

2000, 15(4)

文章编号:1001-4500(2000)04-0001-06

①
1-10

国外移动式采油平台现状 与发展我国采油平台的建议

廖谟圣

(上海石油天然气总公司, 上海 200041)

TE9.52.01

摘 要:对国内外海上移动采油平台发展现状、水平和差距作了阐述,并提出了发展我国海上移动式采油平台的建议。

关键词:采油平台;发展;建议

中图分类号:TE93

文献标识码:C

海上油气田,
移动式,

鉴于海洋采油向深水域发展这一较长时间发展的必然趋势,固定式采油平台工作水深超过 100m 之后,造价越来越昂贵,其允许经济极限工作水深大约小于 450m。发展移动式、特别是浮式采油平台显得特别重要;某些边际油田的开发,需要发展移动式采油平台,以节省建造昂贵的固定式采油平台的投资,使之能重复使用,从而介决了开采边际油田的经济性与可行性,这也是世界上移动式采油平台能得到迅速发展的重要原因。

世界上移动式生产(采油)平台发展的主要类型有四类,即浮(船)式生产储油卸油系统,半潜式生产系统,张力腿生产系统和自升式生产系统。这四类生产系统除其本身主体(浮船式、半潜式、自升式及其结构内的生产分离处理、动力、锚泊、储存等)外,还有海底完井或水面完井系统(导管架井口平台)等。

目前全世界共有移动式海上采油装置 125

艘,其中浮(船)式生产储油卸油装置共 67 艘,占总数的 53.6%;半潜式生产平台有 33 艘(含张力腿平台 4 艘),占总数的 30.4%;其次是自升式平台,共有 20 艘,占 16%。

1 国外移动式采油平台现状

1.1 浮(船)式生产储油卸油装置

浮(船)式生产储油卸油装置(Floating production Storage and offload system, FPSO) 至目前为止,全世界建成和在建(将于 2001 年前完工)的共有 67 艘。其主要特点为浮船型(尚不包括浮式储油卸油装置,即 Floating storage offload,简称 FSO 或 FSU),机动性和运移性好;具有适应深水采油(与海底完井系统组合)的能力;具有在深水域中较大的抗风浪能力;具有大产量的油、气、水生产处理能力和大的原油储存能力。FPSO 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,但更主要的是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。图为 FPSO 与海底完井系统、挠性立管典型组合示意图。

收稿日期:2000-02-17 修改稿日期:2000-07-05

作者简介:廖谟圣(1938—),男,高级工程师。

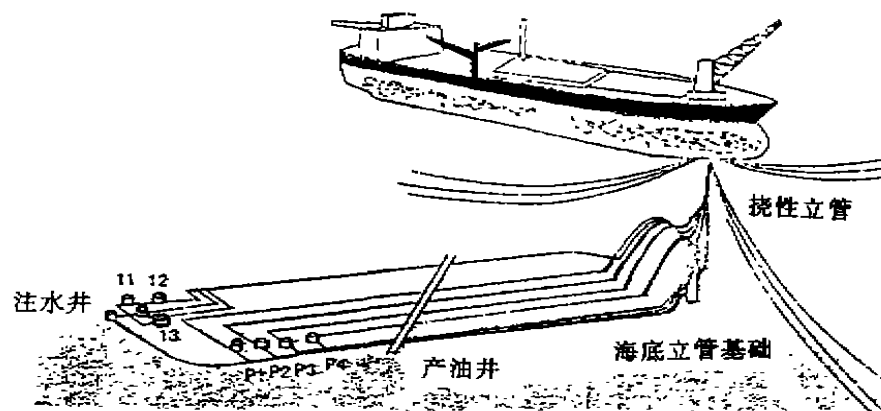


图:FPSO 与海底生产井组成示意图

其主要发展特点和趋势是:

(1) 工作水深逐年增加、抗风暴能力增强。

从被统计的 67 艘浮(船)式生产储油卸油装置可知,工作水深小于 100m 为 24 艘,占 35.8%;工作水深 100~500m 者最多,为 25 艘,占 37.3%;工作水深 >500~1000m 者为 7 艘,占 10.5%;工作水深在 1000m 以上为 3 艘,占 4.5%;其余 8 艘尚不明工作水深,占 11.9%。可见其工作水深主要在 100~500m,但随着采油工作水深的增加,大于 500m 工作水深者在逐年增加。目前,由 Roar Ramde 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并接近完工的“Ramform Banff”号 FPSO,工作水深达 1524m。该 FPSO 属英国所有,由 Conoco 公司作为操作者,计划用于北海的 Banff/kyle 深水油田,其抗风浪能力为百年一遇,浪高可达 16.76m。另一艘目前在新建而尚未完工的、属英国所有的 FPSO,工作水深达 2000m,堪称目前世界上顶级采油水深的浮(船)式生产储油卸油船,由 Harland & Wolff 全部负责设计和建造,由巴西国家石油公司(Petrobras)承担操作者,用于与深海海底完井系统相组合的采油。

以上 FPSO 的适应风暴大都为 50 年或 100 年一遇者,有相当数量属于非解脱型(即在大风暴来临时,仍然锚泊在采油原位而勿须将船用液压连接/脱卸机构快速解脱而避风浪)。

(2) 原油储存能力增大,船的主尺度和载重吨位提高。在 67 艘 FPSO 中,除 4 艘船的储存能力不明外,其他 63 艘 FPSO 中,储存能力小于 10 万 m^3 者共 25 艘,占 39.7%;10 万~20 万 m^3 储存能力者有 26 艘,占 41.3%;>20 万~30 万 m^3 者 5 艘,占 7.9%;>30 万 m^3 ,而达 31.8 万 m^3 者共 7 艘,占 11.1%。可见 FPSO 的原油储存能力在 10 万~20 万 m^3 之间占了大多数,新建造的 7 艘 FPSO,如巴西国家石油公司(Petrobras)新建或改建的“巴油 37”、“巴油 33”、“巴油 31”、“巴油 35”、“巴油 38”和“FPSO6”、“N'kossaNKP”,其储存能力均达 31.8 万 m^3 ,堪称世界上最大级,其最大载重吨位达 28.5 万 t,船的主尺度为长 344.2m,宽 54.3m,型深 28.3m,最大吃水深度 22m。

(3) 原油、生产水的处理能力增强。

从现有 67 艘 FPSO 中,已知原油日处理能力者共 61 艘,其中日处理能力 $\leq 5000m^3$ 者共有 15 艘,占 24.6%;日处理能力 5000~10000 m^3 者共 25 艘,占 41.0%,日处理能力 10000~20000 m^3 者共 13 艘,占 21.3%;>20000 m^3 者共 8 艘,占 13.1%。从上述统计可见,日处理能力 5000~10000 m^3 者占了近半数。但随着大型油气田的开发,日处理能力超过 3 万 m^3 者全球已有两艘,其中由新加坡远东利文斯顿船厂建造,由挪威国家石油公司所有并操作使用的“NORNE”号 FPSO,日处理能力达

3.5 万 m^3 (220000 桶), 生产水的处理能力也较大, 为 $19900\text{m}^3/\text{d}$, 注水能力高达 $40000\text{m}^3/\text{d}$ 。另一艘英国的“碧水号 (Bluewater)” FPSO 的生产水处理能力高达 $30000\text{m}^3/\text{d}$, 注水能力也达 $11180\text{m}^3/\text{d}$ 。

(4) 新增加了天然气的处理和转换成压缩天然气外输的能力。

鉴于过去海上 FPSO 生产的原油主要用穿梭油船外输, 油田中生产的天然气在不值得铺设海底管线的情况下, 只能将价值昂贵的天然气经分离后通过 FPSO 的火炬将其烧掉。但从目前 67 艘 FPSO 中, 已知具有天然气处理能力者共 51 艘, 其中具有压缩天然气能力者共 24 艘 (不包括向井内注气者), 占 47%。这是一项十分重要的技术经济举措, 因为它可以将天然气压缩 (简称 CNG) 后用罐装船舶外输或用海底管线输送, 将宝贵的油田中同时生产的天然气和油中的伴生气能源加以利用, 这实在是利用能源、增加油田经济效益不可忽视的举措。在上述 24 艘具有 CNG 能力的 FPSO 中, CNG 能力 ≤ 50 万 m^3/d 者共 6 艘, 占 25.0%; CNG 能力 50 万 ~ 100 万 m^3/d 者共 4 艘, 占 16.7%; CNG 能力 100 万 ~ 200 万 m^3/d 者共 6 艘, 占 25.0%; CNG 能力 200 万 ~ 400 万 m^3/d 者共 3 艘, 占 12.5%; CNG 能力 400 万 ~ 800 万 m^3/d 者共 3 艘, 占 12.5%; CNG 能力 > 800 万 m^3/d 者共 2 艘, 占 8.3%, 分别是刚果的“N'kossa NKP”号 FPSO, 其 CNG 能力达 850 万 m^3/d , 另一艘属挪威国家石油公司并在建造中的“Asgard A”号 FPSO, 其 CNG 能力高达 1500 万 m^3/d , 算是当今 FPSO 中 CNG 日产能力的顶级。

(5) FPSO 的立管型式增多

立管主要为挠性立管, 也有少数是刚性立管。但挠性立管近来着重发展多用途、多通道、不同尺寸的立管。包括采油立管、采水立管、注水立管、注气立管、气举立管、动力输送立管、信号控制立管、外输油/输气立管等。立管的工作压力高达 17.24MPa 或更高, 立管的数量也比

过去增多, 如奥地利的“Northern Endeavour” FPSO 和 Mobil 公司的“Zafiro Producer”号分别各有 18 根挠性立管, 澳大利亚的“Challis Venture”号 FPSO 有 9 根 6in 挠性生产立管、1 根 2in 气举立管和 1 根 6in 注水立管, 意大利的“Firenze”号 FPSO 有 2 根 6in 生产立管、2 根 0.5in 气举立管和 2 根 0.5in 控制立管, 这些立管均在旋转接头内。

(6) 锚泊能力和动力配置能力也增大, 动力定位技术等均有新的发展, 适应海况能力增强。

FPSO 的系泊多为转塔式多点辐射状系泊, 进一步在艏艉配备了多个侧向推进器, 发展了第三代动力定位技术 (DP-3)。多点系泊多采用锚链和钢缆相组合, 也有采用高耐腐蚀的高强度聚酯纤维与锚链相组合的方式。锚多采用大抓力锚, 也有采用打桩方式。系泊系统有采用液压快速脱卸和连接的形式, 但大多为非解脱式。FPSO 适应海况条件的能力增强, 大多设计和装备了一百年一遇海况条件的装备, 适应风暴浪高高达 16.8m 甚至更高 (北海地区), 适应最高风速超过 100kn (约 53m/s) 或更高 (如由法国建造的“Tazerka”号 FPSO 适应风速 102kn, 浪高 18.3m)。在 FPSO 上配备了强大动力, 以适应大尺度船体在强风暴下采用侧推螺旋桨以船艏对准风浪流的主方向并适应大尺度船自航快速推进 (推进速度可高达 16kn 甚至更高), 以及适应 FPSO 上大量原油、天然气分离处理和 CNG、注水、注气所需大功率的能力, 最高配备功率超过 8 万 kW。为节省海上动力所需的燃油消耗, 大多采用双燃料 (柴油和天然气) 为动力, 并主要依靠 FPSO 生产的天然气作为燃气透平发电机的燃料 (如“Norne”号 FPSO 采用燃气透平发电, 发电功率达 8.4 万 kW, 以适应驱动 4 个各为 2800kW 的推进器、驱动日压缩 665 万 m^3 的天然气、日注水 4 万 m^3 和日处理 35000 m^3 原油、19900 m^3 水以及 708 万 m^3 天然气的能力)。

1.2 半潜式生产平台与张力腿生产平台

半潜式生产平台具有钻井、修井能力和适

应多海底井和卫星井的采油,具有宽阔的甲板空间,具有适应深水采油的能力,其发展仅次于FPSO。现将其近期发展简述如下:

(1) 半潜式生产平台是在半潜式钻井平台基础上增加平台的油、气、水生产处理装置以及相适应的立管系统、动力系统、辅助生产系统及生产控制中心等,故其平台的设计、制造兼有目前第五代半潜平台技术发展的特点。

(2) 半潜式生产平台的工作水深向深水发展,其抗风能力增强,相应的深水锚泊能力也增强。在目前世界上38艘半潜式生产平台已知其工作水深的35艘中,工作水深 $\leq 200\text{m}$ 者共9艘占25.7%;工作水深 $200\sim 500\text{m}$ 者15艘,占42.9%;工作水深 $500\sim 1000\text{m}$ 者共9艘,占25.7%;工作水深 $\geq 1000\text{m}$ 者共2艘,占5.7%。从上述可见,工作水深最浅为118m,工作水深 $200\sim 500\text{m}$ 者占的比率接近半数。随着深水采油的需要,两艘最深水域采油的半潜平台均属巴西国家石油公司所拥有,其一是“巴油18”号工作水深达1000m,抗风能力可适应风速为99kn,浪高 $\leq 32\text{m}$,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,工作水深高达1372m,是目前世界上半潜式生产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组合。

从半潜式生产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 $100\sim 120\text{kn}$,个别最低者均在85kn以上,适应浪高普遍为 $16\sim 32\text{m}$,个别最低的也在12m以上。

(3) 半潜式生产平台配备了具有相适应的、强钻井能力的钻机。半潜式生产平台由于是从半潜式钻井平台发展而来,因此,它是既可钻井、也可以修井,这是优于FPSO的主要方面,一般半潜式生产平台均配备至少钻深能力为6000m的钻机,根据采油深度的增加(含工作水深和油藏深度的增加),大多配备钻深能力为7200~9144m的钻机。

(4) 半潜式生产平台的油、气、水处理能力增强,平台的主尺度也相应增加。在已知具有原油处理数据的34艘平台中,日生产处理原油能力 $\leq 5000\text{m}^3$ 者共8艘,占23.5%;日生产处理原油能力 $5000\sim 10000\text{m}^3$ 者13艘,占38.2%;日生产处理原油能力 $10000\sim 20000\text{m}^3$ 者7艘,占20.6%; $>20000\text{m}^3/\text{d}$ 者6艘,占17.7%。由此可见,其平台生产处理原油能力在 5000m^3 以上占大多数,为76.5%,超过 $10000\text{m}^3/\text{d}$ 者也占38.3%。目前,半潜式生产平台生产处理原油能力最高者为“巴油36”号,其日生产处理原油能力高达2.86万 m^3 。半潜式生产平台的天然气处理能力大约在20万~1000万 m^3/d 左右。在上述34艘半潜平台中,有31艘有天然气的生产处理能力,其中18艘半潜式生产平台具有压缩天然气(即CNG)数据,其中CNG能力 ≤ 50 万 m^3/d 者有4艘,占22.2%;CNG能力 50 万~ 100 万 m^3/d 者有4艘,占22.2%; 100 万~ 200 万 m^3/d 者为3艘,占16.7%; 200 万~ 400 万 m^3/d 者为2艘,400万~800万 m^3/d 者亦为2艘,各占11.1%; >800 万 m^3/d 者共3艘,占16.7%。其中,挪威新建造的“P-45FEPU”半潜式生产平台CNG能力高达999万 m^3/d 。可见,半潜式生产平台增加了一项重要的生产项目,那就是CNG,而且其CNG量也是非常可观的。

(5) 半潜式生产平台的立管为适应多海底井的采油而类型各异,数量增多。半潜式生产平台的重要特点之一是可能适应数量众多的海底井的采油,如“巴油18号”和“巴油19号”半潜平台的海底井分别多达27口和19口,故相适应的立管类型包括采油、采气、注水、注气、气举、动力、控制等多种类型,其数量也多达数十根,且多为挠性立管。

(6) 半潜式生产平台所配套的动力也明显增大。由于半潜式生产平台主要适应多口海底井和较大范围内卫星井的采油,适应平台大产量油、气、水的分离处理,适应压缩天然气、注水、注气和平台深水动力定位等需要,平台配备

的功率从20世纪80年代末90年代初的5000kW左右,而今通常均超过5000kW,大都为6000~10000kW,有的甚至更高,如“巴油36号”和英国的“Balmoral号”平台分别配备的功率高达45800kW和48000kW。

(7) 张力腿平台发展的主要特点。

从被统计的5艘张力腿平台可见当前张力腿平台发展的主要特点如下:

① 张力腿平台(以下简称TLP)的工作水深目前大都在300~350m之间,由于更深水域的张力索的制造、安装难度增大,可能由于经济性限制了向更深水域的发展。

② TLP适应多海底井的采油,其立管类型和数量增多。如“Troll B号”TLP具有22口生产井和一口注水井,“Visund FPS号”TLP有13口生产井和8口注水井,具有挠性立管38根。

③ TLP适应了大产量油气田的生产处理能力,其相应的主尺度也增大。如“Troll B号”TLP其日生产处理原油高达42500m³、水50000m³、天然气800万m³。“Visund FPS号”TLP除具有原油16000m³/d、水11925m³/d、天然气1000万m³/d的处理能力外,还具有注水18000m³/d和压缩天然气1000万m³/d的能力,其平台的主尺度分别为101.5m×101.5m×65m和121m×95m×19.5m。

④ TLP由于上述大的生产、处理能力,其平台也配备了相应足够大的动力。如挪威的“Snorre”TLP配备功率高达88000kW。

1.3 自升式生产平台

自升式生产平台近年来亦有一定发展,其主要发展特点和发展趋势是:

(1) 由于自升式平台工作水深的限制,故多发展工作水深在137m以内的平台。由于自升式平台造价相对低廉,移动性较好,特别适于中小油田和边际油田的开发,这是一般导管架式平台所难以替代的,故近年来也有一定数量的发展。在1998年10月统计的全世界移动式海上采油装置中,自升式生产平台共有25艘,

占全部移动式采油装置125艘的20%,故也是海上移动式采油装置发展的一个方面。

(2) 新建造的自升式生产平台主要发展的技术特点是:

① 工作水深相对偏深。在4艘新建造的自升式平台中,有3艘工作水深为122m,仅一艘为61m。

② 适应海况能力较强。新建自升式平台大都能适应50年一遇的海况,适应浪高有的高达27m。

③ 油、气、水处理能力较强,相对的平台主尺度较大,平台配备动力也较大,平台甲板可变载荷也相对较高。如英国新建造的“Harding TPG 500号”自升式平台原油生产能力为10180m³/d,注水能力为22260m³/d,天然气生产能力为90万m³/d,平台的主尺度为88.7m×102.4m×9.14m,比通常使用的罗布雷300型自升式钻井平台主尺度64.9m×64.6m×8.2m要大许多。新建造的“Rowan Gorilla V号”和“Rowan Gorilla VI号”自升式生产平台的主尺度比“Harding TPG 500号”还要大,为93.3m×91.4m×11m,其平台配备的动力为12000kW,可变载荷为6150t。而“Harding TPG 500号”平台的动力高达20000kW,平台可变载荷高达8500t,比较罗布雷300型钻井平台配备动力为5000kW、可变载荷为1735t要高出许多。

④ 平台下部采用特殊的原油储存结构设计,克服了自升式平台不能储存较大量原油的缺点。如新设计建造的“Harding TPG 500号”平台具有92200m³的原油储存能力,新建的“Siri号”平台的原油储存能力也高达50000m³。

(3) 自升式生产平台多为现有钻井平台改造而成。如被统计的自升式生产平台共20艘中,有16艘为旧钻井改造而成。其改造主要内容包括:

① 计算校核在提高抗风浪能力下平台的安全性及其采取的技术措施;② 进行平台油气

水处理设备增添设计、建造;③进行平台必要的动力设备和相应配套设备的添置和必要的设计、施工安装;④对平台锈蚀结构、落后设备的更新、补强或添置。

2 我国海上移动式采油平台现状与差距

我国海上移动式采油装置自20世纪90年代以来,已有8艘投入海上采油作业,其中7艘FPSO,半潜式生产平台1艘。在7艘FPSO中:“渤海明珠号”系由上海江南造船厂建造,由中国海洋石油总公司(以下简称CNOOC)渤海石油公司拥有,投入渤海地区采油作业,其工作水深31m,可适应风暴能力为:风速74kn,浪高5.5m,船体主尺度为长210m,宽32.92m,型深20.42m,吃水11.6m,载重55000t,乘员47人,日处理原油能力为7155m³/d,储油能力62000m³;“渤海友谊号”由上海沪东船厂建造,工作水深22.9m,亦为CNOOC渤海石油公司拥有,在渤海海区作业,适应风暴能力与“渤海明珠号”相同,船体主尺度为长217m,宽31m,型深17.68m,吃水10.2m,载重55000t,储油能力62000m³,乘员47人,油气处理能力为:原油3627m³/d,水397m³/d,天然气8.5万m³/d;“长庆号”由上海沪东船厂建造,工作水深20m,载重52000t,储油能力58500m³;其余4艘FPSO均由国外公司建造,它们是:“南海发现号”(由CACT作为作业者,工作水深116m,载重25万t,储油能力23万m³);“南海胜利号”(由AMOCO作为作业者,工作水深305m,载重16.35万t,储油能力1192万m³);“南海希望号”(CNOOC南海西部公司作为作业者,由新加坡Keppel船厂建造,工作水深37.5m,载重15.19万t,储油能力9.54万m³);“南海开拓号”(由Phillips公司作为作业者,工作水深100.6m,载重15万t,储油15.9万m³)。半潜式生产平台1艘是:“南海挑战号”,由AMOCO公司作为操作者,平台主尺度为长89.92m,宽

74.68m,型深39.62m,钻机的钻井深度能力为7620m,该平台为Sedco7000型,由新加坡FEELS和Keppel船厂改建。

由于我国海洋移动式采油平台的设计和建造上,特别是其关键技术部分,大多采用与国外合作的方式进行或者派工程技术人员赴国外参与设计建造(特别可喜的是:上海沪东船厂、上海江南造船厂等国内船厂承担建造的“渤海友谊号”、“渤海明珠号”、“长庆号”等,其建造水平和质量与国外相当),故上述国内拥有的8艘移动式采油平台的设计和建造质量、技术水平,基本与国外相近或同步。但其工作水深接近或超过400m者,大都依靠国外技术进行设计,我国在独立进行FPSO设计方面尚有一定差距,特别是工作水深超过600m至3000m的动力定位采油平台,国内更无设计建造经验,这也是与国外技术发展水平的主要差距。

此外,移动式采油平台上配套的装备的设备,国产化率还相当低,主要关键设备、如燃气轮发电机组、天然气压缩机组、高压多路旋转接头、油气水分离处理设备、海水淡化设备、MCC马达中心控制系统、遥控遥测仪表等,大多依赖国外进口,这亦是主要差距之一。

3 对发展我国海上移动式采油平台的建议

(1)继续执行对外开放的方针,对≤150m工作水深的导管架平台或其它固定式平台,建议全部依靠国内设计与建造力量进行设计建造;对某些关键性、技术难度较高的设计计算,可以采用招标或聘请国外专家进行技术咨询的方式加以解决;对平台(含固定式和移动式)上配套的设备,必须花大力气解决配套设备的API、ISO9000的取证、制造质量、供货期以及售后服务问题。力争在2000—2010年内,这类平台(含平台设备国内的配套)的国产化率达到70%以上。

[下转第10页]

文章编号:1001-4500(2000)04-0007-04

②

7-10

输油管线升力的数值模拟与实验研究

康海贵, 翟钢军

(大连理工大学, 大连 116024)

TE 9 73.921
0353

摘 要:在波浪场中,利用PIV装置进行水平输油管线升力及其周围流场的同步测量。同时采用速度压力修正法求解N-S方程和泊松压力方程,得到了雷诺数较低条件下的水平输油管线周围的流场分布。并将两者进行了比较。

关键词:管线;速度压力修正法;PIV ~~输油管道~~

中图分类号:O357

文献标识码:A

模拟人,管道,海洋建筑物

1 引言

在波浪场中,由于柱后涡旋的不对称释放及涡旋强度的变化,在桩柱上引起的升力往往是随机的(即使在规则波情况下),其频率高于正向力,其幅值有时也大于正向力。由此而引起的诸如海工建筑物的振动与疲劳损坏等问题,是当前世界海洋工程界所特别关注的问题之一。近三十年来国内外学者对桩柱升力问题进行过一些研究并提出了一些计算方法。但这些试验方法和理论计算方法均因无法测到柱体周围实际流场及涡旋变化的详细过程而未得到适合于实际应用的结果。本文在波浪场中,进行了不考虑固壁影响情况下水平桩柱升力及其周围流场的同步测量。分析了波浪槽中的实测波面,采用二阶Stokes波浪理论计算桩柱中心点的最大流速,Ke数。采用层流条件求解N-S方程和泊松压力方程得到了雷诺数比较低的条件下桩柱周围的流场分布。所谓层流模型法即将

粘性流体流动的速度 u 和压力函数 p 作为求解的未知量,不考虑大涡旋的低频脉动和小涡旋的高频脉动,采用Galerkin方法,求解N-S方程,也就是动量方程和泊松方程,采用速度压力修正法,求解出流场的速度 u 和压力 p 。本文采用此计算方法的主要缺陷是在计算中受雷诺数的限制,雷诺数不能很大。

2 速度压力修正法的数学模型

2.1 粘性流体的基本控制方程N-S方程

对于不可压缩粘性流体流动,在于求解连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

和动量方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho b_i + \frac{\partial p_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

下标 $i=1,2,3$; $j=1,2,3$;即 u_i, x_j 分别表示速度、位移沿 x, y, z 三个方向分量, b_i 为体积力分量, p_{ij} 为各应力分量。考虑不可压流体条件和连续方程及引入流体的粘性系数 μ ,可以得到Navier-Stokes方程即N-S方程:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho b_i + \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i \quad (3)$$

求解不可压缩粘性流体流动的问题,就是求解式(1)和式(2)所组成的基本控制方程。而在本数学模型计算中不求解连续方程而求解压

收稿日期:2000-04-07

作者简介:康海贵(1945-),男,教授;翟钢军(1971-),男,博士。

基金项目:国家自然科学基金重大项目(59895410)。

力泊松方程,并由此可以建立相应问题的不同离散表达式,以寻求问题的数值解。

根据粘性流体流动的基本控制方程,再加上问题的初始条件和边界条件,可构成求解粘性流体运动的具体的定解问题。对本文而言,应利用自由表面条件,利用波面方程直接进行计算,但这对数值计算来说是比较复杂的问题。本文采用了一个简化的方法,即因为桩柱距离自由表面较深,此时桩柱周围的水质点运动情况基本符合振荡流条件,所以可以用振荡流代替波浪流,这样大大简化了数值计算难度,而且这种简化已经能够满足工程需要。

2.2 速度压力修正法的推导

不可压缩粘性液体流动控制方程组是有量纲的,这里引入四个无量纲参数,将其无量纲化,这四个参数可分别为:

$$St = \frac{L}{TU} \text{——Strauhal Number}$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \text{——Froude Number}$$

$$Eu = \frac{P}{\rho U^2} \text{——Euler Number}$$

$$Re = \frac{UL}{\nu} \text{——Reynolds Number}$$

St是有运动学的特征量构成的参数,它是特征流速 U 流过特征长度 L 所需的时间与特征时间 T 的比值,在恒定流动时 St 是不需要的,非恒定流动时,若选 $T = \frac{L}{U}$,则 $St = 1$ 。 Eu 是特征压强与特征动能的比值,如果选 $P = \rho U^2$,则 $Eu = 1$ 。于是无量纲方程组简化为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \nabla^2 v \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

为了求解方程组(4),本文引入两个参数,分别为 p^* , u_i^* 因为 u_i^* 不一定满足连续性要求,所以要引入压力修正值 δp ,并根据 p^{n+1} ,有下表达式:

$$\left. \begin{aligned} p^{n+1} &= p^* + \delta p \\ u_i^{n+1} &= u_i^* - \Delta t \frac{\partial \delta p}{\partial x_i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

因为 u_i^{n+1} 满足不可压缩条件,则:

$$\frac{\partial u_i^{n+1}}{\partial x_i} = 0 = \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} - \Delta t \frac{\partial \delta p}{\partial x_i} \quad (6)$$

或

$$\frac{\partial \delta p}{\partial x_i} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

在进行计算时,先令 $p^* = p^*$,代入方程(4)可得计算值 u_i^* ,将 u_i^* 代入式(7)可得 δp ,由式(5)可求出 u_i^{n+1} 和 p^{n+1} ,然后用下式进行判断:

$$\left. \begin{aligned} \|\delta p\| &< \epsilon_p \\ \|u_i^{n+1} - u_i^*\| &< \epsilon_u \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

这里 ϵ_u, ϵ_p 是指定的小实数,如果计算结果不满足式(8)要求,则令 $p^{n+1} = p^*$,继续进行运算,直到满足式(8)条件为止。以上所述即为速度压力修正法的计算原理。

2.3 边界条件的确定

方程组的定解条件分为边界条件和初始条件,一般来说取无因次化的边界条件和定解条件,进口出口条件取决于速度条件,即

$$\left. \begin{aligned} u &= U \cos \theta + \sin \frac{2\pi\tau}{Kc} \\ v &= U \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 u, v 为 x, y 方向上的速度分量, U 为均匀来流的相对速度值, $U_r = U_0/U_m$ (U_0 为均匀来流的速度值, U_m 为振荡流的速度幅值), θ 为均匀来流的方向角, τ 为无因次时间。圆柱表面取无滑移条件,即 $u = v = 0, 0$ 。

初始条件为 $U(0) = U \cos \theta, V(0) = U \sin \theta$ 。本次实验采用正向振荡流,因此 $\sin \theta = 0$,考虑到此因素的定解条件为(参阅图1):

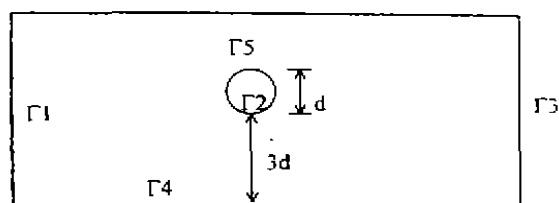


图1 无固壁影响的桩柱绕流示意图

$$\Gamma 1: u = U_r + \sin \frac{2\pi\tau}{Kc}, v = 0;$$

$$\Gamma_2: u = v = 0;$$

$\Gamma_3: \frac{\partial u}{\partial x} = 0, p = 0$, Γ_3 是本质边界条件, 一般不用给出;

$$\Gamma_4: u = U_r + \sin \frac{2\pi r}{Kc}, v = 0;$$

$$\Gamma_5: u = U_r + \sin \frac{2\pi r}{Kc}, v = 0。$$

3 有限元模型的建立

$$\left. \begin{aligned} \iint_{\Omega} \left\{ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \delta u + (-p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}) \frac{\partial \delta u}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial \delta u}{\partial y} \right\} dx dy &= \int_{\Gamma} \bar{f}_u \delta u ds \\ \iint_{\Omega} \left\{ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \delta v + (-p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}) \frac{\partial \delta v}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{\partial \delta v}{\partial x} \right\} dx dy &= \int_{\Gamma} \bar{f}_v \delta v ds \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

应用伽辽金方法, 采用分部积分的方法, 将泊松方程离散成伽辽金弱表示形式

$$\begin{aligned} \int \frac{\partial w}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} d\Omega &= \frac{1}{\Delta t} \int (w \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) d\Omega \\ &+ \int (w \frac{\partial p}{\partial x_i} n_i) dS \end{aligned} \quad (11)$$

求解此泊松方程组要耗费大量的 CPU 时间, 但可以根据方程是对称的线性代数方程组, 而系数矩阵与时间无关, 采用 LU 分解格式, 即对系数矩阵分解一次, 多次回代, 可以较快地得到求解。LU 格式对小尺度问题比较适合, 也是一种比较经济的求解模式, 而对大规模问题主要指多节点问题, 则会造成计算时间过长, CPU 资源的浪费。本文的研究范围属于小尺度的范畴, 故用此方法求解。

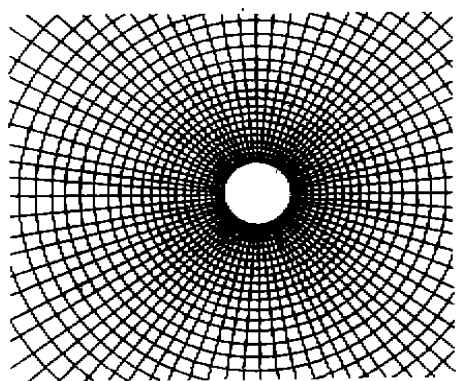


图2 计算网格示意图

建立方程组(4)的伽辽金表示式。显然, 对于这个方程应分别选取变量的变分作为它的权函数。从方程(4)可以看出此方程是分别在 $0x$ 轴向和 $0y$ 轴向的动量方程, 因此它们的伽辽金表示式应能反映流体流动虚功率平衡这一虚功原理, 它们的权函数应分别取为两个方向上的速度分量 u 和 v 的变分 $\delta u, \delta v$, 将其化为伽辽金的弱表示形式, 利用格林高斯公式得到

在计算中首先要剖分网格, 根据流场的实际特点, 网格剖分比较简单, 因此直接用 Fortran 语言生成计算所需的特定网格, 采用 PZP 直接抓图, 将图形拷贝至打印机上, 网格为四边形网格, 如图 2 所示。

4 实验条件情况简述

物理模型实验是在大连理工大学海动研究室的小波浪水槽中进行的, 实验可以测出桩柱周围的流场和桩柱所受的升力, 实验中流场测试采用最新研制成功的 PIV (Particle Image Velocimetry) 激光流场测试技术, 通过图像采集和专门的分析软件, 得到了在较低雷诺数下的二维流速矢量图。采用的波周期为 1.0s, 波形经比较采用二阶 Stokes 波浪理论, 波高为 0.09m, 波长为 1.379m, 桩柱中心点的最大流速为 0.161m/s, 以这一流速为振荡流的最大流速。经计算 Kc 数为 4.1。PIV 的图像采集范围为 12cm × 16cm。

5 计算结果分析与展望

图 3 与图 4 为实测波面过程线与通过录像观测到涡的形成规律。PIV 采集的照片比较离散, 分布于不同的周期, 现将计算流场与实测流场进行比较。

根据速度压力修正法进行计算时,此种情况下的雷诺数为 4800,时间步长为 0.0041,因为是无因次情况,一千步相当于一个周期,为了避免计算时发散,网格点选取的范围为 50D,一般来说在波浪场中,在雷诺数较低的情况下,采用层流模型能保证计算趋势的正确,在计算中采用振荡流代替波浪,比较计算结果与实测值,发现采用层流模型的速度压力修正法,在流场的尾流方向上,也就是在形成涡的时候有着较强的发散,而在流场的趋势方面此种方法基本能反映流场情况,一般来说如果采用普通的层流模型计算桩柱周围流场的话,雷诺数只有 300 左右,而采用此种速度压力修正法计算,雷诺数进一步增大到 4000 左右。

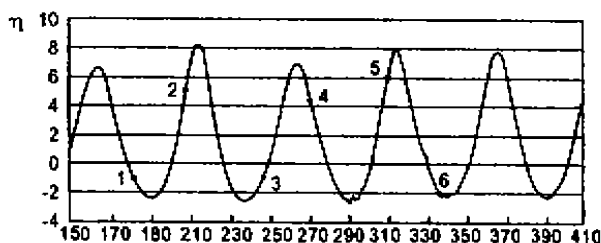


图 3 $T=1.0$ 时实测流场与实测波面过程对应图

经分析,在小雷诺数情况下,采用层流模型可以反映流场的趋势。层流模型的主要缺陷是当雷诺数增大时,会导致对流项增强,使数值结果振荡发散。因此在波浪作用下的圆桩可以认

[上接第 6 页]

(2) 对 $\geq 400\text{m}$ 水深的 FPSO,要力争通过与国外进行联合设计(含基本设计与详细设计),以逐步掌握 FPSO 关键部分的设计技能,并积极倡导在国内进行建造。国内造船行业要力争通过竞标,以价格和建造质量取胜;建议国内海洋石油公司也要在国产化方面,给国内厂商于一定的优惠与鼓励政策。

(3) 组织专门的科研设计队伍,长期地、不间断地跟踪国外的先进技术水平,并力争参与国外深水平台设计建造的投标竞标活动,逐步打入国外海洋石油采油平台的设计、建造市场,

为是圆柱绕流问题,按层流处理,只是雷诺数应该在 4000 左右,也就是说采用速度压力修正法拓展了传统的层流模型条件下雷诺数的限制,是非常有意义的。

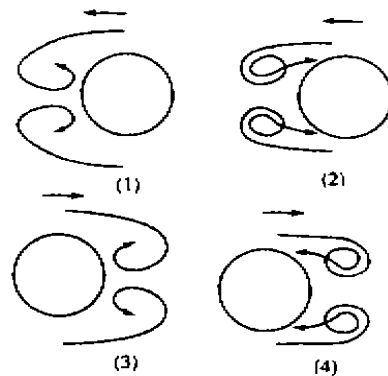


图 4 Kc 为 4.1 时涡的形成图

参考文献

- [1] 邱大洪. 波浪理论[M]. 高等教育出版社, 1985.
- [2] 张涤明. 计算流体力学[M]. 中山大学出版社, 1990.
- [3] 康海贵, 翟钢军. 在简谐振荡流作用下水平圆桩所受升力的数值模拟[C]. 第八届全国海岸工程学术讨论会论文集, 1997.
- [4] 翟钢军. 不同雷诺数情况下桩柱升力及其周围流场的研究[D]. 大连理工大学硕士论文, 1997.
- [5] Sparpkaya T. Force on Cylinders and Sphere in a Sinusoidally Oscillating Fluid[J]. ASME. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42.

承担任务从简到繁,工作水深从浅到深,技术难度从易到难,以逐步赶上当代深水采油平台的设计、建造水平。

参考文献

- [1] 廖谟圣. 2010 年前世界海洋石油钻采工业和设备发展趋势及对发展我国钻采工业和设备的建议[J]. 石油矿场机械, 1995, (3)
- [2] 廖谟圣. 展望 21 世纪前期的世界海洋石油钻采技术与设备[J]. 探矿工程, 1999, (面向二十一世纪钻掘工程学术论文集)
- [3] World Oil[J]. 1998~1999 各期.
- [4] Composite Catalog of Oil Field Equipment and Services[J]. 1998~1999.