

物流搬运机器人路径跟踪双闭环 P+前馈系统设计

刘美娟

(咸阳职业技术学院 财经学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 在复杂的物流搬运环境中, 机器人需要实时规划最优路径以避免障碍物, 并在限定时间内完成任务; 实时路径规划面临着复杂的算法设计和计算量大的挑战; 同时, 物流搬运机器人在运动中会面临各种外部扰动和变化, 为了实现准确的路径跟踪, 提高机器人工作的效率和准确性, 设计物流搬运机器人路径跟踪双闭环 P+前馈系统; 主控模块采用分层架构和模块化设计上层控制层、中间连接层和底层硬件控制层 3 个部分, 实现对机器人的控制和管理; 运动控制模块利用低功耗动态视觉传感器采集环境信息, 并通过底层驱动电路实现控制数据和指令的传输; 通过 CAN 总线将路径规划结果实时发送给底层控制器, 设计双闭环 P+前馈控制算法进行路径跟踪误差控制, 从而更精确地控制机器人的路径跟踪运动; 测试结果表明, 设计系统应用后, 可有效控制主控模块与运动控制模块之间的通信延迟, 通信延迟平均值为 4.2 ms; 应用后在风力干扰、负载变化、地面摩擦力变化和其他机器人的碰撞情况下, 得到的路径跟踪结果与规划路径结果拟合度接近 100%, 证实了设计系统具有较好的路径跟踪效果, 有助于优化机器人工作效率和准确性, 具有一定的实用性和推广价值。

关键词: 双闭环 P+前馈系统; 物流搬运机器人; 路径跟踪; 主控模块; 运动控制; 底层硬件控制层

Double Closed-loop P+feedforward System for Path Tracking of Logistics Handling Robots

LIU Meijuan

(College of Finance and Economics, Xianyang Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: In complex logistics handling environments, robots need to plan optimal path in real-time to avoid obstacles and complete tasks within limited time. Real time path planning faces challenges in complex algorithm design and large computational complexity. While logistics handling robots will face various external disturbances and changes during movement. In order to achieve accurate path tracking, improve the efficiency and accuracy of robots, a dual closed-loop P+ feedforward system for logistics handling robot path tracking is designed. The main control module adopts a layered architecture and modular design, consisting of three parts: upper control layer, middle connection layer, and lower hardware control layer, so as to achieve control and management of the robot; The motion control module utilizes low-power dynamic vision sensors to collect environmental information, and transmits control data and instructions through the underlying driving circuit. The path planning results are transmitted in real time to the underlying controller through CAN bus, and double closed-loop P+feedforward control algorithm is designed to control the path tracking error, thereby more accurately controlling the path tracking of the robot. Experimental results show that after applying the system, it can effectively control the communication delay between the main control module and the motion control module, with an average communication delay of 4.2 ms. Under the conditions of wind interference, load changes, ground friction changes, and other robot collisions, the path tracking results obtained have a fitting degree close to 100% with the planned path results, confirming that the designed system has good path tracking effect, which helps to optimize the efficiency and accuracy of robots, and has certain practical and promotional value.

收稿日期:2024-04-07; 修回日期:2024-05-15。

基金项目:陕西省教育科学“十四五”规划课题(SGH24Y3341)。

作者简介:刘美娟(1988-),女,硕士,讲师。

引用格式:刘美娟. 物流搬运机器人路径跟踪双闭环 P+前馈系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 118-126.

Keywords: double closed-loop P+feedforward system; logistics handling robots; path tracking; main control module; motion control; underlying hardware control layer

0 引言

物流搬运机器人路径跟踪对于物流行业的高效运作和优化提供了重要支持。通过精确控制机器人的移动轨迹和位置^[1]，可以实现货物的准确、快速、安全地搬运和分拣，提高物流运作效率。路径跟踪的重要性体现在以下几个方面：1) 路径跟踪系统可以减少人工操作的错误和时间成本，实现自动化操作，提高作业效率；2) 通过精确的路径规划和控制，可以充分利用仓库或工厂的空间，提高存储密度；3) 路径跟踪系统还能有效避开拥堵区域或障碍物，保证物流过程的顺畅性和安全性；4) 路径跟踪系统结合智能算法和传感技术，可以实现机器人之间的协同作业，进一步提升物流搬运的效率和准确性。综上所述，物流搬运机器人路径跟踪对于实现物流行业的高效运作和优化起着至关重要的作用。

文献 [2] 提出了一种基于干扰观测器的移动机器人路径跟踪控制方法。从运动学跟踪层面与动力学跟踪层面出发，实现了良好的抗干扰能力与路径跟踪性能。然而，在运动学跟踪层面和动力学跟踪层面的控制策略中，如果不能准确地处理系统负载和抵消外部力矩干扰，可能会导致路径跟踪效果的不准确性或不稳定性。文献 [3] 提出了一种改进路径跟踪控制方法，以提高复杂食品原料仓库中全向搬运机器人的跟踪能力。研究通过设计控制器和优化模糊控制器，以跟踪误差信息和电机电压为输入输出，最终实现跟踪误差快速降为零、跟踪过程平稳，并提高全向搬运机器人的工作状态。但麻雀算法的性能和收敛速度受到参数设置和初始化麻雀种群的影响。如果选择不合适的参数或初始化方法，可能导致算法陷入局部最优解或无法充分发挥算法的优势，从而影响路径跟踪效果的提升程度。文献 [4] 提出了一种考虑移动机器人形状的形状感知 A* 路径规划方法，以适应实时执行任务所需的路径规划算法。使用顶置摄像头捕捉任务空间中的障碍物图像，并在 ROS 平台上进行发布，在 OpenCV 软件中使用 Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) 和卡尔曼滤波器算法对捕获的图像进行处理、检测和跟踪。视觉检测和跟踪算法的准确性和鲁棒性会直接影响路径跟踪的有效性。如果算法无法准确地检测和跟踪障碍物，或者在不同情况下都存在较大的误差，可能导致路径规划不精确或机器人无法正确避免障碍物，进而影响路径跟踪效果。文献 [5] 通过图像处理和机器学习方法来实现避障和目标跟踪。通过使用单目摄像头进行图像处理，识别道路车道并计算机

器人相对于路中心的位置。同时，利用 Haar 级联分类器的机器学习技术来检测机器人在移动过程中遇到的不同大小和形状的障碍物。如果机器学习算法无法正确分类障碍物或无法准确预测障碍物的位置和形状，可能导致机器人在避障过程中出现困难或发生碰撞，影响路径跟踪效果。

双闭环 P+前馈控制系统可以提供更高的精准性和稳定性。其中，P 控制器可以根据误差信号对输出进行适当的调整，而馈前系统可以快速响应系统的变化，进一步减小误差，保证路径跟踪的准确性。因此，设计物流搬运机器人路径跟踪双闭环 P+前馈系统。该系统的设计通过主控模块和运动控制模块，实现了机器人分层管理和精确的路径跟踪运动控制，增强了对外部干扰的抵抗性，提高了路径跟踪精度和响应速度。

1 物流搬运机器人路径跟踪总体架构设计

为了实现物流搬运机器人控制的高效性和精确性，将路径跟踪系统分为主控模块和运动控制模块两部分进行模块化设计，如图 1 所示。为提高系统的可维护性和扩展性，主控模块采用分层架构和模块化设计，使得系统的结构更加清晰，便于维护和扩展。运动控制模块利用低功耗动态视觉传感器采集环境信息，并设计双闭环 P+前馈控制器进行路径跟踪误差控制过程。两部分之间的连接通过 CAN 总线实现。通过 CAN 总线，主控模块将路径规划结果实时发送给底层控制器，从而实现机器人路径跟踪运动的精确控制。同时，主控模块通过 CAN 总线接收底层控制器反馈的状态信息，实现对机器人状态的实时监控和管理。物流搬运机器人路径跟踪系统框架如图 1 所示。

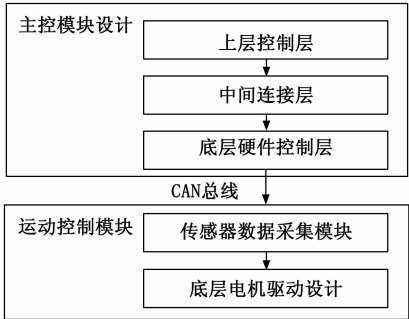


图 1 物流搬运机器人路径跟踪系统框架

2 系统硬件模块设计

2.1 主控模块设计

为了更好地控制和管理物流搬运机器人^[6-8]，实现

系统的分层结构和模块化设计，降低耦合度，从上层控制层、中间连接层和底层硬件控制层 3 个方面设计主控模块。上层控制层负责路径规划、任务调度和状态监控，中间连接层承担消息传递、接口封装和通信功能，底层硬件控制层则控制物理设备、数据采集和处理。主控模块结构如图 2 所示。

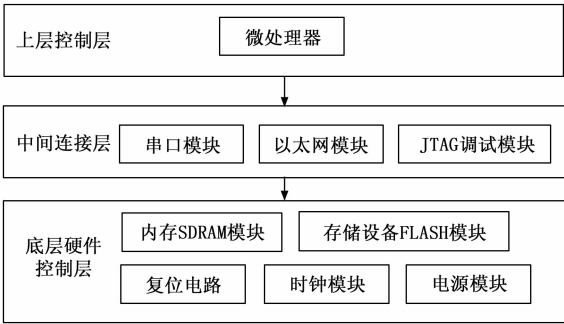


图 2 主控模块结构

如图 2 所示，分别设计上层控制层、中间连接层和底层硬件控制层。

2.1.1 上层控制层

上层控制层负责路径规划、任务分配、协调与决策等高级控制功能。它基于系统需求和环境信息，利用算法和逻辑进行高级控制，生成目标路径或行为指令，并将其传递给中间连接层。微处理器作为上层控制层，是主控模块的核心，负责整个系统的高级控制和决策。PXA270 是一款基于 Intel XScale 架构的低功耗高性能嵌入式微处理器。它具有超流水线指令执行模型和多级缓存，能够高效执行并行指令和提升数据访问速度的优势。因此，选用 PXA270 微处理器作为上层控制层核心组件，如图 3 所示。

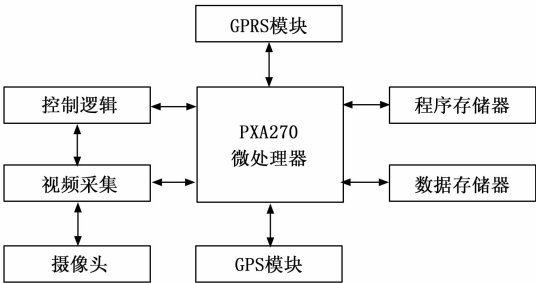


图 3 PXA270 微处理器结构

PXA270 微处理器外围硬件承担着程序运行与数据存储的任务，其中包括：64 M 的 SDRAM HY57V5-61620FTP-H 作为程序的数据堆栈、运行空间与内核的加载空间；32 M 的 FLASH 由两片 Intel JS28F128 组成，用于存储根文件系统、内核、Bootloader 等；128 M 的 SD 卡通过 SD/MMC 接口与 CPU 连接，用于存放

文件。通过内置的协处理器和控制接口，负责接收和解析来自中间连接层的数据，并根据预定的控制算法和策略，向底层硬件控制层发送控制指令，实现对机器人的控制和管理。同时，PXA270 微处理器还需要处理来自底层硬件控制层的反馈信息，监控机器人的状态和运动情况，确保机器人能够安全、准确地完成预设的任务。

2.1.2 中间连接层

中间连接层作为上层控制层和底层硬件控制层之间的桥梁，负责数据传递与通信。它接收上层控制层的指令和参数，并将其转化为底层硬件控制层可理解的形式，同时，通过通信接口将相关指令传递给底层控制层。此外，中间连接层也负责接收底层反馈数据，将其转化为上层控制层所需的信息。中间连接层包括串口模块、以太网模块和 JTAG 调试模块。具体设计过程如下：

1) 串口模块：该模块充当上层控制层与底层硬件控制层之间的数据传输通道。串口与主控模块连接时，使用相应的串口引脚连接，并通过串口协议进行数据交换，每个串口都可以作为一个独立的通信通道，用于与特定的设备或模块进行数据传输。物流搬运机器人在运行过程中需要与传感器、执行器、上位机监控系统多种设备进行数据交换，为了提高系统的通信效率和响应速度，通过使用 UART2、UART1、UART0 三个串口，同时进行多种通信。3 个串口的具体作用如表 1 所示。

表 1 3 个串口的具体作用

序号	串口名称	串口作用
1	UART2	更新和配置系统程序
2	UART1	提供 RS-232 串行信号
3	UART0	外接无线数传设备

2) 以太网模块：以太网模块是物流搬运机器人路径跟踪系统与其他外部设备之间的通信组件。对于物流搬运机器人路径跟踪系统而言，需要实时传输大量的位置信息、地图数据和任务指令，使用以太网可以更快速地完成数据交换。为此，以太网模块通过以太网口外接以太网控制器 CS8900A 实现调试下载与配置网络的功能，同样用于下载与调试的还有 JTAG 调试模块。

3) JTAG 调试模块：JTAG (Joint Test Action Group) 是一种硬件调试和测试的标准接口。该模块利用 JTAG 接口与主控模块连接，通过调试、编程和故障诊断等操作，调试和诊断物流搬运机器人路径跟踪系统。

2.1.3 底层硬件控制层

底层硬件控制层包括各类传感器、执行器和电机驱动器等，负责底层运动控制和实际操作。它根据中间连接层传递来自主控模块的指令和参数，控制执行器实现机器人的运动、路径跟踪和搬运任务。同时，底层硬件

控制层也负责采集物流搬运机器人传感器数据，并将其反馈给中间连接层和上层控制层，以提供实时的环境感知和状态反馈。在此过程中，传感器和执行器会受到温度、湿度、振动等环境因素的影响，降低设备之间数据传输速率和响应速度，而电机驱动器会因为负载变化、电源波动等因素出现不稳定的情况。为了确保底层硬件控制层中的各类传感器、执行器和电机驱动器等能够稳定、高效地运行，对底层硬件控制层中的内存 SDRAM 模块、存储设备 FLASH 模块、复位电路、时钟模块和电源模块进行设计。具体如下：

1) 内存 SDRAM 模块：由两片 16 位的 HY57V56-1620-FTP-H SDRAM 芯片组成的 32 位接口，用作微处理器的动态存储器。通过使用控制线和地址线与 PXA270 相连，以及使用数据屏蔽线、地址线和数据线等进行读写操作，实现实时的路径跟踪，并存储和处理相关数据，从而确保机器人能够准确、稳定地跟踪指定路径。

2) 存储设备 FLASH 模块：以两片 Intel E28F128-J3A 构成 32 位接口，用于存储启动引导程序 Bootloader 和根文件系统，连接到 PXA270 的 n RESET_OUT 引脚。通过 FLASH 模块，机器人可以在启动或重启后恢复之前的配置与状态，确保路径跟踪系统的稳定性和可靠性。

3) 复位电路：由看门狗复位电路、自动复位电路、手动复位电路构成，可将主控模块外接芯片、内部寄存器和 PXA270 等置于事先定义的复位状态，停止内部时钟，使处理器保持静止状态。

4) 时钟模块：时钟模块由 13 MHz 的 CPU 振荡频率经过 PLL 为多个模块，为 CPU 与其外围器件提供一个稳定时钟源。该模块使用锁相环 PPL 控制环路内部中振荡信号的相位与频率，通过时钟同步，路径跟踪系统能够按照预定的时间序列进行数据处理和控制指令执行，从而实现准确的路径跟踪。时钟模块与微处理器 PXA270 的连接情况如图 4 所示。

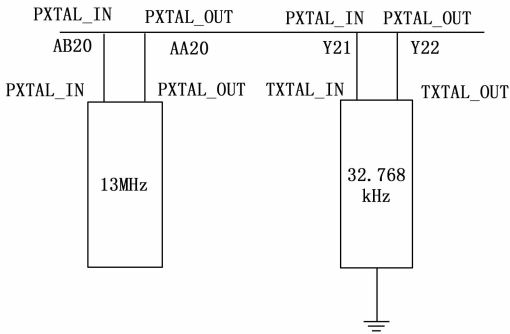


图 4 时钟模块与 PXA270 的连接情况

芯片，特别适合于 Intel Xscale 微处理器设备。因此，电源模块的管理芯片为 MAX1586，通过与微处理器相连，实现物流搬运机器人跟踪底层硬件控制。MAX1586 结构如图 5 所示。

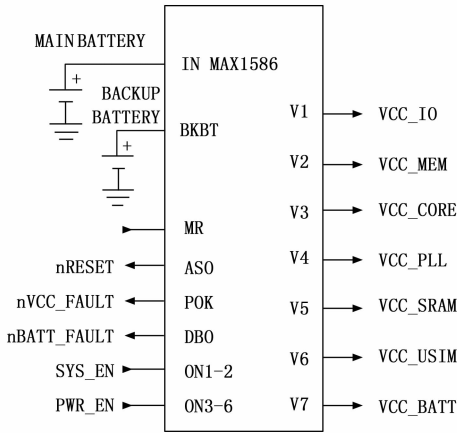


图 5 MAX1586 结构图

2.2 运动控制模块设计

主控模块负责处理高级的逻辑控制、路径规划、决策算法等任务，而底层驱动电路和传感器接口模块则专门负责实现运动控制、数据采集、环境感知等底层硬件操作，通过分工合作提高工作效率。因此，为了使物流搬运机器人能够按照规划好的路径执行运动^[9-11]，并实时响应主控模块的指令，在主控模块设计后，设计包括底层驱动电路、传感器接口两部分的运动控制模块，并通过 CAN 总线连接两个模块，通过监测和控制机器人的位置、速度和姿态，将主控模块发送的运动指令转化为实际的电机控制信号，以实现机器人的准确运动和轨迹跟踪。

2.2.1 传感器数据采集模块设计

物流搬运机器人通常需要长时间工作，且物流搬运机器人在搬运货物的过程中，需要与各种障碍物进行安全和高效的交互。因此，根据物流搬运机器人运动控制的需求^[12-14]，设计一种低功耗动态视觉传感器，采集物流搬运机器人的环境信息，进行位置、速度和姿态的测量。动态视觉传感器能够以高帧率捕捉周围环境的变化和物体的运动。这使得物流搬运机器人能够对快速移动的物体作出更精确的感知和追踪^[15-17]，从而更有效地应对不同场景的需求，并做出更快的决策与响应。

该动态视觉传感器由列读出电路、行编码电路、行仲裁电路、行/列线或电路、像素阵列构成。具体构造如图 6 所示。

动态视觉传感器通过先进的列读出电路、行编码电路、行仲裁电路和行/列线或电路实现高速、高精度的图像数据读取和处理。列读出电路采用高速放大器、低噪声放大器和缓冲器，确保图像数据的快速、稳定读取

5) 电源模块：MAX1586 是一种优化过的电源管理

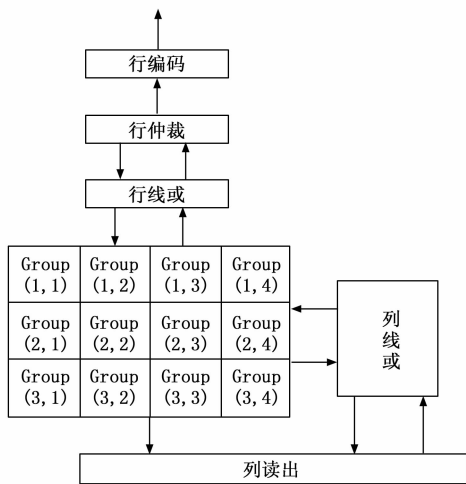


图 6 动态视觉传感器具体构造

和图像质量的提升。行编码电路基于 FPGA 实现高效、实时的像素数据编码，并通过存储器存储编码后的数据。行仲裁电路基于 DSP 设计，实现公平、实时的像素点读出仲裁，确保同一时间只有一个像素点被读出。行/列线或电路基于高速逻辑芯片实现快速、稳定的数据或运算，得到最终图像数据。像素阵列采用 6×8 CMOS 结构，结合高速、低功耗的信号处理电路，实现高清晰度、高灵敏度的图像采集和处理。

2.2.2 底层驱动电路设计

在运动控制模块中，以底层控制器为核心，搭载电机驱动单元实现物流搬运机器人的运动控制。运动控制模块的具体实现步骤如下：

- 1) 通过 CAN 总线与主控模块相连接；
- 2) 接收并解析主控制器发送的数据；

3) 由底层控制器根据处理后的数据输出占空比变化的 PWM 波。底层控制器基于 STM32F407 微控制器，能够接收并解析主控制器发送的数据，进而生成 PWM 波来控制电机的速度和方向。STM32F407 以其丰富的外设资源和良好的开发环境简化了设计流程。该控制器还包括稳定的电源供应设计、晶振电路提供时钟信号、外设接口实现数据交换、EEPROM 存储程序和数据、看门狗定时器监控运行状态，以及保护电路防止过流、过压、过温等异常情况，确保系统稳定运行。

4) 由驱动单元根据 PWM 波来控制电机转速：底层驱动电路中的驱动单元根据接收到的 PWM 波来控制电机的转速。驱动单元通常包括功率放大器、电机驱动电路等组件，用于将 PWM 波转换为实际的控制电压或电流，从而驱动电机转动。通过调整 PWM 波的占空比，可以实现电机的无级调速，从而提高整个运动控制系统的性能和可靠性。电机驱动单元的结构设计如图 7 所示。

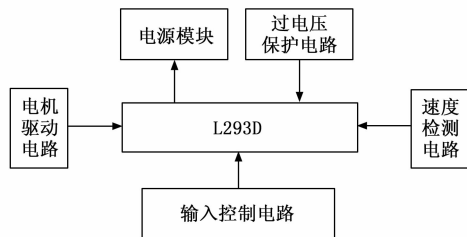


图 7 电机驱动单元的结构设计

选用的驱动芯片为 L293D，该芯片可以同时驱动两个电机，并且具有使能和方向控制信号。在电源模块的设计中，选择一个 5 V 的稳定输入电源，设计一个 π 型滤波器去除电源中的噪声和纹波，该 π 型滤波器由 3 个元件组成：两个电容 (C_1 和 C_2) 和一个电感 (L_1)。电容 C_1 和 C_2 用于过滤低频噪声，电感 L_1 用于过滤高频噪声。使用线性稳压器 7805 来稳定电源电压。7805 可以提供稳定的 5 V 输出，同时可以承受较高的输入电压。并在输出端增加一个 $100 \mu\text{F}$ 的小电容，进一步滤除输出电压中的波纹。

3 双闭环 P+前馈跟踪算法设计

由于主控模块与运动控制模块之间需要通过 CAN 总线通信，完成数据传输和指令传递，可能存在通信延迟导致的控制不及时或不稳定的问题。为提高系统稳定性和精度，设计双闭环 P+前馈跟踪算法，结合反馈与前馈控制策略，解决通信延迟和系统误差带来的挑战，确保机器人路径跟踪系统能够稳定、高效地执行各项任务。

3.1 路径规划设计

物流搬运场景中，涉及多个物流机器人的协同工作和多个任务目标的规划。路径规划模块需要考虑多个机器人之间的协作、协调问题，以及如何优化多个任务目标的分配和路径规划^[18-20]。通过综合考虑机器人的运动特性、环境地图和任务约束等信息，设计一种路径规划算法能够确保机器人在复杂环境中有效、安全地导航。具体运行流程如下：

1) 初始化：设置起始点 s 和目标点 g ，以及全局改进势场的初始参数。

2) 构建全局改进势场：根据起始点 s 和目标点 g 的位置，以及障碍物的位置和形状，构建全局改进势场。

全局改进势场的构建是算法的核心部分。其构建需要根据起始点和目标点的位置，以及障碍物的位置和形状，将环境划分为若干个网格单元。然后，根据每个网格单元的位置和周围环境的信息，计算出该网格单元的势值。势场中的每个点都有一个势值，根据该点的势值和周围点的势值差异来决定下一步移动的方向。各点势值的计算公式如下：

$$G_{\text{robot}} = G_{\text{target}} + G_{\text{obstacle}} \tag{1}$$

式中， G_{target} 为目标点对物流搬运机器人的吸引力； G_{obstacle} 为障碍物对物流搬运机器人的排斥力； G_{robot} 为物流搬运机器人当前所在网格单元的势值。

其中： G_{target} 是基于物流搬运机器人与目标点之间的距离的反比函数得到的，即：

$$G_{\text{target}} = \frac{1}{2}k_{\text{target}} |g - s|^2$$

式中， k_{target} 为吸引力常数。 G_{obstacle} 是基于物流搬运机器人与障碍物之间的最近距离得到的，即：

$$G_{\text{obstacle}} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{\text{obstacle}} \left(\frac{1}{|d-s|} - \frac{1}{m_d} \right), & |d-s| < m_d \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$

式中， k_{obstacle} 为排斥力常数， d 为障碍物的位置， m_d 为障碍物的影响范围。

此时，物流搬运机器人的加速度可以表示为：

$$a = \frac{-\nabla G_{\text{robot}}(g)}{m} \tag{2}$$

式中， $G_{\text{robot}}(g)$ 为机器人在目标点 g 处的势值， ∇ 为梯度算子， m 为机器人的质量。

3) 局部动态避障：通过传感器获取周围环境的实时信息，包括障碍物的位置、大小和形状等信息，然后根据这些信息调整机器人的运动轨迹，以避免与障碍物发生碰撞。局部动态避障的具体公式如下：

$$H_{\text{obstacle}} = (H_{\text{target}} + H_{\text{robot}}) \tag{3}$$

式中， H_{target} 为物流搬运机器人向目标点移动的速度； H_{obstacle} 为物流搬运机器人根据障碍物的信息调整后的速度； H_{robot} 为物流搬运机器人当前的运动速度。其中， $H_{\text{obstacle}} = H_{\text{target}} + a\Delta t$ ， Δt 表示时间步长。

4) 更新全局改进势场：根据物流搬运机器人的移动轨迹和周围环境的实时信息，更新全局改进势场，以便在下一步的路径规划中更加准确地指导物流搬运机器人的移动。具体公式如下：

$$G_{\text{new}} = G_{\text{old}} - (G_{\text{robot}} + G_{\text{obstacle}}) \tag{4}$$

式中， G_{new} 为更新后的全局改进势场中的势值； G_{old} 为上一步中计算出的全局改进势场中的势值。

5) 重复步骤 3) ~4)，直到物流搬运机器人到达目标点。

3.2 物流搬运机器人路径跟踪误差控制

在机器人路径跟踪过程中，尤其是在高速移动或复杂环境中，需要考虑运动的平滑性和稳定性。因此，设计双闭环 P+前馈控制器模块对此进行控制。设计的双闭环 P+前馈控制器由两个闭环控制器和一个前馈控制器组成。其中，内环控制器用于速度控制，外环控制器用于位置控制。前馈控制器则负责根据给定的路径计算出预期的输出，并将其添加到内环控制器和外环控制器的输入中。通过综合两部分的设计，实现物流搬运机器

人路径跟踪误差控制。

内环控制器的目标是使物流搬运机器人路径的速度跟踪误差为零。假设物流搬运机器人路径速度跟踪误差为 e_c ，结合 G_{new} 则有：

$$e_c = (V_c - V_d) \tag{5}$$

式中， V_c 为期望速度； V_d 为实际速度。

则内环控制器可以用下式来表示：

$$U_v = K_v e_c \tag{6}$$

式中， K_v 是内环控制器的比例增益。

外环控制器的目标是使物流搬运机器人路径的位置跟踪误差为零。假设物流搬运机器人路径位置跟踪误差为 e_d ，结合 G_{new} 则有：

$$e_d = (P_c - P_d) \tag{7}$$

式中， P_c 为期望位置； P_d 为实际位置。

则外环控制器^[21-24]可以用下式来表示：

$$U_p = K_p e_d \tag{8}$$

式中， K_p 为外环控制器的比例增益。

前馈控制器的目的是预测未来的输出^[25]，以减小物流搬运机器人路径跟踪误差。假设预期的输出为 y_f ，则有：

$$y_f = A \sin(\chi t + \delta) (U_v + U_p) \tag{9}$$

式中， A 为物流搬运机器人路径跟踪幅值； χ 为物流搬运机器人路径跟踪角频率； δ 为物流搬运机器人路径跟踪初相位； t 为指路径跟踪时间。至此实现物流搬运机器人路径跟踪双闭环 P+前馈系统设计。

4 系统测试

4.1 实验设置

利用设计的物流搬运机器人路径跟踪双闭环 P+前馈系统对物流搬运机器人实施路径跟踪，测试系统实际表现性能。选取 M-410iC/185 物流搬运机器人进行实验。

M-410iC/185 物流搬运机器人技术参数如表 2 所示。

表 2 物流搬运机器人技术参数

参数名称	参数值
控制轴数	4
可达半径/mm	3 143
J1 轴动作范围/(°)	360
转速/rad	6.28
J2 轴动作范围/(°)	144
转速/rad	2.51
J3 轴动作范围/(°)	136
转速/rad	2.37
J4 轴动作范围/(°)	720
转速/rad	12.57
手腕部可搬运质量/kg	185
J2 机座部可搬运质量/kg	550
J3 手臂部可搬运质量/kg	30
手腕允许负载/(kg·m ²)	88

除上述参数外,设定双闭环 P+前馈参数为:反馈环路参数:比例增益 0.5,积分时间常数 0.1;前馈环路参数:前馈增益 0.3、传感器采样频率 50 Hz、轨迹误差容限 1 cm、电机转速调节范围 100~300 rpm。

通信延迟是指从发送数据开始到数据在接收端完全被接收并处理完成所经过的时间。为了评估系统中主控模块与运动控制模块之间的数据传输延迟,在上述参数设定下,测试设计系统的通信延迟,以确保系统实时性和稳定性。结果如图 8 所示。

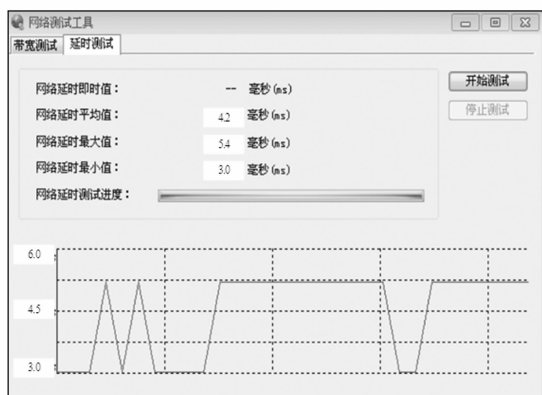


图 8 通信延迟测试结果

由图 8 可知,网络延时平均值为 4.2 ms,表明主控模块发送的数据平均需要 4.2 ms 才能被运动控制模块接收和处理。整体延迟时间的波动范围在 3~6 ms 之间,系统通信延迟相对稳定。证实了所提方法通过双闭环控制结构中的 P+前馈控制,能够综合利用反馈控制 and 前馈控制的优势,提高系统的稳定性和鲁棒性,减小外部干扰对系统性能的影响,降低通信延迟。

4.2 实验设计

由上述实验设置可知,设计系统可有效控制通信延迟,实现物流搬运机器人路径跟踪。因此,下述将采用两种不同的测试工况来评估系统的实际表现性能。以下是具体的测试工况:

在曲线跟踪测试中,要求机器人沿着一条规划的曲线移动。通过给定机器人一个目标点并在其行进直线上设置障碍物,使其只能通过曲线行进,实施路径跟踪。在测试过程中,控制输入的变化情况,记录实验机器人的实际轨迹和目标轨迹之间的偏差。

为测试设计系统鲁棒性,在机器人运动的过程中引入外部干扰力。通过施加干扰力,观察实验机器人在设计系统控制下的曲线路径跟踪情况。施加的干扰力具体如下:

- 1) 风力干扰:在实验室中进行风力干扰,观察风力干扰下实验机器人的路径跟踪情况。
- 2) 负载变化:增加实验机器人的搬运货物重量使其略微超重,观察实验机器人的路径跟踪情况。

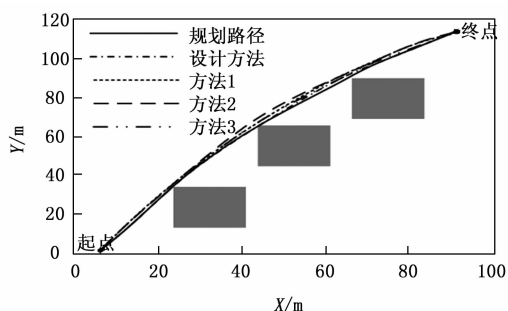
3) 地面摩擦力变化:当在更加光滑的地面上运行时,观察实验机器人的路径跟踪情况。

4) 其他机器人的碰撞:在密集的机器人工作环境中,观察实验机器人的路径跟踪情况。

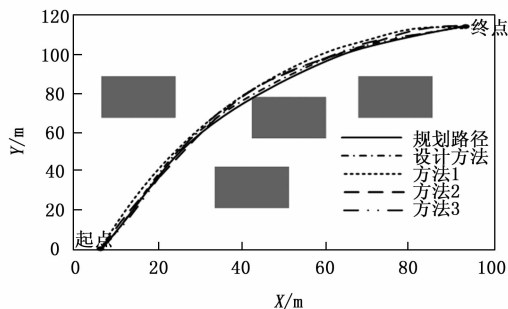
分别测试设计系统的路径跟踪精度。在测试中,将基于干扰观测器的路径跟踪方法、基于改进模糊 PID 的路径跟踪方法以及考虑移动机器人形状的形状感知 A* 路径规划方法作为测试中的对比方法,分别用方法 1、2、3 来表示,以获取对比结果。

4.3 结果分析

在实验室中使用风力机模拟出六级风力的环境,并增加实验机器人的搬运货物重量使其略微超重后,设计系统与方法 1、2、3 的实验机器人曲线路径跟踪情况如图 9 所示。



(a) 风力干扰下的结果



(b) 负载变化下的结果

图 9 曲线路径跟踪情况

在六级风力干扰下,设计系统与方法 C 表现出较好的实验机器人路径跟踪能力。在增加货物重量后,设计系统的路径跟踪误差有一定增长,但仍表现出较好的路径跟踪能力。说明设计系统利用 P+前馈控制算法可以通过运动预测和补偿来降低系统的静态误差,实现更高的控制精度,确保系统能够准确地执行路径跟踪或其他控制任务,从而提高了鲁棒性和适应性更强,因此能够较好地应对风力干扰和负载变化带来的影响。

在降低地面摩擦力后,测试设计系统与方法 1、2、3 的实验机器人的曲线路径跟踪情况,具体如图 10 所示。

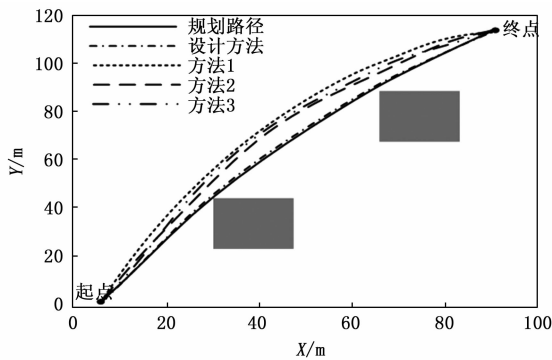


图 10 地面摩擦力变化下的曲线路径跟踪情况

在降低地面摩擦力后，设计系统表现出了较好的路径跟踪能力，其控制曲线与规划路径整体较为贴合。其主要原因是双闭环 P+前馈跟踪算法具有反馈控制环路，能够实时根据实际运动情况进行修正，通过准确的位置反馈来降低地面摩擦力对系统的影响，提高路径跟踪精度。

在密集的机器人工作环境中且在分布有障碍物的情况下，观察实验机器人的路径跟踪情况。设计系统与方 法 1、2、3 的测试结果如图 11 所示。

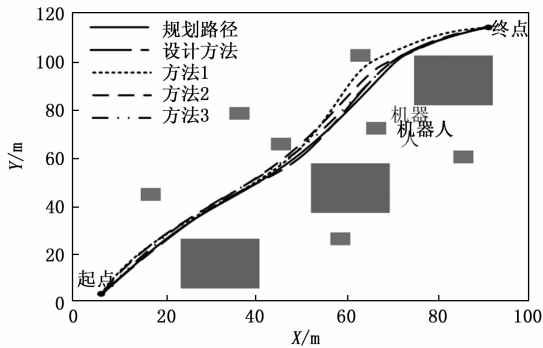


图 11 路径跟踪情况测试结果

根据图 11 的路径跟踪情况测试结果，当工作环境中分布着密集的机器人与障碍物的情况下，设计系统仍然能够表现出较好的路径跟踪能力，其控制曲线与规划路径整体仍表现得较为贴合。证实了设计系统利用双闭环 P+前馈跟踪算法中的反馈控制，可实时监测并调整机器人的运动轨迹，以避免与其他机器人的碰撞和干涉，保持路径跟踪精度和安全性。同时，利用双闭环 P+前馈跟踪算法中的前馈控制环路，在遇到预测的障碍物时立即进行调整，避免碰撞或避让障碍物，并将路径跟踪误差限制在允许范围内，优化了分布着密集的机器人与障碍物工作环境中的路径跟踪情况。

5 结束语

为了提高机器人工作的效率和准确性，降低碰撞和干涉风险，进而提高整体物流系统的生产力和安全性，

本研究设计了物流搬运机器人路径跟踪双闭环 P+前馈系统。通过分层架构和模块化设计的主控模块，实现了机器人的精确控制和管理；运动控制模块利用低功耗动态视觉传感器采集环境信息，并采用双闭环 P+前馈控制器进行路径跟踪误差控制，从而实现了更准确的路径跟踪运动。测试结果显示，所设计的路径跟踪系统能够与规划路径结果拟合度接近 100%。它能够在面对外部扰动和变化时保持较高的跟踪精度，确保物流搬运机器人能够按照规划路径进行准确和稳定的运动。这证明了该系统的路径跟踪效果较好，并具有实际运用的意义。在未来的研究中，将考虑融入深度学习、强化学习等人工智能技术在物流搬运机器人的路径跟踪中，以进一步提高其智能化水平。

参考文献：

[1] 占红武, 厉 晟, 胥 芳. 非完整移动机器人路径跟踪的快速非线性模型预测控制方法 [J]. 高技术通讯, 2021, 31 (4): 405 - 416.

[2] 孔慧芳, 丁道远, 房 耀. 基于干扰观测器的移动机器人路径跟踪控制 [J]. 电光与控制, 2021, 28 (12): 91 - 96.

[3] 张 品, 李长勇. 基于改进模糊 PID 的全向搬运机器人路径跟踪控制研究 [J]. 食品与机械, 2021, 37 (6): 114 - 119.

[4] DAS S K, DASH S, ROUT B K. An integrative approach for path planning and tracking of a shape-aware mobile robot in structured environment using vision sensor [J]. International Journal of Computational Vision and Robotics, 2021, 11 (4): 429 - 447.

[5] SINGH R, BERA T K, CHATTI N. A real-time obstacle avoidance and path tracking strategy for a mobile robot using machine-learning and vision-based approach [J]. Simulation; Journal of the Society for Computer Simulation, 2022, 98 (9): 789 - 805.

[6] 于树友, 常 欢, 孟凌宇, 等. 基于扰动观测器的轮式移动机器人滚动时域路径跟踪控制 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51 (3): 1097 - 1105.

[7] 张婷婷, 张 伟, 王亚刚. 欠驱动搬运机器人轨迹跟踪控制 [J]. 包装工程, 2022, 43 (3): 210 - 216.

[8] 邵冬林, 裴以建, 朱久德, 等. 轮式移动机器人预定时间轨迹跟踪控制 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2021, 43 (1): 33 - 38.

[9] 武 星, 余文康, 楼佩煌, 等. 大型部件的多机器人合作搬运协同导引控制 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (13): 1586 - 1595.

[10] 覃尚活, 郭 乾, 刘颖辉, 等. 基于 SMART PLC 的移动机器人控制系统 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (15):

33-36.

- [11] 丁 坤, 王 立, 张经纬, 等. 基于改进导航圆算法的光伏阵列清扫机器人路径跟踪控制 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2021, 49 (2): 190-196.
- [12] 张俊娜, 白国星. 基于速度调节与路径跟踪的差动机器人运动控制 [J]. 工程科学学报, 2023, 45 (9): 1550-1558.
- [13] 黄 巍, 占红武, 胥 芳. 基于改进 GMRES 算法的水冷壁运动机器人路径跟踪模型预测控制 [J]. 高技术通讯, 2021, 31 (10): 1090-1100.
- [14] 向红标, 程 旭, 李梦伟, 等. 磁弹性微型游泳机器人在外部干扰和复杂路径下的精确跟踪控制 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (7): 93-102.
- [15] 李宗刚, 李龙雄, 杜亚江, 等. 基于扰动观测器的铆接机器人轨迹跟踪控制 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (14): 296-305.
- [16] 严浙平, 杨皓宇, 张 伟, 等. 基于模型预测-中枢模式发生器的六足机器人轨迹跟踪控制 [J]. 机器人, 2023, 45 (1): 58-69.
- [17] 杨桂华, 卫嘉乐. 基于改进 A* () 与 DWA 算法的物流机器人路径规划 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (34): 15213-15220.
- [18] 张 卉, 朱永飞, 刘雪飞, 等. 基于模糊迭代 Q-学习的冶金工业机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 工程设计学报, 2022, 29 (5): 564-571.
- [19] 向红标, 杨大虎, 杨 璐, 等. 复杂环境下磁弹性微型游泳机器人的路径规划与识别跟踪 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (5): 89-99.
- [20] 邵冬林, 裴以建, 朱久德, 等. 轮式移动机器人预定时间轨迹跟踪控制 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2021, 43 (1): 33-38.
- [21] 张 郭, 许艳英, 张 亮. 基于动静安全场的机器人避障路径控制仿真研究 [J]. 中国工程机械学报, 2021, 19 (3): 232-237.
- [22] 王 凯, 朱慧珍, 王丽君. 深度学习理论下移动机器人全局路径规划方法 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (10): 431-434.
- [23] 韩耀廷, 赵志梅, 郝晓宇, 等. 变电站巡检机器人路径规划智能算法优化 [J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39 (6): 58-61.
- [24] 倪建云, 杜合磊, 谷海青, 等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2023, 37 (11): 247-256.
- [25] 李洁静, 吴 倩, 耿轶钊, 等. 复杂环境下矿用巡检机器人的路径规划方法 [J]. 煤炭技术, 2023, 42 (10): 236-239.

(上接第 101 页)

- [19] TONIGOLD K, GROSS A. Dispersive interactions in water bilayers at metallic surfaces: a comparison of the PBE and RPBE functional including semiempirical dispersion corrections [J]. Journal of Computational Chemistry, 2012, 33 (6): 695-701.
- [20] NADLER R, SANZ J Fdez. Effect of dispersion correction on the Au (1 1 1) - H₂O interface: a first- principles study [J]. Journal of Chemical Physics, 2012, 137 (11): 114709.
- [21] LIU W, TKATCHENKO A, SCHEFFLER M. Modeling adsorption and reactions of organic molecules at metal surfaces [J]. Accounts of Chemical Research, 2014, 47 (11): 3369-3377.
- [22] PEK Z R, DONADIO D. Dissociative adsorption of water at (211) stepped metallic surfaces by first- principles simulations [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121 (31): 16783-16791.
- [23] Identifying few- molecule water clusters with high precision on Au (111) surface [J]. ACS Nano, 2018, 12 (7): 6452-6457.
- [24] HAMADA I, LEE K, MORIKAWA Y. Interaction of water with a metal surface: importance of van der waals forces [J]. Physical Review B, 2010, 81 (11): 115452.
- [25] MENG S. Water adsorption on metal surfaces: a general picture from density functional theory studies [J]. Physical Review B, 2004, 69 (19): 195404.
- [26] RYKACZEWSKI K. Microdroplet growth mechanism during water condensation on superhydrophobic surfaces [J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2012, 28 (20): 7720-7729.
- [27] LIU X, CHENG P. Dropwise condensation theory revisited part II. Droplet nucleation density and condensation heat flux [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 83: 842-849.
- [28] SHEN Q, SUN D, SU S, et al. Development of heat and mass transfer model for condensation [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2017, 84: 35-40.
- [29] PAWAR N D, KONDARAJU S. Effect of surface wettability on dropwise condensation using lattice boltzmann method [C] //ASME 2016 5th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2016: 1-6.
- [30] KIM S, KIM K J. Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces [J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133 (8): 81502.