

基于 STM32 控制的移动式机械臂设计与应用

李勇澎, 黄再辉*, 陈嘉源, 刘梓豪

(桂林电子科技大学海洋工程学院, 广西 北海 536000)

摘要 本文采用机械结构与控制算法相结合的设计思路, 构建由六轴机械臂与麦轮悬挂底盘组成的整体机械结构, 实现可移动作业模式。控制系统以 STM32 为核心控制器, 引入增量式 PID 控制算法, 搭配编码器实现主从同构控制, 实现对机械臂的智能闭环控制。在自定义控制器与增量式 PID 算法的协同作用下, 机械臂在移动作业和执行具体操作任务的过程中, 能够实时精准控制, 完成预期效果。样机测试表明, 该可移动自适应六自由度机械臂控制响应迅速、姿态稳定性好, 具备良好的控制性能和实用价值。

关键词 增量式 PID 控制算法; 可移动机械臂; 自定义控制器; STM32; 六自由度

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目“基于 STM32 控制的移动式机械臂设计与应用”(S2510595297)。

中图分类号: TP29

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.001

0 引言

随着全球工业化浪潮的加速推进, 移动机器人在越来越多的领域发挥着至关重要的作用。机器的智能化迫在眉睫, 传统的固定式机械臂受限于活动空间、灵活性不足等多项因素, 已经无法满足工业的需求^[1]。而移动式机械臂机器人恰好能够在传统机械臂发展过渡的期间发挥至关重要的作用。本项目旨在研发出一款能够进行灵活移动的多轴机械臂机器人, 因此机械结构设计是本项目的一个重要内容, 其结果直接决定着机器人的工作性能。在此基础上再通过智能控制算法, 赋予机械臂能够跨空间移动的能力以实现工作场地的局限性^[2]。

1 移动式机械臂基本组成

本设计机械结构由六轴机械臂与麦轮悬挂底盘组成, 控制方面由以 STM32 为核心的自定义控制器控制。机械臂的机械构造由末端执行器、腕关节、“前置”肘关节、小臂、大臂、基座组成, 麦轮悬挂底盘由铝方管骨架、避震器、麦克纳姆轮组成, 机械臂核心驱动模块由自定义控制器 (STM32 单片机) 来控制, 采用主从同构的设计方案, 自定义控制器共包含六个自由度, 分别对应机械臂上的六个自由度。

2 移动式机械臂结构设计

根据现实工作情况及现有条件, 本文设计可移动式机械臂的整车结构如图 1 所示, 六自由度的机械臂结构如图 2 所示。

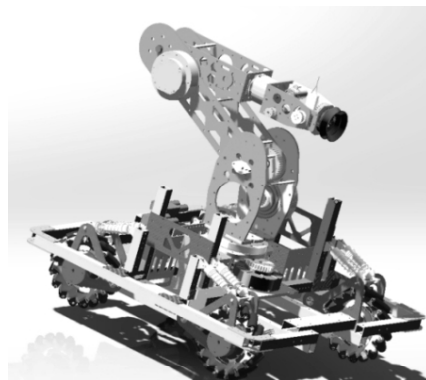


图 1 可移动式机械臂总装配图

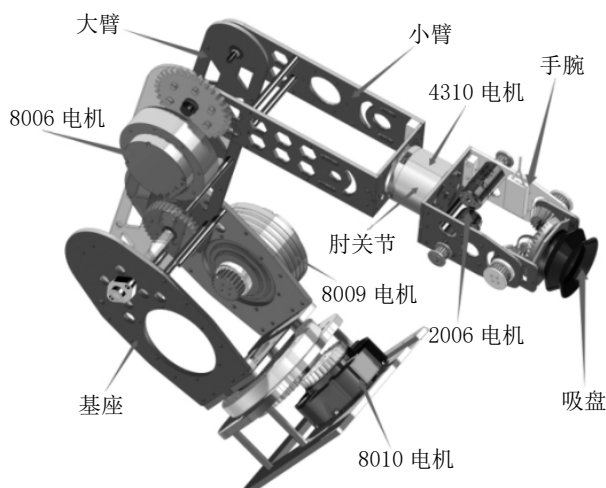


图 2 机械臂结构图

作者简介: 李勇澎 (2004-), 男, 本科, 研究方向: 机械结构设计。

***通信作者:** 黄再辉 (1989-), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 机械设计。E-mail: 408309690@qq.com

2.1 各机械模块设计方案

本文设计的机械臂末端执行器采取吸盘负责目标物体的抓取或吸附。吸盘规格采用HB50型风琴式橡胶吸盘,该型号吸盘为标准工业级真空吸附组件,可以满足吸取大部分平滑物品的需要。机械臂腕关节提供pitch轴、roll轴两自由度姿态调整。选用DJI2006电机反对称布置,安装压缩整体结构的体积。通过控制两侧DJI2006电机转速的不同,从而使手腕获得P轴和R轴两个自由度,可以实现吸盘的两个自由度联动,将极大地提高吸盘的空间运动能力。由于机械臂连接腕关节与小臂关节的刚性结构正常放于大臂与小臂之间,电机负载过大易损坏,故本文选择将肘关节前置。该关节选用达妙4310电机,电机的输出性能可完全支撑该关节的转动。

小臂结构主要实现屈伸运动。该关节选用8006电机,在正常情况下可实现稳定旋转,但突发断电时,驱动系统失力会导致其因自重快速下垂,与限位装置发生刚性碰撞。针对此问题,本文设计齿轮传动机构,将电机与关节隔离,增加的减速比既能实现减速增扭,提升负载驱动能力,减少电机功率损耗与发热,同时齿轮啮合的弹性形变和传动间隙也可缓冲冲击,弱化对电机的载荷,有效保护了驱动部件,能显著延长电机使用寿命。

大臂结构主要实现支撑机械臂主体运动并传递力矩。该关节选用达妙8009电机,设计理念与小臂相同,但是因其力臂受冲击力时间更长,受力更大,故传动方式选用的是皮带传动,较齿轮传动拥有更好的缓冲效果,可以更好地保护电机。

基座固定机械臂并衔接麦轮底盘的关节,采用宇树8010电机,在实际使用中,机械臂虽然可以正常旋转,但电机发热较快,长期运行会影响整体性能和使用寿命。为此,本设计改用齿轮传动结构,通过设计合适的减速比实现减速增扭,以此降低电机驱动负载和能耗,缓解发热问题,减少高温带来的热应力,从而延长各部件的使用寿命。

2.2 四驱独立悬挂麦轮底盘设计

移动机构采用四驱独立悬挂麦轮底盘。该底盘不依赖车轮转向机构,仅通过对四个麦轮的转速和转向进行动态调节,就能实现平面内的全向运动。该控制方式基于差速原理,通过对四个麦轮的运动参数进行统一解算与分配,让底盘摆脱了传统轮系的运动限制,在无转向结构的前提下实现复杂轨迹的精确跟踪,为

移动式机械臂的灵活作业提供了可靠保障。

本文设计的四驱独立悬挂麦轮底盘如图3所示。底盘采用四驱独立悬挂结构,悬挂系统主要由轮组、避震器、底盘主体结构及转轴组件组成。轮组通过避震器与底盘结构刚性连接,同时依靠转轴组件实现绕指定轴线的转动,使每个轮组形成独立的悬挂单元。该独立悬挂结构可让各轮组随地面起伏自主调整姿态,有效提高了底盘在复杂地形下的通过与适应能力。

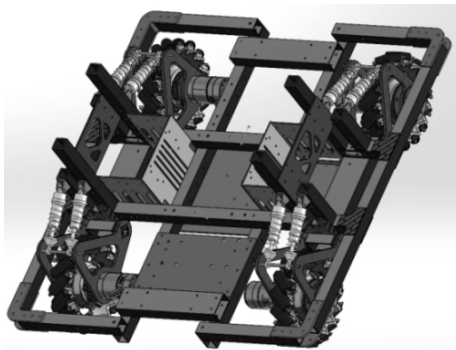


图3 麦轮底盘

在轮组与3508驱动电机的连接形式上,麦轮的驱动装配采用外嵌式连接。

2.3 自定义控制器机械结构设计

本文设计的自定义控制器机械机构采用主从同构的形式,如图4所示。

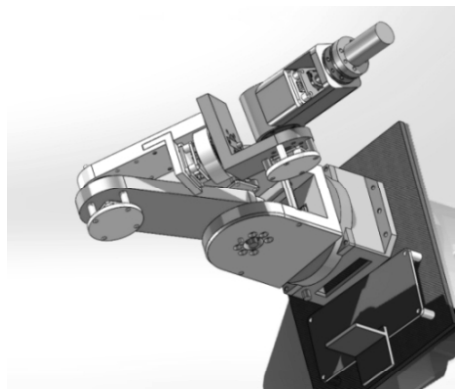


图4 自定义控制器样机图

本文自定义控制器的关节设计与机械臂保持完全一致的运动学特性^[3],可确保两者运动映射的精准性与直观性,实现控制精度与操作体验的最优平衡,为高效主从协同提供了关键支撑^[4]。

3 算法控制设计

3.1 基于前馈补偿的PID控制算法

本文使用结合前馈控制与反馈控制的改进型控制方法^[5],通过在传统PID控制中引入前馈补偿通道,

提前对系统的已知扰动或输入信号进行补偿,从而增强控制系统的响应速度与抗扰能力。

3.2 自定义控制器硬件设计

本文选用自定义控制器,选取 STM32F4VET6 作为核心芯片,包含一个 RS232 接口、TYPE-C 通信供电和测试时观测电路情况的 LED,6 个 ADC 采集接口,OLED 显示相关参数,便于调整数据,相较于 H7,此主控更为简便,为自定义控制器节省空间、方便操作。

本设计角度传感器集成方案采用传感器选型关节角度反馈,即增量式编码器(AS5048A,SP 接口,12 位分辨率),用于实时检测关节旋转角度。电位器采用低成本场景,即线性精度 $\pm 1\%$,通过 ADC 采集电压信号。底盘姿态反馈为 IMU(MPU6050),即检测底盘倾斜角与运动加速度,辅助动态平衡控制。

本设计角度 STM32 外设分配采用的编码器接口使用 TIM 模块的编码器模式,直接读取增量式编码器脉冲。ADC 通道配置多路 ADC 采集电位器电压。SPI 通信连接高精度绝对编码器(AS5048A)。信号调理电路的电位器信号需添加 RC 滤波电路,减少噪声干扰。 Π 性滤波电路中主控部分的 VDDA 模拟输入引脚采用的 Π 性滤波电机输入到 VDDA,此电路的输出端接到 VREF+ 引脚给参考,利于提高 ADC 的采集精度。

USART 通信中宇树电机采用的是 RS485 来进行通信,通过 RS485 芯片将 TTL 信号转换成 RS485 可用的信号。在遥控器对底盘的控制还使用了 DMA 的乒乓 Buff 来对遥控器传输的大量的数据的处理,以加快数据传输的准确性和底盘响应的稳定。

本设计控制算法中,通过编码器反馈关节实际角度,与目标速度对比,采用 PID 算法动态调整。底盘—机械臂协同控制是通过 IMU 数据实时调整底盘姿态,确保机械臂运动时底盘稳定。结合编码器与引 IMU 数据,实现全向移动+机械臂运动解耦。关节限位保护采用实时监测关节角度,超限时触发急停。自动校准采用上电时执行零点校准,机械臂回归初始姿态,编码器清零。动态轨迹规划使用基于角度反馈实时修正轨迹插补(S 曲线优化),减少末端抖动。卡尔曼滤波是在对电机进行 ADC 到电机之间的参数映射的时候,由于采用的模块 ADC 可能会产生一系列不稳定现象导致 ADC 采集得到的数据不稳定和抖动,采用卡尔曼滤波将会产生的不确定的结果,经过分析、推理和计算,得到相对稳定的 ADC 采集值。在电机刚上电时,由于每次机械臂变换导致电机的零位不同从而引发电机的零位

校准,使电机输出较大的电流回归零位,采用软启动减弱电机回归零位的力从而达到保护电机和防止电机伤人的情况。

4 功能测试

根据设计,完成实物样机的搭建,对样机进行 3 次测试,并完成改进。首先是抬升电机负载测试。测试发现电机堵转严重,经过改进优化后增加重力补偿。其次是进行底盘运动 PID 控制及四轮协同、验证机械臂关节电机的运动响应测试。测试结果表明,底盘运动灵敏,机械臂可以实现预期功能,表现优秀。最后是自定义控制器与机械臂的响应速度测试。测试结果反映自定义控制器可以实现主从同构,但是响应速度略微有点延迟,后续可以将霍尔传感器换为单圈绝对值编码器。

5 结束语

本文设计的可移动式机械臂,采用六轴机械臂与麦克纳姆轮悬挂底盘相结合的结构形式,构建了兼具移动能力与操作灵活性的作业平台。控制系统以增量式 PID 控制算法为核心,结合编码器实时反馈信号实现主从同构控制,形成了对机械臂各关节的智能闭环控制体系,有效提升了控制精度与响应速度。通过样机实测验证,该可移动式机械臂在移动作业与具体任务执行过程中,能够实现实时精准控制,不仅控制响应迅速、姿态稳定性优良,且各项性能指标均达到预期设计要求。该设计方案为未来机械臂的可移动化、智能化发展提供了新的思路与切实可行的技术参考,具有一定的工程应用价值与推广前景。

参考文献:

- [1] 王韩.全向移动底盘的自主导航技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [2] 周大鹏.一种液压机械臂的主从交互控制系统研究[D].济南:山东建筑大学,2021.
- [3] 黄焯东,吴晨曦.基于改进 PID 的机器人机械臂控制器设计[J].机械设计与制造工程,2023(07):45-50.
- [4] 刘义杰,王艳梅.基于 STM32 的三维机械手臂控制器设计[J].装备制造技术,2021(08):36-38.
- [5] 赵燕莲.基于模糊 PID 的多自由度机械臂自动控制研究[J].今日制造与升级,2024(02):6-8,41.