

触土曲面内蕴几何量对推土板工作阻力的影响*

郭志军¹ 邢义胜^{1,2} 杜 干³ 张 帅¹

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 海军试验基地, 葫芦岛 125000;
3. 海军工程大学后勤指挥与工程系, 天津 300450)

摘要: 设计了宏观触土曲面准线为圆弧、抛物线和仿生曲线的推土板。通过室内土槽试验测试了3种推土板的工作阻力。建立了3种推土板宏观触土曲面的参数方程,并完成了3种触土曲面第一类基本量 E 、 F 和 G ,曲面第二类基本量 L 、 M 和 N 内蕴几何量计算。得知第一类基本量中的 E 值和第二类基本量中 L 值是影响触土曲面工作阻力的重要因素。仿生曲线式推土板触土曲面 E 值和 L 值具有较复杂变化趋势,也相应获得了较低的工作阻力。圆弧式推土板则具有相对较大的工作阻力。

关键词: 推土板 触土曲面 工作阻力 微分几何 内蕴几何量

中图分类号: TH113.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0328-06

引言

推土板是推土机主要工作部件之一,其设计水平直接影响推土机的工作阻力。目前提出的推土板脱附减阻方法主要有流体注射润滑法、振动法和仿生法等^[1-3]。这些方法在一定程度上可以起到脱附减阻的目的。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一定的困难。

在研究推土板工作阻力数学模型与影响因素时,常用研究方法主要包括经典的土壤耕作动力学理论和现代数值模拟技术,经常考虑的参数主要是推土板材料、推土宽度、切削角、推土深度、纵深比及触土曲面的弯曲几何形状等^[4-7]。这些研究方法较少从触土曲面本身的内在几何性质入手,深入系统地研究宏观触土曲面内蕴几何量(触土曲面几何模型中不依赖于所选坐标系的改变而改变的几何量)与工作阻力的关系。本文以典型宽齿土壤切削工具——推土板宏观触土曲面为研究对象,将微分几何曲面基本理论引入土壤耕作部件宏观触土曲面减阻节能设计的基本方法和土壤耕作动力学模型中。

1 模型推土板的制作与试验

1.1 模型推土板设计

参考图1,经典的推土板结构参数主要包括推土板高度 H 、宽度 B 、推土板触土曲面准线或准线曲

率半径 R 、切削角 δ 、后角 α 、铲尖尖角 β 、前翻角 β_k 、斜装角 ε 等^[4, 6-8]。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,一般认为其对切削阻力影响较大,经验值常取 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。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,圆弧半径 R 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 $S = (0.1 \sim 0.25)H$ 。

推土板触土曲面一般由直线沿着弯曲的准线平行移动而成,见图2。准线形式对推土板工作特性有重要影响。传统推土板触土曲面准线形式一般采用圆弧形式,本文以此作为一种模型来作比较分析^[6]。研究表明抛物线式犁体曲面具有较好的脱附减阻性能^[4, 7],当将抛物线用作推土板触土曲面准线设计时,其脱附减阻性能是本文关注的问题。图3为田鼠爪趾几何分析结果,作者前期的仿真与试验研究均表明这种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)

收稿日期: 2013-01-03 修回日期: 2013-02-24

* 国家自然科学基金资助项目(51175150)

作者简介: 郭志军,教授,博士,主要从事车辆及其装备系统动力学研究, E-mail: gzhj1970@163.com

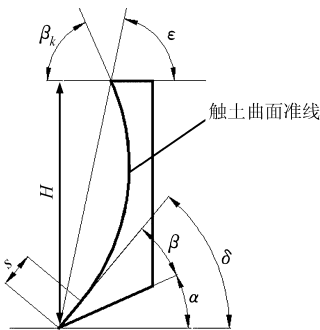


图 1 推土板纵剖面结构参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bulldozing plate and its structural parameters

触土曲面准线设计时,可获得优良的土壤脱附能力和极低的工作阻力^[9-12]。有限元分析表明当将这种仿生曲线用于推土板触土曲面准线设计时也可获得明显的脱附减阻效果^[13]。本文用试验的方式进一步研究这种仿生曲线准线推土板触土曲面的减阻效果。

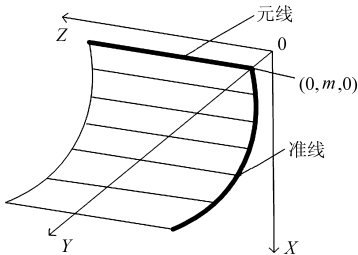


图 2 触土曲面形成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of forming a soil-engaging surface

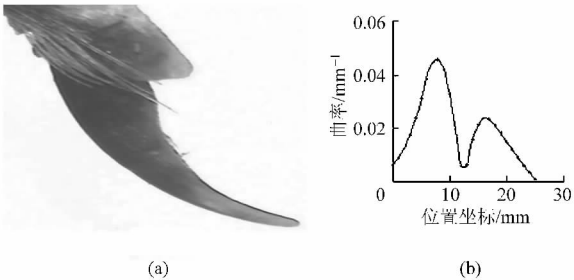


图 3 田鼠爪趾内轮廓线几何特征

Fig. 3 Geometric features of a field mouse's clawed toe
(a) 田鼠爪趾图片 (b) 内轮廓线的曲率变化趋势线

模型推土板设计以固定式铲刀为主。利用近似理论,即本文中仅以准线形式作为唯一的变量,而其他因素尽量保持不变。设计的 3 种推土板宏观触土曲面准线形式分别为圆弧线、抛物线和仿生曲线。参考经验值,试验模型推土板切削角设计成 55°。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。实际推土板高度与宽度比约为 1:2~1:3 之间^[6-7, 14]。本文中 3 种模型推土板的高度与宽度之比取了上限,被设计为 150 mm ×

300 mm。这主要是考虑缩小尺寸的推土板试验过程中土壤易翻越推土板上沿而影响其后布置的传感器,另外各推土板入土部分还统一设定了长度 20 mm 的直线段部分。推土板材料为 Q235 钢,加工完成后的试验推土板实物见图 4a。图 4b 为 3 种模型推土板触土曲面的准线合集。在图 4a 由左至右,图 4b 中由右至左依次为圆弧、抛物线和仿生曲线推土板。

表 1 试验模型推土板触土曲面结构参数

Tab. 1 Structural parameters of soil-engaging surfaces for bulldozing plate models (°)

编号	准线形式	切削角 δ	前翻角 β_k	斜装角 ε	后角 α	铲尖尖角 β
1	圆弧线		72.4			
2	抛物线	55	80.2	78	20	30
3	仿生曲线		69.4			

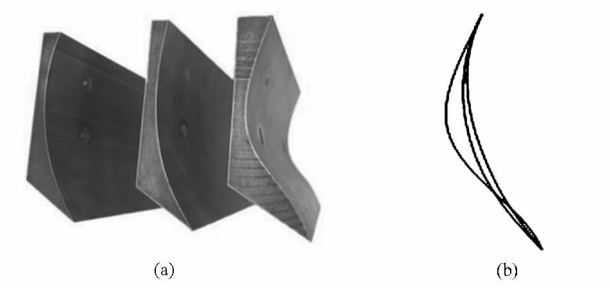


图 4 3 种试验推土板

Fig. 4 Three bulldozing plate models

(a) 试验模型推土板实物 (b) 3 种推土板准线合集

1.2 试验

试验在自制室内土槽中进行。土槽有效土体长、宽、高基本参数为 6 m × 1.2 m × 0.6 m。台车系统由 PA600 型电动葫芦(额定功率 1.15 kW)通过钢丝绳牵引实现水平运动。被推荐的推土机保持高效工作的最高速度一般不超过 0.5~0.9 m/s^[15-16]。该系统所能达到的稳定试验牵引速度 0.16 m/s,试验速度略低。这一方面受室内小型土槽试验的条件所限,即在 4 m 的有效测试区段内满足数据采样要求;另一方面研究的重点在于比较不同触土曲面形状对于工作阻力的影响。实际推土板最大切土深度约为推土板高度的 40%^[15-16]。本次试验切土深度均控制为 30 mm,即试验过程中切土深度与推土板高度之比约为 20%。此比值较小的原因是前文中推土板的高度设计值被略微放大,另外也为了避免试验过程中土壤翻越推土板上沿而影响其后布置的传感器。

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,然后输入微机进行记录、显

示与后处理。图 5 为土槽与测试系统实况照片。试验模型推土板通过 3 个 S 形力传感器与台车相连。3 个 S 形力传感器两端均采用球铰式结构分别与台车和推土板相联接,构成三维空间力系,见图 6。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 和合力 F 等。

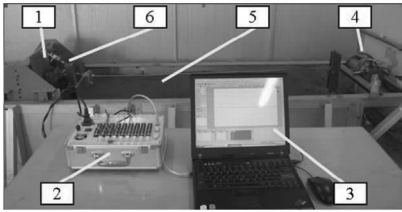


图 5 土槽与台车测试系统

Fig.5 Soil bin, trolley and measurement system

1. 台车 2. 数据采集系统 3. 数据处理系统 4. 电动葫芦
5. 土槽 6. S 型力传感器

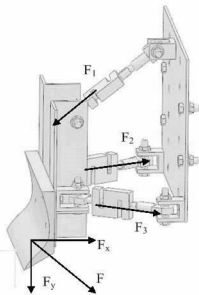


图 6 推土板受力示意图

Fig.6 Force diagram of bulldozing plate

试验用土壤种类为砂壤土。由于整个试验需多次重复,相应地,土壤也需多次准备。试验前先对土壤进行深翻、洒水等预处理。再将土壤全面松碎、打匀,然后刮平,并用固定质量的滚筒对试验土壤均匀镇压 3 次。然后使用相关仪器测试土壤参数。测试结果为:土壤含水率 18.15%,土壤体积密度 $1\,164\text{ kg/m}^3$,土壤平均硬度 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),土壤内摩擦角 29.83° 和土壤内聚力 40.9 kPa(由 ZQB-4 型轻便剪力仪测试)。在后续的各次重复试验过程中,均按同样的程序处理试验土壤,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。推土机实际工作过程中,土壤参数变化情况较复杂。本次试验土壤参数相对单一,一方面是为了增强试验数据的可比性,另一方面根据相似理论限定试验条件,仅研究触土曲面参数变化对工作阻力的影响效果。

1.3 试验结果

3 种模型推土板的工作阻力试验结果如图 7 所示,其中阻力数据均为 3 次重复试验的均值。图 7 表明垂直阻力分量相对较小,水平阻力分量与合力

接近,水平阻力分量的变化趋势也与合力的变化趋势一致。另外,圆弧式推土板水平工作阻力最大,仿生推土板水平工作阻力最小,而抛物线式推土板的水平工作阻力介于两者之间。在 3 种被试推土板模型中,具有仿生曲线形式的推土板获得了相对较低的工作阻力。

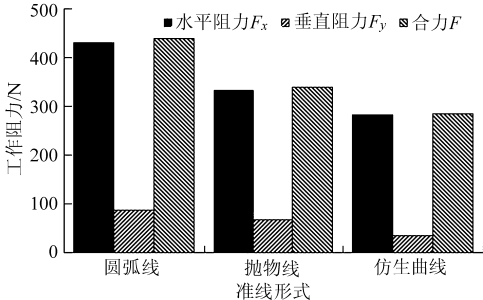


图 7 3 种推土板工作阻力

Fig.7 Working resistance of three kinds of bulldozing plates

2 触土曲面内在几何性质分析

2.1 触土曲面参数化

在图 2 所示的笛卡尔直角坐标系中,曲面的准线方程可以表述为

$$\begin{cases} y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + m \\ z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 a, b, c, d 为不全为零的常数,将式(1)中 x 用参数 u 代替, z 用参数 v 代替,又元线平行于 Z 轴,并运用解析几何知识,把准线形式为式(1)和元线平行于 Z 轴的三维宏观触土曲面可参数化为^[17]

$$r(u, v) = (u, au^4 + bu^3 + cu^2 + du + m, v) \quad (2)$$

虽然所设计的圆弧、抛物线和仿生曲线 3 种模型推土板准线均有确定的方程,但考虑到加工过程中可能会产生误差,另外为了便于 3 种不同推土板宏观触土曲面参数对比,故把 3 种加工后的推土板模型宏观触土曲面准线形式重新测量,采用数据拟合方式统一为四次多项式形式(四次多项式已可使各自的拟合系数超过 99%)。对 3 种模型的触土曲面准线拟合结果,结合 Z 坐标,利用式(2)可分别得到各自的宏观触土曲面参数化方程

$$r(u, v) = \begin{cases} (u, 0.003\,681u^2 - 0.346\,7u + 18.32, v) & (\text{圆弧面}) \\ (u, 1.146 \times 10^{-5}u^3 + 7.172 \times 10^{-4} - 0.147\,7u + 14.8, v) & (\text{抛物面}) \\ (u, -7.380\,1 \times 10^{-7}u^4 + 2.140\,3 \times 10^{-4}u^3 - 0.013\,93u^2 - 0.011\,37u + 23.428, v) & (\text{仿生曲面}) \end{cases} \quad (3)$$

2.2 触土曲面第一类基本量和第二类基本量

推土板宏观触土曲面属于典型的有限空间中的

三维欧氏曲面,其第一基本形式和第二基本形式,合在一起构成了曲面的完全不变量系统,它们决定了曲面的内在几何性质。其中,曲面的第一类基本量(E 、 F 、 G)及其基本形式决定了曲面不依赖于所处空间变换的内蕴几何性质,即曲面在坐标系变换下不变,刚体运动下不变的几何性质。第二基本形式及其基本量(L 、 M 、 N)进一步决定曲面在给定空间中的弯曲特性^[18]。

曲面第一基本形式为

$$I = E(u, v) du^2 + 2F(u, v) dudv + G(u, v) dv^2 \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} E(u, v) = r_u(u, v) r_u(u, v) \\ F(u, v) = r_u(u, v) r_v(u, v) = r_v(u, v) r_u(u, v) \\ G(u, v) = r_v(u, v) r_v(u, v) \end{cases} \quad (5)$$

E 、 F 和 G 为曲面的第一类基本量。

曲面第二基本形式为

$$II = L(u, v) du^2 + 2M(u, v) dudv + N(u, v) dv^2 \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} L(u, v) = \frac{(r_{uu}, r_u, r_v)}{\sqrt{EG - F^2}} \\ M(u, v) = \frac{(r_{uv}, r_u, r_v)}{\sqrt{EG - F^2}} \\ N(u, v) = \frac{(r_{vv}, r_u, r_v)}{\sqrt{EG - F^2}} \end{cases} \quad (7)$$

表 2 3 种模型推土板触土曲面第一、第二类基本量计算结果

曲面第一类基本量			
项目	E	F	G
圆弧式推土板	$1 + (0.007\ 362u - 0.346\ 7)^2$	0	1
抛物线式推土板	$1 + (3.438 \times 10^{-5}u^2 + 1.434\ 4 \times 10^{-3}u - 0.147\ 7)^2$	0	1
仿生式推土板	$1 + (-2.952\ 0 \times 10^{-6}u^3 + 6.420\ 9 \times 10^{-4}u^2 - 0.027\ 86u - 0.013\ 7)^2$	0	1
曲面第二类基本量			
项目	L	M	N
圆弧式推土板	$-0.007\ 362 / \sqrt{EG - F^2}$	0	0
抛物线式推土板	$(6.876 \times 10^{-5}u + 0.001\ 434) / \sqrt{EG - F^2}$	0	0
仿生式推土板	$(-8.856\ 1 \times 10^{-6}u^2 + 1.284\ 1 \times 10^{-3}u - 0.027\ 86) / \sqrt{EG - F^2}$	0	0

抛物面的 E 值变化趋势都类似于抛物线,只不过抛物面的 E 值曲线弯曲程度大于圆弧面 E 值曲线弯曲程度。仿生曲面 E 值随 u 的增加呈近似两条抛物线叠加后的波浪形。图 8b 中,圆弧面 L 值随 u 的增加变化很小,近似为常数(标准圆弧面 L 值为常数即半径,这也说明数据拟合与计算结果的正确性)。抛物面 L 值随着 u 的增加其变化趋势近似为直线, L 值随 u 值增大而减小,但变化范围很小。仿生曲面 L 值变化趋势类似于一种抛物线形状。

L 、 M 和 N 为曲面的第二类基本量。

将式(2)代入式(5)、(7),运算可得

$$\begin{cases} E(u, v) = 1 + (4au^3 + 3bu^2 + 2cu + d)^2 \\ F(u, v) = 0 \\ G(u, v) = 1 \\ L(u, v) = -\frac{12au^2 + 6bu + 2c}{\sqrt{1 + (4au^3 + 3bu^2 + 2cu + d)^2}} \\ M(u, v) = 0 \\ N(u, v) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(6)和式(10)得曲面第一基本形式

$$I = [1 + (4au^3 + 3bu^2 + 2cu + d)^2] du^2 + dv^2 \quad (9)$$

由式(8)和式(10)得曲面第二基本形式

$$II = -\frac{12au^2 + 6bu + 2c}{\sqrt{1 + (4au^3 + 3bu^2 + 2cu + d)^2}} du^2 \quad (10)$$

将式(3)分别代入式(8)中可依次得出 3 种模型推土板宏观触土曲面的第一类基本量和第二类基本量,计算结果见表 2。推土板宏观触土曲面选定的坐标曲线相互垂直,所以 $F=0$ 。推土板宏观触土曲面宽度相同且 v 方向也相同,所以 G 、 M 和 N 相同。推土板宏观触土曲面准线形式不同,造成了 E 值和 L 值的不同。

3 结果分析

3 种曲面的第一类基本量 E 和第二类基本量 L 的变化趋势可通过图 8 来表达。图 8a 中,圆弧面和

对比图 7 试验结果和图 8 的计算结果,可以发现,具有图 8a 所示的波浪形宏观触土曲面 E 值变化趋势时,仿生触土曲面水平工作阻力较小,此时 L 值变化趋势呈现出图 8b 所示的凹函数形式。图 8a 中 E 值弯曲趋势增加,图 8b 中 L 值弯曲趋势也增加,对应推土板工作阻力会出现减小的趋势。或者说触土曲面第一类基本量 E 值和第二类基本量 L 值对推土板工作阻力有明显的影响,通过改变触土曲面第一类基本量 E 值和第二类基本量 L 值有助于尝试反求具有较低工作阻力的推土板触土曲面形式。

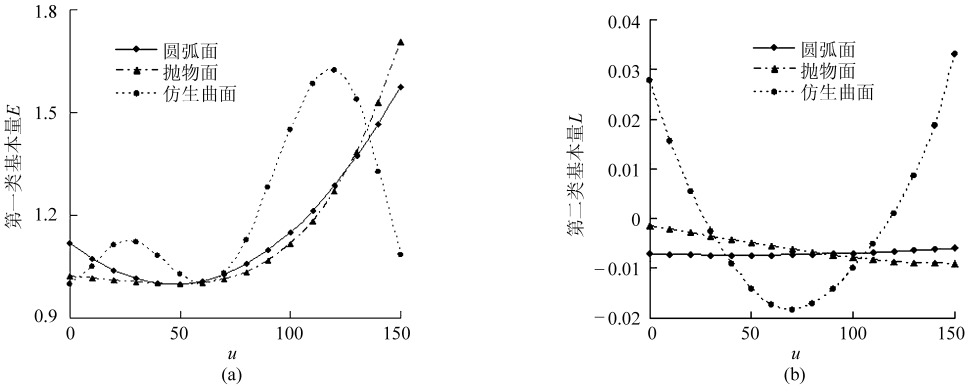


图 8 曲面基本量变化趋势

Fig. 8 Trend charts of soil-engaging surface base quantity

4 结 论

- (1) 在所测试的 3 种推土板中,工作阻力由大至小变化的顺序是:圆弧、抛物线和仿生推土板。
- (2) 3 种触土曲面的第一类基本量 F 和第二类基本量 M 、 N 均为零,第一类基本量 G 均为 1。 E 值和 L 值的变化规律由圆弧至抛物线,再至仿生曲线

显得逐步复杂化。

(3) 第一类基本量中的 E 值和第二类基本量中 L 值的变化对触土曲面工作阻力有明显的影响。在由圆弧至抛物线,再至仿生曲线,3 种对应触土曲面第一类基本量 E 值和第二类基本量 L 值的变化趋势逐步复杂化的过程中,相应推土板工作阻力有逐渐减小的趋势。

参 考 文 献

1 Szabo B, Barnes F, Sture S, et al. Effectiveness of vibrating bulldozer and plow blades on draft force reduction [J]. Transaction of the ASAE, 1998, 41(2):283-290.

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

3 Ren L Q, Han Z W, Li J J, 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.

4 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

5 Godwin R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(2):331-340.

6 徐希民,黄宗益. 铲土运输机械设计[M]. 北京:机械工业出版社,1989:115-117.

7 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:科学技术出版社,1995:189-804.

8 张锐,李建桥,许述财,等. 推土板切土角对于土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(4):822-827.

Zhang Rui, Li Jianqiao, Xu Shucui, et al. Simulation on dynamic behavior of dry soil ahead of the bulldozing plate with different cutting angles by DEM [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(4):822-827. (in Chinese)

9 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)

10 郭志军,周志立,任露泉. 仿生弯曲形切削工具切削性能的二维有限元分析[J]. 机械工程学报,2003,39(9):106-109.

Guo Zhijun, Zhou Zhili, Ren Luquan. A 2-D finite element analysis for the cutting performance of bionic curved cutting tools [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9):106-109. (in Chinese)

11 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.

12 郭志军,周志立,任露泉. 达乌尔黄鼠爪趾几何特征分析[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2003,24(1):1-4.

Guo Zhijun, Zhou Zhili, Ren Luquan. Biomimetics research of geometry characteristics for sperophilus dauricul claws [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2003, 24(1):1-4. (in Chinese)

13 郭志军,孙政委,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):30-32.

Guo Zhijun, Sun Zhengwei, Zhang Yi, et al. Two-dimensional FEA of bulldozing shovel [J]. Tractor & Farm Transporter, 2006, 33(6):30-32. (in Chinese)

14 JB/T 2784—1979 履带式推土机型式和基本参数[S]. 1979.

15 李龙城. 农用液压推土机推切速度与推土铲升降速度最佳协调关系[J]. 北京农业机械化学院学报,1983(1):23 – 36.
Li Longcheng. An investigation on best matching of the push-cut speed with the raising and lowering speed of the blade of hydraulic bulldozers [J]. Journal of Beijing Institute of Agricultural Mechanization, 1983(1):23 – 36. (in Chinese)

16 JB/T 7151—2007 履带式推土机 松土作业试验方法[S]. 2007.

17 陈抚良,张振兰,黄浩然. 解析几何[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

18 陈维桓. 微分几何[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.

Influence of Intrinsic Geometrical Quantity of Soil-engaging Surface on Working Resistance of Bulldozing Plate

Guo Zhijun¹ Xing Yisheng^{1,2} Du Gan³ Zhang Shuai¹

(1. College of Vehicle and Transportation Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. Navy Base of Test, Huludao 125000, China

3. Department of Logistics Command and Engineering, Navy University of Engineering, Tianjin 300450, China)

Abstract: The intrinsic geometrical quantity of macroscopic soil-engaging surface of bulldozing plate plays a decisive role for its geometrical and dynamic characteristics. Three forms of macroscopic soil-engaging surfaces with the arc, parabola and bionic curve were designed and manufactured. The working resistance was measured with a laboratory soil bin. The intrinsic geometrical quantities of the macroscopic soil-engaging, including the first base quantity (E, F, G) and the second base quantity (L, M, N), were calculated based on the parametric equations of the three macroscopic soil-engaging surfaces. It was discovered that E value in the first class of the base quantity and the value of L in the second class of the base quantity were important factors influencing the working resistances of soil-engaging surfaces. The value of E and L of the bionic soil-engaging surface possessed more complex trend, also obtained lower working resistance accordingly. However, the relatively simple arc bulldozing plate had a relatively large working resistance.

Key words: Bulldozing plate Soil-engaging surface Working resistance Differential geometry
Intrinsic geometrical quantity