

# 挖掘机仿生斗齿土壤切削试验与减阻机理研究\*

张琰<sup>1</sup> 黄河<sup>2</sup> 任露泉<sup>2</sup>

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

**摘要:** 模仿蜈蚣爪趾形态设计了挖掘机斗齿。使用多项式拟合方法对爪趾的侧面轮廓线进行拟合, 利用快速成型设备制造仿生斗齿样件。通过土壤切削试验, 测定了仿生斗齿和 JL80 斗齿试样的土壤切削阻力。试验结果显示, 仿生斗齿切削时受到的土壤阻力较原形斗齿降低约 11%。分析表明, 仿生斗齿易形成“自刃尖”, 保持斗齿整体切削性能, 且可在不改变挖掘机设计与工况的条件下, 减小切削角, 实现减阻。

**关键词:** 工程仿生学 挖掘机斗齿 蜈蚣 切削试验

**中图分类号:** TB17; Q811.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0258-04

## Experiment and Drag Reduction Mechanism of Bionic Excavator Tooth during Soil Cutting

Zhang Yan<sup>1</sup> Huang He<sup>2</sup> Ren Luquan<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** A bionic excavator tooth was developed, which is bio-inspired and based on the morphology of the toe of mole cricket foreleg claw. The profile line of the mole cricket's toe was fitted by using polynomial fitting method. The bionic tooth specimens were fabricated by a rapid prototyping machine. The cutting resistances of the bionic tooth and JL80 tooth specimens were measured during soil cutting. The experimental results show that the cutting resistances of bionic tooth is about 11% lower than that of JL80 tooth. The force analysis indicates that the bionic tooth is more likely to form self-sharpening blade so that the cutting performance of the tooth can be maintained. Besides, the bionic tooth is convenient for reducing the cutting angle, which can help for the reduction of cutting resistance, without changing the design and working condition of the excavator.

**Key words:** Bionic engineering Excavator tooth Mole cricket Soil cutting experiment

### 引言

斗齿位于铲斗尖端, 是挖掘机上的重要部件, 其性能直接影响挖掘机铲斗乃至挖掘机的挖掘性能, 减小斗齿土壤切削阻力可有效提高挖掘机的挖掘效率。降低斗齿切削阻力的常规途径主要有: 斗齿构形及排布的优化设计<sup>[1]</sup>、斗齿材料的改进<sup>[2]</sup>、挖掘轨迹优化<sup>[3]</sup>及动力学模型的优化<sup>[4-5]</sup>。应用工程仿

生学理论, 从土壤动物中获取灵感<sup>[6]</sup>, 对触土部件进行仿生改形设计, 进而提高其减阻性能, 是一种新的研究途径, 并取得了很好的效果<sup>[7]</sup>。其中, 模仿蜣螂背板的凸包形式设计的仿生犁壁可减小犁耕阻力 15% ~ 18%<sup>[8]</sup>; 模仿田鼠爪趾弯曲轮廓形状设计的仿生弯曲型深松部件减阻效果明显<sup>[9-10]</sup>。

蜈蚣是一种土栖昆虫, 具有高超的挖掘能力。作为主要触土部件, 其爪趾在构形与形态方面处于

收稿日期: 2012-08-21 修回日期: 2012-09-22

\* 国家自然科学基金重点资助项目(50635030)和吉林大学工程仿生教育部重点实验室开放基金资助项目(450060481274)

作者简介: 张琰, 讲师, 博士, 主要从事工程仿生学研究, E-mail: y. zhang@tust.edu.cn

通讯作者: 任露泉, 教授, 博士生导师, 主要从事工程仿生学研究, E-mail: lqren@jlu.edu.cn

最优化状态,可将切削土壤时的阻力减至最小<sup>[11]</sup>。本研究采用工程仿生学的设计思想,通过提取蜈蚣挖掘足爪趾的构形信息,对 JL80 斗齿进行改形,设计出仿生斗齿。本研究将利用切削试验的方法对两种斗齿的切削阻力进行测定,采用力学分析的方法对仿生斗齿的减阻机理进行讨论。

## 1 试验方法

### 1.1 仿生斗齿设计与加工

观察发现,蜈蚣挖掘足胫节上的 4 个爪趾形态学特点基本相似<sup>[12]</sup>,如图 1a。故对第 1 趾的侧轮廓线信息进行提取,如图 1b。采用多项式拟合的方法获得平滑曲线,拟合结果如图 1c 所示。本研究所用的仿生改形原形为 JL80 筋板耐磨型挖掘机斗齿(行标 JG/T 90—1999<sup>[13]</sup>)。将蜈蚣爪趾的侧轮廓线应用于该斗齿,设计出仿生斗齿。

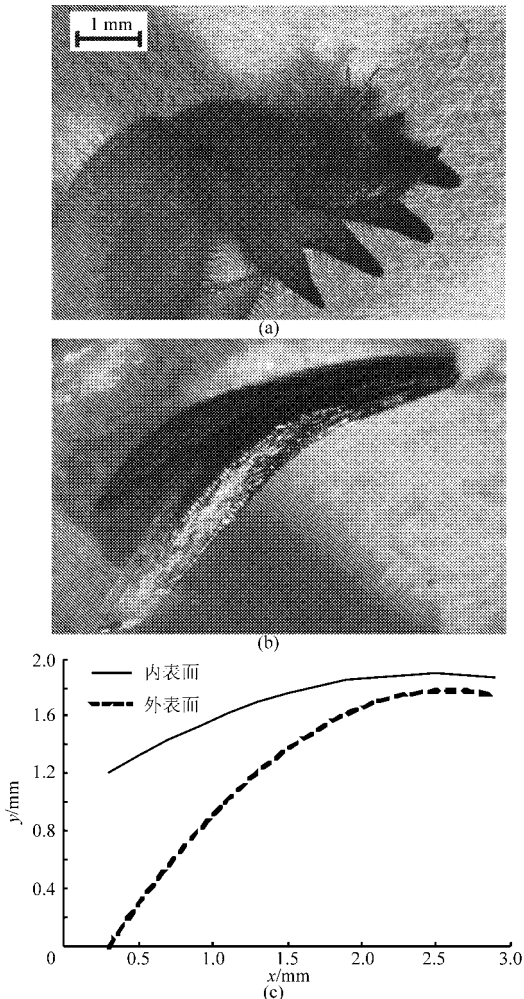


图 1 蜈蚣爪趾形态学信息提取结果

Fig. 1 Extraction result for morphology information of mole cricket's toe

(a) 蜈蚣前足爪趾 (b) 第 1 趾 (c) 拟合后的爪趾侧面曲线

为了试验比较两种斗齿切削土壤的阻力,使用 CATIA 软件对两种斗齿分别进行建模。设计时,为

便于试样加工及试验装夹,将斗齿模型纵向长度设定为 53.4 mm,该尺寸为原型斗齿尺寸(178 mm)的 30%。使用 FDM DIMENSION 快速成形设备加工斗齿试样,材料为 ABS 树脂,如图 2 所示。

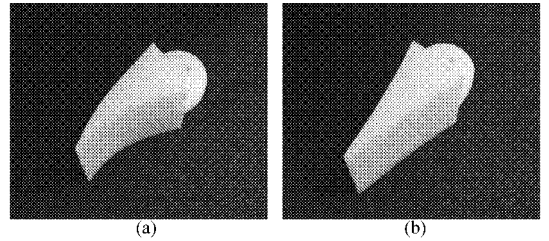


图 2 仿生斗齿与 JL80 斗齿样件

Fig. 2 Bionic and JL80 tooth specimen

(a) 仿生斗齿 (b) JL80 斗齿

### 1.2 土壤切削试验

本试验为模型试验,目的是初步对比分析两种斗齿在介质中的切削阻力。使用图 3a 所示的试验装置分别对 JL80 斗齿试样和仿生斗齿试样的土壤切削阻力进行测定。试验装置由进给机构、拉压传感器、夹具等组成,力学传感器的量程为 10 N,试验时阻力-位移数据会自动记录至计算机。选取的切削方向为垂直向下,切入速度为 100 cm/min,如图 3b 所示。每种斗齿试验重复 5 次,结果取平均值。设定最大切削深度为 15 mm(约为斗齿长度的 28%)。

土壤是一种质地不均匀的介质,不同位置点的

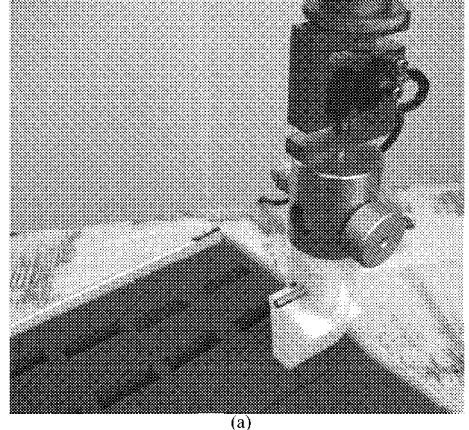


图 3 斗齿切削试验设备与斗齿切削方向示意图

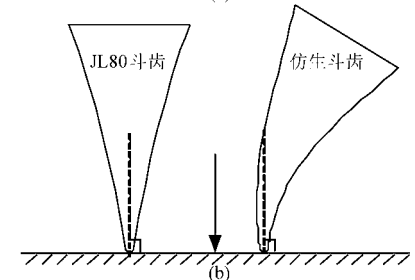


图 3 斗齿切削试验设备与斗齿切削方向示意图

Fig. 3 Experimental equipment and cutting direction of tooth specimen

(a) 试验设备 (b) 斗齿切削方向

力学性能有较大的可变性。此外,土壤与工件之间还存在黏附力。因此,本研究采用一种发泡酚醛塑料作为模拟土壤,该材料结构均一,硬度和孔隙度与土壤相似,黏附性较小,不仅可以减小试验误差,而且可不考虑土壤和斗齿间的黏附作用。

## 2 试验结果

土壤切削试验结果如图4所示。分析发现,切削过程分为土壤变形(区域I)和土壤破坏(区域II)2个阶段。

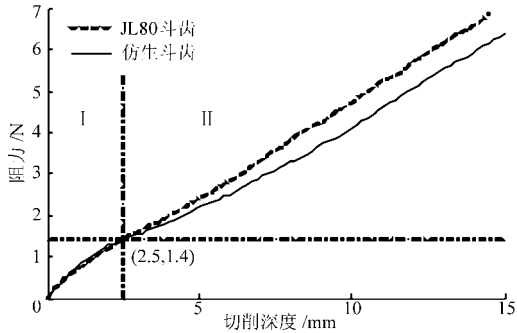


图4 切削阻力与切削深度关系曲线

Fig.4 Curves of cutting resistance and depth

在土壤变形阶段,随着斗齿的向下移动,土壤在斗齿压力作用下产生弹性形变且没有破碎,此阶段的阻力-位移曲线与斗齿构形及受到的阻力无关,而只与斗齿尖端的形状和土壤本身的材料属性有关。仿生斗齿和JL80斗齿的尖部形状相同,因此,两种斗齿在土壤变形阶段受到的阻力基本相同。

在土壤破坏阶段,斗齿继续向下运动,土壤所受的压力超过了自身的屈服极限,斗齿破开并楔入土壤,产生切削作用。在这一阶段,斗齿所受的阻力基本与切削深度成正比。JL80斗齿线性拟合式为

$$f(x_1) = 0.4717x_1 + 0.0882 \quad (R = 0.9993)$$

仿生斗齿线性拟合式为

$$f(x_2) = 0.4244x_2 + 0.0757 \quad (R = 0.9976)$$

由拟合曲线的斜率可知,在相同切削深度下,仿生斗齿受到的阻力均小于JL80斗齿,在5~15mm的切削深度上,阻力减小10%~12%,表明仿生斗齿具有更高的切削效率。

## 3 机理分析

### 3.1 斗齿构形对切削阻力的影响

斗齿对土体的切削过程复杂,在切削过程中,土体受到斗齿的挤压与剪切作用而发生变形,随着切削深度的增大,土体原有结构被破坏,土块或土层从土体上分离下来。整个过程包含土体压缩和松散现象,土体之间以及土体与斗齿间都发生了摩擦,形成摩擦阻力。因此,斗齿在切削时产生的基本阻力有:

土的内摩擦力、土体与斗齿间的摩擦力及破坏土体原有结构所需的阻力。这3种力一般同时存在,很难单独考虑。可以通过对斗齿构形的合理设计<sup>[14]</sup>达到减小3种基本阻力的目的。

结合图1b 蜈蚣爪趾的体视显微镜照片与图5 蜈蚣爪趾内、外侧曲线的曲率发现:蜈蚣爪趾内侧曲线曲率沿着其纵向方向变化不大,而外侧的曲率在靠近趾尖处曲率大,越靠近基部曲率越小。地面力学的试验表明,犁体在犁翼部分曲率大而在犁铧部分曲率小将有利于脱土<sup>[11]</sup>。蜈蚣爪趾轮廓线曲率的变化规律符合该结论。

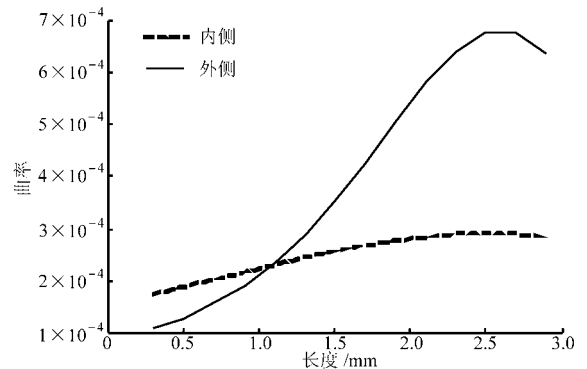


图5 蜈蚣爪趾内、外侧曲线曲率

Fig.5 Curvatures of inner and outer contour lines of mole cricket's toe

统计表明<sup>[15]</sup>,90%~95%的斗齿失效形式为磨损失效,斗齿上表面、下表面、侧表面的相对磨损量为1:3:0.5。磨损量与载荷成正比,因此,斗齿下表面工作载荷是上表面的3倍。对斗齿在不同时期磨损情况的研究表明,在使用初期,齿末端尖角处的应力最大,且下表面磨损较大,形成高于安装中心的“自刃尖”,如图6b所示<sup>[15]</sup>,这一时期的斗齿切削阻力小,磨损轻。之后,斗齿刃口的中心线继续上移,齿尖变钝,如图6c所示,切削能力降低,磨损较大。由斗齿的磨损过程可知,延长斗齿“自刃尖”时期,可同时提高斗齿整体的切削性能和耐磨性能。

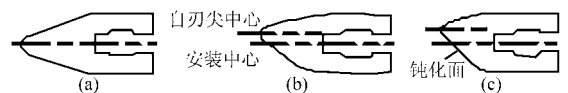


图6 自刃型斗齿自刃原理图

Fig.6 Mechanism of self-sharpening tooth

(a)原斗齿 (b)自刃型斗齿 (c)钝化后的斗齿

图7所示的P&H-2100BL改进型斗齿<sup>[15]</sup>的使用寿命比对称斗齿提高了30%以上,该斗齿通过改变原斗齿刃口中心线的位置,使斗齿面与挖掘过程的磨损曲面相吻合,且呈光滑连续曲线。本文中的仿生斗齿利用动物有利于切削的爪趾构形,使齿尖“上翘”,同样实现了原斗齿上下表面对称中心线位置的改变,且斗齿面的曲线更加平滑,切削时,在齿

尖处会形成对土体的径向撕裂,且不会在轴向处对土壤造成压实,有利于后期的持续切削。

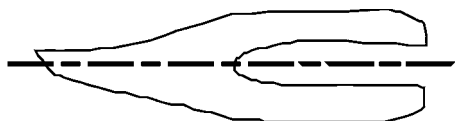


图 7 P&H-2100BL 改进型斗齿  
Fig. 7 Modified P&H-2100BL tooth

### 3.2 斗齿切削时的力学分析

在对斗齿与土壤的相互作用过程进行受力分析之前,做以下假设:斗齿的尖部(楔刃)尖锐,即斗齿尖端不对土壤产生压力;斗齿在楔入时处于稳定的工作状态;斗齿在切削时存在后角  $\gamma_1$ ,不产生楔后棱与土壤的摩擦。

斗齿切削土体时的受力情况如图 8 所示,土体对切削面的作用力有切削面上的压力  $N$  和对切削面的摩擦力  $F$ ,这两个力的合力即为斗齿受到的总阻力  $N'$ 。切削面上的摩擦力  $F = N \tan \varphi$ ,其中  $\varphi$  为摩擦角,反映土壤的物理属性。总阻力  $N' = N / \cos \varphi$ ,则总阻力的水平分力为

$$P_x = N' \cos(90^\circ - \gamma - \varphi) = \frac{N}{\cos \varphi} \sin(\gamma + \varphi) \quad (1)$$

总阻力的垂直分力为

$$P_y = N' \cos(\gamma + \varphi) = \frac{N}{\cos \varphi} \cos(\gamma + \varphi) \quad (2)$$

式中  $\gamma$ ——斗齿的切削角(楔入角),是切削后角  $\gamma_1$ 与斗齿刃角  $\theta$ 的和

对于同一种土壤,斗齿的摩擦角  $\varphi$  固定, $P_x$ 和  $P_y$ 均可看作是关于  $\gamma$  的函数,故切削角  $\gamma$  的大小与切削阻力紧密相关。工程实际中常通过减小切削角来降低切削阻力,即斗齿刃角  $\theta$  越小,挖掘阻力越小,但磨损越快。工程上一般取  $\theta$  为  $20^\circ \sim 25^\circ$ ,考虑到后角  $\gamma_1$  的存在,切削角的理论范围为  $30^\circ < \gamma < 60^\circ$ ,实际斗齿切削角一般为  $40^\circ \sim 50^\circ$ 。如图 8b

所示,仿生斗齿的切削面具有一定的曲率,可以在不改变挖掘机设计( $\theta$ )与工况( $\gamma_1$ )的前提下,最大限度的减小切削角  $\gamma$ 。因此,具有一定曲率的切削面,可以使斗齿受到的总阻力在水平方向上的分量减少,从而减少切削阻力;此外,切削下的土壤将沿着切削面抬升,有助于土体的破碎,进一步减少摩擦阻力。

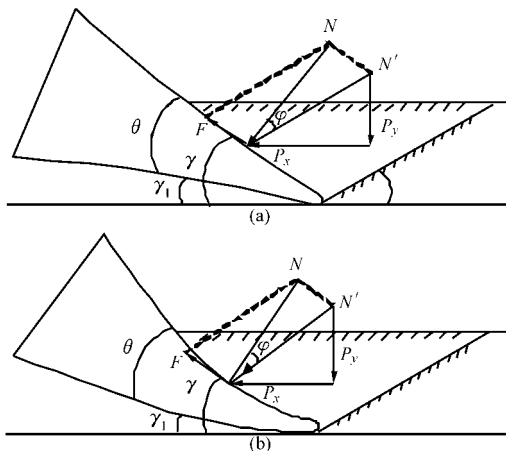


图 8 斗齿切削土壤受力分析图

Fig. 8 Force analysis of teeth during cutting soil  
(a) JL80 斗齿 (b) 仿生斗齿

### 4 结论

(1) 根据蜈蚣爪趾构形信息设计的仿生斗齿,在以  $90^\circ$  垂直切削时,具有比传统 JL80 型斗齿更小的切削阻力。

(2) 仿生斗齿的切削面曲线的曲率尖部大,基部小,该构形易延长斗齿的“自刃尖”时期,有利于持续切削。

(3) 对斗齿切削土体时的切削阻力的力学分析显示,仿生斗齿可在不改变挖掘机设计与工况的条件下,减小切削角,从而减小斗齿受到的总阻力在水平方向上的分量,进而减小切削阻力。

### 参 考 文 献

- Maciejewski J, Jarzebowski A, Trampczynski W. Study on the efficiency of the digging process using the model of excavator bucket [J]. Journal of Terramechanics, 2004, 40(4): 221 ~ 233.
- Fernandez J E, Vijande R, Tucho R, et al. Materials selection to excavator teeth in mining industry[J]. Wear, 2001, 250(1 ~ 12): 11 ~ 18.
- Maciejewski J, Jarzebowski A. Optimisation of tool trajectory in soil digging processes-laboratory tests [J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(3): 161 ~ 179.
- Towarek Z. Dynamics of a single-bucket excavator on a deformable soil foundation during the digging of ground[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45(6 ~ 7): 1 053 ~ 1 076.
- Coetzee C J, Els D N J. Calibration of discrete element parameters and the modeling of silo discharge and bucket filling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 198 ~ 212.
- Ren L, Tong J, Cong Q. Unsmooth cuticles of soil animals and their characteristics of reducing adhesion and resistance [J]. Sciences Bulletin, 1998, 43(2): 166 ~ 169.

XSD 框架结构和 UML 可视化结构进行表示,并且通过这种结构化的知识表示实现了计算机自动化处理过程。

(2) 通过实例证明,该模型与现有的专利技术方案概念模型相比,具有无歧义性、自动化提取和表示等优点。

(3) 提出的机械产品作用结构知识表示模型可以有两方面的应用:该模型中的计算机辅助自动处理方法可以应用于多领域产品专利知识自动化处理,提高知识获取的效率和精度;该模型可以应用于专利知识信息库的建设,为专利知识进一步利用并辅助创新设计知识提供支持。

#### 参 考 文 献

- 1 Sowa J F. Conceptual graphs for a data base interface[J]. IBM Journal of Research and Development, 1976, 20(4): 336 ~ 357.
- 2 Hensman S. Construction of conceptual graph representation of texts[C]//Proceedings of the Student Research Workshop at HLT-NAACL, Boston, Massachusetts, 2004: 49 ~ 54.
- 3 Kamaruddin S, hamdan A R, Nor F M. Conceptual graph interchange format for mining financial statements[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Rough Sets and Knowledge Technology, 2009: 579 ~ 586.
- 4 Jaramillo C M Z, Gelbukh A F, Arangoisaza F. Pre-conceptual schema: a conceptual-graph representation for requirements elicitation[C]//Advances in Artificial Intelligence, 5th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI, 2006: 27 ~ 37.
- 5 王朝霞,邱清盈,冯培恩,等. 机械产品专利技术信息抽取方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 198 ~ 206.  
Wang Zhaoxia, Qiu Qingying, Feng Peien, et al. Research on information extraction method of technical solution from mechanical product patent[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 198 ~ 206. (in Chinese)
- 6 Pahl G, Beitz W, Wallace K, et al. Engineering design: a systematic approach[M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 2007: 38 ~ 42.
- 7 Manschitz E, Burger H, Anzinger J, et al. Hand-held electrical combination hammer drill: US, 7044234[P]. 2006-05-16.
- 8 Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics[J]. Physical Review, 1957, 106(4): 620 ~ 630.
- 9 hyperModel [CP/OL]. <http://www.xmlmodeling.com/hypermodel/overview/>.
- 10 Word Net 2.0 [CP/OL]. <http://www.cogsci.princeton.edu/~wn>.
- 11 Johnson N P. Magnetic transmission; US, 7449807[P]. 2008-11-11.

(上接第 261 页)

- 7 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): 1 812 ~ 1 814.  
Ren L Q, Li J Q, Chen B C. Research on bionic resistance reduction of non-smooth surface[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(19): 1 812 ~ 1 814. (in Chinese)
- 8 李建桥,任露泉,刘朝宗,等. 减粘降阻仿生犁壁的研究[J]. 农业机械学报, 1996, 27(2): 1 ~ 4.  
Li J Q, Ren L Q, Liu C Z, et al. A study on the bionic plow moldboard of reducing soil adhesion and plowing resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(2): 1 ~ 4. (in Chinese)
- 9 郭志军,周志立,徐东,等. 高效节能仿生深松部件的试验[J]. 河南科技大学学报, 2003, 24(3): 1 ~ 3.  
Guo Z J, Zhou Z L, Xu D, et al. Experiment on high-efficient and energy-saving bionic subsoiling components[J]. Journal of Henan University of Science & Technology, 2003, 24(3): 1 ~ 3. (in Chinese)
- 10 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 Z J, Du G, Zhou Z L, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47 ~ 52. (in Chinese)
- 11 任露泉,徐晓波,陈秉聪. 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 L Q, Xu X B, Chen B C. 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)
- 12 张琰. 东方蝼蛄耦合特性、运动学建模及其功能仿生研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.  
Zhang Y. The research on coupling characteristics, kinematics modeling and bionic application of mole cricket (*Gryllotalpa orientalis*) [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- 13 JG/T 90—1999 液压挖掘机斗齿分类[S].  
JG/T 90—1999 Technical requirements for teeth of hydraulic excavators[S]. (in Chinese)
- 14 同济大学. 单斗液压挖掘机[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- 15 陈再良,李亚兰. 矿用挖掘机斗齿的研制[J]. 矿山机械, 1992(9): 9 ~ 11.  
Chen Z L, Li Y L. Development of a mine excavator's bucket teeth[J]. Mining & Processing Equipment, 1992(9): 9 ~ 11. (in Chinese)