

Truss Spar 平台简介

徐琦 (QI XU)

(International Association of Ocean Engineers (IAOE))

摘 要

Truss spar 平台是传统 spar 平台的一个变种, 如图 1 所示。它是一种深吃水圆柱结构。世界上第一座 spar 平台于 1996 年 8 月在 2000 英尺水深的墨西哥湾安装。第一座 Truss spar 平台, Kerr McGee (柯麦奇) Nansen and Boomvang, 于 2001 年安装于墨西哥湾。Spar 平台的最新进展是 BP 的 Holstein, Mad Dog 以及 Murphy 的 Front Runner。所有的已交付的或近期将要交付使用的 Truss spar 平台都在墨西哥湾。图 2 显示了由 CSO-Aker 已交付的或正在交付的 spar。其中最后一个称为多管式 spar 的是第三代 Truss spar 平台, 它已经被 Kerr Magee 的 Red Hawk 项目采用。本文将对 Truss spar 平台的技术进行简要介绍。

(一) Truss spar 平台的主要系统

spar 平台有下列四个主要系统组成: 顶部模块、体壳、系泊系统、立管(生产、钻探、输油等)。

下面对各部分分别介绍。

1. 顶部模块

这是一个多层桁架结构。它可以用来进行钻探、油井维修、产品处理或其它组合作业。用来支撑钻探设备和生产设备的生产钻探层及夹层(有时有)甲板与固定式平台的甲板很接近, 井口布置在中部。顶部模块由四或八根甲板桩腿支撑。

2. 体壳

一个圆柱状分舱式的浮式上部结构(硬舱)给各种设备提供浮力。下面一部分由空间桁架结构组成, 其间有若干层水平设置的平板, 这些平板在做垂荡时可以带动更多质量的水。在桁架的底部是软舱, 这是一种板式钢结构, 为从运输船上卸下平台和水平湿拖航提供浮力, 并提供放置固定压载物(磁铁矿, 在海上添加)的舱室。这种结构保证了平台在恶劣天气条件下垂荡运动很小。硬舱和软舱都设有矩形中心井口, 以便生产、钻探立管的通过。

在 Spar 体壳硬舱的底部装有数量可变的用于调整吃水和浮态的压载海水, 以便适应顶部模块载荷及其它载荷的较大变化。压载水是通过潜水泵(安装于泵箱并直通到体壳顶部)或离心泵(安装于体壳内设备井(Utility Shaft))调配的。一般来说, spar 的浮心在中心以上, 因此即使在破损情况或与系泊系统脱离的情况下它的稳定性也很好。

用于贮藏柴油机、原油、盐水、甲醇、饮用水等的容器通常建在 spar 体壳的顶部。

Spar 平台不仅压载系统简单, 而且机械系统也很简单, 这是一大特点。Truss spar 平台体壳内部没有或只有有限的机械空间, 设计时就消除掉在体壳上开口的必要(5 年一次的正常的定期结构检查

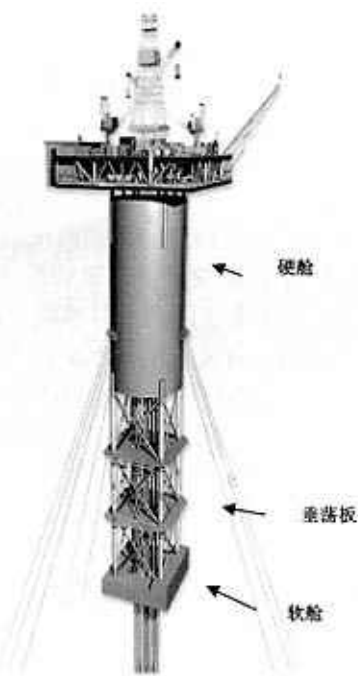


图 0 : Truss Spar

仍须考虑)。大部分的壳体内部设备,如压载泵、舱室监控器等,可以通过套管(通往体壳顶部)进行回收或修理,也可以通过设备井接近以便进行维护。

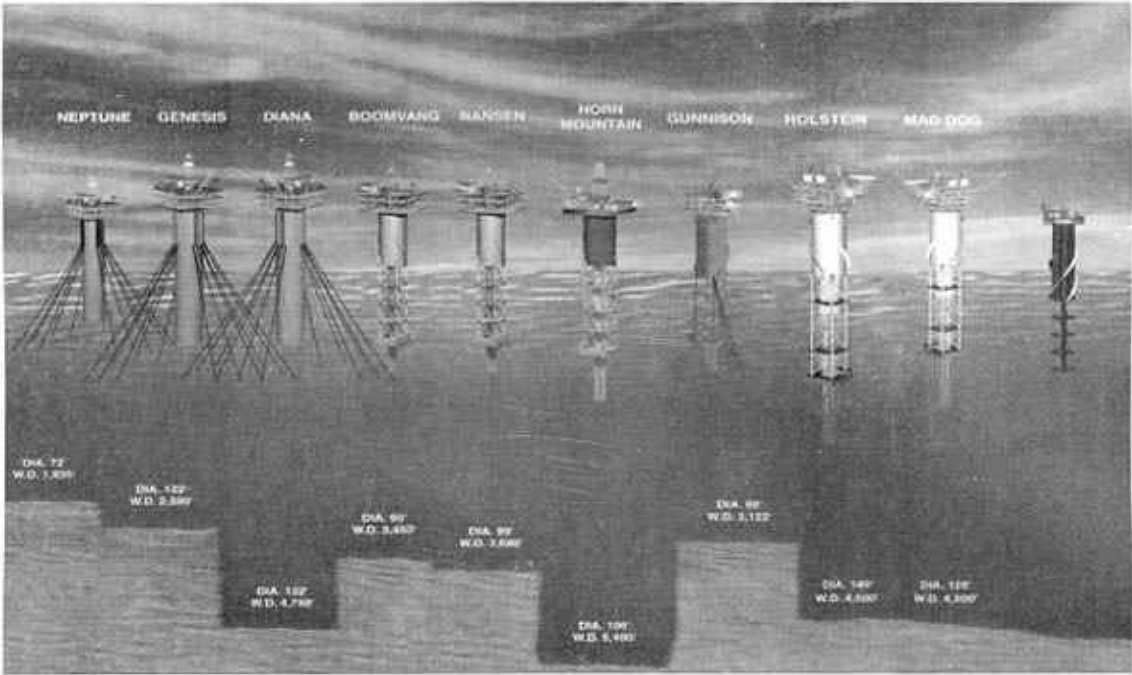


图 2: Spar 进展

3. 系泊系统

Spar 通过半张紧的钢悬索系泊系统来定位。系泊索包括海底桩链,锚链、钢缆和平台链组成。最近,在 BP 的 Mad Dog 项目中,聚酯系泊物(Polyester)已经得到了应用。这是首次在 spar 中应用聚酯系泊物。锚所承受的上拔载荷由打桩或负压法安装的桩锚来承担。导缆孔通常位于硬舱的下部。系泊结构不仅与载荷大小有关,还与水深有关。在最简单的情况下可应用 6 索散布系泊结构。对于 9 索或更多索的情况,采用组群式的结构更经济。在设计 spar 的系泊系统时,通常使其在一根系泊索断开的情况下可以抵御百年一遇恶劣海况。系泊索可以用起重驳船或锚作业船来安装。系泊系统可以预先安装好,在体壳就位后进行连接。

对深水应用来说, Spar 系泊系统远比 TLP 张力腿钢管束的造价低,因此 spar 的造价相对来说对水深是不敏感的。

4. 立管(生产、钻探、输油等)

(1) 生产立管

由于 spar 的垂荡运动很小,因此它可以支持顶端张紧立管(TTR)和集油树(dry trees),提供从表面进入的垂直井。带有集油树(dry trees)的生产立管与 TLP 和固定式平台的立管相似,但在三个方面不同。第一,由于每个立管通过自带的浮力罐提供张力支持,因此立管的轴向载荷与体壳运动解耦。同样道理,平台对水深也不是很敏感。第二,由于 spar 可以在系泊处自动移动,因此海底油井可以设置得更分散些。这样就使立管在 Spar 底部(keel)下面分散开,减小了由于体壳下部海流引起立管接触的风险。最后,要求有一种专门的 Spar 底部接头(keel joint),它可以允许 spar 和立管之间有相对运动。

浮力罐从接近水表面一直延伸到水下一定深度。在一些情况下,浮力罐超出硬舱底部。在中心井内部,由弹簧导向承座提供这些浮罐的横向支持。

(2) 钻探立管

与 TLP 的情况类似, Spar 上的钻探立管由一个液气式压力器提供支撑。在一些情况下, 在立管上附加些综合浮力模块以降低钻探立管的重量。

(3) 输出立管

Truss spar 平台概念上提供三种型式的输出立管: 钢悬链型、柔悬链型和顶部张紧型。

(4) 输送管线 (flowlines)

柔性海底管线既可以将碳氢化合物输送到附近的 FPSO 中 (如果只是将 spar 用于钻探和油井维修), 也可以将其他海底 tieback 油井的产出物输入。柔性海底管线 (包括柔性输出立管), 可以附着在 spar 的硬舱和软舱的外部, 也可以通过导向管拉进桁架内部, 继而进入到硬舱的中心井中。

(二) Spar 体壳的结构与制造

Spar 的硬舱和软舱主要是加筋板结构, 包括:

- 外壁及其上的纵加筋、纵桁和环向横梁,
- 中心井横舱壁及其上的纵加筋、纵桁和横梁,
- 径向横舱壁及其上的纵加筋、纵桁和横梁,
- 径向支柱 (可以是 I 字梁或管状梁),
- 甲板及其上的加筋和横梁,
- 其他结构, 如甲板腿连接结构、桁架连接结构、导缆孔底座等。

图 3 显示了典型的硬舱结构, 图 4 显示了在制造工厂中的 Nansen Spar 平台。

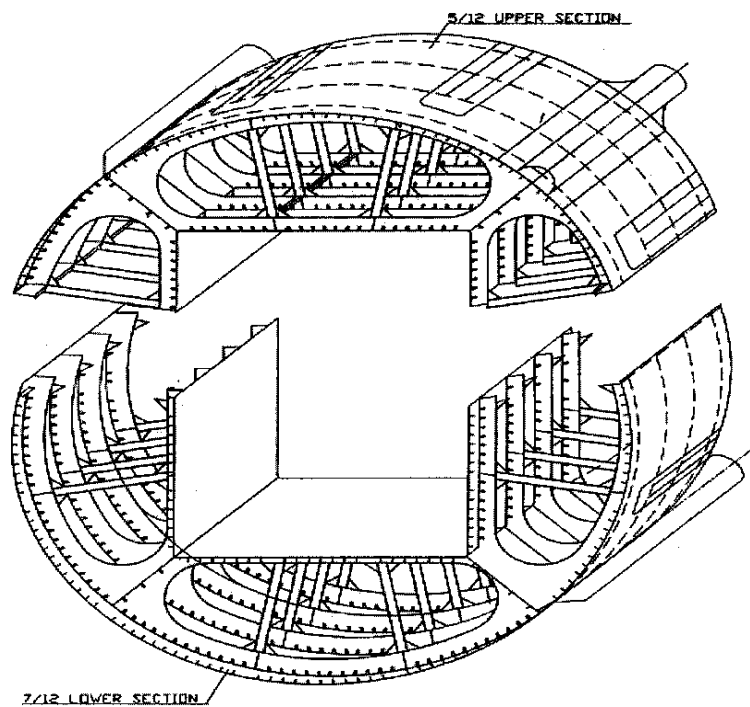


图 3: Spar 的硬舱结构

Spar 的桁架包括 4 个桁架腿, 它们通常是水密的。其中有有斜角撑杆、垂直撑杆和水平撑杆。2 或 3 个垂荡板支撑在桁架的水平撑杆上。垂荡板也是加筋板结构, 上面有允许立管通过的开孔。

在大多数情况下, spar 体壳是在水平位置进行整体制造并运输到安装地点的。BP 的 Holstein 项目在芬兰制造硬舱, 在美国制造桁架和软舱, 在拖航到安装地点之前, 将体壳的这两个部分装配连接起来。

(三) Spar 的安装

在大多数情况下, 制造厂都远离安装地点。安装的第一步是将 spar 的体壳从制造厂运输到安装或组装地点。Spar 的体壳通常是由一艘大型运输船(如 Dockwise 的 Mighty Servant 1)进行整体运输。图 5 显示的是 Mighty Servant 1 上的 spar 平台 Nansen 号, 它正被从 CSO-Aker 的芬兰工厂运往墨西哥湾。由于体壳是作为一个整体运输的, 因此其总长度受到运输船长度的限制。

Spar 的体壳通过给运输船注水来卸下。然后须在维持水平姿态的情况下进行湿拖航, 直至安装地点。在湿拖航过程中, 软舱和浮罐(软舱顶部的水密舱)提供保持 spar 水平状态的浮力。在安装地点, 将 spar 的软舱完全打开充水, 可变压载舱按一定次序充水, 就可以把 spar 竖立起来。这个过程称为“竖正”。将 Spar 竖立起来后, 再把系泊系统(全部或部分)安装上, 就可以使 spar 处于一种能抵御风暴的状态。下一步, 向软舱中添加固态压载物, 以便为接受通过海上提吊安装的顶层模块作准备。最后, 须将顶层模块和体壳结构起来, 然后交付使用。

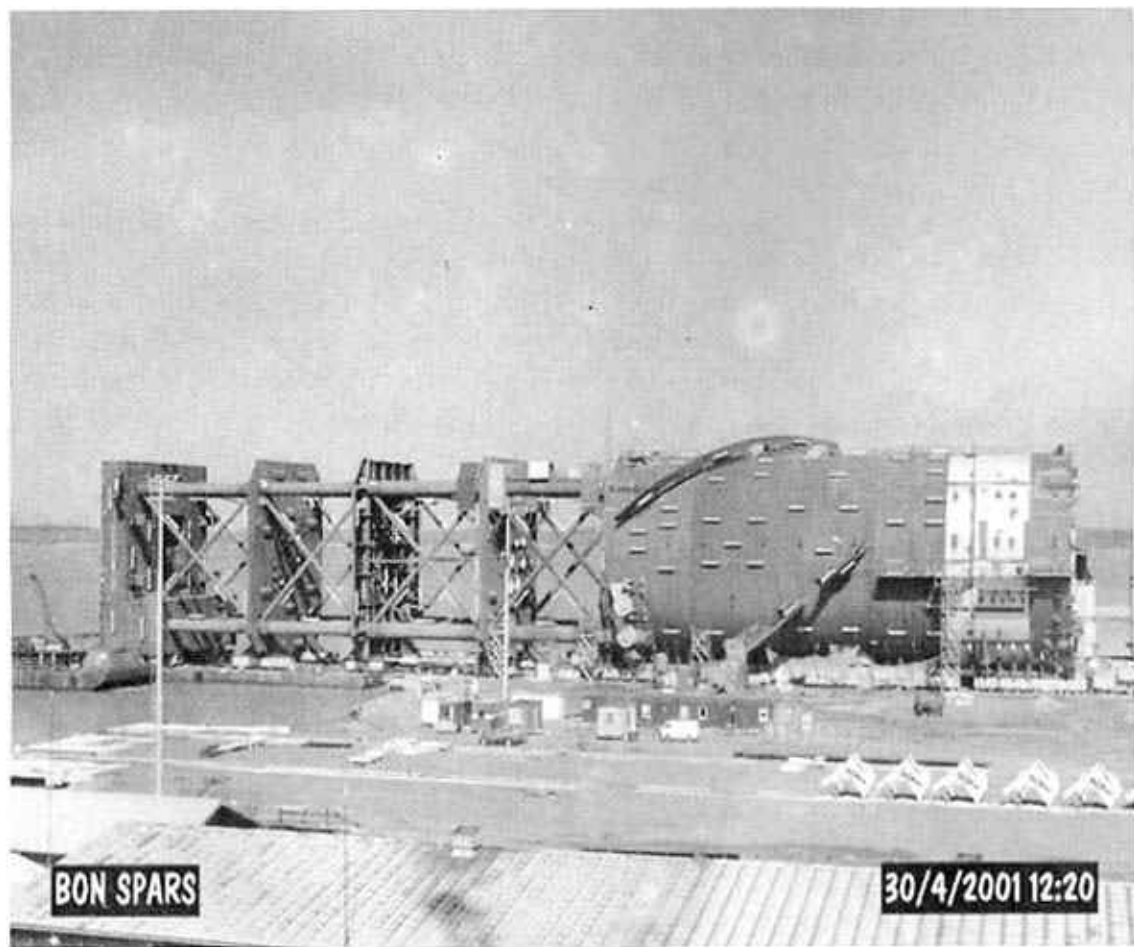


图 4: 制造厂中的 Spar 平台

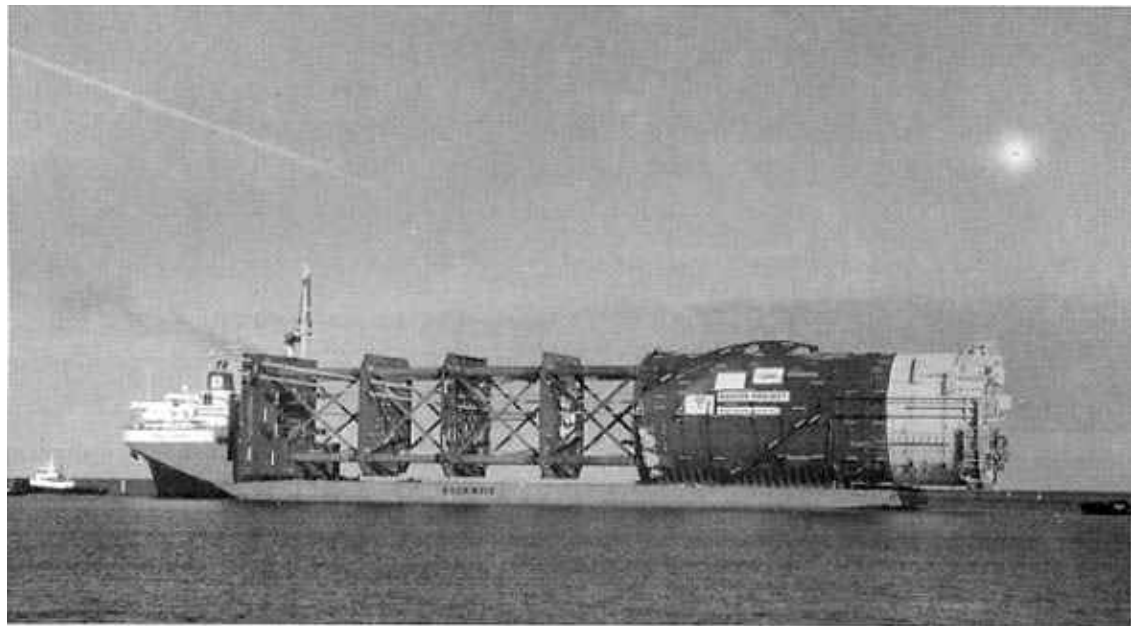


图 5: Mighty Servant 1 上的 Spar 平台 Nansen 号

(四) spar 的性能与 TLP 的比较

稳定性:

由于浮心和重心在垂直方向上是分开的, 因此 Spar 有着良好的漂浮稳性。与大多数其它平台 (包括 TLP) 不同, spar 的重心大大低于浮心, 即使横摇和纵摇到最大角度, 它也是个稳定系统。因为 spar 不是从系泊系统获得稳性, 所以即使系泊系统彻底失效, 它也不会倾斜或倾覆。它可以通过垂直拖拽重新定位, 无须移掉顶层模块 (甚至不需要移掉钻探设备)。在所有的安装阶段, spar 都是稳定的。

(五) 运动

1. 垂荡运动

Spar 的垂向刚度主要来自于它的水线面面积。系泊系统的垂向刚度与静水压力引起的刚度相比可以忽略不计。由于垂荡板的存在, Spar 的垂荡质量大; 同时, 其水线面面积相对小。因此, spar 的垂荡固有周期通常在 25~28 秒之间。墨西哥湾飓风引起的最大海浪的周期是 14 秒, 海浪周期与垂荡周期相差较大保证了 spar 即使在极端海况下垂荡运动也很小。在百年一遇的飓风、有义波高 40 英尺的情况下, Truss spar 平台的最大垂荡运动通常是 3 至 4 英尺。在西非, 多数海浪的周期为 18 秒。尽管此时海浪周期与 spar 的垂荡周期更接近些, 但由于垂荡板会产生大垂荡阻尼, 因此在这种环境下 spar 仍然有很好的运动性能。

对 TLP 来说, 由于张力腿钢筋束的约束作用, TLP 的垂荡刚度很大, 因此垂荡固有周期很小, 在 2~3 秒。因为海浪在这一范围内能量很小, TLP 基本上没有垂荡运动 (除了由水平运动引起的 set down)。

2. 纵荡/横荡

Spar 的半张紧系泊装置使其水平刚度比 TLP 大, 因此 spar 的位置漂移比较小。通常在设计 spar 时, 对于完整系泊状态, 要求漂移小于 4% 水深; 对于有损坏的系泊状态, 漂移小于 6% 水深。一般来说, 由于系泊系统不同, TLP 的水平位置漂移大于 spar。

3. 纵摇/横摇

Spar 的纵摇/横摇刚度由 GM 值（重心和稳心的距离）决定。对于 spar 的纵摇/横摇运动性能的要求通常来自于立管和顶层模块的设计。一般设计要求在百年一遇的风暴中，spar 的最大组合纵摇/横摇角小于 10 度。Spar 的纵摇/横摇固有周期在 50~80 秒之间。Spar 的体壳设计通常由对最大纵摇/横摇的要求决定。然而在西非，由于海况不恶劣，spar 纵摇/横摇较小，因此体壳设计通常由稳性要求决定。

对于 TLP 来说，与垂荡运动类似，由于张力腿提供了很大刚度，所以纵摇/横摇运动很小。TLP 纵摇/横摇的固有周期小于 4 秒。

4. 首摇

由于体壳是圆柱形的，所以 spar 通常受到很小的首摇激励力，首摇运动因此可以忽略不计。

5. 涡激振动

由于硬舱是圆柱形的，Spar 的裸露体壳在一定条件下会发生涡激振动。在硬舱表面安装螺旋形箍带可以有效地抑制涡激振动。箍带的高度通常在体壳直径的 10% 左右。然而在西非，可以不采用箍带。由于那里的海流不大，所以可以张紧系泊系统，将横向刚度增加到足够大，以避免涡激振动锁住现象的发生。

TLP 的浮筒上面不用装箍带，因为它不发生涡激振动。

（六）冗余度

设计要求 Spar 的体壳即使在极端破坏条件下也能保持稳定。在大多数情况下，采用组群式的系泊系统，通常每组包含 3 根或更多根系泊索。这样的组群式系泊系统提供了很好的冗余度。相对来说，若想使 TLP 的体壳和系泊系统具有相似的冗余度，花费会更大。

（七）操作性

Spar 的分散式系泊系统使它能直接移动到任意一个海底（采油树）油井处，而不需要借助其它中间设备和步骤来接近井口。如果将来要增加或移除立管，用同样方法，方便地改变系泊索的预张力就可以使 spar 中心定位在油井上。

体壳对立管的保护及体壳下部区域对立管的横向支撑使立管作业的天气窗口达到最大。这种对立管的保护和操作（立管在体壳内）也使立管与油井钻探机械的中心轴线自然保持吻合。于是，spar 可以通过系泊系统移位，这样既可以增加海底处的立管角度，又不会影响钻机底部的立管角度。

除此之外，spar 很小的横向运动允许有很长的正常钻探和生产时间。

（八）成本

Spar 的顶层模块相对 TLP 的来说更有效率，因为其甲板腿的间距较小。由于水深加大对 spar 平台的影响只是增加系泊系统的重量，而这对于 spar 来说只是很小一部分载荷，因此 spar 体壳对水深是不敏感的。然而对 TLP 来说，体壳成本对水深是敏感的。Spar 的系泊系统对水深也不像 TLP 的张力腿那么敏感。另一方面，由于通常需用重型起重船在海上安装 spar 的顶层模块，因此在一些情况下安装成本较高。最近，顶层模块的 float-over 技术正在发展，这是另一种效费比较好的海上安装方法。

对于水深 2000 英尺以下的情况，一般认为 TLP 更经济。若水深在 2000 英尺以上，spar 是一种有竞争力的方案。

An introduction of Truss Spar Platform

Qi Xu

Abatract

Truss Spar, as shown in Figure 1, is a variation of Classic Spar, which is a deepdraft cylindrical structure. The world first spar was installed in Gulf of Mexico in August 1996 in about 2000ft water. The first truss spars, Nansen and Boomvang of Kerr Magee, were installed in 2001 in Gulf of Mexico. The latest developments of spar are BP's Holstein and Mad Dog and Murphu's Front Runner. All the truss spars delibered so far or to be delivered in the near future are in Gulf of Mexico. Figure 2 shows which have been delivered or are being delivered by CSO-Aker. The last one, cell spar, is the third generation of truss spar, which has recently been adopted by Kerr Magee's Red Hawk Project. In the present paper, a brief description of the truss spar technology is given.

作者简介

徐琦 博士 现在 Technip 海洋工程公司任主管专家, 负责 Spar 等海洋平台的总体设计。他是国际海洋工程师协会的发起会员之一。
Email: gxu@iaoeonline.org。

Table 1: Summary of Spar – TLP Performance Comparison

	Spar	TLP
In-Place Stability	Very stable, does not rely on mooring system	Rely on its tendon system
Heave Motion	Small (~4ft in extreme sea states)	Smaller, mostly set down caused by surge/ sway
Surge/Sway Motions	Small (~6% water depth)	Relatively larger
Pitch/Roll	< 10 deg	Significantly smaller
Hull & Mooring Redundancy	Very good	Relatively less
Operability	Good	Some limitations
Competitiveness	Good for > 3000ft water	Good for < 3000ft water