

挖掘机工作装置复杂轨迹跟踪实验*

黎波 严骏 郭刚 唐建 张梅军

(解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

【摘要】 为实现挖掘机自动控制,对其进行了电液比例改造。建立了挖掘机工作装置的运动学模型及其电液控制系统的非线性模型,并通过实验验证了机理建模中指出的电液控制系统死区及动态特性不对称非线性。为满足地面平整作业,采用五次多项式插值法在笛卡尔空间生成了斗杆末端轨迹,并通过运动学模型获得系统关节空间轨迹。针对控制系统主要存在的死区和不对称非线性,设计了带死区补偿的分段PID控制器,通过对比实验,证明了分段PID比常规PID控制精度高,能克服系统的主要非线性特性。通过协调控制挖掘机工作装置三关节,实现了一个复杂轨迹的有效跟踪。

关键词: 挖掘机 工作装置 复杂轨迹 跟踪 实验

中图分类号: TP273; TD422.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)12-0039-05

Experiment of Complex Path Tracking for Excavator Working Unit

Li Bo Yan Jun Guo Gang Tang Jian Zhang Meijun

(Engineering Institute of Corps of Engineer, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract

In order to control excavator automatically, an excavator was retrofitted with electro-hydraulic proportional control systems. Kinematic models for excavator's mechanism and nonlinear model for its electro-hydraulic system was established respectively. The dead-band and asymmetry nonlinearities of the electro-hydraulic system which was deduced in the theory models was demonstrated by experiments. To satisfy ground-leveling task, a 5-order polynomial was used for path generation in Cartesian space, and the joint-space path was calculated by kinematic models. According to the dead-band and asymmetry nonlinearities of control system, a segment PID controller with dead-band compensation was designed. Comparison experiments demonstrated that segment PID overcame the majority nonlinearities effectively. It had better tracking performance than conventional PID. In conclusion, complex path tracking was achieved by coordinated control of the three working arms.

Key words Excavator, Working unit, Complex path, Tracking, Experiment

引言

针对电液伺服控制挖掘机系统存在的非线性特性^[1],为实现精度高、鲁棒性强的伺服控制,国内外学者采用了许多有效的非线性控制方法,如模糊控制^[2~3]、神经网络控制^[4]及模糊与神经网络控制的结合^[5],鲁棒控制^[6~7]、自适应控制^[8]、自适应鲁棒

控制^[9]及其与智能方法的结合^[10]。这些方法虽然能有效克服系统的非线性,实现精确的轨迹跟踪,但其算法复杂、设计费时,不利于工程实际推广应用。本文在分析系统动态特性基础上,针对系统主要存在的死区非线性及正、反方向动态特性的差异,设计带死区补偿的分段PID控制策略。最后,采用离线轨迹规划与实时轨迹跟踪的方式对设计的控制算法

收稿日期: 2011-11-28 修回日期: 2011-12-11

* 国家自然科学基金资助项目(51175511)

作者简介: 黎波,博士生,主要从事机械装备机电控制及自动化研究,E-mail: libomusic@163.com

通讯作者: 严骏,教授,博士生导师,主要从事工程装备保障与信息技术应用研究,E-mail: 6219033@163.com

进行复杂轨迹跟踪实验。

1 电液控制挖掘机模型

1.1 系统概况

为实现挖掘机的自动控制,需对普通挖掘机的液压控制系统进行改造,图 1 所示为改造后的电控挖掘机,采用了计算机控制电液比例阀代替手动先导控制^[3]。为准确地控制位置和力,在关节臂上安装了倾角传感器,在液压缸进回油口安装了压力传感器。

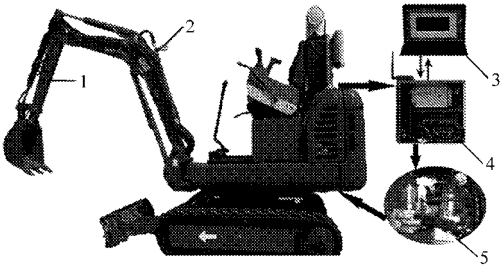


图 1 电液控制挖掘机样机

Fig. 1 Prototype of electro-hydraulic excavator

1. 倾角传感器 2. 压力传感器 3. 计算机 4. 电控箱 5. 电液比例阀

改装后的挖掘机,利用计算机进行采样控制。实际系统为两级结构,上位机执行任务规划和系统监控;下位机接受上位机的任务,根据反馈信号,执行运动控制算法,输出相应电信号控制先导阀以驱动液压执行器。其中,下位机伺服控制系统由控制器、电液比例阀、阀控液压缸及传感器等组成。下位机闭环控制系统框图如图 2 所示。

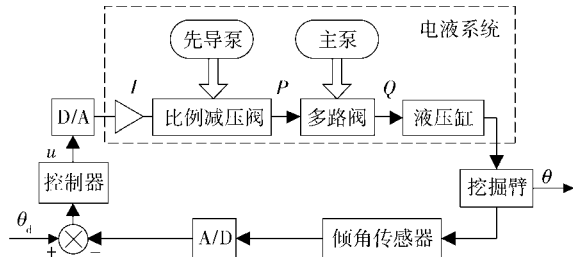


图 2 系统闭环控制框图

Fig. 2 Block diagram of closed loop control system

1.2 运动学模型

为实现复杂轨迹跟踪,需建立工作装置末端在笛卡尔空间中的运动轨迹与各关节运动角度间的一一对应关系。本文主要规划动臂、斗杆两关节以实现斗杆末端的轨迹跟踪,而将铲斗与水平面的相对角进行单独控制。由图 3 可得运动学关系为^[11]

$$\begin{cases} x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 - \theta_2) \\ y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin (\theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可得逆运动学模型为

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 L_1 L_2} \right) \quad (2)$$

其中, $\theta_2 \in (0^\circ, 180^\circ)$, 则有

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{y (L_1 + L_2 \cos \theta_2) + x L_2 \sin \theta_2}{x (L_1 + L_2 \cos \theta_2) - y L_2 \sin \theta_2} \right) \quad (3)$$

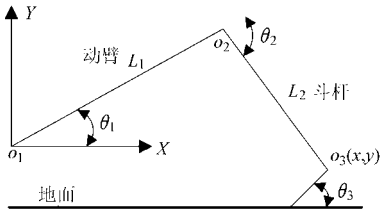


图 3 运动学模型

Fig. 3 Kinematic model

1.3 电液控制系统模型

挖掘机电液控制系统的组成主要包括电液比例阀及阀控液压缸模块,系统模型由比例阀数学模型、滑阀流量方程、液压缸流量连续方程及负载的力平衡方程构成。

1.3.1 电液比例模块等效模型

电液比例系统包括先导比例减压阀及多路阀,比例阀存在死区,忽略次要因素,整个先导电液比例模块可简化为一阶模型,即

$$\tau_v \dot{x}_v = -x_v + k_v u_v \quad (4)$$

式中 x_v ——多路阀芯有效位移

k_v ——增益

τ_v ——时间常数

u_v ——死区补偿后控制器有效输出

1.3.2 阀控非对称缸模块模型

先导控制的阀控非对称液压缸原理如图 4 所示,其动力学模型由滑阀负载流量方程、液压缸流量连续方程及液压缸力平衡方程组成。图中, h 为液压缸位移, M 为等效质量, B_p 为粘性阻尼系数, F_l 为等效负载力。 p_1 、 p_2 分别表示无杆腔、有杆腔压力, A_1 、 A_2 分别表示无杆腔、有杆腔作用面积, Q_1 、 Q_2 分别表示无杆腔、有杆腔流量, p_i 和 p_r 分别表示液压泵输出压力和回油压力。

令 $x_1 = h$, $x_2 = dh/dt$, $x_3 = p_1$, $x_4 = p_2$, $u = x_v$ 。可得阀控非对称缸模块的非线性状态空间模型为^[12-13]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{A_1 x_3}{M} - \frac{A_2 x_4}{M} - \frac{B_p x_2}{M} - \frac{F_l}{M} \\ \dot{x}_3 = \frac{\beta_e C_i x_4}{V_1} - \frac{\beta_e A_1 x_2}{V_1} - \frac{\beta_e (C_i + C_e) x_3}{V_1} + \frac{\beta_e g_1(x)}{V_1} u \\ \dot{x}_4 = \frac{\beta_e A_2 x_2}{V_2} + \frac{\beta_e C_i x_3}{V_2} - \frac{\beta_e (C_i + C_e) x_4}{V_2} - \frac{\beta_e g_2(x)}{V_2} u \end{cases} \quad (5)$$

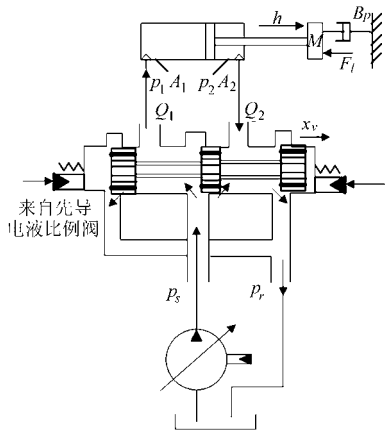


图 4 阀控液压缸示意图

Fig. 4 Valve controlled hydraulic cylinder

其中 $g_1(x) = \operatorname{sgn}\left(\left(1 + \operatorname{sgnu}\right)\frac{p_s}{2} - x_3 \operatorname{sgnu}\right) \cdot$

$$C_d w_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \left| \left(1 + \operatorname{sgnu}\right)\frac{p_s}{2} - x_3 \operatorname{sgnu} \right|}$$

$g_2(x) = \operatorname{sgn}\left(\left(1 - \operatorname{sgnu}\right)\frac{p_s}{2} + x_4 \operatorname{sgnu}\right) \cdot$

$$C_d w_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} \left| \left(1 - \operatorname{sgnu}\right)\frac{p_s}{2} + x_4 \operatorname{sgnu} \right|}$$

式中 $g_i(x)$ ——滑阀非线性流量增益, $i = 1, 2$

C_d ——流量系数

ρ ——液压油密度

w_i ——阀口面积梯度, $i = 1, 2$

β_e ——有效体积弹性模量

C_i 、 C_e ——内、外泄漏系数

V_1 、 V_2 ——无杆腔、有杆腔有效容积

从以上机理建模可知系统存在比例阀死区, 阀控非对称缸正反方向结构参数不对称性等非线性特性。通过实机测量斗杆关节的开环正弦激励得图 5 所示响应(其他关节有类似的响应特性)。可见, 受系统死区影响, 角度响应存在“平顶”现象, 即速度在小输入量时为零; 因正反向的不对称性, 整体角度响应曲线呈上升趋势, 即正反向响应速度存在差异。

2 轨迹跟踪实验

2.1 轨迹规划

地面平整在挖掘机作业中占有很大比例, 通常是由操作员协调操作动臂、斗杆及铲斗以完成规定作业, 但人工操作精度低、效率不高。本文以实验室电液控制挖掘机为对象, 采用离线轨迹规划和实时轨迹跟踪的方式实现平整作业自动控制。为完成平整作业, 需在笛卡尔空间完成工作装置末端轨迹规划。根据 1.1 节所述实验系统, 各关节安装了与水

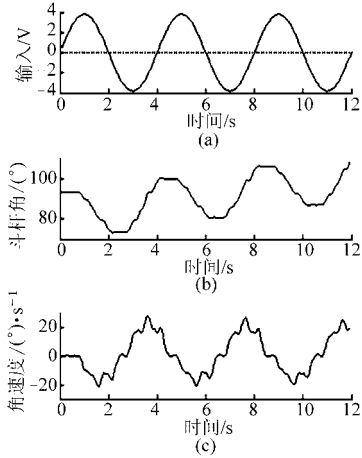


图 5 系统开环正弦响应

Fig. 5 Open-loop response of sine wave

(a) 开环输入 (b) 角度响应 (c) 响应速度

平面呈绝对角的倾角传感器。本文则采用使斗杆末端跟踪水平直线轨迹, 将铲斗关节单独设计为调节系统, 随前 2 个关节的运动而运动, 保持铲斗与水平面夹角 θ_3 为固定值。

规划轨迹中斗杆末端 y 及铲斗角 θ_3 均为固定值, 而斗杆末端在 X 轴的位移则采用轨迹规划中常用的多项式插值方法。直接按时间点均匀地生成直线轨迹, 在跟踪的起始和结束点存在速度及加速度的不连续性, 容易造成系统冲击振荡。为获得平稳光滑的跟踪轨迹, 采用五次多项式对运动轨迹的路径段进行插值

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (6)$$

设轨迹从起始点 x_0 到终止点 x_1 经历时间 t_s , 约束条件为

$$x(0) = x_0 \quad x(t_s) = x_1 \quad \dot{x}(0) = 0$$

$$\dot{x}(t_s) = 0 \quad \ddot{x}(0) = 0 \quad \ddot{x}(t_s) = 0$$

这些约束条件能确定 6 个共含 6 个未知参数的方程, 解此方程组可得多项式路径的参数为^[8]

$$a_0 = x_0 \quad a_1 = 0 \quad a_2 = 0$$

$$a_3 = 10(x_1 - x_0)/t_s^3 \quad a_4 = 15(x_0 - x_1)/t_s^4$$

$$a_5 = 6(x_1 - x_0)/t_s^5$$

可见, 只要给定起始点及跟踪时间, 式(6)的参数就能确定。在笛卡尔空间完成离线轨迹规划后, 通过式(2)、(3)即可实时获得系统关节空间轨迹(图 6)。

2.2 分段 PID 控制策略

挖掘机自动控制系统由计算机控制网络、电液比例控制和阀控液压缸组成, 是一个复杂的非线性系统, 很难应用精确的理论模型进行控制算法设计。但是通过以上对系统的建模分析可知, 除一些不确定性未建模动态外, 系统主要存在比例阀死区及阀控非对称液压缸正反方向不对称非线性。本文根据

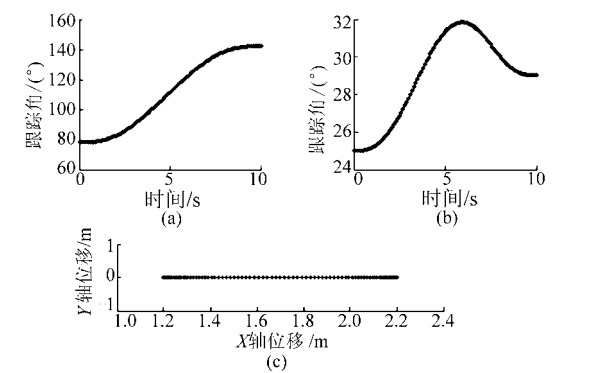


图 6 规划轨迹

Fig. 6 Generated path

(a) 斗杆跟踪角 (b) 动臂跟踪角 (c) 斗杆末端轨迹

系统正响应动态特性的差异^[14]设计了分段 PID 算法,以补偿系统的不对称性。为克服系统死区及其他干扰(库伦摩擦力、重力等),在分段 PID 基础上附加了死区补偿。其中,离散形式的分段 PID 算法为

$$\tilde{u}(k) = \begin{cases} K_{p1}e(k) + K_{i1}e_i(k) + K_{d1}e_d(k) & (e(k) \geq 0) \\ K_{p2}e(k) + K_{i2}e_i(k) + K_{d2}e_d(k) & (e(k) < 0) \end{cases} \quad (7)$$

其中
$$e_i(k) = \sum_{j=0}^k e(j)$$
$$e_d(k) = e(k) - e(k-1)$$

式中 $e(k)$ ——跟踪误差

进行死区补偿后控制输出为

$$u(k) = \tilde{u}(k) + u_b(k) \quad (8)$$

式中 $u_b(k)$ ——死区补偿

3 实验结果分析

综合考虑 PID 控制器 3 个参数的影响^[15],通过实机调试,对各关节分别设计了一个常规 PID^[16]与分段 PID 控制器进行对比分析。其中,PID 参数如表 1~3 所示,死区补偿值约为控制饱和量的 50%。其中,计算机输入值范围为 0~500 等效于 0~5 V 的控制输入范围。

表 1 动臂 PID 参数

Tab.1 PID parameters of boom

控制方式	K_p	K_i	K_d	补偿
常规	4.5	0.1	0.12	250
动臂降	4.0	0.1	0.12	230
动臂升	5.0	0.1	0.15	260

采用常规 PID 与分段 PID 控制时各关节的正反方向阶跃响应曲线如图 7 所示,图中各响应角度均归一化到零为起点,且反向负角度响应为乘以负号

表 2 斗杆 PID 参数

Tab.2 PID parameters of dipper

控制方式	K_p	K_i	K_d	补偿
常规	4.0	0.1	0.12	242
斗杆降	3.8	0.1	0.12	240
斗杆升	4.0	0.1	0.14	248

表 3 铲斗 PID 参数

Tab.3 PID parameters of bucket

控制方式	K_p	K_i	K_d	补偿
常规	5.0	0.1	0.2	240
铲斗展	4.5	0.1	0.2	235
铲斗卷	6.0	0.1	0.22	245

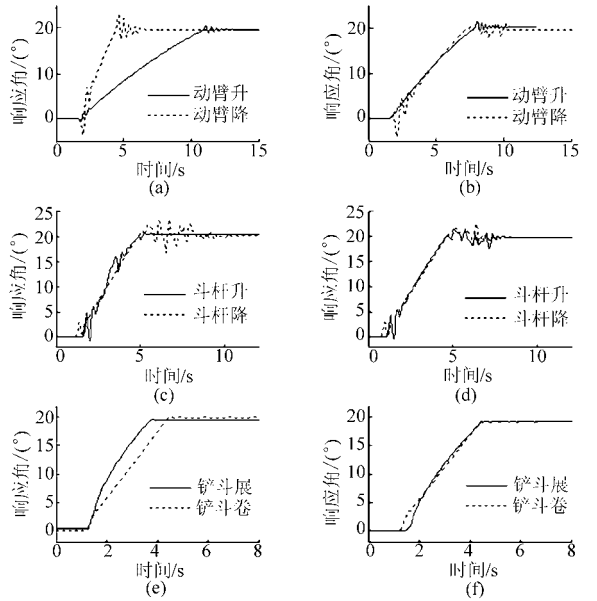


图 7 正反阶跃响应对比

Fig. 7 Comparison of step response

(a) 动臂常规 PID (b) 动臂分段 PID (c) 斗杆常规 PID
(d) 斗杆分段 PID (e) 铲斗常规 PID (f) 铲斗分段 PID

后与正向响应一起对比分析。从图 7 可见,采用常规 PID 控制时,除液压系统动态非对称性外,由于各关节几何结构特征,正反方向重力作用的差别加强了响应的不对称性,动臂在正反方向重力作用差别最大,铲斗、斗杆较小。为克服上述正响应的不对称特性,各关节分段 PID 控制策略在响应慢的方向适当增加增益 K_p 和 K_d ,快的方向则减小增益 K_p ;在需克服重力作用的方向增加死区补偿,反之则减少,且重力作用差别越大增加或减少的量越大。图 8 为规划好的地面平整作业示意图,其中,斗杆末端规划轨迹在 X 轴方向的运动从距原点 2.2 m 处到 1.2 m 处,而 $y=0$ 、 $\theta_3=20^\circ$ 。图 9 为地面平整作业实验结果,从图 9a、图 9b 及图 9c 可见,分段 PID 对各关节的轨迹跟踪更接近设定轨迹;而图 9d 中的斗杆末端

直线轨迹跟踪曲线也直接表明分段 PID 比常规 PID 跟踪精度高,其直线跟踪误差在 50 mm 内,能有效地满足工程中一般的地面平整作业。

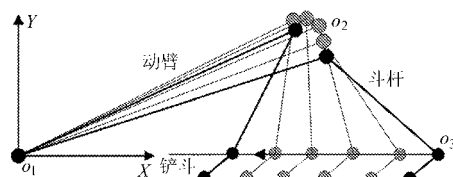


图 8 地面平整作业示意图

Fig. 8 Schematic diagram of ground leveling

4 结论

(1)给出了挖掘机电液控制系统非线性模型,并通过实验分析验证了系统死区及不对称特性对控制性能的不利影响。

(2)建立了挖掘机工作装置的 2 自由度运动学模型,通过 5 次多项式插值离线地实现了地面平整作业笛卡尔空间轨迹规划,并通过运动学模型求得关节空间轨迹。

(3)设计了带死区补偿的分段 PID 控制器,能

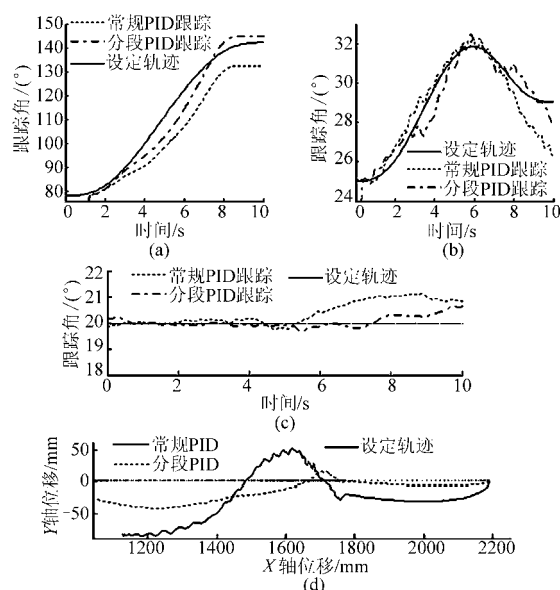


图 9 地面平整作业实验结果

Fig. 9 Experimental results of ground-leveling

(a) 斗杆关节跟踪轨迹 (b) 动臂关节跟踪轨迹

(c) 铲斗关节跟踪轨迹 (d) 斗杆末端直线跟踪轨迹

有效克服挖掘机电液控制系统的主要非线性影响,实验证明分段 PID 控制比常规 PID 控制精度高。

参 考 文 献

- 黎波,严骏,刘安心,等. 挖掘臂电液伺服系统非线性辨识[J]. 农业机械学报,2012, 43(4):20~25.
Li Bo, Yan Jun, Liu Anxin, et al. Nonlinear identification of excavator arm's electro-hydraulic servo system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 20~25. (in Chinese)
- Li Bo, Yan Jun, Guo Gang, et al. High performance control of hydraulic excavator arm based on fuzzy-PI soft-switch control [C]// Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, Shanghai, China, 2011: 676~679.
- Yan Jun, Li Bo, Tu Qunzhang, et al. Automatization of excavator and study of its autocontrol [C]// Proceedings of Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shanghai, China, 2011: 604~609.
- 吕广明,孙立宁,薛渊. 神经网络在液压挖掘机工装轨迹控制中的应用[J]. 机械工程学报,2005,41(5): 119~122.
Lü Guangming, Sun Lining, Xue Yuan. BP network control over the track of working device of hydraulic excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5):119~122. (in Chinese)
- Le D H, Kyoung K A, Nguyen B K, et al. Trajectory control of electro-hydraulic excavator using fuzzy self tuning algorithm with neural network[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1):149~160.
- Nguyen H Q. Robust low level control of robotic excavation[D]. Sydney: The University of Sydney, 2000.
- Chang P H, Lee S J. A straight-line motion tracking control of hydraulic excavator system[J]. Mechatronics, 2002, 12(1): 119~138.
- Chiang M H, Huang C C. Experimental implementation of complex path tracking control for large robotic hydraulic excavators [J]. International Journal of Advanced Manufacturing and Technology, 2004,23(1~2): 126~132.
- 张海涛,何清华,张新海,等. 机器人液压挖掘机运动系统的建模与控制[J]. 机器人,2005, 27(2): 13~16.
Zhang Haitao, He Qinghua, Zhang Xinhai, et al. Modeling and control of the motion system of a hydraulic robotic excavator [J]. Robot, 2005, 27(2):13~16. (in Chinese)
- 张金萍,刘阔,林剑锋,等. 挖掘机的 4 自由度自适应模糊滑膜控制[J]. 机械工程学报,2010,46(21): 87~92.
Zhang Jinping, Liu Kuo, Lin Jianfeng, et al. 4-DOF adaptive fuzzy sliding mode control of excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(21): 87~92. (in Chinese)

- 161 ~ 168.
- 4 Haykm-Acma H. Combustion characteristics of different biomass materials[J]. *Energy Convers Manage*, 2003, 44(1): 155 ~ 162.
 - 5 周捍东,徐长妍,丁沪闽. 木材散碎物料基本堆积特性的研究[J]. *木材加工机械*, 2002, 13(6): 7 ~ 17.
Zhou Handong, Xu Changyan, Ding Humin. Studies on the basic characteristics of wooden bulk materials [J]. *Wood Processing Machinery*, 2002, 13(6): 7 ~ 17. (in Chinese)
 - 6 田宜水,姚宗路,欧阳双平,等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(9): 124 ~ 128.
Tian Yishui, Yao Zonglu, Ouyang Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(9): 124 ~ 128. (in Chinese)
 - 7 孙占峰,蒋恩臣. 稻草秸秆力学特性研究[J]. *东北农业大学学报*, 2007, 38(5): 660 ~ 664.
Sun Zhanfeng, Jiang Enchen. Study on mechanical properties of rice straw [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(5): 660 ~ 664. (in Chinese)
 - 8 孟海波,韩鲁佳. 秸秆物料的特性及其加工利用研究现状与应用前景[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(6): 38 ~ 41.
Meng Haibo, Han Lujia. Analysis of application and prospects and study status of the processing properties of straw materials [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(6): 38 ~ 41. (in Chinese)
 - 9 周晶,吴海涛,丁士军,等. 秸秆资源收获季节性及其能源供应持续性分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(8): 1 537 ~ 1 545.
Zhou Jing, Wu Haitao, Ding Shijun, et al. Analysis of seasonal variation in crop residue harvest and sustainability of its energy supply[J]. *Resources Science*, 2011, 33(8): 1 537 ~ 1 545. (in Chinese)
 - 10 张国梁,张振涛,孙照斌,等. 生物质成型燃料生产与应用的问题分析[J]. *农机化研究*, 2011, 33(8): 177 ~ 183.
Zhang Guoliang, Zhang Zhentao, Sun Zhaobin, et al. Analysis of problems of biomass briquette production and application [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(8): 177 ~ 183. (in Chinese)
 - 11 孙静春,李艳光,黄晓菲. 秸秆发电燃料市场的纵向联盟博弈[J]. *西安交通大学学报:社会科学版*, 2009, 29(4): 25 ~ 29.
Sun Jingchun, Li Yanguang, Huang Xiaofei. Vertical coalitional game in the fuel market of generating electricity by straw [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University: Social Sciences*, 2009, 29(4): 25 ~ 29. (in Chinese)
 - 12 霍丽丽,田宜水,赵立欣,等. 农作物秸秆原料物理特性及测试方法研究[J]. *可再生能源*, 2011, 29(6): 86 ~ 92.
Huo Lili, Tian Yishui, Zhao Lixin, et al. Research on physical property of crop straw and test methods [J]. *Renewable Energy*, 2011, 29(6): 86 ~ 92. (in Chinese)
 - 13 陈长冰,梁醒培. 散体物料物理特性对筒仓动态侧压力的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2008(11): 13 ~ 17.
Chen Changbing, Liang Xingpei. Effect of bulk material physical properties on dynamic lateral pressure of silo wall [J]. *Cereal and Feed Industry*, 2008(11): 13 ~ 17. (in Chinese)
 - 14 张鹏. 卡尔指数法在评价煤粉粉体特征中的应用[J]. *中国粉体技术*, 2000, 6(5): 33 ~ 36.
Zhang Peng. Application of carr index method in comprehensive evaluating properties of coal power [J]. *China Power Science and Technology*, 2000, 6(5): 33 ~ 36. (in Chinese)
-

(上接第 43 页)

- 11 黎波,严骏,曾拥华,等. 挖掘机工作装置运动学建模与分析[J]. *机械设计*, 2011, 28(10): 7 ~ 10.
Li Bo, Yan Jun, Zeng Yonghua, et al. Kinematics modeling and analysis of excavator working device [J]. *Journal of Machine Design*, 2011, 28(10): 7 ~ 10. (in Chinese)
- 12 杨军宏,尹自强,李圣怡. 阀控非对称缸的非线性建模及其反馈线性化[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(5): 203 ~ 207.
Yang Junhong, Yin Ziqiang, Li Shengyi. Nonlinear modeling and feedback linearization of valve-controlled asymmetrical cylinder [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(5): 203 ~ 207. (in Chinese)
- 13 白寒,王庆九,徐振,等. 阀控非对称缸系统多级滑膜鲁棒自适应控制[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(10): 193 ~ 198.
Bai Han, Wang Qingjiu, Xu Zhen, et al. Multiple sliding mode robust adaptive control for valve controlled asymmetric cylinder system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(10): 193 ~ 198. (in Chinese)
- 14 吕云嵩. 阀控非对称缸频域建模[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(9): 122 ~ 126.
Lü Yunsong. Modeling in frequency domain for valve controlled asymmetric hydraulic cylinders [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(9): 122 ~ 126. (in Chinese)
- 15 Li Yun, Kiam Heong Ang, Chong G C Y. PID control system analysis and design [J]. *Control System, IEEE*, 2006, 26(1): 32 ~ 41.
- 16 Gao Yingjie, Jin Yanchao, Zhang Qin. Motion planning based coordinated control for hydraulic excavators [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(1): 97 ~ 101.