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

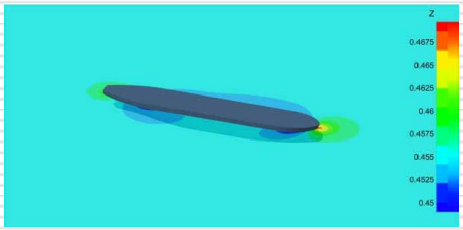
HP:18668214196

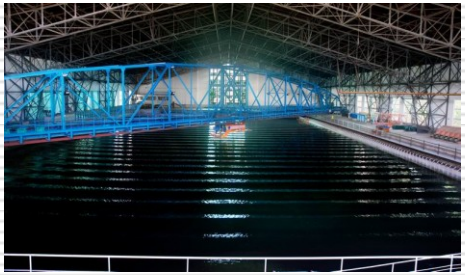
海洋工程的前沿学术问题

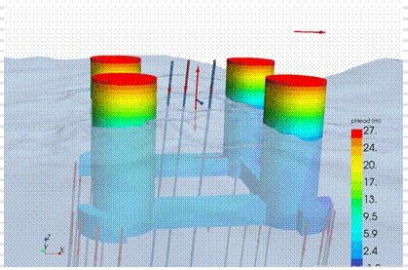
1. 基于CFD的数值模拟理论与方法研究
2. 非线性水动力学、结构物非线性动力响应机理数值方法研究
3. 极限海洋环境及其与结构物相互作用研究
4. 海洋结构物强度与可靠性研究

1. 基于CFD的数值模拟理论与方法研究

- 波-流-结构物相互作用问题的数值模拟：小尺度问题(如海洋平台立柱，锚链，系泊系统)和大尺度问题(如人工岛，海上机场，储油罐)的波流场数值模拟和水动力特性的计算;
- 深海水动力学问题的数值模拟：包括分层流和内波，复杂潜流，深海管线内流和外流耦合，立管多模态涡激振动，海洋结构物大变形流固耦合的水弹性问题，深海锚链系统的数值分析和水动力性能计算;
- 船舶与海洋工程数值水池：数值造波、数值造流、船舶和海洋结构物在复杂波流和各种限制环境下的全流场数值模拟;
- 全尺度船舶与海洋结构物复杂流动问题的大规模并行数值计算仿真：实船、船-桨-附体、超大型海上浮体和平台的流场数值模拟和水动力性能预报。







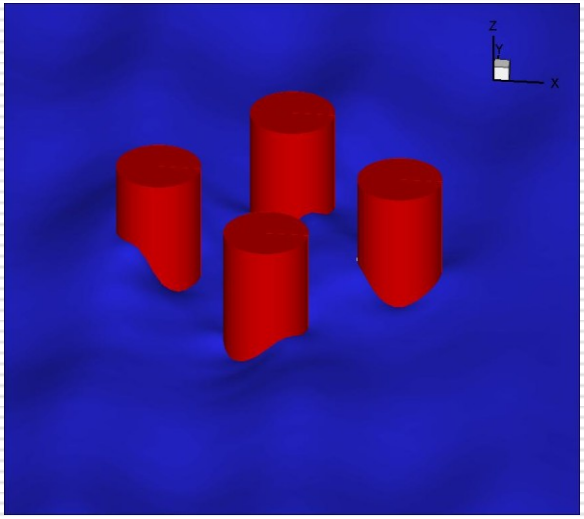
1. 基于CFD的数值模拟理论与方法研究

- 波-流-结构物相互作用

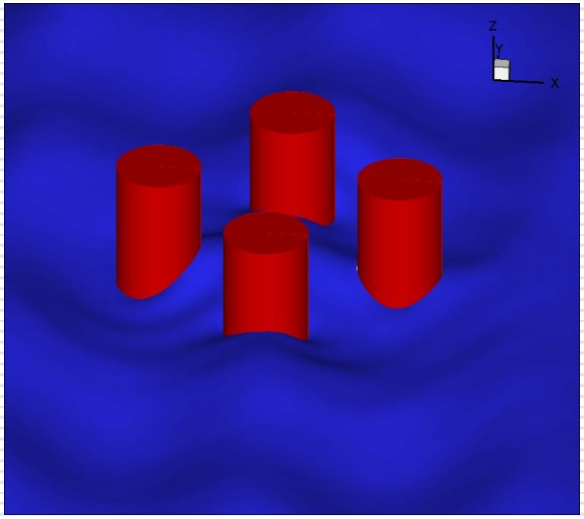
$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial \phi}{\partial x}\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{\partial \phi}{\partial y}\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{\partial \phi}{\partial z}+U_0\frac{\partial \eta}{\partial x}=0 \qquad \text{on } S_f$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t}+g\eta+\frac{1}{2}\left|\nabla\phi\right|^2+U_0\frac{\partial \phi}{\partial x}=0 \qquad \text{on } S_f$$

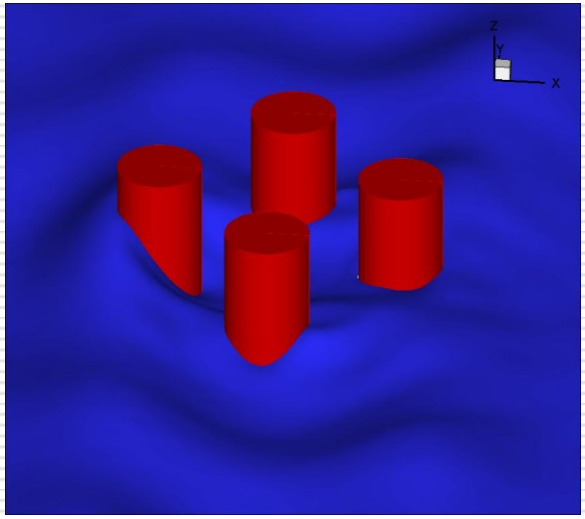
$$\frac{\partial \phi}{\partial n}=-U_0 n_x \qquad \text{on } S_b$$



Fn=-0.1



Fn=0.0

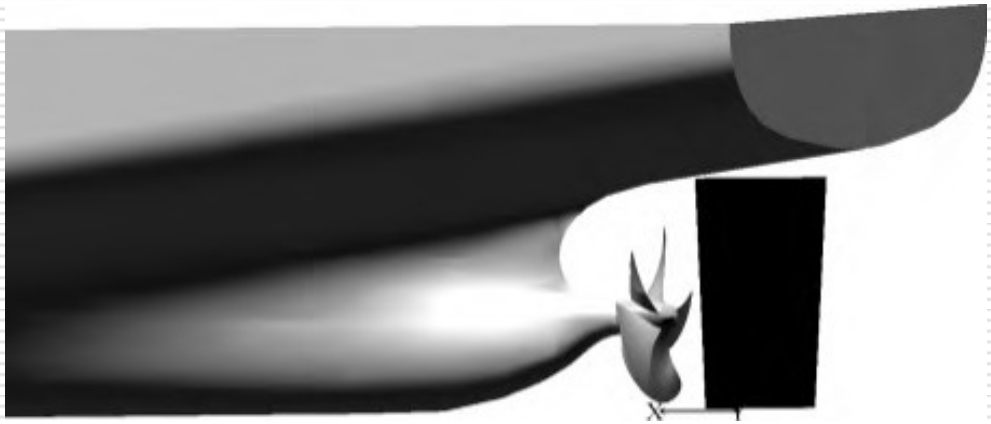


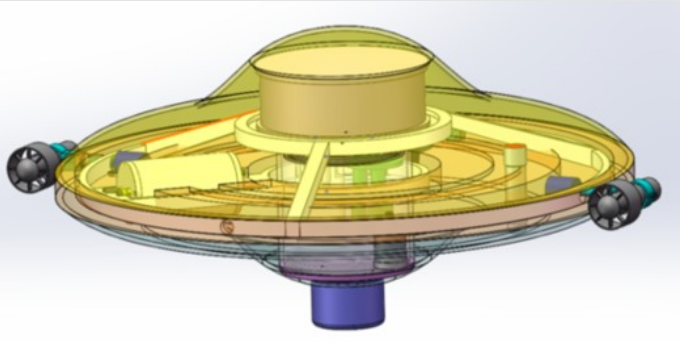
Fn=0.1

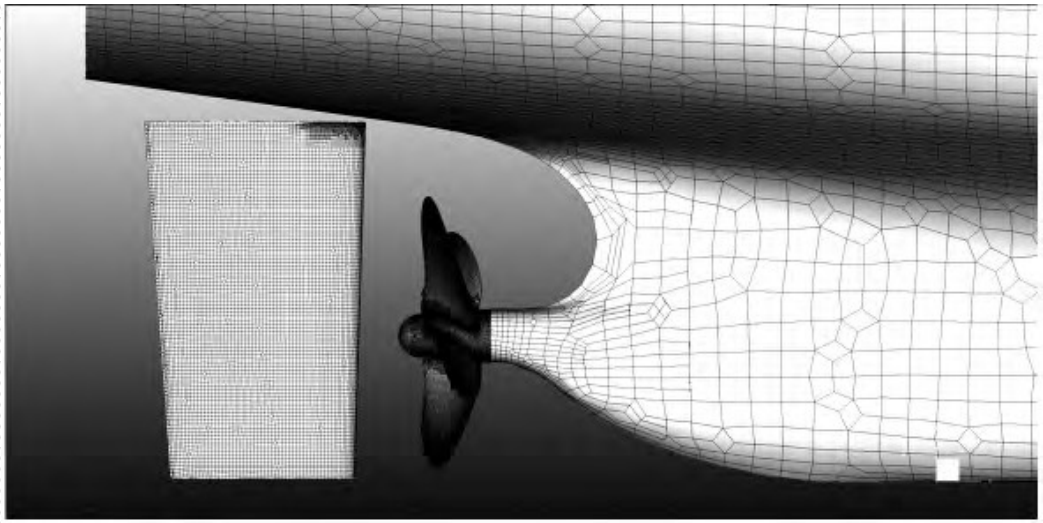
Wave profiles at *t/T*=29

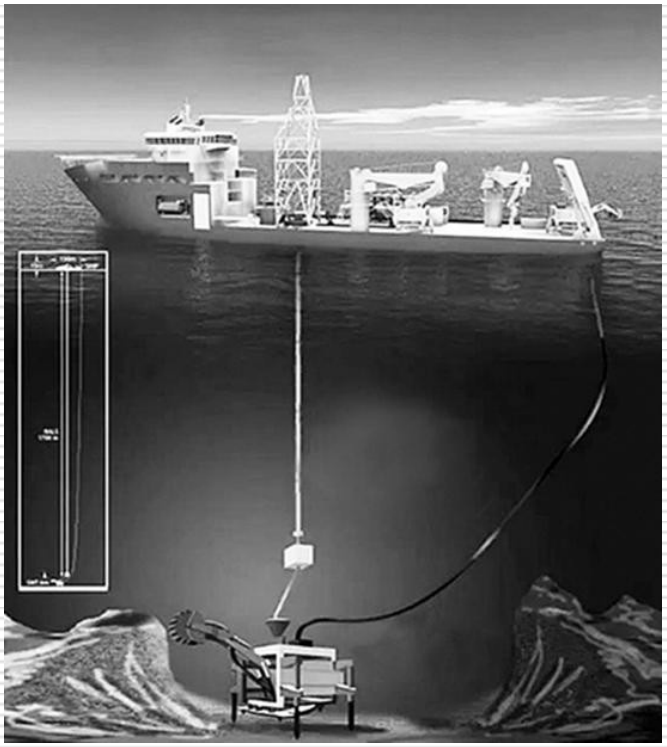
1. 基于CFD的数值模拟理论与方法研究

- 全尺度船舶与海洋结构物



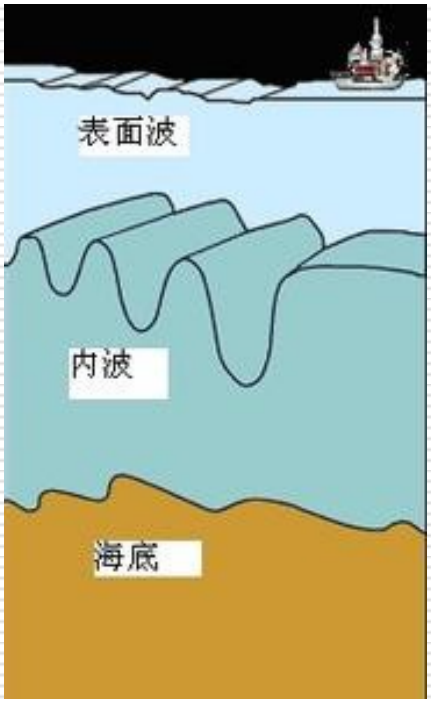


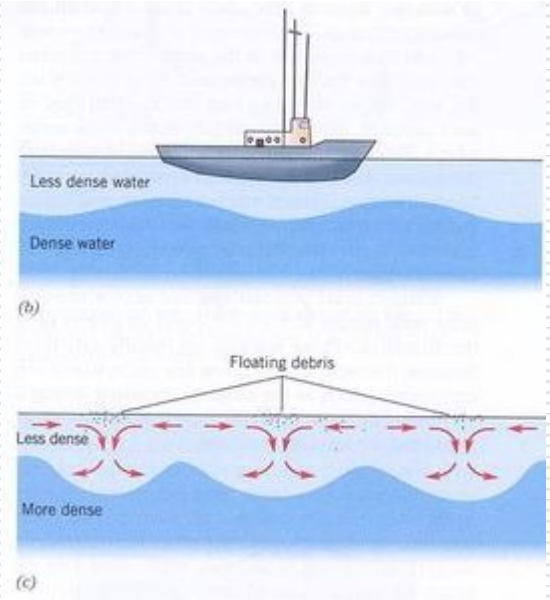




1. 基于CFD的数值模拟理论与方法研究

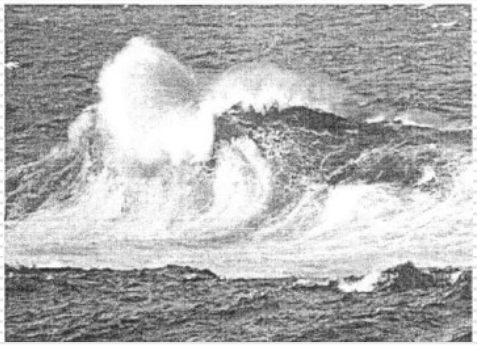
- 内波(Internal wave)：是密度相差较大的水层界面上的波动。可在各种深度的海洋中产生，其波高比表面波大的多，常可达几十米，甚至近百米。会产生“死水”和“共振”现象。遇此现象时应改变航向或航速。
- 1963年6月10日，美国“长尾鲨”号核潜艇在波斯顿以东深海作超水下300m深潜。由于机舱内海水系统完全损坏，耐压壳体招架不住海水的压力，船体炸的粉身碎骨，129名试航人员全部遇难。

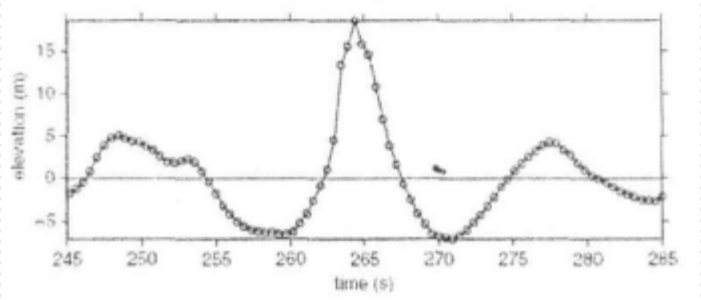




1. 基于CFD的数值模拟理论与方法研究

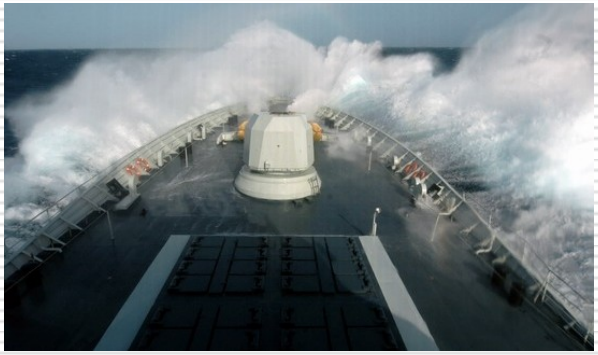
- 畸形波（Freak wave）：也叫凶波（rogue wave)或巨波(giant wave、extreme wave)。波高比一般波大很多，而且出现很突然，几乎无规律可言；
- (1) 畸形波波高大于两倍的有效波高；(2)畸形波波高大于两倍的前后两个波的波高；
- 对海上建筑物容易产生巨大危害。最早的记录是由它引起1896年葡萄牙Spray号船的倾覆。





2. 非线性水动力学数值方法研究

- 强非线性水波的相互作用和干扰；
- 强非线性水波、风、非均匀流与海洋工程结构物的相互作用：艏艉砰击载荷、甲板上浪及其载荷、液舱晃荡载荷、深海平台波浪爬升等；
- 船舶与海洋浮体非线性响应的机理与预报方法：非线性海洋环境载荷，海洋结构物整体非线性响应破坏机理；
- 高速水动力学：高速艇在波浪中的运动、飞机水上迫降、特种飞机在波浪中的起飞和降落。

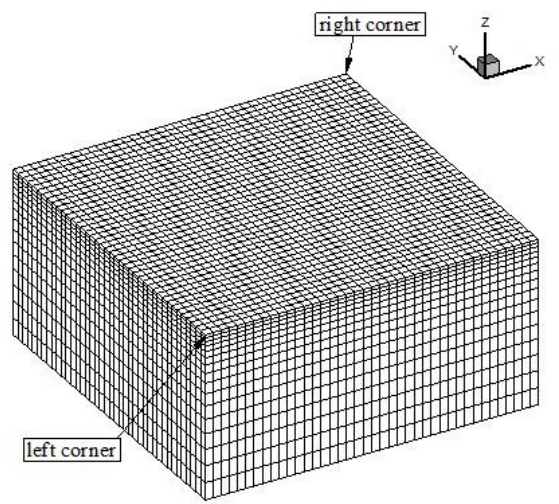


2. 非线性水动力学数值方法研究

- 甲板上浪 (green water): 甲板上浪通常指当船舶遭遇波浪，来波作用于船体并超越干舷，海水冲上甲板的现象。甲板上浪发生过程大致可分为以下四个阶段:波浪爬高、甲板进水、甲板上水体流动和水体冲击甲板或甲板室。
- 甲板上浪是一种强非线性的波体相互作用问题，现象十分复杂。近年来，甲板上浪导致的FPSO(浮式生产
- 的船首甲板和上层建筑严重损坏事故时有发生，甲板上浪问题因此也越来越受到国内外研究人员的重视。
- 甲板上浪问题很久以前就已被海洋工程界所关注，但该问题在数学上是个极难求解的强非线性问题，现象又十分复杂。
- 研究方法：概率与线性水动力理论的结合、浅水近似理论、基于混合欧拉-拉格朗日描述的边界元法、CFD方法(MAC ,VOF , LEVEL-SET , SPH , CIP等)

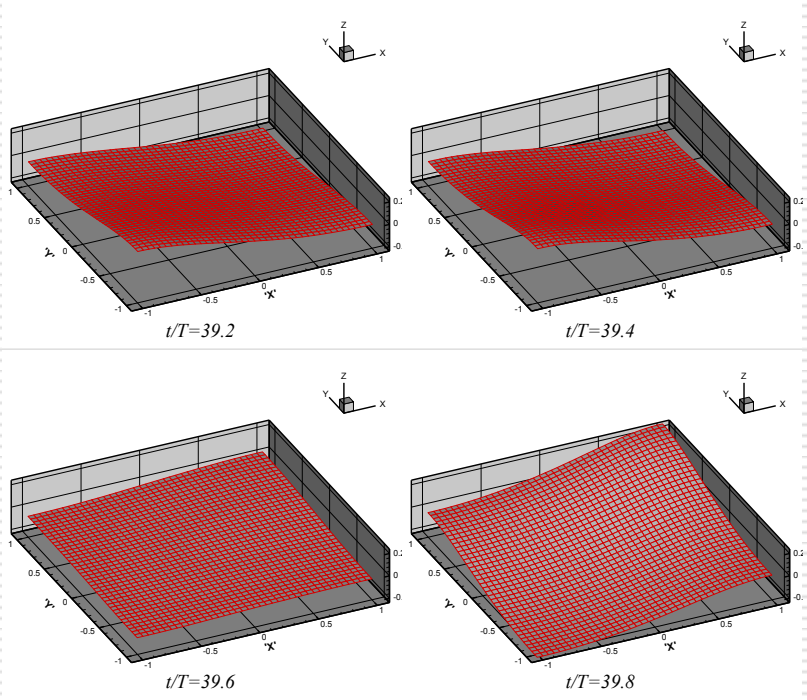
2. 非线性水动力学数值方法研究

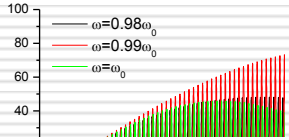
- 液体晃荡 (sloshing)



Discretisation by 8-node hexahedronal elements

- 3D sloshing waves in a tank

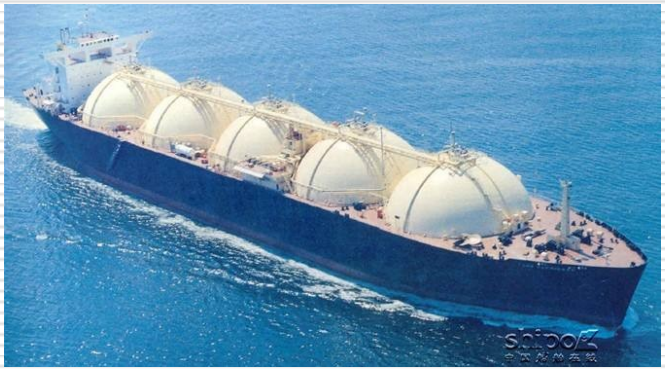




Histories of wave at the left wall of the container at A=0.0025d

Wave profiles at t/T=39.2, 39.4, 39.6 and 39.8 at $\omega=0.99\omega_0$ and A=0.005d

2. 非线性水动力学数值方法研究

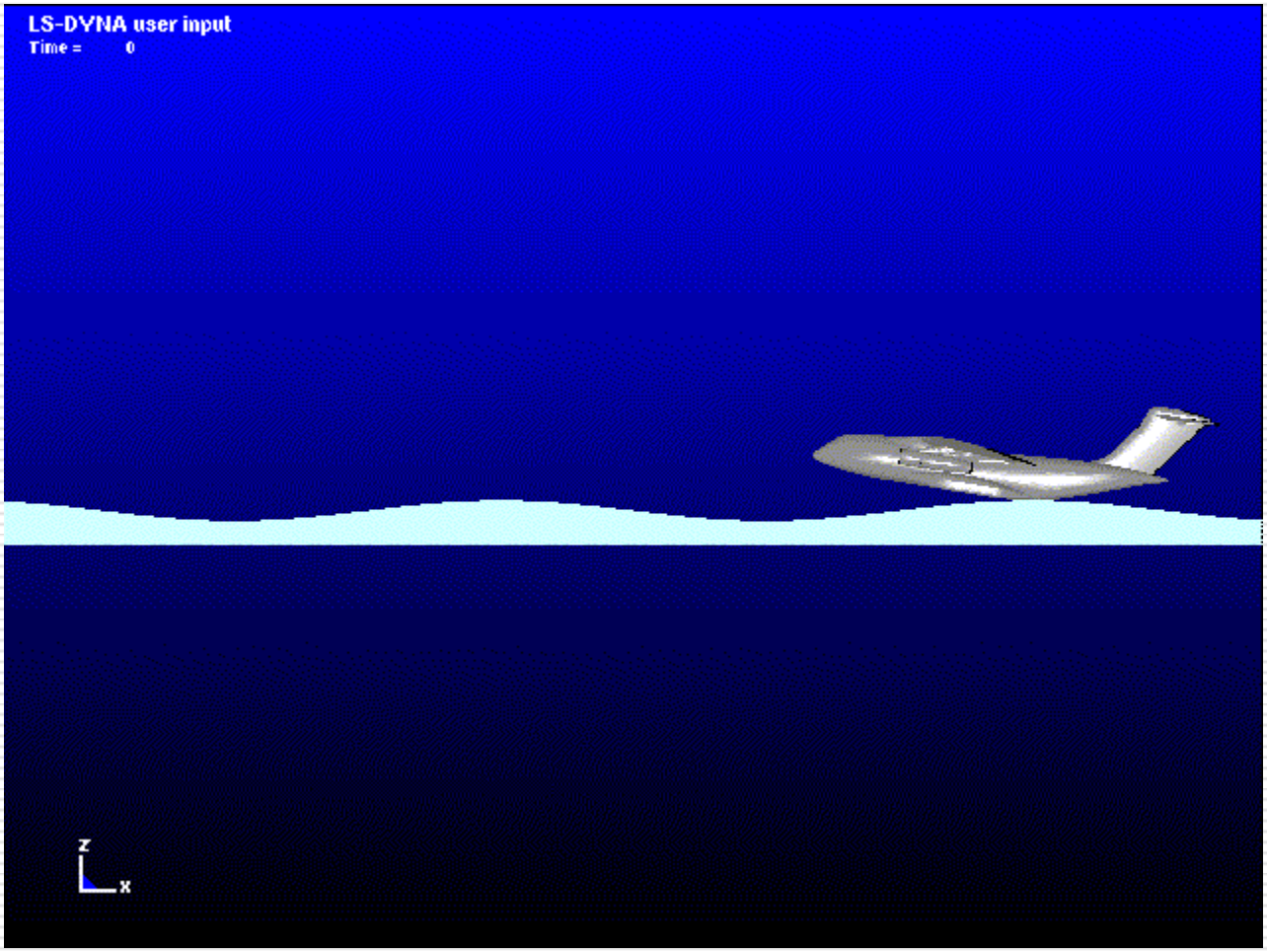


液化气船（LNG）

油船

2. 非线性水动力学数值方法研究

- 高速水动力学：



飞机水上迫降

3. 极限海洋环境及其与结构物相互作用研究

- 极限海洋环境的数理描述：最危险状态的海况;
- 极限海洋环境与结构物的作用机理：最危险状态的海况下海洋结构物所受到的外界环境载荷;
- 复杂海洋水声环境效应规律。

4. 海洋结构物强度与可靠性研究

- 船舶与海洋结构物极限承载能力;
- 海洋结构物全寿命周期分析设计方法;
- 新型复合材料结构强度与设计;
- 基于可靠性和风险评估技术的结构分析方法。

海洋工程领域的前沿研究方向

1. 船舶与海洋工程水动学领域

船舶与海洋工程水动力学是研究海洋平台（航行体/结构物）在复杂海洋环境条件下的流动现象、预报和控制海洋平台的非线性／动态载荷与响应的基础性研究科学，是流体动力学的重要分支领域。

1.1 非线性水动力学

1）强非线性水波、风、非均匀流与海洋工程结构物的相互作用。

2）深水极端非线性海洋环境，以及浅水非线性海洋环境的研究；

3）船舶与海洋浮体整体非线性响应的机理与预报方法，包括：三维非线性水弹性与击振、参数型横摇运动的时域分析、极限运动与倾覆分析、液舱晃荡与船舶运动非线性耦合分析、超大型FPSO浅水效应以及多浮体水动力性能研究等。

4）船舶局部强非线性流动和响应预报理论，包括艏艉砰击载荷、甲板上浪及其载荷、液舱晃荡载荷、深海平台波浪爬升等。

5）船舶与海洋浮体非线性响应试验技术的研究，包括非线性海洋环境的模拟技术，船舶与海洋浮体整体与局部非线性响应的测试技术等。

海洋工程领域的前沿研究方向

1.2 计算水动力学（CFD）

1）波-流-结构物相互作用问题的数值模拟，包括小尺度问题(如海洋平台立柱，锚链，系泊系统)和大尺度问题(如人工岛，海上机场，储油罐)的波流场数值模拟和水动力特性的计算。

2）深海水动力学问题的数值模拟，包括分层流和内波，复杂潜流，深海管线内流和外流耦合，立管多模态涡激振动，海洋结构物大变形流固耦合的水弹性问题，深海锚链系统的数值分析和水动力性能计算。

3）船舶与海洋工程数值水池仿真实验室研究，包括数值造波，数值造流，船舶和海洋结构物在复杂波流和各种限制环境下的全流场数值仿真和动态演示方法和技术。

4）全尺度船舶与海洋结构物复杂流动问题的大规模并行数值计算仿真，主要是针对实船、船-桨-附体、超大型海上浮体和平台的流场数值模拟和水动力性能预报。

5）船舶与海洋结构物优异水动力性能的数值技术开发研究，即通过数值模拟实行船舶减阻，船型优化，新船型开发，海洋平台优化设计，新概念船舶和海洋结构物开发的方法和技术。

6）船舶与海洋工程水动力学问题数值计算的非确定性分析，包括对数学模型、湍流模式、方程离散、数值方法、编程过程、编译系统等误差源的非确定性分析。

海洋工程领域的前沿研究方向

1.3. 海洋工程结构物水动力性能

- 深海平台水动力性能

研究半潜式平台水动力性能；立柱式平台（SPAR）水动力性能；张力腿平台（TLP）水动力性能；新概念深海平台水动力性能；深海平台与定位系统的耦合水动力分析；深海平台海上运输与安装过程水动力分析；深海平台极限环境载荷、低频响应、高频振动、波浪爬升与砰击、涡激运动及控制等特殊水动力性能；内波与深海平台系统的水动力作用等。

- 浮式生产储卸油系统（FPSO）水动力性能

研究FPSO与单点系泊系统的耦合水动力分析；FPSO甲板上浪与砰击等特殊水动力性能；浅水FPSO系统水动力性能；单点系泊FPSO水平面运动与稳定性分析等。

- 深水海洋工程水动力模型实验方法

研究特殊海洋动力环境模拟方法；深海平台混合模型实验方法；深水系泊系统、立管系统的等效模拟方法；波浪爬升等模型实验方法；动力定位系统模型实验方法；海洋工程结构物水动力性能的海上实测技术；深海平台极限环境载荷、低频响应、高频振动与砰击、涡激运动及控制等特殊水动力性能；内波与深海平台系统的水动力作用等。

海洋工程领域的前沿研究方向

1.4 流固耦合

- 单体弹性浮式结构物的动力响应研究

  研究单体浮式结构物水弹性响应的时域分析理论；碰击作用下的弹性浮式结构物水弹性响应分析技术；甲板上浪作用下的弹性浮式结构物水弹性响应分析技术；考虑二阶波浪力作用下的弹性浮式结构物水弹性响应分析技术等。

- 多体弹性浮式结构物的动力响应研究

  研究多体浮式结构物水弹性响应的频域分析理论研究；多体浮式结构物水弹性响应的时域分析理论研究；考虑波浪二阶力贡献的多体浮式结构物水弹性响应分析技术。

- 基于CFD和结构动力学的海洋结构物水弹性响应分析理论研究

1.5 实验水动力学

- 复杂、灾害性深海环境模拟理论与方法

  研究内容包括：奇异波与碎波等模拟理论与方法；任意主方向短峰波、双峰谱短峰波、奇异波叠加短峰波等不规则波模拟理论与方法；分层流、内波模拟理论与方法；均匀稳定深水流、剪切深水流、高速表层流等模拟理论与方法；非定常风场模拟理论与方法。

海洋工程领域的前沿研究方向

- 船舶与海洋工程模型试验理论与技术

研究船舶与海洋工程模型试验尺度效应与相似律；深海平台、深水系泊系统、立管系统的水深截断模拟理论与技术；平台涡激运动及深海柔性构件涡激振动实验技术；甲板上浪、波浪爬升、砰击、晃荡等非线性力学模型试验技术；水下运载器操纵与控制模型试验技术；深海立管结构疲劳试验技术等。

- 大型海上装备现场测试

研究海上风、浪、流环境现场测量与分析方法；海上装备运动性能现场测量方法；系泊系统和立管系统运动与载荷现场测量方法；现场测试数据的长期自动同步采集、传输与处理；现场监测及远距离遥控监测系统等

2 海洋结构物强度与可靠性

2.1 海洋结构物整体与极限强度局部强度

- 船舶与海洋结构物总强度分析方法

研究全结构有限元分析模型的建立以及简化力学分析模型的建立；海洋工程结构在爆炸载荷下的安全性评估；有限元建模不确定性研究；基于可靠性理论的结构总强度安全性评估技术；基于总强度和局部强度协调一致的结构优化设计技术等。

海洋工程领域的前沿研究方向

- 船舶与海洋结构物极限承载能力研究

研究结构极限状态下逐步倒塌的非线性仿真技术；结构总体屈曲和局部屈曲的相互作用分析；焊接残余应力对极限强度影响；制造加工变形的随机特性对极限强度的影响；腐蚀对极限强度的影响；含裂纹结构的极限强度分析；局部损伤结构（比如凹陷）对极限强度影响的分析技术。

2.2 海洋结构物局部强度与疲劳寿命

- 海洋结构物局部强度的应力分析设计方法研究

研究海洋结构物局部应力三维有限元分析标准化；海洋结构物的局部强度应力分类设计理论；海洋结构物在极端环境条件下局部强度控制准则等。

- 海洋结构物疲劳分析

研究高强度钢等海洋工程结构材料在海洋环境条件下的疲劳性能研究;非线性疲劳损伤模型研究;随机载荷作用下的疲劳裂纹扩展寿命预报方法；随机载荷谱及疲劳载荷谱标准化研究；深海柔性立管疲劳特性的预报与实验研究；缆索结构在复杂海洋环境载荷作用下的疲劳特性预报及实验研究等。

海洋工程领域的前沿研究方向

- 海洋结构物全寿命周期分析设计方法

研究海洋工程材料的腐蚀模型研究；海洋结构物的腐蚀疲劳模型研究；基于腐蚀、疲劳损伤演化的全寿命周期海洋结构物设计方法研究等。

2.3 海洋结构物非线性动力响应

- 海洋结构物极端响应

研究深水极端非线性海洋环境载荷，海洋结构物整体非线性响应破坏机理与预报方法。

海洋结构物耦合动力响应

研究海洋结构物与强非线性波浪相互作用机理、海洋结构物与系泊系统和立管系统的非线性流固耦合分析方法。

- 海洋结构物局部非线性动力响应

研究海洋结构物局部强非线性振动和响应预报理论，包括艏艉砰击载荷、甲板上浪及其载荷、波浪爬升等。

- 海洋结构物非线性屈曲

研究超大潜深结构与海底管道的非线性屈曲特性。

海洋工程领域的前沿研究方向

2.4 基于可靠性和风险评估技术的结构分析方法

- 船舶与海洋结构物全寿命周期安全性评估

研究船舶与海洋结构物自诊断与安全性评价；全生命周期下的船舶与海洋结构物的设计与建造理论；船舶与海洋结构物全寿命风险评估与决策；海洋结构物正常使用工况条件下的危险区域的识别；海洋结构物在极端环境条件下风险控制技术等。

- 事故损伤评估

研究碰撞、触礁、燃烧等过程对船舶与海洋结构物的损伤机理；近船体爆炸冲击波的传播特性及其与船体表面的相互作用机理；水下爆炸气泡对船体结构毁伤机理及剩余生命力；船舶与海洋结构物结构疲劳断裂、极限强度、防腐疲劳损伤感知、监测；重大事故发生后船舶与海洋结构物的环境载荷和剩余极限强度分析；重大事故情况下的修复费用效益评估等。

- 风险评估的理论研究

研究海洋结构物重大灾难性事故统计及发生的概率分析；海洋结构物风险概率与损失模型；海洋结构物风险决策模型；海洋结构物工程保险精算研究；船舶与海洋结构物灾害性事故中人因失效模式及影响分析；基于风险的海洋结构物的损伤检测、诊断、险情预报、维修和报废决策等。

海洋工程领域的前沿研究方向

2.6 结构物海底基础强度与可靠性

- **深海结构物海底基础强度特性**

研究深海结构物海底基础强度与极限承载特性；深海结构物海底基础与周围地层介质相互作用的破坏模式与承载能力；考虑海底地下水渗流影响的深海结构物海底基础强度的计算理论与数值方法；深海结构物海底吸力式桶形基础沉贯过程中的关键技术；深海结构物海底基础强度与变形的现场量测技术等。

- **极端灾害环境下深海结构物海底基础动力特性**

研究极端环境荷载作用下深海结构物海底基础动力响应与安全性评估；海洋结构物海底基础与海底冲刷的耦合动力分析；深海结构物海底基础与周围地层介质相互作用的模型试验技术；地震等极端灾害环境作用下海底地基砂土液化及对结构物基础强度的影响。

- **深海结构物海底基础可靠性**

研究海底结构物自诊断技术与可靠性评价；全生命周期下海洋结构物海底基础的设计与建造理论；结构物海底基础全寿命风险评估与决策；海洋结构物海底基础与地基在极端环境条件下风险控制技术。

海洋工程领域的前沿研究方向

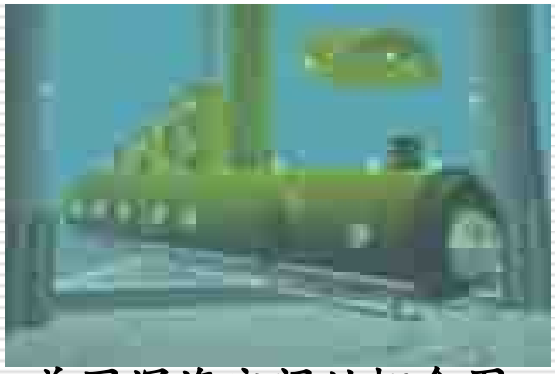
3 深海潜器

- **深海空间站**

研究深海空间站顶层设计与总体优化技术；深海空间站超大潜深结构技术研究；深海空间站水动力性能优化与综合预报技术；深海空间站潜器搭载与收放技术；深海空间站站载系统研究等。

- **潜水器总体和集成技术**

研究潜水器的总体设计和集成技术；复杂线型水下航行体的水动力性能预报和优化技术；大深度载人潜水器无动力下潜/上浮技术；载人潜水器系统的安全可靠性技术；大深度载人钛合金球壳的设计及制造技术；低密度耐高压的浮力材料及其加工技术；高能量密度的深海动力技术；针对作业目标的稳定悬停定位技术；



美国深海空间站概念图

长8m,下潜深度7000米，航速2.5-3节。2010年7月18日海试成功。

专题研究与讨论

- 深海立管参激-涡激振动及疲劳研究
- SPAR平台参激运动特性及稳定性研究
- 海上风力发电浮式基础动力特性研究

1. 海洋深水立管的组成与种类

海洋立管用途为：采油/注水；钻井；循环液体的流进和流出；完井；修井。

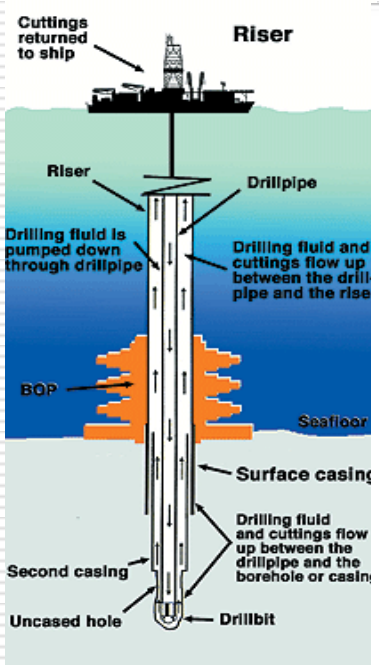
- 立管组成

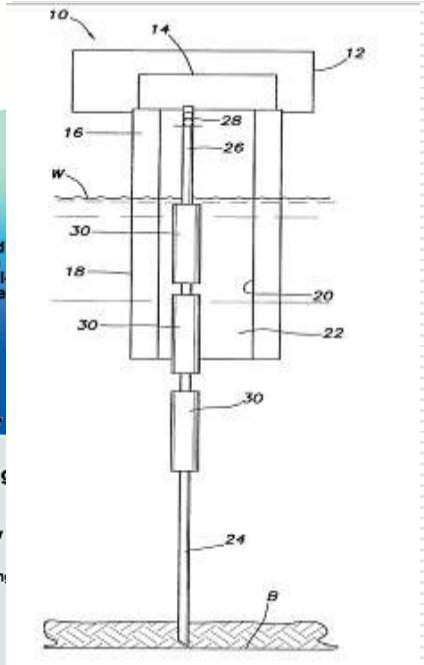
海洋立管是连接水面浮式装置和位于海床的海底设备(如井口、PLEM、总管)的导管，是现代海洋工程结构系统中的重要组成部分之一，同时也是薄弱易损的构件之一。一般情况，海洋立管下端通过万向节与海底井口连接，其上端与平台或船舶底部的滑移节配合。

典型立管系统主要包括：管道、浮体与井口之间的接口设备、部件、辅助件。

- 立管种类

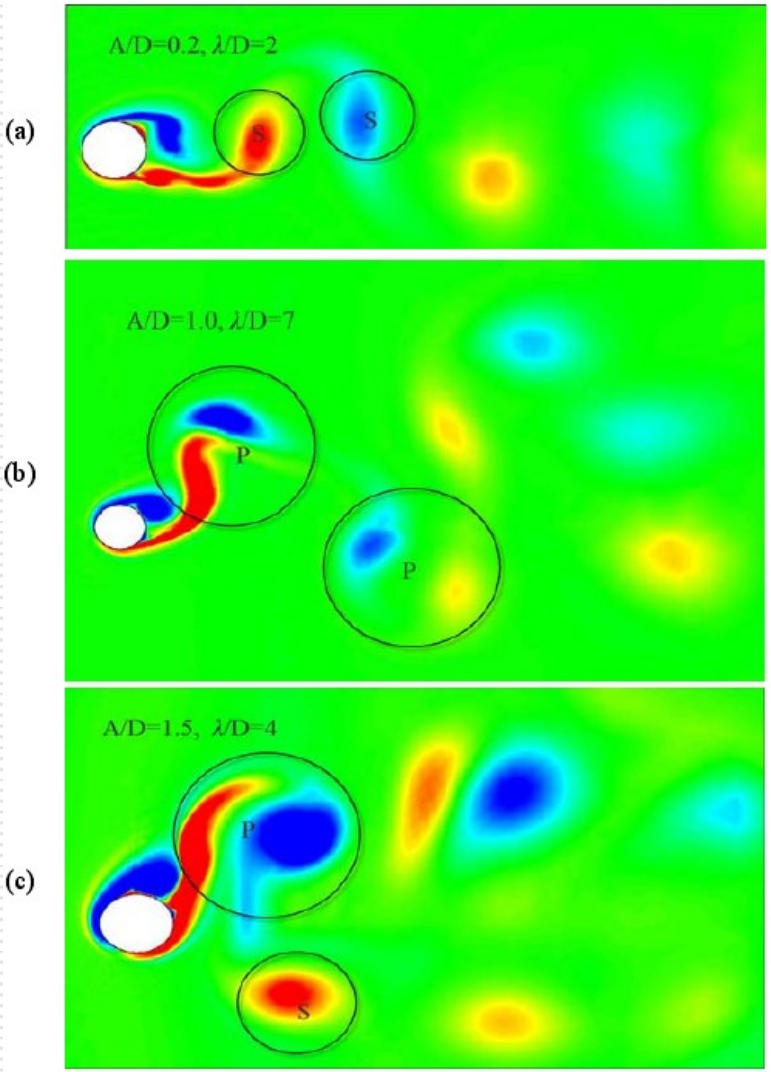
立管的形式本质上有两种，即刚性立管和柔性立管，混合立管是两者的结合。按照线型分又可以分为顶张力立管 (TTRs)、钢悬链线立管(SCR)、惰性S立管、陡峭型S立管、陡峭型波浪立管等。



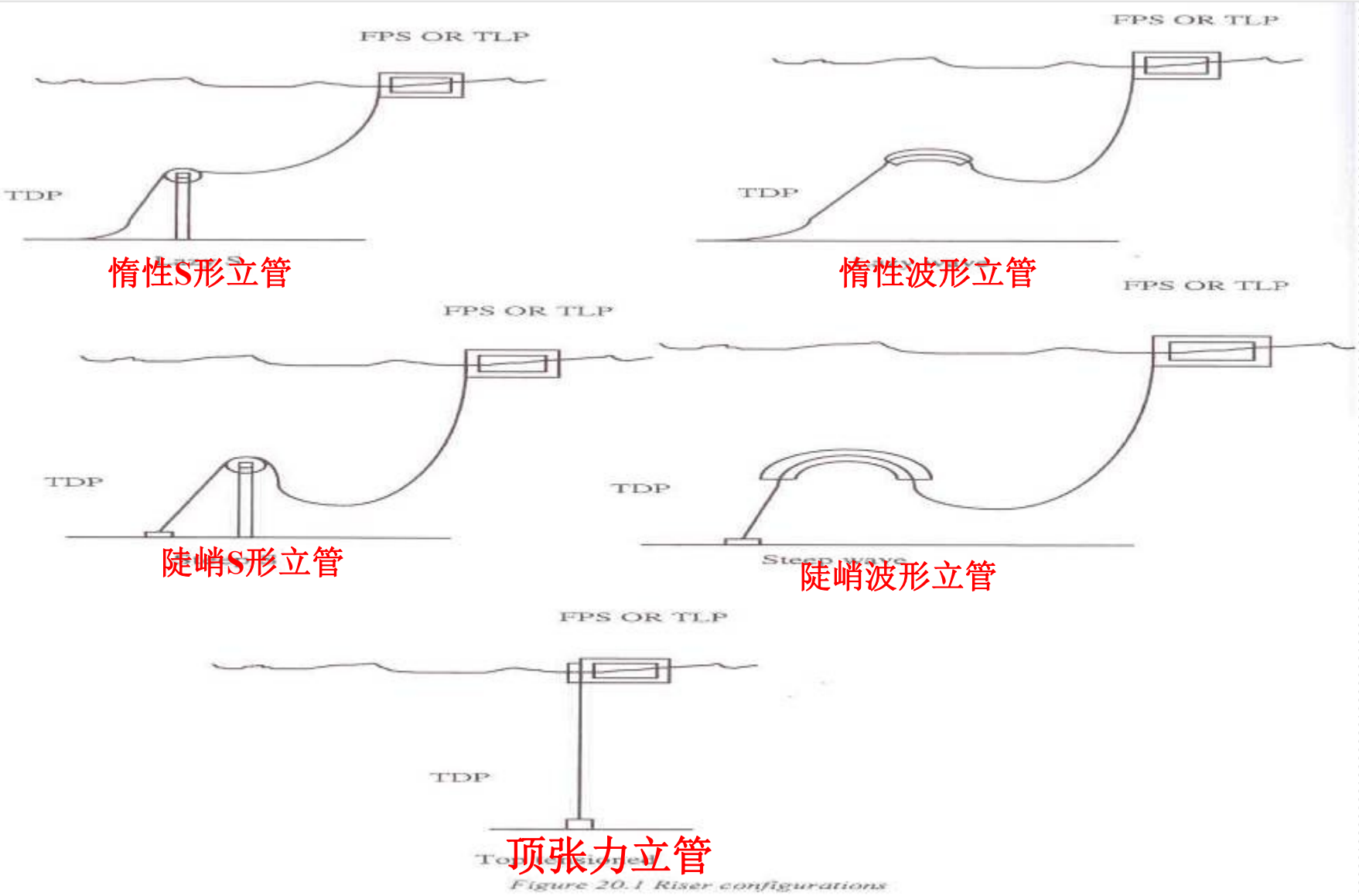


深海立管参激-涡激振动及疲劳研究

- 涡激振动（vortex-induced vibration）：细长管在海流作用下两侧会形成交替的漩涡，漩涡的脱落会导致水管在流向和横向产生周期性的振动，即涡激振动



深海立管参激-涡激振动及疲劳研究



2 TTRs立管存在的主要科学问题

海洋立管下端通过万向节与海底井口连接，上端与平台或船舶底部的滑移节配合：

2.1 作用在立管上的载荷

- 环境载荷

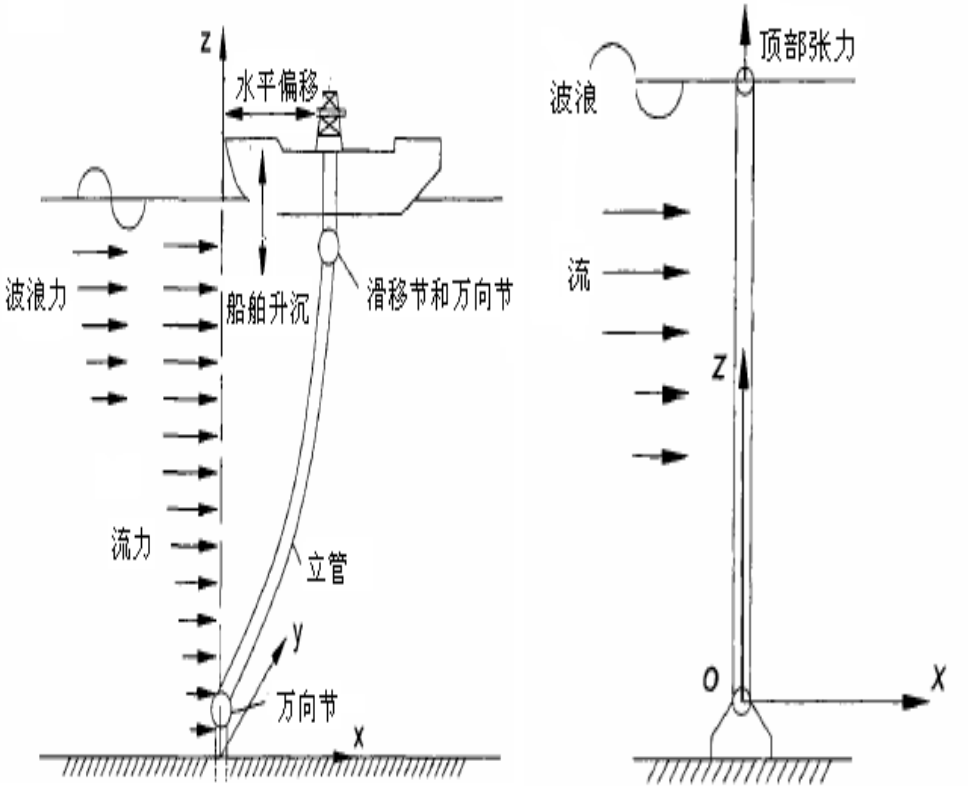
波浪力：表面波、内波

海流力：拖曳力

涡激力：当海流流经柱体时，在柱体的下游产生漩涡，漩涡周期的形成和泄放，产生涡激升力。

- 诱导载荷

浮体运动：立管顶端浮体运动载荷施加在立管，这为浮体运动诱导载荷。



2.2 立管参激振动

- **立管的参激振动**

立管的浮体（船舶或者平台）升沉运动导致立管上端边界受到激励，由此产生两个效应，其一是导致立管的上端边界是可动的；其二是引起立管轴向力随浮体运动而发生时变，这两个效应使得立管水平弯曲振动加大，这既是立管的参激振动问题。

- **参激振动效应**

参激振动可以引起立管平衡位置的不稳定性，并出现参数共振。参数共振会导致立管振动幅值过大，产生疲劳破坏。

2.3 立管涡激振动

- **立管的涡激振动**

当海流流经柱体时，在柱体的下游产生漩涡，漩涡周期的形成和泄放，产生涡激升力，引起柱体发生垂直于流向的振动，这便是涡激振动。

- **立管涡激振动锁定**

当旋涡本身的泄放频率同立管结构自振频率接近时，发生立管振动“频率锁定（lock-in）”现象，立管结构的振动驱使旋涡的泄放频率在一个较大的斯特哈拉数范围内锁定在结构的自振频率附近，此时涡激升力急剧增大，导致柱体发生剧烈的振动。

深海立管参激-涡激振动及疲劳研究

2.4 立管参激+涡激+拖曳力联合振动

深海立管主要受到三种外部激励形式的作用，第一种是流向莫里森(Morison)水动力，第二种是平台升沉引起的参数振动，第三种是漩涡泄放引起的涡激振动。已有的研究工作大都把三种形式的激励分开讨论，未考虑参数激励的存在对立管受迫振动和涡激振动时的影响，这与实际的海洋环境是不符的。

2.5 立管参激+涡激联合振动的疲劳

浮体垂向运动作用下立管发生参数振动，在海流作用下引起立管水平面内的涡激振动，参激振动与涡激振动之间相互影响，相互作用，改变立管振动响应特性和疲劳特性。加速立管的疲劳损伤，导致立管的疲劳破坏。

3 尚没有解决的问题

- 深海立管随机参数激励下失稳机理和非线性随机动力特性？
- 考虑浮体在不规则波上运动，随机参数激励的表达方法？
- 深海立管随机参数激励和涡激振动之间的相互作用的描述？
- 综合考虑随机参数激励和涡激振动立管的疲劳累积损伤分析方法？

4 研究内容

● 深海立管的参激共振机理研究

分别考虑平台规则运动和随机运动，确定参数激励项，研究平台运动引起的立管失稳机理，考虑平台运动的不同频率与立管固有频率比值关系，研究立管的1/2亚谐共振-主参数共振、主共振-主参数共振以及组合参数共振，揭示升沉振动能量向立管横向弯曲振动转移的机理，揭示立管随机参数激励动力特性和失稳域。

● 深海立管参数激励-涡激耦合振动特性研究

考虑平台规则升沉和随机升沉运动，针对简谐参数激励和随机参数激励与涡激振动耦合，分别研究简谐参数激励-涡激耦合动力特性、随机参数激励-涡激耦合动力特性。研究立管参数激励对涡激横向振动的影响，研究涡激振动幅值和频率特性的改变，针对平台运动的频率、立管固有频率、涡激频率之间的不同比值关系，研究立管超谐共振、亚谐共振和组合参数共振，揭示升沉振动能量向涡激振动转移的机理，确定参数激励和涡激耦合振动的失稳域。

深海立管参激-涡激振动及疲劳研究

● 深海立管参激振动和涡激耦合振动立管疲劳累积损伤研究

考虑平台规则升沉和随机升沉运动，分别研究简谐参数激励-涡激振动疲劳以及随机参数激励-涡激振动疲劳特性。针对随机参数激励-涡激振动疲劳，考虑非线性振动响应的亚谐和超谐振动响应分量，研究立管振动响应的极值分布，随机参数激励振动对于立管疲劳累积损伤的影响，得到立管疲劳累积损伤特性，提出立管疲劳累积损伤分析方法。

5. 研究目标

● 揭示立管随机振动失稳机理

给出海洋立管随机参数激励振动的动力学特性，揭示立管随机参数激励振动失稳的机理，提出深海立管振动失稳的判别条件。

● 揭示立管参数激励和涡激振动的失稳机理

给出参数激励振动和涡激振动相互作用的动力学特性，提出参数激励对于涡激振动的影响规律，揭示参数激励和涡激振动的失稳机理，给出立管振动失稳的判别方法。

深海立管参激-涡激振动及疲劳研究

- **参数激励和涡激振动疲劳寿命评估方法**

综合考虑随机参数激励和涡激振动，揭示立管疲劳累积损伤机理，提出立管疲劳累积损伤计算和立管疲劳寿命的预报方法。

- **提出减小有害振动措施**

综合考虑参激振动和涡激振动特性，针对TTRs立管，提出减小立管有害振动的方法，延长立管的有效服务期限。

6. 关键问题

- **建立参激运动表达式**

由于立管上端与平台通过张紧器连接，如何把平台运动转化为立管上端的准确边界运动条件和立管随机参数激励的表达式。

- **建立平台升沉运动的长期概率分布**

为了在涡激振动疲劳分析中考虑随机参数激励振动影响，建立平台升沉运动的长期概率分布。

7. 理论研究技术路线及主要方法

7.1技术路线

立管参数激励振动研究

↓

参数激励与涡激联合振动研究

↓

立管损伤与疲劳分析方法研究

↓

立管参激振动模型试验

7.2 采用的理论与方法

（1）总的理论与方法

理论分析+编程数值计算+商业软件计算+模型实验。

（2）基本理论

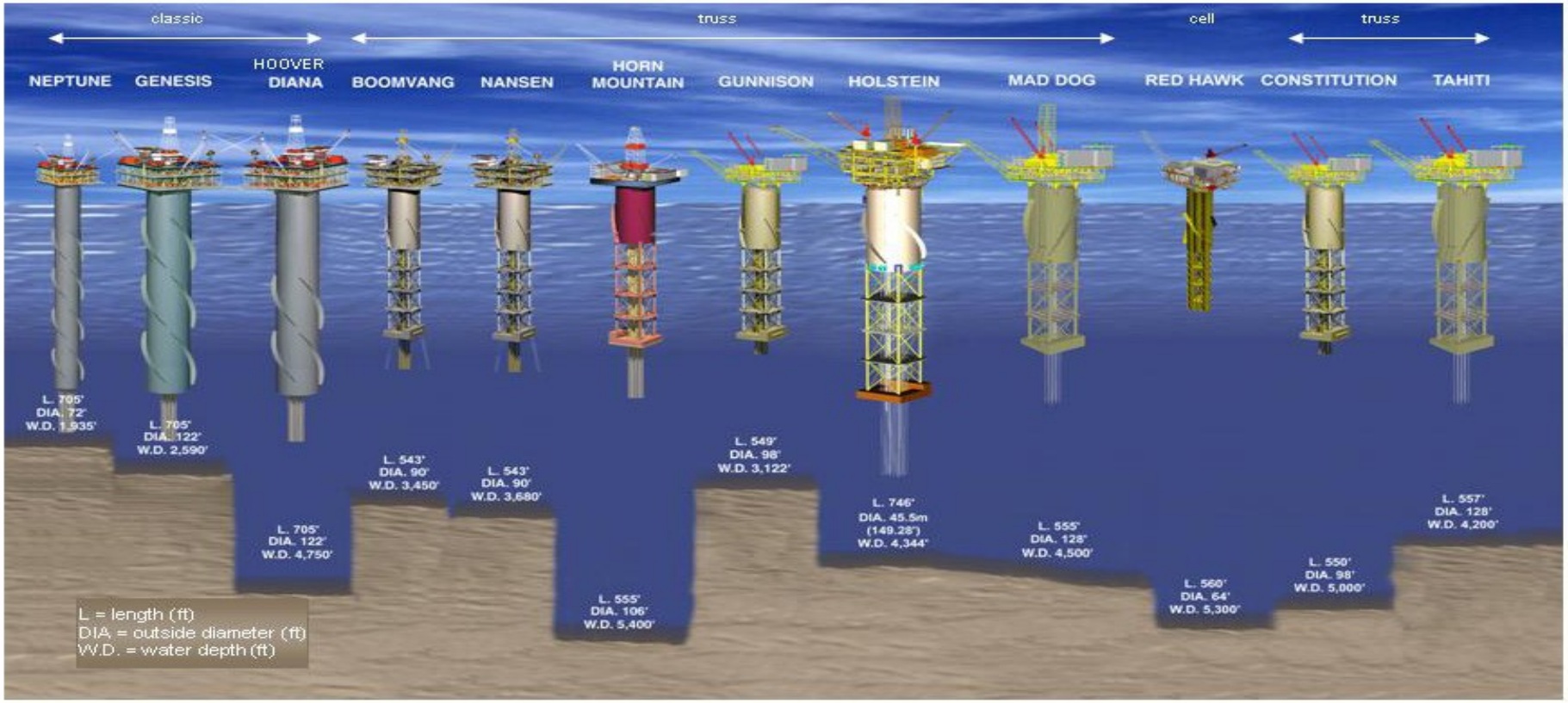
理论分析方法：

- 非线性动力学理论，包括方程建立，求解析解，稳定性分析，编程直接求解动力学方程，伽辽金解法。
- 随机振动理论：随机微分方程的求解，计算均方根位移响应，模态位移的概率密度函数。
- 结构损伤与疲劳理论：确定应力分布模型及疲劳载荷谱，短期响应预报，疲劳寿命分析。

SPAR平台参激运动特性及稳定性研究

1. 深水Spar平台的发展

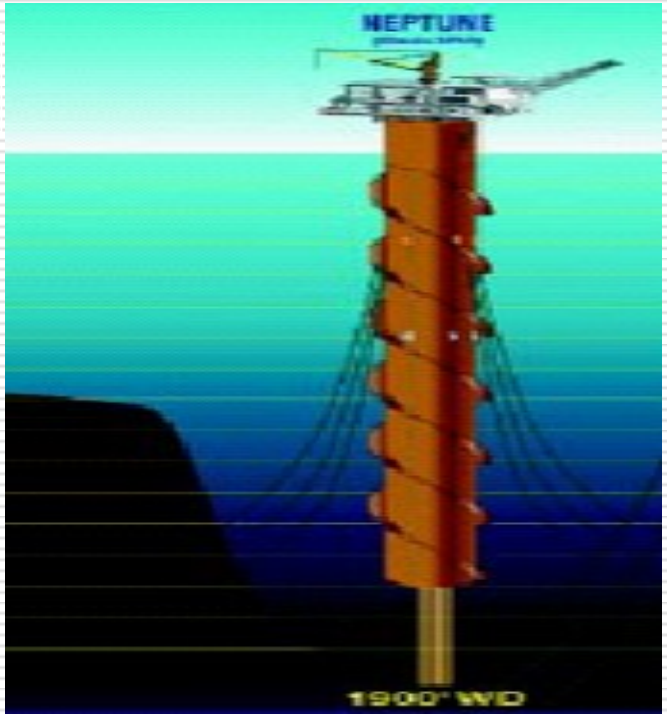
第一代：经典（CLASSIC）SPAR平台
第二代：桁架式(TRUSS) SPAR平台
第三代：多柱式（CELL） SPAR平台

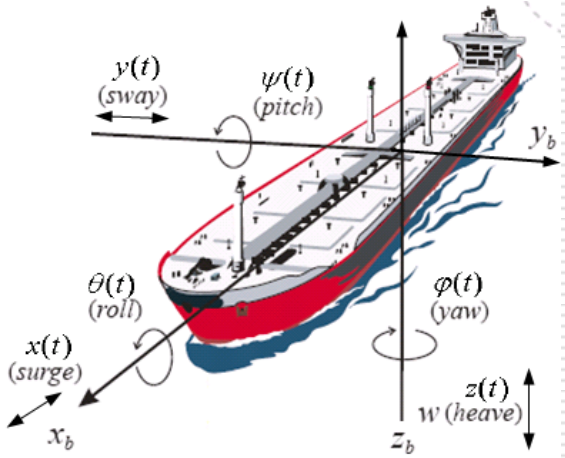


2 深水SPAR平台的结构形式主要性能

2.1 经典SPAR

主要运动性能由主体决定。主体为直径20-30米、高200米左右的圆筒。影响运动的主要参数包括：重心高、浮心高、稳心高。由于纵荡周期很大，一般不会发生纵荡共振，但是对于低频波浪（长峰波）敏感，低频波浪会引起大幅运动。此外，垂荡和纵摇耦合运动，发生Mathieu失稳。特点是对于水深不敏感，此外主体发生涡激振动也是要关注的问题，主体螺旋侧板可以抑制涡激振动发生，但是螺旋侧板的设计是需要探讨的问题。





2.2 Truss SPAR（桁架式）平台

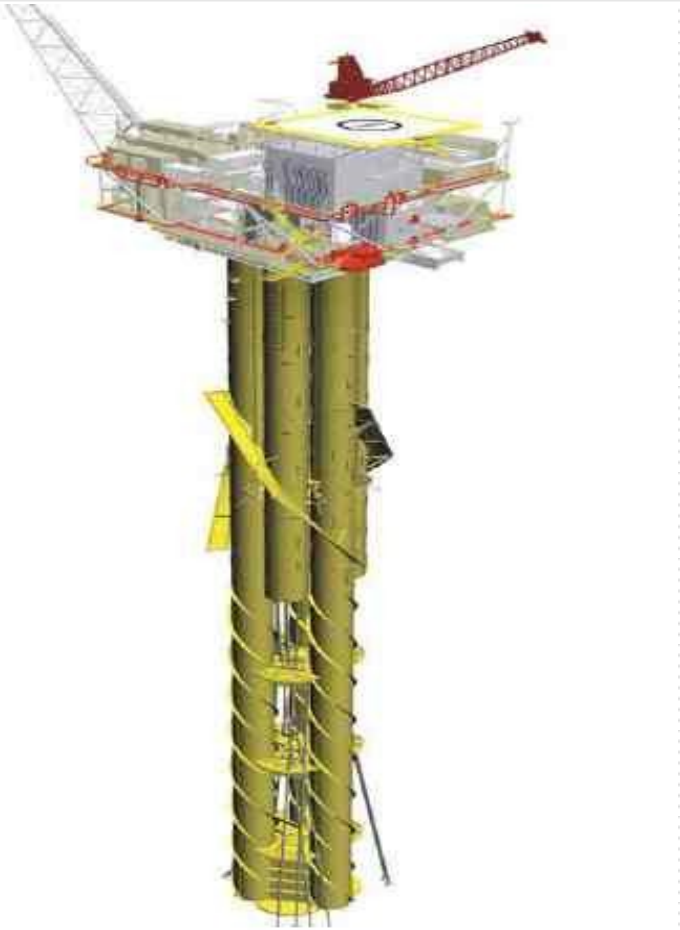
该类型平台主体尺度为经典平台0.5-0.35倍，增加了立柱和垂荡板。与经典平台水动力和运动方面的区别是：

- 垂荡板部分增加了垂荡阻尼，垂荡运动减小显著，平台运动稳定性提高。
- 由于水下结构为桁架，降低了流体的拖曳载荷，主要是洋流载荷，从而水平运动可以减小。
- 垂荡板部分显著增大了附连水质量，拉长垂荡运动固有周期，减少了与波浪频率发生共振的可能性。
- 垂荡板一般都伸出桁架式主体的边沿，可以抑制旋涡的生成，涡激振动响应减小。
- 对低频波浪响应不象经典平台那么剧烈，所以封闭式主体排水量允许减小。

2.3多柱式（Cell） Spar平台

主体上部由6个圆柱围绕一个中心圆柱组成，主体下部为桁架式结构。

- 上部各个单柱可以单独加工、运输和安装，制造、运输和安装难度小、方便。
- 上部多柱部分结构安装螺旋侧板，可以减小涡激振动响应。
- 垂荡板安装在圆柱腿上，具有较大垂荡附加质量和阻尼，低频运动小。
- 主体上部多柱结构安装侧板可以有效降低涡激振动，但是侧板的形式和安装方法需要进一步研究。
- 施工安装过程运输方便，可以单柱运输和安装。



3 深海SPAR平台的参激运动

3.1 平台自身的运动特性

- 纵荡运动、垂荡运动、纵摇

Spar平台基本的分析模型为：大尺度、深吃水、直立悬浮且受有系泊约束的刚性圆柱体，在风、浪、流等环境载荷作用下，发生6个自由度的刚体运动。由于系泊索相对于圆柱体而言，其布置是对称的，研究表明，Spar平台的总体运动包括纵荡运动、垂荡运动、纵摇和横摇运动，都发生在系泊系统的对称平面内，因此平台的总体运动响应主要研究纵荡运动、垂荡运动、纵摇。

- 自由度之间的耦合关系

Spar平台的纵荡和横荡固有周期一般在150~350s，纵摇和横摇固有周期一般在40~80s，垂荡固有周期大约为25~40s。纵荡、纵摇和垂荡为Spar平台三种最重要的运动形式，纵荡与纵摇和垂荡两个运动模态固有周期相差很大，耦合是弱的，而纵摇和垂荡两个运动模态耦合较强。

3.2 威胁平台安全的共振形式

- **平台的低频慢漂共振**

Spar平台一般可以避免一阶波浪力引起的纵荡共振，但在不规则海浪作用下，二阶波浪力的差频分量极易引起平台大幅低频慢漂共振响应。

- **和频垂荡共振**

Spar平台垂荡运动一般可以避免二阶波浪力引起的共振，但是不规则波作用下，二阶波浪力的和频极容易接近平台垂向振动频率，导致平台垂向发生高频弹跳（Springing）运动。

- **涌浪引起的平台垂荡共振**

涌浪周期峰值在25~30秒范围，接近Spar平台的垂荡固有周期，这属于长周期涌浪引起的平台垂荡共振运动。

3.3 SPAR平台内共振及参数激励

- **平台运动的内共振-模态之间的能量传递**

对一般Spar平台，垂荡固有频率高于纵摇固有频率，且其一般满足频率的模态内共振关系，垂荡频率接近纵摇频率的2倍，$\omega_3=2\omega_5$。当波高大于临界值时，垂荡能量向纵摇传递，引起平台纵摇大幅增加。

- **平台参数激励运动**

SPAR平台垂荡固有频率和纵摇固有频率之比大约为2:1，遭受大幅波浪作用时，平台两个模态之间具有强烈的相互作用，Spar平台垂荡和纵摇运动出现运动周期和幅值调整，运动出现Mathieu失稳，平台发生参数激励运动。

- **涌浪引起的平台垂荡共振**

涌浪周期峰值在25~30秒范围，接近Spar平台的垂荡固有周期，这属于长周期涌浪引起的平台垂荡共振运动。

4 存在的问题

- **全张紧系泊技术Mathieu失稳问题**

对于平台运动Mathieu失稳研究，仅考虑半张紧系泊或者悬链线系泊，对于全张紧系泊系统的失稳机理缺乏研究，尤其对于桁架式SPAR平台，采用全张紧系泊技术，这方面缺乏研究。

- **桁架式SPAR平台的阻尼特性**

Spar平台阻尼包括了主体水动力阻尼、垂荡板阻尼、螺旋侧板阻尼以及系索阻尼，这些阻尼计算方法和对耦合运动失稳的影响还缺乏研究。

- **桁架式SPAR平台的参数激励项的确定**

平台耦合运动过程存在参数激励，如何确定桁架式SPAR平台的参数激励项缺乏有效方法。

- **桁架式SPAR平台的参数运动失稳的判别方法**

Spar平台耦合运动满足内共振关系时，参数激励临界值的确定，运动失稳的判别方法以及失稳后平台的动力特性。

- **系泊线对于平台运动的影响**

全张紧系泊系统刚度的确定，阻尼确定，运动响应计算分析，给出系泊线的影响。

SPAR平台参激运动特性及稳定性研究

5 研究内容

- **Truss Spar平台水动力特性研究**

考虑全张紧系泊方式，计算非线性系泊刚度，计算平台纵摇恢复力矩中的参数激励项，计算Spar平台主体水动力阻尼、阻尼板以及系索阻尼等水动力系数，以及其他动力学参数。

- **纵摇运动失稳的判别条件研究**

研究平台非线性耦合运动的动力特性。考虑长周期涌浪，研究平台垂荡运动谐振时，不同运动模态之间的能量传递关系，纵摇运动失稳的临界动力学条件，确定运动失稳的参数范围。

- **内共振情况平台运动的动力特性研究**

考虑平台运动模态之间的内共振，研究长周期涌浪作用下，平台参激运动的多种共振形式包括主共振、亚谐共振、运动跳跃，研究平台不同运动模态之间的能量饱和及能量传递现象，以及分岔和混沌行为。

- **控制桁架式SPAR平台纵摇失稳的方法研究**

研究水动力阻尼、系泊索阻尼对平台耦合运动稳定性的影响。研究控制平台运动失稳的机理和方法，比如调整平台主体的结构形式，改变阻尼结构形式等。

6 研究目标

- **得到Truss Spar平台水动力特性参数**

  提出平台水动力阻尼包括主体阻尼、系泊阻尼及螺旋侧板阻尼的计算方法，以及提出考虑瞬时湿表面积参数激励项的计算方法。

- **揭示平台运动失稳后的动力特性**

  揭示平台运动失稳状态，平台非线性运动的动力学特征，包括主共振、亚谐共振、运动响应跳跃，对平台失效损坏过程进行计算机仿真。提出平台运动失稳的判别条件。

- **给出垂荡板性能的优化方法**

  综合考虑多种阻尼和非线性系泊刚度，针对Truss Spar平台提出控制运动失稳的方法，对垂荡板结构和性能进行优化。

- **编制参激运动分析程序**

  编制桁架式SPAR平台参激运动分析程序。计算全张紧桁架式SPAR平台的参激运动响应。

海上风力发电浮式基础动力特性研究

1 研究背景

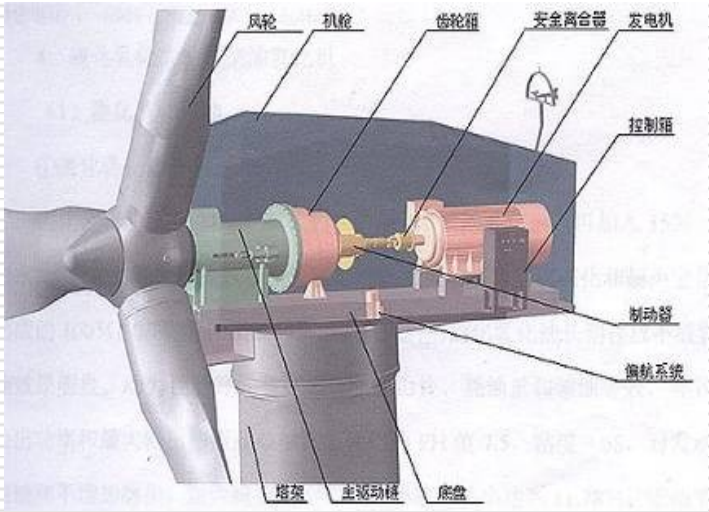
● 我国近海风能资源

初步估算我国海上风能资源为7.5亿千瓦，为陆地风力资源的3倍。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》将“风能、太阳能、生物质能等可再生能源技术取得突破并实现规模化应用”与“沿海与陆地风电场和西部风能资源密集区建设技术与装备”列为“重点领域与优先主题”。

● 风电浮式基础的应用前景

离海岸线越远，风速越大，风的稳定性越好，可以驱动更大容量的风电机，发电效益提高。海洋发电的主要风能资源分布在离海岸线5-50公里海域，而该海域水深一般在30米以上，为了适应海洋更大发电量需求，风电场将选择在30米以上甚至100米以上水深的海域。浮式基础结构海底力矩小，可以降低海底基础结构建造费用，经济性比固定基础好。

我国西沙海面

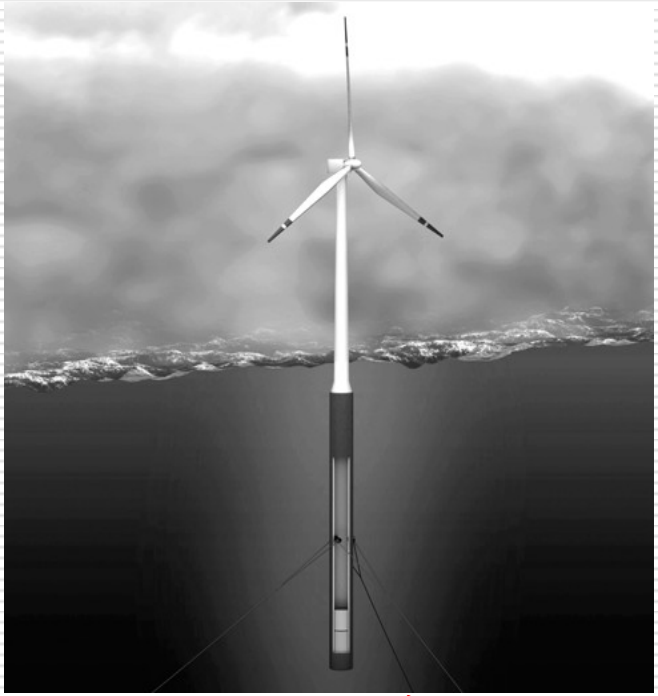


2 海上风电浮式基础的主要形式

2.1 SPAR型浮式基础

由浮力舱、压载舱、系泊线及锚固基础4个部分组成。

通过压载舱使得整个系统的重心压低至浮心之下，保证整个风机在水中的稳定，再通过辐射式布置的悬链线来保持整个风机的位置。下部采用大抓力锚、桩基基础或者吸力式基础。吸力式基础主体为钢制圆筒，在下部舱室内填充块石压载，在中上部舱室灌水压载。



Spar式基础

运动性能：Spar形式的基础比半潜式基础有着更好的垂荡性能，因为Spar形式基础吃水大，并且垂向波浪激励力小，垂荡运动小；但是由于Spar形式的基础水线面对稳性的贡献小，其横摇和纵摇值较大。

2.2 半潜式浮式基础

●结构形式

主要由立柱、横梁、斜撑、压水板、系泊线和锚固基础组成。依靠自身重力和浮力的平衡以及悬链线系泊来保证整个风机的稳定。

●运动性能

半潜式基础吃水小，在运输和安装时具有良好的稳定性，相应的费用比Spar和TLP型式的基础节省。

半潜式基础

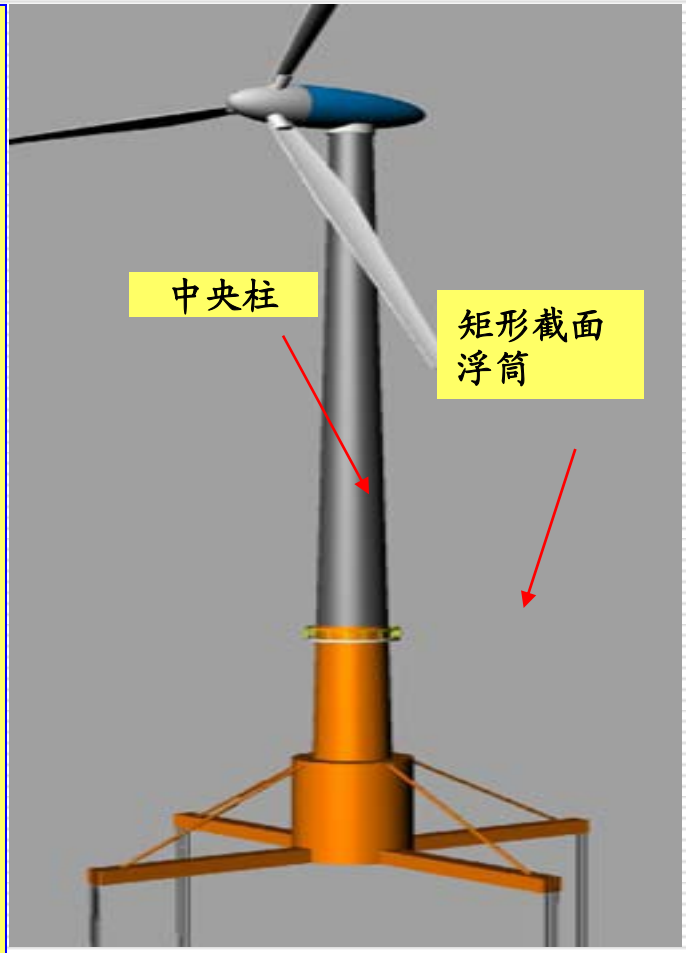
2.3 TLP型浮式基础

●TLP型式基础

主要由圆柱形的中央柱、矩形截面的浮筒、锚固基础组成。通过张力筋腱固定和保持整个风机结构的稳定。海底采用桩基或者吸力式基础，在比较平坦的海底，还可以采用混凝土重力式沉箱基础。

●运动性能

TLP型式的基础具有良好的垂荡和摇摆运动特性。缺点是张力系泊系统复杂、安装费用高，张力筋腱张力受海流影响大，上部结构和系泊系统的频率耦合易发生共振运动。



TLP式基础

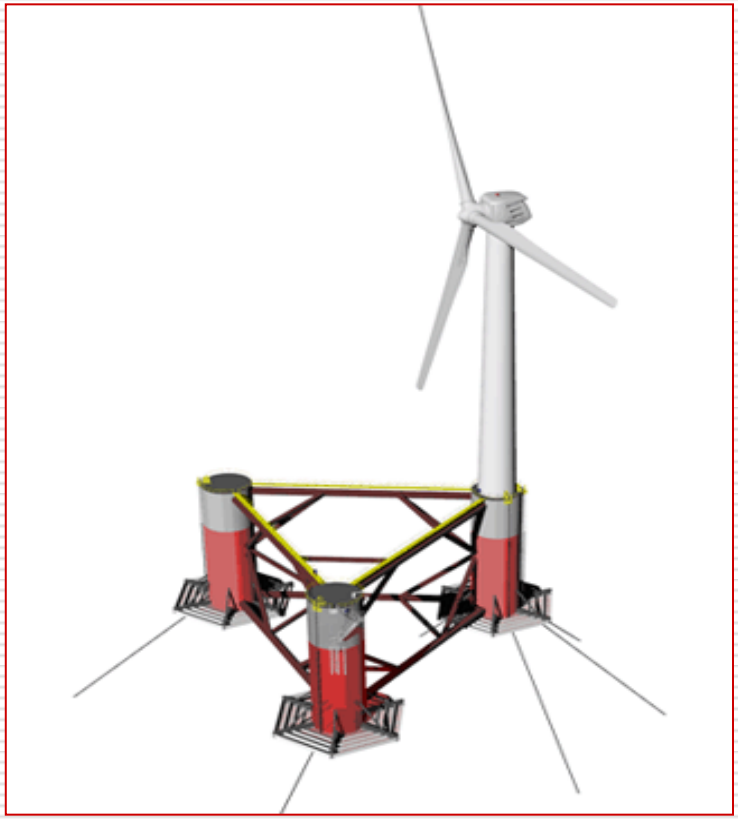
2.4 海面浮动结构技术（windfloat）

●结构形式

属于半潜式结构的衍生基础结构。主要由压水板、桁架结构、三个立柱、6根系泊线组成。

●运动性能

压水板连接在立柱底部，提供附加质量和增加阻尼，改善平台的水动力特性。立柱顶部作为甲板使用，提供适当的作业空间，桁架上表面作为连接通道。安装闭式主动压载系统，调节压载水在立柱之间流动，保持平台的直立和稳定性，使塔柱保持直立状态。



海面浮动结构

3 存在的科学问题

3.1 浮式基础结构载荷及载荷传递方式

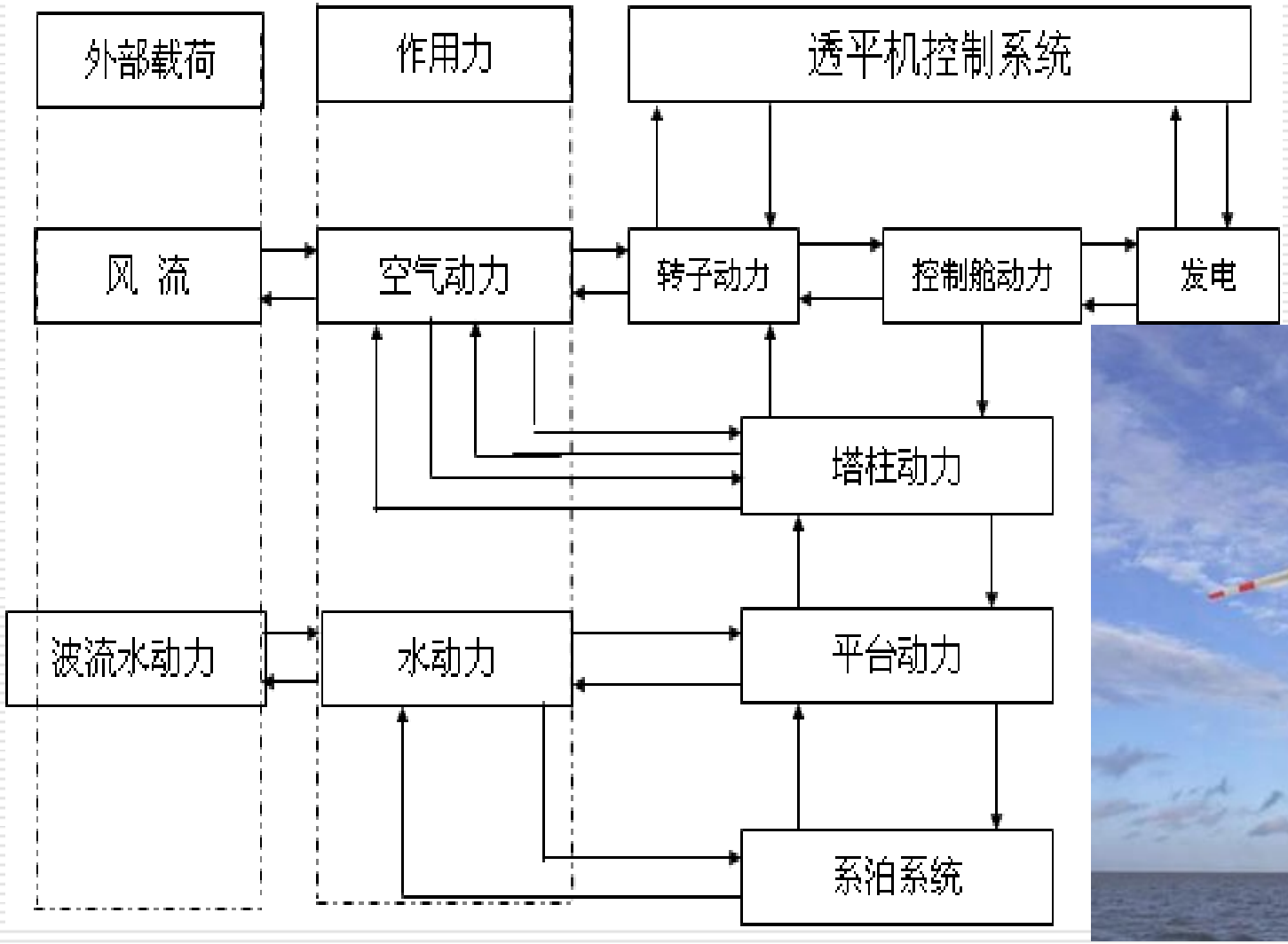
- **结构载荷**

（1）重力载荷: 结构设备自重、甲板上浪；（2）环境力载荷：波浪荷载、海流载荷、风载荷；（3）风机运行荷载：叶片水平推力、转矩、偏航系统力；（4）浮式基础运动诱导的惯性载荷；（5）系泊系统的恢复力；（6）漂流物撞击、船舶碰撞等偶然载荷；（7）锚固基础与土壤之间的相互作用力：渗流与冲刷。

必须准确计算浮式基础载荷的大小、作用位置和随时间的变化规律。除了自重以外，这些力之间的相互影响，大小随基础运动状态、风机和叶片转动而变化，这是建立分析模型时需要考虑的关键问题。

- **载荷传递方式**

海上风力发电浮式基础动力特性研究



载荷传递方式

3.2 关键科学问题

- **塔柱和基础运动的相互影响**

海上风电系统属于高耸结构物，水平载荷和垂向载荷数量级相当。水平倾覆力矩作用引起浮式基础大幅摇摆运动甚至倾覆，同时基础的六个自由度运动又影响塔柱的摇摆。

- **气动弹性力-水动力耦合**

当风速增大时，波流也相应增大，来自叶片的推力和转矩加大，塔柱摇摆剧烈，同时由于波高增大，基础出现大幅运动，此时，塔柱和基础的相互影响增加。

- **二阶水动力引起的差频运动**

对于TLP型浮式基础，由于纵荡刚度小，纵荡运动频率远低于垂荡运动频率。二阶差频波浪力是缓慢变化的力，可能和浮式基础的水平面内固有长周期运动的频率接近，诱发水平面内的大幅共振慢漂运动，此外紊流风的激振频率也在该频率范围，加剧浮式基础的纵荡慢漂运动。

- **二阶水动力引起的和频运动**

二阶和频波浪力诱发浮式基础的大幅垂向弹跳振动（Springing或Ringing），浮式基础的垂向振动属于高阶模态振动，纵摇和纵荡属于较低阶运动模态，因此，垂荡运动能量将传递到纵摇，导致纵摇失稳。

海上风力发电浮式基础动力特性研究

4 研究内容

- **分析模型的建立**

针对TLP型半潜式基础，考虑张力筋腱系泊，研究回复刚度、水动力阻尼和系统阻尼、整个系统惯性矩阵的确定方法，计算叶片和风机的气动弹性载荷，考虑斯特克斯二阶波计算水动力，建立整个浮式基础结构系统的分析模型。

- **低频纵荡运动分析**

研究气动弹性力-水动力耦合的非线性方程的数值求解方法，考虑叶片气动弹性载荷频率、风机载荷频率、二阶水动力载荷差频以及浮式基础结构系统固有频率的不同组合，研究多种谐振形式包括主共振、亚谐共振、超谐共振，研究平台浮式基础的低频慢漂响应及运动失稳条件。

- **和频垂荡与纵摇耦合运动分析**

研究二阶水动力和频载荷引起的浮式基础的垂荡运动，分析垂荡能量向纵摇（或者纵荡）传递的规律，综合考虑垂荡对于纵摇（或者纵荡）影响及风载荷联合作用，研究浮式基础的纵摇（或者纵荡）运动响应和运动失稳临界条件。

海上风力发电浮式基础动力特性研究

- **5MW风机浮式基础基本参数研究**

浮式基础平台的初步选定及概念化设计以及计算模型的建立，风力系统的选择及计算模型的建立。包括确定浮式基础平台的样式、外表面形状、尺寸、重量、重心等参数；确定风机的尺寸、重量、重心等。

- **浮式基础运动对塔架和叶片的影响研究**

浮式基础的运动对风电塔架的影响，以及对风机叶片转动的影响，分析浮式基础运动引起的塔架、机舱和叶片的速度和加速度等。

- **叶片转动对于浮式基础运动的影响研究**

主要研究叶片在不同的位置承受不同的风载荷作用下，浮式基础的位移以及叶片转动和波浪作用对于浮式基础位移的耦合影响。

5 研究目标

- **浮式基础与塔架相互影响规律**

提出波浪作用下浮式基础的运动以及对风力透平机系统的影响规律。

海上风力发电浮式基础动力特性研究

- 完成浮式基础平台的概念化设计

考虑30米以上水深海域和5MW风机，针对张力系泊线半潜式浮式基础，确定风机浮式基础的尺寸，结构布置，系泊系统，形成浮式基础的的概念化设计。

- 确定水动力参数的计算方法并开发程序

提出基础水动力阻尼和附加质量（包括基础本体、系缆、压水板）的计算方法，以及提出解决湿表面积瞬时变化的方法。提出系泊系统非线性刚度的计算方法，研究系泊系统和基础本体之间解耦的方法。提出水平轴风电机工作载荷的计算方法，以及将该载荷加载到基础上的方法。

- 编制浮式基础运动计算分析程序

考虑水动力载荷作用、塔架和叶片影响，编制出浮式基础运动分析程序

- 结构优化和运动控制措施

提出浮式基础在波浪、塔架及叶片共同作用下，运动的控制措施。