

# 复合肥取样机器人仿生设计\*

唐启敬 赵铁石 边辉 耿明超

(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

**【摘要】** 针对复合肥生产的高粉尘强腐蚀环境,设计了一种能够替代人工作业的取样机器人。分析使用需求,提出具有抗冲击、耐腐蚀、自清洁、传动机构内置、驱动远离末端执行件安装等特征的取样机器人设计原则。从仿生学角度出发,通过对螃蟹运动关节结构特征研究,提出取样机器人构型,进行了功能仿生和结构仿生设计。根据其使用工况,设计了取样机器人运动过程和控制方案。通过机构参数优化、仿真和冲击试验,验证了其可行性。

**关键词:** 取样机器人 螃蟹 仿生 复合肥

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0219-05

## Bionic Design of Fertilizer Sampling Robot

Tang Qijing Zhao Tieshi Bian Hui Geng Mingchao

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

### Abstract

In order to release the fertilizer production workers working in high dust and strong corrosive environment for a long time, a sampling robot was designed. By analyzing the using demand, robot's designing principles including characteristics of impact resistance, corrosion resistance, cleaning by itself, transmission mechanism built-in and drive away from the end piece installed was proposed. From the angle of bionics, the crab joints' structure characteristic was researched. Then sampling robot configuration was proposed. Bionics function and structure was designed. According to its operation condition, motion process and control plan was designed. After the parametric optimization, its feasibility was validated by simulation and impact test.

**Key words** Sampling robot, Crab, Bionic, Fertilizer

### 引言

在农业复合肥生产行业中,生产现场粉尘含量高、腐蚀性强,技术人员必须佩戴防毒面具,在生产现场通过手工取样、目测和根据经验数据调控复合肥生产工艺参数。这种方法不仅劳动环境恶劣,对生产技术人员的身心危害大,而且因受采集样品的局限致使检测分析精度低,因此迫切需要研制一种能够代替技术人员在现场取样的机器人。

仿生学应用在机器人和机构设计中解决了很多难题<sup>[1-13]</sup>。本文从仿生学角度出发,设计具有抗冲击、传动机构内置、驱动器远离末端执行件安装等特

点的取样机器人,优化其结构并进行仿真分析和冲击试验。

### 1 需求分析

取样机器人是在复合肥生产车间现有设备基础上设计的,故应结合工业现场环境,并与现有设备衔接,其中机器人本体结构设计尤为重要。复合肥在直径为4 m的造粒机滚筒中滚动,在3 m高处下落形成复合肥料幕。生产技术人员需在高温、高噪声、高粉尘、强腐蚀和有毒气体弥漫的车间中,用铁锹从料幕中取出高速下落的物料作为检测样品。其工作重复程度较高,且环境恶劣、危险性大。由于环境中

收稿日期: 2010-11-16 修回日期: 2010-12-31

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA04Z205)

作者简介: 唐启敬,博士生,主要从事机器人技术研究,E-mail: qjtang@ysu.edu.cn

通讯作者: 赵铁石,教授,博士生导师,主要从事机器人技术研究,E-mail: tszhao@ysu.edu.cn

弥漫粉尘、腐蚀性强、工作冲击大,普通工业机器人在使用过程中易结疤、寿命短,不适用于该环境。到目前为止,没有相应的取样机器人能代替现场技术人员的工作。

样品检测的过程如图1所示。取样机器人的任务是在高速运动的料幕中取出部分作为样品,然后在指定位置卸料。

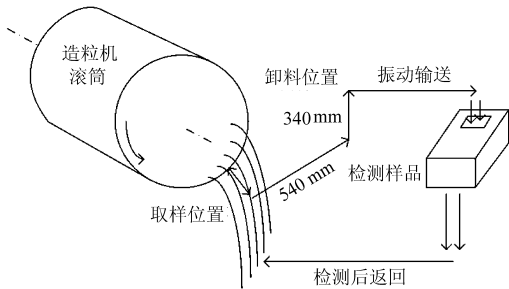


图1 取样检测过程分析

Fig.1 Sampling testing process analysis

根据现场设备已有布置,取样机器人所允许占用的空间大小约为  $750\text{ mm} \times 650\text{ mm} \times 550\text{ mm}$ 。取样过程中机器人不能与造粒机滚筒接触。为保证所取样品具有代表性,取样位置须在料幕中间。当造粒机造粒效果不好时,可能出现直径为  $500\text{ mm}$  的复合肥大球,对取样机器人产生完全破坏性的冲击,为了减小高速运动的物料和复合肥大球对取样机器人的冲击,取样位置应尽量靠上。造粒机出口处复合肥温度在  $30 \sim 90^\circ\text{C}$  之间,且复合肥颗粒中混有一定量的磷酸、盐酸、硝酸、硫酸、硫酸钙等强腐蚀、易粘连结巴的化学物质。这就要求取样机器人的各部分运动关节应密封。

通过现场分析,取样机器人应具有以下基本功能:能在狭窄的空间中运动且不触碰到造粒机滚筒;取样行程水平方向至少能达到  $540\text{ mm}$ , 垂直方向至少能达到  $340\text{ mm}$ ;在取料机器人与复合肥样品接触的表面及运动关节可防尘、防粘、抗腐蚀;传动机构和运动关节可密封;驱动稳定可靠,可长时间连续运行;外表面坚硬,能够抵抗复合肥大物料的冲击。

## 2 螃蟹生理结构及关节特点

螃蟹能在各种复杂环境中自如行走,近年来得到许多学者关注<sup>[14]</sup>。生物学家们也对螃蟹的结构特征作了详细的研究,为螃蟹的仿生研究提供了基础。螃蟹能在水中和沙土中生存、运动,基于其生理结构提出的面向高粉尘强腐蚀环境的取样机器人是一种仿生机器人。

螃蟹属甲壳纲,第1对胸足末端呈钳状,称为螯足。第2~5对胸足统称为步足。步足由底节、基节、座节、长节、腕节、掌节、指节共7节构成,如图2

所示。每两节之间有柔软表皮连接,使关节之间运动自如,当螃蟹从沙土中钻出来时其关节中的沙粒也能随着柔软表皮蠕动自动掉落。其坚硬的外壳和螯足使之能在残酷的竞争中抵御外界的冲击、海水的腐蚀,其螯足的驱动也分布在坚硬的外壳内部,并集中于底节附近,形成良好的保护作用。

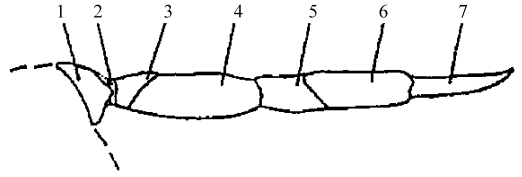


图2 步足结构

Fig.2 Structure of periochods

1. 底节 2. 基节 3. 座节 4. 长节 5. 腕节 6. 掌节 7. 指节

螃蟹螯足和步足关节结构都可以简化成转动副,其驱动都分布在坚硬的外壳内部,由接近底节部分控制末端指节运动。

螃蟹的5条胸足有自切功能,再生能力特别强。在其胸足里面,有天生的“折断线”。每当遇到危险,螃蟹便会立刻收缩体内一种特别的肌肉,断掉这个肢体,达到保护生命的目的,而且自切仅出现在预定脱离节的特定部位。螃蟹的这种自切和再生的特点也可以用在取样机器人中。当取样机器人的机械臂遭受大物块冲击时,机械臂自动折断,保护取样机器人的本体结构,不至于受到破坏性的冲击。

通过对螃蟹生理结构的分析与研究,抽象出其核心特征为:具有坚硬外壳;传动布置于坚硬外壳内部;驱动远离末端,分布在底节附近;关节之间有柔软表皮连接;关节具有柔性,能够自行折断。这些生理特点为面向高粉尘强腐蚀环境的新型仿生机器人机构设计提供了理论依据。

## 3 取样机器人仿生设计

基于螃蟹生理结构基础,提出取样机器人设计的基本原则:①运动副尽量使用转动副而不使用移动副。②传动机构内置。③驱动远离末端执行件安装。④具有自清洁功能。

### 3.1 取样机构设计

取样机器人设计为2自由度,结构本体由双四杆机构组成,具有1个自由度,实现取样动作,如图3所示,其驱动方式为减速电动机带动,虽然传动速度低,但是传递力和力矩较大,且工作稳定可靠。 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8$  是双四杆机构的杆长,  $\alpha$  是  $l_3$ 、 $l_6$  之间的夹角,  $\beta$  是  $l_2$  与水平方向的夹角,  $l_9, H$  是驱动电动机与铰链点A的水平方向和垂直方向距离。双四杆机构末端安装叶片式摆动气缸,也具有1个

自由度,如图 4 所示。当取样机器人机械手臂运行至卸料位置时摆动气缸动作,实现卸料动作。

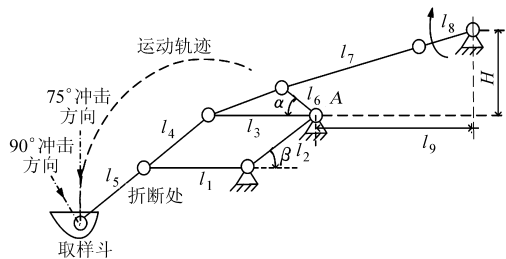


图 3 取样机器人结构原理图

Fig. 3 Mechanism diagram of sampling robot

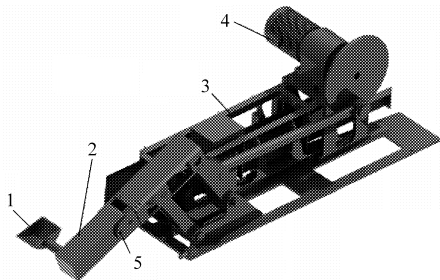


图 4 取样机器人实体

Fig. 4 Model of sampling robot

- 1. 取样斗 2. 机械臂 3. 振动输送槽 4. 电动机 5. 尼龙轴

### 3.2 内驱动仿生结构设计

摆动气缸中的 0.6 MPa 压缩空气气管,沿着机器人手臂内部延伸至外部,连接纯净干燥压缩空气气源,能保护摆动气缸不受粉尘堵塞和气体腐蚀,保证长时间正常运行,具有驱动内置的特点。在转动副关节处为避免控制气路气管反复弯曲变形、老化、断裂、漏气现象,采用旋转密封处理,如图 5

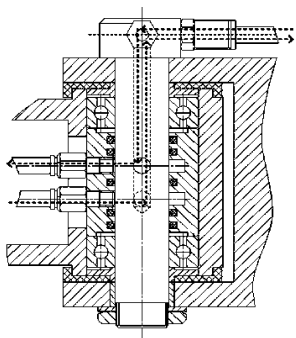


图 5 旋转密封结构

Fig. 5 Rotating seal structure

所示,气路布置在转动轴中就像螃蟹的驱动布置在坚硬的外壳内部一样,能防腐、密封,保证控制气路稳定可靠运行。实际使用的旋转密封主要元件如图 6 所示。

### 3.3 自保护仿生结构设计

取样机器人机械臂为仿螃蟹自切功能结构,其中尼龙轴为机械臂的“切断线”。仿生机械臂安装在取样机器人上,当取料机器人正常工作时,尼龙轴承受剪切力,不会被剪断。当遇到大块物料冲击取料机器人时,机械臂的尼龙轴被剪断,转轴处发生转动,从而保护取样机器人的电动机、关节中的轴承以及其他零部件不被损坏。取样机器人手臂需要恢复

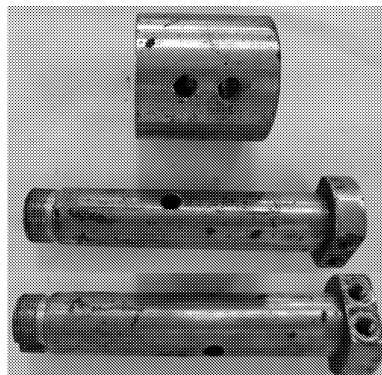


图 6 旋转密封主要元件

Fig. 6 Main components of rotating seal

正常时,只需更换尼龙轴即可。

尼龙轴材料的抗剪切应力强度 40 MPa,设计直径 12 mm,最大能承受 21 kg 的物料从距离机械手臂 1.5 m 高处自由下落造成的冲击<sup>[14]</sup>。

### 3.4 自清洁仿生结构设计

机器人取样周期最大能达到 24 次/min,但一般工作状态为 7~9 次/min。取样机器人实物如图 7 所示。在机械臂伸出与缩回的关节处安装软连接,模仿螃蟹两关节间连接的结构,有效防止尘土和关节处的结疤现象,随着软连接的蠕动,粉尘结疤自动掉落,具有自清洁的特点,如图 8 所示,左图是机器人未安装关节软连接的状态,右图是安装关节软连接后现场使用的状态。

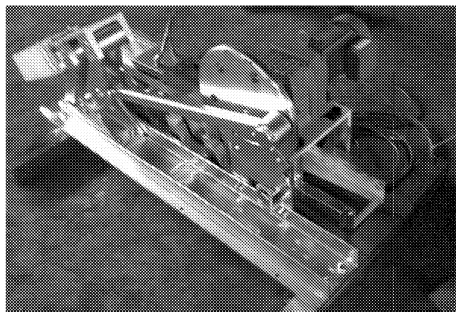


图 7 取样机器人实物图

Fig. 7 Sampling robot

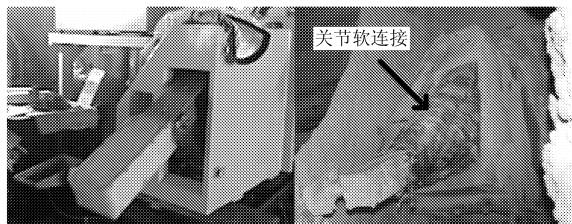


图 8 取样机器人关节软连接

Fig. 8 Soft links of sampling robot joints

## 4 机器人运动过程规划及仿真

### 4.1 机器人运动控制规划

图 9 为一个动作周期内取样机器人机械手臂速

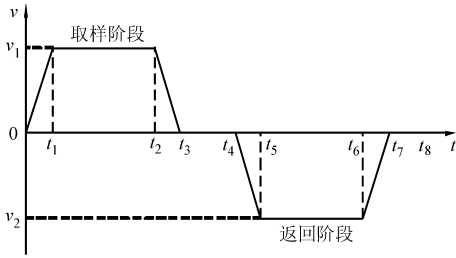


图9 取样机器人速度与时间关系曲线  
Fig.9 Relationship between manipulator's speed and time

度与时间关系曲线。

当发生突发事件时,机械手复位至初始位置,此种情况要根据机械手的位置判断驱动电动机的旋转方向及旋转角度。如图9所示,当机械手处于 $0 \sim t_4$ 阶段、发生复位信号,机械手不再伸出,而是反方向缩回;当机械手处于 $t_4 \sim t_8$ 阶段、发生复位信号,机械手继续运动至初始位置。

料幕中可能出现对机械手形成重大冲击的大块物料,对于直径大于80 mm物料,将其视为危险颗粒,考虑到现场环境,当检测到前方有障碍物、有可能对机器人造成损坏时,机器人停止工作回到设定的初始位置等待,直到下一个启动指令到来。运动控制流程图如图10所示。

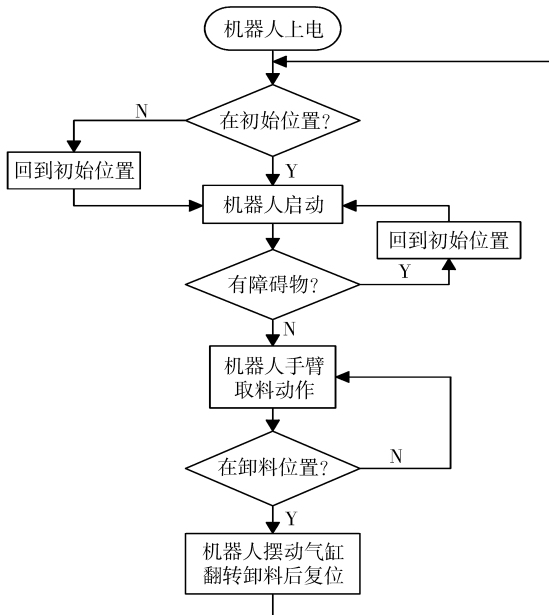


图10 机器人运动控制流程图

Fig.10 Flow chart of motion control process

### 4.2 机器人取样运动仿真分析

根据现场设备布置情况,设计了几组结构参数进行对比,以优化取样机器人机构,优化后的结构尺寸为: $l_1 = l_3 = 370 \text{ mm}$ ,  $l_2 = l_4 = 200 \text{ mm}$ ,  $l_5 = 400 \text{ mm}$ ,  $l_6 = 150 \text{ mm}$ ,  $l_7 = 766 \text{ mm}$ ,  $l_8 = 130 \text{ mm}$ ,  $l_9 = 728 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 25^\circ$ ,  $\beta = 17^\circ$ ,  $H = 330 \text{ mm}$ , 机器人取料过程运动

轨迹如图11、12所示,机器人取料运动过程为一段弧线,取样点至卸料点,行程550 mm,提升高度为358.9 mm。行程范围能满足机器人使用要求。

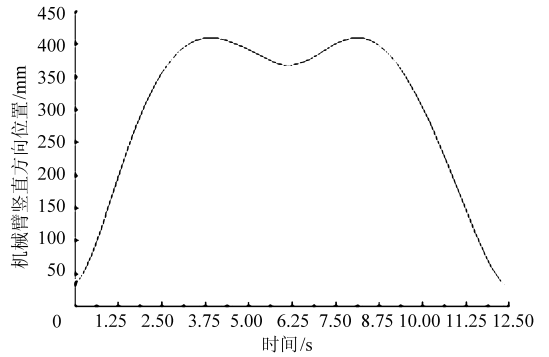


图11 机械臂竖直方向位置-时间曲线

Fig.11 Arm's vertical position vs time curve

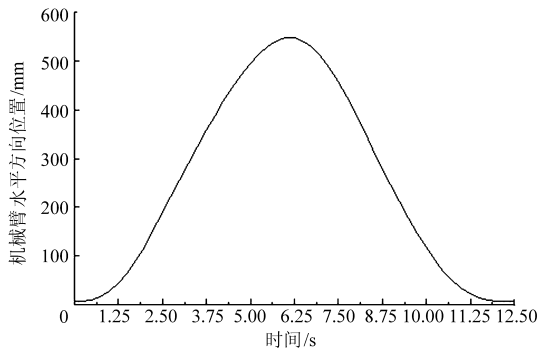


图12 机械臂水平方向位置-时间曲线

Fig.12 Arm's horizontal position vs time curve

$l_1$ 与 $l_2$ 之间转动关节的转动角速度如图13所示,角加速度如图14所示。最大角速度为 $28^\circ/\text{s}$ ,转动角加速度最大为 $26^\circ/\text{s}^2$ ;角速度和角加速度都不大,可以采用回转密封的方式。

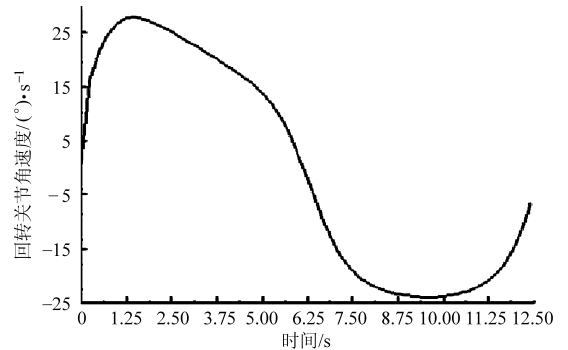


图13 回转密封角速度曲线

Fig.13 Rotary sealing's velocity curve

### 5 冲击试验

取样机器人能否抵抗大物料的冲击是机器人能否连续运行的关键,所以在取样机器人现场安装后进行冲击试验。造粒过程中复合肥大物料可能从距离机械手臂0.5~1.5 m高处以一定初速度下落,冲击方向与机械手臂夹角在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

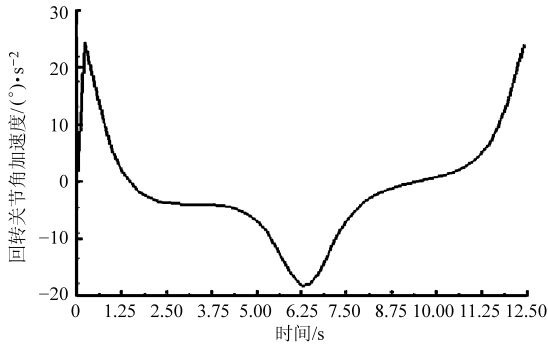


图 14 回转密封角加速度曲线

Fig. 14 Rotary sealing angle's acceleration curve

试验在复合肥停止生产后进行,试验采用复合肥造粒情况不好时产生的不同质量的结疤大物料作为冲击物体,从两个不同角度(如图 3 所示,冲击角度为冲击方向与机械手臂的夹角)和 3 个不同高度对取样机器人机械手臂进行冲击试验,记录尼龙轴被剪断时的物块的下落高度和质量,如表 1 所示。

由试验结果可知,冲击试验中使尼龙轴剪断的物料质量实际值较理论计算值小。误差范围在 2.10% ~ 3.71% 之间,基本符合设计要求。造成误差的原因是:①冲击试验的大物料质量不能随意调整,只能选择与理论计算质量相近的物料进行试验。②90°方向的冲击试验物料的初速度不为零。③大

表 1 冲击试验结果

Tab. 1 Impact test results

下落高度 /m	冲击速度 /m·s <sup>-1</sup>	冲击角度 75°			冲击角度 90°		
		实际质量/kg	理论质量/kg	误差 /%	实际质量/kg	理论质量/kg	误差 /%
0.5	3.1	39.40	40.35	2.35	35.40	36.57	3.20
1.0	4.4	27.90	28.53	2.20	24.90	25.86	3.71
1.5	5.4	22.80	23.29	2.10	20.50	21.11	2.89

物料冲击机械手臂的位置不同以及物料与机械手臂接触时的接触面积不一样,导致冲击力接触时间不同,而理论计算时选择的冲击力接触时间是相同的。

## 6 结论

(1) 基于螃蟹胸足的生理特征,提出了面向高粉尘强腐蚀环境取样机器人的设计原则。

(2) 根据设计原则,提出合理取样机器人机构方案,并设计了关节回转密封、关节自清洁、具有自切功能的机械臂等仿生结构。

(3) 通过结构优化、仿真分析、冲击试验,完成仿生取样机器人设计。经调试和试运行,已投入使用。结果表明该仿生机器人结构设计合理可靠。

## 参 考 文 献

- 周俊,刘锐,张高阳. 基于立体视觉的水果采摘机器人系统设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):158~162.  
Zhou Jun, Liu Rui, Zhang Gaoyang. Design of fruit harvesting robot based on stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6):158~162. (in Chinese)
- 杨庆华,王燕,高峰,等. 基于摆线运动的黄瓜采摘机器人终端滑模轨迹跟踪控制[J]. 农业工程学报,2009,25(5):94~98.  
Yang Qinghua, Wang Yan, Gao Feng, et al. Trajectory tracking with terminal sliding mode control of cucumber picking robot manipulator based on cycloidal motion [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 94~98. (in Chinese)
- 张铭,葛文杰,柏龙,等. 星面探测仿生弹跳机器人设计、仿真及实验[J]. 机器人,2009,31(6):481~486.  
Zhang Ming, Ge Wenjie, Bai Long, et al. Design, simulation and experiment of a bionic hopper for planet exploration[J]. Robot, 2009, 31(6): 481~486. (in Chinese)
- 王田苗,孟德,裴葆青,等. 仿壁虎机器人研究综述[J]. 机器人,2007,29(3):290~296.  
Wang Tianmiao, Meng Cai, Pei Baoqing, et al. Summary on gecko robot research [J]. Robot, 2007, 29(3): 290~296. (in Chinese)
- Xu Haijun, Pan Cunyun, Xie Haibin. Dynamics modeling and simulation of a bionic swim bladder system in underwater robotics[J]. Journal of Bionic Engineering, 2008(Supp. 1): 66~71.
- Zhao Tieshi, Zhao Yongsheng, Huang Zhen. Study on adaptability of a sea crab and its bionics mechanism model[J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(8):1 271~1 280.
- 何龙飞,孙友宏,高科,等. 仿生非光滑螺旋钻头的设计及试验型[J]. 吉林大学学报,2009,39(2):300~304.  
He Longfei, Sun Youhong, Gao Ke, et al. Experiments and design of bionic non-smooth spiral bit[J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(2):300~304. (in Chinese)
- Gao Ke, Sun Youhong, Gao Runfeng. Application and prospect of bionic non-smooth theory in drilling engineering[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 519~522, 540.

## 参 考 文 献

- 1 Ebenstein D M, Pruitt L A. Nanoindentation of biological materials[J]. *Nanotoday*, 2006,1(3):26~33.
- 2 Wang X J, Chen X B, Hodgson P D, et al. Elastic modulus and hardness of cortical and trabecular bovine bone measured by nanoindentation[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006; s744~s748.
- 3 Pelled G, Tai K, Sheyn D, et al. Structural and nanoindentation studies of stem cell-based tissue-engineered bone[J]. *Journal of Biomechanics*, 2007, 40(2):399~411.
- 4 Song Fan, Xiao Kewei, Bai Yilong. Microstructure and nanomechanical properties of the wing membrane of dragonfly[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 457(1~2): 254~260.
- 5 Tong Jin, Zhao Yanru, Sun Jiyu, et al. Nanomechanical properties of the stigma of dragonfly *Anax parthenope julius* Brauer [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(8): 2 894~2 898.
- 6 佟金,高吭,孙霁宇. 东方螞蛄前足爪趾结构与表皮纳米力学性能[J]. *农业机械学报*,2009,40(5):190~193.  
Tong Jin, Gao Hang, Sun Jiyu. Microstructure and nanoindentation properties of foreleg's tarsal claw of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister) [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(5): 190~193. (in Chinese)
- 7 Lonroth N, Muhlstein C L, Pantano C, et al. Nanoindentation of glass wool fibers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(32): 3 887~3 895.
- 8 Sun Jiyu, Tong Jin, Zhou Jiang. Application of nano-indenter for investigation of the properties of the elytra cuticle of the dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky) [J]. *IEEE Proceedings Nanobiotechnology*, 2006, 153(5): 129~133.
- 9 Tong Jin, Sun Jiyu, Chen Donghui, et al. Factors impacting nanoindentation testing results of the cuticle of dung beetle *Copris ochus* Motschulsky [J]. *Journal of Bionics Engineering*, 2004, 1(4): 221~230.
- 10 Sun Jiyu, Guo Yingjie, Tong Jin. Testing methods for nanoindentation property of the cuticle of bovine hoof wall and dung beetle's foreleg femur [J]. *Journal of Terramechanics*, 2006, 43(3): 355~364.
- 11 高吭. 东方螞蛄特征、功能、力学及其仿生分析 [D]. 长春: 吉林大学,2009.  
Gao Hang. Characteristic, function, mechanics and bionic analysis of oriental mole cricket *Gryllotalpa orientalis* Burmeister [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 12 孙霁宇. 臭蛴螂表皮纳米力学测试方法和纳米力学行为 [D]. 长春: 吉林大学,2005.  
Sun Jiyu. Analyzing methods for nanoindentation and nanomechanical properties of the cuticle of dung beetle *Copris ochus* Motschulsky [D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)

(上接第 223 页)

- 9 Tian Limei, Ren Luquan, Liu Qingping, et al. The mechanism of drag reduction around bodies of revolution using bionic non-smooth surfaces [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2007,4(2): 109~116.
- 10 陈柏,陈算,蒋素荣,等. 仿生介入机器人的运动性能[J]. *机器人*,2010,32(3):414~418.  
Chen Bai, Chen Sun, Jiang Surong, et al. Motion performances of a bionic interventional micro robot [J]. *Robot*, 2010, 32(3): 414~418. (in Chinese)
- 11 颜兵兵,任福君. 拱泥机器人仿生机构方案设计[J]. *机械科学与技术*,2008,28(5):674~681.  
Yan Bingbing, Ren Fujun. Design of the bionic mechanism of a move in mud robot [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2008, 28(5): 674~681. (in Chinese)
- 12 任福君,颜兵兵. 拱泥机器人运动特性分析与仿真[J]. *机械工程学报*,2008,44(1):62~66.  
Ren Fujun, Yan Bingbing. Motion characteristics analysis and simulation of move-in-mud robot [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(1): 62~66. (in Chinese)
- 13 张秀丽,郑浩峻,陈恳,等. 机器人仿生学研究综述[J]. *机器人*,2002,24(2):188~192.  
Zhang Xiuli, Zheng Haojun, Chen Ken, et al. Research on robotic bionics [J]. *Robot*, 2002, 24(2): 188~192. (in Chinese)
- 14 赵铁石. 灵活轻便仿生步行机构学研究 [D]. 秦皇岛:燕山大学,1992.  
Zhao Tieshi. Mechanism research for flexible and light bionic walking machine [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 1992. (in Chinese)
- 15 叶四桥,陈洪凯,唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究[J]. *水文地质工程地质*,2010,37(2):59~63.  
Ye Siqiao, Chen Hongkai, Tang Hongmei. Comparative research on impact force calculation methods for rockfalls [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 59~63. (in Chinese)