

液肥深施肥差动式双向供肥分配装置设计与试验

王金武 周文琪 白海超 王金峰 黄会男 王忠波

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对深施肥型液态施肥机分配器工作效率低及液肥能量损失大问题, 设计与斜置式扎穴机构相配套的差动式双向供肥分配装置。为了避免差动式双向供肥分配装置与斜置式扎穴机构之间连接的软管发生缠绕, 采用行星轮-内齿圈组合机构的传动原理, 并根据斜置式扎穴机构喷肥针肥路接口的运动特性, 确定差动式双向供肥分配装置各组件的传动比; 为满足喷肥针入出土即刻喷肥特性, 进行了差动式双向供肥分配装置空间凸轮的设计, 得到相应的结构参数: 推程运动角 31.8° 、回程运动角 25.6° 、平均圆柱半径 100 mm、行程最大值 6 mm。对行星轮进行运动学分析, 得到行星轮的运动轨迹方程。进行差动式双向供肥分配装置性能试验, 记录在一个工作周期内差动式双向供肥分配装置与斜置式扎穴机构每次间隔旋转 45° 时的输肥软管运动状态, 验证软管是否会发生缠绕; 以液压泵压力为影响因子, 分别测得不同水平下每 5 s 内的施肥量, 求得喷肥针与液压泵出口处的流速, 并得到差动式双向供肥分配装置液肥能量损失值及节能损失规律, 分配装置具有高效率的喷肥性能。

关键词: 深施肥型液态施肥机; 供肥分配装置; 运动学分析; 性能试验

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)06-0105-07

Design and Experiment of Differential-type Bidirectional Distribution Device for Fertilizer Supply for Deep-fertilizer Liquid Fertilizer Application

WANG Jinwu ZHOU Wenqi BAI Haichao WANG Jinfeng HUANG Huinan WANG Zhongbo
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the problems that low working efficiency and energy loss of liquid fertilizer of distributor for deep-fertilization liquid fertilizer applicator, the differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply that matched pricking hole mechanism for oblique type was designed. In order to avoid the winding of connecting hoses between the differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply and pricking hole mechanism for oblique type, the mechanism transmission principle that consisted of double planetary gears and annular gear was employed, and the transmission ratio of differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply was obtained based on the movement characteristics of spray fertilizer needle hoses couler of pricking hole mechanism for oblique type; the space-cam of differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply was designed to meet the characteristic that spray fertilizer needle sprayed liquid fertilizer, and the structure parameters of device were obtained, i. e., the upon movement angle of space-cam was 31.8° , the down movement angle of space-cam was 25.6° , base circle radius of space-cam was 100 mm and the maximum value of space-cam stroke was 6 mm. The kinematics of double planetary gears was analyzed, and the motion trajectory equation of planetary gears was obtained. The performance experiment of differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply was done. The hose status was recorded between differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply and pricking hole mechanism for oblique type when the device worked at each time interval of 45° rotation, the connecting hoses that did not twine were verified; the pressure of hydraulic pump as the influence factor, the amounts of liquid fertilizer were measured per 5 s at different levels, the flow velocity of injection needle and hydraulic pump outlet were obtained, the rule of energy loss, value of energy loss for the device and the higher efficiency to spray liquid fertilizer of the device were obtained.

Key words: deep-fertilizer liquid fertilizer application; distribution device for fertilizer supply; kinematics analysis; performance experiment

收稿日期: 2017-12-05 修回日期: 2018-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675093)

作者简介: 王金武(1968—), 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: jinwu@163.com

通信作者: 王金峰(1981—), 男, 教授, 主要从事田间机械研究, E-mail: jinfeng_w@126.com

0 引言

液肥深施技术是将液态肥料深施到作物根系附近的一项施肥技术^[1-2],具有使作物增产效果显著等优点,从而被广泛应用。

分配器是深施型液态施肥机的核心工作部件,该机构不断地向扎穴机构^[3-5]提供液态肥,满足扎穴机构出土喷肥的功能,其性能的优劣直接决定了扎穴机构喷肥质量和供肥效率^[6-7]。目前深施型液态施肥机分配器分为凸轮间歇式分配器^[8]与液肥转子式转换器^[9]。凸轮间歇式分配器利用盘型凸轮机构的旋转运动特性,使顶杆作上、下往复运动,满足液肥间歇喷施功能即喷肥针入出土喷肥。此种施肥系统的结构复杂,液肥在分配器到扎穴机构管路系统流动过程中能量损失较大^[10]。液肥转子式转换器通过空间凸轮以及差动轮系的结构特性,软管可直接将转换器肥路接口与扎穴机构喷肥针肥路接口相互连接(扎穴机构喷肥针为围绕太阳轮的旋转运动),此机构可减少液肥通过扎穴机构的复杂管路系统,其能量损失小。但此转换器由于与两个喷肥针配套工作,仅能满足扎穴机构单

侧喷肥。且安装位置只能置于喷肥针侧面,所以,工作过程中输肥软管易与施肥的作物发生干涉,施肥效率低。

为了满足液肥能量损失小与高效率施肥,本文根据斜置式扎穴机构的结构形式,设计与其配套的差动式双向供肥分配装置,并通过试验进行机构性能的验证。

1 差动式双向供肥分配装置整体结构与工作原理

差动式双向供肥分配装置主要由链轮轴壳体、链轮轴、主轴套、副轴套、行星轮、内齿圈、顶杆、外壳体、空间凸轮等部分组成(以单侧进行说明)。链轮轴贯穿链轮轴壳体分别与副轴套、主轴套通过花键连接,主轴套一端面与副轴套一端面固结。主轴套另一端面圆周对称镶嵌 2 个行星轮,与行星轮啮合的内齿圈套在外壳体上且其上固结 1 个链轮圈。副轴套内对称镶嵌 2 个顶杆,与顶杆上滚子处配合的空间凸轮固结在外壳体上,外壳体与链轮轴壳体固结。总装图如图 1a 所示,关键零件如图 1b 所示。

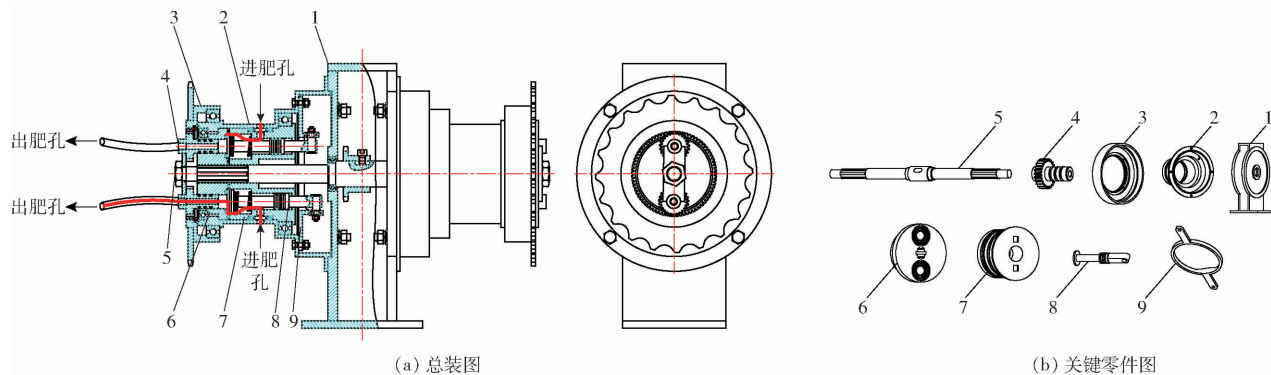


图 1 差动式双向供肥分配装置

Fig. 1 Differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply

1. 链轮轴壳体 2. 外壳体 3. 内齿圈 4. 行星轮 5. 链轮轴 6. 主轴套 7. 副轴套 8. 顶杆 9. 空间凸轮

工作时,外动力源分别驱动链轮轴与内齿圈。链轮轴带动主轴套与副轴套作旋转运动,主轴套带动行星轮作周向转动,同时与行星轮相互啮合的内齿圈按一定的转速比作相同运动(此处行星轮运动状态为围绕轴心线自转与链轮轴心线公转的合成运动)。主轴套与副轴套、行星轮、内齿圈组成差动轮系系统,使得行星轮角速度为零。副轴套带动顶杆作旋转运动,在压力弹簧的作用下,使顶杆在空间凸轮上作左右往复直线运动,实现主轴套与副轴套端面处的液肥流口打开和闭合。

液肥从进肥孔以一定压力流入,当顶杆运动到空间凸轮的推程到回程阶段时,液肥从出肥孔流出,图 1a 中红色曲线为液肥流动方向,经软管最后由喷

肥针施入土壤中。当顶杆运动到近休止阶段时,顶杆关闭,液肥储存在主轴套与副轴套腔内。

2 关键部件结构参数的确定

2.1 传动比设计

斜置式扎穴机构中喷肥针肥路接口处的运动为围绕太阳轮旋转中心的圆周运动,以及相对于行星架的非匀速转动,如图 2 所示。前期研究表明,在两种运动合成下,肥路接口处与水平面的夹角呈周期性变化、摆动幅度为 47.6° 。所以,采用双行星轮-内齿圈组合机构,满足差动式双向供肥分配装置肥路接口处角速度为零以及围绕旋转中心作圆周运动的匹配特性要求,使其与斜置式扎穴机构喷

肥针肥路接口处运动方式一致,解决了差动式双向供肥分配装置与斜置式扎穴机构之间连接软管缠绕的问题。双行星轮-内齿圈组合机构简图如图 3 所示。

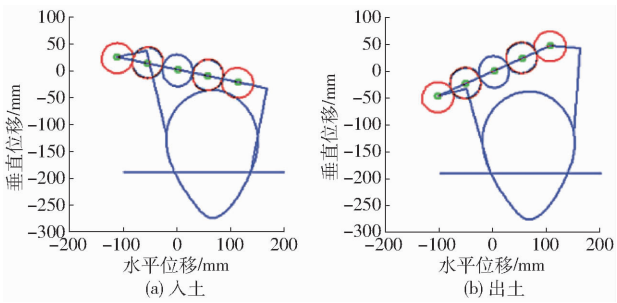


图 2 喷肥针软管接口处摆角变化

Fig. 2 Swing angle change of hose mouth spray fertilizer needle

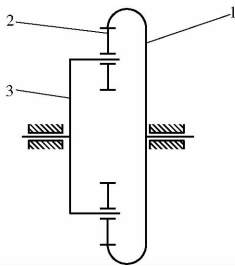


图 3 双行星轮-内齿圈组合机构

Fig. 3 Combination mechanism of double planetary gears-annular gear

1. 内齿圈 2. 行星轮 3. 行星架 H

根据差动式双向供肥分配装置结构尺寸的合理配置,设定机构中内齿圈与行星轮的齿数分别为 75、25,可得行星轮与内齿圈的传动比为^[11-12]

$$i_{21H} = \frac{\omega_{2H}}{\omega_{1H}} = \frac{\omega_2 - \omega_H}{\omega_1 - \omega_H} = \frac{z_1}{z_2} = 3 \quad (1)$$

式中 ω_1 ——内齿圈角速度,rad/s
 ω_2 ——行星轮角速度,rad/s
 ω_H ——行星架角速度,rad/s
 ω_{1H} ——转化后内齿圈角速度,rad/s
 ω_{2H} ——转化后行星轮角速度,rad/s
 z_1 ——内齿圈齿数
 z_2 ——行星轮齿数

根据行星轮角速度为零的特性要求,由式(1)可得

$$\omega_1 = \frac{2}{3}\omega_H \quad (2)$$

即链轮轴角速度与内齿圈角速度之比为 3:2。

2.2 空间凸轮设计

空间凸轮需满足顶杆在其轮廓线滑动时,喷肥针入土即喷肥,出土即停喷。顶杆在推程阶段和回程阶段的运动可采用简谐运动规律,空间凸轮廓线可采用展开法求得,如图 4 所示。横坐标表示凸轮

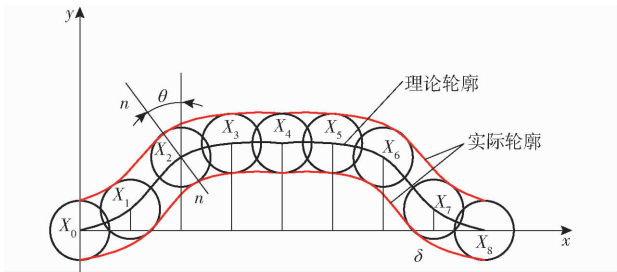


图 4 空间凸轮廓线展开图

Fig. 4 Cylindrical cam lineament expansion drawing

转角,用 δ 表示;纵坐标表示顶杆位移,用 s 表示,则展开的理论轮廓线坐标为^[13-14]

$$\begin{cases} x_1 = r_0 \delta \\ y_1 = s \end{cases} \quad (3)$$

式中 (x_1, y_1) ——空间凸轮理论轮廓线坐标,mm
 r_0 ——平均圆柱半径,mm
 δ ——空间凸轮转角,rad
 s ——顶杆位移,mm

顶杆位移采用余弦加速度运动规律求得,计算式^[15-16]为

$$s = \begin{cases} \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi \delta}{\delta_{01}} \right) & (0 \leq \delta \leq \delta_{01}) \\ \frac{h}{2} \left[1 - \cos \frac{\pi(\delta - \delta_{01})}{\delta_{02}} \right] & (\delta_{01} < \delta < \delta_{01} + \delta_{02}) \\ 0 & (\delta_{01} + \delta_{02} < \delta \leq 2\pi) \end{cases} \quad (4)$$

式中 h ——顶杆行程,mm
 δ_{01} ——推程运动角,rad
 δ_{02} ——回程运动角,rad

工作轮廓曲线坐标为^[17]

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + r_r \sin \theta \\ y_2 = y_1 - r_r \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\sin \theta = (d_{x_1}/d_\delta) / \sqrt{(d_{x_1}/d_\delta)^2 + (d_{y_1}/d_\delta)^2}$
 $\cos \theta = -(d_{y_1}/d_\delta) / \sqrt{(d_{x_1}/d_\delta)^2 + (d_{y_1}/d_\delta)^2}$

式中 (x_2, y_2) ——凸轮工作轮廓线坐标,mm
 r_r ——顶杆滚子半径,mm
 θ ——压力角,rad
 d_{x_1} —— x_1 的增量,mm
 d_{y_1} —— y_1 的增量,mm
 d_δ —— δ 的增量,rad

根据差动式双向供肥分配装置整体结构尺寸确定空间凸轮机构的平均圆柱半径为 100 mm,行程最大值为 6 mm,顶杆滚子半径为 10 mm。通过喷肥针入出土与水平面的夹角确定空间凸轮的推程运动角为 31.8°,回程运动角为 25.6°,获得空间凸轮三维模型如图 5 所示。



图 5 空间凸轮三维模型
Fig. 5 Three-dimensional model of space-cam

3 行星轮运动轨迹分析

根据差动式双向供肥分配装置双行星轮-内齿圈的机构特点,将其结构简化为图 6 所示示意图,并建立 XOY 直角坐标系。

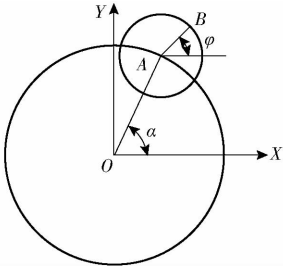


图 6 双行星轮-内齿圈结构示意图
Fig. 6 Structure diagram combination mechanism of double planetary gears - annular gear

A 既为行星轮的转动中心也为行星架 OA 的一个端点,行星架 OA 绕着中心 O 转动。所以行星轮的转动中心 A 为绕着转动中心 O 作半径为 L_{OA} 的圆周运动,其轨迹为以 O 为圆心,半径为 L_{OA} 的圆。行星架 OA 逆时针转动则 α 为正,反则为负。轨迹方程为

$$\begin{cases} x_A = L_{OA}\cos\alpha \\ y_A = L_{OA}\sin\alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中 (x_A, y_A) ——A 点坐标,mm

α ——行星架 OA 与 X 轴的夹角,rad

由于双行星轮-内齿圈组合机构在运动过程中行星轮的角速度为零,即 AB 与 X 轴的夹角 φ 为定值,则行星轮的某一轮齿顶点 B 相对于行星轮转动中心 A 的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_{B,A} = L_{AB}\cos\varphi \\ y_{B,A} = L_{AB}\sin\varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中 $(x_{B,A}, y_{B,A})$ ——行星轮某一轮齿顶点 B 相对于转动中心 A 的坐标,mm

行星轮的某一轮齿顶点 B 的绝对运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_B = L_{OA}\cos\alpha + L_{AB}\cos\varphi \\ y_B = L_{OA}\sin\alpha + L_{AB}\sin\varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中 (x_B, y_B) ——B 点坐标,mm

双行星轮-内齿圈组合机构在运动过程中行星轮的角速度为零,即 φ 为常数,则式(8)中 $L_{AB}\cos\varphi$ 与 $L_{AB}\sin\varphi$ 为常数。所以,行星轮的某一轮齿顶点 B 的运动轨迹为以 $(L_{AB}\cos\varphi, L_{AB}\sin\varphi)$ 为中心, L_{OA} 为半径的圆,即顶点 B 的运动轨迹与转动中心 A 的运动轨迹形状相同,只是顶点 B 的转动中心沿 X 轴方向移动 $L_{AB}\cos\varphi$,沿 Y 轴方向移动 $L_{AB}\sin\varphi$ 。

4 性能试验

4.1 软管防缠绕性能测试试验

为了检验差动式双向供肥分配装置与斜置式扎穴机构喷肥针连接的输肥软管互相不缠绕性能,进行测试试验。试验地点为哈尔滨市依兰县示范基地。差动式双向供肥分配装置、斜置式扎穴机构以及输肥连接软管的安装位置如图 7 所示。



图 7 装置安装位置
Fig. 7 Diagram of device installation location

在一个工作周期内,记录差动式双向供肥分配装置与斜置式扎穴机构每次间隔旋转 45° 时的输肥软管工作状态,查看其防缠绕性能。记录的试验结果如图 8 所示。

试验结果表明输肥软管在各个角度位置并未发生缠绕,差动式双向供肥分配装置设计合理,能够解决输肥软管的缠绕问题。斜置式扎穴机构肥路接口与差动式双向供肥分配装置肥路接口的运动方式变化相一致,所以在运动过程中输肥软管未发生缠绕。

4.2 喷肥性能测试试验

4.2.1 试验测试方法

为了检验差动式双向供肥分配装置的喷肥性能,进行了喷肥性能试验,如图 9 所示。

由于伯努利方程的适用条件为定常流动,同时为了计算液肥能量损失的具体数值,试验时将差动式双向供肥分配装置的顶杆置于开度最大状态,即顶杆均处于空间凸轮的远休止角处,此时顶杆的推程为 6 mm。试验中选用的喷肥针含有 2 个喷肥孔,喷肥孔的直径为 2.5 mm,整个装置包含 4 个喷肥

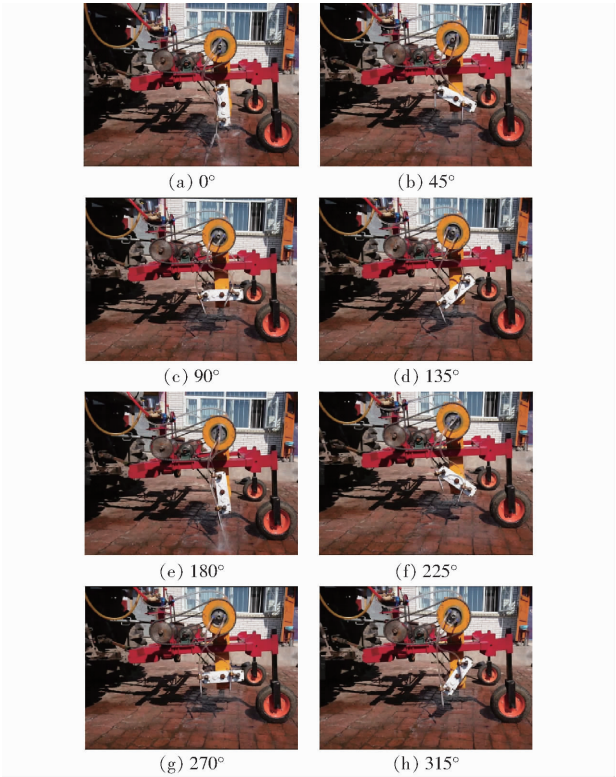


图 8 软管防缠绕性能试验

Fig.8 Performance experiment of anti-winding for hose



图 9 喷肥性能测试试验

Fig.9 Performance experiment of spraying liquid fertilizer

针。试验时,以液压泵压力为影响因子,因子选取 0.2、0.3、0.4 MPa 3 个水平,分别在每个水平下用秒表计时,用量筒与针筒测量喷肥针在一定时间内(试验中以 5 s 为基准)喷出液态肥的体积,每个水平重复 5 次试验。差动式双向供肥分配装置喷肥针的液肥流速和液压泵出口处的流速计算式分别为

$$v_2 = \frac{V}{A_2 t} \tag{9}$$

$$v_1 = \frac{4v_2 A_2}{A_1} \tag{10}$$

式中 v_2 ——喷肥针出口流速,m/s

V ——液肥体积, m^3
 A_2 ——单个喷肥针出口处横截面积, m^2
 t ——时间,s
 v_1 ——液态肥在液压泵出口处流速,m/s
 A_1 ——液压泵出口横截面面积, m^2

最终再根据伯努利方程^[18]确定新装置的节能情况。

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \tag{11}$$

式中 p_1 ——液压泵出口的液肥静压,Pa
 p_2 ——喷肥针出口的液肥静压,Pa
 ρ ——液肥密度, kg/m^3
 z_1 ——液压泵出口位置水头,m
 z_2 ——喷肥针出口位置水头,m
 h_w ——液肥总水头损失,m

4.2.2 试验结果与分析

试验数据如表 1 所示,通过表 1 中液肥的体积总和与时间总和,经计算可获得喷肥针出口在不同压力下液态肥的流速为 8.7、10.4、12.1 m/s。液压泵出口处的横截面直径为 11 mm,则流速通过流体的连续性方程(式(10))计算求得为 1.8、2.1、2.5 m/s。

表 1 新管路系统液肥体积与时间数据
Tab.1 New pipeline system liquid fertilizer volume and time data

序号	压力/MPa					
	0.2		0.3		0.4	
	体积/mL	时间/s	体积/mL	时间/s	体积/mL	时间/s
1	846.0	4.95	1 025.6	4.89	1 205.0	5.03
2	843.4	5.02	1 017.8	4.98	1 201.4	5.10
3	850.6	5.03	1 030.0	5.02	1 201.0	5.13
4	854.8	5.02	1 018.0	5.06	1 205.0	4.98
5	863.0	4.92	1 020.0	5.04	1 195.0	5.04
总和	4 257.8	24.94	5 111.4	24.99	6 007.4	25.28

由于位置水头差约等于 1.0 m,喷肥针出口处液肥流动为自由出流,因此 $p_2 - p_1$ 为零。根据喷肥针出口处、液压泵出口处的速度及伯努利方程,可得整个管路系统的液肥随压力变化的总水头损失^[19-20]为 9.0、12.6、15.0 m(H_2O)。

运用同样的测试与计算方法对液肥转子式转换器进行试验,得到总水头损失分别为 11.1、15.7、20.5 m(H_2O)。所以,差动式双向供肥分配装置的管路系统节约能量分别为 2.1、3.1、5.5 m(H_2O)。运用 Excel 软件对其进行分析,得到节约能量与液压泵压力的关系如图 10 所示。

根据总水头损失,可得随着液泵压力的逐渐增大,液肥能量损失逐渐增大。且从图 10 中可以看

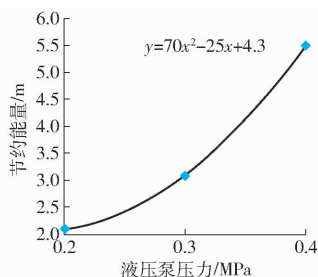


图10 节约能量与液压泵压力关系曲线

Fig. 10 Relationship curve of spraying liquid fertilizer saving energy and hydraulic pump pressure

出,节约能量逐渐增大呈抛物线变化规律,曲线函数为 $y = 70x^2 - 25x + 4.3$,由试验结果得知,差动式双向供肥分配装置喷肥性能较高。

5 结论

(1)设计了差动式双向供肥分配装置,并阐述了机构的工作原理,为了达到与喷肥针软管接头一致的运动规律,确定了机构的传动比以及关键部件

参数。即链轮轴角速度与内齿圈角速度之比为3:2。空间凸轮的推程运动角为 31.8° ,回程运动角为 25.6° ,平均圆柱半径为100 mm,行程最大值为6 mm。

(2)对机构进行运动学分析,建立了行星轮旋转中心A处绝对运动轨迹方程,并得到行星轮上某一点B的运动轨迹。从方程获知,B点作以 $(L_{AB}\cos\varphi, L_{AB}\sin\varphi)$ 为中心、 L_{OA} 为半径的圆周运动。所以,运动学分析可充分揭示软管不缠绕的机理。

(3)进行机构防缠绕试验,以 360° 为一周期,观测软管之间运动状态,试验结果表明,软管之间无缠绕。进行喷肥性能对比试验,通过在一定时间内,根据不同液压泵压力,测得了喷肥针喷肥口处液肥的容量,求得喷肥针出口处以及液压泵出口处的速度,并根据伯努利方程计算出整个管路系统的液肥能量损失为9.0、12.6、15.0 m(H_2O),节约能量为2.1、3.1、5.5 m(H_2O)。试验结果表明,差动式双向供肥分配装置的节约能量逐渐增大呈现抛物线变化规律,喷肥性能高。

参 考 文 献

- VIEIRA-MEGDA M X, MARISNO E, LEITE J M, et al. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(2): 241-257.
- COSTA M C G, VITTI G C, CANTARELLA H. N-NH₃ losses from nitrogen sources applied over unburned sugarcane straw[J]. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2003, 27(4): 631-637.
- 王金武,周文琪,王金峰,等.斜置式非规则齿轮行星轮系扎穴机构工作参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 66-70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170608&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.008.
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, WANG Jinfeng, et al. Experiment and optimization of working parameters for pricking hole mechanism of oblique type non-circular gears planetary system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 66-70. (in Chinese)
- 王金武,周文琪,王秀,等.基于三次拉格朗日曲线拟合轨迹的斜置式扎穴机构研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 79-85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170509&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.009.
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, WANG Xiu, et al. Oblique type pricking hole mechanism based on Lagrange curve for cubic fitting trajectory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 79-85. (in Chinese)
- 冯金龙,王金武,周文琪,等.变形椭圆齿轮式扎穴机构设计与工作参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 90-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170411&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.011.
FENG Jinlong, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Design of pricking hole mechanism with deformation elliptical gears and optimization of experiment with work parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 90-96. (in Chinese)
- 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)
- 王金武,潘振伟,周文琪,等.SYJ-2型液肥变量施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 53-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150708&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.008.
WANG Jinwu, PAN Zhenwei, ZHOU Wenqi, et al. Design and test of SYJ-2 type liquid variable fertilizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 53-58. (in Chinese)
- 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/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 77-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130414&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.014.
WANG Jinwu, HE Jiannan, PAN Zhenwei, et al. Kinematic analysis and simulation of liquid fertilizer distributor's cam for liquid fertilizer applicator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 77-82. (in Chinese)
- 王金武,潘振伟,杨欣伦,等.深施型液态施肥机液肥转子式转换器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 110-115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141018&journal_id=jcsam. DOI:10.

- 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 10. 018.
- WANG Jinwu, PAN Zhenwei, YANG Xinlun, et al. Design and experiment of rotary converter of liquid fertilizer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 110–115. (in Chinese)
- 10 苗森春. 离心泵作液力透平的能量转换特性及叶轮优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- MIAO Senchun. Research on energy conversion characteristics and impeller optimization of pump as turbine [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese)
- 11 薛会玲, 刘更, 杨小辉. 周转轮系功率流与传动效率分析的简化方法[J]. 机械传动, 2017, 41(1): 43–48.
- XUE Huiling, LIU Geng, YANG Xiaohui. Simplified method for the power flow and transmission efficiency analysis of epicyclic gear train [J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 41(1): 43–48. (in Chinese)
- 12 孙桓. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- 13 潘振伟. 液肥肥路转换器及输肥系统设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- PAN Zhenwei. Design and experimental study of liquid fertilizer pipeline converter and transporting liquid fertilizer system [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 14 叶秉良, 李丽, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗移栽机取苗臂凸轮机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 21–29.
- YE Bingliang, LI Li, YU Gaohong, et al. Design and test on cam mechanism of seedling pick-up arm for vegetable transplanter for pot seedling [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 21–29. (in Chinese)
- 15 LIU G D, CHEN G H, PAN Z X, et al. Application of the cubic spline interpolation function in the kinematic analysis of cam mechanism [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2007, 31(5): 53–56.
- 16 ZHOU Changjiang, HU Bo, CHEN Siyu, et al. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 104: 118–129.
- 17 张俊, 张晓婷. 流体传输中流体阻力和水头损失的计算[J]. 流体传动与控制, 2011(4): 24–27.
- ZHANG Jun, ZHANG Xiaoting. The analysis of the fluid resistance and the pressure loss in fluid transmission system [J]. Fluidpower Transmission and Control, 2011(4): 24–27. (in Chinese)
- 18 李启麟, 刘红霞. 液压传动中的能量损失与压力损失[J]. 液压与气动, 2002(5): 29–30.
- LI Qilin, LIU Hongxia. The loss of energy and the loss of pressure in hydraulic transmission [J]. Hydraulics and Pneumatics, 2002(5): 29–30. (in Chinese)
- 19 赵毅山. 流体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- 20 陈波, 高殿荣, 杨超, 等. 基于PDPA的双流体撞击式喷嘴雾化特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 362–369. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170448&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 04. 048.
- CHEN Bo, GAO Dianrong, YANG Chao, et al. Atomizing characteristics of twin-fluid impact nozzle based on PDPA [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 362–369. (in Chinese)

(上接第91页)

- 15 吕金庆, 尚琴琴, 杨颖, 等. 锥盘式撒肥装置的性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 16–24.
- LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Performance analysis and experiment on granular fertilizer spreader with swing disk [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 16–24. (in Chinese)
- 16 刘万俊. 导弹飞行力学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- 17 王安祥, 张晓军, 翟学军, 等. 考虑空气阻力和地球自转的远程抛射体的研究[J]. 力学与实践, 2012, 34(4): 49–56.
- WANG Anxiang, ZHANG Xiaojun, ZHAI Xuejun, et al. Research on a remote projectile considering the air resistance and the earth rotation [J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(4): 49–56. (in Chinese)
- 18 喻莉, 杨植宗, 何艳, 等. 考虑空气阻力的抛体最大射程和最佳抛射角研究[J]. 空军雷达学院学报, 2010, 24(6): 452–453.
- YU Li, YANG Zhizong, HE Yan, et al. Study of maximum range and optimum projection angle of projectile with air resistance [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2010, 24(6): 452–453. (in Chinese)
- 19 COOL S, PIETERS J, MERTENS K C, et al. A simulation of the influence of spinning on the ballistic flight of spherical fertiliser grains [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 105: 121–131.
- 20 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- 21 中国国家标准化管理委员会. 施肥机械试验方法第1部分: 全幅宽施肥机: GB/T 20346.1—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- 22 王浩宇. 水平圆盘式有机肥抛撒部件的试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- WANG Haoyu. Research and test on horizontal disc manure spreader part [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 23 JONES J R, HAYDEN L G, YULE I J. A statistical comparison of international fertiliser spreader test methods—confidence in bout width calculations [J]. Powder Technology, 2008, 184(3): 337–351.
- 24 ISO 5690–2–1984 Equipment for distributing fertilizers—test methods—part2: Fertilizer distributors in lines [S]. 1984.
- 25 ASAE S341.2 Procedure for measuring distribution uniform and calibrating granular broadcast spreaders [S]. 1997.
- 26 潘丽军, 陈锦权. 试验设计与数据处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- 27 FULTON J P, SHEARER S A, CHABRA G. Performance assessment and model development of a variable-rate, spinner-disc fertilizer applicator [J]. Transactions of ASAE, 2001, 44(5): 1071–1081.
- 28 吴辉. 圆盘式施肥机抛撒试验系统开发与撒肥规律研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2007.
- WU Hui. Development and distribution study on the spreading test system for a spinner spreader [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2007. (in Chinese)