

高动态电动伺服系统多模复合控制技术*

马睿, 张新华, 王贯, 王天乙, 宋志翌

(北京自动化控制设备研究所·北京·100074)

摘要: 针对未知扰动下电动伺服系统高动态响应与高精度控制难题, 在建立电动伺服系统特征模型的基础上, 提出了一种将时间最优控制与滑模控制进行结合的多模复合控制算法。该方法通过开展基于电动伺服系统精准动力学模型与环境特性特征建模的分析, 详细阐述了时间最优控制算法与滑模控制算法的设计方法及其适用区间, 并进行了系统仿真验证。仿真结果表明, 提出的多模复合控制算法能够有效提升电动伺服系统的动态响应速度与稳态精度, 实现了未知扰动下高动态高可靠的稳定运行。

关键词: 电动伺服系统; 时间最优控制; 滑模控制; 多模复合控制

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2021)05-0093-06

Multi-Mode Compound Control Technology of High Dynamic Electric Servo System

MA Rui, ZHANG Xinhua, WANG Guan, WANG Tianyi, SONG Zhiyi

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074)

Abstract: To obtain a high dynamic response and high precision control of the electric servo system under unknown disturbance, a multi-mode composite control algorithm based on time-optimal control and sliding-mode control is proposed. In this control algorithm, the available range of time-optimal control and sliding-mode control are elaborated in detail through the analysis of precise dynamic model and feature model of the electric servo system. The simulation results of this control algorithm are also verified. The results show that the proposed multi-mode composite control can effectively improve the dynamic-response speed and steady-state accuracy of the electric servo system and can realize reliable and stable operation under unknown disturbance.

Keywords: electric servo system; time-optimal control; sliding-mode control; multi-mode composite control

0 引言

新一代高超声速武器装备具有飞行跨空域、宽速域的特点^[1], 其对电动伺服系统的动态特性、稳态性能、抗干扰能力均提出了更高的要求。电动伺服系统作为精准制导武器与飞行器控制系统的重要组成部分, 主要由伺服电机、传动机构、功率驱动等复杂部件组成^[2], 承担着调整飞行姿态与飞行轨迹的作用。电动伺服系统具有强非线性、机电参数不确定性等特点, 这直接限制了系统动态特性与伺服精度的提升。

先进控制算法是提高伺服系统性能的关键。传统的电动伺服系统控制多采用频域分析方法进行设计, 文献 [3-4] 根据系统输入输出信号之间的误差动态调整控制器参数, 以实现位置跟踪性能; 但是, 参数辨识更新速度慢, 对快变扰动抑制的效果不理想。文献 [5-7] 分别采用了不同类型的 PID 控制算法, 在一定程度上实现了伺服系统的高动态控制。文献 [8] 提出了以模糊控制和神经网络为代表的智能控制, 此类算法需要精准的特征模型, 不适用于实际应用。文献 [9] 利用

* 收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金面上基金 (51777013); 国家自然科学基金青年基金 (51907009)

作者简介: 马睿 (1995—), 男, 硕士生。E-mail: 944193128@qq.com

滑模变结构控制算法处理不确定扰动, 具有结构简单、运行速度快、无需在线调节参数等优点; 但由于时间滞后或系统惯性等误差因素的存在, 可能导致动态响应速度较慢^[10]。在时间最优控制时刻输出最大控制量, 不断从一个边界值切换到另一个边界值, 在位移差-速差相平面可化简为二次抛物线^[11]。文献 [12-13] 将最优控制切换轨线上上下下平移一定的速度误差量以减小超调与抖动, 在误差较小时切换为线性控制, 但没有考虑到线性控制带来的稳态误差。文献 [14-15] 全面分析了 Bang-Bang 控制在二阶系统中的适用范围, 对其在电动伺服系统中的应用进行了详细分析, 认为其在使用中需要对控制策略做出改进。在分析电动伺服系统特征模型的基础上, 本文提出了一种将时间最优控制与滑模变结构控制进行结合的多模复合控制算法, 详细阐述了时间最优控制算法与滑模变结构控制算法的设计方法及其适用区间, 并采用基于电动伺服系统动力学模型仿真的手段进行了验证。

1 电动伺服系统的特征模型

电动伺服系统的特征模型如图 1 所示, 在相同驱动电压控制输入下, 所建特征模型在动态响应与稳态响应允许的误差范围内与动力学模型等价, 特征模型具有响应性能近似动力学模型的优点, 在分析伺服系统输出性能时可摆脱对传统复杂模型的高精度需求, 且易于工程实现。通常将电动伺服系统控制器输入信号与输出闭环传递函数用二阶系统近似表示为

$$G(s) = \frac{1}{As^2 + Bs + 1} \quad (1)$$

式 (1) 中, A 、 B 为未知量, 可根据特征模型输出。图 1 中, J 为转动惯量; K_t 为力矩系数; K_e

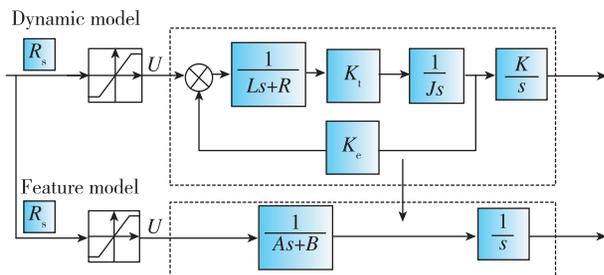


图 1 电动伺服系统的特征模型

Fig. 1 Characteristic model of electric servo system

为反电动势系数; U 为额定电压; K 为减速比; R_s 为控制器输出信号; L 和 R 分别为电机感抗与阻抗。针对电动伺服系统精准动力学模型建立从控制输出信号到伺服系统作动位置的传递函数

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{KK_t}{(R + sL)Js + C_e K_t} \cdot \frac{1}{s} \quad (2)$$

为方便研究, 可忽略电机模型中的电气时间常数 $\tau_e = L/R$, 同时对电动伺服系统进行特征建模。 R_s 到实际转速之间的传递函数简化为一阶惯性环节, 实际转速到伺服系统位置的传递函数简化为一阶积分环节。根据图 1, 可将式 (2) 简化后的传递函数转化为微分形式

$$\dot{\theta}(t) = -\frac{C_e K_t}{JR} \theta(t) + \frac{KK_t}{JR} u(t) \quad (3)$$

2 多模复合控制算法

2.1 时间最优控制设计

时间最优控制 (Time Optimal Control, TOC) 设计采用 Bang-Bang 控制, 在切换时间上完成两个常值之间的跳变。因此, 能在最短时间内接近系统误差切换阈值。根据图 1, 将电动伺服系统特征模型简化为惯性环节与积分环节, 可得到基于电动伺服系统特征模型的目标方程与约束条件

开环传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{s(As + B)} \quad (4)$$

简化传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{s \left[\frac{JR}{(K_t K)^s} + \frac{C_e}{K} \right]} \quad (5)$$

目标方程为

$$J_{\min} = \int_0^{t_f} 1 dt \quad (6)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -\frac{1}{A} B x_2(t) + \frac{1}{A} u(t) \\ x(0) = x_0, x(t_f) = 0, |u| \leq U_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 分别表示系统位置误差与速度误差; t_f 为到达最终指令位置的时间; 取 $|u| = U_{\max}$, 即伺服过程以最大驱动电压控制输入。 V_{\max} 为电动伺服机构的最大转动速度, 由式 (4)、式

(7) 可得到基于电动伺服系统特征模型的最优减速轨线

$$\begin{cases} \frac{B}{A}x_1 + x_2 + \frac{1}{B}v_{\max} \ln\left(1 - \frac{x_2}{\frac{1}{B}v_{\max}}\right) = 0 (u = U_{\max}) \\ \frac{B}{A}x_1 + x_2 - \frac{1}{B}v_{\max} \ln\left(1 + \frac{x_2}{\frac{1}{B}v_{\max}}\right) = 0 (u = -U_{\max}) \end{cases} \quad (8)$$

根据式 (8), 可得到理想最优减速轨线如图 2 所示。

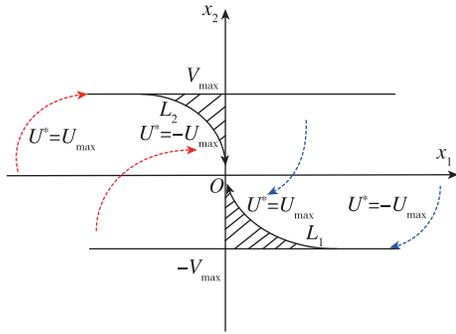


图 2 理想最优减速轨线

Fig. 2 Ideal deceleration track

由于电动伺服系统的实际控制参数受采样时间、测量精度及受控对象模型不确定性的干扰, 同时 Bang-Bang 控制需要精准的系统参数, 实际工况环境复杂, 仅靠最优控制虽能得到良好的动态性能, 但是不能完全达到预期的控制性能。为防止在误差较小时可能发生的高频抖动, 需在系统误差小于切换阈值时切换另一控制策略, 以增加系统的稳态精度。

2.2 滑模变结构控制设计

滑模变结构控制 (Sliding Mode Control, SMC) 能迫使系统向规定状态轨迹靠近, 在处理不确定扰动时具有良好的效果。当系统误差小于切换阈值时, 切换为滑模变结构控制, 加强系统抗扰能力, 提高稳态精度。

其中, 设计滑模面

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad (9)$$

其中, c 为滑模面参数; $e = \theta_d - \theta$; θ_d 为理想位置信号; θ 为实际位置信号。采用指数趋近律

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks (k > 0, 1 > \epsilon > 0) \quad (10)$$

其中, ϵ 与 k 为参考系数, 可通过更改其数值调整

系统趋近速度。

满足李雅普诺夫函数

$$V = s^2 (\dot{V} = 2s\dot{s} = -2\epsilon |s| - 2ks^2 \leq 0) \quad (11)$$

即可满足能进入滑模状态。其中, 滑模面参数 c 与趋近率参数 ϵ 以及 k 可在仿真中进行调整。综合式 (9)、式 (10), 可得式 (12)

$$\begin{cases} \dot{s}(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \\ \dot{s}(t) = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \\ \ddot{\theta}(t) = \ddot{\theta}_d(t) = -\left(\frac{C_c K_t}{JR}\right)\dot{\theta}(t) + \frac{KK_t}{JR}u(t) \end{cases} \quad (12)$$

综合式 (3) ~ 式 (12), 可得到电动伺服系统的滑模变结构控制算法如式 (13) 所示

$$u(t) = \frac{JR}{KK_t} \left[\epsilon \operatorname{sgn}(s) + ks + c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \ddot{\theta}_d + \frac{C_c K_t}{JR} \dot{\theta} \right] \quad (13)$$

由于系统采样频率高于 1000Hz, 指令信号加速度 $\ddot{\theta}_d$ 可简化为零。

2.3 多模复合控制设计

为克服 Bang-Bang 控制的不足, 在提高电动伺服系统动态性能的同时获得一定的鲁棒性, 先采用时间最优控制减小系统误差。当系统误差小于设定阈值时, 将系统切换为滑模变结构控制使系统具有较好的抗扰性与稳态精度。如图 3 所示, 多模复合控制算法理想减速轨线为 L_1 。理想减速轨线代表一种极限状态, 即全程采用最大控制量使系统回到状态原点。当系统状态到达理想减速轨线 L_1 与坐标轴围成的区域 I 时, 则一定会产生超调现象。为了避免超调现象的产生, 可将理想减速轨线 L_1 扩宽为减速区域。在理想减速轨线 L_1 附近增设 U_0 ($U_0 < U_{\max}$) 控制下的次优减速轨线 L_1^* , 取轨线 L_1^* 的所有状态点继续保持 $-U_{\max}$ 控制状态持续作用 T 为 5ms 的时间, 得到向左平移且具有与 L_1^* 同样开口大小的减速轨线 L_1^{\sim} 。 L_1^{\sim} 与理想减速轨线 L_1 相交于 d 点。将该交点所在位置的误差设为切换阈值, 当系统状态位于次优减速轨线 L_1^* 与最大控制量 $-U_{\max}$ 围成的区域 II 时, 系统沿次优减速轨线 L_1^* 向状态原点运动。当系统状态位于切换点 d 所在的位置误差左侧与系统位置误差状态 x_1 轴围成的区域 III 时, 控制策略切换为滑模变结构控制, 可提高抗扰能力。

为得到次优减速轨线的控制量 U_0 , 根据式 (8), 可得到次优减速轨线 L_1^* 的状态方程

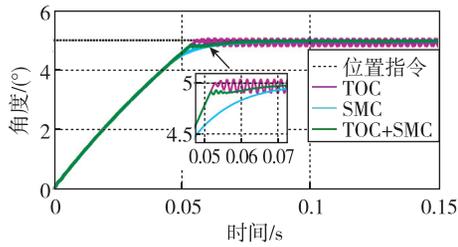


图 5 5°带载阶跃响应仿真曲线
Fig. 5 5° step response curve with load

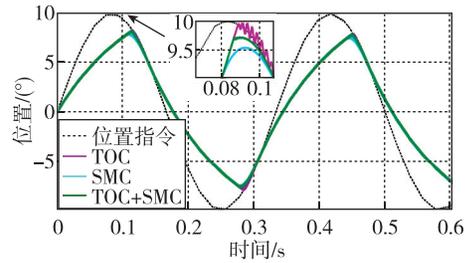


图 7 5Hz 带载位置跟踪曲线
Fig. 7 5Hz position tracking curve with load

的超调与极限环; TOC+SMC 算法的多模复合控制仍具有与 TOC 算法相似的动态性能和与 SMC 算法相同的稳态误差。表 3 为对比 $10\text{N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 弹性负载工况下各种控制算法的阶跃响应性能指标。

表 3 5°带载阶跃响应性能

Tab. 3 5° step response performance with load

带载	TOC 算法	SMC 算法	TOC+SMC 算法
调节时间/ms	53	73	58
稳态静差/ (°)	0.1	0.015	0.015

对比三种算法 5°阶跃响应仿真结果, TOC 算法的响应时间最短, 但其在带载与空载情况下均出现了超调现象; SMC 算法的控制调节时间最长, 受扰动影响较小; TOC+SMC 算法在 5°阶跃指令及空载与带载工况下均具有与 TOC 算法接近的动态性能和与 SMC 算法相同的稳态静差。

3.2 正弦响应

为验证本文所提出控制算法的正弦响应的跟踪性能, 输入幅值为 5°、频率为 5Hz 的正弦扫频信号, 在空载和弹性负载为 $10\text{N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ 时, 分别采用 TOC、SMC、TOC+SMC 三种控制算法, 得到跟踪响应波形分别如图 6 和图 7 所示。

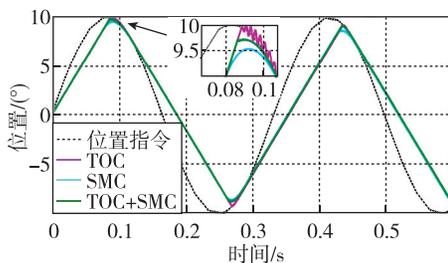


图 6 5Hz 空载位置跟踪曲线
Fig. 6 5Hz position tracking curve

由图 6 和图 7 可知, 由电动伺服系统 5Hz 位置跟踪曲线可以看出: 三种控制算法都有较强的跟踪性能并均在跟踪过程中出现了速度饱和现象。在空载状态下, TOC 算法的跟踪误差较小, 相位滞后约为 9° , 响应幅值为 4.9° , 但其跟踪速度存在不稳定性, 并且在正弦峰值附近出现了抖动现象; SMC 算法的相位滞后约为 20° , 响应幅值为 4.7° ; TOC+SMC 复合控制算法的相位滞后为 13° , 约为 SMC 算法相位滞后的 60%, 响应幅值约为 4.85° , 整体性能更加优异。在弹性负载工况下, TOC 算法的相位滞后为 15° , 响应幅值约为 4.8° , 同样在正弦信号峰值附近存在明显的抖动现象; SMC 算法的相位滞后约为 25° , 响应幅值约为 4.6° ; TOC+SMC 复合控制算法的相位滞后为 18° , 响应幅值约为 4.85° , 取得了很好的效果。

4 结 论

本文针对在电动伺服系统含有未知扰动情况下动态响应速度与稳态精度低的问题, 先将电动伺服系统简化为特征模型, 再通过设计时间最优控制算法与滑模变结构算法及其适用区间, 使电动伺服系统具备高动态、抗干扰且无超调的稳定效果。在仿真中建立了 TOC 算法、SMC 算法、TOC+SMC 复合控制算法的仿真模型, 对所提出的复合控制方案分别进行了阶跃和正弦跟踪的验证和分析。在负载工况阶跃响应中, TOC+SMC 复合控制算法比 SMC 算法的调节时间少了 15ms, 且接近于 TOC 算法; 在正弦跟踪中, TOC+SMC 复合控制算法的相位滞后为 SMC 算法相位滞后的 72%, 且仅比 TOC 算法多 3° 。该多模复合控制算法基本同时具备 SMC 算法的稳态性能与 TOC 算法的动态性能, 伺服系统的综合性能得到了提升, 仿真结果验证了该理论分析的正确性与方案的可行性。

参考文献 (References)

- [1] 黄玉平, 李建明, 朱成林. 航天机电伺服系统 (第一版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
HUANG Y P, LI J M, ZHU C L. Aerospace electromechanical servo system (1st edition) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013 (in Chinese).
- [2] 苏剑波. ADRC 理论和技术在机器人无标视觉伺服中的应用和发展 [J]. 控制与决策, 2015, 30 (1): 2-6.
SU J B. Robotic uncalibrated visual serving based on ADRC [J]. Control and Decision, 2015, 30 (1): 2-6 (in Chinese).
- [3] 王青山, 梁得亮, 杜锦华. 交流稳压电源的改进神经网络 PID 控制 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21 (2): 1-9.
WANG Q S, LIANG D L, DU J H. Improved neural network PID controller for regulated power supply [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21 (2): 1-9 (in Chinese).
- [4] 马秀娟, 郑安琪, 张华强, 等. 双 Y 移 30° 六相 PMSM 的滑模变结构控制技术 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (10): 23-27.
MA X J, ZHENG A Q, ZHANG H Q, et al. Sliding mode variable structure control technique of dual Y shift 30° six-phase PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22 (10): 23-27 (in Chinese).
- [5] 曾从吉, 单梁, 陆建荣. 智能区分 PID 控制算法在电动缸伺服系统中的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (6): 131-135.
ZENG C J, SHAN L, LU J R. Research of intelligent partitioning PID control algorithm in electric cylinder servo system [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23 (6): 131-135 (in Chinese).
- [6] 张义超, 黄晨, 陆浩然, 等. 输入饱和的双积分系统的复合时间最优控制 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (4): 51-57.
ZHANG Y C, HUANG C, LU H R, et al. Composite TOC control for double integrating systems with input saturation [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25 (4): 51-57 (in Chinese).
- [7] 崔业兵, 左月飞, 桂亮, 等. 基于复合 PI 控制器的永磁伺服电机电流控制 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23 (4): 106-110.
CUI Y B, ZUO Y F, GUI L, et al. Current control of permanent servo motor based on compound PI controller [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23 (4): 106-110 (in Chinese).
- [8] 方世鹏, 胡昌华, 扈晓翔. 基于切换滑模控制的抖振抑制方法 [J]. 控制与决策, 2017, 32 (7): 1210-1216.
FANG S P, HU C H, HU X X. Chattering reduction method based on switched sliding mode control [J]. Control and Decision, 2017, 32 (7): 1210-1216 (in Chinese).
- [9] 吴宏鑫, 刘一武, 刘忠汉. 特征建模与挠性结构的控制 [J]. 中国科学 E 辑, 2001, 31 (2): 137-149.
WU H X, LIU Y W, LIU Z H. Feature modeling and control of flexible structures [J]. Science in China (Series E), 2001, 31 (2): 137-149 (in Chinese).
- [10] 孙章军, 金震, 曹杨, 等. 基于 FPGA 的谐波式电动舵机滑模控制研究与应用 [J]. 导航与控制, 2017, 16 (4): 60-65.
SUN Z J, JIN Z, CAO Y, et al. FPGA based on sliding mode for harmonic gear drive electromechanical actuator system control [J]. Navigation and Control, 2017, 16 (4): 60-65 (in Chinese).
- [11] 胡杨, 滕召海, 程国扬. 扩展近似时间最优控制及其试验验证 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45 (9): 62-67.
HU Y, TENG Z H, CHENG G Y. Expanded proximate time-optimal servo control and its experimental verification [J]. Electric Machines and Control, 2018, 45 (9): 62-67 (in Chinese).
- [12] 邱攀峰, 钟钦洪, 胡勤丰, 等. 定点位置伺服系统的近似时间最优控制 [J]. 微电机, 2018, 289 (1): 65-70.
QIU P F, ZHONG Q H, HU Q F, et al. Proximate time-optimal servomechanisms control for set-point position servo system [J]. Micromotor, 2018, 289 (1): 65-70 (in Chinese).
- [13] CHOI Y M, JEONG J, GWEON D G. A novel damping scheduling scheme for proximate time optimal servomechanisms in hard disk drives [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42 (3): 468-472.
- [14] CASAS E. Second order analysis for the bang-bang control problems of PDEs [J]. SIAM Journal on Control & Optimization, 2012, 50 (4): 2355-2372.
- [15] 田春鹏, 宿浩, 王鲁昆, 等. 变切换线 Bang-Bang 变结构控制及在调平系统中的应用 [J]. 中国海洋大学学报, 2018, 284 (8): 148-154.
TIAN C P, SU H, WANG L K, et al. Application of Bang-Bang variable structure control in switching line [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 284 (8): 148-154 (in Chinese).