

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.01.017

塔式起重机自动化配重控制及 平衡动态特性分析研究*

王海舰¹, 袁嘉惠¹, 卢士林¹, 齐子昂¹, 申艳珍¹, 谢 飞², 刘 林²

(1. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 沈阳特种设备检测研究院, 辽宁 沈阳 110035)

摘要:针对塔式起重机工作过程中由于固定配重导致的力矩不平衡问题,研究了塔式起重机的自动化配重控制及平衡动态特性,提出了一种基于自动配重的平衡控制方法。采用拉压传感器测试了塔式起重机吊重过程中两端的力矩偏差,根据偏差和偏差变化率,采用了模糊 PID 控制算法,实时调节了塔式起重机配重块的位置,实现了配重端与重物起吊端的力矩平衡,保证了塔式起重机运行过程中整体的稳定性;设计了塔式起重机自动配重系统实验系统,在重物起升及重物摆动过程中,对塔式起重机的平衡动态特性进行了测试和分析。研究结果表明:塔式起重机自动配重系统响应速度为 0.4 s,配重过程中最大力矩差值为 0.045 N·m,且对重物摆动具有良好的平衡性能;该系统能够实现塔式起重机不同工况的实时动态平衡调节,为提高塔式起重机的稳定性,延长塔式起重机的使用寿命提供了一种有效的技术手段。

关键词:塔式起重机;自动配重;力矩平衡;重物摆动;稳定性

中图分类号:TH213.3;TP273

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)01-0108-05

Automatic counterweight control and dynamic characteristic analysis of a tower crane

WANG Hai-jian¹, YUAN Jia-hui¹, LU Shi-lin¹, QI Zi-ang¹,
SHEN Yan-zhen¹, XIE Fei², LIU Lin²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Institute of Special Equipment Inspection and Research, Shenyang 110035, China)

Abstract: Aiming at the imbalance moment of a tower crane caused by fixed counterweight during working process, the automatic counterweight control and dynamic characteristic analysis of a tower crane were analyzed, and a balance control method based on automatic counterweight was proposed. The moment deviations at both ends of the tower crane during the lifting process were tested by the tension and pressure sensor. According to the deviation and deviation change rate, the fuzzy PID control algorithm was adopted to adjust the position of the weight block during the lifting process of the tower crane, then the moment balance between the counterweight end and the lifting end of the heavy object was achieved. By using the experimental system of the tower crane automatic counterweight system, the balance dynamic characteristics of the tower crane during the lifting and swinging of the heavy objects were tested and analyzed. The results indicate that the response speed of the automatic counterweight system of the tower crane is 0.4 s, the maximum torque difference during the counterweight process is 0.045 N·m, which shows that the system has good dynamic performance and realizes the real-time dynamic balance adjustment of tower crane under different working conditions. Thus, an effective technical method is provided for improving the stability of the tower crane and

收稿日期:2020-04-07

基金项目:广西高校中青年教师科研基础能力提升资助项目(2019KY0240);广西制造系统与先进制造技术重点实验室基金资助项目(17-259-05-001Z)

作者简介:王海舰(1987-),男,辽宁铁岭人,博士,硕士生导师,主要从事机电装备智能监控与故障识别方面的研究。Email:whj19870608@guet.edu.cn

extending the service life of the tower crane.

Key words: tower crane; automatic counterweight; moment balance; weight swing; stability

0 引言

塔式起重机是大型的垂直吊装起重运输机械设,具有塔身高、有效起吊高度大、作业范围广等优点,已经广泛应用于现代建筑施工行业中^[1,2]。

传统的塔式起重机都是采用一次性配重原理,即起吊前,起吊端处于空载状态,配重端的力矩远远大于起吊端;而当起吊端吊起重物重量较大时,起吊端的力矩又大于配重端的力矩,导致塔机长期处于力矩不平衡的状态下,容易发生塔身翻侧、折断和塔机两臂折断等事故,严重威胁塔机操作人员的人身安全;同时,塔机倒塌还会对周边的建筑、设施造成严重损害^[3,4]。

因此,如何实现塔式起重机两端的力矩平衡,降低塔身的不平衡负载,是保证塔式起重机长期安全稳定运行亟待解决的问题。

对于塔式起重机的平衡控制问题,田立勇等人^[5]采用了无线电技术,利用无线遥控发射和接收芯片组与微计算机接口,完成了塔式起重机的无线遥控;孙辉等人^[6]基于塔式起重机在工作工程中的负载摆动现象,分析了塔式起重机的动力学模型,利用 RBF 神经网络输出逼近系统的不确定项,提出了一种基于遗传法的塔式起重机神经网络滑模神经防摆控制新方法,该方法可有效地提高塔机系统的控制性能;张楠等^[7]利用 ANSYS 构建了塔式起重机起重臂架装置的最优化数学模型,并通过分析得到了优化模型的最优解,为塔式起重机臂架装置的设计提供了高效、便捷的方案;王玲娟^[8]以 TC7040 型塔式起重机为研究对象,运用有限元软件 ABAQUS 建立了金属结构模型,分析了塔式起重机在不同风振响应特性的分析,为塔式起重机的设计与使用安全性提供了科学的指导;董明晓等^[9]研究了塔式起重机的变幅运动和起升运动对整机结构振动的影响规律,得到了起重臂振动幅值和频率随着变幅增大而减小,振动的幅值和周期随着起重量的增大而增大的结论。

然而目前对于塔式起重机的自动化配重以及平衡动态特性的分析研究相对较少。

本文提出一种基于自动配重的平衡控制方法,通过调节塔式起重机起吊过程中配重块位置,以实现塔式起重机的配重端与起重端的力矩平衡;并对不同工况下系统的动态特性进行分析,验证基于自动配重的

平衡控制方法的可行性。

1 塔机自动配重实验平台构建

1.1 塔机自动配重原理分析

传统的塔式起重机由于配重是固定在平衡臂端,在空载情况下,平衡臂端的重量远远大于起重臂端的重量^[10,11]。

想要实现塔机处于平衡状态,就要在起吊端起吊适宜的配重实现两端的力矩平衡,即增加吊重 M_2 ,使 $M_1L_1 = M_2L_2$ 。

塔式起重量力矩平衡状态如图 1 所示。

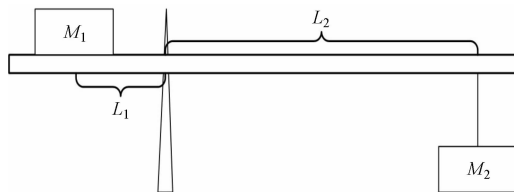


图1 塔式起重量力矩平衡状态

当起吊重量增加, $M_3 > M_2$ 时,此时起吊端力矩 $M_3L_2 > M_1L_1$,为了实现两端力矩平衡,在不改变配重质量的情况下,需要将 M_1 左移,实现 $M_1L_1' = M_3L_2$ 。

起吊端质量增加工况如图 2 所示。

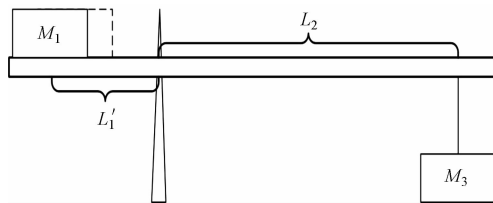


图2 起吊端质量增加工况

当起吊重量不变,而小车向塔帽方向移动,此时起吊端力臂减小, $M_3 > M_2$ 时,此时起吊端力矩 $M_1L_1' > M_3L_2'$,为了实现两端力矩平衡,需要将 M_1 右移,实现 $M_1L_1'' = M_3L_2'$ 。

起吊端力臂减小工况如图 3 所示。

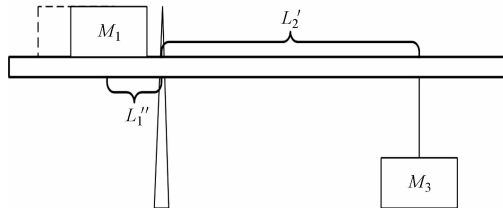


图3 起吊端力臂减小工况

综上所述可知,通过对配重位置的动态调节,改变配重的力臂,可实现塔式起重机不同工况下的平衡调节,提高塔式起重机运行的安全系数,延长塔式起重机的使用寿命。

1.2 自动配重实验平台

实现塔式起重机两端力矩快速平衡调节的关键是确定两端的力矩偏差和偏差变化率。本文提出一种通过拉压力传感器检测两端平衡偏差的方法,即根据塔式起重机的实际结构特征,等比例构建塔式起重机自动配重实验平台^[12-15]。

塔机自动配重实验平台如图 4 所示。

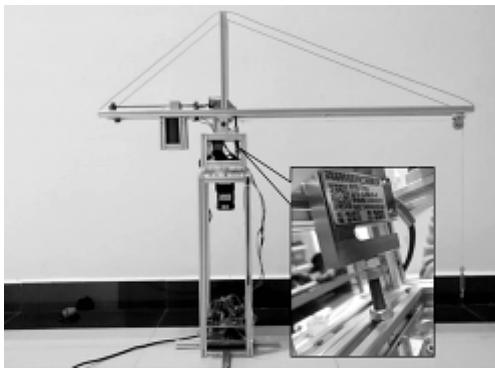


图 4 塔机自动配重实验平台

塔机系统的检测控制模块以 AT89C51 单片机作为控制核心芯片,外围的扩展电路主要由电机驱动电路、压力传感器信号放大、模数转换电路、液晶屏显示电路和光声报警电路等模块组成。

设备上电后,拉压力传感器感应到塔机吊装重物时产生的压力或拉力,转换成模拟信号输出,即很小的 mV 电压,将微小的 mV 信号经过运算放大电路放大到约 0~5 V 之间,将放大的模拟信号经过 A/D 转换器转换成数字信号输入到单片机,单片机接收信号后计算两端力矩的偏差和偏差变化率,并将偏差和偏差变化率输入到模糊 PID 中,进而对电机进行正、反转控制,从而调节配重的位置实现塔机力矩的快速平衡。

2 基于模糊 PID 的塔机自动化配重控制

塔式起重机的模糊 PID 平衡控制系统以拉压传感器反馈的电压信号,与输入期望值的偏差 e 及偏差变化率 e_c 作为输入,系统将量化后的偏差和偏差变化率经过模糊化、模糊推理及解模糊过程,获取 PID 的比例系数、积分系数和微分系数的最优参数,并代入到下式:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: K_p —比例系数; K_i —积分系数; K_d —微分系数。

通过式(1) 输出结果控制驱动电机,可实现对塔式起重机平衡配重的快速调节。

塔式起重机的模糊 PID 平衡控制系统结构如图 5 所示。

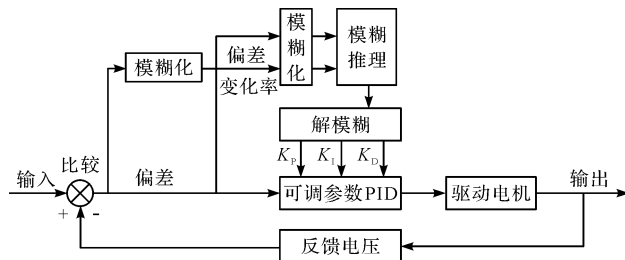


图 5 塔式起重机的模糊 PID 平衡控制系统结构

本文利用 PID 参数模糊自整定确定比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 与偏差 e 及偏差变化率 e_c 的模糊关系,并根据模糊控制原理对 3 个参数不断地进行在线修正,以满足拉压传感器实时反馈的不同的偏差 e 及偏差变化率 e_c 的要求,确保系统具有良好的动态性能和静态性能。

塔式起重机自动配重系统以拉压传感器检测数据的偏差 e 以及偏差的变化率 e_c 作为输入,以自适应模糊 PID 的 3 个参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的值作为输出。

其输入和输出隶属度函数如图 6 所示。

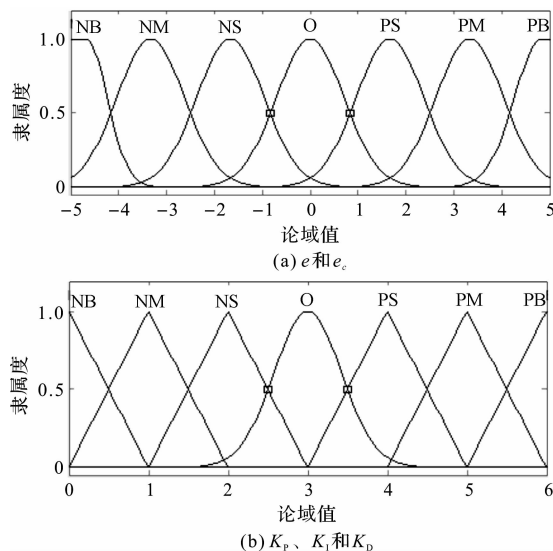


图 6 输入和输出隶属度函数

结合专家经验,根据参数自整定 PID 模糊控制的规则,笔者构建了塔式起重机模糊 PID 系统参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的模糊规则表,分别如表(1~3) 所示。

表 1 K_p 的模糊规则表

K_p	e_c						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	O	O
NM	PB	PB	PM	PS	PS	O	NS
NS	PB	PM	PM	PS	O	NS	NS
e O	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PS	PM	PS	O	NS	NS	NM	NM
PM	PS	O	NS	NS	NM	NM	NB
PB	O	NS	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 K_i 的模糊规则表

K_i	e_c						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	O	O
NM	NB	NM	NM	NS	NS	O	PS
NS	NB	NM	NS	NS	O	PS	PS
e O	NM	NS	NS	O	PS	PM	PM
PS	NS	NS	O	PS	PS	PM	PB
PM	NS	O	O	PS	PM	PB	PB
PB	O	O	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_d 的模糊规则表

K_d	e_c						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	O
NS	O	NS	NM	NM	NS	NS	O
e O	O	NS	NS	NS	NS	NS	O
PS	O	O	O	O	O	O	O
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3 动态平衡实验及结果分析

塔式起重机自动化配重系统需要针对不同运行工况具有良好的普适性,针对起吊重物瞬间、提升过程以及重物摆动等多个工况导致的力矩不平衡均要具有非常好的快速调节能力,且这种动态调节能力需要是动态的、连续的快速响应调节。

为了验证构建的塔式起重机自动化配重系统的动态平衡特性,笔者分别对不同工况进行实验分析。

3.1 起吊瞬间响应分析

塔式起重机提升重物时,提升钢丝绳由非受力状态转变为受力张紧状态,在该过程中,起吊端受力快速增长,在重物离地的瞬间达到峰值;此时,两端力矩严重不平衡,需要系统随着起吊端吊重的变化对配重进行快速调节,以满足塔机两端的力矩平衡。

为了验证笔者所构建的塔式起重机模糊 PID 调节系统的动态特性,本研究对塔式起重机起吊瞬间的响

应特性进行分析。

起吊瞬间响应曲线如图 7 所示。

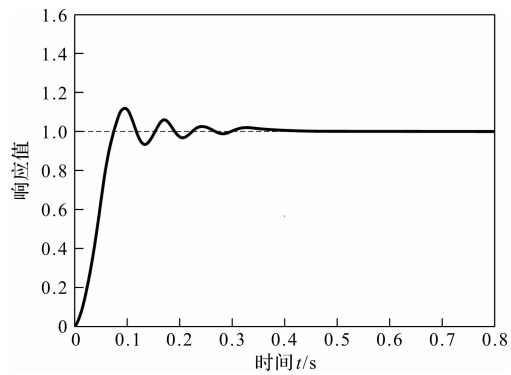


图 7 起吊瞬间响应曲线

由图 7 可以看出:给系统输入 1 个单位阶跃信号,系统响应值快速升高,在 0.1 s 处达到峰值,超调量不大,并经过短暂振荡后在 0.4 s 处达到稳态;以上结果表明,系统对偏差的响应较快,能够根据塔机两端力矩的偏差变化进行快速平衡调节,具有良好的动态性能。

3.2 提升过程动态特性分析

塔式起重机在吊重提升过程中,受塔机提升电机机构、小车行走导致的力臂变化以及重物在空中受风等外界因素导致的微小摆动等影响,会导致塔机两端力矩处于不平衡状态,因此,系统需要不断调整配重的位置来平衡两端的力矩,消除力矩偏差。

本文通过实验,测试塔式起重机起升过程中伴随重物微小摆动(摆动倾角小于 10°)及小车位移(力臂变化)工况的力矩差值变化情况。

起升过程中力矩差值曲线如图 8 所示。

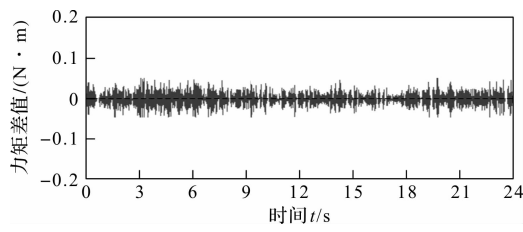


图 8 起升过程中力矩差值曲线

由图 8 可以看出:塔机在提升过程中,两端力矩差值振荡幅度较小,最大力矩差值为 0.045 N · m;由此可以表明,所设计的模糊 PID 系统能够对力矩偏差进行快速调节,实现塔机两端的力矩平衡。

3.3 重物摆动工况动态特性分析

塔式起重机吊重过程中,由于小车的变幅运动,重物会发生一定角度的摆动,在此过程中,由于小车处于运动状态,力臂 L 处于连续动态变化状态;同时,由于质量 M 处于摆动状态下,其在不同时刻垂直向下的重力分

量 M' 也不断发生变化,同理, $M'L$ 也处于连续变化状态。

重物摆动过程中,对力矩平衡将造成比较显著的影响。小车变幅时重物摆动工况如图 9 所示。

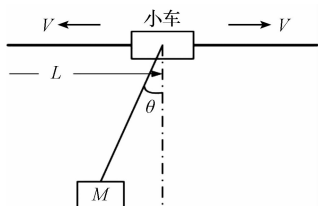


图 9 小车变幅时重物摆动工况

本文分别开展 3° 、 6° 和 10° 不同摆角工况下的塔式起重机自动配重控制系统响应实验,以验证自动配重控制系统的动态特性。

不同摆角工况配重力矩平衡曲线如图 10 所示。

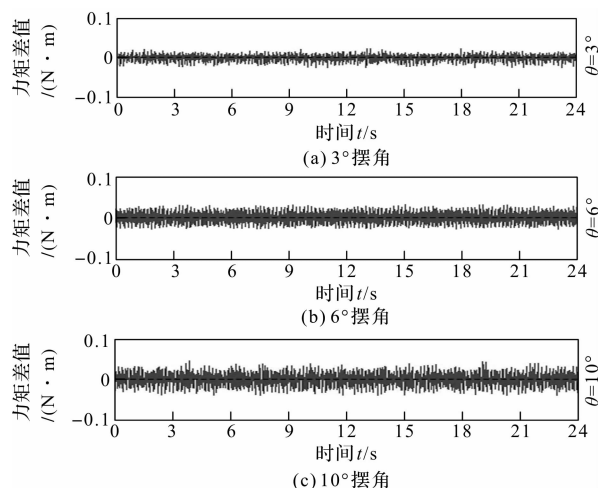


图 10 不同摆角工况配重力矩平衡曲线

从图 10 可以看出:塔式起重机自动配重系统对于小车变幅过程中产生的重物不同摆角,均能够进行快速的平衡调节,最大力矩差值仅为 $0.039 \text{ N} \cdot \text{m}$,表明系统具有非常好的动态性能。

4 结束语

本文提出了一种基于模糊 PID 的塔式起重机自动配重控制方法,通过分析塔式起重机两端的力矩平衡关系,利用拉压力传感器实现了对两端力矩偏差的精确检测,并利用力矩偏差和偏差变化率实现了对两端力矩平衡的动态调节;利用构建的塔式起重机自动配

重实验平台,对起吊瞬间、起升过程以及重物摆动不同工况的力矩平衡进行了实验。

实验结果表明:笔者构建的自动化配重控制系统满足塔式起重机的实际工作需要,具有较高的控制精度和动态特性,为实现塔式起重机的安全稳定运行、延长塔式起重机的使用寿命提供了一种重要的技术手段。

参考文献 (References):

- [1] 刘子薇. 基于 PLC 的塔式起重机控制系统设计与研究 [D]. 合肥:合肥工业大学机械工程学院,2017.
- [2] 李波,杨辉,谢昕,等. 基于 RTP/RTCP 的塔机远程实时监控系统设计及实现 [J]. 计算机测量与控制,2014,22(11):3609-3611.
- [3] 邓翠艳. 塔式起重机工作状态监控系统的研究 [D]. 太原:太原理工大学电气与动力工程学院,2012.
- [4] 赵广平,张学阳. 浅谈当前塔机安装隐患与事故发生的解决途径 [J]. 中国高新技术企业,2013(22):160-161.
- [5] 田立勇,刘治翔,张兰芬. 自动平衡遥控塔式起重机的研究 [J]. 机电产品开发与创新,2011,24(130):67-68,54.
- [6] 孙辉,陈志梅,孟文俊. 塔式起重机的神经网络滑模防摆控制 [J]. 系统工程理论与实践,2013,33(10):262-267.
- [7] 张楠,连香姣,姚圣卓,等. 塔式起重机臂架装置的优化设计 [J]. 机械设计与制造,2019(9):258-260,264.
- [8] 王玲娟,陈建永. 塔式起重机风振响应分析 [J]. 科技视界,2019(10):55-57.
- [9] 董明晓,张恩,梁立为,等. 变幅运动和起重量对塔式起重机起重臂振动的影响规律 [J]. 中国工程机械学报,2018,16(4):347-351.
- [10] 黄冀,梁杰金,严波,等. 塔式起重机吊点定位控制技术的研究 [J]. 机电工程,2018,35(9):955-958.
- [11] 陈帅,周见行,姜伟. 基于 GSM 的塔式起重机安全监控系统 [J]. 机电工程,2011,28(3):337-342.
- [12] 陆旭,周见行,姜伟. 基于 APDL 的塔式起重机有限元参数化建模与分析 [J]. 机电工程,2009,26(7):34-361.
- [13] 曾国源. 基于有限元法港口起重机起重臂静力学分析 [J]. 机电工程技术,2019,48(3):93-95,154.
- [14] 房书继,孙海燕,陆卫军,等. 桥式起重机门架结构载荷试验研究 [J]. 机械制造,2018,56(6):87-90,109.
- [15] 鄢强,邓祥丰,宋慧瑾,等. 小型谷物烘干机的设计及有限元分析 [J]. 包装与食品机械,2019(5):41-45,67.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

王海舰,袁嘉惠,卢士林,等. 塔式起重机自动化配重控制及平衡动态特性分析研究 [J]. 机电工程,2021,38(1):108-112.

WANG Hai-jian, YUAN Jia-hui, LU Shi-lin, et al. Automatic counterweight control and dynamic characteristic analysis of a tower crane [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021,38(1):108-112.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>