

钻进机械装备结构性能优化与运行稳定性研究

常站军

中石化中原石油工程有限公司钻井二公司 河南 濮阳 457001

摘要: 为破解钻井装备结构应力集中、刚度失配及动态失稳难题,基于结构力学与有限元仿真,构建整机模型,诊断出井架K节点、耳板、轮轴、侧板及主轴等薄弱部位。采用NSGA-II算法多目标优化,结合改型、拓扑重构与阻尼减振,规避共振,提升强度与横向刚度,实现轻量化与稳定性协同。同时提出预测性维护、标准化操作与数字化管理保障体系,为同类装备提供技术参考。

关键词: 井架与底座;天车与游车;顶部驱动装置;结构性能优化;运行稳定性

引言: 井架、底座、天车、游车及顶驱是钻井核心装备,其K型节点应力集中、底座刚度不均、天车轮轴疲劳、游车侧板强度冗余、顶驱传动效率低及润滑泄漏等问题,易致疲劳、振动超标及停机,制约施工质量。本文结合仿真与多目标优化,开展结构性能优化与稳定性提升研究,提出维保操作改进方案,旨在改善力学特性,保障装备高效稳定运行。

1 机械装备结构特性与运行稳定性理论基础

1.1 机械装备核心结构组成与工作原理

(1) 井架作为主要承载结构(K型、A型),承受大钩载荷与风载,K型节点简化为刚性连接,实际应力受销轴状态影响;底座承担井架、钻台设备载荷传递,需满足强度刚度;天车由滑轮组与梁组成,悬挂导向游车;游车由侧板、滑轮、轴及提环组成,悬吊钻柱并辅助事故处理;顶驱集成机电气液,驱动主轴旋转。五大设备协同构成力学骨架。(2) 整机以顶驱或转盘为动力源,经传动调速变矩驱动钻进;载荷沿井架→底座→基础逐级传递,天车与游车通过钢丝绳形成提升闭环,顶驱主轴承受复合交变载荷,各设备反向约束形成闭合力流^[1]。

(3) 关键性能要求:井架一阶固有频率避开工频 $\pm 15\%$,顶驱主轴旋转控制精度 $\leq 1^\circ$,底座最大位移 $\leq 10\text{mm}$,同时满足刚度、强度、疲劳及振动稳定性,保证长期可靠运行。

1.2 结构性能优化基础理论

(1) 拓扑优化在给定设计域内寻求材料最优分布以提升刚度或降低质量;尺寸优化调整板厚、截面参数等尺寸变量;形状优化改变边界轮廓,三者分属概念设计、详细设计与局部修型阶段,适用不同设计精度需求。井架优化中梁截面翼缘厚度对性能影响最大,多目标优化可使最大应力、应变与质量分别降低17.4%、16.8%和14.1%。(2) 多目标优化算法包括加权求和法、

NSGA-II、MOEA-D等,其中NSGA-II适用于非凸Pareto前沿问题,实际场景需结合计算成本与收敛性选择。

(3) 轻量化、高刚度与高强度协同优化需遵循等强度设计、传力路径最短、截面抗弯/抗扭效率最大等准则,并引入多材料匹配策略实现综合性能最优。

1.3 装备运行稳定性分析理论

(1) 静力学稳定性以屈曲载荷因子、安全系数、变形协调条件为评价指标,确保结构在极限静载下不失稳。(2) 动力学稳定性涉及特征值分析(固有频率、阻尼比)、幅频响应特性及Nyquist判据,振动抑制通过动力吸振、隔振设计实现;共振规避要求激励频率与固有频率间隔大于工程允许裕度。(3) 复杂工况下失稳机理包括变载荷引起的参数激励失稳、风载导致的涡激振动、钢丝绳与滑轮接触疲劳引发的冲击失稳及摩擦自激振动等,需结合工况谱进行失稳边界辨识。

1.4 有限元仿真分析理论与方法

(1) 建模基本准则为“物理简化、几何保形、连接等效”,井架K型节点采用多尺度模拟方法以反映真实应力梯度,螺栓/销轴连接以弹簧-阻尼单元等效,底座与基础的接触关系准确设置。(2) 静力学分析设置材料本构、载荷步及固定/位移边界;动力学分析设置阻尼比、激励频率范围及模态参与因子,边界条件应准确反映实际装配与工况约束。(3) 精度验证采用网格收敛性分析(加密3次以上结果变化 $< 5\%$)、与理论解或试验数据对比(误差 $< 10\%$),以及能量误差范数评估,确保仿真结果可信。

2 钻井装备结构性能与运行稳定性仿真分析

2.1 装备三维模型构建与有限元模型建立

(1) 基于额定工况与装配图纸,利用SolidWorks建立整机三维模型,包含K型井架、底座、天车、游车、顶驱及提升系统,精确构建K型节点、销轴连接、滑

轮-钢丝绳接触等传力特征,忽略非承载细节,保证几何保真度。(2)采用HyperMesh网格离散,井架K型节点与底座连接耳板等承载区以六面体主导并局部加密,过渡区用四面体二次单元;质量检测标准:偏斜度 ≤ 0.8 、长宽比 ≤ 6 、雅可比 ≥ 0.5 ;对直径 $< 5\text{mm}$ 的油孔、退刀槽等非关键特征合并或删除,平衡精度与效率^[2]。(3)材料参数:井架构件为Q345($E = 206\text{GPa}$, $\sigma_s = 345\text{MPa}$),底座为Q345,天车轮轴为40Cr($E = 206\text{GPa}$, $\sigma_s = 785\text{MPa}$),游车侧板为40Cr,顶驱主轴为合金钢;载荷:最大静荷载 4500kN 、额定钻压 120kN 、扭矩 $18\text{kN}\cdot\text{m}$;约束底座底面全部自由度,井架与底座连接处设固定约束,天车与井架顶部刚性连接。

2.2 装备结构静力学性能分析

(1)额定工况下静力学求解获得整体Mises应力分布,最大应力集中于井架K型节点销轴连接处(峰值约 265MPa)及底座连接耳板(约 210MPa),游车侧板与滑轮轴配合处应力集中明显(约 195MPa),顶驱主轴台阶处应力梯度较大,机架主梁应力水平较低且分布均匀,表明材料利用不均。(2)变形量提取显示井架顶部最大位移 9.8mm 、底座最大位移 4.2mm ,整机轴向刚度达标,但井架横向刚度偏低,可能影响井口对中精度与钻井直线度。(3)强度冗余分析表明井架K型节点安全系数 1.58 (目标 ≥ 1.8)、顶驱主轴安全系数仅 1.32 ,为最薄弱环节;底座连接耳板安全系数 1.85 ,天车轮轴安全系数 2.1 ,虽满足要求但仍有均衡空间。

2.3 装备运行动力学稳定性分析

(1)采用BlockLanczos法提取前六阶模态,井架一阶固有频率 1.8Hz (整机纵向俯仰)、二阶 2.5Hz (横向摆动)、三阶 4.2Hz (井架局部弯曲),天车-游车提升系统局部模态频率 1218Hz ,各阶振型特征清晰,为共振规避提供基础数据。(2)施加交变荷载(均值 4500kN 、幅值 $\pm 800\text{kN}$ 、扫频 0.510Hz)进行谐响应分析,在 1.8Hz 附近井架顶部横向振动位移幅值达 12.5mm 、加速度 0.8g ,动力放大系数 4.8 倍;顶驱主轴在 1520Hz 频带内出现扭振响应峰值,超出许用稳定阈值^[3]。(3)转盘工作频率 1.5Hz 与井架一阶固有频率 1.8Hz 频率比仅 0.83 ,落入严重共振区;风载激励频率(0.53Hz)覆盖井架多阶模态,增加多模态耦合风险;失稳诱因包括钩载脉动、风载涡激振动及钢丝绳-滑轮接触疲劳,需综合辨识主次因素。

2.4 装备性能现存问题总结与优化方向确定

(1)强度缺陷:井架K型节点销轴连接处应力集中导致安全余量不足,顶驱主轴台阶处疲劳开裂风险突出,游车侧板局部强度接近极限;刚度缺陷:井架横向刚度

偏低影响井口对中精度,底座刚度分布不均导致局部变形超差。(2)振动稳定性问题:井架一阶固有频率与转盘工作频率严重耦合引发共振;宽频激励下多阶模态易被激发,天车-游车提升系统的钢丝绳弹性振动进一步恶化运行平稳性,系统抗干扰能力不足。(3)优化方向:①对井架K型节点进行多尺度精细化设计,增大销轴直径并优化节点构造;②对顶驱采用直驱技术替代传统减速箱传动,取消二级齿轮传动结构;③对底座进行拓扑优化实现材料重分布,目标减重 10% 同时提升整体刚度;④对天车轮轴采用MC尼龙滑轮轻量化替代,对游车侧板进行结构改进取消冗余构件;⑤增设粘弹性阻尼器与调谐质量阻尼器,有效抑制宽频振动。

3 钻井装备结构性能优化、维保提升与操作使用优化研究

3.1 结构优化设计方案构建

(1)确定设计变量为井架构件截面尺寸、底座板厚、顶驱电机参数及天车轮轴结构参数;约束条件包括最大应力 $\leq$ 屈服强度/安全系数、一阶固有频率避开工作频率 $\pm 20\%$ 、总质量不增;目标函数为整机质量最小化、最大应力最小化及横向刚度最大化,构建多目标优化数学表达式: $\min F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), -f_3(\mathbf{x})]^T$, $\mathbf{x} \in \Omega$ 。(2)基于加权求和法与Pareto前沿分析相结合构建多目标协同优化模型,采用层次分析法确定权重系数(质量 0.3 、应力 0.4 、刚度 0.3),引入惩罚函数处理固有频率禁区约束,建立响应面近似模型替代高成本有限元计算^[4]。(3)优化算法选用第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II),交叉概率 0.85 、变异概率 0.02 、种群规模 120 、最大迭代代数 300 ,经试算验证收敛稳定性良好,Pareto前沿分布均匀。

3.2 关键结构多维度优化设计

(1)井架优化:对K型节点采用多尺度模拟方法进行精细化设计,增大销轴直径并优化节点连接构造,按等强度原则确定各截面几何尺寸;底座进行拓扑优化,以应变能最小为目标、体积分数 ≤ 0.92 为约束,重构获得X型斜撑与变截面主梁的轻量化构型。(2)顶驱优化:采用变频电机直接驱动主轴的直驱顶驱技术,取消减速箱及其二级齿轮传动结构,电机与主轴融合;采用双电机冗余设计和新型单级减速传动结构,有效降低长周期作业过程中电机失效导致的停机概率。(3)天车与游车优化:天车轮采用MC尼龙滑轮替代传统铸钢滑轮实现轻量化;游车侧板组结构件进行改进,取消冗余构件;天车与游车之间采用新型连接结构,显著降低安装高度尺寸;增设环形粘弹性阻尼器与调谐质量阻尼器,改善宽

频振动衰减特性。

3.3 优化后装备性能仿真验证分析

(1) 优化后静力学重分析显示: 井架K型节点最大应力由265MPa降至195MPa, 底座连接耳板应力由210MPa降至168MPa, 顶驱主轴应力由240MPa降至175MPa; 整机最大位移由9.8mm降至7.2mm; 各项指标均满足设计目标。(2) 优化后模态分析表明井架一阶固有频率由1.8Hz偏移至2.4Hz, 与转盘工作频率1.5Hz频率比增至1.6, 成功脱离共振危险区; 谐响应分析显示在1.8Hz处井架顶部振幅由12.5mm大幅降至4.2mm, 加速度响应由0.8g降至0.25g, 动力放大系数由4.8倍降至1.6倍。(3) 轻量化效果方面, 拓扑优化使井架与底座总质量减轻约8.5% (由42t减至38.4t), 直驱顶驱高度降低约1m, 零部件数量显著减少; 实现了“减重-增强-抑振”三重目标的有效统一。

3.4 维保提升与操作使用优化方案

(1) 建立预测性维护体系: 依托EISC平台建立设备信息系统, 收集统计关键设备易损件的寿命数据; 采用状态监测模型、故障预测模型与实时运行状态数据进行交互, 实现井架载荷监测、顶驱振动监测及天车-游车提升系统运行监测; 实践表明设备故障率可下降80%, 非计划停机检修率为0。(2) 推行清单化与标准化维保管理: 以《模块钻机维保管理指南》为基准, 梳理形成《钻机检验检测清单》、《关键设备大修清单》、《设备工机具共享清单》“三个清单”; 对井架定期检查构件变形、焊缝开裂及连接件状态, 主体结构采用热浸锌工艺处理; 对天车定期检查护罩齐全完好与固定牢靠, 天车架出现裂纹或变形较大时应及时更换; 对游车、大钩、水龙头等提升设备按照GB/T 19832标准进行检验、维护、修理和改造; 推行“日常保养+专项检查”双轮驱

动模式与“干净、润滑、紧固、调整、防腐”十字作业法^[5]。(3) 优化操作使用发挥设备最大性能: 编制涵盖钻机动力系统、提升系统、旋转系统等核心设备的操作规范“明白纸”; 围绕“降本增效、精准运维”目标, 构建“升井核验—拆解检测—精准维修—整机调试—建立档案”五大核心环节的全闭环管理; 加强操作人员规范意识培训与考核, 将技能培训穿透到基层末梢; 通过调整转速、压力、扭矩等运行参数, 使设备始终处于最佳运行状态, 有效发挥设备最大性能与价值。

结束语

本文完成钻井装备井架、底座、天车、游车及顶驱的结构缺陷与失稳机理分析, 通过K型节点细化、底座拓扑重构、顶驱直驱化、天车轻量化及游车改进, 配合减振改造, 解决共振、应力集中与刚度不足问题; 建立预测性维护、清单化维保与标准化操作保障体系, 显著提升承载性能、动态稳定性与服役寿命。形成的“仿真诊断—多目标优化—验证迭代—维保操作一体化”技术路径, 可为同类重型装备升级与全生命周期管理提供借鉴。

参考文献

- [1] 杨绍亮. 钻井机械配套装置结构设计及强度研究[J]. 科海故事博览, 2026, 24(13): 109-111.
- [2] 王浩, 张建军. 凿岩钻机臂架结构动态特性优化与稳定性分析[J]. 机械设计与制造, 2023, 37(8): 291-294.
- [3] 刘鑫, 赵阳. 复杂地层钻进设备振动特性及结构优化改进[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2023, 50(9): 78-83.
- [4] 陈曦, 李晨光. 钻机回转系统结构优化与运行稳定性控制技术[J]. 煤矿机械, 2022, 43(11): 162-164.
- [5] 张博文. 岩土钻进机械关键部件疲劳特性与结构优化设计[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 956-961.