

蚯蚓非光滑体表减粘降阻试验^{*}

刘国敏 李建桥 田喜梅 邹猛 李因武

【摘要】 以赤子爱胜蚓为研究对象,根据其运动特性,制备了头部静息态、舒张态、收缩态及体部静息态、舒张态、收缩态6种体表试样;利用微粘附力测试系统,对蚯蚓体表试样和钢试样进行土壤粘附力和滑动阻力试验。试验结果表明,蚯蚓体表试样的减粘降阻效果由大到小依次是收缩态、静息态、舒张态;而且,头部减粘降阻效果比体部明显;在试验条件下,头部收缩态的土壤粘附力和滑动阻力分别为钢试样的25%和61%,而体部收缩态的土壤粘附力和滑动阻力分别为钢试样的44%和71%。

关键词: 仿生学 蚯蚓 非光滑 减粘降阻 试验

中图分类号: Q811; S154.5

文献标识码: A

Experiment on Reduction of Soil Adhesion Force and Sliding Resistance of Earthworm Non-smooth Surface

Liu Guomin Li Jianqiao Tian Ximei Zou Meng Li Yinwu

(Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

Taking earthworm (*Eisenia foetida*) as the study object, six surface specimens including motionless, extending and shrinking of the forehead and body were prepared according as its movement characteristic. The soil adhesion force and sliding resistance experiments of earthworm non-smooth surface specimens and steel specimen were conducted on via a tiny adhesion testing system. The results showed that the shrinking specimen had best reducing soil adhesion force and sliding resistance ability, then were motionless specimen and the extending specimen respectively. The forehead sample had better reducing soil adhesion force and sliding resistance ability than the body sample. In the test condition, the soil adhesion force and sliding resistance of the forehead sample were 25% and 61% of that of the steel specimen respectively. The soil adhesion force and sliding resistance of the body sample were 44% and 71% of that of the steel specimen respectively.

Key words Bionics, Earthworm, Non-smooth, Reducing adhesion and resistance, Experiment

引言

解决土壤的粘附问题是提高农机具耕作效率的关键,也是实现农业现代化的根本保证^[1-2]。长期以来,国内外学者致力于研究土壤粘附规律,并提出了各种较为有效的脱土方法,但是这些方法都普遍

存在着一定的局限性。土壤动物具有优良的防粘减阻功能,基于这一原理,开展了仿生减粘降阻理论与技术研究^[1-9]。与传统的脱土方法相比,仿生脱附技术具有节能、环保、高效且实用性强等优点,符合农业的可持续发展战略,因此,仿生脱附技术逐渐成为地面机械基础理论研究领域的新方向。土壤动物

收稿日期: 2007-09-10

^{*} 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(项目编号:20050183015)和国家自然科学基金重点资助项目(项目编号:50635030)

刘国敏 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室 博士生 讲师(江西农业大学), 130025 长春市

李建桥 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室 教授 博士生导师

田喜梅 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室 实验员

邹猛 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室 博士生

李因武 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室 副教授 博士

粘附特性的研究是分析其脱附机理的基础,是仿生设计的依据,也是仿生脱附技术的核心问题^[9]。目前对生物非光滑表面的减粘机理仍在不断深入,生物非光滑表面与土壤粘附特性的定量关系的研究,已经成为非光滑仿生表面研究和减阻新技术开发的关键问题。

蚯蚓是一种典型的土壤动物^[10],具有柔性、生物电渗、非光滑、体表润滑多功能耦合减阻能力。在一些国内外有关文献中^[8~12],主要是从体表液、柔性、体表形貌以及生物电系统方面来研究分析蚯蚓的减粘脱土功能。本文以蚯蚓为研究对象,根据其运动特性,制备静息态、舒张态、收缩态 3 种形态不同部位的 6 种体表试样,分析其非光滑表面的土壤粘附特性。

1 试验材料

1.1 试验样品

试验样品蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),采集自吉林省长春郊外,体长 12~14 cm,体宽 3~5 mm,约 1 g 左右。观察蚯蚓的运动发现,蚯蚓在土壤中打洞前行时,其前端的口前叶寻找一个合适的缝隙伸入其中,然后膨胀起来,象楔子一样插入土中,其后部体节伸出刚毛,固定后端,而后再收缩前端的环肌产生向前的推力,使前部体节向前推进。环节的收缩沿着体节一节一节地向后传输,当环肌收缩后,前部的纵肌收缩,使蚯蚓身体后端向前拉,环肌与纵肌协调地收缩使蚯蚓向前运动^[12]。

根据蚯蚓的运动特性,制备了 3 种形态不同部位的体表试样,包括舒张态(图 1a、1d,环肌收缩,纵肌舒张)、静息态(图 1b、1e,环肌和纵肌都放松)、收缩态(图 1c、1f,环肌舒张,纵肌收缩)。

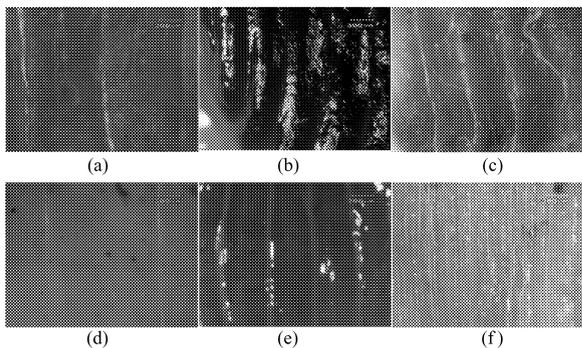


图 1 体表试样(放大 50 倍)

Fig.1 Surface specimen

- (a) 头部舒张态 (b) 头部静息态 (c) 头部收缩态
- (d) 体部舒张态 (e) 体部静息态 (f) 体部收缩态

将 5 mL 乙醚倒入试剂瓶,再将样品蚯蚓放入其中,盖上盖子,大约 10 s 后,蚯蚓完全昏迷。此时

将样品蚯蚓取出,放到载物台上,获得静息态试样。

把蚯蚓放入培养皿或小盘中,倒入清水,使之淹没蚯蚓。用滴管滴入 90% 的乙醇,滴入量约是清水量的 1/10,使体积分数达到 10% 左右。浸泡 1~2 h 后,蚯蚓全身伸直并已死亡,通过这种方法获得舒张态试样。

用 4% 甲醛快速处死蚯蚓获得收缩态试样。为了方便后面试验,所有表面试样均制备成宽 10 mm,长 25 mm。

1.2 试验用土

试验所用的土样为长春市某地的黄粘土,其部分参数如表 1 所示。

表 1 黄粘土的可塑性参数及粒径分布

Tab.1 Plasticity parameters and particle size

		distribution of iron clay				%
		颗粒粒径/mm				
液限	塑限	0.25~0.5	0.1~0.25	0.075~0.1	<0.075	
35.4	19.5	26.7	20.3	23	30	

2 试验设备与方法

2.1 试验设备

基于生物信号采集处理系统的微粘附力测控系统^[13]如图 2 所示,其主要部件有:WDW 系列微机控制电子万能试验机、传感器、RM6240 型多道生物信号采集处理系统和计算机等。

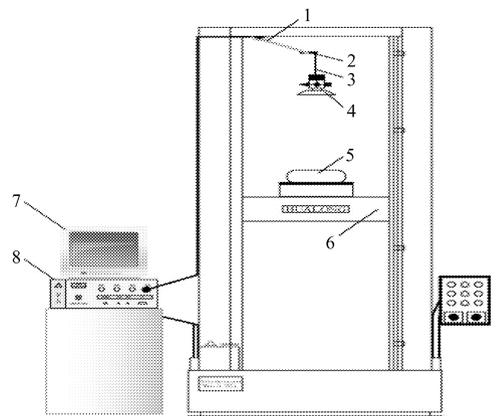


图 2 微粘附力测控系统结构简图

Fig.2 Tiny adhesion testing system

- 1. 磁力表座 2. 传感器 3. 柔性链 4. 试样 5. 土盒
- 6. 电子万能试验机 7. 计算机 8. 多道生物信号采集仪

2.2 试验方法

测试粘附力时,将搅拌均匀的土壤放入土盒,再将土盒平稳的放在试验台上,端部为被测试样的砝码悬吊在磁力表座上,并固定在试验机上端。用数据采集控制软件控制试验台上下运动,实现试样与

土样的粘附与拉脱,并用多道采样示波分析系统记录试验过程中产生的粘附力。测试土壤滑动阻力的方法与测粘附力的方法基本相同,只是通过土盒边缘的定滑轮将试样的上下运动转变为试样与土壤表面的水平运动。为了保证重复试验时土壤状态近似不变,减少试验误差,每次试验前都要更新试验用土,并对其进行压实、刮平。由于不同体表试样的试验结果差别不明显,重复了10次,而各单因素试验结果较明显,所以只重复了3次。同时考虑到蚯蚓

试样不能持续长时间的反复试验,采用不同试样分别进行试验。

3 土壤粘附力试验

3.1 粘附力试验结果

对不同体表试样分别进行粘附力测试,并用钢试样做对比试验。试验采用含水率30%的土壤,正压力2 N,加载速度1 mm/s,卸载速度1 mm/s,保压时间10 s。试验结果如表2所示。

表2 不同体表试样的土壤粘附力试验结果
Tab.2 Soil adhesion force of surface specimens

试样	最小值/Pa	最大值/Pa	平均值/Pa	标准方差	样本方差	减粘率/%	
头部	舒张态	781.06	1 151.50	998.28	117.94	15 455.67	35
	静息态	722.26	1 011.36	844.12	85.54	8 130.75	45
	收缩态	301.35	456.93	387.16	45.49	2 299.41	75
体部	舒张态	961.87	1 412.18	1 207.21	255.64	72 615.53	21
	静息态	812.91	1 174.91	961.29	117.44	15 325.85	37
	收缩态	439.04	824.67	673.80	118.97	15 726.36	56
钢试样	1 152.48	1 804.18	1 530.17	205.98	47 140.16		

从表2可见,头部减粘效果要比体部明显,而且不论是头部还是体部,收缩态的减粘效果最明显,静息态次之,最后是舒张态。与钢试样相比,体部收缩态减粘56%,头部收缩态减粘75%。

3.2 土壤含水率对粘附力的影响

采用土壤含水率为20%、25%、30%、35%分别进行蚯蚓体部静息态和钢试样的粘附力试验,正压力2 N,加载速度1 mm/s,卸载速度1 mm/s,保压时间10 s。试验结果如图3所示。

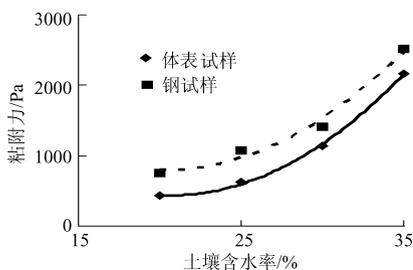


图3 粘附力与土壤含水率的关系曲线

Fig.3 Relation curves of adhesion force against soil containing moisture

由图3可知,蚯蚓体表试样和钢试样的粘附力都随土壤含水率的增加呈抛物线趋势增加,且含水率越小,体表试样的减粘效果越显著。在试验条件下,当含水率为20%时,减粘最显著,减粘率为44%;当含水率为35%时,减粘率为14%。

3.3 正压力对粘附力的影响

分别采用1、1.5、2、2.5、3 N的5种正压力进行

蚯蚓头部舒张态试样和钢试样的粘附力试验,土壤含水率30%,加载速度1 mm/s,卸载速度1 mm/s,保压时间10 s。其试验结果如图4所示。蚯蚓体表试样和钢试样的粘附力都随正压力的增加呈线性趋势增加,且正压力越小,体表试样的减粘效果越显著。在试验条件下,当正压力为1 N时,减粘最显著,为30%;当正压力为3 N时,为22%。

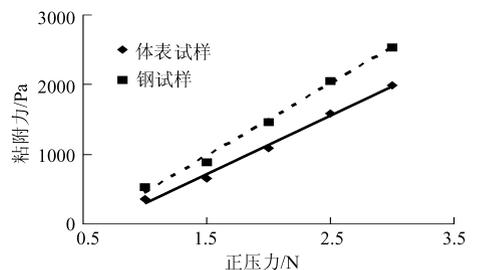


图4 粘附力与正压力的关系曲线

Fig.4 Relation curves of adhesion force against normal load

3.4 卸载速度对粘附力的影响

分别采用0.5、1、1.5、2、2.5 mm/s的5种卸载速度进行蚯蚓头部舒张态试样和钢试样的粘附力试验,土壤含水率30%,正压力2 N,加载速度1 mm/s,保压时间10 s。其试验结果如图5所示。

由图5可知,蚯蚓体表试样和钢试样的粘附力都随卸载速度的增加呈线性趋势增加,且卸载速度越大,体表试样的减粘效果越显著。试验条件下,卸载速度为2.5 mm/s时,减粘最显著,减粘率为18%;卸载速度为0.5 mm/s时,减粘率为8%。

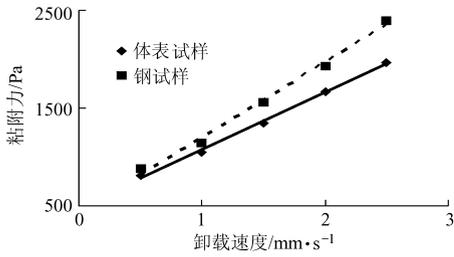


图5 粘附力与卸载速度的关系曲线

Fig.5 Relation curves of adhesion force against unloaded speed

4 土壤滑动阻力试验

4.1 滑动阻力试验结果

对不同体表试样以及钢试样进行滑动阻力试

表3 不同体表试样的土壤滑动阻力试验结果

Tab.3 Soil sliding resistance of surface specimens

试样	最小值/Pa	最大值/Pa	平均值/Pa	标准方差	样本方差	减阻率/%	
头部	舒张态	2 979.45	3 413.10	3 186.64	128.77	16 581.41	28
	静息态	2 828.04	3 113.71	2 991.03	72.95	5 322.08	32
	收缩态	2 477.20	2 942.45	2 677.61	167.11	27 925.15	39
体部	舒张态	3 405.01	3 912.41	3 670.54	181.73	33 026.99	17
	静息态	3 048.54	3 364.10	3 168.49	96.01	9 217.91	28
	收缩态	3 005.17	3 233.27	3 103.98	77.24	5 966.30	29
钢试样	4 217.43	4 697.39	4 396.57	140.35	19 699.33		

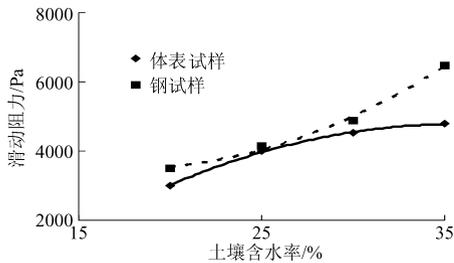


图6 滑动阻力与土壤含水率的关系曲线

Fig.6 Relation curves of sliding resistance against soil containing moisture

力随土壤含水率的增加呈抛物线趋势增加,且随含水率的增大,体表试样的减阻效果先减小后增加。在试验条件下,当含水率为25%时,减阻最小,为4%;当含水率为35%时,减阻最大,为26%。

4.3 正压力对滑动阻力的影响

分别采用0.5、1、1.5、2、2.5 N的5种正压力,在土壤含水率30%,滑移速度1 mm/s的条件下,进行蚯蚓体部舒张态试样和钢试样的滑动阻力试验。其试验结果如图7所示。

由图7可知,蚯蚓体表试样和钢试样的滑动阻力随正压力的增加呈线性趋势增加,且正压力越小,体表试样的减阻效果越显著。在试验条件下,当正压力为0.5 N时,减阻最大,为27%;当正压力为

2.5 N时,减阻24%。

验,正压力1 N,滑移速度1 mm/s,土壤含水率30%。试验结果如表3所示。
由表3可知,头部比体部减阻效果明显,且收缩态的减阻效果最明显,静息态次之,舒张态最差。在试验条件下,体部收缩态的土壤滑动阻力为钢试样的71%,头部收缩态的土壤滑动阻力为钢试样的61%。

4.2 土壤含水率对滑动阻力的影响

分别采用含水率为20%、25%、30%、35%的4种土壤,在正压力1 N,滑移速度1 mm/s的条件下进行蚯蚓体部舒张态试样和钢试样的滑动阻力试验。试验结果如图6所示。

由图6可知,蚯蚓体表试样和钢试样的滑动阻

力随正压力的增加呈线性趋势增加,且正压力越小,体表试样的减阻效果越显著。在试验条件下,当正压力为0.5 N时,减阻最大,为27%;当正压力为

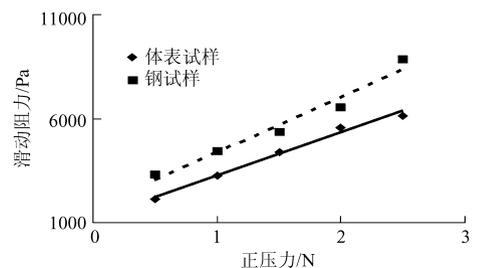


图7 滑动阻力与正压力的关系曲线

Fig.7 Relation curves of sliding resistance against normal load

4.4 滑移速度对滑动阻力的影响

分别采用0.5、1、1.5、2、2.5 mm/s的5种滑移速度,在土壤含水率30%,正压力1 N条件下,进行蚯蚓体部收缩态试样和钢试样的滑动阻力试验。试验结果如图8所示。

由图8可知,蚯蚓体表试样和钢试样的滑动阻力随滑移速度的增加呈线性趋势增加,且滑移速度越大,体表试样的减阻效果越显著。在试验条件下,当滑移速度为2.5 mm/s时,减阻最为显著,减阻达29%左右;当滑移速度为0.5 mm/s时,减阻12%左右。

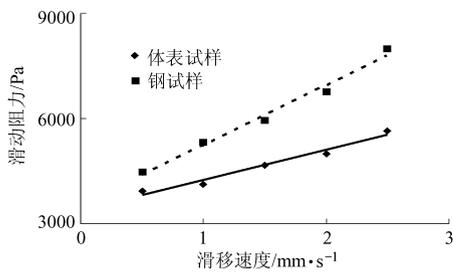


图8 滑动阻力与滑移速度的关系曲线

Fig. 8 Relation curves of sliding resistance against sliding speed

5 分析与讨论

由不同体表形态试样的土壤粘附力和滑动阻力试验结果可知,头部的减粘降阻效果要比体部明显,这与蚯蚓体表形貌及各部位的功能有较大关系。观察发现蚯蚓头部呈圆锥状,环节较宽较明显,纹理大而稀;体部呈圆柱状,环节较窄,纹理小而密。蚯蚓运动时,头部先入土,土壤粘附首先集中到头部,因此需要较大的减粘降阻功能,而体部主要是用于清除残留土壤,对减粘降阻需求相对较小。

由表2、3可知,蚯蚓体表试样的减粘降阻效果由大到小依次是:收缩态、静息态、舒张态。由图1可知收缩态、静息态、舒张态体表试样的非光滑单元体宽度依次增大,由此可见其单元体密度依次减小,棱纹的平展程度依次增加。收缩态试样的减粘降阻效果之所以最大,原因在于其非光滑表面易使体表和土壤之间存在空隙,形成无土区,且易集留空气,使体表和土壤表面间存在空气膜,较深的凹槽易于集存体表液,这些因素耦合作用,减小了摩擦因数,降低了大气负压对土壤的作用,改善了土壤的粘附

度,非光滑程度越高,越易形成复合界面,从而减小了粘附力。

蚯蚓体表试样的土壤法向粘附力和滑动阻力随形貌变化有所不同,但其基本的减粘降阻特性是一致的,因此采用不同体表试样测试试验因素对粘附力和滑动阻力的影响,能反映试样整体的减粘降阻特性。由各单因素试验可知,在试验范围内,土壤粘附力随土壤含水率、正压力以及卸载速度的增加而增加,且土壤含水率的影响最大,其减粘效果随含水率和正压力的增加而减小,随卸载速度的增加而增加;土壤滑动阻力随土壤含水率、正压力以及滑移速度的增加而增加,且土壤含水率的影响最大,其降阻效果随含水率的增加先减小后增加,随正压力的增加和滑移速度的减小而减小。

6 结论

(1) 蚯蚓非光滑体表具有减粘降阻功能,其体表试样的减粘降阻效果由大到小依次是:收缩态、静息态、舒张态。

(2) 蚯蚓头部试样减粘降阻效果比体部试样明显。

(3) 蚯蚓体表试样的土壤粘附力,随土壤含水率的增加呈抛物线趋势增加,随正压力和卸载速度的增加呈线性趋势增加。与钢试样相比,头部收缩态试样减粘75%,体部收缩态试样减粘56%。

(4) 蚯蚓体表试样的土壤滑动阻力,随土壤含水率的增加呈抛物线趋势增加,随正压力和滑移速度的增加呈线性趋势增加。与钢试样相比,头部收缩态试样降阻39%,体部收缩态试样降阻29%。

参 考 文 献

- Shelley T. Worms show way to efficiently move[J]. Eureka, 2004, 24(1): 28~29.
- Ren Luquan, Wang Yunpeng, Li Jianqiao, et al. Analysis of effect factors of soil adhesion to dump trucks[C]. Proc. of the 12th Intern. Conf. of the ISTVS, Beijing, 1996: 524~530.
- Ren Luquan, Cong Qian, Tong Jin, et al. Reducing adhesion of soil against loading soil using bionic electro-osmosis method [J]. J. Terramechanics, 2001, 38(4): 211~219.
- Ren Luquan, Tong Jin, Li Jianqiao, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review[J]. J. Agric. Eng. Res., 2001, 79(3): 239~263.
- 任露泉, 佟金, 李建桥, 等. 松软地面机械仿生理论与技术[J]. 农业机械学报, 2000, 31(1): 5~9.
Ren Luquan, Tong Jin, Li Jianqiao, et al. Biomimetics of machinery for soft terrain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1): 5~9. (in Chinese)
- 田丽梅, 任露泉, 韩志武, 等. 仿生非光滑表面脱附与减阻技术在工程上的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 138~142.
Tian Limei, Ren Luquan, Han Zhiwu, et al. Application of anti-adhesion and anti-resistance of biomimetic non-smooth surface in engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 138~142. (in Chinese)
- 施卫平, 任露泉. 波纹形非光滑推土板减粘降阻的简化力学模型[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 93~95, 103.

- Shi Weiping, Ren Luquan. Simplified dynamic model of adhesion and resistance reduction for the corrugated non-smooth bulldozing plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 93~95, 103. (in Chinese)
- 8 王云鹏,任露泉,杨晓东,等. 仿生柔性非光滑表面减粘降阻的试验研究[J]. 农业机械学报,1999,30(4):1~4.
Wang Yunpeng, Ren Luquan, Yang Xiaodong, et al. Experimental study on the adhesion-decreasing and resistance-reducing characteristics of bionic materials with flexible and unsmoothed surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(4): 1~4. (in Chinese)
- 9 许亚婷. 蚯蚓体表形貌及粘附特性研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
Xu Yating. Research on the surface feature of earthworm and its adhesion characteristic[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- 10 李建桥,刘国敏,邹猛,等. 蚯蚓非光滑体表试样的法向土壤粘附特性[J]. 中国农业科技导报,2007,9(6):95~99.
Li Jianqiao, Liu Guomin, Zou Meng, et al. Study on adhesion characteristics of earthworms' non-smooth surface[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2007, 9(6): 95~99. (in Chinese)
- 11 陈秉聪,任露泉,李安琪,等. 蚯蚓体表液收取方法的初步研究——地面机械减粘脱土仿生研究之一[J]. 农业工程学报,1990,6(2):7~12.
Chen Bingcong, Ren Luquan, Li Anqi, et al. Study on the method of collecting the body surface liquid of earthworms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1990, 6(2): 7~12. (in Chinese)
- 12 Zu Y Q, Yan Y Y. Numerical simulation of electroosmotic flow near earthworm surface[J]. Journal of Bionic Engineering, 2006, 3(4): 179~186.
- 13 杨志强. 三套微小土壤粘附力测试系统的研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
Yang Zhiqiang. Study on three set of test systems for tiny soil adhesion[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
-

(上接第 137 页)

参 考 文 献

- 1 Erwie Zahara, Shu-Kai S Fan, Du-Ming Tsai. Optimal multi-thresholding using a hybrid optimization approach[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(8): 1 082~1 095.
- 2 高尚,杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006: 6~9.
- 3 Shun-Fa Hwang, Rong-Song He. Improving real-parameter genetic algorithm with simulated annealing for engineering problems[J]. Advances in Engineering Software, 2006, 37(6): 406~418.
- 4 Ghoshal S P. Optimizations of PID gains by particle swarm optimizations in fuzzy based automatic generation control[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 72(3): 203~212.
- 5 Mitsuo Gen, YoungSu Yun. Soft computing approach for reliability optimization: state-of-the-art survey[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(9): 1 008~1 026.
- 6 周廷美,蓝悦明. 机械零件与系统优化设计建模及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005:133~135.