

触土曲面形式对推土板减阻性能影响的正交试验*

郭志军¹ 杜 干² 李忠利¹ 李心平¹

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003;
2. 海军工程大学后勤指挥与工程系, 天津 300450)

摘要: 结合经典推土板设计理论和研究成果,对推土板触土曲面结构进行准线形式和切削角的组合设计,采用缩尺模型设计与制作了9个推土板模型。通过室内土槽正交试验研究了触土曲面准线分别为圆弧、抛物线和仿生曲线,切削角分别为50°、55°和60°的9种推土板模型的阻力特性。结果表明准线形式和切削角的交互作用,以及准线形式对工作阻力具有显著影响,显著性水平都达到了0.25。与传统的圆弧曲面推土板相比,抛物面可相对降低工作阻力4.6%,仿生曲面降低16.0%(垂直阻力分别降低4.8%和51.4%)。研究成果对推土板及相关宽齿土壤切削部件的高效节能设计具有较重要的参考价值。

关键词: 推土板 触土曲面 正交试验 工作阻力 节能

中图分类号: S220.1; S222.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0372-07

Orthogonal Experiment on Resistance Reduction by
Soil-engaging Surfaces of Bulldozer Blade

Guo Zhijun¹ Du Gan² Li Zhongli¹ Li Xinping¹

(1. Vehicle and Transportation Engineering Institute, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. Department of Logistics Command and Engineering, Navy University of Engineering, Tianjin 300450, China)

Abstract: The power consumed by bulldozer's main working parts—bulldozer blade accounts for about 40% of the total power of the bulldozer in working process. It has great significance to optimize the structure and working methods of bulldozer blade's macroscopic soil-engaging surface, thus decreasing working resistance and increasing energy efficiency. Combined with the classic design theories and research achievements of bulldozer blades, the modular design of directrix form and cutting angle shall be conducted for macroscopic soil-engaging surfaces structure of bulldozer blades. Nine bulldozer blade models with the cutting angles of 50°, 55° and 60°, respectively, whose soil-engaging surface directrix consists of arc, parabolic and bionic curve respectively, were fabricated and designed with scale model. The resistance features of nine bulldozer blades were studied through indoor soil bin and orthogonal experiment model. The result shows that the interaction between directrix form and cutting angle, and the directrix form has great influence on working resistance with significance level of 0.25. Compared with the traditional circular arc surface bulldozing plate, the paraboloid can relatively reduce the horizontal working resistance by 4.6%, the bionic surface reduced by 16.0%. The vertical resistance is reduced by 4.8% and 51.4%, respectively. The research result has important reference value for the high-efficient and energy-saving design of bulldozer blades and wide tine soil cutting components related.

Key words: Bulldozer blade Soil-engaging surface Orthogonal experiment Working resistance
Energy-saving

收稿日期: 2014-09-22 修回日期: 2014-10-28
* 国家自然科学基金资助项目(51175150)
作者简介: 郭志军,教授,主要从事低速车辆系统动力学研究,E-mail: gzhj1970@163.com

引言

为提高推土机工作效率,可采取的措施主要有:改善发动机性能以提高推土机动力源工作效率;采用液压、双流传动、电传动等新型传动方式提高传动效率;对工作系统与行走系统精确匹配与控制以减小功率消耗,以及改进推土机推土板结构或工作方式获得更小的功率消耗等^[1-2]。其中,推土板作为推土机主要工作部件,推土阻力所消耗功率约占推土机总功率的 40%,减阻设计的潜力较大^[3]。

已提出降低推土板工作阻力的方法主要有触土曲面流体注射润滑法、加热法、磁化法、振动法和仿生法等^[4-6]。其中,仿生方法主要有仿生电渗法、仿生材料改性法、仿生柔性结构法、仿生非光滑法等^[7-10]。上述方法在一定程度上可以减小工作阻力。但是由于存在耐磨性差、加工工艺复杂、辅助件过多、额外能量损失等问题,使得这些方法在推广过程中遇到困难。合理优化耕作部件宏观触土曲面形状能有效减小工作阻力,由此形成的耕作部件具有结构简单、工作可靠、维修成本低、额外消耗能量少的特点。

推土板宏观触土曲面几何轮廓一般由母线沿准线平行移动而成。其中,母线形式一般为直线,母线沿准线的运动方式也主要是平行移动为主。准线在工程中较多采用圆弧或圆弧-直线组合式准线形式^[11-12]。抛物线式犁体曲面具有较好的减阻性能^[12-13],当将抛物线用作推土板触土曲面准线设计时,其减阻性能在此受到关注。前期的仿真与试验研究均表明某些具有优良挖掘功能的动物爪趾触土面轮廓曲线——仿生曲线用作窄齿(深松铲)触土曲面准线设计时,可获得极低的工作阻力^[14]。有限元分析表明当将这种仿生曲线用于宽齿土壤切削工具——推土板触土曲面准线设计时也可获得明显的减阻效果^[15-16]。本文采用正交试验的方式进一步探索仿生推土板的减阻效果。

1 推土板模型设计与制作

参考图 1,推土板结构参数主要包括推土板高度 H 、推土板触土曲面准线或准线曲率趋势线、切削角 δ 、后角 α 、铲尖尖角 β 、前翻角 β_k 、斜装角 ε 、铲刃长度 S 等^[11-12]。推土板高度 H 一般由发动机额定功率 N_e 估算,如对于固定式铲刀常取 $H = (220 \sim 275) \sqrt[3]{N_e}$ 。切削角 δ 是指推土板铲尖处触土曲面与土壤平面间的夹角,一般认为它对切削阻力影响较大,通常取 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。后角 α 是指铲尖后背斜面与地平面的夹角,其值一般取 $30^\circ \sim 35^\circ$ 。后角过小,

则推土板在不平地面上容易出现铲尖后背斜面触地现象,降低推土板切削能力,影响推土效果。铲尖尖角 β 是铲尖前、后面夹角,一般取 30° 左右,它主要和铲尖强度有关。前翻角 β_k 是指推土板触土曲面准线上沿切线与水平面夹角,它主要影响土壤沿触土曲面向前翻落的性能,通常取 $65^\circ \sim 75^\circ$ 。经典圆弧式推土板触土曲面为圆弧面,曲率半径为常数,其圆弧半径 R (图中未标示) 具体数值通过经验公式计算,一般 $R > (0.8 \sim 0.9)H$,通常取 $R = H$ 。由于推土板下部需安装刀片,所以在推土板下部有直线部分 S ,其长度一般取 $(0.1 \sim 0.25)H$ 。另外,图 1 中未标示推土板宽度 B , B 一般应大于推土机两侧履带各 $25 \sim 35 \text{ mm}$,或根据 3 倍左右的推土板高度 H 估算。

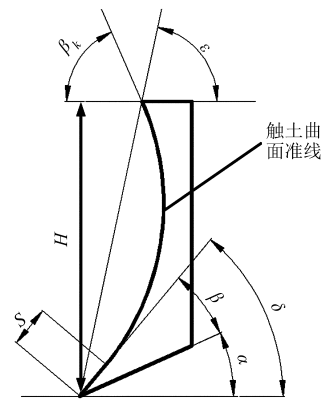


图 1 推土板结构参数示意图
Fig. 1 Schematic diagram of parameters of bulldozer blade structure

实际问题包含众多物理量,而模型简化过程中不能满足所有参数与真实情况都相等的条件。相似理论把握了问题的本质或关注的要点,得到的简化模型,虽不能实现完全的模拟,但局部的模拟常常是可能的^[17]。本文所选的局部条件即为对工作阻力影响较大的 2 个参数:触土曲面准线形式和切削角 δ 。试验所用推土板模型的设计以固定式铲刀为主。分别选取圆弧、抛物线和仿生曲线 3 种触土曲面准线形式,其中仿生曲线准线取自具有变曲率特征的田鼠爪趾纵剖面内轮廓线(图 2)。实际上,圆弧准线具有恒定曲率值。抛物线准线的曲率变化趋势线也具有类似于抛物线的形状^[14, 18]。本文所采用的仿生曲线其曲率变化趋势线具有如图 2 所示的 2 个极大值点,或者从整体上看近似于 2 条抛物线的耦合。对于所选 3 种准线形式依据纵、横坐标按比例缩放,每种准线又分别设计为 50° 、 55° 和 60° 3 种切削角,从而组合设计出 9 种不同触土曲面准线(图 3)。根据上述条件,分别设计与制作了 9 种推土板模型,见图 4。图 4 中由左至右推土板的顺序与

表 1 中 1 ~ 9 的编号一致。

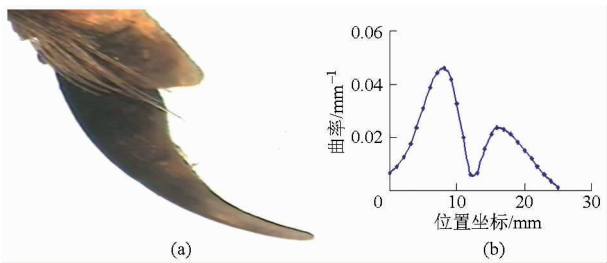


图 2 田鼠爪趾内轮廓线几何特征

Fig. 2 Inner-contour line geometric features of vole claw toe
(a) 田鼠爪单趾图片 (b) 内轮廓线的曲率变化趋势线

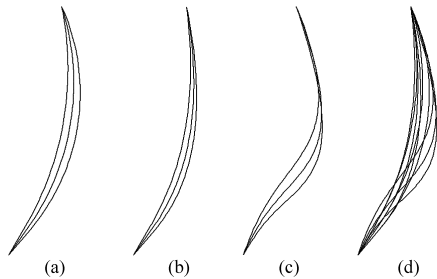


图 3 试验推土板模型触土曲面准线示意图

Fig. 3 Soil-engaging surfaces schematic plot of experimental model bulldozer blades

(a) 圆弧 (b) 抛物线 (c) 仿生曲线 (d) 准线合集

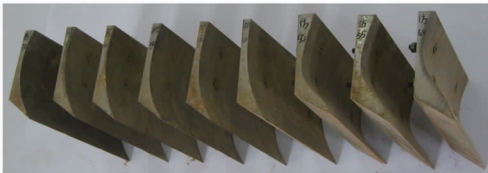


图 4 9 个试验推土板

Fig. 4 Nine experimental bulldozer blades

表 1 试验推土板触土曲面结构参数

Tab. 1 Soil-engaging surfaces structure parameters of experiment bulldozer blades (°)

编号	准线	触土曲面结构参数				
		切削角	前翻角	斜装角	后角	铲尖尖角
		δ	β_k	ε	α	β
1	圆弧	50	66.1	78	20	30
2		55	72.4			
3		60	78.7			
4	抛物线	50	78.7			
5		55	80.2			
6	仿生曲线	60	82.8			
7		50	71.6			
8		55	69.4			
9		60	68.0			

在触土曲面准线形式和切削角 2 个参数变化的情况下,其他参数尽可能保持固定值,见表 1。前翻角 β_k 以 70° 为参考值,在表 1 中其仍具有不同取值,这是由给定准线和切削角参数后自然形成的,或者说是非独立参数。9 种推土板模型的高度与宽度设

计为 $150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 。高度与宽度比适当放大是为了避免推土板缩小尺寸设计后,试验过程中土壤易从推土板上沿落到推土板后面,从而会影响其后布置的传感器及其测试精度。另外,也考虑了各推土板入土部分均具有直线段铲刃。本文中各推土板铲刃长度统一设定为 20 mm 。

2 土槽试验

试验是在自制室内土槽中完成的。土槽有效主体长、宽、高基本参数为 $6\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。台车系统由 PA600 电动葫芦(额定功率 1.15 kW)通过钢丝绳牵引实现水平运动,牵引速度 0.16 m/s 。一般推土机推土作业速度不超过 0.7 m/s ,试验速度略低。这一方面是由土槽长度所限,另一方面为便于顺利完成试验过程中的有效观察和控制。耕作深度均控制为 30 mm ,约为推土板模型高度的 20% (实际推土作业设计耕作深度不超过推土板高度的 40%)。阻力信号经传感器转换成电信号后传输给应变测试系统的数据采集箱,然后输入计算机进行记录、显示与后处理。试验系统框图见图 5。图 6 为土槽、台车及起始工作状态实况照片。试验推土板模型通过 3 个 S 形力传感器与台车相连。S 形力传感器两端均为球铰式结构,构成三维空间力系。3 个力信号通过三角函数运算后可得到各工况下的水平阻力 F_x 、垂直阻力 F_y 、合力 F 及其合力与水平力的夹角 θ 等。

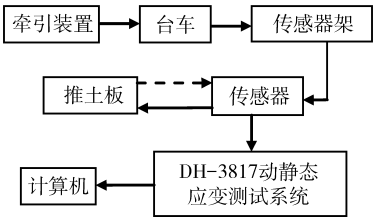


图 5 试验数据采集与处理系统示意图
Fig. 5 Experimental data collection and processing schematic plot

试验用土壤种类为砂壤土,试验前先对土壤进行深翻、洒水等预处理,保持土壤含水率为 18.15% 左右。由于整个试验需多次重复,相应地,土壤也需多次准备。每次试验前将土壤全面松碎、打匀,然后用刮板刮平,并用滚筒压实,控制土壤体积密度为 $1\,164\text{ kg/m}^3$,土壤平均硬度为 0.784 MPa 左右(由 TE-3 型土壤硬度计测量每次土壤处理后的硬度)。通过这些措施尽可能地保证每次试验中土壤的机械性能基本一致,从而增强试验数据的可比性。试验中还用 ZQB-4 型轻便剪力仪测量了土壤内摩擦角和土壤内聚力,所测值分别为 29.83° 和 40.9 kPa 。

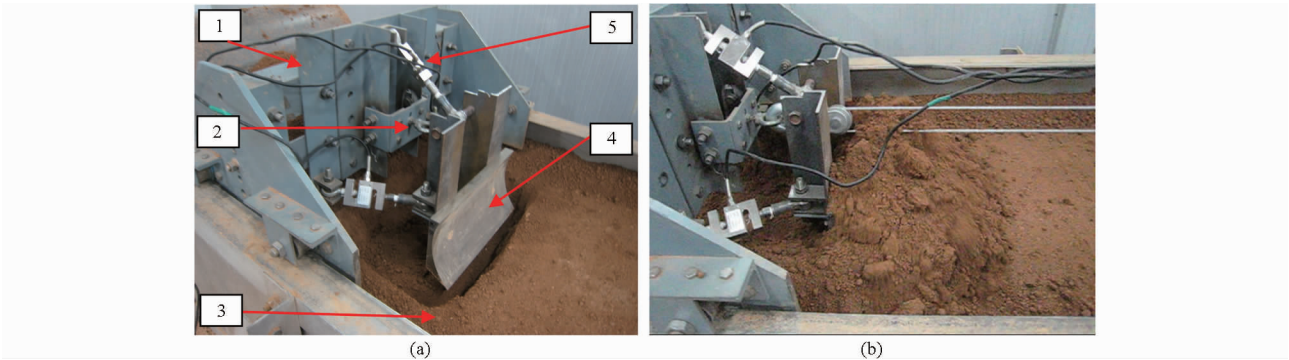


图 6 土槽、台车及工作状态
Fig.6 Soil bin, trolley and working state
(a) 土槽、台车起始工作状态 (b) 试验状态

1. 台车 2. 牵引挂钩 3. 土槽 4. 推土板模型 5. S 形力传感器

3 试验结果分析

试验按照标准 $L_9(3^4)$ 正交表来安排^[19]。表 2 给出了本次试验的因素与水平,表 3 中第 3 因素列考虑的是准线形式和切削角两者的交互作用,第 4 因素列为误差列。表 3 中同时给出的各工作阻力的测试结果均为 3 次重复试验的均值。 A 、 B 为因素编码值。

表 2 因素水平表
Tab.2 Table of factors and levels

水平	因素	
	准线形式	切削角/(°)
1	圆弧	50
2	抛物线	55
3	仿生曲线	60

表 3 推土板模型正交试验及水平阻力分量 F_x 分析结果

Tab.3 Analysis results of bulldozer blade model orthogonal experiment and horizontal resistance component F_x

试验号		因素				水平阻力	垂直阻力	合力	水平阻力-合力夹角
		A	B	A × B	误差	F _x /N	F _y /N	F/N	θ/(°)
	1	1	1	1	1	302.3	72.6	310.9	13.5
	2	1	2	2	2	431.1	86.8	439.8	11.3
	3	1	3	3	3	369.9	65.9	375.7	10.1
	4	2	1	2	3	373.3	83.6	382.5	12.6
	5	2	2	3	1	333.4	66.9	340.0	11.3
	6	2	3	1	2	346.0	64	351.9	10.5
	7	3	1	3	2	301.5	49.4	305.5	9.3
	8	3	2	1	3	284.0	34	286.0	6.8
	9	3	3	2	1	341.3	26	342.3	4.3
极差分析	F _{xj1}	1 103.4	977.1	932.4	977.1	$\sum_{i=1}^9 F_x = 3\,082.8$			
	F _{xj2}	1 052.7	1 048.5	1 145.7	1 078.5				
	F _{xj3}	926.7	1 057.2	1 004.7	1 027.2				
	$\overline{F}_{xj1}$	367.8	325.7	310.8	325.7				
	$\overline{F}_{xj2}$	350.9	349.5	381.9	359.5				
	$\overline{F}_{xj3}$	308.9	352.4	334.9	342.4				
	R _{xj}	58.9	26.7	71.1	33.8				
	优水平	A ₃	B ₁						
	主次因素	A × B、A、B							
	优搭配	A ₃ B ₂							
方差分析	列差平方和 S _j	5 518.82	1 287.74	7 845.02	1 713.74	$S = \sum_{i=1}^9 F_{xi}^2 - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 F_{xi} \right)^2 = 16\,365.14$ $f = 9 - 1 = 8$ $F_{0.25}(2,2) = 3.00$ $F_{0.1}(2,2) = 9.00$			
	自由度 f _j	2	2	2	2				
	均方值	2 759.41	643.87	3 922.51	856.87				
	F _j 比	3.22	0.75	4.58					
	显著性水平 α	0.25		0.25					
	临界值 F _α	3.00		3.00					

表 3 给出了正交试验水平工作阻力分量 F_x 的分析结果。极差分析结果表明主次因素的顺序为：准线形式与切削角的交互作用 $A \times B$ 、准线形式 A 和切削角 B 。虽根据各试验指标的平均值判定最优组合为 A_3B_1 ，但由于交互作用为最显著因素且 B 为不显著因素，综合考察 $A \times B$ 的二元表分析结果（可直接由试验结果读出），发现优搭配为 A_3B_2 。因此，最终认为影响水平工作阻力的各因素最优组合为 A_3B_2 。方差分析结果表明交互作用和准线形式对水平工作阻力影响的显著性水平均达到了 0.25，或者说有 75% 的把握认为交互作用以及准线形式对水平工作阻力有显著性影响。综合分析结果表明仿生

曲线、55°切削角为最优组合，可获得相对较低的水平工作阻力。水平-垂直工作阻力合力 F 的分析结果与水平工作阻力 F_x 的分析结果完全类似，仅是数值的略微差异，此处不再列出。

垂直阻力分量 F_y 虽然相对较小，表 4 也给出了其正交试验分析结果。因交互作用为不显著因素，故最优组合为 A_3B_3 。这说明仿生曲线推土板在获得较低的水平工作阻力分量的同时，也获得了相对较低的垂直工作阻力分量。又根据其方差分析结果，有 90% 的把握认为准线形式对垂直阻力分量有显著影响。

表 4 推土板模型正交试验垂直工作阻力分量 F_y 分析结果

Tab. 4 Analysis results of bulldozer blade model orthogonal experiment vertical working resistance component F_y						
		因素				
		A	B	$A \times B$	误差	
极差分析	F_{y1}	225. 3	205. 6	170. 6	165. 5	$\sum_{i=1}^9 F_y = 549. 2$
	F_{y2}	214. 5	187. 7	196. 4	200. 2	
	F_{y3}	109. 4	155. 9	182. 2	183. 5	
	$\overline{F}_{y1}$	75. 1	68. 5	56. 9	55. 2	
	$\overline{F}_{y2}$	71. 5	62. 6	65. 5	66. 7	
	$\overline{F}_{y3}$	36. 5	52. 0	60. 7	61. 2	
	R_{y_j}	38. 6	16. 6	8. 6	11. 6	
	优水平	A_3	B_3			
	主次因素	$A、B、A \times B$				
优搭配	A_3B_2					
方差分析	列差平方和 S_j	2 732. 83	422. 42	111. 32	200. 78	$S = \sum_{i=1}^9 F_{yi}^2 - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 F_{yi} \right)^2 = 3\,467. 34$ $f = 9 - 1 = 8$ $F_{0.25}(2, 2) = 3. 00$ $F_{0.1}(2, 2) = 9. 00$ $F_{0.05}(2, 2) = 19. 00$
	自由度 f_j	2	2	2	2	
	均方值	1 366. 42	211. 21	55. 66	100. 39	
	F_j 比	13. 61	2. 10	0. 55		
	显著性水平 α	0. 1				
	临界值 F_α	9. 00				

根据表 3 和表 4 的试验结果：从准线形式看，与传统的圆弧曲面推土板相比，抛物面可相对降低工作阻力 4.6%，仿生曲线降低 16.0%（垂直阻力分别降低 4.8% 和 51.4%）。几种曲面的主要区别是准线曲率变化趋势不同，即触土曲面的准线曲率变化趋势对其工作阻力有重要影响。

表 5 给出了水平工作阻力-合力之间夹角 θ 的正交试验分析结果，最优组合为 A_3B_3 。仅根据极差分析结果可认为仿生弯曲形触土曲面工作过程中水平工作阻力与合力之间的夹角 θ 相对较小。但根据方差分析结果，由于误差项相对较大，各因素对于夹角 θ 均不具有显著影响。

4 结论

（1）影响水平工作阻力各因素的主次顺序为准

线与切削角的交互作用、准线形式和切削角。交互作用和准线形式对水平工作阻力影响的显著性水平均达到了 0.25，切削角对于水平工作阻力影响不显著。仿生曲线、55°切削角为最优组合，可获得相对较低的水平工作阻力。水平工作阻力和垂直工作阻力两者间合力的试验数据分析结果与水平工作阻力分析结果类似。

（2）垂直阻力分量相对较小，准线与切削角的交互作用不显著，有 90% 的把握认为准线形式对垂直阻力分量有显著影响。

（3）仿生弯曲形触土曲面工作过程中水平工作阻力与合力之间的夹角 θ 相对较小。虽然准线形式对此夹角影响效果相对明显，但由于误差的干扰，各因素对于夹角 θ 均不具有显著影响。或者说，本文所考虑各因素对于水平阻力-合力之间夹角 θ 的影

表 5 推土板模型正交试验水平工作阻力-合力夹角 θ 分析结果

Tab.5 Included angle θ between F_x and F analysis results of bulldozer blade model orthogonal experiment

		因素				
		A	B	A × B	误差	
极差分析	θ_{j1}	34.9	35.4	30.8	29.1	$\sum_{i=1}^9 \theta = 3\,082.8$
	θ_{j2}	34.4	29.4	28.2	31.1	
	θ_{j3}	20.4	24.9	30.7	29.5	
	$\bar{\theta}_{j1}$	11.6	11.8	10.3	9.7	
	$\bar{\theta}_{j2}$	11.5	9.8	9.4	10.4	
	$\bar{\theta}_{j3}$	6.8	8.3	10.2	9.8	
	$R_{\theta j}$	4.8	3.5	0.9	0.7	
	优水平	A_3	B_3			
	主次因素	$A、B、A \times B$				
优搭配	A_3B_3					
方差分析	列差平方和 S_j	45.17	18.5	1.45	52.0	$S = \sum_{i=1}^9 \theta_i^2 - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 \theta_i \right)^2 = 65.86$ $f = 9 - 1 = 8$ $F_{0.25}(2, 2) = 3.00$
	自由度 f_j	2	2	2	2	
	均方值	22.59	9.25	0.73	26	
	F_j 比	0.87	0.36	0.03		
	显著性水平 α					
	临界值 F_α					

响变化规律仍不明显。

(4) 触土曲面的准线曲率变化趋势对其工作阻力有重要影响。与传统的圆弧曲面推土板相比,抛物面可相对降低工作阻力 4.6%,仿生曲线降低 16.0%(垂直阻力分别降低 4.8% 和 51.4%)。探寻触土曲面准线曲率变化趋势与工作阻力之间的影响机理,以便获得更低的工作阻力是未来触土曲面节能设计的主要研究方向之一。

参 考 文 献

1 邹渊,陈晓玲,李东阁,等. 串联式混合动力推土机驱动系数匹配设计[J]. 机械工程学报,2014,50(1):70-75.
Zou Yuan, Chen Xiaoling, Li Dongge, et al. Parameter matching design and control optimization for series hybrid tracked bulldozer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014,50(1):70-75. (in Chinese)

2 白寒,管成,吴彦来. 推土机半物理试验系统与作业效率复合控制研究[J]. 农业机械学报,2010,41(1):33-40.
Bai Han, Guan Cheng, Wu Yanlai. Semi-physical experiment system and control strategy for bulldozer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(1):34-40. (in Chinese)

3 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):328-333. (in Chinese)

4 Ren Luquan, Tong Jin, Li Jianqiao, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 79(3): 239-263.

5 Nyord T, Kristensen E F, Munkholm L, et al. Design of a slurry injector for use in a growing cereal crop[J]. Soil Tillage Research, 2010, 107(1): 26-35.

6 Friso D, Bietresato M. Dynamic analysis and design guidelines of mechanical oscillators for cutting soil through vibrating tools[J]. Journal of Vibroengineering, 2012, 14(4): 1775-1786.

7 Han Zhiwu, Ren Luquan, Li Jianqiao, et al. Investigations into normal force distribution on several bionic surfaces[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2003, 12(3-4): 209-218.

8 Ren Luquan, Cong Qian, Tong Jin, et al. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method[J]. Journal of Terramechanics, 2001, 38(4): 211-219.

9 Ren Luquan, Han Zhiwu, Li Jianqiao, et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil[J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(4): 221-230.

10 郭志军,佟金,周志立,等. 耕作部件-土壤接触问题研究方法分析[J]. 农业机械学报,2001,32(4):102-104
Guo Zhijun, Tong Jin, Zhou Zhili, et al. Research method about the interacting problem of tillage tool-soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 102-104. (in Chinese)

11 连晋毅. 铲土运输机械设计[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

12 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:北京科学技术出版社,1995.

13 郭志军,周志立,佟金,等. 抛物线型剖面刀具切削性能二维有限元分析[J]. 洛阳工学院学报,2002,23(4):1-4.

Guo Zhijun, Zhou Zhili, Tong Jin, et al. A 2-D finite element analysis for cutting performance of a parabolic curved cutting surface[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2002, 23(4): 1-4. (in Chinese)

14 Guo Zhijun, Zhou Zhili, Zhang Yi, et al. Bionic optimization research of soil cultivating component design[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(4): 955-965.

15 郭志军,周德义,周志立. 几种不同触土曲面耕作部件的力学性能仿真研究[J]. 机械工程学报,2010, 46(15): 71-75.
Guo Zhijun, Zhou Deyi, Zhou Zhili. Simulation research on mechanical performances of several kinds of cultivating components with different soil-engaging surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 71-75. (in Chinese)

16 郭志军,孙政伟,张毅,等. 推土铲切削性能的二维有限元分析[J]. 拖拉机与农用运输车,2006,33(6): 30-33.
Guo Zhijun, Sun Zhengwei, Zhang Yi, et al. Two-dimensional FEA on bulldozing shovel[J]. Tractor & Farm Transporter, 2006, 33(6): 30-33. (in Chinese)

17 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.

18 郭志军,杜干,周志立,等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报,2011, 42(6): 47-52.
Guo Zhijun, Du Gan, Zhou Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47-52. (in Chinese)

19 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春:吉林科学技术出版社,2001.



(上接第 358 页)

14 陈善勇,李圣怡,戴一帆. 考虑特征差异的多特征工件依次定位[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7):13-17.
Chen Shanyong, Li Shengyi, Dai Yifan. Multi-feature workpiece in order localization considering the differences between features [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 13-17. (in Chinese)

15 刘胜兰,张丽艳,王晓飞. 一种考虑区域精度差异的模型配准方法[J]. 机械工程学报,2013,49(13):139-144.
Liu Shenglan, Zhang Liyan, Wang Xiaofei. A shape registration method considering the regional difference in precision[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (13): 139-144. (in Chinese)

16 Bing J, Baba C V. Robust point set registration using Gaussian mixture models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(8): 1633-1646.

17 Tsin Y, Kanade T. A correlation-based approach to robust point set registration[C]//Proceedings of 8th European Conference on Computer Vision, 2004: 558-569.

18 Bergstrom P, Edlund O. Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares[J]. Computational Optimization and Applications, 2014,58(3):543-561.

19 谭高山,张丽艳,刘胜兰,等. 基于 M-估计的线性化稳健配准算法研究[J]. 农业机械学报, 2015,46(4):360-364.
Tan Gaoshan, Zhang Liyan. Liu Shenglan, et al. A robust linearized registration algorithm based on M-estimation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):360-364. (in Chinese)

20 刘胜兰,罗志光,谭高山,等. 飞机复杂装配部件三维数字化综合测量与评估方法研究[J]. 航空学报,2013, 34(2):409-418.
Liu Shenglan, Luo Zhiguang, Tan Gaoshan, et al. Research on 3D measurement and quality evaluation for complex aircraft assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2):409-418. (in Chinese)