

# 核电站仪表和控制系统的可靠性分析与改进

宋宜明

辽宁红沿河核电有限公司, 辽宁 大连 116319

**摘要：**旨在通过深入分析核电站仪表和控制系统的可靠性，提出一系列改进措施，以提高核电站运行的安全性和效率。通过全面调查和评估核电站仪表和控制系统的可靠性，能够更全面地了解系统中存在的潜在问题，并为这些问题提供相应的解决方案。在实现这一目标的过程中，采用了故障树分析（FTA）和可靠性块图分析（RBD）等可靠性分析方法，以系统地识别潜在的故障模式和关键事件。通过这些方法，我们能够准确定位系统中的问题源，并提出了相应的改进措施。研究表明，通过更新升级核电站的仪表和控制系统，定期维护设备，以及加强运维人员培训等改进措施，可以显著提高核电站的整体可靠性。

**关键词：**核电站；仪表和控制系统；可靠性；改进措施

## Reliability Analysis and Improvement of Instrumentation and Control System in Nuclear Power Plants

Song Yiming

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

**Abstract：** The aim is to improve the safety and efficiency of nuclear power plant operation by thoroughly analyzing the reliability of nuclear power plant instrumentation and control systems and proposing a series of improvement measures. By comprehensively investigating and evaluating the reliability of nuclear power plant instrumentation and control systems, it is possible to gain a more comprehensive understanding of the potential problems existing in the systems and to provide corresponding solutions to these problems. In achieving this goal, reliability analysis methods such as Fault Tree Analysis (FTA) and Reliability Block Diagram Analysis (RBD) are used to systematically identify potential failure modes and critical events. Through these methods, we were able to accurately locate the sources of problems in the system and propose appropriate improvement measures. The results show that the overall reliability of nuclear power plants can be significantly improved by upgrading the instrumentation and control systems of nuclear power plants, maintaining equipment regularly, and strengthening the training of operation and maintenance personnel.

**Key words：** nuclear power plant; instrumentation and control system; reliability; improvement measures

## 引言

核电站作为清洁能源的重要组成部分，其安全性和可靠性直接关系到社会的能源供应和环境保护。仪表和控制系统作为核电站运行的智能核心，承担着监测、控制和保护核反应堆等重要任务。然而，随着核电站运行时间的增长和技术的不断演进，仪表和控制系统所面临的挑战也在逐渐增加。因此，对核电站仪表和控制系统的可靠性进行深入分析，并提出改进措施，对于确保核电站的安全运行、提高能源利用效率具有重要意义。

## 一、核电站仪表和控制系统的现状

### （一）设备老化问题

设备老化问题是核电站仪表和控制系统面临的迫切挑战之一。随着运行时间的不断累积，核电站中的关键设备逐渐受到多种环境因素的影响，其中包括辐射、温度变化、湿度等。这些因素可能引起设备的物理磨损、电气性能下降以及材料老化，最终

导致设备功能的减弱和故障的风险增加。设备老化直接关系到核电站的安全性和可靠性。老化设备的存在可能导致系统性能不稳定，增加了事故和故障的发生概率，进而影响到核电站的正常运行。因此，采取有效的设备管理和替换策略显得尤为重要<sup>[1]</sup>。

### （二）技术更新滞后

另一个影响核电站仪表和控制系统可靠性的重要因素是技术更新滞后。由于核电站的长寿命周期和严格的安全标准，一些系

统可能使用较旧的技术和设备，无法充分利用最新的科技进步。这种技术滞后可能导致系统性能不足、难以维护以及对新安全标准的遵循困难。因此，及时进行技术更新，引入先进的控制和监测技术，对于提高核电站的整体可靠性至关重要。

### （三）设备维护挑战

核电站仪表和控制系统的复杂性使得设备维护变得极具挑战性。定期维护对于确保系统的长期稳定运行至关重要，然而，由于核电站的特殊性质，维护涉及复杂的工作程序、高度培训的人员和对设备的高度专业的了解。设备维护不足或不合理可能导致系统性能下降，增加故障风险。因此，建立高效的设备维护策略，包括定期检查和预防性维护，是提高核电站可靠性的必要步骤。

### （四）人员培训与技能保障

仪表和控制系统的性能不仅受到设备和技术的影 响，还依赖于运维人员的技能水平。由于核电站操作的特殊性质，运维人员需要具备高度的专业知识和技能，能够迅速而准确地应对潜在问题。人员培训和技能保障不足可能导致对系统故障的应对不力，进而影响核电站的运行可靠性。因此，加强运维人员的培训计划和持续技能提升，是保障核电站仪表和控制系统可靠性的重要举措。

## 二、核电站仪表和控制系统的可靠性分析方法

### （一）故障树分析（FTA）

故障树分析（FTA）是一种系统性的可靠性分析方法，通过逻辑分析系统中可能发生的故障事件，构建故障树来评估系统失效的概率。在核电站仪表和控制系统的可靠性分析中，FTA 可用于识别关键事件，找出导致系统失效的主要因素，并为制定相应的预防和纠正措施提供科学依据<sup>[2]</sup>。

#### 1. 故障树分析步骤

##### （1）定义分析目标

例如，对于核电站而言，安全系统的可靠性可能是一个关键目标，包括核反应堆的控制和应急停机系统等。可选择分析某个或某类仪表设备的可靠性，例如辐射监测仪表或温度控制设备。了解核电站仪表和控制系统整体的可靠性，可以将整个系统作为目标，考察系统的整体运行和失效情况。通过与系统相关的专业知识和文献资料，识别出可能导致系统失效的顶事件。将这些顶事件分解为基本事件，这些基本事件是构建故障树的基石。

##### （2）构建故障树

基本事件是构建故障树的基石，它们是直接导致顶事件发生的最基本的故障或失效。例如：

基本事件 A：传感器失效；基本事件 B：控制器故障；基本事件 C：电源供应中断

##### （3）构建逻辑门

利用逻辑门表示基本事件之间的逻辑关系。在核电站仪表和控制系统的故障树中，我们可以使用“与门”表示多个事件的共同发生，例如：与门 D：基本事件 A 与基本事件 B 同时发生，导致控制功能失效。

##### （4）完成故障树

将基本事件和逻辑门组合在一起，形成树状结构。树的根部

是顶事件，叶子节点是基本事件。最终构建出的故障树可以用图形的方式表示。

### 2. 评估概率和分析结果

为每个事件节点分配概率，可以通过历史数据、专家经验或其他可靠性数据库获得。最后，计算系统失效的概率。通过对树的分析，可以确定导致系统失效的主要路径和关键事件，从而为改进系统提供指导。核电站仪表和控制系统可靠性事件节点及数据分析见下表 1。

表 1 核电站仪表和控制系统可靠性事件节点及数据分析

事件节点	概率 (P)	数据来源 / 评估方法
顶事件控制功能失效	P(顶)	由专家评估或基于历史数据
与门 D	P(D)	根据基本事件 A 和 B 的关系计算
基本事件 A - 传感器失效	P(A)	基于传感器的寿命和维护历史
基本事件 B - 控制器故障	P(B)	根据控制器的寿命和维护历史
基本事件 C - 电源中断	P(C)	根据电源系统的寿命和维护历史

数据来源和评估方法：（1）专家评估：根据相关领域专家的意见和经验，评估控制功能失效的概率（P（顶））以及基本事件 A、B、C 的概率。（2）历史数据：分析过去的运行和维护记录，以获取传感器、控制器和电源系统的故障数据，用于评估基本事件 A、B、C 的概率。（3）设备寿命和维护历史：考虑设备的寿命和维护历史，评估传感器、控制器和电源系统的故障概率<sup>[3]</sup>。

计算与门 D 的概率  $P(D) = P(A) \times P(B)$ ，其中 P(A) 和 P(B) 是基本事件 A 和 B 的概率。通过对概率的计算和故障树的分析，可以确定导致核电站仪表和控制系统控制功能失效的主要因素和路径<sup>[4]</sup>。如果顶事件的概率较高，那么系统的可靠性可能受到威胁，需要考虑采取相应的预防和纠正措施，例如增加设备维护频率、更新老化设备或改进系统设计。这样的分析有助于提高系统的整体可靠性，确保核电站安全稳定地运行。

### （二）可靠性块图分析（RBD）

可靠性块图分析（RBD）是一种系统性的可靠性工程方法，通过将系统分解为各个可靠性块（Reliability Block）来评估系统整体的可靠性。这种分析方法有助于识别系统中的关键组件，理解它们之间的相互关系，从而指导改进措施的制定。

#### 1. 定义系统和可靠性块

首先，明确定义分析的系统范围，然后将系统分解为若干可靠性块，每个块代表系统的一个关键组件或功能单元。

#### 2. 确定可靠性块之间的关系

确定各个可靠性块之间的相互关系，包括串联和并联关系。串联关系表示必须所有块正常工作才能使整个系统正常工作，而并联关系表示只需其中一个块正常工作就能使整个系统正常工作<sup>[5]</sup>。

#### 3. 分配可靠性参数

为每个可靠性块分配可靠性参数，包括每个块的失效概率或可靠性，以及块之间的关系参数，如串联块的失效概率和并联块的失效概率。

#### 4. 计算系统的可靠性

在计算系统的可靠性时，可以使用概率和统计的方法。概率论提供了一种研究随机事件和概率相关性的数学框架。通过使用概率论，可以计算每个可靠性块和故障块的失效概率，并根据块之间的关系计算系统的整体失效概率。布尔代数则用于描述和分析不同块之间的逻辑关系，如串联、并联和重要性等<sup>[6]</sup>。通过使用布尔代

数,可以计算系统的整体可靠性指标,如可靠性函数和失效模式概率。计算系统的可靠性是一项复杂的任务,需要考虑到系统中各个组成部分之间的相互影响和不确定性<sup>[7]</sup>。在实际计算中,需要收集和分析大量的数据,包括故障率、修复时间、环境条件等。同时,还需要考虑到系统的运行模式、维护策略和人为因素等因素对系统可靠性的影响。通过综合考虑这些因素,可以得出较为准确的系统可靠性指标,为系统的设计和维护提供科学依据。

### 三、改进措施

#### (一) 更新升级

针对核电站仪表和控制系统中存在的老化设备和技术更新滞后的问题,系统的更新升级是一个必要且重要的步骤。随着时间推移,旧设备的性能会逐渐下降,可能会出现故障或无法满足现代化的运行需求。同时,新技术的出现也为系统升级提供了更好的选择,既能提高系统的可靠性、安全性,又能提高系统的运行效率<sup>[8]</sup>。

在进行核电站仪表和控制系统的更新升级时,可以考虑引入先进的技术和设备。例如,采用基于数字化和自动化技术的现代控制系统,替代传统的手动操作和模拟控制。这可以提高系统的响应速度和精度,并降低操作和人为错误的风险。此外,引入支持远程监控和自动故障诊断的设备,可以提高系统的可靠性和故障处理的效率<sup>[9]</sup>。

除了技术上的更新升级,还需要考虑建立适当的维护和管理机制。定期进行设备的检修和维护,及时更换老化设备和元件,以及对系统进行全面的风险评估和控制,都是确保核电站仪表和控制系统保持高可靠性的关键措施。此外,培训和提升工作人员的技能水平和意识,使他们能够适应更新后的系统和技术,也是升级过程中的一项关键工作<sup>[10]</sup>。

#### (二) 定期维护

建立定期维护机制对于核电站仪表和控制系统的稳定运行至关重要。定期维护可以提前发现潜在的问题,预防设备故障和系统故障的发生。通过定期检查设备的工作状况、清洁和润滑关键部件、更换老化的元件等措施<sup>[11]</sup>,可以有效延长设备的寿命,并确保其正常运行。

定期维护还能够发现设备的隐性故障。随着设备运行时间的增加,某些故障可能会逐渐显现,但在早期阶段难以察觉。定期维护过程中,可以进行详细的检查和测试,以确定设备是否存在潜在的故障或性能下降的情况。及时发现并修复这些问题,可以有效预防设备故障,提高系统的可靠性和稳定性。

在建立定期维护机制时,需要制定详细的维护计划和标准操作程序。维护计划应包括设备的维护周期、维护内容和具体的操作步骤。标准操作程序应确保维护工作的质量和一致性,以避免因维护不当而引起的问题<sup>[12]</sup>。此外,还应建立维护记录和维护档案,便于跟踪设备的维护历史和记录设备状态的变化。定期维护机制的有效实施可以保证核电站仪表和控制系统的正常运行,并提高系统的可靠性和稳定性。

#### (三) 培训与人员素质提升

对核电站运维人员进行定期培训是提高其应对突发事件和故障能力的重要手段。培训内容可以包括新技术的学习与应用、事故案

例分析、应急预案的训练等。通过培训,运维人员可以不断提升自身的专业知识水平,了解最新的故障处理技术和解决方案,增强应对各类故障和突发事件的能力,为核电站的安全运行提供支持<sup>[13]</sup>。

除了技术培训外,运维人员的素质提升也是非常重要的。核电站运维工作需要团队合作、高效沟通和决策能力等综合素质<sup>[14]</sup>。因此,可以通过组织团队建设、反思讨论、模拟应急演练等活动,提升运维人员的团队合作能力和应对复杂情况的能力。此外,也可以通过软技能培训,例如领导力培养、沟通技巧培训等,提高运维人员在日常工作中的效能和影响力。

在培训和人员素质提升方面,还可以借鉴其他行业的经验和最佳实践。例如,可以引入生命周期维护管理理念,将培训和素质提升贯穿核电站运维的各个阶段。另外,可以建立与技术合作伙伴的紧密联系,利用他们的专业知识和资源,给运维人员提供更广泛的培训渠道。通过这些措施,可以不断提高运维人员的整体素质水平,确保他们能够应对各类突发事件和故障,保障核电站的安全稳定运行<sup>[15]</sup>。

### 四、结论

通过对核电站仪表和控制系统的可靠性进行全面分析,结合改进措施的提出,可以有效提高核电站的整体可靠性。这对于确保核电站的安全运行和提高核能的利用效率具有重要的意义。今后,还需不断深化研究,不断完善改进方案,以适应新的技术和安全标准的要求。

### 参考文献

- [1] 樊艳艳,汪勇,李勇. 核电厂现场总线的应用研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(S1): 371-375.
- [2] 李力. 核电厂常规岛后备监控技术研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(09): 198-203.
- [3] 王传辉. 核电站数字化仪控系统改造研究[J]. 现代工业经济和信化, 2023, 13(04): 306-308.
- [4] 张媛媛. 核电厂数字化仪表控制系统设备鉴定方法[J]. 电工技术, 2021, (19): 157-158+161.
- [5] 马志刚,李萌,张智慧,石桂连,王晓伟. 核电安全级数字化仪控系统内存诊断设计与实现[J]. 自动化博览, 2021, 38(08): 50-54.
- [6] 李萌,李亮,石桂连,马志刚,王晓伟. 核电厂数字化大尺寸安全显示系统设计与应用[J]. 自动化仪表, 2020, 41(11): 58-61.
- [7] 石舒健. 核电厂数字自动化仪控系统兼容性设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2020, (08): 202-204+209.
- [8] 孙洪涛,李红霞,刘静波,郑伟智. 核电厂数字化仪控系统商品级物项适用性确认方法研究与应用[J]. 核动力工程, 2019, 40(04): 76-80.
- [9] 刘东波,陈玉娟,黄勇成. 核电厂数字化仪控系统智能设备接口设计[J]. 核科学与工程, 2019, 39(03): 485-491.
- [10] 邵拓. 仿真技术应用在反应堆控制系统调试[J]. 电子技术与软件工程, 2019, (08): 142+251.
- [11] 石舒健. 核电厂数字化仪控系统设备鉴定方法研究[J]. 现代信息科技, 2019, 3(06): 87-88.
- [12] 户滕. 核电站数字化仪控系统改造研究[J]. 设备管理与维修, 2019, (03): 107-108.
- [13] 徐世豪,谢维波,徐海燕,彭浩,吴志强. AP1000与CPR1000堆外核测系统对比分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(S1): 41-45.
- [14] 张强,毛虎,黄婧. 核电厂安全级DCS安全审评重点关注点探讨[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(S1): 160-165.
- [15] 苏立臣. 核电厂数字化仪表与控制系统的现状与发展趋势[J]. 山东工业技术, 2019, (02): 163.