

1-2-2019

Disturbance Rejection Based Robust Control Approach for Servo System with Backlash

Chongwei Han

1.Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xiayang 712099, China; ;

Peng Chao

2.School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

Zhixiang Shi

1.Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xiayang 712099, China; ;

Li Zhong

1.Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xiayang 712099, China; ;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Disturbance Rejection Based Robust Control Approach for Servo System with Backlash

Abstract

Abstract: With the rapid development of industry and science technology, the control performance requirements for servo system become higher and higher. Aiming at the servo system with backlash, a *disturbance rejection based robust control approach is studied, which sees the backlash as external disturbance. It utilizes a disturbance rejection compensator to reduce the adverse effects caused by backlash, a mixed sensitivity based robust feedback controller to enhance the tracking control precision and robustness.* The model of the servo system with backlash is built based on the analysis of system structure and work principle. The control principle, the robust disturbance rejection compensator and the mixed sensitivity based robust feedback controller design methods are presented. The simulation experiment results demonstrate the control approach can enhance the control performance of the servo system with backlash effectively.

Keywords

backlash, servo system, disturbance rejection, mixed sensitivity

Recommended Citation

Han Chongwei, Peng Chao, Shi Zhixiang, Li Zhong. Disturbance Rejection Based Robust Control Approach for Servo System with Backlash[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 691-698.

基于干扰抑制的含齿隙伺服系统鲁棒控制方法

韩崇伟¹, 彭超², 石志翔¹, 李忠¹

(1. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099; 2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要: 研究了一种基于干扰抑制的鲁棒控制方法, 该方法将齿隙看作外部干扰, 利用干扰抑制补偿器减小齿隙对系统控制性能的影响; 利用基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制器提高系统对期望输出的跟踪控制精度和鲁棒性。在分析含齿隙伺服系统的结构、工作原理的基础上, 建立了系统模型; 给出了本文所研究控制方法的控制原理, 以及鲁棒干扰抑制补偿器和基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制器的设计方法; 通过仿真实验证明该控制方法能够有效地提高含齿隙伺服系统的动静态控制性能。

关键词: 齿隙; 伺服系统; 干扰抑制; 混合灵敏度

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 02-0691-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802039

Disturbance Rejection Based Robust Control Approach for Servo System with Backlash

Han Chongwei¹, Peng Chao², Shi Zhixiang¹, Li Zhong¹

(1. Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xianyang 712099, China;

2. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: With the rapid development of industry and science technology, the control performance requirements for servo system become higher and higher. Aiming at the servo system with backlash, a disturbance rejection based robust control approach is studied, which sees the backlash as external disturbance. It utilizes a disturbance rejection compensator to reduce the adverse effects caused by backlash, a mixed sensitivity based robust feedback controller to enhance the tracking control precision and robustness. The model of the servo system with backlash is built based on the analysis of system structure and work principle. The control principle, the robust disturbance rejection compensator and the mixed sensitivity based robust feedback controller design methods are presented. The simulation experiment results demonstrate the control approach can enhance the control performance of the servo system with backlash effectively.

Keywords: backlash; servo system; disturbance rejection; mixed sensitivity

引言

机械伺服系统广泛应用于机器人、机床、火炮等工业军事领域的设备中, 伺服系统的位置控制性

能是保证和提高这些设备性能的关键^[1-4]。机械伺服系统中, 往往由于齿轮传动结构的存在, 其不可避免的存在齿隙。

齿隙是在齿轮传动过程中, 齿轮的轮齿之间存在的间隙。含齿隙伺服系统在运动过程中存在齿隙和接触两种情况。当系统进入齿隙时, 电机驱动部分与从动部分之间没有转矩传递, 这样会造成驱动延时; 当齿隙结束, 电机驱动部分与从动部分重新接触, 从而带动从动部分转动。在齿隙结束期间,



收稿日期: 2015-12-28 修回日期: 2016-07-05;
基金项目: 中国博士后科学基金(2014M560710);
作者简介: 韩崇伟(1963-), 男, 河南新安, 博士, 研究员, 研究方向为火炮伺服控制; 彭超(1980-), 男, 四川成都, 博士, 副教授, 研究方向为鲁棒控制理论与应用。

<http://www.china-simulation.com>

电机驱动部分与从动部分之间的速度差异也会导致冲击。这些会导致伺服系统输出存在死区误差、机械/输出振动、极限环等问题^[5-7]。齿隙非线性严重限制了伺服系统的控制性能。因此,如何解决齿隙带来的控制问题,研究其有效的控制方法具有重要的理论价值和工程实际意义。

近年来,随着人们对伺服系统控制性能的要求变得越来越高,对于含齿隙伺服系统控制方法的研究也不断深入。文献[8]提出了一种将PID控制器和模糊控制器相结合的模糊自适应PID控制方法,以提高含齿隙伺服系统的稳定性和控制精度。文献[9]研究了一种基于分数阶PD控制方法。该方法利用分数阶计算和PID控制方法,以减小齿隙对伺服系统控制性能的影响。文献[10]提出了一种基于干扰观测器的内模控制方法。该方法将微分器和内模控制器相结合,以提高伺服系统的跟踪控制精度。文献[11]针对含齿隙的伺服系统,提出了一种反步自适应模糊控制方法。该方法在建立齿隙的近似死区函数模型的基础上,利用两个自适应模糊逻辑控制系统以减小齿轮传动力矩的振荡。文献[12]研究了基于切换策略的补偿控制方法,针对系统的齿隙阶段和接触阶段分别设计不同的控制策略,以为减小齿隙非线性对系统的影响。文献[13]研究了一种基于灰色估计的滑模变结构控制方法,利用灰色估计器实现对负载转速、传动转矩的准确估计,通过滑模变结构控制提高位置伺服系统的鲁棒性和控制精度。然而,现有的这些方法很少综合考虑到在减小齿隙非线性对系统性能影响的基础上,进一步优化伺服系统的控制精度及鲁棒性能。

目前,针对非线性系统,许多控制方法都是将系统的非线性特性看作外部干扰,并利用基于干扰观测器(DOB)的补偿控制^[14]、基于扩张状态观测器(ESO)的补偿控制^[15]、自抗扰控制(ADRC)^[16]等方法来减小对非线性对系统控制性能的影响。然而,这些方法大部分都依赖于系统的状态空间模型,设

计较为复杂,并依赖于模型的准确性,控制系统的鲁棒性相对较差。因此,本文针对含齿隙伺服系统,研究一种基于干扰抑制的鲁棒控制方法。该方法将在齿轮传动中存在的齿隙看作外部干扰,利用鲁棒干扰抑制补偿器以减小齿隙对系统控制性能的影响。利用基于混合灵敏度的鲁棒控制方法,设计反馈控制器以优化含齿隙伺服系统的控制精度和鲁棒性。

本文将首先给出含齿隙系统的结构及其数学模型;然后给出本文所提出控制方法的基本原理和目标,并给出干扰补偿器和鲁棒反馈控制器的设计方法;最后进行仿真实验和分析。

1 含齿隙伺服系统及其建模

1.1 含齿隙伺服系统

含齿隙伺服系统主要由控制器、驱动电机、齿轮传动机构、转角传感器等组成。其中,驱动电机中包含其电机的电流控制环和转速控制环。含齿隙伺服系统结构如图1所示。

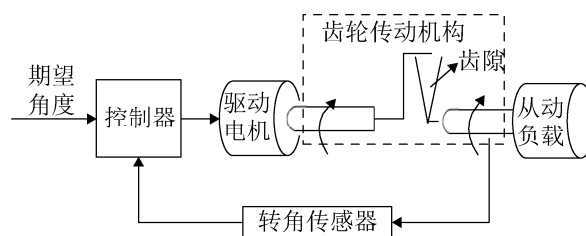


图1 含齿隙伺服系统
Fig. 1 Servo system with backlash

由图1可知,控制器接收对从动负载的期望转动角度信号,其通过控制驱动电机和齿轮传动机构,带动从动负载转动。伺服系统存在齿轮传动机构,使得其含有齿隙非线性特性。

1.2 系统建模

含齿隙伺服系统的模型结构如图2所示。

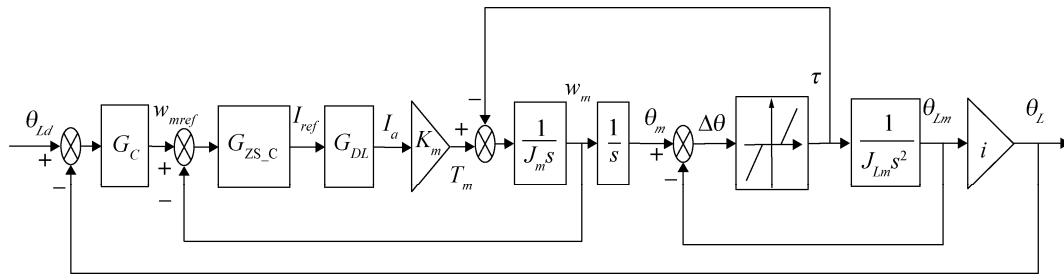


图 2 系统模型
Fig. 2 Model of servo system

由图 2 可知, θ_{Ld} 是系统的期望输出角度, θ_L 是系统实际输出角度, $G_C(s)$ 是伺服控制器, $G_{ZS_C}(s)$ 是驱动电机转速控制器传递函数, $G_{DL}(s)$ 是驱动电机电流环传递函数, w_{ref} 是电机转速环的参考转速, I_{ref} 是电机电流环调节的参考电流, I_a 是电机的实际电枢电流, K_m 是电机电磁转矩常数, J_m 是驱动电机轴的转动惯量, J_{Lm} 是负载等效到电机轴的转动惯量, T_m 是驱动电机的电磁转矩, w_m 是驱动电机轴的转速, θ_m 是驱动电机轴的转角, i 是齿轮传动机构的传动比, τ 是齿轮传动轴的转矩, θ_{Lm} 是负载等效到驱动电机轴的转角。

(1) 传递函数 $G_{ZS_C}(s)$

驱动电机的转速控制器一般采用 PI 控制器, 可写为:

$$G_{ZS_C}(s) = k_{P_ZS} + \frac{k_{I_ZS}}{s} \quad (1)$$

(2) 传递函数 $G_{DL}(s)$

驱动电机的电流环可写为:

$$G_{DL}(s) = \frac{G_{DL_C}(s)G_{U_I}(s)}{1 + G_{DL_C}(s)G_{U_I}(s)} \quad (2)$$

式中: $G_{DL_C}(s)$ 是电流环的调节器, 一般都采用 PI 控制器, 其可写为:

$$G_{DL_C}(s) = k_{P_DL} + \frac{k_{I_DL}}{s} \quad (3)$$

$G_{U_I}(s)$ 是驱动电机驱动电压到电枢电流的传递函数。

根据电机电磁学和物理原理, 电机的电气方程列写如下:

$$U_a = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t) \quad (4)$$

$$E_a(t) = K_e w_m(t) \quad (5)$$

式中: U_a 是电机电枢电压; i_a 是电机电枢电流; R_a 是电机电枢电阻; L_a 是电机电枢电感; E_a 是电枢导体在定子磁场中旋转切割磁力线, 产生的感应反电动势, 它的大小与电机转子转速大小有关。 K_e 是电机的电势常数, w_m 是电机转子转速。

上式通过拉式变换后可得,

$$U_a(s) = (R_a + L_a s)I_a(s) + E_a(s) \quad (6)$$

$$E_a(s) = K_e w_m(s) \quad (7)$$

式(7)中, $w_m(s)$ 是电机轴转速的拉普拉斯变换函数。

由于一般 K_e 都较小, 可以省略 $E_a(s)$ 。因此, 从驱动电压到电枢电流的传递函数 $G_{U_I}(s)$ 可以写为:

$$G_{U_I}(s) = \frac{1}{R_a + L_a s} \quad (8)$$

(3) 齿隙模型

当主动齿轮处于齿隙中时, 由于其余负载从动齿轮之间没有啮合, 其传递给负载的转动力矩为零; 而当主动齿轮与从动齿轮接触时, 其则根据齿轮啮合面的弹性形变可以得到其传递给负载的转动力矩。考虑到了传动空回以及主动齿轮与从动齿轮之间的转动力矩传递和弹性形变。齿隙模型采用死区模型^[17-18]。

基于死区的齿隙模型可写为:

$$\tau(t) = \begin{cases} K_L(\Delta\theta - a), & \Delta\theta > a \\ 0, & |\Delta\theta| \leq a \\ K_L(\Delta\theta + a), & \Delta\theta < -a \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_L 是转动弹性刚度; $\Delta\theta$ 是齿隙相对位移; $\Delta\theta = \theta_m - \theta_{Lm}$, a 是齿隙宽度的 1/2。

(4) 机械传动模型

含齿隙伺服系统中机械传动的输入是通过齿轮传动机构传递到从动负载的转矩,输出是从动负载部分的转动角度。

根据电磁转矩和机械转矩平衡关系,驱动电机的转矩方程可写为:

$$T_M(s) = J_m s^2 \theta_m(s) - \tau(s) = J_m s w_m(s) - \tau(s) \quad (10)$$

根据齿轮传动转矩和负载转矩关系,负载的转矩方程可写为:

$$\tau(s) = J_{Lm} s^2 \theta_{Lm}(s) = J_L s^2 \theta_L(s) \quad (11)$$

式中: J_L 是负载的转动惯量, $J_{Lm} = \frac{1}{i^2} J_L$ 。

2 基于干扰抑制的鲁棒控制方法

2.1 基本原理

基于干扰抑制的鲁棒控制方法将齿隙非线性看作外部干扰,利用根据含齿隙伺服系统的线性模型设计的鲁棒干扰抑制补偿器,以减小齿隙对伺服系统输出的影响;利用基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制理论设计反馈控制器,以提高伺服系统的控制精度和鲁棒性。其控制结构框图如图3所示。

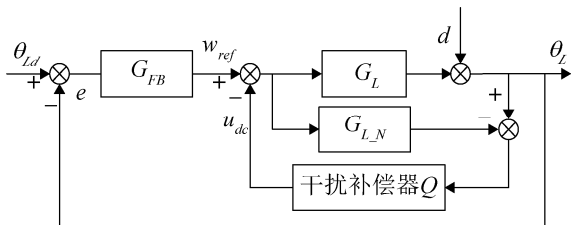


图3 基于干扰抑制的鲁棒控制原理框图

Fig. 3 Block diagram of disturbance rejection based robust control

图3中, G_{FB} 是基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制器, Q 是干扰抑制补偿器, d 是由齿隙引起的干扰, G_L 是实际的伺服系统, G_{L-N} 是 w_{ref} 到 θ_L 的传递函数(不含齿隙的系统模型)。

忽略齿隙的死区, G_{L-N} 可以写为:

$$G_{L-N} = \frac{iG_{zs_tm}G_{Tm_theta_{Lm}}}{1 + G_{zs_tm}G_{Tm_theta_{Lm}}G_{theta_{Lm-zs}}} \quad (12)$$

其中,

$$G_{zs_tm}(s) = G_{zs_c}(s)G_{DL}(s)K_m \quad (13)$$

$$G_{Tm_theta_{Lm}}(s) = \frac{K_L}{(J_{Lm}s^2 + K_L)J_ms^2 + K_L J_{Lm}s^2} \quad (14)$$

$$G_{theta_{Lm-zs}} = \frac{s(J_{Lm}s^2 + K_L)}{K_L} \quad (15)$$

2.2 鲁棒干扰抑制补偿器设计

由图3可得,从干扰 d 到负载转角输出 θ_L 的传递函数 $T_{d\theta}(s)$ 可写为:

$$T_{d\theta} = \frac{1 - G_{L-N}Q}{1 + (G_L - G_{L-N})Q} \quad (16)$$

假设 1: 假设 $G_L = G_{L-N}$ 。可将齿隙和模型不确定性同时看作外部干扰,则 $T_{d\theta} = 1 - G_{L-N}Q$ 。

由公式(12)中的传递函数 $T_{d\theta}(s)$,可知,如果干扰补偿器 $Q = G_{L-N}^{-1}$,干扰对从动负载转角输出的影响为零。然而,实际工程中二阶以上的传递函数逆很难实现。因此,只能考虑引入权函数,尽量对大范围频段的干扰信号进行抑制。

为了使得干扰 d 对 θ_L 的影响最小,最小化外部扰动在比较宽的频率范围对输出信号的影响,即扰动补偿器设计需要满足以下优化目标,

$$Q = \arg \min_Q \|w_d(1 - G_{L-N}Q)\|_{\infty} \quad (17)$$

式中: w_d 是干扰抑制的权函数。

由于线性矩阵不等值(LMI)可以用于公式(17)中的优化问题求解。因此,可以利用鲁棒 LMI 方法,设计干扰补偿器 Q 以满足设计目标通过即找到一个最优的 Q ,使其能够满足以上优化目标。

干扰 d 到期望输出 z_d 的传递函数 $D_{dz}(s)$ 的结构框图和扰动补偿器 Q 的设计框如图4所示。

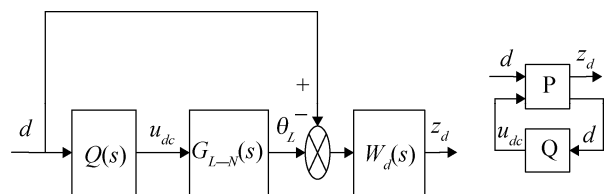


图4 鲁棒干扰抑制补偿器设计框图

Fig. 4 Block diagram of the robust disturbance rejection compensator

图4中,可见干扰到期望输出 z_d 和干扰抑制

补偿器输入 d 、输出 u_{dc} 之间的传递函数矩阵 P 可写为,

$$P = \begin{bmatrix} W_d & -W_d G_{L_N} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

其状态方程可写为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= A_p x_p + B_{p1} d + B_{p2} u_{dc} \\ z_d &= C_{p1} x_p + D_{p11} d + D_{p12} u_{dc} \\ r &= d \end{aligned} \quad (19)$$

传递函数 $D_{dzw}(s)$ 的状态空间表达式可以写为,

$$\begin{aligned} \dot{x}_D &= A_D x_D + B_D u_D \\ y_D &= C_D x_D + D_D u_D \end{aligned} \quad (20)$$

式中,

$$\begin{aligned} A_D &= \begin{bmatrix} A_p & B_{p2} C_Q \\ 0 & A_Q \end{bmatrix}, B_D = \begin{bmatrix} B_{p1} + B_{p2} D_Q \\ B_Q \end{bmatrix} \\ C_D &= [C_{p1} \quad D_{p12} C_Q], D_D = D_{p11} + D_{p12} D_Q \end{aligned} \quad (21)$$

引理 1 (有界实引理^[19-20]) 针对公式(20)中的系统, 若存在正定对称矩阵 V , 使得公式(22)中的线性矩阵不等式成立, 则 $\|D_{dzw}(s)\|_\infty \leq \gamma$, γ 为常数。

$$\begin{bmatrix} VA_D + A_D^T(\theta)V & VB_D(\theta) & C_D^T(\theta) \\ B_D^T(\theta)V & -\gamma^2 I & D_D^T(\theta) \\ C_D(\theta) & D_D(\theta) & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (22)$$

将式(17)中的 A_D 、 B_D 、 C_D 、 D_D 替换为公式(21)中的表达式, 并通变量替换和线性化^[21], 可得如公式(24)中的线性矩阵不等式。

因此, 满足公式(17)中优化问题的干扰补偿器可以通过公式(23)中的线性矩阵不等式(LMI)得到, 如果 Q 是公式(17)中的最小化问题的解, 其状态空间矩阵为:

$$\begin{aligned} D_Q &= \tilde{D}, C_Q = \tilde{C}(M^T)^{-1}, B_Q = N^{-1}(\tilde{B} - YB_{p2}D_Q) \\ A_Q &= N^{-1}(\tilde{A} - YA_p X)(M^T)^{-1} - N^{-1}YB_{p2}C_Q \end{aligned} \quad (23)$$

式中的 M, N 是满秩矩阵, X, Y 是正定对称矩阵, $X > I, Y > I$, 并且满足以下条件:

- a) $XY + MN^T = I$;
- b) X, Y, M, N 是以下 LMI 优化问题的解, 其中 $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}$ 是一般矩阵;

$$\min (\gamma)$$

$$\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}, X, Y$$

s.t.

$$\begin{bmatrix} A_p X + XA_p^T + B_{p2} \tilde{C} + (B_{p2} \tilde{C})^T & \tilde{A}^T + A_p & & & \\ * & A_p^T Y + YA_p & & & \\ * & * & & & \\ * & * & & & \\ B_{p1} + B_{p2} \tilde{D} & (C_{p1} X + D_{p12} \tilde{C})^T & & & \\ YB_{p1} + \tilde{B} & C_{p1}^T & & & \\ -\gamma & D_{p11} + D_{p12} \tilde{D} & & & \\ * & -\gamma & & & \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

2.3 基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制器设计

整个忽略齿隙的伺服系统的灵敏度函数可以写为:

$$S(s) = \frac{1}{1 + G_{L_N}(s)G_{FB}(s)} \quad (25)$$

输入灵敏度函数可以写为:

$$R(s) = \frac{G_{FB}(s)}{1 + G_{L_N}(s)G_{FB}(s)} \quad (26)$$

补偿灵敏度函数可以写为:

$$T(s) = \frac{G_{L_N}(s)G_{FB}(s)}{1 + G_{L_N}(s)G_{FB}(s)} \quad (27)$$

基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制器设计目标即设计一个反馈控制器 $G_{FB}(s)$ 使得以下条件满足:

$$T_{\theta_{Ld}Z}(s) \triangleq \left\| \begin{bmatrix} W_p(s)S(s) \\ W_u(s)R(s) \\ W_t(s)T(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty \leq 1 \quad (28)$$

式中: $W_p(s), W_t(s), W_u(s)$ 分别是设计的跟踪控制性能权函数、控制量幅值限制权函数、鲁棒性能权函数。

上述可知, 基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制器的设计目标为找到一个反馈控制器 $G_{FB}(s)$ 能够从期望输出角度 θ_{Ld} 到评估信号 $Z = [z_p, z_u, z_t]^T$ 的传递函数矩阵 $T_{\theta_{Ld}Z}(s)$ 的 H_∞ 范数 ≤ 1 。

公式(26)中的优化问题, 可以通过 Matlab 中的

H_{∞} 优化命令(“hinf”)求解得到满足优化目标的反馈控制器 G_{FB} 。

3 仿真实验

将本文研究的控制方法用于含齿隙伺服系统控制器设计中,通过仿真实验验证本文所研究方法的有效性。

1) 实验参数

含齿隙伺服系统的参数如下:电机电枢电阻 R_a : 1Ω, 电机电枢电感 L_a : 40 mH, 电机电磁放大系数, 电流环控制参数 k_{p_DL} : 10, 电流环控制参数 k_{i_DL} : 0.1, 速度环控制参数 k_{p_ZS} : 5, 速度环控制参数 k_{i_ZS} : 0.01, 电机转动惯量 J_m : 0.0254kg·m², 从动负载转动管理 J_L : 5430kg·m², 齿轮传动比 i : 320, 转动弹性刚度 K_L : 86206880Nm/rad, 齿隙宽度 $2a$: 1mil。

2) 干扰补偿器设计

根据齿隙等造成的干扰信号特性和保证系统能够尽量抑制外部干扰,扰动抑制权函数选为,

$$w_d(s) = \frac{100}{s+1} \quad (29)$$

根据公式(14)-(16)求解,可以得到干扰补偿器如下:

$$Q(s) = \frac{3.875 \times 10^4 s + 3.288 \times 10^6}{s + 1.006 \times 10^4} \quad (30)$$

3) 基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制器设计

为了保证跟踪信号的跟踪误差尽量小于期望跟踪信号的 2%, 跟踪性能权函数选为:

$$W_p(s) = \frac{60}{1s + 0.1} \quad (31)$$

考虑到电机的转速能力,控制信号幅值权函数 $W_u(s)$ 选为: 1/3000;

考虑的系统建模的不确定性,鲁棒权函数选为:

$$W_t(s) = \frac{s+2}{3s+10} \quad (32)$$

根据公式(18)和利用 Matlab H_{∞} 优化命令“hinf”计算得到反馈控制器如下:

$$G_{FB}(s) = \frac{4.92s^3 + 2.99 \times 10^5 s^2 + 9.82 \times 10^5 s + 3.47 \times 10^{-9}}{s^3 + 113.8s^2 + 383.1s + 37.16} \quad (33)$$

对齿隙大小为 1 密位的伺服系统分别进行阶跃控制和正弦信号跟踪控制仿真实验。

1) 阶跃信号控制仿真实验

20 密位的阶跃信号控制仿真实验结果如图 5。由图 5 可知,对于跟踪信号为 20 密位的阶跃信号,本文控制方法的最大超调量为 0, 上升时间为 0.289 秒, 调节时间为 0.52 s, 稳态误差为 0.07 密位;而一般的 PID 控制方法的最大超调量为 1 密位左右, 上升时间为 0.36 s, 输出未能稳定在 20 密位,而是在 19-21 密位区间内反复波动。本文控制方法的上升时间是 PID 控制的 80.2%, 其最大输出跟踪误差是 PID 控制的 7%左右, 而且输出稳定。可见,本文控制方法的控制性能指标明显优于传统的 PID 控制。

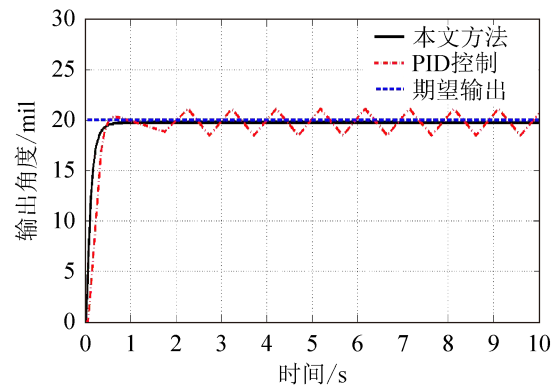


图 5 20 密位阶跃信号控制仿真实验结果
Fig. 5 Step response of 20 mil

1 000 密位的阶跃信号控制仿真实验结果如图 6。对于 1 000 密位的阶跃信号,本文控制方法的最大超调量为 0, 上升时间为 0.88 s, 调整时间为 0.92 s, 稳态误差为 0.07 密位;PID 控制的超调量则为 118.7 密位, 上升时间为 0.83 s, 峰值时间为 1.18 s, 调整时间为 1.96 s, 稳态误差为 1.13 密位。本文控制方法的上升时间与 PID 控制相差不大,但其调整时间是 PID 控制的 46.9%, 稳态误差是 PID 控制的 6%左右。可见,虽然本文控制方法与 PID 控制的上升速度是差不多的,然而,其调整时间、跟踪精度都明显优于 PID 控制。

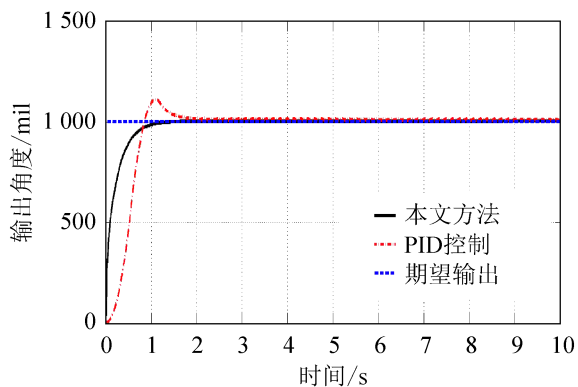


图 6 1 000 密位阶跃信号控制仿真实验结果
Fig. 6 Step response of 1000 mil

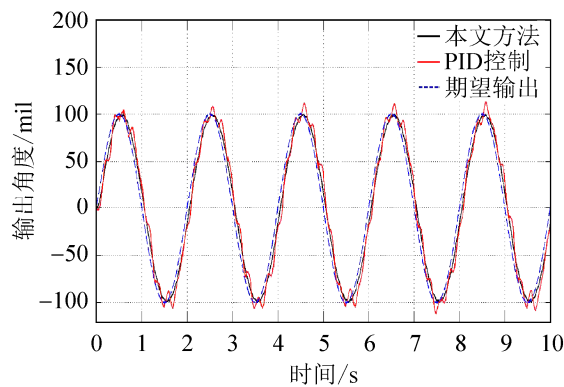


图 8 幅值 100 密位、频率 0.5 Hz 正弦信号跟踪控制仿真实验结果
Fig. 8 Sine response of amplitude 100 mil and frequency 0.5 Hz

2) 正弦信号跟踪控制仿真实验。

幅值为 100 密位、频率为 0.2 Hz 的正弦信号跟踪控制仿真实验结果如图 7 所示。由图 7 可知, 对于幅值为 100 密位、频率为 0.2 Hz 的正弦信号, 本文控制方法的最大跟踪控制误差为 1.42 密位; 是 PID 控制的最大跟踪控制误差的 22.8% 左右。可见, 本文所提出控制方法的跟踪控制误差明显小于 PID 控制。幅值为 100 密位、频率为 0.5 Hz 的正弦信号跟踪控制仿真实验结果如图 8 所示。由图 8 可知, 对于幅值为 100 密位、频率为 0.5 Hz 的正弦信号, 本文控制方法的跟踪控制误差相对较小; 而 PID 控制的控制误差相对较大。本文控制方法的最大跟踪控制误差为最大误差为 3.35 密位, 是 PID 控制的最大跟踪控制误差的 18.2% 左右。可见本文所提出控制方法的跟踪控制性能优于 PID 控制。

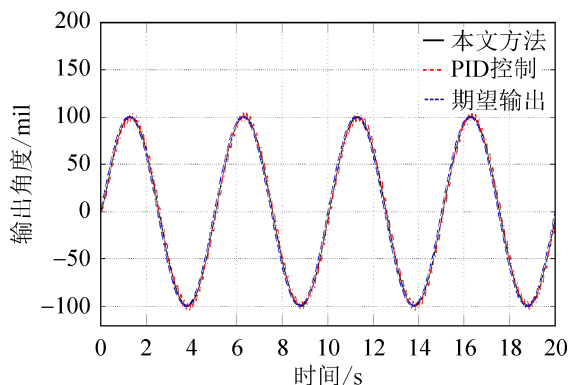


图 7 幅值 100 密位、频率 0.2Hz 的正弦信号跟踪控制仿真实验结果
Fig. 7 Sine response of amplitude 100 mil and frequency 0.2Hz

4 结论

本文研究了一种基于干扰抑制的含齿隙伺服系统鲁棒控制方法, 以减小齿隙给伺服系统控制性能所带来的不利影响。首先, 分析了含齿隙伺服系统的结构并建立了相应的系统模型; 然后给出了本文所研究的控制方法的基本原理; 给出了鲁棒干扰抑制补偿器和基于混合灵敏度的鲁棒反馈控制器的设计方法; 最后, 通过仿真实验验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] Shukor A Z, Fujimoto Y. Direct-drive position control of a spiral motor as a monoarticular actuator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046). 2013, 61(2): 1063-1071.
- [2] 马晓军, 冯亮, 袁东, 等. 坦克炮控系统非线性特性及自适应补偿控制[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(11): 1-5. Ma Xiao-jun, Feng Liang, Yuan Dong, et al. Overview of adaptive compensation control of nonlinearity in tank gun control system[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(11): 1-5.
- [3] Khoshdarregi M R, Tappe S, Altintas Y. Integrated five-axis trajectory shaping and contour error compensation for high-speed CNC machine[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (S1083-4435), 2014, 19(6): 1859-1871.
- [4] 王波兴, 李鹏杰. 基于 Modelica 的数控伺服系统模糊 PID 控制与仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(12), 2924-2929.

- Wang Bo-xing, Li Peng-jie. Fuzzy PID control and simulation of CNC servo system based on modelica[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(12): 2924-2929
- [5] Hamed M, Hassan S. Analysis of nonlinear oscillations in spur gear pairs with approximated modeling of backlash nonlinearity[J]. Mechanism and Machine Theory (S0094-114X), 2012, 51(5): 14-31.
- [6] 张文辉, 叶晓平. 空间机械臂基于神经网络的死区补偿控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 52-58.
Zhang Wen-hui, Ye Xiao-ping. Dead zone compensation control of free-floating space robotic manipulators based on neural network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13): 52-58.
- [7] Ghaffari A, Mohammadiasl E. Calculating the frequency of oscillation for servo axes distressed by clearance or preloading[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (S1083-4435), 2012, 18(3): 922-931.
- [8] Xie D, Zhu J, Wang F. Fuzzy PID Control To Feed Servo System of CNC Machine Tool[J]. Procedia Engineering, (S1877-7058), 2012, 29(2): 2853-2858.
- [9] Tepljakov A, Petlenkov E, Belikov J, et al. Tuning and digital implementation of a fractional-order PD controller for a position servo[J]. International Journal of Microelectronics and Computer Science (S2353-9607), 2013, 4(3): 116-123.
- [10] 黄延福, 吴云洁, 刘柏延. 基于干扰观测器的高性能转台伺服系统内模控制方法研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(8): 1664-1667.
Huang Yan-fu, Wu Yun-jie, Liu Bai-ting. Research on internal model control method based on disturbance observer for high performance turntable servo system[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(8): 1664-1667.
- [11] 杜仁慧, 吴益飞, 陈威, 等. 考虑齿隙伺服系统的反步自适应模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(2): 254-260.
Du Ren-hui, Wu Yi-fei, Chen Wei, et al. Adaptive backstepping fuzzy control for servo systems with backlash[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(2): 254-260.
- [12] 赵国峰, 宋杨, 郭健, 等. 基于时间次优补偿的齿隙非线性系统的切换控制[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 325-329.
Zhao Guo-feng, Song Yang, Guo Jian, et al. Backlash nonlinearity switching control with proximate time optimal compensation[J]. ACTA Armamentarii, 2006, 27(2): 325-329
- [13] Erenturk K. Nonlinear two-mass system control with sliding-mode and optimized proportional-integral derivative controller combined with a grey estimator[J]. IET Control Theory and Application (S1751-8644), 2008, 2(7): 635-642.
- [14] 毛永乐, 杨家强, 赵寿华, 等. 带负载转矩估算的非线性观测器内嵌式永磁同步电机无位置传感器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2252-2259.
Mao Yong-le, Yang Jia-qiang, Zhao Shou-hua, et al. Nonlinear observer with load-torque estimation for sensorless control strategy of interior permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2252-2259.
- [15] 任彦, 于楠楠, 崔桂梅. 基于 ESO 的改进型滑模控制在转台中的应用[J]. 控制工程, 2016, 23(1): 75-80.
REN Yan, YU Nan-nan, CUI Gui-mei. Application of Novel Sliding Mode Control in Flight Simulator Based on ESO[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(1): 75-80.
- [16] 吴丹, 赵彤, 陈恳. 快速刀具伺服系统自抗扰控制的研究与实践[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1534-1542.
Wu Dan, Zhao Tong, Chen Ken. Research and industrial applications of active disturbance rejection control to fast tool servos[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1534-1542.
- [17] Corradini M L, Orlando G. Robust stabilization of nonlinear uncertain plants with backlash or dead zone in the actuator[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2003, 11(2): 196-203.
- [18] Kesner S B, Howe R D. Position control of motion compensation cardiac catheters[J]. IEEE Transactions on Robotics (S1552-3098), 2011, 27(6): 1045-1055.
- [19] Zhang Q, Zhang Y, Tanaka T, et al. Bounded real lemmas for positive descriptor systems[J]. Journal of the Franklin Institute (S0016-0032), 2015, 352(1): 346-368.
- [20] Tanaka T, Langbort C. The bounded real lemma for internally positive system and H-infinity structured static state feedback[J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2011, 56(9): 2218-2223.
- [21] Sherer C, Gahinet P, Chilai M. Multi-Objective Output-Feedback Control via LMI Optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 1997, 42(7): 896-911.