

摘 要

井架作为石油钻机的重要组成部分，用于安放天车、游车等起升设备，承受着各种作业载荷，因此，有关井架的设计和结构分析一直是石油机械研究的重要课题。

首先对国内外钻机井架进行了研究，对同类产品进行了比较分析，对产品设计要求进行了全面分析，完成了 ZJ50/3150LDB 钻机井架的设计方案，确定了井架的基本参数、材料、整体结构型式、井架的主要结构以及井架的制造工艺要求。

其次，基于 ANSYS 软件，研究了有限元仿真方法在 ZJ50/3150LDB 钻机井架结构分析中的应用。通过对井架载荷和受力的研究分析，建立了井架有限元分析模型，对井架静态状况下的四种典型工况进行了有限元仿真，并根据仿真分析结果进行了强度校核和优化设计；对井架起升过程进行了有限元仿真分析，研究了井架不同起升角位置以及起升用人字架的起升强度，进行了强度校核和优化设计；建立了井架稳定计算模型，进行了有限元仿真分析，研究了保持井架稳定的临界载荷。

最后，根据井架的设计分析和有限元仿真分析得出了 ZJ50/3150LDB 钻机井架设计合理、安全可靠的结论。

关键词：井架，设计，有限元，ANSYS，结构分析

Design of the ZJ50/3150LDB Derrick and Finite Element Simulation Computation Analysis

Gao Rongxia (Mechanical Engineering)

Directed by Prof. Gao Xueshi

Abstract

As an important component of petroleum drilling machine, derrick is used to placing the lift equipment such as Crown Block, Traveling Block and so on ,and holding different loadings. So, the designing and structural analysis about derrick is always an important theme of the petroleum mining machinery research.

First, through researching the domestic and foreign drilling machine derrick, carrying on the comparative analysis about the similar products and the overall analysis to the product design request, we completed the design of derrick ZJ50/3150LDB, established the basic parameters of the derrick, materials, the overall structure , the main derrick structure of the derrick, as well as the requirements of the manufacturing process.

Second, based on ANSYS software ,we studied the finite element method in simulation ZJ50/3150LDB derrick machine structure analysis. Through the analysis about the derrick load and stress, we build up a derrick finite element analysis model, make a finite element simulation about derrick on the static conditions of the four typical conditions , and analysis of simulation results based on the strength of verification and optimization of the design; Set up well for the process of finite element analysis of the simulation to study the derrick or from different angle as well as the location of the lifting 'A' frame with the lifting strength, and then carry out the strength verification and optimization of the design; And set up a stable model for the finite element analysis of the simulation to study the derrick to maintain the stability of the critical load.

Finally, we obtain safe and reliable conclusions in accordance with the design of finite element analysis and simulation analysis of the drilling rig derrick ZJ50/3150LDB well-designed.

Key Words: derrick, design, FEM, ANSYS, structural analysis

第一章 绪论

1.1 课题研究的意义

中油特种车辆有限公司是一个集科研开发制造为一体的石油装备企业。主要产品为石油专用特车、钻采机械。近几年来,随着国内外石油勘探开发力度的加大,该公司在研发车载钻修机的成熟经验基础上,加快了石油钻机产品的开发步伐,先后研制出了25K、40J产品。2007年,为进一步满足市场需要,该公司提出了开发ZJ50/3150LDB钻机的任务,并提出了“先进、可靠、安全、方便、经济”的设计原则,要求产品设计制造符合功能要求和HSE要求,达到国内同类产品领先水平。

井架作为石油钻机的重要组成部分,用于安放天车、游车等起升设备,承受着各种作业载荷,因此,有关井架的设计和结构分析一直是石油机械研究的重要课题。为完成ZJ50/3150LDB钻机设计任务,确保产品设计质量,特选定此课题,并通过本课题的研究进一步提升公司产品设计水平,为公司的发展提供更加有力的技术支持。

1.2 国内外研究的现状

1.2.1 钻机井架的结构类型

目前国内外钻机井架主要有塔型、前开口型、A型、桅形等结构型式^{[1][2]}。其主要特点如下:

(1) 塔型井架

塔型井架主体为塔形钢结构,采用螺栓连接,整体稳定性好,承载能力大。由于塔型井架多为单杆组装结构,安装拆卸所费时间多,且为高空作业,陆地中深井及深井钻机已趋向淘汰此种类型井架,但由于它具有很宽的底座基础支持和很大的组合截面惯性矩,因此其整体稳定性最好。这一特点使塔型井架成为陆地超深井钻机井架和海洋钻机井架的最主要的一种结构型式。

(2) 前开口型井架

前开口型井架主体为“K”型截面,大腿为片状桁架结构,各段间采用销子连接。井架低位安装,利用人字架依靠绞车动力整体起放。K型井架拆装方便,整体稳定性强,主体内部开档大,为提升钻具提升了较大空间,是目前国内外陆地中深井钻机主要采用的井架型式^[3]。

(3) A型井架

A型井架大腿截面有矩形或三角形等形式,各段间采用销子连接,井架低位安装,

利用人字架依靠绞车动力整体起放。A 型井架承载能力和局部稳定性好，安装运输比较方便，适用于中小型钻机采用。

(4) 桅形井架

桅形井架主要作为车装钻机井架和修井机井架。工作时井架向井口方向倾斜，靠钢丝绳保持井架的稳定和承载能力。

1.2.2 钻机井架的结构分析

石油钻机井架是钻机的重要承力部件之一，承受着主要的载荷，其钢结构井架杆件多、连接复杂，受力环境恶劣，使用工况复杂，因强度不够、失稳而破坏的情况在国内外都曾发生过^[4]。

为合理设计钻机井架，需对井架进行静态分析和动态分析。静态分析主要研究钻机井架在受外载荷作用后其变形、应力、应变的大小，从而判断井架静力强度是否满足设计要求；动态分析，主要是进行井架的模态分析，根据计算出的模态合理确定钻机工作转速，使钻机在工作中避免发生共振现象，为钻机井架设计提供理论依据。

随着我国钻机种类的不断扩充和生产规模的不断扩大，钻机井架的分析计算越来越成为一项重要的设计任务。传统的计算方法相当繁琐，并且计算时间长，计算误差大。当今，先进的 CAD 软件可实现三维实体设计，捕捉设计意识，快速得到产品几何模型。但是，真正能提高产品质量，改善产品性能，降低产品成本，缩短产品开发周期还要靠计算机辅助工程技术，CAE 技术是 CAD 技术向纵深方向发展的结果^{[5][6]}。

目前，CAE 技术涉及工程和制造业信息化的所有方面，主要包含以下几个模块：工程数值分析模块，运动学动力学仿真模块、结构优化设计及强度评价模块等^{[7][8]}。应用 CAE 技术对工程或产品进行性能分析和模拟时，一般经历以下步骤(如图 1-1 所示)：

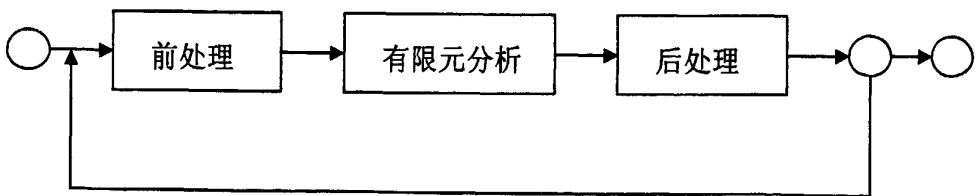


图 1-1 CAE 技术应用步骤

Fig1-1 CAE's application step

- (1) 前处理:用图形软件先对工程或产品进行实体建模,进而建立有限元分析模型;
- (2) 有限元分析:提供丰富的单元库、材料库、载荷及边界条件处理算法,具有有

限元系统组装模块以及静力、动力、振动、线性与非线性等解法库。通过对有限元模型进行单元分析,进行有限元系统组装,进而可以求解有限元方程,给出计算结果;

(3)后处理:根据工程或产品模型与设计的要求,对有限元计算结果进行适当的加工、检查,并以图形方式提供给用户,辅助用户判定计算结果与设计方案的合理性。

CAE 软件是迅速发展中的计算力学、计算数学、相关的工程学、工程管理学与现代计算技术相结合,而形成的一种综合性、知识密集型信息产品。所以它提供了强大的分析功能,对模型进行有限元分析即可得到任意点的应力、应变情况,从而为优化结构布局提供可靠依据。ANSYS 软件目前已成为 CAE 和工程数值模拟的商品软件,是目前 CAD/CAE/CAM 的一个有效分析工具。因此,将有限元技术应用于钻机井架的设计中,不但能提高设计速度,而且使产品重量轻,满足强度、刚度、受压稳定,是目前最有效的一种结构分析方法^{[9][10][11]}。

在井架的计算分析上,针对修井机井架,高学仕等应用ANSYS软件进行了静力分析和可靠性计算,提出了修井机井架的承载分布规律^[12];针对井架实腹式轴心压杆的稳定性计算,杨雄提出了模糊可靠度的计算方法^[13];基于ANSYS 有限元分析软件,结合在役井架及新井架的实际承载工作情况,李夯等对ZJ30型石油钻机K形井架井架的静态力学性能、自振特性、稳定性等进行综合性能分析^[14];根据ZJ40/2250DB型钻机井架及底座的结构特点,邹龙庆等应用有限元分析软件对井架及底座进行了静、动态特性分析^[15];赵庆梅等用振动理论研究了井架结构频率与作用载荷的关系,对现场在用井架模型进行了数位分析,得出了井架作用载荷与固有频率平方之间的线性关系^[16];薛继军等应用有限元分析软件分别对ZJ30/1700CZ型钻机井架在自然状态下和有钩载状态下进行了模态分析,计算得出了井架的前9阶模态频率及相对应的主振型,通过对井架的固有频率与钻机的设计工作转速的比较,对各阶模态主振型的分析,得出了该钻机井架结构设计合理的结论^[17];刘晓嘉等对F320钻机人字架进行了仿真分析^[18]。

1.3 课题研究的主要内容

1.3.1 井架的设计

主要对产品设计要求进行全面分析,对同类产品进行比较分析,完成 ZJ50/3150LDB 钻机井架的设计方案。包括:井架基本参数分析、井架材料选择、整体结构形式选择与确定、井架主要结构选择与确定、井架制造要求。

1.3.2 井架结构的理论分析

重点研究分析井架设计计算的基本原则、有限元法的基本原理，建立井架的有限元分析模型。

1.3.3 井架静力的有限元仿真及技术分析

重点研究四种工况，包括：

(1) 无风载、无立根、最大静载荷下井架强度有限元仿真分析、强度校核和优化设计；

(2) 最大风速不小于 47.8 m/s、无钩载、无立根时井架强度的有限元仿真分析、强度校核和优化设计；

(3) 最大风速不小于 36 m/s、满立根、无钩载时井架强度的有限元仿真分析、强度校核和优化设计；

(4) 最大风速不小于 20.7 m/s、额定钩载、无立根时井架强度的有限元仿真分析、强度校核和优化设计。

1.3.4 井架起升的有限元仿真及技术分析

重点研究井架原始结构起升角为 6° 、 10° 和 15° 三个位置以及起升用人字架的起升强度，进行强度校核和优化设计。

1.3.5 井架整体稳定的有限元仿真及技术分析

主要研究井架稳定计算模型的建立，进行有限元仿真分析，研究保持井架稳定的临界载荷，对井架稳定性进行分析。

第二章 钻机井架的设计

2.1 设计原则

- (1) 遵循“先进、可靠、安全、方便、经济”的设计理念；
- (2) 产品设计制造符合功能要求和 HSE 要求，达到国内同类产品领先水平；
- (3) 符合 SY/T 5609-1999《石油钻机型式与基本参数》规定；
- (4) 符合 API SPEC 4F《钻井和修井井架、底座规范》规定，通过 API 认证。

2.2 设计要求

- (1) 承载能力满足 5 000 m 钻机能力要求；
- (2) 设计匹配井架的二层台；
- (3) 井架低位安装；
- (4) 抗风能力：

非工作状态(无钩载，二层台无立根)	最大风速不小于 47.8 m/s
非工作状态(无钩载，二层台满立根)	最大风速不小于 36 m/s
额定钩载、无立根	最大风速不小于 20.7 m/s
- (5) HSE 设施齐全；
- (6) 符合 API SPEC 4F 要求；
- (7) 设计控制符合 API SPEC Q1 的规定。

2.3 基本参数分析

2.3.1 最大钩载

井架的最大钩载是指死绳固定在指定位置、用规定的钻井绳数、没有风载和立根载荷的条件下大钩的最大起重量。

根据 SY/T 5609-1999《石油钻机型式与基本参数》规定，5 000 m 钻机的最大钩载为 3 150 kN^[19]。

2.3.2 井架高度

井架高度指的是井架大腿支脚底板底面到天车梁底面的垂直距离，但这个参数并不能完全反映井架提供游动系统操作空间高度的指标。为了表明游动系统可上下运动的空间，往往用井架有效工作高度这个指标，井架的有效高度定义为：钻台面到天车梁底面的垂直距离。因此，井架高度可根据钻台上安装的设备及起下钻操作要求确定。

根据计算，井架有效高度定为 44.5 m。

2.3.3 二层台容量

二层台容量是指在二层台内所能靠放的钻杆、油管的数量。通常用一定尺寸的钻杆、

油管的长度表示。

考虑到 5 000 m 钻井深度的要求，二层台立根容量设定为（5" 钻杆 28 m）5 000 m（180 柱）。

2.3.4 最大抗风能力

井架的最大抗风能力是指井架在一定工况下抵抗最大风荷载的能力。

根据 API SPEC 4F 规定，无绷绳井架在无立根时的风载，最大风速不小于 47.8 m/s；有立根时的风载，最大风速不小于 36 m/s，额定钩载、无立根时最大风速不小于 20.7 m/s。

2.4 材料选择

2.4.1 选择原则

合理选用钢材牌号是结构设计的首要任务。钢材的牌号体现了材料的化学成分含量和力学性能指标。其中，钢材的抗拉强度是钢材抵抗被拉断的性能指标，同时还能反映钢材内部组织的优劣，并与钢材的疲劳强度大小密切相关；钢材的伸长率是衡量其塑性性能的一个指标，钢材的塑性性能能使应力集中处的应力高峰平缓，使该截面处的应力分布趋向均匀，能减少钢材脆性断裂的危险和易于冷加工；钢材的屈服点是确定钢材强度设计值的主要指标；硫、磷含量超标可使钢材脆性破坏，含碳量合格则是钢材有良好可焊性的重要保证^[20]。

2.4.2 有关规定

根据 GB 50017《钢结构设计规范》规定，为保证承重结构的承载能力和防止在一定条件下出现脆性破坏，应根据结构的重要性、荷载特征、结构形式、应力状态、连接方法、钢材厚度和工作环境等因素综合考虑，选用合适的钢材牌号和材性；承重结构的钢材宜选用 Q235 钢、Q345 钢、Q390 钢和 Q420 钢。承重结构选用的钢材应具有抗拉强度、伸长率、屈服强度和硫、磷含量的合格保证，对焊接结构尚应有碳含量的合格保证^[21]。

根据 API SPEC 4F 规定，用于井架产品的结构型材或板材的屈服强度应不小于 253 MPa^[22]。

2.4.3 井架主体材料确定

综合考虑产品的使用工况，井架的主体材料选择 Q345B 宽翼缘工字钢。Q345B 材料为低合金结构钢，执行标准为 GB/T 1591。该材料的主要力学性能指标如下^[23]：

抗拉强度 $\sigma_b=470\sim 630$ MPa；

屈服强度 $\sigma_s \geq 345$ MPa（厚度不大于 16 mm）；

伸长率 $\delta_5 \geq 21\%$ ；

冲击功 $A_{kV} \geq 34$ J（+20 °C）

化学成分（wt.%）：

C: $\leq 0.2\%$	Mn: 1.0~1.6%	Si: 0.55%
P: $\leq 0.040\%$	S: $\leq 0.040\%$	V: 0.02~0.15%
Nb: 0.015~0.060%	Ti: 0.02~0.20%	

2.5 整体结构型式选择

2.5.1 钻井工艺对井架的基本要求

（1）要有足够的承载能力，以保证起下一定深度的钻杆柱和下方一定深度的套管柱。

（2）足够的尺寸空间。井架高度越高，起下的立根长度越长，可节省时间；井架的上下底应有必要的尺寸，以安装天车并保证起下操作时游动系统设备畅行无阻；保证钻台有足够面积，以便于布置设备、安放工具，方便工人安全操作，使司钻有良好的视野。

（3）应保证拆装方便，移运迅速。世界上主要产油区大多集中于人烟稀少、交通不便、自然条件较为恶劣的地区。而目前绝大多数的陆地钻机钻完一口井就需搬家、移运到别处，再钻下一口井。在钻机的使用寿命期内，搬家、拆卸、运输和安装所耗费的时间占了相当大的比例。因此，如何以最少的时间快速高效地移动、运送石油钻井设备，延长钻机的使用寿命，使钻井成本降为最低，成为摆在钻井工程人员面前的关键问题

[24][25][26]

2.5.2 结构型式确定

目前国内外满足 5 000 m 钻机要求的井架多采用前开口型式。该型式结构具有拆装方便、移运迅速、稳定性好的特点，因此本钻机选用前开口结构型式。该井架主要由井架主体、人字架、二层台、梯子、立管操作台、起升装置和井架附件等组成。主要结构见图 2-1。

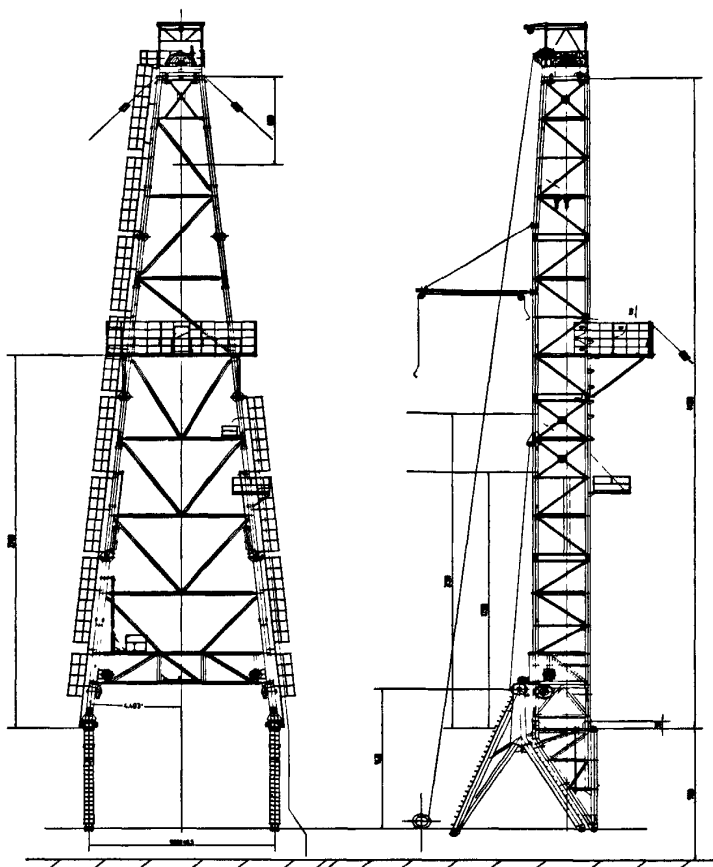


图 2-1 ZJ50/3150LDB 钻机井架结构简图

Fig2-1 ZJ50/3150LDB drilling rig derrick's diagram of structure

2.6 主要结构选择与确定

2.6.1 井架主体结构

(1) 根据井架有效高度 44.5 m 的要求, 考虑产品的运输方便性、结构稳定性和制作工艺的复杂性, 将井架主体分为五段。第 I 段长度为 7.53 m, 第 II 段长度为 11.135 m, III、IV、V 段长度均为 11 m。

(2) 考虑连接强度、刚度及最大钩载 3150kN, 将第 I 段分为左右片架, 左、右片架分为三个桁格; 将第 II 段背部设计为背扇钢架, 其左、右片架分为五个桁格; III、IV、V 段同样分为左、右片架, 每个片架分为四个桁格, 背部有钢架和斜拉杆, 采用销子耳板连接。

(3) 井架设计充分考虑了司钻的视野及操作。顶跨正面 2.1 m, 侧面 2.05 m。

2.6.2 井架二层台

(1) 井架二层台设有三个安装高度, 即: 26.5 m, 25.5 m, 24.5 m, 可供用户选择。

二层台容量为 5"钻杆 5 000 m, 4 柱 10"钻铤, 6 柱 8"钻铤。

(2) 二层台配带 0.5 t 气动绞车, 用于起吊钻杆。

(3) 井架靠近二层台附近的主体及二层台四周安装挡风板, 可减轻井架工操作时遭受的风沙袭击。

2.6.3 配套设施

(1) 死绳固定器固定在司钻对面的井架右大腿内侧, 便于维护操作。

(2) 井架左侧设有通往天车台的梯子, 右侧设有通往二层台的梯子, 配防坠落装置、逃生装置、登梯助升装置。其中, 梯子采用笼梯形式, 更加安全可靠。

(3) 可满足安装顶部驱动装置的要求。

(4) 井架配有死绳稳绳器、快绳稳绳器, 可调套管扶正台, 起升缓冲装置, 起放井架用可调式高支架、低支架和立管安装座等。

2.6.4 井架主体安装及起升

(1) 前大腿安装在左右基座上, 底跨 9 m。

(2) 井架与人字架用球铰螺栓、螺纹顶丝和定位座连接。

(3) 人字架前支腿设计安装在底座后基座上, 形成稳定的三角形结构。人字架(距台面)高度 3.16 m。

(4) 井架左右高度采用加垫片调节, 井架前后用井架液压缓冲液缸和人字架的螺纹顶丝进行调节, 以便使大钩对中井眼。

(5) 井架进行低位水平安装, 通过人字架, 整体起放井架。

(6) 底座与井架通过销轴连接整体起升, 动力采用钻机自身动力。

(7) 在人字架上有一导向滑轮, 在井架起升时快绳绕过该滑轮, 对快绳起支撑和导向作用。

(8) 当井架起升到位时, 由固定在人字架上的缓冲液缸来完成缓冲作用, 同时也由它来完成井架下放初始顶推作用。

(9) 井架起升情况见图 2-2。

2.7 制造工艺要求

2.7.1 总体要求

制造企业应建立符合 API SPEC Q1 要求的质量管理体系。

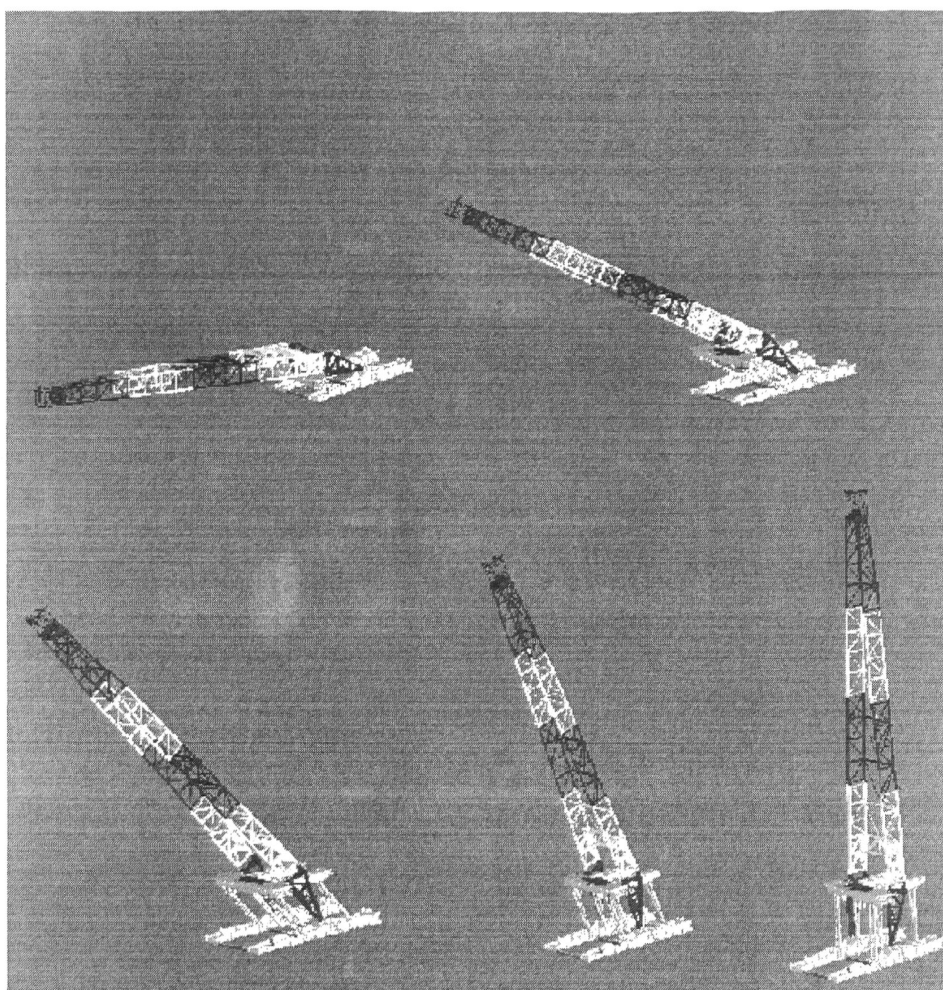


图 2-2 ZJ50/3150LDB 钻机井架起升情况简图

Fig2-2 ZJ50/3150LDB drilling rig derrick jack up unit

2.7.2 主要质量控制内容

井架制造质量控制要求覆盖 API SPEC 4F 要求，重点包括：

- 1) 关键原材料的力学性能、化学成分符合标准要求并经确认和控制；
- 2) 关键件的焊接人员、焊接规范、焊接材料应符合要求并经确认和控制；
- 3) 无损检测人员、无损检测规范应符合要求并经确任和控制。

2.8 有限元仿真分析要求

2.8.1 井架静力分析

- (1) 无风载、无立根、最大静载荷下井架强度计算分析；
- (2) 最大风速不小于 47.8 m/s、无钩载、无立根时井架的强度计算分析；
- (3) 最大风速不小于 36 m/s、满立根、无钩载时井架的强度计算分析；

(4) 最大风速不小于 20.7 m/s、额定钩载、无立根时井架的强度计算分析。

2.8.2 井架的起升强度分析

主要分析起升角为 6° 、 10° 、 15° 时的起升强度和人字架的起升强度。

2.8.3 井架的稳定性分析

主要分析井架的失稳载荷。

第三章 井架结构分析的理论基础

3.1 井架设计计算的基本原则

3.1.1 静强度规定

井架的静强度规定是这样的：结构中任何部位的应力如果达到材料标定的屈服强度 f_y ，就必须认为结构已经破坏。

这个规定认为结构中某一部位的应力达到屈服强度，是结构承载的临界状态。按照虎克定律，为保证结构在弹性范围内工作，用概率统计分析方法，对结构材料抗力性能进行统计分析，在一定的可靠度情况下，确定出一个实际应用的材料强度许用值，称为设计强度 f 。

设计强度低于材料的比例极限，当结构的计算应力低于设计强度时，结构就始终处于弹性范围内工作。因此，井架工作的静强度条件为：

$$\sigma \leq f \quad (3-1)$$

式中 σ —构件或结构中的计算应力；

f —材料的设计强度。

3.1.2 稳定性规定

井架的整体稳定性计算的基础是弹性稳定理论。工程使用的计算方法有两种，一种是将格构式井架折算成实腹柱类构件进行稳定计算的理论这算法，现行《钢结构设计规范》采用此方法；另一类是采用计算机计算技术进行井架结构整体有限元稳定计算。

井架结构实际上是柱类构件结构。柱类构件结构是指结构中承受轴向载荷为柱的构件。若载荷的作用线和构件两端截面形心的连线重合为轴心受力杆柱；若载荷作用线和构件两端截面形心的连线平行则为偏心受力柱。另外一种情况是构件承受轴向压力的同时尚有横向载荷作用，称为压弯柱。在井架中多数属于柱类杆件。井架本身也可折算成一个以承受压力载荷为主的柱。在这些柱的工作过程中，可能发生单个柱的失稳破坏，也可能发生结构整体的失稳破坏。柱的失稳或称压杆稳定问题，是指柱或柱类构件在压力载荷增加到某一数值时达到的一种状态。此时，若载荷继续增加，其承载能力将因变形的继续增加而降低，以至破坏，完全丧失承载能力。

图 3-1(a)表示一中心受压柱。当压力 P 值不大时，若有侧向力使柱发生轻微弯曲，离开直线状态，当侧向力撤去之后，柱经过摆动，仍然回到原来的直线状态。继续增大

压力 P ，达到某一数值 P_k 时，如图 3-1 (b) 所示，柱仍保持为直线状态，若有任何微小的侧向力使柱发生轻微弯曲，但当侧向力撤去之后，弯曲变形仍保持不变，不再恢复到原来的直线形状，此时称为柱的稳定临界状态。当 P 超过 P_k 时，柱的弯曲变形迅速增加直至柱的破坏。图 3-1 (c) 的压力-挠度曲线形式描述了柱的失稳过程。

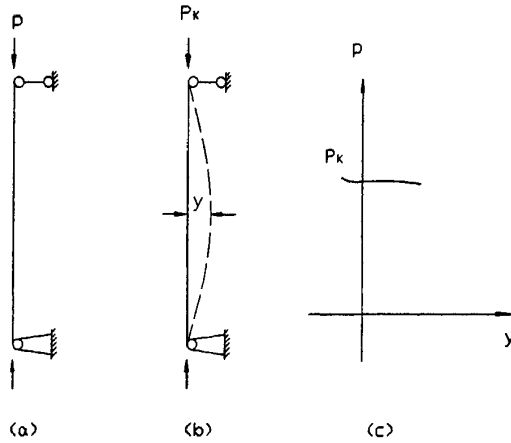


图 3-1 中心受压柱的失稳过程

Fig3-1 Instability process of center stress

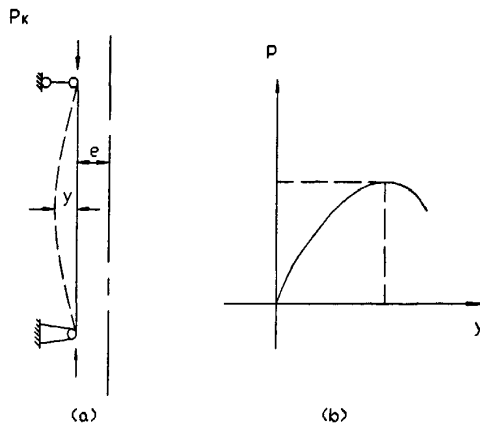


图 3-2 偏心受压柱

Fig3-2 Eccentric stress

偏心受压柱的受力状态如图 3-2(a)所示，作用载荷 P 偏心距为 e ，其失稳过程的压力-挠度曲线如图 2-2(b)所示。当载荷 P 渐增大，柱的挠度也随着逐渐增大。当压力 P 增大到 P_B 时，若想再增加压力 P ，则由于柱的挠度迅速增大而难以实现。 P_B 表示偏心受

压柱的最大承载能力，亦称为偏心受压柱的临界载荷 P_B 。

无论是中心受压柱还是偏心受压柱，在井架结构中是大量存在的，有时往往是它们控制整个结构的设计。因此，稳定性规定为：

$$\sigma_w \leq f_w \quad (3-2)$$

式中 σ_w —稳定计算应力；

f_w —稳定计算的设计强度。

在实际计算中，当杆件的长细比超过一定值而进行稳定计算时， $f_w < f$ ，常以一折减系数 φ 和设计强度的乘积表示稳定计算设计强度。所以稳定条件为：

$$\sigma_w \leq \varphi f \quad (3-3)$$

3.1.3 疲劳强度规定

构件在连续反复的载荷作用下，虽然应力低于构建材料的极限强度，甚至还低于设计强度，也会发生破坏，这种现象称为疲劳断裂。疲劳破坏是一种突然发生的破坏，疲劳断裂的主要特征是在即将破坏之前缺少塑性变形。由于构件破坏之前没有明显的变形，致使及时发现这样的断裂成为一件很困难的事。

确定疲劳强度条件，主要目的是防止结构或构件在使用寿命期间产生疲劳断裂。以往的方法是采用验算最大应力的方法，即：

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma^p] \quad (3-4)$$

式中 σ_{\max} —在反复载荷作用下，构件或连接处的最大应力；

$[\sigma^p]$ —材料的疲劳许用应力，是应力比和应力循环次数的函数。

这种方法也称为安全寿命法，其基础是构件在整个规定的寿命期间不产生疲劳裂缝，结构或构件的安全寿命是可以预期估计的。

近年来发展的许用应力幅法，是伴随着焊接钢结构发展起来的一种疲劳计算方法。这种方法的出发点是：在实际上要假定完全防止产生裂缝是不可能的。通过大量实验研究和工程实践证明：焊接缺陷往往是形成疲劳裂缝和引起疲劳破坏的根源。对焊接结构来说，焊缝附近存在着很大的焊接残余拉应力，其数值可达到材料的屈服强度 f_y 的数量级。因此，疲劳裂缝总是产生于连接部位的焊缝、熔合线的表面和焊缝内部的缺陷处，然后裂缝沿垂直于外力作用方向扩展。实验证明该处的实际应力状态与名义上的最大应

力 σ_{\max} 相差较大。在裂缝的形成和扩展过程中，应力循环的实际状态是由接近屈服强度的最大应力按应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 变化， σ_{\max} 和 σ_{\min} 只是名义上的最大和最小应力，而裂缝扩展阶段的裂缝扩展速率主要由应力幅控制，应力幅 $\Delta\sigma$ 是控制焊接结构的疲劳寿命的最主要的应力变量。

井架绝大多数是焊接结构，其疲劳强度规定为：

$$\Delta\sigma \leq [\Delta\sigma] \quad (3-5)$$

式中 $[\Delta\sigma]$ —许用应力幅度；

$\Delta\sigma$ —计算应力幅度。

3.1.4 动力响应的规定

井架承受的载荷，其中大多数载荷属于动力载荷。但经验和工程实践表明，在大多数情况下动力作用是比较小的，在设计计算中引入一个动载系数，对动力载荷作用进行补偿。这样的方法是可以信赖的。

尽管如此，有些载荷产生的动力作用，仍然在先进的设计和精确的计算中需要考虑。考虑动力作用不仅从结构强度观点出发，有时尚需考虑钻机的操作者和井架工的感觉，避免引起他们的烦躁和不安。这方面的研究成果还很少，真正的解决这一问题需要透彻的了解整个钻井系统包括动力设备、绞车、转盘、钻具、井架及底座等的动力特性。

井架在载荷作用下，其动力反应情况可分为以下几类：

- (1) 由起下钻作业中的动力载荷及钻进过程中的冲击载荷引起结构系统的振动。
- (2) 由大风、阵风及波浪所产生的晃动。
- (3) 由地震引起垂直于地面的振动。
- (4) 由于安装在钻台上的钻盘、绞车及动力机的运转引起的振动和可能的共振。
- (5) 当阵风的脉动频率接近或等于结构的自振频率时，引起的风振。

上述所列问题，在目前的计算方法中，第一类问题通过采用最大钩载作为计算载荷加以补偿；第二类问题对钻井船和半潜式平台上工作的井架、底座，采用加动力惯性载荷的办法加以补偿；对第三、五类问题均引入专门的载荷系数，加入设计载荷；对第四类问题，一直被忽略。在设计新钻机系统时，应充分利用现代计算技术进行钻井系统的振动综合分析，共振问题，跳动问题等引起操作人员不安的问题都应加以考虑。

3.1.5 脆性断裂的规定

构件或构件之间的连接在一定的条件下也可能发生脆性断裂。根据断裂力学分析,构件中经常有宏观裂缝存在。如在焊接过程中可能产生的裂缝,即使原来没有宏观裂缝,其内部的微观缺陷,如夹渣、微孔等也会在外加应力的作用下发展成为宏观裂缝。如果裂缝保持稳定而不发展,或扩展而没达到临界尺寸,构件就能安全使用;如果裂纹失稳扩展,则将导致构件迅速断裂。裂缝处于韧性状态的材料中,裂缝扩展必须有外力作用,如果外力停止做功,裂缝就停止扩展,这种情况的结果往往是由疲劳引起断裂。裂缝处于脆性状态的材料中,裂缝的扩展几乎不需要外力做功,仅裂缝起裂时,从拉应力场中释放出的弹性能即可驱动裂缝极为迅速的扩展。对焊接钢结构,由于有焊接残余应力存在,当裂缝一旦起裂,除构件材料具有一定的断裂韧性,否则的话,它将迅速扩展直至整个构件或连接断裂。

为简化整体结构,单个构件变得粗大时,必须注意防止脆性断裂的发生,特别是处在寒冷地域工作井架,在设计时应当注意:

- (1) 尽量不要采用厚度大于 20mm 的钢板制作构件。
- (2) 采用低碳合金钢或镇静钢。

3.2 有限元法的基本原理

有限元法是要把分析的结构物,离散为有限个形状简单的单元组合体来考虑。井架结构(包括桁架式井架和钢架式井架)是由有限个梁,柱组合成的平面结构或空间结构,因此把梁和柱当作有限单元是很自然的。平面桁架或空间钢架是由几根柱类杆件组成,以每根杆件作为一个单元,那么就可以认为该桁架或钢架是由几个单元组成。

结构受载荷作用产生变形,结构中每个单元也产生变形。在有限元法里,考虑在单元上选定若干个节点(即节点),并假定以这些节点的位移确定各单元的变形状态。

若以梁或柱作的为单元,自然就把杆件两端作为单元变形状态的定义点。因此,柱单元(亦称杆单元)和梁单元的节点通常取杆件的两端。这样,节点位移就是杆件端点的线位移和角位移。在有限元计算里,桁架和钢架的变形状态是由杆件端点的线位移和角位移表示的。

对每个杆件来说,节点是杆件的两端,但如果从结构整体看,节点就是结构中杆件的连接处。对杆件中的内力(力和弯矩),有限元法假定单元中的内力一律通过各个节点传递,单元中的内力可以用节点上的力和弯矩表示。因此,整个结构的内力状态,可以由节点上的力和弯矩表示。在有限元法里,外力也是假定通过节点传到结构上的。因为内力是假定通过节点传递的,如果外力不遵照同样的假定,在考虑内力和外力的平衡

时就不方便了。当结构的杆件作用有均布荷载和集中荷载,可根据材料力学知识,将荷载转化为等效节点力和等效节点弯矩。

3.3 井架的有限元分析模型

3.3.1 井架结构的简化

钻机井架的结构较为复杂,所以一般不完全按井架实际结构进行分析计算。因此,我们对井架的实际结构进行简化,建立一个接近实际结构的力学模型,以此为基础对该井架进行静态分析和动态分析,为此在计算前对井架做如下简化:

(1) 钻机井架的结点均为焊接的刚性结点,井架各杆件不仅承受轴向力,而且也承受附加的弯矩作用。因此可将井架简化为空间刚架结构,其单元为三维梁单元或管单元;

(2) 二层台、天车、井架扶梯、二层台吊绳总成等井架附件,建模时全部去掉。这些附件对井架整体的刚度影响不大。但二层台和天车的质量较大,在建模时将其质量视为集中质量加在相应的结点位置。绷绳总成承受轴向拉力,不考虑弯曲和扭转,建模时按纵向弹簧单元处理;

(3) 简化后的井架主要由Y型底座、井架下体、井架上体和井架托架组成,其连接点看作刚性连接;

(4) 根据井架各部分杆件和梁的截面尺寸不同,把井架各单元划分为4种单元类型,即梁单元、管单元、弹簧单元(位于井架绷绳总成)和质量单元(分布在井架顶部各节点以及井架与二层台的连接处的结点上);井架安装在钻机底座上,由于钻机底座的刚度很大,将其视为刚体,通过四个销子,使井架与底座连接。其中,井架底部两个结点六个自由度均受约束,即不能沿 X 、 Y 、 Z 轴方向产生移动,也不能绕 X 轴、 Y 轴和 Z 轴转动,井架背部两个结点除绕 X 轴的转动未被约束,其余均被约束。

3.3.2 有限元分析的主要类型

目前国内外采取有限元法进行结构分析研究的主要内容有静态分析、井架自振模态分析、稳定性分析、疲劳分析、可靠性分析等。

(1) 静态分析

静力分析常用于求解外加载荷作用下,井架构件的位移、应力、应变和力。通过对井架在给定载荷作用下的计算,求其位移、应力、单元力等的变化。同时,可以将井架与地面接触的节点铰接固定,便于有限元计算;井架承受工作载荷通过大钩传递到井架

顶部天车, 可将载荷平均分配到井架顶部的 4 个节点上。井架底部与底座的连接点采用定铰约束模型, 即约束节点在 x 、 y 、 z 三个方向的位移而不约束旋转。

(2) 自振模态分析

系统的结构模态是由系统的特征值和特征向量所确定的, 模态表示其无阻尼自由振动时的各阶固有振动频率及其相应的固有振型。根据井架的工作状态, 建立无阻尼自由振动的动力平衡方程, 将求解结构固有频率和固有振型问题归结为求解特征值和特征向量的数学问题。

因此, 通过求解, 即可获得井架的各阶固有频率。利用有限元方法计算井架类钢结构时, 边界条件的界定与转换直接影响到计算结果的精度, 因此, 一般对有限元模型做修正加以克服。

井架振动的频率一般比较低, 和绞车滚筒、转盘的转频比较接近, 在实际分析使用时要特别考虑共振问题。

(3) 稳定性分析

依据所建立起的井架整体计算模型, 根据其结构和受力特点, 简化为一个保持格构式结构的抗压刚度和抗弯刚度的具有相应折算长细比 λ 的实腹受压柱来计算。因此井架的总体稳定计算分为两步: 一是根据井架结构特点计算折算长细比 λ ; 二是按实腹受压柱稳定计算方法计算稳定性。

在井架静力计算中通过求解结构总平衡方程式, 即

$$[k]\{\delta\} = \{P\} \quad (3-6)$$

式中 $[k]$ —结构的总刚度矩阵;

$[\delta]$ —节点位移向量;

$[P]$ —载荷列阵。

这个方程组的方程数目与结构的自由度数目相对应, 称为结构的节点平衡方程组。求解这个方程组即可求得各节点位移, 进而得各节点力。在稳定计算中, 考虑单元上作用着轴力, 并假定此轴力不受侧向挠度 w, v 的影响, 但要考虑轴力 N 对弯曲刚度的影响。由应变能之间的关系可导出因轴力 N 的影响而改变的刚度矩阵, 可写为

$$[k]^e = [k_e]^e + [k_g]^e \quad (3-7)$$

式中 $[k_e]^e$ —梁单元的弯曲刚度矩阵;

$[k_g]^e$ —梁单元的几何刚度矩阵。

由上式可以看出，几何刚度矩阵与材料的物理性质无关，而与轴力及单元的几何尺寸有关。按静力计算方法可将所有单元的刚度矩阵叠加组装成稳定计算的总刚度矩阵 $\{k\}$ ，进而得结构整体稳定计算平衡方程组

$$([k] + [k_g])\{\delta\} = \{F_0\} \quad (3-8)$$

由几何刚度矩阵 $[k_g]$ 可知， $[k_g]$ 正比于轴力 N ，如果轴力按比例因子 λ 增加，即 $F = \lambda\{F_0\}$ ，则几何刚度矩阵也相应增加为 $\lambda[k_g]$ 。因此上式变为

$$([k] + \lambda[k_g])\{\delta\} = \{F\} \quad (3-9)$$

当轴力达到临界值时，结构失去弹性稳定。 $[k] + \lambda[k_g] = 0$

由上式求出最小特征值 λ 代入相关计算，就可以求出结构失稳的临界载荷，进而判定结构的整体稳定性。

(4) 疲劳强度分析

多年来，结构疲劳计算中采用验算最大应力的计算公式为：

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma^p] \quad (3-10)$$

式中 σ_{\max} —反复载荷作用下，需要验算的最大应力；

$[\sigma^p]$ —构件（主体金属）或连接的疲劳允许应力， $[\sigma^p]$ 是应力比 $\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ 和循环次数的函数。

焊接件的焊缝缺陷是形成疲劳裂缝和引起疲劳断裂的根源。由于焊缝附近存在着很大的焊接峰值，其应力数值可达到材料的屈服强度 σ_y 。名义应力循环特征应力比

$\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ 并不代表疲劳裂缝的应力状态。实际的应力循环是从受拉屈服强度 σ_y 开始，

变动一个应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ， σ_{\max} 、 σ_{\min} 是名义最大应力和最小应力。因而焊接钢件结构的构件及连接的疲劳性能直接与应力幅 $\Delta\sigma$ 有关，应力幅 $\Delta\sigma$ 是决定构件或连接疲劳性能的主要因素，而与应力比 ρ 不是十分密切。所以疲劳计算应采用应力幅法，对应循环中应力幅度为常量，可按下式计算疲劳强度：

$$\Delta\sigma \leq [\Delta\sigma] \quad (3-11)$$

式中 $\Delta\sigma$ —计算应力幅, $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$;

σ_{\max} —计算部位应力每次应力循环中最大拉应力;

σ_{\min} —计算部位应力每次应力循环中最小拉应力或压应力;

$[\Delta\sigma]$ —允许应力幅度 (N/mm^2), 按下式计算:

$$[\Delta\sigma] = \left(\frac{c}{n}\right)^{1/m} \quad (3-12)$$

式中 c 、 m —系数, 可查表 1-1;

n —应力循环次数。

表 1-1 系数 c , m 表

Table 1-1 Coefficient table of c, m

构件或连接 类型	1	2	3	4	5	6	7	8
c	1.94 $\times 10^{15}$	8.61 $\times 10^{14}$	3.26 $\times 10^{12}$	2.18 $\times 10^{12}$	1.47 $\times 10^{12}$	9.64 $\times 10^{11}$	6.46 $\times 10^{11}$	4.06 $\times 10^{11}$
m	4	4	3	3	3	3	3	3

井架及底座承受载荷是不稳定的, 其疲劳是变幅疲劳, 需要根据积累损伤疲劳原理, 将变幅疲劳折合成等效常幅疲劳。

$$\Delta\sigma_c \leq [\Delta\sigma] \quad (3-13)$$

式中 $\Delta\sigma_c$ —变幅疲劳的等效应力幅度。

$$\Delta\sigma_c = \left[\frac{\sum n_i (\Delta\sigma_i)^m}{\sum n_i} \right]^{1/m} \quad (3-14)$$

式中 $\sum n_i$ —以应力循环次数表示的结构预期使用寿命;

n_i —预期使用寿命内应力幅水平达到 σ_i 的应力循环次数;

m —系数。

井架及底座的长期载荷可按最大钻柱重量 $Q_{\text{柱}}$ 计算, $Q_{\text{柱}}$ 产生的应力幅 $\Delta\sigma_{\max}$ 是已知的。因此有:

$$\Delta\sigma_c = k_c \Delta\sigma_{\max} \quad (3-15)$$

式中 $\Delta\sigma_{\max}$ —长期工作载荷 $Q_{\text{柱}}$ 产生的最大应力幅度;

k_c —等效系数。

$$k_c = \left[\sum \frac{n_i}{N_0} \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_{\max}} \right)^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3-16)$$

式中 N_0 为循环基数，对井架计算，取 $N_0 = 5 \times 10^6$ 。

(5) 可靠性分析

结构的设计原则是抗力 R 不小于载荷效应 S 。实际上由于抗力、载荷效应及计算模式总是存在着不定性，它们都是随机变量，因此要绝对保证 R 总是大于 S 是不可能的。在一般情况下，抗力 R 还是有可能小于载荷效应 S ，这种可能性的大小用概率来表示就是失效概率。

结构的可靠性设计，其功能常以“极限状态”为标志。当一个结构或构件，达不到满足它的某一规定使用功能的某一特写状态时，这个状态就称为极限状态。结构达到极限状态的概率超过了允许的限值，就不可靠了。所以，极限状态是衡量结构是否失效的标志。

设有 n 个相互独立的随机变量 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 影响结构的可靠度，其状态函数为：

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3-17)$$

当 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ 时，称为极限状态方程。

若将 Z 表达为 R 和 S 的函数： $Z = g(R, S) = R - S$

则极限状态方程为：

$$Z = g(R, S) = R - S = 0 \quad (3-18)$$

显然，当 $Z > 0$ ，表示结构可靠； $Z < 0$ ，表示失效；而 $Z = 0$ ，表示达到极限状态。

当 $R > 0$ ， $S > 0$ 时，失效概率可以写成如下的各种形式：

$$P_f = P(Z < 0) = P[(R - S) < 0] = P\left(\frac{R}{S} < 1\right) = P\left[\ln\left(\frac{R}{S}\right) < 0\right] = P[(\ln R - \ln S) < 0] \quad (3-19)$$

由概率论有：

$$\begin{aligned} P_f &= \iint_{r < s} f(r, s) dr ds = \int \left[\int_0^s f(r, s) dr \right] ds = \int \left[\int_0^s f_R(r) f_S(s) dr \right] ds \\ &= \int f_S(s) \left[\int_0^s f_R(r) dr \right] ds = \int f_S(s) F_R(s) ds \end{aligned} \quad (3-20)$$

式中 $f(r, s)$ — (R, S) 的联合概率密度；

$f_R(r)$ — R 的概率密度；

$f_S(S)$ — S 的概率密度;

$F_R(S) = P(R < S)$ 为 $R < S$ 的概率。

除了使用失效概率的概念外,也广泛地使用可靠性指标的概念。可靠性指标定义为:

$$\beta = \frac{m_Z}{\sigma_Z} \quad (3-21)$$

它与失效概率 P_f 存在着对应的关系。当抗力 R 和载荷 S 分别服从于正态分布时,

状态函数 Z 也服从于正态分布,其中: $m_Z = m_R - m_S$, $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 。所以:

$$\beta = \frac{m_Z}{\sigma_Z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3-22)$$

当抗力 R 和载荷 S 服从于其他分布时,其可靠度和失效概率的计算比较复杂。

第四章 井架整体的静力计算分析

4.1 用 ANSYS 软件分析井架的技术处理

将井架的静力计算模型简化为空间钢架计算模型。以井架各杆件自然焊接点作为有限元分析的计算节点,其中井架4根大腿支脚处为固定铰支点,绷绳锚点处为固支,剩余均为刚性节点。整个井架模型共198个节点,其中四个固定铰支点,划分363个单元。详见图4-1。

所分析井架的各杆件均为矩形空心钢结构,必须考虑各杆件既承受轴向力又承受弯矩。所以选取三维梁单元作为分析对象。使用三维梁单元的关键在于斜撑杆的处理。因此采用相对参考坐标的方法,解决不同方向杆的转动惯量难以折算的难题。

钢丝绳只能承受拉力不能承受压力,选取只能承受拉力的弹性杆单元,对绷绳的预紧力问题,采用加预应力的方法予以解决。

井架静力计算采用 ANSYS 软件中命令流程序功能。运用命令流程序可立即产生单元分析,自动处理边界条件和加载。这种方法便于对结构模型的校对,修改和结构的优选分析,此法可提高系列井架计算分析的效率。

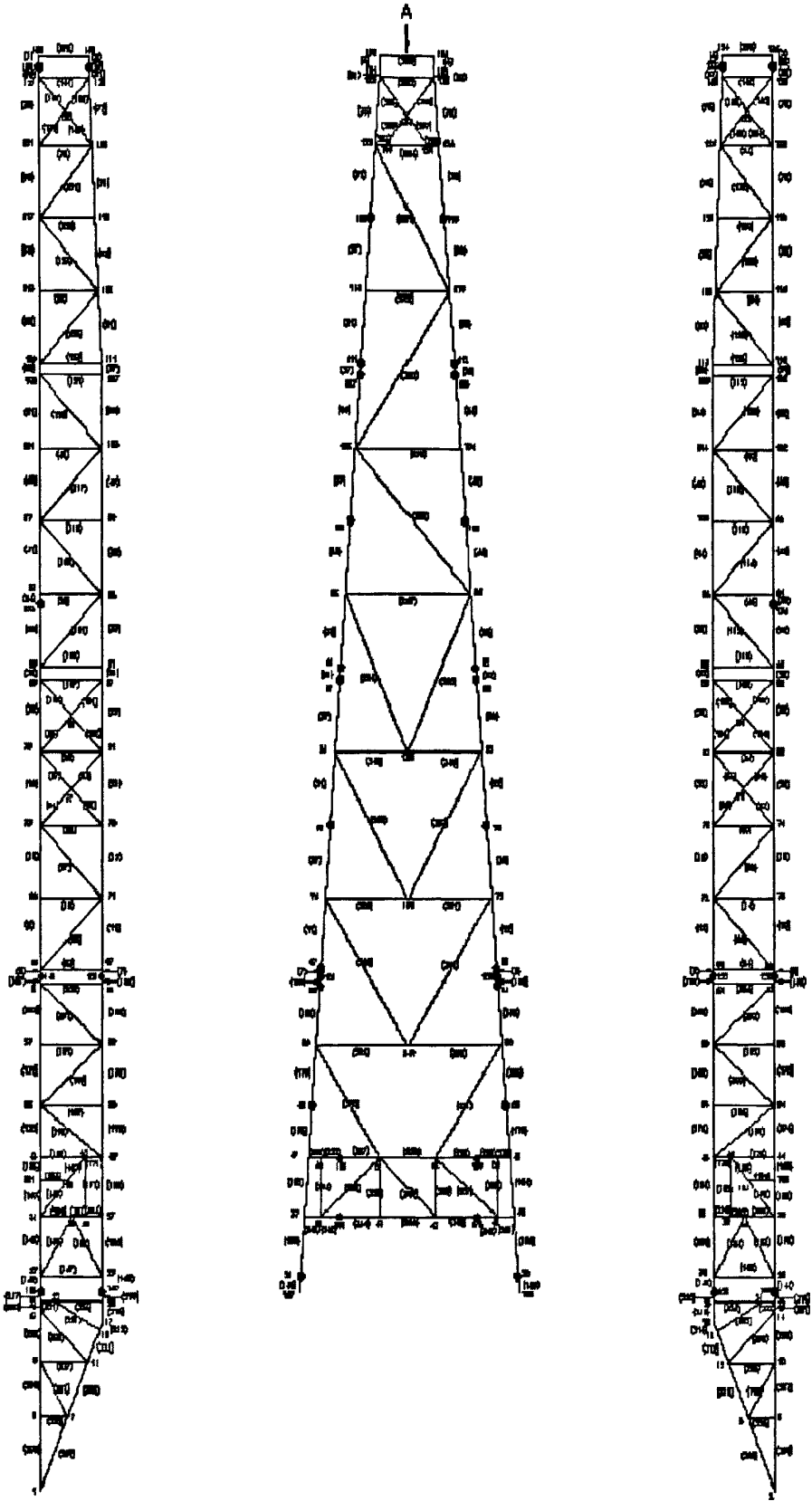


图 4-1.1 ZJ50/3150LDB 钻机井架节点单元图

Fig4-1.1 ZJ50/3150LDB drilling derrick's node unit chart

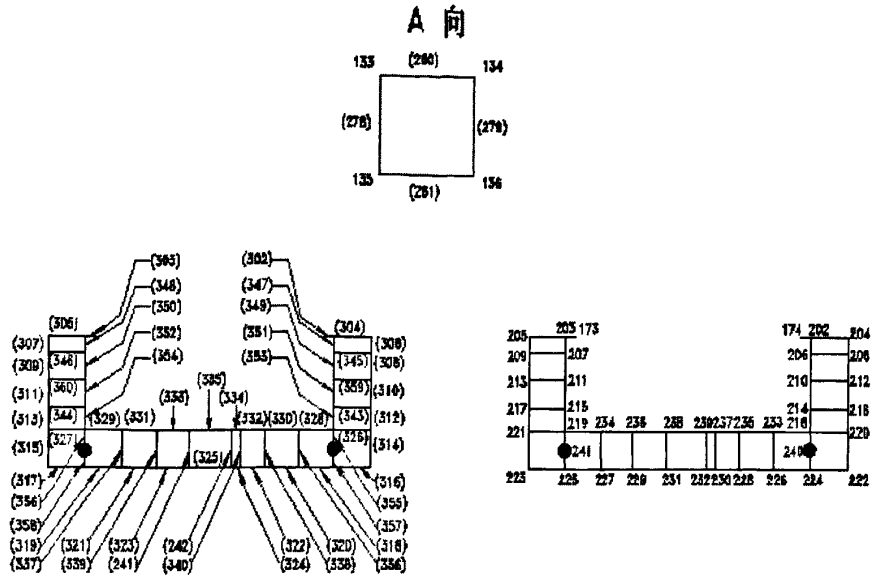


图 4-1.2 ZJ50/3150LDB 钻机井架节点单元图

Fig4-1.2 ZJ50/3150LDB drilling derrick's node unit chart

4.2 确定计算载荷

在 ANSYS 有限元分析软件中，是通过解（SOLUTION）处理项来完成。

4.2.1 加约束

约束作为有限元解的边界条件，在 ANSYS 有限元分析软件中，是作为位移载荷来处理。包括三个位移约束和三个转动约束，分别为：UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ。

4.2.2 加载荷

横梁各节点可能有均布载荷；集中载荷 FX FY FZ MX MY MZ；重力载荷：Z 向加重力加速度 9.8。

(1) 恒载

包括：井架自重、天车重量、二层台自重、游动系统重量、总立根重量。

(2) 恒载分配

首先将井架自重平均分配到上井架各节点，然后将游动系统重量、天车重量分配到井架顶端的 4 个节点上，最后将二层台和二层台悬吊重及二层台钢丝绳拉力分别加在二层台支承两点及悬拉的两点。

(3) 工作载荷

最大静载荷（最大钩载） $Q_{\max} = 3\ 150\ \text{kN}$

额定载荷（最大钻柱重量） $Q_{\text{柱}} = 1800 \text{ kN}$

所以工作绳拉力

$$P_{\text{绳}} = \frac{2(Q_{\text{柱}} + G_{\text{游}})}{Z} = 321 \text{ kN}$$

$$P_{\text{绳max}} = \frac{2(Q_{\text{max}} + G_{\text{游}})}{Z} = 546 \text{ kN}$$

立根载荷是由立根自重产生的垂直载荷和水平载荷组成。垂直载荷施加于钻机的底座上，水平载荷作用于井架二层台的指梁上，指向二层台的两侧。立根与钻台面倾角为 87° 。立根排放示意图见图 4-2。

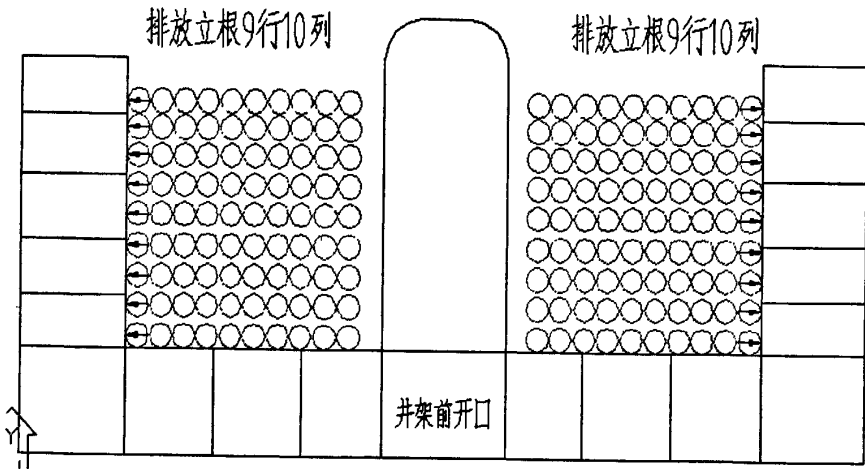


图 4-2 二层台立根排放示意图

Fig4-2 Thrible putting diagram of Kelly board

立根对井架是水平力计算。

$$P_{\text{根水平}} = \frac{1}{2} q \cdot l \cdot n \cdot \text{ctg}\theta = 46.593 \text{ kN}$$

(4) 工作载荷分配

- 最大钻柱重量或最大钩载平均分配到顶端 4 个节点上；
- 工作绳作用也近似分配到顶端 4 个节点上；
- 立根载荷平均分配井架与二层台相连的两点和二层台的下撑两点。

(5) 自然载荷

本井架不考虑地震和温度作用的载荷，因此自然载荷只有风载。

风载计算式为：

$$P = k_z \cdot k \cdot F \cdot W \quad (4-1)$$

式中 k_z —高度变化系数；

k —结构体型系数；

F —结构所有外露表面在垂直于风向的投影面上的投影面积， m^2 ；

W —计算风压， kPa 。

a) 风速

要求对四种风速对应的工况计算：20.7 m/s，12 级风速：36 m/s，47.8 m/s。

转换成 2 分钟时距的风速：

$$(\bar{v}_2)_1 = 1.136\bar{v}_{10} - 0.909 = 1.136 \times 20.7 - 0.909 = 22.61 \text{ m/s}$$

$$(\bar{v}_2)_2 = 1.136\bar{v}_{10} - 0.909 = 1.136 \times 36 - 0.909 = 40 \text{ m/s}$$

$$(\bar{v}_2)_3 = 1.136\bar{v}_{10} - 0.909 = 1.136 \times 47.8 - 0.909 = 53.39 \text{ m/s}$$

b) 风压

$$W_1 = \frac{(\bar{v}_2)_1^2}{1600} = 0.3195 \text{ kPa} \quad W_2 = \frac{(\bar{v}_2)_2^2}{1600} = 1 \text{ kPa} \quad W_3 = \frac{(\bar{v}_2)_3^2}{1600} = 1.78 \text{ kPa}$$

井架风载按结构分三段，上段高：16.5 m；中段高：16.5 m；下段高：18.505 m。

每段风载按均布计算。选择背面来风和侧面来风两种风向。

c) 背面来风载荷

背面来风时的风载

井架上段风载：（依次风速为：20.7 m/s，36 m/s，47.8 m/s）

$$P_{\text{风上正1}} = k_{z\text{上正}} \cdot k_{\text{上正}} \cdot F_{\text{上正}} \cdot W_1 = 11.25811 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风上正2}} = k_{z\text{上正}} \cdot k_{\text{上正}} \cdot F_{\text{上正}} \cdot W_2 = 35.6382 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风上正3}} = k_{z\text{上正}} \cdot k_{\text{上正}} \cdot F_{\text{上正}} \cdot W_3 = 63.436 \text{ kN}$$

井架中段风载：（依次风速为：20.7 m/s，36 m/s，47.8 m/s）

$$P_{\text{风中正1}} = k_{z\text{中正}} \cdot k_{\text{中正}} \cdot F_{\text{中正}} \cdot W_1 = 15.15805 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风中正2}} = k_{z\text{中正}} \cdot k_{\text{中正}} \cdot F_{\text{中正}} \cdot W_2 = 47.98369 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风中正3}} = k_{z\text{中正}} \cdot k_{\text{中正}} \cdot F_{\text{中正}} \cdot W_3 = 85.41097 \text{ kN}$$

井架下段风载：（依次风速为：20.7 m/s，36 m/s，47.8 m/s）

$$P_{\text{风下正1}} = k_{z\text{下正}} \cdot k_{\text{下正}} \cdot F_{\text{下正}} \cdot W_1 = 13.37325 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风下正2}} = k_{z\text{下正}} \cdot k_{\text{下正}} \cdot F_{\text{下正}} \cdot W_2 = 42.3338 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风下正3}} = k_{z\text{下正}} \cdot k_{\text{下正}} \cdot F_{\text{下正}} \cdot W_3 = 75.35416 \text{ kN}$$

d) 风从侧面吹时的风载

侧面吹风时的风载

井架上段风载：（依次风速为：20.7 m/s, 36 m/s, 47.8 m/s）

$$P_{\text{风上侧1}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_2 = 8.728848 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风上侧2}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_2 = 27.63168 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风上侧3}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_3 = 49.18439 \text{ kN}$$

井架中段风载：（依次风速为：20.7 m/s, 36 m/s, 47.8 m/s）

$$P_{\text{风中侧1}} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_1 = 11.21279 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风中侧2}} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_2 = 35.49475 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风中侧3}} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_3 = 63.18066 \text{ kN}$$

井架下段风载：（依次风速为：20.7 m/s, 36 m/s, 47.8 m/s）

$$P_{\text{风下侧1}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_1 = 10.91431 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风下侧2}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_2 = 34.54988 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风下侧3}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_3 = 61.49878 \text{ kN}$$

e) 侧向后扇的风载

侧向后扇吹风时的风载

井架上段风载：（依次风速为：20.7 m/s, 36 m/s, 47.8 m/s）

$$P_{\text{风上侧1}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_1 = 2.760124 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风上侧2}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_2 = 8.740102 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风上侧3}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_3 = 15.55738 \text{ kN}$$

井架中段风载：（依次风速为：20.7 m/s, 36 m/s, 47.8 m/s）

$$P_{\text{风中侧1}} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_1 = 5.406059 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风中侧2}} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_2 = 17.1132 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风中侧3}} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_3 = 30.46149 \text{ kN}$$

井架下段风载：（依次风速为：20.7 m/s, 36 m/s, 47.8 m/s）

$$P_{\text{风下侧1}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_1 = 6.026875 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风下侧2}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_2 = 19.07843 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风下侧3}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_3 = 33.9596 \text{ kN}$$

f) 立根风载

① 背面来风立根风载：（依次风速为：20.7 m/s, 36 m/s, 47.8 m/s）

$$P_{\text{根}1} = 41.83 \text{ kN} \quad P_{\text{根}2} = 132.415 \text{ kN} \quad P_{\text{根}3} = 235.669 \text{ kN}$$

② 侧面来风立根风载：（依次风速为：20.7 m/s ; 36 m/s ; 47.8 m/s）

$$P_{\text{根}1} = 18.82 \text{ kN} \quad P_{\text{根}2} = 59.58 \text{ kN} \quad P_{\text{根}3} = 106.06 \text{ kN}$$

g) 风载分配

井架各段风载平均分配到各段节点上。

立根风载施加于二层台的指梁上。

4.3 井架静力计算结果

4.3.1 无风载、无立根、最大静载荷下井架的强度计算分析

(1) 加载

$$\text{最大静载荷} = Q_{\text{max}} + G_{\text{天车}} + G_{\text{游}} + P_{\text{绳max}} = 3\ 868.57 \text{ kN}$$

需要施加如下载荷：

a) 最大载荷时，在井架顶部的每根大腿施加力： $F = 967.142 \text{ kN}$ ；

b) 二层台重量载荷： $G_{\text{二层台}} = 45 \text{ kN}$ 均布在二层台各节点上。

(2) 分析

在最大载荷下，井架的变形图如图 4-3，应力图如图 4-4，前 10 个较大应力的单元杆件如表 4-1。由图表可知：

a) 井架应力分布趋势：应力较大单元大多分布在井架的前后 4 条主大腿上，侧扇横撑应力较小；井架整体应力下部大于上部。

b) 井架变形分布情况：井架上端变形较大，下部较小；后扇横撑变形也较大，最下段变形最小。

c) 最大应力分布在 166 单元，最大应力值为 194.6 MPa；次最大应力发生 165 单元，应力值为 194.4 MPa。

(3) 强度校核

根据 API Spec 4F 规定，井架结构的安全系数为 1.67。

最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$ ，井架在最大静载荷下的安全系数为 1.773，满足安全系数要求。

次最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$ ，安全系数为 1.775，满足安全系数要求。

(4) 小结

井架在无风载、无立根、最大静载荷下安全可靠。

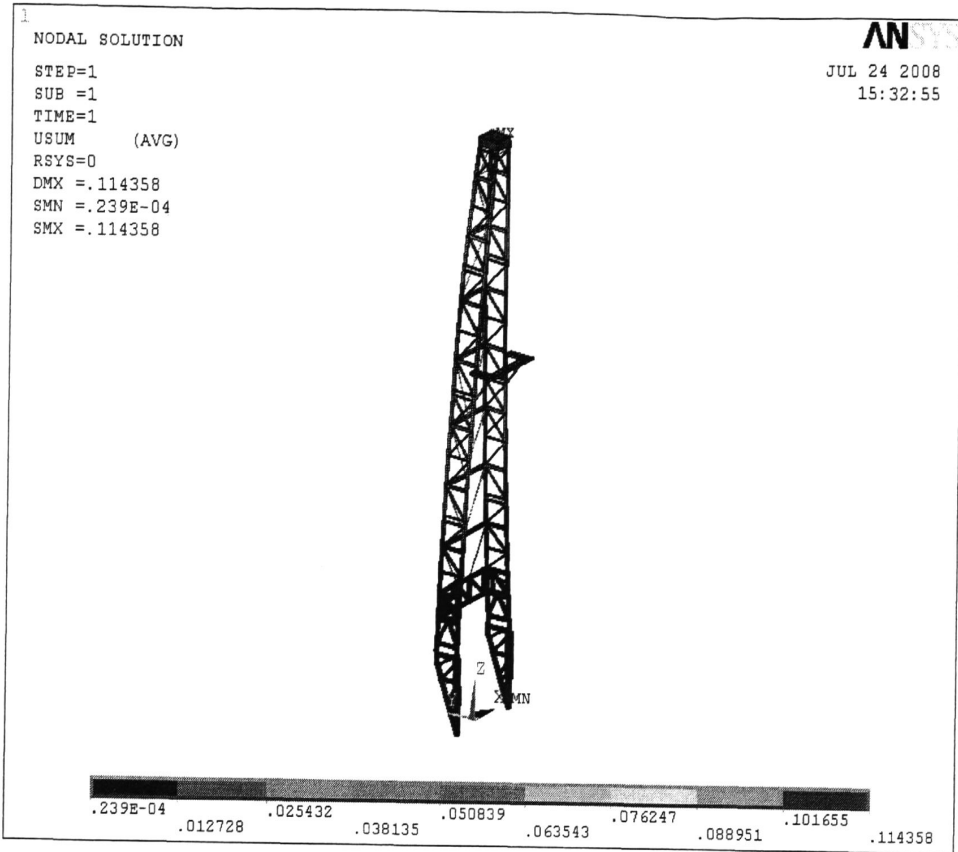


图 4-3 最大静载荷时井架变形图

Fig4-3 Derrick's distortion diagram when the biggest loads

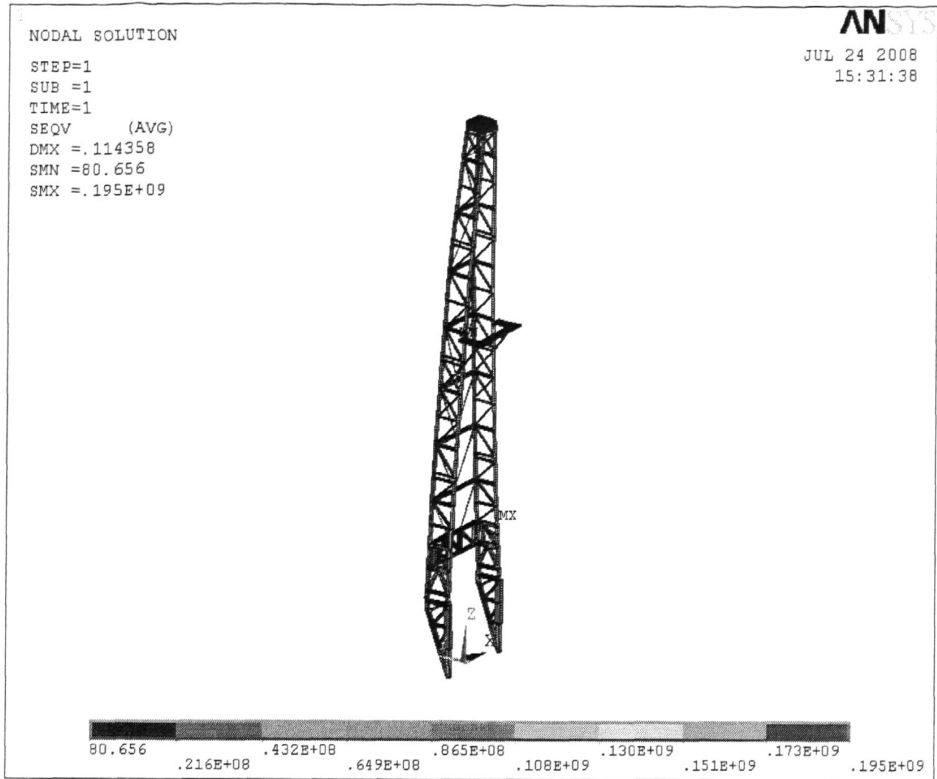


图 4-4 最大载荷时井架应力图

Fig4-4 Derrick's stress diagram when the biggest loads

表 4-1 无风载、无立根、最大静载荷井架前 10 个较大应力表(单位: MPa)

Table4-1 Derrick's first 10 big stresses under no wind load, no thribble and the biggest static load

unit: MPa

单元号	实常数	节点 I	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
166	3	162	44	-112.4	-146.1	-63.7	-194.6	194.6	207	227.7
165	3	161	43	-112.5	-146.1	-63.9	-194.4	194.4	207	227.7
172	3	46	48	187.0	-181.7	176.4	-171.2	187.0	207	227.7
171	3	45	47	186.9	-181.8	176.8	-171.7	186.9	207	227.7
143	3	155	27	-94.4	-174.7	-90.4	-178.4	178.4	207	227.7
144	3	156	28	-94.2	-174.6	-90.2	-178.4	178.4	207	227.7
36	1	174	94	-94.8	-169.6	-88.1	-176.2	176.2	207	227.7
42	1	94	98	-91.7	-172.1	-107.3	-155.7	172.1	207	227.7
215	6	17	25	64.3	-171.3	-13.8	-93.0	171.3	207	227.7
216	6	18	26	64.1	-171.3	-14.0	-93.0	171.3	207	227.7

4.3.2 最大风速 (47.8 m/s)、无钩载、无立根井架的强度计算分析

井架风载按结构分三段，上段高: 16.5 m; 中段高: 16.5 m; 下段高: 18.505 m。

每段风载按均布计算。选择背面来风和侧面来风两种风向。

第一种情况：背面来风

(1) 加载

井架上段风速 47.8 m/s 时风载： $P_{\text{风上正3}} = k_{z\text{上正}} \cdot k_{\text{上正}} \cdot F_{\text{上正}} \cdot W_3 = 63.436 \text{ kN}$

井架中段风速 47.8 m/s 时风载： $P_{\text{风中正3}} = k_{z\text{中正}} \cdot k_{\text{中正}} \cdot F_{\text{中正}} \cdot W_3 = 85.41097 \text{ kN}$

井架下段风速 47.8 m/s 时风载： $P_{\text{风下正3}} = k_{z\text{下正}} \cdot k_{\text{下正}} \cdot F_{\text{下正}} \cdot W_3 = 75.35416 \text{ kN}$

将风载按各段总载荷平均分配到井架背面的大腿的节点上，背面来风施加风载的方向指向井架前开口。

(2) 分析

风速 47.8 m/s 时，背面来风井架的变形图如图 4-5，应力图如图 4-6，前 10 个较大应力的单元杆件如表 4-2。由图表可知：

a) 井架应力分布趋势：应力较大单元大多分布在井架的前后 4 条主大腿上，侧扇横撑应力较小；井架整体应力下部大于上部。

b) 井架变形分布情况：井架上端变形较大，下部较小；后扇横撑变形也较大，最下段变形最小。

c) 最大应力位于 143 单元，最大应力值为 200 MPa；次最大应力发生在 144 单元，其值为 199.8 MPa。

(3) 强度校核

根据 API Spec 4F 规定，井架结构的安全系数为 1.67。

最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$ ，安全系数为 1.725，满足安全系数要求。

次最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$ ，安全系数为 1.727，满足安全系数要求。

(4) 小结

井架在背面来风最大风速 47.8 m/s、无钩载、无立根工况下安全可靠。

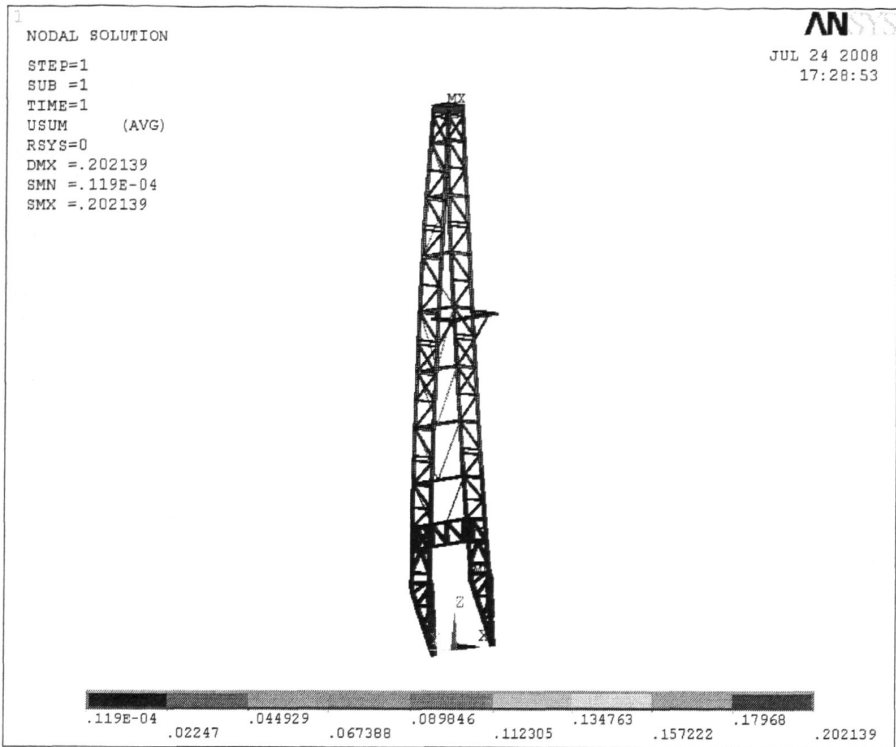


图 4-5 风速 47.8 m/s 背面来风井架变形图

Fig4-5 Derrick's distortion chart when its back comes the wind (47.8 m/s)

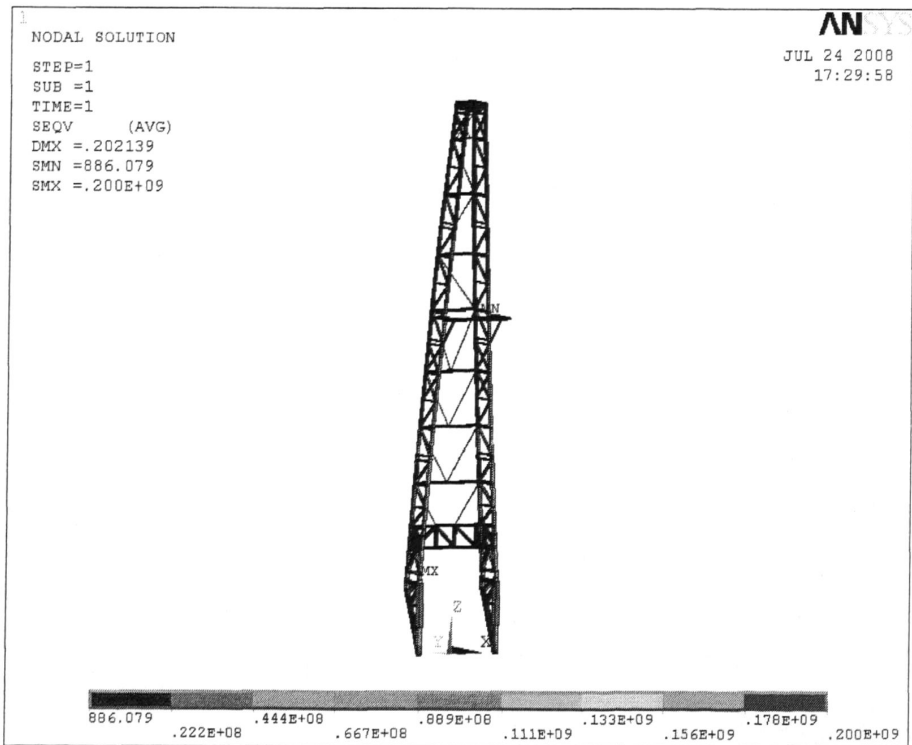


图 4-6 风速 47.8 m/s 背面来风井架应力图

Fig4-6 Derrick's stress chart when its back comes the wind (47.8 m/s)

表 4-2 背面来风 47.8 m/s 井架前 10 个较大应力表 (单位: MPa)

Table4-2 Derrick's first 10 big stresses when its back comes the wind (47.8 m/s) unit: MPa

单元号	实常数	节点 i	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
143	3	155	27	-13.7	-200.0	-24.3	-189.3	200.0	207	227.7
144	3	156	28	-13.7	-199.8	-24.2	-189.1	199.8	207	227.7
215	6	17	25	143.0	-72.7	54.2	16.3	143.0	207	227.7
216	6	18	26	142.9	-72.7	54.2	16.3	142.9	207	227.7
217	6	21	155	14.8	-132.9	-15.3	-102.6	132.9	207	227.7
218	6	22	156	14.9	-132.8	-15.3	-102.5	132.8	207	227.7
149	3	27	31	-59.6	-125.3	-55.7	-128.5	128.5	207	227.7
150	3	28	32	-59.5	-125.1	-55.7	-128.2	128.2	207	227.7
173	3	43	53	-64.8	-106.6	-81.0	-89.8	106.6	207	227.7
174	3	44	54	-65.0	-106.6	-81.0	-90.0	106.6	207	227.7

第二种情况: 侧面来风

(1) 加载

井架上段风速 47.8 m/s 时风载:

$$\text{右扇风载: } P_{\text{风上侧3}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_3 = 49.18439 \text{ kN}$$

$$\text{左扇风载: } P_{\text{风上侧3}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_3 = 15.55738 \text{ kN}$$

井架中段风速 47.8 m/s 时风载:

$$\text{右扇风载: } P_{\text{风中段3}} = k_{z\text{中段}} \cdot k_{\text{中段}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_3 = 63.18066 \text{ kN}$$

$$\text{左扇风载: } P_{\text{风中段3}} = k_{z\text{中段}} \cdot k_{\text{中段}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_3 = 30.46149 \text{ kN}$$

井架下段风速 47.8m/s 时风载

$$\text{右扇风载: } P_{\text{风下侧3}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下}} \cdot W_3 = 61.49878 \text{ kN}$$

$$\text{左扇风载: } P_{\text{风下侧3}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下}} \cdot W_3 = 33.9596 \text{ kN}$$

侧面来风两侧面都要施加风载, 指向相同, 力的大小不同。

(2) 分析

风速 47.8 m/s 时, 侧面来风井架的变形图如图 4-7, 应力图如图 4-8, 前 10 个较大应力的单元杆件如表 4-3。由图表可知:

a) 井架应力分布趋势: 应力较大单元大多分布在井架的前后 4 条主大腿上, 侧扇横撑应力较小; 井架整体应力下部大于上部。

b) 井架变形分布情况: 井架上端变形较大, 下部较小; 后扇横撑变形也较大, 最

下段变形最小。

c) 最大应力位于 240 单元，最大应力值为 146.6 MPa；次最大应力发生在 145 单元，其值为 123.3 MPa。

(3) 强度校核

根据 API Spec 4F 规定，井架结构的安全系数为 1.67。

最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345$ MPa，安全系数为 2.353，满足安全系数要求。

次最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345$ MPa，安全系数为 2.798，满足安全系数要求。

(4) 小结

井架在侧面来风最大风速 47.8 m/s、无钩载、无立根工况下安全可靠。

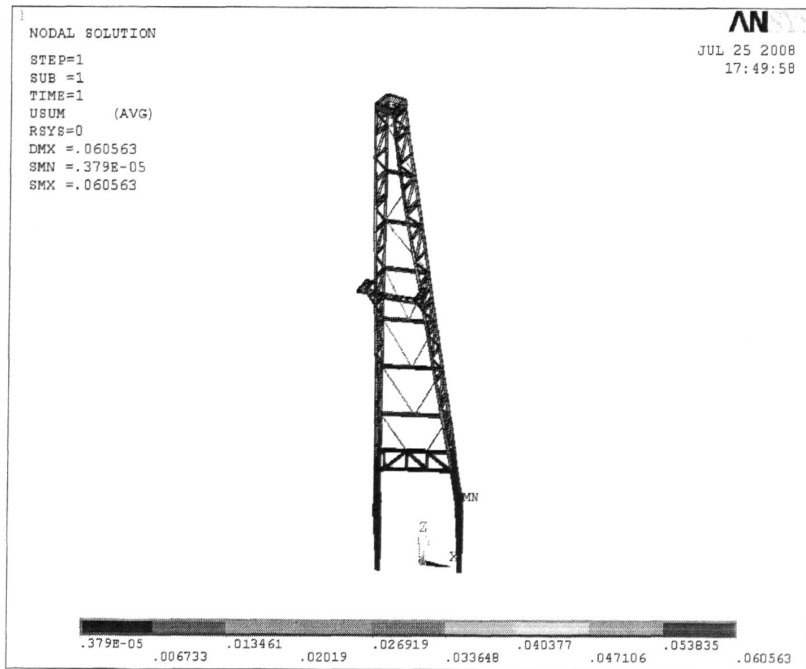


图 4-7 风速 47.8 m/s 侧面来风井架变形图

Fig4-7 Derrick's distortion chart when its side comes the wind (47.8 m/s)

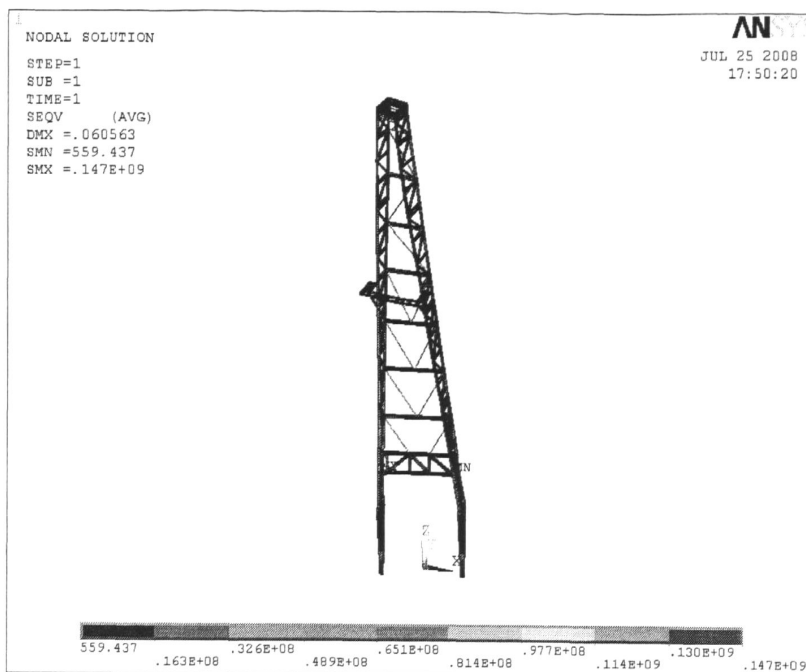


图 4-8 风速 47.8 m/s 侧面来风井架应力图

Fig4-8 Derrick's stress chart when its side comes the wind (47.8 m/s)

表 4-3 侧面来风 47.8 m/s 井架前 10 个较大应力表 (单位: MPa)

Table4-3 Derrick's first 10 big stresses when its side comes the wind (47.8 m/s) unit: MPa

单元号	实常数	节点 i	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
240	10	37	39	133.2	-146.6	52.3	-65.7	146.6	207	227.7
145	3	157	29	-6.5	-123.3	-26.1	-103.5	123.3	207	227.7
155	3	29	37	-22.0	-81.7	11.2	-114.3	114.3	207	227.7
215	6	17	25	38.1	-109.8	4.7	-76.2	109.8	207	227.7
163	3	37	47	-7.0	-84.2	-15.7	-74.8	84.2	207	227.7
216	6	18	26	84.1	-58.5	43.8	-18.0	84.1	207	227.7
146	3	158	30	82.4	-34.2	58.9	-10.6	82.4	207	227.7
219	6	25	157	11.2	-82.3	-9.7	-61.4	82.3	207	227.7
171	3	45	47	76.4	-71.0	78.9	-73.5	78.9	207	227.7
175	3	47	55	-20.2	-78.0	-31.3	-66.3	78.0	207	227.7

4.3.3 风速 36 m/s、满立根、无钩载井架的强度计算分析

第一种情况：背面来风

(1) 加载

井架上段风速 36m/s 时风载: $P_{\text{风上正2}} = k_{z\text{上正}} \cdot k_{\text{上正}} \cdot F_{\text{上正}} \cdot W_2 = 35.6382 \text{ kN}$

井架中段风速 36m/s 时风载: $P_{\text{风中正2}} = k_{z\text{中正}} \cdot k_{\text{中正}} \cdot F_{\text{中正}} \cdot W_2 = 47.98369 \text{ kN}$

井架下段风速 36 m/s 时风载： $P_{\text{风下正2}} = k_{\text{z下正}} \cdot k_{\text{下正}} \cdot F_{\text{下正}} \cdot W_2 = 42.3338 \text{ kN}$

(2) 分析

满立根、无钩载、风速 36 m/s 时，背面来风井架的变形图如图 4-9，应力图如图 4-10，前 10 个较大应力的单元杆件如表 4-4。由图表可知：

a) 井架应力分布趋势：应力较大单元大多分布在井架的前后 4 条主大腿上，侧扇横撑应力较小；井架整体应力下部大于上部。

b) 井架变形分布情况：井架上端变形较大，下部较小；后扇横撑变形也较大，最下段变形最小。

c) 最大应力位于 143 单元，最大应力值为 253.3 MPa；次最大应力发生在 144 单元，其值为 253.1 MPa。

(3) 强度校核

根据 API Spec 4F 规定，井架结构的安全系数为 1.67。

最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$ ，安全系数为 1.362，不满足安全系数要求。

次最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$ ，安全系数为 1.363，不满足安全系数要求。

(4) 优化设计

结合节点图 4-1，应力最大部位为井架下腿主力柱变截面处，如图 4-11 所示。

对该处进行加强（该单元格杆件全用 H450×300×14×20），加强方案见图 4-12。加强后重新计算，应力图如图 4-12，前 10 个较大应力的单元杆件如表 4-4a。最大应力 188.4 MPa，安全系数为 1.831。经强度校核，满足安全系数要求。

(5) 小结

优化设计后，井架在满立根、无钩载、风速 36 m/s 时，背面来风工况下安全可靠。

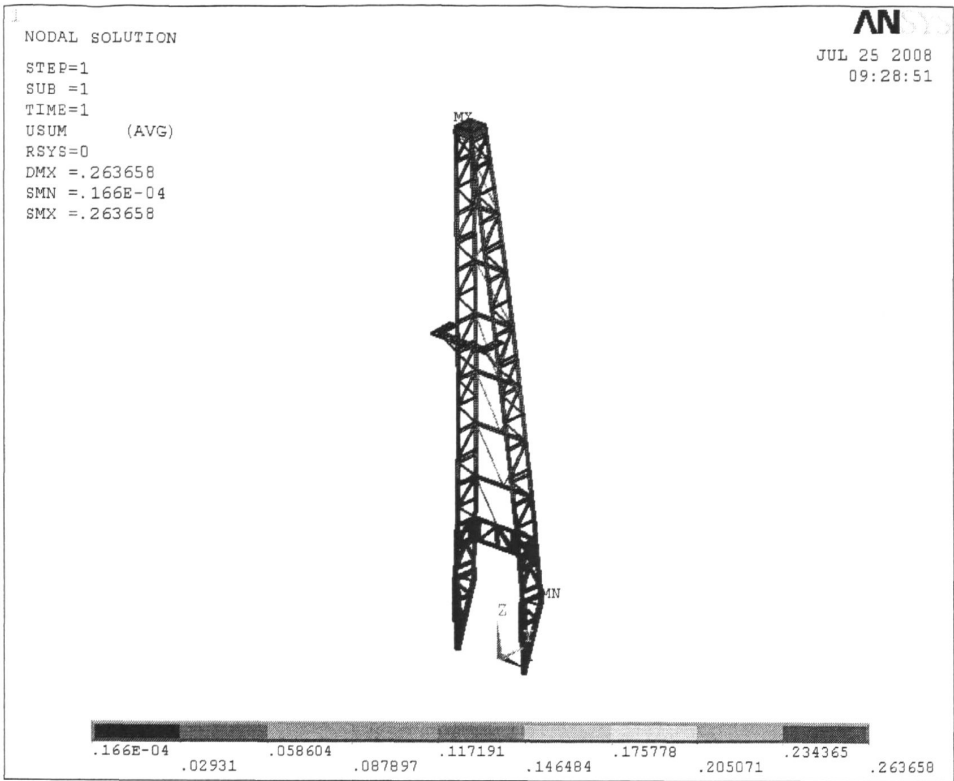


图 4-9 风速 36 m/s 背面来风井架变形图

Fig4-9 Derrick's distortion chart when its back comes the wind (36 m/s)

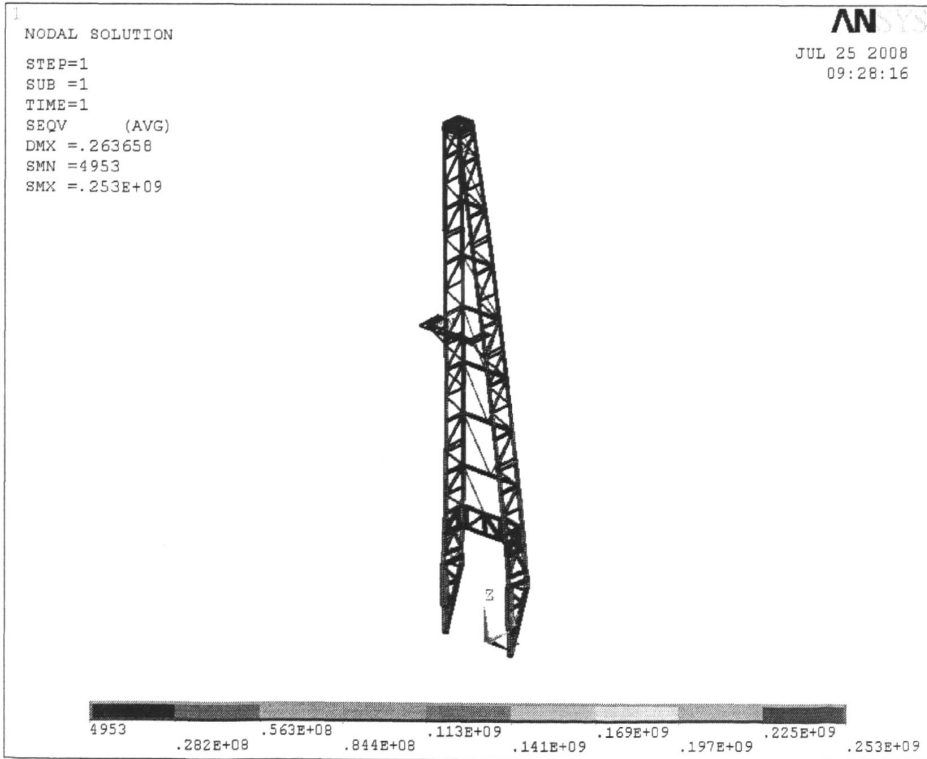


图 4-10 风速 36 m/s 背面来风井架应力图

Fig4-10 Derrick's stress chart when its back comes the wind (36 m/s)

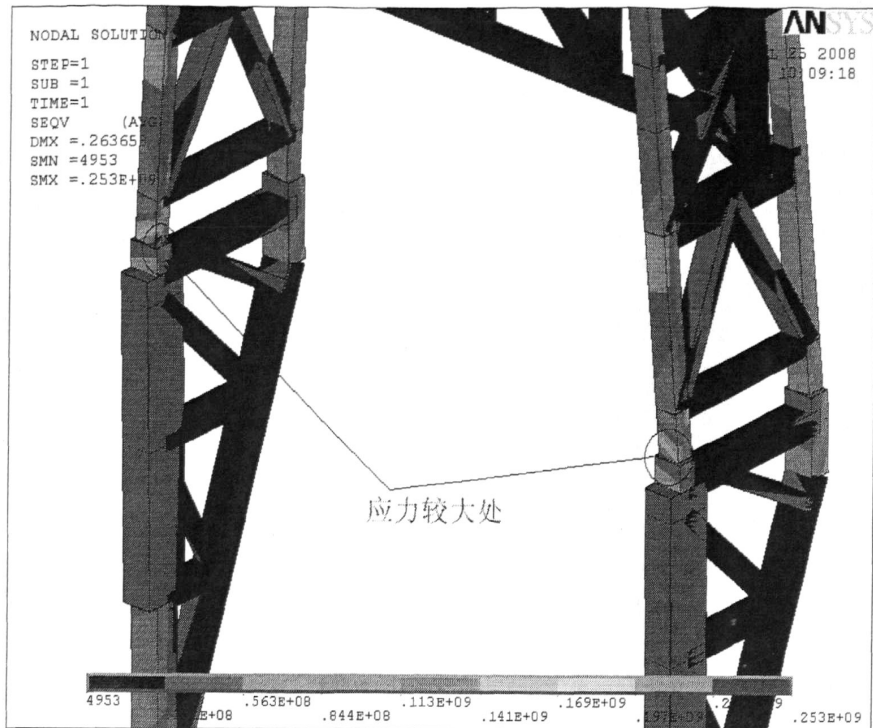


图 4-11 风速 36 m/s 背面来风应力局部放大图

Fig4-11 Derrick's local stress enlarged drawing when its back comes the wind (36 m/s)

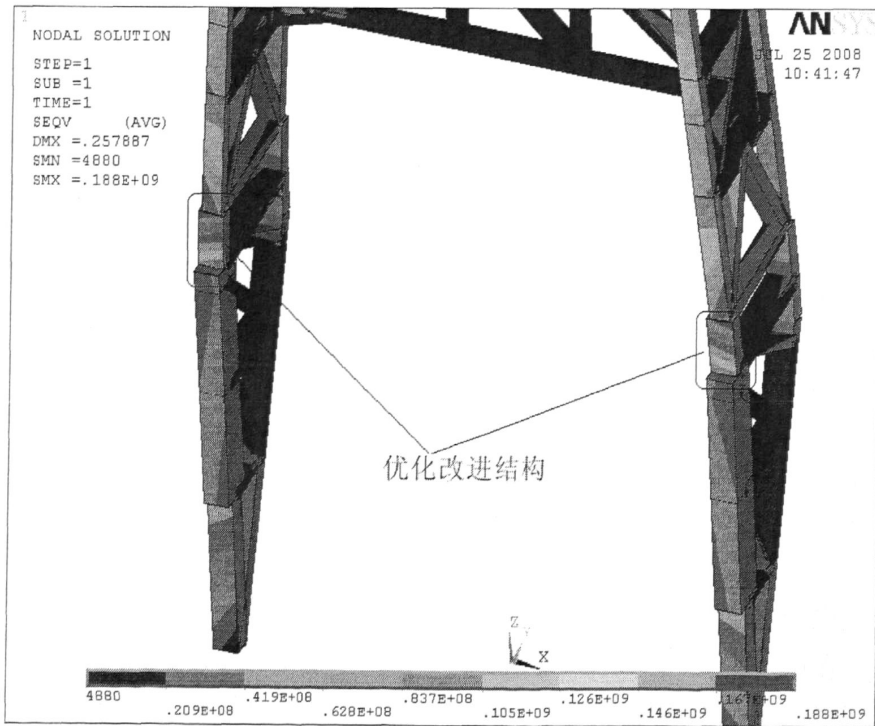


图 4-12 加强后井架局部应力图

Fig4-12 Derrick's local stress enlarged drawing after strengthening

表 4-4 背面来风 36 m/s 井架原始结构前 10 个较大应力表 (单位: MPa)

Table4-4 First 10 big stresses of derrick's primary structure when its back comes the wind (36 m/s)
unit: MPa

单元号	实常数	节点 I	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
143	3	155	27	-21.5	-253.3	-37.7	-237.0	253.3	207	227.7
144	3	156	28	-21.5	-253.1	-37.6	-236.8	253.1	207	227.7
215	6	17	25	189.4	-84.9	74.5	30.3	189.4	207	227.7
216	6	18	26	189.2	-84.9	74.4	30.2	189.2	207	227.7
149	3	27	31	-79.7	-162.4	-72.1	-169.3	169.3	207	227.7
150	3	28	32	-79.6	-162.2	-72.1	-169.1	169.1	207	227.7
217	6	21	155	14.2	-165.9	-21.6	-130.1	165.9	207	227.7
218	6	22	156	14.2	-165.8	-21.6	-129.9	165.8	207	227.7
145	3	157	29	135.2	51.2	148.5	38.1	148.5	207	227.7
146	3	158	30	135.1	51.0	148.5	37.9	148.5	207	227.7

表 4-4a 背面来风 36 m/s 井架加强结构前 10 个较大应力表 (单位: MPa)

Table4-4a First 10 big stresses of derrick's strengthens structure when its back comes the wind
(36 m/s)
unit: MPa

单元号	实常数	节点 i	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
211	6	17	25	188.4	-83.9	78.9	25.8	188.4	207	227.7
212	6	18	26	188.2	-83.9	78.8	25.7	188.2	207	227.7
213	6	21	27	19.8	-172.1	-21.5	-130.5	172.1	207	227.7
214	6	22	28	19.8	-172.0	-21.5	-130.4	172.0	207	227.7
145	3	27	31	-74.1	-167.9	-72.8	-168.6	168.6	207	227.7
146	3	28	32	-74.1	-167.7	-72.7	-168.4	168.4	207	227.7
183	3	61	149	-20.7	-141.8	-74.3	-88.0	141.8	207	227.7
184	3	62	150	-20.7	-141.8	-74.4	-88.0	141.8	207	227.7
169	3	43	53	-83.7	-139.6	-107.5	-115.3	139.6	207	227.7
170	3	44	54	-83.9	-139.6	-107.4	-115.4	139.6	207	227.7

第二种情况: 侧面来风

(1) 加载

井架上段风速 36 m/s 时风载:

$$\text{右扇风载: } P_{\text{风上侧}2} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_2 = 27.63168 \text{ kN}$$

$$\text{左扇风载: } P_{\text{风上侧}2} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_2 = 8.740102 \text{ kN}$$

井架中段风速 36 m/s 时风载:

$$\text{右扇风载: } P_{\text{风中侧}2} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_2 = 35.49475 \text{ kN}$$

$$\text{左扇风载: } P_{\text{风中侧}2} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_2 = 17.1132 \text{ kN}$$

井架下段风速 36 m/s 时风载:

$$\text{右扇风载: } P_{\text{风下侧}2} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_2 = 34.54988 \text{ kN}$$

$$\text{左扇风载: } P_{\text{风下侧}2} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_2 = 19.07843 \text{ kN}$$

风速 36m/s 时立根风载: $P_{\text{根}2} = 59.58 \text{ kN}$, 立根风载均分到二层台一边指梁对应的节点上, 指向井架一侧方向。

立根重量产生的水平载荷: $P_{\text{根水平}} = 46.593 \text{ kN}$, 立根水平载荷均分到二层台指梁对应的节点上, 指向井架两侧。

(2) 分析

满立根、无钩载、风速 36 m/s 时, 侧面来风井架的变形图如图 4-13, 应力图如图 4-14, 前 10 个较大应力的单元杆件如表 4-5。由图表可知:

a) 井架应力分布趋势: 应力较大单元大多分布在井架的前后 4 条主大腿上, 侧扇横撑应力较小; 井架整体应力下部大于上部。

b) 井架变形分布情况: 井架上端变形较大, 下部较小; 后扇横撑变形也较大, 最下段变形最小。

c) 最大应力位于 240 单元, 最大应力值为 125 MPa; 次最大应力发生在 330 单元, 其值为 121.9 MPa。

(3) 强度校核

根据 API Spec 4F 规定, 井架结构的安全系数为 1.67。

最大应力处单元材料为 Q345B, 屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$, 安全系数为 2.76, 满足安全系数要求。

次最大应力处单元材料为 Q345B, 屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$, 安全系数为 1.928, 满足安全系数要求。

(4) 小结

井架在满立根、无钩载、风速 36 m/s 时, 侧面来风工况下安全可靠。

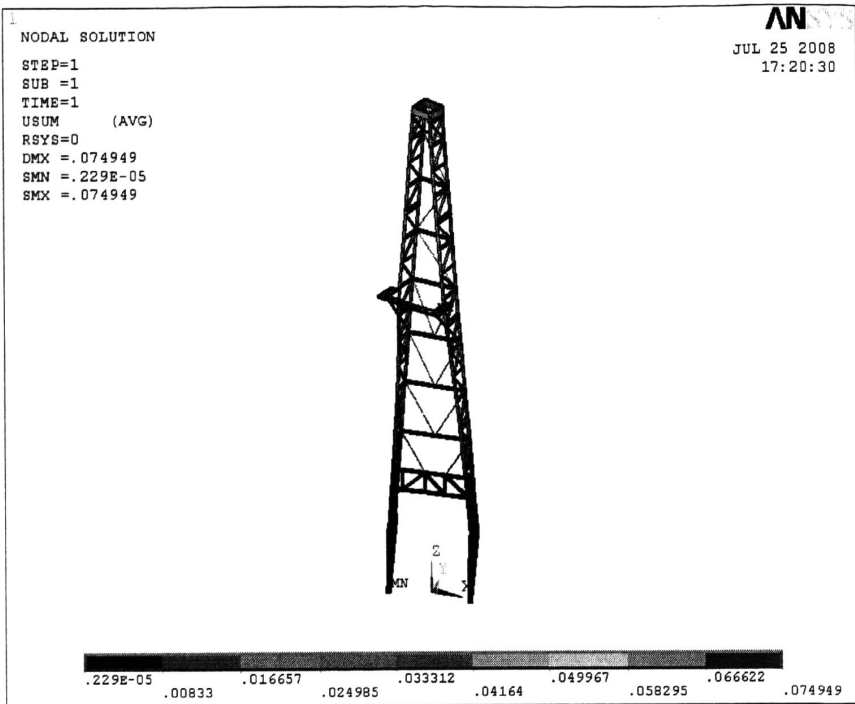


图 4-13 风速 36m/s 侧面来风井架变形图

Fig4-13 Derrick's distortion chart when its side comes the wind (36 m/s)

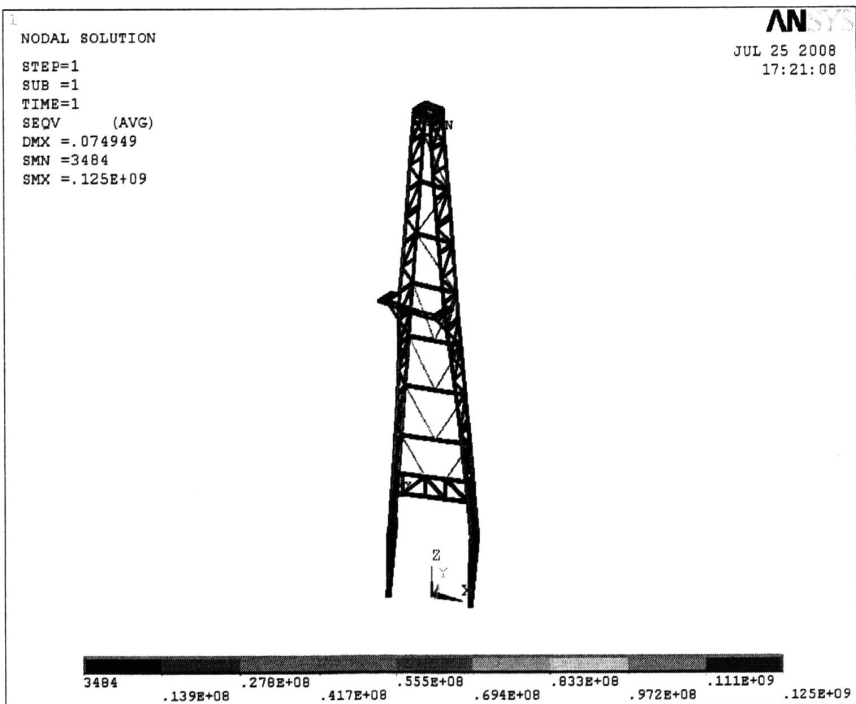


图 4-14 风速 36 m/s 侧面来风井架应力图

Fig4-14 Derrick's stress chart when its side comes the wind (36 m/s)

表 4-5 侧面来风 36 m/s 井架前 10 个较大应力表 (单位:MPa)

Table4-5 Derrick's first 10 big stresses when its side comes the wind (36m/s) unit: MPa

单元号	实常数	节点 i	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
240	10	37	39	115.0	-125.0	48.0	-58.1	125.0	207	227.7
330	20	219	234	120.7	-121.9	60.4	-61.6	121.9	141	155.1
145	3	157	29	-16.8	-112.0	-27.6	-101.0	112.0	207	227.7
39	1	93	95	45.0	-41.2	109.5	-105.7	109.5	207	227.7
320	20	225	227	108.3	-97.0	56.4	-45.1	108.3	141	155.1
155	3	29	37	-27.7	-74.7	-1.7	-100.0	100.0	207	227.7
215	6	17	25	17.8	-89.3	-4.3	-67.0	89.3	207	227.7
33	1	89	173	-21.8	-48.6	15.9	-85.6	85.6	207	227.7
317	20	222	224	52.7	-56.3	81.9	-85.5	85.5	141	155.1
34	1	173	93	17.1	-84.6	-0.9	-66.6	84.6	207	227.7

4.3.4 风速 20.7 m/s、额定钩载、无立根井架的强度计算分析

井架受的额定载荷= $Q_{柱} + G_{天车} + G_{游} + P_{绳} = 2\ 293.57\ \text{kN}$

第一种情况：背面来风

(1) 加载

额定载荷时，在井架顶部的每根大腿施加力： $F = 573.393\ \text{kN}$

二层台重量载荷： $G_{二层台} = 45\ \text{kN}$ 均布在二层台各节点上。

井架上、中、下段风速 20.7m/s 背面来风时风载：

$$P_{风上正1} = k_{z上正} \cdot k_{上正} \cdot F_{上正} \cdot W_1 = 11.25811\ \text{kN}$$

$$P_{风中正1} = k_{z中正} \cdot k_{中正} \cdot F_{中正} \cdot W_1 = 15.15805\ \text{kN}$$

$$P_{风下正1} = k_{z下正} \cdot k_{下正} \cdot F_{下正} \cdot W_1 = 13.37325\ \text{kN}$$

(2) 分析

风速 20.7 m/s、额定载荷下，背面来风井架的变形图如图 4-15，应力图如图 4-16，应力列表如表 4-6。由图表可知：

a) 井架应力分布趋势：应力较大单元大多分布在井架的前后 4 条主大腿上，侧扇横撑应力较小；井架整体应力下部大于上部。

b) 井架变形分布情况：井架上端变形较大，下部较小；后扇横撑变形也较大，最下段变形最小。

c) 最大应力位于 143、144 单元，最大应力值为 142.2 MPa；次最大应力发生在 166 单元，其值为 135.8 MPa。

(3) 强度校核

根据 API Spec 4F 规定, 井架结构的安全系数为 1.67。

最大应力处单元材料为 Q345B, 屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$, 安全系数为 2.426, 满足安全系数要求。

次最大应力处单元材料为 Q345B, 屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$, 安全系数为 2.54, 满足安全系数要求。

(4) 小结

井架在风速 20.7 m/s、额定载荷、背面来风工况下安全可靠。

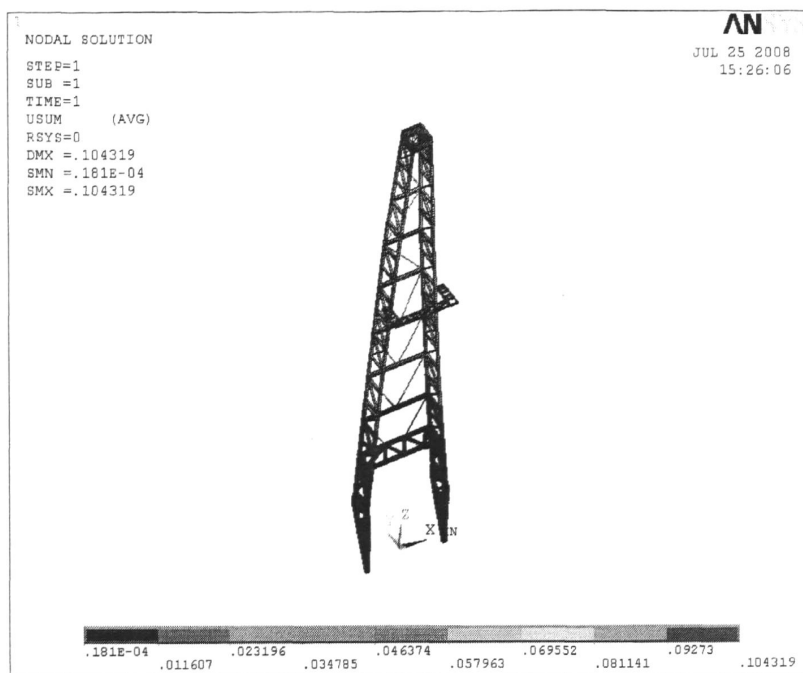


图 4-15 风速 20.7 m/s、额定载荷背面来风井架变形图

Fig4-15 Derrick's distortion chart under rated load when its back comes the wind (20.7 m/s)

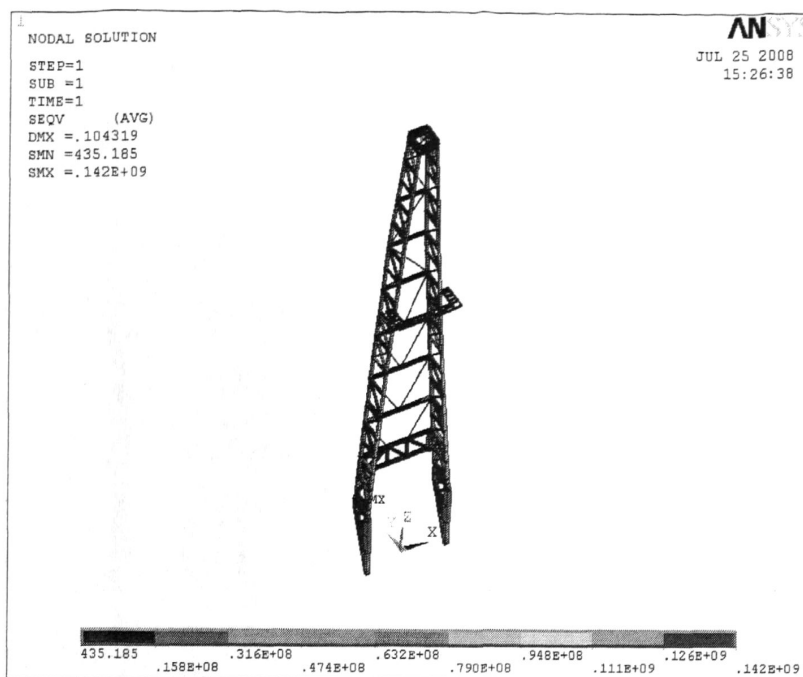


图 4-16 风速 20.7 m/s、额定载荷背面来风井架应力图

Fig4-16 Derrick's stress chart under rated load when its back comes the wind(20.7 m/s)

表 4-6 风速 20.7 m/s、额定载荷背面来风井架前 10 个较大应力表（单位：MPa）

Table4-6 Derrick's first 10 big stresses under rated load when its back comes the wind(20.7 m/s)

unit: MPa

单元号	实常数	节点 I	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
143	3	155	27	-59.5	-141.6	-58.6	-142.2	142.2	207	227.7
144	3	156	28	-59.4	-141.5	-58.5	-142.2	142.2	207	227.7
166	3	162	44	-84.4	-102.0	-50.3	-135.8	135.8	207	227.7
165	3	161	43	-84.4	-102.0	-50.4	-135.7	135.7	207	227.7
158	3	32	162	-65.8	-119.7	-86.5	-98.6	119.7	207	227.7
157	3	31	161	-66.1	-119.5	-86.6	-98.6	119.5	207	227.7
215	6	17	25	62.8	-115.9	0.9	-53.7	115.9	207	227.7
216	6	18	26	62.6	-115.9	0.7	-53.8	115.9	207	227.7
172	3	46	48	114.8	-114.6	108.2	-108.1	114.8	207	227.7
171	3	45	47	114.7	-114.7	108.5	-108.5	114.7	207	227.7

第二种情况：侧面来风

(1) 加载

额定载荷时，在井架顶部的每根大腿施加力：

$$F = \frac{2293.57}{4} = 573.393 \text{ kN}$$

二层台重量载荷： $G_{\text{二层台}}=45 \text{ kN}$ 均布在二层台各节点上。

井架上、中、下段风速 20.7 m/s 侧面来风时风载：

右扇风载：

$$P_{\text{风上侧1}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_2 = 8.728848 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风中侧1}} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_1 = 11.21279 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风下侧1}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_1 = 10.91431 \text{ kN}$$

左扇风载：

$$P_{\text{风上侧1}} = k_{z\text{上侧}} \cdot k_{\text{上侧}} \cdot F_{\text{上}} \cdot W_1 = 2.760124 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风中侧1}} = k_{z\text{中侧}} \cdot k_{\text{中侧}} \cdot F_{\text{中}} \cdot W_1 = 5.406059 \text{ kN}$$

$$P_{\text{风下侧1}} = k_{z\text{下侧}} \cdot k_{\text{下}} \cdot F_{\text{下侧}} \cdot W_1 = 6.026875 \text{ kN}$$

(2) 分析

风速 20.7 m/s 、额定载荷、侧面来风井架变形图如图 4-17，应力图如图 4-18，前 10 个较大应力单元杆件如表 4-7 所示。由图表可知：

a) 井架应力分布趋势：应力较大单元大多分布在井架的前后 4 条主大腿上，侧扇横撑应力较小；井架整体应力下部大于上部。

b) 井架变形分布情况：井架上端变形较大，下部较小；后扇横撑变形也较大，最下段变形最小。

c) 最大应力位于 171 单元，最大应力值为 126.5 MPa ；次最大应力发生在 165 单元，其值为 125.5 MPa 。

(3) 强度校核

根据 API SPEC 4F 规定，井架结构的安全系数为 1.67。

最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限值为 $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$ ，安全系数为 2.727，满足安全系数要求。

次最大应力处单元材料为 Q345B，屈服极限为 345 MPa ，安全系数为 2.749，满足安全系数要求。

(4) 小结

井架在风速 20.7 m/s 、额定载荷、侧面来风工况下安全可靠。

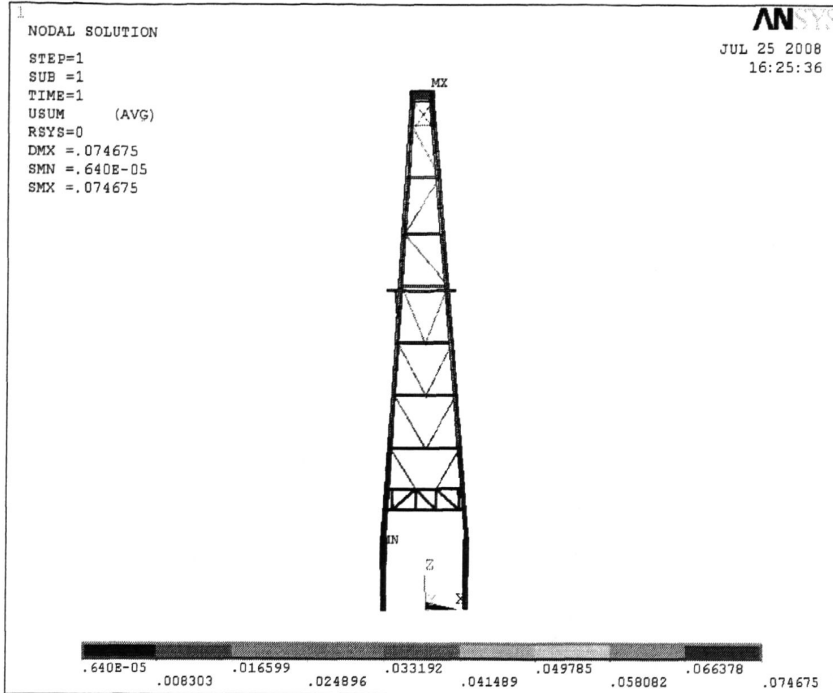


图 4-17 风速 20.7 m/s、侧风、额定载荷井架变形图

Fig4-17 Derrick's distortion chart under rated load when its side comes the wind(20.7 m/s)

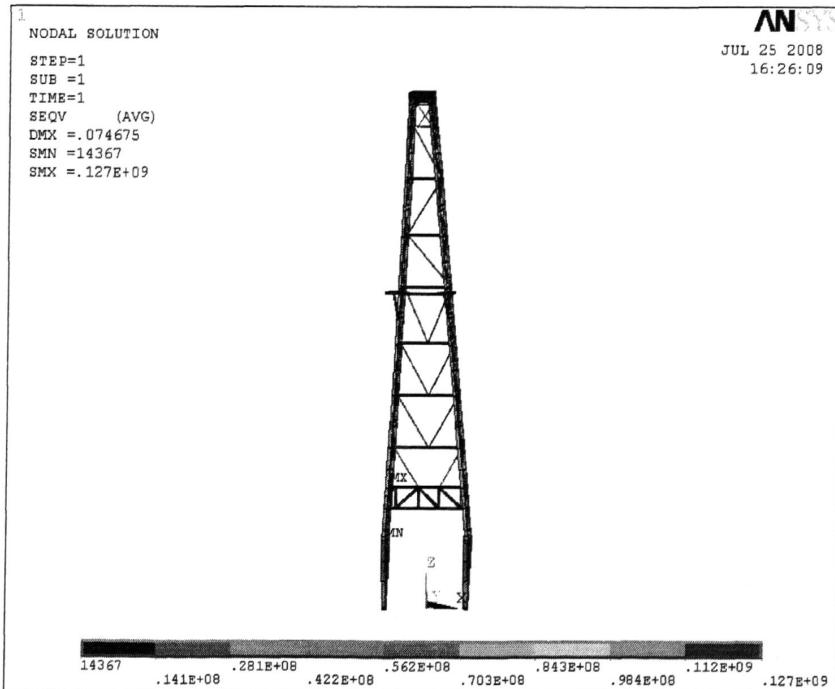


表 4-7 风速 20.7 m/s、侧风、额定载荷井架前 10 个较大应力表 (单位: MPa)

Table4-7 Derrick's first 10 big stresses under rated load when its side comes the wind(20.7 m/s)

unit: MPa

单元号	实常数	节点 I	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
171	3	45	47	126.5	-122.5	120.7	-116.6	126.5	207	227.7
165	3	161	43	-71.8	-94.0	-40.1	-125.5	125.5	207	227.7
215	6	17	25	45.7	-124.1	-8.1	-70.1	124.1	207	227.7
166	3	162	44	-71.3	-89.6	-41.2	-119.5	119.5	207	227.7
144	3	156	28	-51.0	-119.1	-50.4	-119.5	119.5	207	227.7
240	10	37	39	112.1	-115.0	64.4	-67.3	115.0	207	227.7
172	3	46	48	111.0	-108.3	103.4	-100.7	111.0	207	227.7
157	3	31	161	-54.2	-110.8	-78.4	-86.2	110.8	207	227.7
143	3	155	27	-67.8	-105.0	-62.4	-110.2	110.2	207	227.7
175	3	47	55	-12.8	-106.6	-36.3	-82.6	106.6	207	227.7

第五章 井架整体的起升强度计算分析

5.1 快绳拉力计算

5.1.1 起升过程的静载荷

天车重量： $G_{\text{天车}} = 48.9 \text{ kN}$ 二层台自重： $G_{\text{二台}} = 45 \text{ kN}$

游车大钩重量： $G_{\text{游}} = 94.52 \text{ kN}$ 钢丝绳自重： $G_{\text{绳}} = 29.176 \text{ kN}$

5.1.2 快绳拉力 P 载荷计算

通过 ANSYS 有限元模型，施加载荷，求解井架前部的支架 Y 向约束反力近似为零，来确定快绳拉力，游系结构 6×7。

利用井架静力计算模型，并考虑起升底座的重量力，通过有限元仿真得到不同起升角时的快绳拉力。

井架起升角 $\alpha = 6^\circ$ 时，快绳拉力 $P = 84.6 \text{ kN}$

井架起升角 $\alpha = 10^\circ$ 时，快绳拉力 $P = 76.05 \text{ kN}$

井架起升角 $\alpha = 15^\circ$ 时，快绳拉力 $P = 71.65 \text{ kN}$

以上计算表明，在井架起升过程中，快绳拉力 P 逐渐减小。

5.2 井架起升强度计算分析

5.2.1 井架原始结构起升角 $\alpha = 6^\circ$ （起升的初始状态）强度计算

（1）分析

快绳拉力 $P = 84.6 \text{ kN}$ ，变形如图 5-1，应力图 5-2，应力表 5-1。由图表可知：

a) 最大应力发生在 143 号单元，最大应力值为 288.7 MPa。该单元处材料为 Q345B，屈服极限为 345 MPa，安全系数为 1.195。

b) 次最大应力发生在 144 号单元，应力值 288.4 MPa。该单元处材料为 Q345B，屈服极限为 345 MPa，安全系数为 1.196。

（2）强度校核

根据经验，井架起升工况下安全系数不低于 1.5，该工况下起升井架安全系数偏小。

（3）优化设计

最大应力出现在井架大腿连接处，如图 5-3 所示。考虑到井架初始起升的安全性要求，对井架大腿连接处应加强（该单元格杆件全用 H450×300×14×20），加强方案如图

5-4 所示。加强后重新计算，变形如图 5-5，应力如图 5-6，应力如表 5-2。

加强后最大应力发生在 213 号单元，最大应力值为 211.6 MPa，该单元处材料为 Q345B，屈服极限为 345 MPa，安全系数为 1.63；次最大应力发生在 214 号单元，应力值为 211.3 MPa，该单元处材料为 Q345B，屈服极限为 345 MPa，安全系数为 1.633。

经强度校核，满足安全系数要求。

(4) 小结

优化设计后，井架强度在原始结构起升角 $\alpha = 6^\circ$ （起升的初始状态）时满足起升安全强度要求。

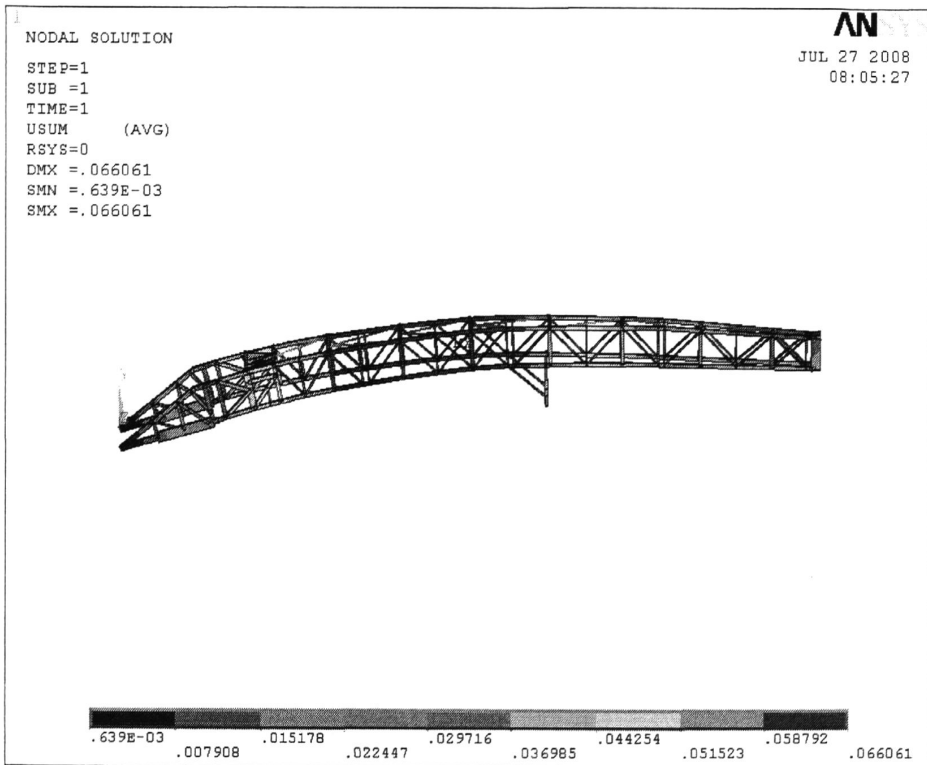


图 5-1 起升角 $\alpha = 6^\circ$ 井架原始结构变形图

Fig5-1 Derrick's primary structure distortion chart when $\alpha = 6^\circ$

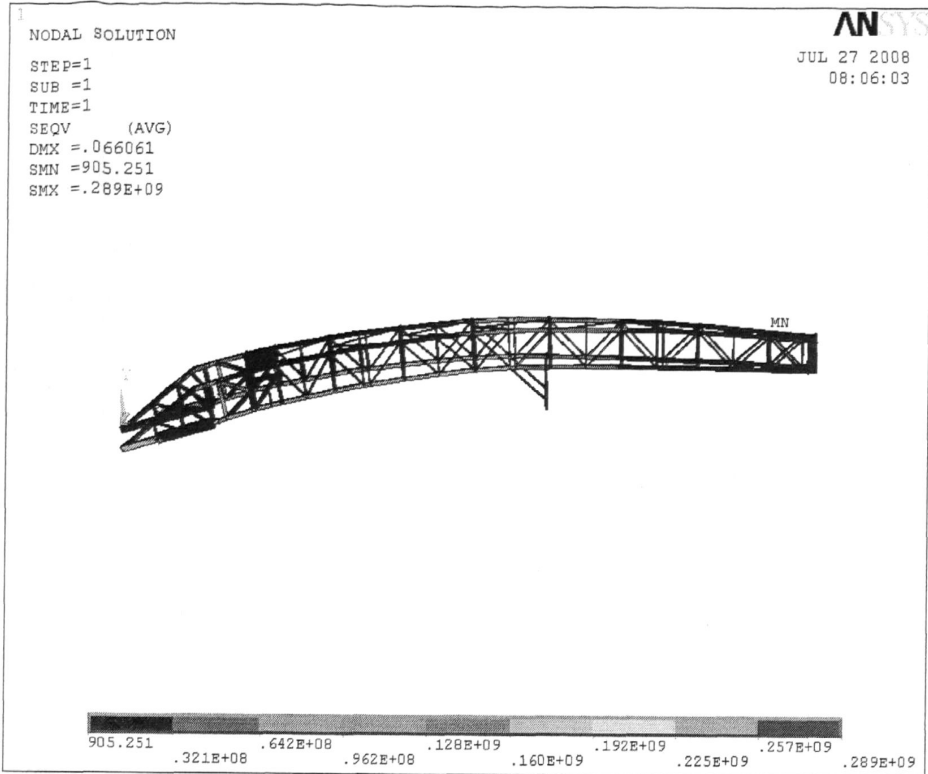


图 5-2 起升角 $\alpha = 6^\circ$ 井架原始结构应力图

Fig5-2 Derrick's primary structure stress chart when $\alpha = 6^\circ$

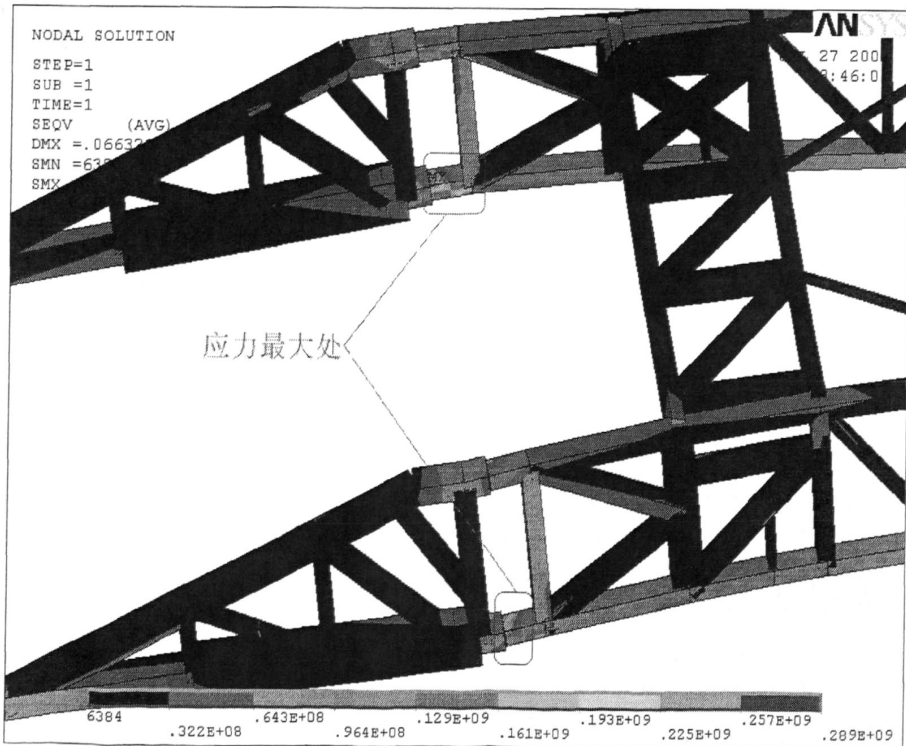


图 5-3 井架原始结构最大应力局部放大图

Fig5-1 Derrick's biggest stress chart of primary structure when $\alpha = 6^\circ$

表 5-1 起升角 $\alpha = 6^\circ$ 井架原始结构前 10 个较大应力表 (单位: MPa)

Table5-1 First 10 big stresses of derrick's primary structure when $\alpha = 6^\circ$ unit: MPa

单元号	实常数	节点 i	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
143	3	155	27	63.0	-288.7	56.8	-282.5	288.7	207	227.7
144	3	156	28	62.9	-288.4	56.8	-282.3	288.4	207	227.7
217	6	21	155	83.6	-208.4	21.4	-146.1	208.4	207	227.7
218	6	22	156	83.4	-208.1	21.4	-146.0	208.1	207	227.7
145	3	157	29	122.7	-182.9	132.1	-192.3	192.3	207	227.7
146	3	158	30	122.6	-183.0	131.9	-192.3	192.3	207	227.7
149	3	27	31	-65.2	-160.3	-80.3	-145.1	160.3	207	227.7
150	3	28	32	-65.1	-160.1	-80.5	-144.6	160.1	207	227.7
220	6	26	158	126.4	-160.1	55.2	-88.9	160.1	207	227.7
219	6	25	157	126.5	-160.0	55.3	-88.8	160.0	207	227.7

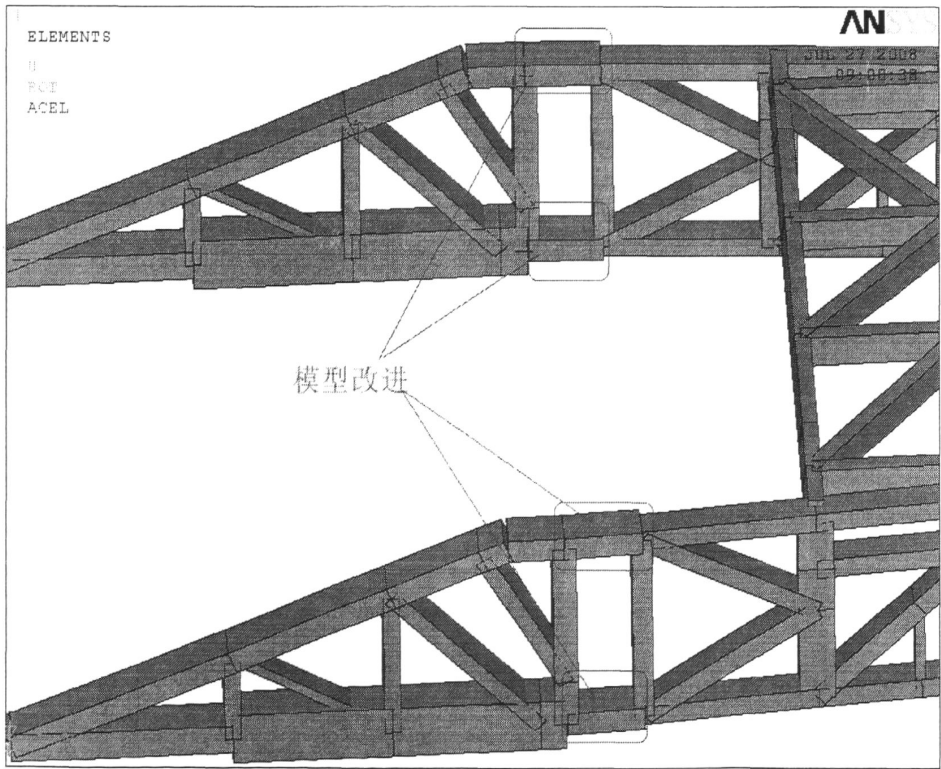


图 5-4 井架加强结构模型图

Fig5-4 Derrick's superstructure model chart

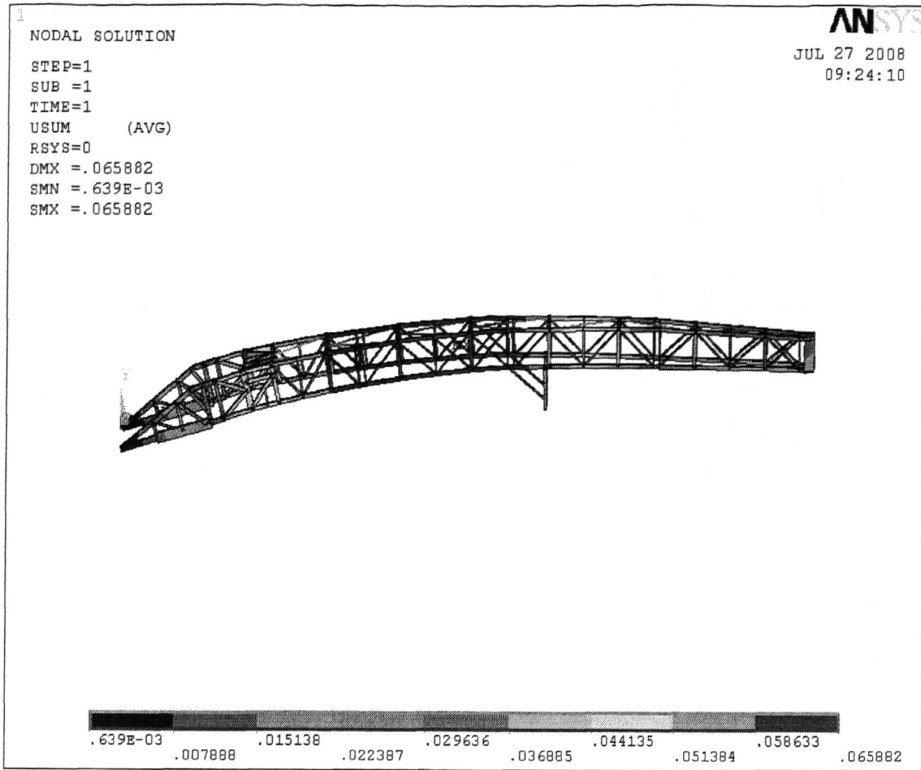


图 5-5 井架加强结构起升角 $\alpha = 6^\circ$ 变形图

Fig5-5 Derrick's superstructure distortion chart when $\alpha = 6^\circ$

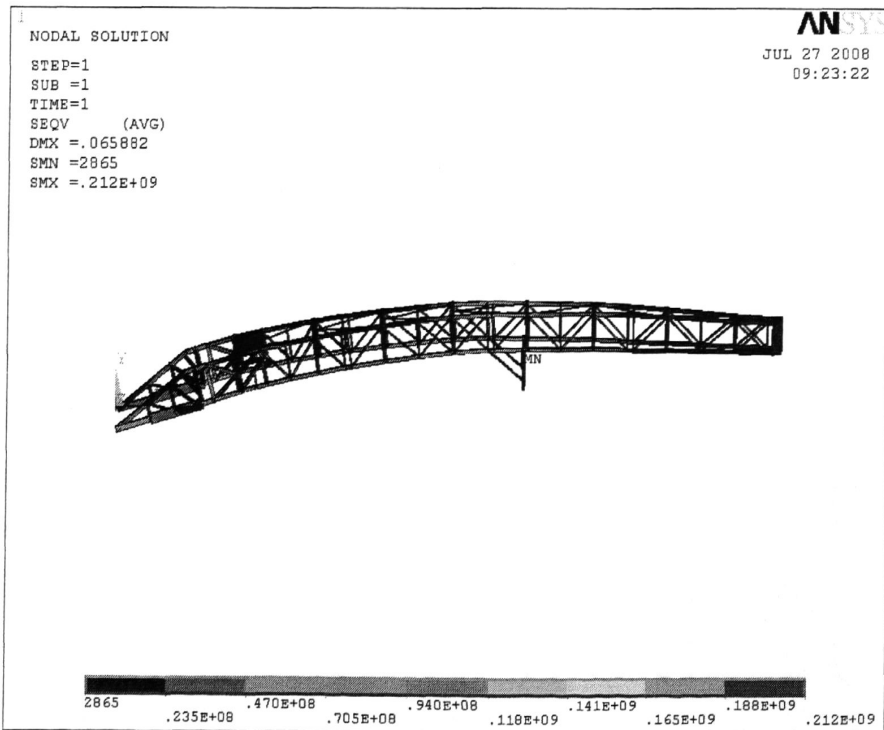


图 5-6 井架加强结构起升角 $\alpha = 6^\circ$ 应力图

Fig5-6 Derrick's superstructure stress chart when $\alpha = 6^\circ$

表 5-2 井架（加强结构）起升应力表 $\alpha=6^\circ$ 前 10 个较大应力表（单位：MPa）Table5-2 First 10 big stresses of derrick's superstructure when $\alpha = 6^\circ$ unit: MPa

单元号	实常数	节点 i	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
213	6	21	27	86.8	-211.6	21.6	-146.4	211.6	207	227.7
214	6	22	28	86.6	-211.3	21.6	-146.3	211.3	207	227.7
145	3	27	31	-62.3	-163.4	-84.0	-141.6	163.4	207	227.7
146	3	28	32	-62.2	-163.2	-84.2	-141.1	163.2	207	227.7
216	6	26	30	122.7	-156.5	64.8	-98.6	156.5	207	227.7
215	6	25	29	122.7	-156.5	64.9	-98.6	156.5	207	227.7
162	3	162	44	-106.7	-108.8	-74.1	-141.4	141.4	207	227.7
161	3	161	43	-106.6	-108.4	-74.4	-140.5	140.5	207	227.7
170	3	44	54	-85.9	-130.6	-101.8	-114.7	130.6	207	227.7
169	3	43	53	-85.4	-130.6	-101.7	-114.2	130.6	207	227.7

5.2.2 井架原始结构起升角 $\alpha=10^\circ$ 强度计算

(1) 分析

快绳拉力 $P=76.05$ kN，变形图如图 5-7，应力图 5-8，应力表如表 5-3。由图表可知：

最大应力发生在 213 号单元，最大应力值 220.4 MPa，该单元处材料为 Q345B，屈服极限为 345 MPa，安全系数为 1.565。

次最大应力发生在 214 号单元，应力值 220.1 MPa，该单元处材料为 Q345B，屈服极限为 345 MPa，安全系数为 1.567。

(2) 强度校核

根据经验，井架起升工况下安全系数不低于 1.5，该工况下起升井架安全系数满足要求。

(3) 小结

井架强度在起升角 $\alpha=10^\circ$ 时满足起升安全强度要求。

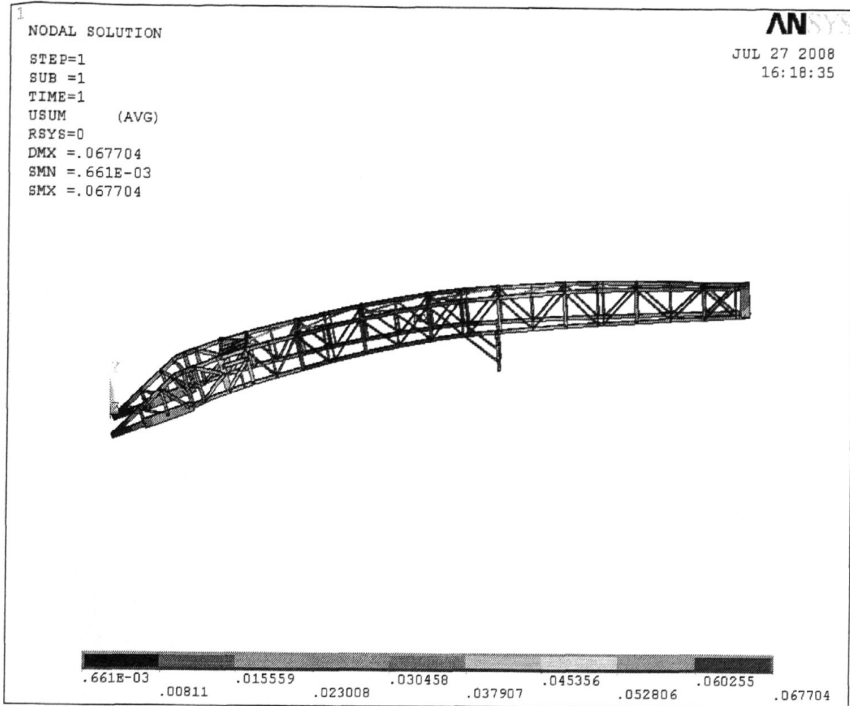


图 5-7 起升角 $\alpha = 10^\circ$ 井架原始结构变形图

Fig5-7 Derrick's primary structure distortion chart when $\alpha = 10^\circ$

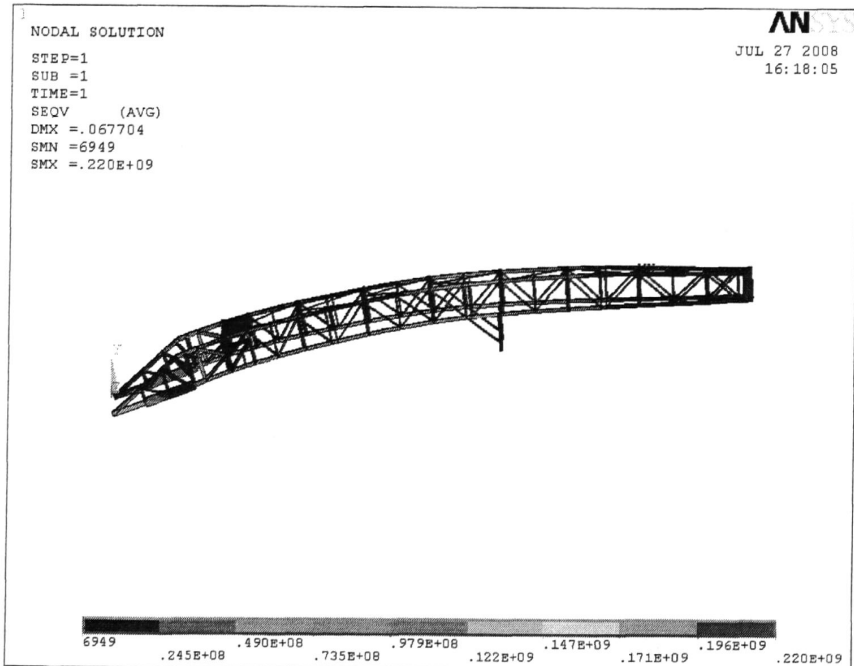


图 5-8 起升角 $\alpha = 10^\circ$ 井架原始结构应力图

Fig5-8 Derrick's primary structure stress chart when $\alpha = 10^\circ$

表 5-3 起升角 $\alpha = 10^\circ$ 井架原始结构前 10 个较大应力表 (单位: MPa)Table 5-3 First 10 big stresses of derrick's primary structure when $\alpha = 10^\circ$ unit: MPa

单元号	实常数	节点 i	节点 j	I 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
213	6	21	27	104.4	-220.4	32.4	-148.3	220.4	207	227.7
214	6	22	28	104.2	-220.1	32.3	-148.2	220.1	207	227.7
145	3	27	31	-56.2	-162.5	-83.0	-135.6	162.5	207	227.7
146	3	28	32	-56.2	-162.3	-83.2	-135.1	162.3	207	227.7
216	6	26	30	133.6	-158.0	74.6	-99.0	158.0	207	227.7
215	6	25	29	133.6	-158.0	74.7	-99.0	158.0	207	227.7
162	3	162	44	-103.4	-105.5	-73.0	-135.8	135.8	207	227.7
161	3	161	43	-103.3	-105.1	-73.4	-135.0	135.0	207	227.7
170	3	44	54	-82.9	-126.8	-99.4	-110.3	126.8	207	227.7
169	3	43	53	-82.4	-126.8	-99.3	-109.8	126.8	207	227.7

5.2.3 井架原始结构起升角 $\alpha = 15^\circ$ 强度计算

(1) 分析

快绳拉力 $P = 71.65$ kN, 变形图如图 5-9, 应力图 5-10, 应力表如表 5-4。由图表知:

最大应力发生在 213 号单元, 最大应力值 217.4 MPa, 该单元处的材料为 Q345B, 屈服极限为 345 MPa, 安全系数为 1.587。

次最大应力发生在 214 号单元, 应力值 217.1 MPa, 该单元处的材料为 Q345B, 屈服极限为 345 MPa, 安全系数为 1.589。

(2) 强度校核

根据经验, 井架起升工况下安全系数不低于 1.5, 该工况下起升井架安全系数满足要求。

(3) 小结

井架强度在起升角 $\alpha = 15^\circ$ 时满足起升安全强度要求。

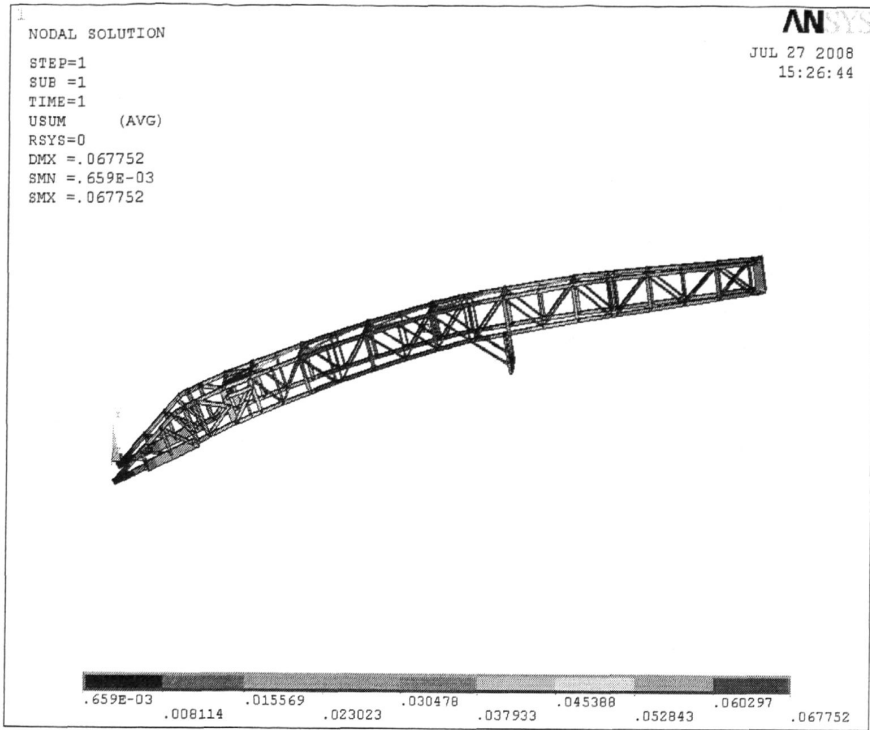


图 5-9 起升角 $\alpha = 15^\circ$ 井架原始结构变形图

Fig5-9 Derrick's primary structure distortion chart when $\alpha = 15^\circ$

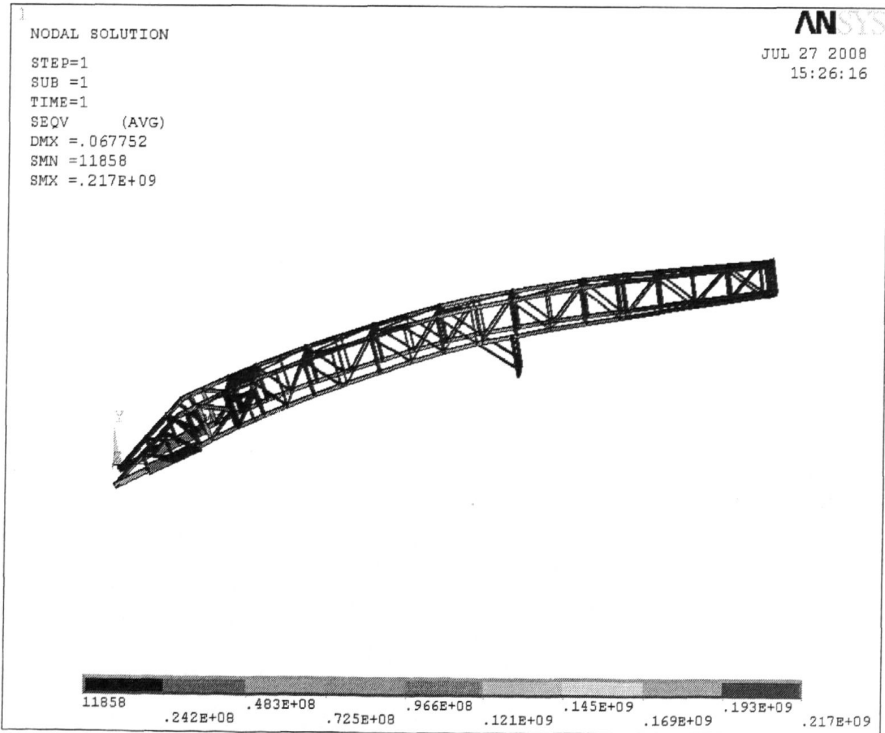


图 5-10 起升角 $\alpha = 15^\circ$ 井架原始结构应力图

Fig5-10 Derrick's primary structure stress chart when $\alpha = 15^\circ$

表 5-4 起升角 $\alpha = 15^\circ$ 井架原始结构前 10 个较大应力表 (单位: MPa)Table 5-4 First 10 big stresses of derrick's primary structure when $\alpha = 15^\circ$ unit: MPa

单元号	实常数	节点 I	节点 j	i 节点最大应力	i 节点最小应力	j 节点最大应力	j 节点最小应力	最大绝对值应力	60% 屈服应力	66% 屈服应力
213	6	21	27	105.6	-217.4	33.8	-145.5	217.4	207	227.7
214	6	22	28	105.4	-217.1	33.7	-145.3	217.1	207	227.7
145	3	27	31	-53.9	-158.8	-81.2	-131.4	158.8	207	227.7
146	3	28	32	-53.9	-158.6	-81.4	-131.0	158.6	207	227.7
216	6	26	30	133.1	-155.4	75.1	-97.3	155.4	207	227.7
215	6	25	29	133.2	-155.4	75.2	-97.3	155.4	207	227.7
162	3	162	44	-100.7	-102.9	-71.4	-132.1	132.1	207	227.7
161	3	161	43	-100.4	-102.7	-71.8	-131.3	131.3	207	227.7
170	3	44	54	-80.8	-123.6	-96.8	-107.4	123.6	207	227.7
169	3	43	53	-80.4	-123.5	-96.8	-107.0	123.5	207	227.7

5.3 人字架的起升强度计算分析

(1) 加载

人字架起升强度采用实体模型进行计算, 根据 CAD 图纸在 Pro/E 里建立实体模型 (图 5-11), 然后导入 ANSYS Workbench 计算。井架起升角 $\alpha = 6^\circ$ (起升的初始状态) 时, 快绳拉力最大, $P = 84.6$ kN, 根据此工况进行人字架起升强度计算。

人字架约束图见图 5-12, 加载图见 5-13。

(2) 分析

最大应力图见图 5-14, 最大位移图见 5-15, 人字架最大应力放大图见图 5-16, 人字架前腿应力较大点分布图见图 5-17, 人字架后腿应力较大点分布图见图 5-18。由图表知: 最大应力值为 180 MPa, 最大应力点位于后腿弯曲处, 前后腿的外侧应力比较大; 最大位移为 13.4 mm, 发生在人字架顶部。

(3) 强度校核

根据 API SPEC 4F 规定, 井架结构的安全系数为 1.67。

人字架最大应力处单元材料为 Q345B, 屈服极限值为 $\sigma_s = 345$ MPa, 人字架在起升时的安全系数为 1.92, 满足安全系数要求。

(4) 小结

人字架强度起升时满足起升安全强度要求。

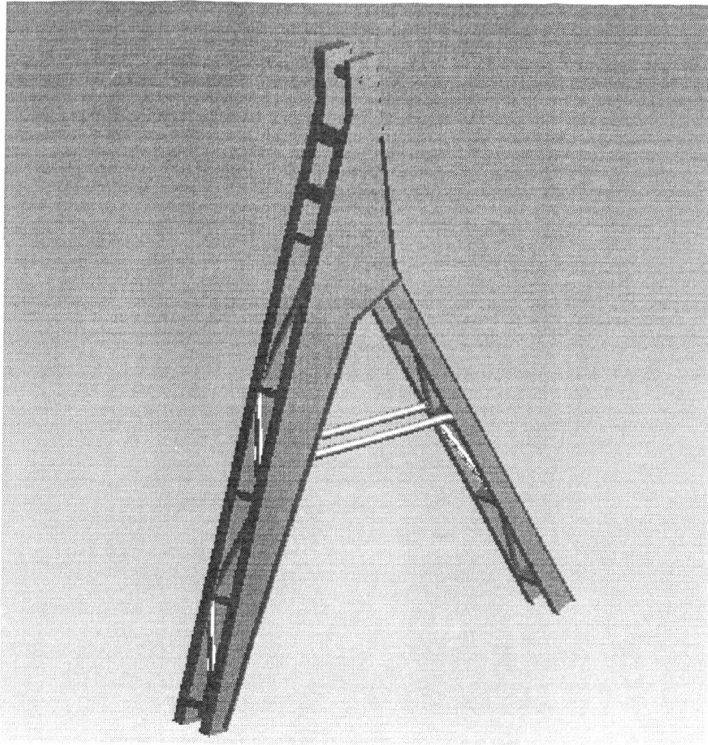


图 5-11 人字架实体模型图

Fig5-11 Gin pole's entity model chart

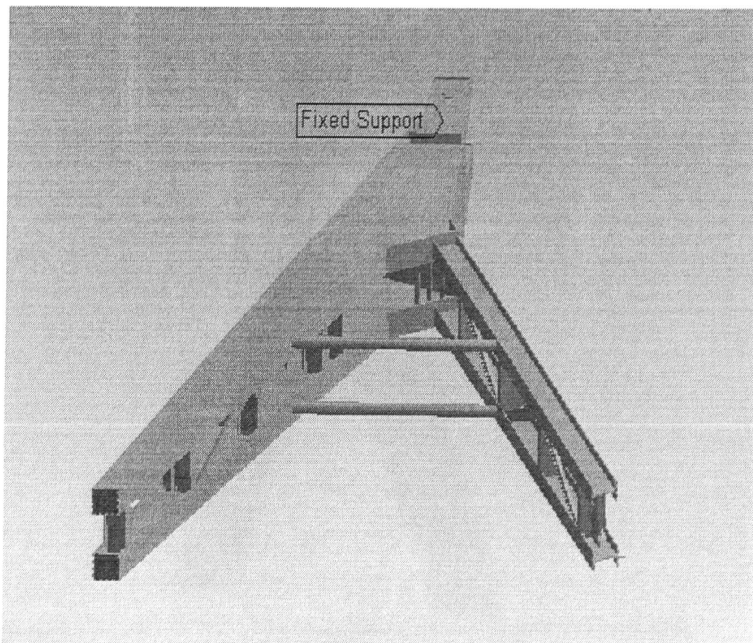


图 5-12 人字架约束图（约束面为绿色）

Fig5-12 Gin pole's restraint chart (The restraint surface is a green)

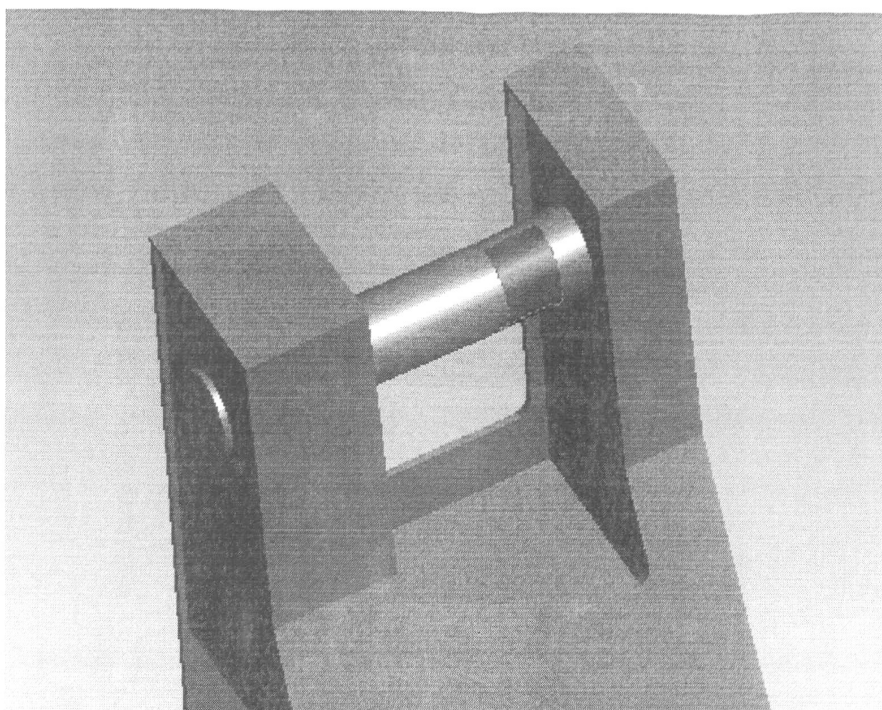


图 5-13 人字架加载图 (加载面为绿色)

Fig5-13 Gin pole's loading chart (The loading surface is a green)

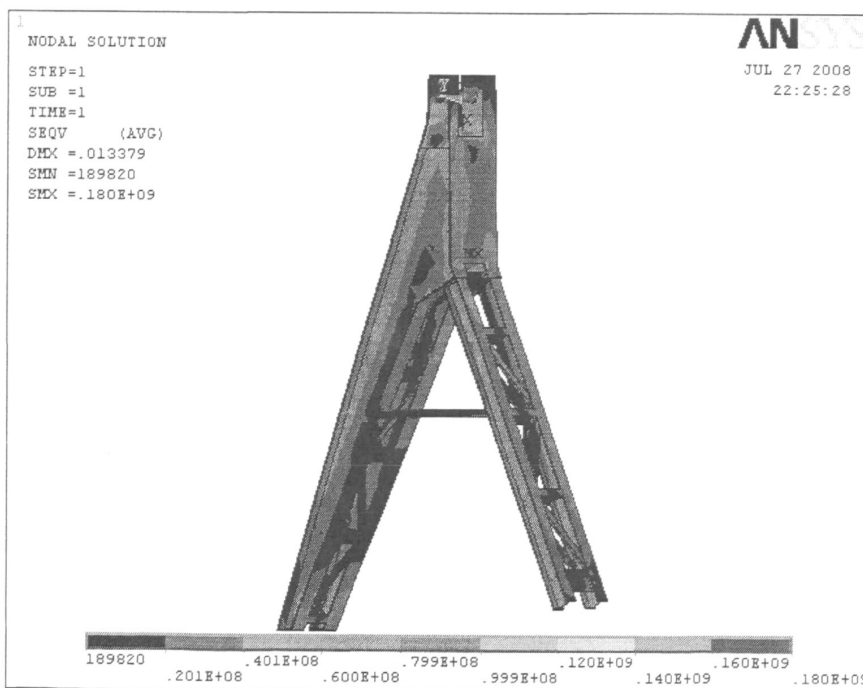


图 5-14 人字架最大应力图

Fig5-14 Gin pole's biggest stress chart

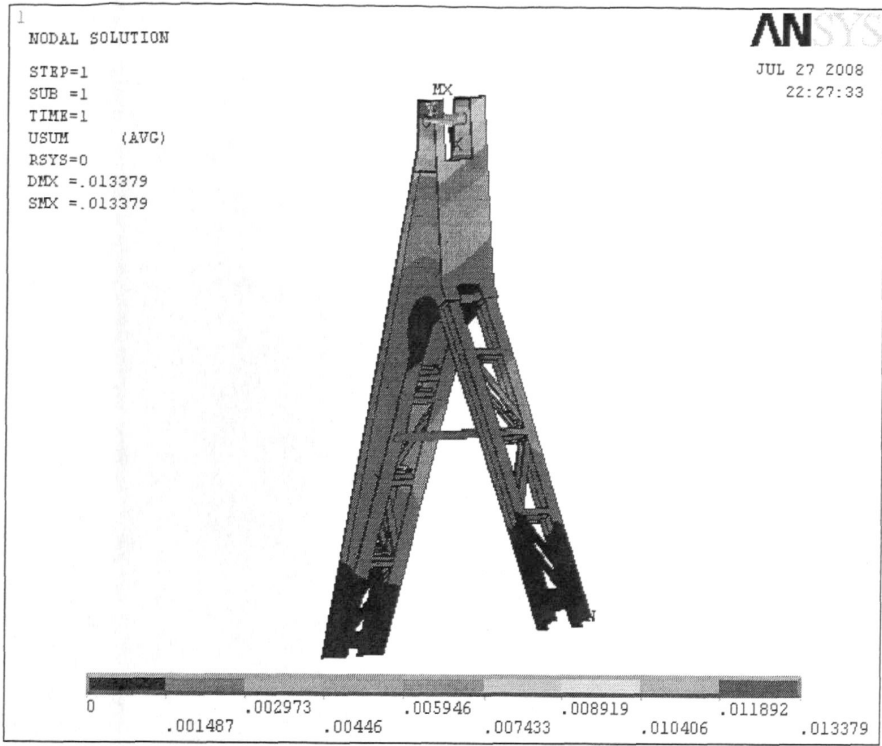


图 5-15 人字架最大位移图

Fig5-15 Gin pole's biggest displacement chart



图 5-16 人字架最大应力放大图

Fig5-16 Gin pole's biggest stress enlarged chart

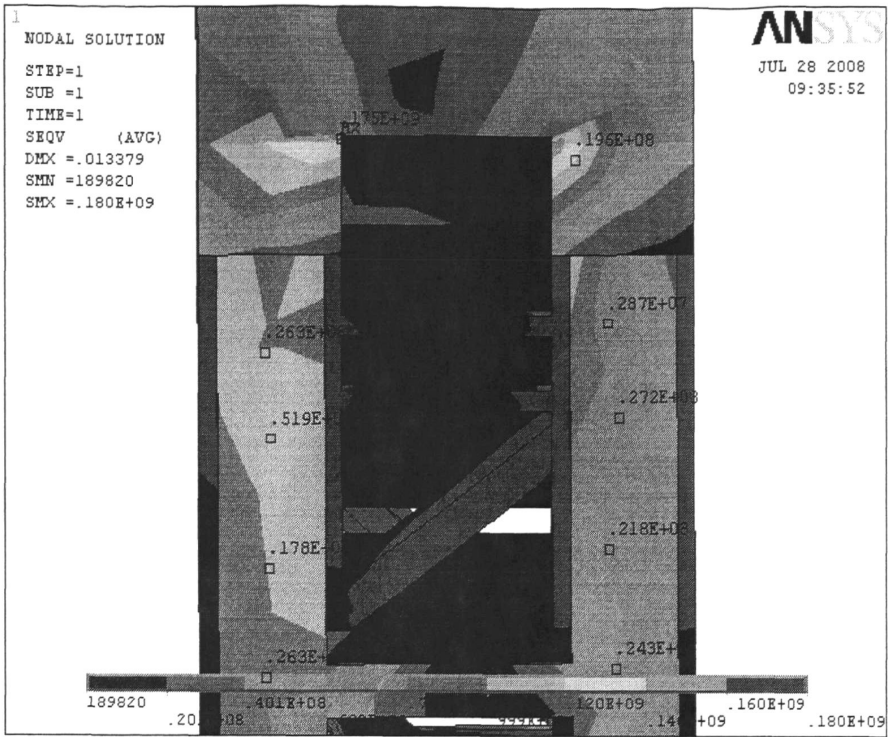


图 5-17 人字架前腿应力较大点分布图

Fig5-17 Gin pole's bigger spot of lead leg stress distribution chart

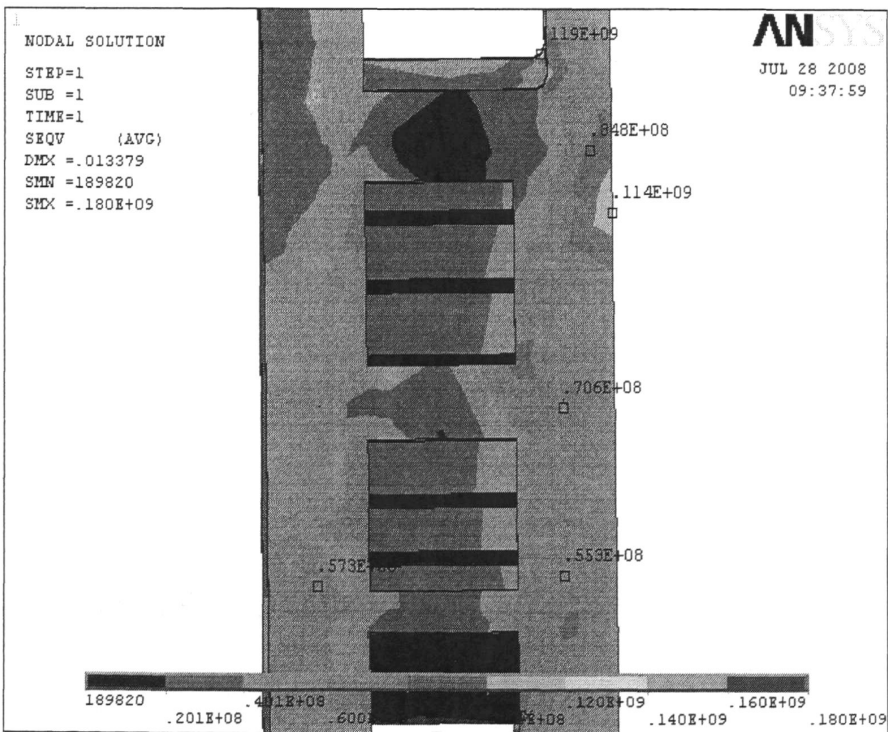


图 5-18 人字架后腿应力较大点分布图

Fig5-18 Gin pole's bigger spot of hind leg stress distribution chart

第六章 井架的整体稳定性计算分析

6.1 前开口井架稳定性概念

ZJ50/3150LDB 钻机井架前扇是敞开的，为前开口井架。前开口的受力，因井架横截面缩小，天车梁位置向开口侧偏移，因而大钩载荷偏心作用在井架顶部。所以前开口井架的整体稳定计算模型可简化为一端作用一个弯矩的压弯柱模型，分别计算正面和侧面的稳定性。两端铰支的端弯矩为：

$$M = N \cdot e \quad (6-1)$$

式中 N —为轴向载荷；

e —为偏心距。

如果井架两个前大腿的稳定性满足要求，侧面的稳定性可不必计算。井架前大腿的稳定性不仅和其本身的抗弯刚度有关，而且在很大程度上取决井架每层横杆组成的框架的抗弯能力。一般在井架的最上部形成刚度较大的框架，或做成前扇封闭结构，而下部牢固连接在基座上，限制了前大腿上下端的横向位移。因此，前大腿的稳定性计算模型可简化为两端铰支，中间具有许多等距离分布的弹性支座（每层框架的横杆的约束作用相当于一个弹性支座）的压弯柱，考虑到每层横杆组成的框架具有相同或相近的刚度，可用连续的弹性介质代替。

腹实式柱：柱构件的截面形式，一是单个热轧型钢截面；二是两个或两个以上的热轧型钢的组合，以及型钢与板钢的组合截面。

格构式柱：截面形式由格构式组合截面。

腹实式柱多用于井架的弦杆，格构式柱本身就是一个完整的构件。一般 A 形井架的两条大腿的立柱采用格构式截面。

6.2 井架整体稳定计算的理论折算法

井架的整体稳定计算模型，实质是将井架这个特殊结构的格构式结构，根据其结构和受力特点，简化为一个保持格构件式结构的抗压刚度和抗弯刚度的具有相应折算长细比 λ 的实腹受压柱来计算。因此井架的整体稳定计算分为两步：一是根据井架结构特点计算折算长细比 λ ；二是按实腹受压柱稳定计算方法计算稳定性。

(1) 折算长细比 λ 的计算方法

前开口井架为压弯模型，折算长细比

$$\lambda_{oy} = \sqrt{\lambda_y^2 + 40 \times \frac{A}{A_y}} \quad (6-2)$$

式中 λ_y —整个柱对 y 轴的长细比;

A —整个柱的截面积的毛面积;

A_y —横截面垂直于 y 轴的各斜缀条的毛面面积之和。

(2) 前开口井架大腿的总体稳定性计算

a) 计算井架横向框架提供的弹簧的刚度系数 C

$$C = \frac{N}{y_0} = \frac{E}{Lh^2 \left[\left(\frac{h}{3I_1} \right) + \left(\frac{b}{2I_2} \right) \right]} \quad (6-3)$$

式中 N —作用于 A、D 两点上的横向力 (弹性支座反力);

L —弹性支座的间距 (井架每层高度);

y_0 —在 N 作用下, 节点 A、D 的位移;

E —材料弹性模量;

h —侧扇横杆的长度;

b —后扇横杆的长度;

I_1 、 I_2 —侧扇、后扇横杆的惯性矩。

找出刚度系数最小值。

b) 计算 CL/Af , L 为两弹性支座之间的距离, A 为大腿的截面积, f 为采用材料的抗压设计强度。

c) 根据大腿具有的节间数 n 和 CL/Af , 查表, 确定弹性支承系数 μ 。

d) 计算大腿节间的细长比 $\lambda = \frac{\mu L}{r}$ 。

e) 由 λ 和截面类型查表, 确定折算系数 φ , 即轴心受压构件的稳定系数 φ 。

6.3 井架整体稳定计算结果

经 ANSYS 仿真得到井架临界失稳变形图, 如图 6-1。

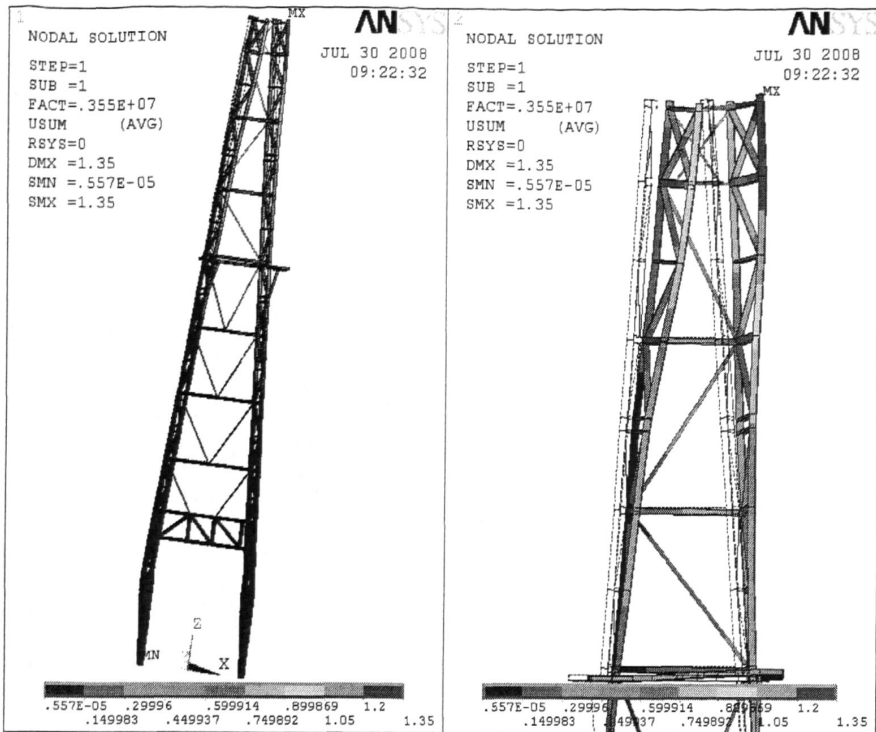


图 6-1 井架临界失稳变形图

Fig6-1 Derrick's critical instability distortion chart

6.3.1 井架临界载荷分析

经 ANSYS 计算，ZJ50/3150LDB 钻机井架失稳的临界载荷为：

$$P_{cr} = 4 \times 3\ 547.8 = 14\ 191.2\ \text{kN}$$

井架顶部最大承受载荷：

$$P_{\max} = Q_{\max} + G_{\text{天车}} + G_{\text{游系}} + F_{\text{绳}} = 3\ 868.57\ \text{kN}$$

因为 $P_{\max} < P_{cr}$ ，所以该井架整体保持稳定。

6.3.2 井架临界变形分析

由图 6-1 知，井架临界变形值为：1.35 m。

又根据前面静力计算结果，得到各工况实际变形值，列表 6-1：

表 6-1 各工况井架三个方向最大位移表

Table 6-1 Derrick's biggest displacements under each kind of operating mode

工况	节点	X 方向位移(m)	Y 方向位移(m)	Z 方向位移 (m)
		UX	UY	UZ
最大静载荷	27	-0.33710E-02		
	135		-0.11013	
	136			-0.29311E-01
风速 47.8 m/s 背面来风	28	0.27101E-02		
	133		-0.20077	
	232			-0.25542E-01
风速 47.8 m/s 侧面来风	122	-0.53047E-01		
	134		-0.27604E-01	
	226			-0.78715E-02
风速 36 m/s 背面来风	28	0.33348 E-02		
	133		-0.26091	
	232			-0.33385 E-01
风速 36 m/s 侧面来风	222	-0.65932 E-01		
	204		-0.33735 E-01	
	226			-0.96768 E-02
风速 20.7 m/s 额定载荷 背面来风	28	0.25416E-02		
	135		-0.10269	
	232			-0.19830E-01
风速 20.7 m/s 额定载荷 侧面来风	122	-0.10615E-01		
	136		-0.71849E-01	
	136			-0.18482E-01

从表中看出, 各工况最大位移值均小于井架临界变形值, 故井架稳定。

综上所述得出结论: ZJ50/3150LDB 钻机井架整体稳定性安全可靠。

第七章 结论

7.1 井架的设计

对国内外钻机井架进行了研究,对同类产品进行了比较分析,对产品设计要求进行全面分析,提出了 ZJ50/3150LDB 钻机井架的设计方案,确定了井架的基本参数、材料、整体结构型式、井架的主要结构以及井架的制造工艺要求。

7.2 井架的有限元仿真分析

通过对 ZJ50/3150LDB 钻机井架的有限元仿真分析,对该井架的应力分布以及承载性能有了深入了解。

7.2.1 最恶劣工况

(1) 井架竖立工作时

①井架在承受最大静载工作即 $Q_{\max} = 3\ 150\ \text{kN}$ 时是较恶劣工况。最大应力位于 166 号单元,位于井架侧扇下部。最大应力值为 $194.6\ \text{MPa}$,按材料为 Q345B,屈服极限值为 $\sigma_s = 345\ \text{MPa}$,则井架原始结构在最大载荷下的安全系数为 1.773。

②最大风速 $47.8\ \text{m/s}$ 、无钩载、无立根时,井架背面来风比侧面来风受应力大,背面来风井架最大应力为: $\sigma_{\max} = 200\ \text{MPa}$,位于 143 号单元。按材料为 Q345B,屈服极限值为 $\sigma_s = 345\ \text{MPa}$,则井架在该工况下安全系数为 1.725。

③风速 $36\ \text{m/s}$ 、满立根、无钩载时,井架背面来风比侧面来风受应力大,最大应力位于 143 号单元,井架大腿连接处。最大应力值为 $253.3\ \text{MPa}$,按材料为 Q345B,屈服极限值为 $\sigma_s = 345\ \text{MPa}$,安全系数为 1.362,安全系数偏小,所以要特别加强井架大腿连接处,以便提高井架工作安全系数。具体加强方案和加强大腿连接处后井架的应力图见图 4-12 所示。加强后最大应力位于 211 号单元,最大应力值为 $188.4\ \text{MPa}$,按材料为 Q345B,屈服极限值为 $\sigma_s = 345\ \text{MPa}$,安全系数为 1.831。

④在额定载荷下风速 $20.7\ \text{m/s}$ 时,井架背面来风比侧面来风受应力大,背面来风井架最大应力为: $\sigma_{\max} = 142.2\ \text{MPa}$,位于 143、144 号单元。按材料为 Q345B,屈服极限值为 $\sigma_s = 345\ \text{MPa}$,则井架在该工况下安全系数为 2.426。

(2) 井架起升

井架起升时,比井架竖立工作时的服役情况较恶劣,下表列出了井架起升各角度的

快绳拉力和井架产生的最大应力。

表 7-1 井架起升快绳拉力、应力列表

Table 7-1 Derrick's quick rope pulling force and the stress tabulation when lifts

井架起升角	起升快绳拉力	井架起升最大应力
$\alpha = 6^\circ$ (原始模型)	$P = 84.6 \text{ kN}$	$\sigma_{\max} = 289 \text{ MPa}$
$\alpha = 6^\circ$ (改进模型)	$P = 84.65 \text{ kN}$	$\sigma_{\max} = 212 \text{ MPa}$
$\alpha = 10^\circ$	$P = 76.05 \text{ kN}$	$\sigma_{\max} = 220 \text{ MPa}$
$\alpha = 15^\circ$	$P = 71.65 \text{ kN}$	$\sigma_{\max} = 217 \text{ MPa}$

$\alpha = 6^\circ$ 起升井架, 原始模型应力较大 (289 MPa), 起升安全系数偏小, 最大应力发生在 143 号单元 (井架大腿连接处), 为了提高起升安全系数, 应加强井架大腿连接处, 加强方案见图 5-4 所示。加强后井架最大应力为 212 MPa, 最大应力发生在 213 号单元, 安全系数为 1.63, 满足起升安全要求。

$\alpha = 10^\circ$ 起升井架, 最大应力为 220 MPa, 最大应力发生在 213 号单元, 安全系数为 1.565, 满足起升安全要求。

$\alpha = 15^\circ$ 起升井架, 最大应力为 217 MPa, 最大应力发生在 213 号单元, 安全系数为 1.587, 满足起升安全要求。

起升人字架时最大应力值为 180 MPa, 最大应力点位于后腿弯曲处, 安全系数 1.92。

7.2.2 最大变形工况

满立根、风速 36 m/s、背面来风时井架变形最大, 最大位移为 264 mm, 发生在井架顶端节点, 方向指向井架前开口方向。

表 7-2 井架顶端最大工况时的位移

Table 7-1 The biggest operating mode displacement of derrick's peak

工 况	向井架开口方向的最大位移 (mm)
风速为 47.8 m/s 背面来风	202
井架独立结构最大载荷	114
风速为 20.7 m/s 额定载荷背面来风	104
风速 36 m/s 背面来风	264

7.2.3 有限元仿真分析结论

对井架所有工况进行了计算分析, 得到如下结论:

(1) 静力安全系数

最大静载荷下最小安全系数为 1.773; 最大风速 47 m/s、无钩载、无立根时, 最小安全系数为 1.725; 最大风速 36 m/s、满立根、无钩载时(加强后), 最小安全系数为 1.831; 最大风速 20.7 m/s、额定钩载时, 最小安全系数为 2.426。井架静力状态安全可靠。

(2) 起升安全系数

起升井架时最小安全系数为 1.565; 起升人字架最小安全系数为 1.92。井架起升工况安全可靠。

(3) 整体稳定性

井架顶部最大承受载荷远小于临界失稳载荷, 井架整体稳定性安全可靠。

综上所述, ZJ50/3150LDB 钻机井架满足设计要求, 设计合理、安全可靠。

参考文献

- [1] 李继志, 陈荣振. 石油钻采机械概论[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2000: 183-186
- [2] 常玉连, 刘玉泉. 井架、底座的设计计算[M]. 石油工业出版社, 1994
- [3] 杨斌, 高峰, 颜刚. 国产石油钻机发展方向探讨[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(5): 37-39
- [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
- [5] 崔俊芝. 计算机辅助工程(CAE) 的现在和未来[J]. 计算机辅助设计与制造, 2000, 6: 3-7
- [6] 王自秦. 计算机辅助工程(CAE) 技术及其应用[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2001, 30(4): 16-18
- [7] 陈精一, 蔡国忠. 电脑辅助工程分析ANSYS 使用指南[M]. 中国铁道出版社, 2001:
- [8] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在ANSYS 上的实现[M]. 西北工业大学出版社, 1999: 55-57
- [9] 冷纪桐, 赵军, 张娅. 有限元技术基础[M]. 东营: 化学工业出版社, 2007: 124-157
- [10] 张立新, 徐长航, 陈江荣等. ANSYS 7.0基础教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 1-47
- [11] 署恒木, 仝兴华. 工程有限单元法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2004: 38-39
- [12] 高学仕. 修井机井架的可靠性计算分析[J]. 石油机械, 2001, 29(10): 25-26
- [13] 杨雄. 井架实腹式轴心压杆稳定性计算新方法[J]. 石油机械, 2006, 34(8): 28
- [14] 李夯, 齐明侠. 基于ANSYS的K形井架结构研究[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(2): 5
- [15] 邹龙庆, 李翠艳, 王树忠等. ZJ40/2250DB型钻机井架及底座静动态特性研究[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(2): 15-17
- [16] 赵庆梅, 周国强, 韩东颖. 井架结构安全承载力动态参数评定方法[J], 石油矿场机械, 2005, 34(6): 36-38
- [17] 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
- [18] 刘晓嘉, 邓勇刚, 万夫. F320钻机人字架仿真分析[J]. 中国测试技术, 2007, 33(2): 36-38

- [19] SY/T 5609-1999, 石油钻机型式与基本参数[S]. 北京: 石油工业出版社, 1999
- [20] 周学军. 钢结构设计规范 (GB 50017) 应用指导[M]. 山东科学技术出版社, 2004: 31-35
- [21] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003
- [22] API Specification 4F, Specification for Drilling and Well Servicing Structures[S].API, 2008
- [23] GB/T 1591-1994, 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994
- [24] 李翠翘. 人字架一次起升井架底座的应用[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(5):113
- [25] 赵国珍、龚伟安. 钻井力学基础[M]. 石油工业出版社, 1988 :337-371
- [26] 荣见华、郑健龙、徐飞鸿. 结构动力修改及优化设计[M]. 人民交通出版社, 2002:124, 89-157
- [27] 徐广利. ZJ40JD/2250JD钻机的研制与应用[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(4):69-72
- [28] 吴福才, 卢群辉. 5000 m钻机选型分析[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(5):58-60
- [29] 陈如恒, 沈家骏. 钻井机械的设计计算[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 263-294
- [30] 张勇, 何军国. 井架结构设计中的优势原则[J]. 石油矿场机械, 2006, 35(5) :86-87
- [31] 苗建军, 苏斯君. 理想钻机的设计思想与现代设计理念[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(5):16-18
- [32] 方建军, 刘仕良. 机械动态仿真与工程分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 224-304
- [33] ANSYS, Inc.ANSYS 5.7 Document.2001
- [34] Palle Thoft-Christensen,Michael J.Baker.Structural Reliability Theory and Its Applications.New York,1982

攻读硕士学位期间取得的学术成果

[1] 戴相富, 张子胜, 郑满圈, 王维忠, 张建军, 高荣霞. ZYT5500TZJ钻机车, 中原石油勘探局科技进步一等奖, 2006.4

[2] 高荣霞. ZJ40/2250DZ钻机的质量控制点研究, 中油特种车辆有限公司技术创新成果一等奖, 2007.4

致谢

经过一年多的努力，终于完成了本篇机械工程硕士论文撰写工作。论文的顺利完成，首先应归功于我的指导老师——中国石油大学机电工程学院的高学仕教授，从课题选择至课题实施、论文撰写，处处都留下了高老师的心血。在他的指导与帮助下，使我对工程设计的认识有了质的飞跃，为今后工作打下了坚实的基础，在此，特向高老师表示由衷的感谢和崇高的敬意。同时，我还要感谢中国石油大学机电工程学院的老师。他们在我论文撰写过程中，给予我谆谆教导和帮助，使我得以完成论文的撰写工作。在课题进行全过程中，我的企业导师——中油特种车辆有限责任公司的郑满圈高级工程师，在我论文撰写过程中给予了及时的指导和帮助；同时在设计过程中还得到其他有关人员的多方指导帮助。在此对所有参与该项目的人员表示衷心的感谢。

在整个攻读研究生期间，在中国石油大学各位老师们的热心指导和帮助下，我学到了不仅仅是书本知识，他们那严谨、认真、负责的教学态度和忘我钻研的精神将使我终生受益。另外，在工作和生活中，我还得到了单位领导、同事的支持、关心和帮助，以及我爱人对我的理解和支持，在此对支持我、帮助我完成此论文和课程研究的所有人员表示衷心的感谢！

最后，我还要感谢中油特种车辆有限责任公司为我创造了这次难得的学习机会，使我得以进一步深造。

2008.10.10