

伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移系统反步滑模控制

亢克松¹, 刘 乐¹, 方一鸣^{1,2†}, 郑会成¹

(1. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对伺服电机通过偏心轴连杆机构驱动的连铸结晶器振动位移系统中存在减速比加工误差、偏心轴机械零位初始偏差和负载转矩扰动等问题, 本文设计了一种基于双幂次趋近律和扩张状态观测器(ESO)的反步滑模控制器。首先, 针对偏心轴转角到结晶器位移非线性关系逆解的非唯一性, 可通过分段函数法建立结晶器位移到偏心轴转角一一对应的映射函数关系; 其次, 针对不可测的减速比加工误差和负载转矩扰动可采用扩张状态观测器来实时估计, 以削弱扰动对系统跟踪性能的影响; 最后, 采用一种具有二阶滑模特性且有限时间收敛的双幂次趋近律以提高收敛速度和削弱抖振。仿真对比结果表明, 本文所设计的控制器能有效实现连铸结晶器位移的渐近跟踪, 并对系统扰动具有较强的鲁棒性。

关键词: 伺服电机驱动; 连铸结晶器; 振动位移系统; 扩张状态观测器; 反步滑模控制; 双幂次趋近律

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Backstepping sliding mode control for continuous cast mold oscillation displacement system driven by servo motor

KANG Ke-song¹, LIU Le¹, FANG Yi-ming^{1,2†}, ZHENG Hui-cheng¹

(1. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

2. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: In this paper, a backstepping sliding mode controller based on the double power reaching law and extended state observer (ESO) is designed for the problems of the machining error of reduction ratio, the initial deviation of the eccentric shaft mechanical zero and load torque disturbance, which exist in oscillation displacement system of the continuous casting mold driven by servo motor through the eccentric shaft linkage. Firstly, for the non-uniqueness of the nonlinear inverse relationship from the position angle of eccentric shaft to the displacement of continuous casting mold, the correspondence nonlinear mapping function from the displacement of mold to the position angle of eccentric shaft is established by piecewise function. Secondly, for the non measurable machining error of reduction ratio and the load torque disturbances the ESO is designed to weaken the influence of disturbance on the system tracking performance. Finally, double exponential reaching law with second-order sliding mode characteristics and finite time convergence characteristics is used to improve the convergence speed and weaken the chattering. The Simulation results show that the controller designed in this paper can achieve asymptotic tracking to the displacement of continuous casting mold and have robustness to the disturbance of system.

Key words: servo motor drive; continuous casting mold; displacement system of oscillation; extended state observer; backstepping sliding mode control; double power reaching law

1 引言(Introduction)

伺服电机驱动的连铸结晶器非正弦振动控制系统是通过伺服电机按单方向、变角速度规律连续转动,

进而通过连杆机构实现结晶器非正弦振动的。该驱动方式可有效避免电液伺服驱动的非正弦振动装置所固有的零位飘移、液压油泄漏等不足; 与机械驱动方

收稿日期: 2016-01-16; 录用日期: 2016-10-17.

†通信作者. E-mail: fyiming@ysu.edu.cn; Tel.: +86 335-8057041.

本人责任编辑: 武玉强.

国家自然科学基金委员会与宝钢集团有限公司联合资助项目(U1260203), 国家自然科学基金项目(61403332), 河北省自然科学基金项目(F2016203263), 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(QN2016122), 河北省高等学校创新团队领军人才培养计划项目(LJRC013)资助. Supported in part by united fund of National Natural Science Foundation, Bao Steel Group Co., LTD (U1260203), National Natural Science Foundation of China (61403332), Natural Science Foundation of Hebei Province (F2016203263), Science and Technology Research Youth Foundation Project in Colleges and Universities of Hebei Province (QN2016122) and Cultivation Project for Leading Talent of Innovation Team in Colleges and Universities of Hebei Province (LJRC013).

式相比, 具有传动系统简化、结构紧凑、占用空间小、便于维护等优点. 然而在工业实际应用中, 伺服电机驱动的连接铸结晶器非正弦振动控制系统目前普遍采用开环控制方式, 虽然可以满足对波形的基本需求, 但是由于减速器减速比加工误差, 以及初始时刻偏心轴机械零位初始偏差等未知扰动的存在, 不可避免的造成了波形跟踪的相位差, 进而使得给定波形的零位与结晶器机械装置零位不一致, 导致波形切换的不平稳.

为了削弱未知扰动对系统性能的影响, 目前较为有效的处理方法是设计观测器对其进行动态观测, 并进行相应的补偿. 文献[1-2]采用非线性干扰观测器 (nonlinear disturbance observer, NDO) 对系统不确定性和扰动进行了有效逼近; 文献[3]采用非奇异终端滑模负载观测器使得观测误差能在有限时间内收敛, 同时实现了对负载转矩的估计. 但是以上方法均假设系统扰动是慢时变的, 即将扰动的导数假设为零, 这样会存在较大的估计误差, 而扩张状态观测器^[4-6]可有效避免这一局限, 并具有较好的观测精度和抗干扰性, 近年来在交流电机控制^[7]、机器人控制^[8]、导航制导^[9]、汽车控制^[10]等领域有着广泛的应用.

为保证滑动模态的实现并消除系统抖振提出指数趋近律和幂次趋近律等实用的滑模趋近律. 指数趋近律是在等速趋近律基础上增加一指数项, 虽然趋近速度快, 但在接近滑动模态时系统抖振较大; 幂次趋近律采用幂次项技术使得系统接近滑动模态时趋近速度放缓, 有利于削弱抖振, 不足之处是在状态远离滑动模态的趋近阶段存在速度过小, 运动时间过长的问題. 针对常规趋近律中存在的问题, 近年来一些学者提出了双幂次趋近律^[11], 文献[12]将双幂次趋近律用于多目标滑模变桨距控制, 提高了系统的收敛速度, 并有效抑制了抖振.

基于上述分析, 本文将通过实现位置环的闭环控制来提高系统位移的控制精度, 削弱未知扰动对系统性能的影响, 保证结晶器振动的平稳性. 首先, 对系统模型进行分段映射处理, 在确保结晶器位移到偏心轴转角非线性关系解的唯一性的基础上, 引入二阶扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 对系统的扰动进行动态观测, 并引入控制器中进行补偿, 以提高系统的抗干扰能力; 其次, 采用反步^[13-15]与积分滑模^[16]相结合的控制策略, 并引入一种具有二阶滑模特性且有限时间收敛的双幂次趋近律, 以提高系统跟踪的精度, 同时提高收敛速度和有效削弱抖振; 再次, 运用Lypaunov稳定性理论证明所设计控制器能保证整个闭环系统渐近稳定. 最后, 通过仿真研究验证所提方法能有效提高结晶器位移系统的跟踪精度和对扰动的鲁棒性, 改善系统的静、动态性能.

2 结晶器振动系统的数学模型及问题描述 (Mathematical model of the mold oscillation system and problem statement)

图1为伺服电机驱动的连接铸结晶器模拟振动系统发生装置. 参考文献[17]给出的结晶器振动系统数学模型, 并考虑减速齿轮的加工精度、偏心轴机械零位初始偏差的存在, 可建立如式(1)所示数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_p = 3\left(\frac{2\pi}{60(i+\Delta i)}n\right)\cos\left(\int \frac{2\pi}{60(i+\Delta i)}nd\tau + D\right), \\ \dot{n} = \frac{1.5p\psi_f}{J}\frac{60}{2\pi}i_q - \frac{B}{J}n - \frac{60}{2\pi}\frac{T_L}{J}, \\ \dot{i}_q = -\frac{2\pi}{60}pni_d - \frac{R_s}{L}i_q - \frac{p\psi_f}{L}\frac{2\pi}{60}n + \frac{u_q}{L}, \\ \dot{i}_d = -\frac{R_s}{L}i_d + \frac{2\pi}{60}pni_q + \frac{u_d}{L}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_p 为结晶器位移; n 为电机转速; R_s 为定子电阻; p 为电机极对数; ψ_f 为永磁体磁链; B 为摩擦系数; J 为转动惯量; L 为定子绕组等效电感; T_L 为负载转矩; u_d, u_q 分别为定子控制电压的 d, q 轴分量; i_d, i_q 分别为定子电流 d, q 轴分量; i 为减速齿轮减速比; Δi 为加工精度引起的减速比误差; D 为偏心轴机械零位初始偏差.

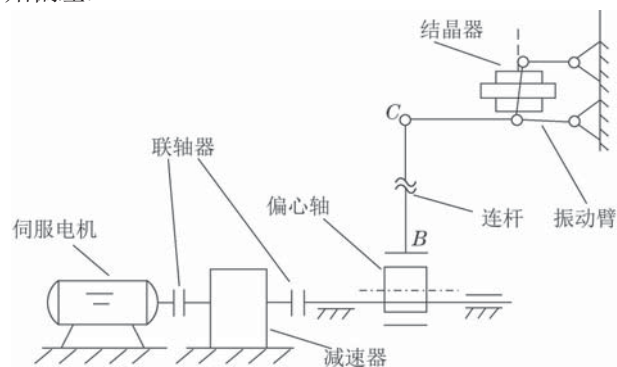


图1 伺服电机驱动的连接铸结晶器模拟振动系统装置

Fig.1 The generator of the continuous casting simulation shaker system driven by servo motor

定义中间状态变量 θ 作为偏心轴转角, 其中 $\theta = \int \frac{2\pi}{60(i+\Delta i)}nd\tau + D$. 考虑到伺服电机驱动的连接铸结晶器振动位移系统中存在的偏心轴转角与位移间正弦函数关系在 $[0, \infty)$ 区间内逆解的非唯一性, 本文通过分段函数法建立区间内偏心轴转角与结晶器位移间一一对应的映射函数关系^[18], 其基本思路如图2所示.

由于连接铸结晶器振动控制系统中的伺服电机是按单方向、变角速度规律转动的, 即 θ 为单调递增的函数, 显然 θ 远远超出了直接对位移求反正弦的值域范围, 因此利用反正弦曲线关于原点的中心对称性和周期性, 对位移求反正弦后的曲线进行中心对称和平移变换, 从而得到 $[0, \infty)$ 区间内唯一确定的解 $\hat{\theta}$. 其变化

过程如下式所示:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_1 = \arcsin \frac{x_p(t)}{3}, & 0 \leq t \leq t_{p1}, \\ \hat{\theta}_2 = \pi - \arcsin \frac{x_p(t)}{3}, & t_{p1} < t \leq t_{b1}, \\ \hat{\theta}_3 = 2\pi + \arcsin \frac{x_p(t)}{3}, & t_{b1} < t \leq t_{p2}, \\ \hat{\theta}_4 = 3\pi - \arcsin \frac{x_p(t)}{3}, & t_{p2} < t \leq t_{b2}, \\ \vdots \\ \hat{\theta}_{k+1} = k\pi + (-1)^k \arcsin \frac{x_p(t)}{3}, & t_{pi} < t \leq t_{bj}, \\ \vdots \end{cases} \quad (2)$$

其中: t_{pi}, t_{bj} 分别为结晶器位移曲线第 i 次和第 j 次到达波峰和波谷的时间, 且 $i \in \mathbb{N}^+, j \in \mathbb{N}^+$; $x_p(t) = 3 \sin(\theta + 2\pi\varsigma)$; $k \in \mathbb{N}$, k 的初始值为 0, 且当 $|x_p(t)| = 3$ 时, k 值累加 1.

用公式 $g(x_p(t))$ 表示 $x_p(t)$ 到 $\hat{\theta}$ 的映射关系:

$$\hat{\theta} = g(x_p(t)), \quad (3)$$

则可得 $\hat{\theta} = g(x_p(t))$ 在 $[0, \infty)$ 上为连续函数.

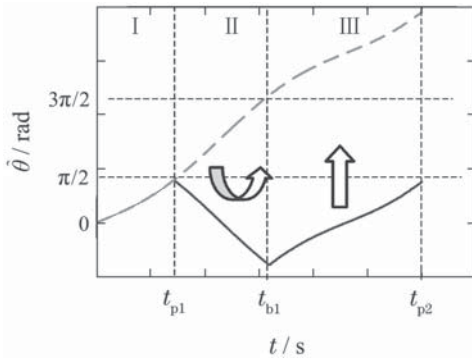


图2 偏心轴转角转化过程

Fig. 2 The conversion process of the eccentric shaft angle

然而在实际中由于采样周期 τ 的存在, 使得 $|x_p(t)| = 3$ 时刻未必落在采样点上, 因而不可避免的造成 k 值的变化提前或者滞后发生, 进而引起在该采样时刻 $x_p(t)$ 做前一区间段或后一区间段变换, 容易引起采样点 $\hat{\theta}$ 的不连续. 为了避免这种情况的影响, 可通过判断 $\hat{\theta}$ 的变化率对异常的点进行修正和滤波处理, 从而保证 $\hat{\theta}$ 曲线的连续性.

至此, 结晶器振动系统数学模型(1)可等效简化为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}} = \frac{2\pi}{60i}n + \dot{d}(t), \\ \dot{n} = \frac{1.5p\psi_f}{J} \frac{60}{2\pi} i_q - \frac{B}{J}n - \frac{60}{2\pi} \frac{T_L}{J}, \\ \dot{i}_q = -\frac{2\pi}{60} p n i_d - \frac{R_s}{L} i_q - \frac{p\psi_f}{L} \frac{2\pi}{60} n + \frac{u_q}{L}, \\ \dot{i}_d = -\frac{R_s}{L} i_d + \frac{2\pi}{60} p n i_q + \frac{u_d}{L}, \end{cases} \quad (4)$$

其中: $d(t) = \int \frac{-\Delta i}{i(i + \Delta i)} \frac{2\pi}{60} n d\tau + D$ 为减速比加工误差和初始时刻偏心轴机械零位初始偏差构成的综合扰动, 而其导数形式 $\dot{d}(t) = \frac{-\Delta i}{i(i + \Delta i)} \frac{2\pi}{60} n$ 为减速比加工误差构成的扰动.

3 基于扩张状态观测器的结晶器位移系统反步滑模控制器设计(Design of the backstepping sliding mode controller of the mold displacement system based on the ESO)

为了提高结晶器位移系统的跟踪控制精度和抗干扰性能, 本节基于数学模型(4)设计一种基于扩张状态观测器的反步滑模控制器.

3.1 扩张状态观测器设计(Design of the ESO)

针对式(4)中不可测量的减速比加工误差和负载扰动量, 可分别建立式(4)的1式、2式的二阶ESO^[6]模型为

ESO1:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha_1, \delta_1) + \frac{2\pi}{60i}n, \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha_2, \delta_2). \end{cases} \quad (5)$$

ESO2:

$$\begin{cases} \dot{z}_3 = -\frac{60}{2\pi} \frac{z_4}{J} - \beta_3 \text{fal}(\varepsilon_2, \alpha_3, \delta_3) + \frac{1.5p\psi_f}{J} \frac{60}{2\pi} i_q - \frac{B}{J} z_3, \\ \dot{z}_4 = \beta_4 \text{fal}(\varepsilon_2, \alpha_4, \delta_4), \end{cases} \quad (6)$$

$\text{fal}(\cdot)$ 为非线性幂次函数, 其表达式为

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sgn} \varepsilon, & |\varepsilon| > \delta, \\ \text{sgn} \varepsilon, & |\varepsilon| \leq \delta, \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{sat}(\varepsilon) = \begin{cases} \varepsilon/\varsigma, & |\varepsilon| \leq \varsigma, \\ \text{sgn} \varepsilon, & |\varepsilon| > \varsigma. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 为观测器系数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为非线性因子; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 为滤波因子; $\varepsilon_1 = z_1 - \hat{\theta}$, $\varepsilon_2 = z_3 - n$.

由式(5)所示的ESO1和式(6)所示的ESO2可分别得到扰动 $\dot{d}(t)$ 的估计值 $z_2 = \hat{\dot{d}}(t)$ 和负载转矩的估计值 $z_4 = \hat{T}_L$.

3.2 结晶器位移系统反步滑模控制器设计(Design of the backstepping sliding mode controller of the mold displacement system)

针对伺服电机驱动的连铸结晶器振动系统, 定义转角跟踪误差

$$e_\theta = \hat{\theta} - \theta^*, \quad (9)$$

式中: $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值, θ^* 为期望的偏心轴转角.

对上式求导, 可得

$$\dot{e}_\theta = \frac{2\pi}{60i}n + \dot{d}(t) - \dot{\theta}^*. \quad (10)$$

为了提高系统的跟踪控制精度, 选取积分滑模面

$$S = e_\theta + k_1 \int_0^t e_\theta d\tau. \quad (11)$$

引入一种滑模特性的双幂次趋近律

$$\dot{S} = -\eta_1 |S|^{1-\xi} \operatorname{sgn} S - \eta_2 |S|^{1+\xi} \operatorname{sgn} S, \quad (12)$$

其中 $\xi \in (0, 1)$.

当系统状态距离滑模面较远时, 其收敛速度主要由式(12)右边第2项决定, 具有比指数收敛更快的速度, 当系统状态距离滑模面较近时, 收敛速度主要由式(12)右边第1项决定, 其Lipschitz性质使得收敛速度很快, 两项结合可以保证系统状态在趋近滑模面过程中具有较快的收敛速度. 且该趋近律能有效削弱抖振, 当 $S = 0$ 时有 $\dot{S} = 0$, 表明当系统状态到达滑模面时, 趋近速度减小为零, 实现了滑模面光滑过渡, 有效削弱了系统抖振.

构造Lyapunov函数 $V_1 = \frac{1}{2}S^2$, 并求其导数

$$\dot{V}_1 = S(-\eta_1 |S|^{1-\xi} \operatorname{sgn} S - \eta_2 |S|^{1+\xi} \operatorname{sgn} S) = -\eta_1 |S|^{2-\xi} - \eta_2 |S|^{2+\xi}. \quad (13)$$

令 $n = n^*$, 可设计虚拟控制转速

$$n^* = \frac{60i}{2\pi}(-\hat{d}(t) + \dot{\theta}^* - \eta_1 |S|^{1-\xi} \operatorname{sgn} S - \eta_2 |S|^{1+\xi} \operatorname{sgn} S - k_1 e_\theta), \quad (14)$$

其中 $\hat{d}(t)$ 为 $d(t)$ 一阶导数的估计值.

由式(4)定义速度跟踪误差

$$e_n = n - n^*. \quad (15)$$

对上式求导得

$$\dot{e}_n = \frac{60}{2\pi} \frac{1.5p\psi_f}{J} i_q - \frac{B}{J} n - \frac{60}{2\pi} \frac{T_L}{J} - \dot{n}^*. \quad (16)$$

构造Lyapunov函数

$$V_2 = \frac{1}{2}e_n^2, \quad (17)$$

并对其求导可得

$$\dot{V}_2 = e_n \left(\frac{60}{2\pi} \frac{1.5p\psi_f}{J} i_q - \frac{B}{J} n - \frac{60}{2\pi} \frac{T_L}{J} - \dot{n}^* \right). \quad (18)$$

基于反步法, 令 $i_q = i_q^*$, 可将 q 轴的虚拟控制电流取为

$$i_q^* = \frac{2\pi}{60} \frac{J}{1.5p\psi_f} \left(\frac{B}{J} n + \frac{60}{2\pi} \frac{\hat{T}_L}{J} + \dot{n}^* - k_2 e_n \right), \quad (19)$$

其中 $\hat{T}_L$ 为 T_L 的估计值.

将上式代入式(18)可得

$$\dot{V}_2 = -k_2 e_n^2 \leq 0. \quad (20)$$

式(19)中 $\hat{n}^*$ 为 $\dot{n}^*$ 的估计值, 由式(14)可见, 控制量

n^* 包含干扰估计值不能直接求导, 因此可采用二阶滑模滤波器对虚拟控制量 n^* 的微分进行估计, 从而简化控制器的设计过程. 二阶滑模滤波器^[19]可设计为

$$\begin{cases} \dot{l}_1 = -\frac{l_1 - n^*}{\tau_1} - \frac{\gamma_1(l_1 - n^*)}{|l_1 - n^*| + \rho_1}, \\ \dot{l}_2 = -\frac{l_2 - \dot{l}_1}{\tau_2} - \frac{\gamma_2(l_2 - \dot{l}_1)}{|l_2 - \dot{l}_1| + \rho_2}, \end{cases} \quad (21)$$

式中: τ_1, τ_2 为滤波时间常数; $\rho_1, \rho_2, \gamma_1, \gamma_2$ 为设计常数; l_1 为 n^* 的滤波值, l_2 为 $\dot{l}_1$ 的滤波值, 即 $\dot{n}^*$ 的估计值 $\hat{n}^*$.

为了实现面贴式永磁同步电动机的完全解耦和速度跟踪控制, 本文采用磁场定向的控制方式, 即令直轴参考电流满足 $i_d^* = 0$, 且选择交轴参考电流如式(22)所示. 定义电流跟踪误差

$$\begin{cases} e_q = i_q - i_q^*, \\ e_d = i_d - i_d^*. \end{cases} \quad (22)$$

由 e_d, e_q 组成的新子系统, 可得

$$\dot{e}_q = -\frac{2\pi}{60} p i_d n - \frac{R_s}{L} i_q - \frac{2\pi}{60} \frac{p\psi_f}{L} n + \frac{u_q}{L} - \dot{i}_q^*, \quad (23)$$

$$\dot{e}_d = -\frac{R_s}{L} i_d + \frac{2\pi}{60} p i_q n + \frac{u_d}{L}. \quad (24)$$

构造Lyapunov函数

$$V_3 = \frac{1}{2}e_q^2 + \frac{1}{2}e_d^2. \quad (25)$$

对上式求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= e_q \dot{e}_q + e_d \dot{e}_d = \\ &e_q \left(-\frac{2\pi}{60} p i_d n - \frac{R_s}{L} i_q - \frac{2\pi}{60} \frac{p\psi_f}{L} n + \frac{u_q}{L} - \dot{i}_q^* \right) + \\ &e_d \left(-\frac{R_s}{L} i_d + \frac{2\pi}{60} p i_q n + \frac{u_d}{L} \right). \end{aligned} \quad (26)$$

进而可将控制量 u_q 和 u_d 设计为

$$u_q = L \left(\frac{2\pi}{60} p i_d n + \frac{R_s}{L} i_q + \frac{2\pi}{60} \frac{p\psi_f}{L} n + \dot{i}_q^* - k_3 e_q \right), \quad (27)$$

$$u_d = L \left(\frac{R_s}{L} i_d - \frac{2\pi}{60} p i_q n - k_4 e_d \right), \quad (28)$$

其中 $\hat{i}_q^*$ 为 i_q^* 的估计值, 经如式(21)所示的二阶滑模滤波器实现.

将式(27)和(28)代入式(26)可得

$$\dot{V}_3 = -k_3 e_q^2 - k_4 e_d^2 \leq 0. \quad (29)$$

由下列等式:

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = -\rho S \operatorname{sgn} S - r S^2, \\ \dot{V}_2 = -k_2 e_n^2, \\ \dot{V}_3 = -k_3 e_q^2 - k_4 e_d^2, \end{cases} \quad (30)$$

由于 V_1, V_2, V_3 有界, 根据Barbalat推论, 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_n = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_q = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_d = 0,$$

从而证明了对于控制律(14)(19)(27)–(28)能够使得系统位移跟踪误差趋于零, 同时使得系统渐近稳定. 控制器的设计结构如图3所示.

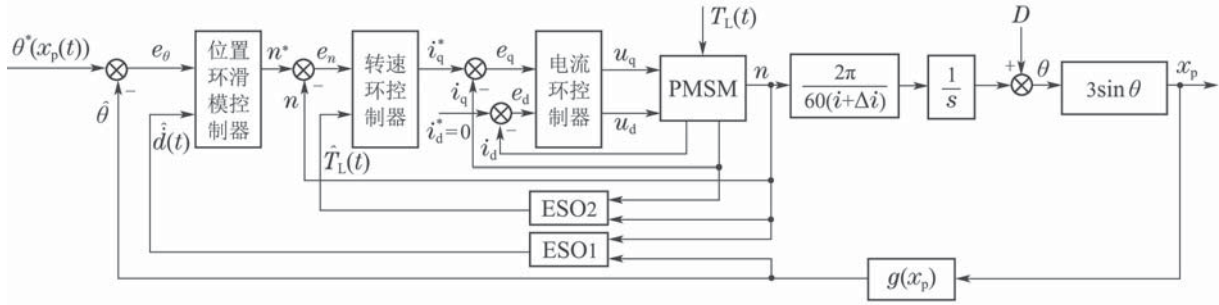


图3 控制系统设计总体框图

Fig. 3 The integral block diagram of the control system design

4 仿真研究(Simulation)

为了验证所提基于扩张状态观测器的反步滑模控制方法的有效性, 本节对伺服电机驱动的连铸结晶器振动系统进行了仿真研究.

实验中所涉及仿真参数取自于实验室模拟振动台的实际参数^[17]. 减速器减速比: $i = 5$; 永磁同步电机参数: $P_N = 20.4 \text{ kW}$, $I_N = 45 \text{ A}$, $n_N = 1500 \text{ r/min}$, $L = 4.6 \text{ mH}$, $\psi_f = 0.96 \text{ Wb}$, $B = 0.004 \text{ Nms/rad}$, $R_s = 0.14 \Omega$, $J = 0.0547 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $p = 3$.

扩张状态观测器参数取为: $\beta_1 = 100$, $\beta_2 = 10^4$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$, $\delta_1 = 0.1$, $\delta_2 = 0.1$, $\varsigma_1 = 0.05$; $\beta_3 = 30$, $\beta_4 = 3 \times 10^4$, $\alpha_3 = 0.5$, $\alpha_4 = 0.5$, $\delta_3 = 0.1$, $\delta_4 = 0.1$, $\varsigma_2 = 0.05$.

二阶滑模滤波器参数取为: $\rho_1 = 20$, $\rho_2 = 20$, $\tau_1 = 1 \times 10^{-3}$, $\tau_2 = 1 \times 10^{-3}$, $\gamma_1 = 100$, $\gamma_2 = 100$.

反步滑模控制器的参数取为: $k_1 = 200$, $k_2 = 100$, $k_3 = 100$, $k_4 = 100$, $\eta_1 = 2$, $\eta_2 = 2$, $\xi = 0.6$.

仿真中给定的结晶器位移信号为德马克非正弦振动波形函数

$$x_{pr} = h \sin(\omega t - A \sin(\omega_0 t)). \quad (31)$$

根据德马克方程可得相应的偏心轴转角给定值为

$$\theta^* = \omega_0 t - A \sin(\omega_0 t), \quad (32)$$

式中: $h = 3 \text{ mm}$ 为结晶器振幅; $\omega_0 = \frac{2\pi}{60}f$, 其中 $f = 130 \text{ 次/min}$ 为连铸结晶器非正弦振动频率; $A = \frac{\pi\alpha}{2 \sin(\frac{\pi}{2}(1+\alpha))}$, 其中 $\alpha = 0.24$ 为波形偏斜率.

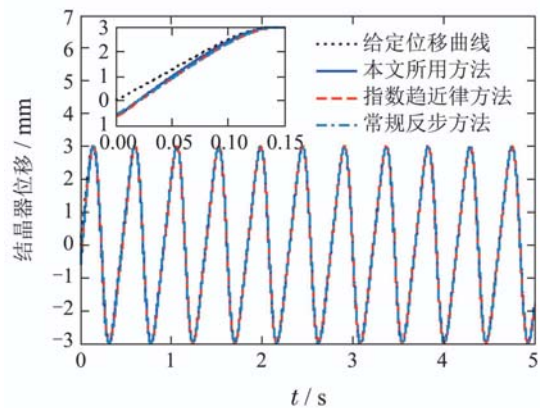
根据文献[17]中对负载转矩的辨识数据, 连铸结晶器振动系统的负载扰动为 $T_L = (5.1335 + 6.4985 \sin(\omega_0 t - A \sin \omega_0 t)) \text{ Nm}$. 考虑到结晶器振动过程中负载转矩的突加、突减对系统的影响, 则在

时刻 $t = 1 \text{ s}$ 时选择负载估计值为 $T_L = (5.1335 + 6.4985 \sin(\omega_0 t - A \sin(\omega_0 t)) + 2) \text{ Nm}$.

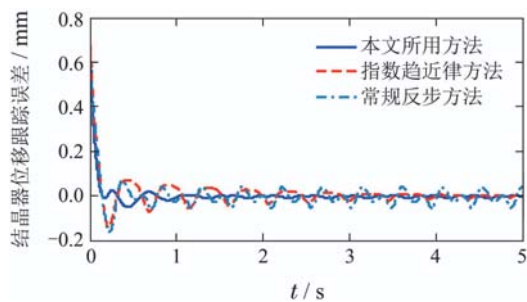
机械部分综合扰动包含减速器减速比加工误差和初始时刻偏心轴机械零位初始偏差. 其中, 减速比加工误差由机械加工精度造成, 如根据机械加工精度 $\pm 3\%$ 的要求, 本文取最不理想的情况: $\Delta i = 3\%i$; 初始时刻偏心轴机械零位初始偏差 $D = -0.2 \text{ rad}$. 因此本文将综合扰动取为 $d(t) = \int \frac{-\Delta i}{i(i + \Delta i)} \frac{2\pi}{60} n d\tau - 0.2/\text{rad}$.

仿真过程分别与未采用滑模控制方法的常规反步方法和采用指数趋近律的反步控制方法进行对比, 从而验证本文采用的双幂次趋近律对跟踪性能的改善.

由图4可见: 在存在负载扰动和机械部分综合扰动情况下, 与采用指数趋近律的控制方法以及未采用滑模的常规反步控制方法相对比, 通过位移跟踪误差曲线可以看出, 当误差较大时前两者跟踪误差收敛速度相当, 但是随着跟踪误差趋向于0, 采用双幂次趋近律的位移跟踪误差曲线保持了较好的收敛速度, 而采用指数趋近律的位移跟踪误差曲线的收敛速度相对较缓慢; 同时采用滑模方法有较小的稳态误差.



(a) 结晶器位移跟踪曲线



(b) 结晶器位移跟踪误差曲线

图 4 结晶器位移跟踪及误差曲线

Fig. 4 The traces and the tracking error curves of the mold displacement

由图5可见, 滑模面可在有限时间内收敛到0, 并且有较快的收敛速度.

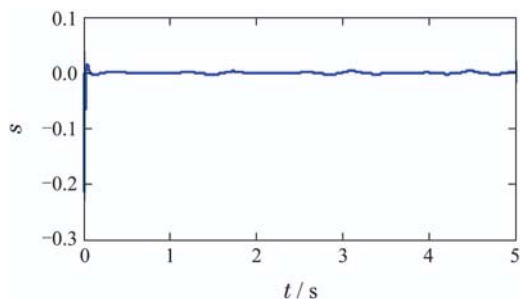
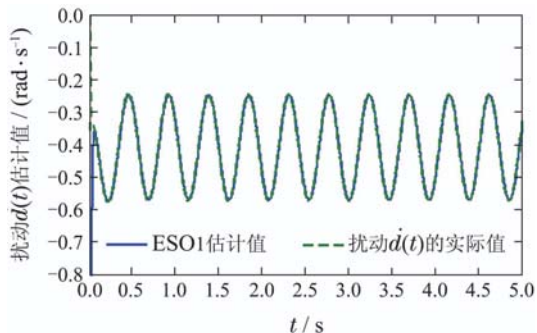
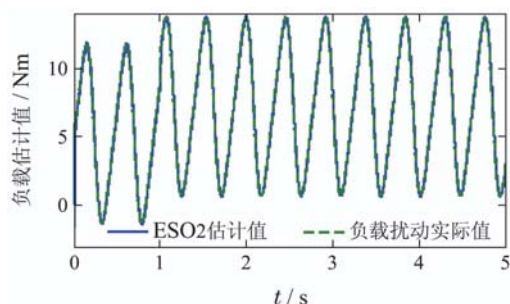


图 5 滑模面曲线

Fig. 5 Sliding mode surface curve

由图6可见: 构造的扩张状态观测器对系统的扰动 $\dot{d}(t)$ 和负载转矩扰动 T_L 进行了动态观测, 有效地削弱了系统干扰的影响, 提高了系统的跟踪控制精度.

(a) 扰动 $\dot{d}(t)$ 的观测值曲线(b) 负载 T_L 的观测值曲线图 6 扰动 $\dot{d}(t)$ 和负载转矩扰动 T_L 的观测曲线Fig. 6 The observations curves of disturbance $\dot{d}(t)$ and the load T_L

由图7转速响应曲线可看出, 伺服电机的转速变化较为平稳, 满足伺服电机驱动的连接结晶器振动工艺所要求的单方向、变角速度转动. 图8分别为 d - q 轴的电流, 交轴电流变化较为平稳, 且在额定值范围内; 直轴电流趋于0, 满足预先对电流的要求.

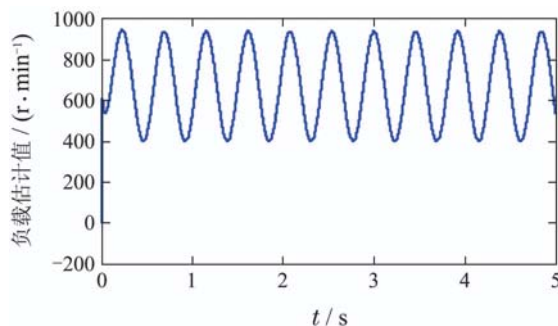
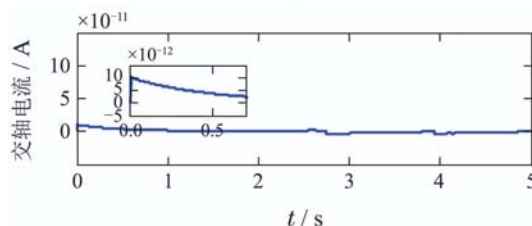
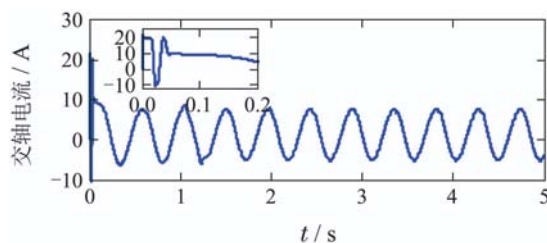


图 7 电机转速响应曲线

Fig. 7 Motor speed response curve

图 8 电机 d - q 轴电流响应曲线Fig. 8 Motor current of the d - q shaft response curve

5 结论(Conclusions)

针对伺服电机驱动的连接结晶器振动系统中减速比加工误差和负载转矩扰动对结晶器位移跟踪精度的影响, 本文采用扩张状态观测器对其进行了动态观测, 并将输出的观测值引入到设计的控制器中进行补偿, 有效地提高了系统的跟踪控制精度; 此外, 结合反步滑模控制方法设计控制器, 并引入双幂次趋近律, 有效保证了系统的跟踪精度和鲁棒性. 与指数趋近律方法和常规反步控制器的仿真对比结果表明, 本文所设计的控制器能有效实现结晶器位移的渐近跟踪控制, 且跟踪速度较快, 对系统的减速比加工误差、偏心轴机械零位初始偏差和负载转矩扰动具有较强的鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] CHEN W H, BALLANCE D J, GAWTHROP P J, et al. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(4): 932 – 938.

- [2] WANG Jianhao, HU Jianbo, GAO Peng. Tracking control of flight simulator servo systems based on NDO [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(10): 2301 – 2305.
(王坚浩, 胡剑波, 高鹏. 基于NDO的飞行模拟转台伺服系统跟踪控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(10): 2301 – 2305.)
- [3] ZHENG Xuemei, LI Qiuming, SHI Hongyu, et al. Higher-order non-singular terminal-sliding-mode observer for permanent-magnet synchronous motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(10): 1467 – 1472.
(郑雪梅, 李秋明, 史宏宇, 等. 用于永磁同步电机的一种非奇异高阶终端滑模观测器 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1467 – 1472.)
- [4] SAYEM A H M, CAO Z, MAN Z, et al. Performance comparison of SO and ESO based RC[C] // *IEEE Conference on Systems, Process & Control*. Kuala Lumpur: [s.n.], 2013: 121 – 124.
- [5] WU Yangyang, FANG Yiming, LIU Le, et al. Global dynamic sliding mode control of pmsms peed servo systems base on extended state observer [C] // *The 32th Chinese Control Conference Proceedings*. Xi'an: [s.n.], 2013: 4432 – 4437.
(吴洋洋, 方一鸣, 刘乐, 等. 基于ESO的永磁同步电机转速伺服系统全局动态滑模控制 [C] // 第32届中国控制会议论文集. 西安: [s.n.], 2013: 4432 – 4437.)
- [6] HUANG Yi, HAN Jingqing. Analysis and design of nonlinear second-order extended state observer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(13): 1373 – 1379.
(黄一, 韩京清. 非线性连续二阶扩张状态观测器的分析与设计 [J]. 科学通报, 2000, 45(13): 1373 – 1379.)
- [7] SUN Zhenxing, LI Shihua, ZHANG Xinghua. Direct torque control of induction motor based on extended state observer and finite time control scheme [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(6): 748 – 756.
(孙振兴, 李世华, 张兴华. 基于扩张状态观测器和有限时间控制的感应电机直接转矩控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(6): 748 – 756.)
- [8] WU Yong, DU Yanli, ZHANG Wei. Decentralized adaptive fuzzy control for manipulator based on extended state observer [J]. *Journal of Southeast University*, 2012, 42(s1): 192 – 195.
(吴勇, 杜艳丽, 张炜. 基于扩张状态观测器的机械臂分散自适应模糊控制 [J]. 东南大学学报, 2012, 42(S1): 192 – 195.)
- [9] DONG Feiyao, LEI Humin, SHAO Lei, et al. Design of control system for missile longitudinal plane based on extended state observer [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(1): 125 – 128.
(董飞尧, 雷虎民, 邵雷, 等. 基于扩张状态观测器的导弹纵向控制系统设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(1): 125 – 128.)
- [10] BAI Yu, SANG Nan. Estimation of CG sideslip angle base on extended state observer [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(13): 154 – 158.
(白玉, 桑楠. 扩张状态观测器的汽车质心侧偏角估计 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(13): 154 – 158.)
- [11] ZHANG Hexin, FAN Jinsuo, MENG Fei, et al. A new double power reaching law for sliding mode control [J]. *Control & Decision*, 2013, 28(2): 289 – 293.
(张合新, 范金锁, 孟飞, 等. 一种新型滑模控制双幂次趋近律 [J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 289 – 293.)
- [12] HAN Y Z, LIU X J. Collective pitch sliding mode control for large scale wind turbines considering load reduction [J]. *International Conference on Mechatronics and Control*, 2014, 3(5): 652 – 656
- [13] HUANG Degang, ZHANG Weiguo, SHAO Shan, et al. Design of automatic control system for longitudinal landing on carrier [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 131(12): 1731 – 1739.
(黄得刚, 章卫国, 邵山, 等. 舰载机自动着舰纵向控制系统设计 [J]. 控制理论与应用, 2014, 131(12): 1731 – 1739.)
- [14] SUN Bing, ZHU Daqi, DENG Zhigang. Bio-inspired discrete trajectory-tracking control for open-frame underwater vehicles [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(4): 454 – 462.
(孙兵, 朱大奇, 邓志刚. 开架水下机器人生物启发离散轨迹跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(4): 454 – 462.)
- [15] TAHERI B, CASE D, RICHER E. Force and stiffness backstepping-sliding mode controller for pneumatic cylinders [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(6): 1799 – 1809.
- [16] FEI J T, XIN M Y, DAI W L. Adaptive backstepping sliding mode control for mems gyroscope [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2013, 27(2): 40 – 45.
- [17] FANG Yiming, LI Gongyin, LI Jianxiong, et al. Modeling and analysing for oscillation system of continuous casting mold driven by servo motor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2615 – 2623.
(方一鸣, 李宫胤, 李建雄, 等. 伺服电机驱动连铸结晶器振动系统建模与分析 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2615 – 2623.)
- [18] XIA Tian, KANG Kesong, FANG Yiming, et al. Backstepping sliding mode control for continuous cast molddisplacement system driven by servo motor drive system[C] // *The 34th Chinese Control Conference Proceedings*. Hangzhou: [s.n.], 2015: 4443 – 4448.
(夏天, 亢克松, 方一鸣, 等. 伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移系统非线性处理及控制 [C] // 第34届中国控制会议论文集. 杭州: [s.n.], 2015: 4443 – 4448.)
- [19] ZHANG Qiang, WU Qingxian, JIANG Changsheng, et al. Robust reconfigurable tracking control of near space vehicle with actuator dynamic and input constraints [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1263 – 1271.
(张强, 吴庆宪, 姜长生, 等. 考虑执行器动态和输入受限的近空间飞行器鲁棒可重构跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(10): 1263 – 1271.)

作者简介:

亢克松 (1990–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移系统非线性控制, E-mail: yingkks@163.com;

刘乐 (1985–), 男, 讲师, 目前研究方向为冷带轧机速度张力系统的解耦和协调跟踪控制, E-mail: leliu@ysu.edu.cn;

方一鸣 (1965–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂系统的建模仿真与控制、自适应鲁棒控制理论与应用、冶金自动化等, E-mail: fyiming@ysu.edu.cn;

郑会成 (1991–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移跟踪控制。