

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208813

基于光纤传感的井架和底座承载力监测系统*

贾登璐 张学理 张易 左卫东 吴昌亮 金艺 杨晓光

(中国石油集团工程技术研究院有限公司 北京 102206)

摘要: 井架和底座作为石油钻机系统中的重要设备,其承载能力直接影响着油田钻井生产的安全和效益。由于恶劣环境影响,钻机井架和底座会出现腐蚀、磨损以及载荷增加等问题,因此有必要将井架、底座承载能力与安全评估技术联系起来,以保证钻机生产作业的安全性。因此,本文重点对钻机井架及底座的承载能力开展安全评估技术研究。首先采用有限元仿真找出井架和底座的起升工况下的最大应力监测位置,进而利用光纤光栅监测技术,对钻机关键结构件井架和底座的起升、下放和作业工况的关键受力截面进行应变监测,防止超设计能力作业和意外情况出现。试验结果证明,钻机井架和底座的应变测量值与外力载荷呈线性关系,拟合程度分别是 99.48% 和 99.85%,本系统可以对井架和底座的应变进行监测,实现了钻井装备的承载力监测事前预警、事后支持,更安全地保障油气资源勘探开发。

关键词: 钻机井架;光纤光栅;有限元分析;安全评估系统

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Monitoring system of derrick and substructure bearing capacity based on optical fiber sensing

Jia Deng Luo Xueli Zhang Yi Zuo Weidong Wu Changliang Jin Yi Yang Xiaoguang

(CNPC Engineering Technology R&D Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: As an important equipment in the system of oil drilling rig, the bearing capacity of derrick and base directly affects the safety and benefit of oilfield drilling production. Due to corrosion, wear and load increase in rig derricks and bases due to adverse environmental conditions, it is necessary to link the derricks and bases load capacity with safety assessment techniques to ensure the safety of rig production operations. Therefore, this article focus on the base of the rig derrick and safety assessment of carrying capacity and technological research. Firstly, the finite element simulation is used to find out the maximum stress monitoring position under the lifting condition of the derrick and substructure, and then the fiber Bragg grating monitoring technology is used to monitor the strain of the lifting and lowering of the derrick and substructure, the key structural parts of the drilling rig, and the key stress sections under the working condition, so as to prevent the operation beyond the design capacity and accidents. The test results show that the measured strain values of the derrick and substructure of the drilling rig have a linear relationship with the external force load, and the fitting degrees are 99.48% and 99.85% respectively. The system can monitor the strain of the derrick and substructure, realize the pre-warning and post support of the bearing capacity monitoring of drilling equipment, and more safely ensure the exploration and development of oil and gas resources.

Keywords: drilling derrick; fiber bragg grating; finite element analysis; safety evaluation system

0 引言

石油钻机是重要的勘探开发装备,井架及底座作为钻机系统设备中的关键部分,属于一种大型承重结构,对油田生产起着重要作用,目前,评价井架、底座承载能力的主要方法有两种,一是有限元仿真计算,二是现场测试。有限元

仿真计算就是运用 ANSYS 等大型的有限元分析软件对 API SPEC 4F 规定载荷作用下的井架进行计算,得到井架、底座的变形情况等。现场测试则是在井架、底座实际作业的现场对其进行承载能力测试,主要方法是在井架、底座特定位置放置应变传感器,观察不同位置微应变随时间的变化,再计算出对应的应力。

收稿日期:2022-01-10

* 基金项目:中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目(2021DJ4304)资助

光纤光栅传感技术是一种以光信号传播特性为基础进行物理量测量的检测技术^[1],其防腐性^[2]、防高盐潮湿^[3]、绝缘、零漂小^[4]、安装方便等特点非常适用于户外大型结构件的安全监测,特别是隧道、桥梁和绞车等。文献[5]从弱光栅阵列应变测量的基本原理出发,首次将传感器阵列应用到实桥应变测量中,证明了光栅传感器系统在桥梁安全监测中的有效性。文献[6]提出了将光纤光栅传感器胶粘与罐道导轨外侧,采用全对称差分结构提高测量灵敏度,直接监测罐道轨道应变,结算井筒变性的设计方案。本文通过采用有限元对自动化钻机井架及底座在起升、下放等工况进行仿真,得到结构件的最大应力承受点,并研制了一套光纤光栅传感测试系统对井架和底座受力点实施应变健康监测,得出了不同外力载荷与井架和底座监测点应变线性关系,证明了该方案的可行性。

1 钻机井架及底座结构有限元仿真计算

本文以 7 000 m 自动化钻机井架及底座结构在起升、下放和作业等不同状态下进行有限元仿真分析,依据有限元分析结果确定结构的安全状态和应力热点部位,对这些应力热点部位进行实时监测,从结构受力角度反应平台的结构安全状况^[7-8]。

1.1 井架最大钩载工况静力分析

井架的主要技术参数:井架型号 JJ450/46.5-K18、总高度 57 m、有效高度 46.5 m、顶部开档 2.5 m×2.2 m、底部开档 8.1 m、二层台高度 24.5 m、最大钩载:4 500 kN。7 000 m 自动化钻机 ZJ70/4500 的井架净高从 48 m 增加到 57 m,有以下 3 点需要考虑:

井架起升:重力增大,起升力臂增大,井架起升时立柱弯曲应力和轴向应力增大;

井架强度:井架所受到钻柱作用力、风载和白重增加;

井架刚度和稳定性:井架高度增加,刚度和整体稳定性变差。

1) 井架计算模型

井架静力学分析所采用的计算模型忽略非主承力路径上的板、角钢等,井架大腿立柱采用 H 型钢,规格为 450×350×25×20,如图 1 所示。井架所划网格以六面体网格为主,网格质量较好,重要受力部位网格较密,其他部位较疏,这样既可满足计算精度和收敛性的要求,又减少了所划分单元和节点的数量,降低了计算量^[9-10]。

2) 井架操作工况时的承载能力分析

根据 GB/T 25428-2015《石油天然气工业 钻井和采油设备 钻井和修井井架、底座》的规定。最大钩载工况时的加载情况和边界条件设置如图 2 所示,井架的惯性力只有重力加速度,其值为 9.806 6 m/s²,钻机的最大钩载为 4 500 kN,分别加在井架顶端的 4 个面上,每个面加载 1 250 kN。井架的边界条件为井架下部与底座基座连接耳板以及井架与人字架相连处。

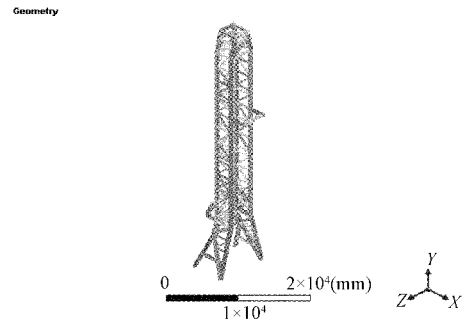


图 1 井架模型图

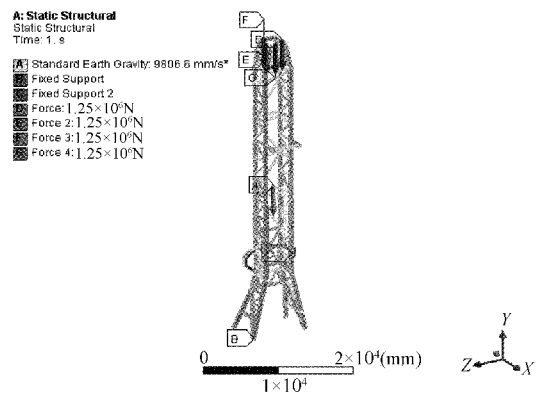


图 2 操作工况时加载情况和边界条件设置

由图 3 可知,井架的最大位移发生在井架上段的顶端,即安装天车的位置,在使用过程中注意其变形情况,以保证井架的安全。

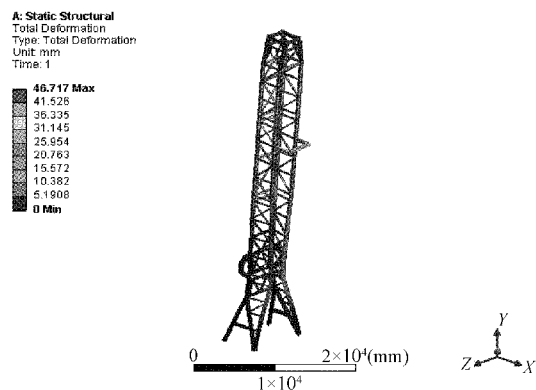


图 3 井架位移云图

从图 4 可以看出,井架在最大钩载工况时的最大等效应力为 159.57 MPa,满足 API SPEC 4F 中所规定的强度要求。井架的最大等效应力发生在上段的顶端,即安装天车的位置,另外在井架下部的斜段与直段的相交位置也很大。通过有限元计算可以得出以下结论,井架在最大钩载工况时的承载能力符合国标规定。

1.2 井架起升、下放工况分析

7 000 m 自动化钻机的井架为液压起升,图 5 为井架起升有限元模型图。井架起升工况加载情况和边界条件设置

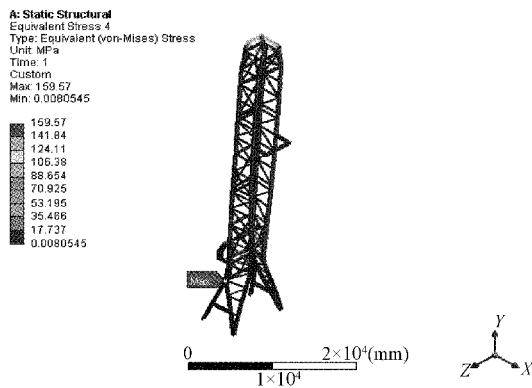


图 4 井架等效应力云图

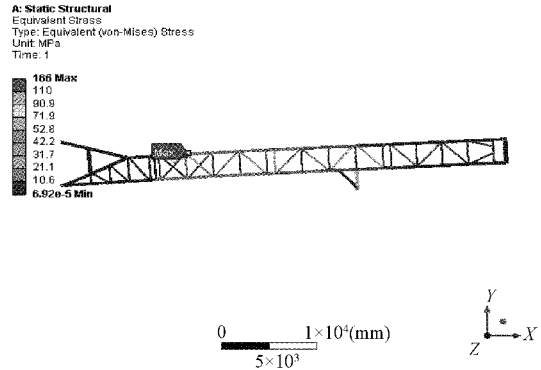


图 7 井架起升工况的等效应力云图

情况,其载荷主要包括重力,边界条件为下部铰支座固定,与液压缸连接处固定。由图 6 可以看出,井架起升的最大位移位于井架与天车的连接处,且沿井架主体自上而下逐渐减小。

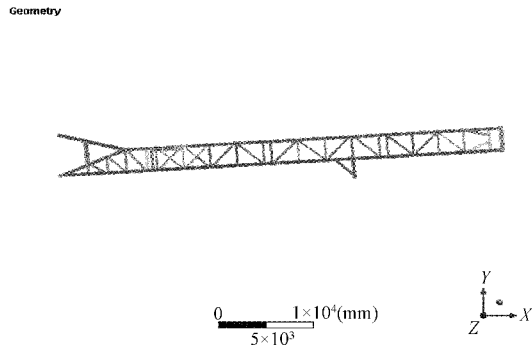


图 5 井架起升工况有限元模型图

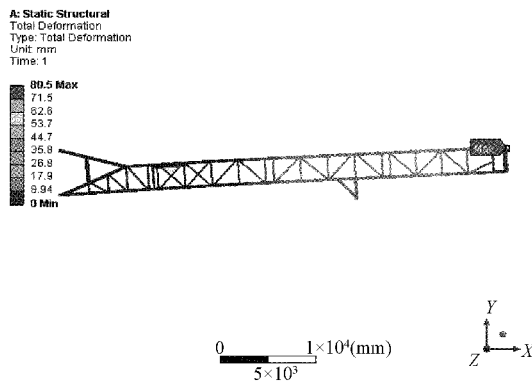


图 6 井架起升工况的位移云图

由图 7 可知,起升工况井架大腿所受的最大应力为 166 MPa,井架起升满足强度要求。井架的最大应力和最大应变均出现在井架下部与人字架相连的位置,因此须对此处结构进行适当加固,并注意消除焊接残余应力。通过计算可以得出以下结论,井架在起升工况时的最大等效应力满足井架的强度要求,最大位移满足井架的刚度要求,符合国标规定。

1.3 底座最大转盘静力计算

底座的主要技术参数:高度 10.5 m、钻台面尺寸 12.5 m×12.2 m、最大转盘载荷 4 500 kN,7 000 m 自动化钻机 ZJ70/4500 的底座钻台面上安装井架总成,并且取消了前后两个中间门框立柱,有以下 3 点需要考虑:

底座起升:液压缸起升,底座起升时立柱弯曲应力和轴向应力增大;

底座强度:井架总成的重量完全加在了钻台面上;

底座刚度和稳定性:底座缺少前后两个中间门框立柱,刚度和整体稳定性变差。

1) 底座计算模型

底座静力学分析所采用的计算模型忽略非主承力路径上的板、角钢等,底座大腿立柱采用 H 型钢,规格为 350×300×25×16,如图 8 所示。

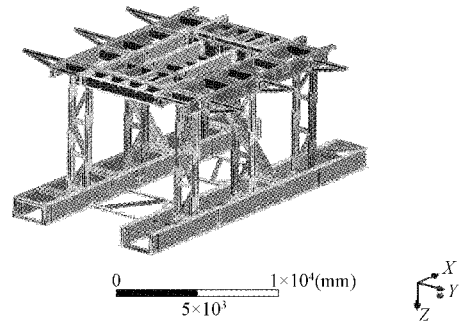


图 8 底座模型图

2) 底座最大钩载工况时的承载能力计算

底座最大钩载工况时的加载情况和边界条件设置如图 9 所示,底座的惯性力只有重力加速度,其值为 9.806 6 m/s²,钻机的最大钩载为 4 500 kN,分别加在底座顶端两个面上,每个面加载 2 250 kN^[1]。立根总重 2 000 kN,均匀加载于立根台主梁上,每个梁加载 1 000 kN。井架重量共 2 000 kN,也分配到底座的 4 个面上,每个面加载 500 kN。底座的边界条件为底座下部固定。

由图 10 可知,底座最大转盘载荷工况的最大位移发生在转盘梁处,在使用过程中注意其变形情况,以保证底座的安全。

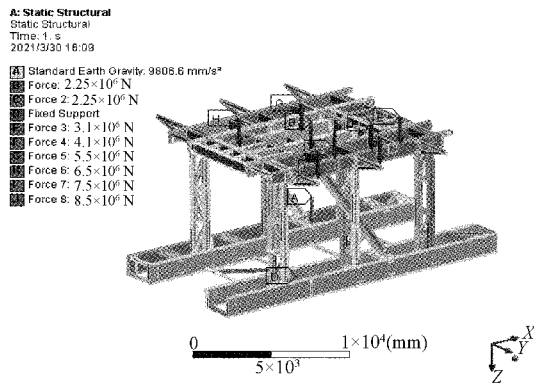


图 9 最大转盘载荷工况时底座加载情况和边界条件设置

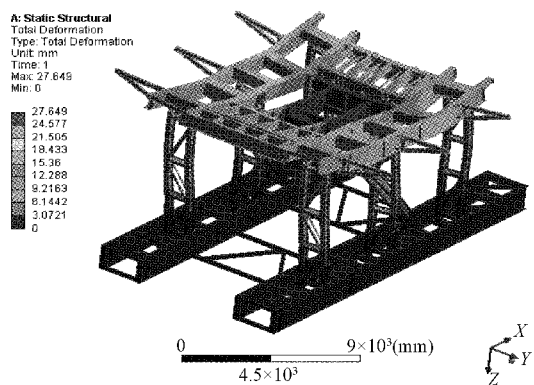


图 10 底座位移云图

从图 11 可以看出,底座在最大转盘载荷工况的最大等效应力为 164.81 MPa,满足 API SPEC 4F 中所规定的强度要求。底座的最大等效应力发生在转盘梁位置,另外在底座立柱位置也很大。通过有限元计算可以得出底座在最大钩载工况时的承载能力符合国标规定。

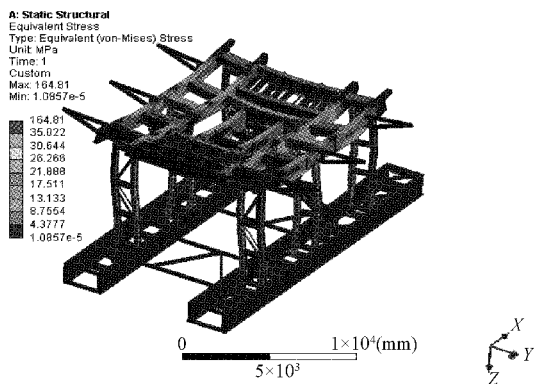


图 11 底座等效应力云图

2 钻机井架、底座关键部件光纤光栅应变在线监测系统研究

光纤光栅根据周期的不同,常见的种类有布拉格光纤光栅、长周期光纤光栅和啁啾光纤光栅。布拉格光纤光栅为均匀光纤光栅,即光栅的栅格周期沿光纤轴向均匀,光栅

沿径向各个位置处的折射率调制周期相等^[12-13]。随着光纤光栅所处环境的温度、应力等物理量变化,光纤光栅的波长也随之变化,通过测试光纤光栅反射光或透射光的波长前后变化,从而实现对温度和应变等参数的测量,所以布拉格光纤光栅是最为常用且工程化应用程度最高的。与传统的电类传感器相比他们的差别在于:传统的传感器是以物理量转电变量为基础,以电信号为转换和传输的载体,用导线来传输电信号;而光纤光栅传感器是以物理量转化光变量为基础,以光信号作为转换和传输的载体。用光纤来传输信号,与传统的电信号传感器相比具有以下优势和特点:

- 1)通过光栅应力监测、无线传输技术,实现对井架底座承载能力实时监控,防止井架超载作业;
- 2)与传统井架应力监测相比,该系统可以对钻机结构件的危险工况进行实时监控,降低了结构件发生事故的机率;
- 3)该系统是一次性安装到位不用拆解、可长期工作,提高设备使用可靠性。

钻机井架、底座关键部件光纤光栅应变在线监测系统主要由光纤光栅解调仪、光纤光栅应变计、软件系统组成^[14]。软件部分由硬件设备驱动、控制、通信软件以及井架或底座设备状态的《钻机光纤光栅传感测试评估系统》软件组成^[15-16]。软件和硬件系统密切配合实现长期健康监测及状态安全评估功能^[17-18]。组成框图如图 12 所示。

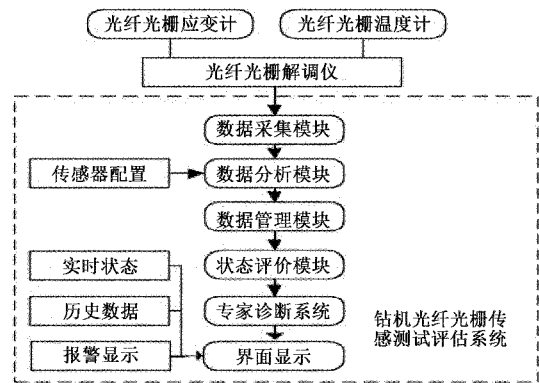


图 12 在线检测监测系统组成框图

2.1 硬件系统

本文研制的光纤光栅解调仪结构框图如图 13 所示,它是一款高精度、高分辨率的光纤光栅监测系统。该系统集成了光源、数据采集、网络通讯等几大模块^[19]。适用于光纤光栅温度、应变、压力、位移、角度、加速度、磁场、流量等多种类型的光纤光栅传感器信号解调和传感数据采集。具有 1~32 个测量通道可选,扫描频率可在 1~1 000 Hz 之间选择。内置校准波长参考模块,在 -10 ℃~55 ℃ 温度范围内可保证 ±1 pm 的长期测量精度。

光纤光栅传感器如图 14 所示,它采用固定的点焊式封装,内部集成了温度补偿传感器,双端出光纤通过“手拉手”方式在一根光纤上可串联多个传感器。另外,它的应变光

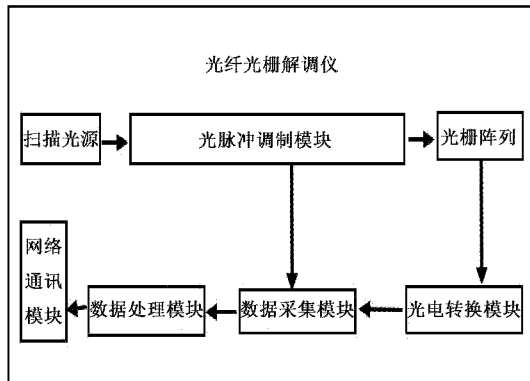


图 13 光纤光栅解调仪结构框图

栅和温度补偿光栅集成在一个传感器内,应变测量精度更好。光纤光栅传感器和尾部光纤一体化连接,尾纤采用铠装光缆封装。

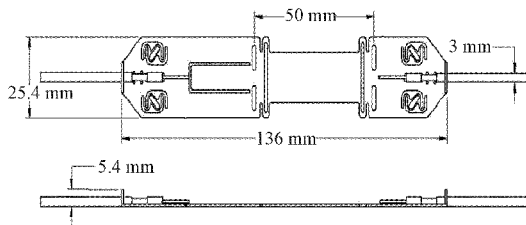


图 14 光纤光栅应变计

2.2 软件系统

《钻机光纤光栅传感测试评估系统》本软件使用微软公司的 Visual Studio 2019 软件开发工具编写,具有界面简洁、美观、操作方便、数据采集及分析速度快、可靠等优点^[20]。本软件可以自动识别接入传感器的通道号、编号、波长等信息,并在传感器参数配置页面全部呈现,无需手动增减,各类型传感器换算公式内嵌于软件中,只需选择传感器类型即可,配置好的传感器参数可以一键保存,生成配置文件,可以通过载入配置直接调用配置文件,简单高效。同时软件还有设置传感器测量阈值功能,通过对井架、底座承载能力计算,输入报警值后会对超出预警值的测点进行实时预警,并保存曲线,还可以通过回放查看。软件界面如图 15 所示。

系统软件主要由文件菜单、实时测量菜单和帮助菜单组成。包含主要功能:文件菜单,新建测试工程和打开已保存好的测试工程以及退出系统;实时测量菜单,传感器扫描、开始测量、停止测量;帮助菜单,提供软件使用帮助说明,显示软件版权及帮助文件信息;标签栏由光谱模式、传感器配置、传感器模式测量曲线、预警监测页面和历史数据页面组成。

1) 新建工程菜单

点击新建工程,工程命名为 test1,点击保存,在光谱模式下,如图 16 所示。点击开始测量,可以看到连通传感器的通道号以及光谱,可以判断各传感器是否正常接通。设

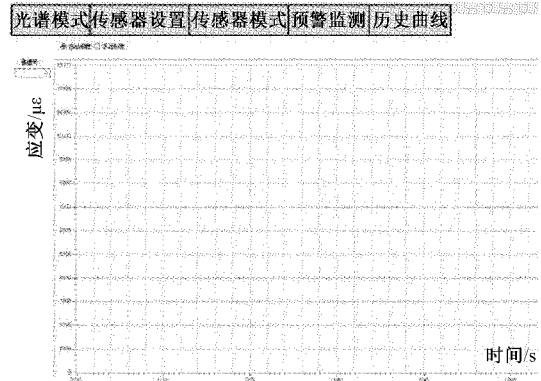


图 15 钻机光纤光栅传感测试评估系统

置传感器类型、灵敏度系数、预警值上下限。保存配置,可以将配置文件保存到工程之中,也可以点击载入配置,直接调用之前保存的配置文件,方便快捷。点击应用配置,系统参数配置完成,点击刷新波长,读取光纤光栅传感器零点波长,实现调零。

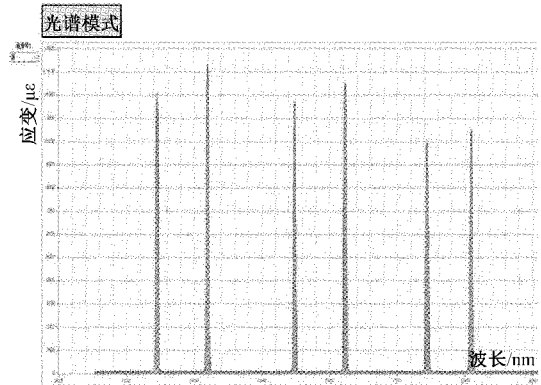


图 16 光谱模式页面显示

2) 传感器模式测量曲线

在传感器模式下点击开始测量,可以实时显示测量曲线,通道号以及传感器编号可以手工选择。数据输出方式以波形图显示为主,在指定的文件保存目录中,文件以 PRJ 和 TDMS 两种类型保存。传感器实时测量曲线如图 17 所示。

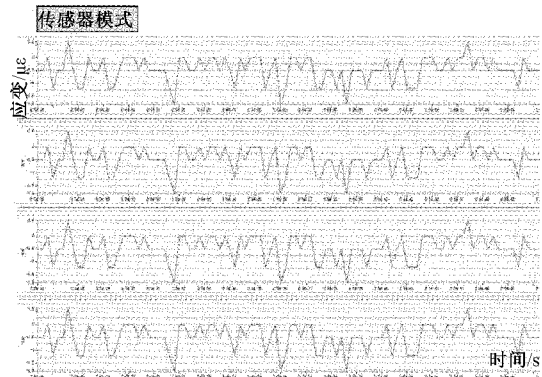


图 17 传感器实时测量曲线

3) 查看历史曲线

打开工程,找到所存工程文件目录并选中所要查询的工程文件(.prj 后缀),然后单击“确定”即可显示历史曲线。可波形左移、波形右移、波形伸展、波形压缩、鼠标框选局部曲线可以展开并查看该时间段曲线数据,如图 18 所示。

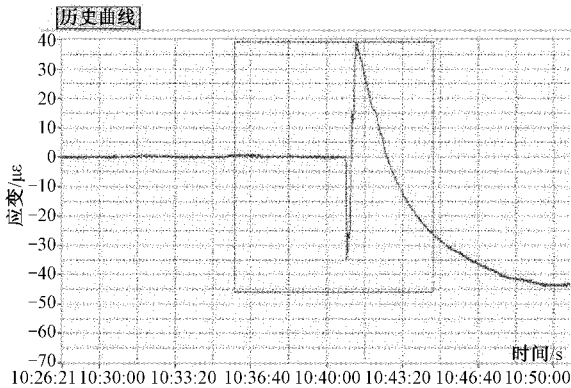


图 18 历史数据显示

4) 预警监测

当系统运行期间传感器测量值超出预警上下限时,预警监测界面会实时显示传感器编号、预警时间、实际测量值等预警信息,根据超出预警下限或上限值的范围大小设定不同颜色预警等级,预警监测页面如图 19 所示。

预警监测					
传感器编号	预警时间	实时测量值/με	预警下限/με	预警上限/με	
0102	2022/3/5 14:11:10	165	-160	160	
0102	2022/3/5 14:11:25	166	-160	160	
0102	2022/3/5 14:15:11	187	-160	160	
0102	2022/3/5 14:15:29	189	-160	160	
0102	2022/3/5 14:18:26	200	-160	160	
0102	2022/3/5 14:18:45	210	-160	160	
0102	2022/3/5 14:20:24	235	-160	160	
0102	2022/3/5 14:20:55	236	-160	160	

图 19 预警监测页面

3 钻机井架、底座关键部件光纤光栅应变在线监测系统现场试验

笔者将光纤光栅应变在线监测系统在宝鸡石油机械厂试验场地完成了 7 000 m 钻机井架、底座应变测点的传感器安装调试,并对井架、底座的起升、加载等过程进行应变测试。试验设备主要包括:光纤光栅传感测试系统,光纤光栅解调仪共 16 个通道,每个通道可接传感器 4 只,共计 64 只。光纤熔接机,用于熔接光纤线缆和跳线。点焊机:用于焊接光纤光栅应变计。

井架、底座测试过程分 4 个阶段进行:井架起升工况,最大钩载工况,最大转盘工况以及底座起升工况。测试布点位

置是井架起升过程,共布点 45 个,井架 30 个、底座 15 个。

井架和底座立柱上的贴片应贴在每个行格的中间位置,贴片粘贴位置距 T 字钢翼板边缘、槽钢或角钢边缘 5 mm;井架起升工况测试点编号为 201~214,该测试点只在井架起升时测试;最大钩载工况测试点编号为 101~118;最大转盘工况测试点编号为 301~314;底座起升工况测试点编号为 401~402,该测试点只在底座起升时测试。在施加不同拉力载荷时,本系统在对井架(201 号)和底座(401 号)起升工况下监测点应变测量值分别与载荷值一一对应,记录结果如表 1 所示。将相应数据导入 Excel 表格,得到井架和底座监测点应变测量值与载荷的关系拟合曲线,拟合曲线和线性关系如图 20 所示。通过表 1 中数据及图 2 分析可知,井架(201 号)和底座(401 号)两个监测点的应力随着载荷的增大而增大。其中,井架(201 号)监测点的应变值与施加的载荷值呈较理想的线性关系(拟合程度 99.48%),井架(201 号)监测点的应变值与施加的载荷值的关系可表达为: $Y_{(应变)} = 9.0645X_{(载荷)} - 2.6403$;底座(401 号)监测点的应变值与施加的载荷值同样是呈较理想的线性关系(拟合程度 99.85%),底座(401 号)监测点的应变值与施加的载荷值的关系可表达为: $Y_{(应变)} = 9.9391X_{(载荷)} - 1.6184$ 。

表 1 井架和起升工况下监测点应变测试结果

载荷值/ kN	井架(201 号) 测量值/με	底座(401 号) 测量值/με
0.0	0.0	0.0
5.0	42.1	48.6
8.0	70.5	76.3
10.0	92.1	97.2
12.0	103.5	112.8
15.0	126.4	152.4
18.0	154.7	174.5
20.0	185.5	201.7
22.0	191.3	215.5
25.0	231.2	246.6

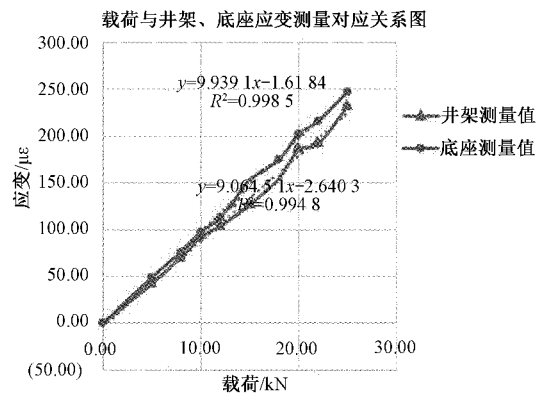


图 20 井架和底座监测点应变测量值与载荷的关系拟合曲线图

通过井架(201)号和底座(401)号两组监测点应变测量值可知,本光纤光栅应变在线监测系统可以实现对井架起升工况、底座起升工况下实施不同载荷时进行应变状态监测,系统运行平稳,测试数据准确可靠,线性拟合程度高。现场试验如图 21~23 所示。



图 21 底座(401)号光纤光栅应变监测点示意图



图 22 井架(201)号光纤光栅应变监测点示意图

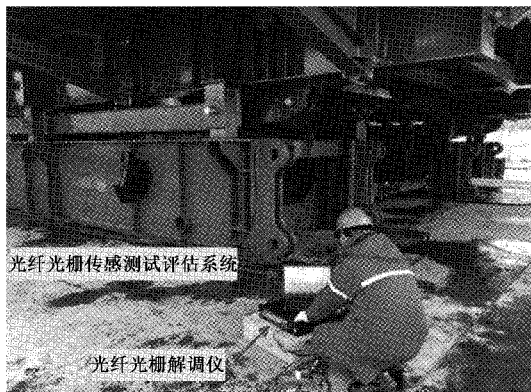


图 23 光纤光栅传感评估系统现场试验

4 结 论

石油钻机井架和底座由于腐蚀、磨损和载荷增加等因素影响会出现形变、扭曲及垮塌,它们的承载能力与油气安全生产密切相关。本文以 7 000 m 自动化钻机的井架和底

座的承载能力为应变监测对象,通过有限元仿真确定了井架和底座的起升工况下的最大应力监测位置,基于光纤光栅应变测量原理,研制了钻机光纤光栅传感测试评估软硬件系统,对钻机关键结构件井架和底座的起升工况的关键受力部位进行应变监测。试验结果证明,钻机井架和底座的应变测量值与施加外力载荷呈线性关系,拟合程度分别是 99.48% 和 99.85%,本系统实现了对 7 000 m 自动化钻机井架和底座的实时动态应力监测,不仅为钻机信息化、数字化奠定了坚实的软硬件基础,而且为钻井装备状态监测以及安全评估业务提供有力支撑。在下一步的研究工作中,可以对井架或底座上的点焊式光纤光栅应变计开展疲劳试验,研究光纤光栅应变计的疲劳特性以及光纤光栅传感器在应变传递效率的稳定性和适用频次。

参 考 文 献

- [1] 徐刚. 基于光纤传感的机械设备动态监测关键技术研究与应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2013,2-7.
- [2] 李京昊. 导管架健康监测与安全评估系统设计与开发[D]. 北京:北京化工大学,2019,1-4.
- [3] 戴珊珊,李仁,马驰. 基于光纤光栅的提升机载荷监测系统[J]. 煤矿机械,2021,42(12):14-16.
- [4] 杨留强,江松元,官继刚,等. 基于光纤磁传感的套损检测技术研究[J]. 电子测量技术,2021,44(4):55-58.
- [5] 陈考奎,李院峰,周次明,等. 基于弱光纤光栅阵列的桥梁应变测量方法研究[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(7):54-57.
- [6] 赵康,刘李杰,周次明,等. 光纤光栅传感技术在井筒变形监测中的应用[J]. 陕西煤炭,2021,40(S2):128-132.
- [7] 凌启东,袁冠,王敏,等. 基于信息融合的开放式空气质量监测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(5):149-156.
- [8] 单一男,马智锦,曾旭,等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(4):1-9.
- [9] 许爱荣,师晓晓,薛佳男,等. JJ80-29W 桅型修井机井架强度评估与结构改进[J]. 山东化工,2021,50(8):141-146.
- [10] 左卫东,方太安,周志雄,等. 四单根立柱超深井钻机井架液压辅助起升机理[J]. 石油机械,2018,46(8):1-5.
- [11] 黄志强,纪苏丹,张波,等. 基于测试与有限元仿真的海洋井架安全评定[J]. 机械强度,2016,38(4):721-728.
- [12] 薛兆康. 油气井下光纤温度压力传感器的研究[D]. 长春:吉林大学,2021,30-45.
- [13] 王冰,王伟,马嘉双,等. 空芯光纤多模干涉型温度传感器[J]. 电子测量技术,2021,44(1):169-172.

- [14] 卫建华,徐薇,刘文月,等. 低压电网监测系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2020,39(1):118-122.
- [15] 刘明尧,刘泉,孙洋,等. 套管井下压力光纤光栅测量方法研究[J]. 石油机械,2016,44(9):70-79.
- [16] 蒋飞,邱雷. 基于压电导波的结构冲击监测软件设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2021,39(4):82-88.
- [17] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等. 基于时频混合特征提取算法的光纤传感信号识别研究[J]. 电子测与仪器学报,2021,34(9):153-159.
- [18] 赵文婧,秦刚,陈忠孝,等. 多参数智能滑坡检测系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2019,38(10):75-78.
- [19] 马新娜,施文锐. 高速列车状态检测大数据的预警可视化分析研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(7):21-27.
- [20] 刘帅,刘长良,甄成刚. 基于数据分类重建的风电机组故障预警方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(8):1-11.

作者简介

贾登,硕士研究生,工程师,主要从事振动测试、无损检测技术和石油检测仪器研发。

E-mail:jiadeng123@qq.com

骆学理,工程师,主要研究方向为大数据、振动测试、石油钻井装备研发等。

E-mail:luoxuelidri@cnpcc.com.cn