北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

路侧绿篱修剪机器人的设计与试验评估

罗海风 张琦 肖力玮 阚江明

Design and experimental evaluation of a roadside hedge trimming robot

Luo Haifeng, Zhang Qi, Xiao Liwei, Kan Jiangming

引用本文:
罗海风, 张琦, 肖力玮, 阚江明. 路侧绿篱修剪机器人的设计与试验评估[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):1–13. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250029
Luo Haifeng, Zhang Qi, Xiao Liwei, Kan Jiangming. Design and experimental evaluation of a roadside hedge trimming robot[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):1–13. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250029

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250029

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

步进式横向插刀机构的运动学求解与轨迹规划
Kinematics solution and trajectory planning of stepping transverse slotting mechanism
北京林业大学学报, 2017, 39(10): 109–116. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170213

白杨派无性系苗期耐盐性综合评价及筛选
Comprehensive evaluation and screening of salt tolerance for *Leuce* clones at nursery stage
北京林业大学学报, 2017, 39(10): 24–32. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170323

石门国家森林公园夏季不同林分保健功能综合评价
Comprehensive evaluation of healthcare functions among different stands in Shimen National Forest Park of southern China in summer
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 60–74. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200343

机器学习技术在风景园林中的应用进展与展望
Application progress and prospect of machine learning technology in landscape architecture
北京林业大学学报, 2021, 43(11): 137–156. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200313

云南省建水县不同石漠化治理模式下碳储量功能评估
Evaluation on carbon storage function under different rocky desertification control models in Jianshui County of Yunnan Province, southwestern China
北京林业大学学报, 2018, 40(8): 72–81. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180069

基于生态系统服务功能模拟演算的绿色空间规划框架
Construction of green space planning framework based on ecosystem service function simulation: a case study of shallow mountain area in Beijing
北京林业大学学报, 2019, 41(11): 125–136. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190149

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250029

路侧绿篱修剪机器人的设计与试验评估

罗海风　张　琦　肖力玮　阚江明
（北京林业大学工学院，林业装备与自动化国家林业局重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】绿篱修剪现有研究面临的主要难点是开发一种既能高效完成大规模基本形状修剪，又能精细处理复杂形状的机器人系统。针对此问题，本研究通过优化机械结构和控制系统，设计一种新型路侧绿篱修剪机器人，以提高道路两侧绿篱修剪质量并降低人工劳动强度。**【方法】**构建由 6 自由度 SCARA 机械臂、往复式剪切刀具及小型履带底盘组成的机器人系统，并对机械臂构型进行优化。控制系统采用“PC + 运动控制卡”，开发基于 C#的上位机软件用于机械臂轨迹规划。规划了直线、梯形和圆弧 3 种修剪路径，并进行修剪试验。设计了路径插值点间距和刀具移动速度的单因素试验，通过分析修剪后绿篱形状的误差来评估修剪精度。引入加权法构建综合评价函数，分析不同参数组合下的修剪效果，将修剪误差与作业时间作为指标进行量化评估，探索路径规划参数的最优组合。**【结果】**试验验证了该机器人在 0.6 ~ 1.6 m 高度、0.5 ~ 1.2 m 横向范围内的修剪能力。路径插值点间距与刀具移动速度对修剪误差的影响显著。单因素试验结果表明，不同参数组合对修剪误差与作业时间均有影响。在设定范围内，直线绿篱在插值点间距 200 mm、速度 50 mm/s，梯形绿篱在间隔 110 mm、速度 45 mm/s，圆弧绿篱在间隔 108 mm、速度 45 mm/s 时，综合评价函数值最小，修剪精度与作业效率表现最佳。**【结论】**本研究通过机械臂结构和控制系统的优化，成功开发了一种新型路侧绿篱修剪机器人，实现了高效与精细修剪的目标。研究结果验证了机器人在不同作业范围内的修剪能力，并明确了路径规划参数对修剪性能的影响，为绿篱修剪的自动化提供了技术支持。未来研究将进一步优化机器人性能，以适应更复杂的实际应用场景。

关键词：绿篱修剪；机器人；机械臂；控制系统；轨迹规划；综合评价函数
中图分类号：TP242；S225　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)05−0001−13
引文格式：罗海风，张琦，肖力玮，等. 路侧绿篱修剪机器人的设计与试验评估［J］. 北京林业大学学报，2025，47(5)：1−13.
Luo Haifeng, Zhang Qi, Xiao Liwei, et al. Design and experimental evaluation of a roadside hedge trimming robot［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 1−13.

Design and experimental evaluation of a roadside hedge trimming robot

Luo Haifeng　Zhang Qi　Xiao Liwei　Kan Jiangming
(School of Technology, Beijing Forestry University, Key Laboratory of State Forestry Administration on Forestry Equipment and Automation, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］Current research on hedge trimming faces the challenge of developing a robotic system that can efficiently perform large-scale basic shape trimming while also handling complex shapes with precision. To address this issue, this study optimizes the mechanical structure and control system to design a new type of roadside hedge trimming robot, aiming to improve the quality of hedge trimming on both sides of road and reduce labor intensity.［**Method**］A robotic system was constructed, consisting of a 6-degree-of-freedom SCARA robotic arm, a reciprocating shear cutter, and a small tracked chassis. The configuration of robotic arm was optimized. The control system employs a “PC + motion control card”, and C#-based upper computer software was developed for trajectory planning of robotic arm. Three trimming

收稿日期: 2025−01−25　**修回日期:** 2025−04−03
基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目（地区培育项目）（2022A1515140013），企业课题（2023HXKFGXY002）。
第一作者: 罗海风，博士，副教授。主要研究方向：林业机械。Email：luohaifeng@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学工学院。
责任作者: 阚江明，博士，教授。主要研究方向：林业装备。Email：kanjm@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

paths, i.e. linear, trapezoidal and arcuate, were planned and tested. A single-factor experiment was designed to evaluate trimming accuracy by analyzing shape error of hedges after trimming, with path interpolation interval and tool movement speed as variables. A weighted method was introduced to construct a comprehensive evaluation function, analyzing trimming performance under different parameter combinations. Trimming error and operation time were used as metrics for quantitative evaluation to explore the optimal combination of trajectory planning parameters. [**Result**] Experiments verified robot's trimming capability within a height range of 0.6 to 1.6 m and a lateral range of 0.5 to 1.2 m. Path interpolation interval and tool movement speed significantly affected trimming errors. The single-factor experiment results indicated that different parameter combinations influenced both trimming errors and operation time. Within set range, the straight-line hedge trimming performed best with an interpolation interval of 200 mm and a speed of 50 mm/s, the trapezoidal hedge trimming with an interval of 110 mm and a speed of 45 mm/s, and the arc-shaped hedge trimming with an interval of 108 mm and a speed of 45 mm/s, where the comprehensive evaluation function value was minimized, showing the best trimming accuracy and operational efficiency. [**Conclusion**] Through the optimization of robotic arm structure and control system, this study successfully develops a new type of roadside hedge trimming robot, achieving the goals of both efficient and precise trimming. The results validate the robot's trimming capabilities across different operational ranges and clarify the influence of trajectory planning parameters on trimming performance, providing technical support for hedge trimming automation. Future research will further optimize the robot's performance to adapt to more complex real-world applications.

Key words: hedge trimming; robots; robotic arms; control system; trajectory planning; comprehensive evaluation function

随着城市化进程的加速，城市绿化在改善生态环境、提升城市品质方面发挥着至关重要的作用。绿篱作为城市绿化体系的重要组成部分，广泛应用于道路两侧、公园等公共空间，不仅起到分隔功能，还能美化环境。然而，为确保绿篱健康生长及其景观效果，定期修剪是必需的[1]。传统人工修剪方式存在诸多不足，一方面，修剪周期长，劳动强度大，依赖汽油动力修剪机和手动工具，不仅效率低下，还增加了操作人员的劳动负担和安全风险[2]；另一方面，对于复杂形状的绿篱，人工操作要求较高，作业难度大，且操作员疲劳易导致修剪精度下降和作业质量不一致[3]。因此，传统人工修剪方式在效率和安全性方面存在明显局限，难以满足现代城市绿化管理的需求。

针对上述问题，国内外学者提出了多种自动化解决方案，研究方向主要根据作业场景的需求进行不同的探索与发展。对于高速公路两侧大面积绿篱修剪，车载式绿篱修剪机是目前的主流选择[4]，此类设备通常安装在中型卡车上，利用液压系统驱动修剪装置完成大规模作业。德国 Ducker 公司和英国 Ryetec 公司开发的产品已广泛应用于此类低精度需求场景[5]，但在复杂地形和高精度修剪方面存在局限性。对于城市道路中较小面积绿篱的修剪，研究人员尝试通过将机械臂搭载于移动平台上以提高修剪的灵活性和精度[6]。例如，2019 年开发的 Potatrice 灌木修剪机能通过弧形切割架修剪球形灌木，但无法适应多种绿篱形状的修剪需求。2022 年，伊朗开发的五自由度修剪机器人能够修剪简单几何形状的绿篱，但在复杂形状修剪方面表现不足[7]；类似研究还包括欧洲 TrimBot 2020 项目，该项目结合视觉识别和自主导航技术实现了绿篱基本形状修剪，但由于设备尺寸较小，仅适用于球形、圆柱形等简单造型绿篱，难以满足道路两侧大范围绿篱的多样化需求[8]。最后，对于形状复杂、精度要求高的绿植，由于空间限制，通常通过特殊的刀具与轨迹仿形设计进行修剪。总体来看，现有研究的主要问题在于如何开发一种既能高效应对大规模基本形状修剪需求，又能满足复杂形状精细修剪需求的机器人系统。为解决这一问题，需要在机械结构设计和控制系统方面进行协同优化，机械结构需具备足够的灵活性以适应复杂形状的修剪任务，同时具备稳定性和高效性以满足大规模修剪需求，控制系统则需优化路径规划算法，结合不同绿篱形状与环境特性，实现修剪精度与效率的平衡[9]。

基于上述分析，本研究拟设计一种高效的绿篱修剪机器人，以满足快速完成基本形状修剪及应对复杂形状修剪的需求。绿篱修剪机械臂是该系统的核心，其性能将直接影响整体修剪效果。为此，本研

究拟提出一种 6 自由度的 SCARA 型机械臂设计方案，以提升修剪效果和应用范围。同时，将开发一套配套的控制系统，以上位机（personal computer，PC）为核心，结合 USB1020 运动控制卡，实现对机械臂的精准控制。在控制系统设计中，将重点聚焦于路径规划和运动控制。计划采用插值法进行路径规划，生成连续、平滑的修剪轨迹，并研究插值点间距和刀具移动速度这两个关键因素对修剪效果的影响。此外，通过单因素试验，探索不同参数组合对修剪精度和效率的影响，以及其在直线、梯形和圆弧 3 种基本绿篱形状修剪任务中的应用潜力。本研究旨在为绿篱修剪机器人的结构设计与控制系统开发提供理论基础和技术支持，为后续系统性能优化以及提升机器人在不同绿篱环境下的适应性奠定基础。

1　绿篱修剪机器人的设计

根据调研，道路两侧常见的绿篱修剪品种为灌木或小乔木，典型尺寸为宽度 0.5 ~ 1 m，长度 1 ~ 2 m，高度 0.7 ~1.6 m，通常修剪为规则的方形轮廓。公园美化和景观造型中，还包括球形、螺旋形等多样形状，要求修剪设备具备更高的灵活性和自由度[10]。为满足这些需求，设计了一种能够同时适应方形道路绿篱和园林复杂造型修剪的绿篱修剪机器人，其整体方案采用履带式移动平台搭载 6 自由度机械臂的形式如图 1b 所示。移动平台为履带式小车，具备原地转动功能，适用于狭窄或复杂环境作业。机械臂末端设置可更换刀具的接口，以适应不同修剪任务的需求。考虑到当前绿篱顶面修剪以规则二维轮廓（如直线与圆弧）为主，刀具到位后仅需绕 x 轴调整偏航角即可完成轨迹，位姿调整较为简单，因此选用直线往复式修剪刀具，其切割长度为 51 cm，可一次覆盖大部分绿篱宽度，具备切割整齐、效率高的优点[11]。

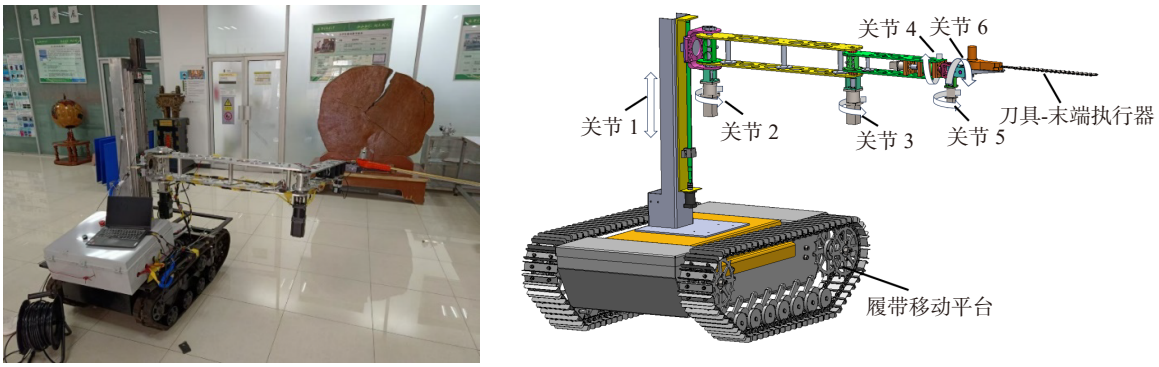
1.1　机械臂的设计

1.1.1　机械臂结构

机械臂的性能在很大程度上决定了修剪机器人的适用场景、操作复杂性以及工作范围。机械臂的设计需保证覆盖不同高度和形态的绿篱，同时具备灵活的运动能力和稳定的修剪性能。根据绿篱修剪的工作需求，机械臂的主要技术指标包括：修剪高度 0.6 ~ 1.6 m，修剪宽度 0.6 ~ 1.2 m，最大水平伸展 2 m。为了适应不同的修剪场景，机械臂采用 SCARA（selective compliance assembly robot arm）构型，其关节排列为 P-R-R-R，其移动关节使得这种构型具有在水平面内较高的灵活性和精度，并在垂直方向上具备较强的刚性，适合快速且精确的平面运动，在此基础上，机械臂增加了两个旋转关节，使末端执行器能够在更多方向上灵活调整，增强适应性。机械臂关节排列为 P-R-R-R-R-R 形式，该设计确保机器人在修剪过程中具备高灵活性与高精度，适应不同绿篱形状与高度的修剪需求，并提升修剪效率。

1.1.2　机械臂的运动学分析

运动学分析可以实现机械臂末端三维位置与关节变量之间的映射，为机械臂的运动控制提供必要的数学模型。本研究采用 D-H（Denavit-Hartenberg）参数法建立机械臂的坐标系[12]。首先确定机械臂各个关节轴的连杆坐标系，连杆编号定义基座为 0 号连杆按顺序推到机械臂末端连杆（6 号连杆），关节编号遵循连杆 i 和连杆（$i-1$）之间的关节记为关节 i 的原则，按照 D-H 参数法规则建立连杆坐标系，0 号连杆坐标系通常与世界坐标系一致，连杆（$i+1$）坐标系中 z 轴方向与连杆 i 的关节轴方向平行，x 轴方向为连杆 i 和（$i+1$）的公法线，y 轴由右手定则确



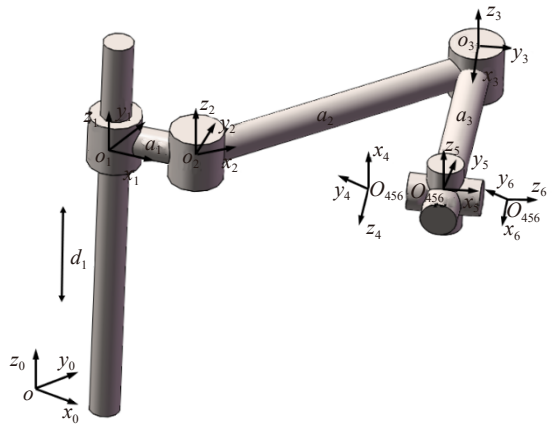
a 样机　　b 三维模型

关节 1 为平动关节，负责垂直方向的上下运动；关节 2 和 3 为绕 z 轴旋转的关节，控制大臂和小臂在 x-y 平面内的伸缩；关节 4、5、6 为腕部的 3 个旋转关节，分别绕 x、y、z 轴旋转，确保在复杂园林造型绿篱修剪时刀具始终保持最佳角度。

图 1　绿篱修剪机器人样机和三维模型

Fig. 1　Prototype and 3D model of hedge trimming robot

定。然后，通过定义 4 个标准化参数来描述机械臂相邻连杆之间的几何关系，这 4 个参数为 θ_i(关节转角，绕 z_{i-1} 轴旋转的角度，为转动关节关节变量)，d_i(关节偏距，沿 z_{i-1} 轴平移的距离，为转动关节关节变量)，a_i(连杆长度，沿 x_i 轴平移的距离，为固定值)，α_i(连杆扭角，绕 x_i 轴旋转的角度，为固定值)，这些参数共同构成了一个变换矩阵，可以通过公式(1)计算任意两个相邻连杆间的齐次变换矩阵。根据绿篱修剪机械臂的结构设计，使用 D-H 法建立每个连杆的坐标系(图 2)，并计算得到 D-H 参数表(表 1)。基于该模型可求解正逆运动学问题：正运动学通过关节角度计算末端执行器的位姿，逆运动学则根据目标位姿反解关节角度，从而构建关节空间与笛卡尔空间的双向映射关系。



d_1 表示从坐标系 0 的原点出发，沿 z_0 轴方向，到达坐标系 1 原点的距离，在这里表示移动关节的移动变量；a_1 表示从坐标系 1 出发，沿 x_1 轴方向，到坐标系 2 的 z 轴的距离，即第 1 根连杆的长度，定义了坐标系 1 和 2 之间的水平位移；a_2 表示沿 x_2 轴方向，从坐标系 2 原点到坐标系 3 的 z 轴的距离，即第 2 根连杆的长度；a_3 表示从坐标系 3 出发，沿 x_3 轴到坐标系 4 的 z 轴的距离，即第 3 根连杆的长度。

图 2 绿篱修剪机械臂 D-H 连杆坐标系

Fig. 2 D-H linkage coordinate system of hedge trimming manipulator

表 1 绿篱修剪机械臂 D-H 连杆参数

Tab. 1 Parameters of D-H connecting rod of hedge trimming manipulator

连杆i	θ_i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	关节变量范围
连杆1	0	0	0	d_1	600 mm
连杆2	θ_2	0	200 mm	0	± 100°
连杆3	θ_3	0	700 mm	0	± 150°
连杆4	θ_4	P_i/2	500 mm	0	± 150°
连杆5	θ_5	P_i/2	0	0	± 180°
连杆6	θ_6	P_i/2	0	0	± 180°

注：D-H法通过一组规则在机械臂每个关节处建立局部坐标系，进而描述各坐标系之间的变换关系。在第i个关节处，坐标系i相对于坐标系$i-1$的变换由4个参数唯一确定。θ_i代表第i个关节的关节转角，绕z_{i-1}轴旋转的角度，为转动关节关节变量；d_i代表第i个关节的关节偏距，表示第i个关节沿z_{i-1}轴方向的平移距离，为移动关节变量；a_{i-1}代表第$i-1$个连杆的长度，是沿x_{i-1}轴的平移距离，为固定值，α_{i-1}代表第$i-1$个连杆的扭角，是绕x_{i-1}轴旋转的角度，为固定值。

正运动学是已知机械臂各连杆长度尺寸和关节角度变量，求出末端修剪执行装置在基坐标系中的位置和姿态。将表 1 中的各连杆参数带入 D-H 参数法的标准变换矩阵公式(1)，依次计算相邻连杆间的齐次变换矩阵，最终将各变换矩阵连乘，得到末端修剪执行装置相对于基坐标系的总变换矩阵，其表达式为

$$ {}_{i}^{i-1}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d\cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1} $$

式中：$\boldsymbol{T}$ 表示从第 i−1 坐标系到第 i 坐标系的齐次变换矩阵，它由 D-H 参数(θ_i, d_i, a_{i-1}, α_{i-1})构建，包含了两个坐标系之间的旋转与平移关系。

$$ {}_{6}^{0}\boldsymbol{T}={}_{1}^{0}\boldsymbol{T}\cdot{}_{2}^{1}\boldsymbol{T}\cdot{}_{3}^{2}\boldsymbol{T}\cdot{}_{4}^{3}\boldsymbol{T}\cdot{}_{5}^{4}\boldsymbol{T}\cdot{}_{6}^{5}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{n}_x & \boldsymbol{o}_x & \boldsymbol{a}_x & \boldsymbol{p}_x \\ \boldsymbol{n}_y & \boldsymbol{o}_y & \boldsymbol{a}_y & \boldsymbol{p}_y \\ \boldsymbol{n}_z & \boldsymbol{o}_z & \boldsymbol{a}_z & \boldsymbol{p}_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2} $$

这些向量构成了一个完整的刚体位姿矩阵，前 3 列描述姿态(方向)，最后一列描述位置。$\boldsymbol{n}_x$, $\boldsymbol{n}_y$, $\boldsymbol{n}_z$ 为末端执行器坐标系的 x 轴在基坐标系中的方向余弦，被称为法向量；$\boldsymbol{o}_x$, $\boldsymbol{o}_y$, $\boldsymbol{o}_z$ 为末端坐标系的 y 轴在基坐标系中的方向余弦，被称为切向量；$\boldsymbol{a}_x$, $\boldsymbol{a}_y$, $\boldsymbol{a}_z$ 为末端坐标系的 z 轴在基坐标系中的方向余弦，被称为姿态向量；$\boldsymbol{p}_x$, $\boldsymbol{p}_y$, $\boldsymbol{p}_z$ 为末端坐标系原点在基坐标系中的空间位置坐标，即末端执行器的位置向量。$n_x = c_6\cdot(s_{23}\cdot s_5 + c_{23}\cdot c_4\cdot c_5) + c_{23}$，$\boldsymbol{o}_x = c_{23}\cdot c_6\cdot s_4 - s_6\cdot(s_{23}\cdot s_5 + c_{23}\cdot c_4\cdot c_5)$，$\boldsymbol{a}_x = c_{23}\cdot c_4\cdot s_5 - s_{23}\cdot c_5$，$\boldsymbol{p}_x = a_3\cdot c_{23} + a_2\cdot c_2 + a_1$，$\boldsymbol{n}_y = s_{23}\cdot s_4\cdot s_6 - c_6\cdot(c_{23}\cdot s_5 - s_{23}\cdot c_4\cdot c_5)$，$\boldsymbol{o}_y = s_6\cdot(c_{23}\cdot s_5 - s_{23}\cdot c_4\cdot c_5) + s_{23}\cdot c_6\cdot s_4$，$\boldsymbol{a}_y = c_{23}\cdot c_5 + s_{23}\cdot c_4\cdot s_5$，$\boldsymbol{p}_y = a_3\cdot s_{23} + a_2\cdot s_2$，$\boldsymbol{n}_z = c_5\cdot c_6\cdot s_4 - c_4\cdot s_6$，$\boldsymbol{o}_z = -c_4\cdot c_6 - c_5\cdot s_4\cdot s_6$，$\boldsymbol{a}_z = s_4\cdot s_5$，$\boldsymbol{p}_z = d_1$。$s_i = \sin\theta_i$，$c_i = \cos\theta_i$，$s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$，$c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$，$j = 1, 2, \cdots, 6$，为连杆序号；$\theta_i$为 D-H 参数法中的关节转角；$d_i$为关节偏距。

逆运动学则是根据给定的末端执行器相对于基坐标系的位置和姿态，求解出机械臂各个关节角度的变化量。由于关节 1 是沿 z 轴的移动关节，其位移(d_1)直接等于末端执行器的 z 坐标值(z_d)，即

$$ d_1 = z_d \tag{3} $$

通过末端执行器的目标位置(x_d, y_d)建立关节 2 和关节 3 的几何关系。利用余弦定理推导出关节 3 的角度公式。

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{x'^2_d + y^2_d - a^2_2 - a^2_3}{2a_2a_3}\right),\ x'_d = x_d - a_1 \tag{4}$$

式中:(x_d, y_d, z_d)为末端执行器要到达的基于基坐标系的三维位置坐标,a_i 为 D-H 参数法中的连杆长度,i 为连杆序号。

该公式通过计算连杆与目标位置之间的角度,得到了顺时针方向的关节 3 的角度。对于逆时针旋转的情况,可以通过反转θ_3(θ_3^{neg})表示。

$$\theta_3^{\text{neg}} = -\arccos\left(\frac{x'^2_d + y^2_d - a^2_2 - a^2_3}{2a_2a_3}\right) \tag{5}$$

关节 2 的角度通过两段连杆之间的几何关系确定。使用三角函数推导得到

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{y_d}{x'_d}\right) - \arctan\left(\frac{a_3\sin\theta_3}{a_2 + a_3\cos\theta_3}\right) \tag{6}$$

对于逆时针方向,关节 2 的角度为

$$\theta_2^{\text{neg}} = \arctan\left(\frac{y_d}{x'_d}\right) - \arctan\left(\frac{a_3\sin\theta_3^{\text{neg}}}{a_2 + a_3\cos\theta_3^{\text{neg}}}\right) \tag{7}$$

通过以上公式的推导,本研究可以得到两组关节角度解(顺时针解与逆时针解)。为了选择合适的解,结合关节的运动范围限制和机械臂的实际操作需求,选取物理上合理的关节角度,以确保机械臂能够按照预期执行任务。

求得d_1、θ_2、θ_3后,就可以根据解析法建立方程求解θ_4、θ_5、θ_6,即

$${}^0_1\boldsymbol{R}{}^1_2\boldsymbol{R}{}^2_3\boldsymbol{R}{}^3_4\boldsymbol{R}{}^4_5\boldsymbol{R}{}^5_6\boldsymbol{R} = {}^0_6\boldsymbol{R} \tag{8}$$

公式两边同时乘以${}^0_3R^{-1}$,因为旋转矩阵是一个正交矩阵,得

$${}^3_6\boldsymbol{R} = {}^4_5\boldsymbol{R}{}^5_6\boldsymbol{R} = {}^0_3\boldsymbol{R}^{-1}{}^0_6\boldsymbol{R} = {}^0_3\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}{}^0_6\boldsymbol{R} \tag{9}$$

求得

$$\begin{aligned}
{}^3_6\boldsymbol{R} = {}^0_3\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}{}^0_6\boldsymbol{R} &= \begin{bmatrix} c_{23} & s_{23} & 0 \\ -s_{23} & c_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{n}_x & \boldsymbol{o}_x & \boldsymbol{a}_x \\ \boldsymbol{n}_y & \boldsymbol{o}_y & \boldsymbol{a}_y \\ \boldsymbol{n}_z & \boldsymbol{o}_z & \boldsymbol{a}_z \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} c_{23}\boldsymbol{n}_x + s_{23}\boldsymbol{n}_y & c_{23}\boldsymbol{o}_x + s_{23}\boldsymbol{o}_y & c_{23}\boldsymbol{a}_x + s_{23}\boldsymbol{a}_y \\ -s_{23}\boldsymbol{n}_x + c_{23}\boldsymbol{n}_y & -s_{23}\boldsymbol{o}_x + c_{23}\boldsymbol{o}_y & -s_{23}\boldsymbol{a}_x + c_{23}\boldsymbol{a}_y \\ \boldsymbol{n}_z & \boldsymbol{o}_z & \boldsymbol{a}_z \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{10}$$

令式(8)左右两边的矩阵对应项相等,有

$$\begin{aligned}
&c_5 = r_{33},\ \ s_5 = \sqrt{1 - c_5^2} \\
&\theta_5 = \arctan2(s_5, c_5)
\end{aligned} \tag{11}$$

当$s_5 \neq 0$时,有

$$\begin{aligned}
&\theta_4 = \arctan2(r_{23}, r_{13}) \\
&\theta_6 = \arctan2(r_{32}, -r_{31})
\end{aligned} \tag{12}$$

代入式(9)得到 3 个姿态角的逆解,通过 Matlab 机器人工具箱进行验证,正逆运动学的解算正确。

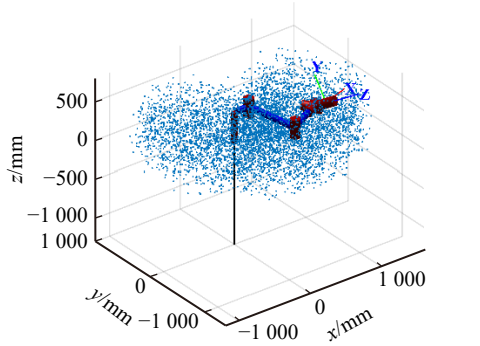
1.1.3　机械臂连杆长度以及工作空间的确定

为了满足实际修剪作业的要求,本研究根据机械臂的结构特点和绿篱修剪的技术需求,确定连杆长度和关节运动范围。根据调研,道路两侧常见绿篱的高度通常在 0.5 ~ 1.0 m 之间,而小车移动平台的高度为 0.6 m。为了覆盖大多数绿篱的高度范围,关节 1 设计为线性平动关节,其位移范围设定为 0 ~ 0.6 m,负责机械臂在 z 方向上的平移,用于调整修剪刀具的工作高度。关节 2 和关节 3 为沿 z 轴旋转的关节,通过它们的协同运动,能够实现末端执行器在 x 方向的前伸和回缩,确保能够满足精确修剪的要求。当机械臂完全展开时,其工作半径可达 1.2 m,其中连杆 1 的长度为 0.7 m,连杆 2 的长度为 0.5 m,这些设计使得机械臂末端执行器能够灵活接近绿篱并完成修剪工作。在旋转关节的设计方面,关节 2 和关节 3 的旋转角度范围分别设定为 ± 100°和 ± 150°,确保末端执行器可以在 x-y 平面内进行前伸、回缩及旋转,从而适应不同形状绿篱的修剪需求。关节 4 至关节 6 主要用于末端执行器的姿态调整,它们的旋转角度范围分别为 ± 150°、± 180°和 ± 180°,使机械臂能够精准调整刀具与绿篱表面之间的角度,确保刀具能够自动适应修剪球形、螺旋形等复杂绿篱造型时,保持最佳切割角度。

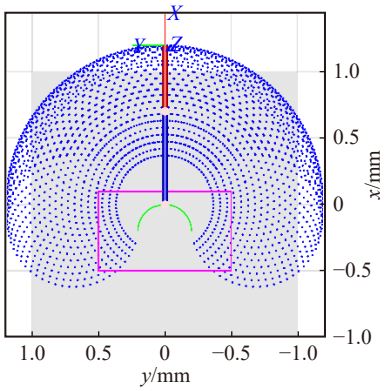
为了进一步分析机械臂的工作能力,采用蒙特卡洛法[13]对其工作空间进行求解,并通过 Matlab 仿真生成了末端执行器的工作空间点云图(图 3)。根据选定的连杆尺寸和关节运动范围,机械臂的工作空间范围为:x 轴上−1.2 ~ 1.5 m,y 轴上−1.4 ~ 0.9 m,z 轴上−0.19 ~ 0.8 m。上述参数表明,该机械臂具有较大的工作空间,能够在目标范围内灵活移动,并从任意位置接近绿篱,满足不同绿篱修剪场景的要求。

1.2　控制系统

在绿篱修剪任务中,控制系统的执行流程如下:首先,机器人通过履带车移动至修剪起始点,并通过控制系统完成初始化操作;随后,操作员通过上位机界面选择修剪形状(如梯形、圆形或方形)以及路径尺寸;当启动修剪任务后,控制系统会根据所选参数向各关节发送运动指令,从而控制机械臂以预设的速度和路径执行修剪操作,在此过程中,机械臂末端会根据目标点的坐标进行姿态调整,并沿着规划路径进行切割;修剪完成后,机械臂会返回初始位置,



a 机械臂工作空间



b *x*-*y* 平面工作空间

图 3 绿篱修剪机械臂工作空间及其 *x*-*y* 平面工作空间

Fig. 3 Workspace and *x*-*y*-plane workspace of hedge trimming manipulator

标志着整个作业流程的结束。

1.2.1 总体设计

控制系统软件在 Windows 平台上开发，采用 C#语言与 USB1020 运动控制卡的动态链接库进行二次开发，实现机械臂的运动控制与系统状态监测。软件系统按照模块化和开放式设计原则开发，包括运动规划模块、运动控制模块和状态监测模块。运动规划模块完成正逆运动学计算与路径规划算法；运动控制模块负责在工作空间内控制机械臂运动，根据目标点坐标完成姿态调整；状态监测模块实时记录控制指令，获取异常信息，并监控系统运行状态。软件通过主框架程序协调各模块的运行，轨迹规划软件界面如图 4 所示，路径点三维坐标计算后解算至各关节变量，通过脉冲控制电机运动，软件结构框图如图 5 所示。

1.2.2 硬件集成

为了实现绿篱修剪任务的高效控制，本研究设计了一套集成动作规划和行为控制的控制系统，采用“PC + USB1020 运动控制卡”的硬件方案。阿尔泰 USB1020 是一款基于 USB 总线的四轴步进电机运动控制卡，可以输出高频率的脉冲信号，精准控制步进电机的运动。控制系统通过开发的软件系统，实现了机器人正运动学与逆运动学计算、核心插补算法的应用以及与运动控制卡的实时通信功能。运动控制卡接收上位机发送的指令，将关节的运动信息转换为脉冲信号或模拟信号发送至驱动器，最终驱动步进电机完成指定运动。

控制系统的硬件集成在控制箱内（图 6），主要由以下部分组成：运动控制卡及对应的接线端子板、具有 USB 接口的主机、步进电机驱动器、24 V 直流开关电源（用于控制卡供电）、48 V 直流开关电源（用于电机驱动器供电）。由于绿篱修剪机器人需要控制 6 个关节电机以驱动机械臂，因此采用了两张 USB1020 四轴运动控制卡与上位机相连，共同实现 6 个关节的精确控制。

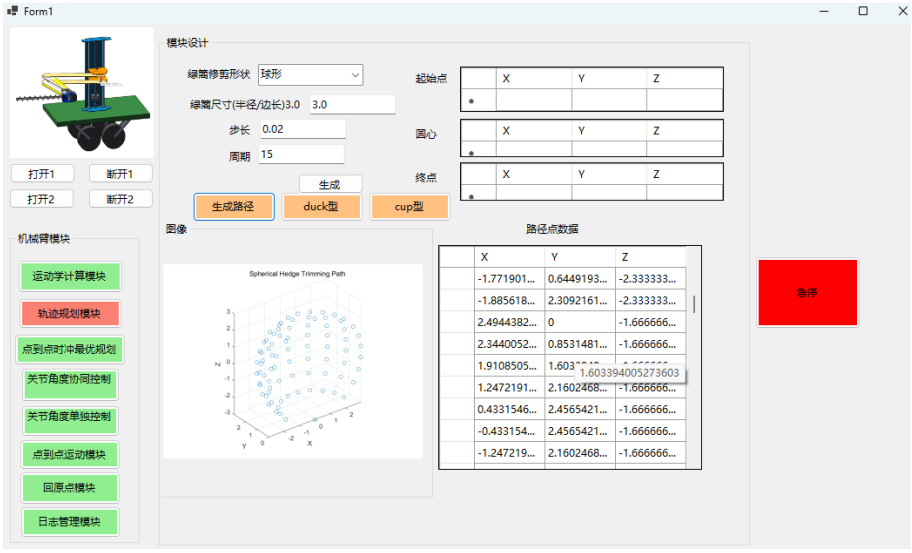


图 4 绿篱修剪机械臂控制系统软件轨迹规划界面

Fig. 4 Trajectory planning interface of hedge trimming robot arm control system software

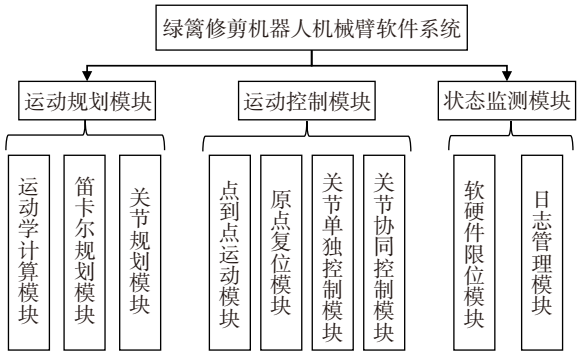


图 5　绿篱修剪机械臂控制系统软件结构框图

Fig. 5　Software architecture diagram of hedge trimming manipulator control system

1.2.3　轨迹规划模块

针对绿篱修剪任务中的直线、梯形和圆弧轨迹，本研究采用笛卡尔空间下的直线和圆弧插值方法进行轨迹规划。首先，确定末端执行器的三维路径和插值点，以确保其能沿预设轨迹运动。接着，利用机械臂的逆运动学模型对各插值点进行求解，计算出各个关节的运动角度。最后，通过控制器驱动各关节的电机，实现机械臂的精确运动控制。

已知笛卡尔空间中起点 $P_1(x_1,y_1,z_1)$和终点 $P_2(x_2,y_2,z_2)$，在两点之间进行直线轨迹规划(图 7)。根据每个周期内各轴的进给量，可以计算出机器人的下一个加工位置坐标。

$$\begin{cases} x_{i+1}=x_i+\Delta x \\ y_{i+1}=y_i+\Delta y \\ z_{i+1}=z_i+\Delta z \end{cases} \tag{13}$$

式中：(x_i,y_i,z_i)是第 i 个插值点的坐标，$(x_{i+1},y_{i+1},z_{i+1})$是第$(i+1)$个插值点的坐标，$\Delta x$、$\Delta y$、$\Delta z$分别是插值间隔在 x、y、z 上的分量。

设空间中不共线的 3 点为 $P_1(x_1,y_1,z_1)$，$P_2(x_2,y_2,z_2)$，$P_3(x_3,y_3,z_3)$，由此可以确定一个半径为 R，圆心为O_R的圆弧(图 8)。P_1P_2的垂直平分面 α 的平面方程一般形式为

$$A_{11}x+B_{12}y+C_{13}z+D_{14}=0 \tag{14}$$

同理，P_2P_3的垂直平分面 β 的平面方程一般形式为

$$A_{21}x+B_{22}y+C_{23}z+D_{24}=0 \tag{15}$$

P_1、P_2、P_3这 3 点可以确定平面P_{123}，其外接圆方程为

$$A_{31}x+B_{32}x+C_{33}x+D_{34}=0 \tag{16}$$

联立上述公式，可以得到式(17)。

$$\begin{vmatrix} A_{11} & B_{12} & C_{13} \\ A_{21} & B_{22} & C_{23} \\ A_{31} & B_{32} & C_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} D_{14} \\ D_{24} \\ D_{34} \end{vmatrix} = 0 \tag{17}$$

求解上式可得到圆心O_R的位置坐标(x_0,y_0,z_0)，进而可以求得外接圆的半径 R 为

$$R=\sqrt{(x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2+(z_1-z_0)^2} \tag{18}$$

圆弧所在平面的得法向量 $\boldsymbol{n}$ 为

$$\boldsymbol{n}=\overrightarrow{O_Rp_1}\times\overrightarrow{p_1p_2}=(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v},\boldsymbol{w}) \tag{19}$$

设步长为Δl，过p_i圆弧轨迹的切向量记为$\boldsymbol{\tau}$，与直线O_Rp_{i+1}相交于p'_{i+1}，通过圆弧所在平面的法向量求得切向量。

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{n}\times\overrightarrow{O_Rp_1}=(\boldsymbol{m},\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}) \tag{20}$$

将切向量$\boldsymbol{\tau}$分别投影到各个坐标轴，可以得到切向量在各个坐标轴的分量。

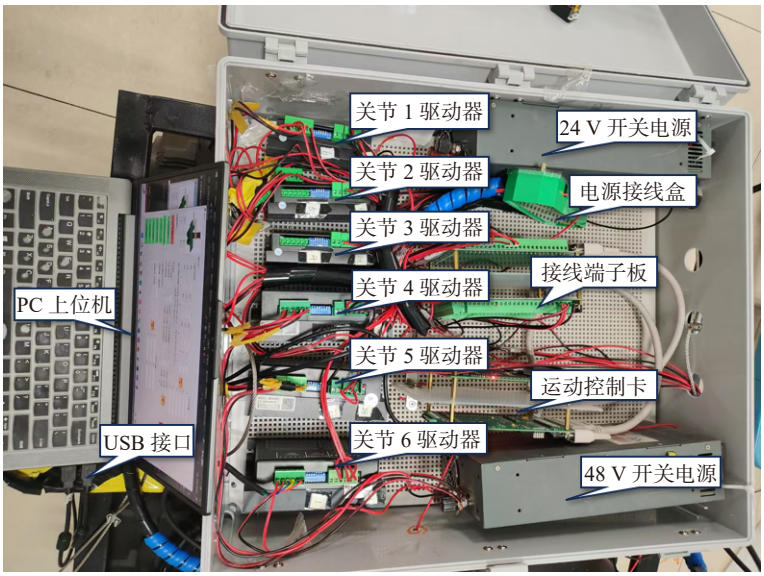
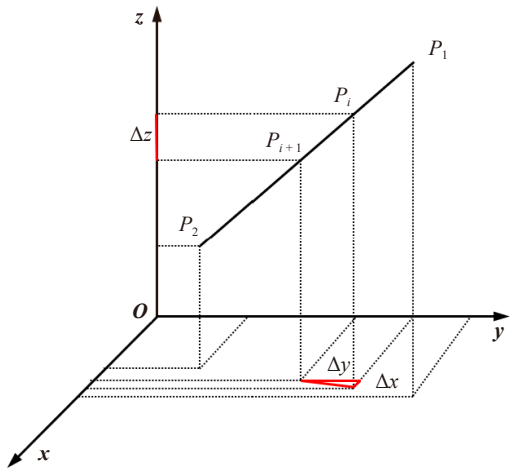


图 6　绿篱修剪机械臂控制箱硬件

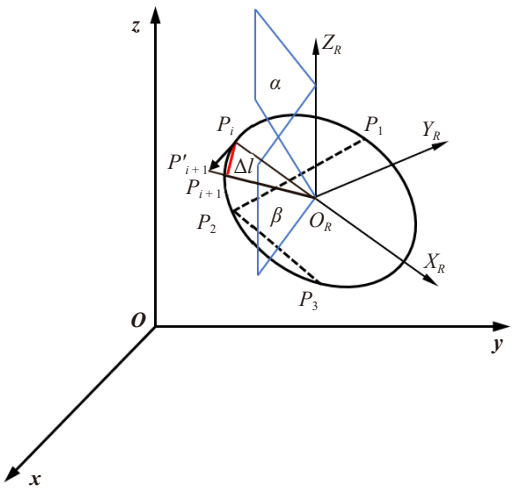
Fig. 6　Hardware of hedge trimming manipulator control box



P_1 为直线轨迹起点，P_2 为直线轨迹终点，P_i 为第 i 个插值点的坐标，P_{i+1} 为第$(i+1)$个插值点的坐标，Δx、Δy、Δz分别为插值间隔在 x、y、z 方向上的分量。

图 7 空间直线插补

Fig. 7 Spatial linear interpolation



通过 P_1、P_2、P_3 这 3 个点进行圆弧的轨迹插值，其中平面 α 为 P_1P_2 的垂直平分面，平面 β 为 P_2P_3 的垂直平分面，以此确定圆弧所在的平面、圆心O_R与半径 R。以圆心O_R为坐标圆心建立圆弧插补坐标系$O_RX_RY_RZ_R$，O_RZ_R轴垂直于圆弧所在平面。设第 i 个插补点在圆弧坐标系下的位置为 P_i，P_{i+1} 为第$(i+1)$个插值点的坐标，过点 P_i 圆弧轨迹的切向量与直线O_RP_{i+1}相交于P'_{i+1}，Δl为插值间隔。

图 8 空间圆弧插补

Fig. 8 Spatial circular interpolation

$$\begin{cases} \tau_x = m_i / \sqrt{\left(m_i^2 + n_i^2 + l_i^2\right)} \\ \tau_y = n_i / \sqrt{\left(m_i^2 + n_i^2 + l_i^2\right)} \\ \tau_z = l_i / \sqrt{\left(m_i^2 + n_i^2 + l_i^2\right)} \end{cases} \tag{21}$$

令 $G = \dfrac{R}{\sqrt{(R^2 + \Delta l^2)}}$，求解出下一个点 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$的坐标。

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_0 + G(x_i - x_0 + \tau_x \Delta l) \\ y_{i+1} = y_0 + G(y_i - y_0 + \tau_y \Delta l) \\ z_{i+1} = z_0 + G(z_i - z_0 + \tau_z \Delta l) \end{cases} \tag{22}$$

为实现轨迹规划，并精确控制末端执行器的运动，本研究在控制系统软件中编写了插值函数公式。通过输入起始点、终点坐标、周期和步长等参数，系统生成插值路径。不同的周期和步长设置影响轨迹精度与平滑度，因此这些参数可以灵活调整，以优化试验效果并确保修剪精度。系统计算得到一系列插值点的三维坐标，构成末端执行器沿预定轨迹的路径。然后，利用逆运动学算法计算每个插值点对应的各关节角度变化，作为控制信号传递至运动控制模块，转化为脉冲信号，驱动电机进行相应运动。控制信号通过运动控制卡发送至驱动器，驱动器依据脉冲信号调整电机的旋转角度和速度，从而精确控制机械臂的运动，确保末端执行器沿预定轨迹执行修剪任务。

2 绿篱修剪机器人修剪质量的评估

2.1 修剪质量的影响因素

在修剪任务中，采用插值拟合方法对机械臂运动路径进行规划[14]。该方法通过生成离散的轨迹点来引导机械臂沿目标路径运动，而插值点的数量和刀具移动速度的设定则直接影响修剪的精度与效率[15]。因此，刀具移动速度(v)和插值点间距(d)被选为关键影响因素。其中，插值点间距决定了轨迹的平滑性和形状拟合程度，而刀具移动速度则影响刀具的移动节奏与轨迹的执行效果。

v 的变化决定了运动的快慢，进而影响修剪的精度与效率。如果速度过高，刀具可能在未完成修剪任务之前就离开目标区域，从而导致轨迹偏差和修剪误差；而速度过低虽然可以提高精度，但会降低工作效率。因此，合理设定 v 是平衡精度与效率的关键。

d 则影响轨迹的平滑性。间距过小可以提高轨迹精度，但会增加计算复杂度和系统负担；间距过大则会降低轨迹拟合效果，进而影响修剪细节。因此，需要在计算效率与修剪精度之间寻求平衡。

在轨迹规划中，采用插值拟合的方法，在规划的末端路径上生成一系列插值点。机械臂通过依次到达这些插值点，实现对预期路径的精确拟合。在路径规划过程中，合理设置插值点间距和刀具移动速度的组合至关重要。这种规划方式不仅确保了修剪轨迹的平滑性和准确性，还为优化系统性能提供了基础，从而在保证修剪精度的同时提升了工作效率。

2.2 修剪质量的评价指标

修剪精度是衡量修剪质量的重要指标，主要用于评估修剪后绿篱的实际形状与目标形状之间的位置偏差。修剪精度通过计算采样点的误差及其平均值来量化修剪效果，在试验中，使用高度测量仪对修剪后的绿篱表面进行测量，选取若干均匀分布的采

样点，记录每个采样点的实际高度值y_i，并将其与目标高度值y_{di}进行比对。误差（e_i）的计算公式为

$$e_i = |y_i - y_{di}| \tag{23}$$

为了综合评估修剪精度，计算所有采样点的平均误差作为评价指标，以评估修剪后绿篱的实际形状与期望形状之间的位置偏差（e_m）。其公式为

$$e_m = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|y_i - y_{di}| \tag{24}$$

式中：N为采样点总数。

在使用高度测量仪进行测量时，根据目标形状的尺寸调整采样点的密度，以确保测量具有代表性和全面性。所有采样点的误差计算完成后，将其平均误差值作为修剪质量的综合评估指标，为不同修剪参数下的效果分析提供了可靠依据。

2.3　修剪试验

为评估绿篱修剪机器人的性能并优化关键参数，设计了直线形、阶梯形和圆形 3 种修剪任务。这 3 种任务分别代表简单的直线轨迹、具有多个转折点的阶梯轨迹以及需要高精度曲线拟合的圆形轨迹，涵盖了常见的修剪形状需求。利用 Matlab 软件对 3 种修剪形状进行路径规划，仿真路径如图 9 所示。每种路径均通过控制系统的插值算法生成，用户可输入修剪路径尺寸等参数，系统根据输入数据生成运动路径，并控制电机完成相应运动。

本试验通过设置不同的刀具移动速度和插值点间距，研究了它们对修剪质量的影响。刀具移动速度设置为 30、40 和 50 mm/s，插值点间距设置为 100、150 和 200 mm，共设计了 9 组试验进行评估。

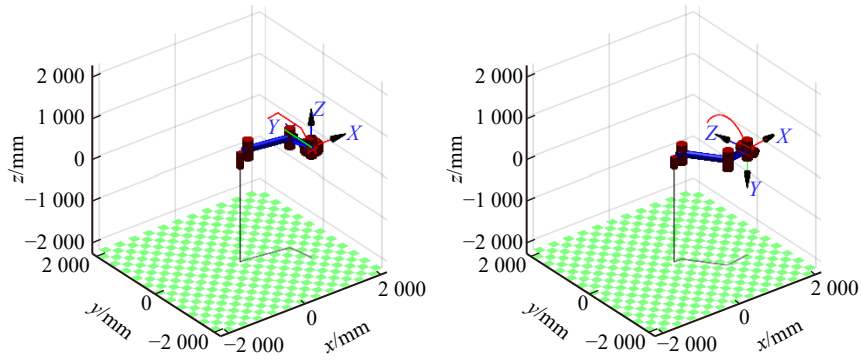
在选择刀具移动速度时，综合考虑了电机的旋转能力及实际应用需求。3 个速度档位分别对应较慢、中等和较快的修剪状态。插值点间距的选择则根据实际需求进行调整：较小的间距适用于高精度修剪，而较大的间距则适合高效率作业。

试验过程中，其他变量（如植株种类和修剪条件）保持不变，以减少外部因素对结果的干扰。试验环境中的绿篱品种为黄杨（*Buxus sinica*），植株高度为 160 cm，宽度为 65 cm。图 10 展示了机器人在田间执行修剪任务的实际场景。

3　结果与分析

3.1　不同目标形状修剪效果

在现场测试中对绿篱进行实际修剪，观察机器人在不同修剪参数组合下完成的修剪形状（图 11）。机器人能够实现预设的目标形状（如梯形、直线和圆



a 梯形　　b 圆弧

图 9　路径仿真

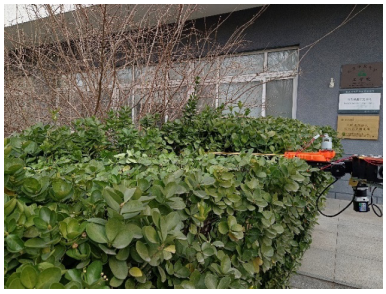
Fig. 9　Path simulation



a 梯形绿篱　　b 圆弧形绿篱

图 10　绿篱修剪机器人实地修剪试验

Fig. 10　Field test of hedge trimming robot



a 直线



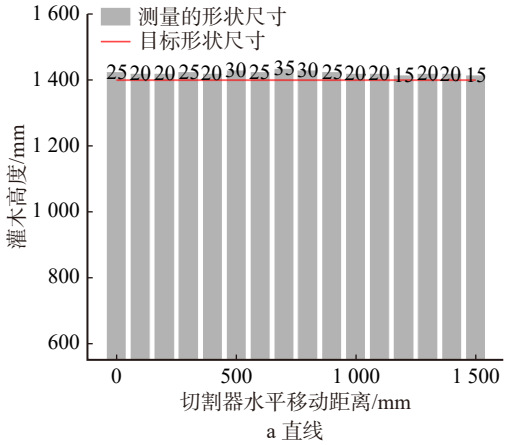
b 梯形



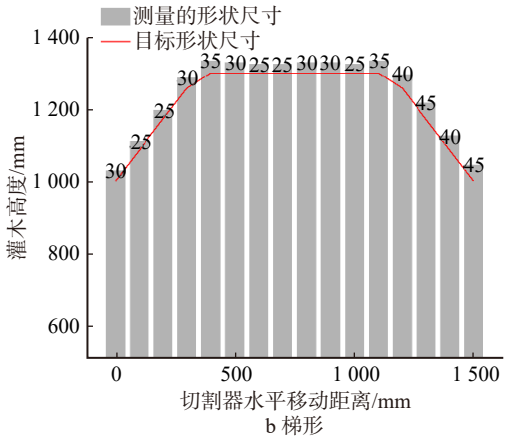
c 圆弧

图 11 绿篱修剪机器人修剪不同形状绿篱

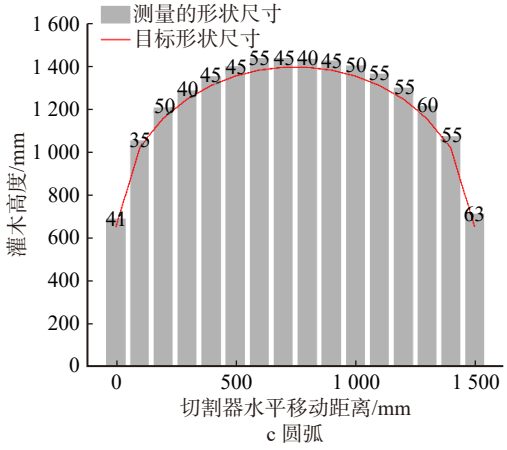
Fig. 11 Hedge trimming robots for shaping various hedge forms



a 直线



b 梯形



c 圆弧

图中数字代表误差值。

图 12 绿篱修剪机器人实际修剪形状与目标形状的误差

Fig. 12 Errors between actual and target hedge trimming shapes by hedge trimming robot

弧），并清晰展示出修剪效果。为精确评估修剪精度，使用高度计测试仪对绿篱修剪后的形状进行测量。在绿篱表面均匀选取若干采样点，记录每个采样点的实际高度值，并将其与目标高度进行对比。通过数据分析，可以观察到机器人修剪结果与目标形状之间的误差分布情况。修剪绿篱的实际测量结果（图 12）表明，不同试验组误差值存在一定分布规律，这与修剪路径的几何特性以及刀具与绿篱的接触方式有关。实际修剪高度高于目标高度，表明绿篱被切割量不足，主要由于刀具切割时压倒绿篱，切割完成后植株回弹，以及木质部未能被彻底修剪。此外，修剪误差在插值点位置的前后表现有所不同。

通过对修剪过程中评价指标的计算和分析，能够全面评估机器人对目标形状的还原能力，并量化不同试验条件对修剪效果的影响。这些指标的计算不仅为数据的可视化分析奠定了基础，也为修剪精度的优化设计提供了重要参考。所有 9 组试验的数据处理结果如表 2 所示。

根据试验结果，修剪误差主要由固定误差和波动误差组成。固定误差是指在所有试验中普遍存在且方向稳定的误差，主要来源于刀具的运动特性和机械臂结构。在直线修剪任务中，误差通常在 2 ~ 3 cm 之间，且大多数情况下，实际修剪的高度普遍高于目标形状的高度。这主要由于刀具的重力下垂导致末端位置低于理论轨迹。在梯形和圆形修剪任务中，绿篱的物理特性（如叶片密度和韧性）会影响修剪精度，尤其是在修剪斜边或曲面时，刀具受到绿篱的阻力，可能导致部分区域修剪不足。尽管轨迹

表 2　3 种目标形状下绿篱修剪机器人修剪误差分析

Tab. 2　Analysis of trimming errors for hedge trimming robot under three shapes

插值点间距/mm	目标形状	刀具移动速度30 mm/s		刀具移动速度40 mm/s		刀具移动速度50 mm/s	
		平均误差/mm	完成时间/s	平均误差/mm	完成时间/s	平均误差/mm	完成时间/s
100	直线	16.3	60	15.8	43	13.2	36
	梯形	19.1	64	20.1	49	24.6	39
	圆弧	31.2	85	35.4	65	38.2	54
150	直线	14.7	58	13.2	41	11.4	35
	梯形	21.1	62	22.5	47	25.1	38
	圆弧	35.2	83	36.2	63	40.5	52
200	直线	13.9	55	12.6	39	10.9	33
	梯形	24.3	60	27.2	46	30.1	36
	圆弧	39.0	81	42.1	60	45.2	49

规划时可以进行补偿，但由于机械臂姿态和受力情况不稳定，固定误差的补偿效果难以保持一致。波动误差则与插值点间距、机械臂运动稳定性和速度变化有关，路径点的离散执行可能会引起轻微偏差，导致误差波动。较小的插值点间距会增加路径调整频率，进而增加误差波动；而较大的间隔可能会降低路径跟踪精度。速度变化也会影响修剪稳定性，高速运动时的惯性和控制响应可能会引入额外误差。

单因素分析表明，插值点间距和刀具移动速度对 3 种修剪形状的误差有一定规律。对于直线修剪的，平均误差范围为 10 ~ 16 mm。较高的移动速度会导致较小的误差，因为直线路径较为简单，较低的移动速度则容易使刀具压倒绿篱，从而增加误差。较大的插值点间距可以减少误差，因为路径变化频率较低，机械臂转向时引入的误差也较少。对于梯形修剪，平均误差范围为 19 ~ 30 mm。较高的移动速度会增加误差，尤其是在斜边部分，而较低的移动速度有助于提高精度。对于圆形修剪，误差范围为 31 ~ 45 mm。较低的移动速度能够减少误差，因为较低的移动速度使机械臂能够更平稳地跟随路径，较小的插值点间距可以更好地拟合圆弧形状的复杂曲线，从而减少误差。

综上所述，直线修剪更适合较高的刀具移动速度和较大的插值间隔，而梯形和圆形修剪则需要更精细的插值点和适当的移动速度控制。试验结果为后续优化不同修剪形状的路径规划和运动参数提供了数据支持。

3.2　不同目标形状的最优修剪参数

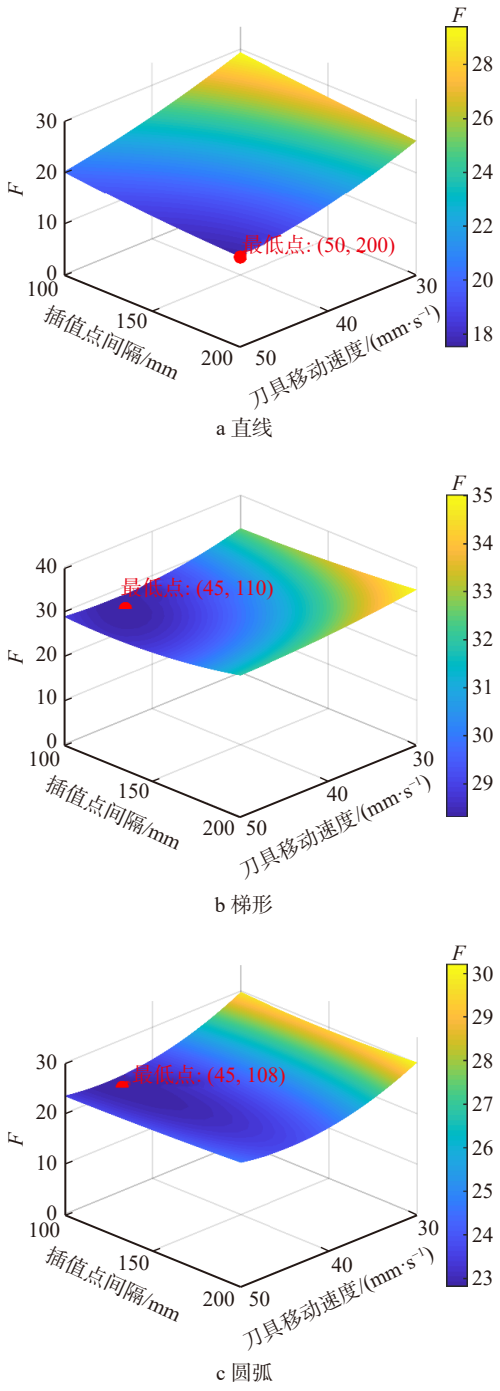
为了优化绿篱修剪机器人在作业过程中的性能，本研究针对影响修剪效果的关键参数进行了优化分析，旨在找到最优的参数组合。本研究以修剪误差和修剪时间作为优化目标，并通过加权综合评价法构建了目标函数曲面，用以评估不同参数组合下的修剪性能。其中，x 轴表示刀具移动速度，y 轴表示插值点间距，z 轴表示目标函数的值，优化的目标是最小化修剪误差和修剪时间。在权重设定方面，考虑到修剪误差直接影响修剪质量，而修剪时间则关系到作业效率，因此需要在二者之间进行权衡。本研究采用了 0.6 的误差权重和 0.4 的时间权重。这一权重比例的设定主要基于修剪任务的核心目标——确保修剪精度，同时兼顾作业效率。该权重比例参考了相关研究中的相似任务优化标准，并结合了试验初期的误差分析结果，以确保在将误差控制在合理范围内的同时，避免修剪时间过长。因此，目标函数 F 旨在通过最小化修剪误差和作业时间的加权和来优化修剪效果，当 F 的值最小时，表示修剪效果达到最佳。目标函数公式为

$$F = 0.6u_1 + 0.4u_2 \tag{25}$$

式中：u_1 代表误差参数，u_2 代表修剪时间。

三维曲面的生成步骤如下：首先，将 9 组试验数据中每组的刀具移动速度、插值点间距、目标函数值标注到三维空间的坐标中；然后，利用 MATLAB 的样条曲面插值方法对这些数据点进行拟合，生成平滑的曲面。样条曲面是一种常用于三维数据拟合的数学方法，它可以在数据点之间构建光滑的连续函数，从而更真实地反映数据点的趋势。拟合完成后，生成了三维目标函数曲面(图 13)，该曲面直观地展示了修剪误差和时间在不同刀具移动速度和插值点间距下的变化趋势。

通过对曲面的分析，可以清晰地找到目标函数值的最低点，该点对应的 x(刀具移动速度)和 y(插值点间距)坐标即为当前范围内的最优参数组合。在当前刀具移动速度范围为 30 ~ 50 mm/s，插值点间



F. 目标函数值。

图 13 不同修剪目标形状的函数曲面

Fig. 13 Functional surfaces of different trimming target shapes

距在 100 ~ 200 mm 的条件下，不同修剪形状的最优参数设置如下：直线修剪的最优参数为刀具移动速度 50 mm/s、插值点间距 200 mm；梯形修剪的最优参数为刀具移动速度 45 mm/s、插值点间距 110 mm；圆弧的修剪最优参数为刀具移动速度 45 mm/s、插值点间距 108 mm。这种方法有效地将多个评估指标综合为一个统一的目标，并通过三维曲面的最低点直观地寻找最优解，从而为机器人的参数设置提供了科学依据和参考。

4 结 论

为了提高道路两侧绿篱修剪质量及降低人工劳动强度，本研究设计了一种移动式路侧绿篱修剪机器人，并完成了直线、梯形和圆弧 3 种基本绿篱形状的自动修剪试验。具体研究结果分为以下 3 点。

（1）该机器人能够在 0.6 ~ 1.6 m 的高度范围内稳定作业，横向修剪范围达到 0.5 ~ 1.2 m，能够满足不同道路绿篱的修剪需求。

（2）试验结果表明，修剪误差受路径插值点间距和刀具移动速度的影响。直线修剪误差随着速度增加而减小，而梯形和圆弧修剪误差则随着速度增加而增大。此外，直线修剪误差在较大插值间隔下更小，而梯形和圆弧修剪误差在较小间隔下更低，表明复杂形状更依赖精细插值路径。

（3）通过单因素试验与权重法优化，获得了不同绿篱形状的最优修剪参数组合。直线修剪在插值点间距 200 mm、刀具移动速度 50 mm/s 时误差最小；梯形修剪在插值点间距 110 mm、速度 45 mm/s 时表现最佳；圆弧修剪的最优参数为插值点间距 108 mm、速度 45 mm/s。本研究实现了机器人对多种绿篱形状的高效修剪，并基于试验数据获得误差较小、效率较高的参数组合。

本研究通过机械臂结构优化及控制系统开发，实现了机器人对多种绿篱形状的高效修剪，并基于试验数据获得误差较小、效率较高的参数组合。试验结果表明，该机器人能有效适应不同绿篱形状的修剪任务，为绿篱修剪的自动化提供了技术支持。

尽管本研究取得了积极成果，但仍存在一些局限性。例如，在实际应用中，绿篱的植株种类、粗细、生长状态和密度等因素也会影响修剪效果。此外，本研究的试验数据仅限于特定参数范围，依赖大量试验来获得最优参数。试验过程中还存在刀具压倒绿篱导致修剪效果不理想的问题，需要进一步优化。未来的研究应考虑将这些额外的影响因素纳入优化模型，并对各因素进行数据化处理，为不同种类和状态的绿篱提供更加智能化的参数设置。针对通过多次试验寻找最优组合的问题，未来可以考虑采用智能算法或机器学习方法，从历史数据中学习，并结合实时数据进行动态优化，从而提高修剪任务的自动化程度。此外，针对实际的修剪环境，应不断优化机器人的结构、软件和硬件等基本装置，尤其是解决刀具压倒绿篱造成的误差问题。未来可以考虑集成力传感器，实时监测施加在绿篱上的力，并与控制系统形成力反馈闭环，根据刀具感受到的接触压力调整修剪策略，从而进一步提高修剪精度。

参 考 文 献

[1] 崔佳奇, 刘宏涛, 陈媛媛. 中国城市建成区绿化覆盖率变化特征及影响因素分析 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 331−339.
Cui J Q, Liu H T, Chen Y Y. Changes in green coverage rate of urban built-up areas in China and influencing factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(2): 331−339.

[2] 蒋慧, 黎国健, 翁恩彬, 等. 新能源园林养护机械应用现状研究 [J]. 安徽农业科学, 2023, 51(16): 196−200.
Jiang H, Li G J, Weng E B, et al. Research on the application status of new energy garden maintenance machinery[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(16): 196−200.

[3] Gu J, Zhang B, Wang Y, et al. Hedge three-dimensional reconstruction and motion control technology for trimming robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109632.

[4] Kaljaca D, Vroegindeweij B, van Henten E. Coverage trajectory planning for a bush trimming robot arm[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(2): 283−308.

[5] 陈义时, 吴湘柠, 凌洪明, 等. 高速公路绿篱修剪机器人刀具切削试验与分析 [J]. 装备制造技术, 2024(5): 37−39.
Chen Y S, Wu X N, Ling H M, et al. Cutting test and analysis of hedge trimming robot tools for highways[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2024(5): 37−39.

[6] Liang Q, Wang H. Design and kinematics analysis of mechanical arm of trimmer[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2021, 64(2): 40−64.

[7] Kamandar M R, Massah J, Jamzad M. Design and evaluation of hedge trimmer robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107065.

[8] Strisciuglio N, Tylecek R, Blaich M, et al. Trimbot2020: an outdoor robot for automatic gardening[C]//Verl A. ISR 2018: Proceedings of the 50th International Symposium on Robotics. Munich: VDE, 2018.

[9] Su X, Gu J, Lai H, et al. Design and experiment of path tracking control system for hedge trimming robot[C]//Feng X, Bhattacharjya A. Proceedings of International Conference on Computer, Artificial Intelligence, and Control Engineering (CAICE 2023). Hangzhou: SPIE, 2023: 44−52.

[10] 韩闰劳, 胡靖明, 杨学明. 绿篱顶侧面枝叶同步修剪机设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 60−66.
Han R L, Hu J M, Yang X M. Design and experiment of synchronous trimming machine for top and side branches of hedges[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization Chemistry, 2021, 42(8): 60−66.

[11] Cai J, Deng J, Zhang W, et al. Modeling method of autonomous robot manipulator based on DH algorithm[J]. Mobile Information Systems, 2021(1): 4448648.

[12] Xu Z, Zhao Y, Xian L, et al. Workspace solution and space trajectory planning of 5-DOF manipulator[C]//Land M. Proceedings of Conference Series. Montréa: IOP Publishing, 2022.

[13] Madridano Á, Al-Kaff A, Martín D, et al. Trajectory planning for multi-robot systems: methods and applications[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 173: 114660.

[14] Li B, Ouyang Y, Li L, et al. Autonomous driving on curvy roads without reliance on Frenet frame: a Cartesian-based trajectory planning method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 15729−15741.

[15] 杜超斐, 刘睿, 丁军, 等. 改进粒子群算法在六轴机械臂关节空间轨迹规划中的应用 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2024, 38(1): 368−378.
Du C F, Liu R, Ding J, et al. Spatial trajeetory planning method for joints of six-axis robotie arm based on improved particle swarm algorithm[J]. Joumal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(1): 368−378.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　李文彬）