

# Design of Motion Planning Safety and Condition Monitoring System for Heavy-duty Robots in Steam Generator Heat Transfer Tube Maintenance at Nuclear Power Plants

Bibo Zhu Dongli Wang Minrong Ji

## Abstract

The heat transfer tubes of steam generators in nuclear power plants are the critical pressure boundary between the primary and secondary loops, and their integrity is crucial to the safety of the unit. Due to the high radioactivity, limited space and high precision requirements in the maintenance environment, inspection and positioning robots are required for operations to reduce the radiation dose to personnel. To address the safety needs of heavy-duty robots in this scenario, this paper proposes a kinematics-based collision detection algorithm, which uses bounding box technology and the separating axis theorem to achieve risk assessment; establishes an anti-entanglement model through algorithm planning; and develops an integrated management system that incorporates condition monitoring, log tracking and visual maintenance. Experiments show that the system achieves the unity of robot motion planning safety and tasks in tube bundle-dense environments, providing technical support for the subsequent application of robots.

## Keywords

Heat Transfer Tubes of Steam Generators; Robot; Collision Detection; Condition Monitoring;

# 核电站蒸汽发生器传热管检修重载机器人安全及监测研究

朱碧波 王东利 吉敏荣

中广核核电运营有限公司, 中国·广东 深圳 518100

## 摘要

核电站蒸汽发生器传热管是一、二回路关键压力边界, 其完整性关乎机组安全。因检修环境高放射性、空间受限且要求高精度, 需检修定位机器人作业以降低人员辐射剂量。针对该场景下重载机器人的安全性需求, 本文提出基于运动学的碰撞检测算法, 借包围盒技术与分离轴定理实现风险判定; 建通过算法规划防缠绕模型; 开发集成状态监测、日志追踪与可视化维修管理系统。实验表明, 该系统在管束密集环境中实现机器人运动规划安全性与任务的统一, 为后续机器人应用提供技术支持。

## 关键词

蒸汽发生器传热管; 机器人; 碰撞检测; 状态监测

## 1 引言

核电站蒸汽发生器是核电站的重大设备, 它是一、二回路热量交换的转换设备, 其传热管壁厚仅为 1 mm 左右, 在高温、高压、振动和应力等恶劣环境下, 最容易产生腐蚀损伤, 造成传热管降质 [1]。核电机组安全运行依赖于蒸汽发生器传热管的完整性保障。行业实践表明, 人工主导的检修模式正加速被智能机器人替代。在核电站蒸汽发生器传热管检修作业中, 重载机器人面临管束密集、运动空间受限、电缆易缠绕等安全挑战。传统工业机器人安全防护策略在动态环境适应性、多约束协同规划等方面存在局限性。本文针对蒸汽发生器检修场景特点, 提出集成化安全控制系统设

计, 通过实时碰撞检测、电缆防缠绕规划与状态监测三位一体的解决方案, 提升机器人系统在复杂工业环境中的作业可靠性。

## 2 系统总体架构

本文设计重载机器人安全监测系统由碰撞检测系统、电缆防缠绕模块、状态监测中心、可视化维修计划管理四大核心模块构成

## 3 关键技术实现

### 3.1 基于运动学的实时碰撞检测

碰撞检测系统系统基于运动学的碰撞检测功能通过实时分析机器人各部件的运动状态、几何构型和环境约束条件, 确保机器人在作业过程中避免与障碍物发生碰撞, 保障任务的安全性和设备的稳定运行。

【作者简介】朱碧波 (1984-), 男, 中国湖北黄冈人, 硕士, 工程师, 从事固体力学研究。

该系统使用包围盒技术,来满足碰撞检测的高实时性要求,其中使用到的包围盒类型包括轴对齐包围盒(AABB)、有向包围盒(OBB)及包围球,并结合分离轴定理快速判定两个对象是否可能发生碰撞。在执行任务时,基于运动学的碰撞检测功能通过实时更新并预测后续轨迹的机器人的关节角度、连杆位移及末端工具的位姿,判断其是否与环境发生碰撞并远离碰撞区域,保证机器人在管板上行走和停止时,不会对蒸汽发生器管束造成损坏,若存在较大碰撞风险,将为操作人员提供报警信息,引导其重点关注。

碰撞的安全计算主要位于 calculate2D 中的 CalCollision 碰撞检测类中(图1),通过包围盒是否存在碰撞风险进行检测。

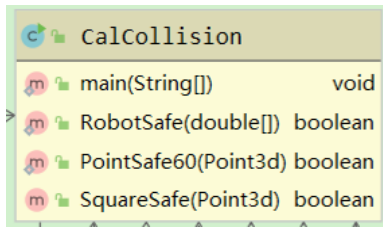


图1 碰撞检测类 CalCollision 所包含的方法

### 3.2 线缆防缠绕模块

机器人在运动过程中,通过旋转圈数算法设计进行电缆防缠绕控制,设置了单方向最大运动圈数(默认2圈),以防止控制柜与机器人之间的电缆过度缠绕,导致设备损坏或任务中断。系统同时支持用户对电缆缠绕的最大圈数进行设置,规划时根据电机角度确定电缆缠绕情况,结合运动规划中的约束项与损失项,自主确定规划轨迹避免电缆及其他管束缠绕[2]。

算法具备以下几类约束条件,以确保线缆的运动符合预定的安全边界:

线缆的最大活动范围:这些约束确保线缆在机器人运行过程中不超过某一限制距离,防止线缆被拉得过长或被迫缠绕,确保线缆在机器人运动时始终处于受控状态。

旋转半径与运动角度的限制:在设计机器人运动轨迹时,需要考虑到线缆的长度和运动范围,尤其是在旋转机构中,旋转半径过大或运动角度过大会导致线缆发生不必要的拉伸或缠绕。因此,运动规划时,设定合理的旋转半径和运动角度,不仅可以有效防止线缆缠绕,还能确保机器人能够顺利完成工作任务。

## 4 系统实现与功能验证

### 4.1 状态监测中心

#### 4.1.1 实时状态查询

实时状态查询模块的核心功能是实时监控和反馈设备及系统各组件的工作状态,涵盖了通讯系统、气动系统、定位平台机器人等关键部分的状态监控。旨在为操作人员提供关于设备和系统各个环节的实时状态信息,为操作人员提供

及时的告警信息,确保系统的可靠性与安全性。

实时的状态查询依托与上位机下位机之间的实时通讯,通讯代码继承在 psocketthread 包中,主要通过 TCP 通讯的方式实现对定位机器人下位机监测到的定位机器人状态,气压状态,启动元件工作状态等的交互。

通讯系统状态监控:通讯系统状态监控模块对整个数据链路进行实时监控,确保机器人与控制中心之间的通讯无障碍。该模块能够实时监控通讯信号的质量,及时向操作人员发出警告,以便进行调整或修复。

气动系统状态监控:该模块实时监控气动系统的气压水平、气动元件的工作状态以及气动系统的整体性能。当气压低于设定范围时,系统会立即向操作人员发出警告,并提示检查气源或气管是否存在泄漏等问题。

定位机器人状态监控:定位机器人的实时状态监控包括当前位置、速度、负载、温度等多项参数,能够帮助操作人员全面了解机器人的运行情况。当检测到末端出现负载过高、运动异常等问题时,系统会及时发出警告,防止设备损坏或任务失败。此外系统提供定时位置确认功能,可设置位置确认间隔时长,如果未及时进行位置确认则弹出报警信息提醒操作人员,充分保证机器人的运行安全。

#### 4.1.2 操作与运行日志

在定位机器人和相关设备的实时运行过程中,日志模块通过对硬件与软件模块状态的精确记录,为操作人员提供了一个高效的管理平台,帮助他们在复杂任务执行和故障排查中更好地定位问题根源、进行实时响应和优化操作。

在系统初始化和操作过程中,主控计算机会启动日志记录系统,并对每一项任务的执行进行监控。每次任务启动、关闭、配置变更以及错误或异常发生时,日志系统都会自动生成相应的记录。这些记录不仅包括设备的运行状态,还涵盖了操作系统、控制系统等软件模块的工作状态。

当设备或系统出现故障时,日志系统能够详细记录故障的发生时间、故障类型、影响设备、错误代码及处理过程。系统会在故障发生的瞬间生成错误日志,并提供系统内部的处理方式。对于一些可恢复的故障,系统会自动进行简单的恢复操作,并记录恢复的时间和结果。

通过 Mediator 类进行日志的添加,在所有有日志生成需求的类的构造函数中加入 mediator 参数变量,使用 mediator 变量的日志添加方法生成日志。

### 4.2 可视化维修计划管理

#### 4.2.1 维修任务的导入与导出功能

维修任务的导入与导出功能使得用户能够便捷地将维修任务数据导入系统,并在任务完成后导出结果进行进一步的分析和记录。通过简洁直观的界面,用户可以轻松地将已设定的维修任务从外部文件导入系统,确保任务数据能够无缝接入平台。在执行完毕后,用户可以将维修结果导出,便于进行详细分析、记录和归档。这一功能不仅提高了数据的

可管理性,也确保了信息的一致性与可追溯性。

#### 4.2.2 维修任务的修改功能

该功能允许用户根据实际情况快速调整维修任务的相关参数,如任务的时间安排、维修工具、维修区域等。无论是由于设备状态更新、工具配置变更,还是维修环境的变化,用户都可以迅速对任务进行灵活调整,确保任务执行时能够满足新的要求。

#### 4.2.3 维修任务进度管理功能

维修任务进度管理是确保维修任务按计划顺利完成的关键功能。通过实时监控维修计划的执行状态,用户可以清晰地了解任务的执行进度,及时发现和解决潜在问题。

系统通过可视化界面展示已维修区域和未维修区域,帮助操作人员直观地掌握任务的进展情况。每当任务中的某个区域完成维修,系统都会自动更新显示,使得操作人员能够随时查看到当前任务的完成情况。实时更新的进度不仅帮助用户清楚地了解当前任务的执行状态,还能让用户在执行过程中随时做出调整,以应对突发的情况。

## 5 实验与分析

在核电站运维场景中,蒸汽发生器作为一、二次侧热量交换的核心设备,其内部检修作业环境具有强辐射、高压、空间密闭等典型高危特征,且现场设备运行状态对安全性要求极高,任何非必要的现场介入均可能引发不可控风险。

为解决上述问题,确保检修机器人系统在进入真实工况前具备稳定可靠的作业能力,本研究采用“先模拟后现场”的验证策略,率先在 1:1 等比例复刻的蒸汽发生器水室及管板模拟体上,对机器人系统的整体功能完整性与关键性能指标进行全面、系统的测试验证。该模拟体测试不仅可规避现场测试的安全风险,还能通过可控的测试环境,实现对机器人作业过程的精准观测与数据采集,为后续现场应用奠定技术基础。

测试平台的核心组成部分为蒸汽发生器水室与管板模拟体,其建造过程严格遵循真实蒸汽发生器一次侧水室的三维几何参数与管板孔阵分布结构[2]。

### 5.1 实验内容与结果

为验证检修机器人系统在蒸汽发生器管板检修场景下的安全可靠性与作业效率,实验围绕自动碰撞检测有效性与准确度这一核心性能指标展开,通过在 1:1 蒸汽发生器管板模拟平台上构建对比实验,将本研究设计的检修机器人系统(本文方法)与传统蒸汽发生器管板检修设备(传统方法)

的关键性能指标进行量化对比。

实验选取碰撞检测延迟、电缆缠绕故障率、维修任务完成率 3 项核心指标用于评价自动碰撞检测性能。

#### 5.1.1 实验结果与分析

实验过程中,两种方法的核心性能指标测试结果如下表所示(表中数据均为多次测试后的平均值):

性能指标	传统方法	本文方法
碰撞检测延迟	28.5ms	5.5ms
电缆缠绕故障率	17.3%	0.8%
维修任务完成率	82.5%	99.2%

由上述实验结果可知,本文设计的检修机器人系统在核心性能指标上均显著优于传统方法。

进一步分析可知,本文方法之所以能实现性能突破,核心在于采用了实时建模的碰撞检测算法与电缆动态张力反馈的路径优化策略:通过在电缆上部署微型张力传感器,实时调整机器人运动姿态以保持电缆张力稳定,避免电缆缠绕。同时,实验结果亦验证了 1:1 模拟体测试平台的有效性——其复刻的真实环境为性能指标的精准测试提供了可靠的实验载体,确保测试结果对现场应用具有直接的参考价值<sup>[3]</sup>。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

本研究针对重载机器人在核工业等高危复杂场景下的作业安全需求,提出并构建了一套融合多维度状态监测与智能运动规划的安全控制框架,形成了覆盖“风险预判-动态约束-综合管理”的全流程安全监测系统。

### 6.2 未来展望

基于本研究的现有成果,结合核工业装备智能化发展趋势,未来将围绕多机器人协同作业的全局避障技术优化、数字孪生技术在预测性维护中的深度应用方向开展深入研究,进一步拓展重载机器人安全监测系统的应用场景与技术深度。

### 参考文献

- [1] 陆军,刘其端,朱齐丹.蒸汽发生器检修六关节机械臂碰撞检测技术[J].计算机仿真,2008,25(9):174-178
- [2] 王磊,张铁民,李娟.细小工业管道群束间狭窄空间检测机器人系统的研究[J].机器人,2015,37(4):498-505.
- [3] 李明,张华,刘强.基于智能化与可靠性的蒸汽发生器检修机械臂软件系统深度设计与实践[J].制造业自动化,2022,44(7):132-136.