

K45 米钻机井架额载工况下的受力与模态分析

李 斌, 崔鹤田, 马红月, 刘子厚, 高淑芳
(河北建勘钻探设备有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘 要:利用 solidworks2013 建立井架模型, 导入 ansys14.5 对大风额载工况与模态进行了有限元分析。分析表明, 井架在 8 级风速额定载荷下强度刚度均满足安全使用要求, 关键部位焊缝强度储备充足。此外, 通过对井架的固有频率与钻机工作频率的比较, 并对各阶模态主振型的分析, 得出该钻机井架结构设计合理的结论。

关键词:井架; ansys - workbench; 有限元; 风载; 固有频率

中图分类号:P634.3⁺4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)04-0051-05

Analysis on Force and Modal of K45m Rig Derrick under Rated Load Working Conditions/LI Bin, CUI He-tian, MA Hong-yue, LIU Zi-hou, GAO Shu-fang (Hebei Jiankan Drilling Equipment Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The derrick model was established based on solidworks 2013, and ansys14.5 was introduced to make the finite element analysis on the rated load and model in strong winds. The analysis indicates that all the strength and rigidity of the derrick meet the requirement of safe use under the rated load in 8th-force wind with sufficient weld strength reserve of the key parts. By comparing natural frequency of the derrick and working frequency of the drilling machine, the analysis on the main vibration mode of each modal comes to that the derrick structure of drilling machine is designed reasonably.

Key words: derrick; ansys - workbench; FEA; wind load; natural frequency

0 引言

ZJ50 型页岩气深井钻机是我公司研发的一种适用于各种恶劣作业环境的新型钻机。K45HC - 315/7.5 型井架作为 ZJ50 型钻机的重要组成部分, 该型号井架构件多以工字钢, 角钢为主, 用于安放天车、游车等起升设备, 承受着各种作业载荷。因此, 在钻机的设计过程中, 笔者对整套钻塔井架进行了各个工况的有限元分析。本文主要针对井架在大风额定钩载工况下的受力以及塔架的模态分析做详细的介绍。

1 条件描述

井架结构采用 Q345C 钢材, 安全系数取为 1.6。
许用应力: $[d] = 345/1.6 = 215.6 \text{ MPa}$
许用挠度:

$$\text{取} \left[\frac{\omega}{l} \right] = \frac{1}{700} \quad [\omega] = \frac{1}{700} \times 50.7 \times 10^3 = 72.43 \text{ mm}$$

弹性模量为 $2 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.3, 密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。在额定钩载状态下, 设计井架要求能够承受 8 级风(风速 20.7 m/s)风载^[3,5]。井架参数见表 1。

2 计算井架载荷

井架自重: $G_{\text{井架}} = 558 \text{ kN}$;

表 1 井架参数

项目	参数
井架型号	K45HC - 315/7.5
最大钩载/kN	3150(6 × 7 绳系、无风、无立根)
钻深范围(Ø127 mm 钻杆)/m	5000
形式	Π 形
井架高度/m	50.7(大腿销孔中心到天车梁底平面垂直高度)
工作高度/m	44.5(钻台面至天车梁底平面垂直高度)
顶跨(正面 × 侧面)/m	2.1 × 2.05
底跨(正面 × 侧面)/m	9.1 × 2.7
二层台容量/m	5000(5" - 27 m 立根)
二层台工作高度/m	26.5; 25.5; 24.5
井架理论质量/kg	55832
配套天车	STC - 315 ₋₂
配套底座	DZ50/7.5
所属钻机	ZJ50

天车重力: $G_{\text{天}} = 57 \text{ kN}$;

游动系统重力: $G_{\text{游动}} = G_{\text{游车}} + G_{\text{大钩}} + G_{\text{大绳}} = 150 \text{ kN}$;

最大钻柱重力: $Q_{\text{柱}} = 1800 \text{ kN}$;

$$\begin{aligned} \text{井架额定载荷: } Q_{\text{额}} &= [\text{最大钻柱重力 } Q_{\text{柱}} = 1800 \text{ kN}] + [\text{天车重力 } G_{\text{天车}} = 57 \text{ kN}] + [\text{游动系统重力 } G_{\text{游}} = G_{\text{钩}} + G_{\text{游车}} + G_{\text{绳}} = 150 \text{ kN}]] + [\text{工作绳拉力 } 2P_{\text{绳}}] \\ &= \frac{Q_{\text{柱}} + G_{\text{游}}}{Z_j} = \frac{1800 + 150}{12 \times 0.782} = 207.8 \text{ kN}] = 2214.8 \text{ kN}。 \end{aligned}$$

收稿日期:2013 - 10 - 23; 修回日期:2014 - 03 - 04

作者简介:李斌(1986 -),男(汉族),河北石家庄人,河北建勘钻探设备有限公司,机械设计专业,硕士,从事机械设计工作,河北省石家庄市建华南大街 58 号,565994809@qq.com。

3 计算风载荷

风力合力简化公式为:

$$F_l = P A_m \beta^2$$

式中: P ——既定风速下的风压(见表 2); A_m ——迎风面积, m^2 ,按井架正面或侧面实际面积乘以体型系数计算,各段体型系数由挡风系数和型钢杆件体型系数确定^[5]; β ——风振系数。

表 2 各种风速下的风压表

风速/($m \cdot s^{-1}$)	风压 P/Pa
47	1688.5
36	990.6
20.7	320

3.1 井架正面(背面)风载计算

$\Sigma A_m \beta^2$ 计算见表 3。

表 3 正面 $\Sigma A_m \beta^2$ 计算表

部位	A_m/m^2	β^2	$A_m \beta^2/m^2$
井架左右 I 段	9.32	1.0	9.32
井架左右 II 段	10.73	1.0	10.73
井架左右 III 段	7.99	1.1	8.79
井架左右 IV 段	7.38	1.2	8.85
井架 V 段	6.21	1.2	7.45
二层台	7.70	1.2	9.24
天车	4.05	1.3	5.26

$\Sigma A_m = 53.38 m^2$, $\Sigma A_m \beta^2 = 59.64 m^2$ 。对于风速 20.7 m/s,正(背)面风载合力: $F_l = P \Sigma A_m \beta^2 = 320 \times 59.64 = 19084.8 N$ 。

3.2 井架侧面风载计算

井架侧面 $\Sigma A_m \beta^2$ 计算见表 4。

表 4 侧面 $\Sigma A_m \beta^2$ 计算表

部位	A_m/m^2	β^2	$A_m \beta^2/m^2$
井架左右 I 段	9.32	1.0	9.32
井架左右 II 段	5.05	1.0	5.05
井架左右 III 段	5.26	1.1	5.78
井架左右 IV 段	4.76	1.2	5.71
井架 V 段	4.51	1.2	5.41
二层台	5.82	1.1	6.4
天车	3.78	1.3	4.9

$\Sigma A_m = 38.5 m^2$, $\Sigma A_m \beta^2 = 42.57 m^2$ 。对于风速 20.7 m/s,侧面风载合力: $F_l = P \Sigma A_m \beta^2 = 320 \times 42.57 = 13622.4 N$ 。

4 模型建立

使用 solidworks2013 三维绘图软件建立模型,本软件中的焊件功能非常强大,并且支持用户自定义焊件库,按设计需要自主编辑结构件截面形状。强

大的裁剪和延伸功能可以有效避免模型干涉,并且使焊接处相贯线平滑紧密。为了在 ansys 中划分网格和计算的方便在导入 ansys 之前,应对 CAD 模型进行简化处理。在不影响静力分析结果的前提下,略去那些为了满足构造或使用的要求而设置的次要部件、附件^[2]。此外也要尽量减少构件的圆角,尖角。图 1 为建立的井架模型。

5 求解前处理

将三维模型导入 ansys - workbench14.5 中的 static structural 模块中,在 Engineering data 栏定义构件材料属性(所有构件弹性模量均为 $2 \times 10^5 MPa$,泊松比均为 0.3,密度均为 $7.85 \times 10^3 kg/m^3$)^[4]。打开 modal 栏划分网格(mesh),网格由四面体与六面体 2 种,根据有限元分析理论单元形状越是规范公式矩阵求解越容易,反之网格单元形状过于异化就可能导致结果失真或者更严重的还会导致求解失败。建立模型时去除尖角圆角正是为了减少模型中不规则的区域,尽量避免不规则网格单元的产生。在一个模型中如果划分的网格尺寸越小,相应的单元就越多,所需求解的方程也会比较多,这样对计算机的性能要求就会很高。综合考虑在实际操作中要选择合适的单元类型与网格尺寸,以使得单元形状规范,数量适中,个别网格划分困难的构件单独定义划分规则。反复修改最终得到理想的网格图。图 2 为模型的网格划分后模型局部放大图。



图 1 塔架三维模型

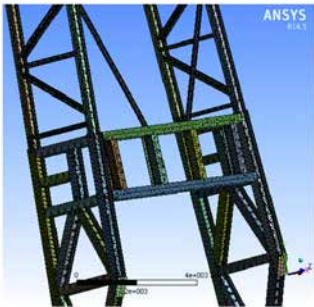


图 2 塔架局部网格划分图

网格划分完成之后必须对模型施加约束,约束施加质量的好坏对分析结果正确性有很大影响,所以添加约束必须尽可能地符合井架的实际情况。塔架底端连接方式虽为销轴铰接但在工作过程中井架整体不允许有转动位移,所以可以在塔底施加固定约束,塔腿一段的靠背施加沿构件方向的滑动约束。

6 加载求解

本文对正(背)面与侧面受风 2 种情况进行研究。根据井架作业实际情况将井架额定载荷对称施加载到 2 个天车梁上,将上文计算所得风载荷($F_{\text{正}} = 18953.6 \text{ N}$, $F_{\text{侧}} = 14339.2 \text{ N}$)分别均匀施加载到所有构件的迎风面上,求解得出正(背)风额定钩载和侧风额定钩载的位移与应力云图(图 3~8),对整体刚度与强度进行分析,并检验受力较大的关键部位焊缝应力分析情况,确保井架满足安全使用要求。

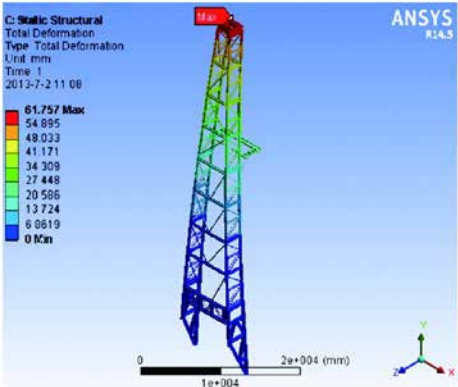


图 3 背(正)风 20.7 m/s 风速、额定钩载工况位移

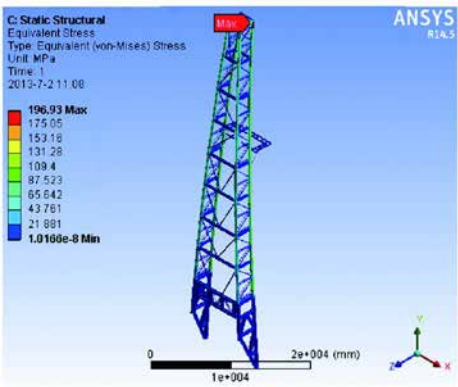


图 4 背(正)风 20.7 m/s 风速、额定钩载工况应力

图 3 显示最大位移发生在塔顶位置约为 61.757 mm,小于许可挠度 $[\omega]$,满足整体刚度要求;图 4 显示最大应力约为 196.93 MPa,小于许用应力 $[d]$ 符合整体强度与各个构件强度要求;图 5 显示关键焊接部位处应力为 126.17 MPa,井架的许用应力为 215.6 MPa,关键焊接处应力小于许用应力的 70% (150 MPa),强度储备足够^[1]。

图 6 显示最大位移发生在塔顶位置,约为 55.158 mm,小于许可挠度 $[\omega]$,满足整体刚度要求,图 7 显示最大应力约为 197 MPa,小于许用应力 $[d]$,符合整体强度与各个构件强度要求。图 8 显示关键焊接处应力为 134 MPa,井架的许用应力为 215.6 MPa,关键焊接处应力小于许用应力的 70%

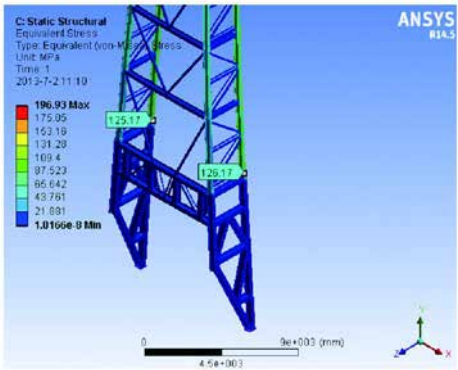


图 5 背(正)风 20.7 m/s 风速、额定钩载工况关键焊接部位应力

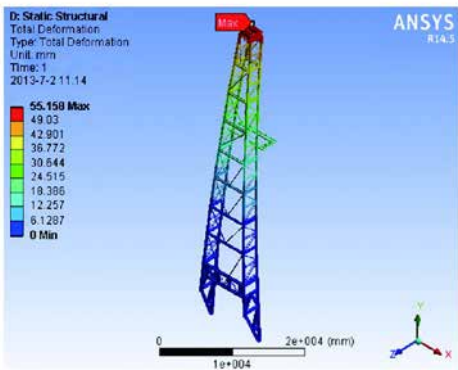


图 6 侧风 20.7 m/s 风速、额定钩载、无立根工况位移

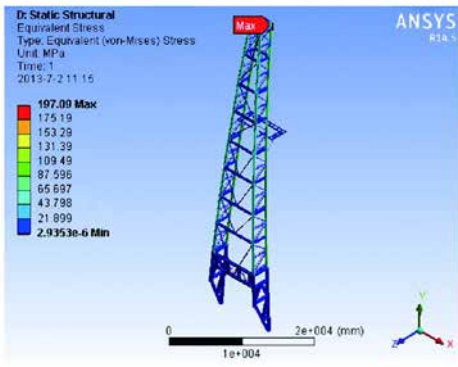


图 7 侧风 20.7 m/s 风速、额定钩载、无立根工况应力

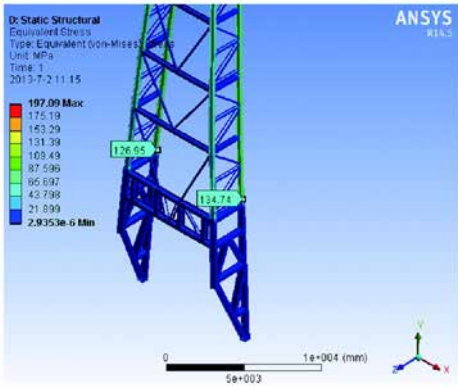


图 8 侧风 20.7 m/s 风速、额定钩载工况关键焊接部位应力 (150 MPa),强度储备足够。

7 井架模态结果分析

为了合理设计钻机井架,需要全面了解井架的固有振动特性。先对井架结构在自然状态下即无钩载作用下进行模态分析,可得到井架的前 9 阶固有频率(表 5)及相对应的主振型。

表 5 井架前 9 阶固有频率(无钩载)

阶数	固有频率 f/Hz	阶数	固有频率 f/Hz
1	1.4596	6	9.1585
2	2.5325	7	9.7967
3	4.7233	8	10.179
4	6.2529	9	10.697
5	6.2893		

表 6 所列为 ZJ50 型钻机转盘主要转速及所对应的频率。对比表 5 与表 6,可以看出井架的固有频率与钻机设计的工作频率(主要是转盘频率)相差较大。

表 6 钻机转盘主要转速与频率

转盘转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	转盘频率 f/Hz
38	0.6333
72	1.2000
113	1.8833
212	3.5333
-58	0.9666

考虑井架在有钩载情况下,存在预应力的模态分析,计算得出井架前 9 阶固有模态频率,列于表 7。表 5 与表 7 比较可以看出,井架有钩载时的固有频率比在自然状态下时略低;表 7 与表 6 对比可以看出,井架固有频率与钻机转盘频率 1、3、4 挡和倒挡工作频率相差较大,只有 1 阶固有频率(1.3239)与 2 挡时钻机工作频率(1.2000)较为接近,但在实际工作中 2 挡使用较少,并且可以通过调节柴油机来调节转速。因此能够得出,钻机工作时井架不会发生共振现象。由于井架的模态频率主要是由前 9 阶决定的,因此需对前 9 阶模态振型进行分析。

表 7 井架前 9 阶固有频率(有钩载)

阶数	固有频率 f/Hz	阶数	固有频率 f/Hz
1	1.3239	6	9.6758
2	2.5632	7	9.7473
3	4.8431	8	9.9665
4	6.0795	9	10.532
5	6.3005		

8 井架模态分析

第 1 阶振型(1.4596 Hz)主要表现为井架做大幅的前后一阶摇摆振动,没有其他明显振动,其振型

如图 9 所示。

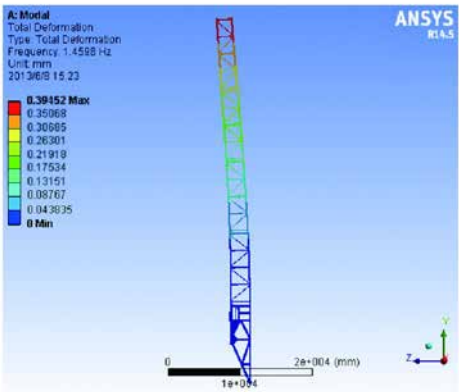


图 9 第 1 阶振型

第 2 阶振型(2.5325 Hz)主要表现为井架做大幅的左右一阶摇摆振动,并且伴随着井架上体轻微的绕 Y 轴旋转运动,其振型如图 10 所示。

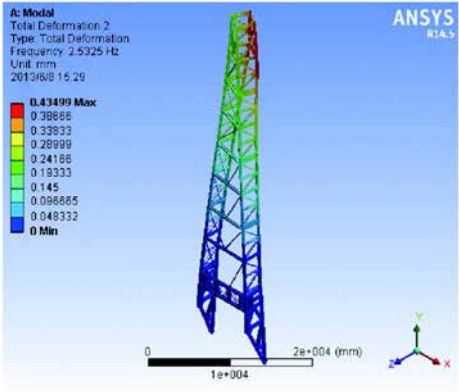


图 10 第 2 阶振型

第 3 阶振型(4.7233 Hz)主要表现为井架上体剧烈的绕 Y 轴的一阶旋转运动,其他振型不明显,其振型如图 11 所示。

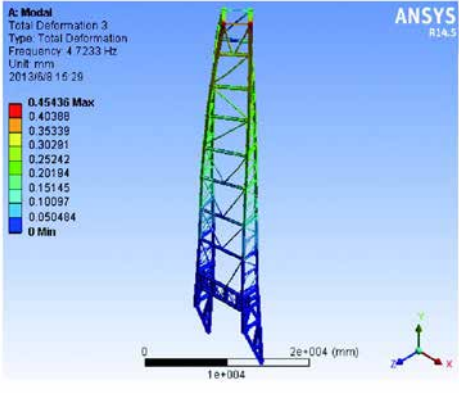


图 11 第 3 阶振型

第 4 阶振型(6.2529 Hz)主要表现为井架大幅的前后二阶摇摆运动,无其他振型,其振型如图 12 所示。

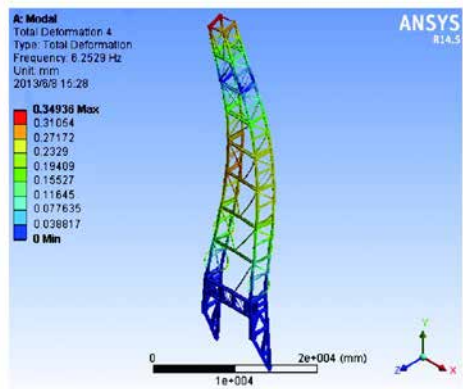


图 12 第 4 阶振型

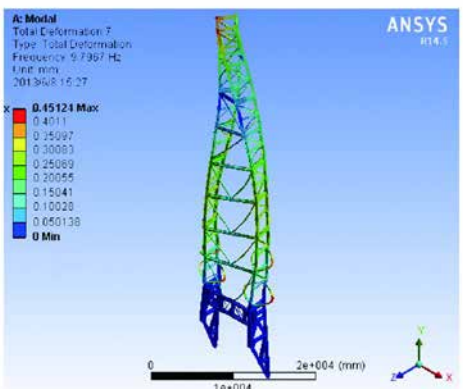


图 15 第 7 阶振型

第 5 阶振型(6.2893 Hz)主要表现为井架大幅的左右二阶摇摆运动,伴随着上体有轻微的绕 Y 轴旋转运动,其振型如图 13 所示。

大幅的左右三阶摇摆运动,伴随着上体轻微的绕 Y 轴的旋转运动,其振型如图 16 所示。

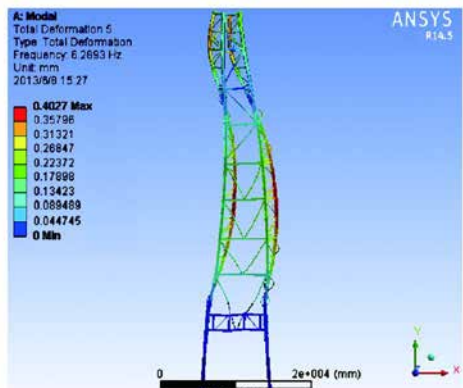


图 13 第 5 阶振型

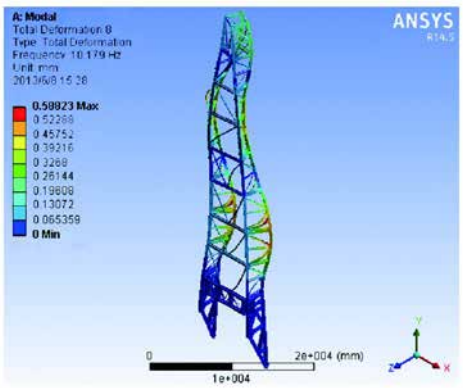


图 16 第 8 阶振型

第 6 阶振型(9.1585 Hz)主要表现为井架两侧大幅的左右一阶摇摆运动,其他振型不明显,其振型如图 14 所示。

第 9 阶振型(10.697 Hz)主要表现为井架两侧强烈的左右二阶摇摆运动,其他振型不明显,其振型如图 17 所示。

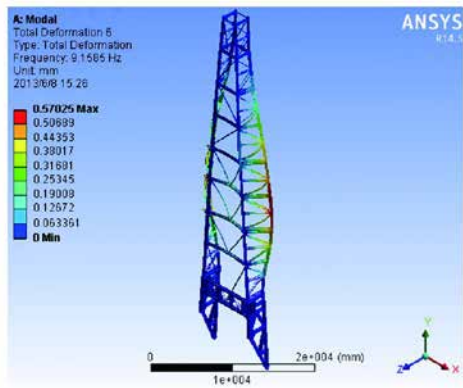


图 14 第 6 阶振型

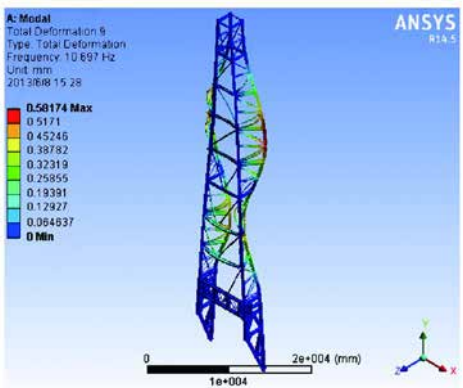


图 17 第 9 阶振型

第 7 阶振型(9.7967 Hz)主要表现为井架绕 Y 轴大幅的二阶旋转运动,伴随着井架上体左右的轻微摇摆运动,其振型如图 15 所示。

9 结语

在研发阶段进行井架较危险工况的有限元分析,证明井架在 8 级风速额定载荷下强度刚度均满足安全使用要求,关键部位焊缝强度储备充足。

(下转第 70 页)

变形或导管内壁有水泥浆块硬化;水泥浆离析,粗骨料卡入隔水塞;灌注时导管理深过大。

针对这些原因,灌注前对导管进行检查,看是否有变形或硬块堵塞;加强对混凝土搅拌时间和坍落度的控制;灌注时注意导管理深不要太大。

4.2.4 塌孔^[9]

塌孔是钻孔灌注桩施工中较为常见的问题。塌孔发生的原因主要有地质情况复杂;在松软地层钻进时,进尺太快;泥浆稠度小,起不到护壁作用;起下钻时钻头、钻具对孔壁的扰动等。

针对这些原因,当轻度塌孔时,采用粘土回填至塌孔位置以上2~3 m,并采取加大泥浆密度、改善泥浆性能、提高水位等措施,待孔壁稳定后低速继续慢慢钻进;塌孔位置不深时,可采用加深护筒的方法,将护筒周围回填土夯实,重新开钻;随时注意坍塌量的变化,如塌孔严重,应全部回填,待回填物沉淀密实后采用低钻速重新钻进。

5 施工效果

本项目施工完成之后,用低应变反射波法对其中的32根灌注桩进行检测,结果显示所有灌注桩的桩身完整,均为Ⅰ类桩,取得了良好的效果。

6 结语

在港口码头工程中,淤泥质土层是常见的地层,

合理地运用钻孔灌注桩可以很好地解决工程中的难题。本工程针对淤泥、淤泥质粘土层厚、力学性质差等特点,选择力学强度高的片麻岩层作为持力层,能够提供高承载力,同时还能控制沉降。根据地层条件、施工设备、项目工期以及工程造价确定桩径,根据持力层埋深确定桩长,最后确定灌注桩的配筋率。通过前期的技术准备,很好地解决了施工中遇到的护筒冒水、卡钻、堵管等问题。

参考文献:

- [1] Tarek M Zayed, Daniel W Halpin. Pile construction productivity assessment[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2005, 131(6): 705-714.
- [2] 付祖良. 钻孔灌注桩水下混凝土灌注技术研究与应[D]. 湖北武汉: 华中科技大学, 2006.
- [3] JTS 167-4-2012, 港口工程桩基规范[S].
- [4] 徐伦煥. 灌注桩在港口建设应用中的几个问题[J]. 港口科技动态, 1995, (8): 4-6.
- [5] 林齐云. 钻孔灌注桩的设计和应[J]. 工程建设与设计, 2006, (7): 54-59.
- [6] 佟东明. 灌注桩施工质量控制与事故预防[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- [7] 王国兴, 宋西阁. 威海港新港区 I 突堤钻孔灌注桩成孔技术[J]. 中国水运, 2010, 10(5): 196-197.
- [8] 莫毅舟. 浅谈钻孔灌注桩施工的质量控制[J]. 山西建筑, 2010, 36(6): 211-222.
- [9] 孙庆丰. 钻孔灌注桩施工中常见问题及处理方法探讨[J]. 交通科技, 2003, (6): 24-25.

(上接第55页)

井架结构设计合理性、安全性得到了验证。可以为该型井架其他工况的分析研究提供很好的借鉴,对井架的优化设计具有一定的指导价值。

此外,本文还对井架进行了模态分析,从井架前9阶的振型分析中看出,井架的刚度和质量分布较为均匀,无明显的薄弱部位和过剩部位。因此,井架的整体结构设计是合理的,为后续的动力学仿真和优化设计提供了基本保证。

本文的研究方法对类似工程的有限元分析具有很好的参考作用。

参考文献:

- [1] 高荣霞. ZJ50/3150LDB 钻机井架的设计和有限元仿真分析[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.

- [2] 刘玉娟, 丁庆新, 张遂安, 等. SMJ5540TZJ5/800Y 煤层气车载钻机井架结构有限元分析[J]. 煤矿机械, 2010, 31(1): 97-99.
- [3] 汪炳贵. JJ450/45-K 井架设计校核及优化[D]. 山东青岛: 中国石油大学, 2009.
- [4] 李锐, 侯友夫. 基于 Ansys Workbench 的矿井架空乘人装置驱动轮支架的有限元分析[J]. 起重运输机械, 2011, (11): 45-47.
- [5] 王慧, 段树铖, 席亚兵. 基于 ANSYS 的石油井架风载的有限元分析[J]. 世界科技研究与发展, 2010, 32(4): 477-479.
- [6] 薛继军, 许爱荣, 赵志丽, 等. 钻机井架有限元模态分析[J]. 石油矿场机械, 2001, 30(6): 44-46.
- [7] 黄志新. ANSYS Workbench 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [8] 李夸, 齐明侠. 基于 ANSYS 的 K 型井架结构研究[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(2): 5-7.
- [9] 吴磊. K 型钻机井架模型的设计及有限元的计算[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(7): 60-61.