

海洋工程研究进展

Advances in Ocean Engineering

王赤忠

浙江大学海洋学院

Email: cz_wang@zju.edu.cn

HP:18668214196

海洋工程前沿科技问题

■ 海洋工程的前沿技术问题

1. 海洋资源开发装备。包括：新概念海洋工程结构物研究开发技术、深海平台关键技术、浮式生产储卸油系统（FPSO）关键技术；
2. 海洋管线与立管。包括：海洋管线与立管设计技术、海洋管线与立管所受环境载荷、立管系统安装；
3. 系泊系统。
4. 水下工程与技术。主要有潜水器前沿技术以及深海空间站等。

■ 海洋工程的前沿学术问题

1. 基于CFD的数值模拟理论与方法研究；
2. 非线性水动力学、结构物非线性动力响应机理与数值方法研究；
3. 极限海洋环境及其与结构物相互作用研究；
4. 海洋工程结构动力学。

海洋工程前沿科技问题

■ 海洋工程的前沿技术问题

1. **海洋资源开发装备**。包括：新概念海洋工程结构物研究开发技术、深海平台关键技术、浮式生产储卸油系统（FPSO）关键技术；深海装备的海上安装技术
2. **海洋管线与立管**。包括：海洋管线与立管设计技术、海洋管线与立管所受环境载荷、立管系统安装；
3. **系泊系统**。包括：单点系泊系统、深海多点系泊系统
4. **水下工程与技术**。主要有潜水器前沿技术以及深海空间站等。

1. 海洋资源开发装备

● 新概念海洋工程结构物研究开发技术

- 新概念海洋平台开发
- 边际油田开发技术
- 新型特种海上工作船研制关键技术
- 超大型浮式海洋结构物
- 超大型储油装置
- 天然气水合物勘探开发技术
- 海上风能、波浪能、潮汐能、温差能等新型海洋能源利用技术与装备
- 海水、矿产、生物等海洋资源利用技术与装备开发



五万吨级渤海友谊号
FPSO



海上工作船



半潜式风电基础



波浪发电装置

1. 海洋资源开发装备

● 深海平台关键技术

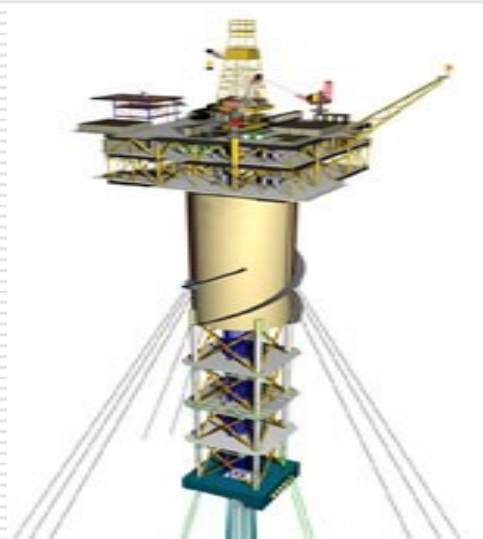
- 新概念深海平台
- 半潜式平台
- 立柱式平台 (SPAR)
- 张力腿平台 (TLP)
- 深海平台定位系统
- 深海平台海上运输与安装关键技术。



半潜式平台



张力腿平台



立柱式平台



平台安装

1. 海洋资源开发装备

● 深海平台关键技术

- 总体设计;
- 系统集成;
- 平台定位;
- 总体性能分析;
- 模型试验;
- 结构强度与疲劳寿命分析;
- 平台建造

1. 海洋资源开发装备

- **总体设计**是对深水半潜式钻井平台的综合性规划，是一个非常**重要的阶段**，该阶段的工作基本确定了平台的**各项性能指标、主要功能和总费用**。
- 所涉及的**关键技术**主要有：**设计标准的选用**；**海洋环境条件和海洋工程地质条件的分析和研究**，以确立平台自存、操作和连接工况的设计环境条件；平台**主要性能指标和主要设备参数的论证和确定**；平台远离基岸作业需要更大甲板空间和可变载荷，最大的可变载荷的论证确定；**平台定位和锚泊形式的选择与研究确定**；**主要设备配置方案的拟定等**。

1. 海洋资源开发装备

- 平台总体方案设计在总体设计中占有较大的分量，是深水半潜式钻井平台设计必须解决的关键技术之一，在总体方案设计中要确定平台的船型与主尺度、结构形式和总布置。
- 平台的总布置涉及平台各系统设计的方方面面，是一个工艺流程确立、功能区块划分、系统布置规划、设备参数落实、结构设计协调等综合设计过程。
- 平台的总布置作为深水半潜式钻井平台要解决的关键技术涵盖多个关键技术点，如可变载荷的分类与布置、双井架系统、隔水管存放方式、机舱数目与布置等。

1. 海洋资源开发装备

- 总体设计确立了深水半潜式钻井平台的诸项设计目标，各项目标的实现要通过深入的研究，采用**计算分析**、**模型实验**和对比研究等技术手段，去解决各个相关的关键技术问题，以达到总体设计的最终要求。

1. 海洋资源开发装备

- **系统集成技术**是将深水半潜式钻井平台的各个独立的系统集成到相互关联、统一和协调的系统之中，成为一个整体，使它们能够精确、高效地发挥作用，同时也便于统一地控制与管理。
- 按照系统的功能整个深水半潜式钻井平台系统可以划分为**五大系统**：钻井系统、公用电力和电站系统、动力定位系统、压载系统、安全和防护系统，其中各大系统又由多个子系统构成。

1. 海洋资源开发装备

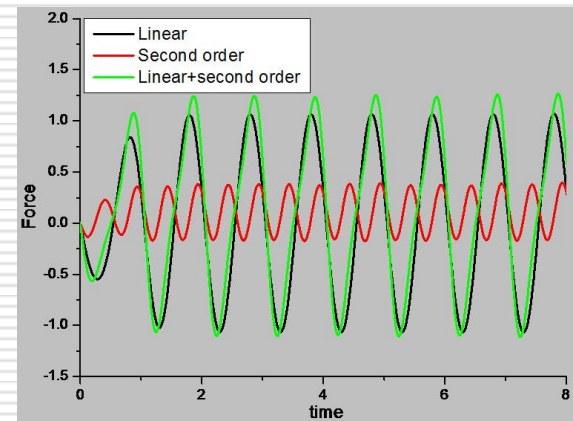
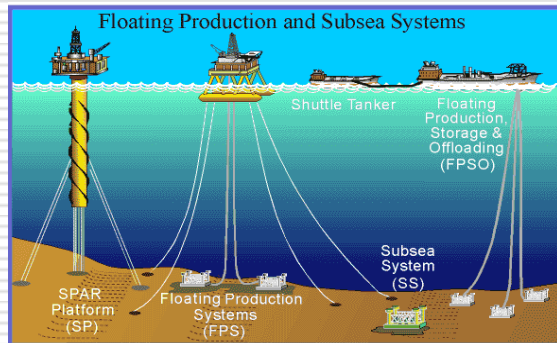
- 系统集成需要解决各系统之间的相互关联与互操作，各类设备、子系统间的接口，以及多厂商、多协议和面向各种应用的体系结构等问题。
- 系统集成技术所涉及的关键技术主要有：钻井系统集成技术、公用电力和电站系统集成技术、动力定位系统集成技术、压载系统集成技术、安全和防护系统集成技术等。

1. 海洋资源开发装备

- **平台定位技术**：深水半潜式钻井平台的定位方式包括**锚泊定位**、**动力定位**和**组合定位**三种方式。在不同的环境条件和水深下，合理选择定位方式对于平台的位移控制和降低燃油消耗起决定性作用。
- 平台的定位方式的选择是建立在平台定位能力分析的基础上，通过定位能力分析，可以确定锚泊与动力定位组合的**适用水深及平衡点**，锚泊定位与动力定位所需要的环境条件，以及锚泊定位与动力定位设备的**选型与配置**；
- 平台定位所涉及的**关键技术**包括：锚泊定位、动力定位和组合定位水深适应性和**经济性分析技术**，三种定位方式所需系统的设计技术，以及平台定位系统等效模拟技术。

1. 海洋资源开发装备

- **总体性能分析**是对深水半潜式钻井平台的水动力性能与运动性能进行预报,采用数值模拟的方法,计算平台在不同装载条件和海况条件下,平台的固有运动周期、最大短期运动**响应幅值**、**气隙**等,通过对计算结果的分析对平台总体性能是否能达到设计要求作出判断。
- 为获得较为准确的计算结果,考虑到平台系统是一个系统,以及**二阶波浪力**的影响,还要进行平台系统的非线性耦合分析。



1. 海洋资源开发装备

- 目前,某些船级社已开发出进行非线性耦合分析的软件,如挪威船级社的DeePC、法国BV船级社的HydroSTAR,但由于影响参数的选取因素众多,计算结果虽能达到一定精度,但仍然有许多没有解决的问题。
- 深水半潜式钻井平台总体性能的分析要进一步获得准确的结果还要解决以下难点:在风、浪、流联合作用下,系泊、立管与浮体的耦合效应;二阶波浪力的计算与低频慢漂运动的预报;各种非线性因素对平台运动与载荷响应贡献的比较;非线性水动力计算数值的稳定性分析、立管涡激振动特性与抑制等。

1. 海洋资源开发装备

- **结构强度与疲劳寿命分析**：立管属细长构件，它们的损伤机理与浮体结构有比较明显的差异。因此，结构强度和疲劳寿命分析方法也不同。
- 结构强度分析所涉及的主要关键技术有：波浪载荷的传递技术、总体结构建模技术、子模型结构分析技术、强度评估的规范适应性分析。平台结构疲劳强度分析基于疲劳累积损伤原理，在此基础上产生了各种疲劳分析方法，如全概率疲劳寿命计算方法、谱疲劳分析方法等。

1. 海洋资源开发装备

- 理论上采用不同的疲劳寿命分析方法应当获得相同的结果，但往往得到**差异较大**的计算结果，这可能与**热点的选取**以及**应力传递函数**的计算精度关系很大。
- 因此，要获得较为准确的疲劳寿命计算结果**必须要解决的问题**包括：疲劳热点的分析、应力函数的计算分析、S—N疲劳曲线的适应性分析。在波浪和流的联合作用下，钻井立管或隔水管将产生涡激疲劳，钻井立管或隔水管疲劳寿命评估技术要解决流固耦合以及平台和立管耦合作用机理，这也是平台的关键技术难点。

1. 海洋资源开发装备

- **模型试验**：深水半潜式钻井平台的设计建造是一项投资巨大、多种技术综合应用的复杂工程，所涉及的关键技术很多，每一项关键技术要包含多个关键技术难点。除以上所述关键技术外，平台建造技术与深水模型试验技术也是必须研究的关键技术。平台建造技术也包含多项关键技术环节，掌握了这些关键技术环节，对于提高建造质量、生产效率和降低成本有积极的意义。数值计算结果必须通过模型试验来验证。因此，平台深水模型试验是确定平台主尺度，验证动力定位设计的必要技术手段，深水模型试验技术也是必须研究和掌握的关键技术。

1. 海洋资源开发装备

● 浮式生产储卸油系统（FPSO）关键技术

- 新型FPSO
- 单点系泊系统
- 浅水FPSO系统
- 新型FLNG系统
- 新型 FDPSO 系统
- FPSO/FLNG 柔性连接输油系统关键技术。



TLP与FPSO联合生产系统



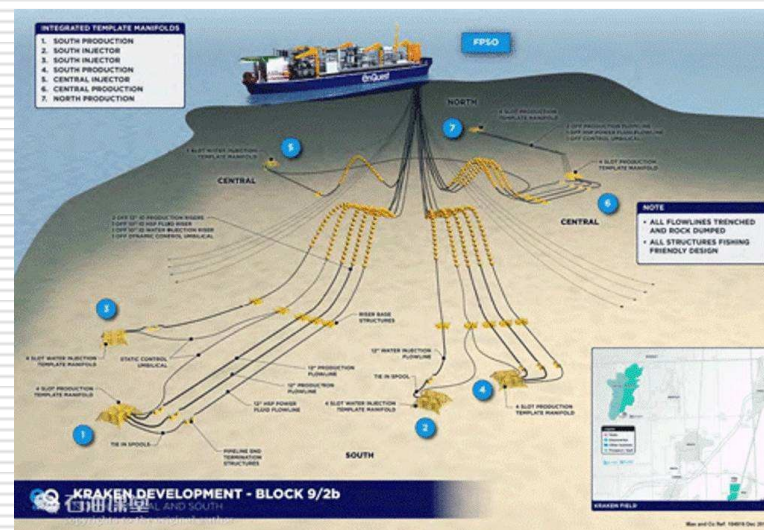
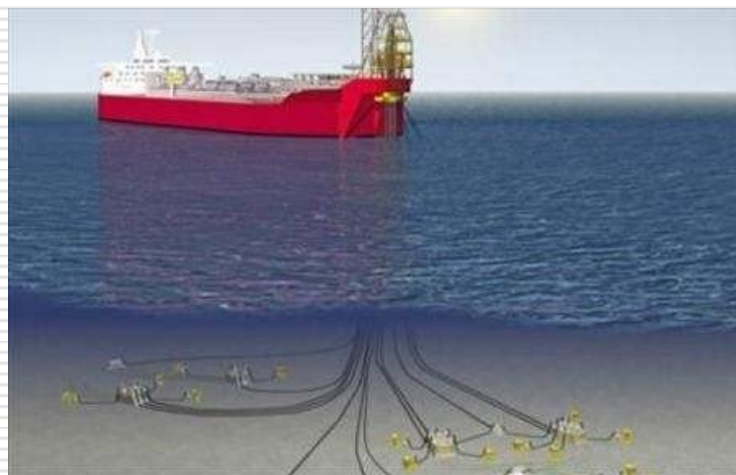
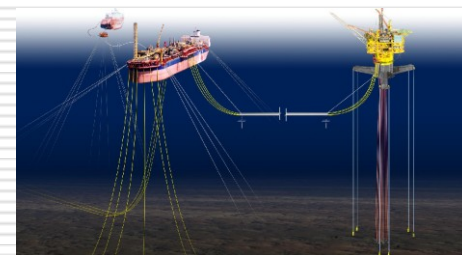
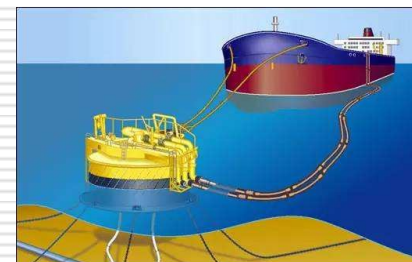
FLNG
(Floating Liquefied Natural Gas)



FDPSO 浮式钻井生产贮卸油系统
(Floating Drilling production Storage and Offloading)

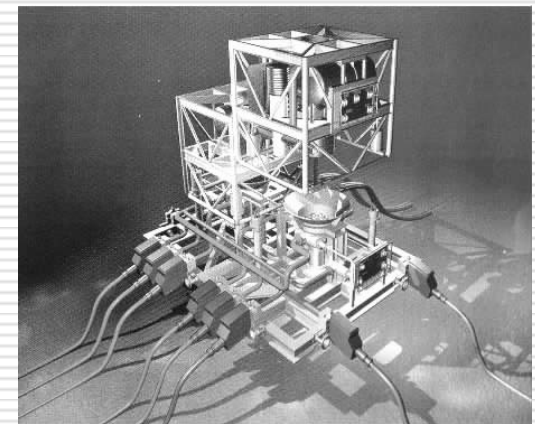
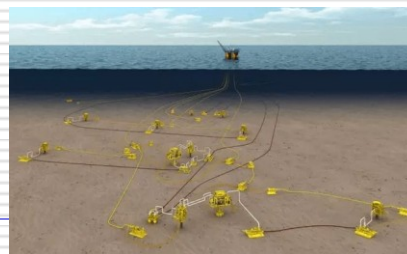
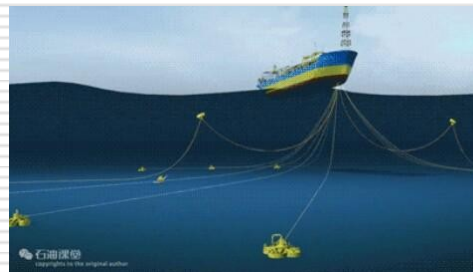
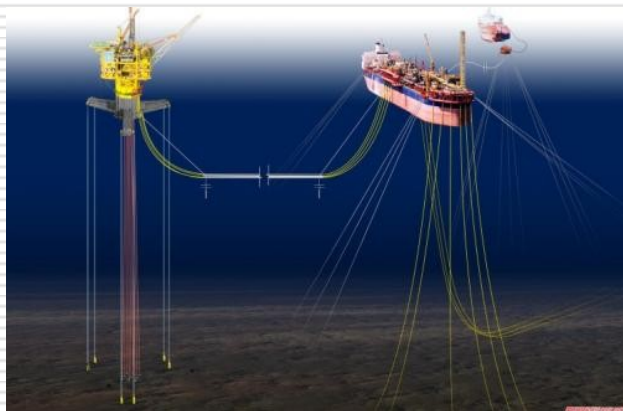
1. 海洋资源开发装备

- FPSO主要由由海底系统、船体系统、系泊定位系统、动力系统、油气处理系统、消防监控系统、储油与外输系统、生活系统等十几个大类组成。



1. 海洋资源开发装备

- **海底系统**由**基座**、**水下卧式采油树**、**海底管汇**、**液压井控**、**立管**等组成。各井口的原油通过各自的采油树汇集到中心管汇中，然后由若干条**海底生产管道**输送到储油轮上。设计中未考虑修井功能，但设置了水下泥线增压泵和水下机器人，**增压泵**由马达带动，增压泵的电缆有3种不同的功能（供电、信号传输、补压），电缆可以进行湿式接头作业。井控所需的各种信号以及中控室对电、液、阀等各种指令通过海底电缆传送。



1. 海洋资源开发装备

船体系统

- FPSO外形类似油轮，但复杂程度远高于油轮。船体在风、浪、流、潮作用下，能够长期被约束在一定范围内，所受的外载荷比普通油轮复杂得多，结构局部强度要做特殊设计。
- 作为载体，其上面包容着动力模块、生产模块、储油模块、消防模块、生活模块等，在布局 and 分隔上更加讲究，安全性问题要作重点考虑。在设计时除了要达到《船舶建造入级规范》、《移动式海上平台入级建造规范》、《浮式生产系统入级建造规范》等通用性规范外，还要顾及到国际海事组织（MO）的MARPOL 和 SOLAS公约等一些行业技术标准（共2 种标准），安全、救生、环保等要求高。
- FPSO的业主一般要求长期系泊在海上，进行不间断生产，因此设计风险等级高（100年一遇的重现期），防腐等耐久性措施要求严，一般能做到20 年或更长时间不进坞维修。

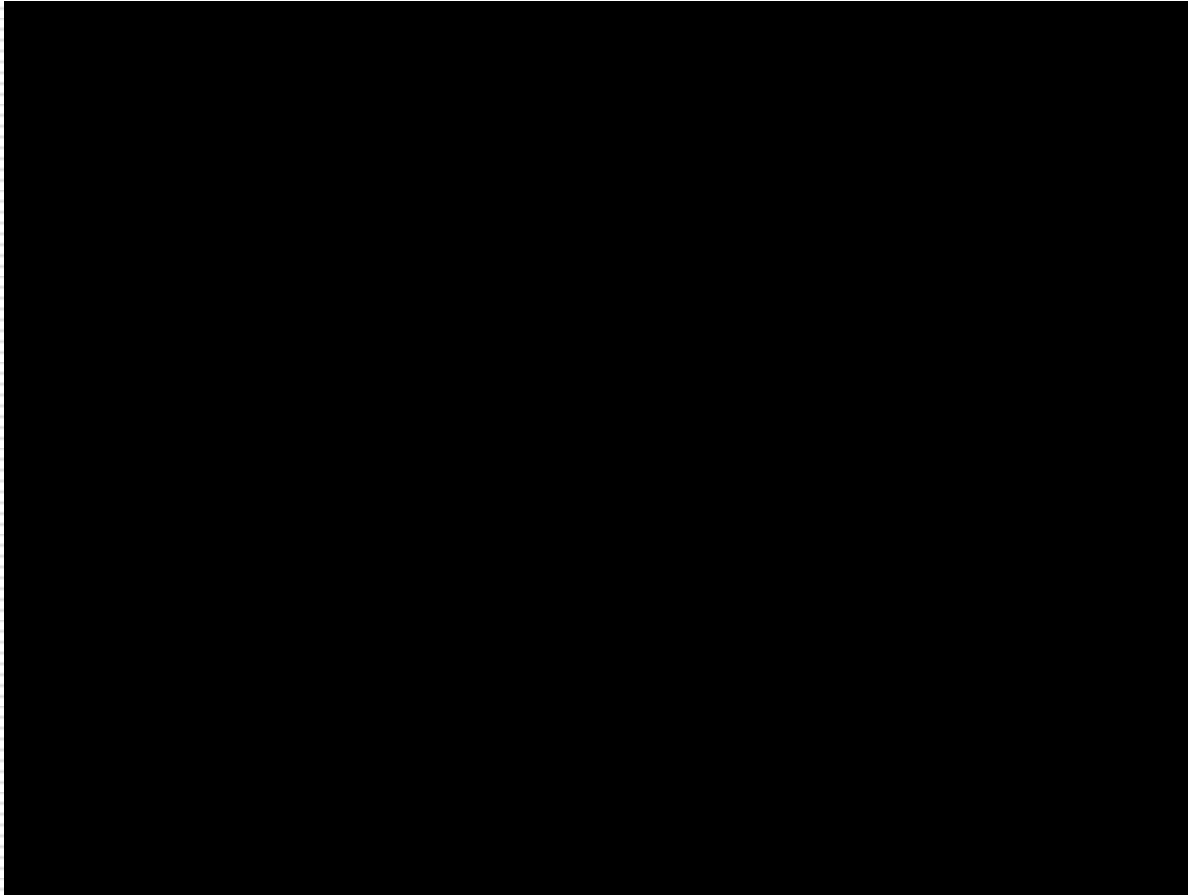
1. 海洋资源开发装备

● 深海平台海上运输与安装关键技术



1. 海洋资源开发装备

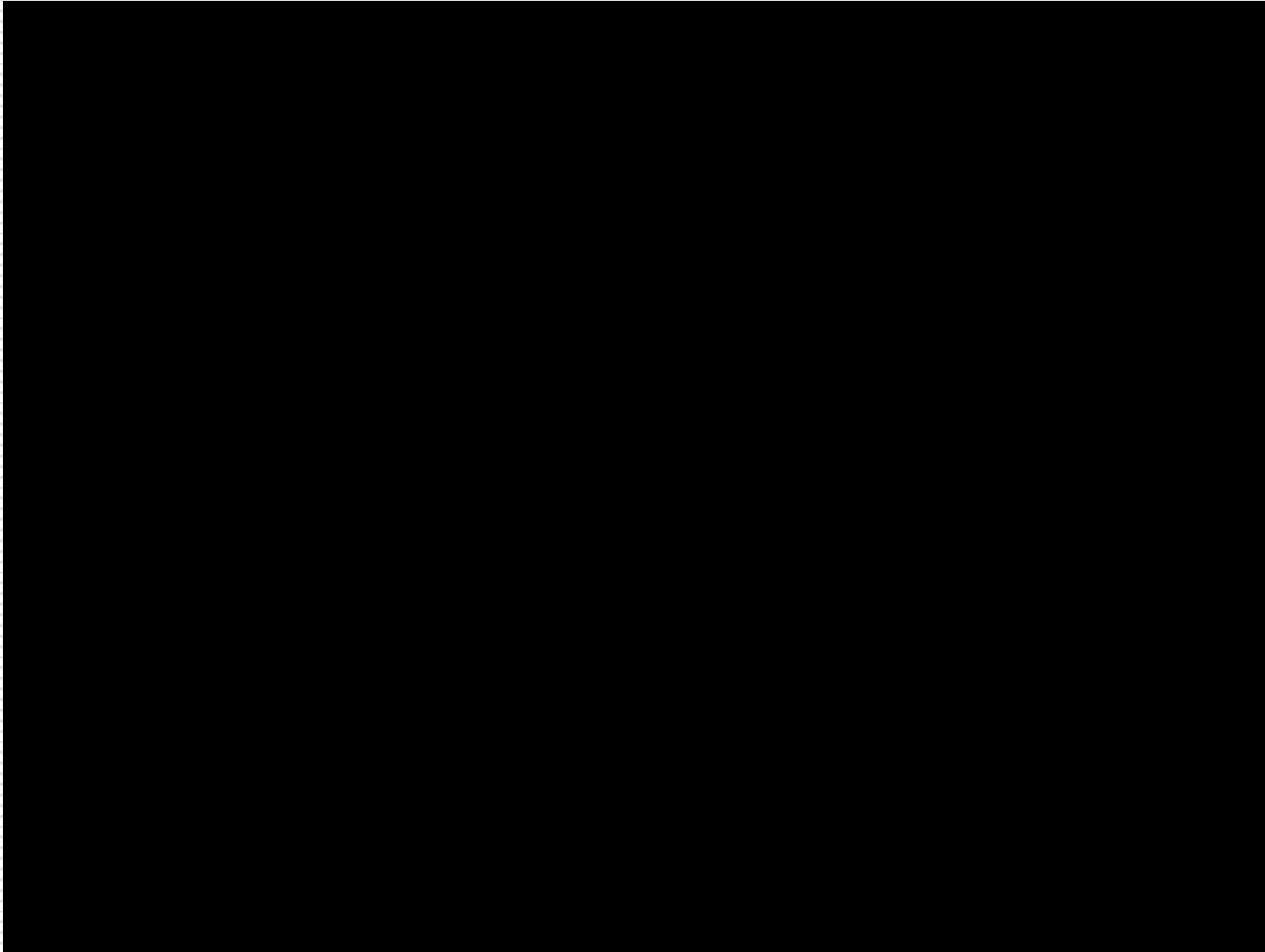
● 深海平台海上运输与安装关键技术



半潜式海洋钻井平台的拖航过程

1. 海洋资源开发装备

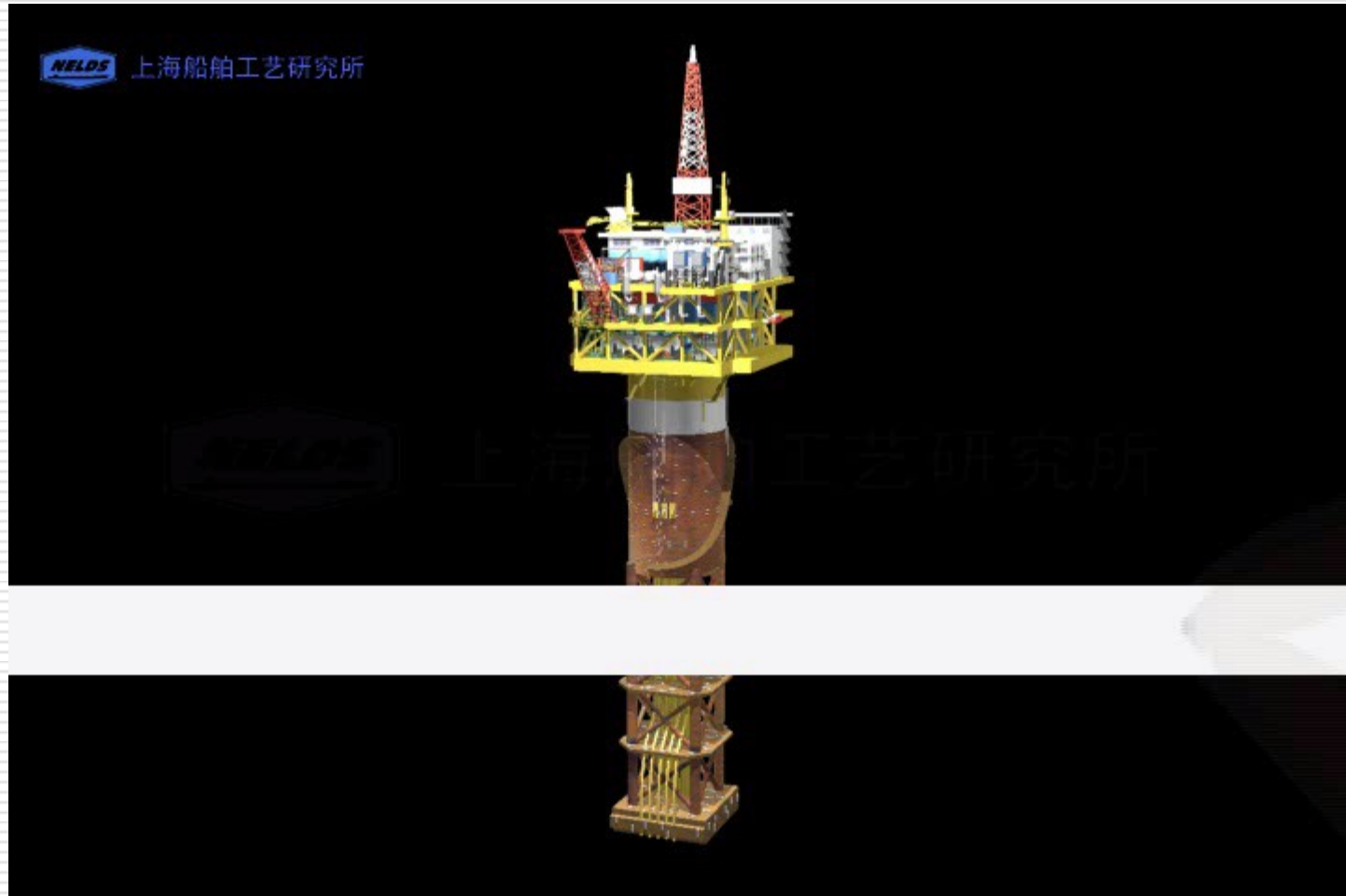
- 深海平台海上运输与安装关键技术



张力腿平台海上安装

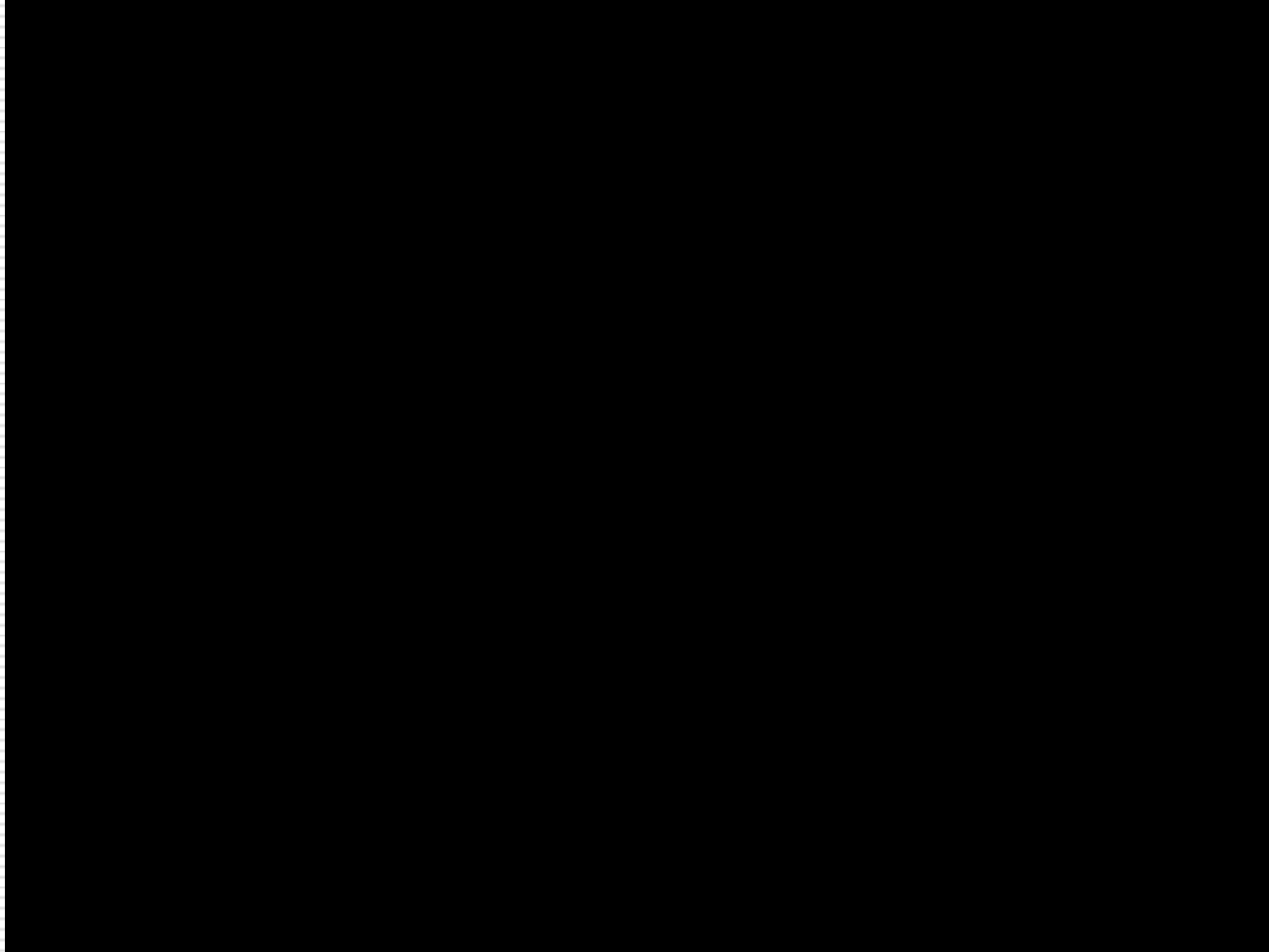
1. 海洋资源开发装备

● 深海平台海上运输与安装关键技术



1. 海洋资源开发装备

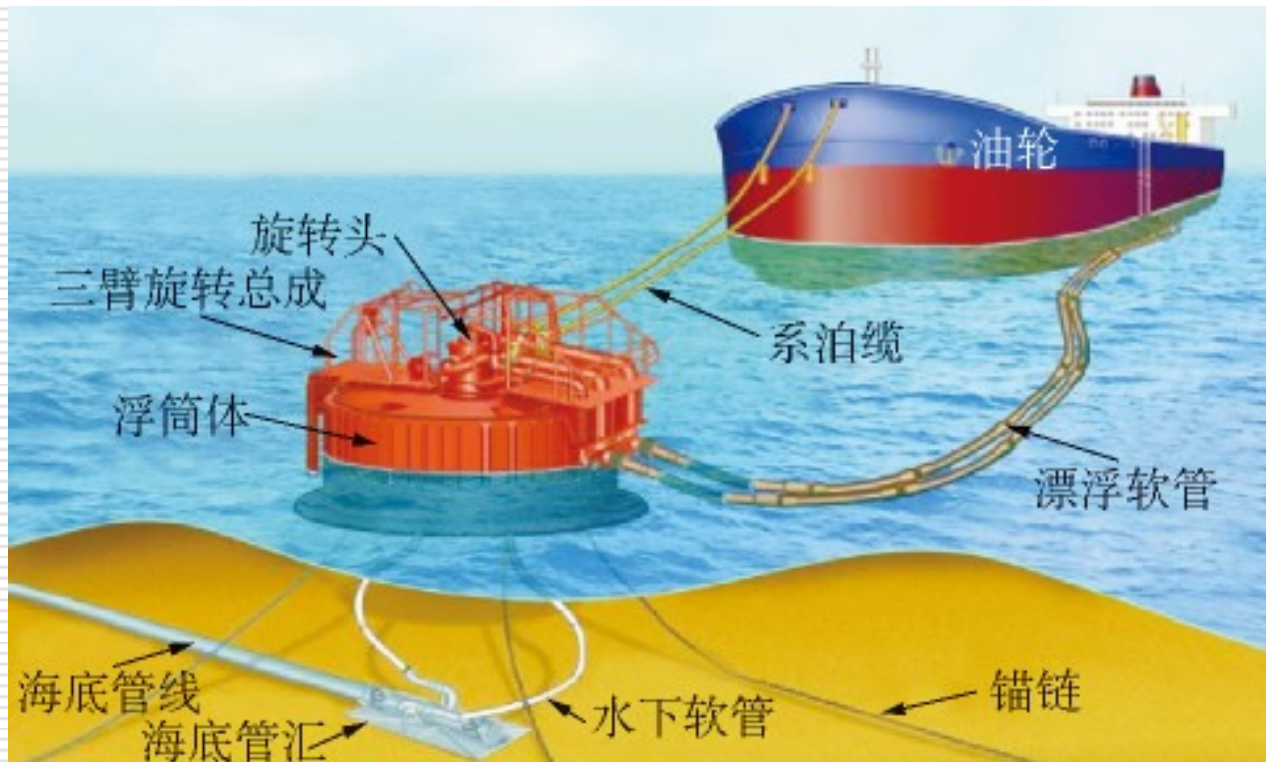
● 深海平台海上运输与安装关键技术



Super 116E型钻井平台

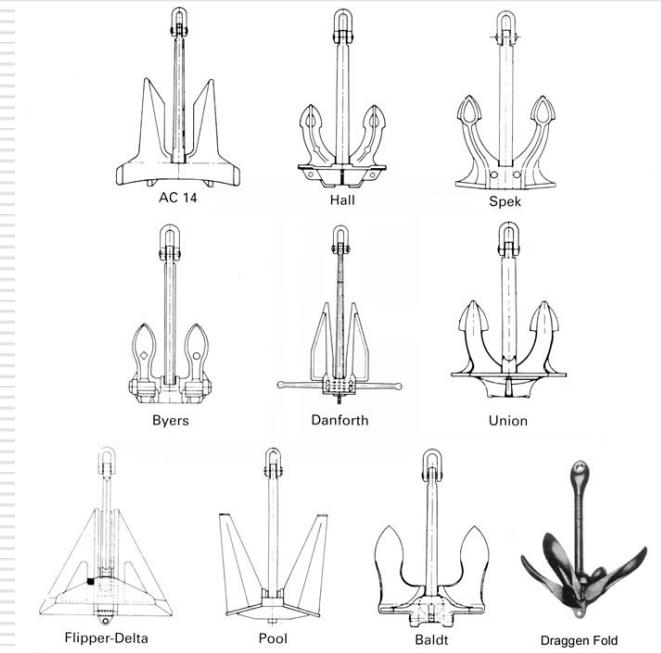
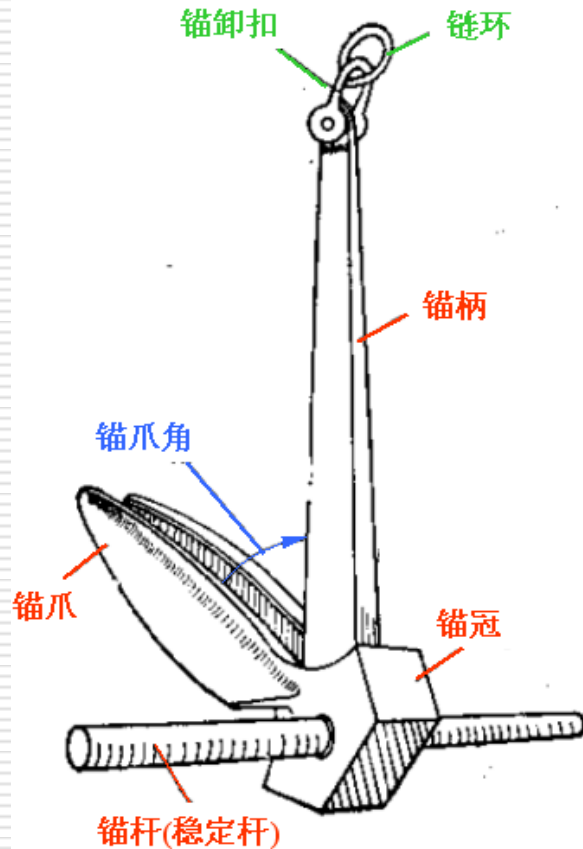
3. 系泊系统

- 深海平台系泊系统一般由**四部分**组成：**系泊缆索**、**导缆器**、**起链机**和**海底基础**。系泊缆索上端连接到平台主体上的导缆器，另一端与海底基础相连，用起链机来控制缆绳的预张力，平台运动的恢复力主要由系泊缆索的位能提供。
- 海底基础大多采用**抓力锚**、**桩基**或是**吸力式基础**固定。

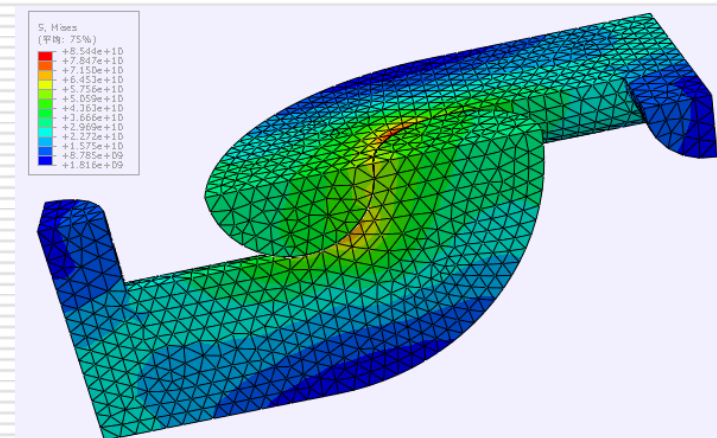


3. 系泊系统

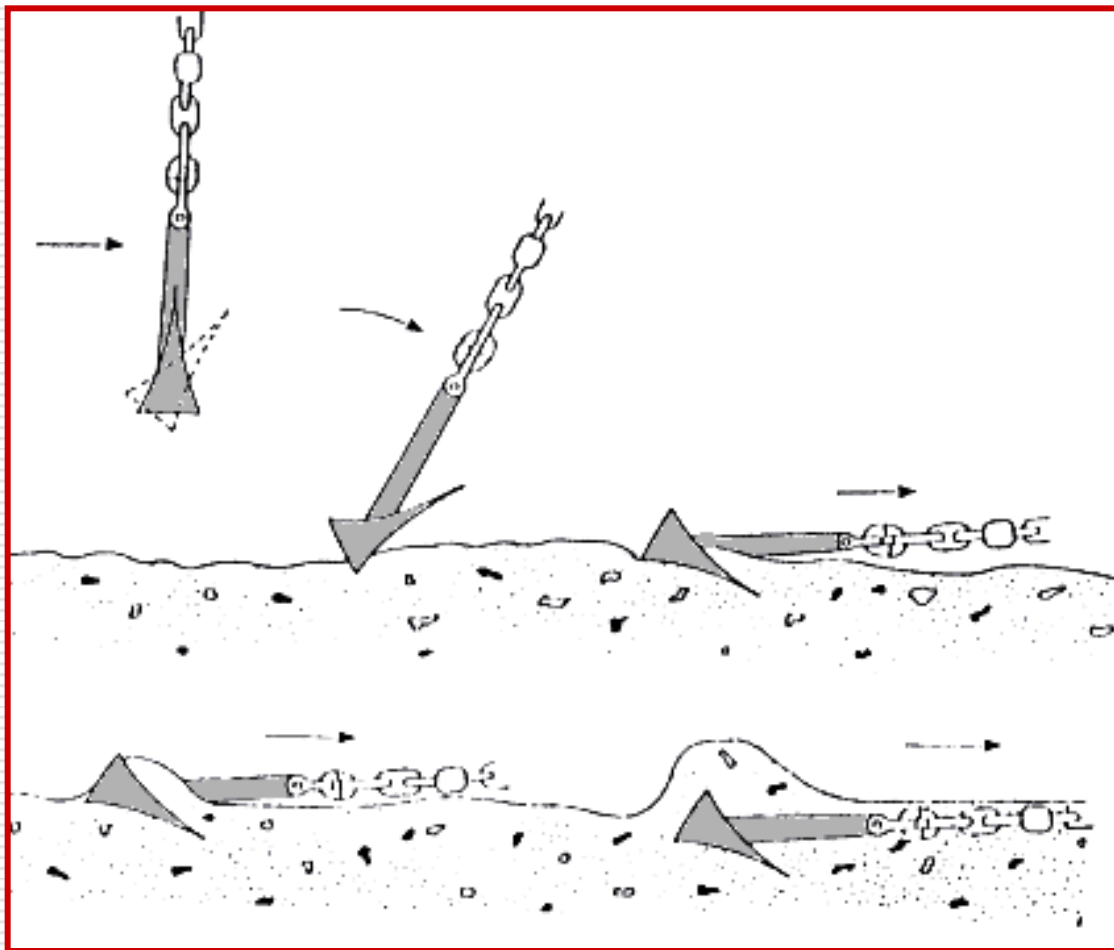
● 锚



- 锚泊线指的是锚链、锚索以及它们配上各种样式的块重和浮力器件的组合。



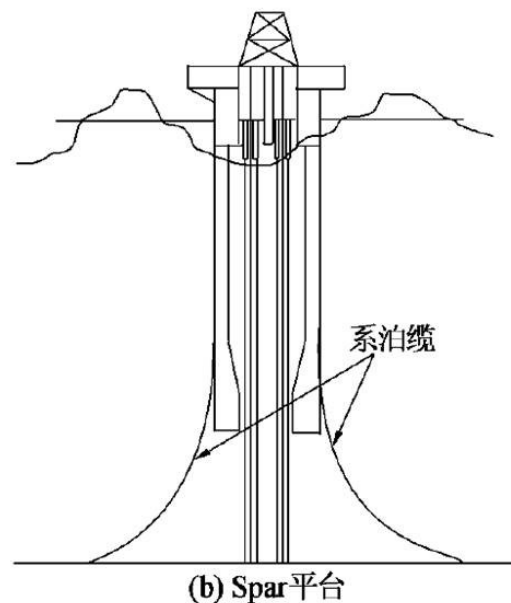
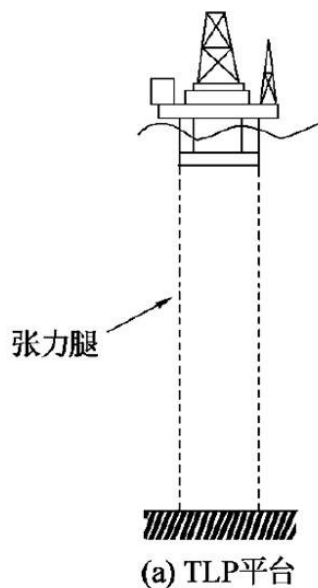
3. 系泊系统



锚的入土过程

3. 系泊系统

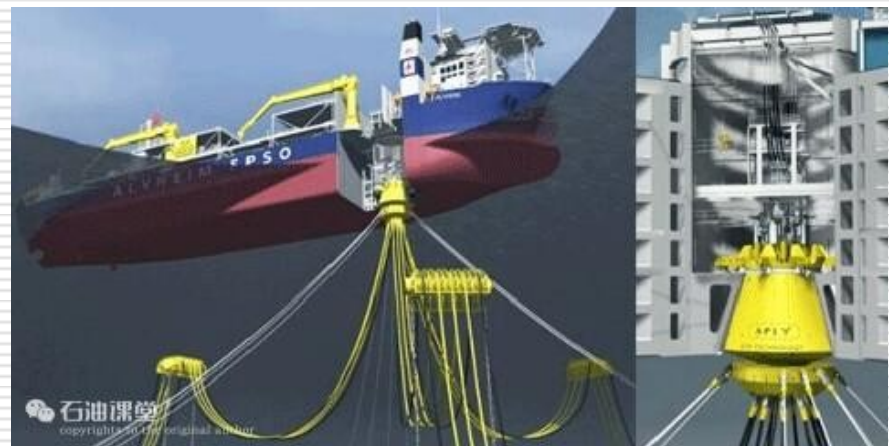
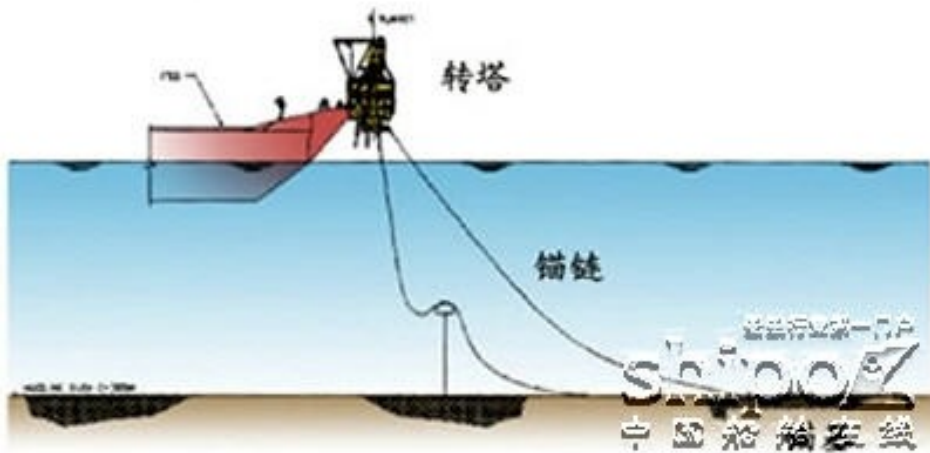
- TLP平台的系泊索由于预张力作用始终处于完全张紧的状态，而Spar 平台的系泊缆在一定预张力作用下形成半张紧半松弛状态。
- 系泊索与主体的连接点位于平台几何中心附近，该点处的运动幅度较小。



3. 系泊系统

1. 锚链悬链线系泊，一般水深不大于1 000m；
2. 全钢缆系泊，可用于1000m以上水深系泊；
3. 链-钢缆-链系泊；
4. 链-尼龙缆-链半张紧系泊。

- 全钢缆系泊和链-钢缆-链系泊可用于1000m以上水深，但是经济性能低，而链-尼龙缆-链半张紧系泊方式，经济性能优越，更适合深海平台的需要。



3. 系泊系统



- **钢链**是最传统的系泊材料，在海洋油气开采的初期就开始广泛应用于钻采船及钻采平台的单点和多点系泊。
 - 应用广泛，制造简单；
 - 质量大、强度高、伸长率低；
 - 耐磨损，不易破坏。

3. 系泊系统

● 锚链（Anchor Chain）

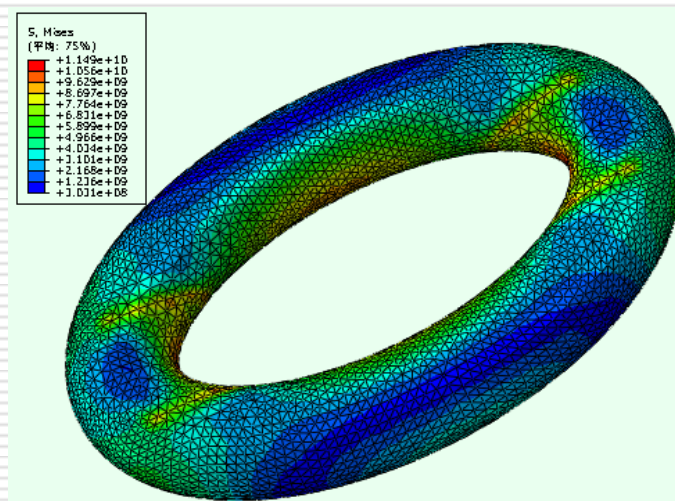
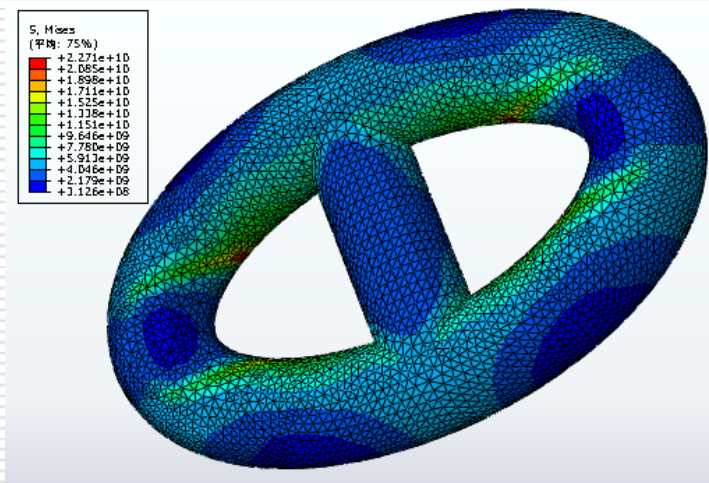
- 锚链由许多链环连接而成
- 链环分有档链环与无档链环两种
- 同样链径，有档链环强度比无档链环高20%



有档链环（Stud link Anchor Chain）



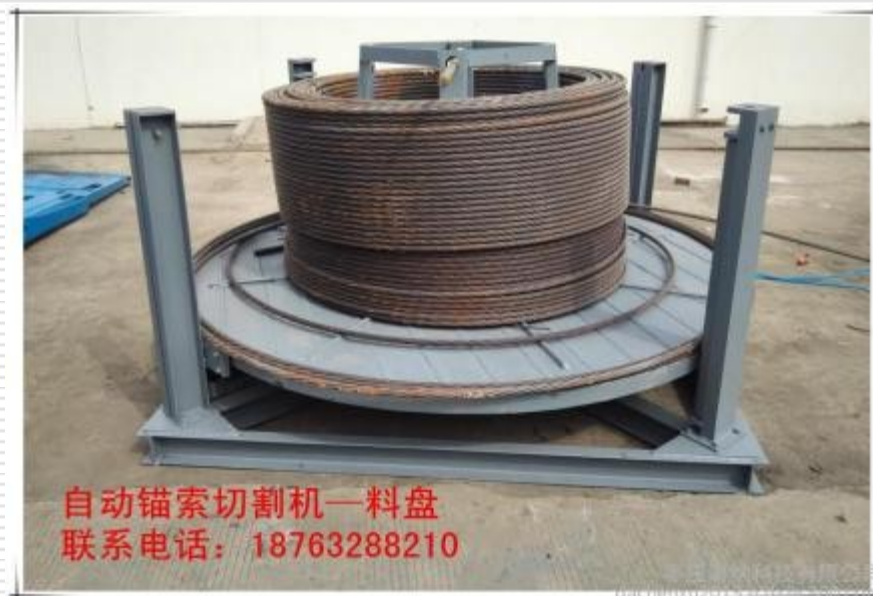
无档链环（Anchor Chain）



- **钢索**是由钢丝组成。它先由若干根钢丝捻成股，再由若干股捻成绳。
 - 结构复杂, 制造成本高;
 - 同等断裂强度下, 钢索重仅为链重的 $1/4 \sim 1/5$, 适应更大水深的要求;
 - 易磨损、易扭结, 易被海水腐蚀和疲劳破坏, 而且索接头很困难;
 - 不易存放, 只能存放在卷筒上。

3. 系泊系统

- 锚索 (Anchor Cable)

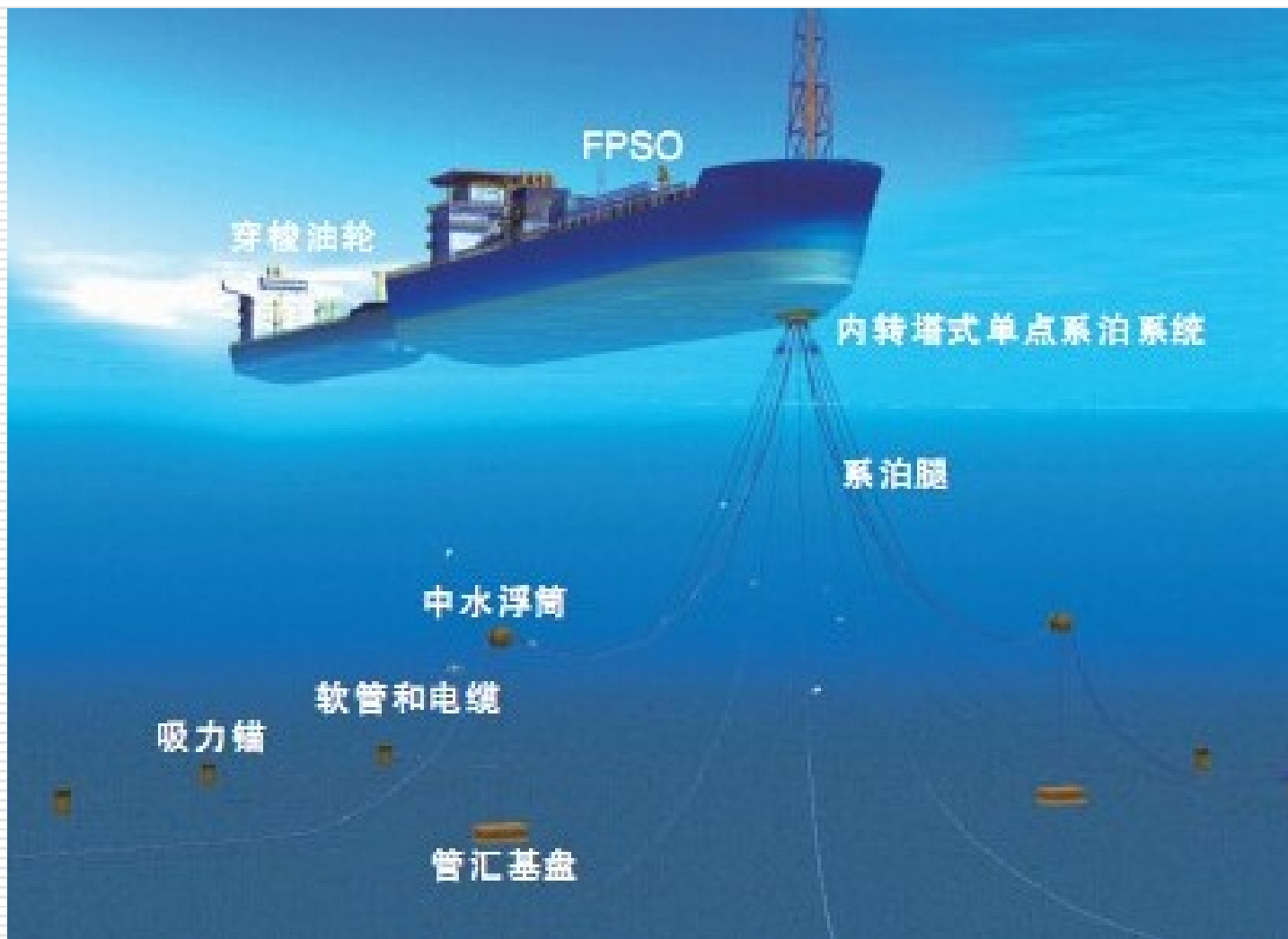


3. 系泊系统

- 合成纤维绳的材料通常有聚酯纤维(PET), 高强聚乙烯(HMPE), 芳香族尼龙(Aramid)等, 其中以聚酯纤维应用最广。
 - 质量轻, 具有重力-浮力中和特性, 可有效降低平台负载
 - 不易磨损、寿命较长、张力范围大
 - 强度高、模量高
 - 对安装、运输和系泊环境要求高
- 新型系泊材料的研究开发成为深海石油工业的重要课题之一

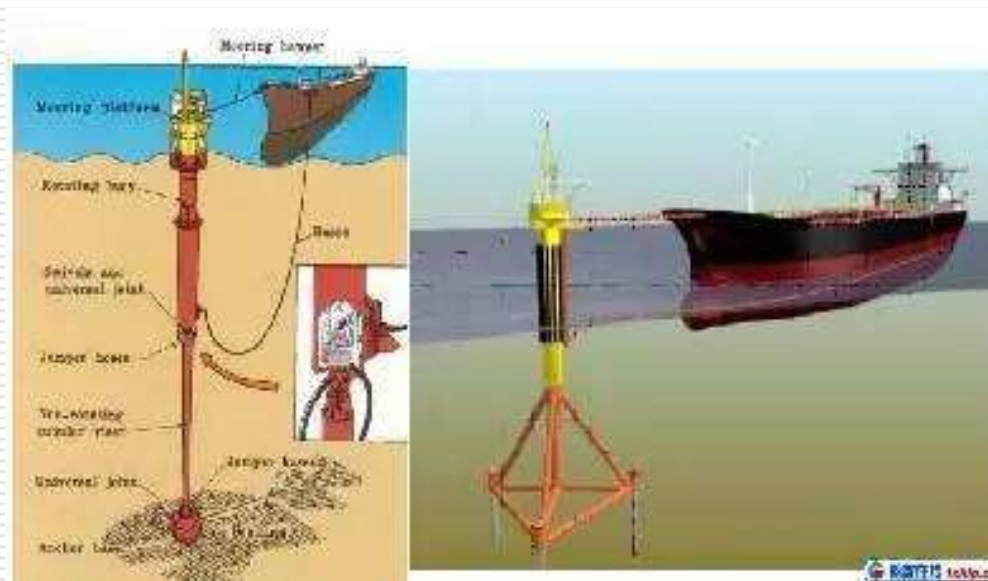
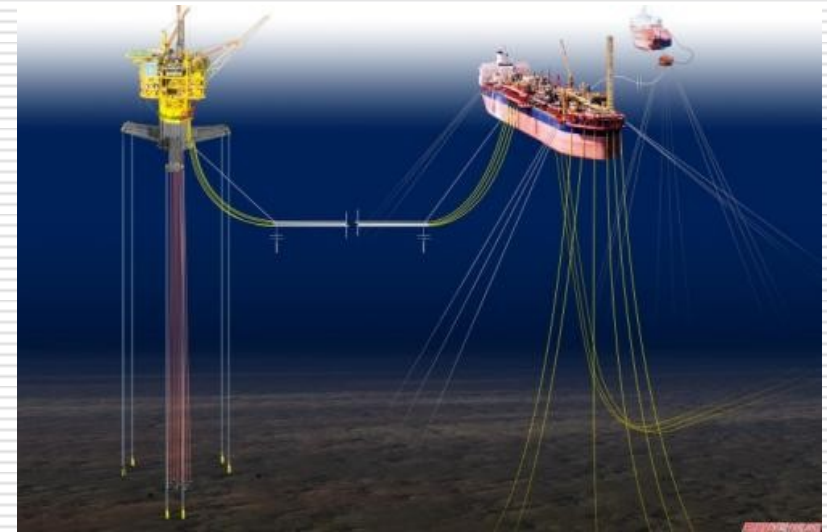
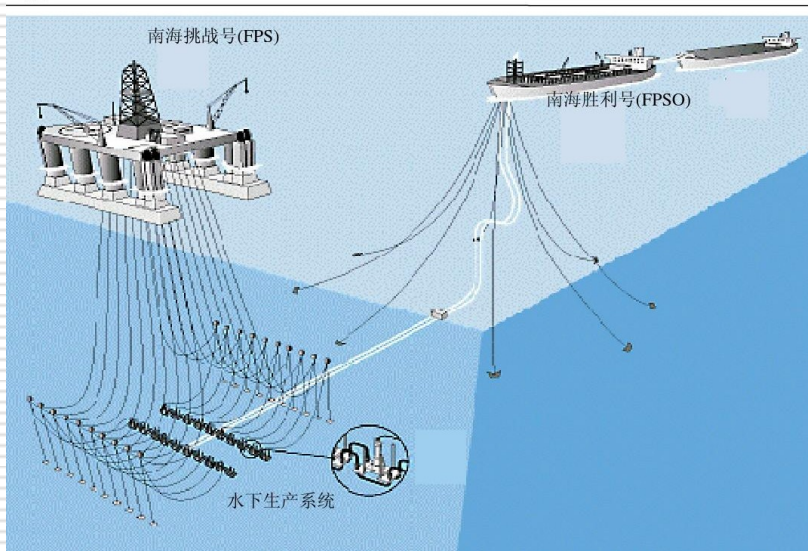


3. 系泊系统



浮筒与传统悬链线锚泊系统相结合

3. 系泊系统



3. 系泊系统

● 单点系泊系统

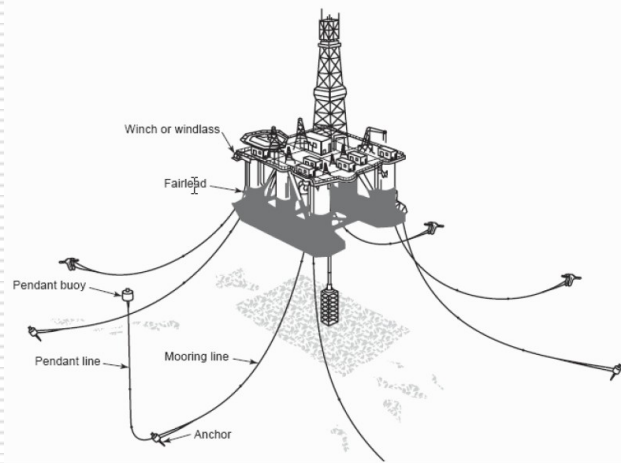
- 单点系泊系统与立管布置形式的设计
- 单点系泊系统的动态运动稳定性问题
- 转塔位置对单点系泊系统风标效应的影响
- 单点系泊系统水平回复特性的研究
- 单点系泊系统水平运动慢漂阻尼的研究



单点系泊

● 深海多点系泊系统

- 深海系泊系统阻尼
- 动载荷等动力响应机理
- 深海锚泊定位与动力定位等不同定位模式间的配合
- 深海系泊系统形式的选择与布置形式
- 深海系泊缆组成成分与材料的确定
- 深海内波、极大波等非线性海洋环境载荷对系泊系统动力响应特性的影响等

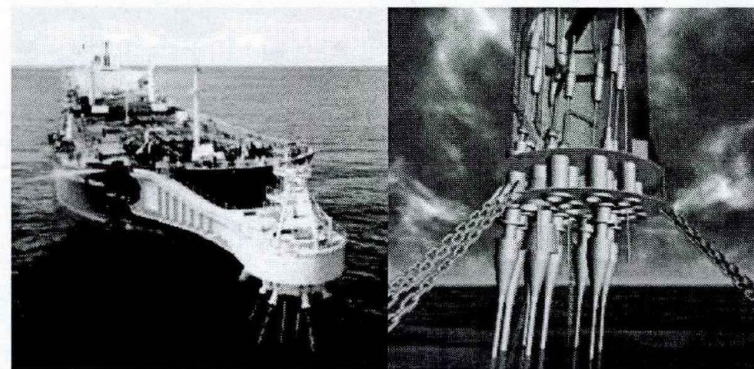
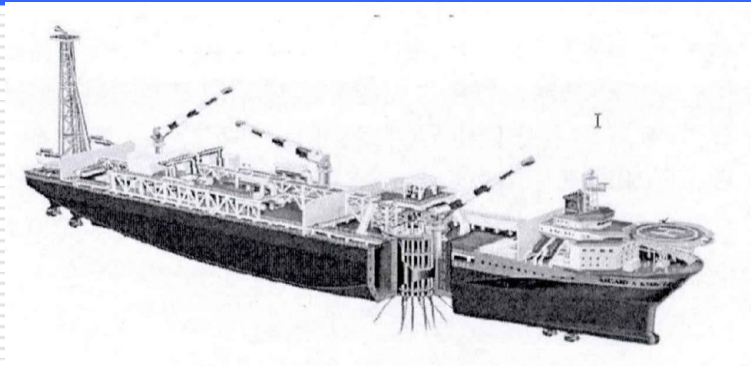


多点系泊

3. 系泊系统

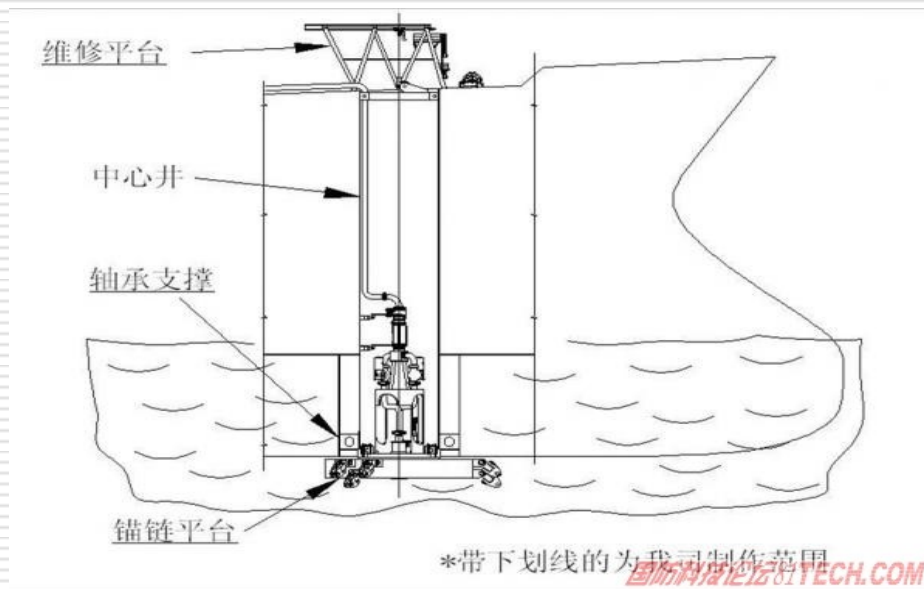
● 单点系泊系统

- 内转塔式系泊系统：应用最为广泛，常用于中等水深以及深水海域；
- 外转塔式系泊系统：位于水面以上，加大了船体的存储量，多用于浅水海域；
- 塔架软钢臂系泊系统：适用于浅水海域。



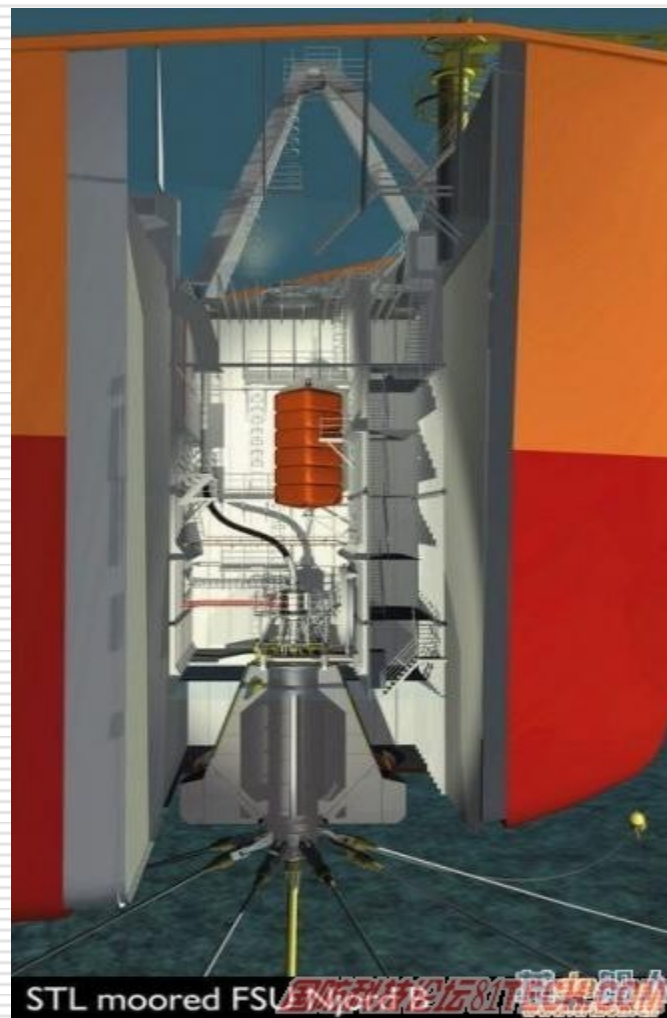
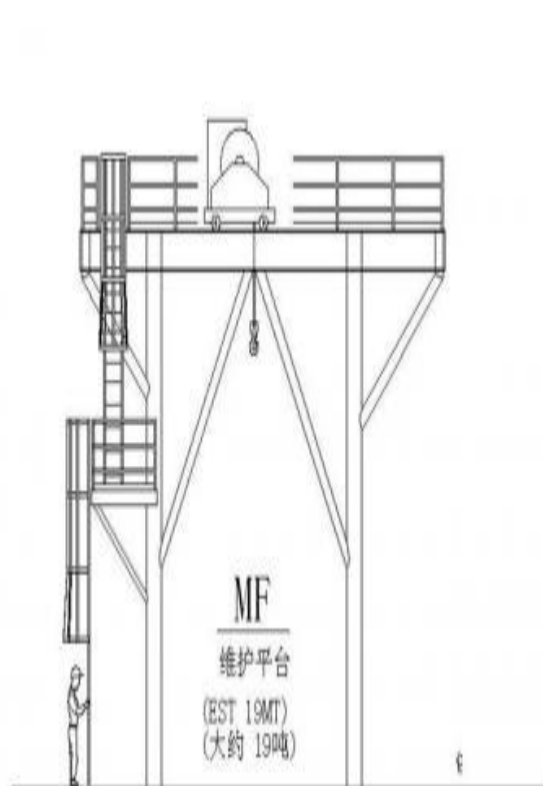
3. 系泊系统

- 单点系泊，主要的用途是作为一个模块安装或者连结在FPSO上，提供海上定位的解决方法。下图是安装在FPSO船头内部的INTERNAL TURRET

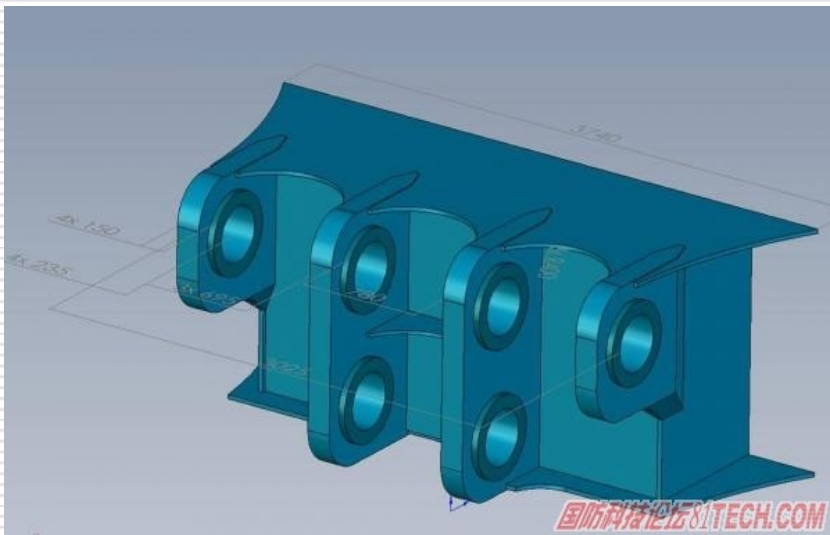
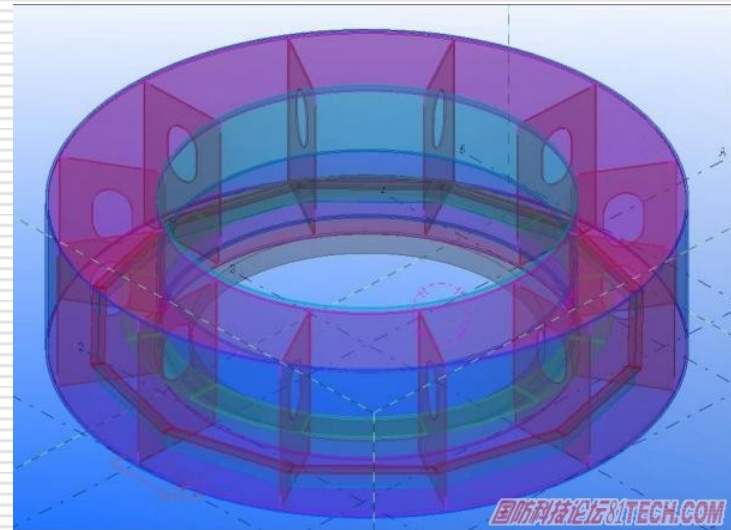
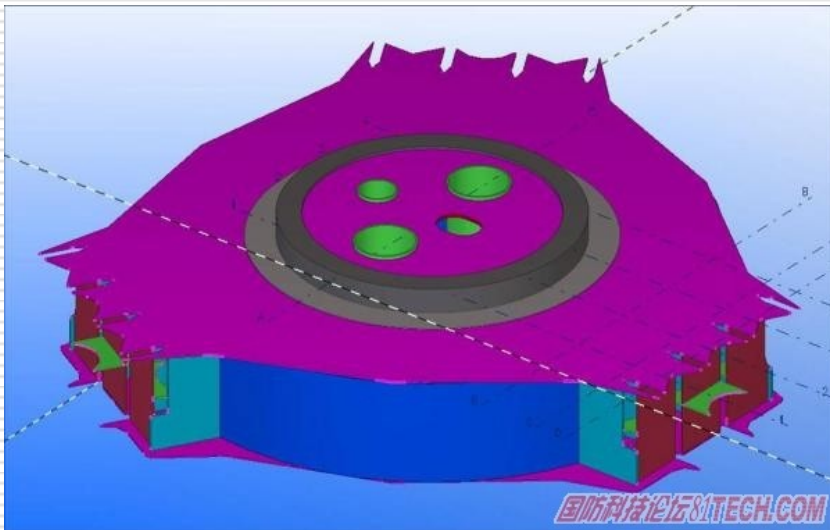


- 它的原理就是在FPSO船体上留出井式空间，将用以连结锚链的CHAIN TABLE通过轴承固定在船底与BEARING SUPPORT栓接，BEARING SUPPORT焊接在船体上。同时在井式空间的最上面焊接一个绞车固定架 (MAINTANANCE FRAME)，用以维护该系统。

3. 系泊系统



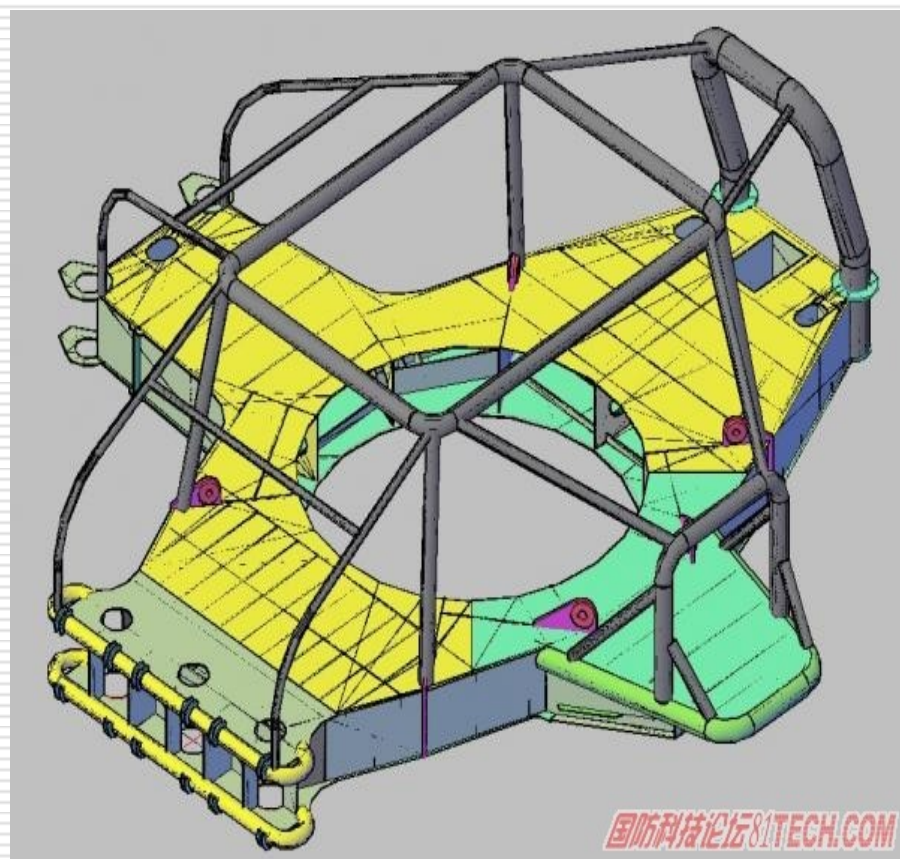
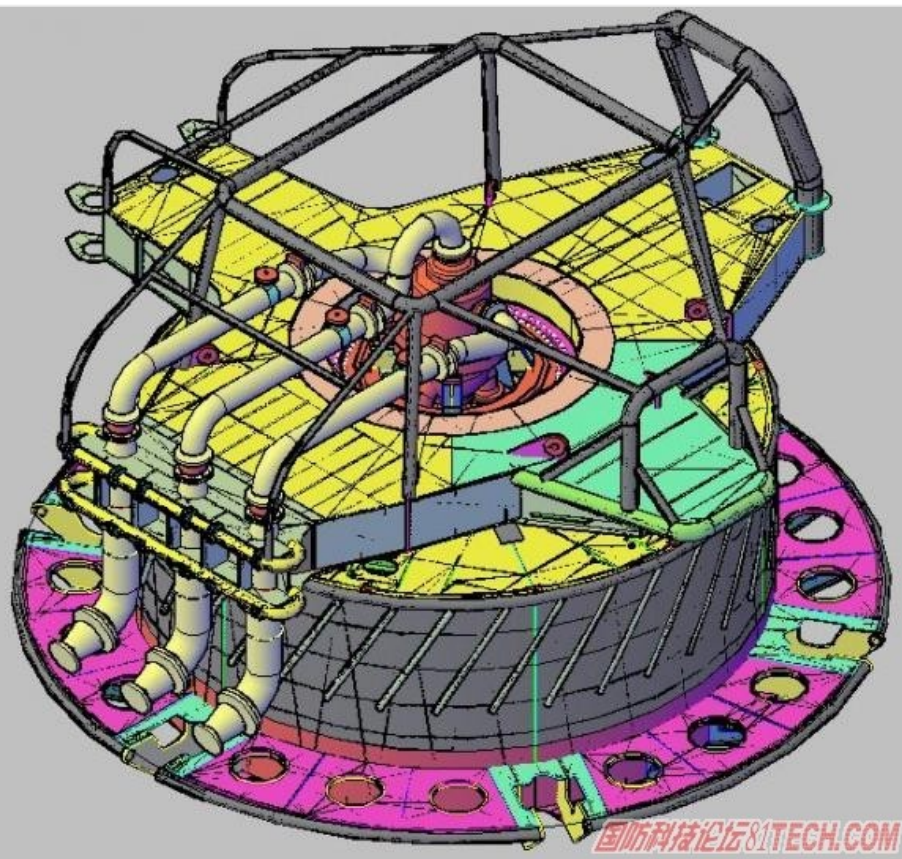
3. 系泊系统



3. 系泊系统



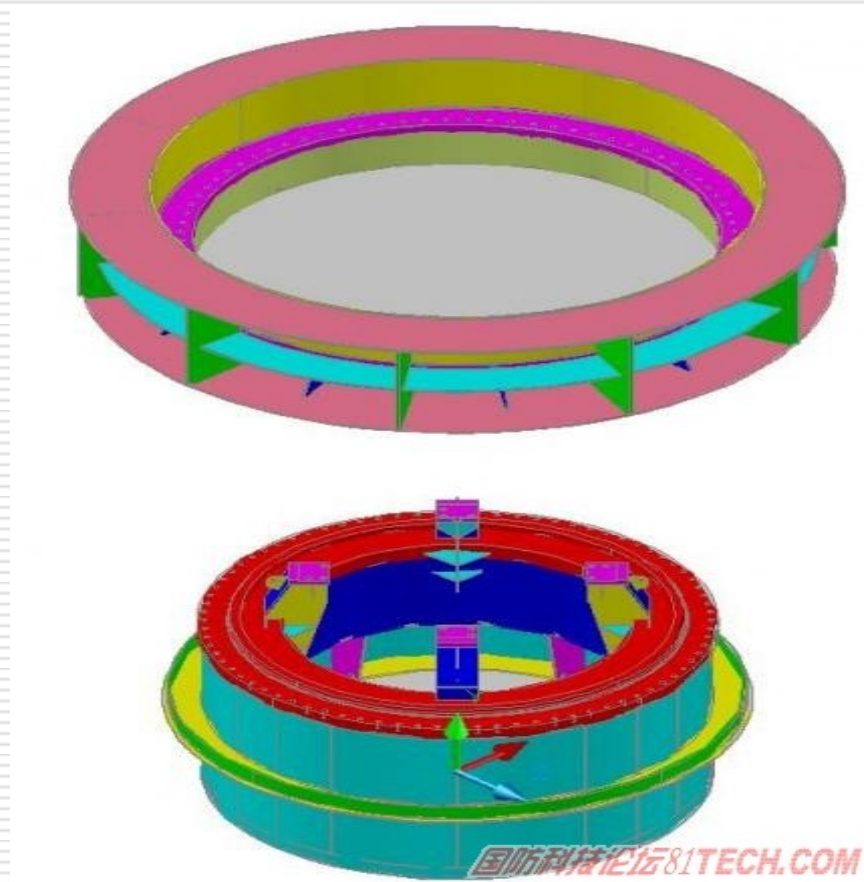
典型的单点系泊浮筒:



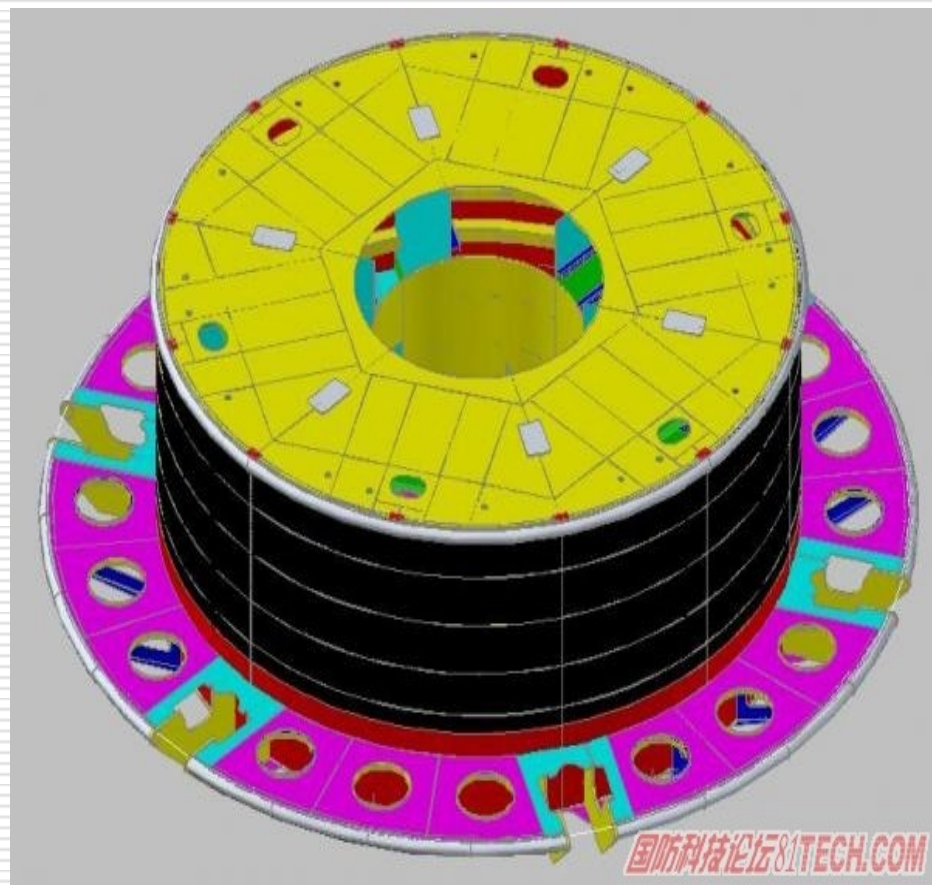
旋转平台

3. 系泊系统

典型的单点系泊浮筒:



轴承支撑环



浮筒本体

3. 系泊系统



塔架软钢臂系泊系统

3. 系泊系统



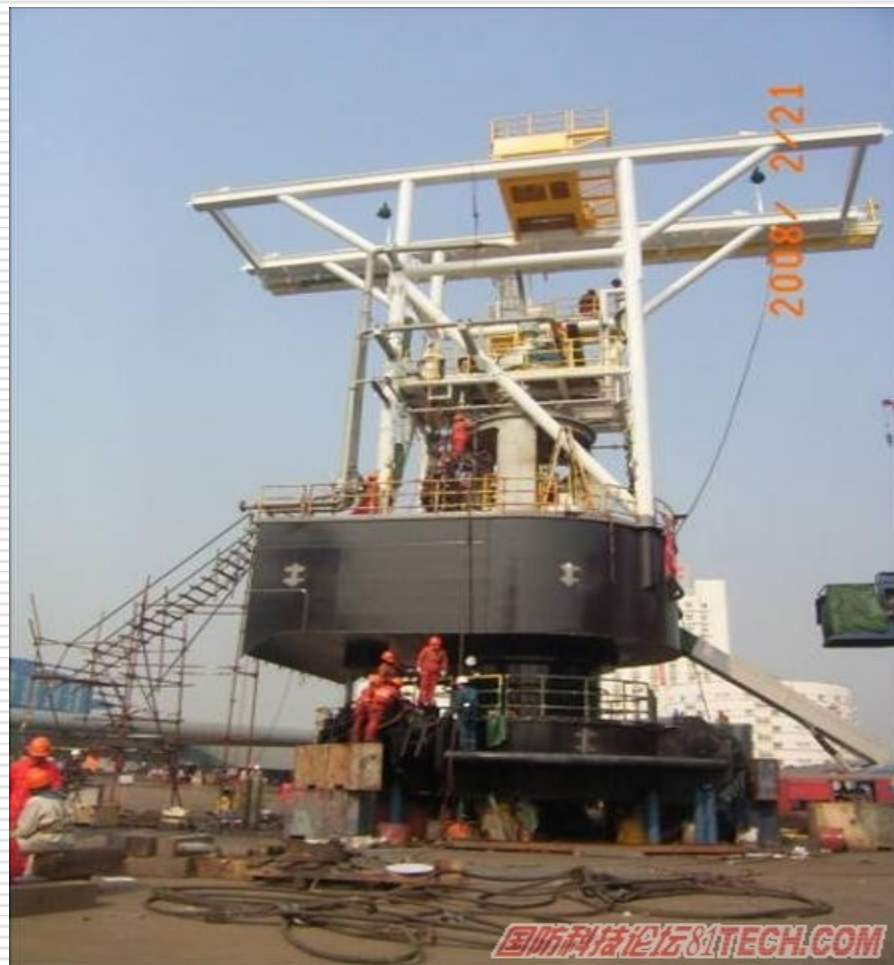
3. 系泊系统



3. 系泊系统



3. 系泊系统



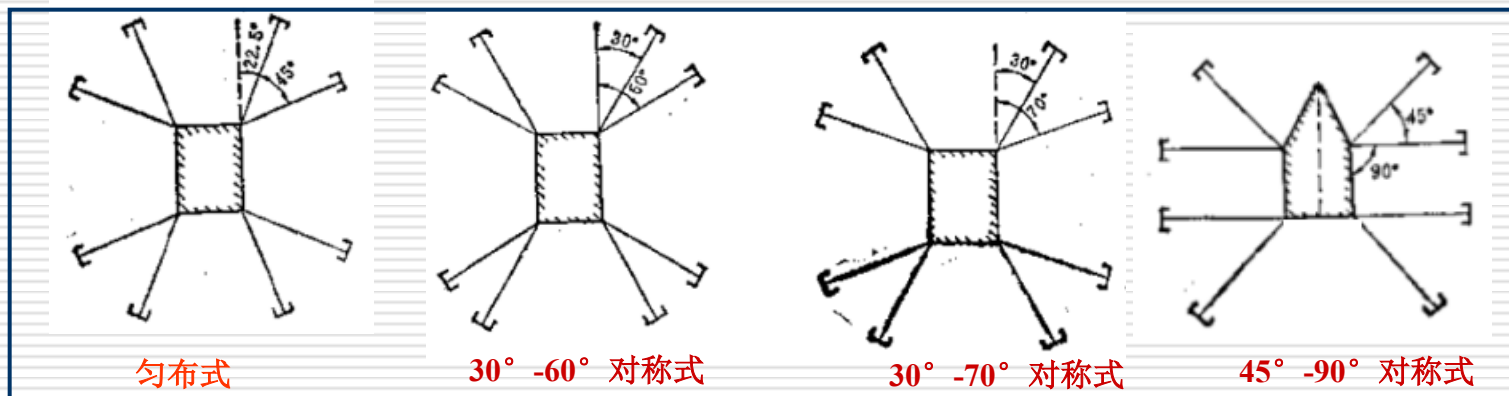
3. 系泊系统



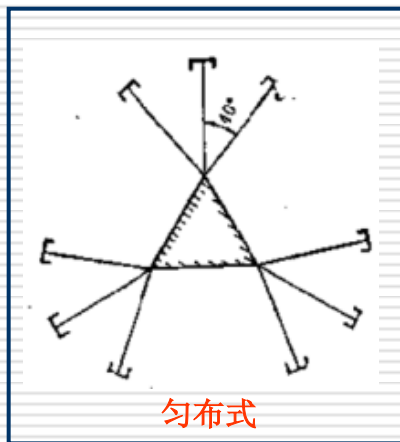
3. 系泊系统

● 多点系泊系统

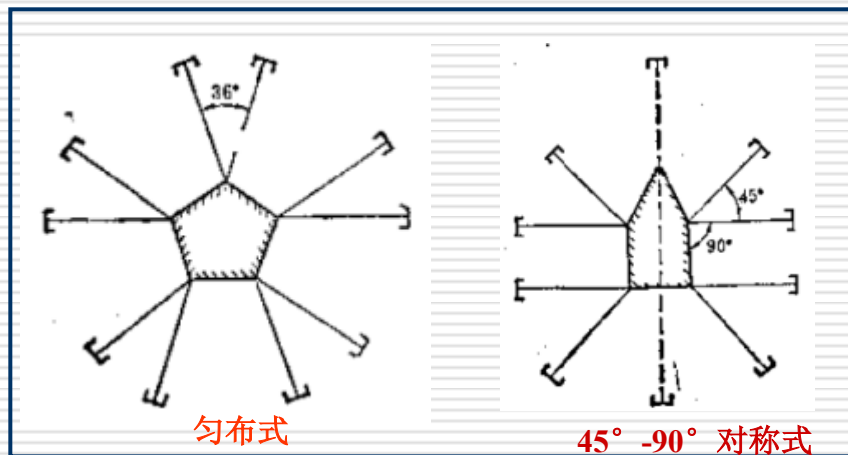
八锚-矩形平台



九锚-三角平台



十锚-五角形平台



3. 系泊系统

- 漂泊于水上作业的钻井船和半潜式平台的锚泊定位系统必须具有**足够的恢复力**，以保证平台位于井口上方顺利地进行工作。
- 在外载荷的作用下，它们的活动半径(即水平偏移)应**不超过某一限度**。
- 其次，在停止钻井工作而隔水管尚未脱开时，锚泊系统仍应将平台的偏移**控制在一较大的范围内**。
- 在自存状况，隔水管和水底防喷器已与平台脱开，此时不存在限位问题，但应考虑**减小**锚索链上所受的张力，确保平台安全。
- 由于定位锚泊系统呈现多锚辐射状分布，且为了增大系统的回复力，每根锚链索上都加了**预张力**。
- 当平台受到大风浪而处于停钻或自存状态时，上风一侧锚索链的张力很大，此时，若**放松下风一侧锚索链**，可减小锚索链上所受的张力且减小平台的最大位移。