

# 铁路除沙车推沙阻力及推沙曲面优化研究

郑明军, 苗佳峰, 施润泽

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**为了减小铁路除沙车推沙装置在推沙过程中的工作阻力和提高推沙效率,基于仿生学原理,选取了3种动物(棕熊、田鼠、家鼠)作为仿生对象。把仿生对象的爪趾内轮廓线作为推沙板触沙曲面的准线原型,通过进一步分析拟合后的仿生准线二阶导数和曲率,根据这些数据,建立了仿生推沙板在内的6种不同的推沙板。通过离散元仿真模拟,对比了6种推沙板在推沙过程中受到的阻力情况。研究表明,在相同条件下,推沙板受到的水平阻力与受到的总阻力很接近,因此水平阻力是影响推沙板工作效率的主要因素;仿生推沙板所受阻力相对于平面板和圆弧板都低,其中田鼠型仿生推沙板所受阻力最低。不同准线形式的仿生推沙板研究对减少推沙阻力有着重要指导意义。

**关键词:**推沙板;仿生原理;减阻;离散元

**中图分类号:** U273.1; TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)01-0092-07

在中国西北地区植被覆盖率低、水土流失严重,常年遭受风沙的侵害,飞扬起的沙土抬高了道砟的高度,铁道线路被掩埋的情况依然存在<sup>[1]</sup>,以前的除沙方式大多数为人工除沙,时间和人工成本较高。为此,铁路养护设备公司研制了一款铁路除沙车,很好地解决了人工除沙的问题,同时提高了除沙效率,但该铁路除沙车的推沙阻力较大,影响除沙车的除沙效率。为了研究推沙板的减阻性能,查阅相关文献<sup>[2-3]</sup>,发现铲车的推土铲的触土面并非平面,而是曲面,这种结构能够有效降低推土铲的工作阻力。因此将推土铲的触土曲面引用到铁路除沙车的推沙装置上去,一般曲面都是由元线沿着准线平移得到的<sup>[4]</sup>。

近些年,仿生学是诸多学者研究的热门方向<sup>[5-7]</sup>,如鼯鼠多趾结构特征仿生旋耕刀<sup>[8]</sup>,通过试验表明,传统旋耕刀在工作后会压实沟底,而仿生旋耕刀的压实并不明显,能够有效降低这种现象,减小耕作能耗;仿生变曲率深松铲柄<sup>[9]</sup>,以田鼠爪趾为仿生对象,仿生深松铲柄经过试验表明,仿生结构具有明显的减阻效果,与圆弧深松铲柄相比,在较宽速度范围内,仿生深松铲柄减阻率为1.90%~23.82%;仿生推土板的设计<sup>[10-11]</sup>,将仿生对象的内爪趾的内轮廓曲线提取出来,作为推土板触土曲面的准线,试验结果表明,仿生推土板的减阻效果要优于平面、圆弧推土板。从以上例子可以得出,将仿生学应用到农用机械当中已成为一种趋势,改变推沙板的触沙表面来降低工作阻力是一个很好的选择。因此研究的主要内容与目标就是利用仿生学,设计出几种优秀的触沙曲面几何结构,从而降低推沙板在工作过程中所受的阻力。

自然界当中有很多动物,它们的挖洞能力很强,这一切都归功于它们的爪子结构很适合挖洞,它们的爪趾内轮廓有一个共同的特点,那就是其曲线规律均为变曲率且多极值点<sup>[12-13]</sup>,例如鼠类、熊类等,这些动物的挖掘能力非常强,其爪趾内轮廓曲线就符合多极值变曲率的特性,这一特性能够使被挖掘土壤的应力波波动的频率增大,使土壤的黏附力降低,从而达到减阻的效果<sup>[14]</sup>。从鼠类和熊类中分别选取家鼠、田鼠和棕熊的爪趾作为仿生对象,利用逆向工程将其内轮廓线提取出来。根据经典推土铲结构,进行改

收稿日期:2022-09-19 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20220274

基金项目:河北省自然科学基金(E2017210166)

作者简介:郑明军(1971—),男,教授,研究方向为机械设计及理论。E-mail:zmjtd@stdu.edu.cn

郑明军,苗佳峰,施润泽.铁路除沙车推沙阻力及推沙曲面优化研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,36(1):92-98.

进并建立推沙板三维建模,设计 3 种圆弧型和一个平面型的推沙板与仿生推沙板进行仿真对比分析,根据仿真结果分析推沙板的受阻规律。

1 仿生推沙板模型

1.1 提取仿生对象特征曲线

以棕熊右前脚掌中间的那个最强壮的爪趾为例,利用逆向工程<sup>[15]</sup>,提取出棕熊爪趾的内轮廓曲线的数据点,将数据点连线进行处理。经过多次调整拟合函数来拟合原始准线,发现三项指数函数的拟合效果最为接近(见图 1(a)),利用相同的方法将田鼠和家鼠的爪趾内轮廓曲线提取出来并进行数值拟合(见图 1(b)、图 1(c))。这 3 个拟合曲线的拟合方程的判定系数( $R_2$ )均大于 0.98,且残差平方和也均小于 0.1,因此用三项指数函数进行拟合最符合要求,具体拟合结果的三项指数函数系数和判定系数如表 1 所示。

三项指数函数公式

$$y=y_0+A_1e^{\frac{-x}{T_1}}+A_2e^{\frac{-x}{T_2}}+A_3e^{\frac{-x}{T_3}}$$
(1)

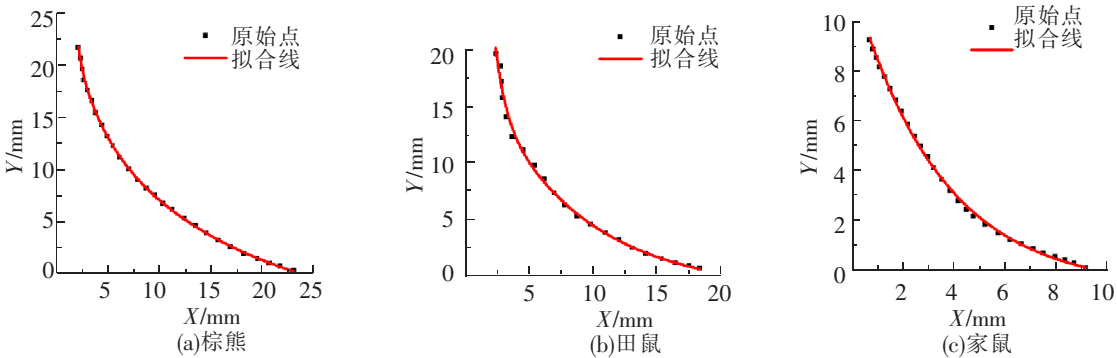


图 1 仿生对象爪趾内轮廓拟合曲线

表 1 仿生对象爪趾内轮廓拟合函数系数与判定系数

| 系数    | 内轮廓特征曲线   |           |          |
|-------|-----------|-----------|----------|
|       | 棕熊        | 田鼠        | 家鼠       |
| $Y_0$ | -4.476 2  | -1.371 8  | -0.274 6 |
| $A_1$ | 580.544 4 | 113.102 3 | 3.902 8  |
| $T_1$ | 0.355 9   | 0.801 6   | 3.442 2  |
| $A_2$ | 13.452 4  | 10.235 2  | 3.901 1  |
| $T_2$ | 2.385 1   | 7.615 5   | 3.442 2  |
| $A_3$ | 22.274 7  | 11.325 2  | 3.891 2  |
| $T_3$ | 14.841 2  | 7.616 9   | 3.416 4  |
| $R_2$ | 0.999 8   | 0.992 0   | 0.999 6  |
| SSE   | 0.019 3   | 0.105 4   | 0.035 1  |

为了进一步分析仿生对象内轮廓曲线特性,求出曲线的一阶、二阶导数,再根据曲线的曲率公式,解出曲线的曲率,曲线曲率公式

$$K=\frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}}$$
(2)

将图 1 当中的拟合曲线求二阶导数,如图 2 所示。从图 2 可知,3 种内轮廓拟合曲线的二阶导数变化幅度较大,大部分在 0 值上下浮动。棕熊的二阶导数从正值降低到负值,且中间 5~22 之间浮动很小,只有在开始和末端浮动较大;田鼠的内轮廓曲线二阶导数起始段先增加到一处峰值再降低到一处峰谷,然后在 6~17 之间在 0 附近上下浮动,浮动的程度较棕熊的要大一些,而且在起始段和末端的浮动最大;最后是家鼠的内轮廓拟合曲线的二阶导数值,在最开始和另外 2 条的浮动趋势一样,但增加到

第一个波峰下降时,下降得很少,同样经历多次波峰、波谷的变化,且和其他 2 条曲线的开始端和末端的变化一样。

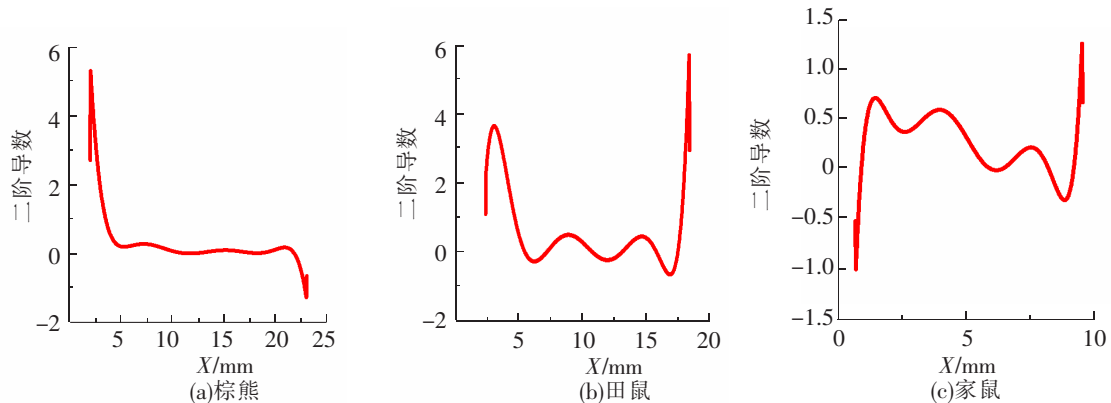


图 2 拟合曲线的二阶导数

根据曲线曲率公式求出拟合曲线的曲率,如图 3 所示。从图 2 和图 3 中可以看出,这 3 条曲线的二阶导数和曲率均有多次波峰和波谷的变化,也都是在起始段和末端的变化最大,这种较大的波动变化也加强了爪趾对土壤的扰动情况,有利于减小工作过程中的阻力。除了棕熊内轮廓拟合曲线的曲率在 2~6 的波动要大,其他大部分区域波动较小,相对来说较为平缓,这些趋势代表了仿生对象爪趾的内轮廓曲线较为光滑平顺。从这些分析来看,拟合曲线的曲率、二阶导数有波动,这说明仿生对象的内轮廓曲面形状会有一些凸起和凹坑等不规则形状,也进一步证明了爪趾内表面为主要触土曲面,大部分挖洞的阻力都在内轮廓曲面上,且最大的磨损也都在内轮廓曲面上。

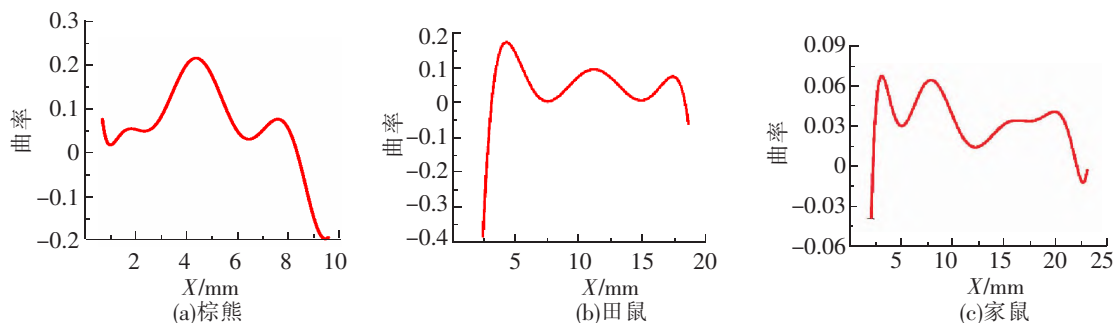


图 3 拟合曲线的曲率

这种变曲率特征在很多动物爪趾上也有所体现,如黄鼠狼、鸡、穿山甲等,它们擅长挖洞和它们的爪趾内轮廓具有变曲率的特性有很大的关系。它们在挖洞时,土壤内部的压力会受到这种变曲率特性而反复波动,从而导致土壤更容易被破坏,进一步说明了研究此类仿生曲线、曲面更有意义。

## 1.2 建立仿生推沙板模型

得到仿生对象爪趾内轮廓线之后,建立仿生推沙板的三维模型。依据典型推土铲(如图 4 所示)的结构建立推沙板模型,初步建立的推沙板高和宽均为 400 mm,并将拟合曲线放大适当的倍数,以此为推沙板触沙曲面的准线,其中推沙板触沙曲面前翻角  $\beta_k$  决定着触沙曲面的形状,因此在建模过程中,合理选择推沙板的前翻角  $\beta_k$  参数对推沙板推沙阻力影响最大,具体参数如表 2 所示。

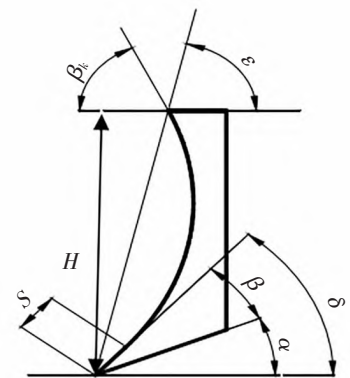


图 4 典型推土铲结构示意图

表 2 推沙板曲面各项参数

(°)

| 类型       | 推沙板触沙曲面参数    |               |             |             |
|----------|--------------|---------------|-------------|-------------|
|          | 切削角 $\delta$ | 前翻角 $\beta_k$ | 板尖角 $\beta$ | 后角 $\alpha$ |
| 仿生 1(棕熊) | 55           | 73.5          | 30          | 20          |
| 仿生 2(田鼠) | 55           | 74.6          | 30          | 20          |
| 仿生 3(家鼠) | 55           | 72.6          | 30          | 20          |
| 圆弧 1     | 55           | 70.6          | 30          | 20          |
| 圆弧 2     | 55           | 74.1          | 30          | 20          |
| 平板       | —            | —             | —           | —           |

根据表 2 的相关参数,建立 3 种仿生推沙板的三维模型,如图 5 所示(仿生 1、仿生 2、仿生 3)。另外再建立 2 种圆弧形的普通推沙板和 1 种平面型推沙板,如图 6 所示(圆弧 1、圆弧 2 和平面型),通过对比验证仿生推沙板的减阻情况。

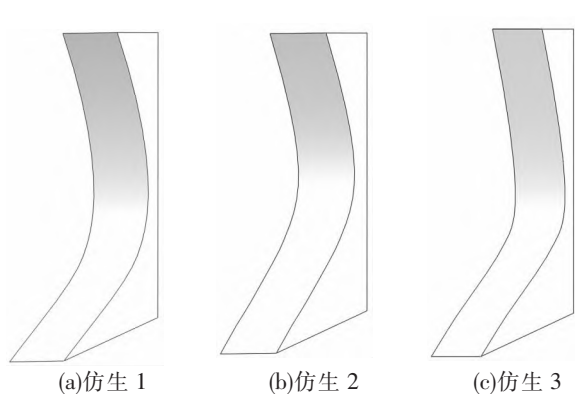


图 5 仿生推沙板三维模型

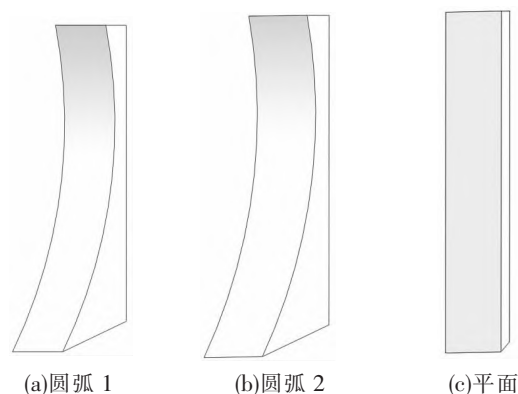


图 6 圆弧型推沙板和平面型推沙板三维模型

模型建立完成,进行离散元仿真,验证仿生推沙板的减阻优势。

## 2 推沙过程离散元分析

### 2.1 离散元接触模型

研究颗粒接触模型的方法有多种<sup>[16-18]</sup>,其中,离散元素法作为一种解决复杂离散体问题的新型数值分析方法,广泛应用于农业、矿产等行业中。该方法基于牛顿第二定律,将介质系统离散为独立单元作为基本思想来分析颗粒运动等问题<sup>[19]</sup>。考虑到西北地区沙堆含水率低,而且沙粒的离散型较强,因此使用离散元素法来研究推沙板的推沙过程。本文离散元接触模型采用 Hertz-Mindlin (No Slip) 接触模型(如图 7 所示),从图 7 可以看出,接触模型包括 2 方面的相互作用,分别为法向作用和切向作用,其中, $k_n$  为法向刚度, $c_n$  为法向阻尼系数, $k_s$  为切向刚度, $c_s$  为切向阻尼系数。

根据法向振动力学公式可以得到颗粒间的法向接触力

$$F_{cn,ij} = -k_n \delta_n \vec{n} \quad (3)$$

式中, $F_{cn,ij}$  为法向接触力; $\delta_n$  为颗粒相互渗透的深度; $\vec{n}$  单位法向向量。

颗粒间的切向接触力

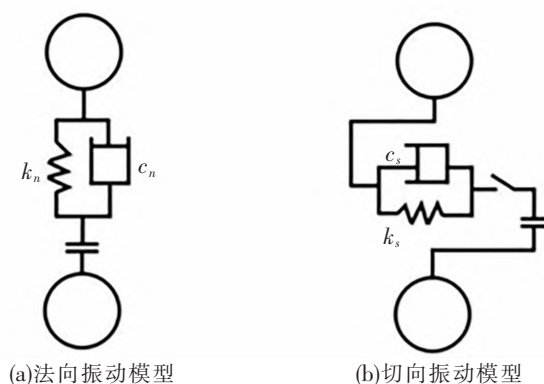


图 7 Hertz-Mindlin(No Slip)接触模型

$$|F_{t,ij}|=\begin{cases} |F_{t,jj}| & |F_{t,j}|<\mu_s|F_{cn,ij}| \\ \mu_s|F_{cn,ij}| & |F_{t,j}|\geq\mu_s|F_{cn,ij}| \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $F_{t,ij}$  为切向接触力;  $\mu_s$  为静摩擦系数。

2.2 离散元相关参数设置

在进行离散元仿真时,仿真模型若按原比例进行的话,仿真时间受电脑性能约束太强,所以将推沙板模型缩小为原来的 1/5,而缩小的模型对 6 种推沙板的受力对比结果影响并不大,同时也缩短了仿真时间,所以按缩小比例后的模型进行仿真。其中,由于沙土颗粒直径较小,摩擦系数、恢复系数并不能通过实验直接求出,通过查阅相关资料与文献<sup>[20]</sup>,且通过实验与仿真相结合的方法,确定仿真中的材料本征参数和材料间的接触参数分别见表 3 与表 4。

表 3 沙粒与钢本征参数

| 材料名称 | 泊松比 | 剪切模量/MPa          | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|------|-----|-------------------|--------------------------|
| 沙粒   | 0.3 | 11.5              | 2 650                    |
| 钢    | 0.3 | 7×10 <sup>4</sup> | 7 850                    |

表 4 材料间的接触参数

| 材料名称  | 恢复系数  | 静摩擦系数 | 滚动摩擦系数 |
|-------|-------|-------|--------|
| 沙粒-沙粒 | 0.240 | 0.23  | 0.10   |
| 沙粒-钢  | 0.478 | 0.59  | 0.28   |

推沙板工作的主要参数为:颗粒尺寸为 0.4~0.6 mm;推沙速度 0.5~0.9 m/s;推沙深度 15~40 mm;最大推沙距离 150 mm。仿真过程中的时间步长为 20%,计算网格尺寸为 3R。具体仿真过程如图 8 所示。



图 8 推沙过程示意图

2.3 仿真结果及分析

根据仿真后的处理结果,分析出仿生类推沙板、圆弧推沙板和平面推沙板的阻力情况,推沙速度 0.5 m/s,深度 40 mm,相同时间下,6 种推沙板所受总阻力的情况如图 9 所示,表 5 为 6 种推沙板所受水平方向的力、垂直方向的力和总阻力。

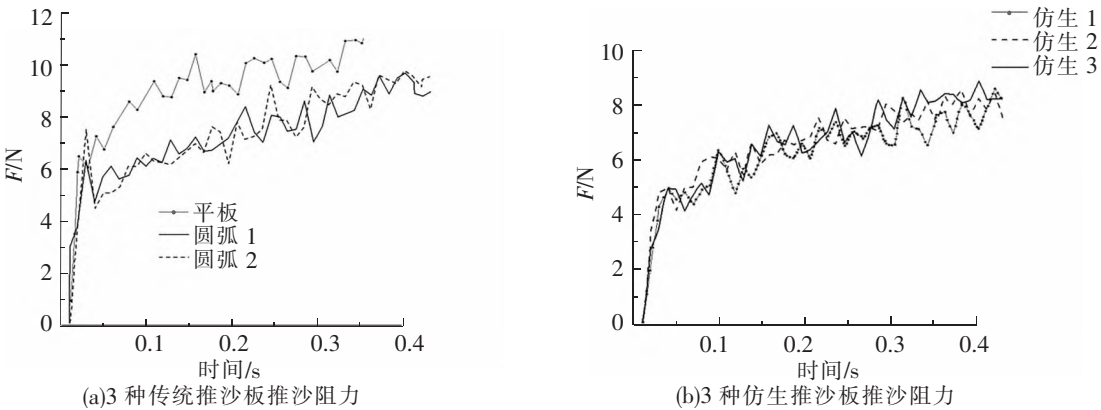


图 9 6 种不同结构推沙板推沙阻力

表 5 推沙板所受阻力离散元仿真结果

| 推沙板         | 水平阻力  | 垂直阻力 | 总阻力   |
|-------------|-------|------|-------|
| 平面推沙板       | 14.14 | 2.10 | 14.71 |
| 圆弧 1 推沙板    | 9.45  | 1.35 | 9.67  |
| 圆弧 2 推沙板    | 10.61 | 1.29 | 10.82 |
| 仿生推沙板 1(棕熊) | 8.89  | 0.66 | 9.05  |
| 仿生推沙板 2(田鼠) | 8.14  | 0.79 | 8.51  |
| 仿生推沙板 3(家鼠) | 8.42  | 0.97 | 8.84  |

结合所受阻力图9和表5,可以得出:

(1)平面推沙板随时间的变化所受阻力逐渐增大;而圆弧推沙板在前0.1 s内所受阻力增加较快,这是因为推沙板的板尖刚开始接触沙堆,触沙面积逐渐增大,故阻力急剧上升,越往后推沙板的触沙面积为整个前表面,所以阻力增加越缓慢最后趋于稳定;仿生推沙板同样的在前0.1 s内阻力增加较快,后面增加缓慢,而且要比圆弧推沙板更快趋于稳定。

(2)因为推沙板受到的垂直阻力比总阻力小,所以垂直阻力不是影响推沙板工作阻力的主要因素。而推沙板受到的水平阻力与推沙板的总阻力接近,所以可作为影响推沙板工作阻力的主要因素。

(3)推沙板受到沙堆的水平阻力与推沙板受到沙堆的总阻力很接近,其中,平面推沙板受到的水平阻力最高,圆弧2型推沙板次之,这2种推沙板是这6种里面水平阻力超过10 N的推沙板;圆弧1型推沙板的水平阻力小于平面和圆弧2型这2种推沙板,总的阻力也小于平面和圆弧1型这两种推沙板;仿生系列的推沙板受到的水平阻力比其他4种推沙板受到的阻力都小,这3种仿生推沙板中,田鼠型仿生推沙板受到的阻力最小,总的阻力也是最小的,棕熊型仿生推沙板次之,家鼠型的最大,其所受总阻力也最大。

综上,6种推沙板中,仿生推沙板所受阻力最小,其次是圆弧推沙板,平面推沙板受到的阻力最大,仿生推沙板里面田鼠型的仿生推沙板所受水平阻力和总阻力均最小。

### 3 结论

(1)经过推沙板推沙过程的离散元仿真分析,得出6种推沙板的水平阻力接近总阻力,可以将水平阻力作为推沙板工作阻力的主要影响因素。

(2)自然界中某些擅长挖洞的动物爪趾的破土过程与推沙板的工作特性相一致,所以选取具有代表性的3种动物(棕熊、田鼠、家鼠)作为仿生对象来研究推沙板的推沙过程是具有可行性的。

(3)通过分析3种仿生曲线的导数和曲率变化,得出特征曲线的变化规律,根据这一规律选取合适的推沙板结构参数,建立了3种仿生推沙板模型和另外3种推沙板模型。

(4)这6种推沙板中,平面推沙板所受阻力最大,其次是圆弧型推沙板,再次是仿生推沙板。仿生推沙板中,田鼠型推沙板推沙工作阻力最小,所以田鼠型触沙曲面可作为推沙装置曲面设计参考。

### 参 考 文 献

- [1]孙程鹏,刘东,李天池. 乌吉线铁路沙害现状及防治措施[J]. 内蒙古林业科技, 2020, 46(4): 60-65.
- [2]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.
- [3]高斯,陈惠勇. 关于曲面的一般研究[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2016.
- [4]张金波,佟金,马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 141-145.
- [5]郭俊,张庆怡, Muhammad S M,等. 仿鼯鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 43-50.
- [6]Jin T, TB Lü, Ma Y H, et al. Two-body abrasive wear of the surfaces of pangolin scales[J]. Journal of Bionic Engineering, 2007, 4(2): 77-84.
- [7]杨玉婉,佟金,马云海,等. 鼯鼠多趾结构特征仿生旋耕刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 37-45.
- [8]张鹏,郭志军,金鑫,等. 仿生变曲率深松铲柄减阻设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1174-1183.
- [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.
- [10]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]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 372-378.
- [11]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.
- [12]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]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 372-378.
- [13]Li B, Chen Y, Chen J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM) [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 177-185.
- [14]Guo Z J, Zhou Z L, Zhang Y, et al. Bionic optimization research of soil cultivating component design[J]. Science in China, 2009, 52(4): 955-965.
- [15]张海,周新建. 逆向工程中关键技术的研究现状和发展趋势[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2005, 26(4):

- 23-27.
- [16] Bilanski W K, Kushwaha R L. Tillage force prediction from terrain characterization with the bevameter[J]. Soil and Tillage Research, 1991, 21(3/4): 299-308.
- [17] Mckyes E, Ali O S. The cutting of soil by narrowblades[J]. Journal of Terramechanics, 1977, 14(2): 43-58.
- [18] Godwin R J, O'dogherty M J, Saunders C, et al. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(1): 117-129.
- [19] Hendrick J G, William R G. Soil reaction to highspeed cutting[J]. Transactions of the ASAE, 1973, 16(3): 401-403.
- [20] 杨摄, 郑明军, 吴文江, 等. 基于离散元的风沙沙粒物理特性参数标定[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(1): 49-57.

## The Bionic Optimization and Research on the Sand Pushing Resistance of Railway Desanding Vehicle

Zheng Mingjun, Miao Jiafeng, Shi Runze

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to reduce the working resistance of the railway sand removal vehicle during the process of pushing sand and improve the efficiency of sand pushing, based on the principle of bionics, three animals (brown bear, field mouse, and house mouse) were selected as bionic objects. Taking the inner contour line of the claw toe of the bionic object as the prototype of the sand-touching surface of the sand pushing board, and further analyzing the second derivative and curvature of the fitted bionic guideline, based on these data, six bionic sand pushing board were established. Through discrete element simulation, the resistance of six sand-pushing boards were compared during the process of working. The research shows that under the same conditions: The horizontal resistance of the sand pushing board is very close to the total resistance, and resistance is the main factor that affects the efficiency of the sand pushing board. The resistance of the bionic sand pushing board is lower than that of the flat board and the arc board, and the resistance of the vole type bionic sand pushing board is the lowest. The research on the bionic sand pushing board with different alignment forms has important guiding significance for reducing sand pushing resistance.

**Key words:** sand pushing board; bionic principle; resistance reduction; discrete element simulation