

仿生减阻深松铲设计与试验*

张金波^{1,2} 佟金¹ 马云海¹

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154007)

摘要: 将小家鼠爪趾高效的土壤挖掘性能应用于深松铲减阻结构设计中, 设计了铲柄破土刃口为指数函数曲线型减阻深松铲。为了对比耕作阻力, 应用仿生减阻深松铲与传统深松铲进行了田间深松耕作试验。结果表明, 耕深和前进速度对耕作阻力均有显著影响, 且耕作阻力随着耕深和前进速度的增大而增大。在相同试验条件下, 仿生减阻深松铲与传统深松铲相比, 耕作阻力降低 8.5% ~ 39.5%, 减阻效果明显。

关键词: 深松铲 结构设计 指数曲线 减阻 耕作阻力

中图分类号: S222.12⁺9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0141-05

引言

传统的耕作方式连年耕作, 导致土壤压实严重、耕层变浅、土地板结, 致使土壤有机质含量下降、蓄水能力差、透气性和透水性降低, 作物的根系发展空间减小, 产量下降^[1-3]。深松作为少耕或免耕农作的一种重要模式, 已经在全世界范围内得到了广泛应用^[4]。深松技术可以大幅增加作物的产量, 尤其是深根系作物的产量, 是一项重要的增产技术^[5-7]。然而, 在深松过程中的耕作阻力过大一直未能得到很好的解决。

目前, 国内外针对这一问题开展了广泛的研究工作。邱立春等设计了自激振动式深松铲^[8]。李艳龙和 Shahgoli 等设计了受迫振动式深松铲^[2,9]。周桂霞等采用通径系数法对深松铲的结构参数与牵引阻力的关系进行了深入研究^[10]。近几年, 仿生学在农业上的应用越来越受到人们的重视。将动物的某些优良的土壤工作特性应用于耕作部件的减阻结构设计中已经成为农业耕作领域研究的一大热点。张强等设计了仿生钩形深松铲, 并进行了室内土槽耕作阻力测试和有限元模拟分析^[11]。龚皓晖等设计了仿生鼠趾深松铲, 并与传统圆弧形深松铲在室内土槽进行了耕作阻力对比试验和有限元模拟分析^[12]。

本文在原有传统深松铲的基础上进行改进, 在不增加制造成本的前提下将土壤洞穴动物高效的土

壤挖掘性能应用于深松铲减阻结构设计中, 设计仿生深松铲, 并与传统圆弧形铲柄深松铲进行耕作阻力的对比分析。

1 仿生减阻深松铲

1.1 深松铲减阻结构设计原理

根据文献[4]的研究, 小家鼠的爪趾在掘洞过程中表现出高效的土壤挖掘性能, 不仅能够轻而易举地切下任何坚硬的土壤, 而且速度很快。对小家鼠的爪趾研究发现, 爪趾纵剖面上轮廓线具有指数函数曲线的特征, 如图1所示。

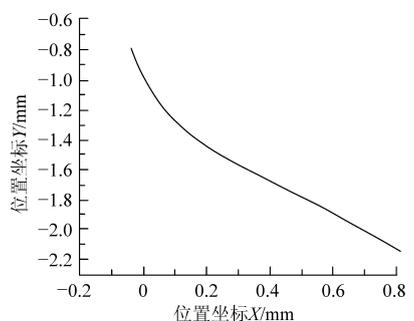


图1 小家鼠爪趾纵剖面上轮廓线

Fig. 1 Upper contour line of longitudinal profile of claw of *Mus musculus*

采用回归分析方法得到爪趾纵剖面上轮廓线的回归方程^[4]为

$$Y = -66.61e^{0.0117X} + 17.78e^{-0.1835X}$$

深松铲的铲柄破土刃口具有与小家鼠爪趾挖掘

收稿日期: 2013-10-26 修回日期: 2013-12-11

* 国家自然科学基金资助项目(51075185)、吉林省科技引导计划资助项目(20100711)、吉林大学研究生创新基金资助项目(20121096)、黑龙江省教育厅科技研究资助项目(12531700)和佳木斯大学科技面上资助项目(L2012-011)

作者简介: 张金波, 博士生, 佳木斯大学讲师, 主要从事农业耕作机械减阻及磨损研究, E-mail: zhangjinpo9872@sina.com

通讯作者: 佟金, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程仿生理论与技术和仿生摩擦学研究, E-mail: jtong@jlu.edu.cn

土壤相似的工作方式,而且深松铲的工作阻力大部分来自刃口对土壤坚实层的犁削作用^[4]。小家鼠爪趾的高效挖掘特性为深松铲仿生设计提供了设计依据。

1.2 仿生减阻深松铲设计

深松铲的整体结构一般包括安装部分和工作部分。如图2所示,A段为铲柄与机架的连接段,B、C为工作部分,其中B段为破土刃口,C段为铲尖及其安装段。将小家鼠挖掘足爪趾纵剖面上轮廓线的结构特征及参数转换为深松铲破土刃口曲线的技术参数,将轮廓曲线经适当放大后应用于铲柄破土刃口B段的结构设计中,并与铲柄、铲刃安装段圆滑连接。为提高深松铲对土壤的犁削破碎性能,破土刃口段横截面设计为楔形,刃口夹角为 60° 。

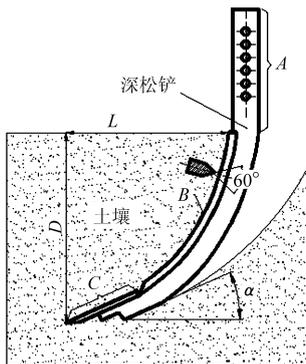


图2 指数曲线型深松铲结构简图

Fig. 2 Structure of subsoiler with exponential curve feature

影响深松铲耕作阻力的因素包括铲柄和铲刃的结构参数、铲柄的破土刃口曲线形状、纵深比 L/D , 铲入土角 α 以及土壤物理性状等。当纵深比为 $0.68 \sim 1.04$ 时,深松铲的耕作阻力较小,且在这一范围内存在一个使深松铲耕作阻力最小的角度^[4,13-14]。本设计的深松铲纵深比选为 0.8 。深松铲的入土角是影响其耕作阻力的另一重要因素。研究表明,入土角在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 时入土工作部件的土壤工作阻力最小,过大耕作阻力增加,过小则工作部件的入土性能差。对小家鼠挖掘足爪趾研究后发现,其纵剖面呈楔形,这种楔形结构能够分散土壤压力,减小触土面积,从而降低土壤挖掘阻力,使爪趾具有较强的入土性能。经测量爪趾楔角为 $20^\circ \sim 30^\circ$,平均值为 24° ,小于能够引起土壤压实作用的极限角度(50°)^[15-17]。本设计深松铲入土角选为 24° ,铲柄宽 58 mm ,厚 30 mm ,铲柄和铲尖均采用 65Mn 钢制造,铲柄破土刃口及凿型铲尖进行热处理,硬度为 52HRC ,最大设计耕深 500 mm ,铲尖结构参数及铲柄其他结构参数参照 $\text{JB/T } 9788-1999$ ^[18-19]。

指数函数曲线型仿生减阻深松铲柄如图3所示。



图3 指数函数曲线型仿生减阻深松铲柄

Fig. 3 Bionic anti-drag shaft with exponential curve feature

2 田间试验

2.1 试验条件

试验在吉林省长春市吉林农业大学试验田内进行。牵引机为长拖农业机械装备集团有限公司生产的CT904型拖拉机。试验过程中拖拉机的牵引速度 v 设定2个水平, 2.0 km/h (慢Ⅲ)和 3.6 km/h (快Ⅲ)。耕深 D 设定为 250 和 350 mm 。传统圆弧形深松铲和仿生减阻深松铲在相同试验条件下进行耕作阻力测试。耕作区域土壤为东北黑土,其物理特性参数如表1所示。

表1 试验区土壤物理特性参数

Tab. 1 Physical characteristic parameters of experimental area soil

土层深度 /mm	土壤 含水率/%	土壤坚实 度/kPa	土壤容积密 度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
0~100	8.32	1674	1.11
100~200	9.91	2117	1.19
200~300	11.20	2289	1.22
300~400	13.29	2424	1.31

深松铲工作阻力测试系统采用CYB-80S静止/旋转型扭矩传感器(北京威斯特中航公司)。该测试系统可直接测定深松铲工作过程中的3个方向分力。数据采集及处理系统为农机动力学参数田间试验遥测系统(中国航空空气动力技术研究院)。该系统可对传感器传回的数字信号进行实时采集,并经内部的处理软件将电信号转换为可直接读取的阻力数值。耕作阻力数据分析系统及牵引悬挂系统如图4、图5所示。其他仪器设备包括SZ-3型土壤坚实度仪、环刀、钢板尺、卷尺、秒表、采样铝盒等。

2.2 试验内容及方法

通过仿生减阻深松铲和传统深松铲的田间试



图4 传感器及数据采集处理系统

Fig.4 Sensors and data collecting and processing system



图5 牵引及悬挂系统

Fig.5 Traction and suspension system

验,采集耕作阻力数据,对两种深松铲在相同试验条件下的耕作阻力进行对比分析,测试仿生减阻深松铲的减阻效果,确定耕作性能,并检验结构设计的合理性。

耕作试验开始前用土壤坚实度仪测定耕作区内不同深度耕层的土壤坚实度(表1),并采集土壤样品回实验室进行容积密度和含水率测定。为了保证试验数据测试的可靠性和稳定性,把整个试验区划分为3部分:50 m的中间数据采集区和两端各20 m的调试区。在调试区内调整深松铲的耕深和牵引机的前进速度为试验预设值,并确保传感器和数据采集系统正常工作^[20]。进入数据采集区后开始进行数据采集,每组试验重复3次取其均值作为一次试验的耕作阻力结果。

3 结果与分析

表2为两种类型深松铲在相同试验条件下耕作阻力的平均值。当耕深为250 mm、前进速度为2.0 km/h时,与传统铲相比仿生铲的耕作阻力减小了39.5%(1、5号试验);当耕深为250 mm,前进速度为3.6 km/h时,耕作阻力减小了19.2%(2、6号试验);在耕深为350 mm、前进速度为2.0 km/h试验条件下,仿生铲的耕作阻力减小了8.9%(3、7号

试验);当耕深为350 mm、前进速度为3.6 km/h时,仿生铲的耕作阻力减小了8.5%(4、8号试验)。试验结果表明,指数函数曲线型仿生减阻深松铲与传统深松铲相比具有显著的减阻效果,平均减阻19%。对于同种类型的深松铲,在耕深相同的试验条件下,前进速度越高则耕作阻力越大;而当作业速度一定时,耕深越深,耕作阻力也越大,说明耕作深度和拖拉机牵引速度对深松铲的耕作阻力均会产生显著影响。

表2 仿生减阻深松铲与传统深松铲耕作阻力平均值

Tab.2 Average tillage resistances of bionic anti-drag subsoiler and traditional subsoiler

试验序号	深松铲类型	耕作深度/mm	前进速度/(km·h ⁻¹)	平均耕作阻力/kN
1	仿生铲	250	2.0	2.6
2	仿生铲	250	3.6	4.2
3	仿生铲	350	2.0	5.1
4	仿生铲	350	3.6	5.4
5	传统铲	250	2.0	4.3
6	传统铲	250	3.6	5.2
7	传统铲	350	2.0	5.6
8	传统铲	350	3.6	5.9

图6为两种深松铲在一定的耕深及前进速度试验条件下实时耕作阻力变化曲线。从图中可以看出,随着深松铲开始与土壤接触,耕作阻力显著增加,增加到最大值后开始逐渐回落,最终趋于稳定并呈现出小幅波动状态。这主要是由于土壤的状态与所承受载荷有关,在深松铲与土壤刚刚接触时,深松铲对土壤的载荷较小,土壤产生弹性变形。当载荷逐渐增加直至超过土壤的弹性极限时,土壤开始进入塑性变形阶段。随着深松铲不断前进和入土深度增加,土体所承受载荷继续增加进而开始屈服但并未被破坏,此时土壤开始出现硬化现象,耕作阻力达到最大值(图6中的最大峰值)。当凝聚力结合键被破坏后,土壤发生初始失效,并开始出现软化效应,强度降低,对深松铲的阻力逐渐变小并最终趋于稳定^[11]。在相同试验条件下,指数函数曲线型仿生减阻深松铲的耕作阻力具有明显小于传统深松铲的变化趋势。由此表明,铲柄破土刃口的指数函数曲线型仿生设计可以显著减低深松铲的耕作阻力,进而提高牵引机具的工作效率,降低能耗。

4 结论

(1) 仿生减阻深松铲在不增加制造成本并满足作业要求的前提下实现了大幅降低耕作阻力的目标。

(2) 通过对指数函数曲线型仿生减阻深松铲和

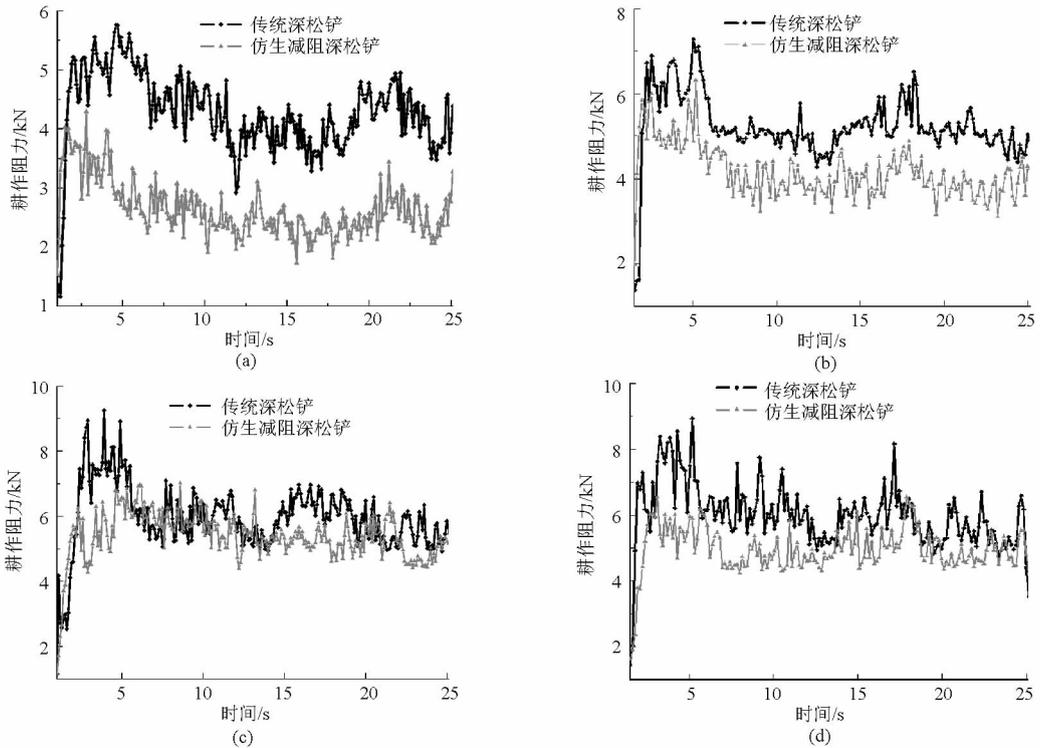


图6 仿生减阻深松铲与传统深松铲耕作阻力变化曲线

Fig. 6 Real-time tillage resistance of bionic anti-drag subsoiler and traditional subsoiler

(a) $D = 250 \text{ mm}, v = 2.0 \text{ km/h}$ (b) $D = 250 \text{ mm}, v = 3.6 \text{ km/h}$

(c) $D = 350 \text{ mm}, v = 2.0 \text{ km/h}$ (d) $D = 350 \text{ mm}, v = 3.6 \text{ km/h}$

传统深松铲耕作阻力的对比分析,在相同试验条件下,仿生深松铲比传统深松铲的耕作阻力减小了8.5%~39.5%,平均减小19%,减阻效果明显。

(3) 深松铲的耕作深度和前进速度对耕作阻力具有显著影响,且耕深和前进速度越大,耕作阻力越大,反之亦然。

参 考 文 献

- 张强,张璐,于海业,等.复合形态深松铲耕作阻力有限元分析与试验[J].农业机械学报,2012,43(8):61-65.
Zhang Qiang, Zhang Lu, Yu Haiye, et al. Finite element analysis and experiment of soil resistance of multiplex-modality subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):61-65. (in Chinese)
- 李艳龙,刘宝,崔涛,等.1SZ-460型杠杆式深松机设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(增刊):37-40.
Li Yanlong, Liu Bao, Cui Tao, et al. Design and field experiment on 1SZ-460 lever-type subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):37-40. (in Chinese)
- 赵伟,张文春,周志立,等.深松旋耕组合作业机的研制与试验研究[J].农业工程学报,2007,23(1):125-128.
Zhao Wei, Zhang Wenchun, Zhou Zhili, et al. Development and experimental research of combined subsoiling and rotary tilling set [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1):125-128. (in Chinese)
- Tong Jin, Chen Donghui, Tomataru Yamaguchi, et al. Geometrical features of claws of house mouse *Mus musculus* and biomimetic design method of subsoiler structure [J]. Journal of Bionic Engineering, 2005, 8(1):53-63.
- 徐宗保.振动式深松中耕作业机的设计与试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2009.
Xu Zongbao. Design and experimental study of the machine of vibrating deeploose and intertillage [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- Raper R L. In-row subsoilers that reduce soil compaction and residue disturbance [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(3):253-258.
- He Jin, Li Hongwen, Wang Xiaoyan, et al. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(2):493-502.
- 邱立春,李宝筏.自激振动深松机减阻试验研究[J].农业工程学报,2000,16(6):72-76.
Qiu Lichun, Li Baofa. Experimental study on the self-excited vibration subsoiler for reducing draft force [J]. Transactions of the CSAE, 2000,16(6):72-76. (in Chinese)
- Shahgoli G, Fielke J, Saunders C, et al. Simulation of the dynamic behavior of a tractor-oscillating [J]. Biosystems Engineering, 2010,106(2):147-155.

- 10 周桂霞, 郭雨昕. 通径系数法研究深松铲关键参数与牵引阻力的关系[J]. 农机化研究, 2009(3): 53-55.
Zhou Guixia, Wu Yuxin. Study on the correlation coefficient between deep-shovel's key parameters and tractive resistance with path coefficient[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(3): 53-55. (in Chinese)
- 11 张强, 张璐, 刘宪军, 等. 基于有限元法的仿生钩形深松铲耕作阻力[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42(增刊1): 117-121.
Zhang Qiang, Zhang Lu, Liu Xianjun, et al. Soil resistance of the bionic hook-shape subsoiler based on the finite element method [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(Supp. 1): 117-121. (in Chinese)
- 12 龚皓晖, 王霜. 仿生深松铲结构设计与有限元分析[J]. 农机化研究, 2013(7): 53-57.
Gong Haohui, Wang Shuang. Bionic subsoiler structural design with the finite element analysis [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(7): 53-57. (in Chinese)
- 13 郭志军, 周志立, 张毅, 等. 深松耕作土壤宏观扰动轮廓分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2003(3): 27-30.
Guo Zhijun, Zhou Zhili, Zhang Yi, et al. The analysis of the macroscopical disturbing profile of soil after subsoiling[J]. Tractor & Farm Transporter, 2003(3): 27-30. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995.
- 16 任露泉, 徐晓波, 陈秉聪, 等. 典型土壤动物爪趾形态的初步分析[J]. 农业机械学报, 1990, 21(2): 44-49.
Ren Luquan, Xu Xiaobo, Chen Bingcong, et al. Initial research on claw shapes of the typical soil animals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990, 21(2): 44-49. (in Chinese)
- 17 吉尔 W R, 范德伯奇 G E. 耕作和牵引土壤动力学[M]. 耕作和牵引土壤动力学翻译组, 译. 北京: 中国农业机械出版社, 1983.
- 18 车刚, 张伟, 梁远, 等. 3ZFC-7型全方位复式中耕机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 130-135.
Che Gang, Zhang Wei, Liang Yuan, et al. Design and experiment of the 3ZFC-7 omni-bearing duplex type cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 130-135. (in Chinese)
- 19 JB/T 9788—1999 深松铲和深松铲柄[S]. 1999.
- 20 朱瑞祥, 张军昌, 薛少平, 等. 保护性耕作条件下的深松技术试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 145-147.
Zhu Ruixiang, Zhang Junchang, Xue Shaoping, et al. Experimentation about subsoiling technique for conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 145-147. (in Chinese)

Design and Experiment of Bionic Anti-drag Subsoiler

Zhang Jinbo^{1,2} Tong Jin¹ Ma Yunhai¹

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

Abstract: Efficient soil digging property of claw toe of *Mus musculus* was applied to the structure design of anti-drag subsoiler. The anti-drag subsoiler had exponential curve shape of soil-cutting edge of shaft. To compare tillage resistance, the subsoiling experiments were conducted using bionic anti-drag subsoiler and traditional subsoiler. The results showed that both tillage depth and forward velocity could affect on subsoiling resistance significantly and the tillage resistance increased with the tillage depth and forward velocity. The tillage resistances of bionic anti-drag subsoiler were reduced by 8.5% to 39.5% respectively compared with traditional subsoiler under the same experimental conditions and the effect of reducing resistance was obvious.

Key words: Subsoiler Structural design Exponential curve Anti-drag Tillage resistance