

文章编号: 1001- 4500(2000)05- 0001- 05

深水张力腿平台的结构形式

董艳秋, 胡志敏, 马 驰

(天津大学, 天津市 300072)

摘 要: 通过对三种不同的张力腿平台结构设计形式的分析, 明确了各种结构形式的特点, 提出了关于张力腿平台结构形式不断优化这一方面的研究发展方向。

关键词: 张力腿平台; 混合张力腿平台;
悬式张力腿平台

中图分类号: P752

文献标识码: A

近二十年来, 随着全球对能源需求量的不断增加, 各国对海洋油气的勘探和生产更加重视, 从而涌现出大量的新型的开采设备, 及其科学的结构形式和先进的检测维修方法。

第一座近海石油平台是 1947 年建在墨西哥 Couissana 海域, 平台高出水平面 6m。从此以后海上建筑物逐步发展建成, 世界海洋石油平台约有 2 000 座。海洋工程石油平台按材料分为: 钢结构石油平台, 混凝土石油平台和钢结构混凝土混合平台, 大多数海洋平台是钢结构形式, 它由钢套管作为油气生产过程中的主要支撑结构。按平台结构形式大致分为: 钢套管平台、重力式平台、顺应式平台。海洋工程中选择什么样的平台结构形式主要考虑平台所处的海况环境, 如: 风、流、浪等载荷, 水深, 海底地质条件, 以及平台的安装组建方法等。一般深海域中自然环境十分恶劣, 环境载荷比较复杂, 严重的影响着海洋工程的建造和生产投入。重力式平台、导管架平台等, 由于其自重和工程造价随水

深大幅度地增加, 已不适应深海环境, 所以必须发展新型的平台^[7]。从 20 世纪 70 年代以来, 这样的研究探索不断进行, 并提出了顺应式平台的概念^[1]。在近二十年, 顺应式平台得到了广泛的发展应用, 其显著特点是具有特殊的结构形式, 使工程造价较低, 结构安全性良好。张力腿平台(Tension Leg Platform 简称为 TLP)是顺应式结构的典型。世界上已经建成投产的 TLP 平台已有不少。实践证明, 张力腿平台在深海作业具有运动性能好、抗恶劣环境作用能力强、造价低等优点。因此张力腿平台作为优秀的深海平台, 至今一直蓬勃发展。随着这些张力腿平台的设计、安装、生产和检测, 各国学者已经积累了许多有价值的经验和方法, 并不断地对张力腿平台进行深入的理论和实验研究。在肯定张力腿平台优良的运动性能和经济效益的同时也在不断地寻求优化张力腿平台各项性能的新方法, 特别是张力腿平台结构形式的优化。从张力腿内锚固外锚固连接形式的改变、基础形式的优化选择, 到结构整体形式的改进, 如悬式张力腿平台^[4]、混合平台概念^[5]的提出, 以及近海小型张力腿平台的概念^[6, 11]等方面做了较多的设计改进。

我国是一个海洋大国, 有 300 万平方公里的海域, 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

收稿日期: 2000-01-21

作者简介: 董艳秋(1937-), 女, 博导, 教授; 胡志敏(1972-), 女, 博士生。

基金项目: 国家自然科学基金项目(59579014)。

开发有着重要意义。本文通过三种张力腿平台整体结构形式特点的分析,说明在深水域中张力腿平台结构形式不断优化的基本思路,提出今后结构形式优化设计的发展方向。

1 张力腿平台

张力腿平台在二十多年的实践中不断发展,已经形成了一种典型的结构形式。它一般由平台本体、张力腿和锚固基础三部分组成,如图 1 所示。张力腿平台设计最主要的思想是使平台半顺应半刚性。它通过自身的结构形式,产生远大于结构自重的浮力,所以浮力除了抵消自重之外,剩余的部分作为预张力。作用在张力腿平台的竖向张力腿系统上,使张力腿处于预张拉状态,较大的张力腿预拉力使平台平面外的运动(横摇、纵摇和垂荡)较小,近似于刚性。平台通过张力腿将平台和海底固接在一起,为生产提供一个相对平稳安全的工作平台。另外,张力腿平台的平台本体主要是直立浮筒结构,一般浮筒所受波浪力的水平方向分力较竖直方向分力大,因而通过张力腿在平面内的柔性,实现平台平面内的运动,横荡、纵荡和首摇为顺应式,这样,较大的环境载荷能够通过惯性力来平衡,而不需要通过结构内力来平衡。张力腿平台这样的结构形式使得结构具有良好的运动性能。

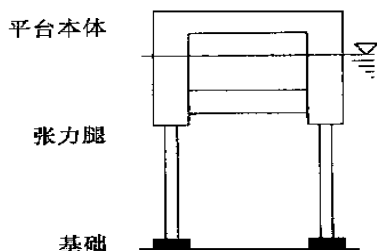


图 1 典型张力腿平台结构示意图

张力腿平台的张力腿系统在初始位置是直立的,平台的横荡运动将不引起纵摇,但一般会和平面的竖向运动相耦合,即横荡引起垂荡。首摇运动和横荡运动相耦合,仍然保持各张力腿

锚固点到海底的距离相等,在运动过程中没有一个张力腿的预张力会松弛。如果有任意一个张力腿未校准,则会破坏这种理想的平衡性质,因此在张力腿平台的设计中,张力腿锚固位置容许偏差的设计很重要。可以设想用非平行的张力腿,这样的张力腿同样可以使平台固定于某一空间位置,但不平行的张力腿必然在空间中相交于一点,这一点将是平台横荡引起纵摇的旋转中心。

从动力学角度来看,张力腿平台欲实现其半刚性半顺应性,平台平面内的运动固有频率低于波浪频率,平面外的运动固有频率高于波浪频率。张力腿平台的横摇、纵摇和垂荡运动周期低于 4s,而横荡、纵荡和首摇的运动周期高于 40s,结构的频率跨越在波浪的一阶频率谱之外,避免结构和波浪的主振频率发生共振,使平台结构受力合理,动力性能良好。

1984 年由 Conoco 公司在北海 Hutton^[8]海域水下 170m 安装了第一座张力腿平台。从另一种意义上说 Hutton 是一座实验平台^[10],它是为以后张力腿平台在深海域的广泛设计应用收集科学数据。Hutton 的平台本体由六根浮筒柱组成,十六根竖立系于海底基础基座的张力腿将平台本体固定入位,张力腿由较大的平台本体浮力张拉着。在 Hutton 平台建成和投产之后,许多张力腿平台如: Joliet^[12], Snorre, Auger^[3], Heidrun^[9], Mars, Ursa, Seastar, Ram/powell 也设计安装并投入生产。通过这些平台的生产实践,进一步证明了张力腿平台在深海域半刚性半柔性的优秀运动性能和经济性。但,同时亦发现典型的张力腿平台结构形式仍存在一定的不足: (1) 差频载荷是一个缓慢变化的力,它将和同样缓慢变化的张力腿平台平面内的运动发生共振。另外,风的激振力也在这个差频范围内,必然会加剧这种慢漂运动。(2) 波浪的高频分量和高频水动力会引起张力腿平台平面外的共振,通常称为 Springing, Ringing。张力腿平台结构这两个问题随着水深的增加而加剧,对结构的安全性有很大的影响。

(3) 典型的张力腿平台是通过海底基础固定入位的, 随水深的加深, 海底基础的设计、施工变得十分复杂。所以张力腿平台所具有的经济、安全和良好的动力特性在更深水域中均不能得到很好发挥, 典型的张力腿平台结构已不能很好地适应更深的水域。各国学者对张力腿平台结构形式不断改进完善非常重视, 因此混合式张力腿平台及悬式张力腿平台等概念应运而生。

2 混合式海洋平台

混合式平台 (Hybrid Compliant Platform 简称为 HCP) 是改进的张力腿平台。平台由浮式本体结构和中心定位的细长塔组成, 如图 2 示, 混合式张力腿平台的浮式本体和细长塔在垂直方向运动是相互独立的, 而水平方向的运动是相互耦合的。平台由两个甲板组成: 一个甲板由中央塔结构支撑在较高平面, 钻探、生产以及相关的设施设置在上甲板上; 浮式本体支撑着较低的甲板, 此甲板上设直升飞机甲板、生活设施等。浮式本体由四个在底面被四个水平浮箱连接的浮筒组成, 与固定在海底基础上的张力腿锚固。混合式平台在水平方向周期大约为 41~100s, 在竖向方向的周期为 1~4s, 像其它顺应式平台一样, 混合式平台的第一基本频率处于波浪激振频率之外, 避免了和波浪发生共振。在非常深的海域 (超过 900m) 典型的张力腿平台有较长的张力腿系统, 对水平方向的载荷过分柔性, 慢漂运动显著, 严重地影响生产的安全性, 而混合式平台的设计概念与典型张力腿平台不同, 混合式平台的恢复力由两部分组成: 一部分同典型的张力腿平台一样是结构惯性力和运动中张力腿张力的水平分力; 另一部分由细长塔的侧向刚度提供, 独特的结构形式产生较大的恢复力有效地控制了平台的慢漂运动。混合式平台的塔一方面支撑着顶部甲板和设置着的生产系统, 担负了 50% 的结构负载; 一方面, 通过减小混合式平台的水平偏移幅值间接地减小了浮式本体的竖向运动, 使 Springing,

Ringling 得到了有效避免。同塔一样, 浮式本体也从多方面对整体结构起作用, 除了分担 50% 的结构负载外, 浮力体对于细长塔是一个顶端侧向支撑, 减小了塔的侧向挠屈。这样与顺应塔平台相比可以大大地减小塔的宽度, 在 900m 深以上的海域, 传统的顺应塔平台的基本宽度为 $70 \times 70 \sim 95 \times 95 \text{m}^2$, 而混合式平台的塔结构只需要 $25 \times 25 \sim 40 \times 40 \text{m}^2$ 。在水平方向浮式体对细长塔提供水平约束, 使混合式平台的二阶模态在塔顶端的挠度为零, 而塔中央的挠曲最大, 因此这样有效地避开了主要分布在自由表面的波浪、风的激振力。浮式体和塔之间的动力平衡对于增强混合式平台对环境荷载的响应能力起重要作用。

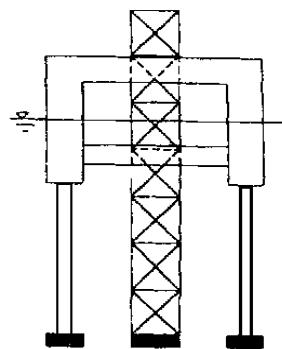


图 2 混合式张力腿平台

文献[5]对混合式海洋平台还进行了详细的结构动力响应分析。结果表明混合式张力腿平台对于深水域复杂的环境载荷具有很好的动力响应性能, 是适于更深水域的一种安全的张力腿平台结构形式, 不过这种平台采用两个既独立又相互影响的结构, 两结构都与海底基础连接定位, 势必会加大基础设计、施工的难度。

3 悬式张力腿平台

悬式张力腿平台 (Suspended Tension Leg Platform 简称为 STLP) 结构形式于 1992 年由 Sridhar Jagannathan 提出并进行了较深入的研究。悬式张力腿平台兼备了张力腿平台良好的运动特点及半潜式船的可移动性和收放性。悬

式张力腿平台有上下两个平台本体, 上体浮力大于自重, 下体浮力小于自重, 二者通过张力腿连接。下体超于自重的浮力形成张力腿的预张力。在结构生产过程中可以通过改变上下体的质量以及张力腿的长度来改变结构频率特征, 实现各种状态下悬式张力腿平台的理想运动性能。图 3 示悬式张力腿平台的三个状态下的结构形式。由于张力腿连接的上体平台和下体平台的横荡运动幅值不同(上体大于下体), 引起张力腿长度的改变, 以及上下平台体不相同的阻尼特征, 使得运动相对滞后, 产生了相对运动及上下平台体间的恢复力。悬式张力腿平台的频率是平台质量、水线面面积、张力腿长度和张力腿弹性性质的函数。可以通过调整这些参数来控制结构的频率和运动响应性能, 这种自然频率的可调控性使得设计时在不破坏结构耐波性的基础上得到满意的结构重量和体积。而且在生产过程中如果遇到特殊海况条件也可以通过改变这些参数及时调整结构的运动行为。允许灵活的操作减小了由于天气变化引起的停钻时间。另外可以通过设计上体平台尺寸对于特定的频率产生零垂荡力, 通常将这个频率称其为“抵消频率”。

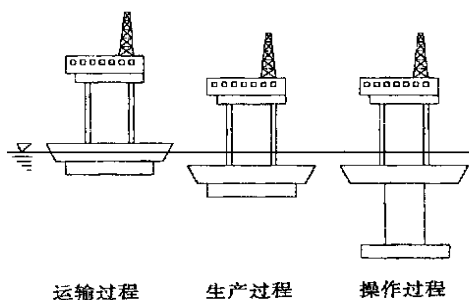


图 3 悬式张力腿平台

综上所述, 悬式张力腿平台具有以下优点:

- (1) 悬式张力腿平台不需要与海底地基固定在一起, 因此它是可移动的, 不受海底地质和水深度的影响;
- (2) 悬式张力腿平台由于其优良的运动特征既可以用于勘测钻井也可作为生产平台、海上浮式旅店结构或应用到其他领域如可

以作为浮式消波器、浮桥、近海人工岛屿等。另外, 悬式张力腿平台不与海底地基连接固定, 发挥了可移动性优点的同时, 也存在着另一个问题——结构刚体运动的控制。从图 3 中可以看到悬式张力腿平台在生产过程中下体平台位于水面以下, 作为最大载荷的海面波浪、流不直接作用在平台上, 而是作用在水平平面较小的浮筒上, 这样减小了水平方向的载荷作用, 减小了结构的水平刚体运动, 同时自重较大的下体平台生产过程中位于相对稳定的海洋深处, 也起到了约束结构刚体运动的作用, 但关于悬式张力腿平台刚体运动的有效控制及其严密的理论计算有待进一步深入研究。

4 结论和展望

典型的张力腿平台结构形式是海洋石油、天然气工业从近海向深海进军的技术革新产物, 作为张力腿平台概念的基本结构形式, 经过二十多年的生产实践证明它有着较好的动力运动特性和经济效益, 同时随着水深的增加也暴露出一些问题。在更深海域中, 典型的张力腿平台结构形式虽然可以避免和波浪主频率发生共振, 但结构平面外和平面内的频率分别与波浪和频、差频发生的共振运动—Springing, Ringing 及慢漂运动十分显著, 这些共振现象严重地影响着结构的安全生产。另外由于张力腿平台是通过张力腿锚固在地基基础上来定位的, 基础的设计安装在深海域中变得十分困难和昂贵。混合式平台和悬式平台就是考虑到这些问题而提出的新型张力腿平台结构形式。

本文通过张力腿平台的三种结构形式概念的分析可以看到深水张力腿平台结构形式的不断优化设计主要是基于以下几点考虑:

- (1) 在结构动力响应特性方面, 典型的张力腿和平台结构形式有效地避免了结构和波浪主频率之间的共振, 使结构具有良好的对波浪主频率顺应性, 但随着水深的增加应该考虑结构的平面外和频共振和平面内慢漂运动。这一

点混合式张力腿平台通过塔结构和平台结构的相互作用得到了改进。

(2) 典型张力腿平台在深水域遇到的海底基础问题是不可避免的, 对于深水域海底基础的设计施工是一个比较复杂而又极其困难的过程。这问题可以借鉴半潜式船的结构形式, 采用浮式结构, 一方面避开了与海底地基的联系及基础的建造, 另一方面使结构具有完全的可移动性, 对实现结构的重复利用、节约工程投入有重要的意义。悬式张力腿平台结构形式就是基于这些考虑提出的。

(3) 为逐步完善深海石油平台的结构形式, 更好的适应生产需求, 平台的动力学性能使用、建造、安装以及经济性等仍是结构不断优化设计需要考虑的问题。

参考文献

- [1] Natvig B J, Vogel H. TLP design philosophy- past, present, future [A]. Proceedings of the Fifth (1995) International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. The Hague, The Netherlands, June 11-16, 1995, p64-69
- [2] Hunter A F, Zimmer R A, W-J. Designing the TLWP [R]. Offshore Technology Conference, 1990, Paper No. 6360
- [3] Schott W E, Rodenbusch G. Global design and analysis of the Auger Tension Leg Platform [R]. Offshore Technology Conference, 1994, Paper No. 7672
- [4] Sridhar Jagannathan. The suspended tension leg platform (STLP): a new platform concept for deepwater exploration and production [R]. 1992 OMAE-Volume 1-B, Offshore Technology ASME 1992
- [5] Nagan Srinivasan. Hybrid compliant platform: an innovative concept for deepwater production [J]. Behaviour of offshore structures vol 13 p161-183
- [6] Hudson W L, Doris Engineering, Vasseur J C, Foramer. A small Tension Leg Platform for Marginal deepwater fields [R]. Offshore Technology Conference, 1996, Paper No. 8046
- [7] Horton E E, McCommon L B, Murtha J P, Paulling J R. Optimization of Stable Platform Characteristics [R]. Offshore Technology Conference, 1972, Paper No. 1553
- [8] Mercier J A, Leverette S J, Bliault A L. Evaluation of Hutton TLP Response to Environmental Loads [R]. Offshore Technology Conference, 1982, Paper No. 4492
- [9] Botrox F R, Wilson T J, Johnson C M. The Heidrun field: global structural design and analysis of the Heidrun TLP [R]. Offshore Technology Conference, 1996, Paper No. 8099
- [10] Stock P F, Jarnine R, McIntosh W. Foundation monitoring on the Hutton Tension Leg Platform [J]. Offshore site investigation and foundation behavior 1993, 28: 469-491.
- [11] 鲍莹斌等. 中等水深轻型张力腿井口平台运动研究 [J]. 海洋工程, 1999, (1).

The Structure Types of Deepwater TLP

Hu Zhimin, Dong Yanqiu and Ma Chi

(Tianjin university, Tianjin 300072)

Abstract: Three types of structure design of tension leg platforms, ie, TLP-Tension leg platform, HCP-Hybrid compliant platform and STLP-Suspend tension leg platform are analyzed in this paper. The characteristics of these types are discussed. Some useful optimal design concepts and the development in the future of TLP are proposed.