

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.006

滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统研究

刘宏新 苏 航 李金龙 刘招金
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对滚筒式免耕播种机构设计过程中,涉及参数多,交互关系复杂,计算量大,计算方法繁琐,设计周期长,不易完成机构优化设计等问题,设计一种交互式设计平台,通过人机交互,达到缩短设计周期、优化机构的目的。通过对鸭嘴滚轮排种装置及其鸭嘴驱动滚筒组成的核心机构的运动学分析,建立鸭嘴驱动角 φ 、鸭嘴助力角 α 、鸭嘴滚轮排种装置角速度 ω_0 和滚筒角速度 ω_1 之间的数学模型;以株距、还田量及播种深度为设计参数,构建目标函数与约束条件,确定优化算法,获得满足设计要求的结构参数,即基本结构参数:滚轮半径 R_0 、滚筒半径 R_1 、鸭嘴高度 H 、鸭嘴数 x ,辅助结构参数:助力角 α 、驱动角 φ 、开孔数 n 和开孔长度 l ;使用 Matlab (Matrix & laboratory),根据优化算法编写程序,并通过 Matlab 图形用户界面,直接在界面中获得优化后的结构参数。通过 CATIA 环境下二次开发,利用关联设计方法建立参数化模型,通过优化后的结构参数驱动参数化模型改变参数。参照系统所得结构参数加工滚筒式免耕播种机构试验样机并进行样机功能试验。交互式优化设计系统可在不同需求下快速生成各结构参数,准确得出最优参数组合,并生成所需模型,最大限度缩短设计时间,提高设计效率与准确度,同时为解决该类问题提供了一种通用方法。

关键词: 免耕播种机构; 人机交互; 优化设计; 结构参数; 参数化
中图分类号: S233.2; TP311.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0058-11

Interactive Optimal Design System of Drum-type No-till Planter Mechanism

LIU Hongxin SU Hang LI Jinlong LIU Zhaojin
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In the process of structure design of drum-type no-till planter mechanism, many parameters are involved, interaction is complicated, calculation is large, calculation method is tedious, design period is long, and the optimization design of mechanism is not easy to complete. An interactive design platform was studied. Through man-machine interaction, the design cycle was shortened and the mechanism was optimized. Based on the kinematics analysis of the core mechanism composed of duckbill drum seeding device and drum driven by its duckbill, the mathematical models of the driving angle, aiding angle, angular velocity and the angular velocity of roller were established. With plant spacing, return amount and sowing depth as design parameters, objective function and constraint conditions were constructed, optimization algorithm was determined, and structural parameters which met the design requirements were obtained, including the basic structural parameters of roller radius, drum radius, duckbill height and duckbill number, and auxiliary structural parameters of the booster angle, driving angle, number of holes and length of hole. According to the optimization algorithm, the program was written by using Matlab, and the optimized structure parameters were obtained directly through the Matlab graphical user interface. Through the secondary development under the environment of CATIA, the parameterized model was established by using the association design method, and the optimized structural parameters were used to drive the model. According to the structural parameters obtained from the system, the structure test prototype of the drum-type no-till planter mechanism was processed and the functional test of the prototype was carried out. The interactive optimal design system can quickly generate various structural parameters under different requirements, get the optimal parameter combination accurately, generate the required

model, shorten the designer's design time to the maximum extent, and improve the design efficiency and accuracy. At the same time, it provided a general method for the study of this kind of problems.

Key words: no-till planter mechanism; human-computer interaction; optimization design; structural parameters; parameterization

0 引言

农业机械设计是农业机械化和现代化的重要内容和步骤,设计水平的高低直接关系到产品的质量性能、研制周期和经济效益等^[1-2]。随着科技的进步与发展,现代设计技术与随之产生的设计方法也不断地融入到农业机械设计中。

传统的农机设计方法一般是通过经验获得设计参数,进行整机设计^[3-7]。但由于经验性和盲目性,往往需要多次修改参数和结构,费时费力。优化设计方法即在符合一系列限制条件的前提下,求出满足设计效果的设计参数解,使设计效率明显提高。与此同时在优化设计的过程中,人类经验知识及创新能力在求解复杂问题时具有不可替代的作用^[8-11],这使得交互式优化设计方法成为研究复杂优化设计问题的最佳选择。张学军等^[12]研究了清田整地联合作业机齿形刮板式残膜、残茬及土壤输送装置的结构原理,通过建立数学模型,得到了机构的最优参数组合;韩豹等^[13]为获得理想的苗间机械锄草效果,结合农艺对机械锄草参数的限定及要求,建立了多目标优化模型,并使用 Matlab 优化工具箱得到了最优解;王方艳等^[14]使用 Matlab,对 4H-2 型花生收获机的传动机构进行了优化分析,以提高机构的工作性能与可靠性。VEGAD 等^[15]对 C 型、Hatchet 型和 L 型 3 种旋耕叶片进行了静态结构分析,并利用 Solidworks 程序设计模块对 3 种转子叶片进行了优化研究。近年来约翰迪尔等国外知名农机企业纷纷采用交互式优化设计方法,建立了以 PDM/PLM 为支撑平台的产品研发体系和知识积累平台。

近年来,保护性耕作技术的推广应用,对农机具的工作性能提出了新的要求^[16-20]。为此,东北农业大学研制出了一种以滚筒为特征部件的免耕播种装置。该装置采用滚筒碾压秸秆,在秸秆被压薄并固定时,置于滚筒内的鸭嘴式播种器的鸭嘴从滚筒中伸出,穿透秸秆完成打穴与播种。相对于现有形式,无需对秸秆残茬进行任何处理,不进行破茬分草和开沟等工序,避免了秸秆和杂草的堵塞,提高了装置的通过性^[21]。但在免耕播种机构设计过程中,涉及参数多,公式复杂,计算量大。当播种需求、播种条件改变时,需重新设计机构的各结构参数,延长了设

计人员的设计周期,不易完成机构的优化设计。

针对上述问题,本文以滚筒式免耕播种机构为研究对象,研究一种交互式设计平台。使用 Matlab 设计并改进算法,进一步优化机构结构参数的求解过程,并在 CATIA 环境下二次开发,利用关联设计方法建立参数化模型。使得系统可以通过人机交互,根据用户需求快速获得优化后的结构参数,并生成对应参数模型,从而缩短设计周期,优化机构,减少设计人员的计算量,提高效率与准确度,以适应现代农业生产对农机产品定制化与个性化需求的新形势,同时为该类问题的研究提供一种通用的方法。

1 交互式设计系统技术方案

在交互式优化设计系统的设计过程中,首先应确定系统的功能与应用模块,并根据知识的数据特征构建知识库;然后根据人机友好原则设计系统人机界面,从而完成整个交互式优化设计系统的设计过程。滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统技术方案如图 1 所示。

根据滚筒式免耕播种机构设计要求与功能结构要求,建立知识库。其中包括对各参数的定义与分类,以及各参数之间的约束关系。

依据用户需求确定设计参数,并使用 CATIA 工具集进行整机设计。整机设计包括关键零部件参数化设计及整机系统匹配设计。

关键零部件参数化设计即根据滚筒式免耕播种机构的设计要求,建立目标函数与约束,并对各结构参数进行优化。将得到的优化结果和问题的理想目标值进行比较,把不满意的结果提供给模型继续求解。如此反复,直到求得设计者满意的参数化模型,并把所得的参数化模型存入模型库中。

整机系统匹配设计包括整机的总体布局以及动力匹配等内容。

本文主要研究滚筒式免耕播种机构关键零部件参数化设计过程:采用优化设计方法,设计结构参数优化算法,建立参数化模型,并设计与之对应的人机交互界面,使系统可在不同需求下快速生成各结构参数,准确得出最优参数组合,并生成所需模型,以缩短设计时间,提高设计效率与准确度。

2 理论模型建立

滚筒式免耕播种机结构如图 2 所示。作业时,

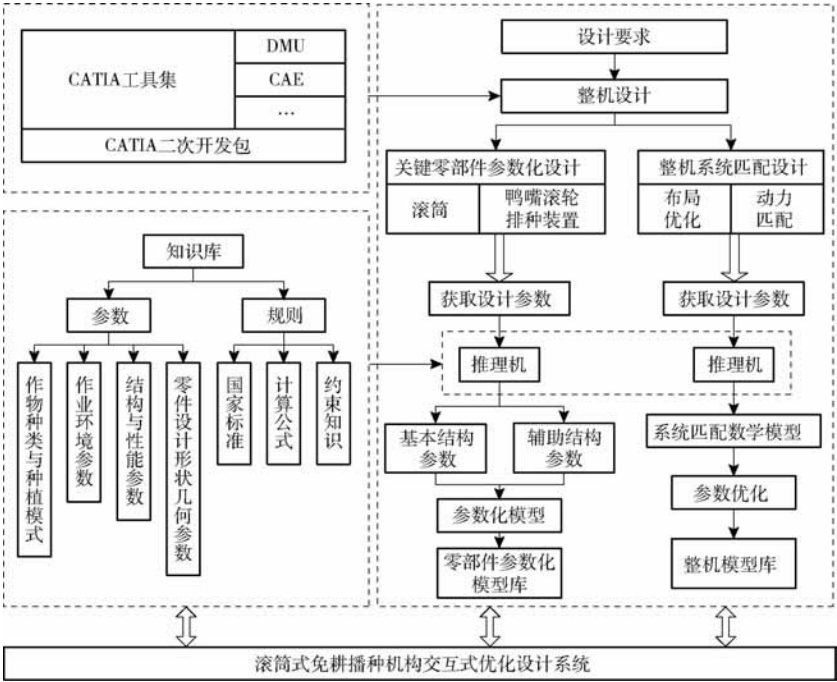


图1 滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统技术方案

Fig.1 Technical scheme of interactive optimization design system of drum-type no-till planter mechanism

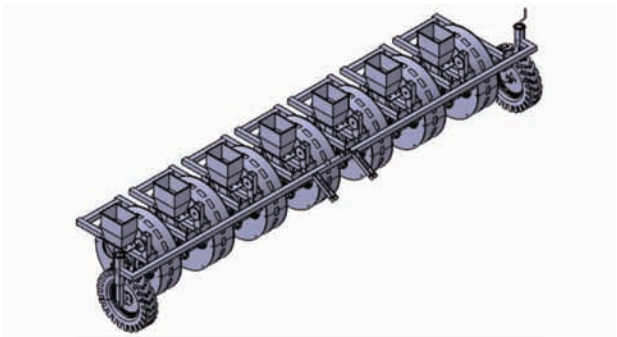


图2 滚筒式免耕播种机结构简图

Fig.2 Structure diagram of drum-type no-till planter

地轮将动力由链传动传递给鸭嘴滚轮排种装置,再通过鸭嘴滚轮排种装置上的鸭嘴推动滚筒,从而驱动整个装置转动。秸秆被转动的滚筒碾压成薄层,鸭嘴穿透这一薄层秸秆后进行成穴并投种。

以滚筒式免耕播种机构的一个播种单元为研究对象,简化实体模型,并根据其工作原理进行运动分析,得到的理论模型如图3所示。

鸭嘴与滚筒的接触点 M 的绝对速度 v_a 由其相对鸭嘴滚轮排种装置中心 O 的牵连速度 v_e 和相对鸭嘴助力角驱动面的相对速度 v_r 合成。 M 点位置随鸭嘴滚轮排种装置的转动不断变化,当 M 点与竖直线 O_1O 重合时,相对速度 v_r 为零,此位置所对应的驱动角 φ 为 σ ,即

$$l_{OM} = \sqrt{\frac{(R_0 + H)^2 \sin^2 \alpha + R_1^2 \sin^2 \left(\alpha + \varphi - \arcsin \frac{R_0 \sin(\pi - \alpha - \varphi) + (R_0 + H) \sin \alpha}{R_1} \right) - 2(R_0 + H) \sin \alpha R_1 \sin \left(\alpha + \varphi - \arcsin \frac{R_0 \sin(\pi - \alpha - \varphi) + (R_0 + H) \sin \alpha}{R_1} \right) \cos(\pi - \alpha - \varphi)}{\sin^2(\pi - \alpha - \varphi)}} \quad (2)$$

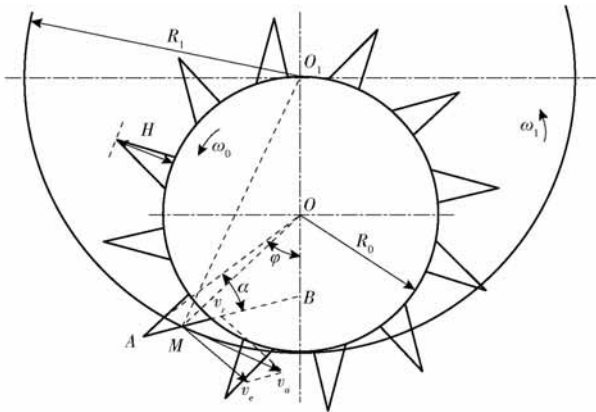


图3 滚筒式免耕播种机构理论模型

Fig.3 Theory model of drum-type no-till planter mechanism

$$\sigma = \arcsin \frac{\sin \alpha (R_0 + H)}{R_0} - \alpha \quad (1)$$

式中 α ——鸭嘴助力角,rad
 R_0 ——鸭嘴滚轮排种装置半径,mm
 H ——鸭嘴高度,mm

当鸭嘴滚轮排种装置继续转动时, M 点相对速度 v_r 方向反转。以 σ 为临界点,通过运动分析,对两种情况进行讨论,得到鸭嘴滚轮排种装置角速度 ω_0 与鸭嘴助力角 α 一定时,滚筒角速度 ω_1 随驱动角 φ 的变化关系为^[21]:当 $\varphi \geq \sigma$ 时,有

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{2R_1^2} (R_1^2 + l_{OM}^2 - R_0^2) + \frac{\omega_0}{R_1} l_{OM} \sin \left(\arccos \frac{R_1^2 + l_{OM}^2 - R_0^2}{2R_1 l_{OM}} \right) \tan \left(\arccos \frac{R_1^2 + l_{OM}^2 - R_0^2}{2R_1 l_{OM}} + \arcsin \frac{(R_0 + H) \sin \alpha}{l_{OM}} \right) \quad (3)$$

当 $\varphi < \sigma$ 时,有

$$l_{OM} = \sqrt{\frac{(R_0 + H)^2 \sin^2 \alpha + R_1^2 \sin^2 \left(-\alpha - \varphi + \arcsin \frac{R_0 \sin(\alpha + \varphi) + (R_0 + H) \sin \alpha}{R_1} \right) - 2(R_0 + H) \sin \alpha R_1 \sin \left(-\alpha - \varphi + \arcsin \frac{R_0 \sin(\alpha + \varphi) + (R_0 + H) \sin \alpha}{R_1} \right) \cos(\alpha + \varphi)}{\sin^2(\alpha + \varphi)}} \quad (4)$$

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{2R_1^2} (R_1^2 + l_{OM}^2 - R_0^2) + \frac{\omega_0}{R_1} l_{OM} \sin \left(\arccos \frac{R_1^2 + l_{OM}^2 - R_0^2}{2R_1 l_{OM}} \right) \tan \left(\arccos \frac{R_1^2 + l_{OM}^2 - R_0^2}{2R_1 l_{OM}} + \arcsin \frac{(R_0 + H) \sin \alpha \sin(\alpha + \varphi)}{\sin(\pi - \alpha - \varphi) l_{OM}} \right) \quad (5)$$

式中 R_1 ——滚筒半径

$$\frac{360\pi}{L} \leq x \leq \frac{480\pi}{L} \quad (8)$$

3 结构参数优化算法

为保证鸭嘴依次驱动滚筒,要求鸭嘴初始驱动角 φ 对应的滚筒角速度 ω_1 大于鸭嘴停止驱动角 φ' 对应的滚筒角速度 ω_1' ;且需根据对应的鸭嘴助力角 α 、鸭嘴驱动角 φ 进行几何分析,计算滚筒驱动孔个数,进而检查鸭嘴交替驱动后是否发生干涉;在所有满足要求的参数中,以滚筒角速度 ω_1 变化平缓为主要衡量指标,以鸭嘴结构紧凑为辅助衡量指标,确定最佳的鸭嘴助力角 α 。根据上述过程建立目标函数,构建与设计变量取值相对应的约束条件,利用线性搜索法对各方案进行比较并做出判断,即可得到满足预定要求的最优解。

由于滚筒式免耕播种机构中涉及结构参数众多,为方便对结构参数进行优化,现把机构中需要优化的结构参数分为两类,即基本结构参数与辅助结构参数。基本结构参数约束机构的总体尺寸,辅助结构参数保证机构成穴作业的完成。机构具体的目标函数与约束条件建立过程如下。

3.1 基本结构参数的确定

本文取 L 、 h_1 、 Q 为设计参数。其中 L 为株距, mm; h_1 为播种深度, mm; Q 为还田量, kg/hm²。

还田量 Q 可转化为还田高度 h_2 , mm。一般非人为堆积玉米秸秆的密度 ρ 为 35 kg/m³ 左右^[22], 因此,还田高度 h_2 可以表示为

$$h_2 = \frac{Q}{10\rho} \quad (6)$$

滚筒式免耕播种机构的基本结构参数为 x 、 R_0 、 R_1 、 H 。其中 x 为鸭嘴数; R_1 为滚筒半径, mm。

鸭嘴滚轮排种装置的半径 R_0 为

$$R_0 = \frac{Lx}{2\pi} \quad (7)$$

鸭嘴滚轮排种装置的半径 R_0 取值一般在 180 ~ 240 mm 范围内^[23], 则鸭嘴数 x 的取值范围为

鸭嘴个数在满足约束条件的情况下不宜过多, 且鸭嘴的个数 x 一般取偶数^[24], 因此可确定最佳鸭嘴数 x 。根据上述已知参数, 计算后对结果圆整, 即可得出鸭嘴滚轮排种装置的半径 R_0 。

鸭嘴高度 H 为

$$H = h_1 + h_2 + h_3 \quad (9)$$

式中 h_3 ——滚筒厚度, mm

滚筒式免耕播种机构在作业的过程中, 若滚筒半径 R_1 过小, 则滚筒不能有效碾压秸秆, 产生秸秆缠绕堵塞现象, 从而影响播种作业的进行, 不能达到预期的播种效果^[21]。设 R_1 与 R_0 的比值为 k 。 k 值过小滚筒与鸭嘴滚轮排种装置之间不能满足正常的几何运动关系, 完成整个作业过程; 同时为减轻滚筒式免耕播种机构总体质量, 节约生产成本, 在满足约束条件的情况下, k 值不宜过大。综合考虑以上因素, 初定 k 为 2。则滚筒半径 R_1 为

$$R_1 = 2R_0 \quad (10)$$

3.2 辅助结构参数的确定

鸭嘴在驱动滚筒运动的过程中, 相对于滚筒的位置是不断变化的, 这就需要设置合理的驱动孔尺寸, 保证鸭嘴与滚轮在运动过程中不发生干涉; 为减缓滚筒速度的变化幅度, 保证机构的平稳运行, 应设置合理的驱动角 φ 与鸭嘴助力角 α 。因此设定辅助参数为助力角 α 、驱动角 φ 、开孔数 n 和开孔长度 l , 辅助参数的求解过程即寻求最佳鸭嘴助力角 α 与驱动角 φ , 并确定其所对应驱动孔数 n 和开孔长度 l 。

取基本结构参数 $H = 90$ mm, $R_0 = 200$ mm, $R_1 = 400$ mm, $x = 12$, 作业速度 $v = 1$ m/s, 即鸭嘴滚轮排种装置角速度 $\omega_0 = 5$ rad/s, 探究不同鸭嘴助力角 α 下所对应滚筒角速度 ω_1 随驱动角 φ 的变化规律, 如图 4 所示。

当驱动角为 φ 时, 鸭嘴开始驱动滚筒; 当 $\varphi_0 = \varphi - 30^\circ$ 时, 鸭嘴停止驱动滚筒。其有效作用区间为

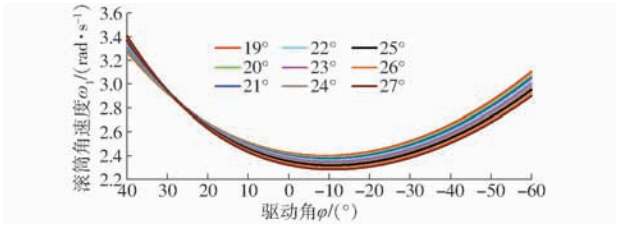


图 4 驱动角 φ 和鸭嘴助力角 α 对滚筒角速度的影响规律

Fig. 4 Influencing law of drive angle φ and duckbill power angle α on roller angular velocity

鸭嘴角间距 $\gamma = 30^\circ$ 。在图中可以划分出若干区间为 γ 的曲线段,此区间即为鸭嘴驱动滚筒时滚筒角速度 ω_1 的变化曲线。

对于任一鸭嘴,从其开始驱动至离开滚筒时,鸭嘴相对于圆心 O 所转过的角度 θ 为

$$\theta = \varphi + \arcsin \left(\frac{R_1}{R_0 + H} \sin \frac{R_1^2 + (R_1 - R_0)^2 - (R_0 + H)^2}{2(R_1 - R_0)R_1} \right) \quad (11)$$

鸭嘴转过角度 θ 时,所用的时间 T 为

$$T = \frac{\theta}{\omega_0} \quad (12)$$

鸭嘴从开始驱动,相对于圆心 O 转过角度 γ 时,所用的时间 t_1 为

$$t_1 = \frac{\gamma}{\omega_0} \quad (13)$$

在时间 T 所在的任一时间 t 内,鸭嘴转过的角度 β_1 与滚筒转过的角度 β_2 为

$$\beta_1 = \int_0^t \omega_1 (\varphi - \omega_0 t) dt \quad (14)$$

$$\beta_2 = q \int_0^{t_1} \omega_1 (\varphi_1 - \omega_0 t) dt + \int_0^{t-t_1} \omega_1 (\varphi_1 - \omega_0 t) dt \quad (15)$$

其中

$$q = \frac{T - \text{mod}(T, t_1)}{t_1}$$

为使鸭嘴与滚筒在运动的过程中不发生干涉,应满足的条件为在时间 T 所在的任一时间 t 内有 $\beta_1 \leq \beta_2$ 。

如图 5 所示,1 号鸭嘴与 2 号鸭嘴分别处于交替驱动的临界位置,设 2 号鸭嘴所对应的驱动角为 φ_1 ,驱动孔角间距 $\angle MO_1M_1$ 为 μ 。则

$$\mu = \int_0^{t_1} \omega_1 (\varphi_1 - \omega_0 t) dt \quad (16)$$

根据滚筒驱动孔角间距可求得滚筒驱动孔数 n 为

$$n = \frac{2\pi}{\mu} \quad (17)$$

n 不为整数时,可圆整为 n_s 。由此便可以求得各鸭嘴助力角 α 所对应的最佳驱动角 φ 下,鸭嘴的开孔数 n 与圆整后的开孔数 n_s 。设 $\Delta n = n_s - n$,为

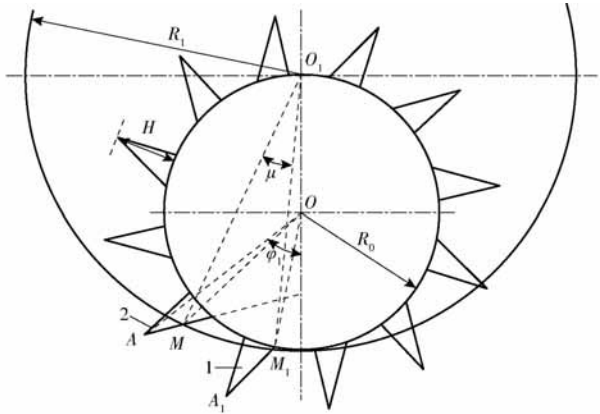


图 5 驱动孔角间距示意图

Fig. 5 Diagram of angular spacing between driving holes

保证滚筒的精度与滚筒运转时的可靠性, Δn 越小越好。则 Δn 取最小值时所对应的鸭嘴助力角即为最佳鸭嘴助力角,其所对应的最佳驱动角与开孔数为 φ_α 和 $n_{s\alpha}$ 。则驱动孔角间距 μ_α 为

$$\mu_\alpha = \frac{360}{n_{s\alpha}} \quad (18)$$

如图 6 所示,滚筒式免耕播种机构运动到此位置时,3 号鸭嘴驱动滚筒运动,4 号鸭嘴顶点与滚筒圆周相交于 N_1 ,其所在驱动孔作用点为 N_2 ,圆弧 N_1N_2 所对应的弦长为最大弦长,即为滚筒所设置驱动孔的合理弦长 l 。

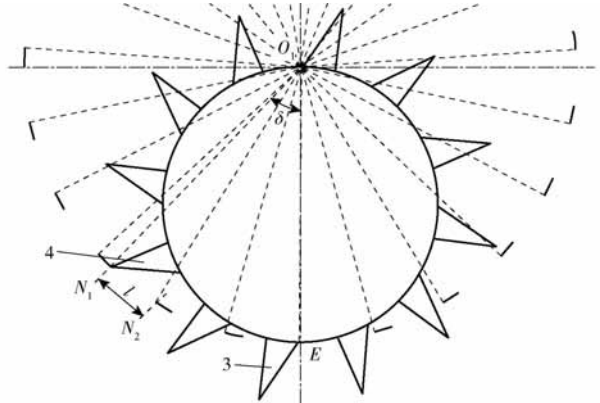


图 6 驱动孔弦长与鸭嘴位置关系

Fig. 6 Position relationship between duckbill chord length and drive hole

设 $\angle N_1O_1E$ 为 δ ,则

$$\delta = \arcsin \left(\frac{R_1}{R_0 + H} \sin \frac{R_1^2 + (R_1 - R_0)^2 - (R_0 + H)^2}{2(R_1 - R_0)R_1} \right) \quad (19)$$

令 $\varphi = \delta - p\gamma$,且令 $\varphi \leq \varphi_\alpha$,当 p 取最小整数值时,记 $\varphi_2 = \delta - p_{\min}\gamma$ 。

当鸭嘴相对于圆心 O 从角度 δ 运动到 φ_2 ,所用的时间 t_2 为

$$t_2 = \frac{\delta - \varphi_2}{\omega_0} \quad (20)$$

鸭嘴与滚筒的接触点 M 相对于圆心 O_1 所转过
的角度 β 为

$$\beta = \int_0^{t_2} \omega_1 (\delta - \omega_0 t) dt \tag{21}$$

则驱动孔最大横弦相对于 O_1 对应的圆心角 λ
为

$$\lambda = \beta - p\mu \tag{22}$$

滚筒上所设置的驱动孔的弦长 l 为

$$l = R_1 \sqrt{2(1 - \cos \lambda)} \tag{23}$$

4 人机交互设计

4.1 交互信息

在滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统
中,为满足用户需求,用户需向系统中输入设计参
数,以获得满足设计要求的结构参数,如表 1 所示,
从而完成滚筒式免耕播种机构的总体设计。

表 1 交互信息

Tab. 1 Interactive information

参数类型		参数名称	单位
输入参数	设计参数	株距	mm
		播种深度	mm
		还田量	kg/hm ²
输出参数	基本结构参数	滚轮半径	mm
		滚筒半径	mm
		鸭嘴高度	mm
		鸭嘴数	
	辅助结构参数	助力角	(°)
		驱动角	(°)
		开孔长度	mm
		开孔数	

4.2 Matlab 编程

根据结构参数优化算法,设计程序框图如图 7
所示。根据程序流程图编写程序,以实现优化过程
的程序化。

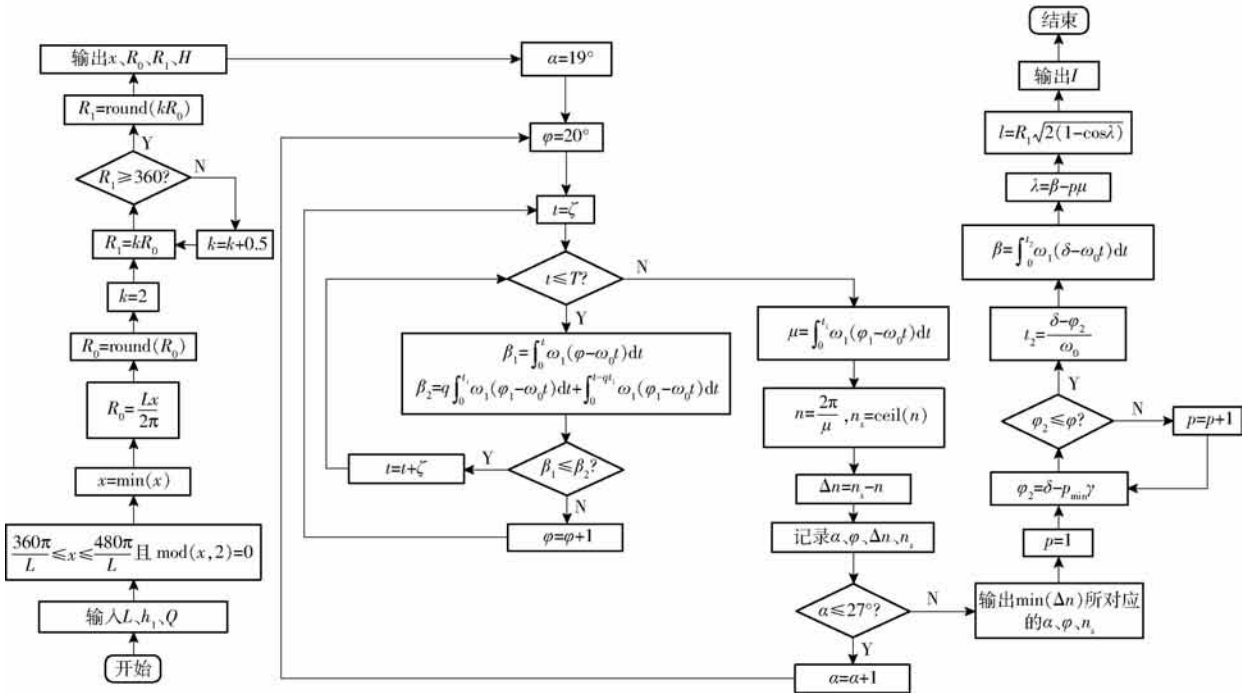


图 7 滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统程序框图

Fig. 7 Program block diagram of interactive optimal design system of drum-type no-till planter mechanism

滚筒角速度 ω_1 的求解过程是所有结构参数优
化求解的基础,因此需得到不同驱动角 φ 下所对应
的滚筒角速度 ω_1 。令 b_2 为驱动角 φ , b_1 为相对速度
 v_r 为 0 时,所对应的驱动角 σ 。当鸭嘴滚轮排种装置
角速度 ω_0 与鸭嘴助力角 α 一定时,不同驱动角 φ 下
所对应的滚筒角速度 ω_1 的求解过程可用伪代码表
示为:

if $b_2 > b_1$ then

$$OA \leftarrow R_0 + H;$$

$$y1 \leftarrow \sin(\pi - a - b);$$

$$OB \leftarrow OA * \sin(a) / y1;$$

$$O1B \leftarrow X + OB;$$

$$y2 \leftarrow \sin(a + b - \arcsin(O1B * y1 / R1));$$

$$BM \leftarrow R1 * y2 / y1;$$

$$OM \leftarrow \sqrt{OB^2 + BM^2 - 2 * OB * BM * \cos(\pi - a - b)};$$

$$O1MO \leftarrow \arccos((R1^2 + OM^2 - X^2) / (2 * R1 * OM));$$

$$CMD \leftarrow \pi / 2 - O1MO;$$

$$OMB \leftarrow \arcsin(OB * \sin(\pi - a - b) / OM);$$

$$O1MB \leftarrow O1MO + OMB;$$

$$ve \leftarrow w0 * OM;$$

```
vr←ve * cos(CMD)/cos(O1MB);
va←vr * sin(O1MB) + ve * sin(CMD);
O1M←R1;
w1←va/O1M;
else
OA←R0 + H;
y1←sin(pi - a - b);
OB←OA * sin(a)/y1;
O1B←X + OB;
y2←sin(asin(O1B * sin(a + b)/R1) - a - b);
BM←R1 * y2/sin(a + b);
OM←sqrt(OB^2 + BM^2 - 2 * OB * BM * cos(a + b));
O1MO←acos((R1^2 + OM^2 - X^2)/(2 * R1 * OM));
CMD←pi/2 + O1MO;
OMB←pi - asin(OB * sin(pi - a - b)/OM);
O1MB←O1MO + OMB;
ve←w0 * OM;
vr←ve * cos(CMD)/cos(O1MB);
va←ve * sin(CMD) - vr * sin(O1MB);
O1M←R1;
w1←va/O1M;
end if
```

以上述程序代码为基础,根据约束条件,依据线性搜索法编写程序,即可得到满意的目标值。

4.3 交互界面

通过 Matlab 的图形用户界面,根据用户所提供的原始参数,直接在界面中获得优化后滚筒式免耕播种机构的各结构参数,从而设计出具有人机交互、界面友好特性的用户界面。

Matlab 图形用户界面是 Matlab 用户图形接口,其用户界面的设计方法有两种:使用可视化的图形界面开发环境和直接编写程序^[25-26]。图形用户界面开发环境提供了更加方便快捷地设计图形用户界面的工具。

进行人机交互界面设计时,首先应启动 GUI 设计窗口,选择 Blank GUI 模板。在窗体中添加面板、静态文本、编辑框和按钮并修改属性,设计的人机交互界面如图 8 所示。其中,播种深度作为行业知识已在界面中设为默认值,不可轻易修改,若要修改需在更高的管理模式下进行。

4.4 系统测试

以东北地区玉米-大豆免耕轮作播种模式为例,对交互式优化设计系统进行测试。玉米和大豆的播种深度一般以 30 ~ 50 mm 为宜,密植玉米的播种株

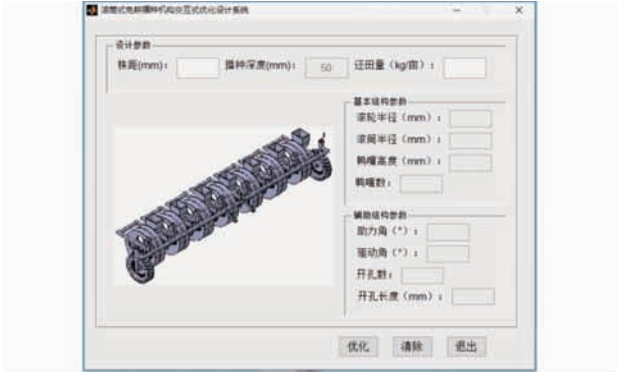


图 8 人机交互界面

Fig. 8 Human-computer interaction interface

距在 190 mm 左右,大豆的播种株距为 70 ~ 120 mm^[27-28]。玉米产量在 7 500 ~ 9 000 kg/hm² 之间,其作物经济系数平均为 0.35,则每公顷所产玉米秸秆量为 15 000 kg 左右;大豆产量在 3 000 kg/hm² 左右,其作物经济系数平均为 0.18,计算可得所产大豆秸秆为 13 500 kg 左右^[29]。

给定播种深度为 50 mm,设定还田量分别为 50%、70%、100%,并对应改变株距,对交互式优化设计系统做多组测试,所得结果如表 2 所示,平均每组测试程序运行时间为 300 s 左右。

对比手工计算,需设计人员根据设计参数确定基本结构参数,依此建立数学模型,得到驱动角与滚筒角速度之间的函数图形;通过函数图形,结合 CATIA 运动仿真模块进行干涉分析,确定辅助结构参数,从而完成滚筒式免耕播种机构的设计过程。在表 2 中抽取第 1、3、5、7 组数据进行手工验证,圆整后的计算结果与系统测试结果相比无过大偏差。但计算过程方面,即使对于熟悉该机构且熟练掌握计算流程的设计者,获得一组数据平均需要 2 ~ 3 h;对于一般技术人员则需要长达 1 ~ 2 d,且无法避免人员素质及差别所导致的问题与偏差。

由测试结果可知,交互式设计系统可以根据不同作物的播种需求快速做出响应,得出最优参数组合,最大限度缩短了设计时间,适应定制化研发。解决了传统设计中由于参数的改变,重复进行优化过程,使计算量增大等问题,从而减轻了设计人员的劳动强度。

5 关联模型建立及驱动

5.1 关联模型建立

为减轻设计人员的劳动强度,提高设计效率,利用关联设计方法建立参数化模型,使得优化后的结构参数可直接驱动模型改参,获得所需模型。

关联设计主题思想是将设计特征与设计参数和设计输入关联起来,通过关联和发布机制实现关联

表 2 滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统测试与手工计算结果

输入		输出									
项目	序号	株距/ mm	还田量/ (kg·hm ⁻²)	滚轮半径/ mm	滚筒半径/ mm	鸭嘴高度/ mm	鸭嘴数	助力角/ (°)	驱动角/ (°)	开孔数	开孔长度/ mm
系统测试结果	1	80	7 500	204	408	70	16	22	24	31	60
	2	80	10 500	204	408	80	16	23	26	31	73
	3	80	15 000	204	408	90	16	19	30	30	70
	4	100	7 500	191	382	70	12	20	30	23	55
	大豆 5	100	10 500	191	382	80	12	22	31	23	71
	6	100	15 000	191	382	90	12	24	32	23	88
	7	120	7 500	191	382	70	10	27	27	20	73
	8	120	10 500	191	382	80	10	22	34	19	65
	9	120	15 000	191	382	90	10	24	36	19	83
	10	180	6 750	229	458	70	8	27	30	16	72
	11	180	9 750	229	458	80	8	27	31	16	84
	12	180	13 500	229	458	90	8	27	32	16	97
	13	200	6 750	191	382	70	6	27	35	12	75
	14	200	9 750	191	382	80	6	19	47	11	56
	15	200	13 500	191	382	90	6	23	47	11	76
手工计算结果	1	80	7 500	204	408	70	16	24	27	31	61
	3	80	15 000	204	408	90	16	21	31	30	72
	5	100	10 500	191	382	80	12	21	29	23	74
	7	120	7 500	191	382	70	10	26	28	20	76

设计。它大大减轻了设计者的负担,激活了设计者的主动创新思想^[30-31]。滚筒式免耕播种机构播种单元参数化模型如图 9 所示,其具体设计过程如下:

在 CATIA 中建立完整的结构树,并建立详细的骨架模型。在一个新的装配中新建一个名称为骨架的 Part,骨架应当是该装配的第一个零件;使用 Fix

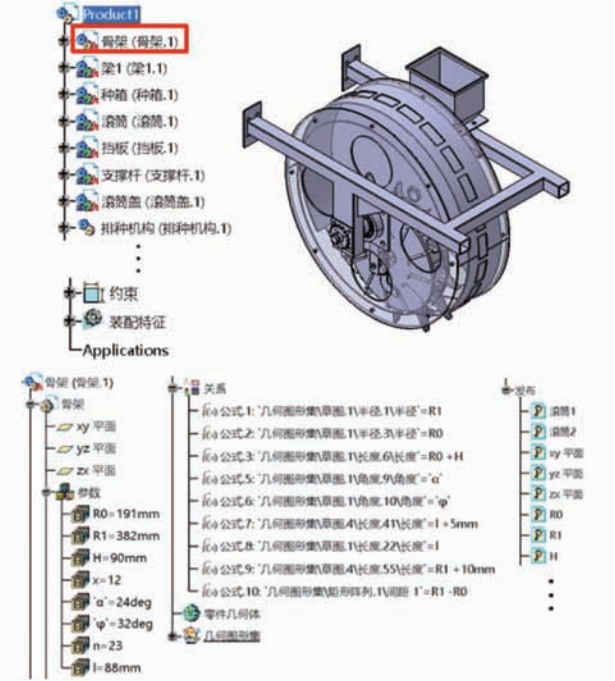


图 9 滚筒式免耕播种机构播种单元参数化模型

Fig. 9 Parameterized model of seeding unit of drum-type no-till planter mechanism

装配约束,在该装配中固定骨架模型;创建用来定义整个装配的几何参考特征和用户参数,根据各子装配与各零件之间的相对位置关系,建立基准点、基准线、基准面,并根据滚筒式免耕播种机构的运动原理图绘制草图,作为整个机构的基本骨架;发布骨架中定义的几何信息和用户参数,以更好地控制所创建的外部参考特征。

在一个产品模型中,除主骨架之外还存在多个子骨架,如排种机构骨架。子骨架中的信息来自于主骨架并添加了新的相对于子装配的驱动信息,使关联信息可以更好地自上而下传递。

通过关联 copy/paste 将相应的骨架中的信息传递到相应的部件中。在相应的部件中进行设计,并通过骨架建立相应空间位置约束,从而完成整个参数化模型的设计。

5.2 关联模型驱动

使用 VB. NET 对 CATIA 进行二次开发。通过人机交互界面辅助完成滚筒式播种机构的设计,并可直接在界面中修改参数值驱动模型改参。设计的人机交互界面如图 10 所示。

从表 2 中选择 4 组参数,其输入参数依次为:(大豆)株距 80 mm,还田量 7 500 kg/hm²;(大豆)株距 120 mm,还田量 15 000 kg/hm²;(玉米)株距 180 mm,还田 6 750 kg/hm²;(玉米)株距 200 mm,还田量 13 500 kg/hm²。通过向人机交互界面中依次

输入与4组输入参数所对应的结构参数,驱动参数化模型改变参数。虚拟驱动后结构如表3所示。



图 10 模型参数化界面
Fig. 10 Model parameterization interface

表 3 关联模型驱动变化对比

Tab. 3 Correlation model driven variation comparison			模型	
作物种类	株距/mm	还田量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	轴测图	局部放大图
大豆	80	7 500		
	120	15 000		
玉米	180	6 750		
	200	13 500		

6 实例分析

限于篇幅、成本和周期,本文选择表2中的3组数据,加工试验样机,对滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统进行实例分析和验证^[32-33]。

6.1 试验条件

2018年9月,在东北农业大学试验场地进行了滚筒式免耕播种机构样机功能试验,如图11所示。场地模拟免耕作业条件,由模拟机器收获粉碎的陈年玉米秸秆覆盖。试验地土壤为黑土,土壤含水率为17.3%,土壤坚实度为 $3.0\times10^5\text{ Pa}$ 。



图 11 滚筒式免耕播种机构样机功能试验
Fig. 11 Function test of drum-type no-till planter mechanism

6.2 试验方法

以东北地区玉米-大豆免耕轮作播种模式为例,按玉米秸秆还田量100%、70%、50%,株距100 mm、播种深度50 mm的播种需求,根据表2中所对应的结构参数加工滚筒式免耕播种机构试验样机。按照滚筒式免耕播种机构预期实现的设计功能,参照GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》和GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》进行样机功能试验,选用拖拉机配套动力为35 kW,作业速度取1.0、1.5 m/s。每组试验完成后,观测成穴效果并分别测量其播种深度和株距,如图12所示。

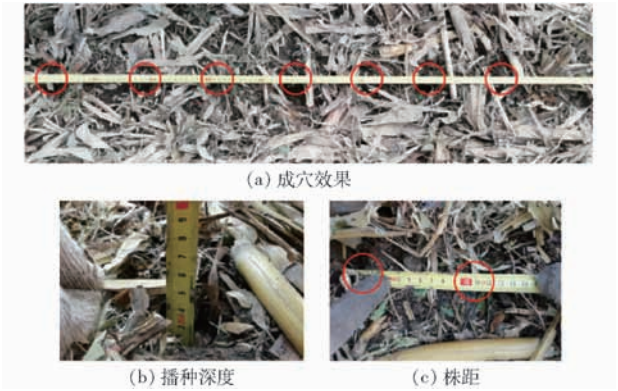


图 12 成穴效果及测量方法
Fig. 12 Cavitation effect and measuring method

6.3 试验结果

试验过程中,滚筒与鸭嘴工作时无干涉,滚筒可以对秸秆进行有效碾压,且通过性良好,对鸭嘴无过大冲击影响。

试验统计结果如表4所示。3组试验中播种深度和株距均满足相关标准规定,可达到播种要求,且播种深度及株距均匀稳定,成穴效果良好。

播种深度及株距合格率在相关标准允许范围内略有下降。一方面试验田地形起伏及秸秆量分布不均匀均可造成合格率下降。另一方面作业速度由1 m/s变为1.5 m/s时,播种深度减小,株距增大,造成整体播种合格率下降,究其原因是作业速度增加致使鸭嘴未充分扎入土壤即脱离成穴区域前进,且滚筒滑移量相对增加。

试验证明了滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统的可行性和有效性。

表 4 试验统计结果
Tab.4 Test statistical results

参数	还田量/ %	速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均值/ cm	合格率/ %	变异系数/ %
播种深度	100	1.0	4.61	95.7	7.7
		1.5	4.41	94.2	9.4
	70	1.0	4.69	96.0	7.8
		1.5	4.50	94.5	14.5
	50	1.0	4.60	95.5	8.2
		1.5	4.44	94.3	8.0
株距	100	1.0	10.54	95.6	5.6
		1.5	10.42	95.4	5.5
	70	1.0	10.27	95.8	3.6
		1.5	10.48	95.2	6.3
	50	1.0	10.13	95.3	7.6
		1.5	10.56	94.7	10.3

7 结论

(1)滚筒式免耕播种机构中涉及参数众多,为方便优化设计,把机构中需要优化的结构参数分为基本结构参数与辅助结构参数。基本结构参数约束了机构的总体尺寸,辅助结构参数保证机构成穴作

业的完成。

(2)以滚筒角速度 ω_1 的求解过程为基础,并将辅助结构参数的求解过程转化为角度与时间之间的函数关系,使问题的求解过程得以简化。

(3)利用 Matlab 语言可获得鸭嘴与滚筒在任意时间段内所转过的角度 β_1 与 β_2 ,并根据线性搜索法,检测鸭嘴与滚筒在运动过程中是否发生干涉。使得结构参数优化算法能够基于 Matlab 语言得以程序化。

(4)利用关联设计方法,根据滚筒式免耕播种机构的运动原理图绘制草图,作为整个机构的基本骨架。通过关联和发布机制,并结合人机交互界面,可快速获得改变参数后的模型,大大减轻设计人员的设计负担,提高滚筒式免耕播种机构的设计效率。

(5)按玉米秸秆还田量 100%、70%、50%,株距 100 mm、播种深度 50 mm 的播种需求,参照系统所得结构参数加工滚筒式免耕播种机构试验样机并进行样机功能试验。穴深和穴距均达到播种要求,且成穴效果良好,证明了滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统的可行性和有效性。

参 考 文 献

[1] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

[2] 孙靖民,王新荣. 现代机械设计方法选讲[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.

[3] 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[4] CHEN Jianneng, ZHAO Yun, YU Gaohong, et al. Establishment and verification of dynamics model of seedling-pushing device in transplanting mechanism with planetary elliptic gears[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5): 71-76.

[5] 李建平,赵匀,应义斌. 振动输送板上物料移动速度和位移的计算机模拟与试验验证[J]. 农业工程学报,1998,14(2): 213-216.

LI Jianping, ZHAO Yun, YING Yibin. Experiment and computer simulation of displacement and traveling speed of agricultural materials on vibrating board[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2): 213-216. (in Chinese)

[6] 赵匀,赵雄,张玮炜,等. 水稻插秧机现代设计理论与方法[J]. 农业机械学报,2011,42(3): 65-68.

ZHAO Yun, ZHAO Xiong, ZHANG Weiwei, et al. Modern design theory and method of rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 65-68. (in Chinese)

[7] 赵匀,武俊生,程革,等. 水稻插秧机分插机构的动力学分析[J]. 农业机械学报,1991,22(3): 20-24.

ZHAO Yun, WU Junsheng, CHENG Ge, et al. The research on dynamics analyzes and testing of four linkage rice transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(3): 20-24. (in Chinese)

[8] 霍军周,张旭,邓立营. 交互式优化设计方法综述[J]. 机械工程与自动化,2014,43(3): 215-217.

HUO Junzhou, ZHANG Xu, DENG Liying. A survey of human-computer optimization methods[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014, 43(3): 215-217. (in Chinese)

[9] 王娜娜,王钰. 交互式虚拟产品展示设计平台的研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版),2006,19(2): 69-73.

WANG Nana, WANG Yu. Research on interactive virtual product exhibition design platform[J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2006, 19(2): 69-73. (in Chinese)

[10] ZHAO Yun, YU Gaohong, CHEN Jianneng, et al. Mechanism dynamics sequence-solution method and its application[J]. ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2006, 2(2): 105-113.

[11] ZHAO Yun, CHEN Jianneng, YU Yaxin, et al. Quadratic optimization method and its application on optimizing mechanism parameter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(4): 519-523.

[12] 张学军,吴成武,王伟,等. 齿形刮板式残膜与残茬输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(9): 49-51.

ZHANG Xuejun, WU Chengwu, WANG Wei, et al. Design and experiment on the zigzag scraper transportation device for remnant plastic film and stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 49-51. (in Chinese)

- [13] 韩豹,吴文福,权龙哲.水平圆盘式苗间锄草装置的多目标优化设计及仿真[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(3):692-696.
HAN Bao, WU Wenfu, QUAN Longzhe. Multi-objective optimization design and simulation on horizontal disk type weeding unit between seedlings [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(3): 692-696. (in Chinese)
- [14] 王方艳,梁洁,尚书旗,等.花生收获机传动系统的运动机理分析与参数优化[J].农业机械学报,2006,37(6):49-53.
WANG Fangyan, LIANG Jie, SHANG Shuqi, et al. Motion theory analysis and parameters optimization of transmission on 4H-2 type peanut harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 49-53. (in Chinese)
- [15] VEGAD G M, YAGVA R. Design analysis and optimization of rotary tiller blades using computer software [J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2018, 49(1): 43-49.
- [16] 孙伟.打穴式免耕播种机的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2006.
- [17] 李洪文,陈君达,邓建,等.旱地玉米机械化保护性耕作技术及机具研究[J].中国农业大学学报,2000,5(4):68-72.
LI Hongwen, CHEN Junda, DENG Jian, et al. Study on technology and machines of mechanized conservation tillage for dryland maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 68-72. (in Chinese)
- [18] 林静,宋玉秋,李宝筏.东北垄作区机械免耕播种工艺[J].农业工程学报,2014,30(9):50-57.
LIN Jing, SONG Yuqiu, LI Baofa. Mechanical no-tillage seeding technology in ridge area of northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9): 50-57. (in Chinese)
- [19] GRISSO R B, HOLSHOUSER D, PITMAN R. Planter/drill consideration for conservation tillage systems[R]. Virginia Cooperation Extension, 2007:196-202.
- [20] GRATTON J, CHEN Y, TESSIER S. Principles of farm machinery. Design of a spring-loaded downforce system for a no-till seed opener[J]. Canadian Biosystem Engineering, 2003, 45:229-235.
- [21] 刘宏新,闻浩楠,改广伟,等.被动滚筒式免耕播种成穴机构设计与实验[J/OL].农业机械学报,2017,48(9):53-61.
LIU Hongxin, WEN Haonan, GAI Guangwei, et al. Design and experiment on passive drum-type no-till planter cavitation mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 53-61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170907&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.007. (in Chinese)
- [22] 刘泉汝,郎坤,赵丹丹,等.秸秆覆盖和种植密度对夏玉米水分利用的影响[J].灌溉机械工程学报,2013,31(12):1089-1091.
LIU Quanru, LANG Kun, ZHAO Dandan, et al. Effects of straw mulching and plant density on water utilization of summer maize[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(12): 1089-1091. (in Chinese)
- [23] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(上册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:321.
- [24] 张军昌,闫小丽,薛少平,等.秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J/OL].农业机械学报,2012,43(12):51-55.
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, XUE Shaoping, et al. Design of no-tillage maize planter with straw smashing and fertilizing [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 51-55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.010. (in Chinese)
- [25] 李丽,王振领.MATLAB 工程计算机应用[M].北京:人民邮电出版社,2001.
- [26] GAO X S, ZHU C. Geometric constraint solving with linkages[J]. Journal of Software, 2000, 61(9): 1151-1158.
- [27] 蔡丽君,张敬涛,刘婧琦,等.玉米-大豆免耕轮作体系玉米秸秆还田量对土壤养分和大豆产量的影响[J].作物杂志,2015,31(5):107-110.
CAI Lijun, ZHANG Jingtao, LIU Jingqi, et al. Effects of corn stalk amount returning to field on the soil nutrient and soybean yields under alternate-year no-till corn-soybean rotation[J]. Crops, 2015, 31(5): 107-110. (in Chinese)
- [28] 刘宏新.大豆密植平播机关键部件研究及整机设计[M].北京:中国农业出版社,2007:29-32.
- [29] 刘龙.种还分离模式秸秆还田对土壤生物学特征的影响[D].长春:吉林农业大学,2017.
- [30] SONG H, KIM Y, SONG J. Automated guidance of peg-in-hole assembly tasks for complex-shaped parts[C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014:4517-4522.
- [31] YIN Zhouping, DING Han, LI Hanxiong, et al. A connector-based hierarchical approach to assembly sequence planning for mechanical assemblies[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(1): 37-56.
- [32] 付宏,王常瑞,靳聪,等.农机部件数字化设计软件平台 AgriDEM 开发[J].农业工程学报,2017,33(7):1-9.
FU Hong, WANG Changrui, JIN Cong, et al. Development of digital design software platform AgriDEM for agricultural machinery parts[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 1-9. (in Chinese)
- [33] 庄叔平,谷波,方继华,等.空调箱数字化设计与选型软件平台技术开发[J].流体机械,2015,43(3):83-87.
ZHUANG Shuping, GU Bo, FANG Jihua, et al. Digital analysis and model selection software developing for air handling units [J]. Fluid Machinery, 2015, 43(3): 83-87. (in Chinese)