

# 八年狂风巨浪的考验

## ——记我国海上第一个超百米水深级南海文昌油田开发工程

□ 通讯员 曾洁 王朋来 本报记者 王学健

屹立于我国南海的文昌油田，是我国海上自营开发的第一个水深超过100米的油田。该油田所处的南中国海被公认为世界上受台风影响最大的海，比墨西哥湾的环境条件还要恶劣。该项目设计、建造、安装的大型导管架及上部平台，永不解脱内转塔式单点系泊装置及FPSO和耐高温抗屈曲双层海底保温管道、海底电缆等技术，经过多次强台风考验，设备运转正常，证明这种技术在南海海域有极广的应用前景，在西江23-1、番禺4-2、番禺5-1、新文昌等多个油气田的开发中得到推广应用。

文昌油田经历8年狂风巨浪的考验，至今安然无恙。

有关专家表示，文昌油田的成功开发为中国海油在东海、南海超百米的广阔南海油气资源的开发积累了极其宝贵的经验，为中国海油的持续高速高效发展作出了巨大贡献。

### 向深水海域油气田开发进军

全球超过70%的油气资源蕴藏于海底，而海洋深水区域潜在的石油储量高达几百亿吨，深水已经成为并将继续成为全球油气资源接替的主要领域。我国具有广阔的深水海域且油气资源丰富，我国南海深水区域油气资源量期望值非常高，仅对南海中南部14个盆地的勘探发现，石油地质资源量63.31亿吨，可采资源量18.84亿吨，天然气地质资源量3.8万亿立方米，可采资源量2.26亿立方米；而南沙海域，包括16个新生代盆地，总面积70万平方公里，我国传统疆界内面积52万平方公里，总资源量570亿吨，属于我国传统疆界内的资源量有350亿吨，油气资源极其丰富！

为确保国家国民经济发展对能源需求的安全，早在上个世纪90年代，中国海洋石油总公司就开始把向深水海域进军作为能源发展战略，确定“向海洋深水进军，向深水技术挑战！”“关注深水能源开发，关注人类未来发展！”

中国海油过去一直在水深比较浅、海洋环境条件相对较平稳的渤海湾和东海以及南海浅水海域进行勘探、开发，而对于水深超过100米的深水海域既没有作业经验，同时又缺乏深水作业的大型装备，加上南海中国海属于台风影响区，具有风大、浪高、流急的特点，文昌油田所处海域百年一遇最大风速为65米/秒，百年一遇最大波高为20.8米，百年一遇最大流为2.33米/秒，可以说是排在世界台风频发区之冠；南海中国的内流发生也较为频繁，最大波致流速度2米/秒；此外，复杂的海底地质，如沙脊沙波也会对海洋工程设施造成灾难性影响，所以南海深水海域油气开发工程建设基本上是外国石油公司的一统天下！

文昌13-1、13-2油田是1998年中国海油在南海海域自营勘探发现的第一个超百米水深级的大油田，东距海南省文昌市约140公里，水深117米。

为开发深水海域油气资源，培养中国海油从事深水油田开发工程设计与施工队伍，中国海洋石油总公司决定用自己的设计和建造力量完成文昌油田的开发工程。

### 工程可抗百年一遇台风 具有很高安全可靠

文昌油田开发工程于1999年3月启动，中海石油研究中心负责该油田的可行性研究、总体开发方案(ODP报告)编制和基本设计；海洋石油工程股份有限公司作为工程总承包，负责整个工程的详细设计、陆地建造和海上安装(见图1)。

陆上开发工程包括：(1)自行设计、建造、安装2座高达128米的四腿大型导管架及上部装有修井机的群桩桩基式无人驻守井口平台，可保证平台在百年一遇强台风恶劣海况条件下的安全可靠。

(2)创新思路，首次建成的我国第一座具有抗强台风功能的永不解脱内转塔式单点系泊装置。在设计海上浮式生产储油装置(FPSO)上部模块与船体主甲板连接时，首次采用滑移连接加装限位挡块的结构，克服了恶劣海况造成船体大变形时对上模块结构强度寿命的影响。通过对与抗台风相关的船体和系泊系统联接件、锚腿布置、水下柔性立管和脐带缆系统等进行的深入研究，为改善FPSO的运动特性，增强系统的抗风浪能力，提出将国内普遍采用的均匀布设9条单点系泊缆，改为按3个方向，在每个方向集中布设3条系泊缆的新思路；采用全新的FPSO船体设计：增加艏部防浪墙；增加几十种工况船体强度计算与模型试验；优化单点与船体连接；取消FPSO自航装置以改善船体主尺度等工作，使得15万吨级FPSO可在不解脱的情况下抵抗百年一遇的强台风环境条件(见图2)。

(3)自行设计、建造、铺设了2条长度6.8公里的耐高温抗屈曲双层海底保温管道和2条海底电缆，整个设施年

产处理能力达400万吨。

在各方努力下，文昌13-1油田于2002年7月7日一次投产成功。

### 开创多项自主知识产权技术

该油田开发工程建设共申报拥有自主知识产权13项，其中：发明专利6项，实用新型专利5项，软件著作权2项。其中1项专利已成功在美国申报发明专利。

文昌油田的主要技术创新表现在：**1.创新的抗台风永不解脱内转塔式单点系泊系统的设计及不间断生产技术**

单点系泊系统是连接海上生产设施浮式生产储油装置(FPSO)的重要组成部分，它具有两大功能，一是将FPSO系泊于固定海域，保证FPSO根据风浪方向绕单点系泊旋转；二是通过软管和电缆与FPSO相连，起到输送油流、电力与通讯的纽带作用(见图3)。

国外对如何在强台风海况条件下使用FPSO的经验非常少，几乎没有可借鉴的工程实例，南海多个国际合作油田开发中外方石油公司所使用的FPSO均采用可解脱式单点系泊系统，一旦台风来临就提前将FPSO与单点系泊系统解脱并驶离台风作用的海域，台风过后再来重新与单点连接，造成油田被迫停产。据不完全统计，一次台风过程油田要停产20天左右，FPSO要驶离单点和重新与单点回接，影响正常生产损失很大；而FPSO解脱与驶离均需要多艘大型辅助工作船配合，大大增加了油田作业费用，每年台风次数频繁时，油田生产作业时效很低，安全性也比较差。

在确定文昌油田开发模式时，我国科技工作者首次提出了大型FPSO系泊抗台风永不解脱方案，这个方案严峻的技术挑战在于：

1)系泊装置将要承受15万吨级大型浮动工厂在台风以及催生的狂浪中所形成的巨大冲击力，并将FPSO可靠地系泊在设定位置上。

2)被系泊的FPSO这个15万吨级的海上浮动工厂的结构强度与运动特性，在与船体连接方式上采用了新的结构。内转塔装置是靠系泊缆通过吸力锚固定在海底，为了提高锚腿抗风浪能力，研究人员认真分析了南海风浪流的方向极值，大胆地改变了世界通常采用的九缆均布式，提出三组三缆组合式的创新思路，为抗台风永不解脱系泊系统打下了可靠的基础。

我国科技工作者全面分析了世界当时使用的各种单点系泊系统的特点，在传统内转塔式系统的基础上进行了优化，重点强化了转动装置的荷载传递能力，在与船体连接方式上采用了新的结构。内转塔装置是靠系泊缆通过吸力锚固定在海底，为了提高锚腿抗风浪能力，研究人员认真分析了南海风浪流的方向极值，大胆地改变了世界通常采用的九缆均布式，提出三组三缆组合式的创新思路，为抗台风永不解脱系泊系统打下了可靠的基础。

为了进一步改善FPSO在系泊状态下的运动性能，减小受风面积，我国科技工作者进行了几十种工况，包括系泊系统、立管与脐带缆系统在内的全面的数模分析与水动力模型试验分析，优化了总体布置、船型尺度与防浪结构。对于总长达100多米的的上部生产模块与船体主甲板连接，首次采用滑移连接与限位挡块的结构型式，有效避免了在狂浪巨浪中船体较大变形对生产模块产生的不利影响。

水下浮筒支撑的海底固定可采用水下立柱方式。为保证水下锚腿垂直度与方向角安装的精度误差在许可范围内，需要在插桩、打桩过程中对桩进行导向、扶正。我国科技工作者自行研发了“水下打桩导向架”，并已申请发明专利。

文昌油田有两座井口平台，除生产工艺设施外，还有相应的辅助生产用系统。该油田井口平台设计成在正常生产状况下无需人员驻守的井口平台，不设生活住房，每个平台设有临时休息室。遇到强台风袭击时，虽然人员全部撤离，但在无人值守的情况下生产设施的运行可

由岸上生产指挥中心进行遥控操作，真正实现安全不停产，有效提高年生产作业率。

文昌油田FPSO自2002年7月投产

以来的8年间，经历过几十次强台风袭击，其中有3次为风速达65米/秒的飓风。经检测，油田各种设施功能正常。实践证明，我国科技工作者创新的这种永不解脱系泊技术装置，为南海深水海域油田开发做好了技术储备。

这种系泊技术和软管连接技术为今后我国南海深水浮式平台工程技术的发展开拓了思路，奠定了工程实践经验。该项整体开发技术获得了2003年度中国海洋石油总公司科技进步一等奖。

**2.新颖的水深超百米的导管架及上部模块平台设计、建造和安装技术**

中国海洋石油总公司以前的作业海域水深基本在40米到90米间，导管架及平台的设计、建造和安装技术已日渐成熟，但超过100米海域当时尚无有独立开发的经验。文昌油田项目围绕以下关键技术进行攻关，并取得了一批有适用价值的技术成果。

1)自行设计、建造和安装的水深超过100米直立群桩导管架平台技术

根据文昌油田总体开发方案，该油田共建两座井口平台，其中文昌13-1平台设有8口井槽，文昌13-2平台设有11口井槽。由于海况条件比较恶劣，为有效降低投资，我国科技工作者将平台设计为无人驻守平台、增加防海生物装置等措施，平台上设有150吨修井机。文昌13-1、13-2油田导管架高度达128米，通过设计方案优化和详细的结构分析，首次提出无主桩双斜度四腿轻型导管架结构形式，导管架的四个腿上各连有两根垂直的裙桩，共计8根裙桩，裙桩的直径为72"，文昌13-1裙桩每根总长度108.7米，入泥深度91米，文昌13-2裙桩每根总长度100.7米，入泥深度83米，创立了直立裙桩新型导管架结构，为导管架结构腿桩的优化提供了条件(见图4)。

通过优化结构，与常规导管架相比，文昌油田项目可节省钢材3000多吨，根据国际海洋工程界统计的导管架重量与水深的关系曲线，该导管架处于国际领先水平；在建造过程中，研发了深水导管架分层、分块预制、大型组合体翻身建造模块化总装建造技术，大幅度减少高空作业，确保大型深水导管架建造质量和建造周期；研发了大型深水导管架尺寸控制系统和加工设计软件系统，实现了导管架建造加工设计和全过程的尺寸控制数字化，



图1 文昌油田整体开发工程示意图

摆脱了依赖外国公司进行加工设计和尺寸测量控制的被动局面；研发超厚板节点断裂韧性评估技术(CTOD)，免除大型导管架厚板焊后热处理，大大缩短大型导管架建造周期；“大型海洋平台导管架加工设计软件系统”和“大型导管架建造尺寸误差分析系统”均已取得计算机软件著作权登记证书。

由于采用直立裙桩，水下液打桩锤连续打桩的方式，可将100多米长的钢桩一次打入，避免海上现场接桩，节省海上浮吊作业和海上接桩的时间，有效节省昂贵的海上施工费用，使打一根桩的时间从原来的几天缩短到几小时，单根直桩方案比斜桩分段安装方案可节省4~5个作业船天，同时降低了海上作业的风险，海上

正分析等技术。其中“自动翻转复位的摇臂”在中国申报的专利已获得授权，并且已到美国申报发明专利，美国国家专利局于2009年10月25日正式受理。

2)大型导管架与平台组块海上安装新工艺

在大型导管架与平台组块装船阶段，大型导管架及组块牵引装船时，我国科研人员通过在结构物底部安装滑靴，调整驳船舱内压载水来补偿潮汐及结构物上船重量的变化，使驳船的滑道始终与码头滑道保持同一水平面上，利用大型绞车将结构物牵引上船。目前，该项“结构物滑移装船调平技术”已申报中国发明专利。在海上安装阶段，我国科研人员从导管架结构特性、经济性和船舶资源等方面对下水

拥有的自主知识产权如下：

序号	授权项目名称	类别	国别	受理号	备注
01	可调节高度的垫墩	发明专利	中国	200810223095.8	已受理
02	深水大型导管架陆地建造的吊装方法	发明专利	中国	200910083697.2	已受理
03	一种铺设海底石油管道的方法及其专用设备	发明专利	中国	ZL200410088859.9	已授权
04	大型结构物体的滑移装船方法	发明专利	中国	200710058604.1	已授权
05	水下打桩导向架	发明专利	中国	200710058600.3	已受理
06	自动翻转复位的摇臂	发明专利	美国	12/605,356	已受理
07	下插销式托管架	实用新型	中国	ZL200420112433.8	已授权
08	外管推管器	实用新型	中国	ZL200420112043.0	已授权
09	爬管式切割开坡口机	实用新型	中国	ZL200520020036.2	已授权
10	金刚石绳锯机	实用新型	中国	ZL200520020037.7	已授权
11	自动翻转复位的摇臂	实用新型	中国	200820124388.6	已授权
12	大型海洋平台导管架加工设计软件系统	软件著作权	中国	2008SR11292	已登记授权
13	大型导管架建造尺寸误差分析系统	软件著作权	中国	2009R11S017244	已登记授权

安装时间节省50%以上，一个导管架海上施工费用节省800万元人民币，2个导管架共节省1600万元人民币。

常规的导管架下水采用驳船滑移下水，需要单独设置下水框架和连续型滑靴，需要大量增加结构钢材，同时由于滑靴带来的波浪力增加，还会导致结构重量的增加。我国科研人员在导管架设计中提出了吊装下水的方案，有效地降低了导管架的结构重量。

该平台为预钻井，即在导管架安装前，在水下设置基盘并进行钻井，因此，该导管架在水中扶正后要再进行与基盘的对接。为了克服对接过程中在环境载荷风浪流作用下导管架运动对基盘产生的较大碰撞力，实现精确定位，研究开发了一套对接系统和模拟分析技术，实现了导管架与水下井口的精确套接。

根据该项目经验和相关技术研究成果，在此后的大型导管架设计中进一步应用了漂浮扶正分析、滑移下水分析、自扶

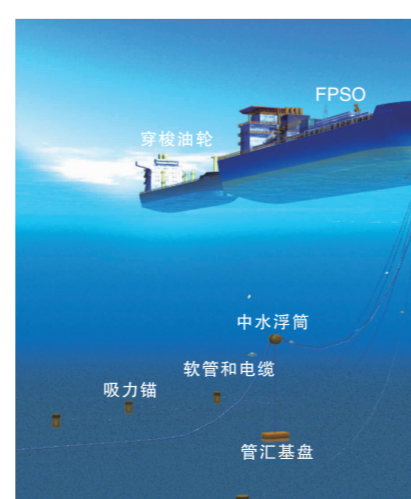


图3 单点系泊的浮式生产储油装置(FPSO)

驳船滑移下水和吊装下水两个方案进行比选，最终确定采用吊装下水的方案，该方案比滑移下水方案节省钢材约600吨。

对高度达128米的导管架，文昌油田开发工程项目首次采用卧式建造、T型就位、吊装下水、水中转向、水中扶正作业以及水下套井口基盘作业技术。该方法根据结构物尺寸、重量选择合适的浮吊，以精确的配重设计保证结构物起吊状态平稳。

**3.国内首创的深水耐高温抗屈曲双层海底管道的设计、安装与维修技术**

1)适合于深水海底管道铺设的设计方案

文昌油田所在海域水深较深，立管总长度达500米，是当时国内开展深水海底管道自主设计的第一例。由于深水海底管道立管所处海域环境条件恶劣，采用传统的立管和海管水面上连接方案极易导致立管和海底管道的损伤，为此我国科研人员提出了适合于深水海

底管道一旦发生泄漏事故，将不可避免地造成环境污染，严重时还将引发社会问题及政治问题。我国科研人员通过文昌海底管道水下修复技术研究，形成了完整的海底管道水下修复技术能力和装备能力；掌握了海底管道湿式修复技术、水下不停产修复技术、常压干式修复技术和海底管道下卧改线连接技术，并在多个海底管道修复工程中得到应用。南海文昌油田海底管道水下修复技术的研究和应用，对国内相关科学技术的发展产生重要影响并填补了国内空白，海底管道水下修复技术的研究和应用具备基础研究、应用基础研究和应用研究主要环节，全部为自主创新技术，达到国际同等技术水平，对保障海洋油气田安全生产意义重大。

针对海底管道的铺设和维修技术，我们开发了多项发明或实用新型专利，如“外管推管器”、“下插销式托管架”、“一种铺设海底石油管道的方法及其专用设备”、“爬管式切割开坡口机”、“金刚石绳锯机”等，其中大多数已经获得授权。

上述研究成果和重大工程应用在国内尚属首次，具有国际先进水平，其中直立裙桩新型导管架结构、抗强台风永久性解脱内转塔式单点系泊系统在国际同期同类工程中尚未见应用。

本项目成果为番禺4-2、番禺5-1、西江23-1、新文昌等后期油田开发的顺利实施解除了技术障碍，并提供了工程经验和很好的示范作用，大幅度缩短了设计和建造周期；部分技术已经推广应用于南海油气开发工程；增强了我国深水导管架平台和抗强台风永不解脱内转塔式单点系泊系统等关键设计建造技术在国际市场的竞争力。为我国今后更深海域油气田的开发积累了宝贵的经验。

该项研究成果已产生了巨大的经济效益和社会效益。

北京国贸一期高156米 文昌综合平台总高度达150米

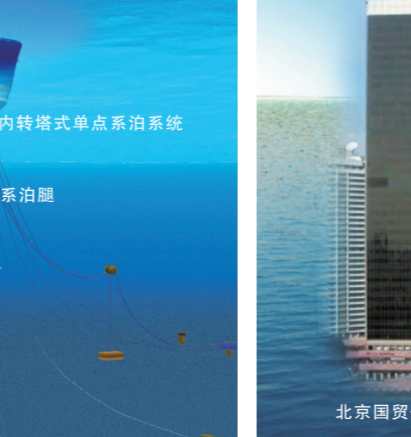


图4 深水导管架平台(高度接近北京国贸大厦一期工程)

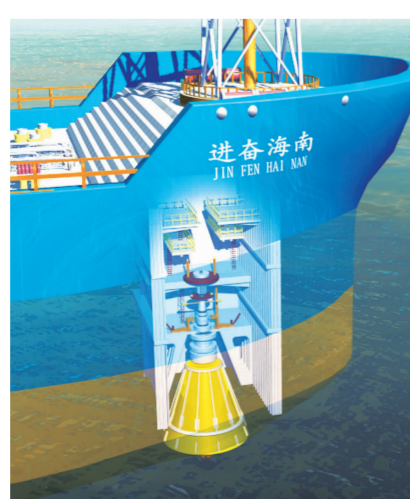


图2 单点系泊装置

底管道与立管之间的水下直接连接方案，该方案和传统方案相比大幅降低了立管和海底管道连接的风险，同时减少了海上连接的工作量。

文昌油田海底管道沿线海床有较大冲蚀坑，为了保证海底管道安全输送，我国科研人员对管道跨越冲蚀坑的方案进行了研究和评估，最后采用海底管道不挖沟埋设的铺设方案，该方案要比挖沟埋设方案节省投资上千万。

由于管道起铺时没有参考基准点，因此我国科研人员选用水下精确定位系统，以保证施工中海底管道和单点系泊系统坐标的准确性。

2)耐高温抗屈曲双层海底管道技术我国海洋工程领域输送高温度介质的保温海管结构主要是双层管。对双层管来说，管道两端受到膨胀弯、立管、管汇等的限制而不能自由变形，管道在内外压、温度载荷、摩擦力等的共同作用下受力状况非常复杂，为此，我国科研人员采用有限元方法对该双层管进行了侧向屈曲分析，将内外层管道作为一个整体进行屈曲分析，通过精确的设计分析，确保了管道不会发生侧向屈曲破坏。这种分析研究在国外刚刚起步，尚未见到完整的研究成果。

对双层海底管道来说，管道的内外管可以仅在终端固联在一起，也可以分段固联，在管道内外压、覆土、温度等载荷的作用下，加上管道两端受到膨胀弯、立管及海床摩擦力的限制而不能自由变形，管道的受力状况会非常复杂，对双层管屈曲问题，我国科研人员进行了侧向屈曲分析，将内外层管道作为一个整体发生屈曲；内管发生屈曲后，尚没有完全释放双层海底管道系统的轴向载荷，外管同时发生屈曲。为避免屈曲破坏发生，我国科研人员提出将管道在海床上铺设成蛇形。

和浅水水域不同，对于较深水域，外部静水压力可能导致的海底双层管道外管的局部屈曲和压溃，我国科研人员通过优化设计，选取合适管材和壁厚，既解决了局部屈曲、压溃问题，又使管道在无需进行混凝土压重的情况下，保持在恶劣环境条件下的稳定性。

3)专门研发了适应于深水海底管道的维修技术

海底管道是海上油气生产的关键，