

# 一种太阳能种植机器人的设计与实现

田维翼<sup>1</sup>, 杨磊<sup>1, 通信作者</sup>, 宋欣<sup>1</sup>, 马遥<sup>1</sup>, 倪妮<sup>1</sup>, 强国<sup>2</sup>

(1. 天津农学院 工程技术学院, 天津 300392; 2. 天津强视科技有限公司, 天津 300100)

**摘要:** 针对当前种植过程中尚未完全实现自动化的问题, 设计开发一款集灌溉、施肥、播种、除草、环境数据收集以及远程操作等功能于一体的太阳能种植机器人。以 Delta 并联机械手的运动学研究为核心的综合硬件设计, 并且融入云物联网技术开发了一款云端控制系统, 用户可通过电脑、手机等智能设备来实现对种植机器人的基本控制以及基础数据收集, 如进行视频远程操控, 以及对温度、湿度、二氧化碳浓度等数据的收集。并且该种植机器人具有良好的综合实用性, 可以满足多种种植环境的需求。该机器人的推广应用对于降低生产者劳动强度, 提高播种种植效率具有重要意义。因此, 这一机器人适用于综合实用性的种植, 具有广阔的应用前景以及市场推广价值。

**关键词:** 太阳能种植机器人; 并联机械臂; 播种器; 物联网技术

**中图分类号:** TP242.6

**文献标识码:** A

## Design and realization of a solar planting robot

Tian Weiyi<sup>1</sup>, Yang Lei<sup>1, Corresponding Author</sup>, Song Xin<sup>1</sup>, Ma Yao<sup>1</sup>, Ni Ni<sup>1</sup>, Qiang Guo<sup>2</sup>

(1. College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China; 2. Tianjin Qiang Shi Technology Co., Ltd, Tianjin 300100, China)

**Abstract:** In response to the problem that the current planting process has not been fully automated, a solar-powered planting robot that integrates irrigation, fertilization, seeding, weeding, environmental data collection, as well as remote operation was designed and developed. The kinematic study of the Delta parallel robot is the core of the integrated hardware design, and a cloud control system is developed by integrating cloud IoT technology. The user can realize the basic control of the planting robot, such as video remote control, and data collection of temperature, humidity, and carbon dioxide concentration, etc. Through smart devices such as computers and cell phones. Moreover, the planting machine has good comprehensive practicality and can meet the needs of a variety of plant environments. The popularization and application of this robot are important for reducing the labor intensity of producers and improving the efficiency of seeding and planting. Therefore, this robot is suitable for comprehensive practical planting and has broad application prospects as well as market promotion value.

**Key words:** solar planting robot; parallel manipulator; garden seeder; internet of things technology

我国是世界农业大国, 农业机械化生产是国家现代农业的基础<sup>[1]</sup>, 随着科学技术与经济的高速发展, 以及农业劳动力短缺日趋严重, 加快推进农业机械化和人工智能在农业机械方面的应用已经成为当前推动农业发展的重要举措<sup>[2]</sup>。智能机器人在农业生产中的广泛应用, 可以大大降低人工劳动强度以及生产成本, 解决农业生产劳动力资源不足等根本问题, 所以机器人代替人工作业是现代化农业发展的必然趋势<sup>[3]</sup>。

在农业信息化不断发展的背景下, 为改变传统农业粗放种植方式, 针对不同种植地形与环境的复杂问题, 通过以 Delta 并联机械手的运动学研究为

核心的综合硬件设计以及基于物联网技术的理念而设计了一种新型的自动化种植机械装置——太阳能种植机器人。它是一款具有太阳能供电、集自动播种、浇灌、施肥、除草和环境监控等功能为一体的智能种植机器人, 主要应用于自动化智能农业方面, 完成机械自动化耕作播种作业, 旨在提高农产品种植效率, 从而减少人力劳动管理成本, 且增加了物联网远程操作控制, 很大程度上提高了自动化种植的适用性和简便性。

### 1 太阳能种植机器人的总体方案设计

太阳能种植机器人的机械本体主要由并联机械臂、播种器、滚轮式排种仓、水肥装置、移动

收稿日期: 2021-01-06

基金项目: 天津市企业科技特派员项目(19JCTP59200); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201910061035)

作者简介: 田维翼(1999—), 男, 本科在读, 新能源科学与工程专业。E-mail: 1140244410@qq.com。

通信作者: 杨磊(1980—), 女, 副教授, 硕士, 主要从事智能农机装备方面的研究。E-mail: yanglei2016@tjau.edu.cn。

机构、太阳能装置和摄像头构成, 如图 1 所示。由移动机构带动整个机器进行人工规划的自主循迹, 通过滚轮式排种仓将种子输送到播种器的种斗内, 由并联机械臂带动播种器上的鸭嘴式播种头将种子通过其中的空心管放入土壤, 随后通过喷头进行喷洒、施肥操作。此外, 还可以将播种器人工更换为除草机构, 实现自动除草功能。

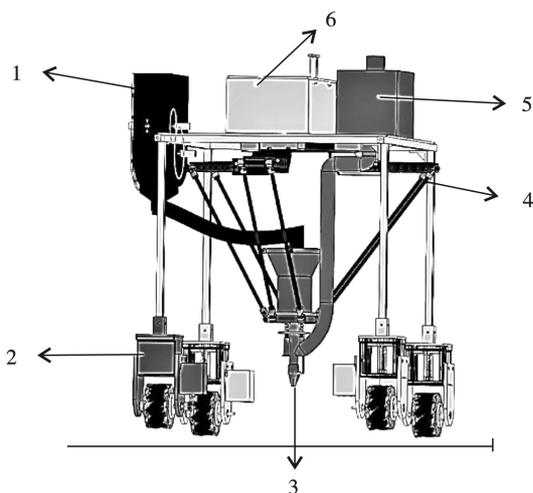


图 1 种植机器人的基本框架

注: 1. 滚轮式排种仓; 2. 移动机构; 3. 播种器; 4. 并联机械臂; 5. 水肥装置; 6. 控制柜

太阳能种植机器人具有 WIFI 远端控制方式。WIFI 通过相应 APP 对其控制和环境数据收集的实时检测。手机使用任意网络即可远程操控机器, 视频数据也可以通过 WIFI 实时传输到上位机手机 APP 端。据统计分析, 农业用户 Android 机使用覆盖率达 95% 以上, 为实现移动端远程操作的需求, 以 Android 系统作为移动端软件的开发平台, 开发了一款基于物联网平台的 APP。该物联网平台主要由参数采集及设备控制 (设备)、数据传输 (网关)、服务器、客户端四部分组成, 系统架构如图 2 所示。采集部分包括各种传感器, 采用 RS485 方式与单片机通信, 保证采集精度的同时, 可以增加传输距离; 控制部分, 主要是控制继电器以间接控制电机等动作; 数据传输部分, 采用了性价比高的 ESP8266WiFi 模块, 选用 Socket 与服务端程序通信; 服务器使用阿里云服务器, 预装 CentOS 6.0 系统, 数据库使用 MySQL 完成数据的存储; 客户端 APP 部分, 通信方式采用 Socket, 页面使用 Vue 快速开发完成, 实现了一个 JSBridge

类, 完成后台与前端页面的数据交互, 通过嵌入海康威视的萤石 SDK 结合其摄像头, 实现实时视频画面传输。

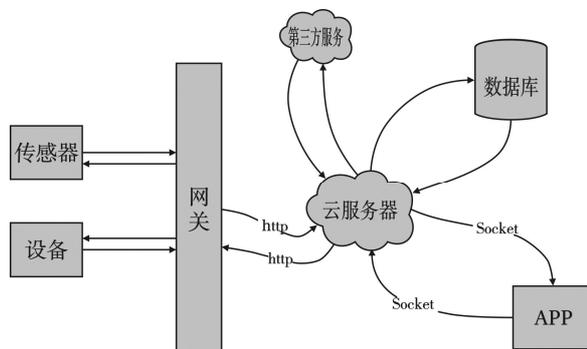


图 2 系统架构图

## 2 主要工作部件

### 2.1 移动平台及其所搭载的部件

种植机器人应适用于各种地形种植作业, 需要在移动与播种过程中保持稳定性, 因此移动机构采用麦克纳姆轮结合减震机构的形式<sup>[4]</sup>, 使其在多种地形条件下都可以具备良好的移动性能。移动平台上加载了自制并联机械臂结构、水肥装置、滚轮式排种仓以及太阳能装置。由下而上依次是并联机械臂、滚轮式排种仓、水肥装置及太阳能装置 (图 3、图 4、图 5、图 6)。并联机械臂主要用于驱动播种头、除草机构等工作机构进行作业。其定平台固定于机器人的顶板上, 末端的动平台可与播种器连接进行相关作业, 动、定平台之间为铰链连接的六根连杆, 可以实现灵活的运动。与串联式机械臂相比, 该种结构无累积误差, 定位精度高, 有助于实现精播和精准施肥。此外, 舵机驱动装置放置于并联机械手定平台上, 可使运动部分重量轻, 速度高, 动态响应性好, 有助于提高作业效率。滚轮式排种仓由排种轮、毛刷轮和种仓盒, 排种轮上设有间距一定的凹槽, 用于运送种子。种仓对面是水肥装置, 由注水管, 水泵、单向阀、电磁阀和水肥箱组成, 可实现喷洒水肥的不同效果, 而且还可以通过滑轨升降机构与注水管实现水肥箱的定向补给。水肥补给需要机器人的控制系统来执行, 最上部的太阳能装置由太阳能光伏板、控制器、直交流逆变器和蓄电池组组成, 以此为种植机的驱动续航能源。

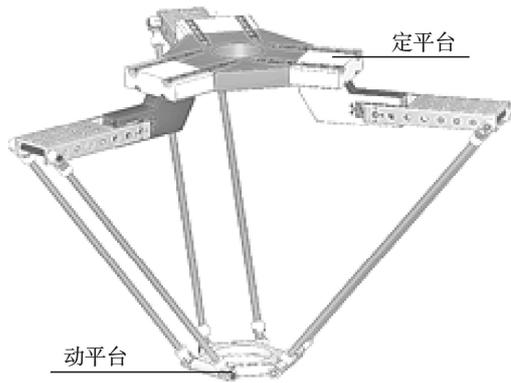


图3 并联机械臂

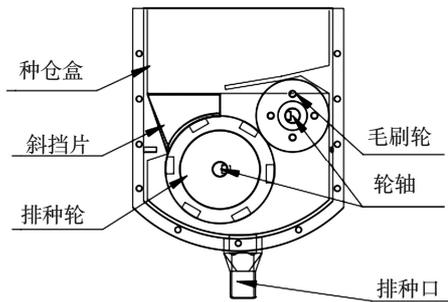


图4 滚轮式排种仓

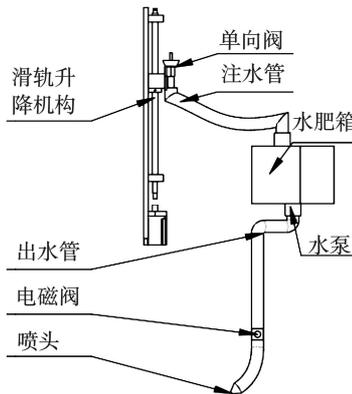


图5 水肥装置

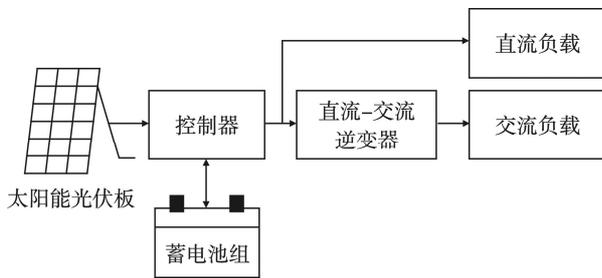


图6 太阳能装置

### 2.2 播种器

播种器在并联机械臂驱动下进行工作,如图7所示,主要由鸭嘴式播种头、种斗、外壳、播种管、外接触片、顶杆、压缩套杆、弹簧、推杆和

内接触片等组成。首先,由滚轮式种仓通过管道将种子输送到播种器的种斗中,然后随着播种器下降,鸭嘴式播种头先插入土壤中打开鸭嘴,土壤与外接触片接触推动顶杆带动推杆向上运动进而将内接触片顶开到一定的高度。此时,由于播种斗是倒圆锥体使得种子向下滑动,而后内接触片向上顶开会与种斗内壁产生一定量的环形空隙,种斗内的种子便可通过这一环形空隙落入到播种外壳中。内接触片的上表面设计为圆锥体,有利于覆盖其表面的种子滑落到周围的空隙中。播种外壳的内部同样设计成倒锥形式,其底部有圆孔与播种管相连接,当种子从种仓滑落其中后,同样可以沿着倾斜的内壁进入到播种管中实现播种作业。完成播种后,播种器上升,当外接触片脱离土壤表面时,依靠弹簧力使得内接触片复位,这样就实现了种仓与播种外壳的隔离。整个过程是先关闭种斗、然后鸭嘴式播种头再完全脱离土壤,有效避免种子的泄漏。

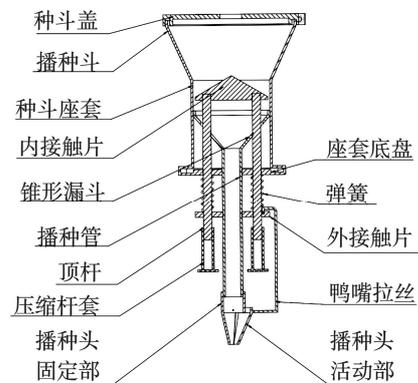


图7 播种器

### 3 控制系统设计

太阳能种植机器人控制系统架构如图8所示,采用的主控芯片为 STM32。主控芯片连接步进电机控制板,用于驱动步进电机来实现行走功能;舵机驱动模块用于驱动舵机实现对并联机械臂的控制;摄像头模块用于采集种植现场的视频画面并回传至手机 APP,实现对种植现场的实时监控;ESP8266 WIFI 模块用于实现用户对机器人的远程操控;继电器用于控制水肥装置。

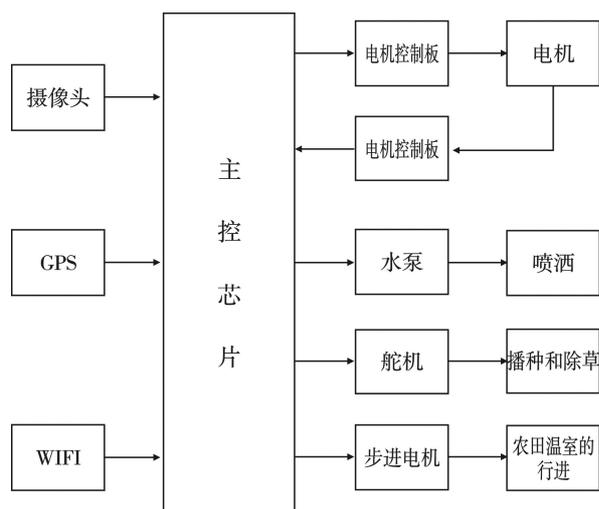


图 8 控制系统的组成

种植机器人程序流程如图 9 所示。系统开机后, 运用摄像头模块捕捉彩色图像以及各个装置初始化, 通过 STM32 主控芯片带动步进电机, 促使其运动, 在运动过程中, 电机的运转速度经过霍尔测速器测速反馈给主控芯片, 控制其速度。同时根据摄像头实时捕捉画面以及传感器感应, 再通过控制并联机械臂舵机运转进行播种, 随后根据实时播种情况通过水泵所连接在播种器上的喷头进行不同效果喷洒施肥。

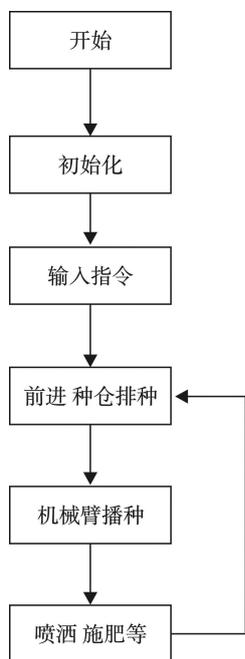


图 9 工作流程图

## 4 工作原理和理论设计计算

### 4.1 移动机构电机选择

太阳能种植机器人物理样机中麦克纳姆轮的移动选用 4 个功率为 15 W 的直流减速电机, 通过

电机驱动板进行驱动, 电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数名称	数值
电压/V	12
转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	60
转矩/ $N \cdot m$	0.6
功率/W	15

### 4.2 减震机构弹簧设计

支撑弹簧采用圆柱螺旋弹簧, 共 8 个, 分别位于四个驱动轮的外侧, 弹簧的旋向无特殊要求, 选用右旋。

其主要几何尺寸如表 2 所示, 选取碳素弹簧钢丝 C 级, 直径为  $d=3 \text{ mm}$ 。材料抗拉强度  $R_m=1470 \text{ MPa}$ , 许用应力  $[\tau]=1470 \times 0.4=588 \text{ MPa}$ , 弹簧外径  $D_2$  受尺寸限制, 取  $D_2=15$ 。

弹簧旋绕比:  $C=D_2/d=5$ ;

曲度系数:  $K=5C-1/5C-4+0.615/C=1.21$ ;

将  $K=1.21$  代入弹簧直径验证公式:

$$d \geq \sqrt[3]{(8KFD/\pi\tau)} =$$

$$\sqrt[3]{(8 \times 1.21 \times 490 \times 18 / (3.14 \times 588))} = 3 \text{ mm}, \text{ 符合}$$

设计要求<sup>[5]</sup>。

表 2 减震参数

参数名称	计算依据	数值
外径 $D/\text{mm}$	$D=D_2+d$	18
中径 $D_2/\text{mm}$	$D_2=Cd$	15
内径 $D_1/\text{mm}$	$D_1=D_2-d$	12
旋绕比 $C$		5
节距 $P/\text{mm}$	$P=(0.28 \sim 0.50) D_2$	7.5
轴向间距 $\delta/\text{mm}$	$\delta=p-d$	4.5
旋转角 $\alpha$		6
质量 $m/\text{kg}$	$\pi d^2 L \rho / 4$	0.16

### 4.3 并联机械臂设计

用几何法分析了机器手的位置逆解, 在位置逆解的基础上对机器手工作空间进行分析, 并通过 MATLAB 软件对其工作空间进行了描述。软件控制程序运用直线插补算法, 以及圆弧插补算法, 确定可移动位置, 并且进行了实体机械臂的控制

操作，完成了机械臂的基础轨迹运动。通过已有的机械手及 Kutzbach Grubler 公式对机器手进行自由度分析，机械臂的动平台只能平动，不可旋转且为等边三角型，自由度为 3。再通过已有的并联机械手的计算资料“3 自由度 Delta 并联机器人运动学分析及工作空间”对自制并联机械手进行空间运动分析。

### 4.3.1 工作空间分析

机器人工作空间的大小代表了机器人的活动范围，它是衡量机器人工作能力的-一个重要指标。机器人的工作空间定义为在结构限制下末端操作器能够达到的所有位置的集合。由于机械手机构模型复杂，利用数学公式表示其工作空间比较困难，自制并联机械手在位置逆解的基础上，利用 MATLAB 进行空间坐标点搜索来确定其工作空间。具体求解过程如下：

(1) 主动臂驱动转角的范围确定。自制并联机械手在正常工作时，驱动转角，即主动臂与静平台工作面之间的夹角一般会限制在一个范围，这样既为了能够在一定的范围内运动，也是为了避免运动范围过大超出可以稳定运行的空间，出现杆件间或者杆件与动平台或静平台之间的干涉。所以本文将驱动转角限制在 $[10^\circ, 120^\circ]$ 之间。

(2) 通过对已有的并联机器人进行测绘，确定机器手的几何参数。

(3) 工作空间预估：根据构件的几何尺寸和几何关系，以及驱动转角的限制范围，经过简单的计算，估计出机器手的大致工作空间范围。其中，X 方向和 Y 方向相同，范围在 $[-300, +300]$ 以内，Z 方向的范围在 $[-200, -400]$ 以内。

(4) 工作空间点搜索：以 X、Y、Z 为自变量，在上述(3)范围内取值，将每一组值带入到机器人的运动学位置逆解方程中，求出驱动臂的输入角度。如果求出的角度值在约束范围内，则在计算机中存下该坐标点，若不在在约束范围内，则剔除该坐标点。此过程由 MATLAB 通过编程完成，工作空间搜索算法如图 10 所示。

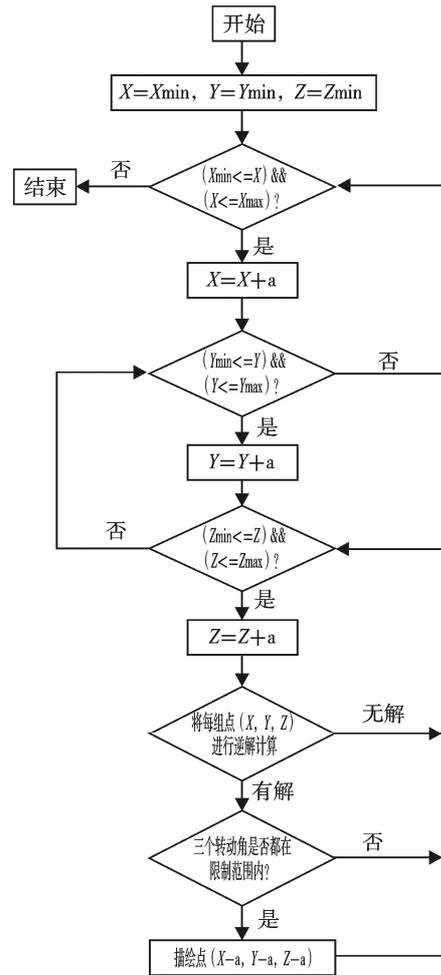


图 10 工作空间搜索算法

(5) 将(4)中满足要求的位置点坐标通过 matlab 绘制出来，即得到工作空间的视图，如图 11 所示。

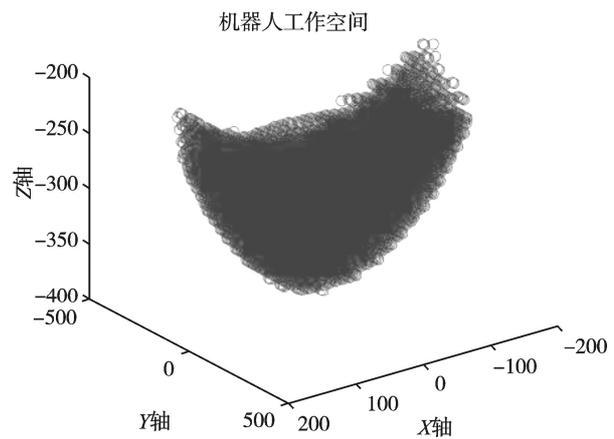


图 11 工作空间仿真图

通过上述计算以及图示，对于并联机械手的理论计算得出机器人在 X 轴方向工作范围近似为 $[-200, 200]$ ，Y 方向工作范围近似为 $[-200, 200]$ ，

Z 方向工作范围近似为 $[-380, -200]$ , 运用实际程序对自制并联机器人手调试实现所需运动位置的设置<sup>[6]</sup>。

## 5 种植机器人的功能实现及测试

根据上述设计方案, 设计出相同结构试验需要样机, 如图 12 所示, 通过机体与物联网通讯的远程控制软件实现了种植机器人的基本操作, 并且此样机是由太阳能装置供能, 很大程度上增加了机体的续航能力, 太阳能属于可再生能源, 其无污染的特性体现了绿色环保<sup>[7]</sup>, 播种结构采用了并联机械臂提高了精准度, 省时省力, 机器人还通过对玉米和大豆等播种进行了试验播种, 效果理想, 通过在并联机械手的动平台上切换不同种农业工具, 如更换播种器为除草的机械结构, 实现除草功能。整个机体平台采用了带有减震结构的自走式稳定平台确保播种精度和稳定性, 系统控制中融入云物联技术, 使得整个系统更加智能化。这一智能种植装置, 通过不断测试以及试验, 运用于不同地形与环境的种植, 且这一种植样机还装备了湿度、空气温度、CO<sub>2</sub> 浓度等常规指标的传感器, 大大提升了其实用性。整个样机机械装置性能指标参数如表 3 所示, 机体结构大小适中, 机体的控制操作是由一键控制为理念来设计, 提高了其操作的简易性。试验控制 APP 如图 13 所示。

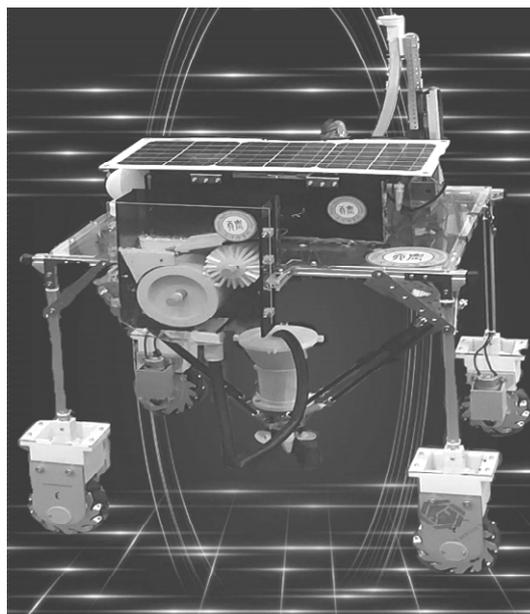


图 12 种植机器人实验样机



图 13 手机APP实验操作界面

表 3 机器人性能参数

参数名称	数值
整机尺寸	696 mm×630 mm×670 mm
移动速度	可调节 (0.1~0.4 m/s)
播种密度以及速率	可以自行设置 例如: 白菜3 333.5 株/666.7m <sup>2</sup> 1.2~1.7 株/s
控制方式	手机app、电脑/平板电脑
耗电量	样机24 h运行需3.6 kwh电
供电方式	太阳能装置与12 V 300 Ah蓄 电池结合供电
供电电压	220 V/12 V

## 5 结论

通过对机械装置本体及控制系统的设计, 实现了太阳能种植机器人的样机制作以及样机行动程序编译, 通过样机与物联网相结合而开发设计的控制操作系统实现了太阳能种植机器人基本作业操作。在实验室的基础条件下, 对这一样机与物联网云端控制的完整系统进行了调整测试, 很好地实现了预期功能。这一太阳能种植机器人基于 Delta 并联机械手的运动学研究为核心而延申的硬件设计, 完成了种植机器人集播种、除草、灌溉和施肥于一体的设计理念, 具有良好的综

合实用性且操作简单。太阳能种植机器人可以适用于多种种植的工作环境，具有较为广泛的适用性。该机器人的推广应用对于降低生产者劳动强度，提高播种种植效率具有重要意义。因此，这一机器人适用于综合实用性的种植，具有广阔的应用前景以及市场推广价值。

**参考文献:**

[1] 毕昆, 赵馨, 侯瑞锋, 等. 机器人技术在农业中的应用方向和发展趋势[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (4): 469-473.  
 [2] 宋健, 张铁中, 张宾, 等. 农业机器人的研究现状与发

展展望[J]. 潍坊学院学报, 2005, 5 (4): 1-5.  
 [3] 卢文景. 基于物联网技术的智能种植系统设计与实现[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.  
 [4] 陈博翁, 范传康, 贺骥. 基于麦克纳姆轮的全方位移动平台关键技术研究[J]. 东方电气评论, 2013, 27 (4): 7-11.  
 [5] 马咏梅, 谢梅英. 基于ANSYS的低频弹簧橡胶减振器结构设计[J]. 机械设计与制造, 2008 (9): 16-18.  
 [6] 梁香宁, 牛志刚, 3自由度Delta并联机器人运动学分析及工作空间[J]. 太原理工大学学报, 2008 (1): 93-96.  
 [7] 方刚剑. 太阳能光伏发电技术及其应用探讨[J]. 智能城市, 2019 (11): 81-82.

责任编辑: 杨霞



(上接第 38 页)

**参考文献:**

[1] 关强, 蒲瑶瑶, 张欣, 等. 长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 115-121.  
 [2] CHEN Q G. Research on economic impact of super rice on rice growers and contribution to food security[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16 (11): 2581-2588.  
 [3] 谈鑫, 何胥, 李习习, 等. 蚯蚓粪酒糟基质对水稻机插秧育秧的效果[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(13): 23-25.  
 [4] 饶镭, 吴天琦, 李保同, 等. 猪粪基质育秧对水稻秧苗素质的影响[J]. 生物灾害科学, 2019, 42 (1): 70-72.  
 [5] 朱宁. 不同育秧基质对水稻秧苗素质及栽后生长的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.  
 [6] LIU C C, WANG C W, YAO H Y. Comprehensive resource utilization of waste using the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) (Diptera: Stratiomyidae) [J]. Animals, 2019, 9 (6): 349.  
 [7] 李卫娟, 周文君, 杨树义, 等. 黑水虻虫沙对白菜生长性能的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(10): 111-112, 115.  
 [8] 吴翔, 胡从勇, 蔡瑞婕, 等. 虫粪有机肥对番茄生长及

品质的影响[J]. 北方园艺, 2019 (3): 60-64.  
 [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.  
 [10] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国高等教育出版社, 2003.  
 [11] 刘祖祺, 张石城. 植物抗性生理学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.  
 [12] 林伟. 茶树有机肥替代化肥效果研究[J]. 园艺与种苗, 2019, 39 (6): 47-48.  
 [13] 顾介明, 石磊, 周勤华, 等. 营养土中不同比例有机肥对水稻秧苗素质及产量和效益的影响[J]. 上海农业科技, 2011 (3): 96-97.  
 [14] 孙国峰, 周宇, 周炜, 等. 连续3年施用高量猪粪有机肥的水稻剑叶光合特征[J]. 中国稻米, 2015, 21 (4): 132-134.  
 [15] 陈虞雯, 王子臣, 周炜, 等. 育秧基质与土配比对水稻秧苗素质及光合生理的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (13): 57-59.  
 [16] 孙常青, 杨艳君, 郭志利, 等. 施肥和密度对杂交谷可溶性糖、可溶性蛋白及硝酸还原酶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (5): 1169-1177.

责任编辑: 宗淑萍