

大型散料堆取设备拉杆类构件仿真分析及结构优化

安福新¹ 张寅² 王彦辉¹ 张晶心¹ 高鹏飞¹ 徐丽³

1. 华电曹妃甸重工装备有限公司, 河北 唐山 063000

2. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004

3. 燕山大学艺术与设计学院, 河北 秦皇岛 066004

[摘要] 拉杆作为该类设备回转平台与臂架之间的关键传力构件, 其异常振动问题已成为影响设备安全运行的重要隐患。文章以某型号大型散料堆取设备前拉杆为研究对象, 针对其在实际作业中出现的剧烈振动现象, 基于材料力学与结构动力学理论, 利用 ANSYS Workbench 平台建立了包含铰轴连接细节的高精度有限元模型, 通过仿真识别出结构的前六阶固有频率与振型特征。以提高结构低阶固有频率、避开外部激励频带为目标, 提出了优化方案。结果表明, 优化后的结构在质量仅增加 0.3t 的情况下, 二阶固有频率提升 49.76%, 有效避开了主要激励频率区间, 且静强度与刚度均满足安全要求。

[关键词] 散料堆取设备; 回转机械; 拉杆; 结构优化; 有限元法; 模态

DOI: 10.33142/sca.v9i3.19357

中图分类号: U661

文献标识码: A

Simulation Analysis and Structural Optimization of Pull Rod Components for Large Bulk Material Handling Equipment

AN Fuxin¹, ZHANG Yin², WANG Yanhui¹, ZHANG Jingxin¹, GAO Pengfei¹, XU Li³

1. Huadian Caofeidian Heavy Industry Equipment Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063000, China

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China

3. School of Arts and Design, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China

Abstract: As a key force transmission component between the rotating platform and the boom of this type of equipment, the abnormal vibration problem of the pull rod has become an important hidden danger affecting the safe operation of the equipment. The article takes the front pull rod of a certain type of large-scale bulk material handling equipment as the research object. Based on the theory of material mechanics and structural dynamics, a high-precision finite element model including hinge connection details is established using the ANSYS Workbench platform to address the severe vibration phenomenon that occurs in practical operation. The first six natural frequencies and vibration mode characteristics of the structure are identified through simulation. An optimization scheme was proposed with the goal of increasing the low order natural frequency of the structure and avoiding external excitation frequency bands. The results show that the optimized structure increases the second-order natural frequency by 49.76% with only a 0.3 ton increase in mass, effectively avoiding the main excitation frequency range, and both static strength and stiffness meet safety requirements.

Keywords: bulk material handling equipment; rotating machinery; pull rod; structural optimization; finite element method; mode

大型散料堆取设备是广泛应用于港口、火力发电厂、冶金、煤炭及建材等行业的关键装卸机械, 其主要功能是实现煤炭、矿石、砂石等散状物料的高效堆存与取料^[1]。随着工业生产规模不断扩大和自动化水平提升, 这类设备正朝着大型化、高参数化、智能化的方向发展, 这对设备的结构强度、动态特性及运行可靠性提出了更为严苛的要求^[2]。前拉杆作为连接设备回转平台与前方臂架系统的关键传力构件, 其主要功能是在回转作业过程中传递轴向拉力与部分

弯矩, 保持臂架系统的几何稳定性。在实际工况中, 前拉杆不仅承受由取料机机构挖掘阻力产生的周期性工作载荷, 还受到设备回转启制动引起的惯性载荷以及自然环境中的风荷载作用, 受力状态异常复杂, 极易引发结构振动问题。

近年来, 多起大型散料堆取设备运行故障报告显示, 前拉杆的异常振动问题日益突出, 成为影响设备安全运行的重大隐患^[3]。剧烈的振动不仅会加速结构疲劳损伤, 引发焊缝开裂、连接件松动、铰点磨损加剧等问题, 还可能

通过臂架传递至整机，影响回转精度与操作安全性，甚至引发倾覆风险。特别是当外部激励频率与结构固有频率接近时，会引发共振现象，导致振幅急剧放大，严重威胁设备安全。因此，深入分析前拉杆振动的产生机理，并在此基础上开展有针对性的结构优化设计，对于提高大型散料堆取设备的运行可靠性、使用寿命和作业安全性具有重要的理论价值与工程现实意义。

在大型散料堆取设备动态特性研究领域，国内外学者已开展了大量工作。早期研究多集中于整机稳定性与静强度分析，如 Smith 等人 (2015) 采用多体动力学方法对某型散料堆取设备在风载作用下的倾覆稳定性进行了系统研究。随着计算技术的发展，有限元动态分析逐渐成为研究热点。国内学者李志强等 (2018) 基于 ANSYS 平台对散料堆取设备门架结构进行了模态分析与谐响应计算，指出了结构薄弱环节及其对动态性能的影响；王磊等 (2020) 则针对臂架系统，研究了不同工况下关键部位的动应力分布规律，为结构疲劳寿命评估提供了依据。

然而，针对大型散料堆取设备前拉杆这一特定构件的系统性振动分析与优化研究仍相对缺乏。现有研究多集中于臂架、门架等主体结构，对连接杆系特别是铰接长杆的动态特性关注不足^[4]。特别是对于包含复杂铰接边界条件、受轴向拉力影响的动力学建模与验证方面，尚有深入探索的空间。同时，如何准确区分不同激励源（如工作载荷、风载、回转惯性力）对振动的贡献度，并据此制定有效的优化策略，也是当前研究的难点之一。

以某实际发生剧烈振动的拉杆为研究对象，其拉杆属于工字形截面，截面形状如图 1 所示。拉杆长 $L=15\text{m}$ ，连接板厚工字钢截面：高 $H=0.212\text{m}$ ，宽 $B=0.22\text{m}$ ，翼缘板厚 $t_1=0.012\text{m}$ ，腹板厚 $t_2=0.008\text{m}$ 。铰接而成，两端与主体结构采用铰轴连接。研究旨在解决以下核心问题：(1) 评估现有结构在动态载荷下的响应特性与安全性；(2) 提出在不削弱结构强度与刚度的前提下，有效避开共振的优化方案。

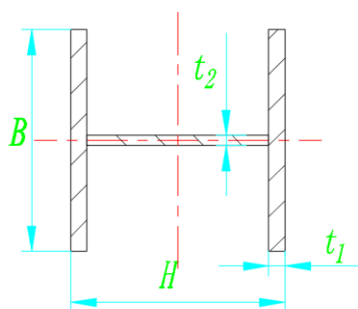


图 1 堆取料设备前拉杆简化截面图

本文采用理论计算、有限元仿真与优化设计相结合的研究路线：首先通过经典力学理论计算结构的固有频率与临界载荷；其次利用 ANSYS Workbench 建立精细有限元模型，进行全面的动力学分析，识别关键振型与危险频率区间；最后基于参数化优化技术，探索最佳结构改进方案，并通过对比验证优化效果。

1 堆取料设备斗轮侧拉杆工程计算

1.1 基本参数

本文以某实际发生剧烈振动的堆取料设备前拉杆为研究对象，设备主要参数见表 1。

表 1 某堆取料设备料斗侧拉杆主要参数

参数	数值
堆料能力/t/h	3000
取料能力/t/h	3000
料斗直径/m	8
上仰角度	12
下俯角度	15
轴力 F/N	8×10^5

1.2 结构动力学基础计算

对于前拉杆这类弹性结构，其无阻尼自由振动的动力学方程可表示为^[5]：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (1)$$

其中， $[M]$ 为质量矩阵， $[K]$ 为刚度矩阵， $\{\ddot{x}\}$ 为加速度向量， $\{x\}$ 为位移向量。通过求解方程的特征值问题，可获得系统的固有频率 f_n 与相应的振型 $\{\Phi_n\}$ 。

$$([K] - \omega_n^2 [M])\{\phi_n\} = \{0\} \quad (2)$$

式中， $\omega_n = 2\pi f_n$ 为第 n 阶固有圆频率。共振发生的条件是外部激励频率与结构的某一阶固有频率接近，即 $f \approx f_n$ ，此时系统响应幅值将显著放大。

对于细长杆件，还需考虑压杆稳定性问题。前拉杆在受压状态下的欧拉临界载荷为：

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu L)^2} \quad (3)$$

其中， E 为弹性模量， I 为截面惯性矩， L 为杆长， μ 为长度系数（铰接两端取 1.0）。该临界值是评估结构静力稳定性的重要指标。

2 有限元模型的建立

2.1 堆取料设备前拉杆分析模型

根据实际结构尺寸，在 ANSYS 中建立前拉杆的三维几何模型。模型包括两根 15m 长的工字钢主梁、两块 0.6m

长的连接板以及铰轴。为平衡计算精度与效率，对不影响整体力学特性的倒角、小孔等特征进行适当简化。如图 2 所示。

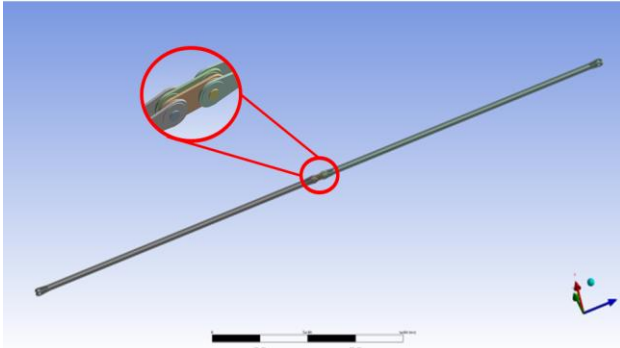


图 2 堆取料设备前拉杆 3D 模型

2.2 载荷、约束及计算工况

利用 ANSYS Workbench 的静力学模块进行分析，设置材料为 Q355，密度为 7850kg/m^3 ，弹性模量为 206GPa，泊松比为 0.3。计算流程如下：

(1) 导入简化的拉杆模型。

(2) 模型中包含若干实体，拉杆耳片及连接板耳片和铰轴之间设置为摩擦连接，摩擦系数 0.05，连接板和拉杆耳片的面接触设置为摩擦连接，摩擦系数 0.15。

(3) 采用实体单元进行网格划分，单元数量为 496351，节点数量为 975834。

(4) 拉杆和堆取料设备塔架、拉杆和斗轮体的约束简化为轴支撑，其中拉杆和斗轮体的轴向支撑释放沿拉杆方向的约束。

(5) 前拉杆主要承受轴向拉力，大小为 $8 \times 10^5\text{N}$ ，在静态分析结果的基础上进行模态计算，提取前 12 阶固有频率与振型，重点关注前 6 阶。如图 3 所示。

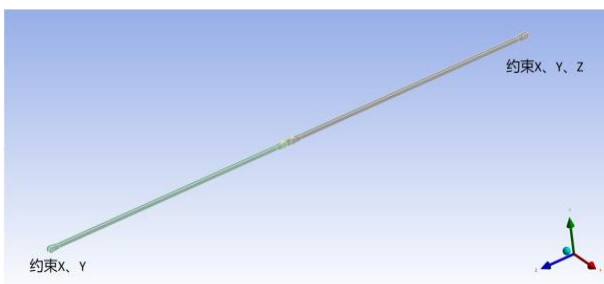


图 3 堆取料设备前拉杆 3D 模型

3 有限元分析结果

模态分析揭示了前拉杆的固有振动特性，结合设备现场震动情况，取前三阶振型为主要研究对象。表 2 列出了前三阶固有频率及对应的振型描述，图 4 展示了典型振型示意图。

示意图。

表 2 某堆取料设备斗轮侧拉杆前 6 阶固有频率

阶数	频率/Hz	振型特征描述
1	0.937	整体一阶侧向弯曲(YZ 平面内)
2	1.433	整体一阶竖向弯曲(XZ 平面内)
3	2.950	整体二阶侧向弯曲(YZ 平面内)

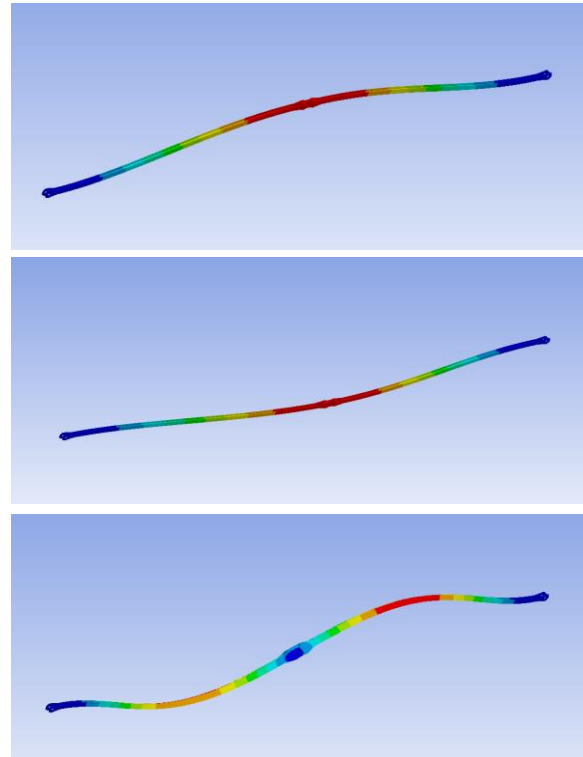


图 4 前拉杆前 3 阶振型图 (1800 倍缩放)

由模态计算结果看出：

(1) 前拉杆低阶频率集中，前两阶固有频率 (0.937Hz 与 1.433Hz) 较为接近，这表明结构在侧向与竖向的弯曲刚度匹配度较高，但也可能形成密集的固有频率群，增加共振风险。

(2) 二阶固有频率和散料堆取设备回转激励频率 (1.5Hz) 极为接近，回转可能引起拉杆剧烈共振。这与实际观察到的振动形态一致。

4 结构优化

4.1 前拉杆结构方案

基于以上计算结果，优化设计的目标是：在最小增重的前提下，显著提高结构低阶固有频率，使其避开 1.5~2Hz 的危险频带，同时保证静强度与刚度不降低。选择对动力学特性影响显著且易于改造的参数作为设计变量：

- (1) 增加拉杆截面高度：由 212mm 增加至 320mm。
- (2) 增加连接板厚度，由 50mm 增加至 70mm。

4.2 优化前后对比

为验证优化结果的合理性,分别对比优化前后的模态、应力和变形结果。模态计算结果见表3。优化后拉杆应力如图5所示。

表3 优化前后拉杆前3阶固有频率

阶数	优化前频率/Hz	优化后频率/Hz
1	0.937	0.883
2	1.433	2.146
3	2.950	2.822

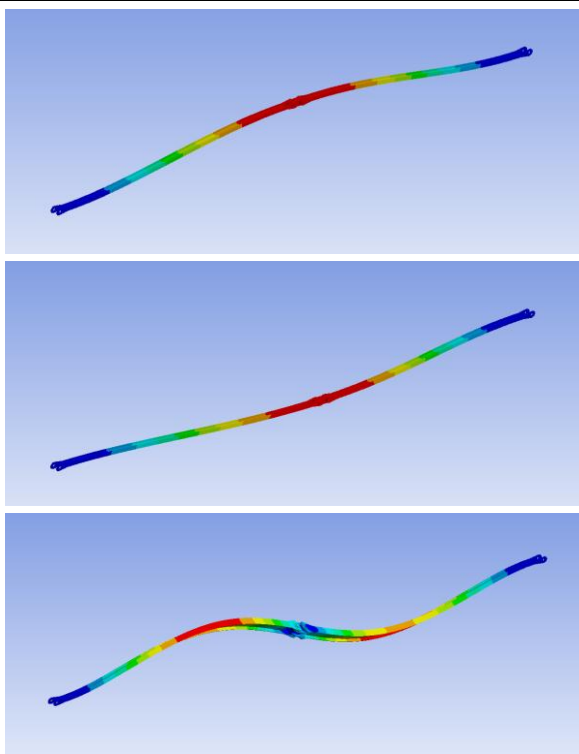


图5 前拉杆1阶振型图(1800倍缩放)

5 结论

本研究通过系统的理论分析与有限元仿真,对堆取料设备前拉杆的剧烈振动问题进行了深入研究,得出以下结论:

(1) 振动原因明确:前拉杆剧烈振动是回转激励引发的共振现象。结构的二阶固有频率(1.57Hz)恰落入外部激励的敏感频带,而钢结构固有的低阻尼特性无法有效抑制共振响应。

(2) 动态特性清晰:前拉杆的前两阶振型为整体侧向与竖向弯曲,频率密集(1.57Hz与1.67Hz);连接板区域是局部刚度的薄弱环节,易发生扭转振动。

(3) 优化方案有效:提出的以增加拉杆截面高度为核心,辅以连接板强化的优化方案,在仅增重10.35%(0.3t)的情况下,将一阶固有频率提升49.76%至2.146Hz,成功避开主要激励频带,满足安全要求。

(4) 本研究不仅为解决特定工程问题提供了有效方案,也为大型钢结构动态设计与优化积累了有益经验,相关方法可推广至起重机、桥梁吊杆及大型港机等类似结构的抗振设计中。

[参考文献]

- [1]陈亮,邓兆印.斗轮机俯仰运动受力分析与方案优化[J].机械工程师,2014(3):50-51.
- [2]刘星茹,史荣,刘春华.斗轮取料机臂架机构刚柔耦合体的动力学仿真[J].机械设计,2016,33(6):67-71.
- [3]张万山.堆取料机臂架有限元分析[J].煤炭工程,2012(2):171-173.
- [4]刘彦飞.门座起重机大拉杆自重影响分析[J].中国重型装备,2017(4):25-28.
- [5]刘国瑞,肖汉斌.模态研究的数学分析与有限元分析的探讨[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(4):891-894.

作者简介:安福新(1985.6—),男,毕业于北华航天工业学院,所学专业:机械设计制造及其自动化,当前工作单位:华电曹妃甸重工装备有限公司,职务:技术总监,职称级别:高级工程师。