

# 浮式海洋结构物研究现状及发展趋势

李 芬 邹早建

(武汉理工大学交通学院 武汉 430063)

**摘要:** 在我国研制和开发浮式海洋结构物对本世纪海洋工程的可持续发展具有极为深远的战略意义。文中对浮式海洋结构物的发展历程进行了回顾,介绍了浮式生产储运装置、半潜式平台、张力腿平台、独柱式平台和超大型海洋浮式结构物的主要结构形式、特点及发展现状,对其发展趋势作了展望,指出了发展我国浮式海洋结构物的迫切性。

**关键词:** 浮式海洋结构物; 浮(船)式生产储运装置; 张力腿平台

**中图分类号:** U 661

## 1 浮式海洋结构物发展简史

1937 年,世界上出现了最早的活动式平台——驳船式钻井平台。由于驳船型深小,适用的水深不大。随着水深的增加,1949 年在墨西哥湾发展了第一座坐底式平台“环球 40 号”。由于这种平台高度是固定的,故工作水深适应范围变化不大。为适应在不同水深范围内工作,1954 年又设计了第一座自升式钻井平台——“加利福尼亚 1 号”。为了在更深海域钻井,人们把钻井设备安装在船上,在漂浮状态下钻井,这就是浮式钻井船。美国 1957 年建造的用于墨西哥湾的 Cuss1 号是第一艘浮式钻井船。这种钻井船由于漂浮在海面作业,抗风浪性能差,停工率高是它最大的缺点。为克服浮式钻井船的缺点,1962 年出现了第一个半潜式钻井平台——美国的“蓝水 1 号”。这种平台可在深水钻井,抗风性能好,可半潜作业,也可坐底作业。随着工作水深不断增加,人们又研究发展了张力腿式平台(tension leg platforms, TLP)、独柱式平台(Spar)、浮(船)式生产储运装置(floating production, storage and offloading units, FPSO)等。世界上第一个张力腿平台于 1984 年 8 月成功安装在英国北海的 Hutton 油田,水深 148 m,至今建成使用的有 20 多座,水深达 1 000 多米。Spar 为海上储油设施,最早使用于 1976 年

的 Brent 油田,它的安装水深为 110 m<sup>[1]</sup>,如今发展为深水平台,安装水深达几千米。在过去的 20 年里,TLP, Spar 已成为深海油气资源开发的生力军和主力军。此外,FPSO 也是深水采油领域中的另一种主要结构形式。

我国从上世纪 60 年代开始海洋石油勘探工作,由于海上石油勘探需要,首先开展了活动式石油钻井平台的研制工作。先后建成“海五”平台(坐底式平台)、“渤海一号”(自升式平台)、“勘探 3 号”(半潜式平台)等。自 20 世纪 90 年代以来,已有 7 艘 FPSO 和 1 艘半潜式平台投入海上采油作业。但从总体上看,我国在平台的设计和建造上与国外先进水平还有一定差距。

## 2 浮式海洋结构物发展现状

为迎接深水钻井和采油的挑战,先后发展了几大类适合于深水作业的浮式结构物: FPSO、半潜式平台、张力腿平台和 Spar 等。

### 2.1 浮(船)式生产储运装置(FPSO)

FPSO(见图 1)目前已在边际油田和油田的早期生产系统中得到广泛应用,该项技术已比较成熟,这种结构形式可提供多种用途,其主要特点为:(1)浮船型,机动性、运移性和结构稳定性好,具有在深水域中较大的抗风浪能力,允许在各种

收稿日期: 2003-04-11

李 芬,女,29 岁,博士生,讲师,主要研究领域为结构工程

气候下装卸油, 并且运输方便; (2) 建筑成本低, 建设周期短, 是一种相对廉价的结构 典型的新建 FPSO 需 2.5 a 左右, 与张力腿平台 (见图 3) 相比, 后者至少要长 1.5~2 a<sup>[1]</sup>。因而对于许多石油公司来说, FPSO 具有较好的经济效益; (3) 工作面开阔, 可在甲板上装卸油, 具有大产量的油、气、水生产处理能力以及较大的原油储存能力; (4) FPSO 本身没有钻井能力, 但它与海底完井系统组合时, 可具有适应深水采油的能力 它可以与导管架井口平台相组合, 也可以与自升式钻采平台相组合成为完整的海上采油、油气处理和储油、卸油系统, 但更主要的适用于深水采油与海底采油系统 (包括海底采油树、海底注水井井口、海底管汇、立管管汇和控制系统等) 组合成为完整的深水采油、油气处理、原油储存和卸油系统

从被统计的 67 艘 FPSO 中, 工作水深主要在 100~500 m, 但随着采油工作水深的增加, 大于 500 m 工作水深的在逐年增加 例如, 由 Roar Ram de 和挪威海事技术公司 (Maritime Tentech) 联合设计, 由韩国现代重工施工建造的“Ram fo m Banff”号工作水深达 1 524 m。另一艘工作水深达 2 000 m 的 FPSO, 由 Harland & Wolff 全部负责设计和建造, 由巴西国家石油公司 (Petrobras) 承担操作, 用于与深海海底完井系统相结合的采油

## 2.2 半潜式平台 (立柱稳定式平台)

半潜式平台, 又称立柱稳定式平台 (见图 2), 是浮式海洋平台中的一种常见类型 它一般由平台本体、立柱和下体或浮箱组成 此外, 在下体与下体, 立柱与立柱, 立柱与平台之间还有一些支撑与斜撑连接 平台上设有钻井机械设备, 器材和生活舱室等, 供钻井工作用 平台本体高出水面一定高度, 以免波浪的冲击; 下体或浮箱提供主要浮力, 沉没于水下以减少波浪的扰动力; 平台本体与下体之间连接的立柱, 具有小水线面的剖面, 立柱与立柱之间相隔适当距离, 以保证平台的稳性, 所

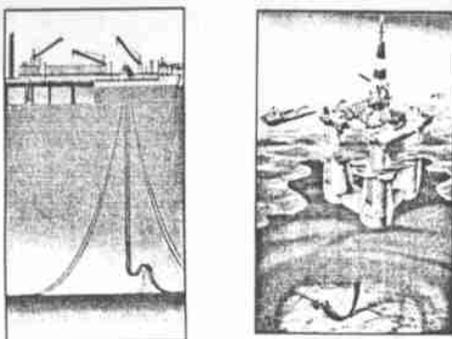


图 1 浮式生产储运装置 图 2 半潜式平台

以又有立柱稳定式之称

半潜式平台在深水区域作业, 需依靠定位设备, 深水锚泊系统, 需要大量链条, 靠供应船运载 半潜式平台由于下体都浸没在水中, 其横摇与纵摇的幅值都很小, 有较大影响的是垂荡运动 由于半潜式平台在波浪上的运动响应较小, 在海洋工程中, 不仅可用于钻井, 其他如生产平台、铺管船、供应船和海上起重船等都可采用, 这也是它优于 FPSO 的主要方面 同时, 能应用于多井口海底井和较大范围内卫星井的采油是它的另一优点 另外, 半潜式平台作为生产平台使用时, 可使开发者于钻探出石油之后即可迅速转入采油, 特别适用于深水下储量较小的石油储层 (例如 4~5 a 内采完)。随着海洋开发逐渐由浅水向深水发展, 它的应用将会日渐增多, 诸如建立离岸较远的海上工厂、海上电站等, 这对防止内陆和沿海的环境污染将有很大的好处

目前, 世界上共有半潜式生产平台 40 艘左右 在已知工作水深的 35 艘中, 工作水深小于 200 m 共 9 艘, 占 25.7%; 工作水深 200~500 m 的共 15 艘, 占 42.9%; 工作水深 500~1 000 m 的共 9 艘, 占 25.7%; 工作水深大于 1 000 m 的共 2 艘, 占 5.7%。由此可见, 工作水深 200~500 m 的比率接近半数<sup>[2]</sup>。2 艘最深水域采油的半潜式平台均属于巴西国家石油公司所有, 其一是“巴油 18”号, 工作水深达 1 000 m, 抗风能力可适应风速为 99 kn, 浪高 32 m, 其锚泊为 8 点张紧锚, 由锚链与钢缆相结合 其二是“巴油 36”号, 工作水深达 1 372 m, 是目前世界上半潜式平台最深的工作水深, 可适应巴西近海百年一遇的海况条件, 为 16 辐射张紧锚, 锚为桩腿式, 锚缆由高强度聚脂绳缆与锚链相结合 从半潜式平台适应风暴能力已知的 21 艘中, 几乎均能适应百年一遇的海况条件, 适应风速普遍为 100~120 kn, 个别最低者也在 85 kn 以上, 适应浪高普遍为 16~32 m, 个别最低者也在 12 m 以上 半潜式平台具有适应深水采油的能力, 用途广泛, 其发展仅次于 FPSO。

## 2.3 张力腿平台 (TLP)

张力腿平台 (见图 3) 可视为半潜式平台的派生分支, 是一种顺应式结构, 它是由一个刚性的半潜式平台与一个弹性的系泊系统结合成的一种较新型平台 它是用系索 (或钢管) 将浮于海面的浮动平台与沉浸海底的锚锭 (或基座) 联结起来的, 通过收紧系索, 使浮体的吃水比静平衡浮态时大,

导致浮力大于浮体重力, 该剩余浮力由系索的张力予以平衡。由于张力腿平台具有垂直系泊的某些特征, 也称它为垂直锚泊式平台。为了能在较小的张力变化范围内就能限制平台的运动, 平台本体采用半潜式。因此, 也有称它为张紧浮力平台。从结构上一般可将其划分为5部分: 平台上体、立柱、下体(含沉箱)、张力腿、锚固基础<sup>[3]</sup>。通常又将平台上体、立柱、下体三部分并称为平台本体, 事实上张力腿平台可以被看作一个带有张力系泊系统的半潜式平台。

张力腿平台受风、浪作用时, 平台随缆索弹性变形而产生微量运动, 就像有桩腿插入海底一样, 所以称为张力腿。平台系统在垂直方向(垂荡、纵摇和横摇)是刚性的, 在水平方向(纵荡、横荡和首摇)是柔性的, 即在非张力控制方向可有一定的漂移。垂荡自然周期一般在2~4 s, 远低于海况的特征周期, 而纵荡自然周期在100~200 s, 远大于海况的特征周期, 从而可避免在波浪中的共振现象。又由于平台控制方向的张力对非控制方向的运动有牵制, 漂移和摇摆比一般半潜式平台小, 具有波浪中运动性能好、抗恶劣环境作用能力强等优点。与固定式平台相比, 除了造价低以外, 其抗震能力显著优于固定式, 且张力腿平台在必要时还可移位, 至多损失锚基和钢索, 故适用于开采周期稍短的油田, 在该油田开采完后, 可将其移至不同地点重新安装, 大大提高了其通用性和经济性, 但目前还没有重新安装的经验<sup>[1]</sup>。它的主要缺点是对重量变化敏感, 有效载荷的调节有限制, 在大波高的状况下, 甲板载荷过大容易产生系泊索松弛现象。由于张力腿平台没有储油能力, 主要用于生产平台, 不能用作储油装置, 在没有管路设施的地方, 需要浮式油轮。

#### 2.4 独柱式平台(Spar)

为降低成本, 弥补张力腿平台的不足, 有人提出了Spar(见图4)的概念。最近20年在挪威海湾和墨西哥海湾都在进行大量的设计和研究工作, 目前Spar已能适用于水深达3 000 m的环境较恶劣的海域。

Spar的主体是一个大直径、大吃水的具有规则外形的浮式柱状结构。它的水线结构是敞开的, 基本不提供浮力, 以减少垂荡; 水线以下部分为密封空心体, 以提供浮力, 又称浮力舱, 舱底部一般装水压载或用以储油(柱内可储油也成为Spar的显著优点); 中部有锚链呈悬链线状锚泊于海底, 底部有系缆或系留管锚固于海底。Spar可适用于深



图3 张力腿平台

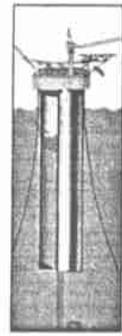


图4 独柱式平台

达3 000 m的海域。它的优点是在波浪中比较稳定, 适应于任意角度的风浪, 能显著减少垂荡反应; 造价低, 便于安装, 可以重复使用, 因而对边际油田比较适用; 并且它的柱体内部可储油; 它的大吃水形成对立管的良好保护, 同时其运动响应对水深变化不敏感, 更适宜于在深水海域应用<sup>[4]</sup>。Spar兼具了张力腿平台和浮(船)式生产储运装置的特点, 优越性显著。被认为是除了张力腿平台之外的另一种适用于深水的海洋平台, 有望在今后得到推广。

#### 2.5 超大型浮式海洋结构物(VLFS)

超大型浮式结构物(very large floating structures, VLFS)是指那些尺度以公里计的浮式海洋结构物, 以区别于目前尺度以百米计的船舶和海洋工程结构物, 如海洋平台等。一般而言, VLFS可以沿海岛屿或岛屿群为依托, 带有永久或半永久性, 具有综合性、多用途的功能。它主要有以下3个方面用途: (1) 在合适的海域建立资源开发和科学研究基地、海上中转基地、海上机场等, 以便大量开发和利用海洋资源; (2) 当沿海城市缺乏合适的陆域时, 可以把一些原本应建在陆地上的设施, 如核电站、废物处理厂等, 移至或新建在近海海域, 以图降低城市噪音和环境污染; (3) 在国际水域建立合适的军事基地, 以期对某地区的政治、军事格局产生战略性影响。

VLFS通常有两类结构型式: 厢式(pontoon type或Box type也叫mat-like)和半潜式(semi submersible type)。厢式浮体构造简单, 维护方便, 日本的“mega-float”就采用这种形式。半潜式浮体虽然构造比较复杂, 但水动力性能更佳, 适宜在较恶劣海洋环境中生存。半潜式浮体又可分为立柱支撑式(column-supported type)和立柱下体混合支撑式(column and lower hull supported type)。美国的移动式海洋基地(mobile offshore base, MOB)就是采用立柱下体混合支撑式的VLFS<sup>[5]</sup>。

与一般的海洋工程结构物相比, VLFS 具有以下几个特点: (1) VLFS 是一个极为扁平的柔性结构物, 它的长(宽)度与高度的比值非常大, 必须考虑它在海洋环境中的弹性响应; (2) 由于 VLFS 从一端至另一端要跨越数公里, 需要建立一种新的随位置缓变的海浪谱, 用于作为与 VLFS 水弹性响应的激励; (3) 由于 VLFS 的巨大, 它是一个模块化的结构, 各模块之间用特殊的具有一定挠性的联接装置相联; (4) VLFS 除了有时需要移动外, 一般来说是相对固定在某一位置的, 不能让它随风、浪、流任意漂移, 因此它的系泊装置在结构设计中极为重要; (5) 与一般海洋工程结构物相比, VLFS 要求的寿命特别长, 一般在百年以上<sup>[6]</sup>。

超大型浮式结构物的研究是一门跨多学科、多领域的课题。目前, 对超大型浮式结构物 (VLFS) 研究最广泛和深入的国家是日本和美国。另外, 韩国、挪威、英国等也有一些专家在从事 VLFS 的动态特性研究。由于 VLFS 有着广泛的带有战略意义的应用前景, 我国的许多专家学者也在积极呼吁尽快开发超大型浮式海洋结构物。

### 3 浮式海洋结构物的发展趋势

海洋石油工业正移向深水, 深于 500 m 的海洋中已发现有数百亿桶石油储量。随着海洋开发事业的发展, 半潜式平台、FPSO、TLP 和 Spar 等浮式结构物的研究得到了迅速的发展。它们保留了固定式平台的许多优点, 可将浅水平台的许多成熟的生产技术直接移植到深水, 并能降低平台在深水海域的造价。浮式结构物集中了海洋结构物设计、制造、安装、智能定位、控制、石油开采、检测与安全适时评定等现代高新技术, 是深海油田开发的主要形式。随着浮式结构物在深海油气开发中的广泛应用, 不少专家和学者对深海平台开展了大量的研究, 开发了几种新型系统。

为提高安全性和操作性, FPSO 和半潜式平台都得到了很大的发展。新式的半潜式平台的设计努力减小垂荡运动以提高其性能。老式 FPSO 大部分由 VLCC 油轮改装, 近年来 FPSO 大多根据规范制造, 这些新的 FPSO 船体呈长方形以增加可用体积<sup>[7, 8]</sup>。杨建民等对储油量为 32 万 t, 吃水为 19.49 m 的软刚臂塔式大型 FPSO 在浅水中(水深为 21~ 26 m)的运动性能进行了试验研究, 其结果表明: (1) FPSO 的升沉、横摇和纵摇

的波频运动随着水深的减少而减少, 但在水平面的低频运动则增大; (2) 即使水深降低至 21 m 的所谓“极浅水”, FPSO 也极少碰底; (3) 在“极浅水”状态, FPSO 并没有随流速的增加而下沉(无吸底现象)。这一研究对采用大型 FPSO 开发浅水油田很有意义。

FPSO 在今后的发展中, 工作水深在逐年增加, 抗风暴能力不断增强(如“Ram form Banff”号工作水深达 1 524 m, 抗风暴能力为百年一遇, 浪高可达 16.76 m); 原油储存能力增大, 船的主尺度和载重吨位提高; 原油、生产水的处理能力增强; 立管型式增多, 除大量使用挠性立管外, 也可采用刚性立管; 锚泊能力和动力配置能力增大, 动力定位技术也有了新的发展, 适应海况能力增强。FPSO 因其在整体技术上的完善和提高, 体现出优越的性能特点和较高的商业价值, 从其近年来的发展趋势来看, 在深海采油领域中, FPSO 正迎来其广泛应用的黄金时期, 它已成为浮式结构物中极具发展潜力的一种结构形式, 前景极为广阔。

Spar 的研究重点已转移到保持其运动性能而不增加主体与水线上部重量之比上。提出了一种复合概念——Truss Spar。Truss Spar 上部的圆柱箱体提供浮力, 12~ 16 根悬链线锚链保持位置, 圆柱箱体下面桁架结构提供纵向强度。Truss Spar 是一种典型的复合结构, 由于其重量轻、易移动和可重复使用的特点, 可用于深水的边际油田。

TLP 作为一种深海理想的平台型式得到了广泛的重视和发展, 主要表现在以下几个方面: 工作水深在逐年增加; 建造成本得到降低, 进一步提高了其经济性; 注重多次重复实用性, 对可移动性的研究取得了很大进展; 由单一的井口生产平台向深海工作站发展, 在所在地区形成一个以 TLP 为核心的油气开发群<sup>[9]</sup>。根据我国海上油田的分布特点, 100~ 500 m 左右中等水深范围是一个很有开发潜力的海域, 因此对浅海和中深水海域的浮式结构物的研究成为我国海洋工程的研究重点。针对边际油田和偏远油田, 李润培等提出了一种适应中深水海域的轻型张力腿平台 (mini TLP) 概念。这种平台的浮力舱置于水下, 浮力舱上竖立的空间刚架支撑着平台甲板及其上的设备, 浮力舱下端用四组钢管张力腿平台固定于海底, 张力腿与海底的连接用筒型基础(吸力锚)。对这种平台在 100~ 500 m 水深范围内的理论与试验研究表明: 这种平台有良好的运动性能, 完全能

满足海上油气开发对平台运动的要求 以 120 m 水深为例,其造价低于相应的导管架平台,随着水深的增加,其在造价上的优势更加明显 这种平台将是中深水边际油田开发的一种很有潜力的平台形式 由于 TLP 在整体技术上更加完善和提高,在今后的发展中向着更深、更广阔的水域进军,必将超出海洋油气开发的范畴而应用到更广泛的领域中<sup>[3]</sup>.

#### 4 结束语

在我国研制和开发浮式海洋结构物对本世纪海洋工程的可持续发展具有极为深远的战略意义 作为一个具有丰富海洋资源的大国,必须高度重视深海平台技术 随着我国海洋石油开发的需要,浮式海洋结构物的应用越来越广泛,所需解决的技术问题越来越多,在浮式海洋结构物的设计、建造、检验和科研方面都迫切需要发展,特别是在浮式结构物的设计和建造上,大多依靠国外技术进行设计,我国在独立进行设计方面尚有一定差距,对于工作水深超过 600~ 3 000 m 的动力定位采油平台,国内更无设计建造经验 因此,对于从事海洋工程的研究人员而言,应密切关注国外浮式海洋结构物的发展,开展相应的研究工作,并力争参与到国外浮式海洋结构物的设计建造中去,以逐步掌握国外先进的技术水平,这对我国未来

深海资源的开发和我国的海洋工程事业的发展都具有重要意义

#### 参考文献

- 1 Barltrop N D P. Floating structures: a guide for design and analysis: volume one Houston, U SA: the center for marine and petroleum technology publication, 1998 6~ 13
- 2 廖谟圣 国外移动式采油平台现状与发展我国采油平台的建议 中国海洋平台, 2000, 15(4): 1~ 4
- 3 杨春晖,董艳秋 深海张力腿平台发展概况及其趋势 中国海洋平台, 1997, 12(6): 255~ 258
- 4 李玉成 海洋工程技术的新发展 中国海洋平台, 1998, 13(1): 9~ 12
- 5 崔维成,吴有生,李润培 超大型浮式海洋结构物开发过程中需要解决的关键技术问题 海洋工程, 2000, 18(3): 1~ 3
- 6 Kitamura F, Sato H, Shimada K, et al Estimation of wind force acting on huge floating ocean structures Proceedings of the 1997 Oceans Conference, 1997. 197 ~ 202
- 7 乐京霞,孙海虹 浮式生产储油船局部节点疲劳强度计算与分析 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2002, 26(4): 488~ 491
- 8 Paulling J R, Tyagi S. Multimodule floating ocean structures Marine Structures, 1993(6): 187~ 205
- 9 段梦兰,李秀巧,赵秀菊等 发展张力腿平台迎接深水钻井的挑战 石油机械, 2000, 28(12): 46~ 48

## Research Condition and Developmental Tendency of the Floating Structures

Li Fen Zou Zaojian

(School of Transportation, WUT, Wuhan 430063)

#### Abstract

The development of the floating structures is of strategic significance to sustainable development in our country. In this paper, developmental history of the floating structures is introduced based on a literature survey conducted. Furthermore, the main structural type and characteristics of FPSO, Semi-submersible platform, TLP, Spar and VLFS are introduced. At last, the developmental tendency of the floating structures is proposed. It points out the urgency of developing floating structure in our country.

**Key words:** the floating structures; floating production, storage and offloading units; tension leg platform