

市政管网复杂工况下管道机器人自适应检测路径规划方法与实践

廖 帅

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730)

摘要 市政管网在城镇更新与水环境治理中呈现复杂非标准化工况, 迫切需要具备环境感知与路径自主决策能力的管道机器人参与检测作业。本文聚焦复杂工况下的市政排水管网, 研究了典型工程环境下的障碍类型、结构形态及通行难点, 分析了机器人在异形断面、淤积、急弯等多类场景中的适应机制与功能边界, 梳理了现有检测系统的能力匹配与技术瓶颈。在此基础上提出一套面向非结构化工况的自适应路径规划方法, 结合工程案例进行算法建模与路径优化设计, 探讨其在动态环境约束、节点决策与全局可达性控制中的工程实现策略。研究成果旨在为城市排水管网的智能化检测提供技术参考, 进而推动机器人技术在地下空间自主作业中的实用化进程。

关键词 市政管网; 管道机器人; 复杂工况; 自适应路径规划

中图分类号: TU990.3; TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.012

0 引言

随着城市排水系统的老化与地下空间利用密度的不断提高, 市政管网呈现出管径变化频繁、结构复杂、空间交错等非标准化特征, 传统人工检测手段在安全性、精度与覆盖范围上难以满足工程需求。高精度、自动化的管道机器人逐步成为复杂工况下管网检测的关键装备, 然而实际应用中面临的淤积障碍、变截面通道和突发水流扰动等问题, 对其路径规划能力和环境适应能力提出了更高要求。复杂空间约束条件下的路径规划算法与导航策略成为制约检测效率与准确性的核心因素。

1 工程概况

大空港全面消黑工程与茅洲河综合整治工程均位于深圳市宝安区, 覆盖福永、福海、松岗、燕罗等多个街道, 地下排水系统规模庞大, 总管网长度超过400公里, 包含污水管、雨水管、沟渠、立管等多类管道结构。工程内容涉及老旧管网的拆除与新建、清淤修复、正本清源改造、小微水体整治等作业类型, 需对管网内部状况进行大范围高精度检测。排水小区数量超过250个, 节点密集, 通道变化频繁, 部分区域存在非标准接口与历史遗留结构。

2 市政管网复杂工况分析

市政排水管网在实际运行过程中呈现出高度复杂的非结构化特征, 部分区域受历史建设滞后与改造断

层影响, 存在接口不匹配、管径突变、断面变形与接驳混乱等情况, 导致机器人检测路径难以稳定规划^[1]。大型区域如茅洲河与大空港工程覆盖范围广, 排水系统交错密集, 节点转角半径小于0.5 m的急弯管段频繁出现, 常伴有局部沉积、淤积或堵塞现象, 形成多点不规则障碍。部分老旧小区和城中村区域, 管道埋深不一, 坡度不连续, 管道材质混杂, 存在圆形、矩形和卵形等不同断面形式, 结构老化导致壁面附着物增加, 对机器人行进姿态与传感器识别形成干扰。多处片区存在明暗渠交替段, 环境光差异剧烈, 引发视觉感知系统误判风险。部分工程段落涉及弱电、燃气和供水等共构管道, 管腔内电磁干扰强烈, 对定位与通信模块稳定性构成挑战; 在雨季工况下, 瞬时流量骤增导致水位波动剧烈, 机器人需具备一定的自主决策能力以规避突发水流冲击^[2]。

3 管道机器人在市政管网检测中的应用

3.1 管道机器人技术概述

市政管网检测任务对智能化作业平台提出了高集成度、抗干扰性和复杂路径适应能力等技术要求。机器人装备结构以履带式或轮式模块为主, 搭载惯性导航单元、激光扫描模组、水下推进组件和视觉识别系统, 实现对管道空间环境的连续感知与定位控制。为应对城市地下管网中频繁变化的结构断面及材质差异, 机器人主体普遍采用模组化设计, 以应对不同坡度、

不同直径管道的切换通行。检测任务以视频巡检、激光轮廓重建和三维定位为主，部分类型采用融合式传感配置，将激光雷达、陀螺仪、视觉光流、压力传感器等多源数据进行时空配准，提高定位精度和建图稳定性。针对排水管道中湿滑、泥沙、水流扰动环境，驱动组件配有密封胶带、防滑履带与水密壳体，满足长期入管作业条件。机器人电源系统采用高能锂电池与低功耗控制算法结合设计，单次检测任务时间可达 4 小时以上。数据回传采用有线缆脐带与无线信号切换机制，结合中继增强节点以穿透复杂结构区域。控制方式支持远程命令触发、自主路径规划与预设任务序列，在动态环境中实现管段自识别、自规避与目标对准。

3.2 机器人在复杂工况下的适应性

非结构化空间条件对检测路径规划和通行姿态控制构成动态约束，机器人适应性主要依赖多源感知与结构响应机制协同运行。管径突变段，机器人通过高频激光测距模组与视觉边界提取算法识别前方断面变化，以电动伸缩式支撑臂完成主动调整，实现圆形管与矩形、卵形等异形断面间的稳定过渡。针对淤泥沉积、水中悬浮颗粒引发的轮系打滑问题，运动模组设计高抓地摩擦层，并联实时扭矩反馈回路动态控制左右轮差速比，使其保持稳定直线行进。遇管道急弯和三通接口节点时，惯导系统联合编码器对转角幅度做快速修正，调用路径预设规则集自动切换航向策略，避免惯性漂移导致的偏航失稳。老旧管道常伴随表面结构脱落与障碍物堆积，激光雷达扫描频率调高至 30 Hz 以上，配合图像流重建出动态障碍地图，实现局部路径在线更新^[3]。地下空间多存在强干扰磁场与弱光环境，系统禁用磁性元件，引入纯视觉惯导融合定位，夜间光源采用 LED 线性阵列提升均匀度与对比度。在水位不稳定区域中，机器人借助压力传感器阵列构建纵向剖面图，识别坡度变化趋势，提前减速或进入低功耗观测模式，以规避水流扰动风险。

3.3 机器人检测系统的技术优势与局限性

在复杂工况下，机器人检测系统较人工或传统探头方式具备更高的适应性和数据完整性。视觉—激光混合检测模式可获取二维图像与三维结构数据，满足管内结构形态重建、缺陷识别与方位定位等多种作业目标^[4]。多自由度机动结构具备横跨异径管、急弯管与直立井的连续通行能力，可实现对非标准接头、偏心连接等隐蔽风险点的近距离探测。数据链支持断点续传和中继转发，提升长距离管段信息传输的稳定性

与完整性。任务执行过程中具备路径自适应与多点识别能力，减少人工干预次数，提升作业效率。

在局限性方面，机器人检测依赖环境传感器与视觉感知，在高反光、强水流或管壁结构失稳区域可能导致数据丢帧或误判。路径规划过程中在连续三通或环形管段中存在路径重复判定问题，需引入全局拓扑结构信息辅助决策。电源续航与通信稳定性仍受物理结构限制，尤其在深埋、封闭管段中存在信号衰减与控制延迟风险。激光雷达对高湿环境敏感，长时间处于高湿或泥沙浓度高的区域可能导致窗口污染，影响测距精度。结构通用性仍有限，对于超大口径或微型支管仍需配备专用结构模块，影响任务调度的灵活性。

4 自适应路径规划方法

4.1 路径规划的基本原理

路径规划任务基于空间建图与可达性分析，在结构复杂、障碍密集的地下管网环境中，融合几何拓扑模型与实时传感信息来构建通行可行域并计算最优路径。城市排水管道空间呈现线性段与节点交错的拓扑结构，路径搜索需在保证机器人结构约束内的前提下实现状态转移。常用路径规划模型包括基于图搜索的 A*、D* 算法，基于采样的 RRT 与 PRM 算法，以及融合路径平滑与碰撞检测的混合方法。为实现多场景自适应，路径规划架构同时考虑局部避障与全局寻优，感知模块输出实时地图，经动态更新后提供给导航模块进行路径重规划。如图 1 所示，路径计算依赖于传感器采集的环境信息、位姿估计与管网结构模型三者融合输出的局部可行图。

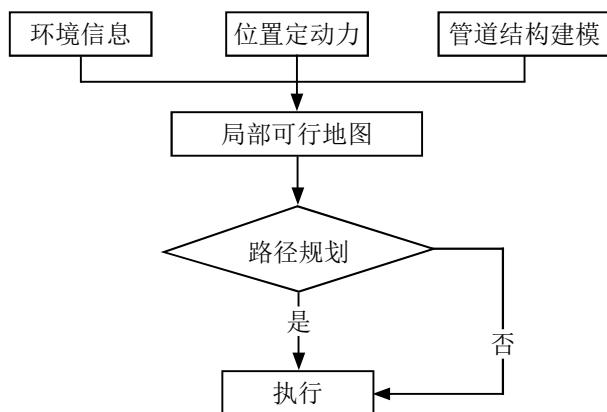


图 1 管道机器人路径规划逻辑流程图

通行路径以目标点为吸引子，构造代价函数进行多路径评价并综合考虑路径长度、能耗估算、转向次数以及结构风险系数等多项指标。约束条件包括最小

转弯半径 R_{min} 、最大坡度 θ_{max} 、最小通行断面 S_{min} 等，对路径可行性进行过滤，避免不适宜段干扰导航精度。

4.2 自适应路径规划方法的设计

在市政管网复杂工况下，传统静态图规划方法效率高，自适应路径规划采用分层结构设计，包括环境感知层、路径计算层与行为决策层，基于任务状态实时反馈实现规划策略切换。感知层实时采集断面形态、坡度、通行宽度与水位深度等信息，构建动态网格地图；路径计算层采用改进型 A* 算法，以最小通行代价函数为核心构建路径搜索结构，结合动态窗口避障模型进行局部修正。在路径计算过程中，引入多目标代价函数：

$$f(x) = \alpha \cdot d(x) + \beta \cdot c(x) + \gamma \cdot r(x) \quad (1)$$

式(1)中， $d(x)$ 为当前节点到目标节点的欧式距离， $c(x)$ 为单位路段的运动能耗， $r(x)$ 为路段结构风险评价函数， α 、 β 、 γ 为权重参数，依据工况实时调整。感知层反馈通行障碍密度与环境扰动等级，自动切换路径规划策略。当结构变化剧烈时，进入高频重规划模式，每 10 秒内进行路径修正；当连续路径转角超过三次或水流扰动超过阈值，路径节点采用冗余双节点规划，避免路径失败引发导航中断。

行为决策层以任务阶段为依据划分导航优先级：通行路径节点 > 避障策略 > 结构适应策略 > 路径平滑修正。机器人进入交叉节点区域时调用本地拓扑图，对多通道接口进行选择排序，依据前方三段路径的总通行代价判断优先方向。特殊断面区域采用曲线拟合策略，进行路径平滑插值，提升姿态控制稳定性。任务中存在多段明暗渠、非标准接头、不同结构接口的复杂混合环境时，系统识别高风险区段并添加路径缓冲节点，每隔 5 m 插入观测节点，提升路径追踪容错能力。

4.3 基于复杂工况的路径优化技术

管道机器人路径规划需在不规则空间中保证导航精度与通行效率，路径优化技术聚焦在以下三个方面展开：路径冗余优化、结构动态补偿、执行反馈增强^[5]。路径冗余优化针对重复路径、局部回环与死角探测区，采用图剪枝与路径压缩算法，在路径图中移除重复节点与冗余转向点，提升执行效率。三通管段区域采用拓扑图等价压缩方式，统一三入口编号，通过编号映射优化路径决策流程，提升节点识别速度。结构动态补偿模块实时接入坡度、断面变化与通行限制条件，计算路段的修正向量，对导航轨迹进行微调。断面变化率高的片区（如罗田片区与塘下涌工业区）路径

段更新频率增加，调度模块依据断面识别可信度阈值设定路径修正权重，实现动态通行能力调整。

执行反馈增强机制将实际轨迹与预设路径进行对比，构建轨迹误差分布图，计算偏移量并用于路径生成算法中的节点权重修正。在茅洲河中心片区实验中，引入轨迹重建模块后整体路径偏移误差均值下降至 0.08 m，提升了路径一致性与控制精度。对于特定区域如明暗渠交接点、拐角死角区，规划算法引入动态窗口避障模型结合曲率约束，提升机器人在有限可视区域内的路径自治性。为量化路径优化策略在典型复杂工况下的实际成效，对多个工程区域实施前后的路径长度、误差水平、路径结构重复率与规划响应时间进行统计比较，结果如表 1 所示。

表 1 路径优化前后关键性能指标对比表

工区名称	优化前 平均路 径长度 (m)	优化后 平均路 径长度 (m)	偏移误 差均值 (m)	回环出 现次数 (次 / km)	平均规 划响应 时间(s)
大空港四 工区	21.30	17.60	0.13	5.20	3.40
茅洲河一 工区	16.10	12.20	0.10	4.70	3.10
松岗街道	13.60	9.70	0.08	3.80	2.70

5 结束语

在市政管网复杂工况背景下，管道机器人需具备强环境感知与路径适应能力，研究围绕非结构化障碍类型、导航通行机制与路径优化策略进行了系统建模，构建了基于多源感知与多目标代价函数的自适应路径规划方法。在实际工程中完成路径动态重构与决策精度验证，结果表明该方法可有效提升复杂环境下的定位连续性与导航鲁棒性，为提升城市排水系统智能检测能力和地下空间作业自动化水平提供了实用的工程路径。

参考文献：

- [1] 闻育民,赵研,高科,等.地下管道清理自平衡自适应机器人结构设计与分析[J].机械设计,2025,42(07):26-35.
- [2] 李婷钰,李贵,裴晓宇,等.新风系统管道清理机器人结构设计与仿真分析[J].机械设计与制造,2025(09):315-319.
- [3] 常祺,闫宏伟,牛海龙,等.管道巡检清理机器人管内运动分析[J].机械传动,2024,48(10):155-163.
- [4] 刘昊,曹苏群.一种主动自适应管道机器人的设计[J].机械工程师,2024(08):75-79.
- [5] 丁春雄,傅姜,王海涛,等.基于爬行机器人技术的管道内壁相控阵超声检测[J].无损检测,2024,46(10):1-6.