

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.008

液肥深施双斜孔式喷肥针动力学分析与试验

刘春香^{1,2} 王金武¹ 周文琪¹ 唐 汉¹ 王 奇¹ 闫东伟¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江工程学院机电工程学院, 哈尔滨 150050)

摘要: 喷肥针为扎穴机构的关键部件, 作业时直接与土壤接触, 其结构特点影响施肥质量。设计了一种新型的双斜孔式喷肥针, 并对其进行了动力学分析。在搭建的动力学测试系统台架上以土槽车前进速度和行星架转速为试验因素, 以土壤对喷肥针反作用力为指标, 对喷肥针扎穴过程受到的土壤反作用力进行试验测定。试验结果表明, 喷肥针受到的土壤拉压力随土槽车前进速度及行星架转速的增加而减小, 变化范围为 19.944 ~ 25.936 N; 弯曲力随土槽车前进速度及行星架转速的增加而增大, 变化范围为 8.62 ~ 75.32 N, 行星架转速对喷肥针反作用力的影响显著; 根据试验结果, 行星架转速在 100 ~ 120 r/min 时, 既可提高工作效率, 又能保证扎穴机构的正常工作。

关键词: 液态施肥; 喷肥针; 动力学分析; 试验

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)03-0053-06

Dynamics Analysis and Experiment of Double Oblique Hole Spray Fertilizer Needle of Liquid Fertilizer Deep-fertilization

Liu Chunxiang^{1,2} Wang Jinwu¹ Zhou Wenqi¹ Tang Han¹ Wang Qi¹ Yan Dongwei¹

(1. Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Mechanical and Electrical Engineering College, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

Abstract: Spray fertilizer needle is the executive component of pricking hole mechanism, which is working on the soil directly, so its construction feature will affect the fertilization quality. In order to improve the operation quality, a new type spray fertilizer needle with double oblique hole was designed and its dynamics characters were studied. On the dynamics testing system bench, taking forward speed of soil tank vehicle and rotation speed of planet carrier as experimental factors, and the reaction of soil particles to spray fertilizer needle as indicator, the reaction force of soil particles to spray fertilizer needle during pricking hole was determined. Result shows that, the tensile stress of needle was decreased with the increasing forward speed and rotation speed, which was in the range of 19.944 ~ 25.936 N. Bending force was increased with the increasing forward speed and rotation speed, which was in the range of 8.62 ~ 75.32 N. The rotation speed has a significant effect on the reaction of spray fertilizer needle. According to the test results, the rotation speed of planet carrier with the range of 100 ~ 120 r/min could improve the work efficiency and ensure normal work of pricking hole mechanism.

Key words: liquid fertilization; spray fertilizer needle; dynamics analysis; experiment

引言

液态肥深施技术是通过施肥机具将液态肥施至

土壤一定深度, 其施肥位置为作物根部附近, 有利于根系对肥料的吸收, 是具有提高产量、减少肥料浪费和环境污染的施肥技术。可兼顾良好的经济和生态

收稿日期: 2016-01-11 修回日期: 2016-01-22

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(830038)

作者简介: 刘春香(1979—), 女, 博士生, 黑龙江工程学院讲师, 主要从事智能型田间机械研究, E-mail: liuchxiang2005@163.com

通信作者: 王金武(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事田间机械和机械可靠性研究, E-mail: jinwuw@163.com

效益^[1-2]。研发深施型液态施肥机具是推广应用此项技术的必要条件^[2-4]。

深施型液态施肥机的施肥质量主要要求是扎穴深度平稳一致且穴孔足够小,减少对土壤结构的扰动作用及肥料挥发,肥量损失小,提高行星架转速,实现高效作业^[4]。

国外针对深施型液态施肥机具的研究鲜有相关报道,东北农业大学研制的多功能液态施肥机,可与中耕三铧犁配套使用,一次完成扎穴、施肥、中耕培土等作业^[5]。其关键部件扎穴机构已经过系列优化设计改型研究,但都存在单位时间扎穴次数受限的缺陷,进一步提高则惯性力加大,扎穴不稳定,喷肥针受到土壤的冲击力大,机构振动较为明显,进而影响穴口形状尺寸,甚至不同程度影响机具使用寿命^[6]。

扎穴机构是深施型液态施肥机的执行部件,驱动喷肥针完成入、出土扎穴和施肥作业。扎穴过程中喷肥针受到土壤反作用力,力的波动影响喷肥针扎穴的轨迹和姿态^[7-8],致使不能保证穴口宽度和液肥准确位置,影响施肥质量,伤及作物根系,喷肥针长期工作后针尖部分的磨损严重。本文对扎穴机构进行结构设计以及动力学分析,在搭建的喷肥针动力特性测试试验台上,利用应变式传感器获得喷肥针针尖受土壤反力的变化规律,为动力学求解提供已知边界条件;进而为优化喷肥针的结构、强度及针尖部分的耐磨性估算等提供理论依据,为后续扎穴机构动力学研究提供重要的理论参考。

1 扎穴机构结构设计

1.1 扎穴机构组成与工作原理

如图1所示,此机构由7个非圆齿轮、2个双斜孔式喷肥针组件(以下简称喷肥针)、2个摇臂和1个行星架组成。动力传动由太阳轮将动力传递给中间轮,2个中间轮同轴,通过齿轮啮合将动力传递给行星轮,行星轮与摇臂固结,喷肥针通过螺纹联接固定在摇臂上,最终将动力传递给喷肥针。

工作时,行星架在太阳轮轴的带动下绕其轴心作圆周运动,行星轮以旋转中心自转且绕太阳轮心公转,进而带动喷肥针完成扎穴作业,机构旋转1周扎穴2次,结构如图1所示。

1.2 喷肥针结构设计及动力学分析

(1) 喷肥针结构设计

扎穴机构是深施型液态施肥机的执行部件,喷肥针是扎穴机构的关键部件^[6]。为防止土壤对喷肥口的堵塞以及瞬间难以截止和形成脉动喷施的问

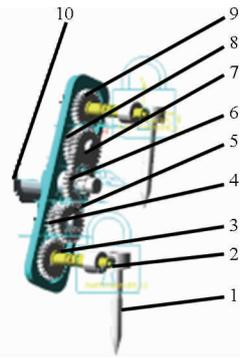


图1 行星轮系扎穴机构结构图

Fig.1 Structure diagram of pricking hole mechanism of planetary gear

1. 喷肥针 2. 摇臂 3, 9. 行星轮 4, 8. 与行星轮啮合的中间轮 5, 7. 与太阳轮啮合的中间轮 6. 太阳轮 10. 太阳轮轴

题,对喷肥针采用斜式喷肥和压力控制阀原理进行设计,根据其性能要求,主要由针尖、调压螺母、压力弹簧、阀芯、喷肥针针杆等组成,如图2所示。针尖与阀芯、阀芯与针杆以螺纹方式连接,由此构成喷肥针的总装。喷肥针的主要结构参数为针体总长163.9 mm、中心孔直径5 mm、针杆壁厚5.5 mm、斜喷孔角度25°,压力弹簧根据实际液肥在腔体内压力确定。

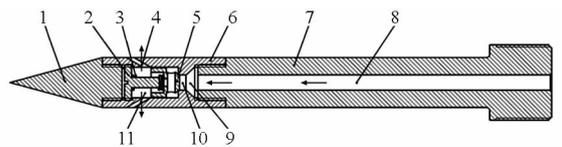


图2 双斜孔式喷肥针结构示意图

Fig.2 Structure diagram of spray fertilizer needle

1. 针尖 2. 调压螺母 3. 压力弹簧 4. 液肥斜喷孔 5. 阀芯 6. 阀座 7. 针杆 8. 中心孔 9. 上腔室 10. 连通孔 11. 下腔室

工作时,液肥以一定的压力由中心孔进入,由液肥斜喷孔喷出,液肥的流动路线如图2中箭头所示。在工作过程中,如果液肥瞬间难以截止和形成脉动,此时由于压力弹簧的作用,调压螺母将液肥截止在中心孔内,防止残余液肥随喷肥针拔出土壤时留在土壤表面;斜肥口在针杆侧面且呈斜式状态,其特点是在与土壤作用的过程中,由于土壤的抗拉强度远低于抗剪强度,因此土壤堵塞斜喷口的几率少,同时液肥压力也可将堵塞的土壤喷出。通过对喷肥针的结构设计,保证施肥效果与质量。

(2) 喷肥针总成动力学分析

工作过程中喷肥针与行星轮、行星轮轴、摇臂固结为一个构件,因此受力分析时将此喷肥针总成作为一个研究对象,设行星架对行星轮中心 D 的作用力为 F_{Dx} 和 F_{Dy} ,喷肥针尖受到的作用力为 F_{A1} 和 F_{A2} 。其受力分析如图3所示,以行星轮轮心为坐标系原点,建立平面坐标, F_{NP} 为太阳轮与中间轮啮合

点 P 的压力, N ; F_{fP} 为太阳轮与中间轮啮合点 P 的摩擦力, N ; m 为行星轮 (包括摇臂喷肥针) 质量, kg ; β 为行星架转角, ($^\circ$); β_0 为行星架初始安装角, 取 60° 。

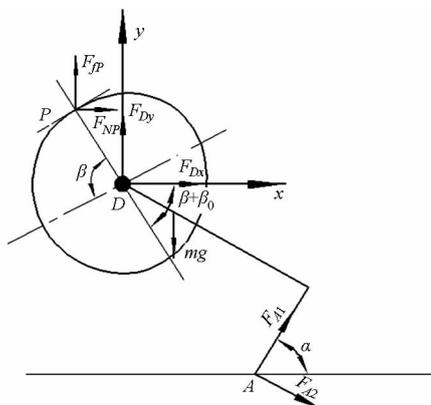


图 3 行星轮受力分析示意图

Fig. 3 Stress analysis of planet wheel

根据受力分析建立若干力学方程 (这里不再列出, 在后续的扎穴机构动力学研究中详细论述)。为便于分析和测试, 将喷肥针受到土壤的反作用力分解为平行于喷肥针体的轴向拉压力 F_{A2} 及垂直于喷肥针体的弯曲力 F_{A1} 。若喷肥针受到反作用力过大将对针体产生拉压及弯曲的变形, 进而影响扎穴质量。土壤反作用力的测取对喷肥针的强度校核、材料的选择、针杆壁厚设计及结构优化意义重大, 所以为了研究土壤的反作用力变化规律, 设计喷肥针动力学特性测试系统并进行相应的测试。

2 扎穴机构喷肥针动力学特性测试

扎穴机构工作过程中, 随着行星架转速的提高机构振动加剧, 进而影响轨迹姿态和扎穴效果。喷肥针为直接与土壤接触的机构执行端, 不同的行星架转速及机具前进速度等工况导致喷肥针受力变化, 是造成振动的直接因素, 因此研究喷肥针受力的变化规律, 为优化设计等提供参考。

2.1 动力学测定系统设计

(1) 试验仪器

试验仪器包括 INV1861A 型便携式应变调理仪, 共有 8 个通道可选用, 试验过程中接收喷肥针的电压信号; INV3018C-24 型信号采集仪为东方振动噪声研究所生产, 将模拟信号转化为数字信号, 并经过除噪、信号放大等预处理; 与信号采集仪配套有 DASP-10 软件, 便于输出曲线和调用数据。试验前须对静止状态下贴有应变片传感器的喷肥针进行标定, 以减少测定过程中的系统误差。

(2) 系统组成

根据扎穴机构实际工作状况, 结合室内土槽试验台架自主设计搭建了一套动力学测试系统, 如

图 4 所示。测试时, 将应变片传感器粘贴于扎穴机构喷肥针靠近顶端的圆柱面上, 由电动机驱动扎穴机构工作, 通过变频器调控移动土槽的前进速度及行星架转速, 土壤含水率为 20%, 坚实度为 0.6 MPa。当喷肥针扎入土壤施肥时受到土壤反力, 并使其产生微小变形, 应变片传感器将变化的电压信号传至动态应变仪, 通过计算机配套软件对应变曲线进行处理^[16-18], 分析作业过程中喷肥针受到土壤反作用力的变化情况, 进而找到随工况变化的规律。

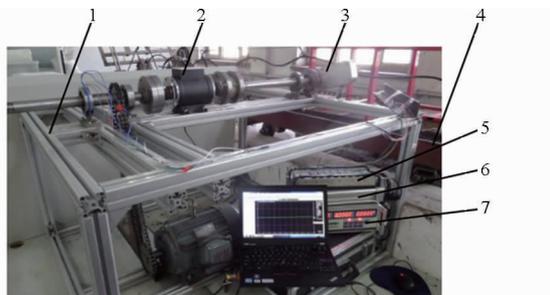


图 4 扎穴机构动力学试验台

Fig. 4 Dynamics test bench of pricking hole mechanism

1. 试验台架
2. 扭矩传感器
3. 扎穴机构
4. 移动土槽
5. 应变调理仪
6. 数据采集仪
7. 扭矩转速测量仪

(3) 应变片传感器设计

为保证试验测定精确度, 信号采集系统由 2 组 BX120-0.5AA 型应变片传感器全桥式连接而成, 如图 5 所示, 应变片参数为型号 BX120-0.5AA, 电阻 $(119.9 \pm 0.1) \Omega$, 敏感栅尺寸 $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 灵敏系数 $(2.08 \pm 1) \%$ 。

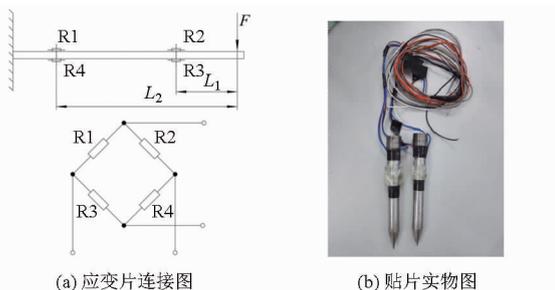


图 5 贴片后喷肥针

Fig. 5 Spray fertilizer needle after patching

由图 5a 可知, $R1$ 与 $R4$ 、 $R2$ 与 $R3$ 均关于弹性元件中心对称分布。以喷肥针弯曲力的测量为例进行分析, 其受力相当于悬臂梁。当喷肥针受到土壤弯曲反作用力 F 时, 根据应变片排布规律及胡克定律, 将所测量微应变数据转化为土壤弯曲反作用力, 转化公式为

$$M = F_1 (L_2 - L_1) \quad (1)$$

相应断面上最大应力为

$$\sigma = \frac{M}{W} = E \varepsilon \quad (2)$$

$$\text{则有 } \varepsilon = \frac{32M}{\pi ED^3(1-\alpha^4)} = \frac{32F_1(L_2-L_1)}{\pi ED^3(1-\alpha^4)} \quad (3)$$

式中 W ——抗弯截面系数, mm^3
 d ——喷肥针内圆直径, mm
 D ——喷肥针外圆直径, mm
 α ——内径 d 与外径 D 之比
 ε ——喷肥针应变
 F_1 ——喷肥针受到土壤弯曲作用力, N
 E ——弹齿弹性模量, N/mm^2
 L_1, L_2 ——受力点到应变片距离, mm

在测试过程中,喷肥针弹性模量 E 及抗弯截面系数 W 恒定不变,应变片传感器粘贴位置固定,其受力点距离 L_1 和 L_2 均为定值,因此作业过程中喷肥针受到的土壤反作用力仅与应变有关。

2.2 试验材料与方法

本次试验在土槽实验室进行,为便于动力学参数的测定,根据旱田中耕时期的土壤状况,调整土壤硬度为 0.6 MPa ,含水率为 20% 。

为分析不同工作参数下喷肥针作用力变化规律,选取土槽车前进速度、扎穴机构行星架转速为试验因素,土壤对喷肥针的反作用力为测定指标,进行单因素试验,根据预试验确定各因素水平,如表 1 所示。

表 1 单因素试验水平编码

Tab. 1 Coding and levels of single factors experiment

水平	试验因素	
	前进速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	行星架转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1	0.6	40
2	0.7	60
3	0.8	80
4	0.9	100
5	1.0	120

2.3 测试曲线分析

试验时,喷肥针受到土壤反作用力产生的微变形量通过动态应变仪实时传至计算机,运用 DASP-V10 软件显示受力波形并对数据进行存储和处理,得到微应变随运动时间的变化规律。

根据前文将土壤反作用力分为 2 个方向力,任取拉压力 F_{A2} 中一组试验分析其应变曲线趋势,土槽车前进速度为 0.8 m/s 、行星架转速为 80 r/min 时,应变曲线如图 6 所示。扎穴机构工作过程分为扎穴阶段和空行程阶段,由于空行程喷肥针未与土壤接触,因此土壤反作用力只存在于扎穴阶段,试验过程中以一套喷肥针作为研究对象。由图 6 中可看出由于各阶段受力不同因此应变值差异较大,红色区域历时 0.75 s 对应着一个完整的周期。对一个周

期内应变曲线的实际意义与发生变化波动的原因加以分析,前 0.5 s 空行程阶段应变在 $0 \mu\text{e}$ 附近波动,后 0.25 s 是一个扎穴行程,随着入土深度的增加应变值逐渐变大,入土最深点即为应变最大点,喷肥针出土应变的变化与入土过程恰好相反。根据测试系统标定的系数可将应变转化为土壤反作用力,在喷肥针进入土壤最低点时反作用力最大,因此在结构设计和动力学特性理论分析时不可忽略。

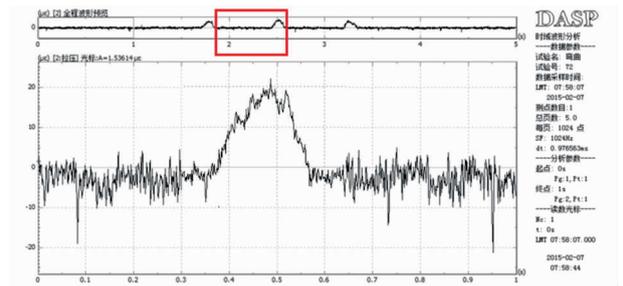


图 6 喷肥针拉压力测试结果

Fig. 6 Tension force test result of spray fertilizer needle

3 试验结果与分析

对土槽车前进速度、扎穴机构行星架转速 2 个因素进行单因素扎穴试验,分析扎穴过程中各因素对土壤作用力的影响规律,得出其相应回归方程。各单因素试验结果如表 2~5 所示,其影响变化趋势及回归方程如图 7 所示。

表 2 不同前进速度时的拉压力

Tab. 2 Tension force at different forward speeds N

前进速度 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	次序			平均值
	1	2	3	
0.6	25.584	26.312	25.912	25.936
0.7	22.680	22.968	22.680	22.796
0.8	21.284	21.628	20.736	21.216
0.9	20.880	21.220	20.024	20.708
1.0	20.452	19.160	19.464	19.944

注:试验中行架架转速为 40 r/min ,喷肥针入土深度为 70 mm 。

表 3 不同前进速度时的弯曲力

Tab. 3 Bending force at different forward speeds N

前进速度 / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	次序			平均值
	1	2	3	
0.6	8.54	8.69	8.63	8.62
0.7	11.93	12.45	11.92	12.10
0.8	26.37	26.44	26.15	26.32
0.9	50.49	50.53	50.66	50.56
1.0	75.32	75.69	74.89	75.30

注:试验中行架架转速为 40 r/min ,喷肥针入土深度为 70 mm 。

3.1 前进速度对力的影响

当行星架转速为 40 r/min 、入土深度为 70 mm

表4 不同行星架转速时的拉压力

Tab.4 Tension force at different rotation speeds N

转速 $/(r \cdot \min^{-1})$	次序			平均值
	1	2	3	
40	25.584	26.312	25.912	25.936
60	25.484	25.552	25.572	25.536
80	25.168	25.260	25.268	25.232
100	24.704	24.752	24.752	24.736
120	24.300	24.424	24.236	24.336

注:试验中土槽车前进速度为0.6 m/s,喷肥针入土深度为70 mm。

表5 不同行星架转速时的弯曲力

Tab.5 Bending force at different working speeds N

转速 $/(r \cdot \min^{-1})$	次序			平均值
	1	2	3	
40	8.54	8.69	8.63	8.62
60	20.79	21.12	20.55	20.81
80	32.98	33.17	32.91	33.03
100	45.11	45.43	45.12	45.21
120	57.36	57.40	57.50	57.42

注:试验中土槽车前进速度为0.6 m/s,喷肥针入土深度为70 mm。

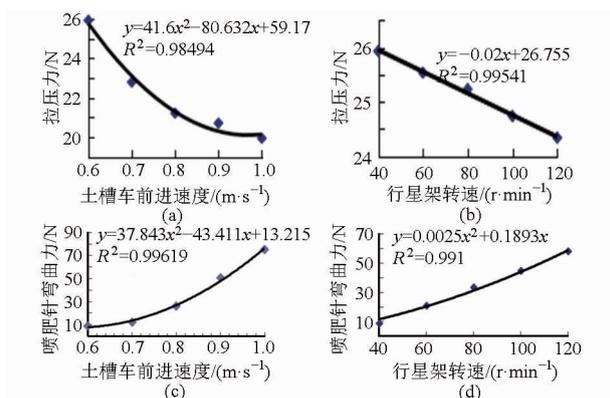


图7 土壤作用力变化曲线

Fig.7 Variation curves of soil force

时,土槽车前进速度对土壤拉压力影响趋势如图7a所示。试验结果表明,前进速度为0.6~0.8 m/s时,喷肥针受到的土壤拉压力随速度增加而减小。前进速度为0.8~1.0 m/s时,作用力下降趋势变缓。拉压力随土槽车前进速度变化的回归方程为 $y = 41.6x^2 - 80.632x + 59.17$,决定系数 $R^2 = 0.98494$ 。随着前进速度的增加,喷肥针针尖部分与土壤颗粒的作用时间变短,微变形量减小导致作用力下降趋势变缓。

行星架转速为40 r/min、入土深度为70 mm时,土槽车前进速度对土壤弯曲力影响趋势如图7c所示。试验结果表明,前进速度为0.6~0.8 m/s时,喷肥针受到的土壤弯曲力随速度增加而增大。前进速度为0.8~1 m/s时,弯曲力增加趋势明显。弯曲力随土槽车前进速度变化的回归方程 $y = 37.843x^2 - 43.411x + 13.215$,决定系数为 $R^2 = 0.99619$ 。

3.2 行星架转速对力的影响

前进速度为0.6 m/s、入土深度为70 mm时,行星架转速对土壤拉压力影响趋势如图7b所示。试验结果表明,行星架转速为40~120 r/min时,喷肥针受到的土壤拉压力随前进速度增加而减小,呈线性变化规律。拉压力随行星架转速变化的回归方程为 $y = -0.02x + 26.755$,决定系数为 $R^2 = 0.99541$ 。相同试验条件下,行星架转速对喷肥针受到的弯曲力的影响趋势如图7d所示,弯曲力随着行星架转速的增加而增大,呈非线性变化规律,回归方程 $y = 0.0025x^2 + 0.1893x$,决定系数为 $R^2 = 0.991$ 。随着行星架转速的增加,土壤对针体的弯曲作用增强,弯曲分力变大。

随行星架转速从40 r/min至120 r/min增大喷肥针拉压力和弯曲力增大,表明力的大小受行星架转速影响较大;当行星架转速为40 r/min时,随着土槽车前进速度的增大,拉压力和弯曲力平均变化数值分别为19.944~25.936 N和8.62~75.32 N。由数值可知,弯曲力数值变化明显大于拉压力,进而表明弯曲力可为喷肥针的结构参数设计和耐磨材料的选取等提供依据。

4 结论

(1)设计了一种新型双斜孔式喷肥针,并对其进行了受力分析,为后续的扎穴机构动力学研究提供理论参考。

(2)设计了喷肥针动力学测定系统,以土槽车前进速度和行星架转速为影响因素进行了试验,获得了土壤反作用力的变化规律。试验结果表明,随着土槽车前进速度的增加喷肥针受到的拉压力减小,而弯曲力增加;随着行星架转速的增加拉压力线性减小,弯曲力非线性增加,测得的拉压力变化范围为19.944~25.936 N;弯曲力变化范围为8.62~75.32 N。

参考文献

- 张义峰,杨景波,衣淑娟. 牧草免耕播种与液体施肥机的设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2011,23(4):20-22. ZHANG Yifeng, YANG Jingbo, YI Shujuan. Design on machine of fodder grass zero tillage seeding and liquid apply fertilizer[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University,2011,23(4):20-22. (in Chinese)
- 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.

- 3 王金武,周文琪,张春风,等. 非规则齿轮行星系扎穴机构反求设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(11):70-75.
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, ZHANG Chunfeng, et al. Reverse design and experiment of non-circular gear planetary system picking hole mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11):70-75. (in Chinese)
- 4 王金峰,王金武,鞠金艳,等. 深施型液态施肥机扎穴机构研究进展[J]. 东北农业大学学报,2013,44(5):157-160.
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, JU Jinyan, et al. Research progress on pricking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(5):157-160. (in Chinese)
- 5 王金峰,王金武,葛宜元. 深施型液态施肥装置的设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(4):58-63.
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, GE Yiyuan. Optimization design and test on picking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):58-63. (in Chinese)
- 6 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.
- 7 张春风. 非圆齿轮行星系扎穴机构的反求设计与仿真[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.
- 8 王金武,王金峰,鞠金艳. 深施型液态施肥机扎穴机构动力学优化[J]. 农业工程学报,2011,27(1):165-169.
WANG Jinwu, WANG Jinfeng, JU Jinyan. Dynamics optimization for pricking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):165-169. (in Chinese)
- 9 YOSHIKI Yokoyama, KIYOSHI Ogawa. Dynamic characteristic of the noncircular planetary gear mechanisms with nonuniform motion[J]. Bulletin of the JSME, 1974, 17(103):149-156.
- 10 陈建能,赵匀,李革,等. 椭圆齿轮行星系分插机构动力学特性的试验[J]. 农业机械学报,2006,37(1):40-41,46.
CHEN Jianneng, ZHAO Yun, LI Ge, et al. Study of dynamic characteristics of transplanting mechanism with elliptic planetary gears through experiment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1):40-41,46. (in Chinese)
- 11 刘安. 蔬菜钵苗移栽机取苗机构的动力学分析与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2013.
- 12 俞高红,陈建能,赵凤芹,等. 正齿行星轮分插机构的动力学分析[J]. 农业机械学报,2005,36(4):51-55.
YU Gaohong, CHEN Jianneng, ZHAO Fengqin, et al. Dynamics analysis of transplanting mechanism with planetary spur gears[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4):51-55. (in Chinese)
- 13 王英,陈建能,周丽莎,等. 步行式插秧机共轭推秧装置动力学分析与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):47-53.
WANG Ying, CHEN Jianneng, ZHOU Lisha, et al. Dynamics analysis and experiment of conjugate cam seedling-pushing device applied on walking-rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10):47-53. (in Chinese)
- 14 叶秉良,刘安,俞高红,等. 蔬菜钵苗旋转式取苗机构动力学分析与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(6):71-78.
YE Bingliang, LIU An, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and test on rotary pick-up mechanism for vegetable pot-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):71-78. (in Chinese)
- 15 袁鹏,王德石,王树宗. 对置式凸轮发动机运动学与动力学研究[J]. 鱼雷技术,2007,15(6):13-17.
YUAN Peng, WANG Deshi, WANG Shuzong. Kinematics and dynamics of contrapositive cam engine[J]. Torpedo Technology, 2007, 15(6):13-17. (in Chinese)
- 16 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- 17 刘丽敏,李革,赵匀,等. 旋转式分插机构动力学试验台的研制[J]. 农机化研究,2005(4):134-136.
LIU Limin, LI Ge, ZHAO Yun, et al. Development of the testing desk for measuring dynamics of rotary transplanting mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(4):134-136. (in Chinese)
- 18 赵雄. 二阶非圆齿轮行星轮系钵苗移栽机取苗机构优化设计与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2014.