

基于反步控制的被动力伺服系统全状态反馈控制

张彪, 赵克定

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对被动力伺服系统的多余力矩问题, 提出一种基于反步控制的全状态反馈控制方法, 并利用 Lyapunov 函数的稳定性定理保证了设计控制器的稳定性. 与以往解决加载多余力矩时不同, 该控制器不仅使用加载系统各状态量, 而且使用了承载系统的各状态量, 在建立系统非线性模型的基础上, 将系统方程重组为多个虚拟子系统, 利用反步控制思想对每个虚拟系统设计虚拟控制量, 进而一步步反向推导出含有加载系统和承载系统各个状态量的非线性控制器. 因此, 该控制器能够更加准确地抑制多余力矩, 仿真结果也证明了该控制器的有效性.

关键词: 全状态反馈控制; 多余力矩; 反步控制; 被动力伺服系统

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0082-05

Total State Feedback Control on Passive Force Control System Based on Backstepping Theory

ZHANG Biao, ZHAO Keding

(School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the extra torque of passive force control system, a total state feedback controller is proposed based on backstepping theory. And the stability of the controller is ensured by Lyapunov stability theory. The proposed method employs the parameters of loading system as well as the parameters of load bearing system to differ from the previous methods for dealing with extra torque. A nonlinear model of the system is established to construct the new virtual subsystems, then the backstepping theory is introduced to design the dummy controllers for each dummy subsystem, the nonlinear controller containing all states of loading system and load bearing system is transposed to restrain the extra torque step by step. The simulated results illustrate the effectiveness of the developed controller.

Keywords: total state feedback control; extra torque; backstepping control; passive force control system

被动力伺服系统是一种地面半实物仿真设备, 主要用于对运动的目标物体施加各种载荷谱, 以模拟其在运行过程中所受的各种动力力矩载荷(又称加载)^[1]. 由于被动力伺服系统即加载系统和其加载对象承载系统之间存在强耦合作用, 被动力伺服系统受承载系统的强位置干扰, 因此产生较大的多余力矩^[2], 严重影响了被动力伺服系统的动静态品质. 目前, 国内外对被动力伺服系统的研究主要集中在

解决多余力矩上, 研究抑制多余力矩问题的文献很多, 但主要集中在两方面: 一方面是从结构上考虑设计特殊的结构以减小多余力矩^[3]; 另一方面是利用各种控制策略设计出有针对性的控制器以抑制多余力矩. 例如, 文献[4-5]提出一种小波逼近和神经网络结合的复合式控制及速度、加速度补偿. 此外, 还有 H_∞ 、 μ 综合等鲁棒控制^[6-7]、神经元控制^[8]、QFT 控制^[9] 和模糊控制^[10] 等. 由于多余力矩的形成主要

与承载系统的各参变量有关,而以往的文献仅考虑到承载系统的速度、加速度因素,所以很难有效消除多余力矩。

最近几年发展起来的反步控制^[11]由于能解决耦合、非线性等问题,因此越来越受到国内外学者的重视。本文基于反步控制思想,同时考虑承载系统的各状态变量,建立了一种全状态反馈控制器。

1 被动力伺服系统描述

本文所研究的电液被动力伺服系统由加载系统和承载系统两大部分组成。系统在不考虑力矩传感器刚度的情况下,其结构原理图如图1所示。图中右侧是模拟加载对象系统即承载系统,左侧是用于给承载系统加载的系统。在被动力伺服系统工作过程中,承载系统和加载系统分别跟踪承载系统转角位置的指令信号和加载力矩信号,并利用角位移传感器的和扭矩传感器的测量信号来实现闭环控制。

对于加载系统和承载系统有如下方程

$$\dot{T}_g = G(\omega_j - \omega_d) \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_j = a_1 P_j - a_2 \omega_j - a_3 T_g \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_d = b_1 P_d - b_2 \omega_d + b_3 T_g \quad (3)$$

$$\dot{P}_j = c_1 x_j (P_s - \text{sgn}(x_j) P_j)^{1/2} - c_2 \omega_j - c_3 P_j \quad (4)$$

$$\dot{P}_d = d_1 x_d (P_s - \text{sgn}(x_d) P_d)^{1/2} - d_2 \omega_d - d_3 P_d \quad (5)$$

其中

$$\omega_j = \dot{\theta}_j; \quad \omega_d = \dot{\theta}_d; \quad a_1 = \frac{D_j}{J_j}; \quad a_2 = \frac{B_d}{J_j}$$

$$a_3 = \frac{1}{J_j}; \quad b_1 = \frac{D_d}{J_d}; \quad b_2 = \frac{B_j}{J_d}; \quad b_3 = \frac{1}{J_d}$$

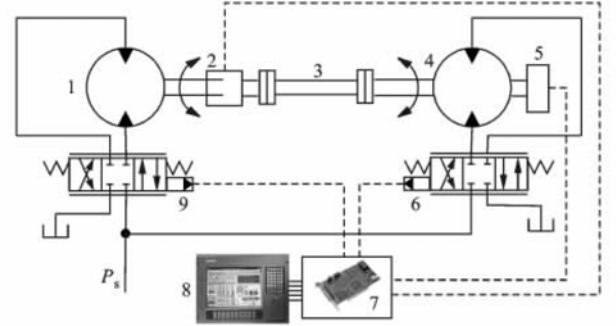
$$c_1 = \frac{4\beta_c C_w}{V_j}; \quad c_2 = \frac{4\beta_c D_j}{V_j}; \quad c_3 = \frac{4\beta_c C_j}{V_j}$$

$$d_1 = \frac{4\beta_c C_w}{V_d}; \quad d_2 = \frac{4\beta_c D_d}{V_d}; \quad d_3 = \frac{4\beta_c C_d}{V_d}$$

$$C_w = C_v \omega \left(\frac{1}{\rho} \right)^{1/2}$$

式中: ω_d 为舵机马达角速度; x_d 为舵机伺服阀阀芯的开口量; P_d 为舵机马达的负载压力; D_d 为舵机马达的理论排量; θ_d 为舵机马达轴的转角; C_d 为舵机马达总的泄漏系数; V_d 为舵机马达腔有效容积; J_d 为舵机等效转动惯量; B_d 为舵机端黏性阻尼系数; C_v 为流量系数; ω 为伺服阀面积梯度; ω_j 为加载马达角速度; x_j 为加载伺服阀阀芯的开口量; P_s 为油源压力; P_j 为加载马达的负载压力; D_j 为加载马达的理论排量; θ_j 为加载马达轴的转角; C_j 为加载马

达总的泄漏系数; V_j 为加载马达腔有效容积; β_c 为有效体积弹性模量; J_j 为加载等效转动惯量; T_g 为输出力矩; B_j 为加载端黏性阻尼系数; G 为连接环节刚度; ρ 为液体密度。



1:加载马达;2:扭矩传感器;3:连接轴;4:承载马达;5:位移传感器;6:承载伺服阀;7:AD/DA卡;8:计算机;9:加载伺服阀

图1 电液被动力伺服系统原理图

2 全状态反馈控制器设计

定义误差量为

$$e_1 = T_g - T_g^* \quad (6)$$

式中: T_g^* 为输出力矩的期望值。对子系统式(1)以 T_g 为控制输出,以 $\omega_j - \omega_d$ 为虚拟控制输入,取 Lyapunov 函数 V_1 并求得

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (G(\omega_j - \omega_d) - \dot{T}_g^*) \quad (7)$$

取虚拟控制量

$$\omega_j^* - \omega_d^* = \frac{1}{G} (-f_1 e_1 + \dot{T}_g^*) \quad (8)$$

设误差

$$e_2 = \omega_j - \omega_d - (\omega_j^* - \omega_d^*) \quad (9)$$

对式(2)和式(3)重新组合后得

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_j - \dot{\omega}_d &= a_1 P_j - b_1 P_d - a_2 \omega_j + \\ &\quad b_2 \omega_d - a_3 T_g - b_3 T_g \end{aligned} \quad (10)$$

对于式(10),以 $\omega_j - \omega_d$ 为虚拟控制输出,以 $a_1 P_j - b_1 P_d$ 为虚拟控制输入,取 Lyapunov 函数 V_2 并求得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = \dot{V}_1 + e_2 (a_1 P_j - a_2 \omega_j - a_3 T_g - \\ &\quad (b_1 P_d - b_2 \omega_d + b_3 T_g) - (\omega_j^* - \omega_d^*)) = \dot{V}_1 + \\ &\quad e_2 (a_1 P_j - b_1 P_d - a_2 \omega_j + b_2 \omega_d - a_3 T_g - \\ &\quad b_3 T_g - \frac{1}{G} (-f_1 (G(\omega_j - \omega_d) - \dot{T}_g^*) + \ddot{T}_g^*)) \end{aligned} \quad (11)$$

取虚拟控制量

$$a_1 P_j^* - b_1 P_d^* = -f_2 e_2 - (-a_2 \omega_j + b_2 \omega_d -$$

$B_d=B_j=8 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\beta_e=7 \times 10^8 \text{ N}/\text{m}^2$. f_1 、 f_2 、 f_3 的取值由实际仿真调试来确定,取值不同会影响系统的控制性能,因此取 $f_1=2 \times 10^5$, $f_2=2.5 \times 10^6$, $f_3=2.55 \times 10^6$.

为检验所设计的控制器对干扰抑制作用的效果,对承载系统的干扰抑制进行仿真,结果如图3、图4所示.其中加载系统的力矩输入为0,承载系统的运动曲线(见图3)为对加载系统的干扰.从图4中可以看出,使用本文设计的控制器控制加载子系统时,干扰输出峰值由原来的 $60 \text{ N} \cdot \text{m}$ 降为 $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右,99%的多余力矩得到了抑制.

图5为PID控制器和本文设计的控制器,其中加载系统以幅值为 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、频率为 15 Hz 的信号进行加载,承载系统以幅值 $\pm 5^\circ$ 、频率为 15 Hz 做曲线运动.可以看出,当加载频率为 15 Hz 时,误差幅值达 $16 \text{ N} \cdot \text{m}$,相位滞后严重,说明使用PID控制的效果很差,而本文设计的控制器的幅值误差只有 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$,相位也基本无滞后,可见本文设计的

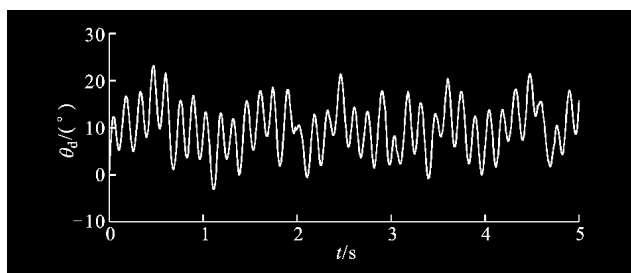
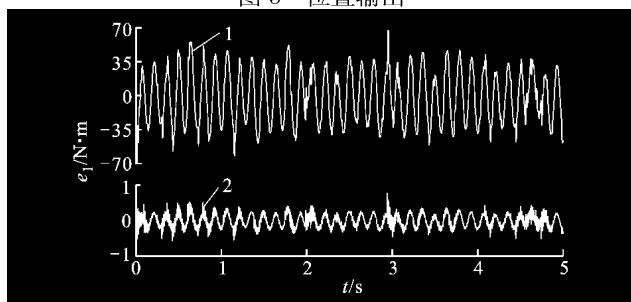


图3 位置输出



1:纯多余力矩曲线;2:设计控制输出多余力矩曲线

图4 多余力矩曲线

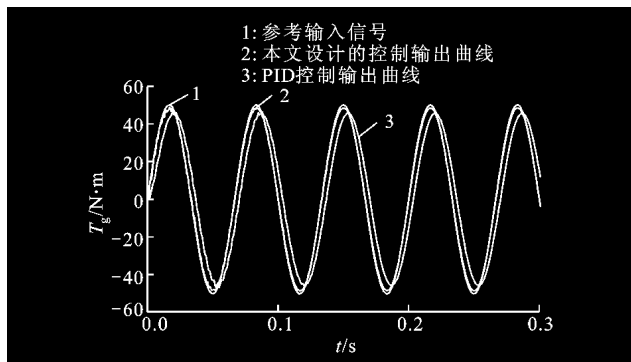


图5 PID与本文控制器控制时的力跟踪曲线

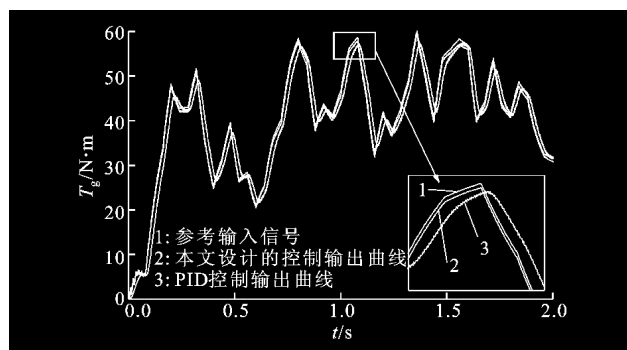


图6 PID与反步控制器对任意信号输入时的控制输出

控制器能够达到快速跟踪的性能要求.

为验证本文设计的控制器对非线性动态加载的控制性能,对任意信号输入加载的仿真结果如图6所示.使用PID控制器时,最大误差值高达 $7 \text{ N} \cdot \text{m}$,相位也有很大滞后,而使用本文设计的控制器时输出最大误差值只有 $0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右,相位基本无滞后,因此本文设计的控制器可以满足对任意信号的跟踪要求.

4 结论

本文建立了被动力伺服系统的非线性数学模型,在此基础上推导出一种基于反步控制的全状态反馈控制器.与以往解决加载时的多余力矩不同,该控制器不仅使用加载系统的各状态量,而且使用了承载系统的各状态量,能更加准确地补偿多余力矩.仿真结果表明,所设计的控制器能有效地解决被动力伺服系统的多余力矩问题,并且具有很好的快速跟踪性.值得注意的是,本文给出的是精确模型基础上的控制器,对于参数摄动的控制将是今后研究的方向.

参考文献:

- [1] 李洪人. 液压控制系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1981:55-58.
- [2] 华清. 电液负载模拟器关键技术的研究[D]. 北京:航空航天大学机械工程学院, 2001.
- [3] 李阁强. 电液负载模拟器关键技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2006.
- [4] YUAN Zhaohui, WU Jiande, LIU Weiguo. Hybrid control of load simulator for unmanned aerial vehicle based on wavelet networks [C]// Proceedings of the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2003:715-719.
- [5] 焦宗夏, 华清, 王晓东, 等. 电液负载模拟器的复合控制[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12):34-37.

- JIAO Zongxia, HUA Qing, WANG Xiaodong, et al. Hybrid control on the electro-hydraulic load simulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 39(12): 34-37.
- [6] 袁锐波, 赵克定, 李阁强, 等. 基于混合灵敏度方法的电液负载模拟器的控制研究[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(5): 537-541.
- YUAN RuiBo, ZHAO Keding, LI Geqiang, et al. Control of load simulator based on mixed sensitivity method[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(5): 537-541.
- [7] LI Geqiang, CAO Jian, ZHANG Biao, et al. Design of robust controller in electro-hydraulic load simulator [C]// Proceedings of 2006 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian: Dalian University of Technology, 2006: 779-784.
- [8] WANG Mingyan, GUO Ben, GUAN Yudong, et al. Design of electric dynamic load simulator based on recurrent neural networks [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(2): 207-210.
- [9] YOONSU N. QFT force loop design for the aerodynamic load simulator [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(4): 1384-1392.
- [10] LEE S Y, CHO H S. A fuzzy controller for an aerodynamic load simulator using phase plane method [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(6): 791-801.
- [11] MIROSLAV K, IOANNIS K P, PETAR V K. Non-linear design of adaptive controllers for linear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(4): 738-752.
- (编辑 管咏梅)

首届亚洲计算传热与计算流体国际会议在我校召开

2007年10月18日上午,首届亚洲计算传热与计算流体会议在我校南洋酒店国际会议厅开幕。来自亚洲9个国家和地区20多所大学的150名该领域知名学者和代表,围绕计算传热与计算流体的现状、未来及工程应用等问题展开了交流、讨论。国家自然科学基金委工程三处刘涛处长,我校卢天健副校长及国际处、科技处、能源与动力工程学院负责人等出席了开幕式。我校陶文铨院士主持大会开幕式,刘涛处长、卢天健副校长分别在开幕式上致辞,他们表示,本次会议的召开有利于促进亚洲计算传热理论与应用领域学者之间的相互沟通,进一步提高我国在计算传热理论及应用方面的研究学术水平和在该领域的国际学术地位。在我校召开这样高水平的国际会议,为提高我校在国际计算传热学领域的国际知名度、加强我校和国际知名大学的合作交流提供了一个宽广平台。在为期5天的学术交流中,我校陶文铨院士,国际计算流体与计算传热的主要创始人、英国皇家工程院院士、帝国理工大学的D. B. Spalding教授,美国国家自然科学基金会热科学部前任主任Ortega教授,美国普林斯顿大学、上海大学长江学者钱跃宏教授等12位知名学者分别作了大会主旨报告。大会对提交会议的130余篇论文进行了分组报告,各国代表分别介绍了各自在计算传热与计算流体相关领域的最新研究成果,并对计算传热与计算流体的未来发展进行了富有建设性的探讨。

(来源:交大新闻网 <http://xjtunews.xjtu.edu.cn>)