数覆盖的容错控制体系，进一步提升汽轮机运行的可靠程度与安全程度。

参考文献

- [1] 冯佩. 火电厂 DEH 控制系统汽轮机转速精准调节技术改进 [J]. 仪器仪表用户, 2025, 32 (12): 33-35.
- [2] 杜沫. 基于模糊 PID 的核电厂汽轮机转速抗扰动控制方法 [J]. 自动化应用, 2025, 66 (21): 235-237+241.
- [3] 邹毅, 肖丽. 汽轮机转速测量误差分析 [J]. 冶金设备, 2025, (03): 111-114.
- [4] 杨鹏燕, 张庆, 赵林涛, 田渭蓉, 洪杨. 基于西门子高速计数模块 FM350-1 的汽轮机转速测量方法的研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2023, (06): 121-124.
- [5] 张荣彬, 郭永飞. 船用汽轮机转速线性自抗扰控制研究 [J]. 仪器仪表用户, 2023, 30 (11): 45-49.