

以油轮为基础的浮式生产贮存和装卸系统的最新发展

B.d'Hautefeuille, G.Remery
Single Buoy Mooring Inc.

漆文远 译
赵毓珊 校

摘 要

九个利用由单点系泊固定油轮（或驳船）的生产、贮存和装卸系统（以下称FPSO）已安装好或正在建造。

自从1976年第一个FPSO系统投产以来，已积累了总计40个系统一年的操作经验。根据这些经验，部件设计反映特有的FPSO环境，可靠性已有很大提高，而系统停工时间已经减少。

在概要介绍了九个FPSO设施后，详述了最主要部件和子系统的操作经验。关键的组成部分是：系泊系统、流体输送系统、处理设备和货船装卸系统。

重点放在流体输送系统，包括高压软管和分别接纳油、气、水的通道的高压旋转接头。给出了调查大直径旋转接头的高压密封的研究计划的主要结果。

本文最后是对FPSO应用的近期预测。

引 言

一个整体的以船为基础的浮式生产、贮存和装卸设施由以下主要部分及子系统组成：

1. 单点系泊系统，其组成是：一个或几个锚点、单点或多点系泊立柱、一个浮式或固定式主体、一个可随风向转动的机械旋转接头和一个与永久系泊着的船相连接的装置。九套FPSO设施在考虑时采用两种基本上不同类型的单点系泊系统，即单浮筒式贮存系统（SBS）和单锚腿贮存系统（SALS）。

2. 流体输送管道将流体从海底送到水面和船上的生产设备，也可以反方向输送。这一系统的基本部分是流体旋转接头，它可使流体不间断地流入船内，不论船的方位如何。

3. 一条浮式船，它可能完全是按要求建造的，也可以是由商业油轮改造的。

4. 生产设备，安装在船的甲板上，将井口产出的流体分离为油、气、水。分离的天然气燃烧发电，其余的回注入海底井中。用来气举或由火炬烧掉。油贮存在船上的贮罐中等候卸入穿梭油轮运至岸上，而水净化后倾入海中。

一种考虑的设施是浮式工厂，以冷冻、贮存和装卸来自附近平台的液化石油气（LPG）。

5. 运油设备，可使产出的原油从FPSO船上的贮罐中定期安全快速装入穿梭油轮中，此

油轮可与生产船串联或靠船舷系泊。也可能使用单独的装油终端或管道。

6. 后勤支持设施, 通常是包括岸上的管理办公室、电讯网、配件库、消费品供应以及人员和设备的运输工具。

背 景

本文的主题, 单点系泊的FPSO系统总括在表1中。详细叙述于下:

Ardzuna油田

Ardzuna LPG 系统虽与以后的油轮为基础的原油浮式生产系统有些不同, 但可认为是外海中的浮式基地上处理所产烃类的单点系泊设施的先驱。

此设施于1976年8月安装在爪哇海上的 Ardzuna 油田上, 距海岸约20 英里, 在印尼雅加达的东北90英里, 水深42.7米 (141英尺)。由大西洋富田印尼公司代表持有生产分成合同的公司集团为印尼国家石油公司Pertamina作业。

Ardzuna设施 (图1) 由载有12个钢贮罐, 可贮存总量为375000 桶冷冻LPG 的水泥驳船组成。此驳船由SBS型的刚性臂系统永久系泊着。

液化石油气离开中央平台联合装置时为235磅/英寸²和 46°C, 通过悬挂在系泊浮筒上的软管送至驳船, 在其上冷冻至 - 43°C, 可在大气压力下贮存。冷冻产品定期地通过装卸臂直接输送到靠驳船船舷停泊的穿梭油轮上。

第二条流体输送管线在165磅/英寸²压力下将流体从中央平台输至驳船作燃料用。

驳船的有关数据如下:

长度	140.5米(461.0英尺)
船身最大宽度	51.5米(169.0英尺)
深度	17.2米(56.4英尺)
最大吃水深	12.5米(41.0英尺)
排水量	66000吨
床位	50人
LPG贮存量	375000桶
装载速率	29000桶/小时
卸载速率	2000桶/小时

对于单点系泊浮式生产系统未来发展的特别令人感兴趣的特点是:

直径 8 英寸的 2 × 7 海底管线旋转接头用硬管线连接到软管系统的单接头上。软管系统是从管端管汇 (PLEM) 把 LPG (235磅/英寸²) 和燃料管线 (165磅/英寸²) 连接到单点系泊浮筒的中心竖井。

用于LPG (密封直径 8 英寸) 和燃料气 (密封直径32英寸) 双生产管的旋转接头, 包括漏气监测系统。

天然气贮轮的停泊和温度在零下的流体从贮存船到一般商业油轮的输送。更完全的介绍可在参考文献[1]中找到。

Castellon油田

第一个以油轮为基础的FPSO设施是为Shell Espana公司建造的, 用作地中海 Castellon

油田〔距西班牙Jarragona海岸40英里,水深117米(383英尺)〕一个海底完成井的经济的生产工具。此系统(见图2)设计的作业寿命为10年,建造期11个多月,于1977年8月开始作业。连续作业至今。已从三口不同的井中总计产出1310万桶油。

为此选用的SALS系泊系统利用一个单系泊立柱,它由实心钢杆一节一节地连接形成高抗张强度的链式柱。立柱设计的优点是利用现场的半潜式钻井船来一节一节地安装。一个在立柱顶上的直径1.6米的滚柱轴承的旋转接头与固定在船头的轭式构件对接,允许载重60000吨的油轮随风转动。一个完全沉没的浮力容器与轭式构件一起,不论海况和船的负荷条件如何,都保持铰接的立柱的绷紧状态。

高压井口流体从海底管端管汇通过附在系泊立柱上的4英寸软管流向一个位于随风转动的支承架(高于水面)之上的单流体旋转接头。管端管汇与三口井分别连接。但是,由于管端管汇至FPSO船只有单流道,在同一时刻只有一口井能生产。

一个小的六通液压旋转接头能够直接用液压控制在采油树(Xmas)上的一个主阀和下水安全阀。所有其他阀是手控的。

井口流体生产设备安装在船甲板上的手板架上。此设备的容量是20,000桶/天,与其他FPSO设施一样基本上与陆上设备相同。

产出原油中的伴生气在船上改装过的锅炉中燃烧,产生蒸汽并发电供船上公用设施使用,其余的在船尾的焚烧炉中处理。

产出的原油卸到停泊在FPSO船的船舷的载重18000吨的穿梭油轮上。

用FPSO船边上的一个带悬臂小型塔架的钢丝修井。

对Castellon油田FPSO设施的后勤支持由Los Carlos岸上基地提供。

Castellon FPSO的更详细情况见参考文献〔2〕

Nilde油田

一个油轮为基础的FPSO设施被认为是AGIP公司在位于西西里海峡里的Nilde油田发现的单井中进行生产的最经济的方法。在此应用中,选用了单管立柱的SALS型的系泊系统,因为立柱(预先通过一个万向接头与重力型锚基础相连)可以浮至现场并在海底定位,无需将重的举升设备移至相当远的地区。幸好有一种特别研制的万向接头,油轮和SALS系统的连接轭与立柱在现场的连接,在几小时内便成功地完成了。

在Nilde油田的FPSO设施的其他很多方面,特别是系泊轭、生产设备和船装货物输送的安排,都与Castellon的设施十分类似,只有以下区别:

FPSO船是用载重84,000吨的油轮改装的。

此系统现在从两口井中生产,借助于一根6英寸的管线,在刚要进入单生产接头之前加以混合。

产出的气体主要是不可燃的二氧化碳,所以在由大风量的鼓风机供应的空气稀释之后排到大气中。

因为在Nilde油田所在地时常有不寻常的海流与波浪的结合力,致使FPSO船旋转严重。AGIP公司在船尾装上一个横向推进器,可使船根据波浪的情况定向到一个更合适的位置上。更详细的介绍可参看文献〔3〕。

Cadlao 油田

Amoco Philippines公司为了开采南中国海的 Palawan 岛海外水深97米 (300英尺) 的 Cadlao油田的两口水下完成的油井, 采用了稍有不同但被充分检验了的系泊设计。

在这种情况下它决定采用一个与6个伸展很远的锚桩组合在一起的系泊系统。6英寸的锚链从CALM型浮筒以悬链曲线式悬挂到锚桩上(图4)。在把改造了的FPSO船从新加坡船坞拖出以前, 已用刚性軛把浮筒系在船尾。

锚桩的拖动、锚链的拉紧和载重为127,000吨的油轮在就位地点的实际连接都是用同一工作船完成的: 工作船用来把两对6英寸的钢的液流管安装到每一口井上。用这种办法, 在安装现场需要动用的重型设备最少。于1981年8月开始生产。

流体是靠两对6英寸的钢管(一条用于生产, 另一条用于维护)从两口井输送到一个管端管汇, 并由此通过挠性的大锥度S形的高压立管输送到浮筒中心竖井。一个高压旋转接头有4条6英寸的额定工作压力为3000磅/英寸²的流道, 把井流体从系泊系统的不旋转部分输送到它的随风转动部分。4条管线的每一条都从生产旋转接头引出, 而且通过硬管线沿着系泊臂输送到油轮的横梁, 在其上每一条管线都穿过一个商业性的管线旋转接头, 并进入到油轮甲板上的管汇入口, 管汇上装有节流阀。

井的控制及管端管汇上的和浮筒中心竖井的阀的控制都是借助于来自船甲板上的中心控制室的密闭液压循环系统实现的。

液压信号是借助安装在生产旋转接头顶部的两个液压旋转接头才得以传过随风转动的支承点。每一旋转接头有12条通道, 且其额定工作压力为5000磅/英寸²。

在FPSO船上的处理装置具有30000桶/天的能力。产出的天然气主要用作船上锅炉的燃料, 用专门设计的燃烧器将多余的天然气烧掉。这种燃烧器利用强制通风装置以产生短的无光火焰, 火焰完全封闭在一个自然通风冷却的和用耐火材料衬里的烟筒内, 烟筒高22米, 直径为4米。

向穿梭油轮(直至载重100,000吨)装油是借助于与油轮串接系泊的用12英寸浮式软管输送原油的输油系统。

Cadlao油田FPSO设施的所有陆上基地的支持直接由在马尼拉的公司提供。

有关Cadlao系统的详细说明可参阅文献[4]和[5]。

Tazerka油田

Tazerka边际油田的开发对于作业者(Shell Tunirex公司)和设计者两方面都有一大批新的工程难题。这个油田位于距突尼斯海岸30英里的海上, 水深范围为140~300米(469~985英尺)。

此油田位于相当深的水下, 烃类聚积比较少, 且与其他任何可为出口石油而与其连接的开发区都相距甚远, 这是选择一种可移动的浮动生产系统开发这个油田的基本原因。

选择的系统包括一个210,000载重吨位的改造的油轮, 其系泊是依靠船头通过一个设计可承受百年一遇的风暴的SALS系泊系统, 风暴期有效波高达10米, 风速为102节。设计有8口井生产, 有提高生产的气举能力和晚期进行注水二次采油的能力。

在直径5.5米的SALS立柱的中心管中装入12条3英寸生产管线, 12条2英寸气举管线和

10组液压控制管路。这些管线中有的是备用的。柔性的跨接软管安装在底部以输送液流穿过位于立柱与基盘之间的海底万向接头。

由于井数和有关的辅助管线太多,在立柱顶上装一个管汇以减少所需旋转接头的通道数量,为操作提供灵活性。安装的旋转接头有6条4英寸液流通道,其额定工作压力均为3000磅/英寸²。由于油嘴安装在旋转接头上游的管汇主管内,旋转接头正常操作压力为225磅/英寸²左右。

管线离开液流旋转接头后,通过高压跨接软管跨接在位于立柱枢间的万向接头,继续沿着作为硬管的枢,由标准的4英寸管的旋转接头跨过枢/船的联接。

八口井的控制是由连续的液压控制系统来完成的,该系统只要求位于生产旋转接头组顶部的液压旋转接头有20个单独的通道。液压控制系统额定压力3000磅/英寸²。

安装在油轮甲板上的生产设施的能力为每天30000桶,并作了以后安装注水泵和气举压缩机的准备。

所产的气主要是二氧化碳,因为它是不燃烧的,经强制通风稀释后由船尾排走。

为了装卸,穿梭油轮来时靠在FPSO船船舷,原油倒船不是经过通常的船的中部,而是靠船尾的管汇的标准装载软管来完成。

对Tazerka FPSO的后勤支持由突尼斯总部和从在Kelibia的供应基地提供。

更详细的情况参阅文献〔6〕和〔7〕

Garoupa油田

从Petrobras的Garoupa油田生产的原油和天然气很快在固定平台上处理后由海底管线输送到约155英里远的Rio de Janeiro。但是,这种安排尚未完全投产。

直到1982年,从7口海底完成井中产出的原油汇集到海底的干式常压的管汇室中,通过一个塔输送到永久系泊着的油轮为基础的处理船上。

生产的原油暂时贮存在生产船上,随后定期装到停泊在附近的装载浮筒处的穿梭油轮上。但是,系泊塔的故障导致5个月的停产。此期间Garoupa油田安装一个生产平台,通过管线连到岸上,进入其最后开发阶段。

Petrobras决定在最后装备平台时继续使用生产/贮存油轮,而且为船签订建造一个容易重新移动定位的单点系泊和液流输送系统的合同。

如图6所示的解决办法它是一个独特设计的可拆开的刚性枢,将处理船与单点系泊相连。将处理/贮存油轮联结到单点系泊的刚性枢装有液流输送管和井的控制管线,它使船随风、浪和海流的方向转动。单点系泊的中央室装有生产和控制管线液流旋转接头。单点系泊借助于拖曳成下垂曲线的链吊着海底的锚以保持位置。刚性系泊枢可以容易地与浮筒外面的转动部分连接或分开。

Garoupa油田的FPSO于1983年11月与第二个更加常规的单点系泊油轮装油终端一道安装在油田上。当生产平台进行其最后装备时,处理船直接从水下管汇主管生产,可使油田不停产。

产出的原油通过液流旋转接头反输到平台上,由此通过管线泵送到岸上。有时,油是用单独的单点系泊终端装到穿梭油轮上。

平台上的处理设施现已接近完成,因此作业者正考虑把FPSO移到Campos盆地的一个油

田上去。

Petrobras公司在巴西Macaé的Garoupa油田组织了一个很大的支援集团。

Ashland油田

这套FPSO位于尼日利亚东西海外40公里，处理比较靠近的三个油田中生产的原油。设施的设计和建造可扩大处理到五个油田。

三个油田中每个油田在各自的固定的钢平台上生产，平台上有一级油气分离和试井设施。在这三个平台上经过部分稳定的原油汇集到立在40米水深的第四个固定式钢的管汇平台上，此平台也作为FPSO随风转动的系泊系统的中心支点。

系泊系统（图7）由一个软缆组成，允许FPSO船围绕固定平台随风转动。FPSO船是一个改装的承载285000吨的油轮，靠其尾部系泊。卸油是由浮动软管卸到与FPSO船串联系泊的穿梭油轮上。

在管汇平台上，两股轻原油混合起来流入分离过的重油流中，经过高压旋转接头流入FPSO。两列平行的处理能力为40000桶/天的机组装在平台上，比FPSO船的甲板高出3米。每列机组包括一个二级分离器、加热/处理脱水装置和一个稳定塔。轻原油在被泵入贮罐前也流过一个水冷的板式换热器。

油与产生的水分离后泵到舷外。产出的气用作FPSO船上锅炉的燃料，多余的气在火炬中烧掉。

FPSO船驾驶舱用作油田作业中心，它接收从外面的生产平台来的遥测的生产数据。

船可居住70人，足够FPSO和油田操作人员以及检验人员和政府官员等住宿。

尼日利亚Ashland设施于1985年第四季度投入生产。

Kakap油田

Kakap FPSO将安置在印尼海外88米水深处，将由马拉松（Marathon）石油公司操作。FPSO船是将从前是商业油轮的载重140,000吨的油轮改装的，将由类似用于Cadlao油田设施的单浮筒贮存（SBS）系统永久系泊着。单浮筒贮存系统用六条4.5英寸锚链系泊靠近带有生产井口的固定钢平台（图8）。

生产的原油流经两条10英寸管线到FPSO船上，通过单浮筒贮存系统的浮筒上的高压旋转接头。FPSO船上的处理设备将油与伴生的水和气分离开。稳定过的原油定期地从FPSO船上的贮罐中泵到串联系泊的穿梭油轮中。

井的控制是靠遥测系统由FPSO船上实施的。

Kakap系统计划1986年初投产。

Jabiru油田

Jabiru油田的单一形式的FPSO系泊系统是安装在船头的塔架/立柱结构，在坏天气时可使船快速自动卸开。船的再联接也是自动的，只有液流管线的组装是手动的（图9）。

这种可拆卸的形式除了增强系统的安全性外，还可使船定期向船坞供蒸汽，使检验和修理更经济。

设计的船的联结能经受五年一遇的风暴条件，单点系泊立柱单独可经受五十年一遇的风暴条件。但是，作业者期望一年拆卸不多于一次。

塔架/立柱FPSO设施将安装在距西澳大利亚约150英里,位于Timer海中的Jabiru 油田,水深119米,此处经常出现相当恶劣的气候。

初期,此FPSO设施将接纳一口海底完成井,但设备可供四口井联合生产。第一口井在现场安装和投产的时间安排在1986年4月或5月。

操 作 经 验

设施的停工时间及随之带来的生产损失是衡量系统性能的最后标志。作者曾理想地试图作出一个完全的汇编,表示出停工的时间及考虑的六个系统中每一个系统的原因。

由Amoco的一个子公司(作者所在的公司)作业的Cadlao油田的FPSO设施的停工时间已有数字而且介绍较详细。

但是,其他设施的数据得到很少,某种程度上说这可能因为作业者认为这种资料是专有的。不过只要有资料,都包括在内了。

因此,操作经验这部分只包括写此文时已知和可发表的资料。

全系统特点—Cadlao FPSO

表2列出生产和停工时间的数字,列出的数据是5套设施的22个系统年积累的总的操作经验,只经历了不到10天的停工时间。这个停工数字比固定平台优越。

对于Cadlao的FPSO设施在不同事件中停工时间如何分布的详情介绍如下:

Cadlao 在前49个作业月中的停工时间

日 期	(停工小时)		备 注
	1A井	3 井	
27/9/81	0.3	0.3	处理装置高液面关闭(错误信号)
28/9/81	9.5	9.8	液压旋转接头间的O环失灵,安全信号控制阀(SSCV)压力泄漏
20/3/82	1.0	1.0	仪表风失灵
26/4/82	2.6		安装液压旋转接头旁通系统
06/6/82	0.1	0.1	处理装置内气动火焰监视系统失灵
05/7/82	1.4	1.8	液压控制装置失灵
07/7/82	5.5		清除油嘴泥砂
07/8/82		1.0	同上
23/8/82	16.5	52.3	在风暴中控制用的液压软管被轧碎的活动销子所打断
19/1/83	2.0		清除油嘴泥砂
27/1/83	0.2		液压旋转接头旁通系统操作不正确
	39.1	66.3	总的井停工小时

从27/1/83到1/10/85没有另外的停工时间

此表说明Cadlao的FPSO所有的停工时间发生在作业的40个月的前18个月中。前18个月的操作经验的详情参看文献〔9〕。

Castellon和Tazerka的作业也有相似的经历。看来经过解决初期暂时困难的一段学习之后,作业者与系统相互间已充分谐调,保证平稳的无停工的操作。

全系统特点—Castellon FPSO

表2中所示Castellon 设施停工 85 小时发生在初期容易解决的暂时困难之后, 而且包括例行的定期维护更换大型液流旋转接头积累至今的65小时。20小时是由于高压分离设备有的监测系统有的警铃失效引起的。

不包括下列的停工时间, 因为不是特别与浮式生产贮存设施有关的理由造成的。

修理和最后用两条平行钢管来替换海底的一条软管以使用周围海水来改善井口的热液流的冷却(三个月)。

更换由于腐蚀而损坏的海水冷却焚烧炉的内衬(一个月)。

试验升沉补偿的、油轮为基础的修井架并更换海底安全阀(1.5月)。

上述所有停工时间都发生在1981年年中以前。从那时以后生产系统只在接入新井时暂停。

系泊系统—Castellon FPSO

作业者与最初的设计者/供应者之间的密切合作保证了从解决现有系统的问题中取得经验, 并在未来设计的进一步发展中共享, 这样可导致某些设施部件的预防性修改。

一个有趣的例子是加强Castellon SALS(单锚腿系统)的链式立柱的顶部连杆。自身润滑材料已经用于多数系泊系统铰链连接。正在进行的研究表明, 在某种情况下轴承材料可以表现出不同于1976年设计SALS系统时设想的性能。因此引起SBM 公司对所有用过这种材料的装置进行一次室内试验, 同时从试验中获得新数据。

在Castellon SALS设施中, 在链式立柱的顶部连杆发现一个潜在的疲劳问题区。疲劳敏感区在链上部的连杆的圆柱体与链制动器的锥体部分的接点处形成的应力集中处。这种布局的位置不可能就地检查, 因此决定设计和安装额外的一个构架, 分成两半包围着现有的连杆(图10)一个对开的刚性锥形套夹在现有的连杆的圆柱外面, 在套与连杆间的空隙填充可硬化的树脂。这种改进有减小疲劳敏感部分弯曲应力的效果。

此外, 由四条拉杆组成的额外的连杆安装在顶部链式连杆周围, 假如链制动器因疲劳发生损坏时, 它就可起到顶部连杆的作用。这种布置从供应船上安装相当简单。

船—Cadlao FPSO

在讨论Cadlao的FPSO 设施的 3 号油罐进行的修理以前, 必须强调的最重要的操作特点是: 这种修理是在保持全部作业时进行的。这些修理在预定时间内成功地完成而且没有差错, 反映出所有参与人员的最高信誉。只有在作计划和进行修理时非常仔细和勤奋才使这种作业成为可能。

1982年12月发现 3 号中心油罐和 3 号右舷油罐间漏油(图11)。调查表明在油罐底部上面的纵向舱壁有大约12到13米断裂。

由于作业的需要, 进入 3 号右舷油罐的通道直到1983年 7 月都没有起作用, 当时发现在水平加强筋11—12间的加强肋骨73有裂缝。

同时, 在加强肋骨70—71—72—73发现严重的结构破损, 该处有垂直裂缝, 因此大大降低了舱壁在此区内的强度。

1983年8月/9月再进入油缸,准备了一个临时通道,并向船级社人员提供了一些照片和一份完整的报告。

1984年4月/5月对3号左舷和右舷油罐进行充分的检查,检查结果美国船级社说必须在三个月内进行修理。

为了提供一个没有天然气的环境,准备了充分的修理和安全的措施以便可以动火和焊接。要修理的油罐及邻近油罐都经过清洗、吹扫和通风以造成无天然气的条件,这是至关重要的。修理期间在油罐内一个连续监测系统在大气条件下工作。

1984年5月12日各方接受了建议的修理程序,由此日至修理工作开始的5月25日,所有必须的合同和准备工作的安排都作好了。

实际修理包括割掉有缺陷的舱壁板,在3号中心罐与3号右舷罐间焊接一个大约700mm×500mm的镶嵌板,垂直加强筋67—73被割掉,修理时对3号左舷和3号右舷的油罐进行了部分更新。为了恢复由于破损失去的强度,将额外的舱底板垂直加强筋焊到3号左侧及右侧油罐肋骨的必需处。

因为问题原来部分地是由于油轮设计不周。额外的补偿杆被焊在垂直加强肋骨上,为了安装水平桁条曾把这些杆割掉了。垂直肋骨上的裂缝最初就发生在这些角焊缝上。

修理从1984年5月25日开始,1984年6月7日完成并测试。1984年6月8日运输船将所有材料从FPSO船上运走。

船—Castellon FPSO

自从1977年8月开始生产以来,不久在紧靠Castellon FPSO附近又发现石油聚集,而且又完成和回接两口井,因此增加了油田潜在的寿命。现在正从每口井轮流生产,但是现正调查把海底油嘴与基底管汇连接以便使三口井同时生产的可能性。

因为Castellon FPSO船的原来协议谈判是30个月租约并有延长一年的进一步的三种任选方案,FPSO设施的作业超过1982年6月需要与船主重新谈判,并不移动位置以保证持续的结构整体性。此后船级社对船进行了就地检验,所需的证书被延长到油田潜在的寿命期1985/1986。

生产设备—Cadlao FPSO

由于Cadlao FPSO生产设备引起的停工时间不到10小时,而且都发生在作业的前18个月。停工主要是由于处理装置内液面传感器和火焰监测器的错误报警和油嘴聚集了砂。值得注意的是没有因为船过分地运动而停产,甚至台风条件下也未停产。

生产设备—Castellon FPSO

在1980年,当Castellon FPSO遇到15年一遇的风暴时生产设备经受了严峻的考验,此期间在船摇摆的情况下仍然不间断地生产。

生产设备的停工时间是因为处理装置内的错误报警和前面提到的更换焚烧炉内衬。

液 体 传 输

液体旋转接头是单点系泊的油轮-基地浮式生产系统所特有的重要的部件,它们是系泊

系统的不旋转部分与随风摆动部分之间的接合所需要的部件。由于没有合适的商品可使用，SBM 有限公司为 FPSO 系统设计和制造了多通道旋转接头（图12）。

这些旋转接头有两个主要的设计参数，它们必须有较大的直径，以允许多种产品可分别地传输，而且可在高压下工作。

旋转接头不断的发展计划已产生了许多实际结果，可参看表 3（原文缺——译注）。将大直径的低压的旋转接头列于表中，是因为它们在高压旋转接头的发展进程中形成一个重要的阶段。

表 3 说明，自第一个 FPSO 设施安装以来，尚无一个公司研制的高压生产旋转接头被更换。然而，在 Cadlao 油田的 FPSO 设施上的生产旋转接头在通过第一道密封处有某些内部泄漏（每天达到1200升）。这些少量液体是从第一道密封与第二道密封之间的空间泄漏出来的，并被泵回到主液流中去。

这样，液流没有泄到旋转接头外，且没有造成任何停工和污染。

在36个月的运转时间里已经证明 Tazerka 油田的生产旋转接头没有泄漏。

另一方面，大多数液压控制管线的旋转接头已须更换，这是由于其最初采用的密封型式和材料，在以后发现其综合寿命比较短。在总计四个中的三个液压旋转接头已用上改进了的密封结构，这是现场经验反馈的另一实例。Cadlao 油田的液压旋转接头出现漏失促成 一个专门的试验程序。在试验中发现一种特殊的密封型式在与某种水基液压液体配合使用时会造成漏失。由于 Tazerka 的液压旋转接头曾采用了类似的密封装置，已计划进行液力旋转接头的预防性更换。用一个在室内试验中找到的密封改进型式装备起来的备用防喷器组已备妥，旋转接头的更换工作已预先计划好，以便使停工时间最短。

液体旋转接头的发展

为了向已在使用的装置提供不断的支持并改进未来的设计，SBM 有限公司自 1978 年以来积极地持续地努力发展 FPSO 系统的多通道旋转接头，为此目的，已发起了一个广泛的发展计划。

这个旋转接头发展计划的重点在于旋转接头的密封功能。这个问题已从三个方面去解决：

- 作业方面：监测海上动态和分析遇到的问题
- 实验方面：在试验装置上，在高压下试验不同型式和尺寸的密封装置；
- 理论方面：为了提高对基本概念的理解，进行磨损学的研究，诸如：
 - 密封机理
 - 在密封内和密封面上的应力分布
 - 在不同压力下和不同液体中的密封和接触材料的磨损特征。

流体旋转接头发展的试验计划

	密封直径(毫米)	额定压力(磅/英寸 ²)	试 验 次 数
试 验 台 1	915	2500	6
试 验 台 2	1100	6000	24
试 验 台 3	320	10000	23

作业经验是连续地从 Cadlao 和 Tazerka 的 FPSO 系统获得的。特别是从 Tazerka 的 FPSO 装置已获得了关于旋转接头的力矩和运动的有价值的资料。

在写这篇文章的时候，实验计划中的 48 次试验已经完成，这些试验是在三个试验台上进行的，其主要特征如下：

试验是利用石油、水和天然气（海水和防腐蚀水）完成的，情况如下：

密封直径 (毫米)	试 验 次 数		
	石 油	水	天 然 气
915	2	4	—
1100	10	6	8
320	6	12	5

试验时的不同压力如下：

不 同 压 力 (磅/英寸 ²)	试 验 次 数		
	石 油	水	天 然 气
0—1000	4	1	—
1000—1500	1	2	6
1500—3000	8	12	2
3000—4500	2	2	2
4500—6000	—	5	1
>6000	2	—	2

上述试验结果使能为特定的使用选择合理的密封装置。

在 1984 年最后一个季度，在 3 号试验台上完成了一种特殊的扩大试验（图 13）。在此期间为一个直径 320 毫米和 3000 磅/英寸² 的天然气旋转接头在一个替代的液流环境中，模拟北海 12 年来的条件下滑动的距离。试验由 70 个相同的试验程序组成，每一个程序又由下列旋度计划组成：

级 别	幅 度 (度)	振动次数	总 旋 度 (度)
1	1.6	17000	108000
2	4.3	3400	58480
3	13.2	12	634
4	360	3	1084

每个程序的总旋度：168994 度

70 个程序的总旋度：12000000 度

从两个密封装置里记录下来的最大密封液体漏失率达 3 毫升/小时，累计漏失了 0.51 升。没有记录到天然气漏失。这个试验结果表明，能够建造预期使用寿命长、安全而且可靠的高

压天然气旋转接头。

在1985年已完成了两种利用海水的相似长时间的试验：第一个是一个直径1100毫米旋转接头，试验压力为3000磅/英寸²，在4000小时里其平均漏失率是0.7毫升/小时/米。第二个试验是对一个320毫米直径的旋转接头在4500磅/英寸²压力下试验。在总旋度为1000万度和100万次循环的情况下，总的计量漏失量为0.25升。

从这些试验和从油田获得的知识被现在与不同的研究所合作进行的磨损率研究中得到的关于密封功能的基础资料所补充。

从这些理论研究中得到的结果的一个有趣的实例示于图14。此图显示借助特殊发展的有限元方法确定的密封里的应力分布，这对于弹性材料和塑性材料两者的分析都是适用的。从图形分析获得的数据对于密封概念的改进和进一步发展是为了满足海洋工业的持续增长的需要所必不可少的。

展 望

大约40个系统一年的作业经验有助于证明油轮/驳船为基础的浮动生产、储存和输送概念对于从其他边际油田或无经济效益的海上油田开采石油来说是一种实用、安全而经济的方法。

随着更多经验的取得，作业者将对于全部系统和部件的可靠性具有不断增加的更大的信心，它将促使FPSO概念更广泛的应用。对于诸如系泊立柱和高压流体旋转接头等关键部件来说尤其如此。

作者认为，虽然对于单点系泊没有理论的深度限制。但比较谨慎的石油工业界将缓慢地，然而确实地计划在今后5—7年里用它在1000米水深中进行生产。

结 论

回顾所研究的FPSO装置的实践可得出结论，即总的说来FPSO的概念是很成功的，而且每年平均停工时间少于1天。工业界看作是最关键的FPSO系统的元件（列于下），并没有造成巨大的问题或导致长的停工时间。

挠性立柱

在解决了Castellon系统早期遇到的高温问题之后，在FPSO的22个系统一年的进一步实践中已没有见到修理立柱或更换立柱的报告。

流体旋转接头

一些高压的多通道的旋转接头，诸如用于液压控制液的，已经由于泄漏而被替换，但改进了密封结构现已可观地提高了它们的寿命。在任何情况下，在一个装置的使用期限内的有计划的更换仍然需预见到，而且应采取预备措施（诸如临时旁通软管），以便使停工时间最短。

大直径的高压液体旋转接头，（例如用于井液的）现已使用了多达40个月，而且其中汇集有40个高压密封，还没有被替换的。双密封结构和漏泄回收系统是有效的。

处理船

在22个系统一年的作业实践中只有很少几天停工时间，这是由于船的移动造成，而且大

多是过于敏感的报警造成的,多数系统在运转的第一年里由于开工初期的困难问题,以至有少量停工时间。

天然气燃烧

已证明,可把天然气在贮油船上安全地烧掉。

而且也已经证明,当穿梭油轮系泊着和输送石油时,可连续地燃烧天然气。焚烧炉炉衬曾有腐蚀问题,已利用不同材料把它解决了。

系泊系统

虽然在所有安装过FPSO的地理区域里,系泊系统对于FPSO系统不是一个关键的部分,而在诸如北海这样更恶劣的环境里就有可靠性问题。在世界范围的海上的17艘船的永久性系泊系统的良好运行情况,以及从模拟北海条件的新设计的模型试验结果,说明在大多数恶劣的海洋环境中能够建造安全和可靠的永久性单点系泊系统。

参 考 文 献

1. SMULDERS L.H.,
"Six Years' Operating Experience at Ardjuna Field Helps Prove Out LPG SBS System".
Oil and Gas Journal reprint, Feb. 21, 1983.
2. EYKHOUT F. and J.A. FOOLEN,
"An Integrated Floating Production Storage and Offloading System - SALS - in 380 feet Water Depth".
OTC Paper 3142, May 1978.
3. MAGNI M. and L. POLDEVAART,
"SALS Unit Tapped for Nilde Field".
Offshore, Dec. 1979.
4. WILLIAMS L. M., D.M. PIERCE, and P. van BERKEL,
"FPSO II - A Second Generation of Floating Production System for Offshore Philippines".
OTC Paper 4274, May 1982.
5. HALL J.E. and W.S. MANUEL,
"Subsea and Process Controls for the Cadiao Floating Production System".
OTC Paper 4515, May 1983.
6. CARTER J.H.T.,
"Production System for the Tazerka Field".
-International Meeting Early Production Systems
Rio de Janeiro, Sept. 1982.
7. RIETVELD R., D. GELDERBLOM and N. BISS
"Tazerka Multiwell FPSU - The Design of Production Facilities".
SPE 11883
Offshore Europe 83, Aberdeen, sept. 1983.
8. CARTER J.H.T. and J. FOOLEN,
"Evolutionary Developments Advancing the Floating Production, Storage and Offloading Concept".
OTC Paper 4273, May 1982.
9. SCOLES L., N. QUIGLEY, and S.S. SOZONOFF,
"Tanker-Based Floating Production: Startup and Operational Experiences with FPSO II over the First 18 months."
OTC Paper 4545, May 1983.
10. CARTER J.H.T., P.G. BALLARD and G.F.M. REMERY,
"Tazerka Floating Production System: The First 400 Days".
OTC Paper 4788, May 1984.
11. D'HAUTEFEUILLE B.B., GRAMET J.C.,
"Tanker Based Production Systems for 350 meters waterdepth - DOT 1983.
12. REMERY G.F.,
"Tanker-based Marginal Field Production: Eight Years' Operational Experience".
OTC Paper 5036, May 1985.

表 1 浮式生产贮存和装卸设施由单点系泊系统系泊

地 点	作 业 者	安 装 日 期	井 数	注 入 能 力	油 轮 载 重 (吨)	船 队 号	单 点 系 泊 型 式	水 深 (米)	有 效 波 高	穿 梭 油 轮 停 泊
Ardjuna 印 尼	ARCO	8/76	无资料	无	驳船 66000	41	SBS	43	4.3	靠船舷
Castellon 西 班 牙	SHELL	8/77	1—3	无	60000	37	SALS	117	8.5	靠船舷
Nilde 意 大 利	AGIP	8/80	2	无	84000	29	SALS	96	10.0	靠船舷
Santa Barbara 美 国	EXXON	4/81	处理平台		50000		SALM	149	6.7	串接
Cadiao 菲 律 宾	TII	8/81	2	天然气举	127000	45	SBS	97	9.2	串接
Tazerka 突 尼 斯	SHELL	11/82	8(5口在 生产)	有	210000	35	SALS	140	10.0	靠船舷
Caroupa 巴 西	PETROBRAS	11/83—7/85	无资料 水下管汇	无	55000		SBS	120	8.4	单独的 单点 系泊
Aterm, Ebughu, Adang 尼 日 利 亚	ASHLAND	85年底	井口平台	无	285000		软连 接杆	42	5.4	串接
Kakap 印 尼	MARATHON	86年初	井口平台	天然气	140000		SBS	85	5.2	靠船舷
Jabiru 澳 大 利 亚	BHP	86年中	1—4	天然气举	140000		立柱 转台	119	8.5 5.5	可脱开 串接 连接

在使用中的液流旋转接头(SBM有限公司设计)

应 用	通道数及尺寸(英寸)	密封直径(毫米)	密封数	额定压力(磅/英寸 ²)			到85年10月1日为止 作 业 月 数
				设 计	试 验	作 业	
Udang							
原油	1×8	1100	8	1700	2550	200	66+9
燃料气	1×8	1100	8	1700	2550	200	9
液压液	6×1/2	230	12	3000	4500	—	66+9
Cadiao							
新采出原油	2×6	1100	8	3000	3600	200	49
服务	2×6	1100	8	3000	3600	270	49
液压液 I	12×3/8	320	24	5000	6000	2700	11+20+18
液压液 II	12×3/8	320	24	5000	6000	2700	11+20+18
Fulmar							
原油	1×16	1600	4	275	413	—	42+1
Tazerka							
新采出原油	5×4	1100	20	3000	4500	250	35
备用	1×4	1100	4	3000	4500	250	2
液压液 I	10×1/2	320	20	5000	6000	3000	8+7+20
液压液 II	10×1/2	320	20	5000	6000	3000	31+4
Ardjuna							
液化石油气	1×8	200	2	275	350	235	110
燃料气	1×8	800	6	170	350	165	110

表 2 到1985年10月1日止总生产和停工数字

	作业月数	产 品	总 产 量	总停工时间(小时)	装油次数
Ardjuna	110	液化石油气	1420万桶	无	150
Castellon	98	原油	1400万桶	87*	多于110
Nidle	45	原油	—	—	—
Cadlao	45	原油	680万桶	69	20
		水	450万桶		
		天然气	20亿英尺 ³		
Tazerka	35	原油	900万桶	52**	26**
Garoupa	21	原油	1310万桶	无	主要通过管线
		天然气	68亿英尺 ³		

* 扣除换管线,焚化炉修理,回接井和服务作业造成的停工时间。

**资料统计至1985年10月1日。

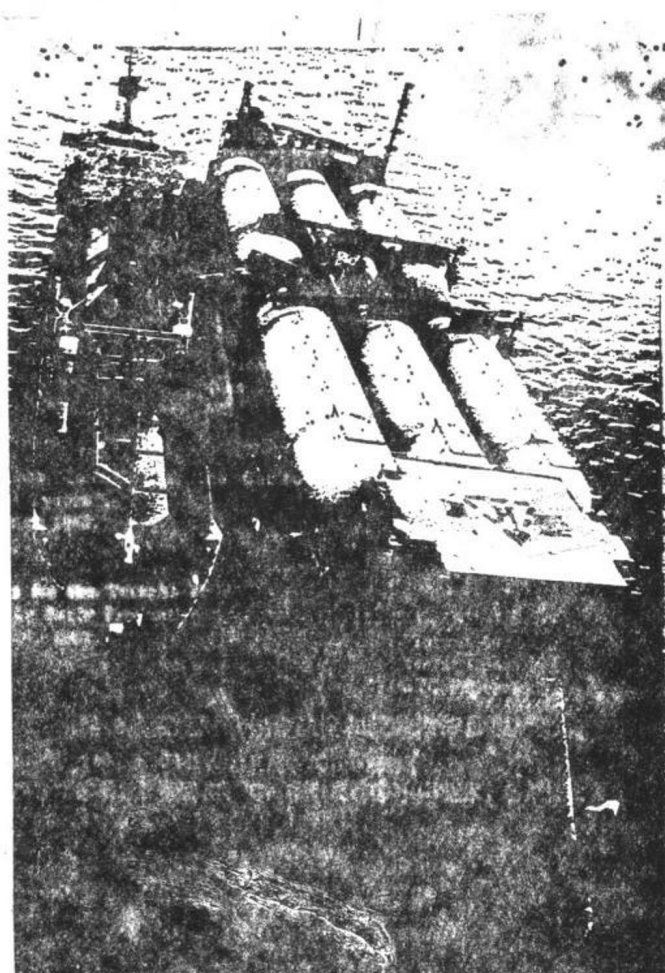


图 1 ARDJUNA油田的液化石油气设施

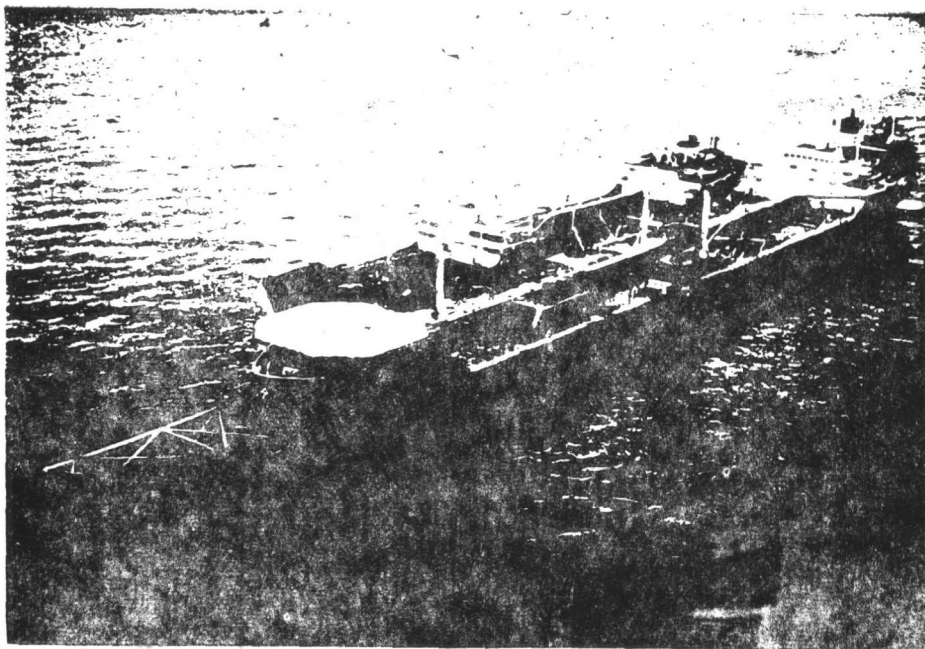


图 2 CASTELLON油田的FPSO设施

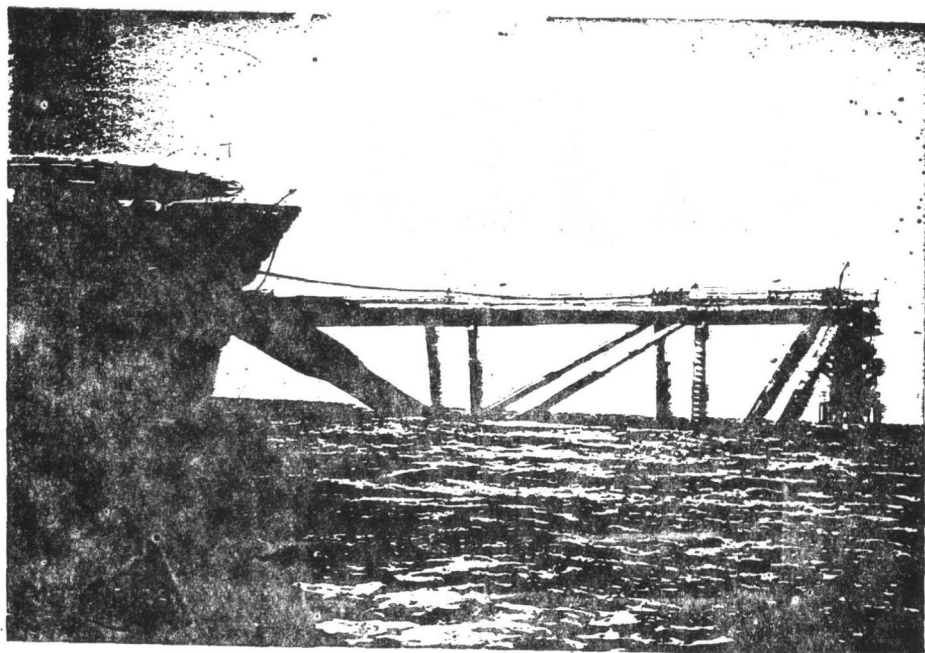


图 3 NILDE油田FPSO设施

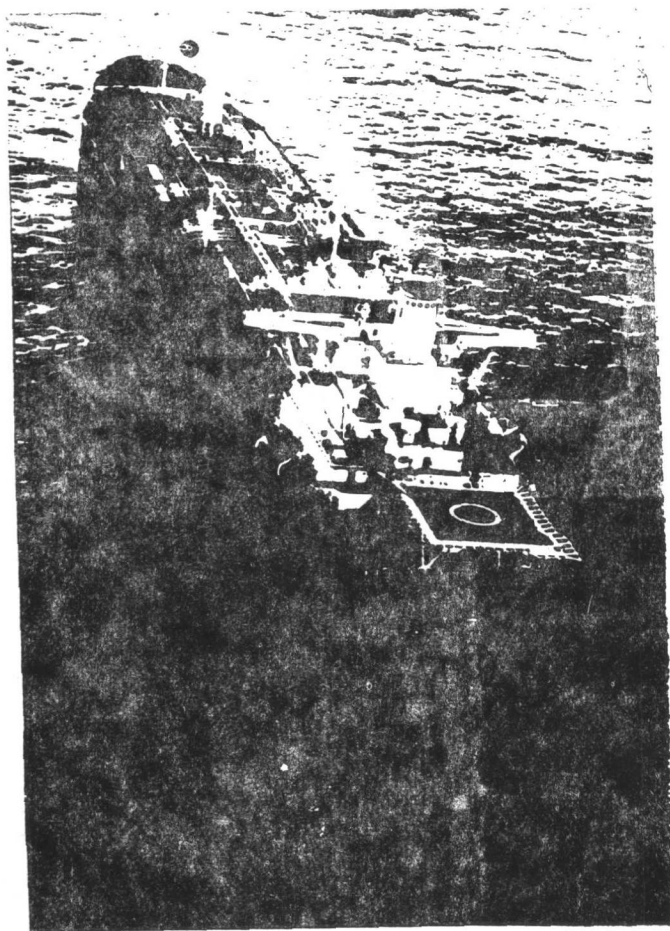


图 4 CADLAO油田FPSO设施