

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.008

加强型超起装置对工程起重机伸缩臂的稳定性提升研究

余占蛟^{1,2},姚峰林²,王俊飞³,张毅¹,沈桓宇¹,李鉴松¹

(1. 南充职业技术学院 机电工程系,四川 南充 637131;

2. 太原科技大学 机械工程学院,山西 太原 030024;

3. 成都理工大学 工程技术学院,四川 乐山 614000)

摘要:为提升超起装置对工程起重机伸缩臂稳定性的作用,提出在Y型超起装置基础上设置加强拉索的方案。采用有限单元法对设置单根加强拉索、多根加强拉索的加强型超起装置与传统Y型超起装置进行屈曲稳定性对比研究。研究表明:设置加强拉索的超起装置对伸缩臂的屈曲稳定性提升效果均强于传统Y型超起装置,且加强拉索设置位置越靠近伸缩臂头部,对伸缩臂的屈曲稳定性提升效果越好,甚至在最顶部设置1根加强拉索性能都优于底部2根加强拉索;设置多根加强拉索性能优于相同位置设置单根或数量少于多根的加强拉索;随着加强型超起装置对伸缩臂屈曲稳定性的提升,伸缩臂最大变形量也越来越小。

关键词:起重机;超起装置;伸缩臂;有限元;稳定性

中图分类号:TB213.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0042-04

Research on Stability Improvement of Telescopic Boom of Construction Crane by Reinforced Super-lift System

SHE Zhanjiao^{1,2}, YAO Fenglin², WANG Junfei³, ZHANG Yi¹, SHEN Huanyu¹, LI Jiansong¹

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchong Vocational and Technical College, Nanchong 637131, China;

2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Engineering & Technical College, Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China)

Abstract: For further improving the lifting performance of super-lift system on the stability of the telescopic boom of the construction crane, this paper proposes a scheme of arranging the reinforced cable on the basis of the Y-type super-lift system, which adopts the finite element method to compare and study the buckling stability of the reinforced super-lift system with one or more reinforced cables and the traditional Y-type super-lift system. The results show that the super-lift system with reinforced cables has a stronger effect on the buckling stability of the telescopic boom than the traditional Y-type super-lift system, the closer the reinforced cable is to the head of the telescopic boom, the better the buckling stability of the telescopic boom is improved, and the performance of one reinforced cable at the top is even better than that of two reinforced cables at the bottom. The performance of multiple reinforced cables is better than that of single or less than multiple reinforced cables at the same position. With the increase of the buckling stability of the telescopic boom, the maximum deformation of the telescopic boom becomes smaller and smaller.

Keywords: crane; super-lift system; telescopic boom; finite element; stability

0 引言

工程起重机具有快速转移、长距离行驶、作业场地适应性强等特点,被广泛应用于建筑、风电、石油化工、航空航天等行业。随着各行业对吊装需求向更高的高度、更大的起吊质量发展,大型工程起重机的需求量将越来越大。伸缩臂是工程起重机重要的执行机构,其全伸长度直接决定最大

起升高度。伸缩臂现在一般都是采用高强度结构钢制造,如Weldox1100钢其屈服强度 σ_s 高达1100 MPa,因此大部分伸缩臂的失效不是强度不够造成的,而是失稳。伸缩臂的稳定性引起国内外不少学者兴趣,同时也取得了丰硕成果^[1-3]。伸缩臂的稳定性主要研究内容是确定其失稳形态和屈曲临界载荷^[4]。目前对伸缩臂稳定性的研究主要聚焦于临界力的解法^[5-9],超起拉索、结构缺

基金项目:山西省自然科学基金项目(201901D111236);南充市科技局应用基础研究项目(23YYJCYJ0023);南充职业技术学院2022年度院级科研课题(ZRB2208)

第一作者简介:余占蛟(1991—),男,四川南充人,讲师,硕士,研究方向为物流设备及其系统自动化,1452106526@qq.com。

陷、截面尺寸对伸缩臂稳定性的影响^[10-16]。

由于我国工程起重机发展起步较晚,且受到国外技术封锁,参考行业标准 GB/T 3811—2008《起重机设计规范》中只给出了 5 阶以下伸缩臂的部分组合的长度系数,5 阶以上暂无相应规范。因此,伸缩臂的稳定性是制约我国大型工程起重机发展的关键所在。为提升伸缩臂的稳定性,国内外普遍选择在伸缩臂上加装超起装置,如 Liebherr LTM11200、徐工集团 XCA1600、三一重工 SAC18000T、中联重科 ZAT5000V753 等在进行大吊装作业时都加装了超起装置。即使加装了超起装置,吊装作业时因失稳而折臂的事故也偶有发生,因而本文采用有限单元法对加强型超起装置方案进行了深度探讨。

1 加强型超起装置设计方案

加强型超起装置如图 1 所示,其由超起撑杆、超起拉板、超起拉索、加强拉索等构成。超起装置的加强方案是在传统 Y 型超起装置基础上增添加强拉索(图中虚线表示),加强拉索在主臂上的铰接位置处于臂节头部,不影响臂节的正常伸缩,且便于拆装,而加强拉索另一端通过卷扬张紧固定于超起撑杆上。

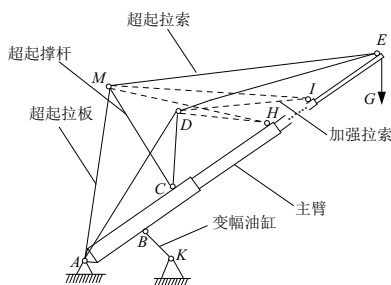


图 1 加强型超起装置系统

2 屈曲分析理论

屈曲分析一般用于计算细长杆件的失稳临界载荷,可分类为非线性屈曲分析与线性屈曲分析。非线性屈曲分析考虑了大变形等非线性效应,计算结果更接近真实临界载荷,但计算效率较低。线性屈曲分析是基于微小变形的理想结构前提而进行的线性分析,计算效率较高,结果为临界载荷上限值。本文屈曲分析旨在探讨加强型超起装置对传统 Y 型超起装置的性能提升效果,故采用线性屈曲分析更为适宜。

结构发生屈曲时,其临界载荷可表示为^[17]

$$P_r = \lambda_0 P_0 \quad (1)$$

式中: λ_0 为屈曲特征值或载荷因子; P_0 为屈曲时加载的初始载荷。

从(1)式不难看出,当屈曲时加载的初始载荷 P_0 恒定时,临界载荷 P_r 与屈曲特征值 λ_0 成正比,即通过比较屈曲特征值 λ_0 便能判定不同类型超起装置对伸缩臂的稳定性的提升效果。

线性屈曲分析计算特征值 λ_0 的一般方程为

$$(\mathbf{K} + \lambda_0 \mathbf{S}) \{\Psi_j\} = 0 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为结构总体弹性刚度矩阵; $\mathbf{S}$ 为结构总体几何刚度矩阵; $\{\Psi_j\}$ 为屈曲模态; j 为屈曲模态阶数,模态阶数选取为 1。

3 有限元分析过程

本文以某工程机械制造厂生产的 300 t 全地面起重机的伸缩臂为例,对其 5 节臂、6 节臂工作时进行有限元屈曲分析,探讨加强拉索不同布置方案对传统 Y 型超起装置性能的提升效果。

在进行有限元屈曲分析时,伸缩主臂赋予 SHELL181 单元、超起撑杆赋予 BEAM188 单元,而超起拉索、加强拉索以及超起拉板赋予 LINK180 单元。超起撑杆截面以及伸缩臂盖板的厚度在 ANSYS15.0 中不能通过定义实常数赋予,需在 Sections 中赋予参数。但超起拉索、加强拉索以及超起拉板可通过 LINK180 单元定义实常数完成相关参数赋予。

本文中主臂和加强型超起装置所采用材料属性如表 1 所示。

表 1 加强型超起装置及伸缩臂材料属性

结构	材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg/m ³)
主臂	WELDOX1100	206	0.3	7 850
加强拉索	钢丝绳	150	0.3	7 850
超起拉索	钢丝绳	150	0.3	7 850
超起撑杆	Q960	206	0.3	7 850
超起拉板	Q960	206	0.3	7 850

3.1 模型建立

有限元模型的建立常见方法有两种,第一种先在三维软件里创建好三维模型,然后导入 ANSYS 软件;另外一种就是直接运用 ANSYS 软件创建模型。两种方法相比较,第一种方法较为简单,容易上手,但往往需要对导入后的模型进行修复,第二种方法要求熟悉 ANSYS 英文界面及含义,对初学者有一定难度。

本文采用第二种方法,利用 APDL 命令流方式创建有限元模型。为提高运算效率,将相邻臂节滑块处通过节点耦合进行连接,超起撑杆与主臂的铰接关系通过 MPC 接触对进行连接,超起拉板、超起拉索、加强拉索应用 LINK180 单元模拟。

装备超起装置的伸缩臂有限元模型如图 2 所示(5 节臂 Y 型超起装置)。(本刊为黑白印刷,相关疑问咨询作者)

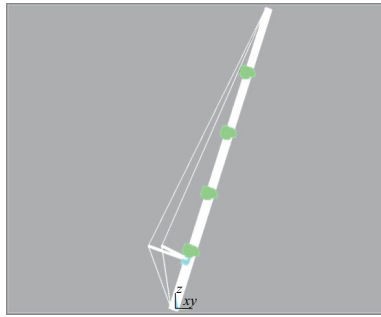


图 2 装备超起装置的伸缩臂有限元模型

3.2 网格划分

有限元的运算中,模型的网格划分至关重要,直接决定结果的精度。APDL 命令流中网格划分部分的命令编写构成为先给待划分网格目标赋予单元属性,再控制网格划分精度、选择网格划分方式以及待划分目标。如划分主臂时,用 AATT 命令赋予材料号、单元号、单元截面号,用 ESIZE 命令控制网格精度,用 MSHKEY 命令选择网格划分的方式,用 AMESH 命令选择待划分的主臂面^[18]。超起撑杆用 LATT 命令赋予单元属性,用 LESIZE 命令控制网格精度,用 LMESH 命令对目标杆划分网格。

3.3 添加约束及载荷

为了模拟符合实际情况,将基本臂与转台的铰接点和变幅油缸与基本臂的铰接点处,沿 x 轴、 y 轴、 z 轴 3 个方向的平移自由度和绕 y 轴、 z 轴转动自由度约束,释放绕 x 轴转动自由度。

伸缩臂所受载荷众多,其中包括自质量载荷、起升载荷 P_Q 、起升绳拉力 F_S 、物品偏摆产生的水平力 F_T 、以及风载荷 P_W 等,其计算公式为^[19]:

$$P_Q = \phi_2 (m_Q + m_0) g \quad (3)$$

$$F_S = \frac{\phi_2 (m_Q + m_0) g}{n\eta} \quad (4)$$

$$F_T = (m_Q + m_0) g \tan \alpha \quad (5)$$

$$P_W = C P_{\Pi} A \quad (6)$$

式中: ϕ_2 为起升动载系数; m_Q 为有效起质量; m_0 为吊具自质量; n 为倍率; η 为起升滑轮组效率; C

为风力系数; P_{Π} 为工作状态计算风压; α 为允许的物品偏摆角, α 为 6° ; A 为伸缩臂侧向的实体迎风面积。

4 加强型超起装置对稳定性的提升效果

本文以 5 节、6 节主臂为实验对象,其中 5 节臂可在①、②、③共 3 个位置布置加强拉索,6 节臂可在①、②、③、④共 4 个位置布置加强拉索如图 3 所示。

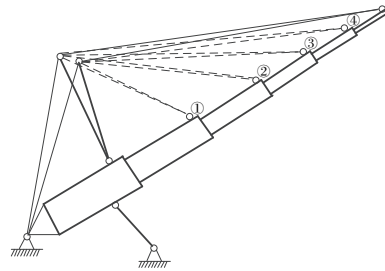


图 3 加强拉索主臂布置位置

在 5 节臂上可布置 1~3 根加强拉索,在 6 节臂上可布置 1~4 根加强拉索,可设计出表 2 所示布置方案。

表 2 加强拉索布置方案

伸缩臂节数	布置加强拉索根数	方案数	布置位置
5	1	3	①、②、③
	2	3	①②、①③、②③
	3	1	①②③
6	1	4	①、②、③、④
	2	6	①②、①③、①④、②③、②④、③④
	3	4	①②③、①②④、①③④、②③④
	4	1	①②③④

4.1 布置 1 根加强拉索效果

5 节伸缩臂与 6 节伸缩臂上布置单根加强拉索,不同布置位置得到的特征值如图 4 所示。

5 节伸缩臂与 6 节伸缩臂上布置单根加强拉索,不同布置位置伸缩臂的最大位移量如图 5 所示。

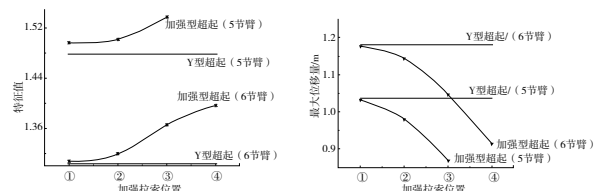


图 4 单根加强拉索特征值

图 5 单根加强拉索伸缩臂最大位移量

4.2 布置2根加强拉索效果

5节伸缩臂与6节伸缩臂上布置两根加强拉索,不同布置位置得到的特征值如图6所示。

5节伸缩臂与6节伸缩臂上布置两根加强拉索,不同布置位置伸缩臂的最大位移量如图7所示。

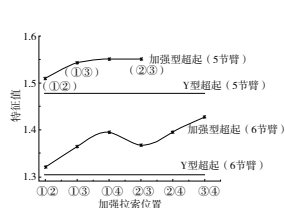


图6 两根加强拉索特征值

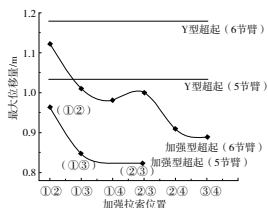


图7 两根加强拉索伸缩臂最大位移量

4.3 布置3根、4根加强拉索效果

5节伸缩臂上布置了3根加强拉索与6节伸缩臂上布置3根、4根加强拉索,不同布置位置得到的特征值如图8所示。

5节伸缩臂上布置了3根加强拉索与6节伸缩臂上布置3根、4根加强拉索,不同布置位置伸缩臂的最大位移量如图9所示。

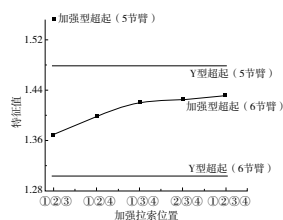


图8 3根、4根加强拉索特征值

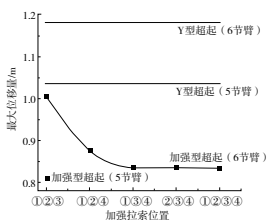


图9 3根、4根加强拉索伸缩臂最大位移量

5 结语

运用有限单元法分别对伸缩臂上装备加强型超起装置与传统Y型超起装置进行屈曲分析可得到如下结论:1)加强型超起装置无论采用单根加强拉索布置方案还是多根加强拉索布置方案,对伸缩臂的屈曲稳定性提升效果均强于传统Y型超起装置;2)加强型超起装置的加强拉索布置位置越靠近伸缩臂头部,对伸缩臂的屈曲稳定性提升效果越好,甚至在最顶部布置1根加强拉索性能优于底部两根加强拉索;3)加强型超起装置布置多根加强拉索性能优于相同位置的单根或数量少于多根的加强拉索;4)随着加强型超起装置对伸缩臂屈曲稳定性的提升,伸缩臂最大位移量越来越小。

参考文献:

[1] 卓英鹏,齐朝晖,王刚,等. 伸缩臂结构超级单元建模

及失稳荷载快速搜索方法[J]. 大连理工大学学报, 2022,62(4):331-341.

[2] 刘士明,刘俊汝,孟丽霞. 超起拉索非保向力作用下伸缩臂几何非线性分析[J]. 机械设计与制造, 2021(5):88-91.

[3] RAHAI A R, KAZEMI S. Buckling analysis of non-prismatic columns based on modified vibration modes[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2006,13(8):1721-1735.

[4] 秦仙蓉,孚罗特,刘应花,等. 基于有限元方法的塔机桁架结构屈曲分析[J]. 中国工程机械学报, 2013, 11(3):187-189,204.

[5] 杨浩. 全地面起重机伸缩臂临界力数值解法及稳定系数研究[D]. 太原:太原科技大学,2022.

[6] 姚峰林,孟文俊,赵婕,等. 伸缩臂式起重机阶梯柱模型的临界力计算对比[J]. 机械设计与制造, 2020(5):23-27.

[7] 姚峰林,孟文俊,赵婕,等. 起重机n阶伸缩臂架稳定性的递推公式及数值解法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(21):2533-2538.

[8] 姚嘉. 全地面起重机伸臂屈曲稳定性数值模拟研究与应用[D]. 长春:吉林大学,2018.

[9] 姚峰林,李建东,高有山,等. 起重机n阶伸缩臂带超起装置的临界力数值解法研究[J]. 机械设计, 2025, 42(1):70-77.

[10] 姚峰林,张立明,吕少博,等. 考虑凹坑缺陷的全地面起重机伸缩臂架结构稳定性研究[J]. 中国工程机械学报, 2024,22(5):567-571.

[11] 姚峰林,丁凡志,杨旭,等. 焊接残余应力对实腹式伸缩臂架稳定性影响[J]. 起重运输机械, 2024(18):46-51.

[12] 邱郡. 汽车起重机臂架关键焊缝缺陷屈曲影响分析[J]. 工程机械, 2024,55(7):174-178,14.

[13] 余占蛟,姚峰林,孟文俊,等. 超起装置对起重机伸缩臂的稳定性影响[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(2):148-152.

[14] 郑宇锋. 考虑臂架变形的伸缩臂起重机模拟系统研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.

[15] 姚峰林,赵兴旺,高有山,等. 考虑双重二阶效应的伸缩臂架非线性稳定性研究[J]. 起重运输机械, 2025(3):32-37.

[16] 王俊飞,姚峰林,余占蛟. 截面尺寸对伸缩臂屈曲失稳性能的影响[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(4):305-309,315.

[17] 屠凤莲,范顺成,罗文龙. 基于ANSYS的支撑架特征值屈曲分析[J]. 河北工业大学学报, 2010,39(3):6-10.

[18] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. ANSYS参数化编程与命令手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[19] 徐格宁. 机械装备金属结构设计[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2019.

收稿日期:2023-12-18