

智能烟草定量穴施追肥机*

王金星¹ 高丽娟² 刘双喜¹ 崔 嵬² 王钦祥² 王 蕊²

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 设计了一种基于对射型红外光电传感器和单片机控制的智能烟草定量穴施追肥机。该追肥机在发动机牵引下前进时,先由传感器检测装置中的20对对射型红外光电传感器检测出烟株中心位置和直径,再由单片机决策出最佳追肥点,控制鸭嘴完成自动化定量穴施追肥。试验表明:传感器检测装置检测准确率达99%,追肥准确率达97%,烟苗损伤率小于2%。

关键词: 追肥机 烟草 红外光电传感器 定量 穴施

中图分类号: S224.22; S572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0071-06

Intelligent Tobacco Quantitative Hole Application Topdressing Machine

Wang Jinxing¹ Gao Lijuan² Liu Shuangxi¹ Cui Wei² Wang Qinxiang² Wang Rui²

(1. College of Mechanical and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments,
Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: A kind of intelligent tobacco quantitative hole application topdressing machine based on opposite-type infrared photoelectric sensor and microcontroller was designed. When the topdressing machine moved forward pulled by the engine, 20 pairs of opposite-type infrared photoelectric sensors of the sensor detection device accurately detected the central position and diameter of the tobacco plant, then the microcontroller determined the best topdressing point and controlled the duckbill to complete the automatic and quantitative hole application topdressing. The test results showed that the detection accuracy rate of sensor detection device reached to 99%, the topdressing accuracy reached to 97%, and the tobacco plant injury rate was less than 2%.

Key words: Topdressing machine Tobacco Infrared photoelectric sensor Quantification Hole application

引言

追肥是烟草栽培合理施肥中的重要措施,可依田间烟株的长相、土壤及气候情况,校正原定的计划用肥量,保证生长中、后期的氮肥供应,防止成熟期过早地脱肥早衰,稳定产量和品质^[1]。追肥方法、追肥量、追肥时间等都会影响烟叶的产量、质量和经济效益^[2~4]。

目前,我国烟草追肥存在的问题有:追肥量控制不当,追肥盲目性大;追肥周期长;肥料有效

利用率低,环境污染严重^[5~6];对烟草追肥机的研究尚处于起步阶段,机械化程度较低,且追肥方式多为侧条施,追肥效果不如穴施效果好^[7~9]。张传斌等研究的TX-12型烟草定量穴灌追肥机可实现单株定量和点状追肥,但需人工找准穴位,劳动强度大,自动化程度不够高,追肥效率低^[10~11]。

针对上述问题,本文研制一种基于红外光电传感器检测和单片机控制的智能烟草定量穴施追肥机,可实现烟草自动化定量穴施追肥。

收稿日期: 2012-09-10 修回日期: 2012-11-21

* 中国烟草总公司科技重点资助项目(110200902075)

作者简介: 王金星,教授,主要从事精密工程与科学仪器研究, E-mail: jinxingw@163.com

1 总体结构及主要技术指标

1.1 总体结构

智能烟草定量穴施追肥机采用自走式,其主要由机械结构和控制系统组成,如图 1 所示。控制系统采用 2 个 12 V 蓄电池串联供电。旋转编码器、电磁离合器和减速器输出轴三者同轴安装。一对传感器检测装置用 U 型卡分别对称悬挂在行走系统的左、右两侧。

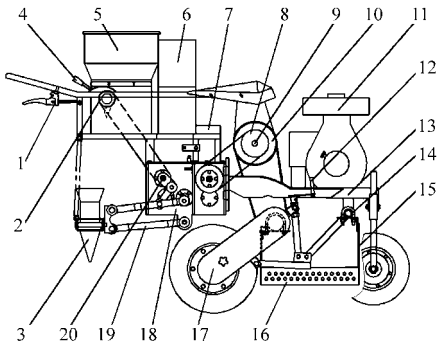


图 1 智能烟草定量穴施追肥机结构简图
Fig.1 Structure diagram of intelligent tobacco quantitative hole application topdressing machine

1. 油门 2. 排肥器 3. 鸭嘴 4. 行走离合器 5. 肥箱 6. 蓄电池 7. 控制系统安装盒 8. 电磁离合器 9. 旋转编码器 10. 减速器 11. 发动机 12. 调节丝杠 13. 机架 14. U 型卡 15. 高度调节板 16. 传感器检测装置 17. 行走系统 18. 变速箱 19. 鸭嘴连杆机构 20. 鸭嘴主动轴

1.2 动力传递

智能烟草定量穴施追肥机工作时,发动机的动力经减速器分别传送至电磁离合器和行走系统。

当电磁离合器得电吸合时,电磁离合器上的动力传递至变速箱:一部分动力经链传动驱动 U 型槽排肥器旋转,使肥料落入鸭嘴中;同时,另一部分动力传递至鸭嘴连杆机构驱动鸭嘴下落完成追肥动作。当电磁离合器失电断开时,电磁离合器上的动力不传递,电磁离合器空转。

1.3 工作原理

追肥前,首先调正智能烟草定量穴施追肥机,使左、右传感器检测装置横跨烟垄的左右两侧;然后根据垄高调节调节丝杠以调整整机高度,使鸭嘴施肥深度为 10 ~ 15 cm,最后根据烟株的长势上、下调节高度调节板,使传感器检测装置能尽可能的检测到烟株最大直径。

追肥时,打开行走离合器,智能烟草定量穴施追肥机在发动机的牵引下前进,其行进速度可通过油门进行微调。追肥机行进时,20 对对射型红外光电传感器对每棵烟株的中心位置和直径进行精确测量,产生相应的一组高、低电平信号。该电平信号经

信号转换电路转换成单片机能直接接收的 0、1 信号,如果该组 0、1 信号与单个烟株追肥点真值表中的 15 种状态之一相匹配,则由单片机计算出当前烟株追肥点到鸭嘴下落点之间的水平距离,同时旋转编码器将测得的减速器输出轴旋转产生的实时脉冲传递给单片机,再由单片机计算出延时脉冲数 N (即单片机从检测到当前烟株有效信号到控制电磁离合器得电吸合旋转编码器所产生的脉冲数)。当单片机延时 N 个脉冲后,单片机控制电磁离合器得电吸合,U 型槽排肥器旋转,肥料落入鸭嘴中,同时鸭嘴下落打孔追肥。当鸭嘴完成当前烟株的定量穴施追肥回到初始位置后 (即电磁离合器得电后,旋转编码器产生的脉冲数为 M 时),单片机控制电磁离合器失电断开。烟株追肥量可通过调节排肥器 U 型槽的体积来控制。

1.4 主要技术指标

依据烟草追肥农艺和追肥机功能特征要求,确定智能烟草定量穴施追肥机主要技术指标如表 1 所示。

表 1 主要技术指标

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	1 800×1 140×1 040
工作行数	1
配套动力/kW	4~8
蓄电池/A·h	85
蓄电池电压/V	12
作业行进速度/km·h ⁻¹	0.8~1.5
施肥深度/cm	10~15
可追肥烟株直径/cm	20~35
适应株距/cm	50~60

2 传感器检测装置

由于光电传感器具有成本低,使用简单方便,输入回路与输出回路光电隔离等优点,在工业和农业控制领域应用广泛^[12],因此传感器检测装置采用多对 E3F-5DN1 型对射型红外光电传感器来检测烟株中心位置和直径。当相对的发射管与接收管之间有烟株遮挡时,接收管接收不到发射管发射出的光信号,接收管的信号输出端输出低电平“0”,接收管指示灯亮;当相对的发射管与接收管之间无烟株遮挡或检测到烟株烟叶之间的间隙时,发射管发射出的光信号被接收管接收,接收管的信号输出端输出高电平“1”,接收管指示灯灭。

追肥期烟株直径为 200 ~ 350 mm,垄顶宽为 350 ~ 450 mm,故将发射管与接收管之间的安装距离定为

600 mm,为防止相邻红外光电传感器之间的相互干扰,相邻红外光电传感器之间的安装距离需满足

$$l \geq 600 \times 2 \times \tan 10^\circ = 212 \text{ mm}$$

此安装距离过大,为更精确检测烟株直径,减小检测误差,在发射管和接收管的前方 30 mm 处分别安装带有通光孔的左缩光板和右缩光板,用于缩小发射光线的辐射角和接收管的受光范围。红外光电传感器光形图如图 2 所示,右缩光板上的通光孔直径等于接收管透镜的直径,为 13 mm。如图 2 虚线所示,当发射管的发射光线正好不被相邻接收管接收时,左缩光板上的通光孔半径 r 应满足

$$\frac{r}{30} = \frac{30 - \frac{13}{2}}{600 - 30}$$

解得 $r = 1.24 \text{ mm}$,取 $r = 1 \text{ mm}$ 。此时能通过左缩光板的发射光线范围如图 2 粗实线所示。

为提高红外光电传感器的检测精度和减少红外光电传感器的数量,使用 20 对红外光电传感器分 2 行排列,具体排列方式如图 3 所示。第 10 对与第 11 对红外光电传感器之间的中心距为 150 mm,第 9 对与第 12 对红外光电传感器之间的中心距为 180 mm,其余相邻红外光电传感器的中心距为 30 mm,按此方式排列,传感器检测装置的检测精度

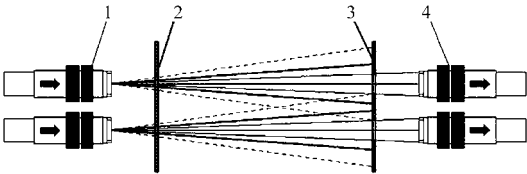


图 2 红外光电传感器光形图

Fig. 2 Light shape of infrared photoelectric sensor

1. 发射管 2. 左缩光板 3. 右缩光板 4. 接收管

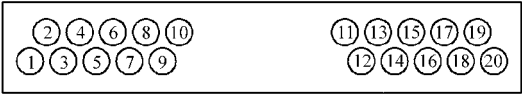


图 3 红外光电传感器排列方式

Fig. 3 Arrangement of infrared photoelectric sensor

为 15 mm。

追肥机前进时,通过记录 20 对红外光电传感器接收管指示灯的亮、灭即可判断出烟株的中心位置和直径。经过大量试验,总结归纳出一种单个烟株追肥点真值表,如表 2 所示。该表包涵了检测单个烟株时可能出现的 15 种状态,其中 x 的值为 0 或 1,表示该处为烟株,但可能有一对或几对红外光电传感器检测到烟叶之间的间隙。将 20 对红外光电传感器产生的 0、1 信号逐次与表 2 单个烟株追肥点真值表中的 15 种有效状态比对,如果与其中一种状态相匹配,则信号均为 0 且相距最远的两对红外光电传感器之间的中心距即为烟株的直径 d ,且传感器检测装置的中心即为烟株的中心位置。用该方法可检测直径范围为 150 ~ 360 mm 的烟株。农艺要求的追肥点是在烟株一旁 100 ~ 150 mm 处或最大叶尖下或两株中间,烟株直径的检测误差为 30 mm,烟株株距的一半为 250 mm,故烟株追肥点到鸭嘴下落点之间的距离为

$$D = \begin{cases} L - 100 & \left(0 < \frac{d}{2} < 100 \right) \\ L - \frac{d + 30}{2} & \left(100 \leq \frac{d}{2} \leq 250 \right) \\ L - 250 & \left(\frac{d}{2} > 250 \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 L ——传感器检测中心到鸭嘴下落点的水平距离,mm

表 2 单个烟株追肥点真值

Tab. 2 Truth table of a single tobacco plant topdressing point

状态	红外光电传感器编号																				d
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	d_1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	x	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	d_2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	x	x	0	1	1	1	1	1	1	1	1	d_3
4	1	1	1	1	1	1	1	0	x	x	x	0	1	1	1	1	1	1	1	1	d_4
5	1	1	1	1	1	1	1	0	x	x	x	x	0	1	1	1	1	1	1	1	d_5
6	1	1	1	1	1	1	0	x	x	x	x	x	0	1	1	1	1	1	1	1	d_6
7	1	1	1	1	1	1	0	x	x	x	x	x	x	0	1	1	1	1	1	1	d_7
8	1	1	1	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	1	1	1	1	d_8
9	1	1	1	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	1	1	1	d_9
10	1	1	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	1	1	1	d_{10}
11	1	1	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	1	1	d_{11}
12	1	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	1	1	d_{12}
13	1	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	1	d_{13}
14	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	1	d_{14}
15	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	d_{15}

3 控制系统设计

智能烟草定量穴施追肥机控制系统电路图如图4所示。该控制系统主要由电源模块、信号转换电路、单片机最小系统、测速电路和控制电路组成。20对红外光电传感器的信号线分别与IN1~IN20

相连,信号转换电路采用光电耦合器将红外光电传感器的输出信号转换成单片机I/O口能直接接收的电平信号。单片机通过控制电磁离合器的断开与吸合来控制变速箱与减速器之间的动力传递,从而控制鸭嘴的追肥动作。

因智能烟草定量穴施追肥机行进过程中,行进

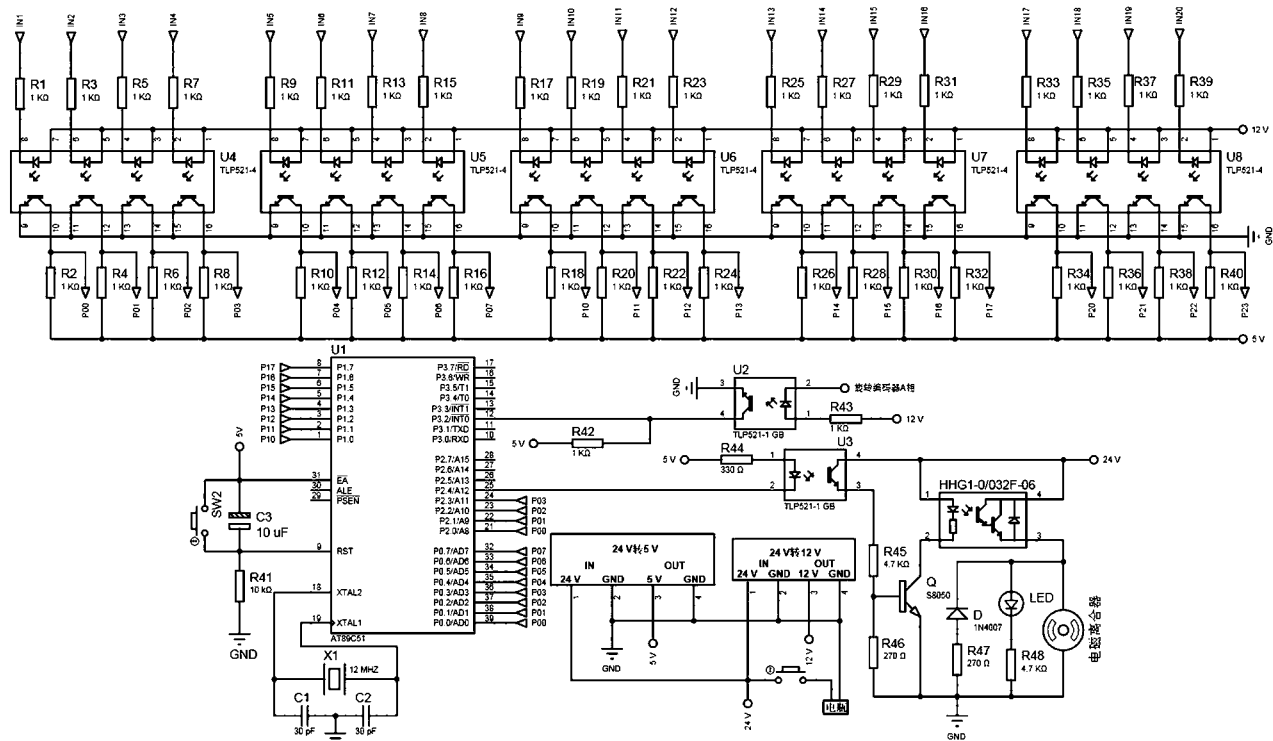


图4 控制系统电路图
Fig.4 Circuit diagram of control system

速度受地形和油门大小的影响,为精确控制鸭嘴追肥,测速电路采用600线增量型旋转编码器实时检测追肥机的行进速度。旋转编码器通过联轴器与减速器输出轴相联,则追肥机前进距离*D*时,旋转编码器产生的脉冲数为

$$N_0 = \frac{n_0DP}{2\pi R} \tag{2}$$

式中 *R*——主动车轮半径,mm
*n*₀——减速器输出轴与主动车轮驱动轴转速比
P——旋转编码器旋转一周产生的脉冲数

经试验测得从电磁离合器得电到鸭嘴开始动作旋转编码器所产生的脉冲数为*N*₁,又已知旋转编码器所在轴与鸭嘴主动轴转速之比为*n*,则鸭嘴主动轴旋转一周(即鸭嘴运动一个周期)时,旋转编码器所产生的脉冲数为*nP*。故从电磁离合器得电到鸭嘴完成追肥并回到初始位置旋转编码器所产生的脉冲数*M*为

$$M = N_1 + nP \tag{3}$$

又已知从鸭嘴开始动作到鸭嘴下落至垄顶位置,鸭嘴主动轴所转过的角度为固定值*θ*,则相对应的旋转编码器所产生的脉冲数为

$$N_2 = \frac{\theta nP}{360} \tag{4}$$

故单片机从检测到当前烟株有效信号到控制电磁离合器得电吸合旋转编码器所产生的延时脉冲数为

$$N = N_0 - N_1 - N_2 \tag{5}$$

4 田间试验

4.1 试验条件

智能烟草定量穴施追肥机田间作业性能试验在山东农业大学烟田试验基地进行,试验用田地平整,试验用地1.2hm²,试验条件如表3所示。

4.2 试验结果与分析

试验过程中样机运转平稳,工作安全可靠,能够有效完成自动化定量穴施追肥,工作过程协调通畅,穴施追肥位置满足追肥农艺要求。采集1000株样本进行分析,试验结果如表4所示,满足设计要求。

表 3 试验条件
Tab.3 Test conditions

参数	数值
烟株直径/mm	200 ~ 350
行距/mm	1 200
株距/mm	500
垄高/mm	250
垄顶宽/mm	350
垄底宽/mm	800
土壤含水率/%	23

表 4 试验结果
Tab.4 Test Results

参数	数值
烟苗检测准确率/%	99
可检测的烟株直径/mm	200 ~ 350
行进速度/km·h ⁻¹	0.8 ~ 1.5
可连续工作时间/h	30
追肥准确率/%	97
烟苗损伤率/%	<2

在试验过程中,出现烟苗不追肥或伤苗现象,分

析其原因有:①烟株生长异常,子叶稀疏,烟株过于高大或烟株直径过小,均可能导致传感器检测装置无法检测出烟株,从而产生不追肥现象。②烟株直径过大,超出传感器检测装置的检测范围,检测出的烟株直径小于其实际直径,单片机由此决策出的追肥点小于其实际追肥位置,从而产生伤苗现象。③偶尔出现震动造成传感器检测异常。

5 结论

(1)设计了一种适合于烟草团棵期追肥的定量穴施追肥机,烟苗肥量可精确控制,节约肥料,可提高肥料的利用率。

(2)智能烟草定量穴施追肥机传感器检测装置能够精确检测出烟株的中心位置和直径,检测准确率达 99%。

(3)该追肥机控制系统能够精确控制鸭嘴完成定量穴施追肥,其追肥准确率达 97%,烟苗损伤率小于 2%,追肥效果满足烟草追肥农艺要求。

参 考 文 献

1 李佛琳, 罗杰. 氮钾追肥不同施用量对烤烟生长性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(29): 12 785 ~ 12 786.

2 范艺宽, 韩锦峰, 李社潮, 等. 不同追肥施用方法对烤烟生长发育及产质的影响[J]. 中国烟草科学, 2001,22(2): 12 ~ 14.
Fan Yikuan, Han Jinfeng, Li Shechao, et al. Effects of different fertilizer top dress method on growth, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2001,22(2): 12 ~ 14. (in Chinese)

3 王德宝, 郜海民, 史宏志, 等. 氮肥用量和基追肥比例对白肋烟干物质积累和氮肥利用率的影响[J]. 河南农业大学学报, 2011, 45(2): 155 ~ 159.
Wang Debao, Gao Haimin, Shi Hongzhi, et al. Impact of nitrogen fertilizer and supplemental proportion on the burley dry matter accumulation and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2011, 45(2): 155 ~ 159. (in Chinese)

4 林建枫, 吴悦, 兰振泉. 不同追肥时间对烟叶产质量的影响[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(21): 70 ~ 71.

5 殷红慧, 赵正雄, 王丽萍, 等. 烟农施肥现状调查与分析[J]. 耕作与栽培, 2005(5): 16 ~ 18.

6 马旭, 马成林, 桑国旗, 等. 变量施肥机具的设计[J]. 农业机械学报, 2005,36(1): 50 ~ 53.
Ma Xu, Ma Chenglin, Sang Guoqi, et al. Design of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(1): 50 ~ 53. (in Chinese)

7 张传斌. 我国烟草生产机械化的现状及思考[J]. 农业机械, 2009(3B): 66 ~ 67.

8 朱祖良. 烟草生产机械化的现状与发展建议[J]. 农业装备技术, 2009,35(3): 4 ~ 6.

9 田金榜. 3SF-3 型苗期深松追肥机的研究开发[J]. 农村牧区机械化, 2008(4): 40 ~ 41.

10 张传斌, 牛长根. TX-12 型烟草定量穴灌追肥机的设计[J]. 农机化研究, 2011(1): 149 ~ 152.
Zhang Chuanbin, Niu Changgen. Design of TX-12 tobacco quantitative hole irrigation dressing machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(1): 149 ~ 152. (in Chinese)

11 姚东伟, 张国祥. TX-12 型烟草定量穴灌追肥机的研制与应用[J]. 河南农业科学, 2011,40(10): 156 ~ 159.
Yao Dongwei, Zhang Guoxiang. Research and application of TX-12 tobacco quantitative hole-filling fertilization machine[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011,40(10): 156 ~ 159. (in Chinese)

12 蒋慧海. 光电开关的原理及应用[J]. 铜业工程, 2009(3): 41 ~ 43.
Jiang Huihai. The principle of photoelectric switch and its application [J]. Copper Engineering, 2009(3): 41 ~ 43. (in Chinese)

13 邵利敏, 王秀, 牛晓颖, 等. 基于 PLC 的变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007,38(11): 84 ~ 87.
Shao Limin, Wang Xiu, Niu Xiaoying, et al. Design and experiment on PLC control system of variable rate fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(11): 84 ~ 87. (in Chinese)

14 于英杰, 张书慧, 齐江涛, 等. 基于传感器的变量施肥机定位方法[J]. 农业机械学报, 2009,40(10): 50 ~ 53.
Yu Yingjie, Zhang Shuhui, Qi Jiangtao, et al. Positioning method of variable rate fertilizer applicator based on sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10): 50 ~ 53. (in Chinese)

15 王金峰,王金武,葛宜元,等. 深施型液态施肥机扎穴机构优化设计[J]. 农业机械学报, 2010,41(4): 52 ~ 55.
Wang Jinfeng, Wang Jinwu, Ge Yiyuan, et al. Optimization design on pricking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(4): 52 ~ 55. (in Chinese)

16 夏俊芳,许绮川,王志山,等. 2BFS-8 型水稻芽种播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010,41(10): 44 ~ 47.
Xia Junfang, Xu Qichuan, Wang Zhishan, et al. Design of rice bud seed sowing and fertilizer machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10): 44 ~ 47. (in Chinese)

17 翟长远,朱瑞祥,黄胜,等. 基于单片机的施药监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011,42(8): 70 ~ 74.
Zhai Changyuan, Zhu Ruixiang, Huang Sheng, et al. Design and experiment of pesticide application monitoring system based on MCU[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(8): 70 ~ 74. (in Chinese)

18 任文涛,迟德霞,刘金波,等. 遥控插秧机自动转向系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012,43(1): 175 ~ 179.
Ren Wentao, Chi Dexia, Liu Jinbo, et al. Design and test on remote rice transplanter automatic steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(1): 175 ~ 179. (in Chinese)

19 Robert P C. Precision agriculture: an information revolution in agriculture[C]//Proceedings: Agriculture Outlook Forum, 1999: 529 ~ 535.

20 Chateau T, Deffin C, Collange F, et al. Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,28(3): 243 ~ 257.

21 Savvas D. The automatic synthetic control of nutritious fluid in the enclosed system for non-soil cultivation [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999,73(1): 29 ~ 33.

~~~~~

(上接第 58 页)

12 费千,岳丹婷. 液滴从固体壁面脱落条件的分析[J]. 大连海事大学学报, 1997,23(3): 92 ~ 95.  
Fei Qian, Yue Danting. Analysis of the condition of liquid drop from solid wall[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1997, 23(3): 92 ~ 95. (in Chinese)

13 王晓东,彭晓峰,闵敬春,等. 接触角滞后现象的理论分析[J]. 工程热物理学报, 2002,23(1): 67 ~ 70.  
Wang Xiaodong, Peng Xiaofeng, Min Jingchun, et al. Hysteresis of contact angle at liquid-solid interface [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002,23(1): 67 ~ 70. (in Chinese)

14 柯清平,李广录,郝天歌,等. 超疏水模型及其机理[J]. 化学进展, 2010,22(3): 284 ~ 290.  
Ke Qingping, Li Guanglu, Hao Tiange, et al. Superhydrophobicity: theoretical models and mechanism [J]. Progress in Chemistry, 2010,22(3): 284 ~ 290. (in Chinese)

15 田辉,杨泰生,陈玉清. 疏水理论研究进展[J]. 山东陶瓷, 2008,31(3): 8 ~ 13.  
Tian Hui, Yang Taisheng, Chen Yuqing. Development of fundamental theories of hydrophobic[J]. Shandong Ceramics, 2008, 31(3): 8 ~ 13. (in Chinese)

16 李小兵,刘莹. 微观结构表面接触角模型及其润湿性[J]. 材料导报: 研究篇, 2009, 23(12): 101 ~ 103.  
Li Xiaobing, Liu Ying. Contact angle modle and wettability on the surfaces with microstructures[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2009, 23(12): 101 ~ 103. (in Chinese)

17 吕晓兰,傅锡敏,吴萍,等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报, 2011,42(6): 70 ~ 75.  
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Wu Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6): 70 ~ 75. (in Chinese)

18 高建民,安贵仁,刘昌鉴,等. 叶片吸收雾滴过程中雾滴覆盖面积的变化规律[J]. 排灌机械工程学报, 2012,30(2): 198 ~ 202.  
Gao Jianmin, An Guiren, Liu Changjian, et al. Variation characters of droplet coverage area in leaf droplet water uptake process [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(2): 198 ~ 202. (in Chinese)