◀钻井技术与装备▶

千吨重载超高井架底座设计关键技术研究

侯 敏 周天明 陈德刚 赵炳鹏 王文超
（宝鸡石油机械有限责任公司；国家油气钻井装备工程技术研究中心；油气钻采输送装备全国重点实验室）

侯敏，周天明，陈德刚，等. 千吨重载超高井架底座设计关键技术研究［J］. 石油机械，2025，53（10）：103-108.

Hou Min，Zhou Tianming，Chen Degang，et al. Key technologies for the design of kilo-ton heavy-duty ultra-high derrick substructure［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：103-108.

摘要：针对万米级深井勘探开发的需要，开展了千吨重载超高井架底座设计关键技术研究，在分析重载超高井架底座功能需求和需要解决的关键技术问题的基础上，确定了重载超高井架底座的主要技术参数和结构方案。井架采用前开口“K”形结构，有效高度61 m，最大额定静钩载11 250 kN，利用钢丝绳进行整体旋转起升；底座分为前后台，前台为平行四边形结构，钻台面高15 m，钻台上设备可在底座位于低位时进行安装，利用液压缸整体旋转起升到工作位置，后台用于安放绞车等设备。系统总结了重载超高井架底座设计的关键技术，包括井架底座起升系统设计技术、井架底座稳定性分析技术及井架底座结构优化技术。研究成果可为我国万米级钻机配套井架底座的研发提供参考。

关键词：万米级钻机；超高井架底座；千吨重载；前开口；深井钻机
中图分类号：TE922 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202409093

Key Technologies for the Design of Kilo-Ton Heavy-Duty Ultra-High Derrick Substructure

Hou Min Zhou Tianming Chen Degang Zhao Bingpeng Wang Wenchao
（*CNPC Baoji Oilfield Machinery Co. , Ltd.* ; *CNPC National Engineering Research Center for Oil and Gas Drilling Equipment*; *State Key Laboratory of Oil and Gas Drilling*, *Production and Transportation Equipment*）

Abstract: To meet the demands of exploration and development of 10 000-meter ultradeep wells, research on key technologies for the design of kilo-ton heavy-duty ultra-high derrick substructure was conducted. After analyzing the functional requirements and key technical problems to be solved of the heavy-duty ultra-high derrick substructure, the main technical parameters and structural scheme of the heavy-duty ultra-high derrick substructure were determined. The derrick adopts a front-opening K-shaped structure, with an effective height of 61 m and a maximum rated static hook load of 11 250 kN, and the overall rotational hoisting is carried out using wire ropes. The substructure is divided into front and rear floors. The front floor is a parallelogram structure with a height of 15 m, and the equipment on the floor can be installed when the substructure is located at a low position, and then raised to the working position via hydraulic cylinders for overall rotational hoisting. The rear floor is used to place equipment such as drawworks. Moreover, the key technologies for the design of heavy-duty ultra-high derrick substructure were systematically summarized, including the design technology of derrick substructure hoisting system, analysis technology of derrick substructure stability and structural optimization technology of derrick substructure. The research results provide reference for the development of the supporting derrick substructure of 10 000-m drilling rigs in China.

Keywords: 10 000-m drilling rig; ultra-high derrick substructure; kilo-ton heavy-duty; front-opening; deep drilling rig

0　引　言

近些年来，宝鸡石油机械有限责任公司相继成功研制了国内首台陆地 9 000 m 四单根一立柱钻机、全球首台陆地 12 000 m 自动化钻机，掌握了特深井钻机设计制造的核心技术，引领了国内石油钻井装备行业发展，使我国成为陆地石油钻机制造强国。

随着油气资源勘探开发朝着更深地层的迈进，以及自动化、智能化钻井技术和装备的进一步发展，万米级智能钻机的研发被提上日程。国内陆地钻井还未配套过万米级钻井。万米级智能钻井的井架底座能否安全可靠地工作，对整个钻机系统的安全性至关重要。

笔者分析了万米级智能钻机的功能需求、需解决的关键技术问题，开展了万米级智能钻机配套井架底座技术研究，确定了井架底座主要技术参数，给出了结构设计方案，形成了井架底座设计的关键技术，为钻机的成功研制提供了支撑。

1　设计要求

1.1　功能需要

井架、底座主要承载构件满足环境温度为−35～55 ℃的使用要求。井架底座设计应尽量采用高强度钢材优化设计，既保证其有足够的承载能力，又要兼顾经济性的原则[1−3]。

井架底座在满足承载能力的前提下，还需满足以下要求：低位安装整体起升、四单根钻柱排放及作业要求；管柱处理系统安装及离线建立根功能要求；钻机总体布置要求。

1.2　需解决的关键技术问题

1.2.1　井架起升钩载大问题

与 12 000 m 钻机配套的井架相比较，井架名义钻深增加 3 000 m（增幅达 25%），最大钩载达到了 11 250 kN（增幅达 39%），井架标定高度达到了 61 m。这 3 个方面的变化使井架受力的不确定性增加；同时在井架自重增加的基础上，还要携带三单根二层台、四单根三层台、提管机械手导轨及顶驱导轨等设备随井架一起起升，这对井架起升安全性是严峻的考验。开展相关研究解决井架起升携带设备多、重力大、起升钩载超大、起升大绳选型难、起升滑轮布置靠经验等问题，突破重载超高井架设计技术瓶颈。

1.2.2　井架强度及稳定性问题

井架采用整体低位安装整体起升式结构，满足四单根立柱的作业要求，总高度近 80 m，额定钩载达 11 250 kN，具有超高高度、超强承载能力的特点，国内陆地钻机从未配套过，井架能否安全可靠地工作，对整个钻机系统的安全性至关重要。

1.2.3　高性能钢材应用问题

开展高性能钢材在井架、底座等大型结构件制作中的关键工艺技术研究。通过对材料焊接性能的研究，确定适用于大型结构件生产的母材性能、焊接技术、关键制作工艺措施，解决该类材料在大型结构件应用中的生产难题，降低生产难度和制造成本。

2　技术分析

2.1　主要技术参数

2.1.1　井架

最大钩载（满立根、8×9 绳系）：11 250 kN（注：加速度、冲击、排放立根和风载将降低最大钩载）；

井架有效高度：61 m；

结构安全级别：E2/U2；

产品规范等级：PSL1；

井架抗风能力：操作及起升工况 16.5 m/s，非预期风暴工况（无钩载，满立根）30.7 m/s，预期风暴工况（无钩载，无立根）38.6 m/s。

2.1.2　底座

钻台面高度：15 m；

最大额定静钩载：11 250 kN；

最大额定静转盘载荷：11 250 kN。

2.2　结构方案及特点

2.2.1　井架技术描述

井架为前开口“K”形旋升式结构，低位水平安装，通过绞车动力整体起升。

井架前立柱上设有供提管机械手运行的导轨，背横梁上设有供顶驱运行的双导轨，下部连接架采用弓形结构，满足缓冲机械手安装及工作空间

要求。井架上分别设有二层台和三层台，分别满足三单根和四单根作业要求。井架结构方案示意图如图1所示[4-5]。

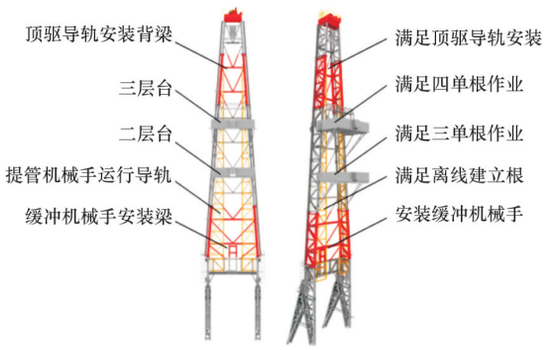


图1　井架结构方案示意图

Fig. 1　Schematic diagram of derrick

井架主体分为7段，各段背横梁及斜拉杆之间通过销轴连接，井架下端支脚通过销轴连接于基座之上。井架人字架为门形框架结构，左右人字架之间设有横梁，人字架支脚位于基座上。

2.2.2　井架结构特点

井架支脚位于基座之上，稳定性好、承载能力强，井架有效高度高、开档尺寸大，满足四单根作业模式及各种自动化设备的安装运行空间要求。

2.2.3　底座技术描述

底座分为前后台结构。前台结构满足动力猫道、转驱、L形机械手、铁钻工的安装及使用要求；后台设有绞车底座和双配重水箱。底座结构方案示意图如图2所示[5]。

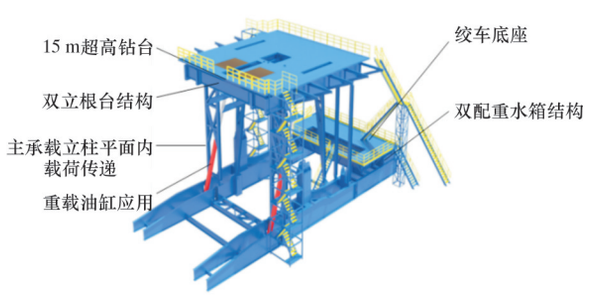


图2　底座结构方案示意图

Fig. 2　Schematic diagram of substructure

底座前台为旋升式结构，转盘、司钻控制房、钻台偏房等钻台设备随同前台底座一起依靠2套液压缸整体起升。

2.2.4　底座结构特点

底座承载能力强，底部空间大，钻台面开阔，满足立根排放、高压防喷器组及各种自动化设备的安装运行空间要求。

3　关键技术

3.1　起升系统设计技术

3.1.1　井架起升系统

井架起升系统主要包括井架、绞车、天车、游车、三角架、人字架、游动系统钢丝绳、起升大绳、高支架等，如图3所示。通过绞车滚筒-钢丝绳-游动系统-导向滑轮组成的滑轮组系统完成井架起升任务。该套井架起升系统与常规井架起升系统相比，在井架起升大耳处增加了导向滑轮，使得起升大绳的拉力成倍增加，可有效减小井架起升钩载。

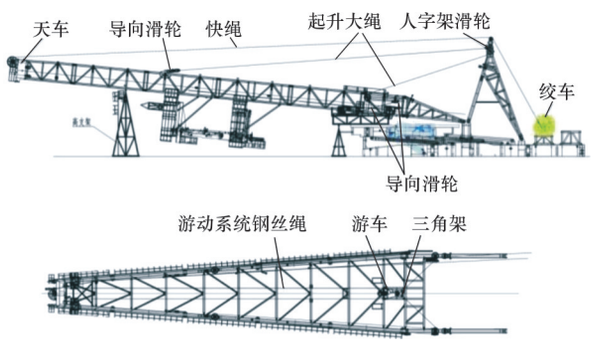


图3　井架起升系统示意图

Fig. 3　Schematic diagram of derrick hoisting system

井架起升过程即为井架在起升大绳、快绳作用下不断克服起升重力矩的过程。通过开展井架起升过程理论研究，梳理起升滑轮布置、起升绳系、起升钩载、起升安全空间等各个要素间的关系（见图4），建立简化起升力学模型。以减小起升钩载和起升大绳载荷为目标，通过调整优化相关参数，可以得到最优的起升滑轮位置、井架结构参数。

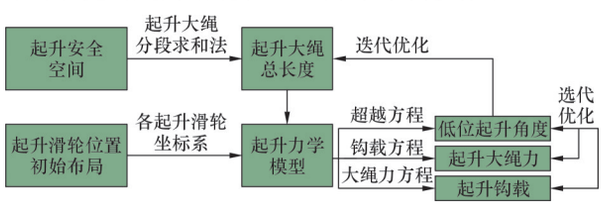


图4　井架起升要素关系示意图

Fig. 4　Relationship among derrick hoisting elements

3.1.2　底座起升系统

底座前台为平行四边形旋升式结构，如图5所示。上座、立根台、转盘梁、后大梁等构成底座上层，前后立柱、斜片架等构成底座中层，前后基座构成底座下层。由于前后立柱及斜片架之间相互平行，底座上下层之间相互平行，它们共同构成平行四边形，起升液压缸一端与上座连接，另一端与基座连接，随着液压缸的伸长，底座上

层将逐渐升高并带动立柱及斜片架发生旋转，最终起升到工作位置，如图6所示。

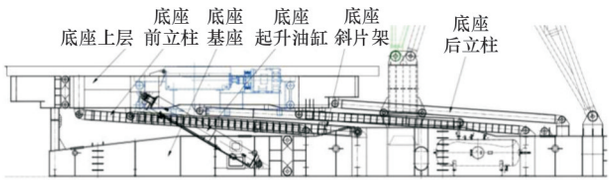


图5　底座起升系统示意图

Fig. 5　Schematic diagram of substructure hoisting system

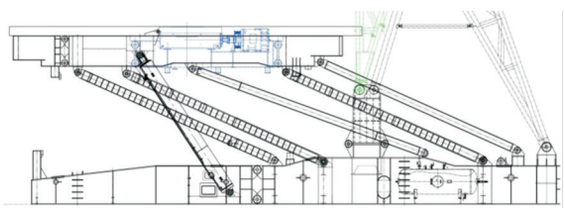


图6　底座起升过程示意图

Fig. 6　Schematic diagram of substructure hoisting process

通过研究底座参与起升重力、底座旋转起升角度、起升液缸伸长量、起升液缸推力之间的关系，推导液压缸的推力公式。模拟多级液压缸起升过程力学变化过程，制定重载多级液压缸最优布局方案，并对重载状态下的液压缸进行稳定性分析，确保底座在起升工况下的安全可控。

3.2　结构稳定性分析技术

3.2.1　井架底座有限元模型建立

根据井架底座受力特点，在SACS有限元分析软件中利用梁单元、杆单元建立井架底座的一体化模型，如图7所示。采用质量单元模拟安装在井架底座上的设备及附件[5-6]。



图7　井架底座有限元模型

Fig. 7　Finite element model of derrick substructure

3.2.2　工况分析

根据API Spec 4F规范[7-8]规定，在使用过程中，该井架底座主要存在以下几种危险工况：①操作工况1a，②操作工况1b，③非预期风暴工况，④预期风暴工况，⑤井架起升工况，⑥底座起升工况。

3.2.3　有限元计算结果

分析结果表明[9]，井架在起升工况下受力最为恶劣，底座（安全级别E2/U2）在预期风暴工况下受力最为恶劣。具体如下：

（1）操作工况1a计算结果。操作工况1a下最大*UC*值为0.968，出现在井架上段前立柱。如图8所示。

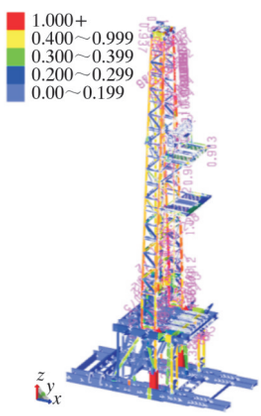


图8　操作工况1a下*UC*值（*UC*≥0.8）

Fig. 8　*UC* value under operating condition 1a（*UC*≥0.8）

（2）操作工况1b计算结果。操作工况1b下最大*UC*值为0.922，出现在前片架。如图9所示。

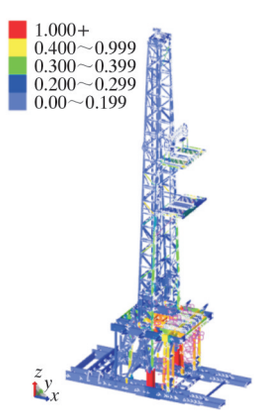


图9　操作工况1b下*UC*值（*UC*≥0.8）

Fig. 9　*UC* value under operating condition 1b（*UC*≥0.8）

（3）非预期风暴计算结果。非预期风暴工况下最大*UC*值为0.889，出现在后连接梁。如图10所示。

（4）预期风暴计算结果。预期风暴工况下最大*UC*值为0.946，出现在前立根台。如图11所示。

（5）井架起升工况计算结果。井架起升工况下最大*UC*值为0.978，出现在人字架前腿。如图12所示。

（6）底座起升工况计算结果。底座起升工况下最大*UC*值为0.93，出现在基座与起升液缸连接的箱型梁上。如图13所示。

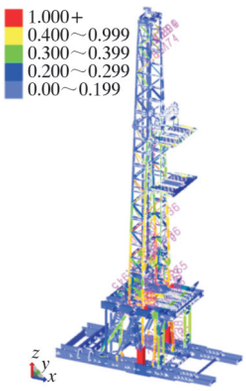


图 10　非预期风暴工况 *UC* 值（*UC*≥0. 8）

Fig. 10　*UC* value under unexpected storm condition（*UC*≥0. 8）

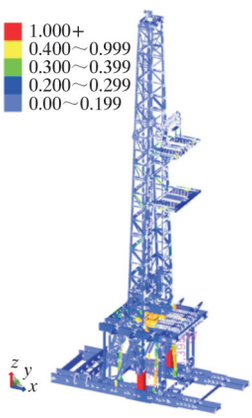


图 11　预期风暴工况 *UC* 值（*UC*≥0. 8）

Fig. 11　*UC* value under expected storm condition（*UC*≥0. 8）

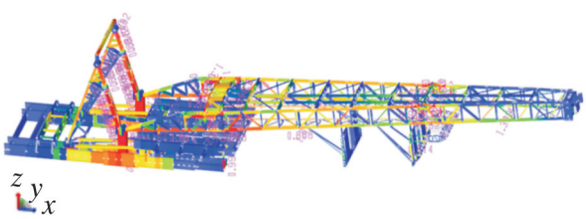


图 12　井架起升工况 *UC* 值（*UC*≥0. 8）

Fig. 12　*UC* value under storm condition（*UC*≥0. 8）

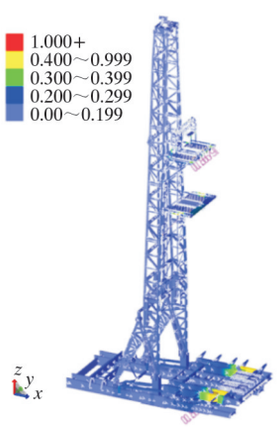


图 13　底座起升工况 *UC* 值（*UC*≥0. 8）

Fig. 13　*UC* value under storm condition（*UC*≥0. 8）

井架底座在上述危险工况下的最大 *UC* 值均小于 AISC（360-16）[8]规定的允许值，因而井架设计满足 API Spec 4F 规范[7]要求。

3.3　结构优化技术

结构优化技术主要包括新材料应用研究和关键部件结构优化两方面。

3.3.1　新材料应用研究

高强钢具有高强度、强韧性和较好的焊接性、成型性、耐腐蚀性等特征。高强钢的应用能够减少整体结构的钢材用量、减轻结构质量，同时提高结构强度储备。因此，通过采用焊前预热或焊后调质处理等方法，优化接头微观组织，控制焊接残余应力，攻关高强度钢材焊接工艺，解决制约应用的核心工艺问题。同时结合井架力学性能分析结果，在天车架、井架人字架及滑轮段立柱、底座转盘梁、立根台大梁等关键受力部件上进行了应用。

铝合金具有质量轻（约为钢制件质量的½）、外观质量好、耐腐蚀等特性。开展铝合金在钻机附件（如笼梯、斜梯、护罩等）上的设计制造工艺及应用研究，进一步减轻产品质量，增强产品性能。如图 14 所示。



图 14　铝合金笼梯

Fig. 14　Aluminum alloy cage ladder

3.3.2　关键部件结构优化

关键部件结构优化主要根据管柱设备尤其是提管机械手的布置设计空间位置，对背横梁、背连接架、人字架等关键部件进行结构优化。将背横梁优化为高翼缘弧形结构。将背连接架优化为异型三立板结构。将单侧人字架优化为双立柱载荷传递结构，改善了结构及焊缝受力，降低了产品设计难度，同等钻机型号下，还减轻了结构质量，增强了结构稳定性。将双耳板对双耳板连接优化为双耳板对三耳板连接，增加了销轴的支撑，减小了单个耳板的受力。

4　结　论

（1）分析了重载超高井架底座设计的要求，确定了井架底座主要技术参数和技术方案，在大

载荷陆地钻机上采用旋升式井架底座结构，满足了低位安装整体起升、四单根钻柱排放及作业、管柱处理系统安装及离线建立根功能以及钻机总体布置要求。

（2）分析了重载超高井架底座起升系统设计技术，通过在井架起升大耳处增设起升滑轮，可有效减小井架起升钩载，解决起升大绳受力过大问题；底座采用液压缸进行起升，可避免常规钢丝起升底座需高空安装起升大绳，费时费力、作业风险大的问题。

（3）分析了重载超高井架底座作业过程中所承受的各种载荷，并确定了危险工况，利用SACS软件对井架底座结构进行了分析及验证。结果表明，井架底座具有质量轻、承载能力大等特点，设计完全满足API Spec 4F规范要求。

（4）分析了重载超高井架底座结构优化技术，通过采用高强度钢材、铝合金等新材料，以及开展结构优化和力学性能分析计算，提升结构的安全可靠性，减轻了结构质量。

参　考　文　献

[1] 侯敏，黄洁，王世军，等. 超深井海洋钻机井架的研制［J］. 石油机械，2014，42（11）：88-92.
HOU M，HUANG J，WANG S J，et al. Development of offshore drilling rig derrick for ultra-deep well［J］. China Petroleum Machinery，2014，42（11）：88-92.

[2] 郑黎明，李彦霖，张洋洋，等. 智能钻机与传统钻机系统组成差异与发展分析［J］. 石油机械，2023，51（11）：41-50.
ZHENG L M，LI Y L，ZHANG Y Y，et al. System composition difference between intelligent and traditional rigs and development analysis of intelligent rig［J］. China Petroleum Machinery，2023，51（11）：41-50.

[3] 周涵锐. 基于API极限工况下钻机结构安全性分析［J］. 石油机械，2023，51（1）：9-17.
ZHOU H R. Structural safety analysis of drilling rigs based on API extreme conditions［J］. China Petroleum Machinery，2023，51（1）：9-17.

[4] 吕兰，陈俊. 中深井陆地钻机井架底座结构和发展方向［J］. 石油矿场机械，2007，36（1）：17-20.
LÜ L，CHEN J. Superficial analysis of structure and development trend of mast and substructure of middle and deep depth land［J］. Oil Field Equipment，2007，36（1）：17-20.

[5] 常玉连，刘玉泉. 钻机井架、底座的设计计算［M］. 北京：石油工业出版社，1992.
CHANG Y L，LIU Y Q. Design and calculation of drilling rig derrick and base［M］. Beijing：Petroleum Industry Press，1992.

[6] 王世圣，张宏，董守平. DZ450/9-S钻机底座静态及动态特性［J］. 石油大学学报（自然科学版），2002，26（1）：66-68.
WANG S S，ZHANG H，DONG S P. Static and dynamic characteristics of substructure of DZ450/9 - S drilling rig［J］. Journal of the University of Petroleum，China （Edition of Natural Science），2002，26（1）：66-68.

[7] API. Specification for drilling and well servicing structure［EB/OL］.（2020-06-01）［2024-08-21］. https：//standards. globalspec. com/std/14297695/api-spec-4f.

[8] API. Specification for structural steel buildings：ANSI/AISC 360-16［S］. Chicago，Illinois：API，2016.

[9] 张超，何军国，张勇，等. HXJ135E人工岛海洋钻修机的研制［J］. 石油机械，2013，41（3）：72-76.
ZHANG C，HE J G，ZHANG Y，et al. Development of the offshore drilling and workover rig used in the HXJ135E artificial island［J］. China Petroleum Machinery，2013，41（3）：72-76.

第一作者简介：侯　敏，高级工程师，生于1982年，2008年毕业于西安理工大学机械电子工程专业，获硕士学位，现从事石油钻井装备的研发工作。地址：（721002）陕西省宝鸡市。电话：（0917）3462194。email：zzbhm802@sohu. com

收稿日期：2024-09-28　　**修改稿收到日期：**2025-03-11

（本文编辑　南丽华）