

高可靠性电气及其自动化的故障诊断与容错控制

熊志伟

江西省人力资源有限公司（江西科能工程建设咨询监理有限公司），江西南昌，330000；

摘要：工业 4.0 推动下，电气及其自动化系统成为关键工业领域的核心支撑，其可靠性直接决定生产连续性。复杂运行环境、设备老化及负载波动等问题，易引发系统故障并造成生产中断，因此故障诊断与容错控制技术备受关注。本文以高可靠性系统为研究对象，剖析故障诱因与传播规律。通过融合先进传感技术与智能算法，构建高效故障诊断体系，实现故障早期识别与定位。在此基础上设计适配性容错控制策略，结合冗余配置与动态调节，降低故障影响并维持核心功能。研究成果可为提升系统运行稳定性提供理论参考，助力工业生产安全高效发展。

关键词：电气及其自动化系统；高可靠性；故障诊断；容错控制；智能算法

DOI：10.69979/3029-2727.25.11.100

引言

电力电子与计算机控制技术的发展，让电气及其自动化系统广泛应用于能源、制造等关键领域。系统可靠性直接关系生产安全与经济效益，故障不仅会导致生产停滞，还可能引发安全事故。当前系统规模扩大、功能集成化，使故障模式更复杂，传统诊断与控制方法已无法满足高可靠性需求。快速诊断故障、精准定位问题，通过容错控制保障故障工况下系统持续运行，成为行业亟待解决的问题。本文围绕高可靠性系统的故障诊断与容错控制展开研究，探索适配现代系统的技术路径，为提升系统可靠性提供支撑。

1 高可靠性电气及其自动化的运行特性与故障机理

1.1 系统核心构成与运行要求

高可靠性电气及其自动化的核心构成包含主控制器、执行机构、传感单元、功率变换模块等关键组件。主控制器作为系统“大脑”，负责指令运算与逻辑判断；执行机构承接控制信号完成具体操作；传感单元实时采集运行参数，为控制决策提供依据。系统运行需满足多方面要求，在连续生产场景中要保持 7×24 小时稳定运行，负载波动时输出参数偏差控制在允许范围，在高温、高湿等恶劣环境下仍需维持低故障率。各组件并非独立工作，其协同配合程度直接影响系统整体可靠性，某一组件性能衰减可能引发连锁反应，因此组件间的兼容性与协同性设计至关重要。

1.2 故障类型与诱发因素

按故障发生位置，系统故障可分为控制器故障、传

感器故障、执行器故障及传输链路故障等类型。控制器故障常表现为指令输出异常，传感器故障多体现为数据采集失真，执行器故障则导致动作响应滞后或失效。故障诱发因素分为内部与外部两类，内部因素主要是设备长期运行后的老化损耗，如电容容量衰减、机械部件磨损等，元件质量缺陷也会增加故障风险。外部因素中，电磁干扰会干扰信号传输，环境温湿度剧烈变化会影响元件性能，电压波动则可能冲击功率模块。不同故障类型有典型特征，如传感器故障时数据波动无规律，执行器故障常伴随异常噪音，这些特征为故障诊断提供了依据。

1.3 故障传播与影响机制

故障在电气及其自动化系统中存在特定传播路径，通常从初始故障点向关联组件扩散。例如传感器故障会导致错误数据传入控制器，使控制器输出错误指令，进而引发执行器异常，形成“传感器-控制器-执行器”的传播链。系统中的关键节点对故障传播起重要作用，如数据校验模块可抑制错误信号传递，而缺乏保护机制的链路会加速故障扩散。故障影响从局部逐渐蔓延至整体，初始阶段可能仅表现为某参数偏差，随故障发展会导致系统功能下降，最终引发停机。故障对系统运行精度影响显著，使产品质量波动；降低响应速度，影响生产效率；严重时还会破坏设备，引发安全事故，威胁人员与财产安全。

2 高可靠性电气及其自动化的故障诊断技术体系

2.1 故障信号采集与预处理

故障信号的有效采集是诊断工作的基础，需构建多

维度传感网络覆盖系统关键部位。针对电流、电压、温度、振动等不同参数，选用适配的传感设备，如电流互感器、热电偶、振动传感器等，实现实时数据采集。采集过程中易受电磁干扰、环境噪声影响，导致信号失真，因此需进行预处理。常用预处理方法包括滤波、去噪与归一化，滤波可剔除高频干扰信号，去噪通过平滑处理减少随机噪声影响，归一化则将不同量级参数统一标准，提升信号辨识度。同时优化传感节点布局，避免信号盲区，在故障高发区域增加节点密度，确保采集数据的全面性与准确性，为后续诊断提供可靠依据。

2.2 智能诊断算法设计与应用

智能算法是提升故障诊断精度的核心，神经网络与支持向量机在该领域应用广泛。神经网络具备强大的非线性映射能力，通过构建多层网络结构，对故障特征进行深度挖掘，实现复杂故障模式的精准匹配。支持向量机在小样本数据处理中优势明显，能有效解决高维数据分类问题，适用于部分故障样本有限的场景。故障诊断中存在诸多不确定性因素，如信号干扰导致特征模糊，引入模糊推理技术可通过模糊规则处理这些不确定性，提升诊断结果的合理性。为进一步增强可靠性，设计算法融合机制，将不同算法的诊断结果进行综合分析，弥补单一算法缺陷，提升诊断的鲁棒性。

2.3 诊断系统性能优化策略

工业场景对故障诊断系统的实时性要求极高，延迟可能导致故障扩大。通过算法轻量化设计优化性能，简化网络结构、减少计算节点，在保证诊断精度的前提下降低计算复杂度，满足实时响应需求。建立故障诊断知识库是提升效率的有效手段，收集历史故障案例、诊断经验与处理方法，实现经验的积累与复用。当遇到相似故障时，系统可快速匹配知识库内容，缩短诊断时间。引入交叉验证机制保障准确性，通过不同数据集对诊断结果进行验证，对比分析差异并修正，同时结合实时运行状态动态调整诊断参数，确保诊断结果可靠。

3 高可靠性电气及其自动化的容错控制核心策略

3.1 硬件冗余容错控制方法

硬件冗余是实现容错控制的基础手段，通过关键组件的冗余配置提升系统可靠性。常用配置方案包括热冗余与冷冗余，热冗余中备用组件与主组件同步运行，故障发生时可瞬间切换，保障无间断运行；冷冗余中备用组件处于待机状态，仅在主组件故障时启动，能耗更低。

明确冗余切换的触发条件至关重要，通常以组件运行参数偏差、性能衰减程度为判断依据，确保切换及时准确。优化冗余资源分配需平衡容错效果与成本，核心控制模块采用热冗余，非关键组件采用冷冗余或部分冗余。建立冗余设备状态监测机制，实时监控备用组件性能，确保故障时可正常投入使用。

3.2 软件控制律重构技术

针对不同故障类型与程度，预设对应的控制策略，形成包含正常运行、轻度故障、重度故障等多种模态的控制模型库。当系统发生故障时，快速识别故障状态并切换至适配的控制模态，实现控制律的快速重构。采用自适应控制算法提升适配性，系统可实时监测故障工况下的运行特性，动态调整控制参数，使系统适应故障后的运行状态，避免控制失稳。设计控制参数在线调整机制，基于反馈信号实时优化参数，确保容错控制过程平稳，减少对系统运行的冲击，维持核心功能稳定。

3.3 软硬件协同容错机制

单一的硬件或软件容错难以满足高可靠性要求，需建立协同控制机制。明确硬件冗余切换与软件控制律重构的联动逻辑，当故障发生时，先由诊断系统定位故障类型，若为硬件故障则触发冗余切换，同时软件模块同步重构控制律，适配新的硬件运行状态。制定容错控制优先级判定规则，生产安全相关的核心功能优先保障，次要功能可暂时降额运行，确保系统关键性能不受影响。构建反馈调节机制，实时监测容错控制效果，采集系统运行参数与控制输出数据，分析偏差原因并调整协同策略，优化硬件切换时序与软件控制参数，实现容错控制效果的持续提升。

4 故障诊断与容错控制的集成系统设计

4.1 集成系统架构与模块划分

故障诊断与容错控制集成系统采用闭环架构设计，形成“信号采集-故障诊断-容错控制-状态反馈”的完整链路。信号采集模块获取系统运行数据，传输至故障诊断模块分析处理，诊断结果驱动容错控制模块执行策略，同时状态反馈模块将控制后的运行状态回传至诊断模块，实现动态调整。按功能划分为数据处理、诊断分析、控制执行等核心模块，数据处理模块负责信号预处理与存储，诊断分析模块承担故障识别与定位，控制执行模块落实容错控制策略。设计统一的模块间通信接口标准，采用工业以太网、CAN总线等可靠通信方式，确保数据传输高效稳定，避免接口不兼容导致的系统延迟。

或数据丢失。

4.2 诊断与控制信息交互机制

信息交互的高效性直接影响集成系统性能，需建立故障诊断结果向容错控制模块的快速传递通道。明确信息交互的格式与内容，诊断结果需包含故障类型、位置、严重程度及建议控制策略等关键信息，采用标准化数据格式确保模块间识别准确。设计控制效果反馈机制，容错控制模块将执行后的控制参数、系统响应数据反馈至诊断模块，为诊断精度优化提供依据，若控制效果不佳，诊断模块需重新核查故障信息。采用实时数据库技术实现数据集中管理与共享，数据库具备高读写速度与数据一致性保障，支持多模块同时访问，确保诊断与控制过程中数据实时更新、同步一致。

4.3 集成系统可靠性保障措施

集成系统自身的可靠性是发挥作用的前提，采用容错设计理念构建软硬件架构。硬件方面选用高可靠性元器件，设置冗余通信链路与电源模块；软件方面采用模块化开发，增加代码校验与容错处理，提升系统抗干扰能力。诊断与控制信息涉及生产安全，需建立数据加密与访问控制机制，采用加密算法对传输数据加密处理，设置不同权限等级限制人员访问，防止信息泄露或恶意篡改。设计系统自检测模块，定期对集成系统各模块进行性能检测，包括传感器精度、算法运行状态、通信链路稳定性等，及时发现并处理自身故障，确保集成系统持续可靠运行。

5 高可靠性电气及其自动化的性能优化方向

5.1 数字孪生预诊断与预控制

数字孪生技术为系统性能优化提供新路径，通过构建与物理系统完全映射的虚拟模型，实现运行状态的实时同步。虚拟模型不仅复制物理系统的结构与参数，还能模拟其运行特性与故障演化过程。利用虚拟模型进行多工况模拟，如负载突变、环境变化等场景，预测可能发生的故障类型与时间，实现故障预诊断。基于预诊断结果制定预控制策略，在故障发生前调整系统运行参数、启动备用组件，从源头降低故障发生概率。

5.2 人工智能深度融合应用

人工智能与诊断控制技术的深度融合是未来发展方向，强化学习算法的引入使系统具备自主优化能力。

系统通过与运行环境的持续交互，自主学习不同故障场景下的最优诊断与控制策略，不断提升性能。大数据分析技术发挥重要作用，挖掘海量运行数据中隐藏的故障规律，如设备性能衰减趋势、故障前兆特征等，提升诊断的前瞻性与准确性。构建智能决策模块，整合诊断结果、运行状态、环境参数等多源信息，自主生成适配的诊断与控制方案，减少人工干预。人工智能的应用使系统从“被动响应”转向“主动预测与控制”，大幅提升运行可靠性。

5.3 诊断与控制协同节能优化

节能降耗是工业系统发展的重要目标，需将其融入故障诊断与容错控制过程。诊断环节优化传感器工作模式，采用间歇采集、按需唤醒等方式降低能耗，同时确保故障信号不遗漏。容错控制中优化控制参数，在保障系统稳定的前提下，调整电机转速、功率输出等参数，减少能源浪费。设计基于能耗最优的冗余切换策略，优先启用低能耗备用组件，合理安排冗余设备的运行与待机状态，减少冗余运行带来的能源消耗。

6 结论

高可靠性电气及其自动化的故障诊断与容错控制是保障工业生产稳定的关键。本文系统分析了系统运行特性与故障机理，明确了故障类型、诱发因素及传播规律，为后续技术研究奠定理论基础。构建的故障诊断技术体系，通过传感网络优化与智能算法融合，实现了故障的精准识别与定位，解决了传统诊断方法精度不足的问题。提出的软硬件协同容错控制策略，结合冗余配置与控制律重构，有效降低了故障影响，保障了系统核心功能的持续运行。

参考文献

- [1] 夏玉玖. 船舶电气自动化系统可靠性保障技术探究[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(10): 40-42.
- [2] 黄思齐, 王岳珩. 电气自动化智能建筑设备安装和质量控制要点[J]. 中国科技信息, 2025, (20): 64-66.
- [3] 付宝友. 电力系统电气设备故障自动化智能监测技术探析[J]. 电力设备管理, 2025, (18): 102-104. D
- [4] 史顺泽. 基于云计算的电气工程自动化监测系统研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (09): 1-3.
- [5] 郭青松. 电气自动化在公路监控系统上的应用[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(18): 16-18.