

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.04.039

# 鼯鼠爪趾几何结构量化特征分析\*

汲文峰 佟金 贾洪雷 陈东辉 刘财勇

(吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

**【摘要】** 土壤洞穴动物鼯鼠具有极高的挖掘效率,前足爪趾是其主要挖掘器官。分析了鼯鼠中重要种属——麝鼯(*Scaptochirus moschatus*)具有优良挖掘功能的前足爪趾的几何结构特征,重点分析了前足爪趾触土面的几何结构。利用体视显微镜观察分析前足爪趾的宏观几何结构,通过逆向工程技术获取爪趾三维数据点进行特征曲线量化分析,求得前足爪趾特征轮廓线的曲率及二阶导数的变化规律:鼯鼠爪趾纵向轮廓曲率变化较小,爪趾纵向表面平顺,保证了挖掘出的洞道内壁的平整;横向轮廓曲线曲率变化较大,且横向轮廓线尖端弯曲小,中后端弯曲大,这种结构使爪趾更易入土和扩洞。

**关键词:** 仿生学 鼯鼠 爪趾 几何结构特征 量化分析

**中图分类号:** Q811.1; TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0193-06

## Quantitative Characteristic Features of Geometric Structures of Claws of Mole Rat

Ji Wenfeng Tong Jin Jia Honglei Chen Donghui Liu Caiyong

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

### Abstract

Mole rat, as a typical soil-burrowing animal, has a high working efficiency in digging hole in earth, its fore claws are main digging organ. The geometric characteristics of the claws of mole rats (*Scaptochirus moschatus*) was analyzed by stereoscopy, the quantitative analysis of geometrically characteristic features of the surfaces was performed by reverse engineering, and the second derivative and curvature of the surface profile curves were calculated. The curvature variation of longitudinal profile of claw changes gently and the longitudinal surface was smooth, which assures the tidiness of inner wall when mole rat dug holes. The curvature variation of transverse fitted curves shows a rapid change, and the bending of the transverse fitted curves increase from tip to rear, this kind of structure is easier for cutting in and hole-enlarging. The results provide some information for the design of the soil-cutting tools and excavation tools in energy-saving property and cutting efficiency.

**Key words** Bionics, Mole rat (*Scaptochirus moschatus*), Claw, Geometrically characteristic feature, Quantitative analysis

### 引言

仿生学研究表明,生物经过长期的进化,造就了生物适应其生存环境的优良本领,某些动物长期生

活在土壤环境中,已进化出能适应不同土壤环境的种种活动方式,逐步形成了优化的几何结构和优良的力学功能,使其在挖掘过程中能够获得最低的切削阻力,这就为土壤切削工具几何结构及力学性能

收稿日期: 2009-03-24 修回日期: 2009-05-07

\* 国家自然科学基金资助项目(50675087)、国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2009AA043604-2)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A08、2007BAD89B06、2006BAD02A10)、吉林大学“985工程”资助项目和吉林大学“985工程”研究生创新基金资助项目(20080105)

作者简介: 汲文峰, 博士生, 主要从事农业工程仿生理论与技术及机具设计研究, E-mail: jiwenfeng@126.com

通讯作者: 佟金, 教授, 博士生导师, 主要从事地面机械仿生技术研究, E-mail: jtong@jlu.edu.cn

的优化提供了仿生研究的基础<sup>[1-6]</sup>。

土壤穴居动物鼯鼠,能在一夜挖出长 91 m 的隧道<sup>[7]</sup>,相对于一个身长只有 100 ~ 180 mm 的鼯鼠而言,掘土效率极高。鼯鼠主要挖掘工具是前足,前足有 5 个趾,跨列成铲状,坚强有力,挖土自如。多数哺乳动物的前足向内生长,而鼯鼠的前足朝外生长,这样的结构更适合向前挖掘洞穴。鼯鼠爪趾是土壤切削工具和挖掘工具良好的仿生学习对象,通过研究其挖掘器官的几何结构特征,探讨其特征轮廓曲线的变化规律,为仿生土壤切削工具和挖掘工具的高效节能设计提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 鼯鼠的捕获

捕获地点为吉林省松原市长岭县腰井子牧场,种属为麝鼯 (*Scaptochirus moschatus*) (如图 1 所示)。

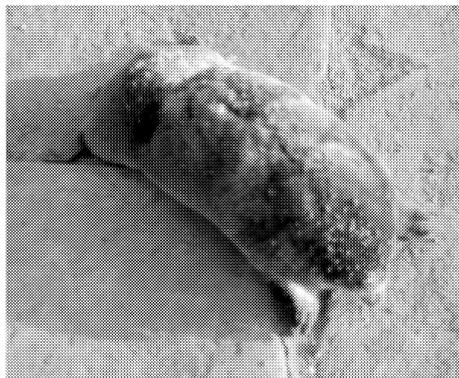


图 1 捕获的鼯鼠 (*Scaptochirus moschatus*) 照片

Fig. 1 Photograph of the tested mole rat (*Scaptochirus moschatus*)

### 1.2 体视显微分析

将鼯鼠前后爪趾切下,用 85% 酒精清洗后风干,制成样品。采用 XTJ-30 型体视显微镜对鼯鼠爪趾表面形态进行观察。

### 1.3 爪趾点云数据测量

在涉及生物表面问题的研究中,需要定量分析生物体结构和生物表面构形及表面形态,逆向工程的三维表面测量及数字化模型技术是定量揭示生物体结构和表面形态特征的有效方法<sup>[8]</sup>。因此,利用逆向工程技术对鼯鼠爪趾的结构信息进行采集,扫描测量仪器为台湾智泰公司生产的 LSV50 型三维激光扫描系统。

### 1.4 爪趾特征曲线建模

对激光扫描系统采集的鼯鼠前足爪趾表面的三维数据点进行轮廓线提取,得到相应的轮廓线,纵向轮廓曲线的截取平行间距为 0.35 mm,同理截取横向轮廓曲线,截面间距为 1.10 mm。而后提取各轮廓线数据点坐标,基于最小二乘法<sup>[9]</sup>对轮廓线数

据进行数学建模,获得拟合曲线方程,并进一步获得拟合曲线二阶导数及曲率曲线,通过对轮廓曲线二阶导数和曲率的分析,总结其特征轮廓线变化规律。

## 2 结果与讨论

### 2.1 爪趾几何特征

鼯鼠的前、后爪(图 2 和图 3)形态存在明显差异,善于挖掘的前爪相对较大,前爪的 5 个趾跨列成铲状,各爪趾形状近似,中间三趾前端稍圆,外侧两趾前端稍尖,且爪趾曲面平顺;而后爪棱角分明,前端尖锐,爪趾形状近似三角体,尖锐的结构利于入土,且后肢粗壮,后爪及后肢的这些特点有利于掘土时向前推进。

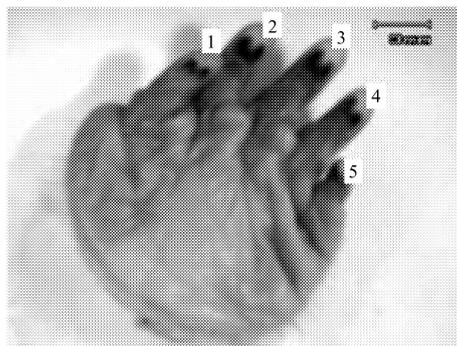


图 2 鼯鼠前爪照片

Fig. 2 Fore claw of mole rat



图 3 鼯鼠后爪照片

Fig. 3 Hind claw of mole rat

鼯鼠前爪是挖掘的主要工具,挖掘时 5 个爪趾呈上下排布,由下而上依次为爪趾 1 ~ 5 (爪趾编号见图 2)。利用游标卡尺测量各爪趾,结果表明中间三趾的长度、宽度和厚度均大于外侧两趾,而爪趾 2 与爪趾 3 尤为接近,具代表性,因此选取爪趾 2 为量化分析样品,其几何形态如图 4 所示。

由图 4 可知,爪趾越靠近前端越薄,有利于入土。爪趾背面呈弧状,曲面平缓,较光滑;而掌面呈凹板状,在爪趾中后部逐渐隆起。鼯鼠前爪趾宽大,因此挖土时,挖起的土将随鼯鼠前爪转动,转到一定角度,土受到掌面隆起部分的阻碍,被动地改变方向,滑落于鼯鼠身体的两侧。

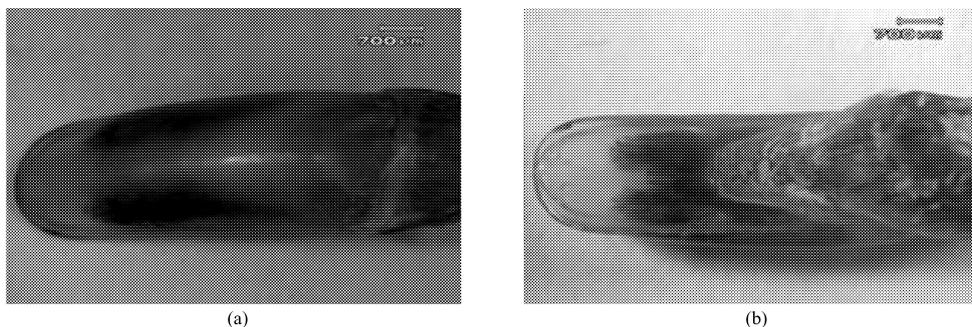


图 4 选取的前足爪趾照片

Fig. 4 Morphology of selected fore claw

(a) 爪背面 (b) 爪掌面

## 2.2 爪趾特征曲线

为准确表达出鼯鼠爪趾表面几何结构特征,提取其表面轮廓线(各截取位置见图 5),并采用最小二乘法进行拟合,以方程的形式加以描述,分别采用多项式函数和高斯函数加以拟合。利用两种拟合函数,分别对提取的 8 条鼯鼠爪趾表面纵向轮廓线数据进行拟合,并对两种拟合形式的拟合精度(评定系数为判定系数  $R^2$  及残差平方和 SSE)进行比较,以确定更精确的拟合方式。分别对两种拟合形式的次数进行逐次尝试,综合考虑拟合精度及拟合方程系数等因素,采用 6 阶多项式方程拟合纵向轮廓曲线,以 4 阶高斯方程拟合横向轮廓曲线。

### 2.2.1 纵向轮廓曲线分析

对于纵向轮廓曲线的拟合,多项式方程拟合比

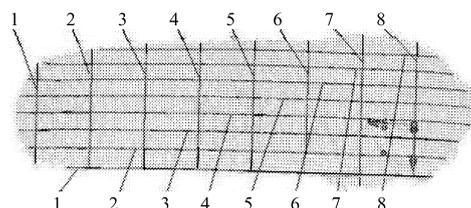


图 5 鼯鼠前足爪趾平行截面位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram for intercepting positions of the curves of selected claw of the mole rat

高斯方程拟合更为精确,选取 6 阶多项式的表达式,多项式方程为

$$f(x) = p_1x^6 + p_2x^5 + p_3x^4 + p_4x^3 + p_5x^2 + p_6x + p_7 \quad (1)$$

表 1 列出了轮廓曲线拟合的方程系数和评估系数,以多项式方程拟合的曲线如图 6 所示。

表 1 纵向轮廓数据拟合的方程系数及评估系数

Tab. 1 Coefficients of longitudinal profile equations fitted and their evaluating parameters

方程系数	轮廓线序号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$p_1$	$4.770 \times 10^{-4}$	$5.961 \times 10^{-5}$	$6.18 \times 10^{-6}$	$-6.910 \times 10^{-5}$	$-1.732 \times 10^{-5}$	$-1.433 \times 10^{-5}$	$-4.539 \times 10^{-5}$	$4.763 \times 10^{-5}$
$p_2$	$-1.097 \times 10^{-2}$	$-1.36 \times 10^{-3}$	$-1.5 \times 10^{-4}$	$1.62 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-4}$	$5.8 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$-1.01 \times 10^{-3}$
$p_3$	0.095	0.012	0.014	-0.015	-0.002	-0.008	-0.013	0.008
$p_4$	-0.387	-0.043	-0.009	0.063	0.063	0.050	0.050	-0.033
$p_5$	0.732	0.014	-0.004	-0.152	-0.040	-0.154	-0.146	0.062
$p_6$	-1.095	-0.200	-0.276	-0.110	-0.213	-0.228	-0.214	-0.561
$p_7$	4.536	4.429	4.575	4.652	4.699	4.850	4.603	4.585
判定系数	0.999	1	1	1	1	1	1	1
残差平方和	0.018	0.001	$8.367 \times 10^{-6}$	$1.424 \times 10^{-5}$	$3.501 \times 10^{-5}$	$2.830 \times 10^{-5}$	$1.278 \times 10^{-6}$	$6.768 \times 10^{-6}$

分析拟合曲线的几何特性,根据拟合曲线方程,计算出每条轮廓曲线的一、二阶导数及曲率,并将拟合曲线的二阶导数和曲率值绘制成图,如图 7 和图 8 所示。

对照鼯鼠爪趾纵向轮廓曲线的二阶导数图(图 7),轮廓曲线 1 的二阶导数在曲率变化较大处

大于零,曲线 2 末端大于零,其余部位各轮廓曲线的二阶导数值均小于零。表明轮廓曲线 1~8 在大多数区间呈凸状。除曲线 1 外,其他曲线的二阶导数变化较小。曲线 2 与曲线 7,曲线 3 与曲线 6,曲线 4 与曲线 5,其二阶导数的变化呈现相同趋势。这表明此 6 条轮廓曲线关于纵向中轴面呈对称分布,而

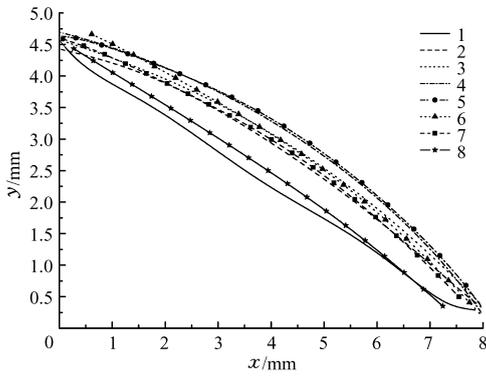


图6 鼯鼠爪趾纵向轮廓曲线拟合结果

Fig. 6 Fitting curves of longitudinal profile on sixth order polynomial

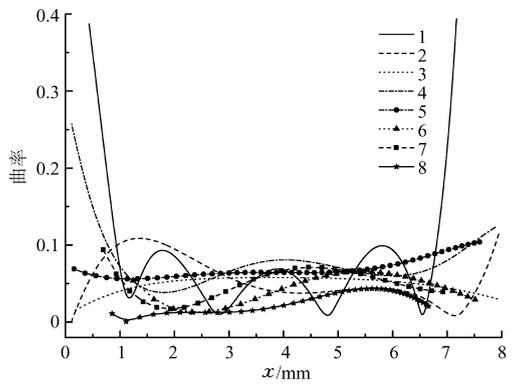


图8 鼯鼠爪趾纵向轮廓曲线曲率图

Fig. 8 Curvature variation of longitudinal fitted curves

相对增大明显,曲线3和曲线6的曲率应呈对称趋势,图中却存在较大区别,可能是由于选取的鼯鼠爪趾受到土壤的不均匀磨损影响。而曲线7亦为磨损较多处,因此,虽然曲线7与曲线2关于纵向中轴面应呈对称分布,应有对应的曲率变化趋势,但由于土壤对鼯鼠爪趾表面的磨损,使曲线7与曲线2的曲率变化出现差异。

对照鼯鼠爪趾纵向轮廓线的二阶导数及曲率图可知,鼯鼠爪趾的纵向轮廓曲线呈凸状分布,且曲率变化较小,较为光滑。

2.2.2 横向轮廓曲线分析

在纵向轮廓曲线的拟合中,由于曲线较长,且较平直,所以多项式方程更为精确,而对于相对短许多、弯曲较大的横向轮廓曲线,选用高斯非线性函数的拟合形式更能保证拟合精度,拟合方程系数及评估系数见表2,拟合曲线如图9所示,4阶高斯函数表达式为

$$f(x) = a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 e^{-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2} + a_4 e^{-\left(\frac{x-b_4}{c_4}\right)^2} \quad (2)$$

表2 横向轮廓数据拟合的方程系数及评估系数

Tab.2 Coefficients of transverse profile equations fitted and their evaluating parameters

方程系数	轮廓线序号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$a_1$	0.971	-2.799	1.067	0.179	$-1.135 \times 10^{-5}$	1.114	0.738	0.849
$b_1$	7.913	7.864	10.230	8.263	7.633	4.729	7.061	8.162
$c_1$	0.719	0.434	8.008	0.807	0.096	8.122	1.728	0.525
$a_2$	0.370	3.056	-0.402	1.388	-0.025	0.112	-0.038	-0.732
$b_2$	8.399	7.864	8.601	-0.003	8.210	8.002	8.033	8.180
$c_2$	0.477	0.452	0.476	0.201	0.439	0.414	0.372	0.503
$a_3$	1.058	1.711	1.156	2.396	2.299	1.312	0.054	1.359
$b_3$	6.986	7.652	7.531	7.884	7.518	7.341	6.943	7.016
$c_3$	0.857	1.595	0.992	2.096	1.644	1.027	0.562	1.090
$a_4$	1.214	0.540	1.024	0.113	1.319	1.523	2.357	2.423
$b_4$	9.042	8.849	8.621	8.996	9.411	8.824	8.460	8.779
$c_4$	0.623	0.607	0.624	0.355	1.509	1.115	2.481	1.972
判定系数	0.999	1	1	1	1	1	0.999	1
残差平方和	$2.464 \times 10^{-6}$	$4.515 \times 10^{-5}$	$1.781 \times 10^{-5}$	$4.572 \times 10^{-6}$	$8.014 \times 10^{-6}$	$1.69 \times 10^{-5}$	$3.262 \times 10^{-4}$	$1.958 \times 10^{-5}$

边界曲线1,在曲率变化较大处呈现凹状。对照鼯鼠爪趾实体,符合此种分布规律。

由图8可知,曲线4和曲线5除曲线始端外,曲率对应大致相同的变化趋势,对应纵向中轴面成对称分布,但曲线4相对于曲线5在始端部分曲率变化较大。曲线3曲率变化极为平缓,曲线6曲率的

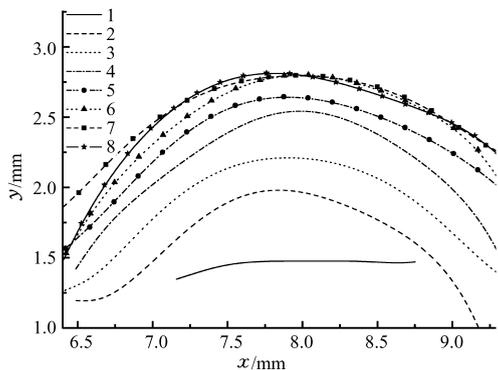


图 9 鼯鼠爪趾横向轮廓曲线拟合结果  
Fig. 9 Fitted curves of transverse profile on Gaussian function

在以高斯函数形式拟合的方程基础上,求解拟合曲线的一、二阶导数及曲率,并绘制拟合曲线的二阶导数及曲率图,分别如图 10 和图 11 所示。

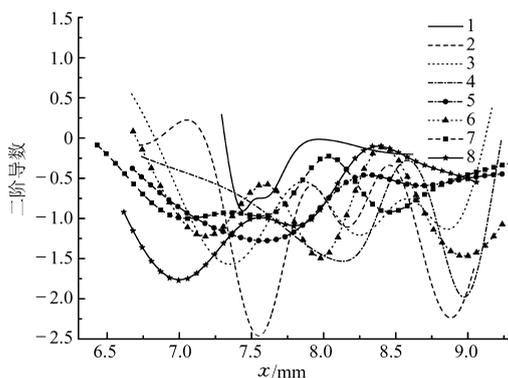


图 10 鼯鼠爪趾横向轮廓曲线二阶导数图  
Fig. 10 Second derivative variation of the transverse fitted curves

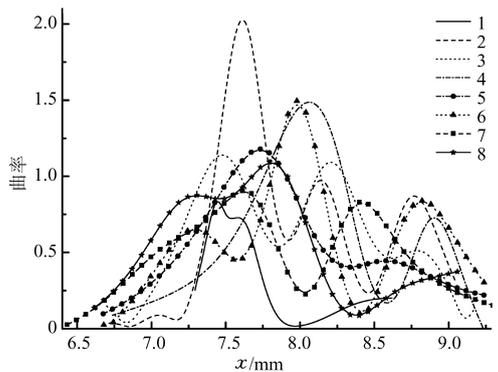


图 11 鼯鼠爪趾横向轮廓曲线曲率图  
Fig. 11 Curvature variation of the transverse fitted curves

由图 10 可知,曲线二阶导数变化较频繁,呈波状分布,除个别情况外(如曲线 3 的始末两端)均小于零,说明曲线均呈凸状,且基本具有相同的变化趋势,二阶导数先变小到波谷,后增大至波峰,然后再

跌至波谷,再上升到波峰,如此几个反复。

由图 11 可知,爪趾轮廓曲线 2 在横坐标为 7.5 mm 处二阶导数达到最小,对应于曲率最高。同样,对照其他曲线的二阶导数及曲率图,在曲率处于波峰时,二阶导数均处于波谷。除曲线 1 和曲线 8 外,其他曲线的曲率也呈相同变化趋势,逐渐递增到最高点,达到波峰,而后开始减小,到达波谷后上升至最大值,之后再减小。在横坐标等于 8 mm 处,其他曲线曲率都处于最大值,曲线 1 的曲率则处于最小值;其他曲线在横坐标值为 8 mm 与 8.5 mm 之间,逐渐变小,曲线 1 的曲率则逐渐增大。考虑鼯鼠爪趾的掘土过程,可知横坐标值大处位于受土壤磨损作用较小处,所以曲率变化较小,是鼯鼠爪趾自然生成形状。而另一端,由于表面受土壤的磨损作用,导致曲率发生相应变化,且变化较大。如曲线 2,在第 1 个波峰处的变化较其它波峰处变化大得多。由二阶导数图及曲率图可知,鼯鼠爪趾表面横向轮廓曲线基本呈凸状,曲率变化比纵向轮廓曲线变化明显。

曲率值越大,则曲线的弯曲程度越大。通过对鼯鼠爪趾纵、横向典型轮廓曲线特征的分析,发现鼯鼠爪趾纵向弯曲较小,横向弯曲较大。鼯鼠爪趾的纵向轮廓曲线二阶导数基本沿纵向中轴面对称,纵向中轴面两侧附近表面轮廓曲线曲率变化相对较大,而由于土壤的磨损致使爪趾边缘(如纵向轮廓曲线 1)曲率变化最大。通过对横向轮廓曲线的分析可知,爪趾尖端弯曲较小,中后端弯曲大,这样的结构更利于入土扩洞,并有利于提高爪趾的强度。

### 3 结束语

为获得包含较多细节特征的数据点群,利用逆向工程技术对鼯鼠爪趾表面几何特征数据进行采集;利用最小二乘法对特征轮廓曲线数据进行量化分析,采用 6 阶多项式方程拟合纵向轮廓曲线,以 4 阶高斯方程拟合横向轮廓曲线;通过对前足爪趾触土面的几何结构、爪趾表面拟合轮廓曲线曲率和二阶导数的分析,总结出特征轮廓线变化规律:爪趾纵向轮廓曲率变化较小,则爪趾纵向表面平顺,保证了挖掘出的洞道内壁的平整;纵向和横向轮廓曲线均呈凸状,且横向轮廓线尖端弯曲小,中后端弯曲大,这种结构使爪趾尖端更易入土,且中后端掘进后可对洞道进行扩充。

## 参 考 文 献

- 1 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)
- 2 Tong Jin, Sun Jiyu, Chen Donghui, et al. Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80(1): 1~12.
- 3 陈秉聪, 任露泉, 徐晓波, 等. 典型土壤动物体表形态减粘脱土的初步研究[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2): 1~6.  
Chen Bingcong, Ren Luquan, Xu Xiaobo, et al. Initial research on reducing soil adhesion of body surface shapes of the typical soil animals[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1990, 6(2): 1~6. (in Chinese)
- 4 丛茜, 任露泉, 吴连奎, 等. 几何非光滑生物体表形态的分类学研究[J]. 农业工程学报, 1992, 8(2): 7~12.  
Cong Qian, Ren Luquan, Wu Liankui, et al. Taxonomic research on geometric nonsmooth animal surface shapes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1992, 8(2): 7~12. (in Chinese)
- 5 任露泉, 王云鹏, 李建桥, 等. 典型生物柔性非光滑体表的防粘研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 31~36.  
Ren Luquan, Wang Yunpeng, Li Jianqiao, et al. Bionic research on flexible nonsmooth surface of typical animals[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1996, 12(4): 31~36. (in Chinese)
- 6 佟金, 吴娜. 臭蜣螂唇基表面轮廓曲面数学模型建立及分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 113~116.  
Tong Jin, Wu Na. Mathematical models and analysis of profiles of the clypeus surface of Dung Beetle Coprisochus Motschulsky [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 113~116. (in Chinese)
- 7 Nevo E. Mosaic evolution of subterranean mammals: regression, progression and global convergence[M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- 8 李世武, 佟金, 张书军, 等. 逆向工程技术与工程仿生[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3): 109~112.  
Li Shiwu, Tong Jin, Zhang Shujun, et al. Reverse engineering and engineering bionics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 109~112. (in Chinese)
- 9 徐涛. 数值计算方法[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2002.

(上接第 192 页)

## 参 考 文 献

- 1 冯斌. AgGPS132 定位测量技术研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 83~85.  
Feng Bin. Study on technology of AgGPS132 positioning measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 83~85. (in Chinese)
- 2 刘国海, 李康吉. 基于 PDA 的 GPS 定位精度提高方法[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(5): 448~452.  
Liu Guohai, Li Kangji. Improving GPS positioning accuracy based on PDA[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005, 26(5): 448~452. (in Chinese)
- 3 何勇, 葛晓锋, 俞海红, 等. 农用 GPS 测试精度分析及提高精度方法的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 168~171.  
He Yong, Ge Xiaofeng, Yu Haihong, et al. Analyses of measurement precision of GPS for agricultural purposes and method for improving precision[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 168~171. (in Chinese)
- 4 朱虹, 关永, 田健仲, 等. 单点 GPS 定位误差建模研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(6): 206~208.  
Zhu Hong, Guan Yong, Tian Jianzhong, et al. Study on single-stand GPS positioning error modeling[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(6): 206~208. (in Chinese)
- 5 曹力, 黄圣国. GPS 误差的时间序列分析建模研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(35): 213~216.  
Cao Li, Huang Shengguo. Studying on GPS errors modeling by time series analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(35): 213~216. (in Chinese)
- 6 张智刚. 插秧机的 DGPS 自动导航控制系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.  
Zhang Zhigang. Automatic guidance system based on DGPS for rice transplanter[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 7 周俊, 姬长英. 自主车辆导航系统中的多传感器融合技术[J]. 农业机械学报, 2002, 33(5): 113~116.  
Zhou Jun, Ji Changying. Multi-sensor fusion in navigation of autonomous vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 113~116. (in Chinese)