

①63-68

第 18 卷第 4 期
2000 年 11 月海洋工程
OCEAN ENGINEERINGVol. 18 No. 4
Nov. 2000

综述

文章编号:1005-9865(2000)04-0063-06

张力腿平台及其基础设计

董艳秋, 胡志敏, 张 翼

(天津大学 海洋与船舶工程系, 天津 300072)

P751

摘 要:海洋工程油气开发逐步向深海域进军,资料表明 21 世纪深海的石油、天然气将是主要能源之一。目前主要的深海石油平台形式是张力腿平台,其结构一般由平台本体、张力腿系统和基础系统三部分组成。基础部分不但承受着结构上部及海底的各种载荷,而且为结构提供必要的稳定性和安全性。本文通过对当今世界已建成投产的 9 座深海张力腿平台及其基础形式进行分析,剖析它们的基础设计思想,为我国深海张力腿平台的设计提供参考。

关键词:深海域;张力腿平台;平台基础

中图分类号:P73.22;U674.38

文献标识码:A

平台本体, 结构,

Design of TLP and its foundation

DONG Yan-qiu, HU Zhi-min, ZHANG Yi

(Department of Ocean Eng. and Naval Arch., Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the development of ocean engineering, oil and gas will be the main natural energy resources in the present century. There are broad sea regions in China. Exploration shows that there are plenty of gas and oil in the South China Sea. Therefore, it is important to exploit the deep water. The Tension Leg Platform (TLP) has been found suitable for working in the deep water due to its favorable motion characteristics and low cost. Recently, TLP is used as the main platform in the deep water. It consists of three parts: hull, tendons and foundation. The foundation is an important part which affects the stability and safety of the whole structure. In this paper, TLPs that have been constructed in the world are analyzed including the design of their foundations. Some useful conclusions and proposals can be referred to in the design of TLP in China.

Key words: deep water; TLP; foundation

早期的海上石油开采主要是面向近海,随着全球对能源需求量的不断增加,技术的革新和完善对深海域的开发生产成为可能。导管架平台和重力平台由于其自重和工程造价随水深大幅度地增加,已经不适应深水区域油气开发,所以本世纪 60 年代提出了顺应式平台的概念,并在近 20 年的平台设计中得到了广泛的发展应用。顺应式结构的典型实例是张力腿平台(Tension Leg Platform 简称为 TLP)。据不完全统计,目前全世界已经建成投产的 TLP 平台有九座,它们分别为 Hutton^[1], Jollite^[2], Snorre^[3], Auger^[4], Heidrun^[5], Mars^[6], Ursa^[7], Seastar^[8] 和 Ram/Powell, 其中 Heidrun 平台是唯一的混凝土张力腿平台。有关资料详见表 1。

张力腿平台最重要的特点是平台的竖向运动很小,水平方向的运动是顺应式的,结构惯性力主要是水平

收稿日期:1999-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5979014)

作者简介:董艳秋(1937—),女,博导、教授,主要从事船舶和海洋结构动力研究。

方向的回弹力。张力腿平台的结构造价一般不会随水深增加而大幅度地增大。通常张力腿平台由三大部分

表 1 张力腿平台的构造资料

Tab. 1 Construction information of TLP

平台名称	安装时间	水深(m)	材料	排水量/t	筋腿数量	筋腿接点	筋腿锚固	基础
Hutton	1984	170	钢	60 000	16	螺栓	内部	重力基础
Snorre	1992	310	钢	106 000	16	螺栓	内部	重力基础
Joliet	1989	542	钢	16 500	12	焊接	外部	16 根桩基
Auger	1993	872	钢	65 000	12	焊+螺栓*	外部	16 根桩基
Heidrun	1995	330	混凝土	278 500	16	焊接	外部	重力基础
Mars	1996	905	钢	50 000	12	焊接	外部	12 根桩基
Ram/powell	1996	981	钢	50 000	12	焊接	外部	12 根桩基
Seastar	1998	1 067	钢	11 000	6	焊接	外部	6 根桩基
Ursa	1998	1 226	钢	90 000	16	焊接	外部	16 根桩基

* 在 73.1m 以下采用筋腿连接

组成:提供结构预张力并支撑上部甲板和设备载荷的平台本体;将平台本体与海底地基连接起来,从而将结构相对固定入位的张力腿系统以及提供张力腿强大的抗拔力并为整体结构提供良好稳定性、安全性的基础。其中,结构的基础是重要的组成部分,它不仅受到张力腿的拔拉力,且作为置于海洋中的结构承受着包括地震等各种载荷。基础形式的设计选择及其安装制造方法对张力腿平台整体的工作性能有极大的影响,因此,对于张力腿平台基础的研究一直是国内外学者非常重视的问题。我国是一个海洋大国,有 300 万 km² 的海域,在周边深水海域蕴藏着丰富的油气资源和其他矿产资源。因此,不断地关注张力腿平台的发展并开展相应的研究工作,对我国未来深海资源开发有着重要意义。本文对世界上建成投产的典型张力腿平台及其基础形式进行分析,以供我国平台基础设计参考。

1 Hutton 张力腿平台

Hutton 张力腿平台是第一座张力腿平台,由 Conoco 公司于 1984 年在北海建造、安装。它是一座中等水深油气钻探、生产的综合性平台。在中等水深条件下钢导管架平台是较经济的石油平台,当时选择张力腿平台形式的一个重要目的是希望在中等海况下获得关于张力腿平台运动性能的一些实测数据,为进一步在深水域内设计应用提供一些科学依据。Hutton 平台结构如图 1。本体由六根立柱和四个浮筒组成,平台每根角柱与四根厚壁钢管组成的张力腿与海底地基基础连接,同时张力腿通过平台本体的浮力保持张拉的受力状态,张力腿通过角柱在水平面之上和甲板相锚固,Hutton 张力腿力学模型如图 2(a)。Hutton 张力腿平台所处的海底地基为中等强度粘土,选择了四个相互独立的重力式基础,这种基础在通常的土质下计算简单,设计可靠。

2 Snorre 张力腿平台

Snorre 平台由 Sage 油气公司于 1992 建成投产,位于 300m 深的海域,是当时北海开发最深的海域。与 Hutton 平台相比,水深较深,结构尺度较大。Snorre 平台本体由四根立柱浮筒组成,张力腿的直径较大,壁厚较薄。Snorre 平台张力腿的连接方式与 Hutton 平台的相同,都是张力腿上端与平台连接,底端与张力腿连接,见图 2(a),这样的张力腿造价昂贵,安装困难,因此后来的张力腿设

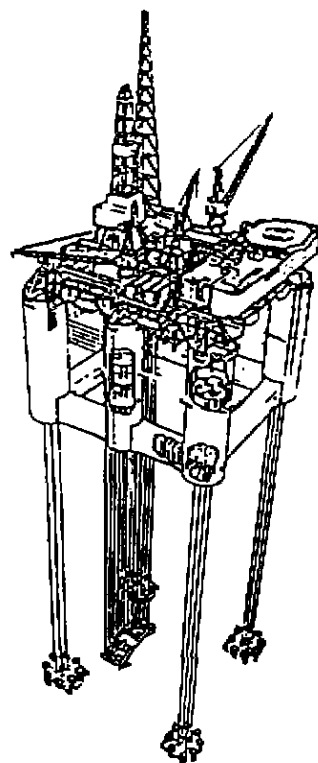


图 1 Hutton 平台结构

Fig. 1 Structure of Hutton platform

计都在柱外锚固,见图2(b)。

Snorre 平台的海底土质条件^[9]是:上层为非常软的软粘土,整体土质不稳定,存在一定的孔穴和塌陷性土层,大约在60m深处粘土变为含有砾石的冰碛。在这样的土层情况下,选择了裙式重力基础形式,如图3。它由四个混凝土基座组成,每个基座截面为720m²,由三个高为20m的混凝土舱体构成,每个舱的直径为17m,裙的壁厚为0.35m,舱上部设有密封的圆形顶盖,裙外壁由顶盖伸出6m,形成一个圆形的外围,以利于在舱顶盖上放置压重物。混凝土基础实际重量为5660t,水下重量为3500t,再附加放置在舱顶盖3500t的压载(压载物一般为铁或橄榄石),最终基础的水下总重为7000t。基础最初贯入是在自重作用下产生的,然后通过吸出裙舱内的水形成舱内负压实现进一步贯入,最终达到设计深度。混凝土基础基座上部中央和张力腿相连。由于海底并非是一个平面,所以在基础的贯入过程中通过调整对应的舱内负压来控制各基座的贯入深度,为张力腿提供一个水平面。

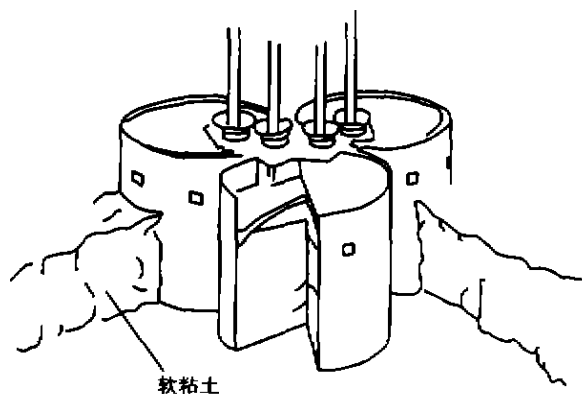


图3 Snorre 基础结构

Fig.3 Foundation of Snorre

基础必然会大大增加工程造价,所以 Snorre 张力腿平台采用了裙式重力基础。

Snorre 平台作为第一座北海真正意义的深水平台结构,包含了许多技术创新,其中包括引进了一种简单经济的海洋浮式结构的锚固基础——裙式重力基础,第一次将混凝土基础作为大型的吸力锚。经过大量的模型实验测定以及实际检测证明,Snorre 混凝土基座是一种新型经济的海洋浮体结构的基础形式,比较适合软粘土海底地基,并以其经济性和安全性在软土地基中取代了桩基础,这种裙式重力基础还可移动,实现重复使用。

3 Joliet 平台

Joliet 张力腿平台于1989年由Conoco公司承建,位于墨西哥海湾542m深的Green峡谷184海域。它与Hutton平台、Snorre平台相比结构尺寸小很多,主要由钻探基座、基础系统、张力腿系统和平台本体四大部分组成,通常称之为井口张力腿平台。Joliet平台由四个立柱和四个浮筒组成,立柱下端与四组、十二根张力腿筋腱锚固,从而把平台与海底基础相连,如图4

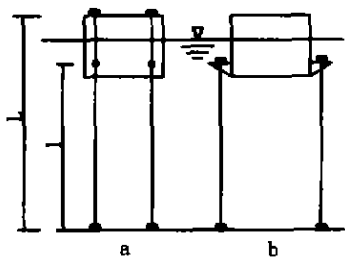


图2 张力腿平台的力学模型

Fig.2 Mechanical model of TLP

当时关于基础形式的选择集中在重力裙式基础和桩基础之间,Sage公司同时对两种基础形式在软土土质中的利弊进行了分析研究,J&W Offshore^[10]进行了重力裙式基础的模型实验,实验表明:重力裙式基础在动载作用下其运动及承载力有一套可靠的承载力计算方法;挪威土工协会(NGI)^[11]进行了拔拉桩的动静态模型实验,在粉质粘土中桩动载的摩擦力和承载力远比静态载荷作用下实验的摩擦力和承载力低,同时在相似的载荷和土质情况下NGI作了关于拔拉桩模型实验,实验表明桩在交替的张拉力和压力作用下承载力大幅度减小,动承载力只是静态承载力的40%。鉴于上述实验结果,考虑到若在粉砂质粘土中使用桩基

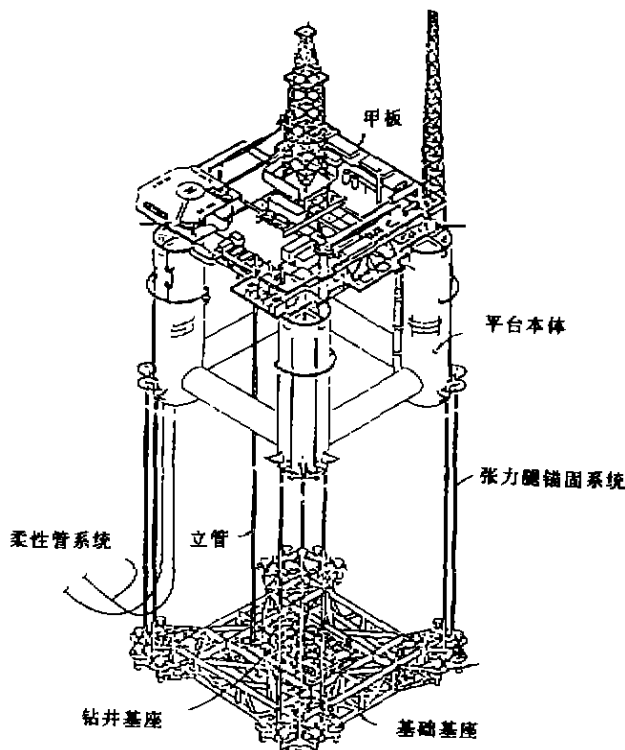


图4 Joliet 平台结构

Fig.4 Structure of Joliet platform

所示, Jolliet 平台首次将张力腿筋腱锚固在平台立柱外侧, 见图 2(b), 使张力腿的安装过程大大简化。

Jolliet 平台的海底比较平整。通过现场勘探实验表明, Jolliet 平台地基土质情况较好, 海底表面的软粘土硬度随水深逐渐增大, 到 58.6m 深处为非常硬的粘土, 到 201m 深土质为超固结粘土。Jolliet 平台基础采用桩基础形式, 由一个矩形的基座和基座四角十六根深入海底的桩组成, 基座面积大约为 62m^2 , 水下重为 700t, 基座由八根相互交叉的直立钢架组成, 钢架之间由水平支撑相连, 基座四角外伸的水平钢架设有筋腱插孔和桩基套筒, 分别在上方与筋腱连接。在下方与贯入海底的桩连接, 如图 5 所示。

4 Auger 张力腿平台

Auger 张力腿平台位于墨西哥海湾 Garden Banks 区域, 水深为 882m。Auger 平台代表着当时张力腿平台概念设计的前沿, 它的结构尺寸和 Hutton 平台相同, 却位于比 Jolliet 平台更深的海域。Auger 张力腿平台由十二根筋腱将平台本体与基础连接, 其中每根角柱连接三根筋腱, 三根筋腱作为一个张力腿与一个基础基座连接。除了张力腿, Auger 平台还有侧向的锚链, 它们可以增加结构的侧向刚度, 减小平台由于风、流、浪引起的静态偏移, 使平台在钻探、维修等过程中有一个允许的偏移量。海底地基由正常固结软粘土组成^[12], 地基表面有一层海洋沉积物和塌陷性沉积物。结构基础是四个相互独立的桩基础基座, 每一个基础基座由四根深入海底地基的桩安全定位, 桩顶通过导向套筒与基座相连。图 6 为 Auger 张力腿平台张力腿基础基座, 四个基座和十六根桩的详细尺寸及重量如下: 基座长宽高分别为 18.5m、18.5m 和 14.6m, 实际重量为 611t; 桩直径为 2.2m, 高为 132m, 实际重量为 203t。

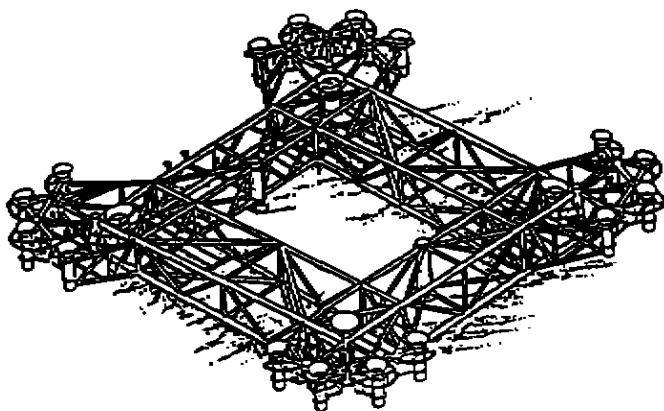


图 5 Jolliet 基础结构

Fig. 5 Foundation of Jolliet platform

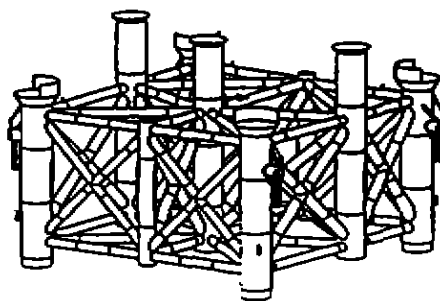


图 6 Auger 基础结构

Fig. 6 Foundation of Auger platform

5 Heidrun 平台

Heidrun 张力腿平台落成于 1995 年, 位于北海距挪威海岸 175km, 345m 深的海域, 结构排水量为 290 310t, 是当时最大的张力腿平台, 也是世界上第一座混凝土张力腿平台, 与其他张力腿平台相比有较大的平台吃水。平台本体和张力腿系统通过结构调整减小了一阶波浪运动, 然而结构的高阶运动“ringing”较其他张力腿平台显著。Heidrun 平台本体的四根角柱高 109.6m, 直径为 31m, 它们的下端由四根矩形截面的浮箱相互连接, 浮箱截面的宽为 15.75m, 高为 13m, 角柱上端有南北方向两根支撑梁, 支撑着上部钢甲板的所有模块。张力腿系统由十六根筋腱组成, 下端系于海底的重力式基础上。Heidrun 平台的地质为软粘土, 所以选择了重力式吸力基础, 共由四个独立的基础组成, 每个基础包含十九个直径为 9m 的高强预应力混凝土桩。每个基础的底端截面为 $43\text{m} \times 48\text{m}$, 一个基础的实际重量为 21 000t, 水下重 12 500t。

6 Mars(USA)

Mars 平台于 1995 年建造, 1996 年安装投产。Mars 张力腿平台位于墨西哥海湾密西西比峡谷 807 区域, 水深 905m, 海底倾斜度为 1.9%, Mars 结构排水量为 53 000t, 是墨西哥海湾破水深记录的工程, 投资近十亿美元。它作为 Shell 公司建造的第二座张力腿平台, 利用 Auger 平台的建造、安装、生产的经验。Mars 平

台的张力腿由十二根分为四组的钢管组成,每根钢管直径为 8.6m,壁厚为 30mm,下端与深入海底 115.6m 的桩基础系固。Mars 平台的基础由十二根直径为 2.6m、长 122.7m 的桩组成,桩的总重为 2 800t。Mars 平台基础的设计和 Auger 平台相似,认为是 Auger 平台设计的扩展。Ram/Powell 张力腿平台是 Mars 平台的姊妹平台,它的结构形式、设计方法、地质条件及基础形式和 Mars 基本一致。

6 Seastar 张力腿平台

Seastar 张力腿平台 1998 年在墨西哥海湾安装投产,是世界上第一次采用小型张力腿平台概念设计的平台,首次实现了在深水域中建立非常经济的单柱张力腿平台生产系统。Seastar 平台主要组成部分为基础、张力腿、单浮筒柱的平台本体,见图 7。

Seastar 平台的甲板由一中央柱支撑,柱下端连接三根矩形截面浮筒,它们在平面上的夹角为 120° ,形成辐射状,且浮筒的末端截面逐渐缩小。Seastar 张力腿系统如下:1). 六根钢筋筋腱,平均分为三组,每支张力腿由两根筋腱组成。2). 每支张力腿的两根筋腱上端与一个浮筒的外侧边沿锚固。3). 张力腿六根筋腱下端分别连接在 6 根 105m 长的基础上。桩的直径尺寸为 2.6m。由于在泥面邻近区域呈现较大的轴向应力和弯曲应力,所以壁厚是变化的,在泥面处壁厚为 54mm,末端厚为 39mm。这种平台具有安全的工作性能,低廉的安装费用,是可靠、稳定、经济的张力腿系统,故在深水油气开发中有广阔前景。

8 Ursa 张力腿平台

Ursa 张力腿平台是目前墨西哥海湾最大最深的平台,水深为 1 226m,排水量为 90 000t,Ursa 张力腿基础的设计、建造和安装等是建立在以前其它张力腿平台的丰富设计建造经验之上的,但 Ursa 又有其自身的特点:张力腿由 16 根筋腱组成,平均分为四组;筋腱较大,直径为 0.98m,壁厚为 46mm。Ursa 的土质比 Mars 平台的土质稍硬一些,基础为十六根独立的桩基,Ursa 张力腿平台的大小约为 Mars 和 Ram/Powell 平台的两倍,所以桩基础每个角部从 3 个增加到 4 个,同时桩柱的外径也从 2.6m 增大到 3m,Mars 桩基贯入深度为 115.6m,而 Ursa 的桩基贯入深度加大到 122m。

Ursa 张力腿平台的设计实践证明目前的张力腿和基础的设计法对于深海域是适合的,只要稍加修改不需要更大的资金投入就可以应用到更深海域。

9 结论

通过对现有深水张力腿平台及其基础设计的综合分析,可得出以下结论和建议:

- 1) 近二十年来,经过张力腿平台设计生产的实践,证明张力腿平台具有良好的运动性能,是深水海域油气生产适宜的平台形式。
- 2) 张力腿平台的平台本体、张力腿系统和基础形式的选择比较复杂,它由多种因素决定,如:水深和风、流、浪以及地震等环境条件,海底的地质条件以及平台的建造安装方法,工程期限,投资、造价等因素。
- 3) 基础的问题一般较为复杂,张力腿平台基础设计主要通过场地地质评估、土工勘察及对张力腿载荷分析,根据基础的设计准则选择基础的形式。目前张力腿平台存在着重力式基础和桩基础两种基础形式。重力式基础以吸力锚固基础为主,在北海海域常见这种基础形式。墨西哥海湾建造的张力腿平台基础以桩基居多。

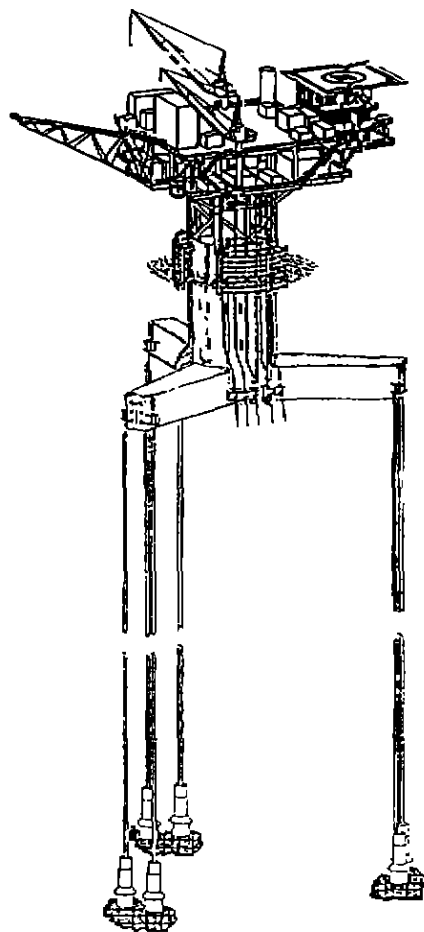


图 7 Seastar 平台结构

Fig. 7 Structure of Seastar platform

- 4) 重力式吸力锚基础一般为浅基础, 适合于非常软的粘土土质、粉砂质粘土或者土质情况不稳定, 存在一定的塌陷性状的土层。在这样的土层情况下桩基础承载力较低, 不宜采用。另外在重力式基础设计时除考虑基础抗拉承载力之外, 还需要考虑基础的抗倾覆力。
- 5) 桩基础的张拉力来自平台本体, 而环境载荷通过平台与张力腿对基础产生侧向力和附加的轴向力。桩基础的设计通常根据土的参数、桩的内力决定桩的长度。同时由于桩基通常通过锤击打桩达到设计深度, 所以设计桩时需要注意由于打桩引起的桩变形以及产生的微裂纹的计算。
- 6) 无论何种形式的基础, 其与土层的相互耦合作用对于基础设计十分重要, 特别是有一定贯入深度的桩基, 这种耦合作用的影响比较明显, 仍是张力腿平台基础设计中一个值得重视的问题。

参考文献:

- [1] P F Stock, R Jarnine, W McIntosh. Foundation monitoring on the Hutton Tension Leg Platform[A]. Proc. Int. Conf. on Offshore Site Investigation and Foundation Behavior[C]. 1993, 128: 469-491.
- [2] A F Hunter, R A Zimmer, W J. Designing the TLWP[A]. Offshore Technology Conference[C]. 1990, 6360.
- [3] Store O J, *et al.* New foundation systems for the snorre development[Z]. OTC, 6882, 1992, 75-83.
- [4] W E Schott, G Rodenbusch. Global design and analysis of the Auger Tension Leg Platform[A]. Offshore Technology Conference[C]. 1994, 7672.
- [5] F R Botros, T J Wilson, C M Johnson. The Heidrun field: global structural design and analysis of the Heidrun TLP [A]. Offshore Technology Conference[C]. 1996, 8099.
- [6] D C Godfrey, J P Haney, A E Pippin, *et al.* The Mars project overview[Z]. OTC 8368 presented at the 1997, OTC, Houston; 119-139.
- [7] Kris A Digre, Robert M, Kipp Rupert J. Hull, Urse TLP, Tendon & Foundation Design, Fabrication, Transportation and TLP Installation[Z]. OTC 10756 presented at the 1999, OTC, Houston; 187-195.
- [8] Stephen E Kibbee, Steven J Leverette, Kent B Davies, *et al.* Morpeth Seastrar: Foundation and Tendon System[Z]. OTC 10855 presented at the 1999 OTC, Houston; 511-517.
- [9] S Fines, O J Steove, F Guidberg. Snorre TLP Tethers and foundation[Z]. OTC 6623 presented at the 1991 OTC, Houston; 587-593.
- [10] Andreasson B, Christophersen H P, Kvalstad T J. Field model tests and analyses of suction installed long-skirted foundations[A]. Proc. Behaviour of Offshore Structures Conference[C]. Trondheim; 1988.
- [11] Karlsrud K, Nowacki F, Kalsnes B. Response of piles in soft clay and silt deposits to static and cyclic loading based on recent instrumented pile load tests [A]. Proc. Int. Conf. On Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, Society of Underwater Technology[C]. London.
- [12] W R Utbricht, M A Rippling, E H Doyle, *et al.* Design, fabrication and installation of the Auger TLP foundation system[C]. Offshore Technology Conference, 1994, 7626.