

一种农业仓储潜入式搬运机器人设计

黄俊敏¹ 戚得众² 孙 强³ 张三强⁴

1. 武昌首义学院,湖北 武汉 430064

2. 山东农业大学机械与电子工程学院,山东 泰安 271018

3. 山东能源兖矿鲁南化工有限公司,山东 枣庄 277500

4. 湖北工业大学农机工程研究设计院,湖北 武汉 430068

摘要:农业仓储运输一般采用半自动或传统人工搬运的方式。这种方式工作效率低,劳动成本高且柔性差。针对这一问题,设计了一款全自动潜入式搬运机器人。对该搬运机器人的车身结构、驱动单元、弹簧阻尼器和顶升单元运动结构及控制系统进行了设计。该机器人采用激光 Slam 导航,能够灵活采集建立地图,并按照地图和环境信息自主导航;运动结构采用四轮八驱方式,通过四轮的协同运动控制算法达到车辆灵活旋转,可实现旋转、前进、后退、侧移,以适应农业仓储环境的窄通道投料。经试验验证,该搬运机器人具备良好的作业性能。

关键词:农业仓储;搬运机器人;潜入式

中图分类号:TP242

DOI: 10.3969/j.issn.2097-065X.2024.09.037

0 引言

潜入式搬运机器人(automated mobile robot, AMR)是自动导引车的一种,其主要特征是潜入式

基金项目:国家重点研发计划“丘陵、山区林果采收、运输系统优化提升与集成应用”(2018YFD0700604)

AMR 工作时潜入相应的货架或者物品底部,通过车上的移栽系统对其进行搬运动作。在农业仓储领域中,农业物料以及农机零部件的搬运、转场大多是采用人力小拖车或者动力小车进行搬运,作业效率较低,物流自动化技术的发展为提高作业效率和减少人力成本提供了重要途径。潜入式 AMR(图 1)能够在狭小的仓储空间中自由穿梭,避免了与上层

会识别”“可用的创业资源”产生一定的影响,从而使其在实现自己的价值时能够自觉地发现和识别机遇,并根据其特性对其进行整合,以经济为动力的农民被迫筹措资金,以获取新的资源为基础,并以现有的创业资源为基础,寻求和运用这些资源。农村道路建设有利于各类金融资本流向农村市场,企业家能够充分利用金融参与主体融资,从而降低创业成本和提高创业成功率。

参考文献:

- [1] 瞿生权. 乡村振兴战略背景下农村公路发展思路[J]. 低碳世界,2022,12(4):139-141.
- [2] 马胜国. 基础设施对农村经济发展的作用机制分析[J]. 商讯,2021(7):139-140.
- [3] 佟琼,李慧. 我国农村公路建设与农民收入的关系研究:以浙江省宁海县为例[J]. 农业经济问题,2014,35(11):65-70.
- [4] 刘志强. 农村公路服务和安全保障能力提升[N]. 人民日报,2022-10-04(002).
- [5] 王佳琪. 公路基础设施对农户创业的影响研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.

- [6] 李练军,杨石美,李冬莲. 新生代农民工返乡创业能力、创业模式与创业路径:机会与资源的视角[J]. 农业经济与管理,2021(4):85-92.
- [7] 张亨溢. 农村公路开通对农民创业的影响研究[D]. 重庆:西南大学,2023
- [8] 截至 2022 年底,全国返乡入乡创业人员数量累计达 1220 万人[EB/OL]. (2023-02-17). <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-02-17/doc-imyfyhav2087230.shtml>
- [9] 杨于琴,邓德文. 大学生创业孵化实训浅析[J]. 现代营销(学苑版),2014(5):80-80.
- [10] 范博文. 中国农村地区农民创业研究:动机、模式与效果[D]. 上海:上海财经大学,2020.
- [11] 张亨溢,杨刚. 城乡公路建设对返乡创业增收的影响机理及其空间差异[J]. 经济地理,2023,43(12):103-112.

作者简介:胡雪晴,女,1993 年生,硕士研究生。研究方向为农业信息与高等教育。刘益民,男,1994 年生,助教。研究方向为农业信息工程。贺馨叶,女,1997 年生,硕士,助教。研究方向为文化产业与摄影艺术。陈国生(通讯作者),男,1965 年生,博士,教授,硕士生导师。研究方向为区域经济。

货物的碰撞和摩擦,确保了货物在搬运过程中的安全性和完整性^[1]。



图1 潜入式AMR

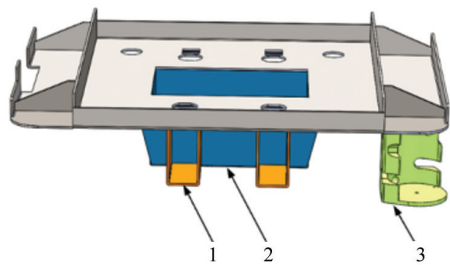
为满足AMR在农业仓储中的应用,应能实现以下功能要求:需具备双向行驶的功能,能实现直行、拐弯、原地回转、斜行等运动,并有一定的爬坡越障能力;有较强的承载能力,并有顶升移载的功能;能够准确识别并遵循预设的搬运路径,确保货物能够准确无误地送达目的地^[2]。在行驶过程中应具备主动避障功能,一旦遇到障碍物必须立即采取规避措施,以确保工作过程中的安全性;接收的任务指令均来自仓储信息管理中心,AMR需具备无线通信能力;需实时向管理中心反馈其位置、电量及工作状态等信息,以确保管理中心能够全面掌握AMR的工作情况^[3-4]。

为了实现上述功能,本文设计了一款潜入式搬运机器人,其关键组成主要包括:车身结构、驱动单元、弹簧阻尼器和顶升单元的结构设计及AMR控制系统。

1 机械结构设计

1.1 车身结构设计

本文设计的AMR需要运载较重货物,车身作为整车的承重核心结构,在尺寸一定的情况下,需要保证足够的刚度与强度。车身选用4 mm厚Q235钢板折弯而成,电池箱位于车身下方的中心位置。车身底面两侧设置电动推杆安装底座,车身前后对角位置各安装一个激光雷达底座,其他电气控制设备布置于车身顶面。车身结构如图2所示。



1. 电动推杆底座 2. 电池箱 3. 激光雷达底座

图2 车身结构

1.2 驱动单元结构设计

驱动单元的机械结构直接决定了AMR的承载

能力和运动性能,AMR驱动单元由2个子结构系统组成:驱动系统、转向系统。

1.2.1 驱动系统

本文设计的驱动系统为舵轮,分析AMR舵轮电机在不同工况下的功率需求,包括平地行驶、上坡行驶以及加速行驶等情况,得知AMR整车质量 $m_c = 90\text{ kg}$,负载质量 $m_f = 300\text{ kg}$,总重量 $m = 390\text{ kg}$ 。

AMR在平坦路面上行驶时受到滚动阻力、空气阻力、加速阻力。总驱动力与行驶阻力之间的平衡方程为:

$$F = F_f + F_w + F_i + F_j \tag{1}$$

式中, F 为总驱动力; F_f 为车轮受到的滚动阻力; F_w 为受到的空气阻力; F_i 为受到的坡道阻力; F_j 为受到的加速阻力。

车轮受到的滚动阻力计算公式为:

$$F_f = \mu mg \tag{2}$$

式中, μ 为轮胎与地面之间的滚动摩擦系数,其取值随路面类型的不同而有所变化,这里取的是各种路面类型下的最大值 $\mu = 0.03$ 。

由式(2)计算得轮子的滚动阻力 $F_f = 114.66\text{ N}$ 。

AMR受到的空气阻力计算公式为:

$$F_w = \frac{C_D A v^2}{21.25} \tag{3}$$

式中, F_w 为受到的空气阻力; C_D 为空气阻力系数; v 为行驶速度; A 为迎风面积。

由于本文设计的AMR工作场所是室内,工作环境基本处于无风状态,且工作行驶的速度不快,因此忽略AMR工作时的空气阻力,即 $F_w = 0$ 。

AMR上坡行驶时受到的阻力计算公式为:

$$F_i = mg \sin \theta \tag{4}$$

式中, θ 为道路坡角,取 3° 。

由式(4)计算得 $F_i = 200.03\text{ N}$ 。

AMR加速时受到的加速阻力计算公式:

$$F_j = ma \tag{5}$$

由此计算得 $F_j = 195\text{ N}$ 。

综合上述分析可得AMR总驱动力为:

$$F = F_f + F_w + F_i + F_j = 509.69\text{ N}$$

单轮驱动力为:

$$F_k = \zeta F / K = 1.5 \times 423.7 \div 4 = 191.13\text{ N} \tag{6}$$

目前可以采购到的普通舵轮的直径为123 mm,则单轮扭矩为:

$$M = F_k r = 11.75 \tag{7}$$

根据扭矩与功率的公式:

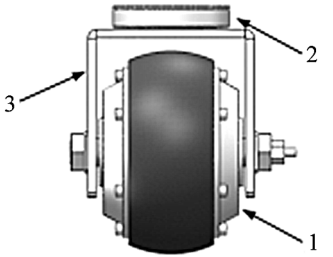
$$P = \frac{T_n}{9\,550} \tag{8}$$

$$n = \frac{60v}{2\pi r} \tag{9}$$

将上面计算得到的扭矩以及转速等数值代入式(8)与式(9)后得到：

$$P = \frac{9.77 \times 1 \times 60 \times 1\,000}{2 \times \pi \times 0.061\,5 \times 9\,550} \text{W} = 191.04 \text{ W}$$

在比较其性能、价格等因素后，选择深圳中菱科技公司的舵轮产品。驱动单元结构如图 3 所示。表 1 列出了选用舵轮电机的主要参数。



1. 舵轮 2. 回转支承 3. 轮架

图 3 驱动单元结构

表 1 舵轮电机主要参数

技术指标	额定电压 (V)	额定功率 (W)	额定扭矩 (N·m)	额定转速 (r/min)
技术参数	24	350	15	300

1.2.2 转向系统

转向系统主要由转向电机、减速器、回转支承组成。

(1)转向电机设计选型。

AMR 在原地转向时总力矩为：

$$M_0 = \max(M_1, M_2) + M_3 \tag{10}$$

式中， M_1 为单轮摩擦力矩 1； M_2 为单轮摩擦力矩 2； M_3 为转向力矩。

$$M_1 = \frac{K'L^2}{4\,000\,K} = \frac{F_f'L^2}{4\,000\,KL} = \frac{\mu'mgL}{4\,000\,K} \tag{11}$$

$$M_2 = \frac{F_f'L}{2K} = \frac{\mu'mgL}{2K} \tag{12}$$

$$M_3 = \frac{1}{2}M_f r^2 \beta \tag{13}$$

其中，均布载荷系数 K' 与轮胎与地面的接触宽度 L 以及滑动摩擦力 F_f' 有关， $K' = F_f'/L$ ，已知滑动摩擦系数取值为 0.5，轮胎与地面的接触宽度 $L = 50$ mm，车轮数量 $K = 4$ ，转向角加速度 $\beta = 10$ rad/s²。

计算得 $M_0 = 9.8$ N·m，故转向设计扭矩：

$$M' = \frac{M_0 \times S}{i_0} \tag{14}$$

其中，安全系数 S 取值为 1.5，减速器取传动比 $i_0 = 7$ ，经过计算得 $M' = 2.1$ N·m。

转向电机最后的设计功率：

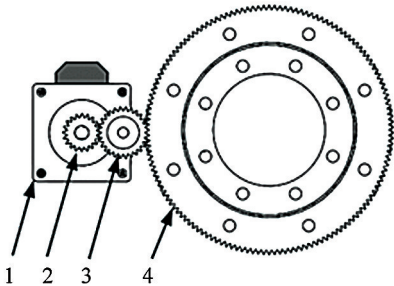
$$P = \frac{M_0 \cdot n}{9\,550\eta} \tag{15}$$

其中，转向速度 $n = 20$ RPM，转向减速器的机械效

率 $\eta = 0.55$ ，最终得到 $P = 0.1$ kW。根据上述的计算参数最终选择电机型号为 57HB250-54B。

(2)减速器的设计。

驱动单元的转向减速器结构如图 4 所示。转向电机通过电机安装底座固定在 AMR 车身底部，当转向电机工作时，电机的转动轴带动主动齿轮旋转，通过相啮合的传动齿轮将动力传递到回转支承的外圈齿轮上，带动回转支承进行转动，实现驱动单元的转向。齿轮参数如表 2 所示。



1. 转向电机 2. 主动齿轮 3. 传动齿轮
4. 回转支承外圈齿轮

图 4 减速器结构

表 2 减速齿轮参数

啮合齿轮	参数规格	
主动轮与传动轮	模数(mm)	1
	压力角(°)	20
	传动比	1:1.4
传动轮与回转支承齿轮	模数(mm)	1
	压力角(°)	20
	传动比	1:5

(3)回转支承的选型。

本文初选回转支承型号为 011.10.100，外圈的安装孔分布圆的直径为 120 mm，其内部的安装孔分布圆直径为 60 mm，回转支承钢球的分布直径为 100 mm，钢球的直径为 10 mm。

回转支承所受的轴向载荷为：

$$F_a = \frac{mg}{4} = 955.5 \text{ N}$$

回转支承的当量载荷计算公式为：

$$C_p = F_a + \frac{4.37M}{D_0} + 3.4F_r \tag{16}$$

式中， C_p 为当量轴向载荷，N； F_r 为径向力，N； F_a 为轴向力，N； M 为倾覆力矩，N·m； D_0 为滚动中心直径，mm。

AMR 在转弯或者改变行驶方向时，回转支承会承受一定的倾覆力矩。本文回转支承最大倾覆力矩为 $M = 1\,528.8$ Nm，所受径向力为 0。将参数代入式(16)可得回转支承当量载荷为 1 022.3 N。

回转支承的静额定容量为：

$$C_0 = f \cdot D_0 \cdot d \tag{17}$$

式中, C_0 为回转支承静额定容量, kN; f 为静容量系数; d 为钢球直径, mm。

将参数代入上式, 得到 $C_0=12$ kN。该回转支承安全系数 S 为:

$$S = \frac{C_0}{C_p} = 12 \tag{18}$$

由选型手册可知, 所求回转支承安全系数大于规定安全系数 1.1, 因此选择的回转支承符合设计要求, 回转支承三维模型设计如图 5 所示。

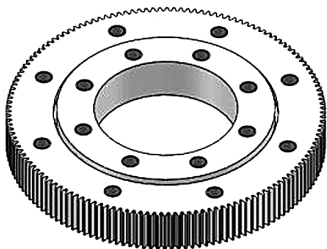
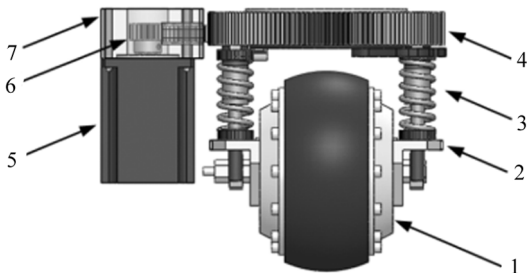


图 5 回转支承三维模型

1.3 弹簧阻尼器设计

当 AMR 行驶时, 路面不可避免会有凹陷与凸起, 造成车体的振动。激光雷达直接安装在车身的下方, 前后双激光雷达进行信息耦合时容易受外界振动干扰, 造成导航定位的失败。

为解决该问题, 设计出了一种减振驱动单元, 如图 6 所示, 舵轮两侧各安装 2 个弹簧阻尼减振器, 减振器一端与车轮架固连, 另一端与回转支承外圈的安装孔固定连接, 回转支承内圈部分与车身底部用螺钉连接。该结构使驱动单元与车身的刚性连接变为柔性连接, 当 AMR 行驶时, 弹簧阻尼器可以有效降低由路面激励引起的振动。



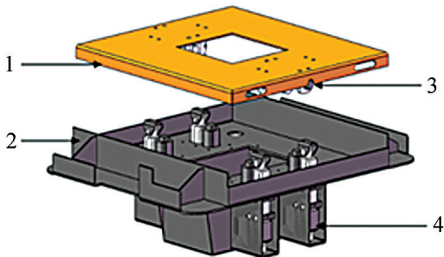
1. 舵 2. 轮架 3. 弹簧阻尼器 4. 回转支承
5. 转向电机 6. 减速齿轮 7. 电机安装座

图 6 弹簧阻尼器驱动单元结构

1.4 顶升单元结构的设计

顶升单元能使顶升板上下移动实现 AMR 与货物的结合、分离。设计的顶升单元如图 7 所示。4 个顶升电动推杆安装在车身两侧的安装底座上, 推杆顶端装有浮动接头, 浮动接头用螺钉与顶升板固定连接。顶升板底面的两侧安装有 2 个锁止电动推杆, 可以保证 AMR 运动过程中能够与货物保持同一运动状态, 防止货物的滑落。按照设计的需求,

AMR 要举升物体的质量为 300 kg, 所以每个电动推杆需要的推力为 750 N, 为了保证 AMR 顶升货架的稳定性与工作效率, 设定推动货架抬升 50 mm 的所需时间为 3 s, 故抬升的平均速度为 17 mm/s。通过对比选择了常州杰川 JC7 产品作为本设计的电动推杆, 它的额定工作电压为 24 V, 最大推力 1 000 N, 举升的范围为 0~100 mm, 最大推行速度为 40 mm/s。



1. 顶升板 2. 车身 3. 锁止电动推杆 4. 顶升电动推杆

图 7 顶升单元结构

2 控制系统设计

潜入式搬运机器人控制系统采用 Nvidia 公司的 Jetson Nano 工业小型计算机作为主控计算机。该主控计算机与 PAC 运动控制板配合使用, 实现对机器视觉、导航解决方案、人机交互、近场避障、位姿传感和机械控制设备的控制^[5]。主控计算机主要负责车辆的行驶导航控制, 基于视觉和各类传感器的信息, 还提供用户人机交互界面。PAC 运动控制板负责执行主控计算机下发的运动指令, 统一协调机器人的机械运动。同时, PAC 运动控制板还将各种机载传感器提供的机器人状态信息汇总, 根据主控计算机的需求实时提供给主控计算机使用。控制系统结构如图 8 所示。

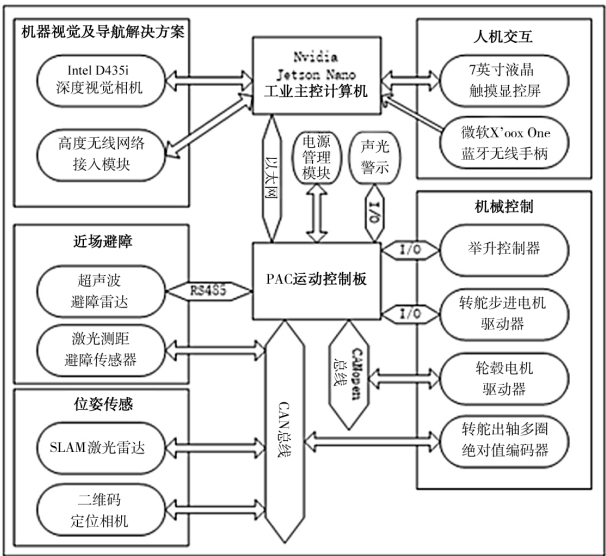


图 8 控制系统结构

2.1 机器视觉及导航解决方案

机器人通过 Intel 公司提供的配套 D435i 的 SLAM 算法 ROS 节点,独立完成实时 3D 建图和定位。同时基于 YOLOv5 的实时目标跟踪将提供高可靠性的目标检测结果,结合运动预测算法可实现智能避障与智能目标对准,以灵活适应各类复杂工况下的任务。

机器人能通过无线网络接入方式接收 2 种类型的调度信息。第一类为实时路点信息,包括实时的目标位置坐标及姿态旋转角,路径导航算法将根据该信息自动到达目标位置并尽可能实现要求姿态。第二类为预设路径信息,包括事先协商存储于机器人及调度系统两方设备内的具体完整运行路径和任务行为,收到该类信息后机器人将严格按照该路径运行并完成要求的任务行为,仅在遭遇障碍物或其他紧急情况时进行避让或停止运动。

2.2 机械执行机构控制方案

机械控制部分负责机器人的运动、举升机构驱动和机械设备状态信息获取。机器人有同步举升控制器和 4 套独立驱动的舵轮系统,包括旋转步进电机、编码器、轮毂驱动电机。步进电机控制转舵角度,编码器获取转舵实际转角。轮毂电机提供牵引力,反馈运行距离、速度和转矩。步进电机驱动器通过脉冲控制旋转角度。转舵连接绝对值编码器,使用 CAN 总线通信。轮毂电机驱动器采用 CANopen 协议,接收运动指令并反馈设备状态数据。

2.3 近场避障

近场避障部分的功能在于采用超声测距仪及激光测距仪此类高可靠性的避障传感元件实现最大程度地避免与障碍物的碰撞。通过将超声与激光相结合,并设计近场避障算法使两者优势互补,进而实现可靠、安全的近距离障碍物规避^[6]。

超声波避障雷达模块分两路共 8 个超声探头,通过 RS485 总线与 PAC 运动控制板相连。激光测距避障传感器则通过 4 个传感器串联连接至 PAC 运动控制板的 CAN 总线。

3 样机试制

根据前文 AMR 的优化设计方案与具体参数,与武汉某机械厂共同合作,试制出 AMR 的物理样机,并进行电气控制系统的调试。物理样机如图 9 所示。

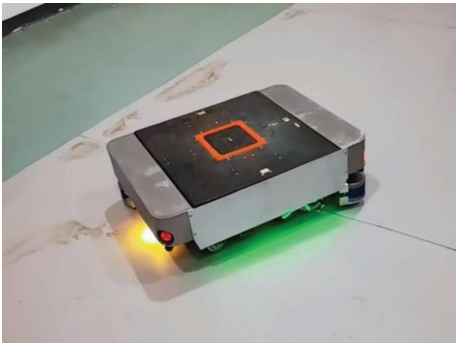


图 9 潜入市 AMR 样机

通过试验验证了 AMR 样机具备多向行驶及较强的地形适应能力,承载与移栽功能、导航与定位能力、主动避障以及无线通信与实时反馈能力均能较好地满足要求。

4 结语

随着现代农业的不断发展,设施农业或农业仓储物流领域对智能化、高效化的需求日益迫切。本文在该物流过程中引入 AMR,能增强农业物资转场过程的智能化程度,提高作业效率,同时这也是现代化农业仓储物流运输搬运产业进行产业升级的必由之路。本文通过对车身结构及控制系统等关键部件的研究,初步实现了农业仓储潜入市搬运机器人的设计和样机试制,为农业仓储环境中的高效、安全、稳定的搬运作业提供了理论支撑和工程实践基础。

参考文献:

[1] 李追风,时文涛,姬志发,等. 国内外农业机器人研究进展分析[J]. 南方农机,2022,53(5):156-158.
[2] 倪银堂,陈贵江,张超. 农业机器人移动平台的研究现状与趋势[J]. 南方农机,2018,49(18):5.
[3] Mentsiev A U, Amirova E F, Afanasev N V. Digitalization and mechanization in agriculture industry[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2020,548(3):032031.
[4] 黄龙贤. 一种面向垂直农业的智能调度系统设计与实现[J]. 数字农业与智能农机,2023(10):124-126.
[5] 张军,雷川川. 一种新型 AGV 驱动单元结构设计与分析[J]. 机械设计与制造,2018(7):137-139.
[6] 张书亮. 基于多传感器融合的室内移动机器人定位与导航研究[D]. 北京:中国科学院大学,2021.

作者简介:黄俊敏,男,1982 年生,硕士,工程师。研究方向为控制工程、机械电子。戚得众,男,1984 年生,博士,副教授。研究方向为机电一体化。孙 强,男,1993 年生,硕士,工程师。研究方向为机械优化设计。张三强,男,1982 年生,博士,讲师。研究方向为振动与噪声控制、结构优化设计。