

# Research on motion path planning of heavy-load robot for primary side maintenance of nuclear power plant steam generator

Minrong Ji Bibo Zhu Dongli Wang

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

## Abstract

In-service inspection and maintenance of primary-side tube sheets and heat transfer tubes in nuclear power plant steam generators are critical for ensuring nuclear safety and operational efficiency. This environment, characterized by high radioactivity, limited space, and extremely precise operational requirements, poses significant challenges for maintenance robots. This paper investigates the motion path planning and design of a cantilever-type heavy-load positioning robot specifically designed for primary-side steam generator maintenance. The robotic system integrates dual working modes (automatic/manual) and dual payload/light-load configurations to handle complex and variable task scenarios. In motion planning, this study focuses on global path planning methods combining A\* and RRT algorithms. To address the issue of robot cantilever structure displacement under heavy loads, a "small-step" path planning algorithm is proposed. Through software-based logical constraints, the system intelligently regulates the robot's movement range, effectively ensuring equipment stability and operational safety. Although not yet deployed in actual nuclear power plants, experimental verification on 1:1 scale mock-ups demonstrates that the designed motion planning system excels in path precision, obstacle avoidance capability, and payload adaptability. These features meet the stringent requirements for primary-side steam generator maintenance, establishing a solid technical foundation for future engineering applications.

## Keywords

Steam generator; One side maintenance; Heavy duty robot; A\* algorithm; Small step planning

# 核电站蒸汽发生器一次侧检修的重载机器人运动路径规划研究

吉敏荣 朱碧波 王东利

中广核核电运营有限公司, 中国·广东深圳 518124

## 摘要

核电站蒸汽发生器一次侧管板及传热管的在役检查与维护是确保核安全与电站运行效率的关键环节。该环境具有高放射性、空间受限及操作精度要求极高等特点,对检修机器人提出了严峻挑战。本文针对一种专用于蒸汽发生器一次侧检修的悬臂式重载定位机器人,开展其运动路径规划设计研究。该机器人系统集成了自动/手动与重载/轻载双重工作模式,以应对复杂多变的任务场景。在运动规划层面,本文重点研究了基于A\*与RRT算法的全局路径规划方法,并针对机器人悬臂结构在重载下易发生偏移的问题,提出了一种“小步距”路径规划算法,通过软件逻辑智能约束机器人的运动范围,有效保障了设备稳定性与操作安全。尽管该设备尚未在实际核电站现场投入应用,但在1:1模拟件上进行的实验验证表明,所设计的运动规划系统在路径精度、避障能力与负载自适应方面均表现出色,能够满足蒸汽发生器一次侧检修的严苛要求,为后续工程应用奠定了坚实的技术基础。

## 关键词

蒸汽发生器; 一次侧检修; 重载机器人; A\*算法; 小步距规划

## 1 引言

核能作为一种清洁、高效的基荷能源,在全球能源结构中占有重要地位。蒸汽发生器作为压水堆核电站一回路与二回路之间的关键边界,其内部包含数千根传热管。这些传

热管长期承受高温、高压、高流速介质冲刷以及振动等复杂载荷,是腐蚀、磨损和裂纹等缺陷的高发区域。一旦发生破裂,可能导致放射性介质泄漏至二回路,引发严重的核安全与环境问题<sup>[1]</sup>。因此,定期对蒸汽发生器一次侧进行无损检测与必要的维修,是核电站停堆大修期间的核心工作,其效率与质量直接关系到大修工期与电站的经济性。目前,该领域的检修工作正逐步从传统人工作业向机器人化、自动

【作者简介】吉敏荣(1988-),男,中国江苏南通人,工程师,本科,从事核工程与核技术研究。

化方向演进。然而，蒸汽发生器一次侧检修机器人面临着一系列独特挑战。针对以上挑战，本文设计了一款悬臂式重载检修定位机器人，并对其核心运动路径规划系统进行了深入研究。本文首先介绍了机器人系统的总体设计与双重工作模式，然后详细阐述了基于A\*与RRT算法的运动规划策略，并重点分析了为解决重载下结构稳定性而提出的“小步距”规划算法。最后，通过模拟件实验验证了所提方案的有效性，并对未来工作进行了展望。

## 2 系统总体设计与工作模式

### 2.1 系统架构概述

该重载检修定位机器人系统主要由三大部分构成：机械本体与驱动系统、控制硬件系统以及软件与算法系统。系统通过传感器反馈构成闭环控制，是实现精确运动规划的基础。

### 2.2 双重工作模式设计

为提升任务适应性、效率与安全性，系统设计了可从自动化程度和负载能力两个维度进行切换的工作模式。

#### 2.2.1 自动/手动模式

自动模式：在此模式下，机器人根据预先设定的检修任务序列和运动规划参数，自主完成路径计算与运动执行。该模式高度依赖于后台的运动控制算法与智能规划功能，适用于大批量、标准化的检测任务。

手动模式：当遇到非预期障碍物或需要进行精细调整时，操作员可进行实时遥操作。手动模式保留了关键的人工干预能力，是应对复杂和不确定情况的必要保障。

· 无缝切换机制：系统支持在自动任务执行过程中被随时中断并切换至手动模式，完成手动操作后，系统支持无缝切回自动模式，并基于当前的位置和状态重新计算路径，完成剩余的任务。确保了任务流程的连续性与操作的高效性。

#### 2.2.2 重载/轻载模式

蒸汽发生器检修任务多样，根据传热管不同类型的检修场景，需搭载不同重量类型的工具头进行作业。其中检修定位平台机器人和某些工具头的重量比超过了1:1，而传统的机器人的自重与负载比（即自重负载比）通常在2:1到5:1之间。较大的自重负载比差距导致工具头的存在极易影响检修定位平台的姿态。且由于检修定位平台的机械构型为悬臂式构型，工具头的安装位置位于悬臂的末端，在进行运动的过程中，如果运动到悬臂较长的姿态，很容易导致悬臂由于负载过大进而倾斜。悬臂的倾斜会导致两个问题：一是安装在悬臂本身上的用于抓持管板的卡爪会无法对准管孔，进而导致无法进行抓持操作或直接导致卡爪无法伸入管孔；二是堵管工具的作业接头无法精准定位到作业管孔，无法实施作业。为优化不同负载下的机器人性能，系统设计了重载与轻载两种模式。

重载模式：当搭载重型工具时，系统切换至重载模式。

在此模式下，控制系统优先保证运动的稳定性和设备的结构安全。通常会通过降低最大运动速度、限制加速度以及启用“小步距”算法来约束运动范围。

轻载模式：在执行快速扫描、定位等低负载任务时，系统切换至轻载模式。该模式通过提升运动速度和关节运动的灵活性，旨在最大限度地提高作业效率。

自适应切换：系统在任务规划阶段，可根据操作员输入的负载类型或通过关节力矩传感器的实时反馈，自动判断当前负载状态并推荐或直接切换至相应模式。

## 3 运动规划系统设计

运动规划是机器人实现自主作业的核心，其目标是在满足所有几何、动力学及任务相关约束的前提下，为机器人找到一条从起始状态到目标状态的安全、高效运动路径。系统根据目标点和机器人当前的位置，自动计算出一条可以安全、有效地到达目标的路径，并自动完成机器人的定位和移动。系统会考虑到任务的要求、机器人末端的工作空间、环境的约束等因素进行带约束条件优化的问题的求解，确保生成的轨迹在执行时不会发生超出限制的动作。

### 3.1 路径规划算法框架

针对蒸汽发生器管板环境的结构化特征与可能存在的未知障碍，综合考虑安全性、高效性、精确性，本系统采用了A\*算法与RRT算法相结合的混合规划策略。

· A\*算法：这是一种在栅格化地图中非常有效的启发式搜索算法。在已知的、结构化的管板地图中，A\*算法能够快速规划出全局最优或次优的无碰撞路径。系统将管板平面离散化为栅格，每个栅格代表一个可能的工具头定位点。

· RRT算法：对于水室内部更为复杂的三维空间避障问题，RRT算法作为一种概率完备的算法，通过随机采样在构建空间中快速生长一棵搜索树，特别适合于解决高维空间和带有复杂几何约束的路径规划问题<sup>[2]</sup>。当机器人臂架需要在水室内进行大范围姿态调整以避让障碍时，RRT算法表现出更强的适应性。系统在实际运行中，首先在二维管板平面使用A\*算法进行粗定位，随后在三维空间中使用RRT算法进行臂架的精细避障规划，两者协同工作，兼顾了效率与可靠性。

### 3.2 轨迹优化与安全保证

在搜索得到一条几何路径后，还需进行轨迹优化。优化过程综合考虑了机器人的动力学约束、任务要求以及能耗。同时，系统集成了实时碰撞检测模块，在规划阶段和甚至执行阶段都对可能的碰撞进行预判与规避，确保了与周围环境的绝对安全。

### 3.3 面向重载稳定性的小步距路径规划算法

本系统所采用的悬臂式结构在重载模式下面临一个关键挑战：当工具头运动至远离基座中心的步位时，悬臂梁效应会导致末端产生显著的弹性变形和下挠，不仅影响定位精度，更可能超出结构强度极限。为解决这一问题，本文提

出并实现了一种创新的“小步距”路径规划算法。该算法的核心思想是：通过软件逻辑，在重载模式下智能地限制机器人的运动范围，将其作业能力约束在靠近基座、结构刚度更高的前三个步位内，而主动放弃使用力矩风险较高的后四个步位。王建国等人在重载机械臂控制方面的研究指出，通过轨迹约束管理负载动能是保证稳定性的有效手段，本研究在此基础上进一步将力学约束前置置于路径规划阶段。具体实现机制如下：1. 配置层限制：在机器人的系统配置界面，当操作员选择“重载运动模式”时，该算法即被激活。2. 人机交互层限制：在手动操作界面上，代表后四个步位的操作按钮或区域被置灰、无法点选，从交互层面杜绝了操作员的误操作。3. 规划层限制：在自动运动规划过程中，路径搜索器在构建可选的机器人姿态集合时，会主动将后四个步位所对应的姿态从搜索空间中移除。通过这种贯穿配置、交互与规划三层的联合限制，确保了在重载模式下，机器人的运动轨迹都被严格限定在安全区域内。这使得路径规划过程始终在机器人结构动力学的安全边界内进行，从根本上降低了因悬臂过长、末端负载过重而导致的力矩过大风险，有效防止了设备损坏，确保了检修作业的安全。

### 3.4 算法实现类结构

路径计算的核心算法被封装在一个名为 `calculate2D` 的软件包中。该包包含了实现上述功能所需的多个协作类。这些类通过清晰的接口相互调用，共同构成了一个模块化、可维护的运动规划软件核心。

## 4 模拟件实验与验证

核电站作为高风险、高复杂度的工业设施，其检修工作面临着辐射环境、空间受限、人员准入严格等多重挑战。为此，研发团队构建了一个 1:1 高精度蒸汽发生器水室与管板模拟测试平台，为检修机器人系统提供了全面的功能与性能验证环境。

### 4.1 实验平台搭建

该模拟平台严格依据真实蒸汽发生器一次侧水室的几何尺寸和管板布局进行建造，确保了测试环境与实际工况的高度一致性。机器人系统被精确安装于模拟蒸发器人孔入口，其工作范围可以覆盖整个管板区域，以便充分验证机器人在核电站狭小空间内的操作的可行性与适应性。

### 4.2 实验内容与结果

实验主要围绕以下几个维度展开：

路径规划成功率与精度测试：在管板上随机选取上百个起始点与目标点，进行自动路径规划与定位测试。结果表明，在轻载模式下，系统路径规划成功率达到 99.5%，末端重复定位误差小于  $\pm 1.5\text{mm}$ ，远高于传热管检测通常所需

的  $\pm 2\text{mm}$  精度要求。这验证了 A\* 等算法在结构化环境中的有效性<sup>[3]</sup>。

重载模式与小步距算法有效性验证：在机器人末端加载模拟重型工具的配重，分别对比启用和禁用“小步距”算法时的情况。实验数据清晰表明，启用该算法后，系统通过限制运动范围，将悬臂末端的最大位移偏差控制在允许的安全范围内，证实了该策略对于维持重载稳定性的关键作用，与相关研究结论相符<sup>[4]</sup>。

模式切换响应与避障测试：模式切换测试表明系统响应迅速。避障功能测试则证明，融合了 RRT 的规划器能够有效地在复杂空间内重新规划路径，绕开障碍物抵达目标点。

## 5 结语

本文针对核电站蒸汽发生器一次侧检修的特殊需求，成功设计并开发了一套集成了双重工作模式与先进运动规划算法的重载机器人系统。通过对 A\* 与 RRT 算法的融合应用，系统具备了在复杂受限空间内高效、安全规划路径的能力。尤为重要的是，针对悬臂式结构在重载下的稳定性难题，本文提出的“小步距”路径规划算法，通过软件智能限位，巧妙地将力学约束转化为规划空间的约束，为类似重载机器人的安全设计提供了新思路。

模拟件上的大量实验充分验证了该运动规划系统的可靠性、精确性与安全性，各项关键性能指标均满足蒸汽发生器检修的预定义要求，为核电站检修向智能化、高精度方向发展提供了关键技术支撑。

尽管该系统已在模拟环境中证明了其潜力，但走向真实的核电站应用仍面临挑战，也是我们未来的研究方向：首先，需要在真实核电站环境下进行最终验证；其次，可进一步研究融入深度学习等 AI 技术，提升算法的智能水平；最后，构建高保真数字孪生模型，实现远程运维与虚拟调试，是提升工程应用可靠性的重要途径。

综上所述，本研究为解决核电站关键设备检修的自动化难题提供了可行的技术方案，具有良好的工程应用前景。

## 参考文献

- [1] 卢炎聪, 李磊. 核电站蒸汽发生器传热管无损检测技术发展综述[J]. 核动力工程, 2020, 41(S1): 156-160.
- [2] 张鹏, 赵晓辉, 王建华. 基于改进RRT算法的冗余机械臂在受限空间路径规划[J]. 机器人, 2019, 41(4): 546-554.
- [3] 李明, 刘伟. 基于A\*算法的移动机器人全局路径规划研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(10): 245-250.
- [4] 王建国, 陈志强, 周涛. 重载机械臂轨迹规划与振动抑制控制策略[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 142-149.