

## 果园轻筒型挖穴机的电动助力系统设计

李震<sup>1,2,3</sup>, 朱余清<sup>1,2,3</sup>, 洪添胜<sup>1,2,3\*</sup>, 温威<sup>1,2,3</sup>, 杨洲<sup>1,2,3</sup>, 马海鹏<sup>1,2,3</sup>, 陈晓平<sup>1,2,3</sup>

(1.南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642; 2.国家柑橘产业技术体系机械研究室, 广东 广州 510642; 3.华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642)

**摘 要:**在手摇式果园轻筒型挖穴机上安装直流电动机、传动机构、安全装置和电控装置, 构成果园轻筒型挖穴机电动助力系统。系统运行结果表明: 空载时, 挖穴机携带直径分别为 30 和 20 cm 的钻头上升和下降的平均速度与蓄电池功耗间的线性相关系数分别为 0.790、0.910、0.927 和 0.865, 线性度较高; 携带大、小钻头实地挖穴时, 助力系统能够以 1.32 或 1.43 cm/s 的速度提升挖穴机, 提升钻头所需的启动电流没有明显差异。

**关 键 词:** 挖穴机; 自动控制; 电动助力; 果园机械

中图分类号: S223.1<sup>+9</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2013)04-0435-05

## Design of electric power assistance system of orchard simple type earth auger

LI Zhen<sup>1,2,3</sup>, ZHU Yu-qing<sup>1,2,3</sup>, HONG Tian-sheng<sup>1,2,3\*</sup>, WEN Wei<sup>1,2,3</sup>,

YANG Zhou<sup>1,2,3</sup>, MA Hai-peng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Xiao-ping<sup>1,2,3</sup>

(1.Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China; 2.Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China; 3.College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The DC motor, transmission mechanism, safety unit and electric control unit installed in a hand-cranked orchard simple type earth auger formed the electric power assistance system of orchard simple type earth auger. The system's performance showed: when the orchard simple type earth auger carried no load, when it was equipped with a drill bit with a diameter of 30 and 20 cm, the linearity coefficients between its average speed of rising and falling and the battery power consumption were 0.790, 0.910, 0.927 and 0.865, respectively, the linearity is high; when the orchard simple type earth auger was digging the earth after it was equipped with the same above mentioned drill bit, the electric power assistance system could raise the earth auger at speed of 1.32 or 1.43 cm/s, and there was no significant difference between the starting electrical current for the drill bit when it was digging and the starting electrical current for the drill bit when it was operating without digging.

**Key words:** earth auger; automatic control; electric power assistance; orchard machinery

柑橘挖穴灌溉和施肥既可节约用水, 又有利于提高肥效, 尤其适合在保水性较差的沙壤土柑橘园使用<sup>[1-3]</sup>。目前, 机械化挖穴主要采取 2 种形式: 一种是运用手提式挖穴机作业; 另一种是拖拉机悬

挂挖穴机作业。手提式汽油动力挖穴机体积小、携带方便、动力强劲, 但因其为双手抬式<sup>[4-7]</sup>, 需 2 名操作人员手动调整钻头挖穴深度和控制掘进速度, 掘进时钻头所需力矩<sup>[8-10]</sup>的反力矩及强烈振动

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27); 公益性行业(农业)科研专项(201203016); 广东省大学生创新实验计划项目(1056411155); 国家自然科学基金项目(31101077); 广东省科技厅项目(2011B020308009)

作者简介: 李震(1981—), 男, 广东广州人, 博士, 副教授, 主要从事机电一体化技术应用研究, lizhen@scau.edu.cn; \*通信作者, tshong@scau.edu.cn

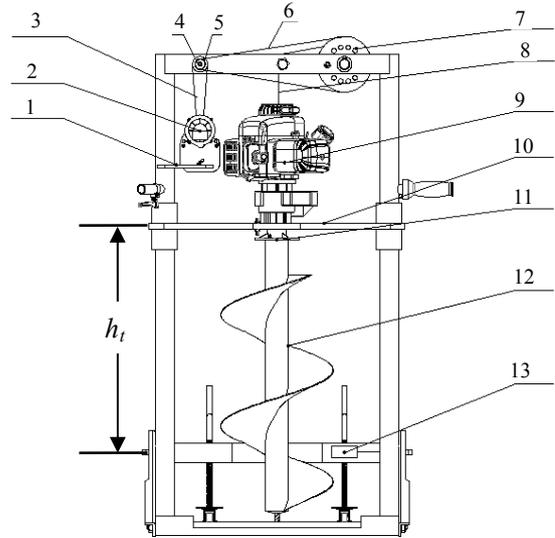
完全由操作者承受,劳动强度大,工作效率低。由拖拉机悬挂的挖穴机<sup>[11-13]</sup>在果园中作业,易受地形、地貌等因素影响,调头转弯和变换工作方位均十分困难。针对以上问题,李国正<sup>[14]</sup>研制了一种小型手推升降式挖穴机,通过在传统手提式挖穴机上加装行走和升降机构,使操作者不需要直接接触挖穴机,提高了安全性,但该机自重达 150 kg,机身长度和宽度超过或接近 1 m,应用于山地果园作业仍存在爬坡、掉头和转弯困难等问题。

为解决传统手提式挖穴机作业中存在的问题,华南农业大学国家柑橘产业技术体系机械研究室根据南方山地果园地形特点,研制了一种手摇式果园轻筒型挖穴机<sup>[15]</sup>,该机可通过手动摇把控制挖穴机钻头的升降,在一定程度上降低了劳动强度,提高了安全性,但通过人工摇把将穴坑中提升附着了泥土的钻头仍然比较费时费力。为此,笔者以现有手摇式果园轻筒型挖穴机为基础,设计和制作了一套果园轻筒型挖穴机的电动助力系统,以期实现通过操控直流电动机代替人工摇把调整钻头的垂直高度,进一步降低劳动强度,提高劳动效率。

## 1 系统机械结构

电动助力系统由直流电动机、传动机构、安全装置和电控装置组成,如图 1 所示。直流电动机安装于手摇式挖穴机的一侧支架上,第 1 皮带轮套在直流电动机的转动轴上,通过第 1 皮带轮与第 2 皮带轮相连;第 2 皮带轮与第 3 皮带轮同轴,通过第 2 皮带与第 4 皮带轮相连;缠绕在第 4 皮带轮上的钢丝绳一端绕过定滑轮后固定于汽油动力挖穴机的汽油机顶部;第 2 和第 4 皮带轮、定滑轮的转轴均位于挖穴机支撑架顶端的横梁上。电动机转动时,通过两级皮带传动实现提升或降下挖穴机。挖穴机的汽油机固定在铁架上,铁架两端各设有 1 个辅助滑动架,辅助滑动架上设有圆孔,圆孔内设有滑动衬套,滑动衬套的内孔与机架内柱采用间隙配合<sup>[15]</sup>。

携带直径为 30 cm 的大钻头和直径为 20 cm 的小钻头后,系统整机质量分别为 30.7 和 28.3 kg。



1 支撑架;2 直流电机和第 1 皮带轮;3 第 1 皮带;4 第 2 皮带轮;5 第 3 皮带轮;6 第 2 皮带;7 第 4 皮带轮;8 钢丝绳;9 汽油机;10 铁架;11 塑料板;12 钻头;13 固定架。

图 1 果园轻筒型挖穴机电动助力系统结构简图

Fig. 1 Mechanical structure of the orchard light earth auger electric power assistance system

## 2 主要部件设计与选型

### 2.1 传动机构

电动助力部分采用两级皮带传动,第 1、2 皮带轮的齿数( $z_1$ 、 $z_2$ )分别为 12 和 48,一级减速比为 1/4,轴间距为 231.6 mm,第 1 皮带采用 L 型同步带;第 3、4 皮带轮的齿数( $z_3$ 、 $z_4$ )分别为 12 和 36,二级减速比为 1/3,轴间距为 206.4 mm,第 2 皮带采用 H 型同步带。

### 2.2 电动机选型

系统通过电动机实现挖穴机的提升和降下,由于铁架与支撑架立柱采用间隙配合,铁架与支撑架间滑动摩擦力可忽略,电动机的功率需大于提升动力总成及附着在钻头上的土壤时所需的功率。

选取直径为 30 cm 的大钻头,所挖穴坑的土壤总质量<sup>[9]</sup> $M_s = \pi r^2 l \rho \times 10^{-3}$ 。式中: $M_s$  为所挖穴坑的土壤总质量(kg); $r$  为挖穴机钻头半径(15 cm); $l$  为挖穴行程(40 cm); $\rho$  为土壤容重(取红泥土土壤容重 1.32 (g/cm<sup>3</sup>)。经计算,得  $M_s = 28.3$  kg。

通过试验可知,附着在钻头上的泥土约占挖穴土总量的 20%,则附着在钻头上的泥土质量

$M_I=0.2 \times M_s=5.7 \text{ kg}$ 。而电机带动钻头提升的质量应为钻头质量(15.5 kg)与附着泥土质量之和,即 21.2 kg。

$$\text{直流电动机需提供的最低功率}^{[16]} P = \frac{Mgv}{\eta_1^2 \eta_2^2}。$$

式中： $P$  为直流电动机需提供的最低功率(W)； $M$  为电机带动钻头提升的质量(21.2 kg)； $g$  为重力加速度( $10 \text{ m/s}^2$ )； $v$  为最大提升速度(0.1 m/s)； $\eta_1$  为同步带传动效率(取 0.95)； $\eta_2$  为滑动轴承传动效率(取 0.90)。

将数据代入,直流电动机需提供的最低功率为 29 W。根据计算结果,直流电机选用浙江尤奈特电机有限公司生产的 MY1016Z2 型直流电机,其额定电压 24 V,输出功率 250 W,额定转速 3 300 r/min,减速比 9.78。

### 3 电控装置设计

电控装置由 ATmega16(Atmel Corp, 美国)单片机、电机驱动单元、电压转换单元、2 路继电器单元、霍尔传感器检测单元、超声波距离检测单元、24 V 蓄电池、5 V 稳压单元等组成(图 2)。

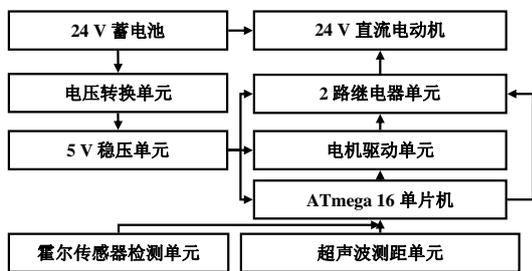


图 2 电控装置构成

Fig.2 Block diagram of the system's control unit

霍尔传感器检测单元包括霍尔传感器以及 6 块磁铁,用于测量挖穴机钻头的转速。传感器选用日本欧姆龙公司的 NJK-5001C 型接近开关,其额定电压 12~24 V,检测距离 8 mm,反应频率 50 Hz。霍尔传感器固定于汽油机与钻头之间的铁架上,铁架随挖穴机主机上下移动,6 个磁铁块固定于钻头上的塑料板,实时采集挖穴机钻头转速,检测钻头挖穴时运行状态信息,并将钻头转速以电压信号反馈给单片机。

超声波测距单元用于检测钻头的挖掘深度,选

用 HC-SR04 型超声波测距模块,其感应角度  $15^\circ$ ,探测距离 2~450 cm,探测精度 0.2 cm。超声波探头安装于固定架上,工作时测量固定架与铁架之间的距离。单片机根据该测量值可计算得到钻头的挖穴深度  $H=h_0-h_t$ 。式中： $H$  为钻头挖穴深度(cm)； $h_0$  为系统内设定的固定架与铁架间的初始距离(cm)； $h_t$  为超声波传感器测量的固定架与铁架间的距离(cm)。

电机驱动单元主要由三极管 9014、场效应管 IRF3205、二极管 1N4007 以及限流电阻组成。接线端子通过两路继电器单元与直流电机 2 个输入端相连。来自单片机的 PWM 信号通过控制三极管 9014 和场效应管 IRF3205 的导通与截止,实现对直流电机的调速。

两路继电器单元中,第 1 继电器与第 2 继电器并联,第 1 继电器的常闭触点与第 2 继电器的常开触点和蓄电池连接,第 1 继电器的常开触点与第 2 继电器的常闭触点和蓄电池连接;直流电机的一端连接于第 1 继电器的动触点,另一端连接于第 2 继电器的动触点;单片机通过三极管与第 1、第 2 继电器连接,用于控制流经直流电机的电流流向,实现电机的正、反转。

### 4 工作原理

系统工作分为手动和自动模式。手动模式下,电控装置根据用户设置控制电动机,提升或降下挖穴机,同时挖穴机的行进速度可根据用户需要进行连续调整。

自动模式工作步骤为：①单片机首先控制继电器单元驱动直流电机反转,直流电机通过传动机构提升钻头,当超声波测距单元输出稳定时表明钻头已到达初始位置,同时单片机记录此时的超声波测距单元输出( $h_0$ )。②单片机控制继电器单元驱动直流电机正转时钻头下降,转动的钻头开始挖掘工作;霍尔传感器检测单元检测钻头转速,并将结果反馈至单片机;单片机根据此信息判断钻头的受阻情况,如果钻头转速低于设定的阈值,则控制继电器单元驱动直流电机反转,将钻头提起至一定高度后重新下降,利用钻头和汽油机的自重辅助挖掘。③单片机读取超声波测距单元输出  $h_t$ ,并计算挖掘

深度。到达预定深度时,单片机控制直流电机反转提升钻头,按步骤①回复至初始位置。

## 5 系统运行试验

### 5.1 试验设计

系统运行试验在华南农业大学工程学院试验柑橘园进行。

1) 蓄电池(24 V, 9 Ah)充电后,将挖穴机架高,保证钻头下降到最底端时仍不会触碰地面,钻头行程 40 cm;将万用表(Victor VC8900A,胜利高电子科技有限公司,中国深圳)串接至蓄电池的供电回路并调至 20 A 电流测量档位。运用手动模式,调整钻头行进速度,控制旋钮,使电流表读数稳定在特定值,上升时电流分别约为 2.7、3.0、3.5 和 3.8 A,下降时分别约为 0.17、0.20、0.30 和 0.35 A,上升和下降时每个电流值条件下均进行 5 次试验。同步测量蓄电池电压和挖穴机携带大、小钻头上升和下降所需时间。由于电动机运行时电流存在一定的波动,测量中记录钻头行进 10、20、30 和 40 cm 时的电流值,将 4 次读值的均值作为本次测量的电流值。计算蓄电池功耗,分析钻头行进速度与蓄电池功耗间的关系。

2) 挖穴机携带大、小钻头挖穴,当钻头下降到最底端后,继续保持钻头旋转,启动助力系统提升钻头,按工作电流由小到大调整钻头行进速度,控制旋钮,当钻头开始上升时,记录蓄电池的电流和电压,并测量钻头从泥土中回复到初始位置所需时间。大、小钻头各进行 3 次试验。

### 5.2 试验结果

挖穴机携带直径为 30 cm 的大钻头和直径为 20 cm 的小钻头空载上升和下降时试验结果如表 1 和表 2 所示。

助力系统分别携带直径为 30 cm 的大钻头和直径为 20 cm 的小钻头上升和下降时,蓄电池功耗有明显的差异。携带大钻头上升或下降时,获得最大行进速度时的蓄电池功耗分别为 88.04 和 8.96 W;携带小钻头时分别为 91.15 和 8.72 W。

挖穴机携带直径为 30 cm 的大钻头时,行进速度高于携带直径为 20 cm 小钻头时的行进速度,主

要原因是第 4 皮带轮的轮轴受皮带牵拉而与支架产生较大的摩擦阻力,当钻头质量较大(大钻头)时,加载与钢丝绳上的重力部分克服了皮带的拉力,减小了轮轴与支架间的摩擦阻力,从而在蓄电池功耗相近的条件下获得了较大的行进速度。

以蓄电池功耗为自变量,上升或下降的平均速度为因变量进行线性回归,得到挖穴机携带大、小钻头上升或下降时的平均速度与蓄电池功耗间的线性相关系数( $R^2$ )分别为 0.790、0.910、0.927 和 0.865,说明空载时蓄电池功耗与钻头行进速度间的线性度较高。

表 1 挖穴机携带大钻头空载上升和下降的平均速度和功耗

Table 1 Test result of the earth auger rising and dropping with big bit and free load

平均速度/(cm·s <sup>-1</sup> )		蓄电池电流/A		蓄电池功耗/W	
上升	下降	上升	下降	上升	下降
0.47	0.72	2.71	0.16	67.21	4.10
0.49	0.62	2.70	0.18	66.96	4.61
0.57	0.60	2.70	0.16	66.96	4.10
0.45	0.69	2.65	0.15	65.72	3.84
0.38	1.01	2.56	0.18	63.49	4.61
0.44	0.68	2.95	0.23	73.16	5.89
0.45	0.95	3.02	0.21	74.90	5.38
0.77	0.93	3.11	0.19	77.13	4.86
0.44	0.97	3.01	0.22	74.65	5.63
0.42	0.93	3.05	0.20	75.64	5.12
1.61	1.70	3.65	0.28	90.52	7.17
1.21	1.68	3.57	0.29	88.54	7.42
1.72	1.63	3.45	0.27	85.56	6.91
1.96	1.63	3.55	0.28	88.04	7.17
1.68	1.65	3.45	0.28	85.56	7.17
1.94	2.04	3.78	0.35	92.61	8.96
1.51	1.99	3.75	0.35	91.88	8.96
1.54	1.98	3.79	0.36	93.23	9.22
1.50	1.90	3.78	0.36	92.99	9.22
1.42	2.00	3.83	0.36	94.22	9.22

表 2 挖穴机携带小钻头空载上升和下降的平均速度和功耗

Table 2 Test result of the earth auger rising and dropping with small bit and free load

平均速度/(cm·s <sup>-1</sup> )		蓄电池电流/A		蓄电池功耗/W	
上升	下降	上升	下降	上升	下降
0.43	0.46	2.71	0.16	66.12	3.98
0.40	0.42	2.73	0.17	66.61	4.23
0.47	0.39	2.68	0.16	65.39	3.98

续 表

平均速度/(cm·s <sup>-1</sup> )		蓄电池电流/A		蓄电池功耗/W	
上升	下降	上升	下降	上升	下降
0.48	0.4	2.74	0.17	66.86	4.23
0.55	0.42	2.72	0.16	65.82	3.98
0.86	0.52	3.09	0.19	75.40	4.73
0.77	0.52	3.02	0.19	73.69	4.73
0.77	0.58	3.07	0.22	74.91	5.48
0.87	0.49	3.02	0.23	73.69	5.73
1.14	0.46	2.99	0.24	73.26	5.98
1.24	0.84	3.44	0.34	83.94	8.47
1.35	0.87	3.55	0.34	86.62	8.47
1.24	0.88	3.60	0.28	87.84	6.97
1.16	0.74	3.51	0.32	85.64	7.97
1.24	0.66	3.54	0.3	86.38	7.47
1.68	0.99	3.83	0.35	91.15	8.72
1.59	1.14	3.72	0.35	88.54	8.72
1.57	1.04	3.88	0.35	92.34	8.72
1.57	0.94	3.79	0.35	90.20	8.72
1.60	0.93	3.85	0.35	91.63	8.72

表 3 为挖穴后钻头的提升效果。挖穴机携带大、小钻头时，实现钻头提升所需的最小电流约为 3.8 A，没有明显差异。主要原因是挖穴后钻头表面附着了泥土，导致钻头提升所需的启动电流较大。钻头上升后，由于小钻头自重较小，且所附着的泥土较少，在相同功耗的情况下提升的平均速度较高，约为 1.43 cm/s。

表 3 挖穴后钻头的提升效果

携带大钻头		携带小钻头	
平均速度/ (cm·s <sup>-1</sup> )	蓄电池 电流/A	平均速度/ (cm·s <sup>-1</sup> )	蓄电池 电流/A
1.32	3.8	1.43	3.8
0.85	3.7	1.42	3.8
0.62	3.6	1.43	3.8

参考文献:

[1] 洪添胜,杨洲,宋淑然,等.柑橘生产机械化研究[J].农

业机械学报, 2010, 41(12): 105-110 .  
 [2] 林清山, 洪伟, 吴承祯, 等. 永春县柑橘林生态系统的碳储量及其动态变化[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 309-316 .  
 [3] Harris J R , Susan D Day , Brian Kane . Nitrogen fertilization during planting and establishment of the urban forest : A collection of five studies [J] . Urban Forestry & Urban Greening , 2008 , 7(3) : 195-206 .  
 [4] 盛国成, 王博炜. 德国 STL360 型手提式挖穴机[J]. 现代农业装备, 2003, 24(4): 54-55 .  
 [5] 盛国成, 张亚军. 日本 AG500 型手提式挖穴机[J]. 现代农业装备, 2004, 25(6): 69-70 .  
 [6] 于建国, 屈锦卫. 国内外挖坑机的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2006, 8(12): 38-41 .  
 [7] 李炳生, 林焯珍, 高杨善, 等. 一种新型的手提式挖穴机: 中国, CN00220714.1[P]. 2001-03-01 .  
 [8] 孟庆华, 于建国. 范数最优控制理论在植树挖坑机钻头主轴纵向振动系数中的应用[J]. 机械设计, 2006, 23(9): 25-27 .  
 [9] 刘会敏, 茅也冰, 王乃康. 土壤条件对挖坑机动力学参数的影响[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(4): 64-69 .  
 [10] 杜瑞成, 刁培松, 蔡善儒, 等. 覆膜穴播施肥联合作业机械的研制[J]. 农机化研究, 2009, 10(10): 72-74 .  
 [11] 李宁, 胡丰收, 郭栋, 等. 烟叶挖穴施肥机的研制[J]. 河南农业大学学报, 2011, 45(4): 445-447 .  
 [12] 孙科, 张争艳, 陈定方. 相对地面静止斜挖穴的单(多)排玉米播种机[J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26(4): 96-98 .  
 [13] 郭贵生, 高梦祥, 郭康权, 等. 基于 MATLAB 挖坑机螺旋钻头参数的研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(3): 179-182 .  
 [14] 李国正. 1WX-400 型手推升降式挖穴机的研制与试验[J]. 新疆农机化, 2008, 24(6): 15-16 .  
 [15] 洪添胜, 朱余清, 欧阳玉平, 等. 一种挖穴机: 中国, 201110310047.4[P]. 2012-03-21 .  
 [16] 杨红帆, 肖丽晶, 赵军, 等. 1PJ-3 型激光平地机的设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2002, 14(1): 47-50 .

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 张 健