

石油钻井井架安全性评价可视化软件设计

张颖¹, 练章华¹, 周兆明², 周 谧³

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中石油川庆钻探工程公司安全环保质量监督检测研究院, 四川 广汉 618300;

3. 西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500)

摘要: 井架作为石油钻机设备的关键部分, 其承载能力直接关系到整个钻井作业施工的安全, 而现场技术人员难以应用通用计算机仿真软件直接对井架进行力学强度、稳定性和安全评价。针对上述问题, 在 Visual Basic 2010 开发平台的基础上, 通过 APDL 程序语言对 ANSYS 软件进行二次开发, 核心是在不进入 ANSYS 软件界面情况下, 所开发软件能够跟踪 ANSYS 求解器的整个运行过程, 提取相关的计算结果数据和 ANSYS 图形显示数据。运用开发的钻机井架安全性可视化仿真软件可以直观显示井架各个部位的应力、应变和位移云图, 也可以提取关键位置点的最大应力、应变和位移数值, 为井架安全性评价提供简便而可靠的手段。利用上述软件开发成果对现场井架安全性评价, 分析了井架的危险点位置、最大承载能力及井架的失稳状态, 结果表明, 上述软件可以为石油井架安全性评价提供依据。

关键词: 井架; 二次开发; 可视化; 安全评价

中图分类号: TE319 **文献标识码:** B

Visual Software Design of Derrick Safety Evaluation

ZHANG Ying¹, LIAN Zhang-hua¹, ZHOU Zhao-ming², ZHOU Mi³

(1. State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China;

2. Safety Environment Quality Supervision and Testing Research Institute, CCDC, Guanghan Sichuan 618300, China;

3. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610051, China)

ABSTRACT: As the key part of drilling equipment, the safety evaluation of derrick is close related to the safety of drilling operation. However, technicians in the field can hardly master and apply ANSYS software to mechanical, stability and safety evaluation. A visual simulation software of derrick was developed in this paper by making ANSYS with secondary development based on the Visual Basic 2010 platform. The software can track the whole running process of ANSYS solver directly, and extract the calculating result data and graphic of ANSYS data, but not enter the ANSYS software interface. A finite element model library of four kinds of K type derricks was established in the software. And the stress, strain and displacement nephogram of all parts of derrick can be visually displayed and the maximum stress, strain and displacement of the key place can be extracted in development software. Now the software has been widespread used in field safety evaluation of derrick.

KEYWORDS: Derrick; Secondary development; Visualize; Safety evaluation

1 引言

石油钻井井架在勘探开发油气藏、开采石油、天然气钻井过程中起着重要作用。其安全性能直接关系到整套钻机

系统的安全生产。然而钻机井架大多数在野外比较恶劣的条件下使用, 在长期使用过程中, 钻机井架都存在着不同程度的变形、损伤和腐蚀等缺陷, 有的井架腐蚀相当严重, 使得井架的力学性能急剧降低, 导致井架的承载能力无法满足钻井工况要求。一旦钻机井架发生事故, 将会给石油钻井工业带来巨大的经济损失, 甚至会造成大量的人员伤亡。因此准确评估钻机井架的安全承载能力, 是保证钻井安全进行的重

要措施。

目前国内外许多学者在钻机井架安全性能评架中做了许多的研究工作。韩东颖、李子丰^[1]提出基于震动参数来诊断钻机井架结构安全承载能力的方法。刘金梅^[2,3]针对钻机井架的结构特点和存在的损伤形式,提出了损伤修正函数的概念,建立了钻机井架极限承载能力仿真计算模型。万夫^[4]针对现役井架现场测试数据的基础上,编制了一套井架承载能力评估软件。薛继军、胡军等人^[5-8]应用有限元软件对钻机井架建立了其有限元模型,分析了井架的固有频率及振型,为评价钻机井架的安全性提供了理论方法。国外学者^[9,10]针对海洋钻井平台所受极端风载作用下,分析了钻机井架的振动频率以及振型,为海洋钻机的优化设计提供理论指导。目前商用有限元软件(称为CAE软件)较多,除了ANSYS软件外,还有ABAQUS软件、Marc软件、ADINA软件、SAP软件等均可用于石油钻机井架的强度问题、稳定性和安全性问题的评价。这些CAE软件,使用人员必须具备专门的数学、力学、有限元法以及工程背景知识才能正确使用,而且其建模过程非常复杂,操作命令繁多,对于现场工程师们很难具备相关的专门知识和使用这些CAE软件的能力。因此前人对井架安全性分析主要集中依靠CAE软件,而本文专门针对油田现场井架安全性评价的工程师们,在Visual Basic 2010和ANSYS软件解算器内核的基础上,二次开发了一套石油井架可视化仿真安全评价的专用软件平台,并建立了各种井架专门的基本有限元模型库。现场工程师只需简单输入或修改井架的基本参数,即可方便地、现场实时地对现有在役井架进行力学强度分析、稳定性和安全性分析,并可视化仿真显示井架的评价结果,为现场井架安全监督人员和现场工程师们提供了简便、可靠而实用的手段和方法。

2 钻机井架强度仿真分析原理

石油钻机井架安全性评价分析主要分为井架结构静力学分析和模态分析两个模块。静力学分析主要关注井架在极限承载能力。模态分析主要计算井架固有频率。

2.1 井架结构的静力学分析

井架的静力学分析主要计算在大钩载荷作用下,井架部件上的位移和应力、应变大小。在静力学分析的有限元推导过程中,应用了弹性力学的3个基本方程(几何方程、物理方程和平衡方程)以及虚功原理^[14]。

几何方程是描述的几何量应变和位移之间关系的方程。由经典弹性理论,小变形情况下的集合关系,即位移-应变关系

$$\{X\} = [L]\{u\} \quad (1)$$

式中 $\{X\}$ 为正应变,即井架梁单元每单位长度的伸缩量; $[L]$ 为微分算子; $\{u\}$ 为井架结构内任一点的位移向量。

设 $\{u\}^e$ 为单元节点 e 的位移向量,选定位移函数后,在单元内部和边界上,假设满足位移协调条件的插值函数矩阵为 $[N]$,则单元体内的位移为

$$\{W\} = [N]\{u\}^e \quad (2)$$

由式(1)、式(2)得

$$\{X\} = [L][N]\{u\}^e = [B]\{u\}^e \quad (3)$$

式中 $[B]$ 为应变矩阵。

物理方程是描述应力分量与应变分量之间关系的方程,这种关系与材料的物理特性有关。对于几何各向同性的线弹性材料,应力-应变关系的矩阵形式为

$$\{e\} = [D]\{X\} \quad (4)$$

式中 $\{e\}$ 为正应力, $[D]$ 为弹性矩阵。

而平衡方程是弹性体内部必须满足的条件,其数学表达式为

$$[L]^T\{e\} + \{q\} = 0 \quad (5)$$

式中 $\{q\}$ 为体积力。

虚功原理是力学中一个普遍的能量原理。其数学表达式为

$$\int_V W\{X\}^T [e] dV = W\{u\}^T \{P\} \quad (6)$$

式中 V 为弹性体的体积。将式(3)与式(4)带入式(6),建立单元刚度矩阵,将各单元刚度矩阵组合,可以得到井架整体的刚度方程为

$$[K]\{u\} = \{P\} \quad (7)$$

式中, $[K]$ 是单元刚度矩阵, $\{P\}$ 为单元节点载荷向量。

引入井架结构的约束条件,对式(7)进行求解,可以得到井架各节点的位移,进而计算出井架结构梁单元的应变和应力。

2.2 井架结构的整体模态分析

系统的结构模态从数学概念出发,是振动系统特性的一种表征,它是由系统的特征值和特征向量所确定的^[7]。井架模态表示无阻尼自由振动时的井架的固有振动频率及其相应的固有振型。根据井架的实际工作状态,其无阻尼自由振动的动力平衡方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (8)$$

对于弹性体其自由振动可以分解成一系列的简谐振动的叠加。其形式为

$$\{u\} = \{\delta\} \sin \omega \tau \quad (9)$$

将其带入上述平衡方程式可得

$$(-\omega^2 [M] + [K])\{\delta\} = \{0\} \quad (10)$$

按自由振动理论, n 阶自由度系统的自由振动方程式应该有 n 个固有频率 ω_i ,并且可以由频率行列式决定,也即

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (11)$$

求得频率后,再把 ω 带入式(11)即可求出振动模态 $\{\delta\}$ 。

3 井架安全性评价可视化软件

3.1 K型井架有限元模型库建立

由于钻机井架的结构较为复杂,其有限元模型建立工作量较大,为此本文根据油田现场常用的K型井架的结构尺寸和结构特点,建立了专门的石油钻机井架有限元模型库,

方便现场工程师们直接调用,或仅输入简单的基本参数即可完成 ANSYS 前处理建模。

根据油田现场常用的 3000m、4000m、5000m 和 7000m 钻机 K 型井架结构尺寸,用 APDL 语言(ANSYS 参数化设计语言)建立 4 种 K 型井架有限元模型库。图 1 为某一井架有限元模型库中调出的模型,图 1 中 A、B、C 和 D 点为井架底座固定约束的关键点, F 为井架所承受的极限载荷。为了方便软件使用人员对有限元计算分析结果数据的查看,根据井架结构,将整个井架从下到上分为 V 大节,其中第 II ~ IV 大节又分为上下两个小节,见图 1 所示。

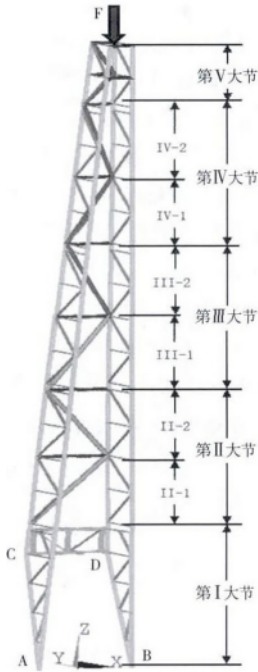


图 1 某 K 型井架有限元结构示意图

井架有限元模型中杆件采用 ANSYS 软件中具有 6 个自由度的空间梁单元 BEAM188,梁截面属性根据石油钻机井架杆件截面形状可分为 H 截面、圆环截面、双角钢截面和工字梁 4 种截面形状,见图 2 所示。图 2(a) 是当井架杆件横截面为 H 梁截面时的尺寸参数图,其中 a 是 H 梁高度, b 为宽度, t_1 是梁板厚度, t_2 是肋板宽度;图 2(b) 是当井架杆件横截面为圆环截面时的尺寸参数图,可设置参数为内半径 R1 和外半径 R2;图 2(c) 是当井架杆件横截面为双角钢时的尺寸参数图,可设置参数分为高度 a、宽度 b 和梁板厚度 t;图 2(d) 是当井架杆件横截面为工字梁时的尺寸参数图,其中工字梁高度为 a,宽度为 b,肋板宽度为 t_2 ,导圆半径为 t。图 2 中梁截面的基本尺寸均包含在有限元模型库中。现场工程师可以根据井架出厂规格参数或井架实测值输入软件,见图 3 所示,程序自动生成井架有限元模型。

3.2 基于 ANSYS 二次开发的可视化软件

基于 ANSYS 提供的参数化设计 APDL 语言,本文采用

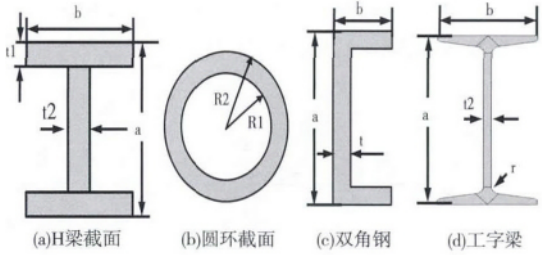


图 2 梁截面形状

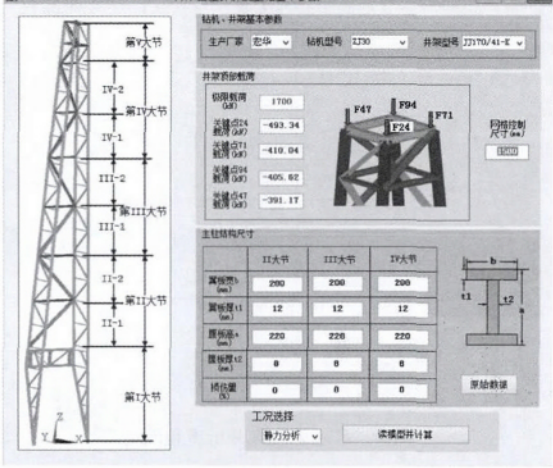


图 3 钻机井架参数输入界面

Visual Basic 2010 实现对 ANSYS 的二次开发^[11,12]。二次开发的软件不需要进入 ANSYS 软件复杂的界面系统,只需要直接调用 ANSYS 的解算器内核。使用 Visual Basic 2010 作为开发平台,编写钻机井架可视化平台的软件参数,输入的主要界面见图 3 所示。图 3 中根据现场实际井架型号,调出井架有限元模型库,钻机井架可视化软件根据用户输入的相关参数,将自动生成 APDL 代码直接送入 ANSYS 的解算器,进行仿真计算。二次开发软件调用 ANSYS 解算器内核的关键代码如下:

```
1) procID = "...\\ANSYS.exe" & " -b -p -i " & MediaFile & "-o" & OutputFile
```

```
2) wait( procID , AppWinStyle.Hide)
```

其中代码中“-b”是设置 ANSYS 的 Simulation Environment 为 ANSYS Batch 模块,“-p”是设置 ANSYS 为 License 对应的多物理场(Multiphysics) 模块,“MediaFile”是井架有限元模型库文件,“OutputFile”是井架模型库文本文件,用于模型数据检查。

wait() 也是 ANSYS 软件二次开发的核心模块之一,wait() 模块主要功能为跟踪 ANSYS 解算器的运行全过程,同时获取用户需要的和关心的关键数据,同时等待 ANSYS 内核解算器运行结束,并转入二次开发的钻机井架可视化仿真系统平台,用户可以任意显示可视化仿真图形结果和数据结

果。其中 AppWinStyle.Hide 是后台调用程序命令,使整个软件运行有限元计算分析过程中,并不显示 ANSYS 界面。

钻机井架可视化仿真分析软件的基本流程见图 4 所示。

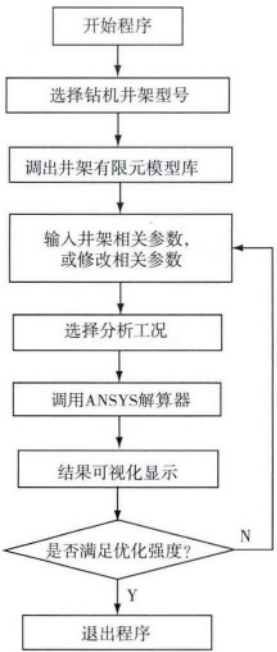


图 4 可视化仿真分析流程图

运行本文开发的钻机可视化仿真系统软件的基本过程为:

- 1) 有限元实体模型: 选择所需分析的 K 型井架型号, 软件自动读取相应井架型号的有限元基础模型。
- 2) 基本参数设置: 选取钻机井架杆件的截面形状及相应尺寸参数输入, 以及是否考虑井架损伤计算模型。
- 3) 工况分析选择: 针对所需分析工况, 选择静力分析或模态分析, 在静力分析工况下, 输入钻机井架所承受的极限载荷。
- 4) 调用 ANSYS 解算器内核: 根据以上设置, 系统程序自动生成 APDL 代码, 并送入 ANSYS 解算器, 进行后台化运行计算。
- 5) 计算结果可视化显示: 在静力分析结果中, 软件自动提取井架各个部位应力、应变及位移的云图结果, 能够直观反映井架每个部位的应力、应变和位移变化, 并以表格形式输出井架关键部位每个小节的应力、应变及位移最大值和最小值。在模态分析结果中, 软件输出井架的前 6 阶模态振型图形和频率数据。
- 6) 计算结果强度校核: 根据所选用钻机井架类型和结构参数, 判断钻机井架在相应工况下是否能够安全服役。
- 7) 退出程序: 钻机井架可视化仿真软件在程序运行完毕后, 可以将整个井架可视化仿真结果自动生成完整的 word 文档分析报告。

4 钻机安全评价可视化软件的应用

以某生产厂家生产的 ZJ30 型钻机 JJ170/41-K 型井架为例, 对钻机井架可视化仿真系统软件进行应用分析。该型号钻机为 3000m 钻机, 最大设计大钩载荷为 170t, 井架主体高度为 43m, 立柱截面采用 H 型钢, 钢架材料选用 Q345 钢, 其屈服强度为 345MPa, 材料弹性模量为 2.06GPa, 密度是 7800kg/m³, 泊松比为 0.3, 其余结构数据均在有限元模型库中。

4.1 静力学分析

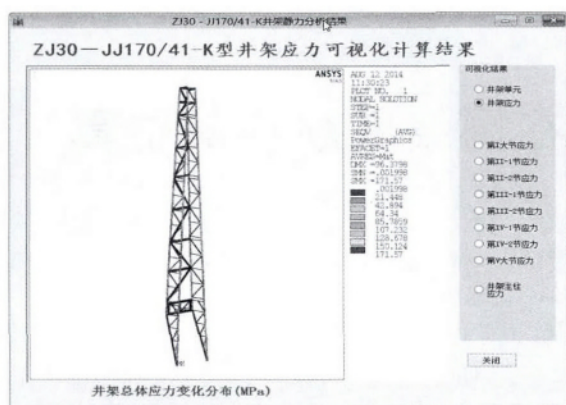
应用本文所开发的软件, 对无损伤井架在极限载荷 170t 作用下进行静力学分析。在图 3 中选择静力分析, 并读入 ZJ30 模型库, 二次开发的软件将模型库直接送入 ANSYS 解算器, wait() 模块自动跟踪 ANSYS 解算器的运行过程, 并自动提取用户所需的数据并自动保存, 且这些有限元计算结果数据自动导入可视化软件, 供使用者查询。在静态分析工况下, 软件可以查看钻机井架各节应力、应变和位移数值云图, 能够直观反映出井架每个部位的应力、应变和位移的变化, 并且软件通过表格形式输出井架各关键位置点的最大应力、最大应变和最大位移数值, 为井架的安全监测提供了理论依据。ZJ30-JJ170/41-K 型井架静态分析结果应力分布云图见图 5 所示, 图 5(a) 是软件可视化仿真结果界面, 当前显示为井架总体应力分布云图, 在软件界面右侧可以自由切换查看井架各节的应力分布云图, 图 5(b) 为钻机井架第 II 大节 II-1 应力分布云图。

ZJ30-JJ170/41-K 型井架各节应力、位移和应变分析计算结果见表 1 所示。从表 1 可以看出井架最大应力和最大应变出现在第 I 大节, 最大应力值为 171.6MPa, 最大位移在井架顶部, 第 V 大节处, 最大位移是 95.8mm。

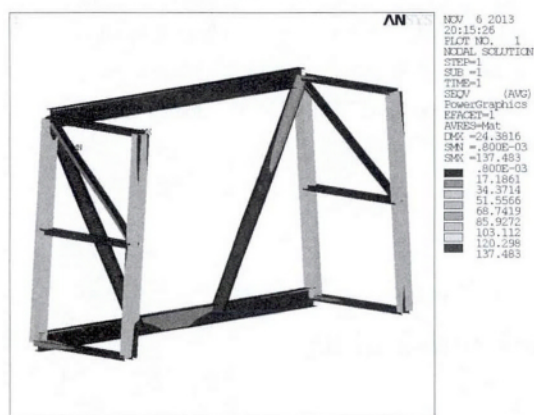
表 1 井架各节应力、位移、应变的最大值

层号	最大应力(Mpa)	最大位移(mm)	最大应变($\times 10^{-4}$)
第 V 大节	95.5	95.8	4.6
第 IV 大节	97.1	80.5	4.7
第 III 大节	104.2	48.5	5.1
第 II 大节	137.5	21.4	5.4
第 I 大节	171.6	4.4	8.3
全井架	171.6	95.8	8.3

钻机井架由于长期使用, 井架杆件会受到不同程度的磨损。在软件主界面输入钻机井架梁截面磨损系数, 对损伤井架在极限载荷作用下进行静力学分析。表 2 为不同损伤量下, 井架各大节的最大 Von-Mises 应力值。从表 2 可以看出, 在井架没有损伤情况下, 在静载荷 170t 拉力作用下, 最大 Von-Mises 应力出现在第 I 大节上, 为 171.6MPa。随着损伤量的增大, 井架底部第 I 大节上最大 Von-Mises 应力几乎没有变化, 但第 II~IV 大节上的最大 Von-Mises 应力显著增加。当损伤量达到 25% 时, 井架第 II 大节的最大 Von



(a) 井架总体应力分布云图



(b) 井架第Ⅱ大节Ⅱ-1应力分布云图

图5 钻机井架安全性评价可视化软件计算结果显示

- Mises 应力值为 200.4MPa。

表2 井架不同损伤量下的最大 Von - Mises 应力值

损伤量 (%)	第Ⅰ 大节	第Ⅱ 大节	第Ⅲ 大节	第Ⅳ 大节	第Ⅴ 大节	整体
0	171.6	110.2	104.2	97.09	95.54	171.6
10	170.6	139.7	136.2	126.1	94.42	170.6
20	169.6	177.5	174.6	161.6	93.51	177.5
25	168.8	200.4	197.9	183.1	93.05	200.2

而在实际井架安全评估过程中,为了安全起见,往往会有一定的安全余量。井架的最大许用应力为 σ_n :

$$\sigma_n = \frac{Y_p}{n} \quad (1)$$

式中 σ_n 为井架杆件最大许用应力,MPa; Y_p 为井架杆件的屈服强度 n 为安全系数。

根据中国石油集团公司《钻机、修井机设备评估工作规范》中井架强度校核标准,井架安全系数值取 $n = 1.67^{[13]}$ 。针对 JJ170/41 - K 型钻机井架,其屈服强度为 345MPa,那么井架杆件的最大许用应力 $\sigma_n = 206\text{MPa}$ 。从表2可以看出,当损伤量达到 25% 时,井架就会出现安全隐患。因此,当井

架损伤量超过 25% 后,就要引起现场安全监督人员和钻井工人的重视。

4.2 模态分析

为了判断和评估钻机井架的安全性,需要全面了解井架的固有振动特性。利用钻机井架可视化仿真系统软件对 JJ170/41 - K 型井架进行模态分析。当 ANSYS 解算器运行结束后,该软件可以自动提取出井架的前 6 阶固有频率以及相应的振型图。井架固有振动频率计算结果见表3所示,一般工程实际应用中,通常只考虑模型的前 3 阶振态,井架前 3 阶振型图见图6所示。可以看出,第1阶振型为钻机井架的左右摇摆振动,其固有频率为 1.55Hz,振型图见图6(a)所示;第2阶振型为钻机井架顶部绕 Z 轴旋转运动,其固有频率为 2.15Hz,振型图见图6(b)所示;第3阶振型主要表现为井架在水平方向和纵向上的振动,其固有频率为 3.93Hz,振型图见图6(c)所示。

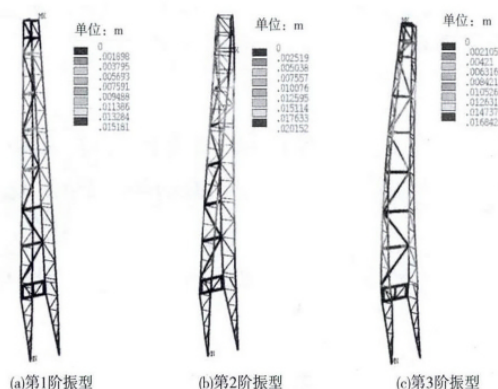


图6 JJ170/41 - K 型井架前3阶振型图

表3 井架前6阶固有频率

阶数	固有频率(Hz)
1	1.55
2	2.15
3	3.93
4	5.51
5	5.69
6	6.09

5 结论

1) 本文所开发的钻机井架可视化仿真系统软件,可以直接调用 ANSYS 解算器内核,直接进行有限元仿真模拟计算,无需进入 ANSYS 软件系统截面,为现场工程师提供了简便的分析手段。

2) 软件中建立了 4 种常用的 K 型井架模型库,这些模型库包含了井架的基本结构参数, (下转第 360 页)

- [12] A Mahboobin, et al. Sensory adaptation in human balance control: lessons for biomimetic robotic bipeds [J]. Neural Networks, 2008, 21(4): 621–627.
- [13] V Santos, et al. Development of a hybrid Humanoid Platform and Incorporation of the Passive Actuators [C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE, 2010: 679–684.
- [14] X F Zhou, et al. Stability Analysis of Biped Walking [J]. Advanced Materials Research, 2012, 569: 420–427.
- [15] 汤中华, 刘莉, 陈恩. 类人机器人耦合步态规划与实验研究 [J]. 机械设计与制造, 2013, (1): 52–54.
- [16] 倪振华. 振动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [17] W Xu, R Xiong, J Wu. Force/Torque – Based Compliance Control for Humanoid Robot to compensate the landing impact force [C]. 2010 First International Conference on Networking and Distributed Computing. IEEE, 2010: 336–340.

- [18] 黄建松, 汪玉, 李政年. 舰员抗冲击鞋性能试验及评估方法研究 [J]. 中国生物医学工程学报, 2012, 31(3): 466–470.

[作者简介]



毛伟伟(1985–), 男(汉族), 安徽省亳州市人, 硕士研究生, 主要研究领域为主动振动控制、机器人。

周 烽(1977–), 男(汉族), 湖南省邵东县人, 讲师, 主要研究领域为运动控制、机器人、主动振动控制。

李 军(1987–), 男(汉族), 安徽省利辛县人, 硕士研究生, 主要研究领域为机器人、硬件设计。

梁 青(1961–), 男(汉族), 山东省荣城市人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为飞行器控制、主动振动控制、机器人。

(上接第 321 页)

梁截面尺寸参数以及井架材料力学特性参数, 根据实际需要, 现场工程师可以对模型直接进行修改、补充和完善, 减少了有限元建模环节。

3) 应用本文所开发的软件, 对 JJ170/41–K 型井架进行应用分析。得到了无损伤井架和有损伤井架在极限载荷作用状态下的应力分布, 计算结果表明, 当井架损伤量超过 25% 后, 井架将可能存在安全隐患。同时, 该软件得到了井架的前 6 阶固有频率和相应的主振型图。

4) 通过本文所开发的钻机井架安全评价可视化软件, 可以有效避免了 ANSYS 使用的技术门槛, 有效提高 ANSYS 使用效率, 可以适用于广大工程技术人员的使用。

参考文献:

- [1] 韩东颖, 等. 基于振动参数的钻井井架安全承载力评定 [J]. 石油钻探技术, 2006, 34(6): 48–51.
- [2] 刘金梅, 周国强, 韩国有. 考虑损伤的石油井架极限承载性能仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1781–1788.
- [3] 刘金梅, 周国强, 郭金玉. 基于弹塑性全过程的在役井架承载性能仿真 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(10): 143–148.
- [4] 万夫, 段明成, 郑勇. 现役井架可靠性测评分析系统 [J]. 天然气工业, 1999, 19(5): 57–60.
- [5] 薛继军, 等. CAE 技术在井架设计中的应用 [J]. 应用力学学报, 2004, 21(1): 134–138.
- [6] 胡军, 唐友刚, 李士喜. 海洋钻机井架振动检测及评估—以 ZJ50/3150DB 钻机为例 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 117–120.
- [7] 邹龙庆, 等. 基于 I–DEAS 的石油井架模态分析 [J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 59–61.

- [8] 许仁波, 等. K 型井架有限元仿真分析及检测方案优化 [J]. 石油机械, 2014, 42(1): 14–17.
- [9] S Gomathinayagam, C P Vendhan, J Shanmugasundaram. Dynamic effects of wind loads on offshore deck structures—A critical evaluation of provisions and practices [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84: 345–367.
- [10] George Ross, et al. Wind Testing of a Dual Derrick [C]. OTC–24262–MS, Offshore Technology Conference, SPE, 2013.
- [11] 练章华. 现代 CAE 技术与应用教程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [12] Bill Sheldon, Billy Hollis, Kent Sharkey. Professional Visual Basic 2010 and .NET 4 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [13] 王孟法, 等. 提高 JJ170/41–K 井架承载能力的方法及安全评定 [J]. 石油矿场机械, 2012, 41(4): 53–56.
- [14] 杨林, 许丹丹. 基于有限元法的井架结构分析 [J]. 机械工程与自动化, 2009–2: 43–47.



[作者简介]

张 颖(1988–), 男(汉族), 四川自贡人, 博士研究生, 主要研究方向为计算机仿真、油气井工程安全及管柱力学等相关方面研究工作。

练章华(1964–), 男(汉族), 四川自贡人, 教授, 博导, 主要研究方向为 CAD/CAE/CFD、套管损坏机理、管柱力学及射孔完井等教学与科研。

周兆明(1983–), 男(汉族), 河南人, 工程师, 主要从事石油井架安全承载力评定及损伤研究。

周 谧(1990–), 女(汉族), 河南人, 助教, 主要从事钻头设计及石油机械测试等研究工作。