

文章编号 :1001 - 4500(2006)05 - 0001 - 06

FPSO 转塔系泊系统的技术特征及发展趋势

刘志刚 ,何炎平
(上海交通大学 ,上海 200030)

摘 要 结合国外设计研究成果 ,系统地阐述了目前 FPSO 转塔系泊系统的技术特征和适用范围 ,并列举了几种新型转塔系泊形式 ,同时对研究中的热点问题进行了探讨 ,以探索转塔系泊的发展方向。

关键词 转塔系泊 ;技术特征 ;发展趋势
中图分类号 :P75 文献标识码 :A

1 引言

FPSO 即浮式生产储油轮 ,始现于 1977 年 ,一般适用于 20m 至 2000m 不同水深和各种环境下的海况。实践证明 ,由于 FPSO 具有移动灵活、适应性强、储油量大、投产快、投资低、可重复使用等极具竞争性的特点 ,它已成为最常用的海上油田开发手段。即使是在海洋平台盛行的墨西哥湾 ,也将于 2007 年在 Ku - Ma - loob - Zaap 油田中首次使用 FPSO 采油。FPSO 主要由船体、油气生产处理模块和水下单点系泊系统三部分组成 ,其中单点系泊系统是影响 FPSO 安全性的关键技术所在^{[1][2]}。

在 FPSO 所采用的各种系泊系统之中 ,单点转塔系泊系统的应用最为广泛。据统计 ,截至 2006 年 2 月 ,全球现役的、在建或维修改造的、签约建造的 FPSO 及 LPG FPSO 的数量已超过 140 艘。在统计到的 133 艘 FPSO 中 ,使用各种转塔系泊系统的达 77 条 ,约占 58%(见表 1)。针对转塔系泊系统应用需求不断增长的现状 ,本文结合国外设计研究成果 ,系统地阐述了目前 FPSO 转塔系泊系统的技术特征和适用范围 ,并通过列举新型转塔系泊形式、探讨设计研究中的热点问题的方式 ,来探索转塔系泊的发展方向。

表 1 FPSO 系泊类型不完全统计表

转塔系泊系统			其他单点系泊系统				扩展性	动力定位	总计
内转塔	外转塔	立管式	软刚臂系泊	悬链锚腿系泊	单锚腿系泊	三脚悬链系泊	系泊系统	系统	
IT	ET	RTM	SYM	CALM	SALM	TCMS	SM	DP	
55	19	3	10	5	2	1	36	2	133
77			18						

2 转塔系泊技术的起源及特点

上世纪 80 年代早期 ,SBM 公司首次提出了一种基于“ 风标效应 ”原理的转塔概念 ,并于 1985 年在一艘 14 万吨的浮式储油轮的船艏安装了一个外转塔 ,正式将这一概念应用于实际。一年后该公司又进一步开发了外转塔可解脱立管系泊系统 ,并将其应用于澳大利亚西北海岸飓风区的 Jabiru 油田开发中 ,由此开启了研究开发转塔系泊技术之门^[3]。

转塔系泊的工作原理与其他单点系泊方式一样 ,也是将 FPSO 通过一定的连接方式固定在海上的系泊点上 ,使之可随风、浪和水流的作用进行 360°全方位的自由旋转 ,形成风标效应 ,以规避风浪带来的破坏力 ,从而降低系统在风浪流外界干扰力作用下的环境载荷和运动响应。转塔系泊系统主要由转塔、液体传输系

收稿日期 2006-03-14
作者简介 :刘志刚 (1981 ~)男 ,硕士生。
基金项目 :上海高校优秀青年教师后备人选科研项目。

统、转塔旋转系统或转台、界面连接系统这四个部分组成。其中转塔既是 FPSO 的系泊点,也是立管和其他脐带系统经海底到达船体甲板的通道口,它与甲板设施相对固定的特点保证了在复杂海况下 FPSO 也能与海底井口之间实现不间断的油气输送,是转塔系泊技术的核心所在^[415]。与其他众多的系泊方式相比,转塔系泊系统具有如下优势 (1)结构简单 (2)受波浪影响小,适用于恶劣海况条件 (3)适用于各种水深的海域 (4)具有快速的解脱和回接功能,便于维修。

3 转塔单点系泊系统的类型及技术特征

目前世界上主要的转塔供应商有挪威 APL 公司、荷兰 Bluewater 公司、挪威 Maritime Tentech 公司、荷兰 SBM 公司以及美国 FMC SOFEC 公司。由于供应商的不同,转塔的设计也不相同。按转塔所处位置的差异,转塔系泊系统可分为两种外转塔式(External Turret(ET))和五种内转塔式(Internal Turret(IT))类型,见图 1。现逐一介绍各型式转塔的技术特征和适用范围。

3.1 外转塔单点系泊技术

传统的外转塔系泊系统如可解脱立管式转塔系泊系统(external Disconnectable Riser Turret Mooring system(RTM))(图 2),最早出现于 1986 年,主要由外伸转塔、铰接头连接器、圆柱形系泊立管、系泊链、万向接头、旋转接头及机械连接装置组成。其优点是投资省、易制造和拆迁、具有解脱和回接功能。不足是系统在解脱后,立管由于富余浮力的存在受波浪的影响较大,不利于回接。

经过近 20 年的发展,外转塔系泊系统已经有了很大的改进。目前所使用的外转塔多为悬臂式转塔(External Cantilevered Turret(ECT))(图 3),这是一种永久系泊系统,其主要特征是在船艏或船艉有一个大的可安放旋转轴承和转塔的外伸悬臂钢结构,这种支撑结构使得转塔脱离水面。悬臂式外转塔系泊系统主要由一个带柔性立管和系泊终端的转塔组成。它的优点是无需将船体拖至船坞内进行大范围的改装、便于转塔的维修与检查、建造周期短、经济,缺点是外伸悬臂结构过长,同时转塔位于水面之上使得柔性立管和脐带系统的上部受波浪的影响较大。一般应用于浅海小油田以及中等以下海况的作业区。

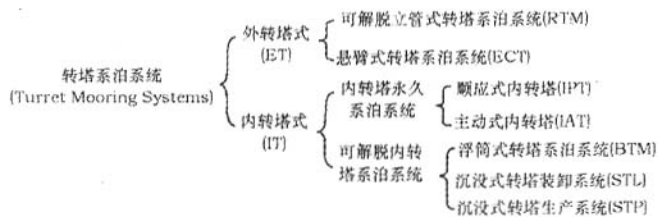


图 1 转塔系泊系统的种类划分

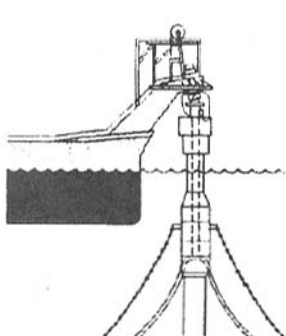


图 2 立管式转塔系泊系统 (RTM)

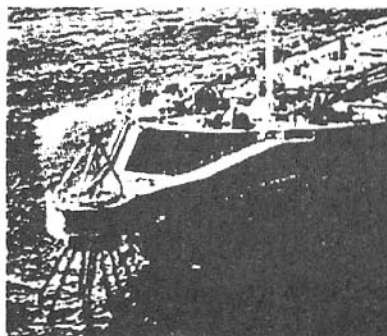


图 3 悬臂式转塔系泊系统 (ECT)

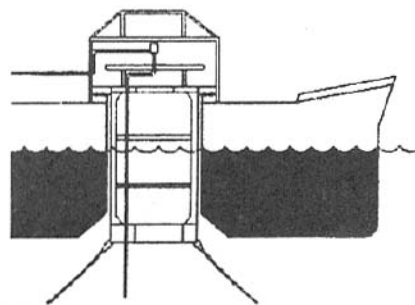


图 4 内转塔永久系泊系统

目前世界上最大的外转塔是由 FMC SOFEC 公司设计建造的 Fluminense FPSO 悬臂式外转塔,它于 2003 年 8 月安装在巴西坎普斯湾的 Bijupira and Salema 油田上。转塔可供 18 根立管和脐带系统,每条系泊腿均由直径为 154mm 的聚酯绳索组成。在卸载工况下,单点系统能经受住 36 万吨 FPSO 和尾输穿梭油轮所产生的系泊力。

3.2 内转塔单点系泊技术

在 FPSO 所采用的系泊系统中,内转塔系泊系统的应用最为广泛。表 1 的统计数据表明,超过 1/3 的

FPSO 采用内转塔系泊系统。深入的调查数据显示,在最近 10 年建造或改装采用单点系泊的 FPSO 基本上都是内转塔式。内转塔系泊装置一般设在船艏,其优点是转塔直径可设计得很大,以便为布置设备和管汇提供足够的空间;内转塔嵌入船体之中后得到很好的保护。不足之处有二:一是转塔的存在对船体结构造成了影响,也减少了舱容;二是系泊船的“风标效应”效果受转塔位置的制约。一般适用于在中等程度到恶劣海况区以及深水区作业,如墨西哥湾、北海、北大西洋、中国海以及巴西、澳大利亚和新西兰外海等。内转塔系泊系统一般可分为内转塔永久系泊系统和可解脱内转塔系泊系统。

3.2.1 内转塔永久系泊系统

在海上油气开采中,作为生产和储存原油之用的 FPSO,实际上是一个海上油气加工厂,它在作业年限内极少离开作业油田。为保证采油的连续性,作业者往往希望 FPSO 在作业年限内的任何工况下都能正常工作,内转塔永久系泊系统(如图 4)正是基于这一目标而设计的。它大多采用百年一遇风暴作为设计工况,使得系泊系统即使在最恶劣海况下也可提供足够的风标效应效果和系泊力,从而保证 FPSO 在绝大多数工况下具有最大的系泊和油气传输能力。按产生风标效应效果的强弱,可分为顺应式内转塔和主动式内转塔,二者的差别见表 2。将于 2007 年应用在巴西坎普斯湾 Marlim Leste 油田上的顺应式转塔系泊系统将是世界上最大的内转塔系泊系统,它可容纳的软管数量达 75 根,采用 9 根聚脂纤维绳索与锚链相组合的系泊腿来系泊。

表 2 两种内转塔永久系泊系统差异比较

	轴承类型	旋转锁紧系统	液体传输系统	特点
顺应式 IPT	滚柱轴承系统	无	多通道旋转接头	转塔在转动时不受约束。可做 360 度自由旋转、无锁紧能力,不利于转塔维修
主动式 IAT	滑动衬垫轴承系统	液压钳或液压动力油缸	旋转接头或牵引链	可通过锁紧装置控制船体的运动,可避免船体在卸载情况下的突发运动。当采用牵引链作为液体传输系统时,FPSO 仅可做 270 度旋转

3.2.2 可解脱内转塔系泊系统

可解脱内转塔系泊系统具有快速的解脱和回接功能,在极端恶劣条件下可以迅速解脱以规避各种危险海况,更适合于恶劣环境、季节性飓风区和冰区。可解脱内转塔系泊系统多采用内转塔浮筒形式,这种形式允许整个单点系泊系统在海上提前安装,从而缩短了 FPSO 回接的时间。为了不影响 FPSO 在工作年限内的正常作业,近年来所使用的可解脱内转塔系泊系统,也逐渐采用百年一遇海况下 FPSO 不解脱条件进行设计,使得系泊系统具备了台风不解脱的功能。2002 年 7 月在文昌 13-1/2 油田投产的“南海奋进”号以及 2003 年 7 月在番禺 4-2/5-1 油田投产的“海洋石油 111”号的内转塔系泊系统,均采用了此项设计。常见的可解脱内转塔系泊系统有三种,浮筒式转塔系泊系统、沉浸式转塔装卸系统和沉浸式转塔生产系统。

浮筒式转塔系泊系统^[6](图 5)是 RTM 系统的进一步发展,它由一个嵌入到船艏的内转塔和一个“蜘蛛”形系泊浮筒组成,两者通过结构连接器连接。浮筒包括浮筒体和系链台,浮筒体能提供足够的浮力以承受系泊腿和立管的重量。系泊力的传递是通过底部的滚珠轴承传到系泊浮筒上的。当系泊船解脱时,该浮筒由于锚链的重量下沉至水面以下 30m 位置,由一浮标表示其位置。回接时在船艏把浮标抬起,从船底通过绞车经转塔通道拉起,完成与转塔的连接。作为早期的系泊产品,BTM 的优点是在恶劣海况下能靠近管汇、液体旋转接头和其他关键性部件进行维修保养,转塔安装可在坞内进行,可减少海上现场安装工作量。缺点是浮筒体露在船底的外面,在恶劣海况下浮筒的受力加剧,不适用于更高海况的深水油田。

自 1993 年首次使用以来,沉浸式转塔装卸系统(Submerged Turret Loading(STL))已被广泛应用在北海、挪威海、帝汶海的八个油田中,它代表着海洋装卸技术领域的发展水平。STL 系统由水下浮筒和一个完整的转塔系统组成,其核心就是系泊于海底的浮筒。该浮筒体不同于 BTM 中的蜘蛛浮筒(见图 6),为圆锥形,在回接时,浮筒嵌入到船体底腹部的锥形浮子穴内,完成耦合式的安装连接。浮筒内部是连接系泊链和立管系统的转台。安装后浮筒的外部结构可以和船体一起绕转塔自由旋转。解脱后,浮筒将漂浮在水中。主要特点是:能在有义波高 5~6m 的海况下连接;可在任何气候下的解脱;具有简单快速的解脱和回接功能;标准

化设计使之在与油船的安装时有一个良好的界面,灵活的系泊系统,最小的原油溢出风险,安全性高。STL 系统可以在水深 85~350m、有义波高至 16.4m 的海域安装,它是一种灵活、安全、经济的海洋油气装卸方式,适用于深水、浅水、浮冰区,还可作为输入输出的终端^[7]。

作为 STL 系统的进化产物,沉浸式转塔生产系统(Submerged Turret Production (STP))^[819](图 7)于 1997 年首次被安装在中国陆丰 22-1 油田上,它是 STL 转塔和系泊技术与多功能旋转接头相结合的产物,是一个集系泊系统、转塔装置和旋转接头为一体的新一代内转塔式单点系泊系统。STP 系统由带有完整转塔系统的 STP 浮筒、与 STL 相仿的系泊系统、安装和捕捉

STP 浮筒的船上工作系统以及万向旋转接头组成。其中多功能旋转接头是 STP 系统的关键组成部分,它由生产集液旋转接头、电刷接头、液压控制接头和电信号接头自下而上搭接而成,是将井口油、水、气、信号和电力从与地球相对位置不变的立管内传至船上管道系统的唯一通道。STP 的特点 (1)标准化的 STP 浮筒设计 (2)能为船体提供充分的风标效应效果 (3)立管和脐带系统所占的空间及数量可调节 (4)船体改装简易,结构影响小,且改装时间短、成本低 (5)万向旋转接头可自由转动,不需要驱动机构。水下转塔生产系统由于其布局紧凑、结构简单灵活的特点,适用于深水、浅水、浮冰区及需要快速解脱的作业环境,近年来在 FPSO 系泊领域得到了广泛的应用。据挪威 APL 公司统计,现已安装或即将安装 STP 系统共 8 个,其中 4 个是计划

为进一步说明各转塔系泊系统的应用情况,表 3 列举出了各种转塔系泊系统安装使用的实例。

表 3 各种转塔形式的应用实例

	可解脱立管式	悬臂式外转塔	顺应式内转塔	主动式内转塔	BTM	STL	STP
作业油田	Jabiru	Bijupira and Salema	Marlim Leste	Gryphon	惠州 21-1	Fulmar	陆丰 22-1
作业者	Newfield	壳牌	巴西石油	科麦奇	CACT	壳牌	挪威石油
油田位置	澳大利亚帝汶海	巴西坎普斯湾	巴西坎普斯湾	英国北海	中国南海	英国北海	中国南海
作业水深 (m)	122	800	1080	110	116	83	330
FPSO 特征	Jabiru Venture 144 000dwt	Fluminense 357 000dwt	P-53 FPSO	Gryphon A	南海发现号 250 000dwt	Aframax	Navion Munin 100 000 dwt
设计者	SBM	FMC SOFEC	SBM	Maritime Tentech	SBM	APL	APL
安装日期	1986	2003	2007	1993	1990	1993	1997
备注	世界上第一座转塔	世界上最大的外转塔	世界上最大的转塔	该转塔形式的首次应用	该转塔形式的首次应用	该种塔形式的首次应用	该转塔形式的首次应用

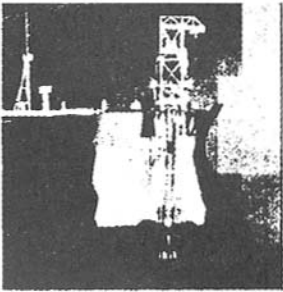


图 5 浮动转塔系泊系统

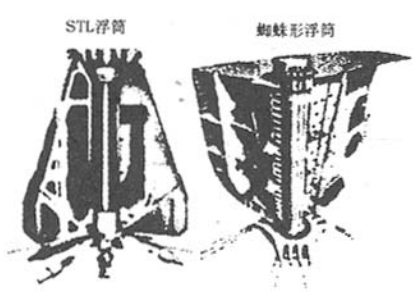


图 6 浮筒结构形式比较

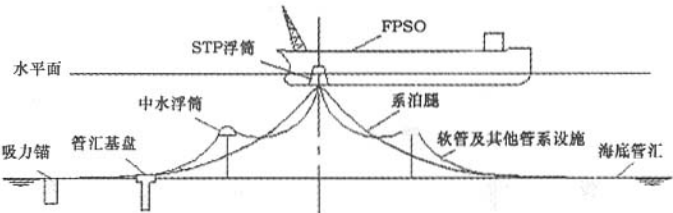


图 7 水下转塔生产系统(STP)

4 新型转塔式单点系泊技术

现有的内转塔系泊系统如 STP 系统虽然系泊性能优越,基本上较好地满足了人们的需求,但仍有不足之处需要进一步的改进。如转塔位置影响了船体的风标效应效果,减少了船体结构应有的连续性,转塔和浮筒被船体环绕不利于维修保养,转塔的大小限制了立管的数量、不利于大型油田的开发等。基于这些问题,一些技术公司进一步开发了新型的系泊系统。

4.1 新型卸载系泊技术(HiLoad MV)

挪威 Remora 装置公司设计的专利产品 HiLoad MV(图8)是一个为永久油田基地的油船如 FSO 提供系泊的转塔系泊系统。该系泊装置自身配备有卸油时所必须的设备和传输系统,它将卸载和定位功能溶于一体,因此可直接为常规油轮提供油气输送任务。系泊时,油轮系泊力的传递是通过油轮与装置之间的摩擦实现的。Hiload MV 有足够大的摩擦面积,因而可降低船体接触区额外增加的应力水平,以保证船体接触区的强度。该形式的转塔能容纳相当数量的立管,在安装和维修中能将转塔提至水面,而在 FPSO 到达之前可对转塔系泊系统和立管进行预安装,同时具备快速解脱的能力。该装置最大的特点是不需要对船体进行修改或加强,也不会因此而减少储藏容量。同时减少了爆炸的风险,提高了安全性。适用于任意深水。

4.2 超大型转塔系泊技术(The Very Large Turret(VLT))

在传统的转塔系泊系统中,立管密集度、可用转塔空间、轴承大小及承载能力都限制了由转塔进入 FPSO 的立管数量,也限制了油田开发的规模。然而,近年来随着 FPSO 产能的增加,要求立管在数量和尺寸上也有相应的增大,基于此种考虑,美国 FMC SOFEC 技术公司提出了一种能包含 100 根立管以上的经济型超大型转塔系泊系统概念^{[10][11]}。

VLT(图9)由能承受大动力载荷的轻质灵活的转塔结构、大面积的主甲板结构、轴承系统、旋转系统、系链台和 I 形管组成。与现有小型转塔系泊系统相比,VLT 保留了风标效应的优点,同时由于主轴承尺寸的加大使当前转塔系泊船处理立管的能力也加倍。VLT 技术中,关键的突破点在于支撑转塔的轴承的尺寸和形状的变化。它的主要特点是海底管汇较少,每立管转塔重量比低;系泊腿的归组处理使得立管通道开阔,没有立管交叉;垂向轴承、径向轴承和下轴承简单的结构形式为检查和保养提供了方便的通道;拆换轴承方便,无须干扰转塔作业;建造中模块建造方法的应用和低精度公差要求节省了资金和时间。适用于水深 500 ~ 3000m 或对“风标效应”效果要求很高的复杂海况和日产量为 10 万 ~ 25 万桶及以上、需要立管数 40 ~ 120 根的大型 FPSO 深水开发中,以及未来需要大容量能力 FPSO 的油田阶段开发中。

5 转塔系泊系统的研究热点与趋势

随着 FPSO 作业水深的增加和油田开采规模的扩大,转塔系泊系统的稳定性和适应性越来越引起人们的关注。首先,水深的增加直接导致转塔的系泊腿变长,增大了系泊的不确定性。这种系泊的不确定性表现为深水船舶的系泊刚度减弱,船舶的非线性水动力作用增强,系泊船呈现出低速、低频、大漂角以及大的横向位移的运动特征,而其中船舶的低频运动是影响系泊系统、立管系统安全设计的关键要素^[12]。其次,油田开采规模的扩大意味着连接海底井口和船上设施的立管和脐带系统数目的增多,这对转塔的尺寸有了更高的要求,同时也需要转塔在空间布置上更为合理。此外,深水化、大型化造成了转塔、系泊链、立管和其他与海底相连的脐带系统等自重的增大,这极大地考验了转塔轴承系统的现有承载能力,并将对船体的风标效应效果产生影响。为解决这些难题,科技工作者对转塔系泊系统进行了不断的改进,在系泊形式上开发了轻

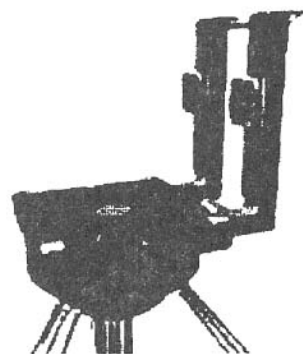


图8 Saipem 7000

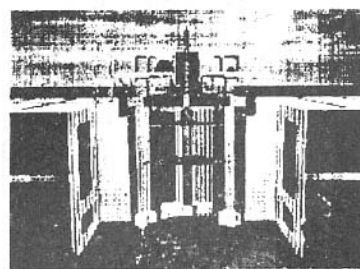


图9 超大型转塔

质、高强度、高耐腐性的聚脂纤维与锚链相组合的系泊系统,同时还尝试在船体上配备动力定位技术,以提高 FPSO 作业的稳定性。在转塔内部的布置上采用成组技术,使内部结构更为条理化。这些都为转塔大型化发展提供了必要的技术支持。

6 结束语

随着海洋石油开发的深水 and 超深水化发展、海洋油田大型化发展、FPSO 作业环境的复杂化演变,作业者对 FPSO 系泊的安全性和经济性要求也愈来愈高。以“风标效应”原理的转塔系泊系统作为一种先进的单点系泊技术很好地满足了这一要求,并能适应海洋油气开采环境变化的需要,在实际应用中得到了不断的改进,并广泛应用于世界各大海上油气开采领域,逐渐发展为一系列以转塔为典型特征的、适应不同海洋环境的转塔系泊系统。与国外这种蓬勃发展的局面相比,我国在转塔系泊技术领域的开发研究明显不足,目前尚不具备独立设计研制的能力。

参考文献

- [1] I - K. Park, H - S. Shin, H - W. Chung, J. W. F. Beek. Development of a Deep Sea FPSO Suitable for the Gulf of Mexico Area [J]. OTC13999, OTC34, 2002.
- [2] M. W. J. Wyllie. Fast Track FPSOs for Deepwater and Ultra - Deepwater [J]. OTC16708, OTC36, 2004.
- [3] Mace A. J. Hunter K. C. Disconnectable Riser Turret Mooring System for Jabiru's Tanker - based Floating Production System [J]. OTC5490, OTC19, 1987.
- [4] Christoph Vogt, Martin L. Goodman, J. A. Han. Turret Mooring System: The Key to Oil Production in the Extreme Atlantic Frontier [J]. OTC10957, OTC31, 1999, 2(II); 241 - 254.
- [5] LT England, A. Duggal, A. Queen, "A Comparison Between Turret and Spread Moored FPSOs for Deepwater Field Developments", Deep Offshore Technology 2001.
- [6] 袁涛生. 惠州油田的开发与浮式生产系统 [J]. 中国海上油气(工程), 1991, 3(4); 15 - 23.
- [7] J. P. K, G. O. H. Submerged Turret Loading Buoy based Offshore Gas Receiving Terminals for LNG and CNG [J]. OTC16579, OTC36, 2004.
- [8] 房晓明. 文昌油田单点系泊系统海上安装 [J]. 中国海上油气(工程), 2003, 15(1); 1 - 11.
- [9] Aanesland V. Skjastad O. Vinje T. Major F. Basic features of the Submerged Turret Production (STP) concept [J]. OTC8444, OTC97, 1997.
- [10] Very Large Turret [J]. Journal of Offshore Technology, 2003, 11(6); 16 - 19.
- [11] Charles Garnerio, Caspar Heyl, L. Terry Boatman, Jerry McCollum. The VLT: A Single - Point Mooring for 100 + Risers [J]. OTC15069, OTC35, 2003.
- [12] Shin H, Kim T, Lee H, Kim J. A hybrid approach for turret deepwater mooring system [C]. Deepwater Mooring Systems Concepts, Design Analysis, and Materials, 2003; 227 - 238.

THE TECHNICAL CHARACTERISTICS AND DEVELOPMENT TREND OF FPSO TURRET MOORING SYSTEMS

LIU Zhigang, HE Yanping

(Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200030 China)

Abstract : In this paper, the technical characteristics and application field of each current FPSO turret mooring systems are systemically summarized. To seek for its future development trend, some new type turret mooring systems are expounded and hot topic on turret mooring systems is discussed.

Key words : turret mooring, technical characteristics, development trend