



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

中南大学 EK 机器人队

四足机器人技术文档

作者：王煜、周星宇、毛胤辉

2025 年 4 月 12 日

1. 机械结构

1.1 机械结构技术路线

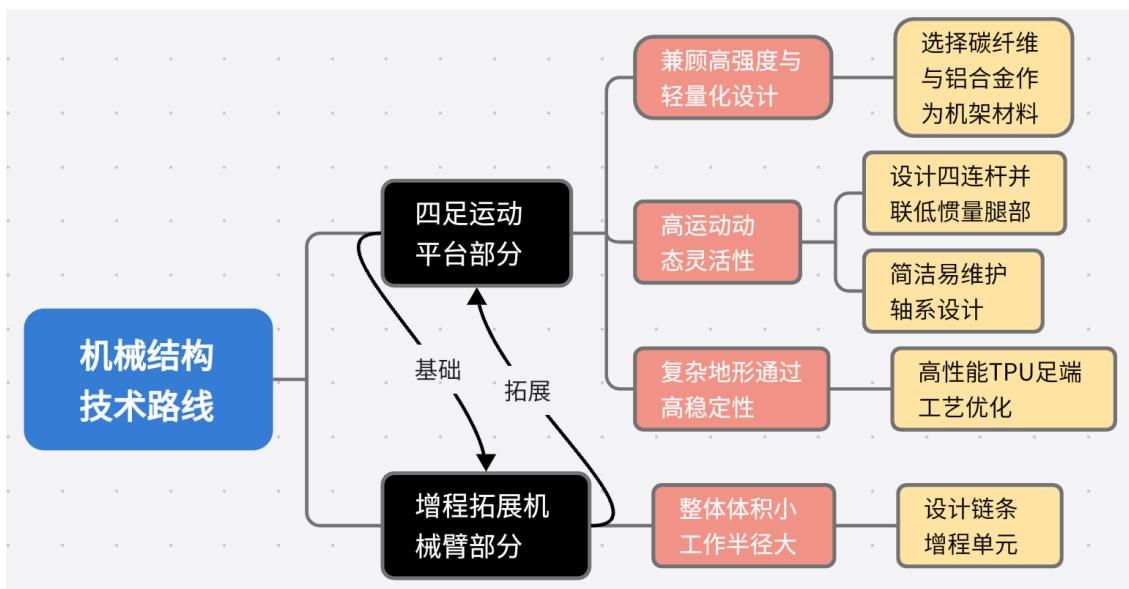


图 1.1.1 机械结构技术路线综述

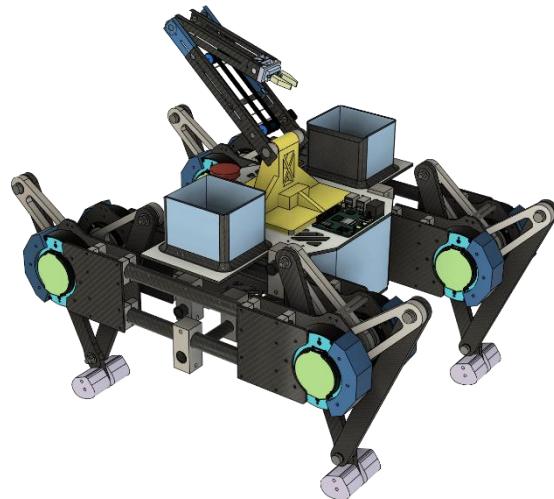


图 1.1.2 机器狗机械设计三维图

1.1.1 四足运动平台机械结构设计

在复杂的老旧社区环境中，足式运动平台具有良好的适应性和通过性。相较于传统的轮式运动平台，四足机器人可以轻松上台阶，通过碎石沙地路面，攀爬斜坡，在狭窄的社区楼道里灵活移动，这就需要具有优异的鲁棒性，在不失强度的前提下进行轻量化设计。机器狗采用三组碳纤维管作为主要支撑结构，碳管用 6061 铝合金航模管夹固定在机架碳板上。每组碳纤维管共四根，碳纤维作为一种高强度高模量纤维，用腈纶和粘胶纤维做原料，经高温氧化碳化而成，使用碳纤维材料作为机架可以在保证强度的同时

做到极致的轻量化。图 6.1.3 为机器狗机架机械设计图。其中左右两组碳管机架通过铝合金十字夹连接到中心四碳管上，赋予运动平台高度的鲁棒性与轻量性。经过精确重力配平与 Fusion360 质心检查，四足机器人整体质心与几何中心及 MPU 近似重合，在机械结构上为控制创造了最佳的条件。

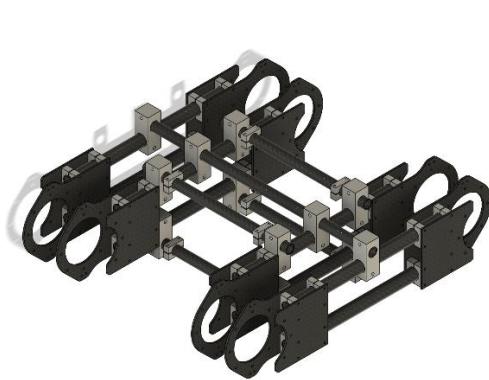


图 1.1.3 机器狗机架设计三维图

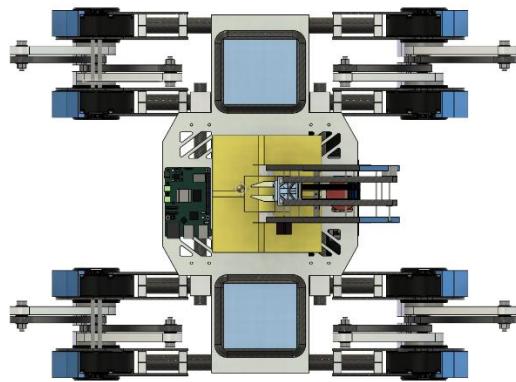


图 1.1.4 Fusion360 质心检查俯视图

本四足运动平台不仅在材料选择上考虑高强度，更在整体设计上注重高集成高自主性。该平台搭载了多项多功能平台，集成了视觉和雷达平台，在电子硬件上使用达妙科技 STM32 主控板作为机器人控制中枢，在元器件连接上选择可靠稳定的 AmassXT30 接头，适应老旧社区露天工作的环境复杂性。此外，此平台还搭载了电源管理系统与显示系统，在总线处配有醒目的急停按钮，使用 DJI TB47s 智能电池提供电能，为四足机器人在老旧小区中运送物流创造了条件，同时始终保持良好的安全性。

1.1.2 并联单腿结构设计

对于四足机器人而言，腿部机械设计是实现机器人高运动动态性和高运动稳定性的核心。本四足机器人采用了五连杆并联式腿部，为简化运动学解算，将顶部机架连杆在运动平面内投影长度缩减为零，因而此五连杆腿部可等效为四连杆。足式运动平台承力的关键就在于腿部，因此对于大腿，设计了 10mm 厚铝合金渐缩形机加件，在保证强度的条件下进行轻量化镂空；对于小腿，设计了 8mm 厚碳纤维板，可保持高刚度机械稳定性。单腿选用两个高集成度的宇树 GO-M8010 关节模组驱动，可提供最大 23.7 牛米的扭矩，高扭矩密度为四足运动平台提供了极高的运动上限。

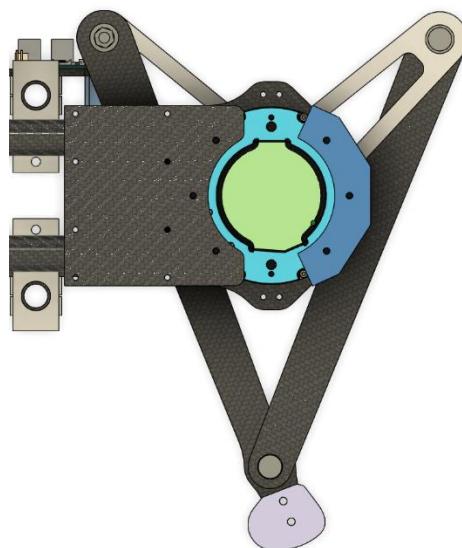


图 1.1.5 四连杆并联单腿设计图

不同于市面上常见的串联腿结构机器狗，本项目采用并联腿设计。并联结构通过多支链闭环设计显著提升结构刚度和稳定性，其刚度高于串联腿，且载荷分布均匀，有效抑制运动形变。在动态性能方面，并联腿驱动单元集中于基座，运动惯量低，因而带来较好的加速度性能。此外，并联腿的误差可通过闭环结构平均化补偿，重复定位精度达毫米级，而串联腿误差会随关节逐级放大。综合考虑老旧社区配送的需求，并联腿具有更优的性能。

(1) 连杆联系处轴系设计

兼具强度与灵活性的关节是连杆腿运转的关键，作为非主动式膝关节，可持续流畅稳定运转成为连杆联系处轴系设计的内在要求。因光轴机加工成本较高，卡簧销难以做到轴向定位，故此处选用强度不减且成本较低的标准件塞打螺栓作为转轴，两腿各嵌入两个法兰轴承承受腿部径向载荷，同时在其中使用不锈钢平垫隔离转动部与非转动部，末端直接使用塞打螺栓螺纹使用胶圈防松螺母锁紧。这种轴系设计的优点在于简单高效，避免了复杂轴系的使用，整体跨度及质量较小，同时拆装容易，稳定性好，适合于机器狗长时间穿梭在老旧小区中的工况。

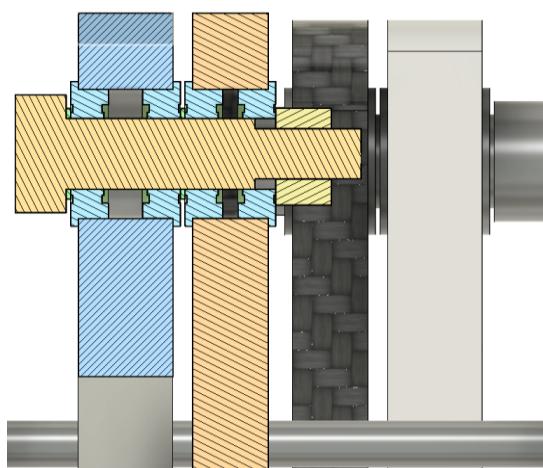


图 1.1.6 关节处轴系设计剖面图

(2) 减少腿部转动惯量方法

减少腿部整体对回转轴的转动惯量可以显著地提高关节电机响应，并且可以大大提高系统运行效率，减少对电能的消耗。因此，如图 6.1.5 在运动模式选择上，一般情况下采取凹四边形四连杆运动，在需要越过更高障碍时选择凸四边形四连杆运动。采用此种运动模式可以在多数情况下将尽可能多的质量集中在转轴附近，从而减少机器狗行走时的转动惯量。而在材料选择上，为减少并联腿整体的转动惯量，在离转轴远的位置应选用更轻的材料，因此在小腿处采用了 8mm 碳纤维。机器狗的低惯量设计可以提高单次充电后在社区场景中的工作时间，同时使其避障动作更加灵活。

1.1.3 高运动性能足端优化工艺

本项目足端采用热塑性聚氨酯（TPU）作为核心材料，于中南大学 EK 机器人实验室自主制造，充分发挥其高弹性与抗冲击优势。通过 3D 打印参数优化（打印温度 200-210°C，平台温度 50-60°C，速度 40mm/s），实现同心填充结构的均匀致密化，既保证足端整体刚性，又通过微孔结构保留弹性缓冲性能，有效避免老旧小区碎石、裂缝路面的局部塌陷问题。

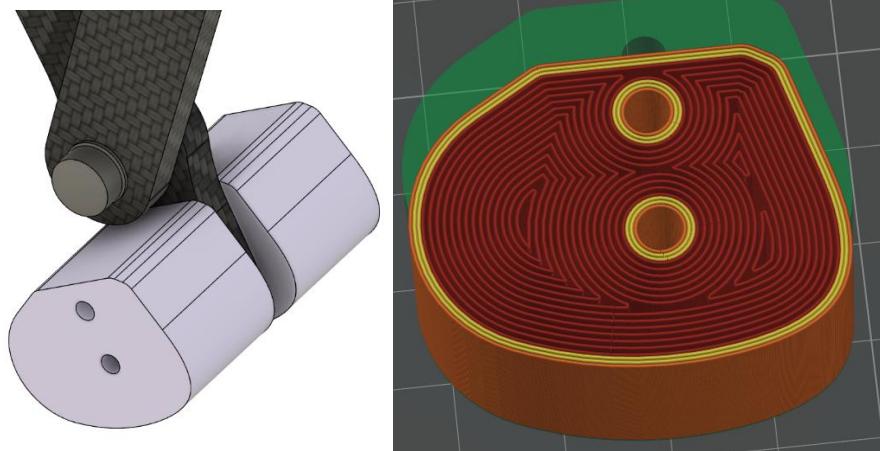


图 1.1.7 TPU 足端设计图 图 1.1.8 足端 3D 打印同心填充切片图

针对狭窄楼道、斜坡与不规则台阶，平足端通过低重心设计增强稳定性，配合泡棉胶带较大的静摩擦系数，在湿滑瓷砖、水泥路面均表现可靠。同时，在 3D 打印时选择由外到内降密度梯度，使足端具有外硬内韧的力学特点。此外，TPU 材料的耐候性可确保冬季结冰路面与夏季高温环境下的性能一致性。

1.1.4 增程柔性取货拓展机械臂设计

本项目采用的增程机械臂系统设计灵感来自于消防伸缩云梯。由于使用过程受场地大小的限制，机器狗本体在狭小环境下的灵活度较小，传统机械臂工作拓展范围较小，不能抓取处在狭小孔洞（如快递柜）和距离地面较高（如物流货架）的物品。由于传统机械臂体积较大且不易收纳，极易造成机器狗重心不稳，运动稳定性下降。下图为宇树科技研发的用于机器狗的功能拓展机械臂。传统机械爪大部分由电机驱动，对货物用力大小容易受电机空程影响，极易出现用力过小导致无法抓牢货物或者用力过大导致货物

破损等问题。



图 1.1.9 传统四足拓展机械臂

与传统机械臂不同，本项目使用增程机械臂，使用链条传动，一端固定定滑轮，能够根据货物所处位置和所处姿态灵活调整气动机械爪的运作方向，因而在装卸货物时减少人为干预，大大增加其工作范围以及工作效率。并且在机器狗本体运动时能够及时收纳，降低了整体重心，越障稳定性大大提高。



图 1.1.10 增程机械臂整体设计图

图 1.1.11 增程机构设计图

这套增程机械臂系统具备高载重负荷大、狭小环境中姿态调整灵活、对不同种类货物适应能力强、模块化可进行适应性改装四大基本优势，其又分为驱动单元、链条增程单元和柔性气动机械爪单元三个单元，系统构成如图所示。

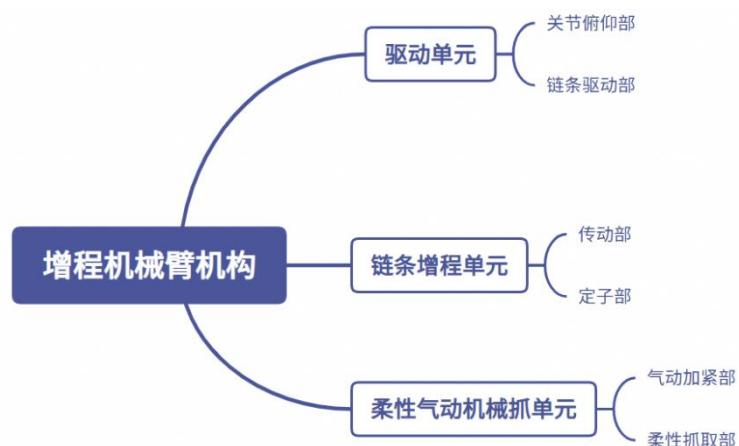


图 1.1.12 增程机械臂构成图

该增程机械臂驱动单元由各关节的俯仰部和增程机构链条的驱动部组成；链条增程单元由传动部和定子部组成；柔性气动机械爪单元由启动加紧部和柔性抓取部组成；传动部由步进电机、传动链条、传动齿轮组成传动齿轮将电机的转动转化成传动链条的横向运动，而链条又与伸缩端的定子部相连，从而实现将电机的转动转化成定子的横向运动，进而实现伸缩臂的抬升。该增程机构运动精度高，灵敏度好，利于实现货物在不同存放状况下的抓取和运送；同时采用模块化设计，可以根据不同的任务需求调整增程单位数，维护简单，传动效率高且寿命较长，显著提升了应对不同货物的适应能力，而且保证其拥有较大载荷。为确保在抓取过程中不使货物掉落，本机构采用气动元件夹紧，避免了电机驱动出现较大空程导致无法夹紧或夹紧力过大导致货物损坏的问题，使抓取简单可靠。

2. 硬件控制

2.1 机器狗硬件方案

2.1.1 硬件系统架构

该机器狗控制系统采用 24V 直流电源作为核心动力源，Raspberry Pi5 作为上位机，搭载 Ubuntu 操作系统，负责处理双目摄像头与固态激光雷达的环境感知数据，完成建图、目标识别等视觉任务，并通过 USART 串口与下位机实时交互控制指令。STM32H723 作为实时控制核心，通过 SPI 总线连接 BMI088 九轴惯性测量单元，同时经由 RS485 工业总线网络协调控制八台无刷电机组成的分布式执行机构。每台电机集成 17 位绝对值编码器、温度传感器及过流保护电路，形成具备自诊断能力的智能关节模块，总线拓扑结构显著降低了多电机协同控制的布线复杂度，这有利于机器狗在配送场景下的快速检修。

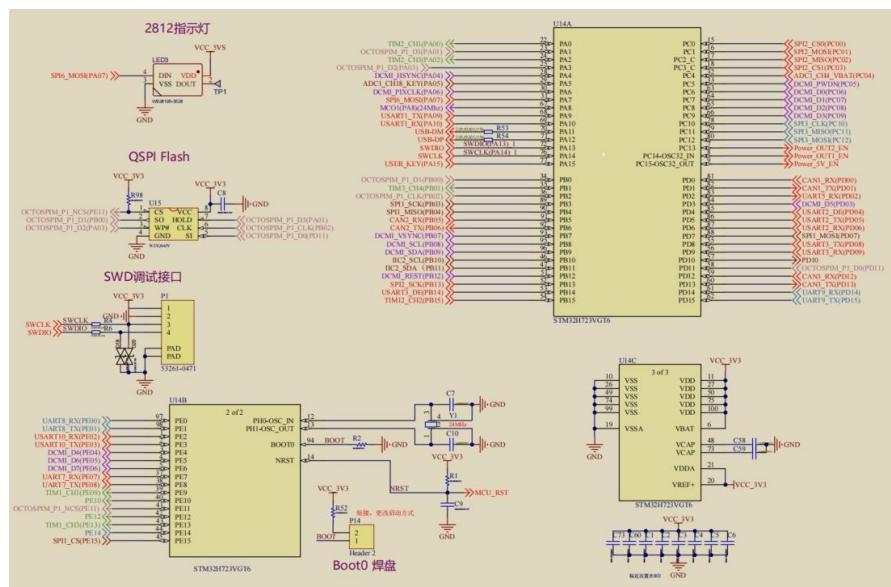


图 6.2.1 STM32H723 控制核心原理图

2.1.2 控制逻辑流程

系统启动后进入多任务实时调度循环，通过优先级抢占机制保障关键控制链路的时效性。核心控制线程融合卡尔曼滤波算法对陀螺仪与加速度计数据进行姿态融合，结合并联腿部运动学模型实时计算各关节目标角度；虚拟力控制（VMC）模块通过雅可比矩阵将末端虚拟力场映射为关节力矩，同时模型预测控制（MPC）采用四阶龙格-库塔（RK4）算法构建动力学预测模型，在滚动时域内求解最优控制序列。

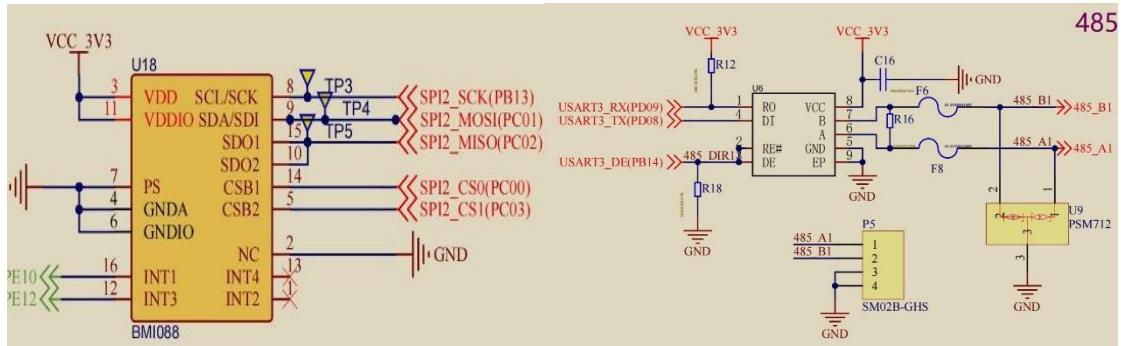


图 2.1.3 IMU 与 RS485 收发器原理图

2.1.3 算法与通信协同

在运动控制层面，系统深度融合了多源传感数据与动力学模型。VMC 算法构建三维势能场，通过梯度计算生成兼具目标导向与避障能力的虚拟力，再经由雅可比矩阵转换为关节空间的驱动力矩。MPC 控制器采用显式离散化方法建立预测模型，通过二次规划求解未来 10 步控制序列，并在每个控制周期应用首步最优解，兼顾响应速度与全局优化。RS485 总线采用主从式通信协议，STM32 作为主机周期轮询八台电机节点，总线错误检测与自动重传机制保障了通信可靠性。安全监控模块实时检测电机温度、电流及通信延迟，异常时自动切换为降级模式，通过动态调整输出扭矩确保系统安全，保障机器狗在社区中配送的安全性。

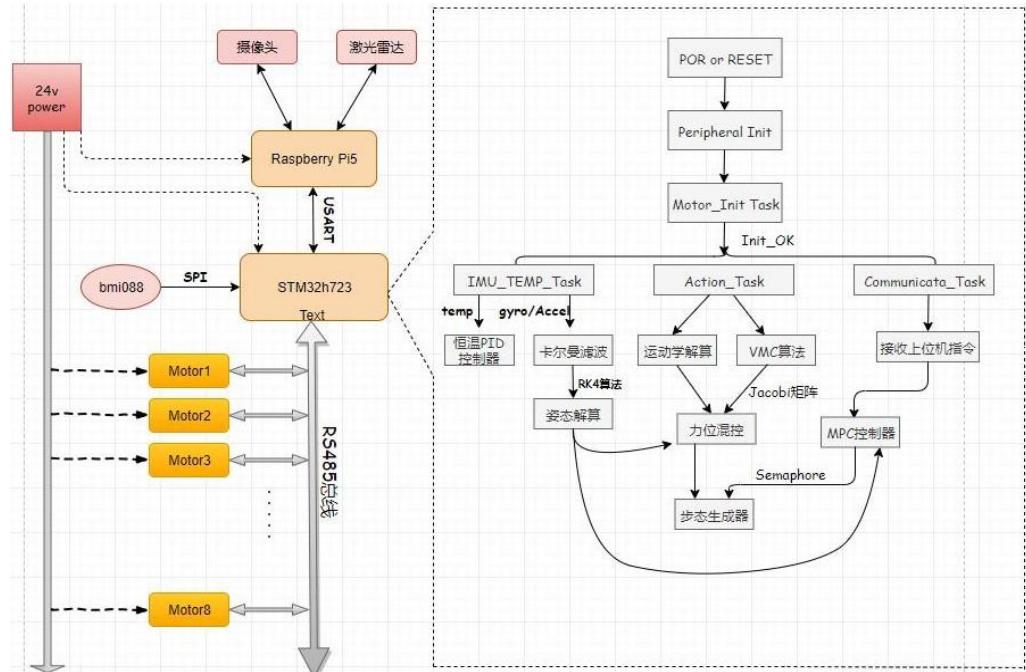


图 2.1.4 硬件架构与控制流程图

2.2 机器狗高效高安全性逻辑控制

2.2.1 末端配送机器狗 VMC 虚拟力控制算法实现

表6.3.1 机器狗控制算法符号说明表

参数符号	说明及单位
l_0	驱动臂长度（单位：m）
A_k	扩展状态转移矩阵，描述自然动态传播特性
B_k	控制输入卷积矩阵，反映历史控制量累积效应
x_k	当前时刻实测状态量（位置/速度），预测初始条件
U	待优化控制输入序列（单位：N·m）
Q^-	状态跟踪权重矩阵
R^-	控制量权重矩阵
X_{ref}	参考轨迹序列（单位：m）
K_{att}	虚拟吸引力系数（单位：N/m）
T_s	控制周期（单位：s）
d_{safe}	障碍安全距离（单位：m）

2.2.1.1 描述复杂构型雅可比矩阵的场景化构建

在专门用于老旧社区复杂场景配送的机器狗四足并联腿机构控制中，雅可比矩阵是连接足端操作空间与关节空间的核心桥梁。针对单腿一主动关节（驱动关节 α ）与二被动关节（调节关节 θ_1/θ_2 ）的3R结构，其雅可比矩阵需精准描述复杂构型下末端笛卡尔坐标系（x, y, z）与关节角度的动态映射关系。

该矩阵不仅包含连杆几何参数，同时融入了老旧社区复杂路况下的运动约束特性——如跨越10cm高台阶时被动关节的协同运动补偿。通过微分几何方法建立的雅可比矩阵如下，其物理意义对应末端足端的线速度与关节角速度的瞬时转换关系：

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(\alpha, \theta_1)} = \begin{bmatrix} -l_0 \sin \alpha - l_1 \sin(\alpha + \theta_1) & -l_1 \sin(\alpha + \theta_1) \\ l_0 \cos \alpha + l_1 \cos(\alpha + \theta_1) & l_1 \cos(\alpha + \theta_1) \end{bmatrix}$$

矩阵第一列表征主动驱动关节 α 对足端水平位移的直接贡献，第二列体现被动关节

θ 在复杂步态（如侧摆、抬腿）中的运动传递特性。该矩阵通过机身IMU实时姿态数据动态更新，确保在倾斜路面行走时的足端轨迹能够精确规划。

2.2.1.2 混合控制落地实现方法

(1) 混合控制架构的场景化协同

针对老旧社区巷道的狭窄空间作业需求，设计了前馈-反馈复合控制架构，实现模型预测控制与误差闭环修正的有机结合。前馈通道通过雅可比转置矩阵将操作空间虚拟力指令（包含地面反力、障碍物碰撞力）转换为关节驱动力矩，同时注入动力学补偿量抵消系统固有扰动，确保在跨越沟壑时的足端触地稳定性。

这种架构的关键优势在于前馈项能够提前预测系统响应，而反馈项则保证了对未知动态的鲁棒性。两者的协同工作使得控制系统既具备模型预测的快速性，又保持了闭环调节的稳定性：

$$\tau_{cmd} = \underbrace{J^T F_{virtual} + \tau_{comp}}_{\text{前馈项}} + \underbrace{K_p e_\theta + K_d \dot{e}_\theta + K_i \int e_\theta dt}_{\text{PID反馈}}$$

(2) 控制参数的工况自适应整定

结合机器狗单腿最大负载12kg的物理特性与老旧社区典型路况，我们建立了基于地形识别的参数整定规则：

$$\begin{cases} K_p = diag([200, 200]) \\ K_d = 2\sqrt{K_p M^{-1}} \quad (\text{临界阻尼调节}) \\ K_i = 0.1 K_p \quad (\text{抑制稳态误差}) \end{cases}$$

在实测中，该算法使机器狗在碎石路面的行走速度提升至1.25m/s，有效解决了传统控制方法在非结构化环境中的姿态失稳问题。通过将VMC算法与机器狗的环境感知系统（双目视觉+激光雷达）深度融合，构建了“路况识别-力控规划-关节伺服”的全闭环控制体系，实现了从平坦路面快速行走到小区窄道灵活转向的全工况适配，为老旧社区“最后一公里”配送提供了高可靠性的运动控制解决方案。

2.3.1 “巷陌灵犬” MPC模型预测控制策略设计

2.3.1.1 扩展状态空间模型的地形适配建模

在“巷陌灵犬”的复杂路况动态控制中，MPC算法的核心是构建融合地形特征的扩展状态空间模型。针对老旧社区典型的运动场景，状态向量定义需完整描述机身质心运动与足端力交互特性：

$$\dot{x} = A_c x + B_c u$$

状态向量 $x = [p_x, v_x, p_y, v_y, \theta, \omega]^T$ ：除x/y向位置速度外，引入偏航角 θ 与角速度 ω ，满足狭窄巷道内的精准转向需求；控制输入 $u = [F_f l, F_f r, F_r l, F_r r]^T$ ：对应四足足端的接触力矢量，通过六维力传感器实时测量并融合IMU姿态数据，实现对不平路面反作用力的动态解算。

考虑到机器狗的控制周期与嵌入式控制器的算力限制，采用零阶保持器结合二阶泰勒展开的离散化方法，在保证1mm位置控制精度的同时降低计算负荷：

$$A_d \approx I + A_c T_s + \frac{(A_c T_s)^2}{2!}$$

$$B_d \approx \left(T_s I + \frac{A_c T_s^2}{2} \right) B_c$$

其中采样周期 $T_s = 5\text{ms}$ ，经实测验证该离散模型在碎石路面的预测误差小，有效平衡了复杂地形下的模型精度与实时控制需求。

2.3.1.2 多工况预测方程构建

预测方程作为MPC算法的核心，需实现未来50ms内的状态序列推演，以应对老旧社区突发的行人穿越、障碍物堆占等动态场景：

$$\mathcal{X} = A_k x_k + B_k U$$

该方程通过融合激光雷达实时扫描的障碍物位置与双目视觉识别的路面高度图，动态调整预测时域内的足端轨迹规划，确保在小转弯半径下的避障安全性。针对末端配送对续航里程与轨迹精度的双重需求，设计带权重调节的二次型目标函数：

$$J = \frac{1}{2} \mathcal{X}^T \bar{Q} \mathcal{X} + \frac{1}{2} \mathcal{U}^T \bar{R} \mathcal{U} + \mathcal{X}^T \bar{Q} X_{ref}$$

其中，轨迹跟踪项 (Q)：在台阶跨越工况下，可以提升横滚角/俯仰角权重确保机身姿态稳定；平坦路面则降低位置权重，减少电机能耗。而控制平滑项 (R)：根据关节电机温度动态调整力输入权重，高温环境下自动增大R矩阵对角线元素，抑制高频力矩波动。

该改进的MPC控制策略使机器狗在突发障碍物前的制动距离大幅缩短，复杂路况下的能量利用率提升，有效平衡了配送效率与运动安全性，为末端配送机器人在非结构化环境中的自主导航提供了高可靠性的控制解决方案。

3. 视觉算法

3.1 基于雷达相机多模态数据融合的复杂路况识别研究

3.1.1 老旧社区的环境感知与建模

鉴于老旧小区环境的复杂性，单一传感器无法满足需求，故采用多传感器融合技术，以PNLC-SLAM算法核心，融合激光雷达、相机、IMU数据，借助深度学习构建高精度环境地图，增强系统环境感知与适应能力。

(1) 多传感器数据采集与预处理：激光雷达用于精确测量距离，相机获取丰富的纹理和颜色信息，IMU实时监测设备姿态变化，三者协同采集小区环境数据。采集后，利用PointNet神经网络算法处理激光雷达点云数据。PointNet通过共享多层感知器(MLP)

网络对每个点的特征进行学习和提取，再经最大池化操作汇聚所有点的特征表示，得到与点排列顺序无关的全局特征，为地图构建提供高质量数据基础。其处理过程如下：假设输入点云数据由 N 个点 $P(x,y,z)$ 构成一个样本，初始化数据样本为 $N \times 3$ ，输入数据为 $N \times 3 \times B$ (B 为 batch size)。在第一次 MLP 训练中，使用权重矩阵 $W_1 \in R^{3 \times 64}$ 和偏置向量 $b_1 \in R^{64}$ ，对每个点 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ ，经线性变换和 ReLU 激活函数 $f(x) = \max(0, x)$ 得到新特征表示 h_{i1} ：

$$h_{i1} = f(W_1 \cdot p_i + b_1)$$

其数据维度变为 $N \times 64 \times B$ 。第二次 MLP 训练使用权重矩阵 $W_2 \in R^{64 \times 1024}$ 和偏置向量 $b_2 \in R^{1024}$ ，对 h_{i1} 进一步变换：

$$h_{i2} = f(W_2 \cdot h_{i1} + b_2)$$

此时数据维度变为 $N \times 1024 \times B$ 。最后经 Max Pooling 全连接层，对样本点特征进行最大池化操作，得到 $B \times 1 \times 1024$ 的点云特征数据 D ，用于后续地图重建等任务。

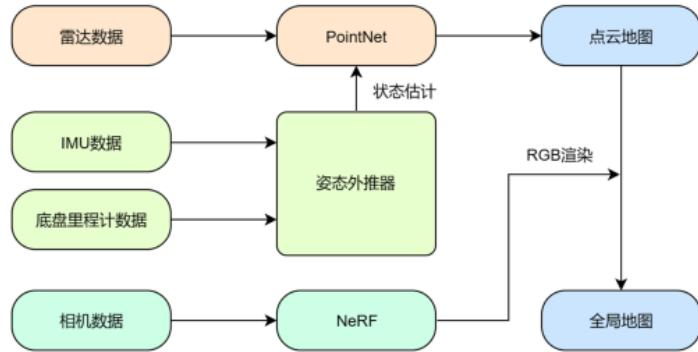


图 3.4.1 PNLC-SLAM 算法框架图

(2) 基于 PointNet 的点云地图构建：利用预处理后的激光雷达点云数据，通过 PointNet 算法构建点云地图。该算法能有效处理点云数据的无序性，提取如边缘、平面等几何特征，减少地图构建误差积累，构建出更精确的地图，助力机器狗在小区配送中准确识别环境，规划配送路径。

(3) 姿态外推与状态估计：运用扩展卡尔曼滤波 (EKF) 算法融合 IMU 数据和底盘里程计数据，实现机器狗在地图中的精确定位和姿态跟踪。EKF 基于卡尔曼滤波原理，通过线性系统状态方程和观测方程对系统状态进行最优估计。定义状态向量 $x \in R^{29}$ 包含 IMU 位置、姿态、速度等信息。假设在 k 时刻状态真值为 x_k ，线性系统状态预测方程为：

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad p(w) \sim N(0, Q)$$

观测方程为：

$$z_k = Hx_k + v_k \quad p(v) \sim N(0, R)$$

实际系统多为非线性，采用扩展卡尔曼滤波将其线性化处理。经对比多种卡尔曼系列算法，EKF 在计算复杂度和精度之间达到较好平衡，能在机器狗配送过程中，面对复

杂运动情况，准确估计其姿态和位置，保障稳定导航。

3.1.2 RTK 与 SLAM 融合精确定位

RTK 与 SLAM 建图融合采用 RTK 技术与 SLAM 技术相结合的方式实现精确定位。RTK 技术基于载波相位观测值，在小区开阔区域（如小区广场）能提供厘米级定位精度，快速确定机器狗位置。SLAM 技术（如 PNLC - SLAM 算法）则在 RTK 信号不佳（如小区高楼附近信号遮挡区域）时，依靠自身传感器构建局部地图实现自主定位。两者融合，RTK 解决 SLAM 累积误差问题，SLAM 保证 RTK 信号受干扰时系统的定位连续性和可靠性，确保机器狗准确送达货物。

3.1.3 路径规划与动态避障技术

老旧小区环境复杂多变，要求机器狗具备高效的路径规划与动态避障能力。采用改进的 A*算法与 DWA 算法融合，提升其在复杂路况下的导航能力。

（1）改进 A*算法：传统 A*算法规划路径拐点多，影响小区配送效率和安全。改进后的算法优化启发式函数，结合欧几里得距离、曼哈顿距离 以及基于小区环境特征（如狭窄通道、障碍物聚集区域）的加权距离：

$$h(n) = \alpha\sqrt{(x_n - x_G)^2 + (y_n - y_G)^2} + \beta(|x_n - x_G| + |y_n - y_G|) + \gamma \cdot f_{env}(n)$$

同时改进关键点选取策略，引入平滑性和环境适应性约束，减少拐点，使路径更平滑，降低配送风险和能耗，提高配送效率。

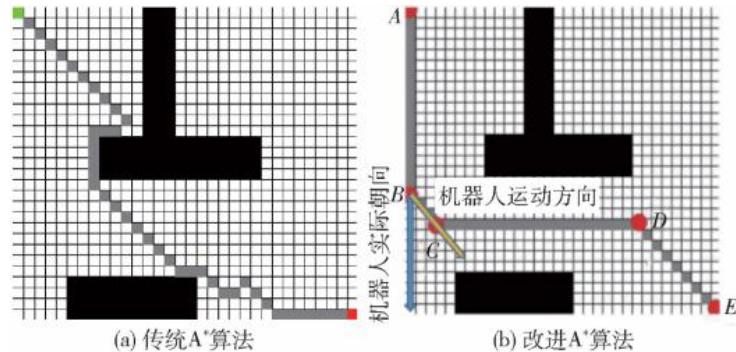


图 3.4.2 传统 A*算法与改进 A*算法路径规划对比图

（2）DWA 算法融合：优化 DWA 算法的评价函数，结合目标方向、障碍物距离、速度大小和环境适应性因子：

$$f(v, \omega) = \alpha f_{goal}(v, \omega) + \beta f_{obs}(v, \omega) + \gamma f_{vel}(v, \omega) + \delta \cdot f_{adapt}(v, \omega)$$

在速度窗口内计算并选择最优速度组合，使机器狗在动态环境（如遇到突然出现的行人或车辆）中实时调整运动方向和速度，实现动态避障。

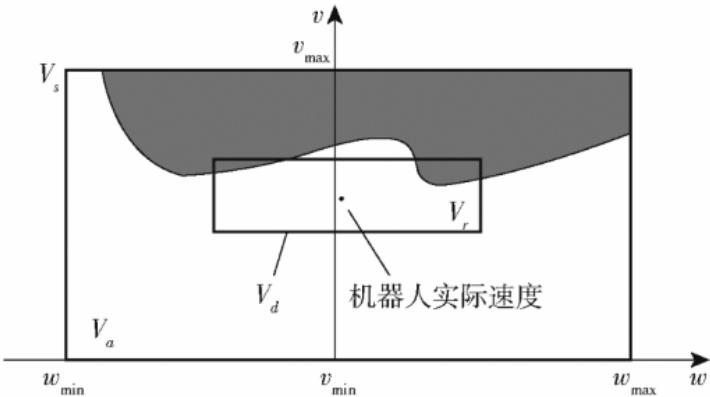


图 3.4.3 速度矢量空间示意图

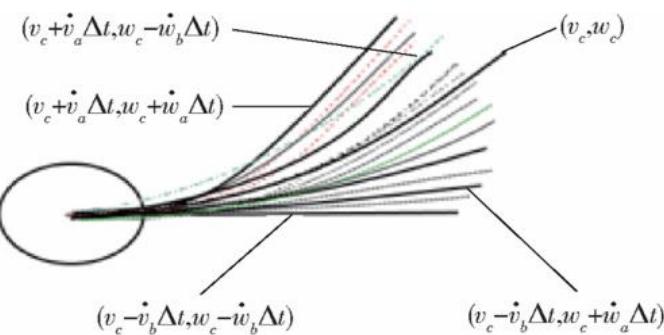


图 3.4.4 机器人多个轨迹生成图

将改进的 A* 算法与优化后的 DWA 算法融合，可以实现全局路径规划和局部动态避障的有机结合。改进的 A* 算法规划全局路线，DWA 算法根据实时环境调整和避障，协同提升机器人在小区复杂环境中的导航能力，满足住户多元化配送需求，实现老旧社区复杂场景智能配送。

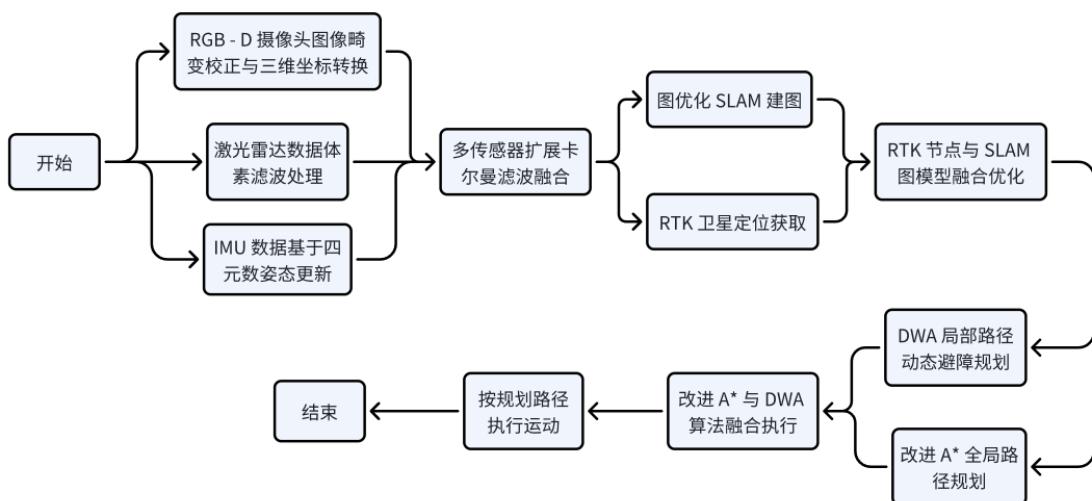


图 3.4.5 动态避障系统工作流程图