

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.007

基于微分几何与 EDEM 的船型开畦沟装置触土曲面优化

刘晓鹏^{1,2} 张青松^{3,4} 刘立超^{3,4} 魏国梁^{3,4} 肖文立^{3,4} 廖庆喜^{3,4}

(1. 武汉轻工大学动物科学与营养工程学院, 武汉 430023; 2. 武汉轻工大学湖北省粮油机械工程技术研究中心, 武汉 430023;
3. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 4. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对长江中下游地区油菜种植时土壤黏重板结、含水率波动大、播种作业需开畦沟避免渍害的农艺要求, 考虑开沟犁体的触土曲面复杂、难以通过高速数字化土槽及田间试验方法寻求其减阻设计方法和理论依据的问题, 采用微分几何理论并结合 EDEM 仿真方法, 开展了驱动圆盘犁对置组合式耕整机开畦沟装置主要触土曲面结构优化研究。通过对主要触土曲面(开畦沟前犁体曲面、船式开沟犁整形曲面)牵引阻力分析和曲面参数分析, 确定了触土曲面主要结构参数范围。根据微分几何理论, 分别建立了能量化描述不同导曲线类型(直线、抛物线、指数曲线)犁体曲面形状变化差异的微分内蕴几何量 E 、 L 、 M 表达式。阻力特性仿真试验结果表明: 在作业速度为 0.9 ~ 1.5 m/s、曲面结构参数一定时, 导曲线为抛物线型的开畦沟前犁和船式开沟犁具有较好的减阻特性, 其平均牵引阻力相比直线型犁体分别低 15.09%、16.92%, 相比指数线型犁体分别低 32.59%、31.58%。触土曲面的内蕴几何量 E 、 L 、 M 可分别反映犁体阻力随速度的增长速率、犁体牵引阻力大小、犁体阻力随速度的波动程度。当设计犁体的导曲线形状使曲面内蕴几何量 E 的变化率较小、 L 为单调减函数、 M 的波动较小时, 犁体具有较好的减阻性能。参数优化仿真试验表明: 在作业速度为 1.2 m/s、抛物线型开畦沟前犁宽度为 92 mm、船式开沟犁整形曲面最大元线角为 66°时, 开畦沟装置牵引阻力最小, 为 1 042.52 N。田间试验表明: 经参数优化的组合式船型开畦沟装置在作业速度为 0.9、1.2、1.5 m/s 时测试的平均牵引阻力分别为 956.77、1 101.33、1 564.85 N, 与仿真试验结果误差在 7% 以内, 作业效果满足油菜播种开畦沟的农艺要求。

关键词: 开畦沟装置; 触土曲面; 结构优化; 微分几何; 内蕴几何量

中图分类号: S222.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0059-11

Surface Optimization of Ship Type Ditching System Based on Differential Geometry and EDEM Simulation

LIU Xiaopeng^{1,2} ZHANG Qingsong^{3,4} LIU Lichao^{3,4} WEI Guoliang^{3,4} XIAO Wenli^{3,4} LIAO Qingxi^{3,4}

(1. College of Animal Science and Nutritional Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China

2. Grain and Oil Machinery Engineering Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China

3. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

4. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Considering the soil in Mid-lower Yangtze River is sticky and its moisture content fluctuates greatly, the furrow should be ditched while rapeseed planting. Due to the lack of theoretical basis for the design of resistance reduction of plow surface, the research on soil contract surface optimization of ship type ditching system was carried out by using the method of differential geometry analysis and EDEM simulation. According to the traction resistance analysis and surface parameter analysis of the main contact surface (front plow surface, shaping surface), the main structural parameters range of the contact surface was determined. Based on the theory of differential geometry, the differential geometric expression which can quantitatively describe the spatial shape change of plow surface with straight, parabolic and

收稿日期: 2019-05-05 修回日期: 2019-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700702、2016YFD020060602)、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)、湖北省丘陵区主要农作物机械化生产关键技术装备研发与集成示范项目和武汉轻工大学青年教师科研启动基金项目(2019RZ10)

作者简介: 刘晓鹏(1989—),男,讲师,博士,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail: conquermygod@163.com

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

exponential curves was established. The simulation results of traction resistance characteristics indicated that the parabolic type plows had better resistance reduction characteristics when the operating velocity was 0.9 ~ 1.5 m/s. And its resistance were reduced by 15.09% , 16.92% and 32.59% , 31.58% respectively compared with the linear type plows and exponential type plows. The intrinsic geometric parameters E , L and M can respectively reflect the growth rate of traction resistance with speed, the magnitude of traction resistance, and the fluctuation degree of traction resistance with speed. The parameter optimization results indicated that when the operating velocity was 1.2 m/s, the width of ditching plow w was 92 mm and maximum element angle $\Phi_{\max}$ was 66° , the minimum traction resistance was 1 042.52 N. Field experiment indicated that the average traction resistance of the combined ship-type ditching system optimized by parameters were 956.77 N, 1 101.33 N and 1 564.85 N, and the error between the system and the simulation test results was less than 7% , and the operation effect met the agronomic requirements of rapeseed planting. The research conclusion had great theoretical value and practical significance to the resistance reduction design of plow which formed by horizontal straight line principle.

Key words: ditching device; soil contact surface; structural optimization; differential geometry; intrinsic geometric quantity

0 引言

油菜是我国重要油料作物,长江中下游地区是我国冬油菜主要种植区域,该地区土壤黏重、板结,且春、秋两季雨水充沛,油菜易遭受渍害^[1],油菜播种作业时需同步在种床厢面两侧开用于排水的畦沟。机械化开畦沟作业多采用被动式犁体或主动式开沟机具^[2-3]。相比主动式开沟机具,被动式犁体结构更简单,能适应较高的作业速度,在农田开沟领域得到了广泛应用。

犁体曲面是一种复杂的空间曲面,常用的犁体多采用水平直元线原理形成犁体曲面^[4-5]。犁体曲面的结构参数、形状变化是影响其作业效果和牵引阻力的重要因素^[6-7]。国内外学者在犁体曲面设计和减阻特性方面开展了诸多研究^[8-13]。犁体曲面结构复杂,通过高速数字化土槽或田间试验的手段研究曲面性质难度较大。近些年来,基于离散元和有限元理论的现代设计方法广泛应用于犁体曲面的研究中^[14-17],但这些研究主要针对犁体曲面阻力与宏观结构参数之间关系进行分析,由于犁体曲面形状变化难以量化描述,鲜有针对犁体曲面形状变化对牵引阻力影响的研究,犁体曲面的减阻设计缺乏相关方法和理论依据。

微分几何是运用微积分理论研究空间曲线、曲面形状变化等几何性质的学科,在机械工程领域得到广泛应用^[18-21]。华中农业大学工学院研制的驱动圆盘犁对置组合式耕整机采用组合式船型开畦沟装置进行开畦沟,其中,开畦沟前犁、船式开沟犁为开畦沟装置的主要触土部件。本文以开畦沟前犁、船式开沟犁为研究对象,采用微分几何理论结合离散元仿真方法,建立能量化描述犁体曲面形状变化

的微分几何表达式,分析犁体曲面形状变化、结构参数对牵引阻力的影响,寻求适用于组合式船型开畦沟装置触土部件低耗、减阻设计的理论依据,以获得具有较优减阻特性的犁体曲面形式。

1 开畦沟装置结构与工作原理

驱动圆盘犁对置组合式耕整机主要由主机架、中央齿轮箱、侧边齿轮箱、驱动圆盘犁组、组合式船型开畦沟装置、限深轮、碎土辊等组成,如图 1a 所示,其结构与工作原理见文献[22-23]。其中,组合式船型开畦沟装置由开畦沟前犁、船式开沟犁组成。

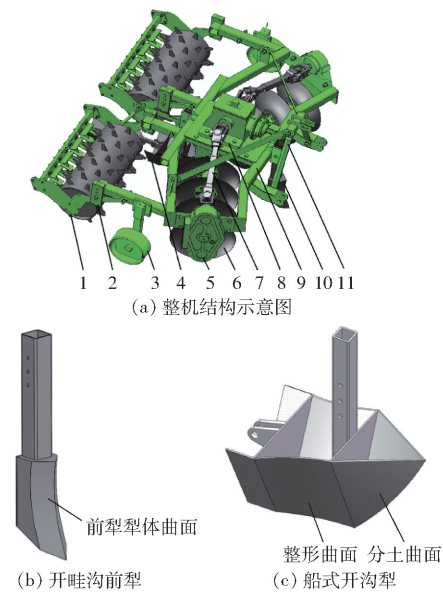


图 1 驱动圆盘犁对置组合式耕整机结构示意图
Fig. 1 Structural sketches of symmetrical driven disc plows combined tillage machine
1. 碎土辊 2 调节装置 3. 限深轮 4. 船式开沟犁 5. 侧边齿轮箱 6. 驱动圆盘犁组 7. 万向节 8. 中央齿轮箱 9. 主机架 10. 开畦沟前犁 11. 三点悬挂装置

作业时,开畦沟前犁破土形成初步沟型,船式开沟犁分土曲面将前犁开沟后残留土壤分向两侧,犁体整形曲面侧向挤压土壤形成满足油菜播种开畦沟农艺要求的梯形畦沟。其中,开畦沟前犁犁体曲面、船式开沟犁整形曲面为开畦沟装置工作时的主要触土、受载曲面。

2 开畦沟装置主要触土曲面设计与分析

根据开畦沟装置的工作原理可知,开畦沟前犁、船式开沟犁的主要触土曲面分别为结构对称的前犁犁体曲面和整形曲面(如图 1b、1c)。二者均采用水平直线法设计,直元线 QQ' 沿导曲线 AB 按元线角 (θ 或 Φ) 均匀减小变化形成,如图 2 所示。

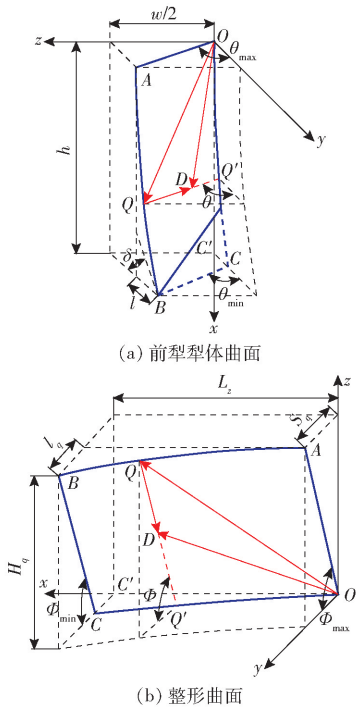


图 2 开畦沟装置主要触土曲面

Fig. 2 Soil contact surfaces of ditching furrow system

2.1 开畦沟装置牵引阻力分析

整机作业时,对置驱动圆盘犁组分别向机组外侧翻耕土壤,在中间未耕区域形成如图 3 所示的凸起开畦沟区域及犁沟,其中,犁沟沟壁由内侧圆盘犁耕后形成。组合式船型开畦沟装置将开畦沟区域土壤侧向挤压,填埋犁沟并形成完整畦沟。开畦沟装置受到的牵引阻力主要由对称布置的前犁犁体曲面、整形曲面与土壤作用产生,如图 3a 所示。开畦沟装置所受牵引阻力 F_d 为

$$F_d = F_1 + F_2 \tag{1}$$

式中 F_1 ——开畦沟前犁牵引阻力, N

F_2 ——船式开沟犁牵引阻力, N

触土曲面的结构参数、形状变化是影响犁体牵引阻力的主要因素^[6-7]。由图 2 可知,触土曲面主

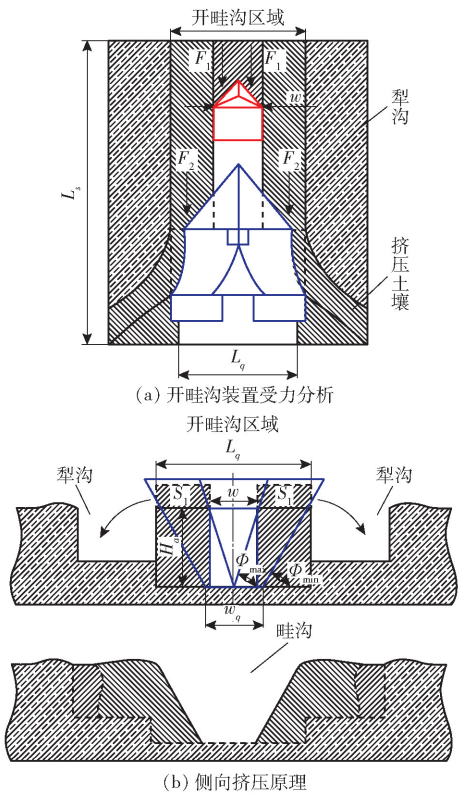


图 3 开畦沟装置主要触土曲面工作原理图

Fig. 3 Soil contact surfaces of ditching furrow system

要结构参数为最大元线角、最小元线角(元线角最大变化量)、高度、宽度、导曲线长度、开度。当结构参数一定时,曲面形状变化则由导曲线类型决定。若设前犁犁体曲面、整形曲面扰动单位体积土壤产生的牵引阻力分别为 f_1 和 f_2 , 则

$$\begin{cases} F_1 = f_1(\theta_{\max}, \theta_{\min}, w, h, l, T) V_1 \\ F_2 = f_2(\Phi_{\max}, \Phi_{\min}, L_s, H_q, T) V_2 \\ V_1 = w H_a L_s \\ V_2 = (L_q - w) H_a L_s \end{cases} \tag{2}$$

式中 $\theta_{\max}$ ——前犁犁体曲面最大元线角, ($^\circ$)

$\theta_{\min}$ ——前犁犁体曲面最小元线角, ($^\circ$)

w ——前犁犁体曲面宽度, mm

h ——前犁犁体曲面高度, mm

l ——前犁犁体导曲线开度, mm

V_1 ——开畦沟前犁扰动土壤体积, mm^3

$\Phi_{\max}$ ——整形曲面最大元线角, ($^\circ$)

$\Phi_{\min}$ ——整形曲面最小元线角, ($^\circ$)

L_s ——整形曲面导曲线长度, mm

H_q ——整形曲面高度, mm

V_2 ——船式开沟犁扰动土壤体积, mm^3

T ——导曲线类型

H_a ——开沟深度, mm

L_s ——作业距离, mm

L_q ——开畦沟区域宽度, mm

由式(1)、(2)可知,除决定触土曲面形状变化的导曲线类型 T 外,当开畦沟区域宽度 L_q 一定时,前犁宽度 w 直接决定了开畦沟前犁与船式开沟犁作业时的扰动土壤体积 V_1 和 V_2 。由于两种犁体工作原理不同,船式开沟犁挤压土壤体积相对较大,故 $f_1 < f_2$ 。因此,若前犁宽度 w 过小,虽可减小前犁阻力 F_1 ,但会显著增大船式开沟犁阻力 F_2 。若前犁宽度 w 过大,前犁阻力 F_1 较大,船式开沟犁牵引阻力 F_2 降低,但由于船式开沟犁作业时需侧向挤压土壤以填埋内侧驱动圆盘犁形成的犁沟,故当前犁宽度 w 过大时,会使后置船式开沟犁扰土面积过小而减弱侧向挤压土壤填埋犁沟的能力。

2.2 开畦沟前犁犁体曲面参数设计与分析

根据油菜播种开畦沟农艺要求,设计开畦沟装置拟开出沟深 250 ~ 300 mm、沟宽 300 ~ 400 mm、沟底宽 120 mm 的梯形畦沟。由于后置的船式开沟犁在前犁开出初步沟型上形成梯形畦沟,故前犁犁体宽度应不大于最终畦沟沟底宽。根据开畦沟装置牵引阻力分析可知,前犁犁体曲面宽度 w 过大或过小均会影响开畦沟质量,故取 w 为 80 ~ 120 mm。开畦沟前犁犁体曲面高度 h 应略高于实际开沟深度,设计取 $h = 350$ mm。参考文献[4]水平直线元犁体设计方法,为保证前犁入土能力,设计犁体最小元线角 $\theta_{\min}$ 为 40° 。元线角最大变化量 $\Delta\theta_{\max}$ 为 5° ,即 $\theta_{\max}$ 为 45° 。由图 2a 可知,前犁犁体曲面导曲线长度即为犁体高度 h ,则

$$\begin{cases} l = \frac{w}{2}(\cot\theta_{\min} - \cot\theta_{\max}) - l_{CC'} \\ \lambda = \frac{h}{l} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $l_{CC'}$ ——犁体外侧开度,mm
 λ ——开畦沟前犁导曲线高宽比

开畦沟前犁作用主要为破土,由图 2a 中几何关系可知,其导曲线为切削刃口曲线,导曲线末端 B 点处切线与水平面夹角 δ 为入土角,导曲线类型决定了曲面形状变化,故导曲线高宽比 λ 和导曲线类型为影响犁体破土性能主要因素。当导曲线类型一定时,若导曲线高宽比 λ 过小,则犁体入土角 δ 较小而不利于入土;若导曲线高宽比 λ 过大,则切削刃口(导曲线)过于平滑致使犁体破土能力较差。为保证前犁破土性能,设计取犁体外侧开度 $l_{CC'}$ 为 50 mm。由式(3)可得导曲线开度 l 为 58 ~ 62 mm,导曲线高宽比 $\lambda \approx 6$ 。此时犁体切削刃口合理平滑变化,能保证犁体破土性能。

2.3 船式开沟犁整形曲面参数设计与分析

假设开畦沟前犁开沟扰动的土壤均匀堆积于沟

壁两侧地表(图 3b),为保证船式开沟犁整形曲面能充分对开畦沟前犁扰动后的土壤作用,应满足

$$\begin{cases} h_a + H_a \leq H_q \\ 2S_1 = H_a w = 2(L_q - w)h_a \end{cases} \quad (4)$$

式中 h_a ——开畦沟前犁扰动土壤两侧堆积高度,mm

S_1 ——开畦沟前犁单侧扰动土壤面积,mm²

船式开沟犁侧向挤压土壤模型见文献[23],参阅文献[23]设计中间开畦沟区域宽度 L_q 为 350 mm,能有效保证侧向挤压土壤填埋驱动圆盘犁形成的犁沟。由式(4)可得 $H_q \geq 380$ mm。因此,设计选取船式开沟犁整形曲面高度 H_q 为 380 mm。由船式开沟犁的工作原理(图 3b)可知,其犁体梯形截面宽度 w_q 即为最终开出畦沟沟底宽,故取 w_q 为 120 mm。整形曲面长度即为导曲线长度 L_z ,若长度 L_z 过小,则犁体会因扰土体积小而难以有效侧向挤压土壤填埋犁沟。若长度 L_z 过大,则犁体触土面积过大而增加犁体磨损。考虑整形曲面触土面积应适中,设计选取整形曲面长度(导曲线长度) L_z 为 300 mm。

当导曲线类型 T 、长度 L_z 一定时,根据文献[22]对船式开沟犁整形曲面挤压过程进行分析,为使整形曲面具有较好侧向挤压能力,应满足

$$\Phi_{\max} \leq 90^\circ - \varphi \quad (5)$$

式中 φ ——土壤摩擦角,取 $20^\circ \sim 26^\circ$ [4]

由式(5)可得 $\Phi_{\max} \leq 70^\circ$ 。整形曲面前端开度 S_q 和导曲线开度 l_q 由最大元线角 $\Phi_{\max}$ 、最小元线角 $\Phi_{\min}$ 决定,由图 3b 几何关系得

$$\begin{cases} S_q = H_q \cot\Phi_{\max} \\ l_q = H_q \cot(\Phi_{\max} - \Delta\Phi_{\max}) + \frac{w_q}{2} - S_q \\ \Delta\Phi_{\max} = \Phi_{\max} - \Phi_{\min} \\ \lambda_q = \frac{L_z}{l_q} \end{cases} \quad (6)$$

式中 S_q ——整形曲面前端开度,mm

$\Delta\Phi_{\max}$ ——元线角最大变化量, ($^\circ$)

λ_q ——整形曲面导曲线高宽比

由式(5)、(6)可知,若最大元线角 $\Phi_{\max}$ 较小,会增大整形曲面前端开度 S_q ,使船式开沟犁前端分土曲面承受较大阻力。故最大元线角 $\Phi_{\max}$ 不宜取较小值,设计选取 $\Phi_{\max}$ 为 $64^\circ \sim 70^\circ$,可满足整形曲面具有较好挤压能力的同时降低阻力。本文设计取元线角最大变化量 $\Delta\Phi_{\max}$ 为 5° ,即最小元线角 $\Phi_{\min}$ 为 $59^\circ \sim 65^\circ$ 。此时导曲线开度为 98 ~ 103 mm,导曲线高宽比 $\lambda_q \approx 3$,处于较合理范围,导曲线能平滑变化并同时保证犁体侧向挤压能力。

2.4 主要触土曲面微分几何性质分析

由前文分析可知,当犁体曲面结构参数一定时,曲面的导曲线类型 T 不同,会使犁体曲面形状变化出现差异,影响犁体牵引阻力。由于传统解析几何方法难以量化描述犁体曲面的形状变化,本文采用微分几何方法,通过建立曲面参数方程并进行若干次微商,构造适当的代数表达式(内蕴几何量)以量化描述不同导曲线类型的犁体曲面形状变化。

2.4.1 参数方程建立

前犁犁体曲面和整形曲面均可看作为直纹面,分别建立如图 2 所示坐标系,根据曲面解析几何理论^[18],两种犁体曲面均参数方程可表示为

$$\boldsymbol{r}(\kappa,\tau)=\boldsymbol{l}_{QQ}+\tau\boldsymbol{l}_{QQ'}\tag{7}$$

式中 κ ——变量参数

τ ——常数变量, $0\leq\tau\leq1$

由图 2 中几何关系可得,前犁犁体曲面和整形曲面参数方程均可表示为

$$\boldsymbol{r}(\kappa,\tau)=(\tau F(\kappa)+(1-\tau)(l(\kappa)+l_{\kappa}),L(\kappa),(1-\tau)H_{\kappa})\tag{8}$$

式中 l_{κ} ——导曲线前端开度, mm

H_{κ} ——导曲线长度, mm

$l(\kappa)$ ——导曲线开度关于变量参数 κ 的函数

$L(\kappa)$ ——导曲线长度关于变量参数 κ 的函数

$F(\kappa)$ ——犁体外侧开度 $l_{CC'}$ 关于变量参数 κ 的函数

为便于计算和表达前犁犁体曲面、整形曲面的几何特性,分别选取元线角变化量 $\kappa=\Delta\theta=\theta_{\max}-\theta$ 或 $\kappa=\Delta\Phi=\Phi_{\max}-\Phi$ 、常数变量 τ 作为方程的变量参数。对于前犁犁体曲面, l_{κ} 、 H_{κ} 取值分别为 $w\cot\theta_{\max}/2$ 和 $(1-\tau)w/2$ 。对于整形曲面, l_{κ} 、 H_{κ} 取值分别为 $H_q\cot\Phi_{\max}$ 和 H_q 。当导曲线类型不同时,变量参数 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\Phi$ 的变化率出现差异,则参数方程的表达形式会出现较大差异。

2.4.2 不同导曲线型触土曲面形状变化分析

微分几何的曲面理论中,空间曲面的形状变化可由如下两个微分方程来表达^[18]

$$\begin{cases} \Sigma_1=E(\mathrm{d}\kappa)^2+2F\mathrm{d}\kappa\mathrm{d}\tau+G(\mathrm{d}\tau)^2 \\ \Sigma_2=L(\mathrm{d}\kappa)^2+2M\mathrm{d}\kappa\mathrm{d}\tau+N(\mathrm{d}\tau)^2 \end{cases}\tag{9}$$

式中 Σ_1 ——曲面第 1 基本形式

Σ_2 ——曲面第 2 基本形式

E 、 F 、 G ——第 1 类内蕴几何量

L 、 M 、 N ——第 2 类内蕴几何量

其中,内蕴几何量 E 、 F 、 G 、 L 、 M 、 N 按文献[18]

中方法计算

$$\begin{cases} E=r_{\kappa}(\kappa,\tau)r_{\kappa}(\kappa,\tau) \\ F=r_{\tau}(\kappa,\tau)r_{\tau}(\kappa,\tau) \\ G=r_{\kappa}(\kappa,\tau)r_{\tau}(\kappa,\tau) \\ L=\frac{(r_{\kappa\kappa}(\kappa,\tau),r_{\kappa}(\kappa,\tau),r_{\tau}(\kappa,\tau))}{\sqrt{EG-F^2}} \\ M=\frac{(r_{\kappa\tau}(\kappa,\tau),r_{\kappa}(\kappa,\tau),r_{\tau}(\kappa,\tau))}{\sqrt{EG-F^2}} \\ N=\frac{(r_{\tau\tau}(\kappa,\tau),r_{\kappa}(\kappa,\tau),r_{\tau}(\kappa,\tau))}{\sqrt{EG-F^2}} \end{cases}\tag{10}$$

由式(9)可知,当变量参数 κ 、 τ 确定时,内蕴几何量 E 、 F 、 G 、 L 、 M 、 N 决定了上述微分方程的表达形式。因此,通过计算曲面的内蕴几何量,可以量化描述曲面的形状变化。由于犁体曲面导曲线常设计为直线、抛物线、指数曲线形式^[4],故本文选取上述 3 种导曲线类型的前犁犁体曲面、整形曲面为研究对象,分别按式(10)计算对应曲面的内蕴几何量,以量化描述不同导曲线类型犁体主要触土曲面的形状变化差异。根据水平直元线形成原理,曲面形状均匀变化可使曲面具有更好力学特性^[4-5]。因此,由式(7)可知,曲面变量参数 κ 随着导曲线开度和犁体底面开度均匀变化,此时函数 $l(\kappa)$ 、 $F(\kappa)$ 可视为一次线性函数。变量参数 κ 随导曲线长度变化的函数 $L(\kappa)$ 形式应与导曲线形式相同。则 3 种导曲线类型犁体参数方程中的各函数可设为如表 1 所示的形式。

表 1 参数方程函数表达形式

函数	导曲线类型		
	直线型	抛物线型	指数曲线型
$l(\kappa)$	$a\kappa$	$a\kappa$	$a\kappa$
$F(\kappa)$	$b\kappa$	$b\kappa$	$b\kappa$
$L(\kappa)$	$c_1\kappa$	$c_2\kappa^2$	$\mathrm{e}^{c_3\kappa}-1$

将上述函数代入式(7)、(10)中计算结果如表 2 所示,3 种导曲线类型的触土曲面对应的内蕴几何量 F 、 G 、 N 均相同,故内蕴几何量 E 、 L 、 M 是体现本文研究触土曲面形状变化差异的主要因素。由表 2 中内蕴几何量 E 、 L 、 M 表达式可知,当曲面导曲线类型一定时,随着曲面结构参数的变化,内蕴几何量 E 、 L 、 M 仍具有相同的表达形式,即结构参数变化不会影响内蕴几何量的变化趋势。当曲面结构参数一定时,曲面形状变化(导曲线类型变化)主要体现在内蕴几何量 E 、 L 、 M 变化趋势的不同,影响触土曲面牵引阻力。

表 2 不同导曲线类型曲面内蕴几何量

Tab.2 Calculated results for intrinsic geometrical quantity of surface with different guide curves

内蕴几何量	导曲线类型		
	直线型	抛物线型	指数曲线型
E	$[(b-a)\tau+a]^2+c_1^2$	$[(b-a)\tau+a]^2+4c_2^2\kappa^2$	$[(b-a)\tau+a]^2+c_3^2e^{2c_3\kappa}$
F	$[(b-a)\tau+a][(b-a)\kappa-l_\kappa]$	$[(b-a)\tau+a][(b-a)\kappa-l_\kappa]$	$[(b-a)\tau+a][(b-a)\kappa-l_\kappa]$
G	$[(b-a)\kappa-l_\kappa]^2+H_\kappa^2$	$[(b-a)\kappa-l_\kappa]^2+H_\kappa^2$	$[(b-a)\kappa-l_\kappa]^2+H_\kappa^2$
L	0	$\frac{2c_2H_\kappa[(b-a)\tau+a]}{\sqrt{EG-F^2}}$	$\frac{c_3^2e^{c_3\kappa}H_\kappa[(b-a)\tau+a]}{\sqrt{EG-F^2}}$
M	$\frac{c_1H_\kappa(a-b)}{\sqrt{EG-F^2}}$	$\frac{2c_2\kappa H_\kappa(a-b)}{\sqrt{EG-F^2}}$	$\frac{c_3e^{c_3\kappa}H_\kappa(a-b)}{\sqrt{EG-F^2}}$
N	0	0	0

3 EDEM 仿真

3.1 模型建立

3.1.1 本征参数与接触模型

长江中下游地区常年稻油轮作,该区域为粘质土壤,参阅文献[24-25]及田间实地测量,本文选用半径为 8 mm 的球形颗粒模拟田间土壤,土壤泊松比为 0.38、剪切模量为 1×10^6 Pa、密度为 $1\,850\text{ kg/m}^3$ 。开畦沟部件材料设置为钢材,泊松比为 0.3、剪切模量为 7.9×10^{10} Pa、密度为 $7\,860\text{ kg/m}^3$ 。土壤-土壤和土壤-犁体恢复系数均为 0.6、土壤-土壤和土壤-犁体静摩擦因数均为 0.6、土壤-土壤和土壤-犁体滚动摩擦因数分别为 0.4、0.05。由于粘质土壤间存在一定粘结力,EDEM 软件的 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型可较好模拟具有粘结力的土壤颗粒,因此本文选择该模型作为仿真实接触模型。对试验用开畦沟前犁、船式开沟犁采用 SolidWorks 软件按 1:1 建立三维模型导入 EDEM 软件中,位于长×宽×高为 $1\,000\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 350\text{ mm}$ 的虚拟土槽一侧,如图 4 所示。

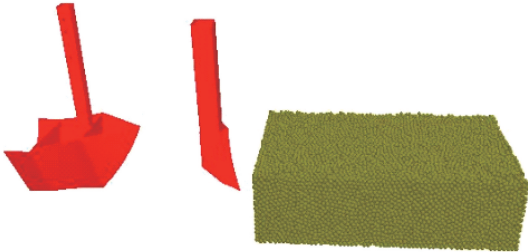


图 4 开畦沟装置 EDEM 仿真模型

Fig.4 EDEM simulation model of ditching system

3.1.2 土壤接触参数标定

选用 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型微观参数为:粘结法向刚度 S_n 、粘结切向刚度 S_τ 、粘结法向临界应力 $\sigma_{\max}$ 、粘结切向临界应力 $\tau_{\max}$ 及颗粒粘结半径 R_b 。其中,粘结半径 R_b 反映湿颗粒含水率。前 4 个参数反映颗粒粘性,由于该模型的粘性刚度对颗粒行为不敏感,可取 $S_n=S_\tau=5\times 10^7\text{ N/m}^{3[15-16]}$ 。

临界粘结应力不便于通过试验测得,本文采用虚拟标定试验与田间试验相结合方法进行标定。为减少标定参数个数,可取 $\sigma_{\max}=\tau_{\max}^{[17]}$ 。

田间试验于华中农业大学现代农业科技试验基地展开,试验选取常年稻油轮作、平坦的地表,土壤含水率为 25.47%、坚实度为 823.9 MPa。试验机具及设备如图 5 所示,测试方法与文献[26]相同,调节限深轮高度控制开沟深度为 300 mm,机组前进速度为 1.2 m/s,通过 BK-5 型拉压力传感器测得组合式船型开畦沟装置平均牵引阻力为 1 076.46 N。通过田间取样土壤测试其单轴压缩法向应力,试验结果表明法向应力为 10^5 Pa 数量级。因此,虚拟标定试验时,设置犁体开沟深度为 300 mm,前进速度为 1.2 m/s。根据田间土壤含水率按文献[27]中计算方法确定粘结半径 R_b 为 9.5 mm。在 EDEM 软件中设定如表 3 所示一系列梯度的临界应力,分别仿真开畦沟装置的平均牵引阻力,并与田间试验牵引阻力进行比较。由表 3 测试结果可知,设置 $\sigma_{\max}=\tau_{\max}=3.5\times 10^5\text{ Pa}$ 时,误差最小,能较真实反映试验土壤与机具互作的力学特性。



图 5 开畦沟装置田间测试装置

Fig.5 Field testing device for ditching system

1. 机架 2. 限深轮 3. 开畦沟前犁 4. 船式开沟犁 5. BK-5 型下拉杆传感器 6. BK-5 型上拉杆传感器

3.2 阻力特性仿真试验

3.2.1 试验方法

分别选取结构参数相同,导曲线分别为直线型、抛物线型和指数曲线型的开畦沟前犁、船式开沟犁为仿真试验对象,探讨犁体曲面形状变化对牵引阻

表 3 土壤颗粒临界应力校核

Tab. 3 Critical stress checking of soil particles

测量参数	仿真临界应力/Pa											
	1×10^5	1.5×10^5	2×10^5	2.5×10^5	3×10^5	3.5×10^5	4×10^5	4.5×10^5	5×10^5	5.5×10^5	6×10^5	
仿真平均牵引阻力/N	756.32	818.54	868.38	919.94	970.21	1 048.90	1 277.85	1 373.91	1 480.28	1 577.46	1 698.69	
田间试验平均阻力/N	1 076.46											
相对误差/%	29.74	23.96	19.33	14.54	9.87	2.56	18.71	27.63	37.51	46.54	57.80	

力的影响。3 种导曲线类型的开畦沟前犁结构参数为: $\theta_{\min} = 40^\circ$ 、 $\Delta\theta_{\max} = 5^\circ$ 、 $w = 100\text{ mm}$ 、 $h = 350\text{ mm}$ 、 $l = 60\text{ mm}$; 船式开沟犁结构参数为: $\Phi_{\min} = 67^\circ$ 、 $\Delta\Phi_{\max} = 5^\circ$ 、 $L_z = 300\text{ mm}$ 、 $H_q = 380\text{ mm}$ 、 $w_q = 120\text{ mm}$ 、 $l_q = 100\text{ mm}$ 。上述 3 种导曲线类型犁体的曲面形状变化主要体现在曲面内蕴几何量 E 、 L 、 M 的变化趋势不同, 将犁体结构参数代入表 2 中表达式计算可得 E 、 L 、 M 的变化规律。其中, 由于常数变量 τ 的大小反映曲面纵向位置上的形状, 对犁体曲面受力分析时常将所受合力作用点简化至中心处, 故计算时取 $\tau = 0.5$ 。设置 EDEM 中土壤模型为前文标定参数, 犁体作业深度为 300 mm , 前进速度与驱动圆盘犁对置组合式耕整机的常规作业速度相同, 为 $0.9 \sim 1.5\text{ m/s}$ ^[22], 仿真总时间为 5 s , Rayleigh 时间步长为 20% , 网格单元尺寸为最小颗粒半径的 3 倍。其中, $0 \sim 2.5\text{ s}$ 为颗粒生成及稳定阶段, $2.5 \sim 5\text{ s}$ 为犁体运动阶段。

3.2.2 试验结果分析

3 种导曲线类型的开畦沟前犁、船式开沟犁牵

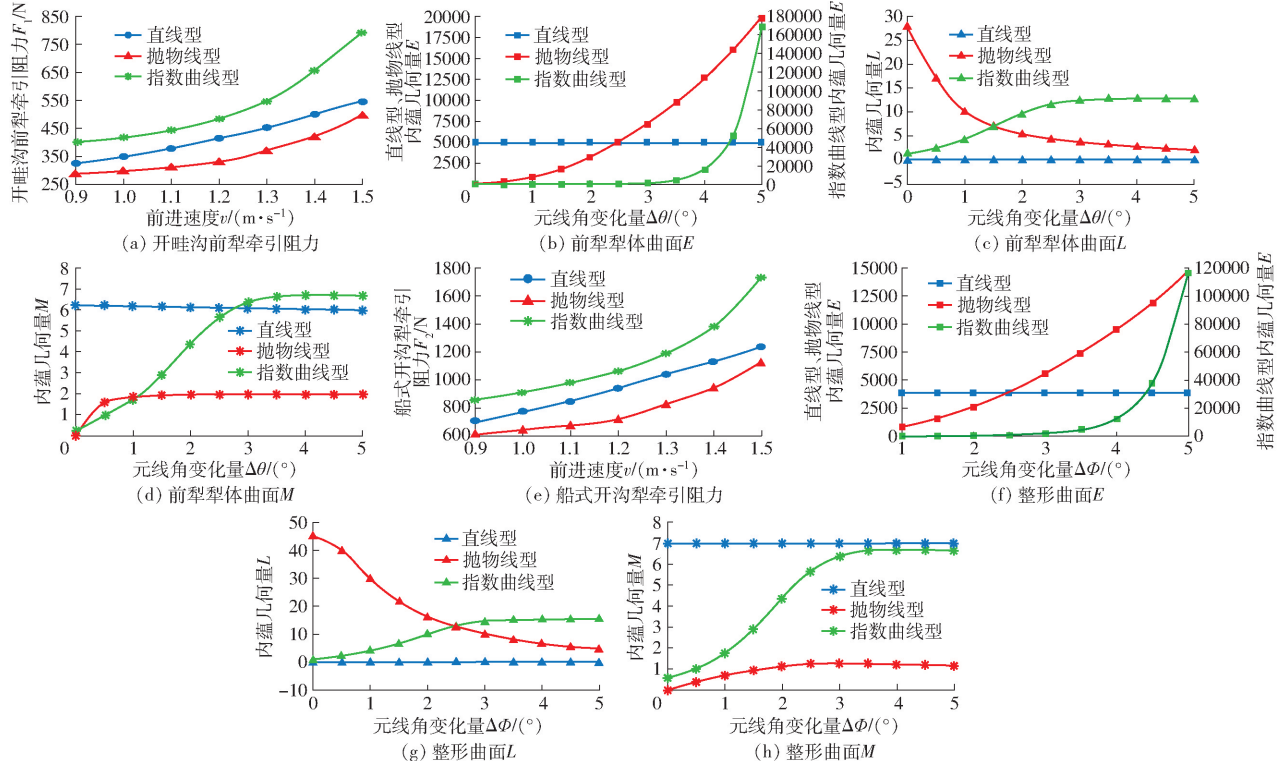


图 6 牵引阻力及内蕴几何量 E 、 L 、 M 的变化曲线

Fig. 6 Variation trends of traction resistance and E , L and M

引阻力随速度变化趋势及其内蕴几何量变化规律如图 6 所示。

由仿真试验结果可知, 当犁体曲面结构参数一定时, 在仿真速度范围内, 开畦沟前犁、船式开沟犁牵引阻力的大小顺序均为: 抛物线型、直线型、指数曲线型。抛物线型开畦沟前犁、船式开沟犁所受平均牵引阻力相比直线型分别低 15.09% 、 16.92% , 相比指数曲线型分别低 32.59% 、 31.58% ; 在仿真速度由 0.9 m/s 增至 1.5 m/s 过程中, 开畦沟前犁、船式开沟犁牵引阻力增长速率由大到小顺序均为: 直线型、抛物线型、指数曲线型。直线型犁体近似匀速变化, 抛物线型、指数曲线型变化速率越来越大; 在整个仿真速度变化过程中, 开畦沟前犁、船式开沟犁牵引阻力的波动程度(增长倍数)均为: 直线型、抛物线型、指数曲线型, 直线型开畦沟前犁、船式开沟犁牵引阻力分别增大了 1.67 、 1.78 倍, 抛物线型犁体牵引分别增大了 1.72 、 1.85 倍, 指数曲线型犁体牵引阻力分别增大了 1.97 、 2.02 倍, 抛物线型与直线型犁体牵引阻力的波动程度相差不大。

由图 6b、6f 中内蕴几何量 E 的变化规律可知,直线型犁体的内蕴几何量 E 均为定值,抛物线型和指数曲线型犁体的 E 值变化速率越来越大,且指数曲线型犁体的 E 值变化速率更大,犁体内蕴几何量 E 的变化速率与其牵引阻力随速度的增长速率的变化规律一致;由图 6c、6g 中内蕴几何量 L 的变化规律可知,抛物线型犁体的 L 单调递减,直线型犁体 L 为定值,指数曲线型犁体 L 单调递增,当犁体的 L 为单调递减变化时,牵引阻力较小;由图 6d、6h 中内蕴几何量 M 的变化规律可知, M 的波动程度大小(增量)均为:直线型、抛物线型、指数曲线型,与犁体牵引阻力的波动程度(增长倍数)变化规律一致。根据仿真试验及前文曲面微分几何性质分析,当导曲线类型一定时,曲面结构参数变化不会影响内蕴几何量的变化趋势,故内蕴几何量 E 、 L 、 M 可分别反映犁体阻力随速度的增长速率、犁体牵引阻力大小、犁体阻力随速度的波动程度。因此,在设计水平直元线形成的犁体曲面时,如果设计的犁体导曲线形状能使曲面内蕴几何量 E 的变化率较小、 L 为单调减函数、 M 的波动较小,可使犁体具有较好的减阻性能。根据上述分析,本文设计开畦沟前犁、船式开沟犁的导曲线为抛物线时,相比直线型、指数曲线型犁体,其主要触土曲面内蕴几何量 E 、 L 、 M 可处于更优变化范围内,犁体牵引阻力更小。

3.3 参数优化试验

通过阻力特性试验分析可知,在驱动圆盘犁对置组合式耕整机作业速度范围内,抛物线型犁体具有更好减阻特性。由前文主要触土曲面设计与分析可知,在部分结构参数一定时,除导曲线类型外,开畦沟前犁宽度 w 、船式开沟犁整形曲面最大元线角 $\Phi_{\max}$ 为影响开畦沟装置牵引阻力的主要因素。本文以抛物线型犁体为试验对象,选取上述二者为试验因素,开畦沟装置总牵引阻力 F_d 为评价指标,开展开畦沟装置主要触土曲面参数优化试验,仿真试验时固定犁体作业深度为 300 mm、作业速度为 1.2 m/s,试验因素编码如表 4 所示。

表 4 试验因素编码

Tab.4 Experimental factors and levels

编码	因素	
	开畦沟前犁宽度 w/mm	最大元线角 $\Phi_{\max}/(^{\circ})$
-1.682	80	64.0
-1	88	65.2
0	100	67.0
1	112	68.8
1.682	120	70.0

3.3.1 试验结果

试验结果与方差分析结果如表 5、6 所示。

表 5 试验方案与结果

Tab.5 Design and results of experiments

试验 序号	试验因素		总牵引阻力 F_d/N
	开畦沟前犁宽度	最大元线角	
	w/mm	$\Phi_{\max}/(^{\circ})$	
1	112	68.8	1 185.68
2	112	65.2	1 119.14
3	88	68.8	1 200.85
4	88	65.2	1 044.99
5	80	67.0	1 108.92
6	120	67.0	1 138.57
7	100	64.0	1 189.12
8	100	70.0	1 275.53
9	100	67.0	1 048.90
10	100	67.0	1 048.90
11	100	67.0	1 048.90
12	100	67.0	1 048.90
13	100	67.0	1 048.90
14	100	67.0	1 048.90
15	100	67.0	1 048.90
16	100	67.0	1 048.90

表 6 方差分析结果

Tab.6 Results of variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
w	1 226.03	1	1 226.03	5.60	0.039 5	*
$\Phi_{\max}$	14 004.44	1	14 004.44	63.94	<0.000 1	**
$w\Phi_{\max}$	1 996.75	1	1 996.75	9.12	0.012 9	*
$\Phi_{\max}^2$	9 503.92	1	9 503.92	43.39	<0.000 1	**
w^2	58 003.88	1	58 003.88	264.84	<0.000 1	**
回归	79 733.64	5	15 946.73	72.81	<0.000 1	**
残差	2 190.15	10	730.05			
总和	81 923.79	15				

注:**和* 分别表示方差分析在 0.01 和 0.05 水平上显著。

应用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析处理,由方差分析结果知,模型显著性试验 F 值为 72.81, P 值小于 0.000 1,决定系数 R^2 为 0.973 3,表明回归模型显著、拟合程度较好。前犁犁体宽度 w 、整形曲面最大元线角 $\Phi_{\max}$ 均对牵引阻力有显著影响,通过二次多元回归拟合的回归模型为

$$F_d = 83\,971.890\,6 + 33.905\,88w - 2\,548.498\,67\Phi_{\max} - 1.034\,37w\Phi_{\max} + 0.181\,68w^2 + 19.948\,55\Phi_{\max}^2 \quad (11)$$

3.3.2 结果优化

以开畦沟装置牵引阻力最小为目标,前犁犁体宽度 w 、整形曲面最大元线角 $\Phi_{\max}$ 为变量,建立参数优化数学模型。目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min F_d(w, \Phi_{\max}) \\ 80\,\text{mm} \leq w \leq 120\,\text{mm} \\ 64^{\circ} \leq \Phi_{\max} \leq 70^{\circ} \end{cases} \quad (12)$$

利用 Design-Expert 软件进行求解,得出前犁犁体宽度 w 为 92 mm、整形曲面最大元线角 $\Phi_{\max}$ 为 66° 时,开畦沟装置最小牵引阻力为 1 042. 52 N。

4 田间试验

为验证仿真试验结果及考察曲面参数优化的组合式船型开畦沟装置作业效果,在华中农业大学现代农业科技试验基地开展田间试验。试验机具为驱动圆盘犁对置组合式耕整机,试验动力为东方红 LX954 型拖拉机,试验田块常年稻田轮作,平均土壤坚实度为 848. 4 kPa,平均土壤干基含水率为 24. 7%。试验仍用前文使用的 BK-5 型拉压力传感器(图 7a)测试开畦沟装置牵引阻力。试验时,通过调节限深轮控制犁体开沟深度为 300 mm,调节拖拉机挡位和手油门测试开畦沟装置在机组前进速度为 0. 9、1. 2、1. 5 m/s 时的牵引阻力,测试方法参照文献[23,26]。

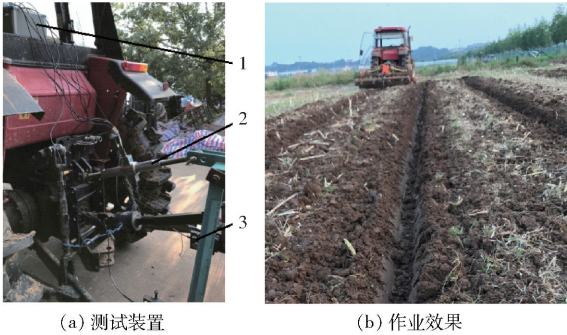


图 7 田间试验

Fig. 7 Field experiments

1. 动态数据采集器 2. BK-5 型上拉杆传感器 3. BK-5 型下拉杆传感器

田间试验效果与牵引阻力测试结果如图 7 和表 7 所示。试验结果表明,组合式船型开畦沟装置在 3 种作业速度下测试的平均牵引阻力分别为 956. 77、1 101. 33、1 564. 85 N,与仿真试验误差均在 7% 以内。开畦沟装置均能开出平均沟深为 294. 8 mm、平均沟宽为 384. 6 mm 的梯形畦沟,并能有效将驱

表 7 田间试验结果与分析

Tab. 7 Analysis and results of field experiments

作业速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	田间测试 平均阻力/N	仿真平均 阻力/N	误差/%
0. 9	956. 77	903. 48	5. 57
1. 2	1 101. 33	1 042. 52	5. 34
1. 5	1 564. 85	1 467. 36	6. 23

动圆盘犁形成的内侧犁沟填埋,作业效果满足油菜播种开畦沟农艺要求。

5 结论

(1)开展了驱动圆盘犁对置组合式耕整地开畦沟装置主要触土曲面的牵引阻力分析和曲面参数分析,确定了主要触土曲面(前犁犁体曲面、整形曲面)的主要结构参数范围。基于微分几何理论,建立了能量化描述不同导曲线类型(直线、抛物线、指数曲线)犁体曲面形状变化差异的微分几何内蕴量 E 、 L 、 M 表达式。

(2)阻力特性仿真试验表明:犁体曲面内蕴几何量 E 、 L 、 M 可分别反映犁体阻力随速度的增长速率、犁体牵引阻力、犁体阻力随速度的波动程度。当设计犁体的导曲线形状能使曲面内蕴几何量 E 的变化率较小、 L 为单调减函数、 M 的波动较小时,犁体具有较好的减阻性能。在犁体曲面结构参数一定,作业速度 v 为 0. 9 ~ 1. 5 m/s 时,导曲线为抛物线型的开畦沟前犁、船式开沟犁具有较好的减阻特性。

(3)参数优化仿真试验表明:在作业速度为 1. 2 m/s、抛物线型开畦沟前犁宽度为 92 mm、船式开沟犁整形曲面最大元线角为 66° 时,开畦沟装置牵引阻力最小,为 1 042. 52 N。

(4)田间试验表明,经参数优化的组合式船型开畦沟装置在作业速度为 0. 9、1. 2、1. 5 m/s 时测试的平均牵引阻力分别为 956. 77、1 101. 33、1 564. 85 N,与仿真试验结果误差在 7% 以内,作业效果满足油菜播种开畦沟的农艺要求。

参 考 文 献

[1] 李玲,张春雷,张树杰,等. 渍水对冬油菜苗期生长及生理的影响[J]. 中国油料作物学报,2011,33(3):247-252.
LI Ling,ZHANG Chunlei,ZHANG Shujie, et al. Effects of waterlogging on growth and physiological changes of winter rapeseed seeding[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(3):247-252. (in Chinese)

[2] 包攀峰,吴明亮,官春云,等. 犁旋组合式油菜播种开沟起垄装置设计[J]. 农业工程学报,2017,33(20):23-31.
BAO Panfeng,WU Mingliang,GUAN Chunyun, et al. Design of plow-rotary style ditching and riding device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the CSAE,2017, 33(20):23-31. (in Chinese)

[3] 吴明亮,官春云,汤楚宙,等. 2BYF-6 型油菜免耕直播联合播种机田间试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(11):172-175.
WU Mingliang,GUAN Chunyun,TANG Chuzhou, et al. Experimental research on 2BYF-6 type no-tillage rape combine seeder in paddy stubble field[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(11):172-175. (in Chinese)

[4] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(上)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

- [5] 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:北京科学技术出版社,1995.
- [6] 西涅科夫 Г H,潘诺夫 N M. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- [7] 吉尔 W R,范德伯奇 G E. 牵引和耕作土壤动力学[M]. 北京:中国农业机械出版社,1983.
- [8] MAK J, CHEN Y, SADEK M A, et al. Determining parameter of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. *Soil & Tillage Research*,2012,118:117-122.
- [9] 翟力欣,姬长英,丁启朔,等. 犁体结构参数和工作参数优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):57-62.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Optimized design of plough body structural and working parameters[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 57-62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130810&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.010. (in Chinese)
- [10] 翟力欣,姬长英,郁隐梅,等. 犁体表面载荷分布的传感器阵列检测[J]. 农业机械学报,2011,42(8):50-53.
ZHAI Lixin, JI Changying, YU Yinmei, et al. Arrayed sensors measurement for load distribution of plow[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(8):50-53. (in Chinese)
- [11] 秦宽,丁为民,方志超,等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(16):7-16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experimental of plowing and rotary tillage combined machine[J]. *Transactions of the CSAE*,2016,32(16):7-16. (in Chinese)
- [12] 秦宽,丁为民,方志超,等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(9):1-8.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. *Transactions of the CSAE*,2016,32(9):1-8. (in Chinese)
- [13] 张青松,汲文峰,廖宜涛,等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):130-135.
ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed seeder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2014,45(2):130-135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140222&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.022. (in Chinese)
- [14] 翟力欣,姬长英,丁启朔,等. 犁面前部土体表层位移场分布有限元分析[J]. 农业机械学报,2011,42(10):45-50.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Analysis of distribution of displacement on soil surface in front of plow with FEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(10):45-50. (in Chinese)
- [15] ASAF Z, DUBINSTEIN D, SHMULEVICH I, et al. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 97(1-2):227-242.
- [16] SHMULEVICH I. State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 111(1):141-153.
- [17] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011,118(5):117-122.
- [18] 陈维桓. 微分几何[M]. 北京:北京大学出版社,2006.
- [19] 张青松,廖庆喜,汲文峰,等. 油菜直播机开畦沟前犁曲面优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):53-59.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1):53-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.008. (in Chinese)
- [20] 郭志军,邢义胜,杜干,等. 触土曲面内蕴几何量对推土板工作阻力的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):328-333.
GUO Zhijun, XING Yisheng, DU Gan, et al. Influence of intrinsic geometrical quantity of soil-engaging surface on working resistance of bulldozing plate[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2014,45(2):328-333. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140254&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.054. (in Chinese)
- [21] 郭志军,杜干,李忠利,等. 触土曲面形式对推土板减阻性能影响的正交试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):372-378.
GUO Zhijun, DU Gan, LI Zhongli, et al. Orthogonal experiment on resistance reduction by soil engaging surface of bulldozer blade[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(7):372-378. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150753&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.053. (in Chinese)
- [22] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):79-87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2017,48(11):79-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010. (in Chinese)

- [23] 刘晓鹏,张青松,肖文立,等. 驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):33–41.
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):33–41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.004. (in Chinese)
- [24] 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀装置中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):60–67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw soil rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):60–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160109&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)
- [25] 丁启朔,任骏,BELAL E A,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):38–48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL E A, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):38–48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.005. (in Chinese)
- [26] 张青松,肖文立,廖庆喜,等. 油菜直播机深浅旋组合式种床整备装置的设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2016,35(4):121–128.
ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, LIAO Qingxi, et al. Designing a deep-shallow rotary tillage device of direct rapeseed seeder[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016, 35(4):121–128. (in Chinese)
- [27] 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2012.
-

(上接第 30 页)

- [23] ZHANG L, LIN L, LIANG X, et al. Is faster R – CNN doing well for pedestrian detection? [J]. arXiv:1607.07032 [cs.CV], 2016.
- [24] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[J]. arXiv:1506.02640 [cs.CV], 2015.
- [25] LIU W, ANGUELOY D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector[J]. arXiv:1512.02325 [cs.CV], 2015.
- [26] 卢蓉,范勇,陈念年,等. 一种提取目标图像最小外接矩形的快速算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(21):178–180.
LU Rong, FAN Yong, CHEN Niannian, et al. Fast algorithm for extracting minimum enclosing rectangle of target image [J]. Computer Engineering, 2010, 36(21):178–180. (in Chinese)
- [27] 吴晓光,王涤琼,盛慧. 一种获取图像区域最小外接矩形的算法及实现[J]. 计算机工程, 2004, 30(12):124–125.
WU Xiaoguang, WANG Diqiong, SHENG Hui. An algorithm and implementaion for obtaining minimum exterior rectangle of image region [J]. Computer Engineering, 2004, 30(12):124–125. (in Chinese)
- [28] 蔡健荣,周小军,李玉良,等. 基于机器视觉自然场景下成熟柑橘识别[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):175–178.
CAI Jianrong, ZHOU Xiaojun, LI Yuliang, et al. Recognition of mature oranges in natural scene based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1):175–178. (in Chinese)
- [29] 肖轶军,丁明跃,彭嘉雄. 基于迭代最近点的 B 样条曲线拟合方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2018, 5(7):585–588.
XIAO Yijun, DING Mingyue, PENG Jiaxiong. ICP-based B-spline curve fitting[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 5(7):585–588. (in Chinese)
- [30] 贺忠海,王宝光,廖怡白,等. 利用曲线拟合方法的亚像素提取算法[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(2):195–197.
HE Zhonghai, WANG Baoguang, LIAO Yibai, et al. Subpixel algorithm using a curve fitting method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(2):195–197. (in Chinese)
- [31] HAMA A S, EL-IRAQI M E, SHARIBIM Y, et al. Design and evaluation of mechanical picking heads for citurs fruits harvesting[J]. Egypt. J. Agric. Res., 2011, 89(4):1545–1562.