

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.016

一种起重机回转装置液压冲击抑制系统的设计

李宝田, 郑凯

(西安交通工程学院, 陕西 西安 710300)

摘要: 起重机回转运行中产生的液压冲击降低了起重机回转系统的稳定性, 以提高起重机回转系统稳定性为目标, 设计一种能够有效抑制起重机回转系统压力冲击的控制系统。阐述起重机回转系统的基本结构, 同时利用 AMESim 建立传统回转系统的仿真模型并进行仿真分析。利用比例阀、传感器设计一种具有 PID 控制环节的自适应冲击抑制系统。利用 AMESim 建立自适应冲击抑制系统的仿真模型并进行仿真实验。通过仿真结果的数据对比分析, 表明在相同的工作压力下, 自适应冲击抑制系统对起重机回转运行所产生的液压冲击起到了有效的抑制作用, 保持了系统连续工作的稳定性。

关键词: 起重机; 回转装置; 液压系统; 冲击; 抑制; AMESim

中图分类号: TH21 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0082-05

Design of a Hydraulic Shock Suppression System for Crane Rotating

LI Baotian, ZHENG Kai

(Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract: In order to improve the stability of the crane rotation system reduced by the hydraulic impact generated during the crane rotation operation, a control system effectively suppressing the pressure impact of the crane rotation system was designed. The basic structure of the crane slewing system was explained, and a simulation model of the traditional slewing system was established using AMESim for simulation analysis. An adaptive impact suppression system with PID control was designed using proportional valves and sensors. The simulation model of the adaptive shock suppression system was established using AMESim and simulation experiments were conducted. The comparative analysis of simulation results show that under the same working pressure, the adaptive impact suppression system effectively suppresses the hydraulic impact generated by the crane's rotating operation and maintains the stability of the system's continuous operation.

Keywords: crane; rotating device; hydraulic system; impact; inhibition; AMESim

0 引言

起重设备广泛应用于工业及生产建设的诸多领域, 其回转动作是起重机工作过程中最频繁的动作之一, 动作的平稳性、响应速度对于整机的工作效率、操控性能、安全性都至关重要。但在实际工作过程中, 面对复杂的应用场景, 其易受交变载荷的影响, 液压回转系统不可避免地存在压力波动, 即所谓的压力冲击。秦泽^[1]通过在液压系统中引入多个蓄能装置的方式, 提高系统稳定性; 扈凯等^[2]通过对液压控制阀的分析与优化设计, 改善系统的动态特性等。这些方法虽然起到了一定的冲击抑制作用, 但被动的压力补偿方式存在较为明显的滞后性, 降低了冲击抑制的效果。应在不改变液压回转系统原有结构与性能的同时, 进一步降低压力冲击对液压系统的影响, 故以起重机回转机构为研究对象, 设计了一种具有比例反

馈环节的针对压力冲击的自适应控制系统, 以期增强液压回转系统的稳定性。

1 起重机回转系统结构与工作原理

1.1 基本结构

起重机回转系统的基本结构^[3-4]如图 1 所示。

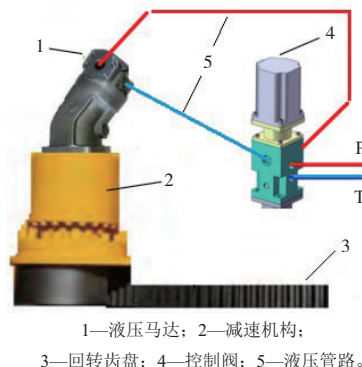


图 1 起重机回转系统基本结构

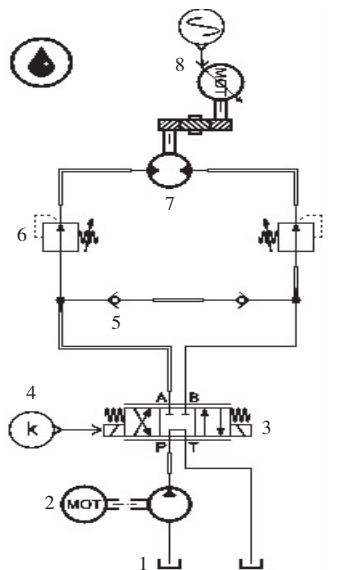
第一作者简介: 李宝田 (1973—), 男, 陕西咸阳人, 讲师, 本科, 研究方向为机电一体化, libaotian2024@126.com。

1.2 工作原理

当液压回转系统工作时,系统压力油从控制阀 P 口进入液压马达并驱动液压马达旋转,而液压马达经过减速机输出力矩驱动回转齿盘旋转,从而实现起重机的回转动作。

本文运用 AMESim 软件^[5-7],通过绘制系统草图、建立子模型等环节,以起重机回转机构为对象,构建传统回转系统的仿真模型,并给出其基本参数。

建立仿真模型,如图 2 所示,仿真模型参数,如表 1 所示。



1-油箱; 2-液压泵; 3-控制阀; 4-控制信号;
5-单项阀; 6-缓冲阀; 7-液压马达; 8-机械负载。

图 2 传统液压回转系统

表 1 传统起重机回转系统仿真模型参数

序号	名称	参数	数值
1	油箱	默认值	—
2	液压泵	液压泵排量/(mL/r)	33/23
		液压泵转速范围/(r/min)	800~3 000
3	控制阀	换向阀直径/mm	25
		换向阀弹簧刚度/(N/mm)	65.7
4	控制信号	工作电流/mA	40
5	单项阀	额定压力/MPa	35
6	缓冲阀	额定压力/MPa	5
7	液压马达	额定转速/(r/min)	3 500
8	机械负载	回转齿盘减速比	1 : 1.15
		交变载荷(模拟控制信号)/Hz	0.1~0.5

2 传统起重机回转系统的压力分析

2.1 系统压力仿真实验

以图 2 为基础,引入表 1 中的仿真模型参数,在 AMESim 的仿真^[8]环境下,进行系统仿真,如图 3 所示。

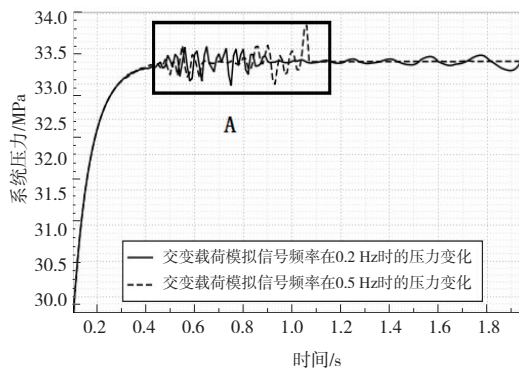


图 3 传统起重机回转系统仿真

为了便于分析,对图 3 的 A 处进行放大分析,如图 4 所示。

从图 4 中发现,在 AMESim 的仿真环境下^[9],进行仿真实验时起重机回转系统的压力波动(冲击)主要产生在 0.5~1.0 s 之间,同时发现交变载荷(模拟信号)频率不同时,液压波动的现象明显不同,即交变载荷频率越小,回转系统的压力波动(冲击)越明显,证实了回转系统在抵抗外部交变负载时存在一定的压力冲击。

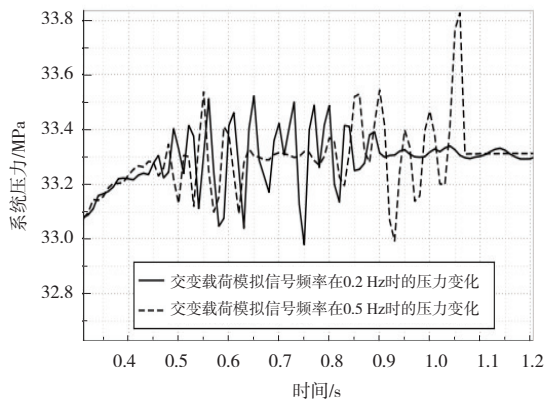


图 4 图 3 中 A 处的放大图

2.2 系统压力数据统计与分析

1) 压力数据统计

本文结合图 4 中的仿真实验结果,对传统起重机回转系统进行了压力数据的统计,如表 2 所示。

表 2 传统起重机回转系统压力数据

时间/s	频率 0.2 Hz 时的压力/MPa	频率 0.5 Hz 时的压力/MPa	压力差/ MPa
0.5	33.524	32.303	1.221
0.6	34.334	32.682	1.652
0.7	33.832	31.986	1.846
0.8	33.702	31.170	2.352
0.9	34.897	32.314	2.587
1.0	34.081	31.318	2.763

2) 系统压力数据分析

本文对表 2 中的不同频率下交变载荷的压力偏差数据进行了统计。通过统计可知压力偏差呈现一定连续变化的线性特征。即系统输出的时间与压力偏差量之间存在比例关系。本文在表 1 的基础上,利用 Matlab 进行数据统计,并进行线性化处理^[10-12],如图 5 所示。

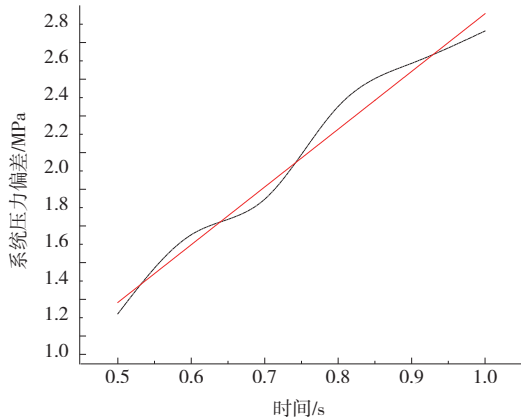


图 5 传统回转系统的压力数据

通过对液压回转系统不同频率下交变载荷压力偏差数据的线性化处理,得到了比例系数 $k \approx 3.31$ 。

3 液压回转系统的优化

3.1 PID 控制系统

由文中 2.2 可知,受交变载荷(频率)的影响,回转系统存在压力波动(冲击)。为了弥补单一比例控制策略的不足,增强系统的适应性,本文引入单神经网络 PID 控制系统^[13-15],其 PID 控制系统原理如图 6 所示。

对期望值为 $r(k)$ 与实际输出 $y(k)$ 进行信号处理并得出单神经网络所需的 3 个状态变量 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$ 。

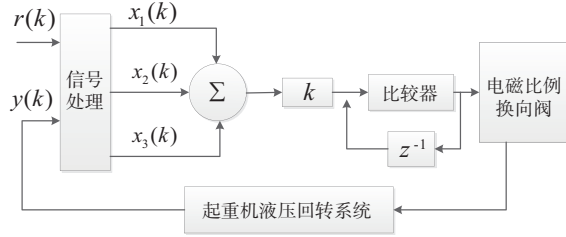


图 6 PID 控制系统原理图

$$\begin{cases} x_1(k) = r(k) - y(k) = e(k) \\ x_2(k) = \Delta e(k) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 k 为比例系数。取 $k = 2.13$, 控制信号为

$$u(k) = u(k-1) + k \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k) \quad (2)$$

式中 $\omega_i(k)$ 为 $x_i(k)$ 的加权系数,可通过加权系数的调整实现 PID 参数自适应整定。采用有监督 Hebb 学习算法。

$$\omega_i(k+1) = (1-c)\omega_i(k) + \eta(e(k)u(k)x_i(k)) \quad (3)$$

式中: $e(k)$ 为误差信号; $e(k) = r(k) - y(k)$; c 为常数 $0 \leq c \leq 1$, c 取 0.1。因此权值修正量 $\Delta\omega_i(k)$ 可由下式表示:

$$\Delta\omega_i(k) = \omega_i(k+1) - \omega_i(k) = -c \left(\omega_i(k) - \frac{\eta}{c} z(k) u(k) x_i(k) \right) \quad (4)$$

控制量 $u(k)$ 为:

$$u(k) = u(k-1) + k \sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i(k) x_i(k) \quad (5)$$

$$\bar{\omega}_i(k) = \frac{\omega_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)|} \quad (6)$$

$$\omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_p e(k) u(k) x_1(k) \quad (7)$$

$$\omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_i e(k) u(k) x_2(k) \quad (8)$$

$$\omega_3(k+1) = \omega_3(k) + \eta_d e(k) u(k) x_3(k) \quad (9)$$

式中:比例环节学习速率系数 $\eta_p = 3.13$;积分环节学习速率系数 $\eta_i = 0.20$;微分环节学习速率系数 $\eta_d = 0.19$ 。

通过 PID 反馈环节^[16-17],控制系统成比例释放蓄能系统压力,进而达到抵抗交变载荷负载,达到提高起重机回转机构稳定性的目的。

3.2 自适应液压冲击抑制系统

1) 建立仿真模型

本文在图 2 传统液压回转系统仿真模型的基础上,通过引入 PID 控制系统,构建了液压冲击抑

制系统仿真模型,进行了优化设计,如图 7 所示。

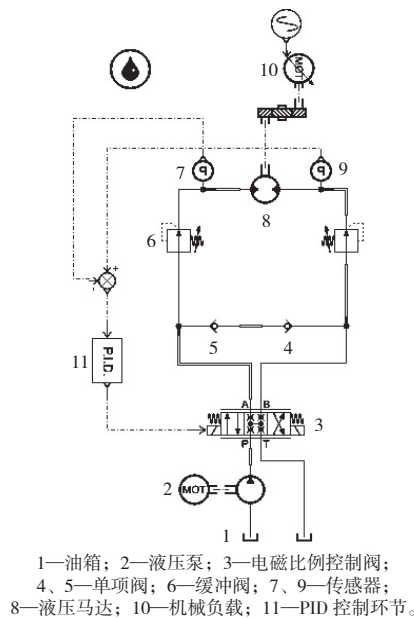


图 7 自适应抑制系统仿真模型

2) 设定子模型参数,如表 3 所示。

表 3 传统起重机回转系统仿真模型参数

序号	名称	参数	数值
1	油箱	默认值	—
2	液压泵	液压泵排量/(mL/r)	33/23
		液压泵转速范围/(r/min)	800~3 000
		换向阀直径/mm	25
3	电磁比例控制阀	换向阀弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)	65.7
		阀控电流/mA	0.5~50
		额定压力/MPa	35
4,5	单项阀	额定压力/MPa	5
6	缓冲阀	默认值	—
7,9	传感器	默认值	—
8	液压马达	额定转速/(r/min)	3 500
		回转齿盘减速比	1 : 1.15
10	机械负载	交变载荷(模拟信号频率)/Hz	0.1~0.5
		比例系数	3.13
		积分系数	0.20
11	PID 控制环节	微分系数	0.19

3) 工作过程

如图 7 所示,起重机回转机构工作时,液压马达 8 转动驱动负载,这时系统中的压力传感器 7、9 开始工作,将采集到的信号经比较器处理,若存

在压力变化量时,PID 控制环节 11 工作,并按照预定算法控制“自适应抑制系统”中的电磁比例换向阀 3 输入相应比例的控制电流,向回转机构液压系统成比例输入压力,进而达到减少压力冲击,提高起重机回转机构稳定性的目的。

3.3 自适应液压冲击抑制系统仿真与分析

1) 系统仿真

依据图 7 中的仿真模型,按照表 3 中的参数进行设置并进行仿真,得到相应的特性曲线。如图 8 所示。

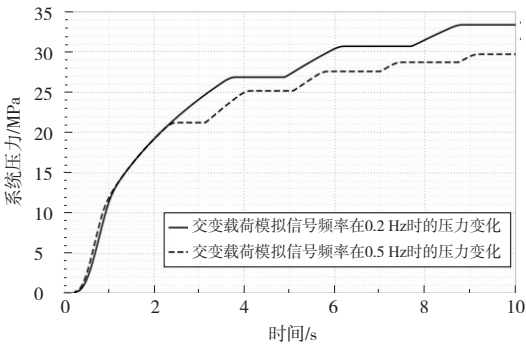


图 8 自适应液压冲击抑制系统

由图 8 可知,在 AMEsim 的仿真环境下^[18-19]进行仿真实验,与图 3 所示的传统液压回转系统相比较,PID 控制环节的引入,进一步补偿了车辆回转机构液压系统压力,有效提高了其抵抗外部交变负载产生的液压冲击的能力。

2) 数据统计

结合图 8 中的仿真实验结果,对自适应液压冲击抑制系统进行了压力数据的统计,如表 4 所示。

表 4 自适应冲击抑制系统压力数据

时间/s	频率 0.2 Hz 时的压力/MPa	频率 0.5 Hz 时的压力/MPa	压力差/MPa
1	11.60	10.57	1.03
2	19.05	17.52	1.53
3	23.96	22.22	1.74
4	26.87	24.64	2.23
5	27.11	24.67	2.44
6	30.41	27.74	2.67
7	30.71	27.86	2.85
8	31.50	28.11	3.39
9	33.38	29.79	3.59
10	33.38	29.65	3.73

3.4 仿真实验结果分析

依据表4中的运行数据,对自适应冲击抑制系统压力偏差数据进行统计,并进行线性化处理分析,如图9所示。

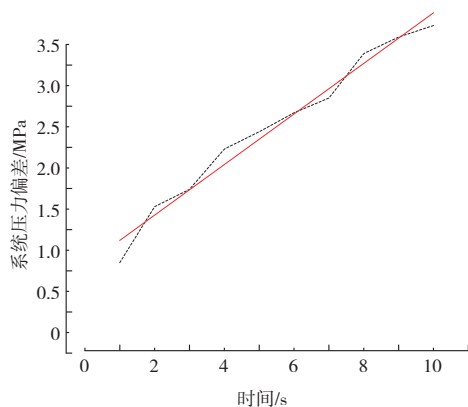


图9 自适应系统压力数据

1)由图9与图5比较后可知,自适应冲击抑制系统压力偏差远小于传统回转系统压力偏差值。通过对数据进行线性化处理,发现优化后回转系统的压力偏差进一步减少。

2)由表4与表2比较后可知,采用PID控制环节后,系统的压力补偿能力明显提升,起到了较好的抗冲击效果,保持了执行机构所需压力的稳定供给。

通过分析证明PID控制环节的引入,在相同工作条件下,自适应冲击抑制系统进一步减小了执行系统(回转机构液压系统)的压力损失。

4 结语

本文首先分析了起重机回转系统的基本结构,并以此为基础建立了传统回转系统的仿真模型并进行仿真,同时绘制了压力偏差的特性曲线,通过分析发现执行系统因负载连续变化造成一定程度的液压冲击。其次,针对液压冲击这一问题,以比例换向阀、传感器为硬件核心设计了一种具有PID控制环节的自适应冲击抑制系统,通过向液压执行系统成比例进行压力输入,进而达到压力补偿的作用。最后,以AMESim为手段搭建了自适应冲击抑制系统的仿真模型,并进行了仿真实验,通过数据统计与对比分析,表明自适应冲击抑制系统对起重机回转运行所产生的液压冲击。起到了有效的抑制作用,从而保持了液压执行系统的稳定性,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 秦泽. 双皮囊蓄能器在挖掘机节能中的研究[D]. 太原:太原科技大学,2021.
- [2] 扈凯,张文毅,祁兵,等. 四通阀控非对称液压缸系统控制器优化设计[J]. 中国农机化学报,2023,44(7):140-146.
- [3] 丁伟. 基于AMESim的起重机回转系统建模与冲击抑制[J]. 机床与液压,2022,50(22):69-73.
- [4] 祝瑞瀚. 汽车起重机回转系统平稳性研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.
- [5] 刘学. 基于AMESim直升机电磁阻尼器建模与仿真[J]. 中国科技信息,2024(1):35-37.
- [6] 高少俊,颜溯,高靖原,等. 基于AMESim的增程式电动轻卡能耗仿真与优化[J]. 汽车实用技术,2025,50(7):8-14.
- [7] 卢加亮,刘庆喜,殷利建,等. 基于AMESim的护坡骨架施工设备工作装置液压系统的设计[J]. 机床与液压,2025,53(5):176-183.
- [8] 王旭东,林承伟,崔彭博. 基于AMESim的直升机液压系统热特性分析[J]. 机械制造与自动化,2025,54(1):72-75.
- [9] 倪萌,张铁柱,鲁力群,等. 基于AMESim的汽车悬架用空气泵建压过程仿真与分析[J]. 机械工程师,2025(2):51-56.
- [10] 张皓,魏德胜,胡立新,等. 非线性模型修正的等效线性化方法[J]. 建筑结构学报,2023,44(增刊2):483-490.
- [11] 毛艳岭,富月. 非线性系统自适应最优切换控制方法[J]. 自动化学报,2023,49(10):2122-2135.
- [12] 郭华伟,吴广磊. 基于SolidWorks-MATLAB-CoppeliaSim的机械臂轨迹规划研究[J]. 机械设计与制造工程,2025,54(4):93-98.
- [13] 刘旭. 基于BP神经网络的PID控制算法参数优化[J]. 中国新技术新产品,2023(20):22-24.
- [14] 段东江,李海英,张贵杰. 基于神经网络算法的电加热过程温度控制[J]. 河北冶金,2023(8):29-34.
- [15] 张宇,何领军. 基于改进PSO-PID的水利闸门启闭机自动控制研究[J]. 电子设计工程,2025,33(8):78-81,86.
- [16] 朱硕. 基于PID控制的船舶航向控制系统研究[J]. 中国科技信息,2025(8):66-69.
- [17] 张哲,宋文陶. 双闭环PID控制的一阶倒立摆系统设计[J]. 中国新技术新产品,2025(7):11-14.
- [18] 袁荫武,孟利民,李会强. 基于AMESim新型径向柱塞泵设计与性能分析[J]. 机械工程与自动化,2024(6):74-76.
- [19] 王瀚毅,曾爱平,尹志宏,等. 基于AMESim的注塑机能耗分析及其节能技术[J]. 机电工程技术,2024,53(12):300-303.

收稿日期:2024-01-31