# 液态施肥机椭圆齿轮扎穴机构优化设计与仿真\*

郗晓焕 王金武 郎春玲 张成亮

(东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030)

【摘要】 为减少深施液态肥时土壤回带现象,建立了扎穴机构数学模型,利用 VB 编写了计算机辅助分析软件,并仿真得到影响施肥效果的因素以及喷肥针长度、摇臂长度、喷肥针与摇臂的夹角、行星架的初始位置等有关参数。其中一组优化后参数为:摇臂长度 197 mm,喷肥针长度 180 mm,喷肥针与摇臂的夹角 76°,行星架的初始角度 31°,行星轮轴心和喷肥针尖 D 的连线与行星架中心连线的初始夹角 - 70°。通过验证,优化后扎穴机构大大减少了喷肥针土壤回带现象。

关键词:液态施肥机 扎穴机构 优化设计 计算机辅助分析 中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)02-0080-04

# Optimal Design and Simulation on Pricking Hole Mechanism of Liquid Fertilizer Applicator

Xi Xiaohuan Wang Jinwu Lang Chunling Zhang Chengliang (College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

#### Abstract

In order to reduce throwing soil as fertilizing the field, mathematical model of pricking hole mechanism was built, computer aided analysis software was developed in VB language. Simulation results showed that the effort factors of fertilize related to spraying needle, rocker, angle of spraying needle and rocker, planet carrier and so on. One of the optimum parameters were that, the length of rocker was 197mm, spraying needle was 180mm, angle of spraying needle and rocker was 76°, the initial planet carrier of angle was 31° and the initial angle between the line of connection with planet wheel axle and spraying fertilizer needle's D and the line of the center connection of planet carrier was  $-70^{\circ}$ . The optimal model was verified to get well effect on pricking hole mechanism.

Key words Liquid fertilizer, Prick hole mechanism, Optimal design, Computer aided analyzing

### 引言

目前,液态肥的施肥方式有穴施、喷洒、灌溉三 种方式,由于液态肥料易挥发,喷洒和灌溉方式均会 造成资源浪费和环境污染。美国、德国、韩国、日本 等液态肥的施肥方式为叶面喷洒,一般使用喷嘴或 喷枪达到喷洒效果<sup>[1]</sup>。穴施肥料的成本比其他两 种施肥方式高,但可以充分利用肥料,且不会对环境 造成污染,具有较好的发展前景<sup>[2-5]</sup>。目前,深施型 液态施肥机有曲柄滑块机构和曲柄摇杆机构,这些 机构虽然能够达到扎穴喷肥的一般要求,但是运动 平稳性及扎穴频率低。由两个全等的正圆齿轮和两 个全等的椭圆齿轮组成的椭圆齿轮行星系扎穴机构 克服了曲柄滑块机构及曲柄摇杆机构的主要缺陷, 但是结构复杂且存在震动。本文研究椭圆齿轮扎穴 机构,并运用 VB 编程软件实现喷肥针运动姿态的 优化,进而改进扎穴机构的参数及安装角度,并验证 其有效性。

收稿日期:2010-04-22 修回日期:2010-07-23

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50875043)、高等学校博士点专项科研基金资助项目(20102325110002)和黑龙江省留学归国基金资助项目(L08C15)

作者简介: 郗晓焕,硕士生,主要从事机械制造自动化研究, E-mail: xxh1233@126.com

通讯作者: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: jinwuw@163.com

# 1 喷肥针安装及工作原理

玉米株距为 200~330 mm<sup>[6]</sup>,为达到良好的施 肥效果选取穴距为 260 mm。当人土深度达到距离 地表 100~150 mm 范围内土层中,施肥效果最 佳<sup>[7]</sup>。试验所选用的施肥针喷肥口中心距针尖 18 mm,所以针尖的人土深度应在 118~168 mm 之 间<sup>[8]</sup>。在喷肥针扎入土壤过程中液态肥射入土壤 中,从而达到穴施液态肥的目的。

扎穴机构由3个全等椭圆齿轮、行星架、摇臂和 喷肥针组成,如图1所示。其中,A点为太阳轮与中 间椭圆齿轮啮合点,B点为中间椭圆齿轮与行星轮 啮合点,C点为摇臂与喷肥针连接中心,D点为喷肥 针针尖。初始位置时太阳轮、中间椭圆齿轮及行星 轮的长半轴与行星架的中心连线重合,摇臂与行星 轮轴轴心 0,固结为一体,喷肥针通过键与摇臂固结 为一体。运动时两个椭圆齿轮的啮合点始终在轴心 连线 0102上,啮合平稳性较高,并且转速也随着角 位移变化<sup>[9~10]</sup>。行星架固定在轴上,太阳轮固定, 行星架绕轴 0,作圆周运动。中间椭圆齿轮的运动 带动行星轮在周期内摆动。摇臂通过键与扎穴机构 的行星轮连接并在行星轮的带动下绕行星架作圆周 运动。因摇臂与喷肥针连接,进而引起施肥针尖运 行轨迹的变化。通过调整参数,获得了满足施肥机 工作要求的"腰形"相对运动轨迹以及在绝对运动 中实现喷针插入土壤时与地表呈 85°~95°角并沿 入土轨迹返回,减少了土壤回带现象。



图 1 项化 1 初始 女 表 位 直.
Fig. 1 Initial installation position of spraying fertilizer needle
1. 太阳轮 2. 中间椭圆齿轮 3. 行星轮 4. 摇臂 5. 喷肥针

#### 2 建立数学模型

喷肥针初始安装位置的确定与太阳轮和中间椭 圆齿轮的啮合点位置有关。太阳轮在工作中保持静 止并设太阳轮与中间椭圆齿轮啮合点到中心轴的距 离为 $r_1$ ,太阳轮与中间椭圆齿轮啮合点到 $O_2$ 的距离为 $r_2$ ,如图2所示。



Fig. 2 Planet carrier rotated  $\beta$ 

太阳轮与中间椭圆齿轮的啮合点位置<sup>111</sup>可表 示为

$$r_{1} = \frac{ap^{2}}{1 + \sqrt{1 - p^{2}}\cos\beta}$$
(1)

式中 a----椭圆齿轮长半轴,mm

c----椭圆齿轮短半轴,mm

p----椭圆齿轮短轴与长轴的比值

 $p = \frac{c}{a} \quad \beta < 0$ 

β——行星架转过的角度,(°)

假设中间椭圆齿轮固定,行星架绕中间椭圆齿轮运动,中间椭圆齿轮相对于行星架的回转角度为β<sub>21</sub>,则

$$r_{2} = \frac{ap^{2}}{1 - \sqrt{1 - p^{2} \cos\beta_{21}}}$$
(2)  
$$\cos\beta_{21} = \frac{1 - ap^{2}/r_{2}}{\sqrt{1 - p^{2}}}$$

Ħ

其中

根据 cos $\beta_{21} > 0$  或 cos $\beta_{21} < 0$  确定  $\beta_{21}$ 的唯一值。 设中间椭圆齿轮与行星轮啮合点到  $O_2$  的距离为  $r_4$ , 中间椭圆齿轮与行星轮啮合点到行星轮轴轴心的距 离为  $r_3$ ,则

 $r_1 + r_2 = 2a$ 

$$r_4 = \frac{ap^2}{1 + \sqrt{1 - p^2 \cos\beta_{21}}}$$
(3)

设行星轮相对于行星架的角位移为β<sub>31</sub>,则

$$r_{3} = \frac{ap^{2}}{1 - \sqrt{1 - p^{2} \cos\beta_{31}}}$$
(4)  
$$\cos\beta_{31} = \frac{1 - ap^{2}/r_{3}}{\sqrt{1 - p^{2}}}$$
$$r_{2} + r_{4} = 2a$$

其中

$$\blacksquare \qquad r_3 + r_4$$

同理 $\beta_{31}$ 可由 $\cos\beta_{31} > 0$ 或 $\cos\beta_{31} < 0$ 确定其唯一值。

2.1 喷肥针尖位移方程

喷肥针尖 D 点相对运动位移为

$$\begin{cases} x_d = 4a\cos(\beta_0 + \beta) + s\cos(\beta_0 + \beta + \alpha_0 - \beta_{31}) \\ y_d = 4a\sin(\beta_0 + \beta) + s\sin(\beta_0 + \beta + \alpha_0 - \beta_{31}) \end{cases}$$
(5)

其中 
$$s = \sqrt{b^2 + h^2 - 2bh\cos\varphi}$$
  
式中  $b$ ——喷肥针长度,mm  
 $h$ ——摇臂长度,mm  
 $s$ ——行星轮轴心到喷肥针针尖距离,mm  
 $\varphi$ ——摇臂与喷肥针夹角,(°)  
 $\beta_0$ ——行星架的初始角度,(°)  
 $\alpha_0$ ——喷肥针针尖和行星轮心连线与行星架  
中心连线的初始夹角,(°)  
喷肥针尖  $D$ 点绝对位移为

 $\begin{cases} x_{d1} = x_d - \beta H_1 / 180 \\ y_{d1} = y_d \end{cases}$ (6)

式中 H1----玉米株距,mm

## 2.2 喷肥针尖速度方程

假设行星架相对于中间椭圆齿轮的角速度为

$$\dot{\beta}_{21}$$
,且太阳轮固定即 $\dot{\beta}_1 = 0$ ,则 $\frac{-\beta_{21}}{\dot{\beta}_1 - \dot{\beta}} = -\frac{r_1}{r_2}$ 。同理,

假设行星架相对于行星轮的角速度为 $\dot{\beta}_{31}$ ,则 $\frac{\dot{\beta}_{31}}{\dot{\beta}_{21}}$  =

$$\frac{r_2}{2a-r_2}$$
,简化得 $\dot{\beta}_{31} = \frac{r_1r_2}{(2a-r_1)(2a-r_2)}\dot{\beta}_{\circ}$ 

假设扎穴机构水平前进速度 v<sub>1</sub> = 0,则喷肥针尖 D 点的相对速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_{d} = -4a\dot{\beta}\sin(\beta_{0}+\beta) - s(\dot{\beta}-\dot{\beta}_{31})\sin(\beta_{0}+\beta+\alpha_{0}+\beta_{31}) \\ \dot{y}_{d} = 4a\dot{\beta}\cos(\beta_{0}+\beta) + s(\dot{\beta}-\dot{\beta}_{31})\cos(\beta_{0}+\beta+\alpha_{0}+\beta_{31}) \end{cases}$$
(7)

式中  $\beta$ ——行星架角速度, rad/s

当喷肥针水平速度  $v_1 \neq 0$  时喷肥针尖 D 的绝对 运动速度方程为



#### 3 参数优化

本文运用 VB 编写程序实现扎穴机构各参数的 优化。首先运用 scale 法进行坐标变换,将坐标变换 成直观坐标以方便模型的编程实现。软件主要是优 化喷肥针初始安装的各参数。参数设置界面放置在 右边可方便直接调试参数,在主界面观测喷肥针的 各种运行轨迹并分析数据的可靠性。为达到不伤 苗,不折弯喷肥针和不带土、扬土,喷肥针尖的运动 轨迹应满足:①喷肥针在土壤中与水平面的角度为 85°~95°。②轨迹的穴口小于15~20 mm。③喷肥 针尖入土深度为 100~150 mm。④ 施肥穴距 260 mm。为提高扎穴频率和改善机构的动力学特 性,该机构的目标函数是喷肥针与摇臂夹角 $\varphi$ ,椭圆 齿轮圆盘直径 d,其中 d 与模数 m、齿数 Z、椭圆齿轮 短轴与长轴的比值 p 成非线性关系, 即, d = f(m, Z), p)。优化参数包括: $a, p, \beta, \alpha_0, \beta_0, h, b, \varphi$ 等。通过 参数优化,喷肥针绝对运行轨迹如图3所示。在主 界面右侧可动态调整参数并观测喷肥针绝对运动轨 迹变化。优化后参数值为: a = 21.405 mm、p =  $0.988_{\beta_0} = 31^{\circ}_{\alpha_0} = -70^{\circ}_{b} = 197 \text{ mm}_{h} = 180 \text{ mm}_{h}$  $\varphi$  = 76°。测得优化结果下的运行轨迹可以使喷肥针 在土壤中与水平面的夹角为85°~95°,喷肥针入土 深度为118 mm,满足设计要求。



Fig. 3 Absolute motion trajectory of spraying fertilizer needle

#### 4 速度分析

在建立相对运动数学模型基础上,编制程序并 利用 VB 人机交互可视化设计优化参数,得到喷肥 针 D 点相对运动速度仿真曲线如图 4、5 所示。喷



图 4 相对运动时喷肥针尖 D 点速度变化曲线 Fig. 4 Curves of spraying fertilizer needle's D of velocity variation in relative motion (a) X方向 (b) Y方向 肥针扎入土穴时,针尖的速度足够大才能保证喷肥 针顺利扎入土穴。喷肥针入土时最大速度为 0.56 m/s,满足设计要求。



图 5 相对运动时喷肥针尖 D 点相对速度变化曲线



#### 5 结束语

通过建立数学模型并用 VB 编写的软件动态仿 真,确定扎穴机构中喷肥针初始安装位置为行星架 的初始角度 31°,行星轮轴心和喷肥针尖 D 的连线 与行星架中心连线的初始夹角 - 70°,摇臂长度 197 mm,喷肥针长度 180 mm,喷肥针与摇臂之间夹 角 76°。通过观测仿真软件中喷肥针扎入土壤的角 度及运动范围,并仿真喷肥针 D 点的速度变化,验 证了在优化参数下确定喷肥针在土壤中角度变化范 围为 85°~95°,进入与返程轨迹一致,达到了减少 土壤回带现象的设计要求。

参考文献

- 1 Yang C. A variable rate applicator for controlling rates of two liquid fertilizers [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 17(3):409 ~ 417.
- 2 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)
- 3 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):58~62. Wang Jinfeng, Wang Jinwu, Ge Yiyuan. Design and experiment on liquid fertilizer device of deep-fertilization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(4):58~62. (in Chinese)
- 4 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):123~125.
   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):123~125. (in Chinese)
- 5 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)
- 6 穆玉国. 玉米的抗旱播种与节水灌溉[J]. 饲料与种植,2009(6):52.
- 7 李志红,李锦泽,侯桂凤,等.变量施肥机的设计[J].农机化研究,2008(8):109~110. Li Zhihong, Li Jinze, Hou Guifeng, et al. Design of variable fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2008(8):109~110. (in Chinese)
- 8 王金武,王金峰. 液态施肥机喷肥针:中国,ZL200610150879.3[P]. 2006-10-12.
- 9 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)
- 10 俞高红,陈建能,赵凤琴,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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4):51~55. (in Chinese)
- 11 赵匀,俞高红,武传宇,等. 机构数值分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2005.