

基于 ADAMS – MATLAB 联合仿真的 液压活套多变量解耦控制

尹方辰, 孙 杰, 马更生, 张殿华

(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)

摘 要: 对于具有非线性、强耦合、不确定特性的液压活套系统的多变量控制一直是轧制控制领域的难点问题, 为了进一步提高热连轧带钢的控制品质, 首先利用 ADAMS 建立了液压活套虚拟样机模型, 然后利用 MATLAB 设计了一种基于互不相关解耦策略的液压活套迭代学习控制系统, 利用 ADAMS/Sub 模块与 MATLAB/Simulink 接口得到联合仿真模型. 基于此模型, 对传统 PID 控制系统与所设计的控制系统进行了仿真研究, 仿真结果表明所设计的控制系统可以更好地减弱活套张力与高度系统的耦合作用, 使活套控制系统获得更好的控制效果.

关 键 词: 热连轧; 液压活套; 互不相关解耦; 迭代学习控制; ADAMS; MATLAB

中图分类号: TG 333.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0500-05

Multivariable Decoupling Control of Hydraulic Looper System Based on ADAMS-MATLAB Co-simulation

YIN Fang-chen, SUN Jie, MA Geng-sheng, ZHANG Dian-hua

(State Key of Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: YIN Fang-chen, E-mail: yfc_ral@163.com)

Abstract: The multivariable control for hydraulic looper system which has the features of nonlinearity, strong coupling and uncertainty is the difficult point in the rolling control field. In order to improve the control performance of hot continuous rolling strips, a virtual prototype model of the hydraulic looper was built by using ADAMS, then the iterative learning control (ILC) system based on a non-interactive decoupling strategy was designed by using MATLAB, thus a co-simulation model was built by using ADAMS/Sub module and MATLAB/Simulink interface. Simulation studies were made for traditional PID control system and for the designed control system on the basis of this co-simulation model. The simulation results showed that the designed control system further weakens the coupling effect between the looper height and tension, and achieves better control effect of the looper system.

Key words: hot strip mill; hydraulic looper; non-interactive decoupling strategy; iterative learning control; ADAMS; MATLAB

在现代热连轧机中, 活套控制系统是一个非常重要的系统, 其性能的优劣将直接反映在成品带钢的产品质量上. 但在活套控制系统中活套高度与带钢张力具有很强的耦合性, 并且其系统本身具有较强的非线性与不确定性, 这些控制难点均给活套多变量控制系统的设计带来了巨大的挑

战^[1]. 对于活套多变量控制系统的设计, 近几年来一直受到关注, 不同的控制方法不断地被提出, 但多数是针对电动活套进行的. 然而, 目前新建的热轧生产线大部分采用的是液压活套, 其在控制上比传统的电动活套更为复杂. 此外以往活套控制系统的设计大多是针对简化求解的线性化活套

收稿日期: 2015-03-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N140704001); 辽宁省博士启动基金资助项目(20131033).

作者简介: 尹方辰(1988-), 男, 辽宁盘锦人, 东北大学博士研究生; 张殿华(1963-), 男, 内蒙古赤峰人, 东北大学教授, 博士生导师.

数学模型,其与实际的活套机械模型差别较大,很难满足工程上对模型精度的高要求,因此迫切需要寻找新的途径来解决这些问题^[2-4]。

随着现代化工业的迅速发展,ADAMS - MATLAB 联合仿真技术在工业控制系统的研究领域得到了广泛应用,并取得了较为理想的成果。ADAMS 既能够方便地实现多刚体系统的运动学及动力学仿真,也能实现柔性体运动学及动力学仿真^[5-7]。

本文在互不相关解耦的基础上,针对活套动作过程具有重复运行的特点,将每一次活套行程所得到的系统误差应用于下一次的控制过程中,构成液压活套迭代学习控制器。此种控制策略不需要对被控对象的精确建模,能以非常简单的方式处理具有非线性、强耦合、不确定性的液压活套系统,达到增强液压活套系统鲁棒性的目的^[8]。然后借助 MATLAB 强大的计算能力,建立起了基于互不相关解耦的液压活套迭代学习控制系统模型,以及 ADAMS 与 MATLAB 之间的通信连接,使得机械设计与电气控制两部分有机地结合起来。

1 液压活套机械系统模型的构造

1.1 基于 ADAMS 的液压活套机械建模

ADAMS 具有很强的运动学及动力学仿真能力,但很难精确建立复杂的三维实体模型。因此本文根据某厂 1 450 mm 热轧线 3[#] 液压活套尺寸数据,首先以 SOLIDWORKS 软件为基础设计出液压活套机械模型,并将简化后的三维机械模型导入到 ADAMS 中。为使建立的液压活套虚拟样机与现场实际液压活套具有相同或者相近的物理特性,在 ADAMS 中需对液压活套的每个零部件进行编辑,定义其材料、质量、转动惯量等相关属性。最终得到如图 1 所示的液压活套系统机械模型视图。

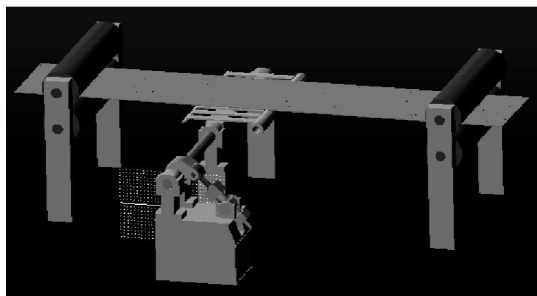


图 1 液压活套系统机械模型

Fig. 1 Mechanical model of hydraulic looper system

1.2 基于 ADAMS 的液压活套动力学仿真

在建立完液压活套的机械模型后,应该先利用 ADAMS/View 进行机械系统的仿真分析,验证模型的合理性后,再向样机系统添加控制系统。在仿真前首先在 ADAMS 中设计张力传感器用于测量套辊与带钢之间的接触力,其次为了测量活套辊与轧制线之间的夹角,在模型中添加 3 个 Marker 点,最后为使仿真过程进一步贴近实际,在相邻机架的工作辊上辊添加单向力作为实际轧制过程中的轧制力。仿真结果如图 2 所示。

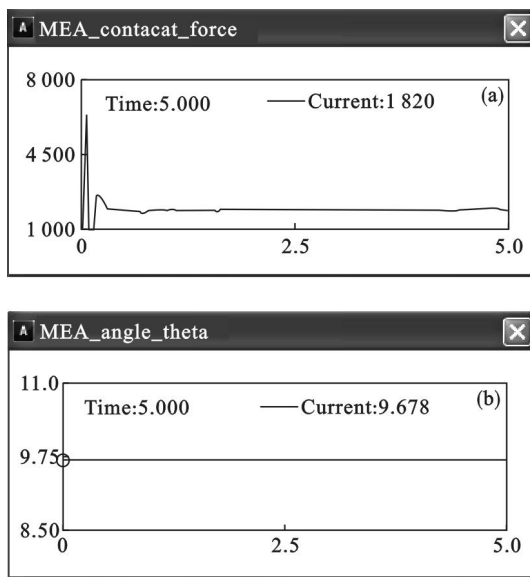


图 2 机械系统仿真过程及结果

Fig. 2 Simulation results of mechanical system in ADAMS

(a) 一带钢与活套辊接触力响应曲线;
(b) 一活套高度响应曲线。

由图 2 可知,在给液压缸活塞缸一个位移输出时,活套辊抬起,通过角度测量得到活套高度值,通过张力传感器检测得到活套辊与带钢之间的接触力,由此证明活套的机械系统可以进行正常的仿真分析,机械系统建模满足联合仿真需求,为下一步机电系统联合仿真奠定了基础。

2 液压活套解耦控制系统设计

2.1 液压活套迭代学习控制器设计

迭代学习控制(ILC)不需要对系统的精确建模,它是针对具有重复性或周期性的被控对象,利用先前的控制经验和测得的跟踪误差信号,通过一定的学习律对下一次的控制量进行修正,并且不难证明随着迭代次数的增加可以寻找出一个理想的控制输入信号,使被控系统在有限时间和区间上输出高精度的跟踪理想轨迹^[9-10]。热连轧液

压活套通过伺服阀控制无杆腔与有杆腔不断进油与出油,实现液压缸活塞的重复运动,从而带动活套辊完成对带钢的张力控制,活套系统起套、调套与落套三个阶段称为一个行程,即一次迭代.热连轧工艺需要活套系统响应快、追随性能好,因此本文采用 PD 型学习律来设计液压活套迭代学习控制器,利用液压活套系统当次运行的输出误差 $e_k(t)$ 及前次输出误差 $e_{k-1}(t)$ 与输出值 $u_{k-1}(t)$ 来

构成当次存储器的输入值 $\tilde{u}_k(t)$:

$$\tilde{u}_k(t) = u_{k-1}(t) + L e_k(t) + W e_{k-1}(t) \quad (1)$$

式中: t 为反应时间; k 为迭代次数; L, W 为学习增益矩阵.

令 $y_d(t)$ 为液压活套系统的设定值, $y_k(t)$ 为液压活套系统的实际值,则液压活套迭代学习控制系统框图如图 3 所示.

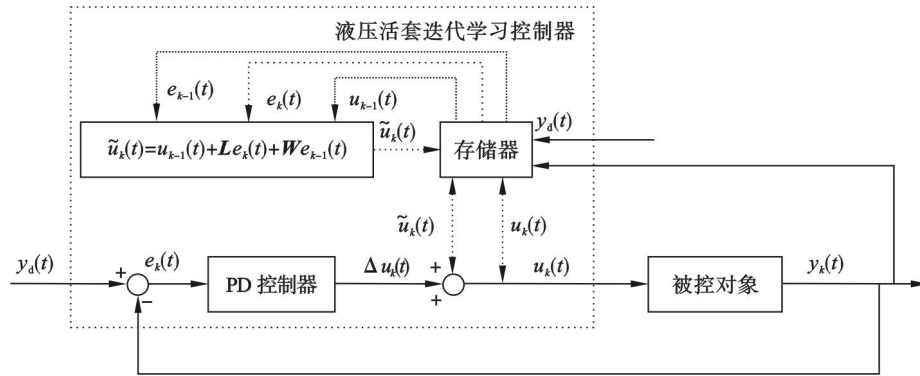


图 3 液压活套迭代学习控制系统框图

Fig. 3 Diagram of iterative learning control system for hydraulic looper

设 $k_p^{\text{ILC}}, t_d^{\text{ILC}}$ 分别为 PD 控制器的比例、微分系数, t 为反应时间, λ 为前次输出误差 $e_{k-1}(t)$ 的加权系数,则由图 4 可知,迭代学习控制的输出值 $u_k(t)$ 为

$$u_k(t) = \tilde{u}_k(t) + \Delta u_k(t) = u_{k-1}(t) + (1 - \lambda) \times \left(k_p^{\text{ILC}} + \frac{d}{dt} t_d^{\text{ILC}} \right) e_k(t) + \lambda \left(k_p^{\text{ILC}} + \frac{d}{dt} t_d^{\text{ILC}} \right) e_{k-1}(t) \quad (2)$$

2.2 互不相关解耦控制系统设计

活套多变量互不相关解耦控制考虑了活套角

度和张力之间的相互干涉对活套控制所造成的不良影响,把耦合通道对主通道的影响当作扰动,通过调节互不相关控制器的参数达到削弱各输出信号之间耦合作用的目的.同时,将迭代学习控制器分别引入到活套高度与带钢张力控制回路中,均串联于互不相关解耦控制器前,对其起到补偿作用,这样活套高度和带钢张力控制系统即变成了一个双闭环控制系统,图 4 是活套多变量互不相关解耦控制方法结构框图.

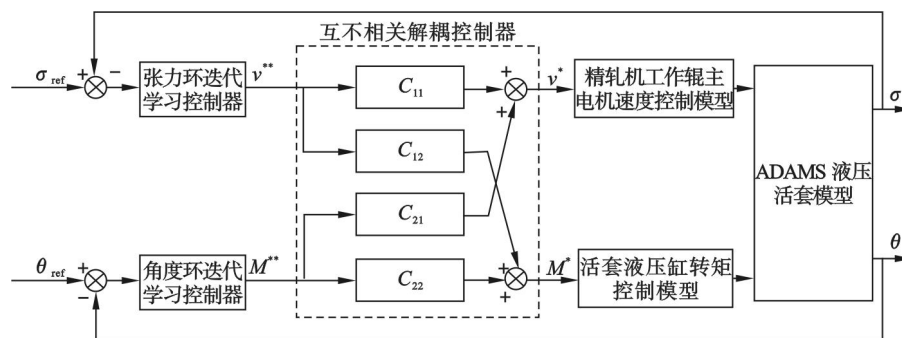


图 4 活套多变量互不相关解耦控制系统

Fig. 4 Non-interactive decoupling control strategy of looper multivariable system

图 4 中: σ_{ref} 为带钢张力给定值; θ_{ref} 为活套高度给定值; σ 为带钢张力响应值; θ 为活套高度响应值; $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$ 为互不相关控制器的参数.

互不相关控制器实际是一个前馈补偿器,加入互不相关控制器相当于是在被控对象模型前乘

上一个系数矩阵 $\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}$, 矩阵中 $C_{11} = C_{22} = 1$, C_{12} 和 C_{21} 由 0 开始逐渐增大,现场对 C_{12} 和 C_{21} 的调节是在 PLC 中进行的.

3 液压活套多变量解耦控制系统的联合仿真

ADAMS 的输入输出是与 MATLAB 设计的控制系统进行数据通信的接口. ADAMS 中的输出变量是进入控制系统的输入变量, 控制系统的输出变量是返回到 ADAMS 的输入变量, 由此可以完成从 ADAMS 到 MATLAB 的一个闭环控制. 在本文中定义的 2 个输入变量分别为液压缸输出转矩和轧辊转速, 定义的 2 个输出变量为活套角度和带钢张力.

首先, 在工作点处于 $t = 0\text{s}$ 时分别对活套高度系统与张力系统施加幅值为 1 的阶跃信号进行仿真分析, 选取活套传统 PID 控制系统参数: 高度闭环比例系数为 5.5, 积分系数为 3.0; 张力闭环比例系数为 4.8, 积分系数为 4.2. 选取活套基于互不相关解耦的迭代学习控制系统参数为: 高度闭环比例系数为 28.50, 积分系数为 6.70; 张力闭环比例系数为 20.38, 积分系数为 78.00; $C_{11} = C_{22} = 1, C_{12} = 0.432, C_{21} = 0.176, \lambda = 0.382, k = 3$, 设置仿真时间 $t = 8\text{s}$.

由图 5, 6 可知, 互不相关解耦控制器在很大程度上减小了活套角度与带钢张力的耦合作用.

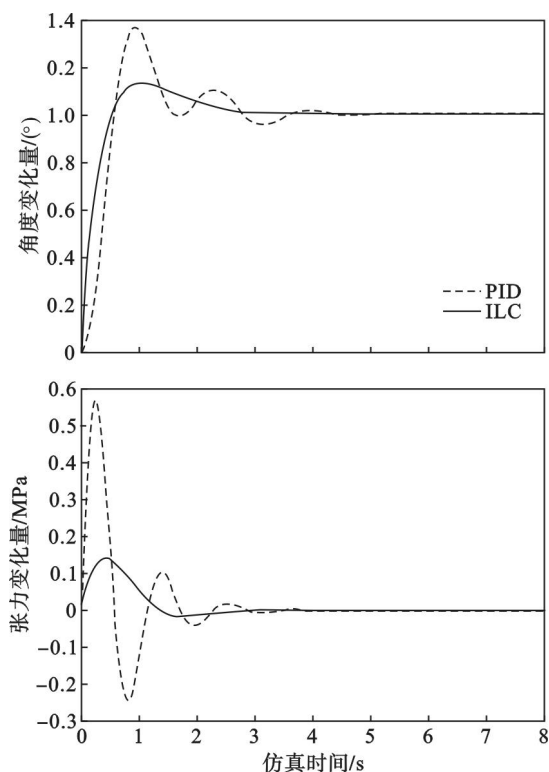


图5 活套角度添加阶跃扰动时活套系统响应曲线
Fig. 5 Response curves of looper system with step disturbance signals on looper angles

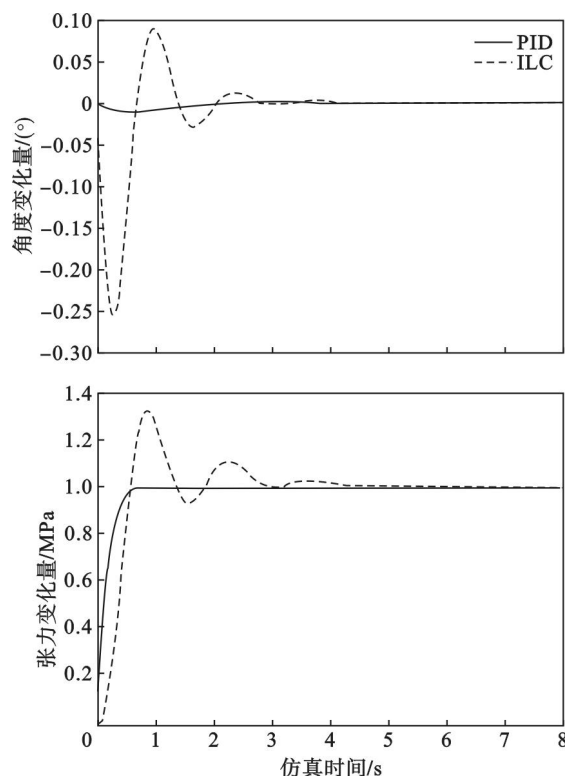


图6 带钢张力添加阶跃扰动时活套系统响应曲线
Fig. 6 Response curves of looper system with step disturbance signals on strip tension

4 结 论

1) 通过 ADAMS 软件建立了液压活套虚拟样机, 避免了对液压活套系统的复杂微分方程的推导, 所建立的虚拟模型与那些近似线性化的简易数学模型相比, 可以更好地接近实际物理模型.

2) 根据迭代学习控制理论, 用 PD 学习律设计了液压活套迭代学习控制器, 并结合互不相关解耦控制, 开发了基于互不相关解耦的液压活套迭代学习控制系统.

3) 将在 ADAMS 中建立的液压活套虚拟样机模型与在 MATLAB/Simulink 中建立的基于互不相关解耦的液压活套迭代学习控制系统通过 ADAMS/Sub 模块接口连接起来, 得到液压活套机电联合系统仿真模型. 仿真结果表明本文所建立的控制系统比常规 PID 控制系统, 可以更好地改善热连轧液压活套张力系统与高度系统之间的耦合关系, 并且在模型参数发生变化时, 比常规 PID 控制系统体现出了更好的鲁棒性.

参考文献:

- [1] Choi I S, Rossiter J A, Fleming P J. Looper and tension control in hot rolling mills: a survey[J]. *Journal of Process Control*, 2007, 17(6): 509 - 521.

(下转第 507 页)