

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108175

基于参数优化的连铸结晶器振动位移系统 复合控制研究*

马 壮^{1,2}, 方一鸣¹, 赵晓东¹, 周 健¹

(1. 燕山大学河北省工业计算机控制工程重点实验室 秦皇岛 066004;
2. 唐山学院河北省智能数据信息处理与控制重点实验室 唐山 063000)

摘 要:本文以伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移控制系统为研究对象,针对系统工艺控制中要求伺服电机转速单方向、变角速度转动,同时考虑系统控制器参数的选取大多依靠经验等问题,提出了一种基于前馈控制与参数优化的PID反馈控制相结合的复合跟踪控制策略。首先,根据伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移系统特性,建立了伺服电机输出转速与振动位移之间的近似数学模型。其次,针对伺服电机单方向转动工艺约束条件,确定结晶器振动位移系统以转速补偿作为前馈控制器,保证系统控制器输出大于零。再次,针对振动位移系统控制器参数大多依靠经验选取的问题,提出采用一种改进的飞蛾火焰优化算法优化PID控制器参数的策略,以实现结晶器振动位移高精度跟踪控制。最后,通过仿真与实验验证所提方法的有效性,实验结果表明:优化后的振动位移调整时间缩短了0.3 s,振动位移跟踪相对误差减小了1.8%。

关键词:连铸结晶器;复合控制;改进的飞蛾火焰优化算法;前馈控制;PID反馈控制

中图分类号: TP273 TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Study on compound control of vibration displacement system of continuous casting mold based on parameter optimization

Ma Zhuang^{1,2}, Fang Yiming¹, Zhao Xiaodong¹, Zhou Jian¹

(1. Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. Key Laboratory of Intelligent Data Information Processing and Control of Hebei Province, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: This paper takes the vibration displacement control system of continuous casting mold driven by servo motor as the study object, aiming at the problem of the servo motor requirements of single direction and variable angular speed rotation in system processing control and considering that the selection of the system controller parameters mainly depends on experience, a compound tracking control strategy based on feedforward control and PID feedback control with parameter optimization is proposed. Firstly, an approximate mathematical model between the output speed of servo motor and vibration displacement is established according to the characteristics of the vibration displacement system of continuous casting mold driven by servo motor. Secondly, aiming at the processing constraints of servo motor single direction rotation, it is determined that the vibration displacement system of continuous casting mold takes speed compensation as the feedforward controller to ensure that the output of the system controller is greater than zero. Thirdly, aiming at the problem that the controller parameters of vibration displacement system are selected mainly depending on experience, a strategy adopting ameliorated moth-flame optimization (AMFO) algorithm to optimize the PID controller parameters is proposed, which can achieve high accuracy tracking control of the mold vibration displacement. Finally, simulation and experiment verify the effectiveness of the proposed control strategy, and the experiment results show that the adjustment time of the vibration displacement is shortened by 0.3 s and the relative error of vibration displacement tracking is reduced by 1.8% after optimization.

Keywords: continuous casting mold; compound control; ameliorated moth-flame optimization algorithm; feedforward control; PID feedback control

收稿日期: 2021-06-29 Received Date: 2021-06-29

* 基金项目: 国家自然科学基金(61873226, 61803327)、河北省自然科学基金(F2020203018)项目资助

0 引 言

连铸结晶器振动控制技术被认为是钢铁连铸生产过程中关键的技术之一^[1],其对于提高连铸效率与改善钢坯品质起着至关重要的作用。结晶器在驱动方式上,连铸结晶器经过最初的液压驱动方式^[2],逐渐发展到机械+电机(普通电机、伺服电机)驱动方式^[3-4],近年来机械伺服驱动方式逐渐被钢铁企业认可;而在振动方式上,结晶器经历了矩形波振动、梯形波振动,发展到正弦波与非正弦波振动^[5-7],非正弦振动方式被认为在提高连铸结晶效率、改善铸坯表面振痕等方面表现尤为显著。因此,机械伺服驱动与非正弦振动方式相结合连铸结晶器由此发展而来。

相比于液压驱动的连铸结晶器^[8]而言,本课题组发明研制的伺服电机驱动的连铸结晶器振动控制装置^[4,9]具有控制精度高、体积小、维护简单、节约能耗等优点,同时在减轻振痕、提高拉坯速度等方面作用明显,行业认可度逐年提升。在其工艺控制过程中,要求伺服电机须单方向、变角速度旋转,实现结晶器非正弦振动。而系统振动位移与伺服电机转角(或者转速)之间为近似正弦函数关系,其逆解存在不唯一性,因此按照传统的设计方法所设计的控制器不能直接将应用到系统控制之中。同时,本装置因存在快时变负载扰动、齿轮间隙、减速器安装误差以及参数摄动等不确定性问题,一定程度上影响了跟踪控制效果。

为解决上述周期函数逆解不唯一问题,文献[10-14]提出了解决周期非线性问题的几种方法。文献[10-11]利用分段函数方法确立了振动位移与伺服电机转角之间的对应一一关系,而文献[12]在建立振动位移与伺服电机转角的对应关系上,采用波形翻转的处理方法,上述方法均处理了系统非线性控制问题。但以上文献均会出现随时间增加,导致数据溢出问题,故文献[13-14]为解决了非线性周期函数不唯一与数据溢出问题,通过建立结晶器振动位移与偏心轴转角误差之间的映射关系,既避免数据的累计溢出现象发生,又保证了非线性关系逆解的唯一性。但上述文献仅限于系统仿真研究,完成了伺服电机转角与振动位移的闭环控制,未实现期望振动位移与实际振动位移的闭环跟踪控制。

另外,在提高考虑结晶器跟踪控制精度,抑制扰动以及参数不确定性等方面也取得了较多的成果^[15-18]。文献[15]针对结晶器系统中存在的匹配与非匹配扰动问题,提出了采用扩张状态观测器的方法进行观测,进而补偿到滑模控制器中提高跟踪控制精度;文献[16]针对减速器齿轮间隙与偏心轴安装非零位误差问题,提出采用基于干扰观测器的反步滑模控制方案;文献[17-18]均针

对时变负载扰动及参数不确定性问题,分别提出采用自抗扰控制方案与前馈+反馈的复合控制方案,以抑制系统因突变负载扰动以及其他不确定性对系统跟踪精度的影响。但上述文献仅仅基于仿真研究,实验研究较少,同时控制器参数调节存在经验选取的问题,一定程度上影响跟踪控制精度的提高。

针对实际系统中控制器参数大多依靠经验选取的问题,很多研究人员采用智能优化算法进行控制器参数整定,尤其是受到生物进化和昆虫行为启发而提出的算法得到了广泛应用,例如:遗传算法^[19]、粒子群优化算法^[20]、蚁群优化算法^[21]、人工蜂群算法^[22]、飞蛾火焰优化算法^[23]等。近年来参数优化算法不断推陈出新,其对于控制器参数优化来说均具有可行性。而本文采用了共同作者 2020 年提出的较先进的改进飞蛾火焰优化算法(ameliorated moth-flame optimization algorithm, AMFO)^[24],该优化算法简单、高效、易于实现,且克服了易陷入局部最优的问题,保证了种群多样性,提高了收敛速度。

综上所述,本文为提高结晶器振动位移系统跟踪控制精度为出发点,针对结晶器振动系统工艺控制问题与系统控制器参数大多依靠经验选取等问题,提出一种基于 AMFO 算法优化 PID 控制器参数的复合控制策略,进行了系统仿真与实验研究。首先,建立连铸结晶器系统模型,并指出系统的控制目标与主要问题;其次,设计了基于 AMFO 算法优化的系统反馈控制器和为解决因工艺约束要求而构建系统前馈控制器,进而完成系统复合控制器(前馈控制+PID 反馈控制)设计,以提高系统的跟踪控制精度;再次,通过 MATLAB 仿真研究,确定系统最佳控制器参数,分析控制效果;最后,通过实验室的伺服电机驱动的连铸结晶器振动台进行实验研究,验证本文所提出方法的有效性。

1 伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移系统数学模型及主要控制问题

1.1 结晶器振动位移系统模型

伺服电机驱动的连铸结晶器振动控制装置如图 1 所示,其主要由结晶器振动台、伺服电机(含伺服电机驱动器)、减速器、偏心轴、振动臂以及连杆机构等部分组成。其原理主要是通过伺服电机的单方向、变角速度旋转,进而通过联轴器带动减速器、驱动偏心轴转动,通过与偏心轴相连的连杆机构上下运动,最终实现结晶器振动台的非正弦周期振动。

图 1(b)为系统原理图,该图主要根据伺服电机 $d-q$ 模型坐标变换,并考虑系统存在时变负载扰动以及偏心轴安装非零位等影响因素得到的,其系统数学模型如式(1)所示。

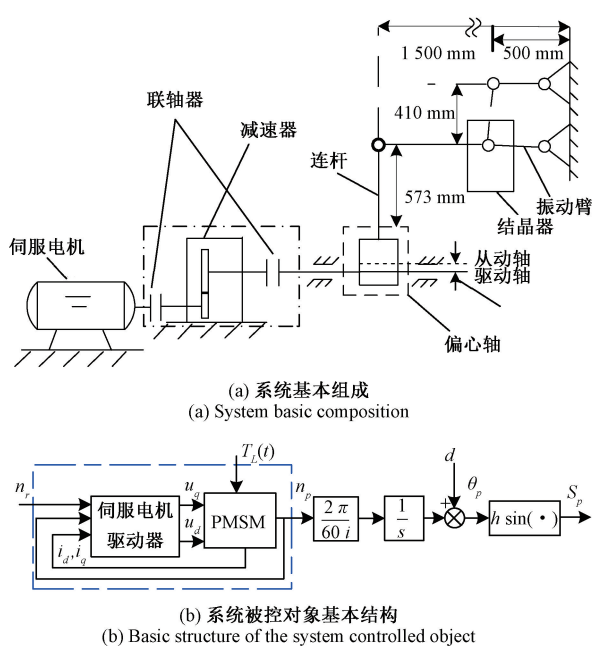


图1 伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移系统基本组成

Fig. 1 Basic composition of the vibration displacement system of continuous casting mold driven by servo motor

$$\begin{cases} \dot{s}_p = h \left(\frac{2\pi}{60i} n_p \right) \cos \left(\int \frac{2\pi}{60i} n_p d\tau + d \right) \\ \dot{n}_p = \frac{1.5p\psi_f}{J} \frac{60}{2\pi} i_q - \frac{B}{J} n_p - \frac{60}{2\pi} \frac{T_L}{J} \\ \dot{i}_q = -\frac{2\pi}{60} p n_p i_d - \frac{R_s}{L} i_q - \frac{p\psi_f}{L} \frac{2\pi}{60} n_p + \frac{u_q}{L} \\ \dot{i}_d = -\frac{R_s}{L} i_d + \frac{2\pi}{60} p n_p i_q + \frac{u_d}{L} \end{cases} \quad (1)$$

式中: s_p 、 n_p 表示系统的实际振动位移、伺服电机实际转速(图1(b)中 n_r 表示伺服电机期望转速, θ_p 为伺服电机实际旋转的角位移); h 为振动位移振动幅度; i 为减速器减速比; u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 $d-q$ 轴坐标的电压和电流; $T_L(t)$ 为结晶器振动台负载转矩; d 为偏心轴非同轴安装误差, 为常数; J 、 B 为伺服电机转动惯量和粘性摩擦系数; p 、 L 、 R_s 、 ψ_f 分别表示为伺服电机磁极对数、等效的电感、电阻与磁链。

1.2 主要控制问题描述

系统模型中值得指出的是, $d-q$ 坐标下的电流 i_d 与 i_q 存在耦合关系, 其主要通过矢量控制方法令 $i_d = 0$ 实现解耦, 进而通过一个 PI 控制器实现对电流环的快速控制, 以抑制电流环内的扰动与不确定性对系统的影响; 在速度环, 伺服电机实际转速 n_p 与期望转速 n_r 通过一个设计工程最佳 PI 控制器实现对转速环的跟踪

控制。故实际系统中, 这两个环节通过伺服电机驱动器加以实现, 此部分不再赘述。综上所述, 图1(b)中虚线框部分可以等效成二阶工程最佳系统, 其数学模型^[25]为:

$$G(s) = \frac{n_p}{n_r} = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (2)$$

式中: T 为等效二阶系统时间常数; k 为比例增益; ξ 为最佳工程模型阻尼比, $\xi = 0.707$ 。同时, 本控制系统中, 对于系统期望的非正弦振动位移曲线 s_r 为:

$$s_r = h \sin(\omega t - A \sin(\omega t)) \quad (3)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为结晶器振动角频率, 其中结晶器的振动频率 f 与拉坯速度 v 的关系为: $f = \alpha v + \beta$, 参数 α 、 β 均为常数。 A 为与非正弦振动偏斜率 α 有关的参数, $A = \pi\alpha / (2\sin(\pi(1+\alpha)/2))$ 。

本文的控制目标为: 针对伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移控制系统的工艺控制要求, 即: 系统在满足伺服电机单方向、变角速度旋转工艺控制约束的前提下, 同时考虑实际系统中存在时变负载扰动以及偏心轴非零位等不确定性问题, 设计系统控制器完成对期望非正弦振动位移的快速、高精度跟踪控制。

针对上述目标, 主要工作归纳为:

- 1) 构建系统期望非正弦振动波形 s_r 与实际振动位移 s_p 的位置闭环 PID 控制器, 用以解决系统跟踪控制问题;
- 2) 为提高位置闭环系统跟踪控制精度, 采用 AMFO 算法对所设计的 PID 控制器参数进行参数优化, 选取最佳控制器参数;
- 3) 构建系统前馈控制器, 用以解决结晶器控制系统中因伺服电机单方向、变角速度旋转产生的工艺控制约束问题;
- 4) 在 MATLAB 环境下完成仿真研究; 然后利用现有实验环境下的结晶器模拟振动试验台完成实验, 以验证系统控制方案的有效性。

2 证基于参数优化的复合控制器设计与分析

系统振动位移闭环控制器主要由基于参数优化的反馈控制器与处理伺服电机单方向、变角速度旋转的前馈控制器两部分构成, 系统整体控制结构图如图2所示。

2.1 基于参数优化的反馈控制器设计

首先, 根据期望的振动位移 s_r 与系统实际输出振动位移 s_p 的差 (即: $e_s = s_r - s_p$), 构成 PID 控制器, 如下:

$$u_e(t) = K_p e_s(t) + K_I \int e_s(t) dt + K_D \frac{de_s(t)}{dt} \quad (4)$$

式中: K_p 、 K_I 、 K_D 分别为 PID 控制器的比例、积分、微分参数。

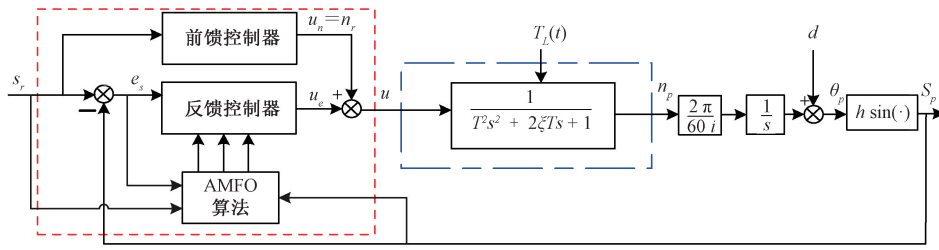


图 2 伺服电机驱动的连续铸结晶器振动位移控制系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of vibration displacement control system of continuous casting mold driven by servo motor

其次,采用 AMFO 算法对系统控制器参数进行优化。具体优化步骤如下^[24]:

1) 初始化参数:飞蛾和火焰种群数 n , 迭代次数 $l=1$, $R=\text{rand}$ 。同时,设置目标精度。

2) 初始化飞蛾种群 M , 其中每个飞蛾是由控制器参数 (K_p, K_I, K_D) 构成。采用反对学习生成反向飞蛾 M' , 具体公式如下:

$$M'_{ij} = M_{ij_{\max}} + M_{ij_{\min}} - M_{ij} \quad (5)$$

其中, $i = 1, \dots, n; j = 1, 2, 3; M_{ij_{\max}}$ 和 $M_{ij_{\min}}$ 分别表示第 i 个飞蛾的上界与下界。

同时,计算 M 和 M' 适应度函数值,选取较好的 n 个个体作为飞蛾种群。

3) 计算火焰数 f_{no} , 公式如下:

$$f_{no} = \text{round}\left(n - \frac{l}{L}(n - 1)\right) \quad (6)$$

4) 火焰生成。当迭代次数为 1 时,对飞蛾种群的适应度函数值进行排序得到火焰种群;当迭代次数大于 1 时,对当前迭代的飞蛾、前一次迭代的飞蛾和突变的火焰进行适应度函数值排序,选取较好的 n 个个体为新的火焰种群。

5) 飞蛾的位置更新,如下:

$$M_i = (l + 1) = \begin{cases} F_i - A \cdot D'_i, & i \leq f_{no} \\ D_i \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_{f_{no}}(l), & i > f_{no} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} D'_i = |C \cdot F_i - M_i| \\ D_i = |F_{f_{no}} - M_i| \\ A = 2a \cdot R - a, C = 2R \end{cases}$$

其中, R 为 0 到 1 之间的随机数。

6) 高斯突变。在迭代过程中,选取最优的火焰作为基火焰,采用高斯突变从生成变异火焰,如下:

$$\begin{cases} P_j = F_{ij} + C_j \cdot \text{Gaussian}[\mu, \sigma^2] \\ C_j = \left(\sum_{i=1}^N F_{ij}\right) / n \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_j 为变异火焰; F_{ij} 为最优火焰的第 j 个变量; C_j 为

权重; $\mu = 0; \sigma = 0.6 - 0.4(l/L)$ 。

7) 达到最大迭代次数或者达到需要的精度后结束迭代,输出最优火焰,即一组最优的控制参数。

最后,根据图 2 模型,采用 MATLAB 对结晶器振动位移 PID 控制参数进行优化,确定最佳控制参数 K_p, K_I, K_D 。

2.2 前馈控制器设计

针对伺服电机驱动的连续铸结晶器位移控制系统中要求伺服电机单方向、变角速度旋转的工艺控制约束问题,本节主要通过结晶器振动位移控制系统前馈控制器设计,用以确定伺服电机的期望速度 $u_n = n_r$ 与期望振动位移 s_r 之间的关系,保证伺服电机给定转速满足工艺约束条件。

令伺服电机期望旋转角度 $\theta_r = \omega t - A \sin(\omega t)$, 则系统振动位移输出 $s_p = h \sin(\theta_p)$ 与期望振动位移 $s_r = h \sin(\theta_r)$ 之间的差即为 e_s 。本质上讲, e_s 虽在一定程度上体现了振动位移的差,但由于振动位移的逆解(伺服电机旋转角位移)为周期函数(即存在逆解非唯一问题),从而导致 e_s 不能全面体现结晶器振动位移的差。因此,用伺服电机旋转角度之间的差应最为准确。基于此,通过期望振动位移来确定期望转速 $u_n = n_r$ 将有效提高系统跟踪控制精度。分析过程如下:

1) 由期望振动位移 $s_r = h \sin(\omega t - A \sin(\omega t))$, 可知对应的 $\theta_r = \omega t - A \sin(\omega t)$;

2) 由图 2 可知,结晶器实际振动为:

$$s_p = h \sin\left(\int \frac{2\pi n_p}{60i} dt + d\right) \quad (9)$$

在理想情形下,不考虑扰动(即: $d = 0$), $n_p = n_r$, $\theta_p = \theta_r$ 。此时,结合式(3)与(9)可得到

$$\omega t - A \sin(\omega t) = \int \frac{2\pi n_r}{60i} dt \quad (10)$$

3) 由确定 n_r 与期望振动位移 s_r 的关系:对式(10)求导,同时结合式(3)、(9)可知,前馈控制器 u_n 为:

$$u_n = n_r = \frac{60i}{2\pi}(\omega - A\omega \cos(\omega t)) \quad (11)$$

由式(3)可知,期望的非正弦振动位移波形为 $s_r = h \sin(\omega t - A \sin(\omega t))$ 。结合系统的工艺控制约束,伺服电机单方向、变角速度旋转,可知期望的角位移 $\theta_r = \omega t - A \sin(\omega t)$ 一定大于零。对其进行求导可得:

$$\dot{\theta}_r = \omega_r = \omega - A\omega \cos(\omega t) \quad (12)$$

式中: ω_r 为理想角速度。

假设伺服电机期望转速为 n_r , 并结合系统图 2 中减速器环节特性,则其角频率计算公式为:

$$\omega_n(t) = \frac{2\pi n_r}{60i} \quad (13)$$

由于伺服电机通过减速器后的角频率与期望振动波形的角频率一致,即: $\omega_r = \omega_n$ 。进而,通过式(12)、(13)可得:

$$n_r = \frac{60i}{2\pi}(\omega - A\omega \cos(\omega t)) \quad (14)$$

因此,在设计前馈控制器过程中,若直接通过期望振动位移进行前馈控制器设计,其过程繁琐、困难。而采用倒推法进行前馈控制器设计,设计过程便捷、准确。

3 仿真与实验研究

本文采用的伺服电机驱动的连铸结晶器实验测试平台如图 3 所示,系统主要由上位机、SimotionD425 与结晶器振动台组成。其振动台以及伺服电机相关参数如表 1 所示,将相关参数进行本文所采用控制策略进行 MATLAB 仿真与现有模拟实验平台的实验研究,用以验证所提控制策略的有效性。

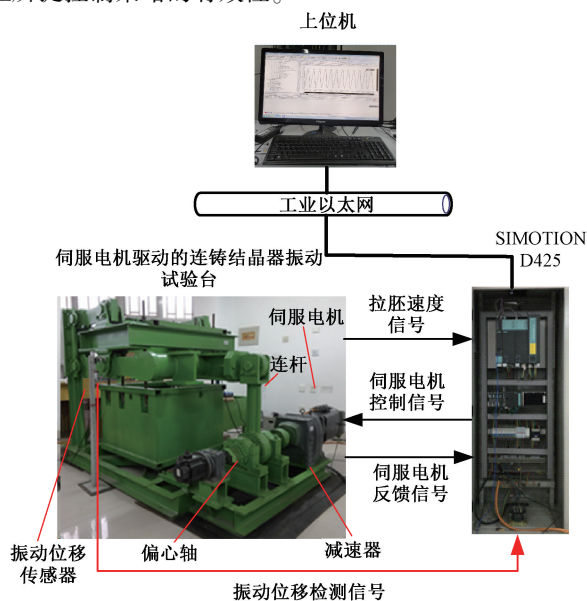


图 3 伺服电机驱动的连铸结晶器振动系统实验平台

Fig. 3 Experiment platform of the vibration system of continuous casting mold driven by servo motor

表 1 结晶器振动台与伺服电机相关参数

Table 1 Related parameters of mold vibration platform and servo motor

物理参数	标称值
结晶器振动幅值 h/mm	3
偏心轴的偏心距 d_e/mm	9
减速器减速比 i	5.114 5
额定功率 P_N/kW	20.4
额定电流 I_N/A	45
额定转速 $n_N/(\text{r}/\text{min})$	1 500
转动惯量 $J/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$	0.054 7
摩擦系数 $B/(\text{Nms}/\text{rad})$	0.004
转子永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.96
磁极对数 p	3
等效电感 L/H	0.004 6
等效磁阻 R_s/Ω	0.14

3.1 仿真研究

根据伺服电机与结晶器振动台主要技术参数确定系统实际运行条件,进而在确定系统模型后进行参数优化仿真研究。首先,采用实验方法^[25]确定系统模型参数为: $T=0.017 7 \text{ s}$, $\xi=0.707$, $k=1$;其次,采用 AMFO 算法对 PID 反馈控制器参数 K_p, K_i, K_d 进行离线仿真优化;最后,得出优化后的控制器参数,再进行测试平台上的实验研究。

结合结晶器振动控制平台实际工况,确定了 K_p, K_i, K_d 的参数调整范围分别 $[10, 300]$ 、 $[10, 500]$ 与 $[0, 100]$ 。确定飞蛾火焰优化算法种群数 $n=50$,最大迭代次数 70,设置精度为 0.001 mm。PID 控制参数随迭代次数变化曲线如图 4 所示,在第 22 代后基本上趋于恒定,此时适应度最小值为 0.067 1,由此最终确定了 $K_p=23.886, K_i=204.976, K_d=0$ 。

经 AMFO 算法优化控制器参数后,进行了系统仿真实验,结果如图 5、6 所示。图 5 分别为振动位移跟踪曲线与跟踪误差曲线,图 5 中显示振动位移跟踪效果良好,其跟踪误差最大值为 0.417 6 mm,调节时间结束后跟踪误差基本稳定在 0.096 6 mm 之内。本文所采用的 AMFO 控制器参数优化算法相比于传统 PID 靠人工经验参数调整方法:此方法在确定实际参数范围后,具有参数确定简便、快捷的优点;同时,该方法参数选取具有随机性的特点。图 6 为复合控制器的输出曲线,其物理量为伺服电机的转速,由图 6 可知控制器输出曲线平滑,能够很好的满足伺服电机控制的工艺要求。

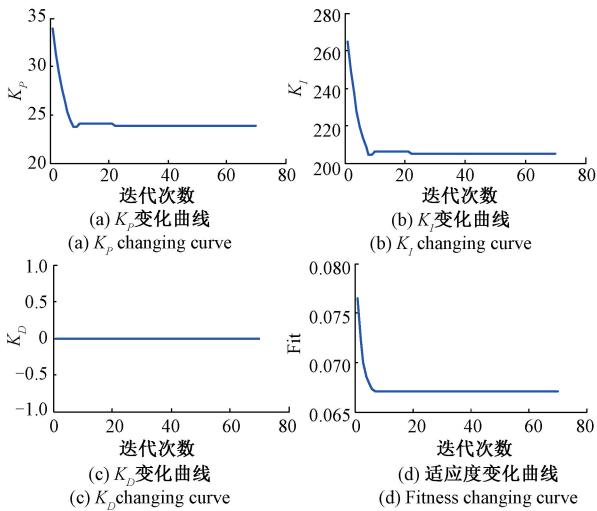


图 4 AMFO 优化 PID 参数过程变化曲线

Fig. 4 Process changing curves of PID parameters optimized by AMFO

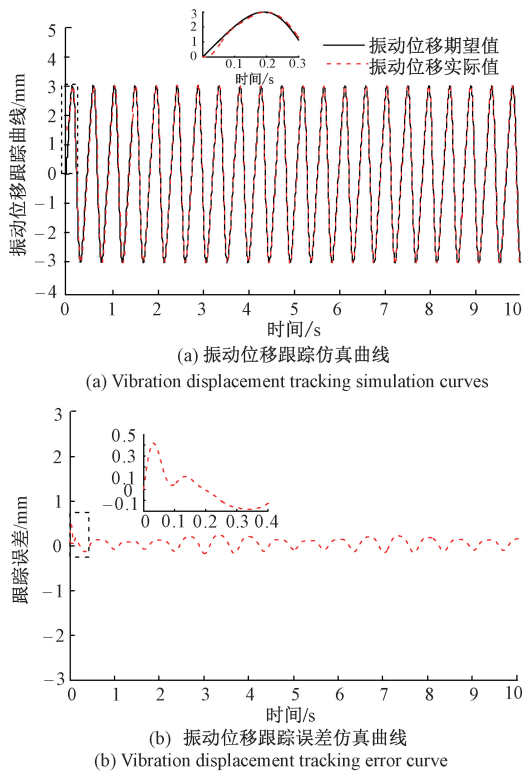


图 5 结晶器振动位移及其误差仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of vibration displacement and its error of the mold

3.2 实验研究

伺服电机驱动的结晶器振动控制系统主要包括硬件和软件(含监控和测试软件)两部分组成。其中,硬件部

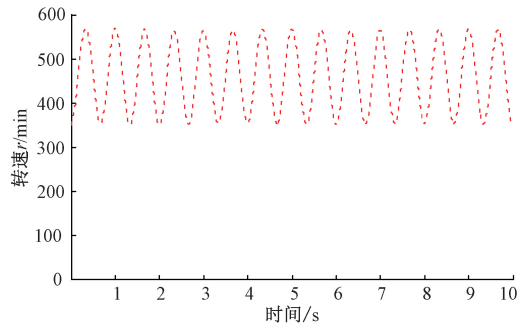


图 6 控制器输出曲线

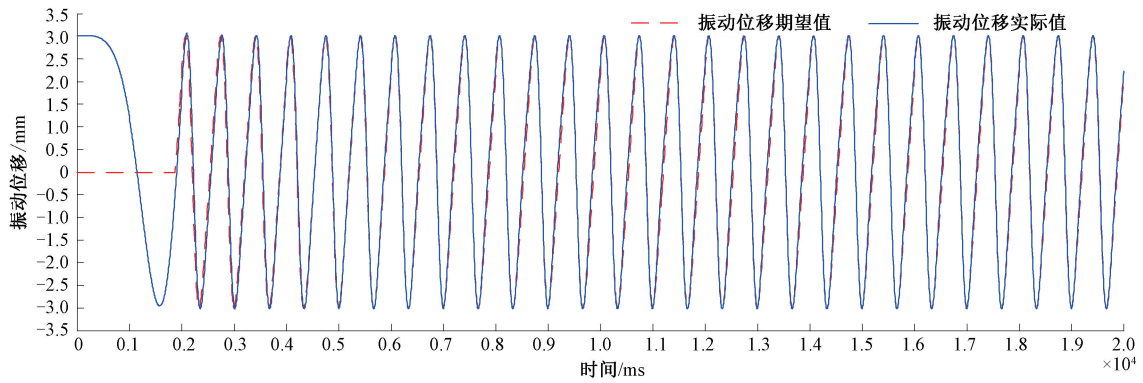
Fig. 6 Controller output curve

分主要由结晶器模拟振动台、连杆机构、偏心轴、减速器、振动位移传感器、伺服电机(1FT6-134-6SB71 永磁同步电动机,具体参数见表 1)、驱动器(Sinamics S120)以及西门子运动控制器 Simotion D425 等共同组成。Simotion D425 作为控制的核心,通过 DRIVE-CLiQ 总线与驱动器 S120、位移传感器进行实时通信。而测试软件 SCOUT 安装在上位机中,其通过工业以太网 Ethernet 与下位机 Simotion D425 通信,完成对结晶器振动过程的监控与数据分析。上位机利用 SCOUT 软件创建实验项目,完成对 SIMOTION D425 的接口通信方式与相关硬件设备的组态,并将其下载到 SIMOTION D425 中完成硬件组态;而后,编写前馈+PID 反馈控制程序,编译后完成下载并可调试运行。

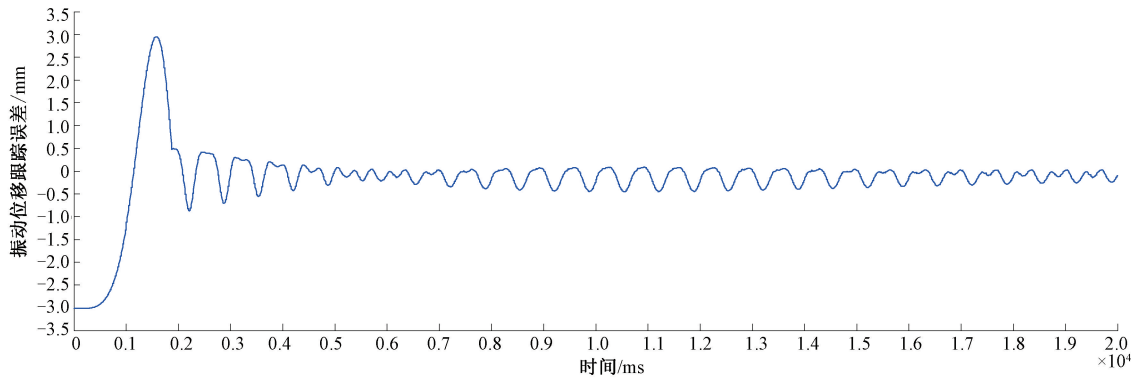
实验过程中,结晶器非正弦振动波形为德马克波形,如式(3)所示。其中振动频率、振动幅值和波形偏斜率分别为: $f=90\text{ c/min}$ 、 $h=3\text{ mm}$ 和 $\alpha=0.24$ 。此外,AMFO 优化前 PID 控制参数根据经验调整,其控制器参数 K_p 、 K_i 与 K_d 分别为:15、300 与 100;AMFO 算法优化后的 PID 控制参数 K_p 、 K_i 与 K_d 分别为:23.886、204.976、0。

为验证所提控制策略的有效性,本文在实验环节对参数优化前后的振动位移、跟踪误差与控制输入曲线进行了对比分析。因此,按照上述上位机实验操作完成了实验曲线的获取,如图 7~10 所示。

图 7(a)与图 9(a)分别为参数优化前与 AMFO 参数优化后的振动位移曲线,根据系统工艺控制要求,结晶器振动需要在前期做好振动位移零位检测,其过程结束后在 2 s 时加期望非正弦振动位移信号与控制策略,在系统实验的 20 s 过程中可以观察到优化前、后振动位移跟踪曲线的跟踪效果整体良好;但在图 7(b)与图 9(b)中,跟踪误差曲线观察较为明显:优化后的跟踪误差明显小于优化前的跟踪误差,且调整时间缩短了 0.3 s。



(a) 振动位移跟踪实验曲线
(a) Vibration displacement tracking experiment curves



(b) 振动位移跟踪误差实验曲线
(b) Experiment curve of vibration displacement tracking error

图7 优化前连铸结晶器振动位移与跟踪误差实验曲线

Fig. 7 Experiment curves of vibration displacement and tracking error of continuous casting mold before optimization

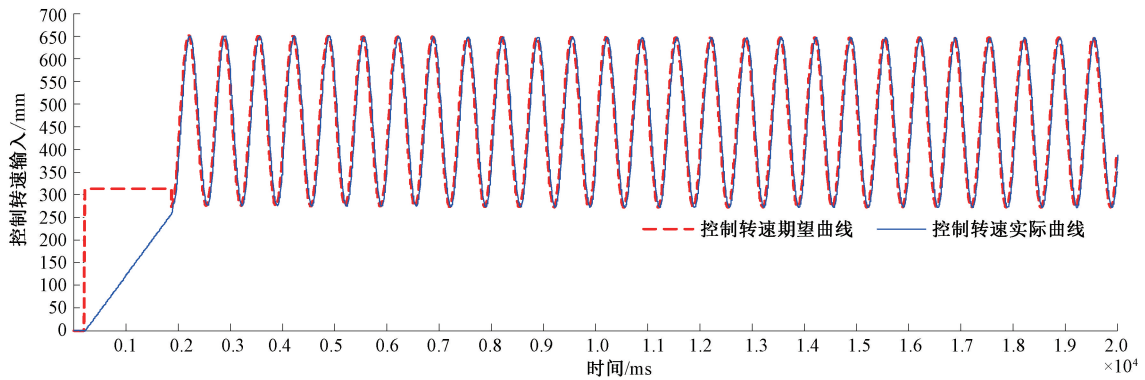


图8 控制转速输入曲线

Fig. 8 Input curve of control speed

同时,为衡量跟踪精度的准确性,通过抽取 16~20 s 之间共 500 个数据并对振动位移的对相对误差 r_a 与均方根误差 r_b 进行分析,其定义^[25] 如下:

$$r_a = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N e_{pi}^2}{N}} / \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N s_{ni}^2}{N}} \quad (15)$$

$$r_b = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2} \quad (16)$$

式中: s_{ni} 、 e_{pi} 分别为第 i 个 ($i = 1, 2, \dots, N$) 期望振动位移、期望振动位移与实际振动位移的差,为 $N = 500$ 为采样总个数。经计算,优化前相对误差 7.00%,均方根误差 0.143 mm;优化后,相对误差 5.20%,均方根误差

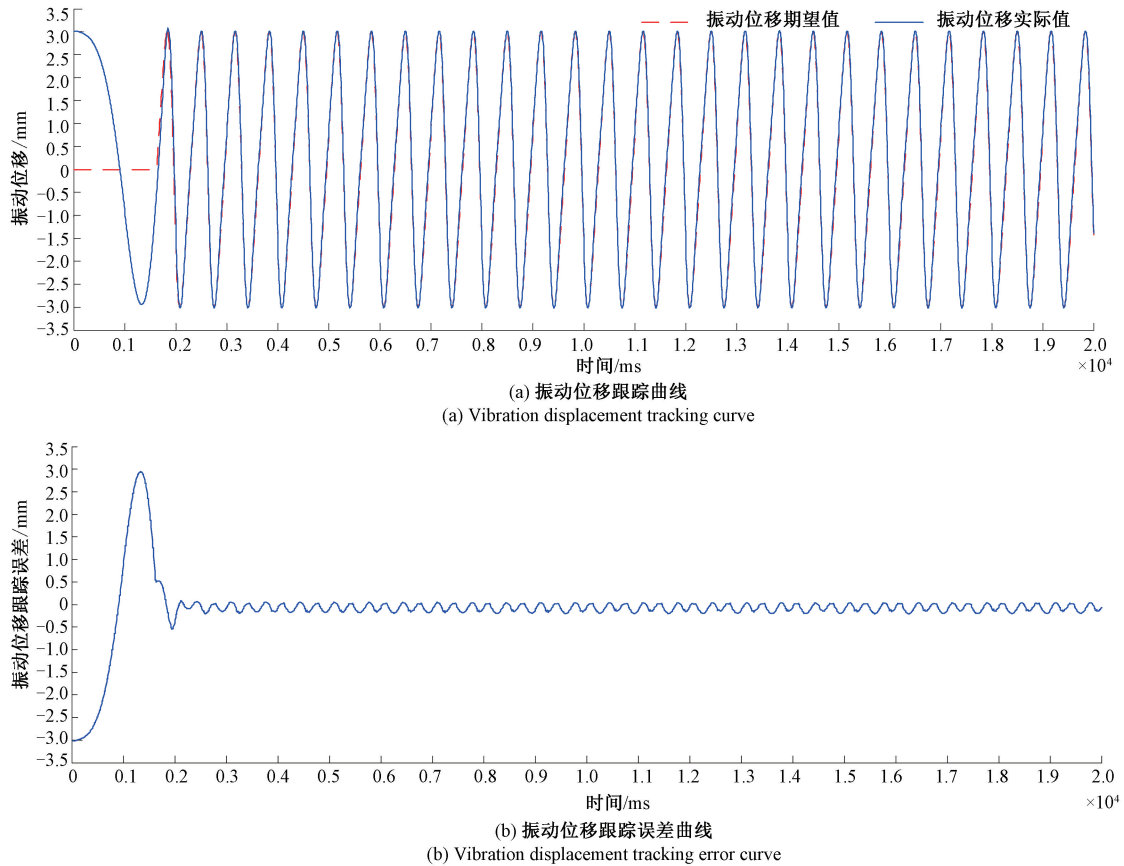


图 9 优化后连铸结晶器振动位移误差实验曲线

Fig. 9 Experiment curve of vibration displacement tracking error of continuous casting mold after optimization

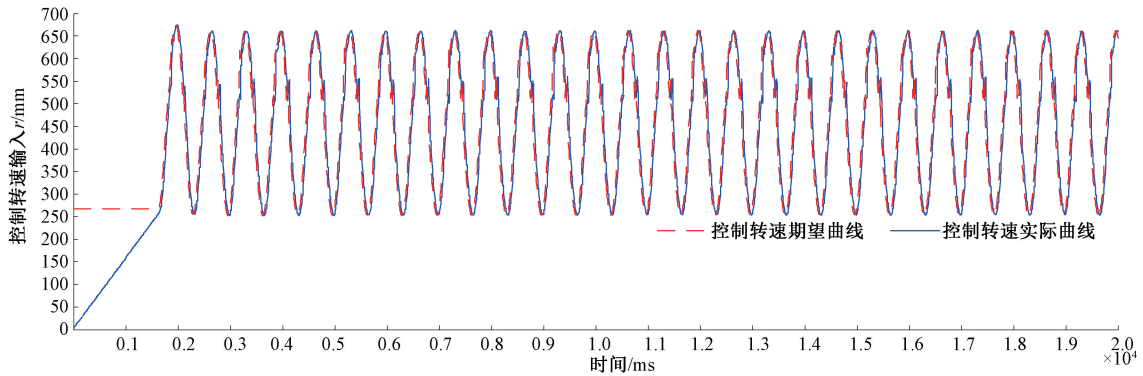


图 10 优化后的控制转速输入曲线

Fig. 10 Input curves of control speed after optimization

0.106 mm, 相对误差较优化前减小了 1.8%。

图 8 与 10 为参数优化前、后的控制转速输入曲线比较。图 8 转速控制输入曲线整体平滑抖动较少;而在图 10 中,为提高振动位移的跟踪精度抖动有些明显,可通过引入滤波器方法来抑制高频抖动现象。

经实验验证环节得出的结论可知:通过 AMFO 算法提高了结晶器振动位移系统的跟踪控制精度,能更好的

为后续生产实践中提高拉坯速度、减小铸坯表面振痕和改善铸坯质量等奠定基础。此外需要说明的是:控制器参数优化过程在实验室模拟振动试验台所建模型的基础上、通过 MATLAB 离线仿真完成的。因此,在实验测试过程中,采用优化后的控制器不会影响伺服电机的快速性控制。

4 结 论

本文为满足结晶器振动位移跟踪控制的工艺要求,主要针对伺服电机单方向、变角速度转动的工艺控制与控制器参数大多依靠经验等问题,提出了一种基于前馈控制与 AMFO 参数优化的 PID 反馈控制相结合的复合控制策略。本控制策略中的前馈控制主要为了解决伺服电机单方向、变角速度转动问题,建立了期望位移与期望转速之间的匹配关系,满足了系统工艺控制约束要求条件下的控制问题;而 AMFO 参数优化算法较好的解决了控制器参数选取依靠经验的问题;最后通过系统仿真与实验研究均验证了所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] LIU J, LIU C. Optimization of mold inverse oscillation control parameters in continuous casting process [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30 (4): 563-568.
- [2] 胡军宏. 板坯连铸结晶器液压振动系统状态监测试验研究 [J]. 冶金自动化, 2006, 30 (5): 1-5.
HU J H. Test research on status monitoring of mould hydraulic oscillator for slab continuous caster [J]. Metallurgical Industry Automation, 2006, 30 (5): 1-5.
- [3] 方一鸣, 周健, 张文健, 等. 伺服电机驱动的结晶器振动集散控制系统 [J]. 钢铁, 2019, 54 (8): 137-143.
FANG Y M, ZHOU J, ZHANG W J, et al. Vibration distributed control system for mold driven by servo motor [J]. Iron and Steel, 2019, 54 (8): 137-143.
- [4] 李宪奎, 方一鸣. 伺服电机驱动的连铸结晶器非正弦振动发生装置 [P]. 中国专利 CN 1318163 C, 2005.
LI X K, FANG Y M. Non-sinusoidal vibration generator of continuous casting mould driven by servo motor [P]. Chinese Patent CN 1318163 C, 2005.
- [5] ZHOU C, ZHANG X Z, WANG F, et al. Mold oscillating system with optimized non-sinusoidal oscillation profile [J]. Metallurgist, 2019, 63 (5): 585-597.
- [6] ZHOU C, ZHANG X Z, WANG F, et al. Investigation of non-sinusoidal oscillator of continuous casting mold synchronously driven by double servomotors and technological parameters [J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2019, 40 (1): 33-40.
- [7] LIU L, DUN Y R, FANG Y M, et al. Modeling and verification of the nonlinear system of oscillation platform of continuous casting mold driven by servo motor [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8 (7): 1-9.
- [8] 章家岩, 孟庆喜, 冯旭刚, 等. 迭代学习控制策略在连铸结晶器振动系统中的应用 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (17): 101-108, 114.
ZHANG J Y, MENG Q X, FENG X G, et al. Iterative learning control strategy for the application of CCM vibration system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37 (17): 101-108, 114.
- [9] 方一鸣, 张文健, 李健雄, 等. 伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移系统前馈+迭代学习复合控制 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24 (12): 130-141.
FANG Y M, ZHANG W J, LI J X, et al. Compound control of feedforward and iterative learning for vibration displacement system of continuous casting mold driven by a servo motor [J]. Electric Machine and Control, 2020, 24 (12): 130-141.
- [10] XIA T, KANG K S, FANG Y M, et al. Nonlinear processing and control for the oscillation displacement system of continuous casting mold driven by servo motor [C]. Proc. of the 34th Chinese Control Conference, 2015: 4443-4448.
- [11] KANG K S, LIU L, FANG Y M, et al. Backstepping sliding mode control for continuous cast mold oscillation displacement system driven by servo motor [J]. Control Theory & Applications, 2016, 33 (11): 1442-1448.
- [12] 马壮, 方一鸣, 李建雄, 等. 时变负载转矩伺服电机驱动的连铸结晶器振动位移系统补偿控制 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (3): 295-300.
MA ZH, FANG Y M, LI J X, et al. Compensation control research of vibration displacement system for continuous casting mold driven by servo motor with time-varying load torque [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (3): 295-300.
- [13] ZHENG H C, LIU L, FANG Y M, et al. Nonlinear auto disturbance rejection control for vibration displacement system of continuous cast mold driven by servo motor [C]. Proc. of the 35th Chinese Control Conference, 2016: 879-884.
- [14] 李强, 方一鸣, 李建雄, 等. 连铸结晶器振动位移系统中非线性处理 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (12): 1433-1440.
LI Q, FANG Y M, LI J X, et al. Non-linear processing for vibration displacement systems of continuous casting molds [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30 (12): 1433-1440.
- [15] SHI S L, KANG K S, LI J X, et al. Sliding mode control for continuous casting mold oscillatory system driven by servo motor [J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2016, 15 (4): 1669-1674.
- [16] LIU L, LI Z, FANG Y M, et al. Sliding-mode control of continuous cast mold oscillation displacement system driven by servo motor [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20 (12): 101-118.

- [17] MA ZH, FANG Y M, ZHENG H C, et al. Active disturbance rejection control with self-adjusting parameters for vibration displacement system of continuous casting mold [J]. IEEE Access, 2019, 7: 52498-52507.
- [18] MA ZH, FANG Y M, LI J X, et al. Displacement tracking control for continuous casting mold driven by servo motor based on composite control strategy [J]. ISIJ International, 2020, 60(4): 628-635.
- [19] 杨赫然, 赵桐, 孙兴伟, 等. 基于改进遗传算法的机床主轴径向回转误差分离技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 82-91.
- YANG H R, ZHAO T, SUN X W, et al. Research on radial rotation error separation technology of machine tool spindle based on the improved genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 82-91.
- [20] 陶志勇, 于子佳, 林森. PSO_SVM 算法在太阳能电池板裂缝缺陷检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 18-25.
- CHEN ZH Y, YU Z J, LIN S. Research on crack defect detection of solar cell based on PSO_SVM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(1): 18-25.
- [21] DENG W, XU J J, SONG Y J, et al. An effective improved co-evolution ant colony optimization algorithm with multi-strategies and its application[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2020, 16(3): 158-170.
- [22] LI J Q, SONG M X, WANG L, et al. Hybrid artificial bee colony algorithm for a parallel batching distributed flow-shop problem with deteriorating jobs [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(6): 2425-2439.
- [23] YILDIZ B S. Optimal design of automobile structures using moth-flame optimization algorithm and response surface methodology [J]. Materials Testing, 2020, 62(4): 371-377.
- [24] ZHAO X D, FANG Y M, LIU L, et al. Ameliorated moth-flame algorithm and its application for modeling of silicon content in liquid iron of blast furnace based fast learning network [J]. Applied Soft Computing, 2020, 94: 1-17.
- [25] 方一鸣, 李官胤, 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.
- FANG Y M, LI G Y, LI J X, 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.

作者简介



马壮, 2001 年于西南交通大学获得学士学位, 2006 年于北京科技大学获得硕士学位, 现为燕山大学博士生、唐山学院副教授, 主要研究方向为非线性系统、自适应鲁棒控制与系统辨识。

E-mail: tmzhuange_mail@sina.com

Ma Zhuang received his B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2001, M. Sc. degree from University of Science and Technology Beijing in 2006. He is a Ph. D. candidate in Yanshan University and an associate professor in School of Intelligence and Information, Tangshan University. His research interest includes nonlinear system, adaptive robust control, and system identification.



方一鸣 (通信作者), 1985 年和 2003 年分别获得燕山大学控制科学与控制工程学士学位与博士学位, 现为燕山大学电气工程学院教授, 主要研究方向为连铸自动化技术及应用、复杂系统建模与控制、自适应鲁棒控制理论与应用。

E-mail: fyiming@ysu.edu.cn

Fang Yiming (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree in Control Science and Engineering from Yanshan University in 1985 and 2003. He is currently a professor in School of Electrical Engineering, Yanshan University. His main research interest includes automation technology and application of continuous casting, complex system modeling and control, adaptive robust control theory and application.



赵晓东, 2014 年于山东理工大学获得学士学位, 2017 年于燕山大学获得硕士学位, 现为燕山大学在读博士生, 主要研究方向为群智能优化算法及其应用。

E-mail: xiaodongzhaos@163.com

Zhao Xiaodong received his B. Sc. degree in 2014 from Shandong University of Technology, M. Sc. degree in 2017 from Yanshan University. Now, he is a Ph. D. candidate in Yanshan University. His main research interest includes swarm intelligence optimization algorithms and its application.



周健, 2018 年于山东农业大学获得学士学位, 2021 年于燕山大学获得硕士学位, 现为江苏金风软件技术有限公司电气助理工程师, 主要研究方向为风力发电机变桨控制。

E-mail: zhoujianxsgz@163.com.

Zhou Jian received his B. Sc. degree in 2018 from Shandong Agricultural University, M. Sc. degree in 2021 from Yanshan University. Now, he is an electrical assistant engineer in Jiangsu Goldwind Software Technology Co., Ltd. His main research interest is pitch control of wind turbine.