

文章编号: 1002-0446(2005)02-0113-05

机器人液压挖掘机运动系统的建模与控制*

张海涛, 何清华, 张新海, 黄志雄

(中南大学机电学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 首先利用机器人运动学将铲斗的理想运动轨迹和各工作装置的目标转角序列联系起来, 然后利用拉格朗日方程建立各工作装置的运动学模型, 最后推导出 LUDV 液压驱动系统的电液模型, 从而得到了挖掘机器人运动系统的完整模型. 针对系统动力学的高非线性、参数的不确定性、外界干扰及比例方向阀的死区及非线性增益等特点, 提出一种建立在自适应鲁棒控制基础上的非连续映射方法来处理运动系统并利用鲁棒反馈来消除近似误差. 最后利用动臂控制试验来验证控制方法的正确性.

关键词: 挖掘机器人; 运动控制; 系统模型; 自适应鲁棒控制

中图分类号: TP24

文献标识码: B

Modeling and Control of the Motion System of a Hydraulic Robotic Excavator

ZHANG Hai-tao, HE Qing-hua, ZHANG Xin-hai, HUANG Zhi-xiong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: This paper connects the desired trajectory of the bucket with the objective angular series of the working mechanisms, and establishes the dynamic model of the mechanisms by using the Lagrange equation. The electro-hydraulic model of the LUDV hydraulic driving system is deduced, and the complete motion system model of the robotic excavator is obtained. According to the characteristics such as high nonlinearity of system dynamics, parameter uncertainties, external disturbance, the dead region and nonlinear gain coefficient of the proportional direction valve, this paper presents a discontinuous projection based on adaptive robust control to deal with motion system, the error is eliminated with robust feedback. Finally, the experiment of the boom motion control is presented to illustrate the feasibility of this method.

Keywords: robotic excavator; motion control; system model; adaptive robust control

1 引言 (Introduction)

本文利用湖南山河智能机械股份有限公司生产的 SWE85 液压挖掘机为平台进行机器人技术改造, 电液比例改造如图 1 所示, 在原系统的基础上, 每一工作装置都增加了两个梭阀和两个比例减压阀, 从而实现了人工控制和电液比例遥控的快速方便转换. 硬件控制系统构成如图 2 所示, 系统分为上、下位机两级结构, 上位机 PC 计算机根据目标轨迹计算出相应的目标转角序列传递给下位机, 下位机根据上位机的目标转角指令, 并采样检测到的关节位置信号和油缸压力信号, 执行位置控制算法, 输出电压信号控制先导阀驱动工作油缸.

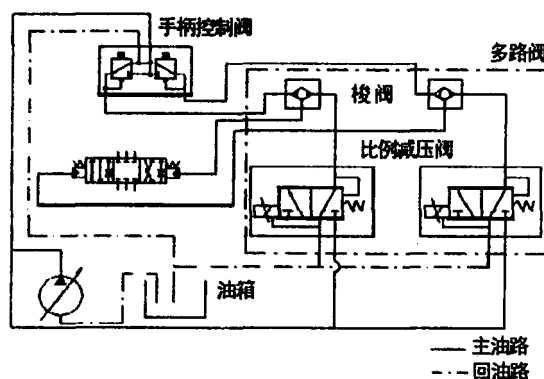


图 1 改造后的电液系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the modified electrohydraulic system

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2003AA430200).

收稿日期: 2004 - 06 - 01

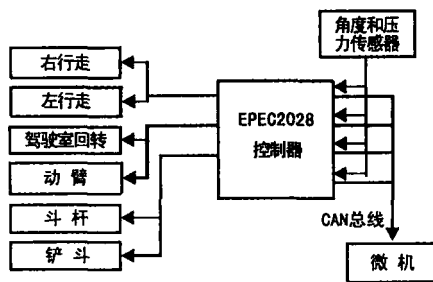


图 2 控制系统的硬件构成

Fig. 2 Hardware architecture of the control system

2 运动系统模型的建立 (Modeling of the motion system)

挖掘机器人运动控制系统由控制器、液压动力系统和挖掘机工作装置组成,其中工作装置主要是由上车、动臂、斗杆、铲斗等组成。

2.1 工作装置运动学分析

建立工作装置的运动学模型是为了将铲斗尖的目标轨迹转化为实现该轨迹所需要的目标转角序列,并确定液压缸活塞杆的伸缩序列。图 3 定义了基坐标系 $O_0 \{x_0, y_0, z_0\}$ 来描述铲斗尖的位置,并将 $O_1 \{x_1, y_1, z_1\}$ 、 $O_2 \{x_2, y_2, z_2\}$ 、 $O_3 \{x_3, y_3, z_3\}$ 、 $O_4 \{x_4, y_4, z_4\}$ 系统地加在各关节处,从而得到各坐标系之间的 D-H 变换矩阵为:

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $i=1, 2, 3, 4$, 将这些矩阵相乘便可以得到决定铲斗位置和方向的“手”矩阵:

$$A_0^4 = \begin{bmatrix} c_1 c_{234} - s_1 s_{234} & s_1 c_1 (a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_1) & s_1 s_1 (a_4 s_{234} + a_3 s_{23} + a_2 s_2 + a_1) & s_{234} \\ s_1 c_{234} - c_1 s_{234} & c_1 c_1 (a_4 c_{234} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_1) & c_1 s_1 (a_4 s_{234} + a_3 s_{23} + a_2 s_2 + a_1) & c_{234} \\ 0 & a_4 \sin\theta_{234} + a_3 \sin\theta_{23} + a_2 \sin\theta_2 + d_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $c_i = \cos(\theta_i)$, $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$, $s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ 。对于以时间 t 为自变量的给定铲斗运动轨迹 $f(t)$, 理想的铲斗位置和方向又可用基坐标系中的一个位置矩阵即 $f(t) = [n_x, s_x, a_x, p_x; n_y, s_y, a_y, p_y; n_z, s_z, a_z, p_z; 0, 0, 0, 1]$ 表示出来, 其中 n, s, a 为姿态矩阵, p 为位置向量, 通过解方程 (3), 便可以求出与理想轨迹点对应的各铰点的关节

角为:

$$f(t) = A_0^4(t) \quad (3)$$

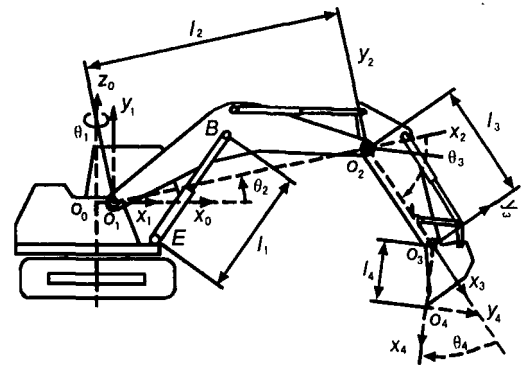


图 3 液压挖掘机工作装置运动学模型

Fig. 3 Kinematics model of the hydraulic excavator's working mechanism

2.2 工作装置的动力学模型

挖掘作业时, 挖掘机工作装置在铅直面内运动, 故可设转角 $\theta_1 = 0$ 。每个工作臂的动力学方程可根据拉格朗日方程导出。本文以动臂为例, 设斗杆和铲斗固定, 动臂缸无杆腔和有杆腔的压力分别为 P_1 和 P_2 , 面积分别为 A_1 和 A_2 , $T(t, \theta_2, \dot{\theta}_2)$ 为含外载和摩擦阻力矩的总干扰力矩, x_{bm}, y_{bm} 为大臂重心在 $o_2 \{x_2, y_2, z_2\}$ 中的坐标, x_{st}, y_{st} 为斗杆重心在 $o_3 \{x_3, y_3, z_3\}$ 中的坐标, x_{sk}, y_{sk} 为铲斗重心在 $o_4 \{x_4, y_4, z_4\}$ 中的坐标值; I_2, I_3, I_4 分别为动臂、斗杆和铲斗相对于其重心的转动惯量; m_2, m_3, m_4 分别为动臂、斗杆和铲斗的质量, m_L 为铲斗中未知负载的质量, 则动臂相对于铰点 O_1 的动力学方程为:

$$(D_c + m_L l_c^2) \ddot{\theta}_2 + G_c(\theta_2) + m_L g l_g(\theta_2) = \frac{\partial x_c}{\partial \theta_2} (P_1 A_1 - P_2 A_2) - T_n(t, \theta_2, \dot{\theta}_2) \quad (4)$$

式中, $D_c = I_2 + m_2 (x_{bm} + l_2)^2 + m_2 y_{bm}^2 + I_3 + m_3 (x_{st} + l_3 + l_2 c_3)^2 + m_3 (y_{st} + l_2 s_3)^2 + I_4 + m_4 (x_{sk} + l_3 + l_2 c_3 c_4 + l_2 s_3 s_4 + l_4)^2 + m_4 (y_{sk} - l_3 s_4 - l_2 l_3 c_4 + l_2 s_3 c_4)^2$
 $G_c = m_2 g l_c c_2 + m_2 g x_{bt} c_2 - m_2 g y_{bt} s_2 + m_3 g (l_2 c_2 + l_3 c_{23}) + m_3 g (x_{st} c_{23} - y_{st} s_{23}) + m_4 g l_2 c_2 + m_4 g l_3 c_{23} - m_4 g l_4 c_{234} + m_4 g x_{bt} c_{234} - m_4 g y_{bt} s_{234}$
 其中, c_2, c_{23}, s_{234} 为 $\cos(\theta_2)$ 、 $\cos(\theta_2 + \theta_3)$ 、 $\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ 。

2.3 电液比例系统模型^[5, 6]

液压挖掘机的油缸由换向阀控制, 换向阀的开口量由比例阀输出油压大小所确定, 而比例阀减压

阀输出的油压由控制器输出的电压大小所决定. 液压系统模型如图 4 所示.

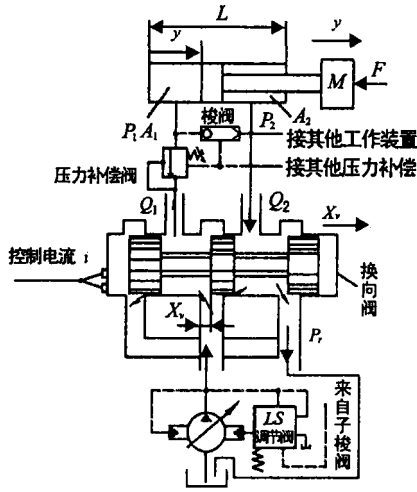


图 4 LUDV 液压系统示意图

Fig. 4 Sketch map of the LUDV hydraulic system

设:

- (1) 比例阀为对称三位四通阀, 阀内流体为紊流;
- (2) 忽略管道压力损失及其动态特性;
- (3) 比例阀的死区对称.

以动臂阀控液压缸为例, 其动力学模型为:

$$\begin{aligned} \frac{V_1(x_L)}{\beta_e} \dot{P}_1 &= -A_1 \dot{x}_L + Q_1 = -A_1 \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 + Q_1 \\ \frac{V_2(x_L)}{\beta_e} \dot{P}_2 &= A_2 \dot{x}_L - Q_2 = A_2 \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 - Q_2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $V_1(x_L) = V_{h1} + A_1 x_L$, $V_2(x_L) = V_{h2} - A_2 x_L$, 为两个腔的控制容积, V_{h1} 和 V_{h2} 分别为进油路和回油路在 $y=0$ 时的容积, β_e 为有效体积模量, Q_1 和 Q_2 分别为进入和流出液压缸的流量, 设 P_r 为回油压力, P_{LS} 和 P_h 分别为 LS 阀和压力补偿阀弹簧的压力, 由 LUDV 系统工作原理^[7]可得:

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{d1} W x_v f(\Delta P_1) \\ &= \begin{cases} C_{d1} W x_v \sqrt{P_{LS} - P_h} & x_v \geq 0 \\ C_{d1} W x_v \sqrt{P_1 - P_r} & x_v < 0 \end{cases} \\ Q_2 &= C_{d2} W x_v f(\Delta P_2) \\ &= \begin{cases} C_{d2} W x_v \sqrt{P_2 - P_r} & x_v \geq 0 \\ C_{d2} W x_v \sqrt{P_{LS} - P_h} & x_v < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

由于比例阀存在死区, 且试验表明流量增益 C_d 为非线性的^[3], 如图 5 所示, 设比例阀的净开口量

为:

$$x_{nav} = \begin{cases} x_v - x_d, & x_v \geq x_d \\ 0, & -x_d \leq x_v \leq x_d \\ x_v + x_d, & x_v < -x_d \end{cases} \quad (7)$$

其中 x_d 为阀的死区, 简便起见, 我们用两条直线来近似阀的流量增益系数, 为了便于控制, 我们将阀的流量 Q 分为式 (8) 所表示的两部分, 其中 Q_M 为简化了的流量映射函数, $\bar{Q}$ 为流量映射的模型误差, $\bar{Q}$ 的影响将通过一定的鲁棒反馈来进行处理. 而 Q_M 的表达式为式 (9), 对于一定的阀位移点而言, C_{d1} 和 C_{d2} 为常量.

$$Q(x_v, \Delta P) = Q_M(x_v, \Delta P) + \bar{Q}(x_v, \Delta P) \quad (8)$$

$$Q_{1M} = C_{d1} W f(\Delta P_1) x_{nav} \quad (9)$$

$$Q_{2M} = C_{d2} W f(\Delta P_2) x_{nav}$$

3 适应鲁棒控制器的设计 (Design of the adaptive robust controller)

由挖掘机模型可知, 对挖掘机进行控制的主要难点在于: (1) 系统的动力学是强非线性的; (2) 系统参数存在不确定性, 如惯性负载 m_L 、液压系统体积模量 β_e 的不确定性; (3) 外界干扰和未建模的摩擦力引起的干扰 T_n ; (4) 方向阀的死区、非线性流量增益等.

为了解决上述问题, 本文采用建立在自适应鲁棒控制器基础上的非连续映射来处理系统的非线性及参数的不确定性, 利用图 5 中以通过坐标原点且与 x 轴成 45° 的直线为对称轴, 增益曲线的对称曲线对阀的死区进行补偿, 并利用鲁棒反馈来补偿流量映射误差. 主要考虑由未知载荷 m_L 、体积模量 β_e 和集中干扰 T_n 三个不确定参数, 设 $q_1 = \frac{1}{1 + (l_c/J_c) m_L}$,

$q_2 = \frac{T_n}{J_c + m_L l_c}$, $q_3 = \beta_e$, 并且 $q = [q_1, q_2, q_3]^T$, 则式 (4)、(5) 可以变换为以 q 为参数的线性函数:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_2 &= \frac{q_1}{J_c} \left[\frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} (P_1 A_1 - P_2 A_2) - G_c(\theta_2) \right] + \frac{q_1}{l_c} g l_s \\ &\quad - \frac{1}{l_c} g l_s + q_2 + \bar{T}(t, \theta_2, \dot{\theta}_2) \\ \dot{P}_1 &= \frac{\theta_3}{V_1} \left(-A_1 \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 + Q_{1M} + \bar{Q}_1 \right) \\ \dot{P}_2 &= \frac{\theta_3}{V_2} \left(A_2 \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 - Q_{2M} - \bar{Q}_2 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\bar{T} = \frac{T(t, \theta_2, \dot{\theta}_2) - T_n}{J_c + m_L l_c}$, $q_{min} \leq q \leq q_{max}$, $|\bar{T}| \leq \delta_T$,

$|\bar{Q}_1| \leq \delta_{Q_1}, |\bar{Q}_2| \leq \delta_{Q_2}$, 且 $q_{\min}, q_{\max}, \delta_T, \delta_{Q_1}, \delta_{Q_2}$ 已知. 设 $\hat{q}$ 和 $\bar{q}$ 为 q 的估计值和估计误差, 接下来寻找自适应法则 (12), 式中 Γ 为对角矩阵, τ 为自适应函数, $Pw_j(\cdot)$ 为非连续投影映射.

$$\dot{\hat{q}} = Pw_j(\Gamma \tau) \quad (11)$$

(1) $P_1 A_1 - P_2 A_2 = P_L$ 为方程 (10) 的输入, 因此要寻找有效输入 P_{Ld} 使得输出误差 $\bar{z} = \theta_2 - \theta_{2d}$ 趋近于零, 以保证轨迹跟踪精度. 设:

$$\begin{aligned} \theta_{2r} &= \theta_{2d} - k_1 \bar{z}, \quad \ddot{\theta}_{2r} = \ddot{\theta}_{2d} - k_1 \dot{\bar{z}}, \quad \bar{z}_2 = \theta_{2d} - \theta_{2r} \\ \phi_2 &= \left[\frac{1}{J_c} \left(\frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} P_{Lda} - G_c \right) + g l_s / l_b^2, 1, 0 \right]^T \end{aligned}$$

由式 (10) 并根据 Lyapunov 函数, 可得:

$$\begin{aligned} P_{Ld} &= P_{Lda} + P_{Lds}, \quad \tau_2 = \phi_2 \bar{z}_2 \\ P_{Lda} &= \frac{\partial \theta_2}{\partial x_L} \left[G_c(\theta_2) + \frac{J_c}{q_1} \left(-\frac{\hat{q}_1}{l_b} g l_s + \frac{1}{l_b} g l_s - \hat{q}_2 + \ddot{q}_r \right) \right] \\ P_{Lds} &= P_{Lds1} + P_{Lds2} \\ P_{Lds1} &= -\frac{J_c}{q_{1\min}} \frac{\partial \theta_2}{\partial x_L} (k_{2sl} + k_2) \bar{z}_2, \quad k_2 > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

(2) 设 $\bar{z} = P_L - P_{Ld}$ 为输入误差, 接下来将推出实际控制法则使 $\bar{z}$ 趋于零. 由式 (10) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{z}} &= \dot{P}_L - \dot{P}_{Ld} = q_b \left[-\left(\frac{A_1}{V_1} + \frac{A_2}{V_2} \right) \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{A_1}{V_1} Q_{1M} + \frac{A_2}{V_2} Q_{2M} \right) + \left(\frac{A_1}{V_1} \bar{Q}_1 + \frac{A_2}{V_2} \bar{Q}_2 \right) \right] \\ &\quad - \dot{P}_{Ldc} - \dot{P}_{Ldu} \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\dot{P}_{Ldc} = \frac{\partial P_{Ld}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 + \frac{\partial P_{Ld}}{\partial \dot{\theta}_2} \ddot{\theta}_2 + \frac{\partial P_{Ld}}{\partial t}$ 为 P_{Ld} 的计算部分,

通过鲁棒反馈处理 $\dot{P}_{Ld}$ 的误差部分 $\dot{P}_{Ldu} = \frac{\partial P_{Ld}}{\partial \theta_2} \left[-\frac{1}{J_c} \cdot \right.$

$$\left. \left(\frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} P_L - G_c(\theta_2) \right) \bar{q}_1 - \frac{1}{l_b} g l_s \bar{q}_1 - \bar{q}_2 + \ddot{T} \right] + \frac{\partial P_{Ld}}{\partial q} \dot{\hat{q}}.$$
 在式

(13) 中, $\frac{A_1}{V_1} Q_{1M} + \frac{A_2}{V_2} Q_{2M} = Q_L$ 可视为有效输入, 本过程将推导出 Q_L 的理想输入 Q_{Ld} , 使 P_L 跟踪步骤 (1) 中推出的理想控制函数 P_{Ld} . 控制函数 Q_{Ld} 和自适应函数 τ_3 分别为:

$$\begin{aligned} Q_{Ld}(\theta_2, \dot{\theta}_2, P_1, P_2, \hat{q}, t) &= Q_{Lda} + Q_{Lds} \\ \tau_3 &= \tau_2 + \phi_3 \bar{z}_3 \\ Q_{Lda} &= -\frac{1}{q_3} Q_{Lde} \\ Q_{Lds} &= Q_{Lds1} + Q_{Lds2} \end{aligned}$$

$$Q_{Lds1} = -\frac{1}{q_{3\min}} (k_3 + k_{3sl}) \bar{z}_3, \quad k_3 > 0 \quad (14)$$

其中 $\tau_3 = \tau_2 + \phi_3 \bar{z}_3$, $Q_{Lde} = \frac{1}{J_c} \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \bar{z}_3 \hat{q} - \hat{q}_3 \left(\frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \cdot$
 $\theta_2 - \dot{P}_{Ldc}, \phi_3 = \left[\frac{1}{J_c} \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \bar{z}_3 - \frac{\partial P_{Ld}}{\partial \theta} \left[\frac{1}{J_c} \left(\frac{\partial x_{LQ}}{\partial \theta_2} P_L - G_c(\theta_2) \right) + \right. \right.$
 $\left. \left. \frac{1}{l_b} g l_s \right], \frac{-\partial P_{Ld}}{\partial \theta_2}, -\left(\frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) \frac{\partial x_L}{\partial \theta_2} \theta_2 + Q_{Lda} \right]^T$ 在得到 Q_{Ld} 的值后, 由式 (6)、(9) 便可以计算出理想的阀芯净位移为:

$$x_{nav} = \frac{Q_{Ld}(\theta_2, \dot{\theta}_2, P_1, P_2, \hat{q}, t)}{\frac{A_1}{V_1} C_{d1} f(\Delta P_1) + \frac{A_2}{V_2} C_{d2} f(\Delta P_2)} \quad (15)$$

设阀芯的位移与控制电压 u 成正比, 即 $x_v = Ku$, 则:

$$u = Kx_v = \begin{cases} K(x_{nav} + x_d) & x_{nav} \geq 0 \\ 0 & x_{nav} = 0 \\ K(x_{nav} - x_d) & x_{nav} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

令自适应法则 (11) 中的 $\tau = \tau_3$, 选择 k_{2sl}, k_{3sl} 使得 $k_{2sl} \geq \frac{1}{2} \|\Gamma \phi_2\|^2$, $k_{3sl} \geq \frac{1}{2} \|\Gamma \phi_2\|^2$, 那么使用控制法则 (16) 便可以达到较好的控制精度.

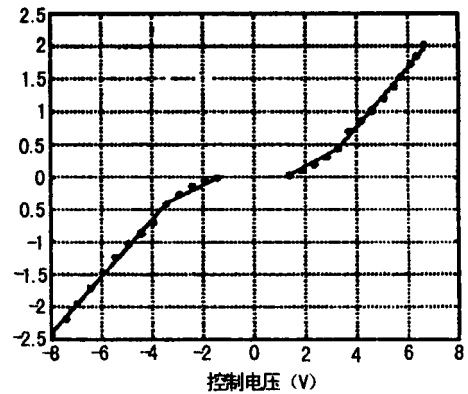


图 5 比例阀流量增益的非线性特性

Fig. 5 Nonlinear characteristics of the proportional valve flow gain

4 试验研究及结论 (Experiment and conclusion)

以湖南山河智能机械股份有限公司的 SWE85 液压挖掘机器人作为试验平台对动臂进行转角控制试验, 控制系统的硬件结构如图 3 所示. 设动臂的目标转角运动以 -2° 为中心、幅值为 40° 的一个正弦曲线, 试验结果如图 6 所示, 结果表明控制器能较好地完成对理想轨迹的跟踪.

本文提出了一种对挖掘机进行运动轨迹控制的方法,能够保证必要的精度.在本系统的基础上进行通讯系统的设计,便可以实现挖掘机的遥控操作;在此基础上解决挖掘机的运动规划问题,便可以实现全自动化挖掘.

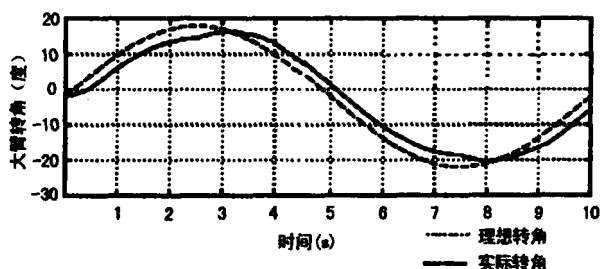


图 6 大臂转角控制试验

Fig. 6 Experiment of the boom's angle control

参考文献 (References)

- [1] Bradley D, Seward D. The development, control and operation of an autonomous robotic excavator[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1998, 21(1): 73 - 97.

- [2] Ha Q, Santos M, Nguyen Q. Robotic excavation in construction automation[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2002, (1): 20 - 28.
- [3] Yao B. High performance adaptive robust control of nonlinear systems: a general framework and new schemes[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control[C]. 1997. 2489 - 2494.
- [3] 朱湘翼.机械铲式挖掘机机器人化的探讨[J].机器人, 1995, 17(5): 316 - 320.
- [4] 孙守迁,冯培恩,金永昕.微机操纵液压挖掘机反铲典型作业循环过程路径规划及运动学研究[J].工程机械, 1991, 15(5): 16 - 20.
- [5] 李兰生,邹占江.液压挖掘机工作装置专家模糊控制系统的研究[J].矿山机械, 1998, 4(3): 26 - 28.
- [6] 罗安.智能电液比例位置伺服系统[J].组合机床与自动化加工技术, 1996, 12(5): 10 - 14.
- [7] 张铁,朱明才.工程建设机械机电液一体化[M].山东:石油大学出版社, 2000.

作者简介:

- 张海涛 (1971-),男,工程师,硕士研究生.研究领域:矿山机械,工程机械,液压传动与控制.
- 何清华 (1946-),男,教授,博士生导师.研究领域:液压工程机械,凿岩机器人技术.

(上接第 112 页)

5 结论 (Conclusion)

本文借助流体动力计算软件 CFX 和 Matlab 对水下滑翔机器人的阻力、流场及运动特性进行联合仿真,结果表明,这种直观而快速的设计方法给水下滑翔机器人方案设计带来较大的便利.应该指出的是,还可以利用 CFX 与 USAERO 软件进一步对水下滑翔机器人的水动力系数进行模拟仿真.

通过 CFX 和 Matlab 的联合仿真,我们得到了比初步方案更为优越的水下滑翔机器人外形,这为我们在方案设计阶段把握水下滑翔机器人载体的外形对载体运动的影响,从而实现对载体的外形修正提供了一种较为直观的手段.

致谢

本文在完成过程中,得到了吴利红博士和康涛硕士的大力帮助,在此表示诚挚的谢意!

参考文献 (References)

- [1] 蒋新松,封锡盛,等.水下机器人[M].沈阳:辽宁科学技术出版社, 2000.
- [2] 陈厚泰.潜艇操纵性[M].北京:国防工业出版社, 1981.

- [3] 施生达.潜艇操纵性[M].北京:国防工业出版社, 1995.
- [4] 孙元泉,马运义,邓志纯,等.潜艇和深潜器的现代操纵理论与应用[M].北京:国防工业出版社, 2001.
- [5] 邵世明,赵连恩,朱念昌.船舶阻力[M].北京:国防工业出版社, 1992.
- [6] 徐燕侯,过明道,徐立功,等.流体动力学[M].北京:科学出版社, 2002.
- [7] 张宇文.鱼雷总体设计原理与方法[M].西安:西北工业大学出版社, 1998.
- [8] 燕奎臣,等.深海作业型自治水下机器人总体方案设计报告(载体分系统设计分册)[R].沈阳:中科院沈阳自动化研究所科技报告, 2003.
- [9] 袁学庆,等.自治水下机器人阻力的数值模拟与试验研究[R].沈阳:中科院沈阳自动化研究所, 2003.

作者简介:

- 胡克 (1976-),男.研究领域:水下机器人结构设计与水动力分析.
- 俞建成 (1976-),男.研究领域:水下机器人设计,导航与控制.
- 张奇峰 (1979-),男.研究领域:水下机器人设计,导航与视觉.