

基于并联机构的多维振动筛分试验台设计*

王成军¹ 李耀明¹ 马履中²

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013;
2. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 为解决传统振动筛分装置不能实现多维振动的问题,设计了基于并联机构的多维振动筛分试验台,试验台以全解耦型多维主体激振机构为核心,采用大功率直线电动机为直线往复振动的动力源,传动链短,机械结构和运动参数的调整简单便捷,可获得多个工况下物料颗粒的筛分性能指标以及物料在筛面上的运动规律。试验台以计算机和 PMAC 控制卡作为硬件控制系统的核心,测控软件系统可以对试验过程中工作部件的振幅、速度、频率、扭矩和功率等参数进行实时采集、显示、处理与分析,为多维振动筛分设备的设计提供了依据。

关键词: 并联机构 混联 多维振动 筛分 试验台 设计

中图分类号: TH237⁺.6; S226.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0070-05

Design of Multi-dimensional Vibration Screening Test Bench
Based on Parallel Mechanism

Wang Chengjun¹ Li Yaoming¹ Ma Lüzhong²

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province,
Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Multi-dimensional vibration screening test bench based on the theory of parallel mechanism was designed to solve the problem that multi-dimensional vibration could not be attained by traditional vibration screening device. This multi-dimensional vibration screening test bench took fully decoupled multi-dimensional main exciting mechanism as center, and adopted high-power linear motor as linear reciprocating vibration power source. It had the characteristics of shorter driving chain and convenient adjustment of mechanical structure and motion parameters to obtain material pellets vibration performance under several conditions and motion law of material on the screen. The test bench used computer and PMAC control card as the core of hardware control system. Measurement and control software system could collect real-timely, display, process and analyze the amplitude, velocity, frequency, torque and power to provide the design basis of multi-dimensional vibration equipment.

Key words Parallel mechanism, Hybrid, Multi-dimensional vibration, Screening, Test bench, Design

引言

振动筛是物料颗粒分级、分选的重要设备。物

料颗粒在筛面上的运动分析是研究振动筛筛分性能的基础,筛面上物料的运动状态直接影响着筛分机的筛分效率和处理能力,通过研究筛面上物料的运动

收稿日期: 2011-06-15 修回日期: 2011-08-08
* 国家自然科学基金资助项目(50875113)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA01402)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财政(2011)8 号)和江苏省农业装备与智能化高技术研究重点实验室资助项目(BM2009703)
作者简介: 王成军,博士生,主要从事并联机构及多维振动筛分技术研究,E-mail: cumt1279@163.com
通讯作者: 李耀明,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械设计及理论研究,E-mail: ymli@ujs.edu.cn

动规律,得以认识物料在筛面上的运动机理,寻找筛分机的最佳运动学参数(振幅、转速、筛面倾角、振动方向角),从而达到提高筛分效率、降低能耗、延长筛分机和筛面使用寿命的目的^[1]。传统的直线振动筛分装置难以使物料颗粒在筛面上快速均布,影响了筛分效果和效率。鉴于此,有学者提出将并联机构应用于振动筛分装置的设计中^[2-3],以解决传统振动筛振动自由度少、颗粒易于堵孔和圆振动筛容易引起共振、使用寿命短和筛分性能不稳定等缺陷。

本文在文献[4]基础上提出一种基于完全解耦的并联机构 3-PRRR 的多维振动筛分试验台,以混联机构 3-PRRR-R^(4R) 作为试验台的主体激振机构,可实现最多 4 个自由度的振动,用于物料颗粒多自由度振动筛分试验和振动筛样机设计,以解决现有振动筛分设备不能实现多维振动筛分等问题。

1 机械系统

1.1 机械系统整体结构及主要参数

多维振动筛分试验台最多可提供沿 X、Y、Z 方向的移动和绕 Z 轴的转动共 4 个自由度的振动,既可单独实现某个自由度的振动筛分试验,也可任意组合进行振动筛分试验。多维振动筛分试验台主要由控制系统、水冷却系统和机械系统 3 部分组成(图 1),其机械系统整体结构如图 2 所示,相关参数如表 1 所示。

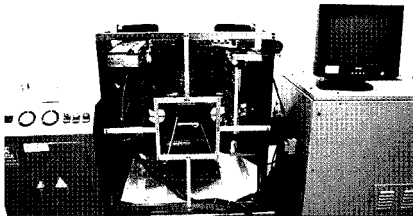


图 1 多维振动筛分试验台系统

Fig.1 Multi-dimensional vibration screening test bench system

1.2 主体激振机构的设计与运动特性

1.2.1 主体激振机构设计与构造

主体激振机构是多维振动筛分试验台机械系统的核心,主体激振机构的运动性能直接决定筛子的运动性能,进而影响物料筛分的效率和性能。多维振动筛分试验台的主体激振机构采用 3-PRRR-R^(4R) 混联结构形式,其中 3-PRRR 结构为完全解耦的 3 平移并联机构。文献[5~6]对 3 平移并联机构进行了系统综合。

本文所涉及的 3 平移并联机构是以 SOC{-P||R||R||R} 为支路结构(图 3, P 表示移动副, R 表

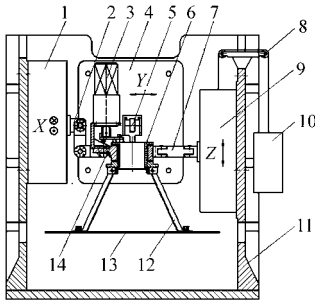


图 2 多维振动筛分试验台机械系统整体结构示意图

Fig.2 Integral structural diagram of multi-dimensional vibration screening test bench mechanical system

1. X 向直线电动机 2. X 支链 3. 旋转电动机及减速器 4. Y 向直线电动机 5. Y 支链 6. 回转支撑装置 7. Z 支链 8. 配重支撑装置 9. Z 向直线电动机 10. 配重块 11. 机架 12. 连杆 13. 筛网 14. 回转机构

表 1 多维振动筛分试验台主要参数

Tab.1 Main parameters of multi-dimensional vibration screening test bench

参数	数值	备注
振动自由度/个	1~4	可任意组合
X 向最大往复振动频率/Hz	7	无极可调
Y 向最大往复振动频率/Hz	7	无极可调
Z 向最大往复振动频率/Hz	7	无极可调
绕 Z 向最大往复旋振频率/Hz	7	无极可调
X 向最大振幅/mm	35	无极可调
Y 向最大振幅/mm	35	无极可调
Z 向最大振幅/mm	30	无极可调
绕 Z 轴旋振最大幅度/(°)	20	可调
筛面长度/mm	600	
筛面宽度/mm	300	
安装角度/(°)	0~10	可调
重复精度/mm	0.1	
筛面最大负载/kg	15	

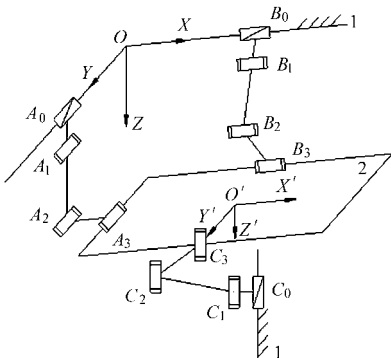


图 3 3-PRRR 并联机构

Fig.3 3-PRRR parallel mechanism

示转动副, || 表示平行)。并联机构的运动情况取决于各相邻运动副的轴

线配置方式,图 3 中每条支链中 3 个转动副的轴线相互平行,且与移动副的轴线平行, X 向支链和 Y 向支链的移动副轴线相互垂直, Z 向支链的运动副轴线垂直于 X 、 Y 支链运动副轴线所在平面。且有 $l_{A_0A_1} = l_{B_0B_1} = l_{C_0C_1} = a, l_{A_1A_2} = l_{B_1B_2} = l_{C_1C_2} = b, l_{A_2A_3} = l_{B_2B_3} = l_{C_2C_3} = c$,设筛面沿 X 向长度为 $2d$,沿 Y 向宽度为 $2e$ 。在初始位置 $A_1A_2 \perp A_2A_3, B_1B_2 \perp B_2B_3, C_1C_2 \perp C_2C_3$,点 C_3 在点 A_3 和点 B_3 的垂直平分线上,符号 $\perp$ 表示垂直。

1.2.2 主体激振机构的运动特性

空间机构自由度计算公式为

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_j = 4 \times 3 - (5 + 4) = 3 \quad (1)$$

式中 m ——运动副数

v ——基本回路(独立回路)数

f_i ——第 i 个运动副的自由度

ξ_j ——第 j 个基本回路的独立位移方程数

$F = 3$,即此并联机构的自由度为 3,该机构需要 3 个主动副。 $PA_0、PB_0、PC_0$ 不共面、不平行,故可将 3 个移动副作为主动副。

并联机构每个支链的自由度均为 4,其运动输出矩阵为 3 平移 1 转动,对 3 个支链的运动输出矩阵求交集,即可得动平台的运动输出矩阵为

$$\begin{bmatrix} x & y & z \\ & \beta & \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} x & y & z \\ & \alpha & \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} x & y & z \\ & \gamma & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)表明 3-PRRR 并联机构仅有三维纯平移量输出而无转动量输出,并联机构的动平台能实现 $x、y、z$ 方向的移动,是 3 自由度 3 平移的并联机构。

建立如图 3 所示的坐标系 $OXYZ$,已知结构参数 $a、b、c、d、e$,动平台位置参数 $x、y、z$,求解位移参数 $S_x、S_y、S_z$ 。根据机构的运动情况可得逆运动学方程

$$\begin{cases} S_x = x - (d + c) \\ S_y = y - (e + c) \\ S_z = z - (a + b) \end{cases} \quad (3)$$

从而,有速度 v 和加速度 a 的对应关系

$$\begin{cases} v_x = v_{O'x} \\ v_y = v_{O'y} \\ v_z = v_{O'z} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_x = a_{O'x} \\ a_y = a_{O'y} \\ a_z = a_{O'z} \end{cases} \quad (5)$$

由式(3)可得到机构的正运动学方程

$$\begin{cases} x = S_x + d + c \\ y = S_y + e + c \\ z = S_z + a + b \end{cases} \quad (6)$$

由并联机构理论可知,根据所建立的并联机构运动学方程便可确定振动筛的运动输入和输出之间的对应关系,进而可根据筛分需求确定各电动机的参数,为筛分试验提供准确的数据。当已知主动副的输入量时,很容易求出动平台的位置 $x、y、z$ 。且由式(6)可知,动平台(筛面)的位置参数和主动副的输入参数之间存在线性关系,动平台的速度、加速度参数与主动副的输入速度、加速度参数之间存在相等关系,故主体激振机构的并联机构部分是完全解耦的,这为振动台的参数计算和控制带来极大的方便。

1.3 回转支撑装置

多维振动筛分试验台的回转支撑装置主要用于连接并联机构与筛体,构成一个转动副。回转支撑装置的结构如图 4 所示,主要由上圆盘、下圆盘、空心轴、滚针轴承、复合轴承、1/3 圆环挡圈和锁紧螺钉组成。上圆盘与并联机构的 3 个支链相连接;下圆盘上有 4 个耳座,通过连杆与筛网相连;上圆盘与下圆盘之间以及上圆盘与空心轴之间通过滚针轴承和复合轴承支撑,以减少摩擦;空心轴的上端与回转机构相连接,下端与下圆盘通过 1/3 圆环挡圈限位并由锁紧螺钉固定,实现筛体绕 Z 轴的往复回转振动。

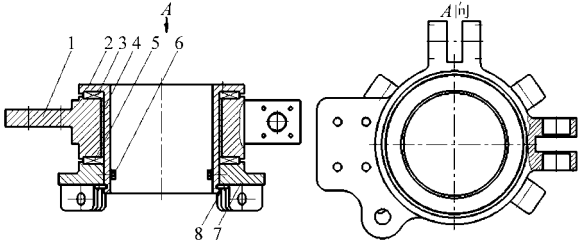


图 4 回转支撑装置结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of rotary support device

1. 上圆盘 2. 空心轴 3、5. 滚针轴承 4. 复合轴承 6. 锁紧螺钉 7. 下圆盘 8. 1/3 圆环挡圈

1.4 Z 向配重支撑装置

试验台的 Z 向直线往复振动,由于受力不平衡,需设计配重,以满足较高频率振动的需要^[7]。配重支撑装置包括定滑轮、支撑架、钢丝绳、吊环、支承座、直线轴和直线轴承,其结构如图 5 所示。钢丝绳的一端固定在直线电动机的动子上,另一端固定在配重块上。两根直线轴沿铅垂方向平行布置,直线轴的两端通过支承座与机架相连,而直线轴承固定在配重块上。

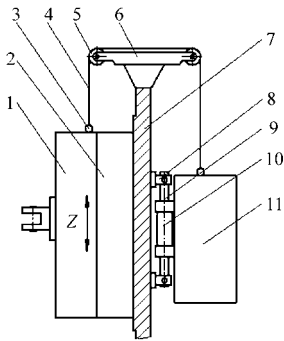


图 5 配重支撑装置的结构示意图

Fig.5 Structural diagram of counter weight support device

1. 直线电动机定子 2. 直线电动机定子 3. 吊环 4. 钢丝绳
5. 定滑轮 6. 支撑架 7. 机架 8. 支承座 9. 直线轴 10. 直线轴承 11. 配重块

2 测控系统

2.1 硬件系统

试验台测控系统的硬件系统包括 PMAC 控制卡、电动机驱动器、光栅尺、转速传感器、转矩/转速传感器、计数卡和计算机等,其中 PMAC 控制卡配置 100 Mbps 以太网端口和 RS232 通信接口,其 Turbo PMAC2 处理器能实现 32 轴伺服或步进电动机的联动控制,同时提供了 32 个 I/O 以及 2 路模拟量的采集口。测控系统流程如图 6 所示。

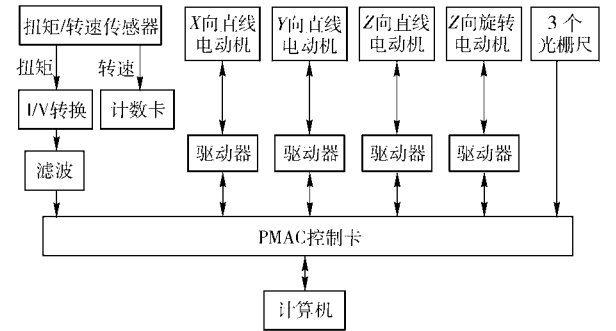


图 6 测控系统流程图

Fig.6 Flow chart of measurement and control system

试验台 X、Y、Z 3 个方向的振动由对应的直线电动机驱动激振机构实现,绕 Z 轴的旋振是由伺服电动机经减速器驱动曲柄摇杆机构实现。由于激振机构的完全解耦性,振动筛 4 个自由度的振动是独立可调的。各参数的设定和修改由控制执行软件 PEWin32PRO 实现,如调节筛子的自由度数、振幅和频率等参数,而筛面倾角需手工调节。

试验台共安装 3 个光栅尺、1 个转速传感器和 1 个扭矩传感器。其中光栅尺用于检测筛子 X、Y、Z 方向的振幅和速度,转速传感器和扭矩传感器分别用于检测筛子回转的速度和扭矩。由于扭矩为电流信号,需要通过电流/电压转换得到标准电压信号,

在进行电压采集前增加低通滤波处理,可有效降低变频器的干扰,提高测量精度^[8]。

2.2 水冷系统

由于大功率直线电动机长期工作时发热量较大,需要配置冷却系统。本试验台采用 LSF-01 型风冷型工业冷水机为 3 台直线电动机供冷,制冷量为 2.73 kW/h,水泵功率为 0.37 kW。

2.3 监控软件

基于 VC++ 的 PCOMM32PRO 软件对筛分试验台的测控系统进行开发和编程,运用执行软件 PEWin32PRO 对试验参数进行设定、修改和保存,同时可对各电动机运行状态进行监测,试验台控制界面如图 7 所示。试验过程中,直线电动机的位移和速度信号以及旋转电动机的转速信号能够在界面中实时显示,试验台回转装置的扭矩信号可采用连续变化曲线描述。

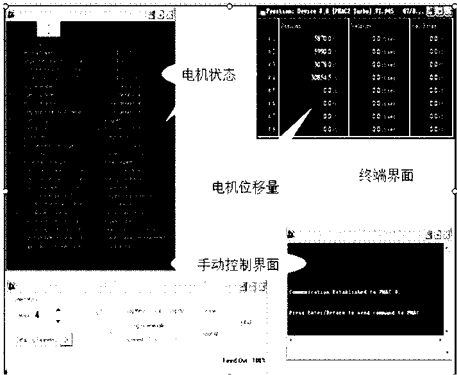


图 7 试验台控制界面

Fig.7 Test bench control interface

3 工作过程

试验前先确定筛网层数并调整好筛面倾角,换好试验用筛网,启动水冷机,打开驱动器和控制卡的电源开关,然后通过测控系统软件将电动机使能,调节各自电动机参数回零。再根据试验要求设定各电动机的输入参数,编写控制程序。

投料前根据是否需要选择是否增加风等流场作用或布置高速摄影系统跟踪筛面物料的运动轨迹,然后加入试验用颗粒物料,物料颗粒由筛面(X向)一端进入筛面并随着筛面的多维振动而完成沿筛面滑移、分层、分散、层间交换和透筛等筛分过程。筛上物沿 X 方向滑移而离开筛面,筛下物通过筛孔被分离后进入接料箱或再次进入下一层筛网进行二次筛分。进入接料箱的颗粒物料经过人工取样处理可得清洁度指标和颗粒在筛面下方的空间分布规律;人工筛选损失掉的颗粒物料和部分杂余等可得到筛分损失。大部分杂余从筛面某一侧排出,落入排杂箱,

经人工处理后可得未筛净损失和夹带损失。筛面物料的运动规律、筛分效率和处理量等通过观测、高速摄影跟踪以及简单的数学统计等方法获取。

若只需进行单自由度的振动筛分试验,只需开启相应的驱动电动机即可。若筛面物料过重且无需进行旋振试验,可将回转支撑装置换成专用的 3 自由度圆盘,可增加试验台的筛面负载能力。

4 试验验证

筛分作业包括粒状物料的分散、分层和细粒物料的透筛等过程,而粒群在振动平面上的运动状态对振动筛分机的处理量和筛分效率起着决定性的作用^[9],物料的分层又常包含在分散和透筛过程中,因而分(松)散度和透筛性能是筛分机的 2 个重要性能指标。本文分别选取等质量(718 g)和等体积(700 L)大米、小麦和水稻 3 种物料,测试其在 4 种不同振动自由度下配比方案下,振动筛分试验台的分散度和透筛性能指标,试验结果如表 2 所示。

表 2 多维振动筛分试验台分散度和透筛性能试验结果
Tab.2 Dispersivity and screen-penetrating performance testing results of multi-dimensional vibration screening test bench

自由度	分散度/%			透筛性能/s		
	大米	小麦	水稻	大米	小麦	水稻
X	20.0	23.5	25.0	26.5	62.5	68.5
X、Y	6.0	14.8	15.5	10.3	21.9	21.1
X、Z	11.5	20.5	22.0	10.3	22.2	21.4
X、Y、Z	9.0	19.0	18.7	9.1	13.8	15.7

从表 2 中可以看出,Y 方向的振动对物料的分散度和透筛性能的影响非常明显,以物料分层为目

的 Z 方向的振动有利于物料的分散和透筛,但其分散效果没有 Y 方向明显,Y 和 Z 方向的振动对物料透筛性能的影响效果相当,X、Y、Z 3 个自由度的振动对筛分性能的提高优于 2 个自由度的振动。此外,试验还证实,绕 Z 轴的旋振有利于提高物料分散度和透筛性能,效果近似于 Y 向振动;振动频率和振幅的提高有利于提高筛分机的筛分效率。

5 结论

(1) 设计的多维振动筛分试验台,最多可实现 X、Y、Z 3 个方向的直线往复振动和绕 Z 轴往复旋振共 4 个自由度的振动筛分试验;振动幅度、频率和筛面倾角等振动参数可无级调节,可对多种作物不同工况下的筛面物料运动规律、筛分效果、处理量和筛面物料分散度特性等指标进行试验分析。

(2) 测控系统采用工控机、PMAC 控制卡和信号采集卡相结合的方式,抗干扰能力强,工作可靠;基于 VC++ 的软件系统,可显示与记录试验过程中电动机及筛子的动力参数和运动特性曲线,便于后继深入分析。

(3) 横向振动和垂直振动有利于提高分散度和筛分效率。试验结果表明,Y 方向的振动对物料的分散度和透筛性能的影响非常明显,Z 方向的振动和绕 Z 向旋振有利于物料的分散、分层和透筛,Y 和 Z 方向的振动对物料透筛性能的影响效果相当,X、Y、Z 3 个自由度的振动对筛分效率的提高优于 2 个自由度的振动。

(4) 振动频率和振幅的提高有利于提高筛分机的筛分效率。物料的筛分效率随着振动频率和振幅的提高而提高。

参 考 文 献

1 焦红光,赵跃民. 筛面上颗粒运动的计算机仿真研究及试验验证[J]. 矿冶, 2006(3):63~67.
Jiao Hongguang, Zhao Yue-min. Computer emulation of particle motion on the screen plate and its validation by test [J]. Mining and Metallurgy, 2006(3):63~67. (in Chinese)

2 沈惠平,张会芳,何宝祥,等. 一种新型并联运动振动筛及其运动学研究及研制[J]. 机械设计,2007,24(6):34~36.
Shen Huiping, Zhang Huifang, He Baoxiang, et al. A kind of novel parallel movement vibration sieve and its kinematic research and development [J]. Journal of Machine Design, 2007,24(6):34~36. (in Chinese)

3 张会芳,沈惠平,杨廷力,等. 一种新型并联运动振动筛主机机构及其运动学分析[J]. 江苏工业学院学报,2007,19(2):38~41.
Zhang Huifang, Shen Huiping, Yang Tingli, et al. A novel main mechanism of parallel kinematic sieve and kinematics [J]. Journal of Jiangsu Polytechnic University, 2007,19(2):38~41. (in Chinese)

4 王成军,李耀明,马履中,等. 3 自由度混联振动筛设计[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):69~73.
Wang Chengjun, Li Yaoming, Ma Lüzhong, et al. Design of three degree of freedom hybrid vibration screen [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):69~73. (in Chinese)

5 Chung-Ching Lee, Jacques M Hervé. Translational parallel manipulators with doubly planar limbs [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(4):433~455.

(下转第 112 页)

Agricultural Sciences in China, 2007, 6(6): 724 ~ 731.

- 10 邓勋飞,吕晓男,郑素英,等. 基于 GIS 的农产品安全溯源体系[J]. 农业工程学报,2008,24(增刊2):172 ~ 176.
Deng Xunfei, Lü Xiaonan, Zheng Suying, et al. GIS-based traceability system of agricultural product safety [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(Supp.2): 172 ~ 176. (in Chinese)
- 11 Phan R C W. Impossible differential cryptanalysis of 7-round advanced encryption standard (AES) [J]. Information Processing Letters, 2004,91(1): 33 ~ 38.
- 12 魏凤兰,汤秀芬,米晨. AES 加密算法中的 S 盒及其 C 语言实现[J]. 宁夏工程技术, 2005,4(1): 42 ~ 44.
Wei Fenglan, Tang Xiufen, Mi Chen. S-box in AES encipher algorithm and its C language implementation [J]. Ningxia Engineering Technology, 2005, 4(1):42 ~ 44. (in Chinese)
- 13 翁小杰,宋中山,杨娜. AES 加密算法及 S-box 改进策略[J]. 电脑知识与技术, 2007, 4(19): 63 ~ 64.
Weng Xiaojie, Song Zhongshan, Yang Na. AES encryption arithmetic and S-box improved strategy [J]. Computer Knowledge and Technology, 2007, 4(19):63 ~ 64. (in Chinese)
- 14 刘连浩. 基于身份的十进制加密技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2005,41(24): 154 ~ 156.
Liu Lianhao. Research of ID-based encryption technology on decimal system [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(24):154 ~ 156. (in Chinese)
- 15 刘学馨,杨信廷,宋怿,等. 基于养殖流程的水产品质量追溯系统编码体系的构建[J]. 农业网络信息, 2008(1): 18 ~ 21.
Liu Xuexin, Yang Xinting, Song Yi, et al. Construction of fishery products coding scheme of quality traceability system based on the aquaculture flow [J]. Agriculture Network Information, 2008(1): 18 ~ 21. (in Chinese)
- 16 刘连浩,罗安,陈松乔. 基于十进制的加密技术研究[J]. 小型微型计算机系统,2006,27(7): 1 229 ~ 1 231.
Liu Lianhao, Luo An, Chen Songqiao. Research of encryption technology based on decimal system [J]. Mini-Micro Systems, 2006, 27(7): 1 229 ~ 1 231. (in Chinese)
- 17 孙爱娟,王俊峰. AES 加密算法中的 S-盒及其 MATLAB 实现[J]. 信息技术, 2008(11): 67 ~ 69,73.
Sun Aijuan, Wu Junfeng. The S-box of AES encryption algorithm and its MATLAB implementation [J]. Information Technology, 2008(11):67 ~ 69, 73. (in Chinese)
- 18 杨信廷,钱建平,范蓓蕾,等. 农产品物流过程追溯中的智能配送系统[J]. 农业机械学报,2011,42(5):125 ~ 130.
Yang Xinting, Qian Jianping, Fan Beilei, et al. Establishment of intelligent distribution system applying in logistics process traceability for agricultural product [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(5):125 ~ 130. (in Chinese)
- 19 陈长喜,张宏福,飞颀经纬. 肉鸡产业技术体系生产监测与产品质量可追溯平台设计[J]. 农业机械学报,2010,41(8):100 ~ 106.
Chen Changxi, Zhang Hongfu, Feixie Jingwei. Traceability platform design of production monitoring and products quality for broilers industry technology system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):100 ~ 106. (in Chinese)

(上接第 74 页)

- 6 Kim H S, Tsai L W. Kinematic synthesis of spatial 3-RPS parallel manipulators [C] // Proc. of DECT'02 ASME 2002 Design Engineering Technical Conference, Canada, 2002:978 ~ 986.
- 7 Jacques Steyn. Fatigue failure of deck support beams on a vibrating screen [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1995,61(2 ~ 3):315 ~ 327.
- 8 徐立章,李耀明,李洪昌,等. 纵轴流脱粒分离-清选试验台设计[J]. 农业机械学报,2009,40(12):76 ~ 79.
Xu Lizhang, Li Yaoming, Li Hongchang, et al. Development on test-bed of longitudinal axial threshing-separating-cleaning unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12):76 ~ 79. (in Chinese)
- 9 焦红光. 振动筛分过程解析[M]. 北京:煤炭工业出版社,2008.
- 10 徐立章,李耀明,张立功,等. 轴流式脱粒-清选装置试验台的设计[J]. 农业机械学报,2007,38(12):85 ~ 88.
Xu Lizhang, Li Yaoming, Zhang Ligong, et al. Development on test-bed of axial threshing and cleaning unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):85 ~ 88. (in Chinese)