

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.008

SYJ-2型液肥变量施肥机设计与试验*

王金武 潘振伟 周文琪 王金峰 何剑南 郎春玲

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 变量施肥技术是精准农业的重要组成部分,依据农业生产要求设计了与轮式拖拉机配套的SYJ-2型三点悬挂式液肥变量施肥机。以单片机作为核心处理器,以电磁比例调节阀为执行部件,设计编写了液肥变量控制系统以及与硬件配套的上位机软件,用于采集数据与发送命令;关键部件内腔式旋转扎穴机构采用5个全等椭圆齿轮传动,液肥在内腔流动,在减少外部连接软管的同时,防止了管路缠绕;液肥分配器的功能是适时开启和关闭,实现液肥的不连续射出,进而完成穴施作业;同时对内腔式旋转扎穴机构和液肥分配器进行了结构设计。田间试验结果表明,施肥深度为地表12~15 cm,施肥精度为99.1%,满足液态变量施肥作业要求。

关键词: 深施 液肥施肥机 变量 设计 试验

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)07-0053-06

Design and Test of SYJ-2 Type Liquid Variable Fertilizer

Wang Jinwu Pan Zhenwei Zhou Wenqi Wang Jinfeng He Jiannan Lang Chunling

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Variable fertilization technology is an important part of precision agriculture. According to the requirements of agricultural production, the SYJ-2 type three-point suspension liquid variable fertilizer machine was designed which was matched with wheeled tractor. Taking the single chip microcomputer as the core processor and the electromagnetic proportional adjusting valve as the execution unit, the control system for liquid variable fertilizer and the upper computer software works in concert with hardware were designed and programmed for collecting data and sending the command. The key components, which called rotary pricking hole mechanism, used five congruent oval gears to drive. The liquid fertilizer flew in the cavity of rotary pricking hole mechanism. This agency reduced the external connecting hoses at the same time and prevented the pipe twine. The function of the liquid fertilizer distributor was opened and closed timely. The mechanism could achieve discontinuous injection of liquid fertilizer, then complete the injection operation of liquid fertilizer. The structures for distributor and intracavity rotary pricking hole mechanism were designed at the same time. The field experiment results showed that the fertilization depth was 12~15 cm below the soil surface, and the fertilization accuracy was 99.1%, which meets requirements of liquid fertilizer for variable fertilization.

Key words: Deep-placement Liquid fertilizer Variable Design Test

引言

液肥是一种既经济又有效的肥料,其生产费用低、肥效高、易吸收、节支增产效果显著、施肥方式方便,在国外已得到了较为广泛的应用^[1]。在美国,

液体化肥占化肥总量的35%以上,英国、德国、比利时、荷兰、墨西哥及俄罗斯等国均在大量使用各种液体肥料^[2]。深施液肥能够将液态肥施于作物根部附近土壤的一定深度中,更便于作物吸收,减少液态肥的挥发^[3-4]。变量施肥技术是精准农业的重要组

收稿日期: 2014-09-14 修回日期: 2014-12-01

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B04)

作者简介: 王金武,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwu@163.com

成部分,可根据不同地区、不同土壤类型以及土壤中各种养分状况、作物类型和产量水平,将 N、P、K 等多种可促进作物生长的微量元素与有机肥加以科学配方,实现按需施肥^[5-8]。

现阶段对变量施肥技术控制系统的研究,主要针对固态肥的按需施用,而液态肥控制系统局限于对农作物的叶面喷洒作业。文献[9]针对曲柄摇杆扎穴机构设计了一种变量控制系统,而本文以5个全等椭圆齿轮的扎穴机构为对象,开发设计变量控制系统。基于此本研究设计深施型液态施肥机以及与其配套的低成本变量施肥控制系统,同时对整机进行田间试验验证。

1 整机结构与工作原理

SYJ-2 型液肥变量施肥机整机如图 1 所示,由机架、扎穴机构、分配器、液压泵、液肥输送管路、液肥箱、变量控制系统和传动系统等组成。液态施肥机工作时,动力输出轴通过带传动驱动液泵工作,液泵从液肥箱中吸取液态肥,以一定压力将液态肥输送至两端的分配器,在此过程中变量控制系统控制电磁比例调节阀调节管路中的液肥压力。依据获得的 GIS 施肥处方图,机组在正常作业时,由液态变量施肥控制系统控制实现实时变量。每个分配器分别与同侧的一副扎穴机构分配液态肥。通过 2 个出肥口分别向 2 支喷肥针提供液态肥。

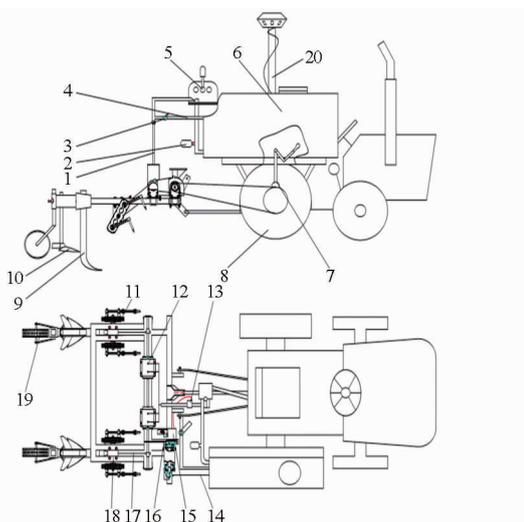


图 1 SYJ-2 型液肥变量施肥机整机结构简图
Fig.1 Structure diagram of SYJ-2 type liquid fertilizer variable applicator

- 1. 输肥管 2. 过滤器 3. 压力调节阀 4. 回液管 5. 液泵
- 6. 液肥箱 7. 离合器 8. 驱动轮 9. 深松铲 10. 培土器
- 11. 扎穴机构 12. 分配器 13. 电磁比例调节阀 14. 驱动链条
- 15. 变量控制系统 16. 调速链条 17. 传动链条 18. 机架
- 19. 限深轮 20. GPS 接收机

当凸轮轴和太阳轮轴再转过半圈时,另外 2 支

喷肥针又同时入土,此时另一分配阀开启,向入土的 2 支喷肥针提供液态肥,如此往复循环。

2 液态变量施肥控制系统设计

液态变量施肥控制系统结构原理图和电路模块图如图 2、3 所示。系统分为控制部分与执行部分,由 GPS 接收机、上位机、变量施肥控制器和电磁比例调节阀等构成。控制部分的核心处理器选用深圳宏晶公司生产的 51 系列单片机 TC89C52RC。

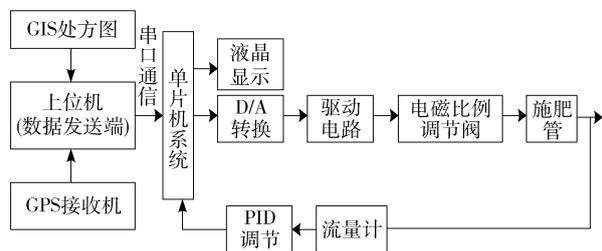


图 2 液态变量施肥控制系统结构原理图

Fig.2 Control system of liquid variable fertilization principle

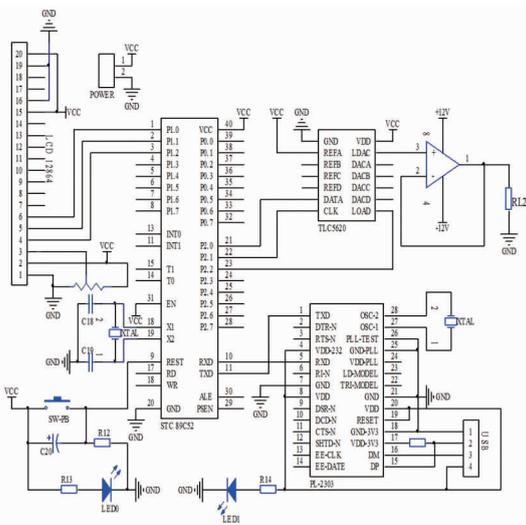


图 3 控制系统电路模块图

Fig.3 Control system circuit module chart

单片机带有 8kb 闪烁可编程可擦除只读存储器的低电压和高性能的 CMOS 8 位微处理器。该单片机与工业标准的 MCS-51 指令集和输出管脚相兼容。由于将多功能 8 位 CPU 和闪烁存储器组合在单个芯片中,是一种高效微控制器,其为很多嵌入式控制系统提供了一种灵活性高且价廉的方案。控制部分主要完成电磁比例调节阀的驱动、LCD (Liquid crystal display) 的显示和控制算法的实施。执行部分为德国 Burkert 公司生产的 8603 型控制器+2835 型电磁比例调节阀,接收经单片机 D/A 转换后的电压信号。电磁比例调节阀接收 0~10 V 直流电压^[9-11]。

为了实现变量施肥,设计研制了变量施肥控制

软件,该软件由 Visual Basic 6.0 语言、地理信息系统 Map Objects 2.2 控件和 Microsoft 公司串行通信 MSComm 控件进行编程,通过上位控制计算机对变量施肥控制机构间接进行控制。系统在工作过程中,使用流量计检测施肥管路中的流量是否达到上位机给定的预设值,如果没有达到预设值,通过流量计反馈到单片机系统中,运用增量式 PID 调节算法继续调节,以达到精确控制施肥量的目的,进而实现变量施肥。

3 关键部件设计

3.1 扎穴机构

扎穴机构示意图如图 4 所示,其包括 5 个全等的椭圆齿轮、行星架、喷肥针和摇臂等,每一个椭圆齿轮的回转中心均位于其焦点上。当行星架处于初始相位(即初始安装位置)时,5 个椭圆齿轮的长轴共线,且与水平线呈一定夹角。动力通过与行星架 1 固联的太阳轮轴输入。其中与机架固联为一体的椭圆齿轮 I 为太阳轮,工作时处于静止状态,不随行星架的转动而转动;椭圆齿轮 II 为中间轮,工作时随行星架一起绕行星架的轴线作公转,同时绕固定于行星架上的轴线作自转;椭圆齿轮 III 为行星轮,工作时也随行星架一起绕行星架的轴线作公转,同时绕固定于行星架上的轴线作自转。根据作业速度、传动比以及作业高度等因素,设计得扎穴机构壳体长 387.2 mm、宽 108 mm,椭圆齿轮中心距 69.8 mm,摇臂长 245.5 mm,喷肥针长 138.8 mm,行星架转速为 60~90 r/min 等各结构参数值^[12]。

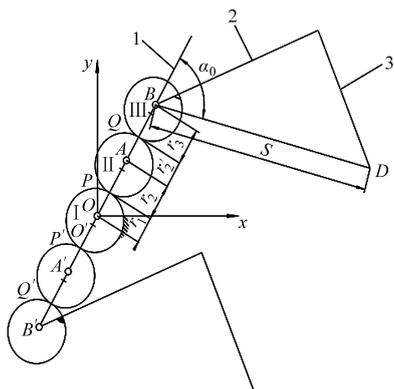


图 4 扎穴机构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pricking hole mechanism

- 1. 行星架 2. 摇臂 3. 喷肥针

喷肥针、摇臂、行星轮轴和行星轮通过相应连接固联为一体,随着行星轮的复合运动,喷肥针上各点(包括喷肥针尖)也作有规律的复合运动,从而形成特殊的运动轨迹^[13-14]。

喷肥针在工作时通过周期性地插入土壤中而实

现扎穴动作。该机构在太阳轮两侧各包含一个中间轮、一个行星轮、一个摇臂和一支喷肥针,从而确保机构在旋转一周时完成两次扎穴动作。液态肥通过相应的液肥输送管路按时按量输送到喷肥针,并随着喷肥针入土而施入土壤。扎穴机构三维模型如图 5 所示。

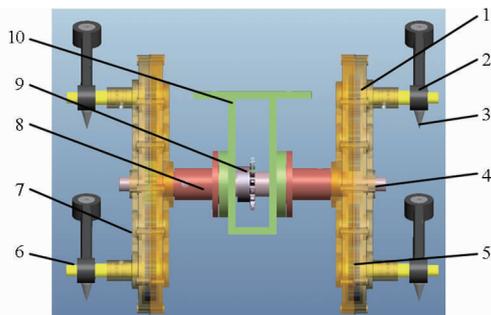


图 5 扎穴机构三维模型图

Fig. 5 Three-dimensional model diagram of pricking hole mechanism

- 1. 行星架 2. 摇臂 3. 喷肥针 4. 太阳轮轴 5. 全椭圆齿轮
- 6. 行星轮轴 7. 中间轮轴 8. 法兰 9. 链轮 10. 链轮壳

3.2 分配器

分配器的作用是在喷肥针入土时向扎穴机构提供液态肥,出土时停止向其提供液态肥。作业时以凸轮机构的间歇性运动实现分配器的分配要求。在此工作过程中,起决定作用的则是分配器凸轮。为了保证分配器和扎穴机构工作的协调性,对分配器凸轮机构的运动规律进行探究后,设计了符合扎穴机构运动规律的凸轮。

由分配器对扎穴机构的供肥原理可知,行星架和分配器凸轮轴的转速比为 1,为使分配器和扎穴机构能够更为协调的配合工作,保证分配阀在喷肥针入土过程中渐渐开启,出土过程中渐渐关闭,需要对凸轮廓线进行合理设计。采用直动滚子推杆盘形凸轮机构,根据工作条件,确定阀芯在推程和回程阶段的运动规律均为正弦加速度运动规律,这样既无刚性冲击也无柔性冲击^[12]。

采用解析法对凸轮的轮廓曲线进行设计,建立如图 6 所示的 Oxy 坐标系, B_0 为凸轮推程段廓线的起始点,当凸轮转过 δ 角时,推杆运动位移为 s ,此时滚子中心位于 B 点。

凸轮理论廓线的坐标公式为

$$\begin{cases} x = (s_0 + s) \sin \delta + e \cos \delta \\ y = (s_0 + s) \cos \delta - e \sin \delta \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$s_0 = \sqrt{r_0^2 - e^2}$$

式中 e ——偏距, mm

r_0 ——凸轮基圆半径, mm

δ ——凸轮转过的角度,以逆时针为正, rad

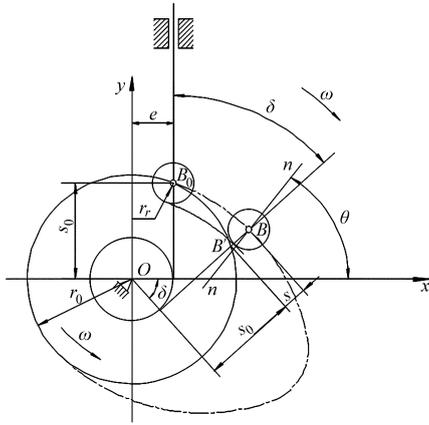


图6 凸轮廓线分析图

Fig. 6 Analysis diagram of cam's profile curve

s ——推杆位移, mm, 按推程、回程、近休止3阶段计算

凸轮工作廓线的坐标公式为

$$\begin{cases} x' = x - r_r \cos\theta \\ y' = y - r_r \sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \sin\theta = (dx/d\delta) / \sqrt{(dx/d\delta)^2 + (dy/d\delta)^2} \\ \cos\theta = -(dy/d\delta) / \sqrt{(dx/d\delta)^2 + (dy/d\delta)^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} dx/d\delta = (ds/d\delta) \sin\delta + (s_0 + s) \cos\delta - e \sin\delta \\ dy/d\delta = (ds/d\delta) \cos\delta - (s_0 + s) \sin\delta - e \cos\delta \end{cases} \quad (4)$$

式中 r_r ——推杆滚子半径, mm

θ ——理论廓线上 B 点处的法线 $n-n$ 与 x 轴的夹角, rad

h ——推杆行程, mm

$ds/d\delta$ ——按推程、回程、近休止3阶段计算

由 $\tan\alpha = (ds/d\delta - e) / [(r_0^2 - e^2)^{1/2} + s]$, 得到压力角的计算公式

$$\alpha = \arctan((ds/d\delta - e) / [(r_0^2 - e^2)^{1/2} + s]) \quad (5)$$

采用 VB 语言对公式(1)~(5)进行编程得到, 当凸轮从 0° 转到 47° 时, 阀芯处于推程阶段, 在该段的最大压力角为 26.07° , 所对应的凸轮转角为 23.5° ; 当凸轮从 47° 转到 85° 时, 阀芯处于回程阶段, 在该段的最大压力角为 31.19° , 所对应的凸轮转角为 67° 。推程阶段和回程阶段最大压力角均小于许用压力角; 凸轮最小曲率半径为 15.87 mm, 大于推杆滚子半径 (10 mm), 满足设计要求。凸轮三维图如图 7 所示。

当凸轮处于推程、远休和回程状态时, 分配阀开启; 当凸轮处于近休状态时, 分配阀关闭^[15-18], 从液泵出来的具有压力的液态肥通过两个分配阀分别提供给扎穴机构的两支交替扎穴的喷肥针。凸轮轴上的两个交替安装的凸轮通过推动阀芯使两个分配阀实现交替开启, 以确保喷肥针在入土时深施液态



图7 凸轮三维图

Fig. 7 3-D model diagram of cam

肥, 出土时停止施液态肥。依据工作原理设计了分配器, 如图 8 所示。

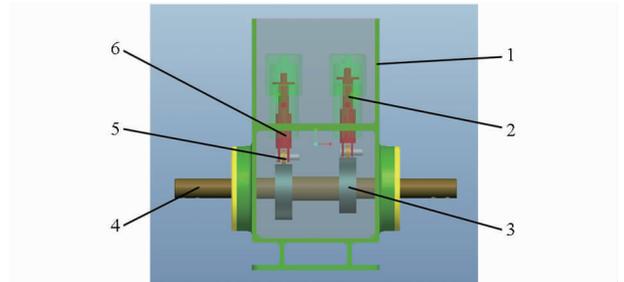


图8 分配器三维图

Fig. 8 3-D model diagram of distributor

1. 分配器壳体 2. 分配阀 3. 凸轮 4. 凸轮轴 5. 滚子 6. 阀芯

4 田间试验

2014年6月18日在哈尔滨市东北农业大学香坊实验基地对 SYJ-2 型液肥变量施肥机进行了田间性能测试(图 9)。液态施肥机与 13.3 kW 的拖拉机挂接; 作业条件为玉米中耕施肥作业, 玉米植株自然高度为 $550 \sim 650$ mm, 垄距为 700 mm, 株距为 250 mm, 肥液为尿素溶解液。



图9 SYJ-2型液肥变量施肥机

Fig. 9 SYJ-2 type liquid fertilizer variable applicator

1. 液肥箱 2. 分配器 3. 传动系统 4. 扎穴机构 5. GPS 接收机 6. 液泵 7. 变量控制系统 8. 机架 9. 限深轮

试验时, 在上位机软件子系统中预设施肥量后, 启动控制器和电磁比例调节阀, 机组作业速度为 0.55 m/s, 测区长 16.5 m, 设置每间隔 0.25 m (株距) 为一个施肥点。施肥机在正常工作速度下, 将喷肥针抬起而不入土, 每个喷肥针喷口接 1 个量杯

接取喷射出的肥量。计算实际施肥量与预设施肥量(施肥量处方图的数值)的差值即为施肥量误差。试验中,测取50个施肥点,每个点重复10次,得到单次施肥量误差后,计算整机施肥精度最高可达99.1%。部分试验数据如表1所示。

在测试区内以玉米植株自然高度550~650 mm范围内扎穴机构的喷肥针扎破作物茎、叶、根的株数与总株数的比计算作物损伤率。试验时,机组作业长度设定50 m,作业行数4行,株距0.25 m,计算机组5次作业的玉米损伤率最大为3.15%。

田间试验结果表明,通过变量控制系统控制电磁比例调节阀可实现不同开度,改变每次的施肥量;液态肥施入12~15 cm的土层中,作物有良好的吸收效果,肥液喷射均匀,覆盖性较好;喷肥针的施肥深度可达到18 cm,对作物的机械损伤较小;施肥机田间试验性能证明施肥质量达到了各项农艺技术指标的要求。

5 结论

(1)设计了与轮式拖拉机配套的SYJ-2型三点悬挂式液肥变量施肥机,以及由GPS接收机、上位机、变量施肥控制器和电磁比例调节阀等组成的变量施肥控制系统,变量调节通过以单片机和电磁比例调节阀为执行部件实现,结合机械部件实现了变量施肥作业。

(2)试验表明,该机能满足变量深施液肥作业要求,变量施肥控制系统实现变量调节,施肥精度可达99.1%,提高了液态肥的利用率。

表1 试验数据与结果

Tab.1 Experimental data and results

北纬/ (°)	东经/ (°)	设定的 施肥量/ (mL·次 ⁻¹)	测得的 施肥量/ (mL·次 ⁻¹)	偏差/ (mL·次 ⁻¹)	精度/ %
45.742 081	126.719 003	27.8	28.2	0.4	98.5
45.742 138	126.718 999	31.7	32.1	0.4	98.7
45.742 190	126.718 999	31.8	32.2	0.4	98.7
45.742 245	126.719 001	30.7	31.1	0.4	98.7
45.742 293	126.719 008	32.5	32.1	0.4	98.7
45.742 293	126.719 009	31.5	32.0	0.5	98.4
45.742 404	126.719 012	31.0	31.4	0.4	98.7
45.742 457	126.719 022	31.8	32.2	0.4	98.5
45.742 509	126.718 998	31.6	32.0	0.4	98.5
45.742 564	126.718 998	33.3	33.6	0.5	92.2
45.742 626	126.718 998	34.2	34.7	0.5	92.7
45.742 674	126.719 000	33.3	33.7	0.4	98.4
45.742 725	126.719 001	31.0	31.3	0.3	98.9
45.742 780	126.718 999	32.7	33.1	0.4	98.7
45.742 835	126.719 002	31.9	32.2	0.3	98.9
45.742 891	126.719 003	32.5	32.9	0.4	98.7
45.742 945	126.719 000	31.8	31.5	0.3	98.9
45.743 064	126.719 098	34.7	34.4	0.3	99.1
45.743 053	126.719 001	33.7	34.1	0.4	98.5
45.743 108	126.719 001	32.5	33.0	0.5	98.4
45.743 162	126.719 002	31.8	31.4	0.4	98.7
45.743 219	126.719 003	33.9	33.6	0.3	98.9
45.743 270	126.719 003	35.9	36.2	0.3	98.9
45.743 326	126.719 005	37.4	38.0	0.4	98.4
45.743 379	126.719 004	39.7	39.4	0.3	98.9
45.743 440	126.719 002	35.6	35.3	0.3	98.8
45.743 509	126.718 998	35.6	36.0	0.4	98.5
45.743 550	126.719 002	33.3	33.8	0.5	98.3
45.743 598	126.719 004	32.9	32.6	0.3	98.9
45.743 655	126.719 003	34.6	35.0	0.4	98.7

参 考 文 献

- 王云霞. 液体肥料的应用现状与发展趋势[J]. 化肥设计, 2003, 41(4): 10-13.
- 汪家铭. 液体肥料的开发与应用[J]. 川化, 2000(1): 31-33.
- 王金武, 王金峰. 深施型液态施肥关键部件的设计与仿真[C]. 中国农业工程学会2009年学术年会论文集, 2009. Wang Jinwu, Wang Jinfeng. Design and simulation of key parts of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[C]// Proceedings of China Agricultural Engineering Association 2009 Annual Conference, 2009. (in Chinese)
- 刘亚华, 王金武, 王金峰, 等. 基于Pro/E及ADAMS液态施肥机扎穴机构的设计与仿真[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(2): 134-137. Liu Yahua, Wang Jinwu, Wang Jinfeng, et al. Design and dynamic simulation of liquid fertilizer applicator pricking hole mechanism based on Pro/E and ADAMS[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(2): 134-137. (in Chinese)
- 王金峰, 王金武. 液态变量施肥机两种不同变量机构的研究[J]. 农机化研究, 2007(1): 123-124. Wang Jinfeng, Wang Jinwu. Research on two different kinds of variable mechanism of liquid variable fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(1): 123-124. (in Chinese)
- 刘阳春, 张小超, 伟利国, 等. 一种变量施肥技术的实现及其台架试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 160-162. Liu Yangchun, Zhang Xiaochao, Wei Liguang, et al. Design and experiment of a variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 160-162. (in Chinese)
- 王金峰. 深施型液态施肥关键部件的工作机理与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010. Wang Jinfeng. Working principle and experiment of key components of deep-liquid fertilizer[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 张书慧, 马成林, 吴才聪, 等. 一种精准农业自动变量施肥技术及其实施[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 129-131.

- Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Wu Caicong, et al. Development and application of variable rate fertilizer applicator for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 129 - 131. (in Chinese)
- 9 郎春玲, 王金武, 王金峰, 等. 深施型液态肥变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 43 - 47.
Lang Chunling, Wang Jinwu, Wang Jinfeng, et al. Variable fertilizer control system for deep-fertilization liquid fertilizer applicator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 43 - 47. (in Chinese)
- 10 郎春玲. 基于处方图的深施型液态肥变量施肥作业系统设计与开发[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
Lang Chunling. Variable-rate fertilization system for deep-fertilization liquid fertilizer applicator based on the prescription map [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 11 梁春英, 衣淑娟, 王熙, 等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 158 - 160.
Liang Chunying, Yi Shujuan, Wang Xi, et al. PID control strategy of the variable rate fertilization control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 158 - 160. (in Chinese)
- 12 何剑南. 液肥注射式工作部件的工作机理与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
He Jiannan. Study on working principle and experiment of work components of liquid fertilizer injection type [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 13 李革, 赵匀, 俞高红. 椭圆齿轮行星系分插机构的机理分析和计算机优化[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 78 - 81.
Li Ge, Zhao Yun, Yu GaoHong. Theoretical analysis and parameters optimizing of separating-planting mechanism with planetary elliptic gears [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4): 78 - 81. (in Chinese)
- 14 王金武, 何剑南, 潘振伟, 等. 液态施肥机液肥分配器凸轮运动学分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 77 - 82.
Wang Jinwu, He Jiannan, Pan Zhenwei, et al. Kinematic analysis and imulation of liquid fertilizer distributor's cam for liquid fertilizer applicator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 77 - 82. (in Chinese)
- 15 王金武, 刘亚华, 王金峰, 等. 全椭圆齿轮行星系液肥深施机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 60 - 65.
Wang Jinwu, Liu Yahua, Wang Jinfeng, et al. Optimization design and experiment of liquid-fertilizer applying deep-fertilization mechanism for planetary elliptic gears [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 60 - 65. (in Chinese)
- 16 王金武, 纪文义, 冯金龙, 等. 液态施肥机的设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 157 - 159.
Wang Jinwu, Ji Wenyi, Feng Jinlong, et al. Design and experimental investigation of the liquid fertilizer applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 157 - 159. (in Chinese)
- 17 孙桓, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 18 邹慧君. 凸轮机构的现代设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005.

~~~~~

(上接第 71 页)

- 8 颜华, 吴俭敏, 林金天. 环形土槽微耕机试验台设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 69 - 72.  
Yan Hua, Wu Jianmin, Lin Jintian. Design of micro-cultivator testing plat form with annular soil-bin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mechanization, 2010, 41(1): 69 - 72. (in Chinese)
- 9 刘鸿文. 材料力学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 376 - 381.
- 10 刘仁家, 陶性华. 机械设计师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- 11 俞洪, 丁剑平, 姚钟尧, 等. 轮胎的承载能力分析[J]. 轮胎工业, 2000, 20(11): 653 - 659.
- 12 程钢, 赵国群, 管延锦, 等. 子午线轮胎负荷性能试验研究[J]. 弹性体, 2004(2): 53 - 57.  
Cheng Gang, Zhao Guoqun, Guan Yanjin, et al. Experiment study on load performances of radial tire [J]. China Elastomers, 2004(2): 53 - 57. (in Chinese)
- 13 唐升武. 轮胎下沉量理论计算方法在结构设计中的应用[J]. 轮胎工业, 2004, 24(1): 16 - 17.
- 14 张士齐. 轮胎力学与热学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- 15 张春阳, 雷贤卿, 李济顺, 等. 基于几何优化的圆度误差评定算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 8 - 12.  
Zhang Chunyang, Lei Xianqing, Li Jishun, et al. Method for roundness error evaluation based on geometry optimization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 8 - 12. (in Chinese)