

# 不同类型张力腿平台的主要结构特征与技术特点

## Primary structural features and technical characteristics of different types of tension leg platforms

吴家鸣

(华南理工大学 土木与交通学院 船舶与海洋工程系, 广东 广州 510640)

中图分类号: TE5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)04-0101-08

doi: 10.11759/hyxx20120912002

张力腿平台(简称 TLP)是一种垂直系泊的顺应式平台,其主要设计思想是通过平台自身的特殊结构形式,产生远大于平台结构自重的浮力,浮力除了抵消结构自重之外,所产生的剩余浮力与张力腿的预张力相平衡。时刻处于受张拉绷紧状态的张力腿使平台的横摇、纵摇和垂荡运动较小,近似于刚性。张力腿平台立柱主要为直立的圆筒型或方形截面结构,这样的柱型结构所受水动力载荷主要是水平方向的波浪和海流力,它们可以通过张力腿的柔性约束,允许平台在水平面上的纵荡、横荡和艏摇有一定自由度的顺应式运动。张力腿平台这样的结构形式使得它所受到的环境载荷可以通过平台自身的惯性力来得到平衡,从而使张力腿平台具有良好的运动性能。

### 1 张力腿平台的共同特点

目前已投入使用的张力腿平台共有 24 座,按其结构特征分为第一代张力腿平台(也称为传统类型的张力腿平台)和第二代张力腿平台,而第二代张力腿平台又分为 SeaStar、MOSES 和 ETLF 三个系列。不同类型的张力腿平台具有不同的结构特征与技术特点,但由于他们都是以张力腿垂直系泊的方式将浮式平台系泊于深海中,不同类型的张力腿平台具有以下共同的特点<sup>[1-4]</sup>: (1)具有良好的运动响应特性。张力腿平台具有顺应式结构物的特点,平台在风、浪、流等海洋环境载荷作用下发生偏转运动时会产生一种惯性力,这种惯性力可以对环境载荷构成一定的抵消作用,从而减少作用在平台结构上的净载荷。(2)由于平台为一种半顺应半固定式的结构,在水平方向是一种顺应式结构,在竖直方向接近于

固定式结构。这一特点使得张力腿平台可以保留传统的固定式生产平台的许多作业优势,其生产与维护作业方式与传统固定式平台相似,其操作方式与固定式平台几乎没有差别。但是,对于深海油田,由于张力腿平台的结构造价不会随着水深的增加而大幅度地增大,采用张力腿平台比固定式平台其开发费用要低得多。特别是在 300~1 500 m 水深范围内,采用张力腿平台优势明显。(3)由于张力腿平台可以通过合理选择平台本体的结构形式和设置合理的张力腿预张力来决定张力腿系泊系统的刚度,进而调整张力腿平台的固有摇荡周期,使其避开海面的波浪频率。现有的张力腿平台水平面运动(纵荡、横荡、艏摇)的固有周期约为 1~2 min,高于波浪周期;铅直面运动(垂荡、横摇、纵摇)的固有周期约为 2~4 s,低于波浪周期。这样的固有周期范围避免了平台结构和海浪能量集中的频率发生共振,使平台结构受力合理,动力性能良好,这样就可以将平台的运动控制在低水平范围内。(4)平台在张力腿的约束下几乎没有垂荡运动;张力腿平台的结构形式也决定了平台难以有横摇与纵摇运动,平台的主要摇荡运动为纵荡、横荡和艏摇。这三个自由度的摇荡运动可以通过增加平台本体产生的剩余浮力或张力腿的预张力,进而提高平台在这些自由度方向上的恢复力来加以约束。多年来,不同类型的张力腿平台的使用实践表明:在海洋环境因素作用下,平台的运动很

收稿日期: 2012-09-12; 修回日期: 2014-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772068)

作者简介: 吴家鸣(1957-),男,广西梧州人,教授,博士,主要从事船舶与海洋结构物设计制造领域的研究,电话: 020-87111030-3637, E-mail: ctjmwu@scut.edu.cn

小,这一类型的平台结构表现出了良好的平稳特性。(5)平台本体结构通过张力腿垂直锚泊。因此,与 Spar 平台不同,张力腿平台没有锚固半径的限制。(6)适应范围广,它可应用于不同规模大型或小型油气田,几百米到 1 500 m 的水深范围均可考虑使用张力腿平台。(7)张力腿平台是一种小水线面结构,它对平台重量的变化非常敏感。对于特定的张力腿平台,载重的增加将会降低平台的剩余浮力或张力腿的预张力。因此,这类平台对其有效载荷会有限制。(8)张力腿平台的结构特点决定了平台难以具备自身的储油能力,所生产的原油需要用管线外输到其他浮式储油装置进行储存。

## 2 第一代张力腿平台的主要结构特征与技术特点

第一代张力腿平台也称为传统类型的张力腿平台,其主要结构特征包括:上体均为四边形。作为生产平台使用的 TLP 立柱采用大直径的柱体,直径在 15~25 m 之间,有的立柱间还设有横撑和斜撑。而作为井口平台使用的 TLP 立柱则采用小直径立柱或矩形立柱。作为平台下体的浮箱首尾与各立柱相接,形成方形环状结构。张力腿与角立柱存在着——对应的轴向连接关系,张力筋腱通常通过角立柱内部在水平面之上和甲板相锚固、或在角立柱外侧与平台本体相锚固。第一代张力腿平台是最早出现的一种张力腿平台,也是当今世界上数量最多的张力腿平台,目前在役的平台共 9 座,几乎占世界张力腿平台总数的一半。图 1 为第一代张力腿平台 Hutton TLP 的整体概貌简图<sup>[5]</sup>。

除了张力腿平台共同的特点外,第一代张力腿平台还具备以下技术特点<sup>[1-4]</sup>:(1)较之其他类型的张力腿平台,第一代张力腿平台体积巨大,能够支持一套高生产能力的原油处理设施,它可应用于大型的深海油气田开发。(2)由于摇荡运动不大,平台与生产立管之间的相对运动量较小,张力腿平台可以采用结构简单、造价低廉的立管张紧装置,采油树可以设置在平台之上,海底油井由垂直生产立管直接连接到位于平台井口甲板的采油树上。采用干式采油树方式作业,操作人员可以从平台上直接钻井和直接在甲板上进行采油操作,这使钻井、完井、修井等作业和井口操作变得简单,而且便于维修和管理,从而降低了采油操作费用。(3)由于平台采用了大直径立柱,在自由漂浮状态下具有较好的稳性,包括

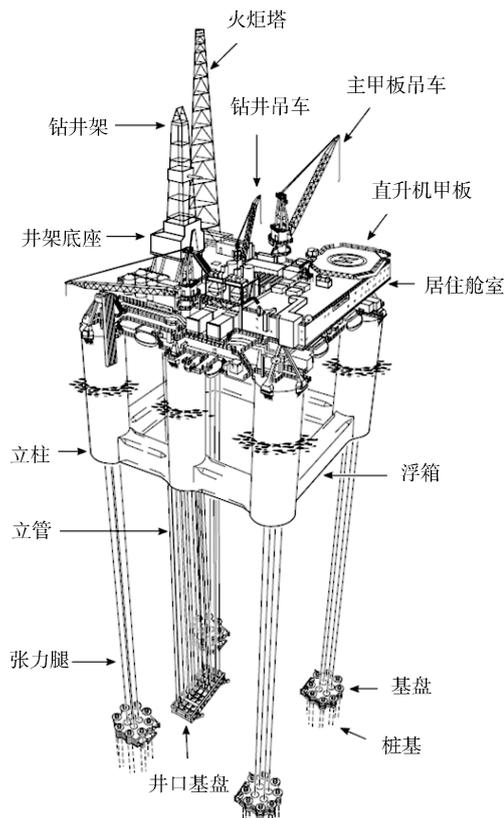


图 1 Hutton TLP 整体概貌简图

平台上体、立柱及下体在内的平台本体结构可以在岸上一体化建造、然后整体海上就位安装,为降低海上安装和维护费用创造了条件。(4)由于张力腿长度与水深呈线性关系,随着水深的增加,张力腿自重过大、张力腿的购置费用增加。水深超过 1 000 m 后,其经济性不佳。(5)由于张力腿的预张力通常较大,整个张力腿平台系统刚度较强,对高频波浪力扰动响应比较敏感。(6)平台本体结构巨大,造价比第二代张力腿平台要高得多。

## 3 第二代张力腿平台的主要结构特征与技术特点

第二代张力腿平台出现于 20 世纪 90 年代初期,它在继承第一代张力腿平台优良运动性能和良好经济效益等优点的同时,对结构形式进行了优化改进,使之具有体积小、灵活性好、受环境载荷小、在深水环境中能稳定地工作等优点。从而更适用于深水作业条件、恶劣海洋环境和深海的中小油田开发,并因此而降低了油田开发和平台的建造成本。目前投入生产实践的第二代张力腿平台共分为三大系列,分别是 SeaStar TLP、MOSES TLP 以及 ETLP(Ext-

ended TLP)<sup>[1-4, 6]</sup>。

### 3.1 SeaStar TLP 系列

SeaStar TLP 采用了一种独特的单柱式设计, 这一圆柱体结构称为中央柱, 中央柱穿过水平面, 上端支撑平台甲板, 在接近下端的部位固定连接三根矩形截面的水平浮筒, 各浮筒向外延伸成悬臂梁结构, 且末端截面逐渐缩小, 彼此在水平面上的夹角为  $120^\circ$ , 呈辐射状分布。这三根浮筒与中央柱一道向平台本体提供所需的浮力, 三根浮筒在外端与张力腿系统连接, 其作用是分开三组张力腿, 张力腿从浮筒末端的连接头垂直延伸到海底锚固基础, 张力腿被剩余浮力绷紧(见图 2<sup>[7]</sup>)。



图 2 SeaStar TLP

SeaStar TLP 除了具有张力腿平台的共同特点外, 还具备以下的技术特点: (1)SeaStar TLP 的结构形式具有更高的承载效率, 平台主体能够提供相当于自身重量  $1.5 \sim 2.5$  倍的有效载荷, 而传统类型张力腿平台最多只能提供相当于自身重量 1 倍的有效载荷。(2)单一圆柱体结构和对称形的平台本体结构为模块化建造、降低平台结构重量提供了有利条件, 这大大缩短了建造周期, 节约了建造和安装成本。(3)穿越自由表面的单一圆柱体结构进一步降低了波能聚集区水动力载荷对平台运动的影响, 其体积比起传统类型张力腿平台要小得多、自重也较轻, 受力面积小, 所受的风、浪、流等环境载荷自然也较传统类型张力腿平台要小得多。(4)尽管采用了单柱式设计, 呈辐射状分布外延伸的三条悬臂梁浮筒结构与三组张力腿一起除了为平台提供足够的预张力, 使平台具备了抵抗环境载荷的回复力外, 还为平台提供了足够的抗倾覆力矩, 使之在恶劣环境条件下能够维持

作业所需要的稳定状态。(5)平台采用了中性浮力的张力筋腱设计, 使张力筋腱在海水中所受的浮力等于甚至大于其自重。这样, 随着由于水深的增加导致张力筋腱长度增加而引起的张力腿自重过大的问题不再构成张力腿平台向超深水作业过渡的一个障碍。

SeaStar TLP 的上述技术优势使这种类型的张力腿平台更适应于在恶劣环境下稳定作业, 也大大降低了张力腿平台的建造费用, 为中小型深海油田提供了一种可供选择的实用开发手段。

SeaStar TLP 的单一圆柱体设计也为其带来了不少的制约: 拖航或自由浮动时稳性较差; 对平台上体结构的可变载荷变化非常敏感, 对平台上体结构的使用构成很大限制; 由于单一圆柱体设计, 平台上体结构没有更多的底部支撑, 平台上体结构的受力分布不均匀, 这使得这种类型的张力腿不利于向大型化方向发展; 自由浮动时只有中央柱的水线面提供浮筒与中央柱组成的组合结构的回复力矩, 其稳性不佳, 主体和平台上体结构的现场安装都需要大型浮吊辅助。

### 3.2 MOSES TLP 系列

MOSES TLP 设计沿袭了传统类型张力腿平台的四角柱结构, 而与传统类型张力腿平台不同, MOSES TLP 的四条立柱向平台中心靠拢, 立柱横截面也比传统类型张力腿平台的小很多(图 3<sup>[8]</sup>)。小立柱截面设计减轻了立柱重量, 降低了平台的整体重



图 3 MOSES TLP

心,使立柱在自由表面的波能聚集区中受力面积很小;同时,集中布置的四条立柱存在一定的遮蔽效应,一定程度上也减小了平台所受的环境载荷作用。这些措施减少了立柱所受到的波浪载荷以及由此所引起的平台在波浪场中的动力响应。

与 SeaStar TLP 比较,由于采用了四条立柱结构,立柱之间离开一定间距能够提供给平台上体更大范围的支撑,使平台上体受到一个更均匀的支撑力分布,从而使平台上体结构强度设计趋于合理,平台上体的结构重量也因此得以减轻,其建造难度也相应地可以降低。

MOSES TLP 还有以下的技术特点:(1)通过对包括张力腿在内的平台整体系统的动力响应优化设计,使平台结构和张力腿避开了导致其疲劳破坏的波频响应区域,从而降低了对张力腿预张力和张力腿制造技术的要求。(2)立管系统沿着平台外侧连接到安装在平台一端远离中心的外侧开放空间中,这一设计减小了立管系统事故发生的可能性;一旦发生故障后,检修起来也较方便。(3)平台的组成结构大多采用平面直角设计、矩形横截面结构、标准模块和标准板材组装等,使平台的制造可以尽量利用船厂的标准建造设备和标准通用材料进行制造,以此简化平台的建造工艺。

### 3.3 ETLP 系列

ETLP 的结构形式实际上是由传统类型张力腿平台演变而来,其主要改进点在于将传统类型张力腿平台四条立柱与张力腿的垂向轴线位置对应关系通过增加延伸悬臂梁的方式将它们的位置约束关系解除,使设计者在考虑平台的张力腿的布置形式时不受平台上体和立柱布置形式的约束,从而使设计者从平台在海洋环境载荷作用下的动力响应、结构强度和平台上体的主尺度选择角度去考虑这三者关系时有更大的自由度(图 4<sup>[3]</sup>)。

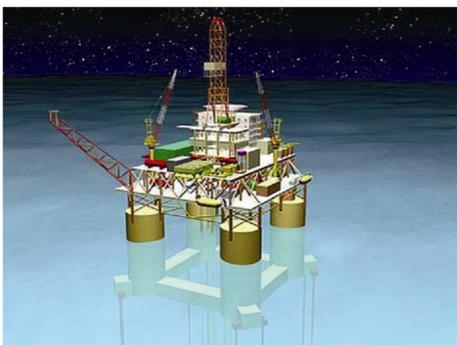


图 4 ETLP

ETLP 的平台本体的主体结构由立柱和浮箱两大部分组成,立柱的数目为三柱或四柱,立柱截面为方形或圆柱形,立柱上端穿出水面支撑平台上体,下端与浮箱结构相连,浮箱截面的形状为矩形,首尾相接形成环状基座结构,在环状基座的每一个边角上,都有一向外延伸形成的延伸悬臂梁,悬臂梁的外端与张力腿相连接。

与传统类型张力腿平台张力腿与立柱存在一一对应的轴向连接关系不同,ETLP 张力腿上端与延伸悬臂梁的外端相连,这一设计使得张力腿与立柱设置之间的限制关系得以弱化,设计者可以根据动力响应、结构强度和整体布置等方面的需要来确定二者的几何布置关系。采用 ETLP 结构形式,使所设计的张力腿平台更容易达到一种符合作业要求的理想力学状态:延伸悬臂梁的外端连接张力腿,使张力腿之间有一个合理的跨距和系泊点的分布范围,为平台获得更大的抗倾覆力矩、更高的纵横摇转动刚度、使平台受到更大的转动响应的限制提供了保证;立柱间距不再受张力腿系泊点的限制,设计者可以更多地从结构设计的考虑去设置立柱,这为优化平台甲板的尺度、简化主体结构、减轻平台重量、降低平台建造费用创造了条件。ETLP 设计上的这些改进大大降低了张力腿平台的用钢量。

与 MOSES TLP 类似,ETLP 主体设计尽量采用简单结构、平台本体结构为对称形,易于采用模块化的建造方式,对建造场地条件要求也不高。这对于提高平台的建造工作效率,降低其施工难度十分有利。

### 3.4 第二代张力腿平台共同的结构特征与技术特点

第二代张力腿平台研发的初衷是考虑如何将第一代张力腿平台的技术优势拓展到深海的中小油田开发中去,以简化平台结构、降低张力腿平台的重量和造价,使之在恶劣的海洋环境条件下具有更理想的动力响应特性作为其设计研发目标。以此为目标所研发的第二代张力腿平台具有以下的一些共同的结构特征与技术特点:(1)与第一代张力腿平台立柱与张力腿轴向一一对应的连接关系不同,第二代张力腿平台三个系列均采用了立柱与张力腿轴向异位连接方式,立柱向平台中心靠拢;张力腿均通过在平台本体结构上设置的悬臂梁浮筒结构与平台连接。这样一种结构方式使设计人员在考虑平台的动力响应、立柱间距、平台上体的尺度等力学与平台

的布置等问题时有了更大的设计自由度。(2)立柱采用小水线面设计,使立柱在近水线面处受力面积降低,这样可以大幅减小平台在水线面处受到的环境荷载。但是,立柱小水线面设计同时也会造成平台回复力矩的减小以及对可变荷载变化的敏感,不利于平台对作业载荷适应能力的提升。(3)普遍使用了模块化设计建造技术。第二代张力腿平台有意将平台结构尽量设计成对称形,平台的组成结构尽量采用平面直角设计、矩形横截面结构、标准模块和标准板材组装等,以此简化平台的建造工艺、降低平台的建造成本。(4)部分类型的平台采用了中性浮力的张力筋腱设计,采用这一类型的张力筋腱,使平台摆脱了深水条件下张力腿过重的问题,使之可以在更深的海域作业。

## 4 已投入使用的张力腿平台整体概况及主要技术参数

### 4.1 张力腿平台整体概况

目前世界上最大的张力腿平台为传统类型的张力腿平台 HEIDRUN,该平台于 1995 年在挪威 345 m 水深的海域投入使用,是世界上第一座也是唯一的一座混凝土张力腿平台,因为其主体构造采用了混凝土结构,所以主体排水量远远超过其他钢制张力腿平台,平台本体重量达到 25.5 万 t,设计排水量为 29 万 t。该平台设计使用寿命为 50 a,平台上有生产井 51 口、注水井 24 口,平台日产当量原油 25.1 万桶。另外二座在欧洲海域作业的张力腿平台分别为 HUTTON 和 SNORRE A。WEST SENO A 为在亚洲地区第一座也是目前唯一的一座张力腿平台;KIZOMBA A 为在非洲海域作业的第一座张力腿平台,此后陆续有另外三座张力腿平台坐落在非洲海域,它们是 KIZOMBA B、OVENG 和 OKUME/EBANO。除了上述的亚、非、欧 8 座张力腿平台外,其余的 16 座均在美国墨西哥湾作业。目前作业水深最深的张力腿平台为坐落于美国墨西哥湾的 MAGNOLIA,其作业水深达到 1 425 m,平台的结构形式为 ETLP;MORPETH 为世界上第一座第二代张力腿平台,该平台于 1998 年在美国墨西哥湾 518 m 水深的海域投入使用,平台为 SeaStar TLP 结构形式,平台本体结构重量为 5 357 t,设计排水量为 10 605 t,平台日产当量原油 4.8 万桶。产量最大的张力腿平台为在挪威海域作业的传统类型张力腿平台 SNORRE

A,平台日产原油当量 36.6 万桶。该平台本体重量约为 7.4 万 t,设计排水量为 10.6 万 t,是除了 HEIDRUN TLP 以外最大的一座张力腿平台,也是目前世界上最大的一座钢质张力腿平台。

从 1984 年至今,世界上建成投入生产的第一代张力腿平台共有 11 座,属于第一代张力腿平台的有 HUTTON、JOLLIET、SNORRE A、AUGER、HEIDRUN、MARS、RAM POWELL、URSA、MARLIN、BRUTUS、WEST SENO A。第二代张力腿平台最早于 1998 年投入使用,迄今共有三个系列 13 座第二代张力腿平台投入使用。属于第二代张力腿平台 SeaStar 系列的有: MORPETH、ALLEGHENY、TYPHOON、MATTERHORN 和 NEPTUNE;属于 MOSES 系列的有: PRINCE、MARCO POLO、OVENG、OKUME/EBANO 和 SHENZI;属于 Extended TLP 系列的有: KIZOMBA A、MAGNOLIA 和 KIZOMBA B。24 座张力腿平台中,除了 HUTTON 已退役、TYPHOON 由于在 Rita 和 Katrina 飓风中倾覆报废、沉入海底作为人工鱼礁外,其余 22 座 TLP 均在役。

此外,巴西国家石油公司(Petrobras)正在为位于巴西海域的坎普斯盆地(Campos Basin)、水深为 1 180 m 的 PAPA TERRA P-61 油田设计建造一座 ETLP 结构形式的张力腿平台,目前尚未见到该平台投产的报道。

### 4.2 已投入使用的张力腿平台的主要技术参数

1984 年世界上第一座实用化的张力腿平台 Hutton TLP 投入使用以后的近 30 a 来,张力腿平台已经逐渐成为各大石油公司深海油气田开发考虑采用的主流开采装置之一。目前已有 24 座不同类型的张力腿平台在世界各海域使用,其中二座已退役。表 1<sup>[3, 6, 9-13]</sup>为这 24 座张力腿平台基本信息、张力腿及其基础结构参数表,表 2<sup>[3, 6, 9-13]</sup>为 24 座张力腿平台本体结构的主要参数表。

## 5 讨论、结论与展望

根据前面的分析,本文有如下的讨论、结论与展望:(1)第一代张力腿平台和 Extended TLP 一般规模较大,具有较大的油气处理能力,这两类平台可用于大型油气田的开采;SeaStar TLP 由于自身结构特点一般适用于环境恶劣的中小油田和边际油田以及

表 1 24 座张力腿平台基本信息、张力腿及其海底基础结构参数表

平台名称/ 作业者	类型	投产 时间 (年.月)	干树或 湿树 平台	作业 海域	作业 水深 (m)	张力 腿数 (条)	张力筋腱结构参数			海底基础结构参数			
							每组张力 腿的张力 筋腱数(条)	长度 (m)	直径/ 壁厚 (mm)	基础 形式	桩数量 (根)	桩 直径 (m)	桩 长度 (m)
HUTTON/ ConocoPhillips	CTLP	1984.8	干树	英国	147	4	4	—	260/ —	基础+ 桩基	32	1.83	60
JOLLIET/ ConocoPhillips	CTLP/ TLWP	1989.10	干树	美国墨 西哥湾	536	4	3	515.2	610/20.6	基础+ 桩基	16	1.52	91.5
SNORREA/ Statoil	CTLP	1992.8	干树/ 湿树	挪威	335	4	4	—	813/ —	重力 基础	16	—	—
AUGER/ Shell	CTLP	1994.4	干树	美国墨 西哥湾	873	4	3	841.2	660/ 33	基础+ 桩基	16	1.83	130
HEIDRUN/ Statoil	CTLP	1995.10	干树/ 湿树	挪威	345	4	4	—	1070/ —	重力 基础	4	—	—
MARS/Shell	CTLP	1996.7	干树	美国墨 西哥湾	894	4	3	869	711/ 30.5	直接 桩基	12	2.13	114
RAM POWELL/ Shell	CTLP	1997.9	干树	美国墨 西哥湾	980	4	3	959	711/ 30.5	直接 桩基	12	2.13	106
MORPETH/ Eni	STLP	1998.10	湿树	美国墨 西哥湾	518	3	2	430	660/ —	直接 桩基	6	2.13	104
URSA/ Shell	CTLP	1999.3	干树	美国墨 西哥湾	1159	4	4	1158	812.8/ 38.1	直接 桩基	16	2.44	127
ALLEGHENY/ Eni	STLP	1999.9	湿树	美国墨 西哥湾	1009	3	2	—	711.2/ —	直接 桩基	6	—	—
MARLIN/ BP	CTLP	1999.11	干树	美国墨 西哥湾	987	4	3	—	711.2/ —	间接 桩基	8	2.13	—
TYPHOON/ Chevron	STLP	2001.7	湿树	美国墨 西哥湾	639	3	2	—	711.2/ 22.4	直接 桩基	6	—	—
BRUTUS/ Shell	CTLP	2001.8	干树	美国墨 西哥湾	910	4	3	884	813/ 31.7	直接 桩基	12	2.08	104
PRINCE/ Palm Energy Offshore	MTLP	2001.9	干树	美国墨 西哥湾	454	4	2	—	609.6/ 20.6	直接 桩基	8	1.63	98
WEST SENOA/ Chevron	CTLP/ TLWP	2003.8	干树	印度尼 西亚	1021	4	2	951	660/ —	直接 桩基	8	1.83	76.5
MATTERHORN/ Total	STLP	2003.11	干树	美国墨 西哥湾	859	3	2	828	812.8/ 29	直接 桩基	6	2.4	130
MARCO POLO/ Anadarko	MTLP	2004.7	干树	美国墨 西哥湾	1311	4	2	—	711.2/ 30.5	直接 桩基	8	1.93	119
KIZOMBA A/ ExxonMobil	ETLP/ TLWP	2004.8	干树	安哥拉	1178	4	2	—	812.8/ —	间接 桩基	8	2.13	—
MAGNOLIA/ ConocoPhillips	ETLP	2005.1	干树	美国墨 西哥湾	1425	4	2	—	812.8/ —	间接 桩基	8	—	—
KIZOMBA B/ ExxonMobil	ETLP/ TLWP	2005.7	干树	安哥拉	1178	4	2	—	812.8/ —	间接 桩基	8	2.13	—
OVENG/ Amerada Hess	MTLP/ TLWP	2007.1	干树	赤道几 内亚	271	4	2	—	609.6/ —	间接 桩基	8	1.63	52.7

续表

平台名称/ 作业者	类型	投产 时间 (年.月)	干树或 湿树 平台	作业 海域	作业 水深 (m)	张力 腿数 (条)	张力筋腿结构参数			海底基础结构参数			
							每组张力 腿的张力 筋腿数(条)	长度 (m)	直径/ 壁厚 (mm)	基础 形式	桩数量 (根)	桩 直径 (m)	桩 长度 (m)
OKUME-EBANO/ Amerada Hess	MTLP/ TLWP	2007.10	干树	赤道几 内亚	503	4	2	—	609.6/—	间接 桩基	8	1.63	60.3
NEPTUNE/ BHP	STLP	2008.7	湿树	美国墨 西哥湾	1280	3	2	—	914.4 /34.5	直接 桩基	6	2.44	126.2
SHENZI/ BHP	MTLP	2009.3	湿树	美国墨 西哥湾	1333	4	2	1311	914.4/ 39.4	—	—	—	—

注：—表示未见相关报告；CTLP 表示传统类型的张力腿平台，Conventional TLP；TLWP 表示张力腿井口平台，Tension Leg Wellhead Platform；STLP 表示 SeaStar TLP；MTLP 表示 MOSES TLP；ETLP 表示 Extended TLP；HEIDRUN 主体为混凝土结构；HUTTON 的海底桩基础为独立重力式基础、SNORRE A 和 HEIDRUN 为重力式吸力锚基础，重力式基础的桩数量是指重力式基座或重力式吸力锚数量；“直接桩基”表示张力筋腿直接与桩基连接，“间接桩基”表示张力筋腿通过海底基座模板与桩基相连

表 2 24 座张力腿平台本体结构的主要参数表

平台名称	人员 编制 (人)	主体 重量 (t)	上层建筑重量 (甲板结构及 设备) (t)	设计 排水量 (t)	平台上体主尺度 (长(m)×宽(m)× 高(m))	立柱			浮箱 数量 (个)
						数量	尺度 根× (m)或根× 长(m)×宽(m)	高度 (m)	
HUTTON	239	25500	20792	61500	78×74×12	6	4× 18+2× 15	—	4
JOLLIET	56	4170	1950	16602	43×55	4	4× 12	—	4
SNORRE A	220	30000	43700	106000	—	4	4× 25	—	
AUGER	132	35380	21772	66224	88×101×21	4	4× 22.6	—	4
HEIDRUN	370	166000	89000	290610	—	4	4× 31	—	4
MARS	106	15105	6531	49099	75×75×14	4	4× 22	49	4
RAM POWELL	110	13608	—	49100	75×75×12	4	4× 22	50	4
MORPETH	18	2540	2817	10605	34×34	1	1× 18	34	3
URSA	156	26018	20321	88451	91.4×91.4×15.2	4	4× 26	54	4
ALLEGHENY	18	2359	2781	10605	34×30.4	1	1× 18	34	3
MARLIN	—	8165	5000	23800	—	4	—	—	4
TYPHOON	22	2817	—	12157	34×34	1	1× 18	33	3
BRUTUS	94	13154	19958	49623	74.7×74.7×12.2	4	4× 20	51	4
PRINCE	24	3175	3629	13097	35×40	4	4×7×5	39	4
WEST SENO A	0	9000	—	23059	34×51.8	4	4×7×10	—	4
MATTERHORN	22	5352	5570	14881	43×43	1	1× 26	38	3
MARCO POLO	—	5216	12500	24947	—	4	4×7×10	39	4
KIZOMBA A	—	13464	11600	53052	75×61×14	4	4×14×14	40	4
MAGNOLIA	90	10000	13816	34286	68×68×12	4	4× 17.5	38.7	4
KIZOMBA B	—	13464	11600	53052	75×61×14	4	4×14×14	40	4
OVENG	13	2650	2250	—	39.4×36.6	4	4×7.6×7.6	15.9	4
OKUME-EBANO	13	2700	2250	—	39.4×36.6	4	4×7.6×7.6	15.9	4
NEPTUNE	26	5398	5779	24494	36.6×33.5	1	1× 23	39	3
SHENZI	44	11333	7878	39400	44×59×19.2	4	4×10.4×8.8	54	4

注：— 表示未见相关报告；表示直径，立柱为圆柱形立柱；根×长×宽表示立柱为矩形立柱

作为井口平台使用;而 MOSES TLP 介乎于第一代张力腿平台、Extended TLP 和 SeaStar TLP 之间。(2)就海底基础形式而言,已投产的张力腿平台中只有二座张力腿平台(SNORRE A 和 HEIDRUN)采用了重力式基础,其余的均以桩基形式作为其海底基础。重力式吸力基础一般为浅基础,主要适用于土质较软、或土质情况不稳定的土层,而桩基础则适用于承载力较高的土质。(3)传统类型张力腿平台是最早出现的一种张力腿平台结构形式,但 2003 年作为井口平台使用的最后一座传统类型张力腿平台 WEST SENO A 投产后,至今未见这种类型的新平台投入使用。显然,随着第二代张力腿平台越来越多地投入使用,传统类型张力腿平台结构形式的不足也越显突出。可以预见:今后新型的张力腿平台将会在吸收第一、第二代张力腿平台优点的基础上,综合第一、二代张力腿平台的四种类型的优点研发而成。(4)在投入使用的所有第一代张力腿平台均拥有支持干树系统的能力,可归类为干树平台;已投产的所有 3 座 Extended TLP 和大部分的 MOSES TLP 也为干树平台(除了 MOSES 系列中的 SHENZI TLP 为湿树平台外);而 5 座 SeaStar 系列的张力腿平台除了 MATTERHORN 拥有支持干树系统的能力外,其余 4 座为湿树平台。平台是否具备支持干树系统的能力主要由平台的规模大小而定。(5)目前张力腿平台大部分是在墨西哥湾使用,近年来有向巴西、北非等海域扩张的趋势。随着我国南海油气资源开发活动的升温,张力腿平台无疑将会与 Spar、FPSO 等一起作为我国南海油气田开发的主要考虑采用的装置。

#### 参考文献:

- [1] 张煜,冯永训. 海洋油气田开发工程概论[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011: 22-32.
- [2] 余建星. 深海油气工程[M]. 天津: 天津大学出版社, 2010: 86-92.
- [3] 董艳秋. 深海采油平台波浪载荷及响应[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005: 1-58.
- [4] Chakrabarti S K. Handbook of offshore engineering [M]. Amsterdam: Elsevier, 2005: 30-34.
- [5] Plumb A B, Stewart A, Laar J V D, et al. Abandonment of the Hutton TLP Wells [C]// Society of Petroleum Engineers. Proc of SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, the Netherland: Society of Petroleum Engineers, 2003: 1-20.
- [6] 张智,董艳秋,唐友刚,等. 1990 年后世界 TLP 平台的发展状况[J]. 中国海洋平台, 2004, 19(2): 5-11.
- [7] 佚名. 张力腿平台[EB/OL]. [2012-08-20]. <http://okok.org/forum/viewthread.php?tid=145456>.
- [8] 刘峰. 世界主要采油设备发展动态[EB/OL]. [2012-08-20]. <http://www.istis.sh.cn/list/list.aspx?id=6393>.
- [9] 董艳秋,胡志敏,张翼. 张力腿平台及其基础设计[J]. 海洋工程, 2000, 18(4): 63-68.
- [10] 李飒,李忠刚,韩志强,等. TLP 平台锚泊系统和锚固基础的发展状况[J]. 海洋科学, 2009, 33(3): 80-83.
- [11] Randolph M F, Gaudin C, Gourvenec S M, et al. Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments [J]. Ocean Engineering, 2011, 38: 818-834.
- [12] Teigen P, Haverb S. The Heidrun TLP measured versus predicted response [J]. Applied Ocean Research, 1998, 20: 27-35.
- [13] Chris Jones of Xenon Group. 2010 worldwide survey of TLPs, TLWPs [J]. Offshore Magazine, 2010, 70 (2): foldout.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)