

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2014.10.018

基于干扰观测器和最优 LQR 的电 液压系统的复合控制研究

吴常红

(吉林铁道职业技术学院 汽车工程系, 吉林 吉林 132100)

摘要:随着电液压系统在自动控制领域的广泛应用,复杂工艺环境对其性能的要求也越来越高,但是模型不确定性和负载力矩干扰的存在阻碍了系统性能的进一步提升。针对干扰观测器(Disturbance Observer, DOB)在提高控制系统鲁棒性方面的优势,以及复合控制器在改善伺服系统跟踪性能方面的能力,提出了一种双环控制结构,即内环 DOB 与外环复合控制器相结合的方式。同时,在构造外环复合控制器时,采用状态空间设计的方法,并借助于最优 LQR 理论。计算机仿真结果表明,相比传统控制方案,所提出的双环控制方案可实现电液压系统更精确的位置跟踪以及针对建模误差和负载力矩干扰的更强鲁棒性。此外,该研究控制方案的结构较为简单,易于工程实现。

关键词:电液压;干扰观测器;复合控制;LQR;鲁棒性

中图分类号:TH137;TP273 文献标志码:B 文章编号:1000-4858(2014)10-0077-05

Compound Control of Electro-hydraulic System Based on Disturbance Observer and Optimal LQR

WU Chang-hong

(Department of Automotive Engineering, Jilin Railway Vocational and Technology College, Jilin, Jilin 132100)

Abstract: With that electro-hydraulic systems are more and more widely used in many automatic control areas, more and more high performances of them are required for complicated process environment, however the improvement of system performances is restricted by model uncertainties and loading moment disturbances. Because the disturbance observer (DOB) possesses the advantage in enhancing the robustness of control system, and the compound controller has the ability of improving the tracking performance of servo system, one control scheme with a two-loop structure is proposed by using the cooperation of inner-loop DOB and outer-loop compound controller. Moreover, the outer-loop compound controller is designed in state-space and by using optimal LQR theory. Simulation results show that, compared with traditional control schemes, the proposed two-loop control scheme can achieve more accurate tracking of electro-hydraulic system and stronger robustness against model errors and loading moment disturbances. In addition, its structure is simpler, and therefore it is easy to be implemented in engineering.

Key words: electro-hydraulic, disturbance observer, compound control, LQR, robustness

引言

电液压系统综合了电气和液压两方面的优点,既具有快速易调和高精度的响应能力,又能控制大惯量并实现大功率的运动输出,因而在机械制造业、采矿、环境、电力、航空航天等自动控制领域得到了广泛

的应用^[1-3]。然而,由于系统建模不确定性和负载干

收稿日期:2014-03-03

作者简介:吴常红(1978—),女,吉林吉林人,讲师,硕士,研究方向为汽车检测与机械控制。

扰力矩的存在,再加上目前运行环境的日趋复杂,导致电液系统的控制性能受到很大的影响,一些传统的线性控制方法,如PID控制等,很难使其控制系统的性能满足工艺环境的需求,因此有必要开展电液系统新型伺服控制技术的研究。

干扰观测器(Disturbance Observer, DOB)^[4]是解决以上问题最有效并简单实用的方法,其基本设计思想是通过测量实际系统输出与名义模型输出之间的差异,估计出当前的扰动水平,并将此估计值补偿于控制系统中,以达到抑制干扰的目的。DOB具有良好的抗干扰性能,可以提高控制系统针对负载力矩干扰、建模误差和参数小范围扰动等不确定性的鲁棒性,因而得到了广泛的应用,尤其是在各类伺服设备中^[5-7]。本研究将引入基于DOB的内环控制,将其用于电液系统鲁棒控制器的构造之中。

在一般的反馈闭环控制系统中,增加一个或多个前馈开环补偿回路就组成了复合控制系统。实践证明按照不变性原理设计的复合控制系统,具有控制精度高、系统的结构简单、可靠性好等特点。而且,复合控制很好地解决了一般反馈控制系统中减少误差与保持稳定性之间的矛盾。因此,当复合控制技术应用于伺服系统中时,可以实现位置指令的高速高精度跟踪^[8]。于是,以干扰观测器和复合控制器为主要元素形成的控制方案,既可以解决外界干扰、建模误差以及参数扰动等不确定性对系统的影响,又可以提高跟踪精度,这也是本研究的主要出发点。同时,通过最优LQR(Linear Quadratic Regulator)理论^[9]设计出的反馈控制器可使得二次型目标函数最小化,故而使系统具备良好的综合性能优势,即利用较小的控制消耗得到理想的状态收敛性能。LQR理论是现代控制理论中发展最早也最为成熟的一种状态空间设计法,LQR可得到状态线性反馈的最优控制规律,易于构成闭环最优控制,因此得到了广泛的研究和应用^[10,11]。本研究将利用最优LQR方法来设计复合控制器的反馈控制器部分。

本研究包括四个方面:①对电液系统(包括实际对象和负载力矩)进行相应的数学描述;②针对所建立的数学模型,设计出内环干扰观测器,并进一步设计基于DOB的外环复合控制器;③通过计算机仿真验证本研究控制方案相比传统控制方案的性能优势;④相关的结论和未来工作。

1 问题描述

电液系统主要由伺服控制器、功率放大器、伺服阀、液压缸、活塞和电位计等部件组成。单通道的电液系统可以描述为如下的数学形式^[12]:

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s\left(\frac{s^2}{\omega^2} + 2\frac{\xi}{\omega}s + 1\right)} \quad (1)$$

式中: ω 为液压固有频率; ξ 为液压相对阻尼系数; K 为开环放大系数。

在研究电液控制系统时,除了要了解其对象特性,还应该注意负载力矩对控制系统性能的影响。负载力矩是电液对象作动时所要克服的全部力矩的总和,它会影响到电液系统的稳定性、精确性以及动态性能,因此我们在分析和设计控制系统时不能将其忽略。

电液对象所受到的负载力矩主要包括惯性力矩 M_J 、库伦摩擦力矩 M_F 、阻尼力矩 M_D 、位置力矩 M_P ,它们折算到液压轴上的表达式如下所示:

$$\begin{cases} M_J = J \frac{d^2 y}{dt^2} \\ M_F = M_{F0} \operatorname{sgn}\left(\frac{dy}{dt}\right) \\ M_D = K_D \frac{dy}{dt} \\ M_P = K_P y \end{cases} \quad (2)$$

式中, J 为伺服系统自身惯量与摆动喷管折算到液压轴上的惯量之和; M_{F0} 为摩擦力矩幅值; K_D 为各运动件折合到液压轴上的总阻尼系数; K_P 为各运动件折合到液压轴上的位置力矩系数。

我们设计电液系统控制器的目的可以归结为:在负载力矩和建模不确定性的影响下,确保电液系统精确、快速地跟踪角位置指令信号。

2 控制方案设计与分析

2.1 DOB设计

干扰观测器的基本设计思想是将外部干扰力矩以及模型不确定性等造成的实际对象与名义模型输出的差异,综合等效到控制输入端,即首先观测出系统的等效干扰,然后在控制输入端引入等量的补偿,从而实现对外部干扰的完全抑制,其结构框图如图1所示。

图1中, $G_n(s)$ 表示名义模型, $Q(s)$ 表示低通滤波器, d 和 \hat{d} 分别表示系统的等效干扰以及干扰估计值。

若将 u 和 d 视为系统输入,由叠加原理可得到系统输出为:

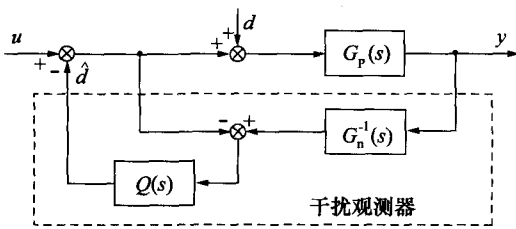


图1 干扰观测器的实现框图

$$y = G_{UY}(s)u + G_{DY}(s)d \quad (3)$$

式中:

$$G_{UY}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} \quad (4)$$

$$G_{DY}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)[1 - Q(s)]}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)]Q(s)} \quad (5)$$

假设低通滤波器 $Q(s)$ 的频带为 f_0 , 则当频率 $f \leq f_0$ 时, $Q(s) \approx 1$, 进一步地, $G_{UY}(s) \approx G_n(s)$, $G_{DY}(s) \approx 0$. 这说明在低频段, DOB 可以使系统的特性与名义模型的特性近似相等, 即对各种干扰及参数不确定性有很强的抑制作用。通过选择 $G_n(s)$ 和设计 $Q(s)$, 可实现在干扰抑制能力和系统鲁棒稳定性之间的折中。

在选择 $G_n(s)$ 时, 可以忽略液压转轴的扭曲变形以及未建模动态等因素的影响, 并将其视为非结构化不确定性, 于是可得到单通道电液对象简化名义模型:

$$G_n(s) = \frac{K_n}{s \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2 \frac{\xi_n}{\omega_n} s + 1 \right)} \quad (6)$$

式中, K_n 、 ω_n 和 ξ_n 表示对象的名义参数。

$Q(s)$ 的设计在 DOB 设计中最为关键, 其设计原则为: 首先, 为了使 $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 正则, $Q(s)$ 的相对阶应不小于 $G_n^{-1}(s)$ 的相对阶。针对形如公式(6)的名义模型, 可以选取:

$$Q(s) = \frac{4\tau s + 1}{\tau^4 s^4 + 4\tau^3 s^3 + 6\tau^2 s^2 + 4\tau s + 1} \quad (7)$$

其中, 参数 τ 为正数, 它决定了滤波器的带宽。

其次, 便是 $Q(s)$ 带宽的设计, 因为参数 τ 决定了 $Q(s)$ 的带宽, 所以可以通过选取参数 τ 的值来实现干扰观测器鲁棒稳定性和干扰抑制能力之间的折衷。将不确定性对象的集合用乘积摄动形式来描述, 即:

$$\tilde{G}_p(s) = [1 + \Delta(s)]G_n(s) \quad (8)$$

式中, $\Delta(s)$ 表示乘性摄动传递函数。根据小增益定理^[13], 可以得到内环系统鲁棒稳定性条件为:

$$|\Delta(j\omega)Q(j\omega)| \leq 1 \quad (9)$$

如上设计的 DOB 虽然可以保证电液系统在建模不确定和负载干扰力矩下的内环鲁棒性, 但仍不能实现其伺服跟踪能力, 因此通常还需要一个基于误差调节的外环控制器。当频率 $f \leq f_0$ 时, $G_{UY}(s) \approx G_n(s)$ 成立, 该特性将作为后续设计外环控制器的主要依据。

2.2 外环复合控制器设计

基于之前所设计的内环 DOB, 提出一种基于状态空间设计的复合控制器, 用以进一步实现电液伺服系统的角位置跟踪功能。引入干扰观测后, 可以将输入 u 到输出 y 的系统近似写为如下状态空间的形式:

$$\dot{x} = A_n x + b_n u \quad (10)$$

其中, 状态向量 $x = [y \quad \dot{y} \quad \ddot{y}]^T$ 。而且,

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\xi_n\omega_n \end{bmatrix}, \quad b_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_n\omega_n^2 \end{bmatrix}$$

引入状态误差向量为:

$$x_e = x_d - x \quad (11)$$

其中, $x_d = [y_d \quad \dot{y}_d \quad \ddot{y}_d]^T$, 而且 y_d 、 \dot{y}_d 和 \ddot{y}_d 分别表示电液系统的角位置指令、角速度指令和角加速度指令。

对系统(10)作变量替换可得:

$$\dot{x}_e = A_n x_e + b_n u_1, \quad (12)$$

其中,

$$u_1 = -u + f \dot{x}_d, \quad f = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_n} & \frac{2\xi_n}{K_n\omega_n} & \frac{1}{K_n\omega_n^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

于是, 原系统(10)的状态跟踪问题便转化为等效系统(12)的状态调节问题, 故而达到简化设计过程的目的。对于系统(12), 基于 LQR 最优控制理论^[9-11], 我们可以为其设计最优反馈控制律, 并使得如下的二次型性能指标最小化。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x_e^T Q x_e + R u_1^2) dt \quad (14)$$

其中, Q 是半正定常数矩阵, R 是正常数。 Q 、 R 分别是对状态误差变量和控制输入量的加权量。

此时, 系统(12)的最优反馈控制律可以表示为:

$$u_1^* = -k^* x_e = -R^{-1} b_n^T P x_e \quad (15)$$

其中, k^* 为最优状态反馈矩阵, P 为正定对称矩阵, 且满足矩阵代数 Riccati 方程:

$$-PA_n - A_n^T P + P b_n R^{-1} b_n^T P - Q = 0 \quad (16)$$

于是, 外环复合控制器的输出可以设计为:

$$u = k^* x_e + f \dot{x}_d \quad (17)$$

控制律中既包含基于状态误差的反馈控制项,同时又包含基于跟踪指令的前馈控制项,故而达到了外环复合控制的目的。而且,很容易证得:复合控制律(17)可使系统的状态误差趋于0,即 $x_e \rightarrow 0$ 。

2.3 控制系统的总体结构

根据2.1节设计的内环DOB以及2.2节设计的外环复合控制器,下面给出电液控制系统的整体结构框图(见图2)。

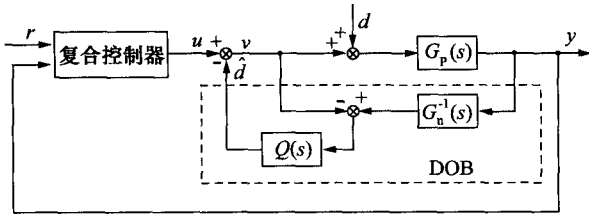


图2 电液控制系统的闭环结构框图

根据图2,电液系统控制器的总控制输入量为:

$$v = u - \hat{d} \quad (18)$$

至此,电液系统的双环鲁棒控制器设计完毕,关于其控制性能的仿真验证将在下一节中给出。

3 仿真结果

对比本研究控制方案与传统PD控制方案DOB+PD控制方案的计算机仿真结果,从而得到所提出控制方案的性能优势。

仿真中实际对象参数为 $K = 15.0, \omega = 85.0 \text{ rad/s}, \xi = 0.40$;名义模型参数选取为 $K_n = 16.0, \omega_n = 90.0 \text{ rad/s}, \xi_n = 0.45$,由此可以看出名义模型的选取与实际模型之间存在着建模误差。此外,电液系统的负载力矩系数为 $J = 0.00015 \text{ N} \cdot \text{s}^2/(\circ), M_{F0} = 0.5 \text{ N}, K_D = 0.0015 \text{ N} \cdot \text{s}/(\circ), K_p = 0.02 \text{ N}/(\circ)$ 。考虑到工程实际要求,将电液系统的控制输入限定在 $\pm 10 \text{ V}$ 之间。

三种控制方案的控制参数如表1所示。

表1 三种控制方案的控制参数表

控制方案	控制参数
PD控制方案	$k_p = 3.0, k_d = 0.2$
DOB+PD控制方案	$\tau = 0.015, k_p = 3.0, k_d = 0.2$
本研究控制方案	$\tau = 0.015,$ $k^* = [2.2361 \quad 0.9642 \quad 0.2230]$ $(Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = 20)$

假设电液系统的初始角位置为 0.5° ,其期望的位置跟踪信号如图3所示。

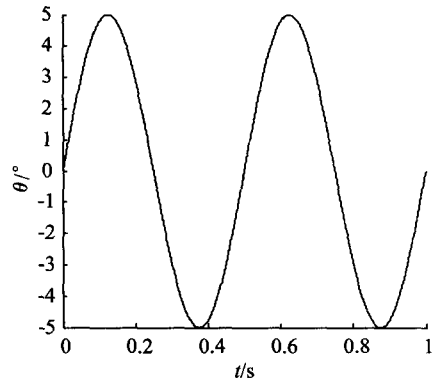


图3 电液系统的位置跟踪指令

对比本研究控制方案与PD控制方案、DOB+PD控制方案的位置跟踪情况,并通过图4展现出三种控制方案下的跟踪误差。

通过图4可以看出,相比PD控制方案,DOB+PD控制方案下电液系统的跟踪误差(Δ)更小,其原因在于内环DOB对系统建模误差和负载力矩干扰的抑制作用,提高了控制系统的鲁棒性。然而,相比DOB+PD控制方案,本研究控制方案下电液系统的跟踪误差将更小,这就体现了本研究外环复合控制器在提高位置跟踪精度方面的有效性。

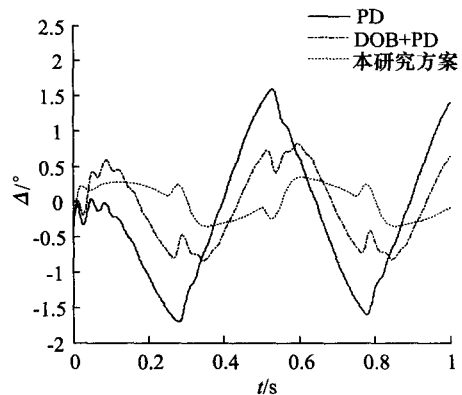


图4 三种控制方案的跟踪误差曲线

实际上,本研究控制方案的三个分控制器各司其职,即DOB可以提高系统对建模误差和负载力矩干扰的鲁棒性,反馈控制器可以实现系统的角位置跟踪能力,而前馈控制器将进一步提高角位置的跟踪精度,三者的控制输出曲线如图5所示。

此外,本研究控制方案下总的控制量曲线如图6所示。

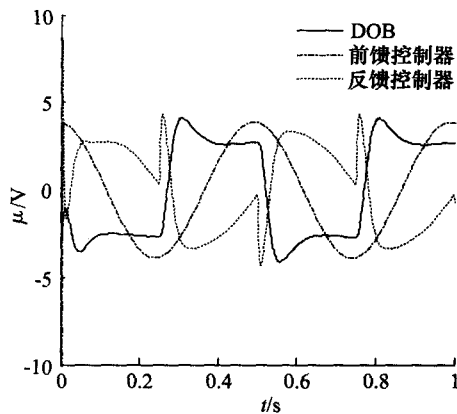


图5 三个分控制器的控制输出曲线

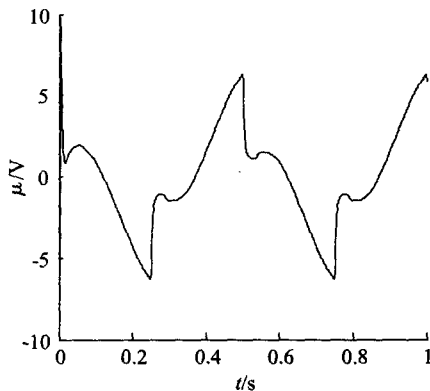


图6 总的控制量曲线

4 结论

针对电液压系统,本研究提出的双环控制方案,即采用内环干扰观测器和外环复合控制器相结合的控制结构,可以针对建模误差和负载力矩干扰对控制系统的影响,实现电液压系统的角位置鲁棒跟踪能力。仿真结果表明,相比 PD 控制方案和 DOB + PD 控制方案,本研究控制方案下电液压系统的角位置跟踪精度更高,且对建模误差和负载力矩干扰的鲁棒性更强。此外,本研究控制方案的结构较为简单,易于实际工程的实现。关于实验验证部分将在今后的工作中展开。

参考文献:

- [1] 肖新华,焦维佳,刘凯波. 电液舵机抑制颤振的设计思路[J]. 战术导弹控制技术,2009,3(3):32-38.
- [2] 张兴友. 机械制造业中液压技术的应用与发展研究[J]. 湖南农机,2012,39(9):154-155.
- [3] 周克俭,李玉华,于云峰. 液压负载模拟器控制方法研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(35):75-80.
- [4] Lee H S, Tomizuka M. Robust Motion Controller Design for High-accuracy Positioning Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(1):48-55.
- [5] B K Kim, W K Chung, and K Ohba. Design and Performance Tuning of Sliding-mode Controller for High-speed and High-accuracy Positioning Systems in Disturbance Observer Framework[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10):3798-3809.
- [6] Du C, Li H, Thum C K, et al. Simple Disturbance Observer for Disturbance Compensation[J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(9):1748-1755.
- [7] Wu Y J, Liu X D, D P Tian. Research of Compound Controller for Flight Simulator with Disturbance Observer[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5):613-621.
- [8] 郭光荣,薛斌,张云龙,等. 复合控制技术在高速高精度跟踪控制系统中的应用[J]. 兵工自动化,2006,25(10):60-61.
- [9] Naidu D S. Optimal Control Systems[M]. FL, USA: Crc Press, 2002.
- [10] Shakir H, Kim W J. Nanoscale Path Planning and Motion Control with Maglev Positioners[J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2006, 11(5):625-633.
- [11] 蓝会立,高远,谭光兴,等. 车辆悬架 LQR 控制器权值优化方法[J]. 科学技术与工程,2013,13(17):75-77.
- [12] Wang B Y, Dong Y L, Zhao K D. Compound Control for Hydraulic Flight Motion Simulator[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(2):240-245.
- [13] Doyle J C, Francis B, Tannenbaum A R. Feedback Control Theory[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1992.

《液压与气动》杂志

创刊于1977年的《液压与气动》,属技术类学术期刊,由北京机械工业自动化研究所主办,办刊宗旨是沟通信息、反映动态、普及知识和促进发展。读者对象为本专业的工程技术人员、有关的销售人员、管理人员、液压和气动设备的安装、调试、使用、维修人员以及有关大专院校师生。报道内容主要为液压与气动技术及其在国民经济各个部门的应用方面的新技术、工艺、设计、设备、材料,专业基础知识以及产品、企业和行业信息。

自1992年始,《液压与气动》连续被选定为机械、仪表类学科的全国中文核心期刊,并进入《中国学术期刊(光盘版)》和万方数据系统科技期刊群网络。2001年,被评选进入“中国期刊方阵”,是液气密行业中发行量最大、最具影响力和唯一进入“中国期刊方阵”的杂志。