

一种基于分层框架的滚弯成形多辊轮轨迹优化及协同控制策略

王大号^{1,2}, 吴亚丽³, 杨博¹, 张晓东⁴, 柴佐华¹, 王震¹

(1. 西安重型技术有限责任公司, 陕西 西安 710018; 2. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
3. 西安理工大学 信息与控制工程系, 陕西 西安 710043; 4. 辽宁忠旺集团有限公司, 辽宁 辽阳 111013)

摘要: 针对“3+1”辊轮形式的滚弯机在实际应用中存在的多辊轮协调性差、滚弯精度低等问题, 基于滚弯机的机械结构, 结合多智能体分布式协同控制理论, 提出一种分层式协同控制框架, 旨在解决滚弯机多辊轮优化与协同控制一体化的问题。控制框架的上层基于分布式优化算法构造虚拟系统生成最优参考轨迹, 下层利用最优参考轨迹, 在反步法基础上设计辊轮的位置跟踪控制器, 从而实现了滚弯成形多辊轮分布式轨迹优化和协同位置跟踪控制。此外, 在控制器设计过程中, 结合自适应技术估计辊轮系统的不确定上界, 基于 Lyapunov 稳定性理论证明了多辊轮系统的跟踪误差能够实现有界稳定, 并通过数值仿真验证了控制方案的有效性。

关键词: 协同控制; 轨迹优化; 分层框架; 辊轮控制; Lyapunov 稳定性理论

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.015

中图分类号: TP273⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 11-0113-07

A multi-roller trajectory optimization and collaborative control strategy for roll bending based on hierarchical framework

Wang Dahao^{1,2}, Wu Yali³, Yang Bo¹, Zhang Xiaodong⁴, Chai Zuohua¹, Wang Zhen¹

(1. Xi'an Heavy Equipment & Technology Co., Ltd., Xi'an 710018, China;
2. State Key Laboratory of Rolling Technology and Continuous Rolling Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710043, China;
4. Liaoning Zhong-wang Group Co., Ltd., Liaoyang 111013, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor multi-roller coordination and low roll bending accuracy in practical applications of roll bending machine with "3+1" roller, based on the mechanical structure of the roll bending machine and multi-agent distributed cooperative control theory, a hierarchical cooperative control framework was proposed to solve the integration problem of multi-roller optimization and cooperative control of roll bending machine. A virtual system was constructed based on a distributed optimization algorithm to generate optimal reference trajectories in the upper layer of control framework. The position tracking controller of rollers based on the backstepping method was designed in the lower layer using optimal reference trajectories, so as to realize the multi-roller distributed trajectory optimization and cooperative position tracking control in roll bending. Furthermore, during the design process of controller, the adaptive technique were incorporated to estimate the uncertain upper bounds of the roller system. Based on Lyapunov stability theory, it is proven that the tracking error of the multi-roller system can achieve the bounded stability, and the effectiveness of the control scheme is verified by numerical simulation.

Key words: cooperative control; trajectory optimization; hierarchical framework; roller control; Lyapunov stability theory

型材滚弯成形技术在石油、造船、水利、锅炉、航空等行业有广泛的应用场景, 对我国工业发展具有重要作用^[1]。滚弯机作为完成滚弯成形的重要设备, 其控制方式通常是操作人员手动调节上辊的相对位置, 这种控制方法可能导致人工调整的不确定

性和盲目性, 从而降低滚弯的精度。此外, 大多数控制系统采用开环控制, 导致左右下辊信号的时间同步性也较差, 两下辊之间的累计信号偏差随使用时间推移进一步增大。这一点使得开环滚弯控制在那些对精度要求较严格的应用场景里表现不佳^[1-3]。与此同时, 轨迹优化是实现各个辊轮协同控制的重要环节, 有效的优化算法可为辊轮运动提供时间最短且稳定的参考轨迹^[4]。因此, 本文针对“3+1”辊轮形式的滚弯机的机械结构, 借鉴智能优化及控制一体化思想, 设计了一种基于分层控制框架的分布式轨迹优化与协

收稿日期: 2024-08-06; 修订日期: 2024-11-13

基金项目: 金属挤压锻造装备技术国家重点实验室开放项目 (S2308100.W09)

作者简介: 王大号 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: wang.dahao@x-het.com

同控制策略来实现多辊轮参考运动轨迹优化及各个辊轮的位置控制,从而满足多种型材滚弯需求。

1 “3+1” 滚轮式滚弯机的基本结构

传统的滚弯机主要由 4 部分组成:机械设备、液压系统、气动系统和数控系统。“3+1” 辊轮形式滚弯机机械结构主要包含上辊、左右下辊、伺服油缸、下中心辊、左右边辊和机架等部件^[5],其结构如图 1 所示。

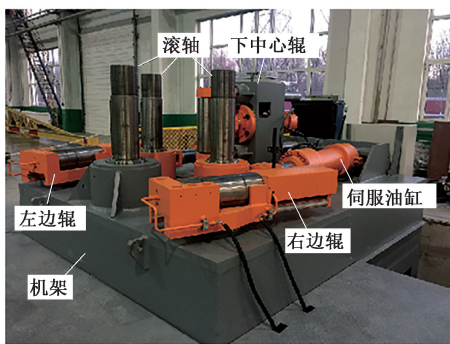


图 1 “3+1” 辊轮形式滚弯机机械结构

Fig. 1 Mechanical structure of roll bending machine with “3+1” roller

图 1 中上辊滚轮直接固定装置在机架中心线上,而其左右下辊滚轮之间则要通过控制油缸来沿其中的销轴方向进行弧线弯曲运动。需要滚弯的型材分别被固定放置于两个辊轮之间,左右两个下辊可根据实际滚弯圆弧半径调整下辊轮位置,并同时通过上辊轮的上下旋转以推动整个型材向前进给。型材通常可以单独进行一次进料或进行多次进料,最终加工轧制为其所需形状的曲率。在整个滚弯过程中,左右边辊共同为型材提供支撑,而下中心辊则用以检查型材中的进给量,并帮助压紧 L 形型材。三辊轮的旋转由电机和减速机驱动,各辊轮独立操作。液压系统是为伺服左右下边辊旋转提供伺服动力,控制伺服油缸旋转和控制左右边辊之间的运动。气动系统则负责自动调节转速和控制型材的进给速度,确保生产过程的平稳与高效。整个系统的协调运行通过精确的液压和气动控制实现,保证型材加工的精度和一致性,最终达到所需的加工效果^[5-6]。

2 基于分层框架的滚弯成形多智能体辊轮轨迹优化及协同控制策略

在实际的比例积分微分 (Proportion Integration

Differentiation, PID) 控制中,由于数控系统驱动机床的操作步骤有限,对于曲率呈连续变化的型材几何成形,全自动实现对变曲率型材外形尺寸的无限精度逼近是不可能的^[6]。因此,为了保证型材外形轮廓的几何逼近误差在合理的范围内,可直接采用分段成形法加工以快速实现型材变曲率的滚弯成形。分段法是根据事先给定的型材的成形直径要求^[7-8],将型材划分为有限个微段,在每一个微段内,可以认为型材的弯曲曲率是近似等曲率的。通过对每个微段进行单独计算,可以确定其对应的成形曲率半径。进而,通过精确控制辊轮的位移,确保在每个微段内的型材按照所需的曲率成形,从而实现型材的精确进给和成形。这种方法可以在一定程度上弥补数控系统在处理连续曲率变化时的精度限制,提高成形过程的效率和精度。此外,由于多智能体协同合作具有高容错、高效率和高并行性等单个系统没有的优点,已经广泛应用于各个领域^[9-13]。因此,考虑设计基于多智能体的滚弯成形过程协调控制方案。考虑到 3 个辊的运动轨迹相对独立又相互影响,不失一般性,可以将滚弯成形的过程视为各辊轮相互协调合作的过程,每个辊视为一个智能体,各个辊具有相对的运行自由度,3 个辊轮通过信息交换获取各自的相对位移,实现智能化调节运动轨迹,进而达到滚弯成形的目的。假设多辊轮之间的通信拓扑图如图 2 所示。

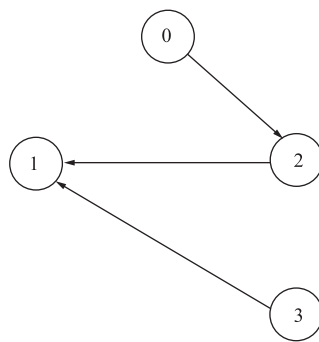


图 2 多辊间通信拓扑图

Fig. 2 Multi-roller communication topology diagram

从图 2 可知,将上层产生的最优参考轨迹视为虚拟领导者,即智能体 0,其他 3 个跟随者智能体为实际的辊轮,借鉴多智能体协同控制的思想,本文提出一种基于分层控制框架的多辊轮分布式轨迹优化和协同控制策略,具体思路如图 3 所示,其中, \mathbf{x}_i 、 \mathbf{u}_i 分别为第 i 个智能体的状态变量和控制输入, \mathbf{x}_j 为邻居智能体 j 的状态信息, \mathbf{x}_0 为上层产业的最优参数信号。

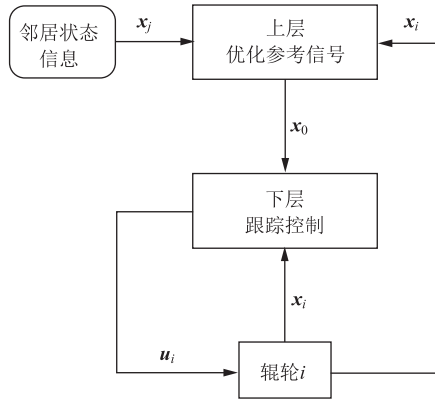


图 3 分层控制框架

Fig. 3 Hierarchical control framework

由图 3 可以看出，框架上层采用分布式优化算法构造虚拟系统来产生最优参考信号，以满足各个辊轮的局部成本函数；而下层设计基于反步法的自适应跟踪控制器，使得各个辊轮能够稳定跟踪来自上层的最优参考信号，并具有一定的抗干扰性。基于此，假定上层产生的最优参考信号 \mathbf{x}_0 为虚拟领导者的位置，即期望位置， $\mathbf{x}_{i1} = [x_{i1X}, x_{i1Y}]^T$ ，表示跟随者 i 的位置状态信息， x_{i1X} 、 x_{i1Y} 分别为分解到水平方向 X 与竖直方向 Y 的位置状态信息， $\mathbf{h}_i = [h_{iX}, h_{iY}]^T$ ，表示跟随者 i 与领导者之间的预期相对距离， h_{iX} 、 h_{iY} 分别为分解到水平方向 X 与竖直方向 Y 的预期相对距离。本控制系统的目标是在考虑每个辊轮的局部成本函数的基础上，通过各个辊轮协作以找到最小值点，即上层最优参考信号 \mathbf{x}_0 ，

使得所有辊轮的全局成本函数 $f(x)$ ($f(x) = \sum_{i=1}^N f_i(\mathbf{x}_i)$) 其中， $f_i(\mathbf{x}_i)$ 为第 i 个辊轮的成本函数， N 为智能体数量，本文中 $N = 3$) 最小，即 $\min_{x \in R^n} f(x) = \sum_{i=1}^N f_i(\mathbf{x}_i)$ 的同时，为多辊轮设计分布式自适应位置跟踪控制器，系统随着时间 t 的运行，以实现：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0) = \mathbf{h}_i \quad (1)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) = \mathbf{h}_i - \mathbf{h}_j \quad (2)$$

式中： \mathbf{h}_j 为跟随者 j 与领导者之间的预期相对距离。

即左右下辊可在控制器作用下精准运动，实现高精度位置跟踪控制，与上辊保持期望相对距离。

3 滚弯成形多智能体辊轮轨迹优化及协同控制算法

为实现上述的控制目标，首先需构造可生成

上层最优参考信号的虚拟系统，具体模型如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_0 = -\nabla f_i(\mathbf{x}_i) - \sum_{i=1}^N a_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) - \mathbf{z}_i \\ \dot{\mathbf{z}}_i = \sum_{i=1}^N a_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\nabla f_i(\mathbf{x}_i)$ 为第 i 个智能体的局部成本函数的梯度； \mathbf{z}_i 为辅助状态； a_{ij} 为邻接矩阵的元素。

其次，需构建每个辊轮的动力学模型。由于 3 个辊轮分别具有独立的驱动系统，因此，可将每个辊轮视为智能体，多辊轮的位置控制可视为多智能体的位置跟踪控制问题。

通过对辊轮的动力学研究^[14]，确立动力学模型，如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{i1} = \mathbf{x}_{i2} \\ \dot{\mathbf{x}}_{ij} = \mathbf{x}_{i(j+1)} \\ \dot{\mathbf{x}}_{in} = \mathbf{u}_i + \mathbf{d}_i(\mathbf{x}_{in}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： \mathbf{x}_i 为第 i 个智能体的状态变量， $\mathbf{x}_i = [\mathbf{x}_{i1}, \mathbf{x}_{i2}, \dots, \mathbf{x}_{ik}, \dots, \mathbf{x}_{in}]^T$ ， $\mathbf{x}_{ik} \in R^2$ ， $k = 1, 2, \dots, n$ ； \mathbf{u}_i 为第 i 个智能体的控制输入， $\mathbf{u}_i \in R^2$ ； n 为智能体 i 的动态维数； $\mathbf{d}_i(\mathbf{x}_{in})$ 为未建模的动力学，包括模型的不确定性和未知的扰动。

若将 3 个辊轮视为图论^[15]中拓扑结构中的节点，则确定辊（智能体 i ）的位置跟踪误差系统 \mathbf{e}_{i1} 的表达式如 (5) 式所示：

$$\mathbf{e}_{i1} = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{x}_{i1} - \mathbf{x}_{j1} - \mathbf{h}_i - \mathbf{h}_j) + b_i(\mathbf{x}_{i1} - \mathbf{h}_i - \mathbf{x}_0) \quad (5)$$

有向图中节点的关系由邻接矩阵 \mathbf{A} 表示， $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ ， $\mathbf{A} \in R^{N \times N}$ ，若节点 i 与节点 j 之间相连接，则 $a_{ij} > 0$ ，若节点 i 与节点 j 不连接，则 $a_{ij} = 0$ ； $\mathbf{B} = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_N\}$ ，表示跟随者与领导者之间的通信拓扑关系^[16]，如果第 i 个智能体可以直接获得领导者信息，则 $b_i = 1$ ，否则 $b_i = 0$ 。

在以上基础上，基于分布式控制理论^[17-18]来求解多辊轮分布式位置跟踪控制策略。为求解相应的控制策略，先提出两个假设：

假设 1：对于未建模的动力学 $\mathbf{d}_{in}(\mathbf{x}_{in})$ ，包括模型的不确定性和未知的扰动，存在常数 γ_i ，使得 $\|\mathbf{d}_{in}(\mathbf{x}_{in})\| \leq \gamma_i$ 成立。

假设 2：局部成本函数 $f_i(\mathbf{x}_i)$ 是凸函数且可微，全局成本函数 $f(x)$ 是严格凸函数。

在上述假设下, 该控制策略的核心即设计虚拟控制输入 α_i 及实际控制输入 u_i 。根据式 (5) 的位置跟踪误差, 对 e_{i1} 求导可得:

$$\dot{e}_{i1} = \sum_{j=1}^N a_{ij}(e_{i2} + \alpha_{i1} - \dot{x}_{i1}) + b_i(e_{i2} + \alpha_{i1} - \dot{x}_0) \quad (6)$$

式中: e_{i2} 为 x_{i2} 的误差信号, $e_{i2} = x_{i2} - \alpha_i$ 。

选取 Lyapunov 函数为:

$$V_{i1} = \frac{1}{2} e_{i1}^T e_{i1} \quad (7)$$

对式 (7) 求导, 可得:

$$\dot{V}_{i1} = e_{i1}^T \dot{e}_{i1} = e_{i1}^T \left[\sum_{j=1}^N a_{ij}(e_{i2} + \alpha_{i1} - \dot{x}_{i1}) + b_i(e_{i2} + \alpha_{i1} - \dot{x}_0) \right] \quad (8)$$

基于式 (8), 设计虚拟控制输入为:

$$\alpha_{i1} = \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} + b_i \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} \dot{x}_{i1} - c_{i1} e_{i1} + b_i \dot{x}_0 \right) \quad (9)$$

式中: c_{i1} 为可调节参数, $c_{i1} > 0$ 。

对 e_{ik} 对求导, 可得:

$$\dot{e}_{ik} = x_{i(k+1)} - \dot{\alpha}_{i(k-1)} \quad (10)$$

式中: e_{ik} 为 x_{ik} 的信号误差, $e_{ik} = x_{ik} - \alpha_{i(k+1)}$ 。

选取 Lyapunov 函数为:

$$V_{ik} = V_{i1} + \frac{1}{2} e_{ik}^T e_{ik} \quad (11)$$

对式 (11) 求导, 可得:

$$\dot{V}_{ik} = \dot{V}_{i1} + e_{ik}^T (x_{i(k+1)} - \dot{\alpha}_{i(k-1)}) \quad (12)$$

基于式 (12), 设计虚拟控制输入为:

$$\alpha_{i(k-1)} = \dot{\alpha}_{i(k-2)} - \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} + b_i \right) e_{i(k-1)} - c_{ik} e_{ik} \quad (13)$$

式中: c_{ik} 为可调节参数, $c_{ik} > 0$ 。

对 e_{in} 求导, 可得:

$$\dot{e}_{in} = u_i + d_{in}(x_{in}) - \dot{\alpha}_{i(n-1)} \quad (14)$$

式中: e_{in} 为 x_{in} 的误差信号, $e_{in} = x_{in} - \alpha_{i(n-1)}$ 。

选取 Lyapunov 函数为:

$$V_{in} = V_{i(n-1)} + \frac{1}{2} e_{in}^T e_{in} + \frac{1}{2\lambda_i} \tilde{\gamma}_i^2 \quad (15)$$

对式 (15) 求导, 可得:

$$\dot{V}_{in} = \dot{V}_{i(n-1)} + e_{in}^T (u_i + d_{in}(x_{in}) - \dot{\alpha}_{i(n-1)}) - \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\gamma}_i^T \dot{\tilde{\gamma}}_i \quad (16)$$

根据假设 1, 需估计不确定项的上界 γ_i , $\dot{\gamma}_i$ 为对不确定项上界 γ_i 的估计, 上界估计误差 $\tilde{\gamma}_i = \gamma_i - \hat{\gamma}_i$ 。以此为基础, 设计自适应率 $\dot{\tilde{\gamma}}_i = -\varepsilon_i \lambda_i \tilde{\gamma}_i + \lambda_i e_{in}$, 其中, $\varepsilon_i > 0$, $\lambda_i > 0$, 均为可调参数。

基于式 (16), 第 i 个辊的实际位置跟踪控制输入可设计为:

$$u_i = \dot{\alpha}_{i(n-1)} - \hat{\gamma}_i - e_{i(n-1)} - c_{in} e_{in} \quad (17)$$

由上述分析可以得出, 若将各辊轮视为智能体, 滚弯成形的过程便可等价于多智能体系统协同控制的过程。因此, 上述算法对其他类型的辊轮及滚弯机具有很强的通用性。在实际应用中, 可根据设备的基础结构与工作目标进行适当的参数调整。

4 控制策略的稳定性证明

引理 1: 在假设 2 成立的情况下。对于任意初始状态, 分布式优化算法 (式 (3)) 满足: 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 对于 $i \in N$, 有 $x_0 \rightarrow x^*$ 成立, 其中, x^* 为分布式算法 (式 (3)) 的最优点。

定理 1: 在假设 1 成立的情况下, 对于具有下三角结构的多辊轮位置控制系统^[19], 分布式自适应位置跟踪控制器已给出。通过选择合适的参数可以保证辊的位置跟踪误差有界稳定^[20-21]。

证明: 将所求的实际控制输入代入式 (16), 同时利用杨氏不等式, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{in} = & -c_{i1} e_{i1}^T e_{i1} - c_{ik} e_{ik}^T e_{ik} - c_{in} e_{in}^T e_{in} + e_{in}^T \tilde{\gamma}_i - \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\gamma}_i^T \dot{\tilde{\gamma}}_i \leq \\ & -c_{i1} e_{i1}^T e_{i1} - c_{ik} e_{ik}^T e_{ik} - (c_{in} - \frac{1}{2}) e_{in}^T e_{in} - \frac{\varepsilon_i}{2} \tilde{\gamma}_i^2 + \frac{\varepsilon_i}{2} \gamma_i^2 \leq \\ & -\rho_i V_{in} + M_i \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $\rho_i = \min \{ c_{i1}, c_{ik}, c_{in} - \frac{1}{2}, \frac{\varepsilon_i}{2} \}$; $M_i = \frac{\varepsilon_i}{2} \gamma_i^2$ 。

只要满足 $c_{i1} \geq 0$, $c_{ik} \geq 0$, $c_{in} - \frac{1}{2} \geq 0$, $\varepsilon_i \geq 0$, 第 i 个辊轮的位置跟踪误差即是稳定且有界的, 且误差满足 $\|e_{i1}\| \leq \sqrt{2(V_{in}(0) - \frac{M_i}{\rho_i}) + 2 \frac{M_i}{\rho_i}}$ 。

为了证明所有辊轮的位置跟踪误差是有界的, 选取 Lyapunov 函数:

$$V = \sum_i^3 V_{in} \quad (19)$$

根据式 (18), 可得:

$$\dot{V} \leq - \sum_i^3 (\rho_i V_{in} + M_i) \leq -\rho_1 V + M_1 \quad (20)$$

式中: $\rho_1 = \sum_i^3 \rho_i$; $M_1 = \sum_i^3 M_i$ 。

只要选取合适的参数, 所有辊轮可实现高精度的位置跟踪控制, 且跟踪误差满足 $\|e_1\| \leq$

$$\sqrt{2 \left(V(0) - \frac{M_1}{\rho_1} \right) + 2 \frac{M_1}{\rho_1}}。$$

5 算法仿真验证

本部分通过数值例子验证所设计控制策略的有效性。

假设图 2 中各个辊轮的局部成本函数为:

$$f_1(x_1) = [0.5e^{-0.5x_1} + 0.4e^{0.3x_1}, x_1^2 \ln(2 + x_1^2)]^T \quad (21)$$

$$f_2(x_2) = [x_2^2 + e^{0.1x_2}, 0.5e^{-0.5x_2} + 0.4e^{0.3x_2}]^T \quad (22)$$

$$f_3(x_3) = [0.5e^{-0.5x_3} + 0.4e^{0.3x_3}, x_3^2 + e^{0.1x_3}]^T \quad (23)$$

邻接矩阵 A 表示为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

跟随者与领导者关系矩阵 $B = \text{diag}\{0, 1, 0\}$ 。

假设各个辊轮与虚拟领导者预期的期望距离为:

$$h_1 = [0.1, 0.2]^T, \quad h_2 = [0.1, 0.3]^T, \quad h_3 = [0.3, 0.2]^T。$$

控制器参数 $c_{11} = c_{12} = c_{21} = c_{22} = c_{31} = c_{32} = 2$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.005$; $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 5$ 。

各个辊轮初始状态为: $x_1(0) = [0.2, 0.1]^T$; $x_2(0) = [0.1, 0.2]^T$; $x_3(0) = [0.1, 0.1]^T$ 。

未建模动力学 $d_n(x_n)$ 设置为: $d_1(x_1) = d_2(x_2) = d_3(x_3) = [0.1 \sin(\pi t/200), 0.1 \sin(\pi t/200)]^T$ 。

仿真结果如图 4~图 6 所示。图 4 为本控制策略各个辊轮水平方向最优参考信号 x_{idX} 及局部成本函数的梯度和。图 5 为本控制策略上层分布式优化中, 各个辊轮竖直方向最优参考信号 x_{idY} 及局部成本函数的梯度和。图 6 为本控制策略仿真验证提供的各个辊轮位移误差曲线。图 7 为本控制策略仿真验证提供的各个辊轮不确定上界估计误差曲线。图 8 为本控制策略仿真验证提供的各个辊轮控制输入曲线。

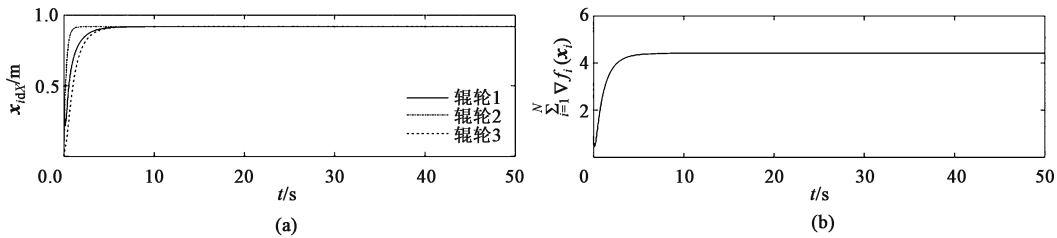


图 4 各个辊轮水平方向最优参考信号 (a) 及局部成本函数的梯度和 (b)

Fig. 4 Optimal reference signal (a) and gradient sum of local cost function (b) for each roller in horizontal direction

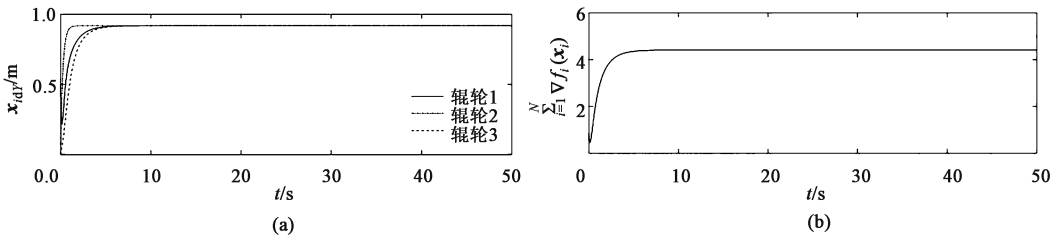


图 5 各个辊轮竖直方向最优参考信号 (a) 及局部成本函数的梯度和 (b)

Fig. 5 Optimal reference signal (a) and gradient sum of local cost function (b) for each roller in vertical direction

从仿真结果可以看出, 当控制框架上层的各个辊轮局部成本函数之和最小时, 最优参考信号值 $x_0(0) = [-0.05, 0.91]^T m$ 。下层各个辊轮均可以

实现高精度位置跟踪, 且跟踪误差有界稳定。各个辊轮的控制输入曲线均非常平滑。这说明给出的仿真参数设定及结果对于实际任务具有一定的

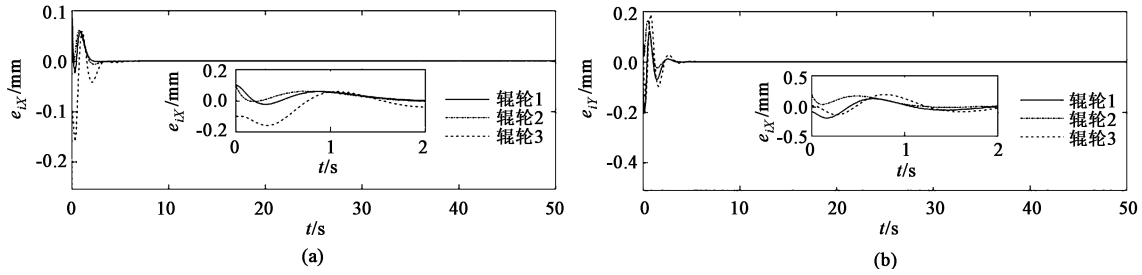


图 6 各个辊轮的位移误差曲线

(a) 水平方向 (b) 竖直方向

Fig. 6 Displacement error curves of each roller

(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

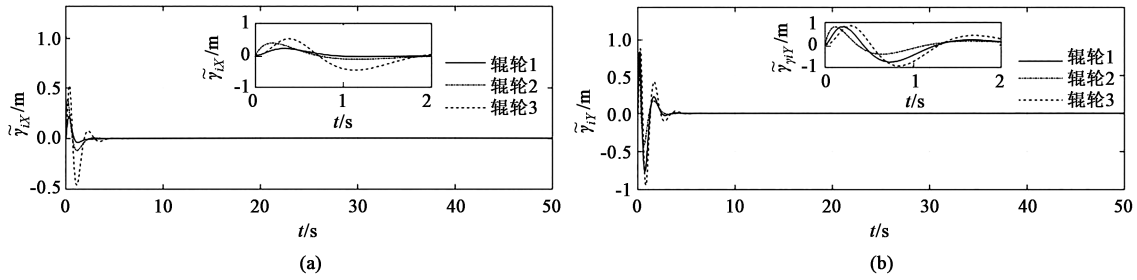


图 7 各个辊轮不确定上界估计误差曲线

(a) 水平方向 (b) 竖直方向

Fig. 7 Estimation error curves of uncertain upper bound for each roller

(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

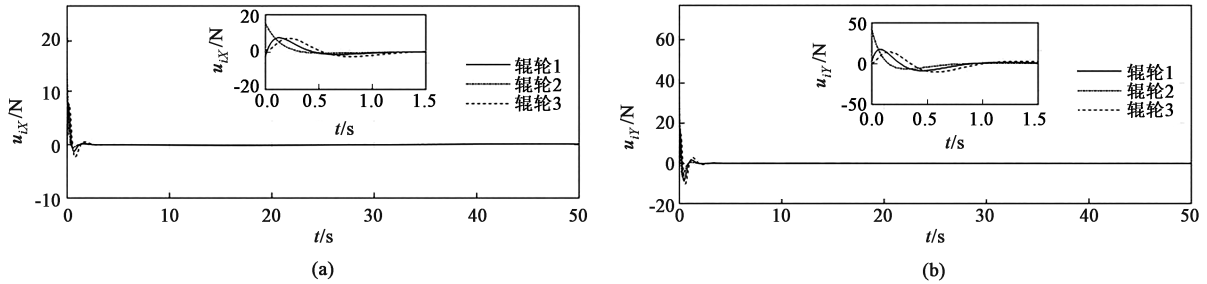


图 8 各个辊轮控制输入曲线

(a) 水平方向 (b) 竖直方向

Fig. 8 Control input curves of each roller

(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

参考性。

6 结论

(1) 在辊轮的动力学模型的基础上,通过构造虚拟系统生成最优参考轨迹,设计了辊轮的位置跟踪误差系统,在此基础上运用反步法设计虚拟控制输入与实际控制输入,基于 Lyapunov 稳定性理论证明跟踪误差是稳定有界的,提出了一种滚弯成形多辊轮分布式轨迹优化和协同位置跟踪

控制策略,并通过数值仿真验证了控制策略的有效性。

(2) 由于上述控制策略是将单个滚轮视为智能体,基于多个滚轮布局结构进行的控制策略的设计,因此,设计思路适用于所有多智能体系统的协同控制。

(3) 通过对滚弯成形中多辊轮轨迹优化和位置协同控制进行理论指导,可实现多辊轮轨迹在线优化和位置高精度控制来提高型材滚弯成形的精度和工作效率。

参考文献:

- [1] 田洪才. 型材变曲率滚弯成形控制技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
Tian H C. Research on Roll Bending of Profile for Variable Curvatures and Design of the Control System [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [2] 刘文学, 方秋林, 范兴杰. 三辊弯板机整机结构及自动控制系统设计 [J]. 内燃机与配件, 2023 (13): 52-55.
Liu W X, Fang Q L, Fan X J. Design of the whole machine structure and automatic control system of the three roll bending machine [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023 (13): 52-55.
- [3] 黎仕, 钱应平, 薛杭, 等. 水平上调式三辊卷板机卷圆成形控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2024, 52 (10): 104-109.
Li S, Qian Y P, Xue H, et al. Design of circular forming control system for three-roll coiling machine with horizontal adjustment [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52 (10): 104-109.
- [4] Limon-Leyva P A, Balvantín A J, Diosdado-De-La-Peña J A, et al. Parametric optimization of roll-hemming process in oblique planes with linear and non-linear trajectories [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 123-131.
- [5] 陈建峰, 谭进. 大滚弯模量铝型材滚弯机的研制 [J]. 有色金属加工, 2021, 50 (2): 59-63.
Chen J F, Tan J. Development of aluminum profile bending machine with large rolling bending modulus [J]. Nonferrous Metals Processing, 2021, 50 (2): 59-63.
- [6] 曹振鑫. 滚弯成形数学建模与有限元仿真验证 [J]. 中国科技信息, 2021 (11): 86-88.
Cao Z X. Mathematical modeling and finite element simulation verification of rolling bending forming [J]. China Science and Technology Information, 2021 (11): 86-88.
- [7] Cao H Q, Yu G C, Yang C F, et al. Research on a control strategy of the symmetrical four-roller bending process based on experiment and numerical simulation [J]. Symmetry, 2021, 13 (6): 940-940.
- [8] Kim W K, Kim K M, Cho Y W. An analytical model of roll bending steel pipe formed by three rollers [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104 (9-12): 4039-4048.
- [9] 刘畅. 基于多智能体的轧制过程协调控制研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
Liu C. Research on Coordination Control of Rolling Process Based on Multi-agent [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [10] 孙照阳. 基于多智能体的中厚板轧制工艺模型优化 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
Sun Z Y. Optimization of Medium and Heavy Plate Rolling Process Model Based on Multi-agent [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [11] 程烨. 基于多智能体的轧制过程协同研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
Cheng Y. Collaborative Research on Rolling Process Based on Multi-agent Systems [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021.
- [12] 张维维, 胡明珠, 李继伟, 等. 基于多智能体非合作-进化博弈的柔性作业车间机器-AGV 协同调度 [J/OL]. 计算机集成制造系统, 1-19 [2024-11-08]. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2024.0215>.
Zhang W W, Hu M Z, Li J W, et al. Flexible job shop machine-AGV collaborative scheduling based on multi-agent non-cooperative and evolutionary game [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1-19 [2024-11-08]. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2024.0215>.
- [13] 叶结松, 龚柏春, 李爽, 等. 基于相对方位信息和单间距测量的多智能体编队协同控制 [J]. 航空学报, 2021, 42 (7): 480-491.
Ye J S, Gong B C, Li S, et al. Cooperative formation control of multi-agent systems based on relative position information and single range measurement [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42 (7): 480-491.
- [14] Sheehan J S. Graph theory (Encyclopedia of mathematics and its applications, 21) [J]. Bulletin of the London Mathematical Society, 1986, 18 (1): 83-84.
- [15] 金坤善. 四辊卷板机侧辊位移控制理论与方法研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2020.
Jin K S. Research on the Theory and Method of Side Roll Displacement Control for Four-roller Plate Bending Machine [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020.
- [16] 高雅丽. 四旋翼无人机分布式编队跟踪控制研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
Gao Y L. Research on Distributed Formation Tracking Control of Quadrotor UAV [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [17] 郑大钟. 线性系统理论 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002.
Zheng D Z. Linear System Theory [M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [18] Liu Y, Yang G H. Distributed robust adaptive optimization for nonlinear multiagent systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 51 (2): 1-8.
- [19] Wang C G, Zhang K K, Zhang N, et al. A systematic study on three-roll continuous straightening process for LSAW pipes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 124 (1-2): 165-182.
- [20] 高金龙. 铝合金型材滚弯曲率误差补偿技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
Gao J L. Research on Curvature Error Compensation Technology for Roll Bending Forming of Aluminum Alloy Profiles [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [21] 黄世军, 陈凌霄, 田洪才, 等. 型材滚弯回弹影响因素研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (4): 117-123.
Huang S J, Chen L X, Tian H C, et al. Study on the influential factors of profile roll bending spring back [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (4): 117-123.