

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0185-04

机电复合传动系统瞬态振动自动化控制技术

董传翠¹, 孔锐言², 苏小礼²

(1. 开封技师学院, 河南 开封 475000; 2. 河南医药健康技师学院, 河南 开封 475000)

摘要: 由于机电复合传动系统的复杂性以及时变性, 对其进行瞬态振动控制的精度受限, 故提出机电复合传动系统瞬态振动自动化控制技术。针对机电复合传动系统进行非线性动力学建模, 构建振动频率特征方程。将控制器的控制目标设为传动系统的振动频率调整量, 将输入值设为电机转子的位移偏差以及变化率, 设计模糊控制器结构。对传动系统电机转子位移数据进行平滑处理, 将控制器的输出值作为机电复合传动系统的瞬态振动控制值, 实现对系统振动情况进行调整控制。测试结果表明, 应用所提方法后, 系统瞬态振动频率明显降低, 控制精度较为理想。

关键词: 机电复合传动系统; 瞬态振动; 自动化控制; 模糊 PID 控制; 模糊规则; 非线性动力学建模

中图分类号: TP237; TN134

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)01-0185-04

Automatic control technology of transient vibration of electromechanical composite transmission system

DONG Chuancui¹, KONG Ruiyan², SU Xiaoli²

(1. Kaifeng Technician College, Kaifeng 475000, Henan, China;

2. Henan Technician College of Medical and Health, Kaifeng 475000, Henan, China)

Abstract: Due to the complexity and time-varying of electromechanical composite drive system, the precision of transient vibration control is limited, so the automatic control technology of transient vibration of electromechanical composite drive system is proposed. The nonlinear dynamics model of electromechanical composite drive system is established, and the vibration frequency characteristic equation is established. The control target of the controller is set as the vibration frequency adjustment of the transmission system, and the input value is set as the displacement deviation and the change rate of the motor rotor. The rotor displacement data of the drive system is smoothed, and the output value of the controller is taken as the transient vibration control value of the electromechanical compound drive system to realize the adjustment and control of the system vibration. The test results show that after the proposed method is applied, the transient vibration frequency of the system is obviously reduced, and the control precision is better.

Keywords: electromechanical composite transmission system; transient vibration; automatic control; fuzzy PID control; fuzzy rules; nonlinear dynamics modeling

机电复合传动系统作为现代机械装备的核心组成部分, 其性能的稳定性和精度直接影响到整个设备的运行效率和可靠性^[1]。然而, 在实际运行过程中, 机电复合传动系统常常会受到各种内外部因素的干扰, 导致系统出现瞬态振动现象, 影响系统的正常运行。因此, 研究机电复合传动系统瞬态振动的自动化控制技术具有重要意义。

当前, 针对不同传动系统在振动控制方面的研究, 国内外学者均已取得了不少成果。例如, 高博等^[2]引入疲劳损伤谱修正试验条件, 在满足最大预期的前提下缓解“过试验”。以航天飞行器典型圆筒结构为原型, 设计典型试验件, 提升低频瞬态振动环境试验的精细化水平, 缓解现有正弦扫频振动试验条件制定方法中存在的疲劳损伤

“过试验”问题。姚宇等^[3]提出针对直联式隧道通风机机械传动过程瞬态振动的控制方法, 通过拉格朗日方程推导出机械传动系统的动力学模型, 利用线性 FxLMS 算法完成对瞬态振动的初步控制, 更新准则优化线性 FxLMS 算法完成对瞬态振动的精准控制。Zhou C 等^[4]提出了一种基于内模控制的 PID 控制方法来抑制风力发电系统传动链的振动。张博等^[5]对船舶海上航行推进轴瞬态扭转振动响应展开研究, 利用有限元分析软件构建实体模型, 通过有限元分析得到引起船舶内燃机故障问题的主要影响因素, 确保船舶能够在海上安全、稳定航行。

本文通过结合模糊 PID 控制法, 设计一种能够支持实时在线调整控制参数的自动化控制技术。通过对机电

收稿日期: 2024-04-16; 录用日期: 2024-04-22

基金项目: 河南省自然科学基金项目(202101231101)

作者简介: 董传翠(1985—), 女, 本科, 副高, 研究方向: 自动化控制。

引用本文: 董传翠, 孔锐言, 苏小礼. 机电复合传动系统瞬态振动自动化控制技术[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1): 185-188. (DONG Chuancui, KONG Ruiyan, SU Xiaoli. Automatic control technology of transient vibration of electromechanical composite transmission system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(1): 185-188.)

复合传动系统进行非线性动力学建模,对系统的振动特性进行分析,从而有效优化方法的控制效果。

1 传动系统瞬态振动自动控制

1.1 机电复合传动系统动力学建模

机电复合传动系统本身具有复杂的非线性特性。这些特性可能来源于系统的物理结构、材料属性、工作环境以及多体之间的相互作用等^[6]。在瞬态振动过程中,这些非线性因素会导致系统行为的不确定性和难以预测性。因此,为准确描述系统的动态行为,本文首先针对机电复合传动系统进行非线性动力学建模。系统具体内部结构如图1所示。

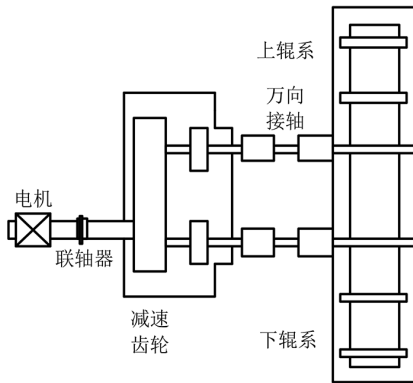


图1 机电复合系统结构

Fig. 1 Structure of the electromechanical hybrid system

在上述结构中,假设 J_1 代表机电复合传动系统中电机的转动惯量, θ_1 和 θ_2 分别代表电机和负载部分的转动角度,由此本文搭建出的关于机电复合传动系统的非线性动力学方程表达式为

$$\begin{cases} J_1\ddot{\theta}_1 - C(\theta_1 - \theta_2) + K(\theta_1 - \theta_2) + K^2(\theta_1 - \theta_2)^2 = T_1 \\ J_2\ddot{\theta}_2 - C(\theta_1 - \theta_2) - C(\theta_1 - \theta_2)^2 + K'(\theta_1 - \theta_2) = f(\theta_2)T_2 \\ f(\theta_2) = \alpha P - \zeta P\theta_2 + \gamma P^2\theta_2^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, J_2 代表负载机械的转动惯量, T_1 和 T_2 分别代表电机部分以及负载机械的参考转矩, K 和 K' 分别代表联轴器的线性扭转刚度以及非线性扭转刚度, C 代表负载机械的扭转阻尼参量, α , ζ 和 γ 分别代表电机设备、联轴器以及负载设备的摩擦因数, P 代表上下辊系产生的轧制力^[7]。轧制力的值主要与上下辊系之间的接触刚度 k_p 有关,其具体计算公式为

$$P = k_p(c_1 - c_2) \quad (2)$$

其中, c_1 和 c_2 分别代表上支撑滚轴的等效阻尼以及下支撑滚轴的等效阻尼。结合上述求解出的轧制力,可以构建出机电复合传动系统的振动频率特征方程,具体表达式为

$$\det | \mathbf{K} - P\omega_j \cdot \xi_j | = 0 \quad (3)$$

其中, ω_j 代表考虑阻尼因素的机电复合系统的瞬时振动频率, ξ_j 代表第 j 阶模态的系统等效阻尼参量, \mathbf{K} 代表机电复合系统的等效刚度矩阵^[8]。

通过上述步骤即可完成对于机电复合传动系统的动力学建模处理,通过对系统结构进行分析,构建出参考转矩与转动惯量之间的非线性动力学关系,并结合上下辊系的轧制力,构建出系统的振动频率特征方程,为后续的瞬态振动自动化控制提供可靠帮助。

1.2 模糊控制器设计

根据上述构建出的机电复合传动系统的动力学建模结果,可以得到系统的振动频率特征方程,从而明确系统的振动特性^[9]。对此本文以振动频率作为被控对象,通过构建模糊 PID 控制器,从而实现瞬态振动的有效控制。具体控制器结构如图2所示。

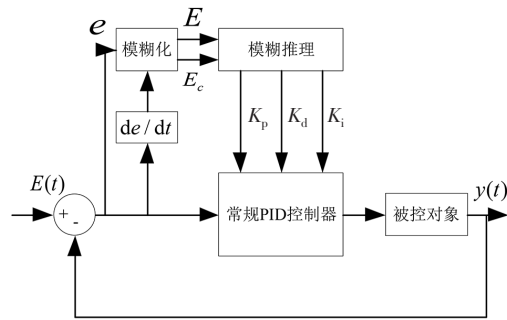


图2 模糊PID控制器的具体结构

Fig. 2 The specific structure of fuzzy PID controller

在上述控制器中,本文设定输入变量为机电复合传动系统的电机转子的位移偏差 $e(t)$ 以及位移偏差变化率 $de(t)/dt$, 由此可以得到控制器的输出控制量计算公式为

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

其中, K_p , K_i , K_d 分别代表比例/积分/微分系数。通过对模糊规则进行设计,从而实现 K_p , K_i , K_d 的调整,最后可以根据调整后的控制器参数,计算最终输出值,即振动频率控制值^[10]。对此,本文所设计出的模糊规则如表1所示。

表1 K_p , K_i , K_d 模糊规则

Tab. 1 K_p , K_i , K_d fuzzy rules

模糊集	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	ZO	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	ZO	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	ZO	NS	NS	NM
PM	PS	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NS	NS	NM	NB	NB

在上述模糊规则中,输出变量论域的七个模糊子集分别为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。采用上述构建出的模糊规则对 K_p , K_i , K_d 三个控制参数进行调整,并将调整结果代入公式(4)中,对控制器的输出控制量进行计算。

通过上述步骤即可完成对于模糊 PID 控制器的设计,将控制器的控制目标设为传动系统的振动频率调整量,并将输入值设为电机转子的位移偏差以及变化率。通

过结合模糊规则对控制器的控制参数进行调整,从而优化控制效果^[11]。根据模糊推理得到的调整量,实时调整PID控制器的参数,并计算PID控制器的输出。

1.3 瞬态振动自动化控制策略输出

通过对上述内容进行整合,本文通过结合模糊推理与PID调整,对瞬态振动的控制策略进行设计。

首先采用传感器对机电复合传动系统的电子转子位移数据进行采集,假设得到的初始位移序列为 e_1, e_2, \dots, e_n ,其中, n 代表序列长度^[12]。考虑到数据采集环境中存在一定的干扰成分,因此本文结合滑动平均法,对采集到的位移数据进行平滑处理,其具体计算公式为

$$e_{\text{smooth},i} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{N} \quad (5)$$

其中, N 代表滑动窗口大小, $e_{\text{smooth},i}$ 代表第 i 个平滑处理后的位移数据点。将滑动窗口向右移动一个数据点的位置,即去掉窗口最左侧的数据点,加入窗口最右侧的新数据点。通过不断对上述步骤进行重复,即可完成位移数据的平滑处理^[13]。然后结合位移数据,对位移偏差 $e(t)$ 以及变化率 $de(t)/dt$ 进行计算,并将其输入到模糊控制器中。具体计算公式为

$$e(t) = |e_i - e_{i-1}| \quad (6)$$

其中, e_i 和 e_{i-1} 分别代表第 i 个采样点以及第 $i-1$ 个采样点下的位移数据平滑值。基于上述计算结果,可以通过构建出的模糊规则,对PID参数进行调整。最后结合公式(4),对控制器的输出值进行计算,并将其作为控制信号作用于传动系统,以调整振动频率。最后不断采集实时数据,进行下一轮的控制调整,形成闭环控制^[14]。

通过上述步骤即可完成对于瞬态振动自动化控制策略的设计,首先结合滑动窗口法,对采集到的传动系统电机转子位移数据进行平滑处理,并将其作为输入值,输入到控制器中。最后将输出值作为控制信号,作用于传动系统,从而实现瞬态振动的自动化控制。

2 实验论证

为了证明本文提出的机电复合传动系统瞬态振动自动化控制技术的实际控制的有效性,通过构建实验环节,对方法的实际控制效果进行验证。

2.1 实验说明

本次实验结合Simulink软件构建出关于机电复合传动系统的运行模型,并采用传感器系统的实际位移数据进行采集,构建出实验数据集。最后采用本文方法对运动模型所模拟出的瞬态振动进行仿真控制,在控制过程中,通过监测运行模型的实际振动曲线,从而判定方法的实际控制效果。

2.2 实验对象

本次实验所选取的机电复合传动系统主要应用于轧机设备中,系统的机械传动部分包括齿轮箱、传动轴、轴承等机械组件,负责将电机的动力传递至轧机工作辊。齿轮箱

采用多级传动设计,能够实现大范围的速度调节和扭矩输出。电气控制部分包括电机驱动器、控制器、传感器等电气元件。电机驱动器负责驱动电机运行,控制器根据传感器反馈的信息进行实时控制,实现速度、位置等参数的精确调节。电机的额定功率为150 kW,额定转速为1 500 rpm,齿轮箱设计有多个传动比可供选择,最大传动比可达10:1,满足轧机在不同轧制厚度和速度下的需求。过载保护设定值为电机额定负载的90%,过热保护设定温度为120℃,过流保护设定值为电机额定电流的1.5倍。采用上述参数,对机电复合传动系统的运行模型进行构建,该模型包括机械传动模块、电气控制模块和安全保护模块等,能够模拟系统在不同输入信号下的动态响应和控制效果。

本文通过在轧机设备上安装位移传感器,用于实时采集转子的位移数据。设定数据采集的频率为1.5 Hz,设定采样总时长为90 s,确保能够捕捉到轧机在不同工况下的位移变化。由此本文所得到的机电复合传动系统的电机转子位移变化情况如图3所示。

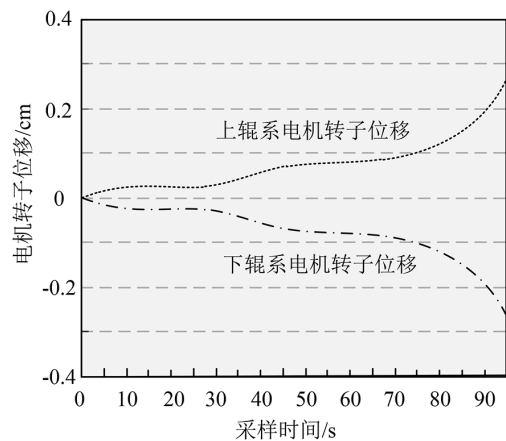


图3 电机转子位移数据采集结果

Fig. 3 Motor rotor displacement data acquisition results

通过上述位移数据可以看出,随着电机的运行时间不断延长,电机转子的位移会越来越大,由此也会导致系统的瞬态振动频率越来越高,振动幅值也会越来越不稳定。

对此,本文根据实验需求,提取特定时间段的位移数据作为实验数据集。将实验数据集划分为训练集和测试集,用于后续的仿真控制实验。将实验数据集导入到Simulink模型中,作为模型的输入信号。在Simulink模型中添加控制算法模块,用于对输入信号进行处理并输出控制信号。对此,本文算法中模糊PID参数的具体配置如表2所示。

表2 本文算法的模糊PID参数配置

变量	$e(t)$	$de(t)/dt$	K_p	K_i	K_d
语言变量	E	E'	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
基本论域	$[-1, 1]$	$[-1, 1]$	$[50, 100]$	$[0, 2]$	$[0, 2]$
模糊论域	$[-3, 3]$	$[-3, 3]$	$[50, 100]$	$[0, 2]$	$[0, 2]$
量化因子	3	3	1	1	1

运行Simulink模型,观察并记录模型的输出响应,即瞬

态振动曲线。通过对记录结果进行分析,即可实现方法性能的有效验证。

2.3 控制效果分析

采用本文方法对模型的瞬态振动进行控制后,模型所输出的瞬态振动幅值的前后对比结果如图4所示。

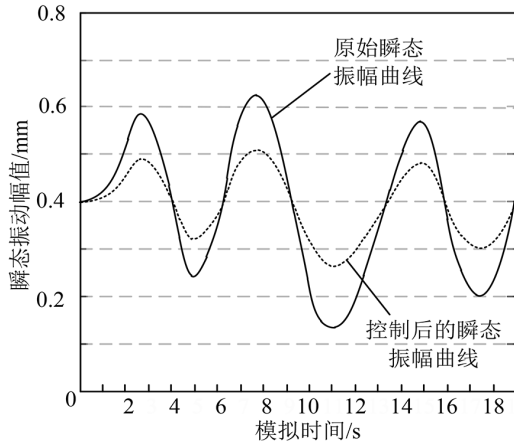


图4 本文控制方法下瞬态振幅曲线前后对比结果

Fig. 4 Comparison results of transient amplitude curves before and after applying the proposed control method

通过上述实验结果可以看出,在采用本文控制方法对机电复合传动系统模型进行控制后,模型的瞬态振动幅值输出曲线明显变得更为平缓。此外,对实验结果进行进一步佐证,本文以瞬态振动的频率作为衡量指标,对本文方法下的控制效果进行对比,由此可以得到不同时段内,机电复合传动系统瞬态振动频率记录数据如表3所示。

表3 机电复合传动系统瞬态振动频率变化情况

Tab. 3 Frequency variation of transient vibration in electromechanical compound transmission system

模拟时长	控制前/s	控制后/s
1	24.8	12.6
2	25.6	15.8
3	25.8	14.2
4	24.6	11.5
5	28.5	12.1
6	23.1	13.5
7	21.2	14.1
8	26.8	12.6
9	31.2	12.4
10	32.0	15.8
11	25.8	16.2
12	26.4	15.0
13	25.4	12.7
14	21.6	13.6
155	24.7	15.9

通过上述实验结果可以看出,相较于控制前的瞬态振动频率,在本文控制方法下,机电复合传动系统的瞬态振动频率明显更低。由此可以证明本文提出的机电复合传动系统瞬态振动自动化控制技术在控制精度上明显更高。

3 结论

本研究的意义在于,通过自动化控制技术的引入与创新应用,有效解决了机电复合传动系统在运行过程中出现的瞬态振动问题。这种技术的研发和应用,不仅提高了传动系统的稳定性和可靠性,降低了故障率,延长了设备的使用寿命,同时也为工业生产的连续性和高效性提供了有力的保障。

参考文献

- [1]陈星,郑水利,候宇,等.采用滑模控制的电动汽车传动系统主动减振研究[J].机械设计与制造,2024(3):218-223.
- [2]高博,张忠,李志强,等.考虑疲劳损伤的低频瞬态振动试验扫频率修正方法[J].强度与环境,2022,49(5):56-63.
- [3]姚宇,方忠强.直联式隧道通风机机械传动过程瞬态振动控制[J].自动化与仪表,2023,38(8):94-98.
- [4]ZHOU C, SHEN Y. A PID control method based on internal model control to suppress vibration of the transmission chain of wind power generation system[J]. Energies, 2022, 15(16):5919-5922.
- [5]张博.船舶海上航行推进轴瞬态扭转振动响应研究[J].舰船科学技术,2022,44(14):44-47.
- [6]杨柳,杨绍普,梁儒全,等.动车传动系统的振动特征分析[J].振动与冲击,2023,42(20):188-195.
- [7]李儒琼,黄立新.一种减速器齿轮传动控制方案优化方法[J].自动化与仪表,2023,38(10):33-36.
- [8]蔡振东.基于传感器技术的数控车床机电一体化自动控制方法[J].自动化技术与应用,2024,43(1):129-133.
- [9]陈忠敏,侯力,吴阳,等.驱动桥准双曲面齿轮传动系统振动特性分析[J].工程科学与技术,2023,55(4):224-238.
- [10]莫帅,周长鹏,高瀚君,等.机器人智能关节机电耦合系统瞬态动力学研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(2):131-138.
- [11]林子豪,方成刚.具有同步带伺服传动系统的振动误差控制策略[J].组合机床与自动化加工技术,2023(1):61-66.
- [12]戴良朋,李强,邹来平.摇摆工况下电动汽车高速斜齿轮传动振动控制方法[J].机械与电子,2022,40(9):61-64,70.
- [13]李华柏,粟慧龙,邵瑞.轨道交通能量回馈式交流牵引传动综合测试系统的设计[J].自动化技术与应用,2024,43(1):125-128.
- [14]顾文斌,王贤良,苑明海,等.面向置换流水车间生产过程的瞬态产能计算方法[J].工业工程与管理,2023,28(4):70-81.
- [15]刘逸飞.基于北斗卫星通信技术的远洋船舶通信自动化控制系统[J].电子设计工程,2024,32(5):150-155.