

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.042

城市轨道交通车站机电设备机器人智能巡检方法

王子龙

(中铁二十三局集团第六工程有限公司,重庆 400012)

摘要: 机器人巡检过程中传感器内部噪声和安装偏差等因素会引入误差,仅针对单一误差源进行校准,易导致机器人导航与定位精度下降,偏离预定巡检路径。为此,提出一种城市轨道交通车站机电设备机器人智能巡检方法。利用高斯投影技术进行巡检环境建模,将地理坐标转换为平面坐标以获取完整工作环境地图。针对随机误差和系统误差分别建立通用误差模型与姿态误差模型,并引入多目标优化克隆算法进行误差校准,生成众多不同的误差校准候选解,并通过克隆和变异操作不断优化这些解,以适应多种误差源的复杂变化,显著提升机器人的导航精度。采用改进蚁群算法规划最优巡检路径。实验结果表明:所提方法在保证巡检质量基础上,能最大限度地提升巡检效率和安全性,为城市轨道交通车站运维管理提供创新且高效的解决方案。

关键词: 轨道交通;机电设备;智能巡检;路径寻优;改进蚁群算法

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0224-05

Intelligent Inspection Method for Mechanical and Electrical Equipment Robots in Urban Rail Transit Stations

WANG Zilong

(6th Engineering Co., Ltd., China Railway 23rd Bureau Group, Chongqing 400012, China)

Abstract: During the process of robot inspection, errors like internal noise and installation deviation of sensors may occur, among which a single error source calibrated only tend to cause a decrease in the navigation and positioning accuracy of the robot, deviating from the predetermined inspection path. Therefore, a robot intelligent inspection method for mechanical and electrical equipment in urban rail transit stations is proposed. Gaussian projection technology is used to model the inspection environment, converting geographic coordinates into plane coordinates to obtain a complete working environment map. A general error model and an attitude error model are established for random errors and systematic errors respectively. With the introduction of a multi-objective optimization cloning algorithm, error calibration is conducted, generating numerous different candidate solutions for error calibration. And the solutions are continuously optimized through cloning and mutation operations to adapt to the complex changes of multiple error sources, significantly improving the navigation accuracy of the robot. An improved ant colony algorithm is used to plan the optimal inspection path. The experimental results show that the proposed method can maximize inspection efficiency and safety as well as ensure inspection quality, which provides innovative and efficient solutions to the operation and management of urban rail transit stations.

Keywords: rail transit; mechanical and electrical equipment; intelligent inspection; path optimization; improving ant colony algorithm

0 引言

作为城市公共交通的骨干网络,轨道交通车站的安全、高效运营对保障市民出行、促进城市发展具有重要意义^[1]。传统人工巡检在面对大规模、高密度的车站机电设备布局时,越发凸显其局限性。探索一种高效、智能的巡检方式,已成为提升城市轨道交通车站机电设备管理水平的关键^[2-3]。不同领域的学者给出以下方案。金波

等^[4]计算巡检环境空间数据的同时,利用门循环神经网络完成机器人巡检路径规划算法,但未校准传感器误差,导致其路径偏离最优,影响巡检质量。张伟刚等^[5]针对巡检机器人避障问题,运用阿基米德螺旋曲线扩大全局搜索范围,借鉴黄金正弦算法更新猎物位置,输出机器人路径规划结果,但未校准传感器误差,导致路径偏离最优,影响巡检质量。SECIL 等^[6]使用 Gilbert Johnson-Keerthi 算法在胶囊之间进行最小距离计算,完成

基金项目: 中铁二十三局集团有限公司引导课题项目(2024500001000894)

作者简介: 王子龙(1991—),男,重庆人,工程师,本科,研究方向为工程技术工作,wangtingting01155@163.com。

机器人路径规划,但误差导致猎物位置计算不准确,增加巡检难度。薛光辉等^[7]融合 D * Lite 算法,实现路径实时规划,但误差导致路径偏离最优,增加巡检时间和难度。为此,本文提出一种基于改进蚁群的算法的机电设备机器人智能巡检方法。

1 城市轨道交通车站机电设备巡检环境建模

在城市轨道交通车站机电设备巡检过程中,机器人需要在复杂且多变的环境中自主导航和巡检。为了确保机器人能够准确地识别路径、避开障碍物并高效地完成工作,必须首先对其工作环境进行精确建模。为此,本研究利用高斯投影技术,为机器人巡检提供精确的空间信息基础。该技术通过转换地理坐标为直角坐标系坐标,并结合对工作空间边界和障碍物的处理,初步构建了巡检环境。

如果机器人当前位置为点 A,其地理位置坐标为 (L, W) , L, W 依次表示经、纬度。为使机器人在其操作环境中可精确定位并创建地图,地理坐标要转换成直角坐标系中的坐标 (x, y) 。高斯投影基本概念为:椭圆柱与地球椭球体在特定经线上横切,相切的经线为中央经线。将位于中央经线两侧具有相同经度差异的两条子午线之间的地带投影到椭圆柱面上,然后展开成平面^[8],带状的经纬线网格被称为高斯投影带。

假设地球是一个椭球体, c 为长半轴长度; d 为短半轴长度; g_1 为第一偏心率; g_2 为第二偏心率。其计算公式为:

$$g_1 = \sqrt{\frac{c^2 - d^2}{c^2}} \quad (1)$$

$$g_2 = \sqrt{\frac{c^2 - d^2}{d^2}} \quad (2)$$

利用高斯投影转换公式,将地理坐标 (L, W) 转变为工作区域内的平面坐标 (x, y) ,此过程的精度可达到 0.015 m:

$$\begin{cases} x = X + \frac{M}{2} \sin W \cos W l^2 + \frac{M}{24} \sin W \cos^3 W (5 - t^2 + 9\gamma^2 + 4\gamma^4) l^4 \\ y = M \cos W l + \frac{M}{6} \cos^3 W (1 - t^2 + \gamma^2) l^3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: X 为子午线长度; M 为曲率半径; l 为 A 点经度与中央子午线经度的差值^[9]; t 为纬度正切值;

γ 为第二偏心率与 A 点纬度余弦的乘积。根据上述步骤收集所有障碍物的坐标点数据后,最终完成轨道交通车站机电设备巡检环境的建模。

2 机器人导航误差分析与校准

在复杂的城市轨道交通车站环境中,机器人执行巡检任务时依赖于高精度的导航系统。然而由于传感器内部噪声、安装偏差等因素,导航系统不可避免地会产生误差,这些误差可分为随机误差和系统误差两类^[10]。为了提升机器人的导航性能,确保巡检任务的准确与高效执行,本研究采用了多目标优化克隆算法对导航误差进行分析与校准。

针对随机误差,陀螺仪是用于测量误差的关键部件之一,巡检机器人导航坐标系中,3 个轴向上的任何漂移都会影响陀螺仪准确性^[11]。假设每个轴向的漂移在导航坐标系内具有相同的误差特性,建立一个适用于陀螺仪的通用误差模型,记作:

$$\mu = \psi_g + \mu_r x + \eta_b y \quad (4)$$

式中: ψ_g 为白噪声; μ_r 为慢变漂移, η_b 为启动漂移。

在系统误差方面,设定 λ_e 为东向姿态误差角变化率, λ_n 为北向姿态误差角变化率, λ_u 是天向姿态误差角变化率。基于此构建出机器人姿态误差模型,记作:

$$\begin{cases} \lambda_e = \lambda_{ef} \mu + \frac{v_e}{h + P_e} - \zeta_e \\ \lambda_n = \lambda_{ef} \mu + \frac{v_n}{h + P_n} - \zeta_n \\ \lambda_u = \lambda_{ef} \mu + \frac{v_u}{h + P_u} - \zeta_u \end{cases} \quad (5)$$

式中, v_u, v_n, v_e 分别为天向速度、北向速度和东向速度的变化率; λ_{ef} 为中心速率; P_e, P_n, P_u 分别为相对的巡检机器人导航确定性数值; h 为相对高度; $\zeta_e, \zeta_n, \zeta_u$ 依次为表相对的巡检机器人导航随机值。

在通用误差模型与姿态误差模型中引入多目标优化克隆算法进行误差校准。该算法融合了生物免疫系统原理与个体优势排序机制,在处理复杂且模糊的导航误差问题时展现出显著优势。求解过程如下:

通过 Pareto 快速排序法得到初始克隆群体 $B(k)$ 的最优解 $B_n(k)$,把最优解被复制进记忆存

储单元 $O(k)$ 。 $\phi[O(k)]$ 是和记忆存储单元 $O(k)$ 相关的抗体和抗原之间的亲和程度^[12-13],其计算方式为

$$\phi[O(k)] = \lambda_e \lambda_n \lambda_u + \{\phi[O_1(k)], \dots, \phi[O_N(k)]\} \quad (6)$$

利用式(6)对克隆群体 $B(k)$ 实施变异操作,得到种群 $E(k)$ 。

$$E(k) = B(k)q_i + \Delta(r, z)\phi[O(k)] \quad (7)$$

式中: q_i 为变异系数; $\Delta(r, z)$ 为匀称分布在 $[0, 1]$ 区间的随机值。

在明确 $\phi[O(k)]$ 的前提下,对种群 $E(k)$ 采取选择计算,输出种群 $F(k)$ 。

$$F(k) = \max\{e_{ij}(k)\}E(k) \quad (8)$$

式中 $\max\{e_{ij}(k)\}$ 为最高巡检机器人导航位置偏差。

重复执行式(7)、式(8)的操作,达到最高迭代量后,输出记忆单元内的抗体信息,得到误差概率模型最优解,达到巡检机器人导航误差校准目标。根据上述步骤,得到机器人误差校准结果,如图1所示。

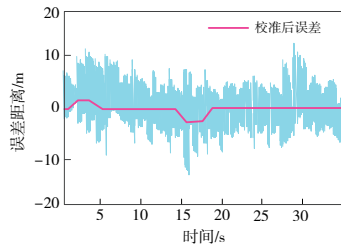


图1 机器人误差校准结果

根据图1可以看出,多目标优化克隆算法在误差校准方面表现出色,这显著降低了机器人的导航系统误差。

3 改进蚁群算法下机电设备机器人智能巡检方法

在城市轨道交通车站环境中,机电设备分布复杂,仅依靠误差校正无法实现机器人智能巡检。为此,本研究提出改进蚁群算法,通过重新定义启发函数和优化信息素更新机制,提升全局寻优能力和收敛速度,同时采用支持向量机算法对机电设备状态进行分类检测,构建完整的智能巡检方法。

蚁群算法模拟蚂蚁寻找食物的行为,蚂蚁通过释放信息素标记路径,信息素浓度高的路径指

示最优路线。为加速寻优,引入信息素蒸发机制,按式(9)更新信息素水平,提高算法效率。

$$\vartheta_{ij}(t+1) = (1-\sigma)\vartheta_{ij}(t) + \sigma\Delta\vartheta_{ij}(t)F(k) \quad (9)$$

式中: $\vartheta_{ij}(t)$ 为蚂蚁在节点 i, j 之间残留的全局信息素; σ 为挥发因子; $1-\sigma$ 为残留因子; $\Delta\vartheta_{ij}(t)$ 为蚂蚁遗留的信息素。

蚂蚁选择路径时不仅受到信息素浓度影响^[14],当决定下一个移动节点时,也会优先考虑邻近节点。定义一个启发式函数 ξ_{ij} 为蚂蚁从当前节点 i 移动到相邻节点 j 的偏好程度,解析式为

$$\xi_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}\vartheta_{ij}(t+1) \quad (10)$$

式中 $\frac{1}{d_{ij}}$ 为欧几里得距离。如果蚂蚁 s 在 t' 时段处于节点 i ,则转换至节点 j 的概率是:

$$Q_{ij}^s(t') = \begin{cases} \frac{[\vartheta_{ij}(t')]^\alpha [\xi_{ij}(t')]^\beta}{\sum_{r \in G} [\vartheta_{ir}(t')]^\alpha [\xi_{ir}(t')]^\beta}, & j \in G \\ 0, & j \notin G \end{cases} \quad (11)$$

式中: G 为下一步访问节点集; α 为启发因子; β 为期望因子^[15]。

在蚁群路径寻优过程中,传统启发函数未考虑节点间的相对位置关系。为此,本研究重新定义启发函数,如式(12),综合考虑距离、信息素浓度和节点位置关系,优化蚂蚁选择行为,提升算法整体性能。

$$\xi'_{ij} = \frac{\psi}{d_{ij} + d_{jk}} \quad (12)$$

式中: d_{jk} 为节点 j 至终点 k 的欧几里得距离; ψ 为让启发函数产生变化的动态参数。将优化后的启发式函数 ξ'_{ij} 代入式(11)进行概率计算,蚂蚁基于信息素浓度和启发式偏好做出更明智的路径选择。通过多轮移动和信息素更新,最终形成的高信息素路径集合即为近似最优巡检路径。

在城市轨道交通车站智能巡检中,机器人不仅需规划高效路径,还需实时监测设备状态。为此,本研究采用支持向量机算法中的决策函数,通过特征信号分析判断机电设备是否处于故障状态,检测公式表示为

$$F(x) = \text{sign}(\sum \xi_i y_i J(x_i, x) + b_r) Q_{ij}^s \quad (13)$$

式中: $F(x)$ 为状态决策函数; ξ_i 为支持向量系数, y_i 为支持向量类别标签; $J(x_i, x)$ 为核函数; b_r 为偏置。

4 实验分析

4.1 实验环境

为表明所提方法的可靠性,进行实验分析,实验平台的计算机操作系统为 Win11 (64bit),处理器为 i7-11800H,内存为 16 GB。使用 MATLAB R2021a 软件,分别进行分析。将门循环神经网络法和改进海洋捕食者算法作为比较方法。以某地区城市轨道交通车站为例,巡检机器人质量为 37 kg,巡航时间为 3 h。车站巡检路面平整,仅存在 2 个缓坡,车站内部光线稳定,动态障碍物为乘客和工作人员,静态障碍物为消防系统、环控系统 etc 车站机电设备。具体实验参数如表 1 所示。

表 1 参数配置

参数	数值
最大迭代次数	300
蚂蚁数量	60
信息素启发因子	3
信息素期望因子	8

表 1 中的参数配置基于算法特性、实验经验和问题需求设定。300 次迭代为经验值,兼顾收敛性和计算成本;蚂蚁数量设为 60,平衡搜索能力与计算效率;信息素启发因子和期望因子分别设为 3 和 8,均为常用中间值。

为了简化机器人的建模和分析的过程,选择在一个理想环境下建模,做出以下假设:1)假设四轮差速机器人整体为一个刚体,其固有属性不变,不受外部因素影响;2)假设机器人在平面上进行移动,轮子和地面不发生相对的滑动,只产生滚动。

4.2 实验结果分析

构建城市轨道交通车站机电设备场景图,尺寸为 50 m×40 m 的地图,进行 3 种机器人智能巡检实验。图 2 中左上角圆圈表示初始点,右下角圆圈为终点,a、b、c、d 均为待巡检机电设备所处位置。4 个浅色长方形和 1 个浅色圆形均为动态障碍物。其中,浅色长方形动态障碍物沿 X 轴方向做速度为 0.3 m/s 的往复±1.5 m 直线运动;浅色圆形动态障碍物以 0.4 m/s 的速度沿虚线预设的路径运动。深色长方形块为消防系统、环系统等静态车站机电设备。不同方法机器人的路径规划结果如图 2 所示。(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)

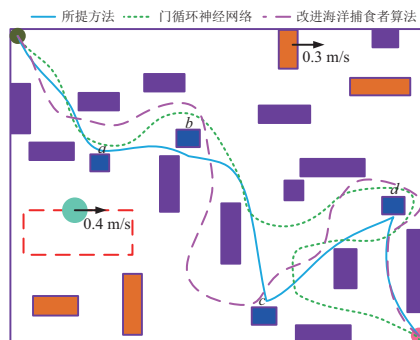


图 2 不同方法机器人智能巡检路径规划能力对比

观察图 2 发现,门循环神经网络法路径规划结果路径长度相对较长,且存在多处不必要的转弯。这主要因为该算法在处理复杂空间结构和动态环境信息时,长期依赖性和记忆能力导致难以作出最优选择,增加了巡检机器人能耗和时间成本。改进海洋捕食者算法在具有复杂障碍物和设备布局的环境中,其路径规划过于保守,倾向于选择更宽敞的路径,忽视了路径最优化。此外,在转弯处理上不够灵活,路径中存在多个急转弯,增加了巡检机器人的操作难度。相比之下,所提方法通过引入启发式信息和动态调整信息素更新策略,在保证路径连通性的同时,减少路径总长度,且整体转弯幅度明显小于其他两种算法,提高了在复杂多变环境下的路径规划能力,确保了巡检任务的稳定性。

上述步骤构建了一个尺寸为 50 m×40 m 的城市轨道交通车站机电设备场景图,模拟真实车站的布局。为全面展现 3 种方法路径规划的时效性,在上述相同测试场景和初始条件下,对比各方法在达到最优解过程中所需的迭代次数,评价其效率与性能。研究结果如图 3 所示。

观察图 3 曲线变化看到,与两个对照方法相比,所提方法通过改进蚁群算法,重新定义启发函数、优化信息素更新机制等方式,显著提高了算法在复杂环境中的搜索效率和全局寻优能力。该方法收敛到期望路径的迭代次数更少,意味着在相同计算资源下,能更快地找到最优路径,在实际应用中为巡检机器人提供更加及时和高效的路径规划服务。

为进一步验证设计方法的有效性,在模拟环境中进一步随机生成障碍物模拟,范围从 10% 到 50%,全面覆盖可能遇到的各类情况。实验在 MATLAB 仿真平台进行,每种方法在每个障碍率下重复运行 15 次,取平均值作为最终结果对比不

同障碍率下3种方法规划的最优路径长度,结果如图4所示。

从图4中看出,所提方法通过改进蚁群算法中的优化搜索策略和启发函数,在复杂环境中能够更加高效地找到最优路径。随着障碍率的增加,传统方法由于障碍物布局复杂,容易陷入局部最优或搜索效率低下,导致路径长度显著增加。相比之下,改进蚁群算法能够更好地适应复杂环境,保持路径长度的相对稳定,并始终找到较短的最优路径。而两个对比方法的表现则明显逊色,随着障碍率增多,其最优路径长度持续增长,反映出在处理复杂障碍物布局时的局限性,在实际应用中可能导致额外的时间和成本消耗。

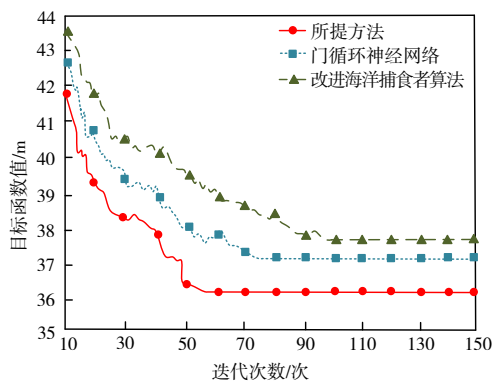


图3 巡检路径规划收敛性分析结果

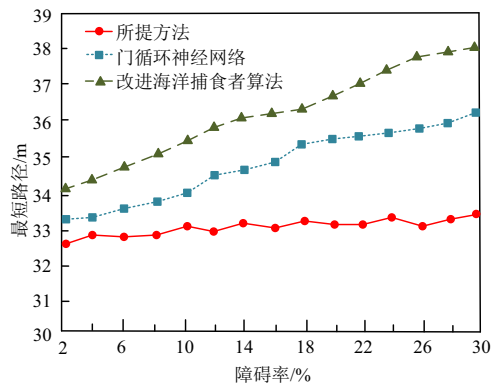


图4 不同障碍率下路径规划能力实验结果

5 结语

针对城市轨道交通车站复杂多变的巡检环境,提出一种基于改进蚁群算法的机电设备机器人智能巡检方法。采用高斯投影技术构建车站机电设备三维环境模型,量化导航过程的误差源并采取校准,提高机器人导航精度;引入改进蚁群算法,结合城市轨道交通车站机电设备的实际布局和巡检需求,优化路径搜索策略,得到满足巡检需

求的机器人最优行进路径,能够有效应对不同规模的城市轨道交通车站机电设备巡检任务。

参考文献:

- [1] 朱将勇,李鹏,李翔,等. 城市轨道交通车辆智能巡检机器人定位系统[J]. 铁道运输与经济,2023,45(1): 130-136.
- [2] 李军,周航,陈昌邦,等. 一种城市轨道交通工务综合巡检机器人的设计及应用[J]. 城市轨道交通研究, 2023,26(6):220-224.
- [3] 王文超,王俊平,丁建明,等. 基于智能巡检机器人系统平台的列车空气泄漏超声波检测装置设计[J]. 机车电传动,2024(3):164-172.
- [4] 金波,陈铨,徐焕,等. 基于门循环神经网络的电力机器人巡检方法[J]. 高电压技术,2023,49(增刊1): 118-121.
- [5] 张伟刚,周红生. 基于改进海洋捕食者算法的电力巡检机器人避障技术研究[J]. 现代制造工程,2024(10): 60-66.
- [6] SECIL S, OZKAN M. A collision-free path planning method for industrial robot manipulators considering safe human-robot interaction[J]. Intelligent Service Robotics,2023,16(3):323-359.
- [7] 薛光辉,刘爽,王梓杰,等. 基于改进概率路线图算法的煤矿机器人路径规划方法[J]. 工矿自动化,2023, 49(6):175-181.
- [8] 郭中远,徐锋,王贵洋,等. 基于虚拟现实的移动机器人真实环境三维建模系统[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(2):450-456.
- [9] 李秋瑜,杜虎彬,黄鹏俊,等. 基于结构光的室内消防机器人环境重构研究[J]. 消防科学与技术,2023, 42(7):972-977.
- [10] 张泮虹,倪涛,赵亚辉,等. 基于最优控制策略的复杂环境移动机器人轨迹规划[J]. 农业机械学报, 2022,53(7):414-421.
- [11] 贾明超,冯斌,吴鹏,等. 一种融合改进A*算法与改进动态窗口法的文旅服务机器人路径规划[J]. 图学学报,2024,45(3):505-515.
- [12] 张亚莉,莫振杰,田昊鑫,等. 基于改进APF-FMT*的农业机器人路径规划算法[J]. 华南农业大学学报,2024,45(3):408-415.
- [13] 张洪琳,吴耀华,胡金昌,等. 一种基于改进冲突搜索的多机器人路径规划算法[J]. 控制与决策,2023, 38(5):1327-1335.
- [14] 聂秀珍,焦迎雪,张霞. 融合优化遗传算法和变步长蚁群算法的矿山巡检机器人路径规划[J]. 金属矿山,2023(7):248-253.
- [15] 康博涵,黄静雯. 基于环境复杂度的移动机器人变步长RRT路径规划算法与仿真研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(4):87-93.

收稿日期:2025-02-21