

文章编号:1001-4500(2002)01-0011-06

大型半潜式钻井平台结构设计关键技术研究

马延德

(大连新船重工有限责任公司,大连市 116001)

摘 要:以 BINGO-9000 型半潜式钻井平台为依据,重点介绍了平台结构设计应解决的几个主要关键技术问题。展开了对该平台在波浪作用下载荷的分析计算,在此基础上对主体结构进行了三维有限元强度分析。对平台特殊结构如 K 型管节点及支撑结构和立柱结构进行了专门的强度分析和疲劳寿命分析。同时对主体结构遭受破损后出现极限强度不足而导致结构破坏这一情况,提出了对受损主体结构极限强度分析与可靠性评估的设计思路和方法。通过以上关键设计技术的研究,可使平台结构设计更趋安全可靠合理,既具有必须的强度储备,又可减轻结构重量。

关键词:主体结构设计;疲劳寿命;极限强度

中图分类号:P752

文献标识码:A

1 概述

BINGO-9000 型半潜式钻井平台是目前世界上最先进的第五代半潜式钻井平台产品,主要技术特点是适应深海(工作水深 3000m)、恶劣气候海况(零下 20℃低温、风速 41m/s、浪高 32m)开采石油。因此平台结构设计是否安全可靠合理,是该平台的主要设计关键。本文以 BINGO-9000 型半潜式钻井平台为依托,重点介绍平台结构设计应解决的几个主要关键技术。

1.1 主体结构、主要参数及说明(如图所示)

浮体 2 个	(长×宽×高)105.00m×16.00m×12.25m		
浮体间距	55.00m	拖航排水量	~37000t
6 个立柱尺度	11.56m×11.56m	工作排水量	~52000t
立柱纵向间距	33.50m	生存排水量	~49000t
立柱横向间距	55.00m	拖航吃水	11.79m
主甲板高度	45.00m	工作吃水	23.75m
甲板长度	80.06m	生存吃水	21.00m
甲板宽度	66.56m	空气吃水	13.50m

平台入级符号: +1A1COLUMN STABILISED DRILLING AND PRODUCTION UINT(N)。

其设计、建造规范、规则、标准主要有挪威船级社的海洋平台规范、英国标准(BS)、挪威标准(NS)、ISO 标准等附加船级符号(N),要满足挪威石油管理局(NPD)规定。

1.2 结构形式

主体结构中,有两个浮体、六个立柱、两根横向和四根菱形水平支撑、四对斜支撑和上部由机械甲板至主甲板 1m 高的箱形结构。左、右两浮体中,共有 23 个压载水舱、2 个淡水舱、4 个钻井水舱、12 个燃油舱、8 个推进器舱、4 个泵舱。在 4 个角立柱中,布置着 12 个锚链舱和 4 个电梯通道,两个中间立柱中将安装 8 个灰罐。

收稿日期:2001-11-08

作者简介:马延德,男,教授级高工,大连新船重工有限责任公司副总工程师。

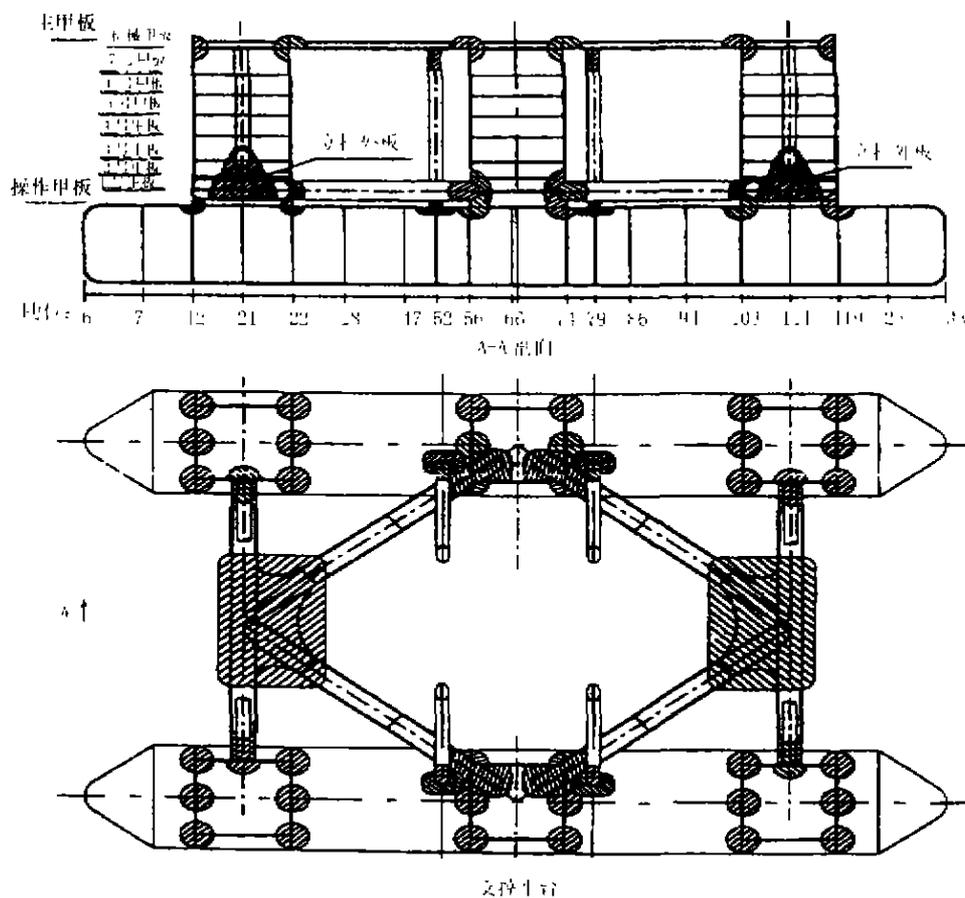


图 主体结构平面图

2 基于疲劳寿命分析的结构设计思想

第五代半潜式钻井平台,目前在技术发展的前沿阵地,正在齐尽协力解决平台结构强度和抗疲劳性问题。尤其值得一提的是,平台的结构强度设计必须符合基本疲劳寿命分析这一设计思想。随着高强度钢在船体结构中的大量应用,船体结构的疲劳破坏问题越显得突出。长期以来,由于平台主体结构复杂,因此疲劳寿命计算多采用经验公式来进行估算,其精度根本满足不了大型平台工程的需要。随着技术进步和计算机软、硬件性能的不断提高,使得计算平台主体结构所受波浪诱导载荷和船体响应长期预报,以及疲劳校核点应力集中计算成为可能。

文中所研究的半潜式平台的疲劳强度分析主要集中在两方面:一方面在浮体结构、类似于一个主船体结构;另一方面在特殊区域管节点疲劳积累损伤计算分析。

2.1 平台浮体结构疲劳寿命校核计算分析

为了评价整个浮体结构的疲劳强度,实质是进行液货舱内大型构件端部疲劳寿命的校核分析。这样,必须选定大量不同部位强力构件连接端进行疲劳校核,但每校核一个点的计算工作量都是非常大的。因此,正确选择最不利的疲劳热点是实船工程分析的重要一环。根据工程实际、经多次同有经验的船级社讨论确定,在浮体结构中部选择3个具有代表性的疲劳热点做为典型来分析。

为了计算船体受载时的响应,整体结构计算是必不可少的。建立整体结构有限元模型时的原则是、

模型的大小应保证计算模型的边界条件对校核点附近的应力影响很小。对校核点附近结构,应进行局部网格加密。进行结构的疲劳寿命计算时,选用校核点处的循环主应力范围作为疲劳寿命计算时的响应应力,通常主应力范围根据船级社规范的要求确定。

关于浮体舱段的动载荷的计算,可采用船级社的建议进行叠加计算的方法。水平波浪诱导弯矩和垂直波浪诱导弯矩是由船体总变形引起的,可归为总体应力应变类。浮体外板所受的波浪诱导动载荷和压载水对浮体内舱的动载荷归为局部应变类。先进行各类中的应力叠加,然后再进行类与类之间的应力叠加,这样可以计算出总体应力和局部应力叠加范围,进而可计算出应力范围。

由于浮体结构选用材料为低碳钢和高强度钢,为减少计算强度,在进行浮体结构疲劳分析中,可基于 $S-N$ 曲线和 Miner 线性疲劳累积损伤原理,计算浮体结构所选定应力热点处的疲劳寿命。 $S-N$ 曲线的选取可参考船级社规范中的有关建议,计算出疲劳寿命,并结合业主规格书对疲劳寿命的要求进行疲劳寿命是否满足要求的判断。

2.2 特殊区域管节点疲劳累积损伤计算分析

文中所列平台多处采用管节点的形式,如水平支撑管的 K 型管节点,中间立柱与水平斜撑的管节点等。这些管节点的疲劳与断裂分析是半潜式钻井平台设计中的重要环节。这些管节点处有很高的应力集中现象,它不仅影响管接头处的静强度,同时也严重影响管接头的疲劳强度。

以水平撑 K 节点为例说明疲劳计算的主要步骤。首先进行平台运动统计预报,这个可从平台整体有限元模型中取出。然后进行管节点应力传递函数计算,该计算可采用有限元方法计算结构自振频率,计算由运动引起的强近振动的节点应力响应。再计算管节点应力集中系数,这个计算可基于船级社关于海洋石油平台疲劳计算指导书所建议的方法进行。最后进行管节点的疲劳计算。

K 节点有限元模型如图所示。在各种载荷工况下,K 节点的热点应力位置可能会不断变化,因此很难确定结构最薄弱的部位。为了得到 K 节点的真实疲劳寿命,计算了 14 个点的疲劳累积损伤度,最后在其中取最大值作为 K 节点的疲劳累积损伤度。在计算中发现撑板与撑管相交的端处应力值也非常大,所以除了考虑撑管相交的焊缝附近热点应力,还选取了撑板与撑管相交的两个典型位置进行疲劳强度校核。

根据 $S-N$ 曲线,计算各离散的应力范围单独作用的点疲劳破坏的循环次数,并计算各离散的应力范围产生的疲劳损伤度。然后累加各离散的应力范围产生的疲劳损伤度,从而得到一个海况下某点的疲劳损伤度。最后可根据 Miner 线性疲劳累积损伤准则,求出管节点的疲劳损伤度和疲劳寿命。以上计算均需按满载和压载两种工况进行,计算后再叠加。

3 浮体结构三维有限元强度分析

3.1 平台所受各种载荷及计算

在风浪作用下,半潜式平台始终处于运动状态,因此对平台的载荷进行计算是一个非常复杂的动力问题,难于精确计算。目前比较普遍使用的方法是将动力问题转化为准静力问题来处理,从而简化计算,并且精度满足工程上需要。

波浪载荷是半潜式平台所受环境载荷的主要部分,对平台的总强度校核起决定的作用。根据有关船级社对半潜式平台的强度校核规范,在使用百年一遇的最大波浪校核平台总强度时,可以不考虑风和流的影响。由于波浪是一个随机的过程,而通常平台强度计算校核需要得到确定的结果,所以需要采取一定的分析方法对波浪载荷进行处理。目前的方法主要有谱分析法和设计波法两种。本次计算中对平台总体强度计算时的波浪载荷采用设计波法进行计算。

设计波法是根据平台工作地区的环境条件和设计的要求,选取平台可能遇到的最大的波浪作为设计波,规范通常规定使用百年一遇的最大规则波。然后计算平台在设计波作用下的运动、载荷和构件应

力,并根据规范的强度要求校核平台的结构安全性。由于不同的浪向、不同的周期以及不同的波峰位置(波浪相位)下波浪对平台的作用力有很大的差异,因此在计算中要选取若干个不同的浪向、周期的波浪在不同相位对平台的载荷进行计算。从中选取最不利的情况进行有限元分析计算。

根据有关船级社规范的规定,平台在作业状态、自存状态和迁航状态下,分别需要进行受静水载荷和受最大环境载荷条件下的总强度分析,对作业状态,还需要对突发情况的环境载荷进行总强度分析。

根据工程的实践和规范的要求,计算中校核了平台在下列几个典型计算工况下的结构强度。

工况1——静水状态。

工况2——加速上升状态。平台作业状态,静水,有向上的加速度,井架上有大钩载荷。

这个工况主要分析平台有升沉运动时的结构强度,虽然平台处于静水中,但是在一些突发事件引起海面上升时(如涌浪,海啸等),平台将产生升沉运动,此时平台向上有一定的加速度,从而受到与重力方向一致的惯性力作用,使结构处于不利状态。规范中一般规定校核时取加速度 $1.5\sim 2.5\text{m/s}^2$,本计算中取最大的情况,垂直方向加速度 2.5m/s^2 。

工况3——最大总纵弯曲状态。平台作业状态(有大钩载荷)和自存状态,迎浪。

这个工况主要校核平台的总纵强度,平台迎浪时受到波浪造成的弯矩和剪力,对浮体和立柱抵抗剪力的能力和平台总体的抗弯能力进行检查,需要对不同的波浪周期和波浪相位进行计算,选取总弯矩最大的情况进行校核。

工况4——最大扭转状态。平台作业状态(有大钩载荷)和自存状态,斜浪、波浪平行平台对角线方向入射时平台所受的波浪扭转力矩最大。主要对浮体和立柱抵抗剪力的能力和平台总体的抗扭转变形能力进行检查,需要对不同的波浪周期和波浪相位进行计算,选取总扭矩最大的情况进行校核。

工况5——最大横向受力状态。平台作业状态(有大钩载荷)和自存状态,横浪。

这个工况主要校核平台的横向强度,平台横浪,当波峰接近平台中线时,平台两侧浮体受到向外的分离力;当波谷接近平台中线时,平台浮体受向内的挤压力。对浮体和各支撑的强度进行检查,需要对不同的波浪周期和波浪相位进行计算,选取横向分离力和横向挤压力最大的情况进行校核。

3.2.1 整体计算模型建造

整个平台采用空间板梁组合结构力学模型,外板、舱壁板等平板构件采用四节点壳单元。平台骨架包括纵桁、纵骨、横梁、肋骨等用空间梁单元,另外,撑管也采用梁单元,部分较小的线性构件用杆单元。整个平台有限元模型节点总数为25068个,单元总数为68206个,其中壳单元31438个,梁单元28305个,杆单元136个以及用于描述平台设备的质量单元8327个。

平台结构模型的总坐标系原点位于两个浮体底部的对称中心,X轴沿着平台纵向,指向首部,Y轴从右舷指向左舷,Z轴以垂直向上为正。

考虑到浮体在外载荷的作用下主要遭受拉压和弯曲变形,将浮体的走廊壁取消,而将其板厚按其等效抗拉压和抗弯曲性能并入中纵舱壁的相应部分。由于浮体两端的形状对强度影响甚小,为建模方便将其简化为三棱柱形。模型有限元网格的尺寸取决于浮体强肋骨的间距,一般部位取强肋骨间距的一半。但在浮体与支柱的连接区域,网格根据构件的连接情况适当加密。

3.2.2 计算方法和结论

根据实际工程要求选择生产作业、自存和迁航三种工况进行计算,每一种工况又进行了五个状态即中垂、横浪、扭转、静水、上升的计算,在此以作业状况为例说明五种状态的计算结果。

在风浪工况下,半潜式平台始终处于运动状态,诸如升沉、横摇、纵摇以及扭转等等,这是一个非常复杂的动力问题。目前比较普遍的方法是在不引起较大误差的基础上,把平台的动力问题简化为准静力问题来处理。

(1) 中垂 平台结构中,外板、舱壁等板材的最大等效应力为 126MPa ($[\sigma]=284\text{MPa}$),位于上层甲板内。平台整体应力分布比较均匀,而且具有较高的安全裕度。

浮体外板及舱壁的等效应力最大值为 63.7MPa ($[\sigma]=284\text{MPa}$)。由于立柱的约束,浮体的垂向变形远不及一般船体那么严重,具有足够的总纵强度。在横向上,浮体的变形相对较大,主要是因为波浪的作用下,浮体和立柱有被向内挤压或向外分开的趋势。浮体两端的水平撑杆约束了浮体端部的横向位移,而浮体中部的变形则相对自由。另外,在海水压力以及波浪的作用下,浮体的外板也产生较大的局部应力,但受影响最大的还是浮体的骨架结构。

立柱平板构件的等效应力最大值为 80.9MPa ($[\sigma]=284\text{MPa}$),位于立柱与甲板相连的内侧拐角处。从受力角度来讲,立柱是把作用于甲板上的所有载荷传递到浮体上,因此主要承受垂向的压应力。立柱内部设有很多垂向扶强材、水平桁材以及水密或非水密平台等等,从而保证了立柱结构的稳定性。但在立柱与上层甲板相连的局部区域,由于甲板的变形,将引起局部应力集中,但问题不是很严重。

上层甲板的等效应力最大值为 127MPa ($[\sigma]=284\text{MPa}$)。上层甲板将承受平台几乎所有的设备和活载,如果不考虑平台的运动,甲板的受力状况主要由静载荷来决定。从目前的计算来看,甲板结构形式比较合理。机械甲板等效应力最大值为 168MPa。工作甲板等效应力最大值为 125MPa。从应力云图可以看出,贯穿整个甲板结构的纵横舱壁,特别是在它们的连接交叉处,剪应力和弯曲应力比较大,因此在这些部位,要注意结构的焊接质量。

撑杆(梁单元)的组合名义最大值为 53.6MPa ($[\sigma]=284\text{MPa}$)。水平撑杆主要约束浮体和立柱的横向位移,因此波浪对它们的受力影响较大。而斜撑杆主要抵抗上层甲板的变形,受力也是比较大的。但在整体模型中,管节点等连接部位的局部应力无法直接算出,这将在局部有限元模型中重点分析。

浮体骨架结构(梁单元)的组合应力最大值为 255MPa。从应力云图中可以看出,最大应力出现在侧壁的纵向构件上。原因之一是静水压力和波浪力使纵向构件产生较大的局部弯曲应力;之二是在结构模型的处理上忽略了浮体的艏部以及骨架连接处的肘板等因素,从而偏于保守,应力值偏大,但仍然低于风暴工况下的许用应力 284MPa。

(2) 横浪 根据工作状态下各工况计算结果,当平台遭受横浪时,结构应力最大,即平台结构处于最危险状态。由于波谷位于两个浮体中间,浮体有被向两侧分开的趋势,而且变形较大。一方面,浮体和立柱受到很大的波浪载荷作用,舱壁尤其是加强构件将承受很大的弯曲应力;另一方面,受影响最大的将是水平撑杆。水平横向撑杆除了受到浮体的拉伸作用,还由于斜撑杆的拉伸而产生很大弯曲变形,这对水平 K 节点以及撑杆与立柱连接部位等结构是相当不利的。因此,平台应尽量避免遭受横浪。

(3) 扭转 当平台遭受斜浪时,很可能会产生扭转变形。这种情况下,由于上层甲板结构将起到很大作用,平台整体结构应力不大。

(4) 上升 当平台处于加速上升状态时,平台的上层甲板结构将承受更大的压力。同时,立柱结构也将受到更大的压力。

4 立柱结构强度与屈曲强度设计分析

半潜式钻井平台的立柱一般由外壳板、垂向扶强材、水平桁材、水密平台、非水密平台、水密通道围壁和水密舱所组成。立柱能够提供浮力,保证平台的浮性和稳性。从受力角度看,立柱除了要受到静水压力和波浪力外,更主要的是承受上层甲板以上的所有结构和设备的重力,因此,在进行立柱强度计算时,必须考虑结构的稳定性。

为了进行立柱部分的结构优化分析,分别对右侧中间立柱和右侧后角立柱主体部分建立有限元局部模型,即从第四甲板下方到第七甲板上方。局部模型的边界条件从整体模型计算中取得,即:在平台整体分析的基础上,选取整体分析各工况中立柱受力最危险的一种工况,然后从整体有限元模型计算结果中获取局部模型所有边界节点的位移作为局部模型的边界条件。对于由于局部模型细化而在整体模型中没有与其对应的节点,则通过线性插值得到该节点的位移。

考虑到立柱主要承受甲板载荷作用,并传递到浮体,故选取作业状态下平台有向上加速度时的情况作为立柱优化分析时的校核工况,因为此时由于加速度的影响而使立柱所承受的载荷最大,通过计算对比其它工况也发现这时立柱的应力最大,说明选取这种工况来校核立柱是合理的。

通过分析可见,在现有载荷作用下,立柱的主体部分仍然有较高的安全裕度。不管是板材还是骨材,其应力值都相对较小,但在立柱靠近甲板部分,由于甲板载荷的作用,使得立柱偏于平台中心的一角受力比较集中,在这些部位应该适当提高工艺的要求,以避免出现局部应力集中而引起疲劳失效。

依据船级社关于屈曲强度分析的有关规定,对 BINGO-9000 立柱优化部分的结构的稳定性进行校核。通过立柱的局部模型细化分析,得到了角立柱中各部分的应力分布。计算结果分析发现,立柱中各种应力成分幅值较大的地方集中在角立柱靠近甲板且接近平台的内侧的位置。立柱中垂直方向的压应力远比其它应力值大,对立柱中板材的屈曲影响最大,所以在选取区域时主要针对最大垂直压应力进行分析。计算结果表明立柱结构满足稳定性要求。

5 受损浮体极限强度分析与可靠性分析初探

统计资料表明,在大型船舶重大海损事故中,除一些因稳性丧失造成翻沉外,多数是由于船体结构遭受破损后其极限强度不足导致整体折断,造成全损。传统结构设计和强度理论只针对完整船体、理想工况,即仅在安全域内考察船舶安全,没有注意研究破损结构遭受非常载荷即极限状态下船舶安全问题。大型半潜式平台,在深海作业,由于海浪情况恶劣,经受百年一遇台风,因此波浪诱导弯矩特别大,对结构强度方面的要求也就特别高。尤其由于平台撑杆结构为空间的钢架结构,在部分构件失稳或失效的情况下,容易导致平台的毁灭性破坏。针对这一情况,部分船级社规范已做出规定,在不能对平台进行全面疲劳分析的情况下,需要进行破坏性强度校核与破损状态下的强度计算。

受损浮体极限强度分析主要内容:是研究浮体结构破损形态,建立适应极限强度分析要求的破损结构模型。

(1) 针对半潜式平台浮体结构与分舱特点,研究其结构破损形态,并按照极限强度分析要求,建立完整主浮体结构和破损后主浮体的结构数学力学模型。

(2) 主浮体所承受载荷计算。按照极限强度分析要求,建立浮体载荷效应计算模型,载荷计算针对两种结构形态,即 1) 完整浮体结构,即正常工况。2) 破舱后进水或出水,称为非常工况。在两种工况中,主要进行包括静水、波浪载荷等计算。进行危险计算工况的确定以及相应静水载荷和波浪载荷最大值计算及其它载荷计算。

(3) 结构梁极限承载能力计算。首先用简化解析法求解结构梁极限弯矩,然后对非线性有限元采用理想单元法进行计算分析。

(4) 进行浮体结构极限强度分析。利用三维有限元分析的方法,对浮体结构建立三维模型并进行极限强度分析。

通过上述方法对平台进行计算和分析,可以评估完整和受损浮体结构安全性,并根据船级社和业主对腐蚀率的要求,报出其有效寿命周期。

6 结论

本文通过对 BINGO-9000 型半潜式平台结构设计关键技术的研究,可以看出:

(1) 通过对浮体局部结构选定应力热点处的疲劳寿命和特殊区域管节点疲劳累积损伤计算分析,认为结构强度设计必须基于疲劳寿命分析这一设计思想,并且分析计算是可以实现的。

(2) 结构强度的三维有限元分析结果表明,当平台遭受横浪时,结构处于不利状态,因此平台应尽

[下转第 20 页]

- [1] 中国船级社. 海上移动平台入级与建造规范[M]. 人民交通出版社, 1992.
 [2] 潘斌. 移动式平台设计[M]. 上海交通大学出版社, 1995.
 [3] 孙东昌, 潘斌. 海洋平台模块化设计和建造的研讨[J]. 中国海洋平台, 2000, 15(1).

Primary Design of a Mobile Self-elevation Single Pillar Platform

CHEN Xiao-quan, PAN Bin

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030 China)

QI He-ping

(Shengli Oil Field Administration Bureau, Tongyin 257000 China)

Abstract: The necessity of using light platform in marginal oil fields in China is discussed. A new type of mobile self-elevation single pillar production platform is proposed, its towing stability, flooded stability and operational performance are analyzed.

Key words: mobile platform, single pillar offshore platform

[上接第16页]

量避免遭受横浪的作用。同时计算结果也表明该平台的整体结构设计比较合理。

(3) 平台立柱结构具有足够的局部强度,但在设计中一定要进行屈曲强度分析,以保证立柱结构满足稳定性要求。

(4) 对大型半潜式平台,由于其长期在恶劣海况中工作,遭受的波浪诱导弯矩特别大,因此在进行结构强度分析时,需要进行破坏性强度校核,进行破损状态下的强度计算。

参考文献

- [1] Bureau Veritas, Fatigue strength of Welded Ship Structure, NJ393R01E.
 [2] DNV Classification Notes, Fatigue Assessment of Ship Structure No. 30.7, September 1998.
 [3] 胡毓仁, 陈伯真. 船舶海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
 [4] 李润培, 王志农. 海洋平台强度分析[M]. 上海交大出版社, 1992.
 [5] 戴遗山. 舰船在波浪中运动的频域与时域热流理论[M]. 国防工业出版社, 1998.
 [6] Rules For Classification of Mobile Offshore Units[S]. DNV, January 2000.

The Study of Key Technologies in Structure Design for Large Sized Semi-submersible Drilling Platform

MA Yan-de

(Dalian New Shipbuilding Heavy Industry Co., Ltd., Dalian 116001 China)

Abstract: Based on Bingo-9000, the key technologies to be solved in the structural design of offshore rigs are introduced. The load analysis and calculation under wave action of this platform is developed, on this base, a three dimensional finite element strength analysis for main structural body is conducted, strength and fatigue life of special structural elements of the rig are carried out the design concept and method for the limit strength analysis and reliability evaluation for the damaged main body are proposed. By using these technologies, the structural design of offshore rigs may be more reasonable, reliable and safe.

Key words: semi-submersible structural design, fatigue life, limit strength analysis