

深施型液态施肥机扎穴机构优化设计*

王金峰 王金武 葛宜元 刘亚华 鞠金艳

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

【摘要】 为实现液态施肥机高速作业,设计了一种结构简单、运动平稳的椭圆齿轮行星系作为液态施肥机的扎穴机构。对该机构进行运动学分析,建立了数学模型,以穴距 200 mm 和入土深度 120 ~ 150 mm 为寻优目标,应用 Visual Basic 6.0 软件编程得出满足机构运动要求的最优参数范围为:喷肥针尖和行星轮轴连线与行星架的初始夹角 $-45^\circ \sim -40^\circ$ 、行星架初始角位移 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、喷肥针尖与行星轮轴心距离 280 ~ 300 mm,此时椭圆齿轮长半轴 29.364 mm、齿数 23、短半轴与长半轴比 0.958,正圆齿轮半径 25 mm。从优化工作参数中选择一组参数设计扎穴机构,应用 Pro/E 软件进行仿真。结果表明,根据优化参数设计的扎穴机构能够满足穴距和入土深度的设计要求。

关键词: 液态施肥机 扎穴 椭圆齿轮 仿真 优化 设计

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0052-04

Optimization Design on Pricking Hole Mechanism of Deep-fertilization Liquid Fertilizer Applicator

Wang Jinfeng Wang Jinwu Ge Yiyuan Liu Yahua Ju Jinyan

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

Abstract

In order to realize the high-speed work of liquid fertilizer applicator, the elliptic gear planetary galaxy as the pricking hole mechanism was designed, which presented the simple structure and steady movement. Then, the mathematical model for this mechanism was established. By Visual Basic 6.0 program, taken the distance between hole 200 mm and buried depth 120 ~ 150 mm as the optimization goal, the most optimum parameters range of the mechanism was obtained as follows: the initial angle between planet frame and the line formed from spraying-fertilizer needle-tip and planet wheel axle was $-45^\circ \sim -40^\circ$, the initial angular displacement of planet frame was $40^\circ \sim 50^\circ$, the distance between spraying-fertilizer needle-tip and the planetary gear axle center was 280 ~ 300 mm, simultaneously, the semi-major axis of elliptic gear was 29.364 mm, the teeth quantity was 23, the ratio of semi-minor axes and semi-major axis was 0.958, the radius of circular gear was 25 mm. Among the optimization operational parameters, a group of parameters were selected to design the pricking hole mechanism by using Pro/E simulation. The simulation result shows that the designed pricking hole mechanism can satisfy the design requirements of the distance between holes and the buried depth.

Key words Liquid fertilizer applicator, Pricking hole, Elliptic gear, Simulation, Optimization, Design

引言

施肥机扎穴机构是将喷肥针插入土壤并喷施液态肥的机构,它是液态施肥机重要工作部件,其性能

决定施肥质量、工作可靠性和作业速度。传统的扎穴机构采用曲柄摇杆机构或曲柄滑块机构,这两种机构结构简单紧凑,能够实现深施液态肥的作业要求,但运动不平稳、效率低,尽管采用机构优化、平衡

和减振办法,其单位时间实际扎穴次数最多只有240次/min,无法保证施肥机高速作业时的施肥质量。因此,本文借鉴高速水稻插秧机分插机构的工作原理,设计一种结构简单、运动平稳的椭圆齿轮行星系作为液态施肥机的扎穴机构。该机构将匀速运动转换为非匀速运动,实现变速传动,扎穴次数可达400次/min。与传统的扎穴机构相比,椭圆齿轮行星系扎穴机构单位时间内的扎穴次数明显提高,同时施肥作业质量也较好。设计中,应用运动学理论分析椭圆齿轮行星系扎穴机构并建立数学模型,应用 Visual Basic 6.0 开发人机对话仿真软件来优化求解,得到液态施肥机扎穴机构的优化参数,用 Pro/E 软件进行结构设计和模拟仿真^[1-3]。

1 结构及工作原理

扎穴机构由两个全等的椭圆齿轮和太阳轮、两个全等的正圆齿轮和行星轮、行星架、摇臂和喷肥针组成,椭圆齿轮和太阳轮的回转中心均在各自的焦点上。行星架处于初始相位角时,椭圆齿轮的长轴与太阳轮长轴共线。椭圆齿轮和正圆齿轮固结为一体,机构结构示意图如图1所示。

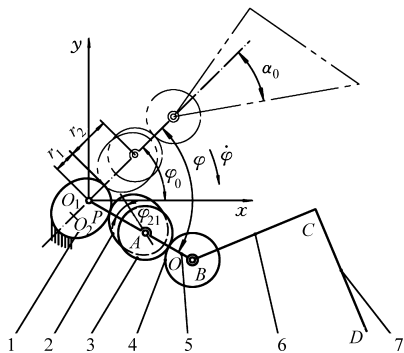


图1 扎穴机构初始位置及行星架转过一角度后的结构示意图

Fig.1 Schematic drawing of pricking hole mechanism initial place and planet frame turn some angle

1. 太阳轮 2. 椭圆齿轮 3. 正圆齿轮 4. 行星轮 5. 行星架
6. 摇臂 7. 喷肥针

工作时,太阳轮固定不动,行星架在中心轴的带动下绕回转中心 O_1 转动,由于太阳轮与椭圆齿轮啮合,引起传动比的不断变化,从而导致行星轮作往复摆动。喷肥针装配在摇臂的一端,通过摇臂与行星轮固结,使喷肥针的牵连运动随着行星架作圆周运动,随行星轮相对行星架作不等速逆向转动^[4]。

2 数学模型

设行星架转动中心为 O_1 ,椭圆齿轮和正圆齿轮的转动中心为 A ,且 A 点在椭圆齿轮的焦点上。 O_1 和 O_2 为太阳轮的两个焦点。太阳轮固定在机架上,

长轴 $\overline{O_1O_2}$ 为行星架转动初始边并与 x 轴夹角为 φ_0 。行星架转角为 φ ,相对于初始边逆时针转动为正,则太阳轮的啮合位置

$$r_1 = \frac{b^2}{a \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cos \varphi} \right]} \quad (1)$$

式中 a ——椭圆齿轮长半轴,mm

b ——椭圆齿轮短半轴,mm

假设椭圆齿轮固定不动,行星架相对椭圆齿轮转动。以 A 点为中心,以椭圆齿轮长轴为始边,行星架相对于椭圆齿轮逆时针转过 φ_{21} ,则椭圆齿轮的啮合位置

$$r_2 = \frac{b^2}{a \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cos \varphi_{21}} \right]} = 2a - r_1 \quad (2)$$

$$\cos \varphi_{21} = \frac{\frac{b^2}{a} - r_2}{r_2 \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2}} \quad (3)$$

当 $\varphi \in (0, -\pi)$ 时, $\varphi_{21} \in (0, \pi)$; 当 $\varphi \in (-\pi, -2\pi)$ 时, $\varphi_{21} \in (\pi, 2\pi)$ 。

行星轮相对行星架角位移为 φ_4 , $\varphi_4 = \varphi_{21}$ 。

喷肥针尖 D 点动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_D = (2a + R) \cos(\varphi_0 + \varphi) + S \cos(\alpha_0 + \varphi_0 + \varphi_4 + \varphi) \\ y_D = (2a + R) \sin(\varphi_0 + \varphi) + S \sin(\alpha_0 + \varphi_0 + \varphi_4 + \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

式中 R ——正圆齿轮半径,mm

S ——行星轮中心到喷肥针尖的距离,mm

α_0 ——喷肥针尖和行星轮轴连线与行星架的初始夹角^[5-8], ($^\circ$)

当施肥机前进速度为 v 时,喷肥针尖 D 点运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = x_D + v \frac{\varphi}{\dot{\varphi}} \\ y = y_D \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\dot{\varphi}$ ——行星架转动角速度, r/s

3 参数优化

3.1 目标函数与约束条件

为获得良好的施肥质量、工作可靠性和作业速度,达到不伤苗、不折弯喷肥针和不滑出沟痕,喷肥针尖的轨迹和姿态应满足:①喷肥针的入土深度为120~150 mm。②两穴之间的距离为200 mm。③喷肥针入土时,喷肥针与水平线夹角为 $70^\circ \sim 110^\circ$ 。此时,扎穴机构以轻巧为目标,从而提高扎穴速度和改善该机构动力学特性,扎穴机构的目标函数是正

圆齿轮的半径 R 和椭圆齿轮圆盘直径 d , d 是模数 m 、齿数 z 和椭圆齿轮短轴与长轴之比 k 的非线性函数, 即 $d = f(m, z, k)$ 。

上述约束条件和目标函数是复杂多变量非线性函数, 采用传统的优化方法很难解得全局最优解, 因此根据数学模型和目标函数, 在满足约束条件的前提下, 应用 Visual Basic 6.0 软件开发出人机对话仿真软件来优化求解^[9-10]。

3.2 人机对话仿真软件

软件的输入参数包括 R 、 z 、 k 、 α_0 、 φ_0 和 S , 输出参数为施肥深度 h 和 d 。软件能够根据机构参数的变化实时地计算输出参数, 并显示轨迹, 同时也可以模拟喷肥针尖相对运动和绝对运动^[11], 如图 2 所示。

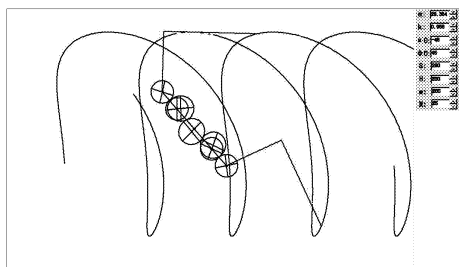


图 2 可视化人机交互优化界面

Fig. 2 Optimization interface of visible man-machine interaction

使用该软件时, 首先根据经验输入一组参数, 由计算机实时计算结果并显示轨迹和进行运动模拟。再根据这些结果, 凭借人的直觉和逻辑思维直接判断这组参数优良与否。

3.3 变量对结果的影响

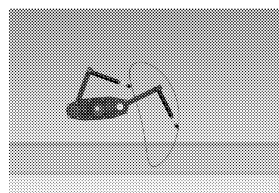
由仿真软件可知:

(1) 椭圆齿轮长轴 a 的变化影响喷肥针轨迹高度, 轨迹高度随着 a 的增大而增加。

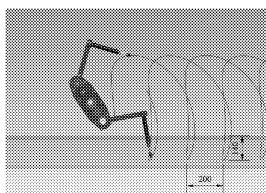
(2) 椭圆齿轮短轴与长轴比 k 影响喷肥针尖轨迹形状, 轨迹的饱满程度随着 k 的增大而增加。

(3) 正圆齿轮的半径 R 影响喷肥针轨迹宽度, 轨迹宽度随着 R 的增大而增加。

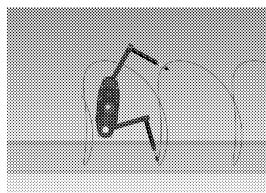
(4) 喷肥针尖和行星轮轴连线与行星架的初始夹角 α_0 影响喷肥针尖轨迹在空间的姿态。当 α_0 增



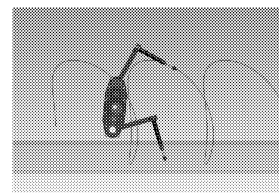
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4 喷肥针尖运动轨迹曲线

Fig. 4 Curve diagram of spraying-fertilizer needle-tip move path

(a) 相对运动轨迹 (b) 绝对运动轨迹 (c) 右喷肥针尖绝对运动轨迹 (d) 左喷肥针尖绝对运动轨迹

加时, 喷肥针尖轨迹逆时针转动。

(5) 行星架转动初始安装角 φ_0 影响喷肥针尖轨迹在空间的位置。当 φ_0 增加时, 喷肥针尖轨迹顺时针转动。

3.4 优化结果

利用软件得到满足运动要求的优化结果如表 1 所示。

表 1 优化结果

Tab. 1 Optimization results

a/mm	z	k	R/mm	$\alpha_0/(^\circ)$	$\varphi_0/(^\circ)$	S/mm
29.364	23	0.958	25	-45 ~ -40	40 ~ 50	280 ~ 300

4 结构设计与仿真

应用软件实现了扎穴机构参数的优化、运动轨迹的模拟和机构结构的示意, 但扎穴机构的运动情况和干涉问题的检验需要通过三维实体建模仿真来实现。选择优化后的一组参数 $a = 29.364$ mm、 $z = 23$ 、 $k = 0.958$ 、 $\alpha_0 = -45^\circ$ 、 $\varphi_0 = 45^\circ$ 和 $S = 280$ mm, 应用 Pro/E 设计出扎穴机构, 其结构仿真图如图 3 所示。

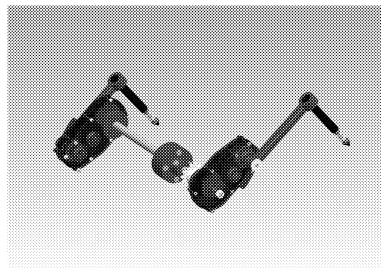


图 3 扎穴机构结构仿真图

Fig. 3 Structure simulation of pricking hole mechanism

应用 Pro/E 机构模块对扎穴机构进行运动学仿真, 得出喷肥针尖运动轨迹曲线, 如图 4 所示。

应用 Pro/E 干涉检验, 发现设计的扎穴机构运动过程并无干涉, 椭圆齿轮啮合良好。如图 4b 所示, 扎穴机构入土深度为 140 mm, 穴距为 200 mm, 设计的扎穴机构能够满足预期的设计要求。

5 结束语

对施肥机具扎穴机构进行运动学建模, 应用

Visual Basic 6.0 软件开发出人机对话仿真软件进行优化求解扎穴机构的参数。从优化出的参数中选择一组参数设计扎穴机构,应用 Pro/E 机构模块对扎穴机构进行运动学仿真。仿真结果表明,根据优化参数设计的扎穴机构能够满足穴距和入土深度的设计要求。本文从运动学的角度进行优化设计,得到的解是一个范围,其中每一组参数都是“非劣解”,

形成的扎穴机构都可以满足设计的要求。

用优化的任何一组参数设计出的扎穴机构动力学性能都不同,要得到最优参数组合,应既要满足运动学要求,又使得机构具有最佳的动力学特性。因此,可以进一步对扎穴机构进行动力学分析,得出最优参数。

参 考 文 献

- 1 谭伟明,胡赤兵,洗伟杰,等. 非圆齿轮滚切最简数学模型及其图形仿真[J]. 机械工程学报,2001,37(5):71~82.
Tan Weiming, Hu Chibing, Xian Weijie, et al. Concise mathematical model for hobbling non-circular gear and its graphic simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 71~82. (in Chinese)
- 2 裴艳兰,和丽,许纪倩. 高速水稻插秧机中非圆齿轮齿廓的图形仿真[J]. 机电产品开发与创新,2007,20(5):96~97.
Pei Yanlan, He Li, Xu Jiqian. The graphic simulation of non-circular gear teeth contour in transplanting mechanism[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2007, 20(5):96~97. (in Chinese)
- 3 冯金龙,王金武. 探针注入式深层施肥机构的运动分析[J]. 农机化研究,2007,29(4):64~65.
Feng Jinlong, Wang Jinwu. The analysis for probe injection deep fertilization mechanism [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(4): 64~65. (in Chinese)
- 4 杨文珍,赵匀,李革,等. 高速水稻插秧机移箱螺旋轴回转轨道优化设计[J]. 农业机械学报,2003,34(6):167~168,175.
- 5 俞高红,赵凤芹,武传宇,等. 正齿行星轮分插机构的运动特性分析[J]. 农业机械学报,2004,35(6):64~67.
Yu Gaohong, Zhao Fengqin, Wu Chuanyu, et al. Analysis of kinematic property of separating-planting mechanism with planetary gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 64~67. (in Chinese)
- 6 龚永坚,刘丽敏,俞高红,等. 水稻插秧机后插式分插机构运动分析与试验[J]. 农业机械学报,2005,36(9):41~43.
Gong Yongjian, Liu Limin, Yu Gaohong, et al. Study on rearward separate-planting mechanism of rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 41~43. (in Chinese)
- 7 孙恒,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- 8 赵匀,蒋焕煜,武传宇. 双季稻高速插秧机偏心链轮分插机构结构设计和参数优化[J]. 机械工程学报,2000,36(3):37~40.
Zhao Yun, Jiang Huanyu, Wu Chuanyu. Structure analysis and parameter optimization of separating-planting mechanism with eccentric sprockets for high-efficiency transplanter [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3): 37~40. (in Chinese)
- 9 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.
- 10 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- 11 武传宇,赵匀,陈建能. 水稻插秧机分插机构人机交互可视化优化设计[J]. 农业机械学报,2008,39(1):73~74.
Wu Chuanyu, Zhao Yun, Chen Jianneng. Optimization design of rice transplanter separating-planting mechanism with visualization human-computer interaction method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):73~74. (in Chinese)
- 12 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)