

农业采摘机器人机械臂结构设计

刘宇

黑龙江工业学院，黑龙江鸡西，158100；

摘要：文章以一款苹果采摘机器人为研究对象，对农业采摘机器人中的机械臂设计进行分析。包括该农业采摘机器人的总体结构、机械臂设计以及机器人测试等。经研究可知，对于农业采摘机器人的机械臂，具体设计时，研究者应对机械臂以及末端执行器做到合理选型，在此基础上合理设计其传输结构与分拣机构，以满足其实际采摘作业需求。希望通过此次分析，可以为农业采摘机器人机械臂结构设计提供参考。

关键词：农业采摘机器人；苹果采摘；机械臂结构；传输结构；分拣机构

DOI：10.69979/3041-0673.25.07.039

前言

在现代农业生产工作中，农业采摘机器人已得到广泛应用。对于此类机器人，具体设计时，机械臂是最为关键的一个组成部分，其设计质量将对机器人自动采摘工作产生直接影响。基于此，设计者应根据其总体结构，合理选择机械臂与末端执行器型号，对其传输结构和分拣机构进行合理设计。完成设计后，研究者需通过测试的方式，确保其设计质量和应用效果。

1 农业采摘机器人总体结构

此次设计中，研究者以苹果的高效采摘为目的，设计了一款农业采摘机器人。该机器人的主要组成结构包括机械臂、传输机构、末端执行器、移动平台、分拣机构、行走机构以及动力系统等。为保障该机器人的苹果采摘范围及其灵活度，研究者将其机械臂关节设计为六自由度形式。由传输机构负责传输采摘的苹果，由分拣机构负责对苹果进行初步分级。为满足该农业采摘机器人在苹果采摘工作中的实际应用需求，研究者欲使其机械臂运行中的定位偏差不超过5mm，苹果采摘成功率不低于90%，苹果损伤率不超过5%。并根据以上预期目标，对该机器人机械臂结构展开合理设计。本文主要对其机械臂结构设计进行分析。

2 农业采摘机器人机械臂结构设计

2.1 机械臂选型

当前的机器人机械臂主要构型有很多，包括SCARA型、球坐标型、关节坐标型、直角坐标型以及圆柱坐标型等。此次设计中，出于苹果采摘环境、苹果树形态特征和机器人自身大小等各方面因素的综合考虑，研究者将关节型坐标机械臂选作其机械臂，其型号为RRRRRR。在保障机械臂强度的基础上，为合理降低其重量，研究者以轻量化设计法设计其关键部件。对于具备支撑与传递功能的连杆大臂，笔者通过空心矩形结构配合加强筋的方式设计其结构，使其整体强度、稳定性与抗变形性能符合实际需求，并进一步减轻了结构重量。通过底座，将机械臂安装在与地面相距0.8m的移动平台上，由机器人内部的电机与减速器来控制机械臂运动。通过法兰盘口，将末端执行器连接在机械臂连杆上，如此便可根据不同应用需求来合理更换末端执行器，使机械臂结构更具通用性。为提升机械臂末端精度，设计者在近端设置了相机，通过相机实时获取机械臂末端具体位置，将其实时上传给精度调节系统，由精度调节系统对比实际位置与目标位置预设值，并依据误差情况，自动调整机械臂采摘位置，使其误差不超过5mm，以满足实际苹果采摘需求。表1为此次设计中的农业采摘机器人机械臂关节基本参数情况：

表1-此次设计中的农业采摘机器人机械臂关节基本参数情况

| 序号 | 机械臂轴 | 连杆号 | 长度 | 转角 |
|----|------|-----------|-------------|------------|
| 1 | S轴 | 1#连杆（底座） | 330mm | ±170° |
| 2 | L轴 | 2#连杆 | 255mm | -50° -155° |
| 3 | U轴 | 3#连杆 | 705mm | -50° -155° |
| 4 | R轴 | 4#连杆 | 250mm | ±155° |
| 5 | B轴 | 5#连杆 | 518mm | -50° -225° |
| 6 | T轴 | 6#连杆/7#连杆 | 305mm-155mm | ±180° |

2.2 末端执行器选型

对于该机器人机械臂上的末端执行器，具体设计时，研究者主要根据苹果采摘特点，将末端执行器类型选为负压式吸取形式。该末端执行器的主要硬件设施包括以下三种。（1）外壳，以 ABS 材料实施 3D 打印，通过法兰连接。（2）内嵌层，以乳胶材料制成的防撞层和特殊装置制成的缓冲层实施果实保护。（3）光电门，主要负责对苹果进入末端执行器的情况做出实时检测，并完成相应的信号反馈。

该末端执行器的苹果采摘方法为单向瓣膜吸附采摘。根据心脏板面基本原理为末端执行器设置单向瓣膜，以达到良好的缓冲、减速效果。具体设计时，设计者将该末端执行器主吸口直径设计为 80mm，以四通转三通的模式将风机吸风口变为三个，其直径是 26mm，可使整体采摘气场保持稳定。将 4kW 规格的轴流式风机用作动力源，其气压最大值可达 36KPa，风压最大值可达 26KPa，风量可达 318m³/h，可充分满足苹果实际采摘需求，进一步提高其采摘效率，降低损伤率。

2.3 传输结构设计

在该机械臂结构设计中，传输结构的主要功能是确保苹果自摘取至分拣传输过程的安全性。传输结构的主要组成部分包括传输管道、单向瓣膜以及内部设置的缓冲瓣膜。其中，传输管道是内部填有缓冲材料的柔性波纹管，总长度是四米，将若干个缓冲瓣膜设置在其内部，用来降低传输过程中的苹果损伤率。将单向瓣膜设置在传输管道两端，其原理依然与心脏瓣膜相同。整体瓣膜结构是三个渐变漏斗形，其角度是 119°。传输过程中，苹果将在自身重力与机械动量作用下将瓣膜推开，使瓣膜在负压作用下朝末端收缩，直至封闭。将四个扇形瓣膜设置在缓冲瓣膜内部，其角度是 89 度，可对传输过程中的苹果起到隔离缓冲作用。

具体采摘时，由于末端执行器需要根据苹果具体生长位置移动，在此过程中，传输管道同样需跟随末端执行器做出相应变化。当采摘高处的苹果时，传输结构中的传输管道将接近于垂直状态，苹果在其中也相当于自由落体。在此种情况下，设置在传输管道末端的单向瓣膜将会对传输中的苹果起到有效缓冲作用，以保障苹果的安全传输，减少或避免苹果损伤。当采摘低处的苹果时，传输结构中的传输管道虽具有较小坡度，但其内部的苹果也需做合理的缓冲处理。在此种情况下，设置

在传输管道内部的扇形瓣膜便可起到有效的缓冲作用，以保障苹果传输安全，尽最大限度降低苹果损伤率。

2.4 分拣机构设计

在完成苹果采摘后，为保障苹果品质及其市场价值，分拣工作的合理实施至关重要。基于此，在本次农业采摘机器人的机械臂设计中，设计者也将分拣机构作为一个重要部分。具体设计时，研究者主要根据苹果的不同大小分级来设计分拣机构，并以有效的分拣流程来控制苹果分拣过程的安全性，尽最大限度降低苹果损伤。此次设计的分拣机构主要组成部分包括减速机构、苹果分拣盘、苹果分拣传输通道以及苹果收集箱。为满足不同大小苹果的分拣需求，设计者将分拣盘设计为直条形式，按四个等级设计分拣盘圆形开口，以实现不同等级苹果的顺利分拣。其中，一级苹果分拣盘开口直径设计为 120mm，二级开口直径设计为 85mm，三级开口直径设置为 75mm，四级开口直径设计为 65mm。具体分拣时，经传输机构减速后的苹果将进入连接筒，由连接筒转入直条形分拣盘，先从四级分拣盘开口处通过，依次向三级、二级和一级开口传输。将收集箱设置在分拣盘开口下方，分拣出的苹果将由传输通道传输至收集箱内。当收集箱中的苹果重量达到设计值时，机器人系统将立即发出警报，以提示工作人员及时更换收集箱，为下一箱苹果收集做好准备。

3 农业采摘机器人测试

3.1 测试环境

对于此次设计的农业采摘机器人机械臂结构，为验证其应用性能，研究者以实验测试的方式对其进行分析。根据该机器人的实际应用需求，研究者将测试环境搭建在苹果园内。在此过程中，研究者将足具代表性的密植矮化苹果园选为测试环境，该苹果园内部地势平坦，果树株距是 1.8m，行距是 3.2m。将该机器人原型机用作测试平台，根据此次设计标准，机械臂选择六自由度关节型，末端执行器选择负压式结构，行走机构选择履带式结构。测试时通过高清摄像头配合激光雷达，对测试环境数据进行实时采集。并根据采集到的环境参数，使机械臂准确达到指定位置，并准确完成苹果采摘。根据该机器人应用地区的苹果采摘季环境条件，研究者将此次测试环境的温度控制在 22.3℃，湿度控制在 45.7%，风速控制在 1.2m/s。

3.2 测试方法

具体测试时，研究者将该机械臂的运行定位精度、苹果采摘成功率以及苹果损伤率等用作主要测试指标。在确定好的测试环境下，共实施了120次苹果采摘试验操作。每次试验时，研究者均随机将不同位置上的苹果选做采摘目标，由机器人控制程序操控该机械臂结构移动至采摘位置，通过末端执行器将苹果吸入传输结构中的传输通道，由传输通道减速传输后，将其输送至分拣机构，于不同分拣盘开口处实施分级处理，最终将其传输至对应等级的收集箱内。依次重复上述操作，直到完成120次苹果采摘试验操作为止。之后，研究者根据实际情况对机械臂的定位精度均值、采摘成功率和果实损

伤率进行统计，以测试其在苹果采摘工作中的应用效果，验证该机械臂结构设计方案是否有效、是否实用。

3.3 测试结果

通过农业采摘机器人实践应用测试可知，在使用该机械臂实施苹果采摘过程中，其机械臂的定位精度均值为4.2mm，苹果采摘成功率可达94.2%，采摘过程中的苹果损伤率仅为1.8%。由此可见，该采摘机器人在苹果园采摘环境条件下具有良好的适应性，可实现苹果园内苹果的高效采摘，且采摘时的苹果损伤率非常低，几乎可达到无损采摘的应用效果。表2为此次研究中的农业采摘机器人实践应用测试结果：

表2-此次研究中的农业采摘机器人实践应用测试结果

| 序号 | 测试数值 | 测试项目 | | |
|----|--------|--------|---------|-------|
| | | 运行位置偏差 | 苹果采摘成功率 | 苹果损伤率 |
| 1 | 最大值 | 5.0mm | 98.0% | 2.5% |
| 2 | 最小值 | 3.5mm | 90.7% | 1.2% |
| 3 | 平均值 | 4.2mm | 94.2% | 1.8% |
| 4 | 标准偏差 | 0.4mm | 2.1% | 0.3% |
| 5 | 预期设计值 | ≤5mm | ≥90% | ≤5% |
| 6 | 是否符合预期 | 符合 | 符合 | 符合 |

以上实践应用测试结果表明，此次设计的农业采摘机器人机械臂具有较高的定位精度，较高的苹果采摘成功率以及较低的苹果损伤率，与预期的机械臂设计目标相适应。

4 结束语

综上所述，苹果采摘机器人是现代农业采摘机器人中的一个重要分支。在该机器人的实际应用中，机械臂发挥着至关重要的作用。只有确保其机械臂运行位置准确性，提升其苹果采摘成功率，降低苹果损伤率，方可充分发挥其应用优势，满足现代苹果采摘工作的实际需求。基于此，研究者应结合此类机械臂的实施应用场景及其应用需求等，对机械臂中的各个组成部分进行合理设计，以保障整体机械臂结构设计效果，提升其应用性能。如此方可使其在苹果采摘环境中表现出良好的适应性，在进一步提升苹果采摘效率的同时，合理降低苹果损伤。

参考文献

- [1] 刘继展,江应星.农业采摘机器人产业化进程分析与多臂高速化技术走向[J].农业机械学报,2024,55(10):1-17.
- [2] 韩党威.面向林地果实采摘作业的柔顺控制机械臂研究[D].浙江农林大学,2024.
- [3] 赵伟冬.农业采摘机器人机械臂结构开发与试验研究[J].南方农机,2024,55(09):49-51.
- [4] 颜清华,杜玉珠,李亚芹,等.苹果采摘机器人的机械臂路径规划发展现状[J].中国科技信息,2023,(16):139-141.
- [5] 赵敬,王全有,褚幼晖,等.农业采摘机器人发展分析及前景展望[J].农机使用与维修,2023,(06):63-70.

作者简介：刘宇（1997.05-），男，满族，吉林白城人，助教，研究生学历，研究方向：农业智能装备研究与应用。