

文章编号:1001-4500(2007)02-0009-05

Spar 平台垂荡板设计中的关键问题

高 鹏,柳存根

(上海交通大学,上海 200030)

摘 要: Spar 平台是一种适宜于深海石油的开采、生产、处理加工和储存的平台结构形式。垂荡板是影响 Truss Spar 和 Cell Spar 垂荡性能的关键构件。垂荡板的性能及设计已是国际 Spar 工程和研究的热点之一。介绍了影响 Spar 平台垂荡板性能的主要因素,以及典型的垂荡板结构和主要载荷。

关键词: Spar; 垂荡板; 性能; 结构; 载荷

中图分类号: P752

文献标识码: A

近年来,我国对石油的需求量急剧上升。随着陆地石油资源日渐枯竭,油气资源开发正在向海洋尤其是深海发展^[1]。目前适合深海油气开采的设备系统主要有 4 种,即张力腿平台(TLP)、半潜式平台、浮式生产储卸装置(FPSO)、Spar 平台。其中 Spar 平台凭借优良的运动性能、良好的灵活性,以及优异的经济性,赢得了广泛的关注,被各石油公司视为新一代的海洋石油开采平台。作为 Spar 平台的重要构件,垂荡板也成了国外海洋工程界的研究热点。

1 Spar 技术的演变和垂荡板的出现

人类应用 Spar 平台技术至今已经有超过 30 年历史。至今为止,共出现了 3 种形式的 Spar,分别为: Classic Spar(传统 Spar)、Truss Spar(桁架式 Spar)、Cell Spar(多柱式 Spar),如图 1、图 2、图 3 所示。



图 1 Classic Spar—DIANA

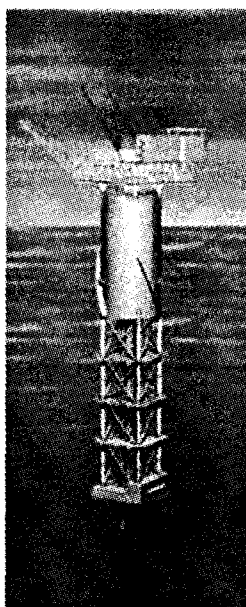


图 2 Truss Spar—CONSTITUTION



图 3 Cell Spar—RED HAWK

Classic Spar(传统 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,由 3 个部分构

收稿日期:2006-09-29

作者简介:高鹏(1982-),男,硕士生,主要从事船舶与海洋结构物设计制造研究。

基金项目:上海市科委重大基础课题研究项目(05DJ14001)

成,从上至下依次为硬舱、中段和软舱^[2]。

Classic Spar 中段很长,半径也大,建造时需要消耗大量钢材,减少了平台的有效载荷,而其主要作用仅仅只是控制结构载荷及保护立管,经济性较差。为了克服这些缺点,人们设计出了新型的 Truss Spar。Truss Spar 的主要特点是中段为 X 型空间梁桁架结构,与传统的导管架相似。用桁架代替中段的圆柱可降低钢材重量,这对于像 Spar 这样的浮式平台是极其重要的。另外,这种结构可显著地减少海流载荷,降低系泊张力。但是,这种桁架结构水平截面小,不能提供足够的垂荡附加质量和阻尼。为了弥补这个缺陷,Truss Spar 上首次采用了垂荡板结构。

Classic Spar 和 Truss Spar 的主体部分都包含大直径的圆柱体,建造难度较大。为了降低建造难度,缩短建造周期,人们设计出了一种新型 Spar——Cell Spar。这种新型 Spar 平台的壳体由一束直径较小的圆柱体组成,称为 Cell,通过处在它们空隙间的很多水平的和垂直的结构单元连接起来。与 Truss Spar 类似,Cell Spar 上也设计了垂荡板结构。

除了现有的这 3 种 Spar 平台形式,研究人员还提出了一些新的形式。上海交通大学海洋工程国家重点实验室与美国 Novellent LLC 公司合作设计了一种八角形的几何形 Spar 平台^{[7][8]},实验证明其运动性能优良。此外,上海交通大学海洋工程国家重点实验室的张帆等^[6]结合 Truss Spar 和 Cell Spar 的优点,设计出了一种硬舱类似于 Cell Spar、中段类似 Truss Spar 的 Cell Truss Spar,并通过实验验证了其性能。

2 Spar 平台垂荡板概述

2.1 Spar 平台的运动性能与垂荡板

Spar 平台通常配备刚性立管,立管和其他一些生产设备对平台的垂荡运动性能要求很严格。为了避免平台与波浪产生共振,使平台拥有良好的运动性能,通常要使平台的垂荡运动固有周期远大于波浪周期。

增加 Spar 垂荡固有周期的方法通常有两种:(1)增加结构吃水;(2)增加结构质量和附加质量。为了获得更多的有效载荷,Spar 平台通常都要减少结构本身的质量,所以通常采用增加结构吃水和附加质量的方法来增大 Spar 垂荡固有周期。^[3]

对于 Classic Spar 这样的规则圆柱体,其垂荡周期的简化计算公式为^[4]

$$T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{hC_m}{g}} \quad (1)$$

式中 h 为 Spar 吃水, C_m 是惯性系数。

从式(1)可看出,Spar 吃水越深,其垂荡周期就越大,所以现有的 Classic Spar 都依靠大吃水来获得较大的垂荡固有周期。其吃水均为 198m,垂荡周期为 25s 左右,并且全部安装在波浪周期较小的墨西哥湾。但是在波浪周期较大的海域,比如在西非海域(其波浪周期在 20s 以上),这样的主体长度仍然不能满足要求,继续增加长度,将会使造价急剧上升,经济性变差。为了改善 Classic Spar 垂荡运动性能,有些学者在理论及实验研究中提出在 Classic Spar 主体底部增加圆形的垂荡板^{[4][5]},取得了良好的效果,但是这种设计在实际平台上并未被采用过。

发展到 Truss Spar 及 Cell Spar 时,主要依靠垂荡板来增大 Spar 的垂荡固有周期。垂荡板使 Spar 获得了很大的运动附加质量。垂荡板的出现,改变了 Classic Spar 必须依靠大吃水才能保证较大的垂荡固有周期,使得 Spar 平台在满足运动性能要求的同时,可以减少吃水,从而使得主体长度也相应得到缩短(最短的 Truss Spar 长仅 166m,比 Classic Spar(长 215m)缩短了近 50m),平台的建造成本得到了大幅度的降低,经济性显著提高。

2.2 垂荡板性能的影响因素

垂荡板的主要作用是增大 Spar 垂荡运动的固有周期,减小垂荡运动的剧烈程度。

影响垂荡板性能的主要因素为:(1)垂荡板数目及间距;(2)板厚及骨材尺寸;(3)板的尺度及开口。

2.2.1 板数目及间距的影响

垂荡板的板数增多,则板间距变小。由于各板相互间存在遮蔽作用,使得垂荡板总体附加质量的增长速度低于板数的增长速度,所以随着板数增多,平均到每一块板上的附加质量反而会变少。也就是说,单纯的增加垂荡板的数目,其效率会有所降低。

从 Prislín^[9]的实验中说明了垂荡板的板数和板间距的影响:当各板的间隔足够大时(即形状比 $H/L > 1.5$,其中 H 为板间距, L 为板宽),每块板上的附加质量几乎不怎么变化,跟单块板时几乎相同;但是从结构设计的角度来讲,通常桁架中的 X 型支柱与水平方向的角度大约为 45° (见图 4),因此,垂荡板间距 H 与立腿间距相等,其典型值为 $0.707D$ (D 为 Spar 直径),板宽则通常扩展到与 Spar 直径相同,即 $L = D$,则典型的形状比 $H/L = 0.70 \sim 0.75$,此时,每块板的附加质量为单板时的 $85\% \sim 95\%$ 。也就是说,从附加质量的角度来讲,垂荡板的效率是 90% 左右。可见板间距缩小会使其效率下降。但对于阻力来说,板间距的影响是不显著的。

Ji Heng—Teng^[10]通过实验发现,当板间距 H 大于 1.5 倍板宽 L 时,阻尼系数 C_d 达到最大,而附加质量系数 C_m 在 $1.0L$ 时已经达到最大。当 $H = 1.5L$ 时,每块板上的 C_d 和 C_m 均与单块板时几乎相同。

2.2.2 板厚及骨材尺寸的影响

阻力是由板的薄边处的漩涡脱落产生的,这是最主要的垂荡阻尼。

当板较薄的时候,垂荡运动中板的上下边缘处出现的漩涡会产生强烈的相互作用,致使漩涡脱落加强,从而使得阻尼增大。Krish^[4]用数值方法研究了板厚对阻尼的影响,研究了两种板厚($t = 0.475\text{m}$ (约 1.56ft)和 $t = 3.048\text{m}$ (10ft)),发现后者的阻尼只是前者的大约 $1/4$ 。研究还发现,漩涡之间的相互作用是非线性的。

当板厚过大时,阻尼效果将会显著降低。Troesch^[11]数值计算与模型试验得出结论,认为当板厚超过宽度的 $1/50$ 时,阻尼效果将会显著降低。这里的“厚度”包括板边缘处骨材的高度。因此,限制板边缘处的厚度和骨材高度或者将骨材从板边缘内移都是有利的。

另外,在垂荡运动中,板上的加强材也会使总的阻尼增大。

2.2.3 垂荡板尺度及开孔的影响

在实际应用中,垂荡板上有中央井开孔、立腿开孔和立管开孔等各种开孔,这些都将对垂荡板的附加质量和阻尼效果产生影响。在垂荡板上开孔,将会使板与水接触的周长增加,从而产生了更多的漩涡脱落,使得阻尼效果增加。但是开孔板所带动的水比实心板要少,也就是说提供的附加质量会减少,所以使用开孔垂荡板有可能会使 Spar 的垂荡固有周期比使用实心板时减小。

Downie^[12]对垂荡板的尺度及板上的开口对性能的影响进行了试验研究。他们在一座 Truss Spar 平台模型上分别安装了 4 种类型的水平垂荡板,分别是大尺度打孔板、小尺度打孔板、大尺度实心板和小尺度实心板,其中大尺度板的边沿延伸到桁架式主体之外,而小尺度板则没有。结果发现,在实验模拟的大多数情况下,安装大尺度实心板的模型垂荡运动幅值小于安装小尺度打孔板的模型,因为前者的附加质量更大、运动固有周期更低。此外,大尺度板不但可以提高附加质量,能够减小涡激振动,而且打孔板的效果要好于实心板。但是限于实验所能模拟的环境条件很有限,所以并不能由此断定垂荡板类型的优劣。

Krish^[4]的数值研究也发现,随着垂荡板尺度增大,垂荡阻尼也呈线性增大。

张帆^[6]用实验的方法研究了垂荡板在 Cell Truss Spar 平台上的作用效果。实验测试了不同的垂荡板数目和开孔面积及孔径对垂荡板效果的影响,给出了平台对波浪载荷的响应,及垂荡板上的载荷、附加质量与阻尼系数的试验结果和数值预报。认为使用 5 块垂荡板已经可以满足需要。另外,垂荡板阻尼随板上开孔面积的大小而先增后减,当开孔面积达到 5.4% 时,阻尼效果最佳。为了获得较大的开孔边界周长,孔径

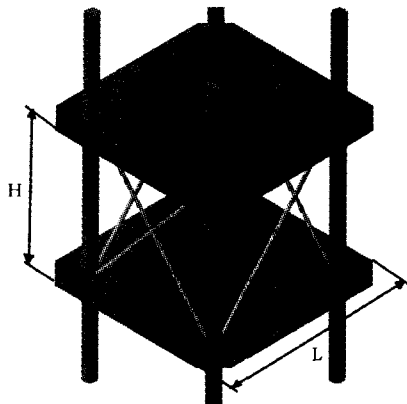


图4 垂荡板在 Truss Spar 平台上的位置

应当尽量小。

一般来说,选用尺度尽可能大的垂荡板将会获得较好的垂荡效果,而开孔对垂荡性能既有正面作用,又有负面影响。如何才能使得开孔取得最好的效果,仍然需要进行更多的试验和研究。

2.3 垂荡板结构设计与校核

2.3.1 垂荡板的典型结构形式

从结构上来说,垂荡板是几块有加强材的平板结构,由撑杆支撑,详见图 5 所示。骨材用撑杆支撑,形成了一个双向框架。设计板和加强材时主要考虑结构强度要求。梁跨距是由加强材间距来确定。一个优化设计结果显示,加强材间距应该选取 0.6~0.9m,而梁跨距不可超过 4.5~6.0m。

为了减少撑杆的弯曲应力,增加了斜撑和垂直立柱。斜撑把水平撑杆之间的横向撑杆分成 3 段,斜撑的另一端则支撑在桁架立腿上。垂直立杆连接在水平撑杆的中点上,以减小其弯曲,其另一端则连在桁架的 X 型连接处。垂荡板的角部被切除掉,这样做的目的是为了减小悬臂梁的长度。

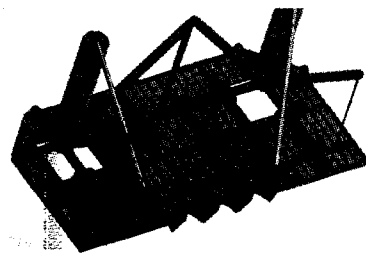


图 5 典型的垂荡板结构

垂荡板为桁架提供了平面内加强,从而减少了支柱的数量。

以撑杆组成的框架为立管、沉箱等提供侧向支撑,这种方式比常规的水平框架要简单的多。而且,垂荡板有很大的强度储备,很适合做装配和运输的支撑构件,无需再建造其他的支撑桁架。

2.3.2 垂荡板载荷

Spar 主体通常是在岸上装配好,再水平拖运到工作地点,然后自行竖立(upending)并安装。拖运有干拖和湿拖两种方式,干拖是指使用驳轮拖运 Spar 主体,湿拖是指 Spar 主体依靠自身浮力漂浮,并用拖轮拖运。由于干拖受到驳轮承载能力的限制,所以应用不如湿拖多。在湿拖过程中,垂荡板约有 1/3 浸没在水中,垂荡板上载荷分布情况与就位状态时明显不同。所以,对垂荡板进行载荷分析时,主要考虑两种状态:(1)就位状态,即 Spar 平台在设计位置安装完成后的状态;(2)湿拖状态。

此外,桁架的总体剪切变形会引起垂荡板的变形,产生应力。在垂荡板上某些位置,总体变形引起的应力可以达到总应力的 50% 左右,所以必须加以考虑。常用的分析方法是在垂荡板局部有限元模型上给桁架立腿加一个位移,然后将分析的结果叠加在前面分析的结果上。

3 结束语

深海采油技术正在受到人们越来越多的关注,Spar 平台凭借其优良的运动性能和相对低廉的造价而被人们寄予了厚望。作为新型 Truss Spar 和 Cell Spar 的关键构件,垂荡板也成为了人们研究的热点之一。其性能及结构方面的研究在我国目前尚处于几乎空白的状态,加强这方面的研究是发展我国海洋工程技术的迫切需求。因此,建议今后需要做的工作主要是:

(1)学习吸收国外的设计经验和研究成果,开展垂荡板性能研究,设计出合理的垂荡板形状、开孔及尺寸,使其能够有效地改善 Spar 平台的运动性能;

(2)开展垂荡板结构设计研究,应使其结构满足就位状态和湿拖状态的强度要求,以及结构整体变形所引起的应力的要求。

参考文献

- [1] 中国石油网, <http://www.oilnews.com.cn/>
- [2] 董艳秋. 海采油平台波浪载荷及响应[M]. 天津:天津大学出版社, 2005.
- [3] 张帆, 杨建民, 李润培. Spar 平台的发展趋势及关键技术[J]. 中国海洋平台, 2005, (2): 6-11
- [4] Thiagarajan Krish P. Influence of heave plate geometry on the heave response of classic spars[C]. Proceeding of OMAE'02 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2002: 621-627.

