

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.10.035

番茄采摘机器人真空吸盘装置设计与试验*

刘继展¹ 李萍萍¹ 倪齐² 李智国¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 德累斯顿工业大学, 德累斯顿 01062, 德国)

【摘要】 为实现番茄采摘机器人作业时将目标果实从果束中分离,设计了以微型静音空气压缩机和集成式真空发生器为主体的真空吸盘装置,并依据供气压力-负压关系、吸盘拉脱力和真空吸着响应时间测定结果,确定了其控制策略。试验表明,真空吸盘装置平均单次作业的时间和空气消耗量分别为 1.5 s 和 0.6 L,拉动果实实现 35 mm 水平位移的成功率达 92%,空气压缩机功率可以满足采摘效率 360 个/h 的需要。

关键词: 番茄 采摘机器人 真空吸盘装置 设计 试验

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)10-0170-04

Design and Test of the Vacuum Suction Device for Tomato Harvesting Robot

Liu Jizhan¹ Li Pingping¹ Ni Qi² Li Zhiguo¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. Dresden University of Technology, Dresden 01062, Germany)

Abstract

A vacuum suction device was developed to separate aimed tomato fruit from cluster in robotic harvesting, which took a mini air pump and a vacuum ejector as vacuum generation. Control strategy to this device was designed based on relationship between air supply pressure and vacuum pressure, pull-off force of the suction cup, and suction responding time. Experiments indicated that average time of one task and air consumption of this device were 1.5 s and 0.6 L, respectively. Success rate pulling fruit to reach horizontal 35 mm far distance was 92%. Power of the mini air pump could satisfy the need of fulfilling 360 fruits harvesting per hour.

Key words Tomato, Harvesting robot, Vacuum suction device, Design, Experiment

引言

番茄 2~5 个成束生长、相互触碰,采摘过程中末端执行器难以以理想姿态接近和夹持果实,极易造成夹持的失败和相邻果实的损伤,日本、美国等国所开发的番茄采摘机器人均通过一吸盘首先吸持住番茄并将其拉离果束,采用吸持-拉动-夹持-分离的采摘作业顺序,此方法已被证明是有效的^[1-3]。

但以上吸盘装置仍存在不便控制、效率低且耗能过大等不足,严重阻碍了装置的实际应用。本文设计以集成式真空发生器为核心的番茄采摘机器人

真空吸盘装置,并根据装置性能试验确定其控制策略。

1 番茄采摘机器人真空吸盘装置

1.1 总体结构

真空吸盘装置是番茄采摘机器人末端执行器的关键部分^[4-5],由真空系统和执行机构组成(图 1)。真空系统以集成式真空发生器和微型静音空气压缩机为主体,执行机构由微型直流电动机驱动,通过齿轮齿条传动带动固定于齿条前端的吸盘运动。番茄采摘机器人工作时,当末端执行器达到预定位置后,

收稿日期: 2009-09-25 修回日期: 2009-11-05

* 国家自然科学基金资助项目(50905076)和江苏省教育厅项目(09KJD210002)

作者简介: 刘继展, 副研究员, 博士生, 主要从事农业机器人研究, E-mail: liujizhan@163.com

执行机构带动吸盘前进,集成式真空发生器以空气压缩机产生的压缩空气为气源在吸盘与果实表面间形成一定的负压,使吸盘产生对果实的吸力,吸持果实后由执行机构带动后退,从而实现目标果实与相邻果实的分离。

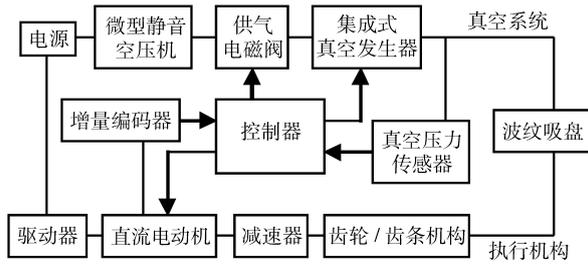


图 1 番茄采摘机器人真空吸盘装置结构组成

Fig. 1 Composing of the vacuum suction device for tomato harvesting robot

1.2 真空系统

装置中以空气压缩机和真空发生器替代了传统的真空泵。真空发生器是根据文丘里管原理工作的真空发生设备^[6],体积小,无运动部件,可以直接搭载在末端执行器上,负压产生及解除速度更快且易于灵活控制,更好地满足了番茄果实采摘的需要。采用 186 W (1/4hp) 小功率空气压缩机作为真空发生器的气源,空气压缩机备有压力开关,可有效降低空气压缩机空转卸荷造成的能量浪费。

集成式真空发生器内置吸气和吹气电磁阀,同时在真空发生器与空气压缩机气罐出口之间安装供气控制电磁阀。真空发生器与吸盘之间安装数字式真空压力传感器,并将真空压力反馈进入机器人控制器,经供气电磁阀、吸气电磁阀和吹气电磁阀,实现真空系统的反馈控制。集成式真空发生器内置单向阀,保证负压的可靠性,防止在吸持拉动过程中果实的意外脱落;同时利用单向阀的止回特性,在吸持果实过程中无需连续供气即可保持一定的负压,从而大大节省了压缩空气的耗量。

1.3 控制系统

真空吸盘装置控制系统是基于 Pmac 2A-PC/104 多轴运动控制卡构建的采摘机器人控制系统的一部分(图 2)。Pmac 和 Maxon 电动机的 Epos 位置控制器均具有 DSP 数字信号处理器,通过 Pmac 闭合位置环、速度环和 Epos 闭合电流环,形成复合伺服控制,从而具有更强大灵活的运动控制能力。系统通过 Pmac 板载的 12 位 A/D 转换器接收真空压力传感器的模拟信号输入,通过通用数字输入/输出接口接收真空开关的数字信号输入并对供气电磁阀、吸气电磁阀和吹气电磁阀进行开/关控制信号输出。

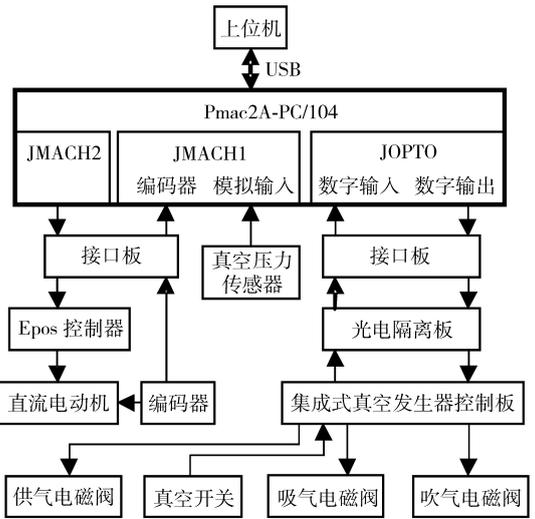


图 2 控制系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of the control system

2 装置性能试验

2.1 真空发生器供气压力-负压关系试验

2.1.1 试验材料与方法

启动空气压缩机为储气罐充气直至空气压缩机停止,关闭空气压缩机,打开真空发生器吸气电磁阀,继而打开供气电磁阀,分别于吸持果实和吸气口敞口状态由 Sony T10 数码相机记录压缩空气耗尽全过程中压力控制阀出口压力和真空压力传感器的对应示数变化,并通过视频文件的逐帧播放,确定供气压力-负压的变化关系(图 3)。

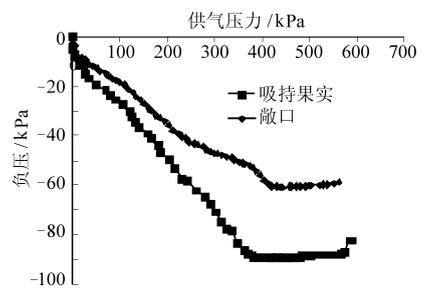


图 3 供气压力-负压关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between supplied air pressure and vacuum pressure

2.1.2 试验结果分析

结果说明,当压缩空气约为 400 kPa(表压)时,负压达到 -89.4 kPa,而后随着压缩空气压力的增加,真空度维持恒定甚至略有下降。

同时在吸盘吸持果实和敞口状态下,存在明显的压力差。在压缩空气为 0 ~ 400 kPa 时,该压力差近似线性增加,而在 400 ~ 600 kPa 时,该压力差稳定于 28 ~ 33 kPa。这一特征对于判断果实与吸盘的可靠接触与吸持从而决定电动机的动作,以及判断吸持-拉动过程中果实的脱离,保证装置作业的成功

率非常关键。

2.2 吸盘拉脱力试验

2.2.1 试验材料与方法

试验于2009年5月在江苏大学农业装备与技术实验室进行。试验材料为采自镇江市蔬菜基地的半熟期番茄,番茄平均直径38.24 mm。利用细绳将番茄悬挂于支架上,并通过夹具与HP-50电子测力计相连,同时调整收获机器人机械手,使真空吸盘、电子测力计与果实中心位于同一水平线上。分别进行以下试验:

(1) 拉脱力-吸盘直径关系试验

启动空气压缩机,并打开真空发生器的吸气阀,直至真空压力达到稳定值;更换安装 $\Phi 20$ 、 $\Phi 14$ 、 $\Phi 9$ mm的2.5摺波纹吸盘,启动电动机,齿条带动吸盘前进并吸住果实后,以2 mm/s速度拉动果实返回直至脱开,由电子测力计测定并记录拉脱力的峰值,对每个吸盘直径重复试验30次。

(2) 拉脱力-负压关系试验

启动空气压缩机,并打开真空发生器的吸气阀,由供气开/关电磁阀控制真空发生器压缩空气的输入。安装 $\Phi 20$ mm 2.5摺波纹吸盘,启动电动机,当齿条带动吸盘前进并吸住果实后,以2 mm/s速度拉动果实返回直至脱开。由Sony T10数码相机摄影,实时记录并通过逐帧播放确定果实、吸盘脱开时刻的真空压力传感器和电子测力计示值。

2.2.2 试验结果与分析

吸盘的拉脱力决定于真空压力和吸持的有效面积,其理论公式为

$$F_0 = |p| A_e / 1\,000 = |p| \pi (D_e / 2)^2 / 1\,000$$

式中 F_0 ——最大拉脱力,N

A_e ——吸持的有效面积,mm²

D_e ——吸盘的有效直径,mm

p ——相对压力,kPa

不同直径波纹吸盘的有效直径及拉脱力理论值与试验值如表1所示。

表1 不同直径吸盘的拉脱力性能比较($p = -13.6$ kPa)

Tab.1 Pull-off force comparison of suction pad of various size

公称直径 /mm	有效直径 /mm	理论拉 脱力/N	实际拉 脱力/N	平均相对 误差/%
20	16	2.73	3.23	1.86
14	11	1.29	1.58	2.31
9	7	0.52	0.58	1.67

试验发现,吸盘越大,其拉脱力越大,且实际拉脱力略高于理论值。试验平均相对误差均在2.5%以内,表明吸持稳定性良好。

拉脱力-负压关系试验结果发现(图4),当处于较低真空度时($p > -50$ kPa),真空压力与吸力间具有良好的线性关系

$$F_0 = 0.1984 |p| + 0.9430$$

其拟合优度 R^2 达0.9933,且拟合直线斜率与理论直线斜率(0.2010)非常接近。但在 $p > -50$ kPa时,实际拉脱力略高于理论值,而在较高真空度时,实际拉脱力明显低于理论值且数据较为离散。可能的原因:①与平面吸持相比,果实的曲面使实际压力作用的有效面积 A_e 有所增加,使较低负压时实际拉脱力高于理论值。②番茄表面为不规则曲面,较高负压和较高作用力时,吸盘与番茄曲面间的漏气问题开始显现,将造成吸盘边缘的负压明显降低,使实际拉脱力低于理论值。③在较高负压和较大作用力时,吸盘的拉伸变形亦导致吸盘有效直径 D_e 减小和边缘漏气,对拉脱力造成影响。

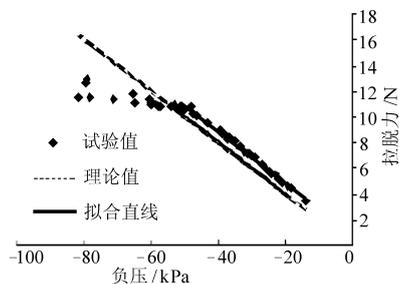


图4 拉脱力与负压关系

Fig.4 Relation between pull-off force and vacuum pressure

2.3 真空吸着响应时间试验

2.3.1 试验材料与方法

启动空气压缩机使储气罐充满,先打开真空发生器的吸气电磁阀,然后打开供气电磁阀,由阿尔泰USB5935型数据采集卡采集记录吸气口敞开状态下真空压力传感器信号。

2.3.2 试验结果与分析

一般按照吸盘口压力达到最终负压的63%所需的时间作为真空发生器的吸着响应时间^[7-10]。真空发生器吸气阀处于开启状态时,通过供气电磁阀控制压缩空气的输入,因而其吸着响应时间包括供气电磁阀的动作时间、压缩空气流经管路时间和负压的上升时间。测试表明(图5),供气电磁阀开启的吸着响应时间为107 ms,其中供气电磁阀动作和压缩空气流经管路时间为25 ms,负压上升时间为82 ms。测试结果表明,通过控制压缩空气的输入,可以有效满足快速产生负压的需要。

3 真空吸盘装置控制策略

以基础试验结果为依据,确定了真空吸盘装置的控制策略。如图6所示,首先空气压缩机进行预

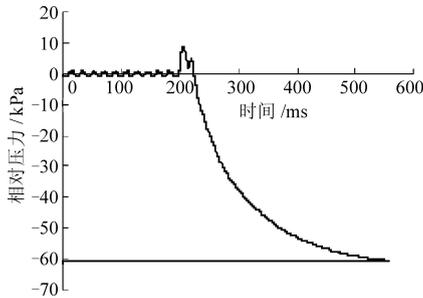


图 5 供气电磁阀开启的真空吸着响应时间

Fig. 5 Suction responding time of air-supply solenoid valve

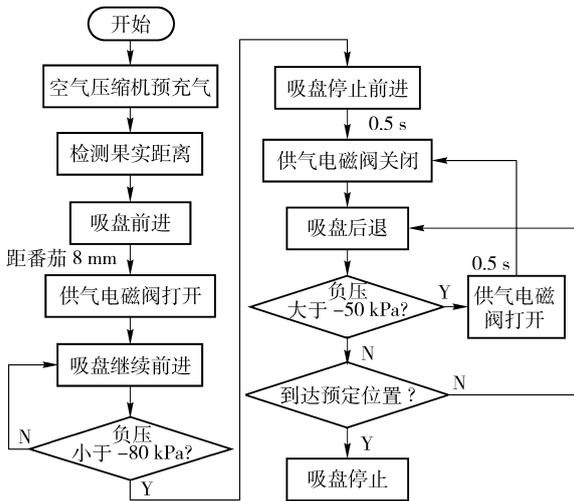


图 6 真空吸盘装置控制流程框图

Fig. 6 Flow diagram of vacuum suction device control

充气,机械手将末端执行器运送至采摘位置后,由视觉系统检测目标果实的距离;电动机启动使吸盘向果实前进,并在距果实 8 mm 时打开供气电磁阀,迅速产生负压;当吸盘接触并成功吸持果实后,负压跃升至 -80 kPa 以上,吸盘停止 0.5 s;供气电磁阀关闭,利用单向阀维持负压,保持吸盘对果实的吸力,由吸盘拉动果实后退,其间如果压力传感器检测到负压下降过快,则供气电磁阀再次打开以补充负压;直至到达预定位置后吸盘停止运动,由末端执行器进行后续的夹持和分离。

试验结果表明,尽管番茄果实大小、果梗直径和长度存在较大差异,该控制策略仍可以保证吸盘前进和后退速度分别达到 100 mm/s 和 60 mm/s、拉动果实实现 35 mm 水平位移时 92% 的成功率。其平均单次作业的时间和空气消耗分别为 1.5 s 和 0.6 L,空气压缩机功率可以满足采摘效率 360 个/h 的需要。

但是试验过程中发现,由于果实表面不规则,出现极少数吸盘吸持果实失败的现象;在果梗较短时,亦出现果梗直接被吸持拉断的情况;对于全熟期的番茄,可能出现吸持造成的果皮损伤(图 7)。以上问题需要继续进行深入研究,以进行改进与提高。

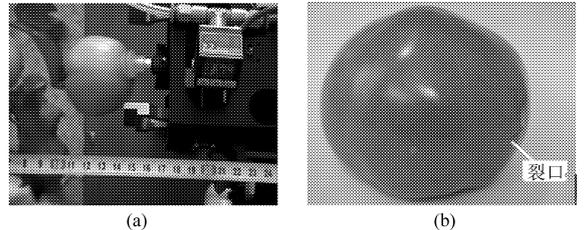


图 7 真空吸盘装置作业的失效

Fig. 7 Invalidation of the vacuum suction device

(a) 吸持拉断 (b) 吸持损伤

4 结论

(1) 当压缩空气为 $400 \sim 600$ kPa 时,在吸持果实和敞口状态下吸盘口存在介于 $28 \sim 33$ kPa 的稳定压力差,可以作为吸盘与果实吸持和脱开的可靠判据。

(2) 吸盘对番茄果实的吸力与吸盘大小和负压成正比相关,但在较高负压下实际吸力将会明显低于理论值,过高负压使能耗大大增加而吸力增加有限。

(3) 通过供气电磁阀控制压缩空气的输入,其吸着响应时间仅为 107 ms,可以实现快速产生负压,同时还可以通过单向阀维持负压,以极低的空气消耗满足吸持拉动果实的需要。

参 考 文 献

- Monta M, Kondo N, Ting K C. End-effectors for tomato harvesting robot[J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1~3): 11~25.
- Ling P P, Reza Ehsani, Ting K C, et al. Sensing and end-effector for a robotic tomato harvester[J]. 2004 ASAE Annual Meeting, Paper No. 043088, 2004.
- Kondo N, Ting K C. Robotics for bioproduction system[M]. New York; ASAE Publication, 1998.
- 刘继展,李萍萍,李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 109~112. Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhigu. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 109~112. (in Chinese)
- 江苏大学. 果蔬采摘机器人末端执行器: 中国, ZL200710020500.1[P]. 2009-07-15.
- 陆鑫盛,周洪. 气动自动化系统的优化设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.

参 考 文 献

- 1 Reyns P, Missotten B, Ramon H, et al. A review of combine sensors for precision farming[J]. Precision Agriculture, 2002, 3(2): 169 ~ 182.
- 2 谢高地, 陈沈斌. 环境的控件连续变异与精准农业[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- 3 陈树人, 胡鹏, 胡均万, 等. 谷物产量分布图生成系统的开发研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 182 ~ 184.
Chen Shuren, Hu Peng, Hu Junwan, et al. Research and development of one grain yield map generating system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 182 ~ 184. (in Chinese)
- 4 许红卫. 田间土壤养分与作物产量的时空变异及其相关性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Xu Hongwei. Spatial and temporal within-field variability of soil nutrients, crop yield, crop nutrients and their correlation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 5 Luticken R, Koch W, Bill R. The potential of yield map and soil survey data in low cost site specific farming strategies[C]// Proceedings of Precision Agriculture'97, 1997.
- 6 陈树人, 肖伟中, 朱云开, 等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 140 ~ 143.
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 140 ~ 143. (in Chinese)
- 7 Wollenhaupt N C, Mulla D J, Gotway Crawford C A. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties[C]. ASA-CSSA-SSSA, 1997.
- 8 Cliff A D, Ord J K. Spatial processes: models & applications[M]. London: Taylor & Francis, 1981.
- 9 Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189 ~ 206.
- 10 Getis A, Ord J K. Local spatial statistics: an overview[M]// John Longley, Michael Batty. Spatial Analysis: Modeling in a GIS Environment, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 1996: 261 ~ 277.
- 11 Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93 ~ 115.
- 12 Moore M. An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management[D]. Cranfield: Cranfield University, 1998.
- 13 张漫, 邝继双. 谷物联合收割机测产数据中的误差分析与处理[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 144 ~ 148.
Zhang Man, Kuang Jishuang. Error analysis and process of yield data collected by yield monitoring system of corn combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 144 ~ 148. (in Chinese)
- 14 陈立平. 精准农业变量施肥理论与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
Chen Liping. Theoretical and experimental studies on variable-rate fertilization in precision farming[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 15 Wollenhaupt N C, D J Mulla Gotway Crawford C. A soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties[C]. ASA-CSSA-SSSA, 1997.
- 16 Blackmore S. The interpretation of trend from multiple yield map[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(1): 37 ~ 51.

(上接第 173 页)

- 7 李居泽, 金晶立. 缩短真空吸附动作时间的途径[J]. 沈阳工业大学学报, 1994, 16(1): 38 ~ 42.
Li Juzhe, Jin Jingli. Methods of reducing the voc-sorb actuation time[J]. Journal of Shenyang Polytechnic University, 1994, 16(1): 38 ~ 42. (in Chinese)
- 8 孙军. 真空发生器在工业自动化中的应用[J]. 机械设计与制造, 1998(1): 32 ~ 33.
- 9 姚朝晖, 何枫, 陈远. 真空发生器系统吸附响应时间的确定[J]. 真空科学与技术, 2002, 22(3): 198 ~ 201.
Yao Zhaohui, He Feng, Chen Yuan. Calculation of adsorption responding time of vacuum ejector system[J]. Vacuum Science and Technology, 2002, 22(3): 198 ~ 201. (in Chinese)
- 10 滕燕, 李小宁, 华健. 快速响应低耗气真空节能系统的研究[J]. 液压与气动, 2007(1): 10 ~ 12.
Teng Yan, Li Xiaoning, Hua Jian. Research on the twin-nozzle vacuum system with short response time and low air consumption[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2007(1): 10 ~ 12. (in Chinese)