

一种智能化的 γ 辐照装置故障 诊断系统设计

宋辉, 张勇, 郭峰, 邓超, 李文革

(湖南省农业科学院 湖南省核农学与航天育种研究所, 长沙 410125)

摘要: 开展故障诊断分析是保障核技术利用装置安全稳定可靠运行的重要手段, 以某大型 Co-60 辐照装置为研究对象, 针对目前存在的故障诊断方式过度依赖维修人员现场处置的不足, 提出了一种智能化的专家系统故障诊断方式, 采用智能化的专家系统集成诊断手段, 利用领域专家知识及经验总结集成知识库, 按照规则推理可以快速识别故障, 可有效减轻现场维修人员的负担, 同时采用远程问诊的方式来处理故障并给予运行建议支持, 保证装置的辐射安全; 基于 Visual C++ 建立了本故障诊断系统, 系统具有操作便捷、可视化的人机界面, 可辅助运行值班人员及时处置故障; 系统测试结果表明, 所建立的诊断系统功能符合预期要求, 能准确地识别现场故障信息; 实现了辐照装置的无人化自动控制。

关键词: 智能化; γ 辐照装置; 故障诊断

Design of Intelligent Fault Diagnosis System for γ Irradiation Device

SONG Hui, ZHANG Yong, GUO Feng, DENG Chao, LI Wenge

(Hunan Institute of Nuclear Agricultural Science and Space Mutation Breeding, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: It is an important means to conduct fault diagnosis and analysis, which ensures the safe, stable and reliable operation of nuclear technology utilization devices. Taking a large-scale Co-60 irradiation device as the research object, this paper proposes an intelligent expert system-based fault diagnosis method to address the current shortcomings of fault diagnosis methods that overly rely on on-site handling by maintenance personnel, adopts the integrated diagnostic means of the intelligent expert system, utilizes the knowledge and experience of domain experts to build an integrated knowledge base, quickly identifies faults through rule-based reasoning, and effectively reduces the burden on on-site maintenance personnel while handling the fault by remote consultation and providing an operational advice support, thus ensuring the radiation safety of the device. Based on Visual C++, a fault diagnosis system is established, which has a user-friendly and visual human-machine interface, and can assist on-duty operators in promptly handling faults. Experimental results show that the established diagnosis system achieves the expected functions, which accurately identifies on-site fault information, achieving the unmanned automatic control of the irradiation device.

Keywords: intelligence; γ irradiation device; fault diagnosis

0 引言

大型 Co⁶⁰ 辐照装置是一种在工业领域应用较为广泛的装置核技术, 也是核技术在民用领域的一个拓展; 其

与人们的日常生活联系越来越紧密。利用辐射技术可以开展食品辐射保鲜、杀虫防腐、灭菌及改善品质等方面的基础研究, 也可对医疗用品、卫生用品等开展辐射加工, 从而达到杀菌、消毒的效果; 每年可为社会创造数

收稿日期: 2025-01-25; 修回日期: 2025-03-24。

作者简介: 宋辉 (1991-), 男, 硕士, 工程师。

通讯作者: 张勇 (1979-), 男, 助理研究员。

引用格式: 宋辉, 张勇, 郭峰, 等. 一种智能化的 γ 辐照装置故障诊断系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(2): 10-15.

亿以上的经济效益。 Co^{60} 辐照装置的应用虽然蕴含着巨大的发展前景, 但随着社会对核安全的高度关注, 其安全的重要性不言而喻, 有必要对装置设备设施开展可靠性管理, 探索一种更为智能的维修诊断方式; 尽可能降低安全风险。

一般的辐照装置主要由放射源升降系统、安全连锁系统、输送系统、TV 监视系统、计算机监控管理系统、通风系统、水处理系统等构成。由于核技术利用的特殊性, 该装置的核安全问题也深受社会与监管部门的关注, 需采取一切可能的防范措施来确保足够的安全, 虽然辐照装置配备了一系列的安全连锁系统, 但在设备运行状态监测与故障诊断上不够智能化, 运行人员无法及时获知潜在的隐患风险; 不能第一时间进行处置。

核技术利用装置故障诊断技术研究也一直是业内关注的重点, 有效的故障诊断与科学的预测手段在提高辐射安全过程中占有十分重要的作用。由核动力系统的故障特点以及运行参数的特征可知, 故障存在不确定性、扩展性、放射性等特点, 实际诊断存在较大的困难, 而且故障与征兆之间的关系并不能确切地表达, 使得传统的分析手段存在很多局限性。目前, 人工智能技术也正朝着实际应用的方向发展, 而且可结合其他相关算法以进一步提高分析结果的可靠性。由此可以发现, 故障诊断方法的研究对运行决策以及科学的维修策略的制定都具有重要的意义。目前, 国内外关于辐照装置控制运行方式大同小异, 故障诊断的模式较为单一, 主要采用基于数据监测的方式来了解设备的运行状态, 过度依赖技术人员的判断; 随着人工智能算法的兴起, 以人工智能技术为基础的诊断方法使得工业领域故障诊断技术研究有了较大的进步。

1 辐照装置故障分析

一般的 Co^{60} 辐照装置控制系统主要由 PLC (可编程逻辑控制器) 作为核心处理单元, 其通过对现场传感器采集的数据经过转化处理, 用户可以根据触摸屏控制面板发出相应的控制指令来控制装置各部件的运行。由于核技术的特殊性, 对于该装置的控制系统在安全性、先进性、技术性与经济性方面均提出了要求。安全设计主要遵循了纵深防御、冗余性、多元性及独立性的原则, 采用安全可靠的元器件, 精心设计、严格检查、符合设计加工安装的要求^[1]。通过可靠的控制手段保证辐照源的正确动作, 严防辐照源工作时人员误入辐照室和升源时人员误留辐照室内。对控制系统要求长期可靠运行, 为防止 γ 射线对电气设备的辐照损伤, 除必要的控制器件和信号线外, 辐照室内尽量不设置其它电气设备。另外, 为确保绝对的安全, 在辐照装置运行期间出现故障

时, 控制系统能保障辐射源下降到储存位, 未恢复正常前辐射源不可上升。

1.1 控制系统结构

控制系统由上位机、触摸屏、自动装卸系统、输送系统、提升系统、安全连锁系统、通风系统、水处理系统及传输系统等组成, 其结构如图 1 所示。

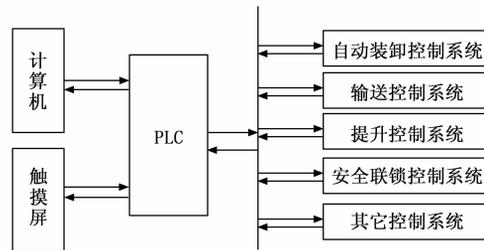


图 1 辐照装置控制系统框图

辐照装置是以 PLC 控制系统为核心的大型工业设施, 为充分利用放射源释放的 γ 射线能量, 装置会处于 24 小时运行状态, 运行期间会由于倒源、放置辐照样品、停机检修等原因而需要进行降源操作, 每年降源操作达 800 余次, 辐照装置的升降源操作均由运行操作人员在 PLC 控制平台上进行, 频繁的操作对于各运行设备及部件的可靠性是一种考验, 可能导致设备部件提前老化、损坏等现象。装置长期运行过程中也会出现不同程度的设备故障, 典型的故障包括排风机电机故障、入口堵门失败、出口堵门失败、光电开关动作、电机停止器满位、剂量仪故障、拉线开关动作、输送机传动过载、卸箱位输送机与装卸系统联锁故障、装箱位输送机与装卸系统联锁故障等十几种。上半年频发的故障统计数据如图 2 所示。随着辐照装置的老化, 出现的故障频率也较大, 需要定期开展设备的健康管理。一般辐照装置出现故障时, 运行人员由于维修技能的缺乏, 无法直接开展故障识别并进行维修活动, 故障处理方式过于依赖维修人员; 另外, 维修人员前往现场需要花费时间, 此时需将辐照装置置于安全停机的状态; 放射源降至水下贮存位。停机时间会影响放射源的有效利用率, 停机过于频繁会对企业造成巨大的经济损失。因此, 有必要进一步加强对设备的可靠性管理, 探索一种更为智能化的设备故障诊断方式, 用于在线实时监测辐照装置的运行状态, 可在无人值守的情况下快速实现对装置故障情况的分析, 并根据诊断结果给出相应的运行决策建议。

1.2 辐照装置故障特点

目前, PLC 控制系统的显示终端可以进行装置故障信息的提示及报警, 但由于其内置的故障提示方式过于单一、信息表达过于专业化、对人员技能要求高等特

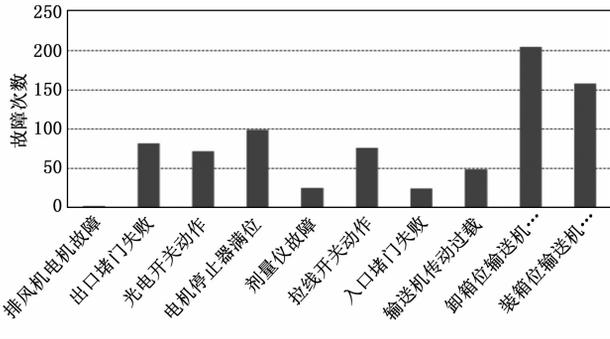


图 2 2024 年上半年故障次数统计

点, 使得现场运行值班人员难以理解故障本质特征, 并从中获取有价值的信息, 对于不具备装置维修技能的人员来说, 无法进一步采取处置措施来排除故障, 快速将装置恢复正常的运行状态。因此, 需要开发一种智能化的故障诊断系统, 运行人员可以通过系统的诊断来作出判断, 快速获取故障原因, 根据运行建议采取相应的措施, 同时可以与维修人员进行远程沟通, 参与复杂故障问题的解决与处理; 快速提高故障处置速率, 减少装置停机时间, 摒弃过度依赖专业人员现场处置的传统模式, 有利于无人化、信息化、智能化的智慧生产工厂的建设。

1.3 故障树分析

为了形象直观地描述辐照装置故障演绎的过程^[2-3], 便于对故障开展分析研究, 拟借助应用广泛的故障树分析法 (FTA, fault tree analysis) 开展故障分析, 在故障树中将顶事件标记为 E, 中间事件标记为 T, 底事件标记为 X^[4-5]。按照逻辑演绎的方式, 按照从上往下, 从事件出发不断寻找原因, 直到寻找到最基本的故障点为止; 这也是开展故障诊断的重要依据。同级事件具有逻辑“或”的关系, 下面以安全连锁保护系统故障 (E₁) 为例, 故障树分析模型如图 3 所示。利用内部的逻辑关系可以十分清晰直观地展示该故障发生的内在演变机理, 便于维修人员开展诊断分析^[6]。

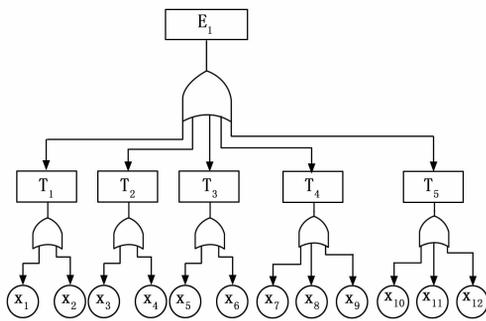


图 3 安全连锁保护系统故障树

该故障树所对应的事件表如表 1 所示。列出了引

发安全连锁保护系统故障的所有可能性; 逐级分析可能存在的原因。类似可以建立辐照装置内部所有系统现有的故障树结构, 利用故障树来生成后续的故障诊断知识库, 可以快速寻找匹配, 提高知识利用的效率。通过故障树可以清晰的建构各种不同故障的层次逻辑, 为构建专家知识库提供可以借鉴的知识体系; 故障树分析方法也是在设备故障诊断领域较为常见的一种分析策略。

表 1 故障树对应的事件表

符号	意义	符号	意义
E ₁	安全连锁保护系统故障	x ₁	传送链过松
T ₁	迷宫内光电连锁报警	x ₅	源井水位过高
T ₂	传送链连锁报警	x ₆	源井水位过低
T ₃	储源井水位异常	x ₇	剂量值超高阈值
T ₄	剂量异常	x ₈	剂量值超低阈值
T ₅	装卸位与输送线连锁故障	x ₉	仪表接头未紧固
x ₁	人员误入迷宫	x ₁₀	卸货位动作异常
x ₂	光电检测开关动作	x ₁₁	装货位动作异常
x ₃	传送链过载	x ₁₂	门栓检测报警

2 系统结构及原理

针对辐照装置的故障特征, 结合实际故障经验数据的积累, 拟采用基于专家系统的故障诊断思维开展系统框架设计, 通过设置内部的推理规则来实现对特定故障的智能化诊断; 专家系统通过模拟人类专家的思维过程, 可以高效解决实际问题, 将其应用于故障诊断领域具有独特的优势, 可以灵活、准确、智能地判断故障类型^[7-9]。

2.1 诊断系统框架

如图 4 所示, 诊断系统的建立将主要基于已有的 PLC 控制系统, 诊断系统与 PLC 系统采用串口连接的方式进行数据通信, 诊断系统布置在现场, 可以实时获取 PLC 控制系统采集的参数数据, 在诊断系统内部建立了故障诊断专家系统, 为便于用户访问, 快速互联, 系统采用 B/S 架构的方式布置, 维修专家可以在远程端通过终端访问系统, 进行远程问诊提出相应的处置建议, 并以站内消息的方式通知运行人员进行处理。普通用户可以登陆系统查询信息, 维修专家作为管理员可以录入信息对系统的知识库进行完善管理; 对于无法识别的故障, 经维修专家进行诊断处理后将自动添加进知识库, 以此不断进行丰富知识库。

2.2 诊断系统设计

专家系统是一种模拟人类专家推理和决策的计算机程序系统, 它利用大量的专业知识和人类专家的经验以解决只有人类专家才能解决的特定领域问题^[10-14]。一般的专家系统诊断原理如图 5 所示, 首先传感器进行数据

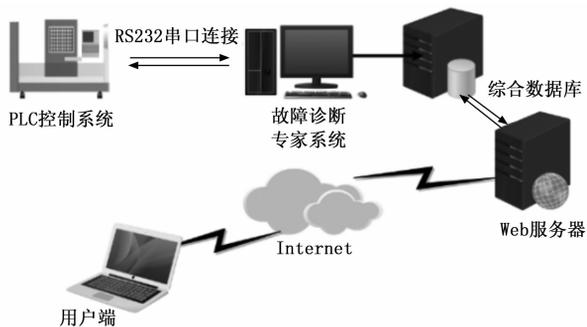


图 4 诊断系统框架

的采集送入接口单元, 提取征兆特征, 根据系统中由专家知识构建的诊断数据库进行诊断推理, 解释得到相应的诊断结果; 将诊断信息显示在人机交互界面, 丰富的知识数据库与完备的解释推理机制是专家系统成功的关键。因此, 本诊断系统在设计过程中将重点围绕知识库的构建及推理机制的建立, 依靠辐照装置实际运行过程中所积累的专家知识经验来进行分析。

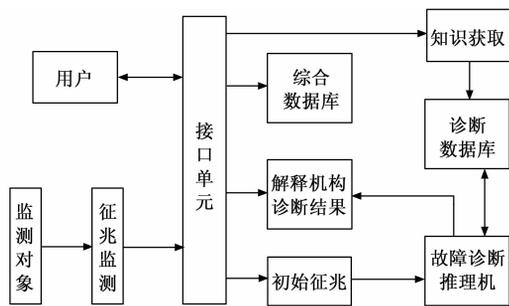


图 5 基于专家系统的故障诊断原理图

2.2.1 特征参数提取及预处理

在开展故障的准确识别前, 首先需要针对不同故障类型建立可供参考的标准化特征参数序列, 建立征兆参数与故障之间的隐射关系; 对于本研究所涉及的辐照装置由于内部功能较为简单, 结合实际工作经验, 在考虑选取气缸阀门开度、剂量率、水井水位、通风系数、空气温度、空气湿度、光电开关、传送链载荷、门栓位置及电机电流共 10 个参数作为特征参数; 由于不同参数数据具有不同的表征方式, 故在参数预处理时基于各自参数的变化范围开展归一化处理; 采用 5 种不同数值进行状态表征; 其中, 0.5 为正常值, 1.0 为上限阈值, 0.0 为下限阈值, 0.75 和 0.25 则分别为上、下报警状态。

2.2.2 知识库建立

专家知识库为整个专家系统中一个重要的模块, 作为故障推理的依据, 其知识的全面性与准确性直接影响诊断结果的正确性, 专家知识库的知识数量及水平直接影响着专家系统的功能与性能^[15-16]。本系统知识库的建

立将主要依据装置运行原理知识以及维修领域专家实际经验的总结。知识库需要进行不断的完善, 这样诊断系统才能更加准确。鉴于辐照装置故障种类的数量, 专家知识采用手动的输入方式开展知识管理。本知识库的知识获取既包括装置维修的事实性知识也有来自专家的启发性知识。在故障诊断过程中人员通过知识库信息引导进行选择, 获取故障原因及诊断结果^[17]。

在知识的获取方式上, 主要依靠专家访谈的方式进行, 鉴于辐照装置的特殊性及故障模式的简易性等特点, 专家的维修经验在故障的识别及排除过程中具有十分重要的作用, 在知识库的构建上, 通过与 5 位长期在现场一线开展设备维修的工程技术人员访谈的方式收集了辐照装置日常故障相关的理论知识, 作为知识库构建的基础。

本知识库的知识表达方式基于“if...then...”的产生式规则表述^[18]。例: “若传送链过载, 则传送链连锁报警”“若剂量值超高阈值, 则剂量异常”等等, 该方式便于现场人员理解, 也可以快速建立内部知识的联系。

故障的准确识别依赖于专家知识库的完善, 因此需要不断根据情况来更新知识库内容, 本诊断系统知识库的知识更新策略主要采用定期更新的方式来进行; 当诊断系统无法识别一种新的故障类型时, 会将该情况反馈至现场维修专家处, 经过现场维修专家研判后进行综合评判, 若属于一种新的故障类型, 则由现场维修专家, 根据知识库的构建规则对该知识进行更新, 以此来不断对知识库进行完善, 使得知识库所储存的知识内容越来越丰富, 使系统识别故障的准确率也越来越高; 不断提升系统的诊断的正确率。

2.2.3 推理机设计

推理的过程实质为对故障特征的解释, 针对实际的故障类型, 按照专家知识库的推理规则进行推理解释, 快速获取故障诊断的结果。推理机是专家系统的核心组成部分, 它实质上是一组程序, 用来协调和控制专家系统的工作^[19]。推理机根据系统获取的输入提示根据知识库建立的规则进行推理得到诊断结果。本系统故障推理的部分规则如表 2 所示, 包含多个字段, 其中, No. Rule 为规则编号, ID. Fault 为故障标识, FFault 为父级故障描述; Fault 为本级故障原因^[9-10]。

表 2 故障规则表

No. Rule	ID. Fault	FFault	Fault
001	0101	迷宫内光电连锁报警(T1)	人员误入迷宫
002	0301	储源井水位异常	源井水位过低

故障推理的结论部分如表 3 所示。经过故障的推理

获得故障根本原因，并提出相应的处理措施或建议。
ID, Fault 故障标识，Reason 为故障原因的描述；Measure 为针对故障原因可采取的措施。

表 3 结论规则表

ID, Fault	Reason	Measure
0101	人员误入迷宫	紧急降源并撤离人员
0301	源井水位过低	降源并立即向井里注水

2.2.4 实施步骤

为准确地识别出不同的故障类型，本故障诊断系统运行过程主要按照以下步骤来开展相应的诊断分析：

- 1) 依据专家知识信息建立准确的可靠的专家推理知识库，作为诊断推理的依据来源；
- 2) 设备特征参数监测。利用传感器对装置设备开展实时监测，对监测数据进行预处理^[20]；
- 3) 开展故障识别。依据建立的专家知识库开展定向推理；
- 4) 输出诊断结果。若根据专家知识库推理规则可以进行匹配，则输出相应的诊断结果。

3 故障诊断专家系统

本诊断系统的运行主要依赖内部建立的专家系统，以此来实现智能化的诊断，具体的诊断推理过程如图 6 所示。系统开机启动后自动进行装置异常检测，出现报警提示后进行故障诊断，基于 PLC 控制系统采集的数据及故障现象进行综合故障诊断，利用已建立的专家知识库进行故障的快速识别，并进行推理解释，给出可能的故障原因及运行建议，便于采取下一步措施，若知识库无法识别出故障则自动推送至远程专家端，由维修专家进行远程故障分析，故障排查完成后可按照既有的规则更新已有的知识库。

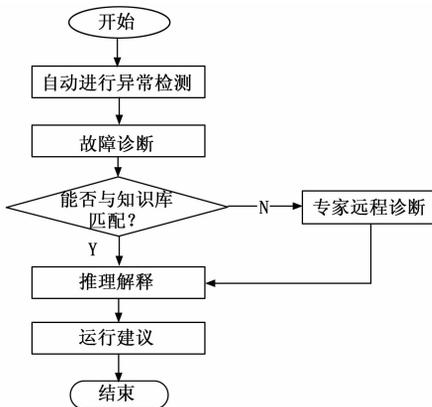


图 6 诊断推理框图

本系统的故障诊断部分布置在现场，并采用 RS232 串口连接的方式将故障诊断专家系统与现场 PLC 控制

系统相连接，可以实时接收由 PLC 控制系统传输而来的数据，开展故障的实时识别与判断；另外，维修人员可远程登陆来辅助进行复杂故障的在线解决。对于专家知识库中无法进行识别的新故障，运行人员可在线远程连线专业维修专家进行问诊，维修专家可在远程端进行故障诊断分析，并给出相应的运行建议。通过快速、高效的远程诊断支持可以有效解决复杂故障问题，以便进一步采取措施；将维修人员从现场工作中解放出来，无需 24 小时留守，只需远程开展故障排查，指导运行人员开展相关的工作，确保设备运行的可靠性。

4 系统测试与分析

基于 Visual C++ 建立了 γ 辐照装置故障诊断系统，系统将与 PLC 控制系统互联，实时获取传感器采集的相关数据信息，根据特征信息进行预处理，利用专家系统内部推理机制来进行故障的诊断，界面由“报警提示”“故障名称”“原因分析”“运行建议”4 大模块构成；“报警提示”模块将及时提示存在的系统异常，点击“故障诊断”按钮可以利用专家知识快速作出判断，并按照给定的格式输出相应的故障名称、原因分析及运行决策指导信息；“历史记录”按钮可以查阅历史发生的故障记录信息；“录入数据库”按钮用于维修专家将新的故障信息录入专家知识库；该功能只有维修专家才有权限进行维护。

若报警提示的信息无法利用已建立的知识库进行诊断，则弹出对话框提示无法识别故障，将通过站内消息自动发送至维修专家用户端，专家远程登陆后可以查看进行故障排查，处理完后可录入从而更新知识库。

为测试验证系统的各项功能指标是否满足要求，以某装源量为 80 万居里的大型 Co^{60} 辐照装置为应用案例进行了系统部署，将该系统与装置控制系统有效对接，系统实际使用过程中，对各项功能的完整性与有效性进行的测试，测试界面如图 7 所示；测试结果显示，该系统准确地识别出了所出现的故障类型，并给出了相应的故障原因及运行建议指导；未出现诊断失误的情况；系统界面未出现卡顿，诊断准确率为 98%，诊断速度为 0.8 s、用户满意度 99%，经过测试系统完全具备上线运行的条件，系统具有较强的实用性与可靠性；可有效解决目前面临的诊断手段落后、效率低下等问题。

将专家系统应用于工业 γ 辐照装置的故障诊断研究是一种理论先进、技术成熟可靠的一种解决方案^[21]。整个过程可以减少人员的干预，正常运行期间可以实现无人化的管理，降低人力成本，利用专家知识及时解决存在的故障问题，减少装置降源等待的时间，进一步提



图7 故障诊断系统界面

高放射源的利用率。

5 结束语

利用技术成熟的专家系统构建了一种智能化的辐照装置故障诊断系统, 具有实时监控、快速诊断及远程支持等功能, 经过诊断系统的现场部署及测试, 对系统的各项功能特别是相关的诊断指标开展深入的测试; 经验证获得的诊断结果具有可靠性强、准确性高等优势, 该诊断系统具有一定的工程应用价值, 该智能化诊断方式可有效地将维修人员从日常辐射加工生产流程中解放出来, 利用专家知识建立的诊断系统可实现智能化的设备故障诊断, 并可快速地诊断故障类别; 并给出原因分析及运行建议; 便于运行人员做出进一步决策, 能够有效地防止由于故障识别不准确、诊断不及时所带来的的人因失误, 保障 γ 辐照装置始终处于安全、稳定、可靠地运行; 确保工作人员、环境及公众的辐射安全。

参考文献:

- [1] 王传祯. 伽马辐照装置及应用 [M]. 北京: 中国原子能出版社.
- [2] 朱继洲. 故障树原理和应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [3] 许化东. 基于故障树分析法的汽车故障诊断专家系统的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
- [4] 李耀华, 王星州. 飞机液压系统故障诊断 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (5): 232-234.
- [5] 甘传付, 曹宏炳, 黄允华, 等. 基于 FMECA、FTA 的故障诊断和故障预报 [J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24 (11): 127-130.
- [6] 郝用兴, 刘玉洋, 周建军, 等. 基于 VW-PCA 的盾构刀盘驱动液压系统故障诊断 [J]. 隧道建设, 2018, 38 (1): 118-123.
- [7] VISWANATHAN P, SINGH P. Failure modes and mecha-

nisms in electronic package [M]. Chapman & Hall, New York, 1998.

- [8] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack growth laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85 (3): 528-534.
- [9] GIARRATANO J C, RILEY G D. 专家系统原理与编程 [M]. 印 签, 陈忆群, 刘星成, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [10] 郭俊杰, 郭正红. 基于深度置信网络的旋转机械在线故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2025, 33 (1): 60-68.
- [11] 刘 嵘, 周鸣岐. 故障诊断专家系统综述 [J]. 测控技术, 1994, 13 (2): 6-9.
- [12] 陈志辉, 夏 虹, 刘 邈. 核电系统故障诊断专家系统研究 [J]. 核动力工程, 2005, 26 (5): 524-526.
- [13] DAI J Y, TANG J, HUANG S Z, et al. Signal-based intelligent hydraulic fault diagnosis methods: review and prospects [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32 (5): 11-32.
- [14] MAIOF D, SECCHI P, VANTINI S, et al. Fuzzy C-means clustering of signal functional principal components for post-processing dynamic scenarios of a nuclear power plant digital instrumentation and control system [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60 (2): 415-425.
- [15] CHEON S W, CHANG S H, CHUNG H Y. Development strategies of an expert system for multiple alarm processing and diagnosis in nuclear power plants [J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1993, 40 (1): 21-30.
- [16] YANG J O, CHANG S. A diagnostic expert system for the nuclear power plant based on the hybrid knowledge approach [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989, 36 (6): 2445-2478.
- [17] XU G X. Statistical forecasting and decision making [M]. Shanghai: Shanghai Finance University Press, 1998.
- [18] 杨莎莎. 基于故障树的直流充电桩故障诊断专家系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [19] 郝用兴, 刘玉洋, 马子领, 等. 基于 DE-BP 神经网络的盾构推进液压系统故障诊断 [J]. 中国科技论文, 2018, 13 (10): 1142-1147.
- [20] 鄂东辰, 张立杰. 基于分块多向主成分分析的翻车机液压系统故障诊断 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (8): 958-964.
- [21] 张敏芳, 刘 峰, 阮 博, 等. 基于专家系统的雷达远程故障诊断系统 [J]. 火控雷达技术, 2019, 48 (4): 29-32.