

# 修井机井架轻量化研究发展综述

冯云<sup>1,2</sup>, 张红<sup>1,2\*</sup>, 潘勇博<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

<sup>2</sup>湖北省油气钻完井工具工程技术研究中心, 湖北 荆州

收稿日期: 2022年8月19日; 录用日期: 2022年9月21日; 发布日期: 2022年9月28日

## 摘要

井架作为修井机关键构建对其性能起决定性作用, 井架在使用过程中受各种因素影响会发生损坏, 损坏程度是快速的。当前国内修井机行业相对成熟, 企业对修井机的研发重点主要考虑结构轻量化和工作稳定性。修井机井架轻量化研究主要分为三个阶段, 第一阶段通过修改井架材料和梁单元截面进行有限元分析, 比较不同截面选型对应井架的应力大小, 得出应力最小结构最稳定的井架设计方案; 第二阶段是利用有限元分析得到井架结构应力和变形, 通过改善井架内部应力传递实现降低井架危险截面处的应力大小, 继而井架重新设计降低其重量; 第三阶段是在有限元分析的结果上利用拓扑优化等优化算法对井架的结构进行优化, 去除冗余部位, 在保证结构可靠前提下实现井架的轻量化研究。未来井架的轻量化研究可以将结构稳定和质量最少相统一实现多优化目标研究, 同时井架的轻量化研究还可以推广到其它大型空间桁架的研究过程中。

## 关键词

修井机井架, 轻量化, 有限元分析, 截面选型, 拓扑优化, 遗传算法

# Light Weighting Research Development Review of Work-Over Derrick

Yun Feng<sup>1,2</sup>, Hong Zhang<sup>1,2\*</sup>, Yongbo Pan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

<sup>2</sup>Hubei Engineering Research Center for Oil & Gas Drilling and Completion Tools, Jingzhou Hubei

Received: Aug. 19<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The derrick as the key construction of the well repair machine plays a decisive role in its perfor-

\*通讯作者。

mance. The derrick will be damaged by various factors in the process of use, and the degree of damage is rapid. The current well repair machine industry is relatively mature. Companies focus on the research and development of well repair machines mainly considering the structure of lightweight and work stability. The first stage is to carry out finite element analysis by modifying the derrick material and beam unit cross-section to compare the stress magnitude of the derrick corresponding to different cross-section selections and arrive at the derrick design scheme with the lowest stress and the most stable structure. The second stage is to obtain the structural stress and deformation of the derrick using finite element analysis, and to reduce the stress magnitude at the dangerous cross section of the derrick by improving the internal stress transfer, and then redesign the derrick to reduce its weight. The third stage is to optimize the structure of the derrick by using optimization algorithms such as topology optimization based on the results of finite element analysis to remove redundant parts and achieve the lightweight study of the derrick while ensuring the reliability of the structure. The future research of light weight of derrick can unify structural stability and mass minimization to achieve multi-optimization objectives, and the research of light weight of derrick can also be extended to the research process of other large space trusses.

## Keywords

Work-Over Rig Derrick, Lightweight, Finite Element Analysis, Cross-Sectional Selection, Topology Optimization, Genetic Algorithm

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 研究背景与意义

修井设备主要作用是完成修井作业，在海洋油田日常修井作业中，修井机起到举足轻重的作用，是起下管柱、更换井下工具和处理井下各类旋转作业的核心装备，也是修井作业中最基本和最主要的动力来源。在修井作业过程中，随着修井设备使用次数和时间的增长，会加速设备的老化，增加作业过程中潜在的安全隐患；通过调查研究发现，增产和修井作业次数在我国已达每年十余万次[1] [2] [3] [4]。所以需要全面衡量在修井过程中设备的安全可靠性和环境适应性，因此众多高校和科研单位纷纷开展提升修井机结构强度方面的研究工作。

当前许多修井机井架在使用的过程中都暴露出一系列弊端，主要表现为井架出现共振，局部刚度较弱、无法有效的抵抗风载荷、将动载荷简单考虑为一个安全系数等问题。同时井架在使用过程中经常受到各种因素影响发生破坏，且损坏程度将迅速扩大。随着修井机工作量时长不断增加，井架承载的重量急剧增加，同时高度和尺寸也相应增大，在现场作业中经常因为重量过大和结构不稳定对工作人员造成伤害，所以井架的安全问题必须引起人们高度重视，以免造成人身安全及财产损失等[5] [6] [7]。伴随国内外各种 CAE 工业软件的快速发展，修井机受各种载荷和振动作用的工况下的应力和位移分析越来越简便，这使得修井机的发展变得更具先进性，为使修井机在起下油管或者更换井下工具时能更好发挥其作用，修井机需要拥有更快的起下速度及更好的移动性能，修井机产品从设计开发到加工技术手段及工艺质量等方面进行优化设计。

## 2. 以材料和截面选型为主的井架轻量化研究

上世纪 70 年代起，随着 ANSYS、Pro/E、ABAQUS 等有限元结构分析软件的兴起和发展，使得井架

的分析计算变得简单而精确,有限元分析技术对修井机发展起到至关重要的作用,国内主要修井机生产制造厂家通过材料力学和有限元软件对井架进行分析,大幅缩短井架从样机到产品定型生产的时间,实现结构的改进和优化[8]。研究人员发现井架的载荷均值服从正态分布,且幅值遵循威布尔分布的原理,基于此对井架展开可靠性分析[9]。国内对于井架的轻量化研究早期是利用材料力学公式和有限元分析软件,以井架的截面、型式、材料等为设计变量,井架所受刚度和强度大小作为结构优化的判断标准展开研究。

武吉有等[10]以 JJ160/41-K 型井架进行了优化研究,运用材料力学的方法对井架不同材料、截面及结构进行了稳定性分析,以井架总体刚度和强度大小作为判断准则,得出抗扭能力和稳定性及承载能力更强的井架结构。在实际工作中,井架会受到风载、钩载、自重等影响,武的方法未考虑到井架实际工况下所受载荷,仅从材料方面进行判断是不够全面的,运用有限元软件可以很好的模拟在不同工况组合下的井架所受应力和位移。何霞等[11]在此基础上针对海洋修井机所处作业环境进行优化研究,利用有限元软件对井架进行实体建模,对井架最大钩载工况下所受应力进行研究,得到井架应力的分布规律和薄弱环节。并根据井架应力分布,降低应力较小处的截面尺寸;在应力较大的地方增加角钢提升局部强度的方法对井架进行优化,在保证结构可靠性的基础上有效降低井架重量。相较于根据井架应力大小降低井架截面尺寸的优化研究不同,邹龙庆、任国友等[12][13]利用有限元软件对 JJ160/41-K 型井架进行分析,根据井架受力特点将拉格朗日函数求解极值的方法带入到井架箱形截面优化设计求数值解和分析解的过程中,以井架可靠性工作的前提下,以最小截面面积为优化目标建立优化函数,得到截面尺寸参数优化值的关系。刘瑞华等[14]则利用分析文件构造循环文件建立井架模型进行结构分析,以井架的结构尺寸和构件截面尺寸为设计变量,以应力和位移作为设计优化目标建立目标函数进行优化。管锋[15]等利用 ANSYS 软件采用 Beam188 梁单元和 Shell63 壳单元建立底座的三维模型,按照最大钩载工况进行有限元分析,以上、下翼板厚度、腹板厚度、工字梁截面宽度和截面高度作为设计变量,以工字梁截面积作为目标函数,以强度作为约束条件利用 Matlab 软件进行迭代计算得到新的梁截面尺寸。蒋发光等[16]参照 API Spec 2C-2004 标准采用有限元法对海洋钻机平台双井架进行建模,以危险组合工况下杆件的质量、应力、位移变化和不同高度段的应力差异程度为优化目标,对比杆件截面的腹板厚度、宽度和高度之间单因素对井架的应力、位移变化影响,考虑各因素之间的交互响应,建立井架的数学模型,进行响应曲面多目标优化,获得了最优截面参数组合。庞士强等[17]在此基础上建立完整的双井口井架模型,利用专业有限元分析软件对井架的正常作业工况、自存工况和拖航工况进行了模态分析,提出设计时应改进井架前、后片架和天车滑轮起重架处杆件的截面属性。

利用更改井架截面的方式对井架进行优化研究,可有效降低井架的重量避免材料浪费,但并不能降低井架内部所受应力和位移。

### 3. 以改善结构内部应力传递为主的井架轻量化研究

随着现场作业需求日益增加,单纯依靠对井架梁单元截面、材料和结构尺寸修改进行优化研究是不能从根本提升井架的性能,并且依靠静力学结果作为判断井架结构是否可靠是不够全面的。由于有限元软件的发展进步,研究学者利用有限元软件分析得到不同工况下井架在静力学和动力学下所受应力应变及振动,通过改变井架结构来降低井架的整体重量,而改进结构的关键在于改善结构内部各杆件之间的内力传递关系,更改拓扑结构比单纯增大杆件的截面尺寸对减小应力集中更有效。

杨晓红等[18]将井架计算模型简化为空间梁单元和柔索单元,以井架杆件自然焊接点作为有限元分析的计算节点,大腿支脚为固定铰支点,绷绳锚点处为固定支点大腿与井架连接处为铰接,背拉杆为二力杆,剩余均为刚性节点,并对输出节点位移和梁单元的应力应变进行拓扑优化得到了一种新型结构,改

进后的井架结构间应力分布趋于均匀,有效改善了井架结构内部各杆件之间的内力传递关系,最后利用屈曲分析对新结构进行稳定性分析。周传喜等[19]在此基础上对某海洋修井机的井架在多种载荷和工况组合分析,采用 Beam4 梁单元建立井架三维模型,得到了不同状态下井架的位移及应力分布。但考虑极端工况下强度不够和经济性,利用改变杆件拓扑结构改善杆件间内力传递大小不太符合实际需求,在对原井架结构尽量不作大改动的前提下,在井架最上一格增加 3 个横撑,可有效减小井架内部应力集中现象,从而提升井架的性能。

通过改善结构井架结构内部间的应力传递关系能有效降低井架的应力大小使井架的重量明显降低,但会花费大量的时间考虑和试算,急需一种能够快速确定井架结构的方法。

#### 4. 基于优化算法的井架轻量化研究

随着有限元分析软件与数值分析软件发展日益成熟,二者间的连接变得更为紧密。当前井架的设计多以按工作状态下不发生破坏作为设计标准,改善井架内部应力传递关系的方法还是会造成一些材料未被充分利用,造成经济上的浪费。井架进行轻量化研究时可以参考其它类似复杂的大型空间桁架结构的优化方法,Zeng Fuming [20]提出桁架结构轻量化设计的实现通常经历拓扑优化、尺寸优化和复合材料优化 3 个过程。在每个优化过程中,都会选择合适的算法,如最优性准则法、数学规划法以及模拟自然界中生长和演化过程的智能算法。并根据实际流程将算法结合工程实践和商业软件,对航天器桁架结构轻量化设计的实施进行了总结。其中拓扑优化是结构优化设计中最具有潜力的研究领域,井架的拓扑优化最早可以追溯到 1854 年,Maxwell [21]首次提出基于应力约束的最小桁架重量的基本拓扑分析,迄今为止已有一百多年的历史,特别是过去的十几年中,桁架拓扑优化的算法理论得到了长足发展。在井架安全的前提下以井架的重量最小为优化目标,以结构的截面尺寸和拓扑逻辑值为设计变量对井架进行拓扑优化。井架的拓扑优化问题可转化为离散变量拓扑优化问题,选择合适的优化算法对于解决该类问题至关重要。

遗传算法是一种求解离散变量优化问题的优化算法,其原理是基于达尔文的生物进化论和孟德尔遗传学机理,通过模拟生物遗传和进化过程来搜索最优解,该方法在求解不连接和不可微的优化问题中表现良好。Kalyanmoy Deb 等[22]以遗传算法对桁架结构进行拓扑优化,以桁架结构的重量为优化目标,尺寸和布局作为优化变量,通过桁架结构所受应力进行判断。Omer Kelesoglu [23]则基于遗传算法建立一种通用数学模型,该模型以动力响应作为优化的约束条件,有效解决桁架结构在多目标拓扑优化问题。Golubev E 等[24]针对大型空间桁架结构的轻量化节点部件进行建模,以各桁架杆件截面尺寸为优化变量,以结构变形最大为约束,以整体模型体积最小为优化目标,采用遗传算法求得新的结构尺寸。彭垒[25]基于遗传算法利用 ANSYS 和 Matlab 分析软件对井架进行拓扑优化,使用 Matlab 建立井架有限元分析程序,以极端工况下的静力学分析结果作为拓扑优化约束条件;同时利用 Newmark 法求解井架运动方程,得到动力学下的井架应力应变作为约束条件对井架进行拓扑优化,比分析静力学和动力学对井架拓扑优化的影响,在不对井架大改设计的基础上,通过整数与逻辑值组合编码、遗传算法与井架有限元分析程序结合,实现井架的拓扑优化。

渐进结构优化法是一种求解离散型变量的优化算法,最早由谢亿民等[26]于 1992 年提出,解决静态、动态、稳定性的尺寸、形状、拓扑优化问题,其原理是建立标准,将结构中低效杆件逐步删除,留下部位接近于最优结构。施加所有潜在杆件形成井架的基结构,施加相关的载荷和约束条件,对井架进行静力学和动力学分析,引入灵敏度计算删除低能杆件,进行循环迭代,直到达到最优结构停止。黄冀卓等[27]针对钢框架结构的拓扑优化,运用渐进结构优化算法,通过引入拓扑变量,修改无效杆件的弹性模量,提出了一种在多载荷工况下能考虑应力、稳定性和位移等离散型结构的统一数学模型,将其带入 9 杆桁

架结构进行计算,发现该模型能够很好实现桁架结构的拓扑优化。刘威等[28]在此基础上为了减小独立轮轴桥的质量,基于变密度法对轮轴桥进行拓扑优化。以单元相对密度为设计变量、结构体积为约束条件、刚度为目标函数,结合 13 个载荷工况进行拓扑优化,完成后利用 Solidworks 软件将优化结果中的中空壳结构材料向分型面填补进行后处理完成整体轻量化研究。

## 5. 井架轻量化研究展望

通过研究发现,目前国内对修井机井架的研究侧重在刚度、强度、稳定性方面这几方面之一,将提高修井机井架结构稳定性与减轻重量相结合利用现有优化算法对井架进行轻量化涉及较少,研究所使用有限元模型选取节点为刚性节点,与实际情况可能有所出入,可以进一步对此研究;修井机进行轻量化拓扑优化研究时,可基于井架静力学和动力学分析结果,并在不对井架整体结构更改的基础上考虑井架形状上的优化;利用离散型优化算法进行优化时,需要考虑井架每一根杆件的作用,不能简单的以 0 和 1 删除低能杆件,同时可以对比不同优化算法所得结构所受应力和重量;最后提出具有广泛适用性的井架离散型结构拓扑优化问题数学模型,可对含有同类结构轻量化分析的其它工程装备领域也具有广泛应用前景。

## 基金项目

国家采油装备工程技术研究中心开放基金资助项目抽油机井杆管偏磨系统动力学行为研究(编号:ZBKJ2021-A-02)。

## 参考文献

- [1] Guan, F., Duan, M.L., Zhou, C.X. and Wu, W.X. (2010) Assessment of Actual Bearing Capacity of Offshore Drilling and Workover Rig Derrick. *20th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2010)*, Vol. 6, Beijing, 20-25 June 2010, 632-638.
- [2] 冯定, 杨志远, 柳进, 等. 液压修井机现状与发展趋势[J]. 石油机械, 2010, 38(1): 69-72.
- [3] Yan, T. and Han, C.J. (2010) Research on the Vibration of Drilling Derrick. *2010 International Conference on Manufacturing Engineering and Automation (ICMEA 2010)*, Vol. 139-141, Hong Kong, 13-15 December 2010, 2368-2371. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.139-141.2368>
- [4] 马俊生, 颜廷俊, 戴志刚, 等. 新型车载式作业井架静态应力测试与分析[J]. 石油矿场机械, 2004, 33(3): 49-50.
- [5] 魏文科, 宋宏宇, 武秋冬. 步进式自平衡井架电动修井机研究与应用[J]. 石油机械, 2020, 48(9): 31-36+42.
- [6] 高胜, 庞伶俐, 常玉连, 等. 修井井口机械自动化技术现状分析与展望[J]. 石油机械, 2012, 40(2): 80-85.
- [7] Liu, F. and Dong, D.B. (2018) Research on Hydraulic Control System of the Hydraulic Tong for Automatic Workover Rig. *Mechanical Engineering and Technology*, 7, 316-327. (In Chinese) <https://doi.org/10.12677/MET.2018.75039>
- [8] 倪栋, 段进, 徐久成. 通用有限元分析 ANSYS7.0 实例精解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 181-186.
- [9] 博弈创作室. ANSYS 经典产品基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [10] 武吉有, 焦洪柱, 鲍有光. JJ160/41-K 型井架结构优化及稳定性分析[J]. 钻采工艺, 2000, 23(2): 54-56.
- [11] 何霞, 刘清友, 金迅, 欧阳隆绪. HYX90 海洋修井机井架力学分析[J]. 天然气工业, 2004, 24(2): 59-60.
- [12] 邹龙庆, 付海龙, 任国友. JJ160/41-K 型井架有限元分析与承载能力研究[J]. 石油矿场机械, 2004(6): 33-35.
- [13] 任国友, 邹龙庆, 付海龙, 冷建成, 刘贵海. K 型钻机井架大腿箱形截面的一种简便优化方法[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(5): 46-48.
- [14] 刘瑞华, 王渤, 耿会英. JJ170/42-K 型井架的设计优化[J]. 石油机械, 2005, 33(11): 18-20.
- [15] 管锋, 黄丽红, 郑立伟, 余庆林, 李鹏, 李君. 海洋修井机底座有限元分析及优化设计[J]. 石油机械, 2009, 37(9): 38-41.

- [16] 蒋发光, 张敏, 杨秀菊, 梁政. 第七代超深水海洋平台钻机双井架的等强度多目标优化[J]. 天然气工业, 2020, 40(12): 124-132.
- [17] 庞世强, 师涛, 成斌, 向小荣. 海洋 15000 m 双井口井架设计及结构分析[J]. 石油机械, 2019, 47(9): 77-83.
- [18] 杨晓红, 张邦成, 陈兆峰. 油田修井机井架的力学分析与优化设计[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 488-492.
- [19] 周传喜, 张延水, 南丽华. 海洋修井机井架有限元分析及结构优化[J]. 石油机械, 2008, 36(9): 54-57.
- [20] Zeng, F.M., Yang, J.Z. and Wang, J. (2015) Study on Light Weight Design of Truss Structures of Spacecrafts. *19th National Symposium on Remote Sensing of China*, Vol. 9669, Xi'an, 20-23 October 2014, Article ID: 966902. <https://doi.org/10.1117/12.2204744>
- [21] Prgaer, W. (1974) A Note on Discredited Michell Structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **3**, 349-351. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90019-X)
- [22] Deb, K. and Gulati, S. (2001) Design of Truss-Structures for Minimum Weight Using Genetic Algorithms. *Finite Elements in Analysis and Design*, **37**, 447-465. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(00\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00057-3)
- [23] Kelesoglu, O. (2007) Fuzzy Multiobjective Optimization of Truss-Structures Using Genetic Algorithm. *Advances in Engineering Software*, **38**, 717-721. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2007.03.003>
- [24] Golubev, E., Arkhipov, M., Galinovsky, A. and Klem, A. (2021) Lightweight Nodal Parts for Large Space Truss Structures Enabled by SLM: Modelling, Manufacturing, and Testing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1060**, Article ID: 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1060/1/012010>
- [25] 彭垒. 基于有限元分析的井架拓扑优化设计[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2016.
- [26] Xie, Y.M. and Steven, G.P. (1992) Shape and Layout Optimization via an Evolutionary Procedure. *Proceedings of International Conference on Computational Engineering Science*, Hong Kong, December 1992, 471.
- [27] 黄冀卓, 王湛. 基于遗传算法的离散型结构拓扑优化设计[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 32-38.
- [28] 刘威, 兰少明, 黄坤兰, 刘强. 基于拓扑优化的轻轨独立轮轴桥轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2020(12): 198-200+204.