

# 基于遗传算法的波纹形仿生推土板表面的数学建模与优化设计

任露泉, 刘庆怀, 陶敏

(吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130025)

**摘要:** 该文根据典型土壤动物波纹形几何非光滑体表的特征, 给出了两种波纹形仿生推土板表面的数学描述式, 利用地面机械仿生学及地面车辆理论的研究结果, 建立波纹形仿生推土板表面的非凸优化模型, 并借助于演化计算构建了求解算法, 通过数值计算, 针对不同类型的土壤给出了波纹形仿生推土板的优化设计方案。

**关键词:** 数学建模; 优化设计; 仿生; 推土板

**中图分类号:** TB17

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)02-0078-05

任露泉, 刘庆怀, 陶敏 基于遗传算法的波纹形仿生推土板表面的数学建模与优化设计[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 78- 82

Ren Luquan, Liu Qinghui, Tao Min. Mathematical modeling and optimization design of the wave shape bionic bulldozing plate surface based on genetic algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 78- 82 (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

人们在科研、生产、生活和其他活动中常常使用以土壤为工作介质的农业机械, 它们在作业时都会不同程度地受到土壤的黏附, 轻则增大阻力, 增加能耗, 影响作业质量, 降低生产率, 重则无法工作<sup>[1]</sup>。为解决地面机械触土部件的黏附问题, 从 20 世纪初人们就开始致力于研究土壤黏附的规律与机理, 尝试了多种减黏方法, 如润滑剂、振动、电渗、表面改性和表面改形等方法<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 原吉林工业大学开始从工程仿生学角度研究生活在土壤中的土壤动物的脱附功能与降阻机理。地面机械仿生学研究表明, 典型土壤动物体表及其触土部位具有防黏脱土的外形结构, 普遍存在着几何非光滑特征, 如穿山甲、蜈蚣、蚂蚁、蛻螂和蚯蚓等, 其特点是: 一定几何形状的结构单元随机地或按一定规律地分布于体表某些部位, 表现出明显的几何非光滑特性。不同土壤动物体表结构单元形状大致有鳞片形、凸包形、凹坑形、波纹形、刚毛形以及前面两种或多种形状结合的混合形<sup>[7]</sup>。基于典型土壤动物体表的几何非光滑特点, 对推土板仿生改形研究以利于脱附减阻是地面机械仿生学中重要研究工作之一。所谓仿生推土板就是对推土板表面仿典型土壤动物非光滑体表进行改形而得到的。目前利用试验优化、计算机模拟和分形几何等技术对仿生推土板及仿生犁壁进行减黏脱土仿生研究表明, 模拟典型土壤动物非光滑体表来设计的仿生推土板具有很好的减黏降阻作用<sup>[3-7]</sup>。

为了合理的优化设计仿生推土板, 本文利用土壤下压深度计算公式, 建立了波纹形仿生推土板的非凸非光滑优化模型, 并借助于遗传算法构建了该模型的求解算法, 通过数值计算, 针对不同类型的土壤给出了波纹形仿生推土板的优化设计方案。

## 1 基本原理与假设

### 1) 基本原理

在现有土壤黏附理论中, 土壤- 固体接触面积这一指标是影响土壤黏附状况的重要指标之一。土壤对推土板表面的摩擦力符合库仑公式<sup>[9]</sup>, 即

$$F = A (C + P \operatorname{tg} \theta)$$

式中  $F$ ——摩擦阻力;  $C$ ——土壤黏附力;  $A$ ——土壤与触土部件的接触面积;  $P$ ——土壤对触土部件表面的正压力;  $\theta$ ——土壤与推土板的摩擦角。由此说明土壤动物非光滑体表能够减黏脱土的一个非常重要的原因就是体表与黏湿土壤接触面积的减少, 亦即当土壤介质和正压力一定时, 接触面积越小, 则摩擦阻力越小, 减黏降阻能力也就越好。如文[8]中采用数值分析的方法估计这一指标, 给出了对触土表面的仿生柔性结构单元的优化设计方案。

### 2) 基本假设

为了便于研究, 本文将推土机正常的推土板简化为矩形平板, 并作如下假设:

(1) 推土板的入土角与行进速度恒定, 且土壤下压深度的计算忽略入土角与行进速度因素;

(2) 土体在弹塑性范围内不发生断裂;

(3) 土体均匀地分布在推土板的表面。

### 3) 土壤下压深度计算公式

根据土壤—车辆系统理论, 如果对地面上某局部面积施加一定载荷, 则受载荷的这一部分面积就发生沉陷。为了评价地面车辆的性能, Bekker<sup>[9]</sup>对于匀质土壤提出了下列载荷与沉陷关系:

收稿日期: 2004-04-19 修订日期: 2004-09-06

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项资助项目(002CCA 01200); 教育部科学技术研究重点项目资助(02089)

作者简介: 任露泉, 教授, 博士生导师, 长春市 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 130025

通讯作者: 刘庆怀, 博士后, 教授, 长春市 吉林大学数学学院, 130012

$$p = \left( \frac{k_c}{d} + k\varphi \right) z^n$$

式中  $n$ ——变形指数;  $d$ ——载荷面的短边的长度;  $p$ ——单位面积载荷;  $k_c, k\varphi$ ——分别为内聚变形模量和摩擦变形模量;  $z$ ——沉陷深度。

推土板在推土过程中, 当推土板的板面是平滑表面时, 与土壤的接触面积等于推土板板面的面积。当推土板的板面是仿生表面时, 与土壤的接触面积的计算较为复杂, 若能知道土体在板面上的下压深度, 则可计算板面与土壤的接触面积。而下压深度的多少大致与下列因素有关: 1) 土壤性质(如: 变形指数、内聚变形模量、内摩擦变形模量等); 2) 板面上的载荷(土体对推土板法向压力)与推土板的推力, 这里我们把这两种力的合力称为板面承载力; 3) 仿生推土板板面的特征(如: 凸包或波纹的分布、大小等)。其中, 当推土板在地面上作业时, 由于土壤性质一定, 第一项的值基本上是固定不变的, 而当推土板的入土角与行进速度恒定时板面承载力(第二项值)也基本不变, 因此, 影响仿生推土板与土壤的接触面积大小或下压深度多少主要取决于第三个因素。根据以上分析, 为了优化设计仿生推土板表面形态, 我们对沉陷公式作少许变形, 来计算土壤下压深度, 其计算公式为

$$h = 100 \left[ \frac{p}{(100k_c/b + k\varphi)} \right]^{\frac{1}{\mu}} \quad (1)$$

式中  $p$ ——单位面积上板面的承载力;  $\mu$ ——变形指数;  $k_c$ ——土壤的内聚变形模量;  $k\varphi$ ——土壤的内摩擦变形模量;  $b$ ——仿生推土板的宽, cm;  $h$ ——土壤下压深度 cm。本文所用的土壤类型的数据(见表 1)来源于文[10]。

表 1 土壤类型参数

Table 1 Soil type parameters

土壤类型	$\mu$	$k_c$ /kN·m <sup>-(n+1)</sup>	$k\varphi$ /kN·m <sup>-(n+2)</sup>	$p$ /kN·m <sup>-2</sup>
黏土 1	0.50	13.19	692.15	不同 的值
黏土 2	0.70	16.03	1462.53	
重黏土 1	0.13	12.70	1555.95	
重黏土 2	0.11	1.84	103.27	
贫瘠黏土 1	0.20	16.43	1724.69	
贫瘠黏土 2	0.15	1.52	119.61	

## 2 数学描述与优化模型

### 1) 仿生推土板表面数学描述式

为方便研究和应用, 根据对典型土壤动物非光滑体表的观察和统计分析结果, 以及对蜣螂鞘翅(图 1)和花葬甲鞘翅(图 2)的波纹形几何非光滑体表形貌的仿生类比, 分为两种情形来研究: 仿生类比蜣螂鞘翅(称为波纹形 I, 见图 3)、仿生类比花葬甲鞘翅(称为波纹形 II, 见图 4)。以下各个表达式中,  $a, b, l$  为给定正数, 其中  $a, b$  分别为推土板的高和宽,  $l$  为推土板前端平面部分长度, 单位均为 cm。

#### (1) 波纹形 I 仿生推土板表面的数学描述式

满足此种情况的仿生推土板表面形状如图 3 所示, 其数学描述式设为



图 1 蜣螂鞘翅  
Fig 1 Elytrum of dung beetle

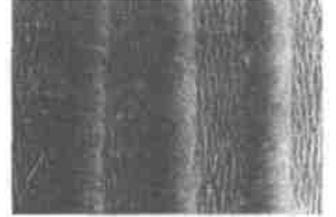


图 2 花葬甲鞘翅  
Fig 2 Elytrum of variegated pangolin

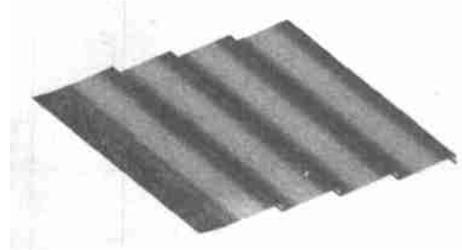


图 3 波纹形 I 推土板

Fig 3 Wave shape I bulldozing plate

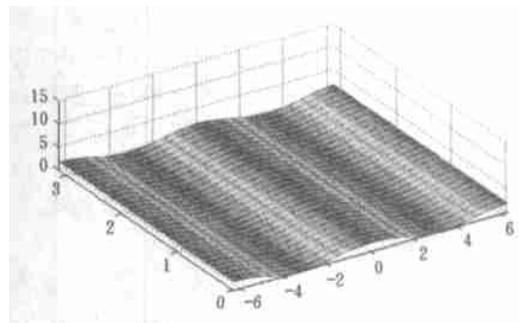


图 4 波纹形 II 推土板

Fig 4 Wave shape II bulldozing plate

$$z = \begin{cases} \alpha(x - k\beta), k\beta & x & k\beta + \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} \text{ 且 } 0 & x & n\beta, \\ 0 & y & b \\ \sqrt{\beta^2 - (x - k\beta)^2}, k\beta + \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} & x & \beta + k\beta \text{ 且} \\ 0 & x & n\beta, 0 & y & b \\ 0, -l & x & 0, n\beta & x & a, 0 & y & b \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\alpha > 0$ ——与波峰高度有关的参数;  $\beta > 0$ ——相邻波峰间距离的参数;  $k = 0, 1, \dots, n - 1$  为整数,  $n$

$= \left[ \frac{a}{\beta} \right]$  (取整) 为波纹的个数参数。

#### (2) 波纹形 II 仿生推土板表面的数学描述式

该种仿生推土板表面形状如图 4 所示, 其数学描述式设为

$$z = \begin{cases} \frac{1}{2} \beta \sin(\alpha x - \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{2} \beta, 0 & x & \frac{2n\pi}{\alpha}, 0 & y & b \\ 0, -l & x & 0, \frac{2n\pi}{\alpha} & x & a, 0 & y & b \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\beta$ ——波峰高度参数;  $\alpha$ ——关于相邻两波峰间的距离参数;  $n = \left[ \frac{a\alpha}{2\pi} \right]$ ——波纹个数参数。

#### 2) 仿生推土板与土壤接触面积

为了确定波纹形仿生推土板表面的优化模型, 利用曲面表面积的计算公式

$$S = \int_D \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2} dx dy \quad (4)$$

式中  $z$  —— 所求表面积的曲面表达式;  $D$  —— 所求曲面在  $xoy$  平面的投影区域。由式(4) 给出波纹形仿生推土板与土壤的接触面积的表达式。

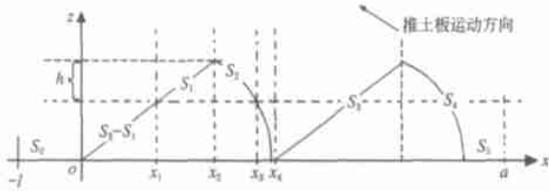


图5 波纹形 I 横切面示意图

Fig 5 Cross section of wave shape I

仅考虑波纹个数至少为 1 个的情况, 计算方法如下: 利用公式(1) 计算土壤下压深度  $h$ , 由此再计算推土板与土壤接触面积。只须考虑推土板前端平面部分与土壤的接触面积, 在一个周期内的推土板与土壤接触面积乘以波纹总个数, 以及推土板后端平面部分与土壤的接触面积, 便可知整个推土板与土壤的接触面积。以波纹型 I 为例用示意图说明, 如图 5 所示, 则波纹形 I 仿生推土板与土壤的接触面积为

$$S(\alpha, \beta) = S_0 + n(S_1 + S_2) + (S_3 - S_1) + (S_4 - S_2) + S_5 = S_0 + (n - 1)(S_1 + S_2) + S_3 + S_4 + S_5 = lb + (n - 1)[(x_2 - x_1)b\sqrt{1 + \alpha^2} + b\beta(\arcsin(\frac{x_3}{\beta}) - \arcsin(\frac{x_2}{\beta}))] + bx_2\sqrt{1 + \alpha^2} + b\beta(\arcsin(\frac{x_4}{\beta}) - \arcsin(\frac{x_2}{\beta})) + bx_5 \quad (5)$$

其中

$$x_1 = \frac{\frac{\alpha\beta}{\sqrt{1 + \alpha^2}} - h}{\alpha}, \quad x_2 = \frac{\beta}{\sqrt{1 + \alpha^2}},$$

$$x_3 = \sqrt{\beta^2 - (\frac{\alpha\beta}{\sqrt{1 + \alpha^2}} - h)^2}, \quad x_4 = \beta,$$

$$x_5 = a - n\beta, \quad n = [a/\beta]$$

对于波纹形 II 推土板与土壤接触面积表达式运用数值积分进行近似计算, 由于篇幅所限, 详细的计算步骤略。波纹形 II 推土板与土壤接触的总面积为

$$S(\alpha, \beta) = S_0 + nS_1 + 2S_2 + S_3$$

$$b \left\{ l + n \times \frac{h_1}{2} \times \left( f(x_1) + f(x_2) + \sum_{i=1}^{M-1} f(y_i) \right) + 2 \times \frac{h_2}{2} \times \left( f(0) + f(x_1) + \sum_{j=1}^{N-1} f(z_j) \right) + x_3 \right\} \quad (6)$$

其中  $M, N$  是给定的正整数, 且

$$x_1 = \frac{\arccos \frac{2h - \beta}{\alpha}}{\alpha}, \quad x_2 = \frac{2\pi - \arccos \frac{\beta - 2h}{\beta}}{\alpha},$$

$$x_3 = a - n \cdot \frac{2\pi}{\alpha}, \quad n = [\frac{a\alpha}{2\pi}], \quad h_1 = \frac{x_2 - x_1}{M},$$

$$h_2 = \frac{x_1}{N}, \quad y_i = x_1 + ih_1, \quad z_j = jh_2, \quad i = 1, 2, \dots, M - 1,$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

### 3) 非凸非光滑优化模型

为设计在不同黏形土壤下具有减黏降阻功能的波纹形仿生推土板, 须确定参数  $\alpha, \beta$  的值使得  $S(\alpha, \beta)$  达到最小(最优化模型), 从而获得仿生推土板非光滑表面的数学模型。即

$$\begin{aligned} \min & S(\alpha, \beta) \\ \text{s.t.} & (\alpha, \beta) \in I \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $I$  —— 约束集(又称可行域)。

下面以波纹形 I 为例说明约束集  $I$ , 设仿生推土板的高和宽分别为  $a, b$ 。根据假设与波纹形土壤动物体表的统计结果知<sup>[4]</sup> 推土板的波峰间距不宜过小, 不妨设下限不小于  $10^{-3}$ , 又知波峰间距的上限值  $w_{\max}$  及波峰高度上限值  $h_{\max}$  与板宽和板高的关系大致如下<sup>[4]</sup>(单位与板的长和宽的单位一致):

$$w_{\max} = \min\{5b/(b - 1), a\} \quad h_{\max} = 0.03b$$

因此

$$I = \{(\alpha, \beta) \mid 10^{-3} \leq \beta \leq \min\{5b/(b - 1), a\},$$

$$10^{-3} \leq \frac{\alpha\beta}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \leq 0.03b\}$$

于是问题转化为求解如下的非凸非光滑优化问题:

$$\begin{cases} \min & bl + (n - 1)[(x_2 - x_1)b\sqrt{1 + \alpha^2} + b\beta(\arcsin(\frac{x_3}{\beta}) - \arcsin(\frac{x_2}{\beta}))] + bx_2\sqrt{1 + \alpha^2} \\ & + b\beta(\arcsin(\frac{x_4}{\beta}) - \arcsin(\frac{x_2}{\beta})) + b \cdot x_5 \\ \text{s.t.} & 10^{-3} \leq r \leq \min\{5b/(b - 1), a\} \\ & 10^{-3} \leq \frac{\alpha\beta}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \leq 0.03b \end{cases} \quad (8)$$

其中  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  见式(5) 的定义。

### 4) 求解非凸非光滑优化的遗传算法

众所周知, 非凸非光滑优化问题, 用传统的优化方法难于求解, 遗传算法在寻求复杂优化问题的全局最优解中已显现优势。因此, 这里运用遗传算法求解该问题, 其具体步骤如下:

(1) 确定编码方案: 实数编码。

(2) 确定适应值函数:  $S_{\max} - S(\alpha, \beta)$ , 其中  $S_{\max}$  为控制参数,  $S_{\max}$  为当前代的最大值。

(3) 选择策略: 赌盘选择和线性排名选择相结合。

(4) 重组策略: 算术杂交, 非一致变异。

(5) 控制参数: 群体规模  $N = 50$ , 杂交概率  $p_c = 0.5$ , 非一致变异时非变异程度  $\lambda = 3$ , 最大代数  $max\text{gen} = 500$ 。

(6) 终止准则: 最大代数  $max\text{gen} = 500$ 。

### 3 结果与分析

#### 1) 实算结果

实算中给定仿生推土板的高和宽分别为  $a = 60$  cm,  $b = 100$  cm, 给定仿生推土板前端平面部分宽度为  $l = 10$  cm。下面对 3 种类型土壤列出波纹形 I 和波纹形 II 仿生推土板在不同的板面承载力  $P$  ( $N/cm^2$ ) 下参数的优化结果(见表 2~ 表 7)。其中  $S$  ( $cm^2$ ) 为土壤与仿生推土板表面的接触面积(包括弧形面), 相应的土壤类型的数据见表 1。表中的符号“—”表示迭代 5 次以内其接触面积就超过  $7000 cm^2$  的参数值故略。

表 2 对黏土 1 仿生推土板的设计方案与计算结果

Table 2 Designs and results of the bionic bulldozing plates on clay 1

承载力 $P$ $N \cdot cm^{-2}$	波形	$\alpha/cm$	$\beta/cm$	波纹数	$S/cm^2$
2.5	波纹形 I	1.036337	2.855039	21	2219.294023
2.5	波纹形 II	2.932607	1.157110	28	2969.629883
5.0	波纹形 I	51.287990	6.657985	9	5090.021409
5.0	波纹形 II	—	—	—	—
7.5	波纹形 I	458.439666	9.990435	6	6525.864872
7.5	波纹形 II	—	—	—	—
10.0	波纹形 I	6.703036	14.130744	4	7130.565573
10.0	波纹形 II	—	—	—	—

表 3 对黏土 2 仿生推土板的设计方案与计算结果

Table 3 Designs and results of the bionic bulldozing plates on clay 2

承载力 $P$ $N \cdot cm^{-2}$	波形	$\alpha/cm$	$\beta/cm$	波纹数	$S/cm^2$
2.5	波纹形 I	5.572119	6.353360	9	4144.650154
2.5	波纹形 II	2.619113	0.749384	25	4940.806641
5.0	波纹形 I	75.966043	8.427014	7	6231.833942
5.0	波纹形 II	—	—	—	—
7.5	波纹形 I	80.437908	11.887077	5	7340.114867
7.5	波纹形 II	—	—	—	—

表 4 对重黏土 1 仿生推土板设计方案与计算结果

Table 4 Designs and results of the bionic bulldozing plates on heavy clay 1

承载力 $P$ $N \cdot cm^{-2}$	波形	$\alpha/cm$	$\beta/cm$	波纹数	$S/cm^2$
20.0	波纹形 I	1.160879	0.127386	471	1025.596668
20.0	波纹形 II	401.181635	0.114006	3831	1065.919922
50.0	波纹形 I	1.382174	0.789002	76	1486.867319
50.0	波纹形 II	7.960391	0.638712	76	1919.792969
80.0	波纹形 I	94.330337	6.648626	9	5317.782629
80.0	波纹形 II	106.501340	0.001801	1017	7021.313477
100.0	波纹形 I	3.204655	14.829876	4	7330.781961
100.0	波纹形 II	—	—	—	—

表 5 对重黏土 2 仿生推土板的设计方案与计算结果

Table 5 Designs and results of the bionic bulldozing plates on heavy clay 2

承载力 $P$ $N \cdot cm^{-2}$	波形	$\alpha/cm$	$\beta/cm$	波纹数	$S/cm^2$
2.5	波纹形 I	0.992256	0.209696	286	1057.268171
2.5	波纹形 II	62.622533	0.223979	598	1169.113281
5.0	波纹形 I	31.879544	5.382530	11	3528.900666
5.0	波纹形 II	4.188967	1.490307	40	2820.810059
7.5	波纹形 I	0.924247	18.710499	3	7151.393372
7.5	波纹形 II	45.869794	0.003989	438	7045.454590

表 6 对贫瘠黏土 1 仿生推土板的设计方案与计算结果

Table 6 Designs and results of the bionic bulldozing plates on barren clay 1

承载力 $P$ $N \cdot cm^{-2}$	波形	$\alpha/cm$	$\beta/cm$	波纹数	$S/cm^2$
20.0	波纹形 I	1.121628	0.260692	230	1181.854235
20.0	波纹形 II	20.839490	0.550455	199	1369.938965
50.0	波纹形 I	104.641199	5.431818	11	4021.557495
50.0	波纹形 II	5.655168	1.170773	54	4014.992676
80.0	波纹形 I	1.042124	9.999387	6	5540.244083
80.0	波纹形 II	15.080041	0.003359	144	7016.590332
100.0	波纹形 I	0.100000	32.098058	1	7319.917023
100.0	波纹形 II	—	—	—	—

表 7 对贫瘠黏土 2 仿生推土板的设计方案与计算结果

Table 7 Designs and results of the bionic bulldozing plates on barren clay 2

承载力 $P$ $N \cdot cm^{-2}$	波形	$\alpha/cm$	$\beta/cm$	波纹数	$S/cm^2$
2.5	波纹形 I	1.206330	0.328525	182	1221.994650
2.5	波纹形 II	16.232049	0.572915	155	1419.064453
5.0	波纹形 I	359.011288	5.447695	11	4401.524305
5.0	波纹形 II	3.144968	1.460772	30	4400.002441
7.5	波纹形 I	1.101287	14.409867	4	7092.078012
7.5	波纹形 II	91.839250	0.001377	877	7006.160645

#### 2) 结果分析

(1) 对于各种不同类型的土壤, 当单位承载力在一定范围内时(如: 波纹形 I 在黏土 1 情形下,  $P < 100$   $kN/m^2$ ), 波纹形仿生推土板确比光滑板(接触面积为  $7000 cm^2$ )与土壤接触面积少; 即, 单位承载力在一定范围内, 能找到比光滑板减黏降阻能力更好的波纹形仿生推土板。

(2) 对于各种不同类型的土壤, 在推土过程中, 当单位承载力超过某个值(土壤被破坏), 仿生推土板与土壤接触面积将大于  $7000 cm^2$ , 因此, 这时非光滑波纹形仿生推土板的设计反而不利于减黏降阻, 此时选光滑板更好。

(3) 对于各种不同类型的土壤, 当仿生推土板与土壤的接触面积小于  $7000 cm^2$  时, 随着单位承载力的增

大, 优化所得的波纹个数呈下降趋势。因此, 随着单位承载力的变化, 需适当的设计仿生推土板的各个参数, 才能更有效的减黏降阻。

(4) 对于各种不同类型的土壤, 当单位承载力在有效范围内时, 在相同的单位承载力下, 波纹形 I 比波纹形 II 优化结果要好, 即按照波纹形 I 的优化参数所设计的仿生推土板比按照波纹形 II 的优化参数所设计的仿生推土板减黏降阻能力更好。

#### 4 结 论

1) 本文的结果与常规定性分析的结论相吻合, 说明该方法是合理的、可行的。对于各种不同类型的黏性土壤, 当单位承载力在有效范围内时, 将优化后的参数代入相应的数学描述式, 便得相应的波纹形仿生推土板表面数学模型。

2) 计算结果表明, 板面承载力固定时, 按波纹形 I 的优化参数所设计的仿生推土板的接触面积小于按波纹形 II 的优化参数所设计的仿生推土板。因此, 合理的建立仿生推土板表面的数学描述式是十分有意义的, 这与生活在土壤中的典型土壤动物的几何非光滑体表特征也是相符的。

#### [参 考 文 献]

- [1] Ren Luquan, Tong Jin, Li Jianqiao, et al Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review [J]. J Agric Engng, 2001, 79(3): 239- 263
- [2] Cong Qian, Ren Luquan, Chen Bingcong, et al Using characterizers of burrowing animals to reduce soil-tool adhesion [J]. Trans of the ASAE, 1999, 42(6): 1549-1556
- [3] Luquan Ren, Qian Cong, Tong Jin, et al Reducing adhesion of soil against loading soil using bionic electro-osmosis method [J]. J Teramechanics, 2001, 38(4): 211-219
- [4] 任露泉, 李建桥, 陈秉聪 非光滑表面的仿生降阻研究 [J]. 科学通报, 1995, 40(19): 1812- 1814
- [5] 李建桥, 任露泉, 陈秉聪 土壤动物非光滑体表几何单元的分析及模拟 [J]. 农业工程学报, 1995, 11(2): 1- 5
- [6] 任露泉, 佟金, 李建桥, 等 生物脱附与机械仿生——多学科交叉新技术领域 [J]. 中国机械工程, 1999, 10(9): 984- 986
- [7] 丛茜 非光滑减黏降阻机理及触土部件仿生改形研究 [D]. 长春: 吉林大学, 1992
- [8] 王云鹏, 任露泉, 杨晓东, 等 仿生柔性非光滑表面的结构优化设计 [J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 613- 615
- [9] 陈秉聪 土壤- 车辆系统力学 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981
- [10] 黄祖永, 李长祜, 等译 地面车辆原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [11] 袁亚湘, 孙文瑜 最优化理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1997
- [12] 刘勇, 康立山, 陈毓屏 非数值并行算法(第二册): 遗传算法 [M]. 北京: 科学出版社, 1995

## Mathematical modeling and optimization design of the wave shape bionic bulldozing plate surface based on genetic algorithm

Ren Luquan, Liu Qinghui, Tao Min

(Key Laboratory of Terrain Machinery Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** In this paper, the mathematical formulations and the nonconvex optimization models have been set up for the two kinds of the wave shape bionic bulldozing plate surface using the classification of nonsmooth body surfaces of the typical soil animals and terrain vehicle theory. By genetic algorithm and numerical calculation, the optimization designs of the bionic bulldozing plate were given based on the different types of soil

**Key words:** mathematical modeling; optimization design; bionics; bulldozing plate