柑橘类水果采摘机器的设计与研究

刘静，林冲，郭世财，彭宗玉
（江西理工大学，江西 赣州 341000）

摘要：目的 设计并制作一款柑橘类水果采摘机器，对柑橘等水果进行采摘和装箱。**方法** 对整机的机械和控制部分进行设计，机械部分包括末端执行器、机械臂、移动平台、上升机构、存储机构和运输机构；控制部分基于 OpenMV 系统对指定颜色的柑橘进行扫描，通过串口通信将坐标值传输给 STM32 单片机，基于 STM32 单片机对各模块进行控制，利用 Altium Designer 软件对各模块的控制电路图进行设计与仿真。**结果** 制作出实物样机且在果园试验成功，采摘 1 次的平均时间为 5.4 s，采摘的最大高度是 1.85 m。**结论** 该机器能够完成对柑橘识别、采摘、分拣和装箱一体化功能，满足使用要求。

关键词：采摘机器；OpenMV；STM32；电路仿真
中图分类号：TB486　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3563(2019)17-0056-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.009

Design and Research of Citrus Fruit Picking Machine

LIU Jing, *LIN Chong*, *GUO Shi-cai*, *PENG Zong-yu*
(Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

ABSTRACT: The work aims to design and manufacture a citrus fruit picking machine to pick and pack fruits such as citrus. The mechanical part and the control part of the whole machine were designed. The mechanical part comprised an end effector, a manipulator, a moving platform, a rising mechanism, a storage mechanism and a transport mechanism. The control part scanned the citrus in specified color based on the OpenMV system, transmitted the coordinate value to the STM32 MCU through serial communication, controlled each module based on STM32 MCU, and designed and simulated the control circuit diagram of each module with Altium Designer software. A physical prototype was produced and tested successfully in the orchard. The average time for one-time picking was 5.4 s and the maximum height for picking was 1.85 m. The machine is capable of integrating citrus identification, picking, sorting and packing to meet the requirements of use.

KEY WORDS: picking machine; OpenMV; STM32; circuit simulation

大量的水果采摘工作是费力、耗时的一个环节，其劳动强度大，长期机械式的操作过程给果农造成了一定的压力。由于工业化的发展，农村大量劳动力流失，使能够从事农业化生产的劳动力越来越少，仅仅依靠手工劳动是远远不够的[1—2]。随着工业化和智能控制理论的发展，使用机器完成自动化采摘成为了可能[3]。柑橘是我国种植面积较为广阔的一种水果，我国柑橘栽培面积达 3800 余万亩（1 亩=666.7 m^2），年均产量达 3500 多万 t。

从 20 世纪 80 年代开始，国内外开始对柑橘采摘机器人进行研究，日本宇都宫大学尾崎功一氏[4]设计的采摘机器，视觉部由 3 台彩色摄像机、偏振滤光片以及 5 盏照明灯组成，可以精确地定位水果的位置；东南大学卢伟团队[5]提出了一种基于 D-H 运动算法确定柑橘

收稿日期：2019-04-26
基金项目：江西省教育厅科学技术研究项目（GJJ160615）
作者简介：刘静（1965—），女，副教授，主要研究方向为机械设计与机器人控制技术。

位置的机器；文献[6—10]分别设计了不同的采摘方式完成对柑橘类等水果的采摘。文中提供一种基于 OpenMV 图像处理功能的柑橘类水果采摘机器，包括机械部分和控制部分，能够完成对柑橘识别、采摘、分拣、装箱一体化的功能，减轻工作人员的劳动强度。

1　总体方案设计

1.1　整机原理方案

设计的柑橘类水果采摘机器包括机械部分和控制部分。机械部分包括末端执行装置、机械臂、移动平台、上升机构、存储机构和运输机构；控制部分包括 OpenMV 图像采集，和以 STM32 单片机为核心芯片对各模块的控制系统。

柑橘类水果采摘机各种动作的设计准则是根据柑橘果树的生长分布特征而定。具体工作过程：摄像头扫描柑橘，当识别到成熟的柑橘时，将柑橘坐标值通过串口通信传送至 STM32 单片机，单片机控制机械臂到达指定的位置，启动控制环形剪刀的舵机，剪断柑橘果柄，柑橘顺着管道进入箱体内部的滑槽，进行初步分拣和装箱，完成识别、采摘、分拣、装箱一体化的功能，降低果农的劳动强度。

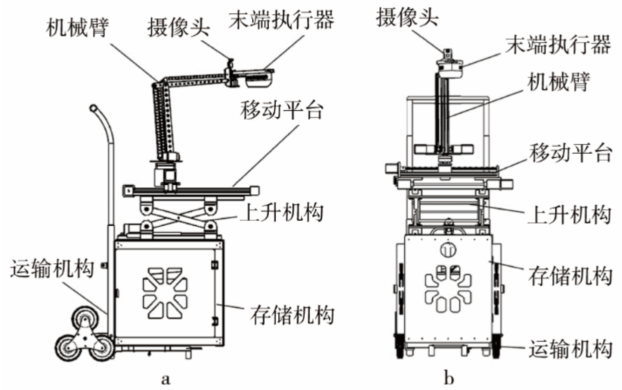


图 1　采摘机器人整机结构原理
Fig.1 Schematic diagram of picking robot structure

1.2　末端执行装置的设计

末端执行装置由摄像头和环形剪刀两部分组成。摄像头基于 OpenMV 图像处理功能，OpenMV 是一种基于 Python 软件进行编程驱动的机器视觉处理模块，利用 Python 强大的机器学习功能对其进行二次开发，实现自己的功能。OpenMV 视觉模块可运用于色彩识别、脸型检测等[11—13]。基于 OpenMV 以上特点，以成熟柑橘的颜色为识别目标，通过前端的摄像头对柑橘表皮的颜色进行采集，根据柑橘的坐标值能够快速判断柑橘所在的位置，将该模块安装在机械臂末端，以扩大识别范围。

环形剪刀的设计考虑到柑橘果柄较硬，并且大多数采摘方式剪断机构都是依靠手动施加力，因此，采用能够提供较大力矩的舵机作为动力源。当摄像头识别到成熟的柑橘时，机械臂控制环形剪刀到达指定的位置，启动舵机，驱动轴带动第二弧形连杆往复运动，弧形连杆凹槽处固定有刀片，进而割断果柄。末端执行装置见图 2。

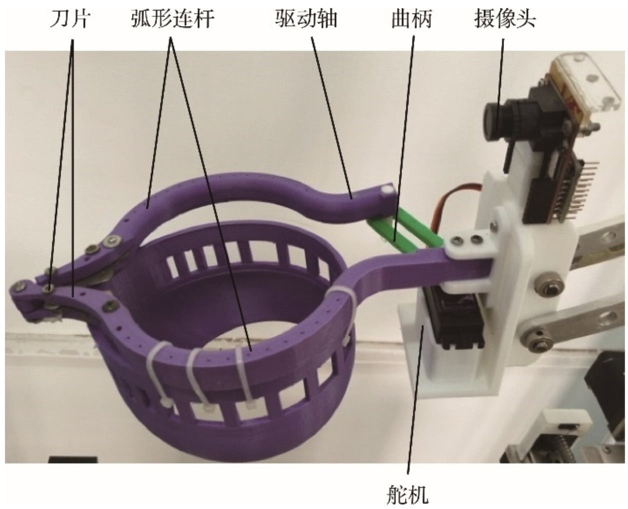


图 2　末端执行器的设计
Fig.2 End effector design

1.3　机械臂的设计

机械臂是完成整个采摘过程十分重要的结构，机械臂的结构设计和控制方式决定了是否可以快速地完成采摘，实现相关功能。文献[14—15]分别设计了 2 种不同水果采摘的机械臂，这 2 种机械臂的共同特点：机械结构简单，电机数量较多，这种机械臂控制复杂，对精度要求较高。为了减轻机械臂的重量和控制难度，提高运动的平稳性，在大臂、小臂、连接臂的另一侧设计有同样对称分布的机械臂杆件，中间臂起辅助支撑的作用，在机械原理上可简化为 2 个对称的铰链四杆机构，减少电机数量的同时，提高其运动的灵活度。机械臂见图 3a，结构原理见图 3b。

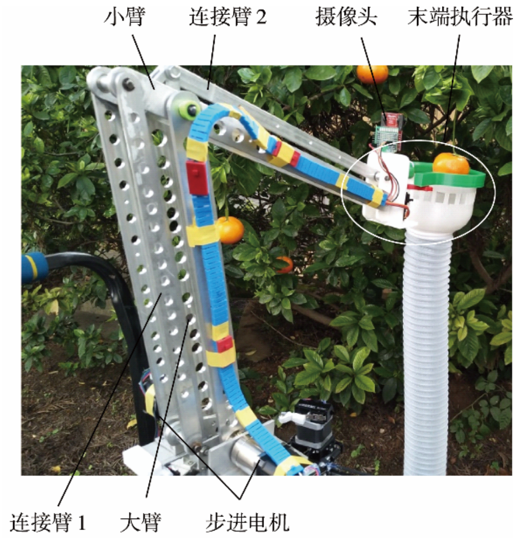
1.4　移动平台的设计

经过实际调研，大部分柑橘树的生长高度在 1.5~3 m，株距约为 2~3 m。传统的采摘机器为了采摘不同方位的柑橘，需要移动整台机器，降低了采摘效率。移动平台左右移动方向采用丝杆螺母作为传动机构，其特点是运动平稳、有可逆性，最大移动范围 350 mm；前后移动方向采用同步带作为传动机构，其特点是结构紧凑、抗拉强度高、效率高，最大移动范围 500 mm；同时在滑块上安装旋转电机，控制机械臂采摘不同角度的柑橘，移动平台结构见图 4。

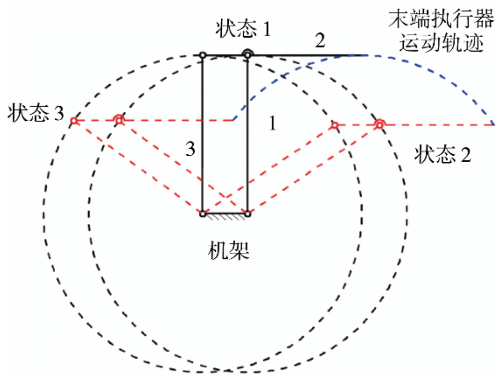
2　系统的设计

2.1　系统整体设计思路

控制系统的程序设计包括视觉识别系统的控制、



a 机械臂实验



b 机械臂结构原理

图 3　机械臂的设计
Fig.3 Manipulator design

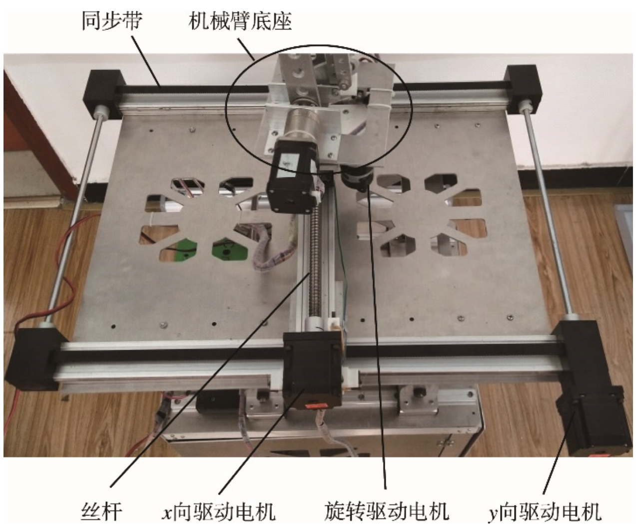


图 4　平台结构
Fig.4 Moving platform structure

末端执行机构的控制、机械臂的控制、移动平台的控制和升降装置的控制 5 个部分。所有控制模块的主控芯片都采用 STM32 单片机[16—17]，视觉识别系统控制程序利用 Micopython 软件进行编写，其他控制部分的程序利用 Keil5 软件进行编写。各程序模块见图 5。

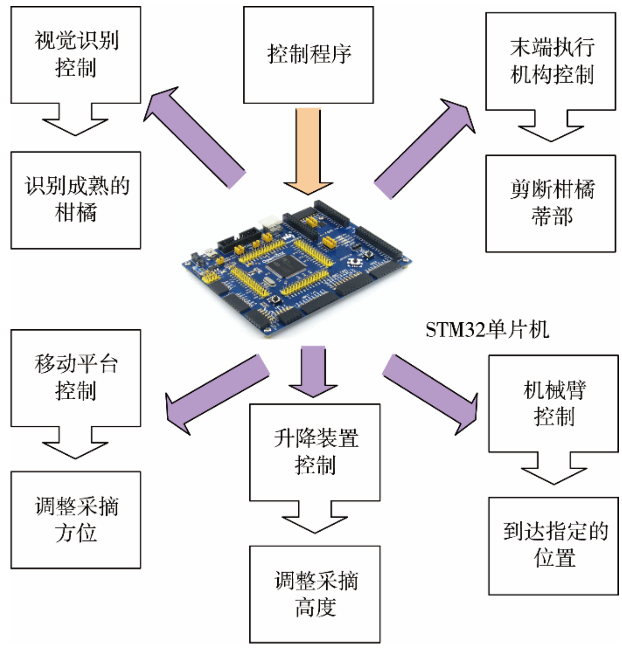


图 5　机器人控制系统框架
Fig.5 Control system framework of picking robot

整个柑橘采摘机器人包括以下几个设计任务。

1）视觉识别部分：对用户指定颜色的柑橘进行扫描，通过控制算法自动的以较优的速度移动到目标物体前，并稳定地停在前方。

2）末端执行机构：当识别到目标体时，控制末端执行机构运动到指定的位置，剪断柑橘蒂部。

3）机械臂部分：与末端执行器相连，通过控制机械臂从而控制末端执行机构采摘指定的柑橘。

4）移动平台部分：与机械臂连接，扩大机械臂前后左右的移动范围，采摘不同方位的柑橘。

5）升降机构部分：与移动平台连接，扩大机械臂上下移动的范围，采摘不同高度的柑橘。

2.2　识别的控制

OpenMV 是一个功能强大且开源的机器视觉模块，视觉识别系统主要由 3 部分组成：图像采集、图像处理和分析、图像信息的传递，它以 STM32F4 单片机为核心，集成了摄像头芯片，分辨率高达 30 万像素，利用 C 语言编程实现高效算法。本项目调用 OpenMV 视觉识别的设计过程是：设定识别颜色为橘黄色，利用摄像头采集图像，识别柑橘中心所在位置的相对坐标值，将该坐标信息通过串口通信直接传递给 STM32 单片机，单片机控制末端执行器到达指定的位置。OpenMV 端口成像见图 6a，部分控制程序见图 6b。

2.3　执行器的控制

末端执行机构通过一个舵机控制，刀片在切断果

柄时需要有较快的速度和较大的剪切力，本项目使用的舵机型号是 MG995；控制电路根据单片机发送的信号控制电机转动；减速齿轮实现电机的转速控制同时增大电机的转矩；电位器用于监测电机的旋转角度，通过单片机生成的 PWM 波信号，控制舵机旋转一定的角度。

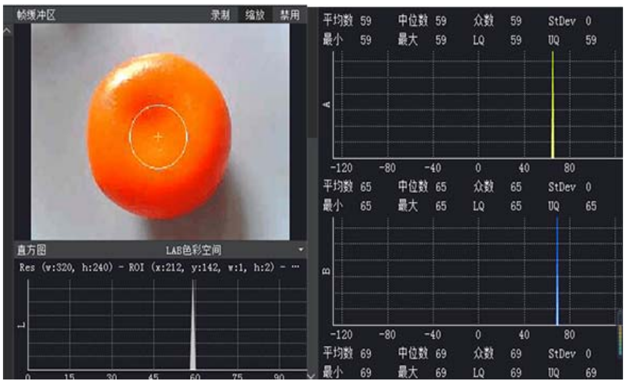
根据设计要求，要实现舵机的控制，一般需要一个 20 ms 的时基脉冲周期，该脉冲的高电平角度控制部分一般为 0.5~2.5 ms 范围内的脉冲。以旋转角度为 180° 的舵机为例，其旋转 0°，45°，90°，135° 和 180° 对应的脉冲时间分别为 0.5，1.0，1.5，2.0 和 2.5 ms。

具体工作流程：使用 KeiluVision5 建立目标工程文件，根据程序设计思路使用 C 语言编写控制程序、编译，无误后生成执行文件，下载至 STM32 芯片中；根据设计要求和设计方案绘制电路图，设置元件的参数，并将程序导入单片机中，运行调试；根据调试结果，判断舵机运行的稳定性和可靠性。

利用 Altium Designer 软件绘制舵机的控制电路原理图，STM32 单片机输出一路周期为 20 ms 的 PWM 波连接舵机的信号线从而控制舵机，控制接口直接与单片机引脚连接，另一端与电源连接。电路仿真见图 7。

2.4　其他模块的控制

机械臂、移动平台、升降机构均通过不同型号的步进电机控制执行相关动作。步进电机的转速控制是通过脉冲宽带调制（PWM）来控制。PWM 是按一定



a OpenMV 端口成像

```
import sensor, image, time
from pyb import UART
red_threshold  = (  5, 25 ,20 , 30,17,30)
uart=UART(3,115200)
sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QVGA)
sensor.set_auto_whitebal(False)
sensor.set_auto_gain(False)
sensor.set_brightness(0)
sensor.skip_frames(10)
clock = time.clock()
while(True):
        clock.tick()
        img = sensor.snapshot()
        blobs =
img.find_blobs([red_threshold])
        max_pixels=1
        a=[0,0,0,0,0,0,0,0,8,9]
c=10
 if blobs:
  for b in blobs:
   if(b[4]>max_pixels):
    max_pixels=b[4]
     a=b
     c=(a[2]+a[3])/10
      c=int(c)
if (b[4]>50):
if a[2]!=0:
if a[5]<10:
d=str(a[5])
uart.write('x=00'+d)
if (a[5]>9) and (a[5]<100):
d=str(a[5])
uart.write('x=0'+d)
if a[5]>99:
d=str(a[5])
uart.write('x='+d)
 if a[6]>99:
  uart.write('y='+f+'          ')
  img.draw_circle(a[5],a[6],c)
  img.draw_cross(a[5],a[6])
print(a,'\n')
print(clock.fps())
```

b 部分控制程序

图 6　识别控制

Fig.6 Visual recognition control

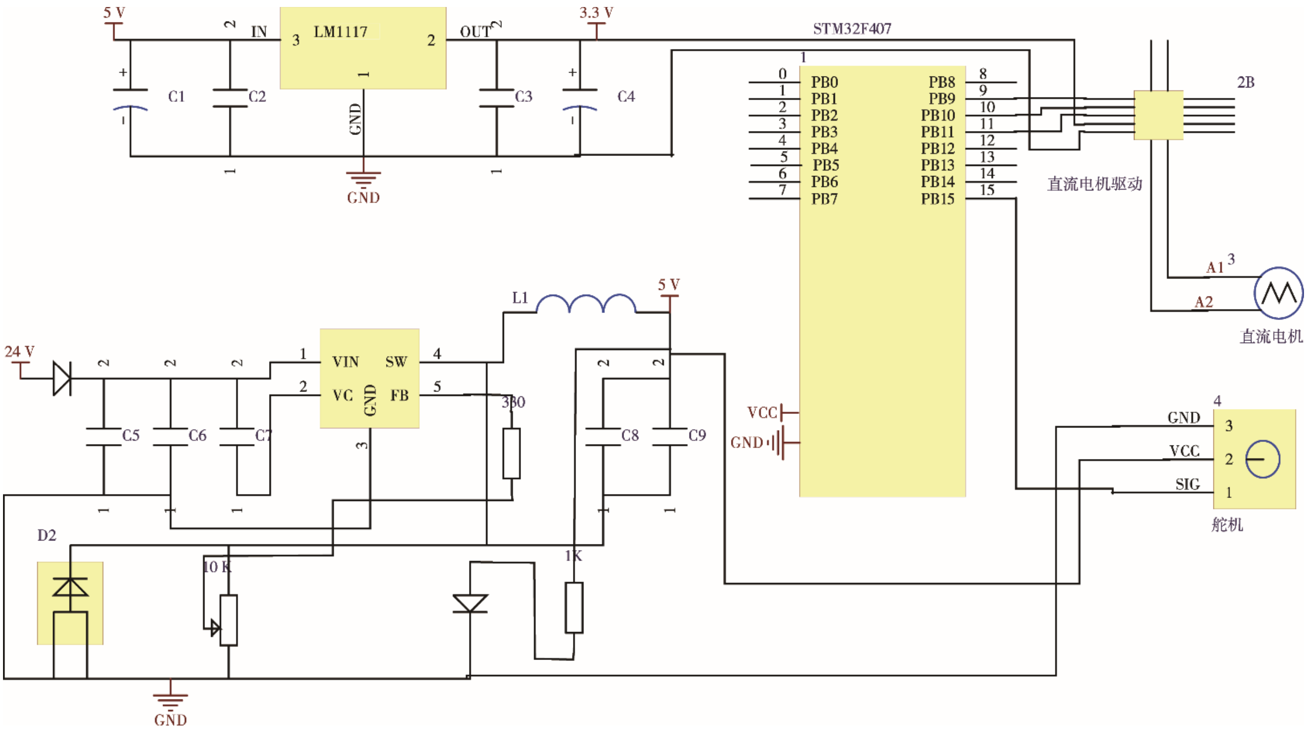


图 7　控制原理

Fig.7 Control schematic diagram of steering gear

规律改变脉冲序列的脉冲宽度，以调节输出量和波形的一种调制方式，在控制时需调节 PWM 波的占空比（高电平持续时间在一个周期时间内所占的百分比）。控制电机转速时，速度跟占空比有关。占空比周期见图 8。

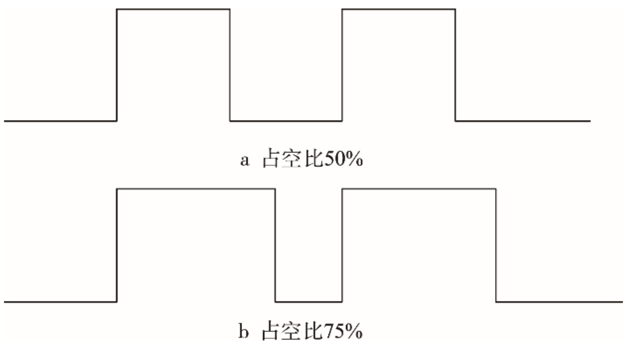


图 8　步进电机控制原理
Fig.8 Control principle of stepper motor

利用 Altium Designer 软件绘制步进电机控制电路图：为保证电路的可靠性，电源部分采用 XL4016 稳压芯片进行初级稳压，产生 5 V 接口，再由 LM1117 稳压芯片降压为 3.3 V 给单片机供电，确保单片机不受电源电压波动的影响；步进电机采用 TB6560 驱动器驱动，该驱动器能够与单片机直接连接，步进电机则直接连接在驱动器上，每个驱动器使用 3 个单片机引脚进行控制，CLK 控制转速，SW 控制转向，EN 控制驱动器是否工作，通过改变脉冲的频率能够控制步进电机平稳地启动和停止。电路原理见图 9。

3　实验验证

根据设计方案和控制电路设计方案，制作了一款柑橘类水果采摘机器，机械臂未展开时的整体尺寸为 500 mm × 400 mm × 1200 mm，整体样机和试验过程见图 10。

将此原型机在果园进行了多次实验，实验证明：该机器能够完成对柑橘识别、采摘、分拣和装箱一体化功能。摄像头扫描柑橘，基于 OpenMV 图像处理功能，当识别到成熟的柑橘后，将柑橘坐标值反馈至 STM32 单片机，单片机通过移动平台和上升机构控制机械臂到达指定的位置，末端执行器剪断柑橘蒂部，柑橘顺着管道进入箱体，进行分拣和装箱，实现全自动化采摘。经过多次实验，实验结果见表 1，此样机识别 1 次平均时间是 2.7 s，采摘 1 次平均时间是 5.4 s，每次采摘的数量为 1~2 个，采摘的最大高度为 1.85 m，验证了设计的可行性。

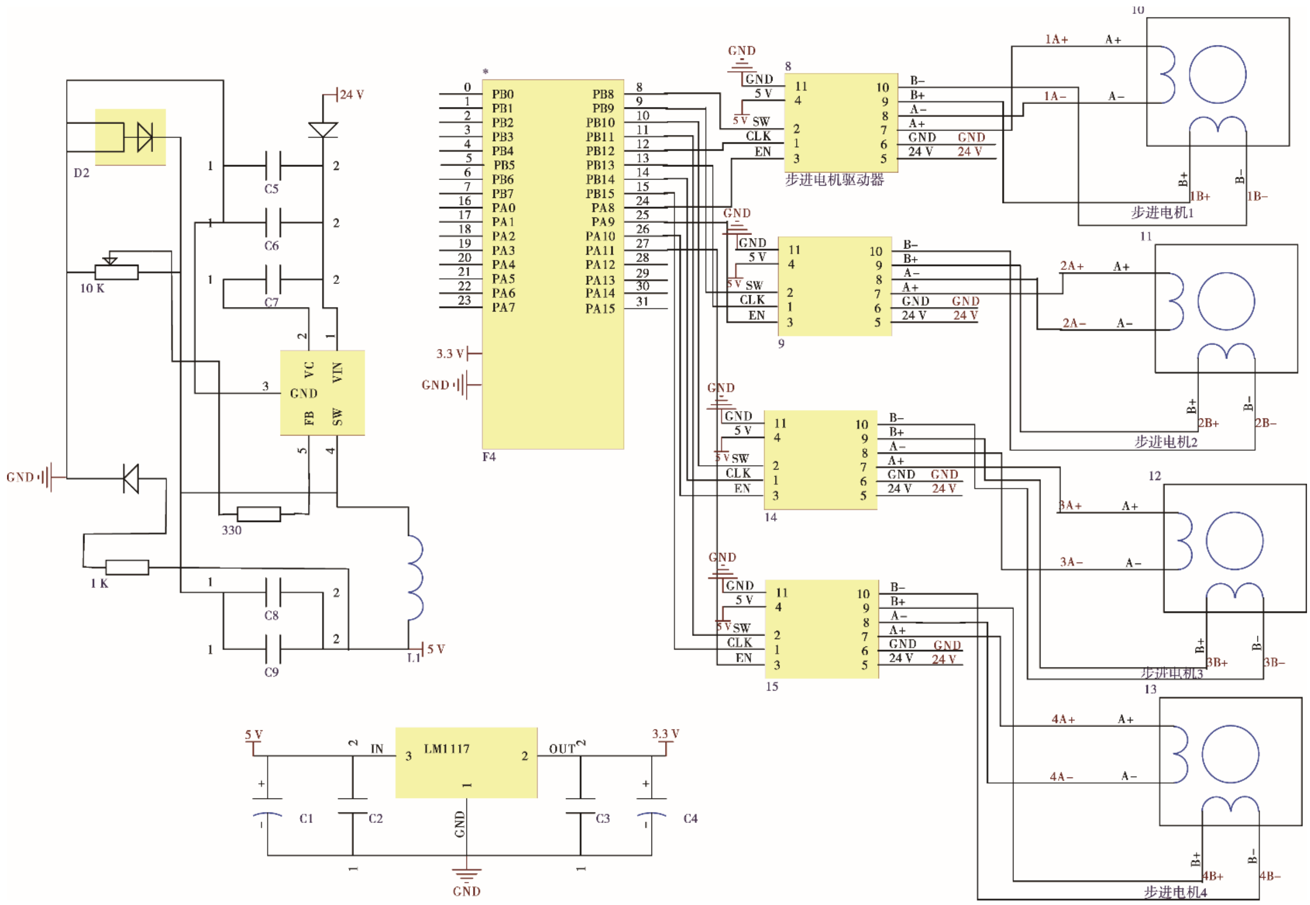


图 9　步进电机控制原理
Fig.9 Control principle of stepper motor

图 10　整体样机试验
Fig.10 Overall prototype test

表 1　试验结果统计
Tab.1 Statistics of test results

试验次数	识别时间/s	采摘时间/s	采摘个数	柑橘高度/m
1	2.2	4.5	1	1.54
2	1.8	5.0	1	1.66
3	3.5	6.0	2	1.55
4	4.0	6.5	2	1.62
5	2.5	5.3	1	1.70
6	2.2	4.8	1	1.85

4　结语

结合采摘机器人的结构特点，对末端执行器、机械臂、移动平台、上升机构和存储机构进行模块化设计，保证采摘机器可以采摘不同角度和不同高度的柑橘。

对采摘机器人的各部分控制模块进行设计，利用 Altium Designer 软件绘制各模块的控制电路图，并进行了仿真，验证了电路设计的可行性。

通过制作实物样机实验，验证了机构设计和控制电路的正确性，但机器识别过程受光线影响较大，识别精确度不高。

参考文献：

[1] 张洁，李艳文．果蔬采摘机器人的研究现状、问题及对策[J]．机械设计, 2010, 27(6): 1—5.
ZHANG Jie, LI Yan-wen. Research Status, Problems and Countermeasures of Fruit and Vegetable Picking Robots[J]. Mechanical Design, 2010, 27(6): 1—5.

[2] 杜恩明，张仁朝．基于机器视觉的自动分拣码放系统研究[J]．包装工程, 2018, 39(15): 194—198.
DU En-ming, ZHANG Ren-chao. Research on Automatic Sorting and Grading System Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(15): 194—198.

[3] 何家成，汪洋，刘宏博，等．便携式果园采摘机设计[J]．农机化研究, 2018, 40(5): 83—87.
HE Jia-cheng, WANG Yang, LIU Hong-bo, et al. Design of Portable Orchard Picking Machine[J]. Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 83—87.

[4] 姬江涛，郑治华，杜蒙蒙．农业机器人的发展现状及趋势[J]．农机化研究, 2014(2): 1—3.
JI Jiang-tao, ZHENG Zhi-hua, DU Meng-meng. Development Status and Trend of Agricultural Robots[J]. Agricultural Mechanization Research, 2014(2): 1—3.

[5] 卢伟，宋爱国，蔡健荣．柑橘采摘机器人结构设计及运动学算法[J]．东南大学学报：自然科学版, 2011, 41(1): 96—98.
LU Wei, SONG Ai-guo, CAI Jian-rong. Structural Design and Kinematics Algorithm of Citrus Picking Robot[J]. Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(1): 96—98.

[6] 王皓，高国华，夏齐霄．连续体采摘机械臂末端静态承载姿态等效模型建立与验证[J]．农业工程学报, 2018, 34(5): 23—26.
WANG Hao, GAO Guo-hua, XIA Qi-xiao. Establishment and Verification of Equivalent Model of Static Bearing Attitude at the End of Continuum Picking Manipulator[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 23—26.

[7] NI Xin-dong, WANG Xin, WANG Shu-mao. Structure Design and Image Recognition Research of A Picking Device on the Apple Picking Robot[J]. IFAC Papersonline, 2018, 51(17): 489—494.

[8] SANG Yong, LI Feng-tao, DAI Yue-bang. The Practical Control Technology Design for AC Servo Motor Based on STM32 Micro-controller[J]. Advanced Information Technology, 2015, 20: 1—6.

[9] 徐丽明，刘旭东，张凯良．脐橙采摘机器人末端执行器设计与试验[J]．农业工程学报, 2018, 34(12): 53—56.
XU Li-ming, LIU Xu-dong, ZHANG Kai-liang. Design and Experiment of End Effector for Navel Orange Picking Robot[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 53—56.

[10] 黄河，曾欣．基于单片机的玉米智能播种机设计和研究[J]．农机化研究, 2018, 40(5): 201—204.
HUANG He, ZENG Xin. Design and Research of Corn Intelligent Seeding Machine Based on Single Chip Microcomputer[J]. Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 201—204.

[11] 梅妍玭，傅荣．基于 OpenMV 的 3D 定位识别系统[J]．新技术新工艺, 2018(2): 50—52.
MEI Yan-pin, FU Rong. 3D Positioning Recognition System Based on OpenMV[J]. New Technology and New Technology, 2018(2): 50—52.

[12] LIU Hua-ping, YU Yuan-long, SUN Fu-chun. Visual-

Tactile Fusion for Object Recognition[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2): 996—1008.

[13] ALEXANDER M, O'BRIEN. Using Prosopagnosia to Test and Modify Visual Recognition Theory[J]. Perceptual and Motor Skills, 2018, 125(1): 57—80.

[14] 李伟. 果蔬采摘机器人机构设计及特性分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 11—20.
LI Wei. Design and Characteristic Analysis of Fruit and Vegetable Picking Robot Mechanism[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014: 11—20.

[15] 丁祥青, 马莉. 采摘机器人机械手结构设计与分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(23): 40—43.
DING Xiang-qing, MA Li. Design and Analysis of Picking Robot Manipulator Structure[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2017, 45(23): 40—43.

[16] YANG F, MA C T, LI H Y. Design of Wireless Video Transmission System Based on STM32 Microcontroller [J]. Advances in Materials, 2017, 1820: 48—64.

[17] 吕书信, 张北伟, 王泽澄. 基于 STM32 分拣搬运机器人控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 101—104.
LYU Shu-xin, ZHANG Bei-wei, WANG Ze-cheng. Design of Control System Based on STM32 Sorting Handling Robot[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(9): 101—104.