

核反应堆控制系统的故障检测和故障容忍性研究

宋宜明

辽宁红沿河核电有限公司, 辽宁 大连 116319

摘 要：核反应堆控制系统的故障检测和故障容忍性研究是确保核能系统安全运行的重要组成部分。文章研究目的是研究和分析核反应堆控制系统中故障检测的关键技术。为了达到这个目的，收集了大量的相关文献，分析了核反应堆故障检测的方法和技术。基于这些分析，重点探讨了核反应堆控制系统中故障检测和故障容忍性的关键方面。研究结果表明，所提出的故障检测算法能够准确地检测核反应堆中的故障，核电站的可靠性和安全性严重依赖于其控制系统的稳健性。综合来看，核反应堆控制系统的故障检测和故障容忍性研究在不断推动核能技术的进步的同时，确保了核能系统的可持续、安全运行。未来的研究将继续关注新兴技术的引入、更有效的人机交互手段以及更全面的操作员培训方法，以进一步提升核反应堆控制系统的性能和安全性。

关 键 词：核反应堆；控制系统；故障检测；容忍

Study on Fault Detection and Fault Tolerance of Nuclear Reactor Control System

Song Yiming

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., Ltd, Dalian, Liaoning 116319

Abstract： The study of fault detection and fault tolerance in nuclear reactor control system is an important part to ensure the safe operation of nuclear energy system. The research objective of the article is to study and analyze the key technology of fault detection in nuclear reactor control system. In order to achieve this purpose, a large amount of relevant literature has been collected, and the methods and techniques of nuclear reactor fault detection have been analyzed. Based on these analyses, key aspects of fault detection and fault tolerance in nuclear reactor control systems are highlighted. The results show that the proposed fault detection algorithms are able to accurately detect faults in nuclear reactors, and that the reliability and safety of a nuclear power plant heavily depend on the robustness of its control system. Taken together, the research on fault detection and fault tolerance of nuclear reactor control systems ensures the sustainable and safe operation of nuclear energy systems while continuously advancing nuclear energy technologies. Future research will continue to focus on the introduction of emerging technologies, more effective means of human-computer interaction, and more comprehensive operator training methods, so as to further enhance the performance and safety of nuclear reactor control systems.

Key words： nuclear reactor; control system; fault detection; tolerance

引言

核反应堆是复杂的系统，要求精确的控制以确保安全和高效运行。先进技术在控制系统中的集成显著提高了反应堆的性能。然而，故障和故障的风险仍然存在，需要全面研究故障检测和容错策略。本文旨在调查核反应堆控制系统中故障检测的最新技术和探讨故障容忍性体系结构的设计原则。目标是提高核电站的整体安全性和可靠性。

一、核反应堆控制系统的故障检测

（一）基于传感器的检测

在核反应堆控制系统中，基于传感器的故障检测是确保系统

正常运行的关键组成部分。各种传感器提供了关于反应堆运行状态的丰富数据，为异常检测提供了基础。以下是基于传感器的故障检测的关键考虑因素：（1）不同类型的传感器监测反应堆的各种参数，包括温度、压力、流速等。通过对这些传感器数据进行

实时收集和分析，可以建立对正常操作状态的基准，并识别与之不符的异常情况^[1]。（2）然而，基于传感器的故障检测面临误报和漏报的挑战。误报可能导致不必要的系统干预，而漏报则可能忽视潜在的问题^[2]。以下表1提供了一些典型的误报和漏报情况，以及可能的解决方案：

表1典型的误报和漏报情况及可能的解决方案

问题类型	描述	可能的解决方案
误报	由于传感器噪音或失校引起的错误报警	引入滤波算法，定期校准传感器
漏报	由于传感器失灵或故障未能检测到真实问题	实施冗余传感器系统，定期检查传感器健康状态

下表2基于传感器的故障检测的数据分析示例，其中列出了常见的反应堆参数和相应的传感器数据，以及可能的异常情况和解决方案：

表2常见的反应堆参数和相应的传感器数据

参数	传感器数据范围	异常情况
温度	300-600°C	>600°C 或 <300°C
压力	15-25MPa	>25MPa 或 <15MPa
流速	0.5-1.0m/s	>1.0m/s 或 <0.5m/s

（二）基于模型的检测

在核反应堆控制系统中，基于模型的故障检测利用数学模型对反应堆行为进行建模，从而能够识别与预期性能的偏差^[3]。这一方法的关键在于通过模型比对实际观测到的系统状态，快速而准确地检测潜在的异常情况。动态模型是一种描述系统随时间演变的数学工具，对于反应堆控制系统的故障检测尤为重要。通过将实际系统行为与预定义的动态模型进行比较，可以检测到与模型不符的行为，从而迅速发现潜在问题^[4]。

系统识别技术利用从实际运行数据中提取的信息来识别系统的动态特性和参数。在基于模型的故障检测中，系统识别技术可以帮助验证动态模型的准确性，并对模型进行实时调整，以适应系统的实际变化。研究基于模型的故障检测的实际应用案例表明，这一方法能够在较早的阶段识别出潜在的系统异常^[5]。例如，通过动态模型对冷却系统的建模，可以检测到管道堵塞或冷却剂泄漏等问题，从而及时采取措施，避免进一步的损害^[6]。

（三）数据驱动方法

在核反应堆控制系统的故障检测中，数据驱动方法通过机器学习算法展现了潜在的强大能力。这一方法通过从大量的运行数据中学习模式和趋势，能够实现对系统异常的高效检测。以下是数据驱动方法在核反应堆控制系统中应用的关键方向：

（1）神经网络的应用：神经网络是一种强大的数据驱动工具，能够从复杂的输入数据中提取非线性关系。在故障检测中，神经网络可以训练模型以识别正常和异常操作的模式，从而在实时运行中发现潜在的系统问题^[7]。（2）支持向量机的利用：支持向量机是一种用于分类和回归分析的机器学习方法，在故障检测方面展现了出色的性能。通过训练支持向量机来识别正常和异常操作的边界，可以实现对系统状态的快速分类和检测^[8]。

除了神经网络和支持向量机之外，还有许多其他数据驱动技

术，如决策树、随机森林等，可以应用于核反应堆控制系统的故障检测。这些方法的综合研究可以提供多样性的解决方案，以满足不同环境和需求的要求^[9]。

二、核反应堆控制系统的故障容忍性

（一）冗余策略

在核反应堆控制系统中，冗余策略是实现故障容忍性的基本方法之一。通过引入冗余的部件和子系统，系统能够在发生故障时继续可靠地运行。（1）硬件冗余的实施：①传感器的硬件冗余：在核反应堆控制系统中，温度、压力和流速等参数的准确监测对系统的正常运行至关重要。为了确保高可靠性，采用硬件冗余的方法对关键传感器进行实施是必要的。例如，对温度传感器的硬件冗余可以包括使用两个独立的传感器，通过比较它们的读数来检测是否存在异常情况。这样的冗余设计减小了因单一传感器故障而导致的错误读数的风险。②控制单元和执行器的冗余设计：控制单元和执行器是核反应堆控制系统的关键组成部分，负责响应传感器数据并调整反应堆的运行状态。在这些关键组件中引入硬件冗余措施是防范系统单点故障的有效手段。例如，采用双重控制单元，当一个单元出现故障时，系统可以自动切换到备用单元，确保对反应堆的控制不会中断。此外，执行器的硬件冗余设计也可通过使用多个执行机构来保证对控制指令的可靠执行，即使其中一个执行机构发生故障。（2）多样性的优势：多样性是通过引入不同设计或制造的组件来实现的，以确保系统具有内在的多样性和冗余性。这意味着系统中的关键功能可以由不同类型或品牌的部件执行，减小了由于特定设计或制造缺陷导致的故障概率。多样性策略通过防范共同模式故障，提高了系统对各种潜在故障的抵抗力^[10]。（3）自动切换和恢复：实施冗余策略还包括自动切换和恢复机制，以确保在检测到故障时系统能够迅速切换到备用组件，而无需人工干预。这可以通过自动故障检测系统和智能控制算法来实现，提高了系统对故障的快速响应能力。然而，在采用冗余策略时，必须权衡成本与性能之间的关系。引入过多的冗余可能导致系统复杂性增加和成本上升。因此，在设计核反应堆控制系统时，需要仔细评估不同的冗余策略，以找到最佳的平衡点，既确保故障容忍性，又保持合理的成本。

（二）基于软件的故障容忍性

在核反应堆控制系统中，基于软件的故障容忍性是一项关键的策略，可以通过在软件级别引入故障容忍算法来缓解潜在的故障影响。本部分深入研究了错误检测和纠正代码，以及基于软件的冗余技术，以提高核反应堆控制系统对软件故障的容忍性^[11]。

1. 错误检测和纠正代码的应用

在基于软件的故障容忍性中，使用错误检测和纠正代码是一种常见的方法。通过在软件中嵌入能够检测和纠正错误的代码，系统能够在运行时识别并修复潜在的软件故障。这涉及到使用差错检测码或纠错码，以确保在数据传输或计算过程中发生的错误可以被及时发现和修复。

假设核反应堆控制系统中存在一个关键的温度传感器，负责

监测反应堆的冷却系统。为了增加系统的容错性，开发团队在软件层面嵌入了差错检测码。每次传感器读数被传输到控制系统时，都会附加差错检测码。例如，原始温度读数为500° C，差错检测码计算得到校验位，将其附加到传输的数据中。如果在传输过程中发生了位翻转或错误，系统可以通过检查差错检测码来检测到问题，并使用校验位信息纠正数据。这有助于防止由于传感器数据传输中的意外错误而导致的误报或误差^[12]。

在核反应堆控制系统中，一个执行关键控制功能的软件模块也可能受到软件错误的威胁。为了应对这种情况，系统使用纠错码技术。考虑到控制模块的指令集，系统使用纠错码对每个指令序列进行编码。如果在执行过程中发生了错误，系统可以通过纠错码的帮助检测到错误并纠正其内容，确保正确的指令被执行。这种方式有助于防止因为软件错误导致的控制系统误导和不正确的反应。

通过以上举例，可以看出错误检测和纠正代码在软件层面的应用对核反应堆控制系统的稳定性和安全性具有关键作用。这种方法能够有效地应对潜在的软件层面故障，确保系统在面对异常情况时能够快速而可靠地进行纠正^[13]。

2. 基于软件的冗余技术

基于软件的冗余技术是通过引入多个相互独立的软件模块来提高系统对故障的容忍性。这些模块可以并行运行，并对系统状态进行监测。在检测到某个模块产生异常时，系统可以自动切换到备用模块，确保系统的正常运行。这种冗余策略可在不引入额外硬件成本的情况下提高系统的可靠性^[14]。

3. 自动错误恢复和系统重建

基于软件的故障容忍性还包括自动错误恢复和系统重建功能。当软件模块发生故障时，系统可以尝试自动修复错误或者恢复到之前的正常状态。这依赖于系统记录和检测错误的能力，以便迅速采取适当的恢复措施，确保系统的稳定性和可用性。

4. 安全性和性能的权衡

在引入基于软件的故障容忍性时，必须在安全性和性能之间进行权衡。增加错误检测和纠正的代码和引入冗余模块可能会增加系统的计算和存储负担，从而影响系统性能。因此，在设计阶段需要综合考虑安全性需求和系统性能要求，以确保达到适当的平衡。

（三）人机界面和操作员培训

人机界面是操作员与核反应堆控制系统进行交互的关键环节。其设计应当直观、清晰，能够有效传达系统状态和异常情况。合理设计的人机界面有助于操作员快速理解系统状态，识别异常，并迅速采取适当的措施。例如，采用直观的图形表示和清晰的警告信息，以确保操作员能够迅速做出正确的决策。同时，人机界面的设计也应考虑到操作员的人因工程学原理，以降低误操作的可能性，从而提高系统的整体韧性。

即使系统具有先进的故障检测和容忍性能力，操作员的反应和决策仍然是系统成功应对异常的关键因素。因此，系统的操作员需要经过全面的培训，包括正常操作、应急响应和故障处理。培训不仅应涵盖系统的基本操作，还应针对可能发生的各种异常

情况进行模拟和演练。通过实际的培训活动，操作员可以熟练掌握系统的应对策略，提高对复杂情况的应对能力，从而增强整个系统的韧性。

人机界面设计和操作员培训是一个持续改进的过程。随着技术的发展和系统的更新，人机界面应根据最新的设计原则进行优化，以保持与操作员的良好交互。培训计划也应根据系统性能和操作经验的反馈进行更新，确保操作员始终具备应对新情况的能力^[15]。定期的模拟演练和培训评估有助于发现问题并及时修正，进一步提升核反应堆控制系统的整体韧性。

四、结论

总的来说，核反应堆控制系统的故障检测和故障容忍性研究是确保核能系统稳定、安全运行的核心要素。通过多层次、多方面的策略，包括传感器数据分析、模型驱动方法、数据驱动技术以及硬件和软件层面的冗余设计，不仅提高了对潜在故障的检测能力，也在系统遭遇异常情况时保障了其可靠性。此外，强调了操作员培训和人机界面设计对整体韧性的贡献，使得人为因素成为系统安全的重要支柱。在未来，继续关注新技术的应用和不断完善操作人员的培训将是推动核反应堆控制系统性能提升的关键方向。

参考文献

- [1]耿柯繁，许分钦，庞波，殷园. 基于LSTM的核反应堆一回路传感器故障智能检测[J]. 自动化仪表, 2023,44(S1):366-370+375.
- [2]刘惠，曾辉，张思原，黄擎宇，李梦书，杨昆霖，林源峰. 控制棒驱动机构智能感知与诊断系统架构设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2023,(07):99-102.
- [3]王燕. 核级锆材质量控制——基于故障树法的Zr-4棒材氢元素检测超标原因排查分析[J]. 金属世界, 2023,(04):49-51.
- [4]刘惠，曾辉，张仲，杨昆霖，黄擎宇，林源峰. 控制棒驱动机构智能感知与自适应控制系统设计与仿真验证[J]. 计算机测量与控制, 2023,31(01):120-126.
- [5]黄亚军，孟路，于耀华. 控制棒驱动机构吸合电流偏大的故障排查[J]. 上海电气技术, 2022,15(04):66-69.
- [6]陈迪，黄擎宇，王媛美，张思原，杨昆霖，庞志鑫，龚磊，孙卓，张爽. 基于注意力机制的反应堆一回路系统故障诊断技术研究[J]. 科技视界, 2022,(29):39-43.
- [7]韩文悦，王运喜，詹瑜滨，连金彬，张诚. 华龙一号机组上充泵基于模糊多属性方法的维修决策研究[J]. 电工技术, 2022,(19):201-203+206.
- [8]王义凯，尹项根，谭力铭，乔健，尹昕. 发电机定子接地故障双频有源消弧策略及故障类型辨识[J]. 电工技术学报, 2022,37(19):4835-4847.
- [9]孙原理，宋志浩. 基于卷积长短期记忆网络和人工鲸鱼算法的核反应堆运行事件诊断方法研究[J]. 核动力工程, 2022,43(04):185-190.
- [10]伍建辉，周俊，邹春燕，贾国斌，张奥，蔡翔舟，陈金根. 小型氦氖冷却反应堆事故发生频率分析研究[J]. 核技术, 2022,45(06):103-112.
- [11]郝鹏飞. 基于OpenMC的空间核反应堆临界及安全分析[D]. 东华理工大学, 2022.
- [12]赵垣萱. 空间核反应堆电源的功率分布控制方法研究[D]. 中国科学技术大学, 2022.
- [13]刘建辉. 一种变频变压的双频注入绝缘检测方法研究[D]. 南华大学, 2022.
- [14]漆天. 移动式热管小堆典型事故及其安全性分析[D]. 华北电力大学(北京), 2022.
- [15]夏彦，黄文，冯宇，靳张涛，欧学东，徐靖皓，帅智康. 基于微型核反应堆的月表高可靠可扩展配电网架设想[J]. 深空探测学报(中英文), 2022,9(01):3-13.