

基于液压二次调节技术的大惯量回转系统预定性能自适应鲁棒控制研究

陈振豪, 赖 昭

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月13日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

摘 要

将液压二次调节技术应用于大惯量回转系统可以进行制动能量的回收, 本文针对基于液压二次调节技术的大惯量回转系统存在的参数不确定性以及未知的外部扰动引起的跟踪精度不足的问题, 提出了预定性能自适应鲁棒控制器。将预定性能和自适应鲁棒器相结合, 对大惯量回转系统存在的未知参数进行了估计, 并使用Lyapunov函数严格保证了整个系统的半全局渐近稳定。仿真结果表明: 相同的工况下, 与PID以及普通的自适应鲁棒控制相比, 本文所设计的控制器可以让大惯量回转系统有更好的跟踪精度和较高的鲁棒性。

关键词

液压二次调节技术, 大惯量回转系统, 预定性能, 自适应鲁棒控制

Adaptive Robust Control for Predetermined Performance of Large Inertia Slewing System Based on Hydraulic Secondary Regulation Technology

Zhenhao Chen, Zhao Lai

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 13th, 2023; accepted: May 24th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

The application of hydraulic secondary regulation technology in large inertia rotary system can

recover braking energy. In this paper, aiming at the problems of parameter uncertainty and insufficient tracking accuracy caused by unknown external disturbance in large inertia rotary system based on hydraulic secondary regulation technology, an adaptive robust controller with predetermined performance is proposed. By combining the predetermined performance with the adaptive robustness, the unknown parameters of the large inertia rotary system are estimated, and the Lyapunov function is used to guarantee the global stability of the whole closed-loop system. The simulation results show that compared with PID and ordinary adaptive robust control, the controller designed in this paper can make the large inertia rotary system have better tracking accuracy and higher robustness under the same working conditions.

Keywords

Hydraulic Secondary Regulation Technology, Large Inertia Rotary System, Predetermined Performance, Adaptive Robust Control

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工程机械是推进城市化进程的重要工具, 如挖掘机、起重机、旋挖钻机等都是城市里各种施工建设中被广泛使用的大型机械, 它们上车的转动惯量均比较大[1]。近些年, 国家从政策上为环境的治理和改善持续赋能, 为让“双碳”战略尽早实现, 环境友好型机械的创新有着重要现实意义。液压系统具有功率重量比大以及易实现无极调速的优势, 所以上述各类工程机械大多使用液压系统进行传动, 另一方面, 这类工程机械在作业时能耗也普遍较大[2]。液压二次调节技术实则属于泵控系统, 其结构如图1所示, 该结构的优势在于可以实现理论上的无节流损失, 将其应用于大惯量回转系统中, 可以回收发动机多余功率和回转机构制动前的转动能, 并将其转换成液压能存储于液压蓄能器中, 用以下一次回转对上车回转的驱动[3]。

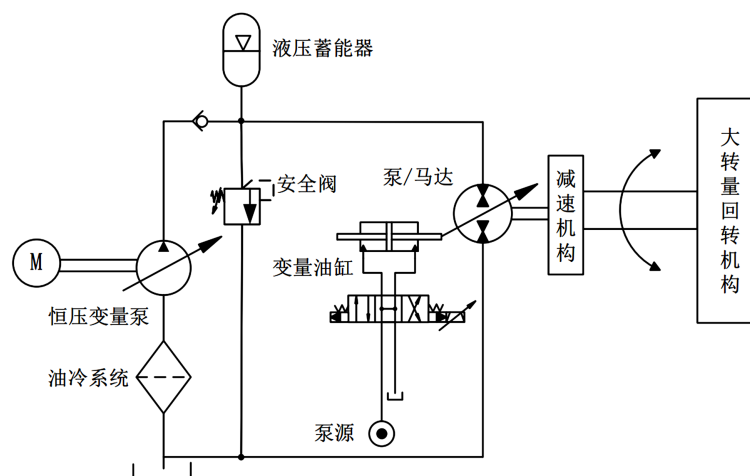


Figure 1. Structure diagram of large inertia rotary system based on hydraulic secondary regulation technology
图1. 基于液压二次调节技术的大惯量回转系统结构图

大型工程机械在作业时, 其实际工况条件是极其复杂, 这会导致系统存在不匹配扰动和参数不确定性等问题, 这主要由于系统中摩擦、泄漏以及液压油体积模量等液压参数一直在变化导致的[4], 目前, 上述的一些问题尚未得到有效的解决。本文将预定性能自适应鲁棒控制算法应用于大转量回转机构的角度跟踪控制中, 通过将预定性能和自适应鲁棒器相结合, 实现大惯量回转机构在复杂干扰条件下的高精度控制。

2. 系统建模

如图 1 所示, 基于液压二次调节技术的大惯量回转系统主要由恒压变量泵、泵/马达、蓄能器、减速机构等元件组成, 恒压变量泵为系统供应稳定高压油源并驱动泵/马达转动, 泵/马达输出力矩通过减速机构带动大惯量回转机构转动, 该力矩平衡方程为[5]:

$$\frac{P_s V_{\max} \eta \zeta i \beta}{2\pi \beta_{\max}} = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + M_f + f(t) \quad (1)$$

其中, P_s 恒压变量泵输出的高压油源压力; V_{\max} 泵/马达最大排量; η 泵/马达机械效率; ζ 减速机构的效率; β_{\max} 泵/马达斜盘的最大倾角; J 大惯量回转机构的回转惯量; i 减速机构减速比; B 回转阻尼; θ 回转机构的回转角度; M_f 系统的常值干扰阻力矩; $f(t)$ 系统未建模误差以及干扰补偿。

定义状态变量 $[x_1 \ x_2]^T = [\omega \ \dot{\omega}]^T$, 则整个系统可以用以下状态空间方程来表述:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \frac{2\pi A_g X_{\max} J}{K_v P_s V_{\max} \eta \zeta i} \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{cases} x_2 \\ -\frac{2\pi A_g X_{\max} B}{K_v P_s V_{\max} \eta \zeta i} x_2 + u + d_c + f(t) \end{cases} \quad (2)$$

$$y = [1 \ 0]x$$

其中 ω 回转角度; $\dot{\omega}$ 回转角速度; A_g 变量缸活塞有效作用面积; K_v 伺服阀流量增益; X_{\max} 变量液压缸最大位移量; $d_c = -\frac{2\pi A_g X_{\max} M_f}{K_v P_s V_{\max} \eta \zeta i}$, 可以被当作系统的常值干扰。

3. 预定性能自适应鲁棒控制器设计

3.1. 参数自适应算法设计

在工程机械进行作业时, 系统的参数会随着工况的变化而改变, 为了降低系统参数不确定性以及提高系统的跟踪特性, 本文在控制器的设计中引入参数自适应算法[6]。首先, 定义一组未知的参数集:

$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$, 其中 $\theta_1 = \frac{2\pi A_g X_{\max} J}{K_v P_s V_{\max} \eta \zeta i}$, $\theta_2 = -\frac{2\pi A_g X_{\max} B}{K_v P_s V_{\max} \eta \zeta i}$, $\theta_3 = -\frac{2\pi A_g X_{\max} M_f}{K_v P_s V_{\max} \eta \zeta i}$ 。由此可以得出, 描述

系统的状态空间方程(2)可改为如下式(3):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \theta_1 \dot{x}_2 = \theta_2 x_2 + u + \theta_3 + f(t) \end{cases} \quad (3)$$

$$y = [1 \ 0]x$$

在对控制器进行设计之前, 需要有如下假设:

假设 1: 期望回转的角度有界。此外, 系统未建模误差以及干扰补偿有界, 即:

$$|f(t)| < \delta_1 \quad (4)$$

其中, δ_1 为正数。

假设 2: 系统参数的波动范围如下:

$$\theta \in \Omega_\theta \triangleq \{\theta: \theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}\} \quad (5)$$

其中, $\theta_{\min} = [\theta_{1\min}, \dots, \theta_{3\min}]^T$ 为各个参数的下界, $\theta_{\max} = [\theta_{1\max}, \dots, \theta_{3\max}]^T$ 为各个参数的上界, 并且各个参数的上下界均已全部已知。

定义如下映射函数:

$$Proj_{\hat{\theta}_i}(\tau_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } \hat{\theta} = \theta_{\min} \text{ and } \tau < 0 \\ 0, & \text{if } \hat{\theta} = \theta_{\max} \text{ and } \tau > 0 \\ \tau, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中, 向量 $\hat{\theta}$ 为参数 θ 的自适应估计值。 τ 是待合成的自适应函数, 通过应用如下自适应律:

$$\dot{\hat{\theta}} = Proj_{\hat{\theta}}(\Gamma \tau), \quad \theta_{\min} < \hat{\theta}(0) < \theta_{\max} \quad (7)$$

其中, Γ 是正定的对角矩阵, 那么对于任何函数 τ , 本文会在后续的控制设计给出, 该自适应律满足以下关系:

$$\begin{cases} \hat{\theta} \in \Omega_{\hat{\theta}} \triangleq \{\hat{\theta}: \theta_{\min} < \hat{\theta} < \theta_{\max}\} \\ \tilde{\theta}^T [\Gamma^{-1} Proj_{\hat{\theta}}(\Gamma \tau) - \tau] \leq 0, \forall \tau \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 表示对该元素的估计误差。式(8)表示各个参数的估计均有界。

3.2. 控制器设计

首先, 进行预定性能控制部分的设计, 定义跟踪误差 $e(t) = x_1 - x_d$ 严格满足以下不等式(9):

$$-\delta_l \rho(t) < e(t) < \delta_u \rho(t), \quad \forall t > 0 \quad (9)$$

其中, $\delta_l > 0, \delta_u > 0$, 需要被合理的设定。性能函数 $\rho(t)$ 设计如下式(10):

$$\begin{aligned} \rho(t) &= (\rho_0 - \rho_\infty) e^{-kt} + \rho_\infty \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t) &= \rho_\infty > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

上式(10)中, ρ_0, ρ_∞, k 均是正常数, 也应被合理的设定。

可将跟踪误差的转换等式设计如下式(11):

$$e(t) = \rho(t) S(z_1), \quad \forall t \geq 0 \quad (11)$$

上式中 $S(z_1) = \frac{\delta_u e^{z_1} - \delta_l e^{-z_1}}{e^{z_1} + e^{-z_1}} = \frac{e(t)}{\rho(t)} = \lambda$ 。

由于函数 $S(z_1)$ 严格且单调递增, 因此可以给出以下反函数(12):

$$z_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{\lambda + \delta_l}{\delta_u - \lambda} \quad (12)$$

由上式(10)、(11)、(12)可得: $\dot{z}_1 = \eta \left(\dot{e} - \frac{e\dot{\rho}}{\rho} \right)$, 其中, $\eta = \frac{\delta_u - \delta_l}{2\rho(\lambda + \delta_l)(\delta_u - \lambda)}$ 。

接下来, 可定义如下一组误差变量

$$\begin{aligned} z_2 &= \dot{z}_1 + k_1 z_1 = x_2 - x_{2eq} \\ x_{2eq} &= \dot{x}_{1d} - k_1 z_1 \end{aligned} \quad (13)$$

上式中, $\dot{x}_{2eq} = \ddot{x}_{1d} + k_1 \dot{x}_1$, x_{2eq} 是虚拟控制 x_2 的期望值, $k_1 > 0$ 。

综合(3)、式可得:

$$\theta_1 \dot{z}_2 = u - \theta_1 \dot{x}_{2eq} - \theta_2 x_2 - \theta_3 - f(t) \quad (14)$$

则自适应鲁棒控制器可被设计为

$$\begin{aligned} u &= u_a + u_{s1} + u_{s2} \\ u_a &= \hat{\theta}_2 x_2 + \hat{\theta}_1 \dot{x}_{2eq} + \hat{\theta}_3 \\ u_{s1} &= -k_2 z_2 \end{aligned} \quad (15)$$

在上式(15)中, u_a 属于自适应补偿项, 各个参数的估计值由式(7)给出, u_{s1} 属于线性反馈项, u_{s2} 为鲁棒项, 其由之后的具体推导给出。此外, k_2 为大于零的反馈增益。

将(15)式代入(14)式可得式(16):

$$\theta_1 \dot{z}_2 = -k_2 z_2 + u_{s2} - \tilde{\theta}^T \varphi - f(t) \quad (16)$$

上式中, $\varphi = [-\dot{x}_{2eq}, -x_2, -1]^T$, 根据式(14)所示, u_{s2} 需被设计为满足如下式(17):

$$\begin{aligned} z_2 [u_{s2} - \tilde{\theta}^T \varphi - f(t)] &\leq \varepsilon \\ z_2 u_{s2} &\leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

式中 ε 为大于零的常数, u_{s2} 可以克服 $f(t)$ 和 $\tilde{\theta}$ 引起的模型不确定, $z_2 u_{s2} \leq 0$ 可以保证 u_{s2} 不影响后续自适应律的设计[7] [8]。因此, u_{s2} 可被设计为式(17)所示。

$$u_{s2} = -\frac{h^2}{4\varepsilon} z_2 \quad (18)$$

上式中, $h \geq \|\theta_M\| \|\varphi\| + \delta_1$, $\varphi = \theta_{\max} - \theta_{\min}$ 为参数 θ 的上下界之差。

定义如下(19)式所示的 Lyapunov 的函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} \theta_1 z_2^2 \quad (19)$$

则由(16)和(19)得

$$\dot{V}_1 = \theta_1 z_2 \dot{z}_2 = -k_2 z_2^2 + z_2 [u_{s2} - \tilde{\theta}^T \varphi - f(t)] \quad (20)$$

由上式(17)可得:

$$\dot{V}_1 \leq -k_2 z_2^2 + \varepsilon = -k_2 \left(\frac{2V_1}{\theta_1} \right) + \varepsilon \leq -\lambda V_1 + \varepsilon \quad (21)$$

上式中, $\lambda = \frac{2k_2}{\theta_{1\max}}$ 。

于是, 可得式(22)

$$\dot{V}_1(t) \leq V_1(0) \exp(-\lambda t) + \frac{\varepsilon}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t)] \quad (22)$$

由(22)式可知, 随着时间 t 趋于无穷大, 即 $t \rightarrow \infty$, $V_1 = \frac{\varepsilon}{\lambda}$, 则 z_2 的稳态值满足:

$$|z_2| = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{\lambda\theta_1}} \leq \sqrt{\frac{2\varepsilon}{\lambda\theta_{1\min}}} \quad (23)$$

由(13)、(23)可知, z_1 的稳态值满足下式(24):

$$|z_1| = \frac{1}{k_1} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{\lambda\theta_{1\min}}} \quad (24)$$

以上结论易知, z_1 和 z_2 均有界, 此外, 由前式(7)、(8)和(12)可以看出参数估计值和控制输入 u 也均有界。由(20)和(21)式可知, 系统能够稳定追踪期望信号, 需要选择合适的控制参数 k_1 、 k_2 、 ε

$$\tau = \varphi z_2 \quad (25)$$

定义如下形式的 Lyapunov 的函数

$$V_2 = \frac{1}{2} \theta_1 z_2^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \quad (26)$$

对其求导, 则可得 \dot{V}_2 :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= z_2 [-k_2 z_2 + u_{s,2} - \tilde{\theta}^T \varphi] + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \\ &= -k_2 z_2^2 + u_{s,2} z_2 + \tilde{\theta}^T (\Gamma^{-1} Proj_{\hat{\theta}}(sat_{\theta}(\Gamma \tau)) - \tau) \end{aligned} \quad (27)$$

结合(8)和(17)式子可得:

$$\dot{V}_2 \leq -k_2 z_2^2 = -W \quad (28)$$

上式中, W 非负, 由(13)、(16)可知, 其导数也是有界的, 因此由 Barbalat 引理可知 $t \rightarrow \infty$, $W \rightarrow 0$, 进而 $z_2 \rightarrow 0$, $z_1 \rightarrow 0$, 也即 $x_1 \rightarrow x_{1d} b$, 即所设计的控制器可使系统渐近稳定, 并能最终实现上车回转位置的准确跟踪。

4. 仿真与分析

为了能直观体现本文所提预定性能自适应鲁棒控制器(PPC + ARC)的优越控制性能, 本节选取 PID 和常规自适应鲁棒控制器(ARC)使用 Matlab/simulink 平台搭建仿真模型并在相同极限工况下进行仿真分析, 本文在进行角度控制时, 其输入是期望转速的积分, 系统仿真的具体参数如表 1 所示。

Table 1. System simulation parameters

表 1. 系统仿真参数

参数	数值
上车最大转动惯量 J (kg·m ²)	15,000
变量液压缸活塞有效作用面积 A_g (m ²)	1×10^{-2}
系统压力 P_s (MPa)	23
泵/马达最大排量 V_{\max} (cc/r)	125
阻尼系数 B (n·m/(r/min))	400
减速机构效率 η	0.9
减速机构减速比 i	152
伺服阀流量增益 k_v (m ³ /(s·V·√pa))	1×10^{-5}
变量液压缸最大位移量 X_{\max} (m)	0.1

系统参数的波动范围如下 $\theta_{\min} = [5, -0.1, -2.5]^T$; $\theta_{\max} = [10, -0.04, -1]^T$ 。

此外, 上述各控制律参数的选择如下:

1) PID: $k_p = 2000$ (比例增益); $k_i = 500$ (积分增益); $k_d = 50$ (微分增益);

2) ARC: $\varepsilon = 0.015$; $k_1 = 5$; $k_2 = 5$; $h = 2$;

3) PPC + ARC: $\varepsilon = 0.015$; $k_1 = 5$; $k_2 = 5$; $h = 2$; $\rho_0 = 2$; $\rho_\infty = 0.5$; $k = 2$; $\delta_l = 0.5$; $\delta_u = 0.5$ 。

使用 Matlab/simulink 平台搭建系统仿真模型和控制算法, 此外, 为了能够定量评价上述 3 种控制算法的控制器性能, 本文选取上车回转角度跟踪误差绝对值的最大值 M_e 、平均跟踪误差 μ_e 、跟踪误差的标准偏差 σ_e 等指标来进行具体的量化[9]。

Table 2. Tracks performance indicators

表 2. 跟踪性能指标

性能指标	M_e	μ_e	σ_e
PID	0.0241	0.0128	0.0156
ARC	0.0180	0.0091	0.0116
所提算法	0.0097	0.0036	0.0046

从图 2、图 3 以及表 2 中可以直观地看出, PID 控制律的稳态精度明显不如另外两种算法, 常规自适应鲁棒控制律的稳态误差也有较大的波动, 这是因为通过预定性能控制的加入, 可以使得系统稳态的回转角度跟踪精度得到很大改善。

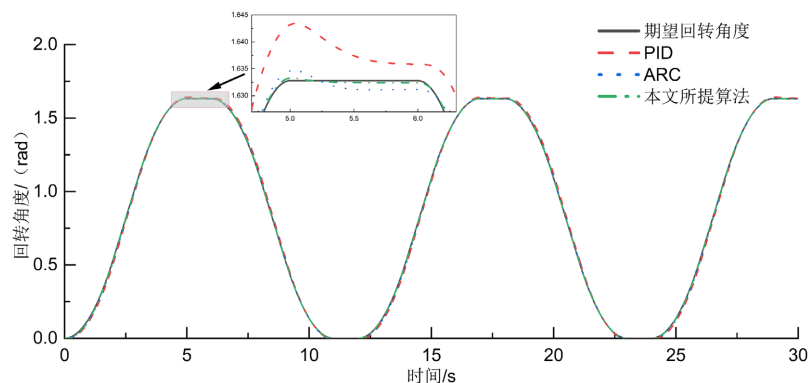


Figure 2. Comparison of Angle tracking effects of different algorithms

图 2. 各算法角度跟踪效果对比图

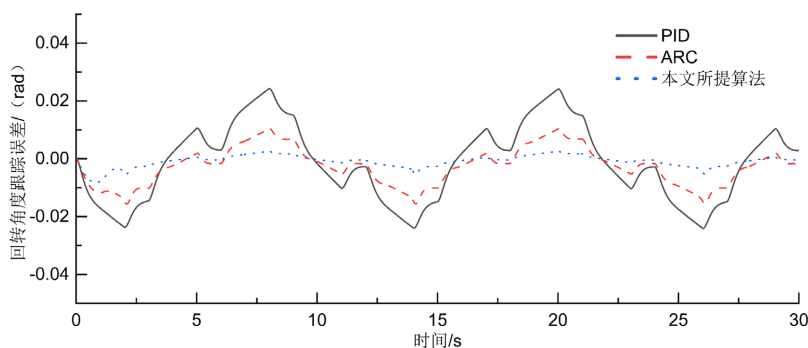


Figure 3. Comparison of Angle tracking errors of different algorithms

图 3. 各算法角度跟踪误差对比图

Table 3. Speed tracking performance indicators
表 3. 速度跟踪性能指标

性能指标	M_e	μ_e	σ_e
PID	0.0287	0.0117	0.0138
ARC	0.0195	0.0121	0.0126
所提算法	0.0121	0.0041	0.0045

大惯量回转系统需要满足速度稳定的需求, 速度不稳定必然会导致驾驶员的操控体验不佳。从图 4、图 5 以及表 3, 可以直观地看出, 对比传统 PID 和自适应鲁棒算法, 本文所提控制器对速度的跟踪精度高。

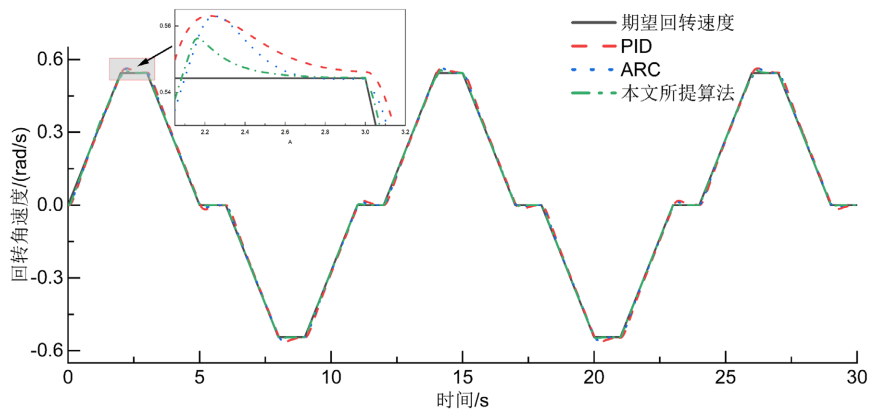


Figure 4. Comparison of angular velocity tracking effects of various algorithms
图 4. 各算法角速度跟踪效果对比图

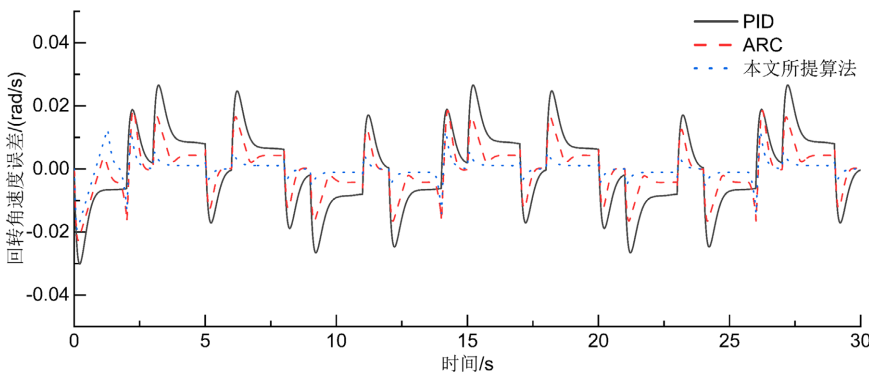


Figure 5. Comparison of angular velocity tracking errors of each algorithm
图 5. 各算法角速度跟踪误差对比图

5. 结论

本文针对基于液压二次调节技术的大惯量回转系统存在的参数不确定性以及未知的外部扰动引起的跟踪精度不足的问题, 提出了预定性能自适应鲁棒控制器, 使用 Lyapunov 函数严格保证了整个闭环系统的全局稳定性。所提控制器将预定性能和自适应鲁棒控制两种控制策略有机结合, 二者可发挥各自优点, 使得系统对于回转系统的参数不确定和干扰, 具有优秀的响应性能和控制精度, 较好地满足系统转速控制和工作平稳性的要求, 具有实际应用前景。

参考文献

- [1] 贺磊, 刘志奇, 刘宣佐, 等. 大惯量高频启停液压回转机构节能驱动技术综述[J]. 机电工程, 2022, 39(7): 877-885.
- [2] 胡均平, 李科军. 旋挖钻机回转制动能量回收系统设计与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3386-3393.
- [3] 卫鹏斌. 基于二次调节的液压挖掘机回转系统仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [4] 荆成虎. 摩擦式电液负载模拟器加载性能及控制策略研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [5] Shen, W., Su, X., Pang, Y., *et al.* (2018) Robust Controller Design for the Excavator Swing System under the Active Regulating Common Pressure Rail. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, **40**, 3323-3332. <https://doi.org/10.1177/0142331217707369>
- [6] Shen, W. and Zhao, H. (2022) Fault Tolerant Control of Nonlinear Hydraulic Systems with Prescribed Performance Constraint. *ISA Transactions*, **131**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.04.052>
- [7] 沈伟, 刘帅, 武毅. 基于网络的液压马达伺服位置系统自适应鲁棒积分控制[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(4): 325-331. <http://doi.org/10.13255/j.cnki.jusst.20201117005>
- [8] Shen, W., Huang, H. and Wang, J. (2019) Robust Back Stepping Sliding Mode Controller Investigation for a Port Plate Position Servo System Based on an Extended States Observer. *Asian Journal of Control*, **21**, 302-311. <https://doi.org/10.1002/asjc.1885>
- [9] 邹璇, 刘鑫宇, 赵海鸣, 等. 基于扩展观测器的电液负载模拟器自适应鲁棒控制[J]. 上海理工大学报, 2021, 43(6): 551-559. <http://doi.org/10.13255/j.cnki.jusst.20201219001>