

## 海洋结构：未来趋势和高校的角色

Preben Terndrup Pedersen

**摘要：**本文强调未来海洋结构发展的挑战和趋势，集中讨论了提高耗能船舶效率的途径及近海油气生产设施设计面临的挑战，也讨论了未来船舶和海洋结构可持续设计所必需的分析工具，最后是对大学在海洋结构领域的教育、研究和创新中应有作用的思考，并讨论了海洋科技教育、基础研究活动和国际合作等方面的课程要求。

**关键词：**海洋结构，船舶，海工设施，课程，研究活动

### 1 前言

地球表面 70% 被水覆盖，平均深度达 3800 m。海洋对人类至关重要，它保证了全球不断增长的人口能维持可观的生活水平，理由如下。

- 海洋在全球货物贸易领域扮演着极其重要的角色；现代的全球贸易离开海洋运输通道便无法进行。
- 海洋和海床是原材料和油气资源的宝库。
- 海洋具有鱼类及浮游生物等生物资源开发和未来养殖的巨大潜力。
- 太阳能是人类拥有的最主要可持续能源，而海洋吸收的太阳能占到了地球总量的 70%。这种能源可以通过热梯度、风力、洋流、波浪和盐梯度等形式采集。

海洋结构在开发以上海洋潜能中必不可少。由于海洋结构，如船舶和海工设施都是体积庞大、资本密集的复杂结构物，所处环境特殊而危险，相关设计和开发对研究和工程师的技术水平有一定要求。因此，对于任何打算发展该领域产业的国家，高校的相关研究和教育都必不可少。

### 2 船舶结构

在过去的 50 年间，商业船舶的出现推动了人类生活水平的快速发展。两个世纪以来，船舶已成为人类制造的最为庞大和复杂的运输设备。19 世纪到 20 世纪间，船舶结构发生了革命性的改变，这一改变主要源于技术的进步：

造船材料从最初的木材改为铁，再到钢材；船舶主动力装置从最初的船帆发展到蒸汽，再到柴油机；而推进装置从叶轮船桨发展到螺旋桨。最终，第一艘柴油机海轮 *MS Selandia* 号于 1912 年下水，开始在欧亚大陆之间营运。这艘船已基本具备了现代船舶的主要特点（图 1）。

在 *MS Selandia* 号后，船舶技术的发展更像一场用基于基本原理的设计替代经验建造规则的革命。船舶设计不断地优化，其大小与主尺度由它所承担的运输任务决定。除考虑受承载货物与航线影响的基本功能外，还需考虑低阻力、高推进效率、航行对吃水、船宽和稳定性的限制等要求，所有这些都影响着船舶尺度和布局的设计。这种对船舶的持续改良使其



图 1. 第一艘柴油机海轮 *MS Selandia* 号，载重吨位为 6800 t，1912 年 B&W 为 EAC 公司建造。(http://selandia100.dk/contact-2, 12 February 2015)

Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby DK-2800 Kgs., Denmark  
E-mail: ptp@mek.dtu.dk  
Received 12 February 2015; received in revised form 13 March 2015; accepted 17 March 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

引用本文：Preben Terndrup Pedersen. Marine Structures: Future Trends and the Role of Universities. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015004

结构大为优化。例如，现代油船或散货船的船体加上机械设备的重量还不到船舶额定载重量的 15%。

如今，全世界约 90% 的原材料和制成品贸易依赖船舶进行运输，带来的 CO<sub>2</sub> 排放量约占全球总排放量的 4%。因此，目前船舶结构发展的动力主要来自社会影响。公众对船舶的关注主要有两点：一是降低每个运输单位所产生的排放量，二是降低航运事故率。在这类关注下，一系列严格的国际 [1] 和区域标准应运而生，并引发了港口和沿海国家对非环保船舶和运营行为的严厉惩罚。同时，公众对绿色供应链的期待也日益增加。

为此，航运产业已经开始提高效率。尽管大型二冲程式柴油机的热效率已经很高了（约 50%），但燃料的利用率仍有进一步提升的空间。其中一个办法就是安装废热回收系统，利用废热发电供给轴传动发动机。

对螺旋桨的研究促进了新型优化叶形、回收螺旋桨尾流旋转损失的装置及对螺旋桨来流的改善。研究人员也运用计算流体力学 (CFD) 探索螺旋桨推进的替代方式，如鳍推进。与模型试验相结合以优化船形、减少静水推进阻力的 CFD 技术已取得进展。

但是，真正重要的是船舶的尺度和速度。如图 2 所示，不仅减速，而且船舶尺度的增大都可大大改善一艘船的能效和减排效果 (g CO<sub>2</sub>·(t·mile)<sup>-1</sup>)。每载重吨的资本成本和人力操作成本也因为船体增大而显著降低。

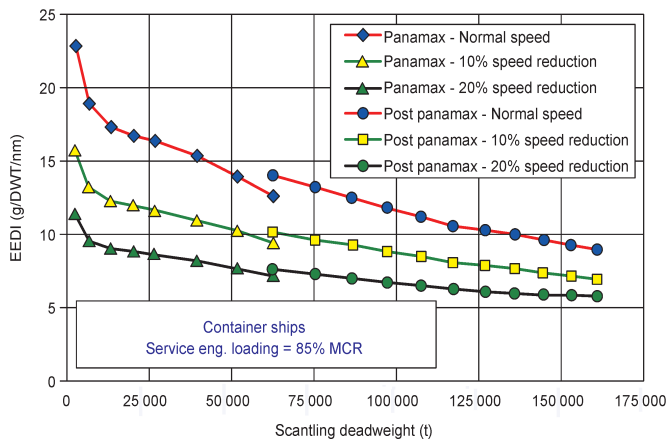


图 2. 不同航速下作为船舶吨位函数的能效设计指数 (EEDI), g CO<sub>2</sub>·(t·mile)<sup>-1</sup>[2]。

这些益处使得船舶向越来越大的方向发展。集装箱船就是一个很好的例子。第一艘专门设计的集装箱船于 1960 年问世，可载 610 个标准箱。1988 年，当集装箱船增大到可载 4500 个标准箱时，就不得不设计船宽超过巴拿马运河最大宽度的船舶了。

这种发展呈指数增长态势，从而建造出额定吨位约为 195 000 t、航速相对低、可以装载 20 000 个 20 英尺

(1 英尺 = 30.48 cm) 集装箱的新一代大型集装箱船 (图 3)。利用这些船只，与亚欧贸易的行业平均水平相比，可使每运输单位的 CO<sub>2</sub> 排放量减少 50%。



图 3. 3E 号货轮，新一代大型集装箱货轮的代表，长 400 m，宽 59 m，航速 19 节，载重吨位为 165 000 t。(http://www.maersk.com/en/search?q=Triple%20e&t=images, 12 February 2015)

## 2.1 船舶结构所需的研究

人类制造更大船舶的努力从未停止。但是大型船舶的结构设计面临重重技术挑战。船舶尺度的增长速度如此之快，以致于来不及得到船舶运行经验的反馈。也就是说，这些超大型钢铁结构不得不用直接算法设计。它们有大的船首外飘，从而要承受更高的非线性波载荷。船舶尺度增大时，如果使用更高强度的钢材，那么船体的柔度将在船舶的响应中起到重要作用。对于一艘超大型集装箱船来说，船体梁的最低阶固有频率仅为 0.40 Hz (即每个自然周期为 2.5 s)。因为这些船舶的船体梁振动固有频率过小，所以为计算波浪载荷，仅将船体当成刚体是不够的 (图 4)。砰击诱导的船体鞭震振动决定了船体梁的最大载荷和极限状态。实船测量表明，高海况下，高频鞭震应力大小可以与波浪直接产生的波频应力大小相同，如图 5 所示。



图 4. 因船体梁处承受过大的波浪应力而船体断裂的例子。(http://www.rina.org.uk/mol\_comfort\_accident.html, 12 February 2015)

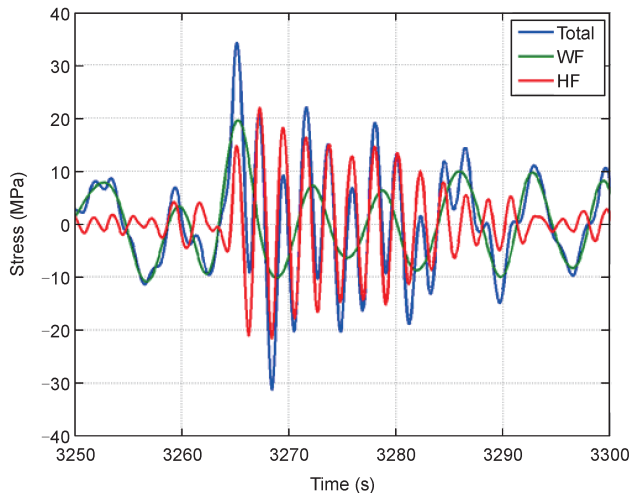


图 5. 一艘大型集装箱船在高海况下船舫应力测量结果，包括刚性船体上直接由波浪诱导的应力 (WF)，砰击引起的鞭震应力 (HF) 和总压力 [3]。

对柔性船体疲劳强度会有严重影响的另一种波浪作用是波激振动，这是由波谱中的高频部分和非线性激励效应引起的船体梁最低固有频率的一种持续激励。为便于甲板下集装箱的装卸，集装箱船有甲板大开口区域，使船体梁的抗扭刚度很低。当这些船舶斜浪航行时，水动力扭转载荷会引起可观的扭转变形。其结果是引起舱口变形、甲板梁与侧舷连接处的高应力，尤其是住舱楼和发动机舱楼前甲板梁的高应力。在现有船舶中往往会在这类部位发现疲劳裂纹。

科技发展同样也是解决意外载荷问题的需要。意外载荷伴随着人员死亡、环境污染和财产损失等风险。值得注意的是，碰撞和触礁是船舶面临的两大主要风险。欧洲海事安全局的事故统计数据表明 [4]，它们引起了约 70% 的严重船舶事故。因此，为了提高航运安全，要更加关注意外载荷和发生碰撞与触礁事故后船体梁的强度。当然，一些事故，如 *Costa Concordia* 号触礁事件 (图 6)，往往是由人为因素造成的。但是，不考虑陆路交通事故中的人为失误，经研究努力，已可降低此类事故的年死亡率。因此，在船舶领域应做类似的努力。

随着全球变暖和冰盖融化日益严重，北冰洋的航运活动会日益频繁。经由北冰洋线路从中国到欧洲所花时间比经由苏伊士运河的传统航线要少近两周。而有关北冰洋航运的主要研究挑战在于如何预测冰载荷与冰山和冰盖的运动。因此，极区航运将会带来环境和意外载荷的新问题。

## 2.2 船舶结构的可行性分析工具

目前，基于第一原理的大型船舶的设计还有很多未解决的问题。对此，本文将迫切需要的可用分析工具简

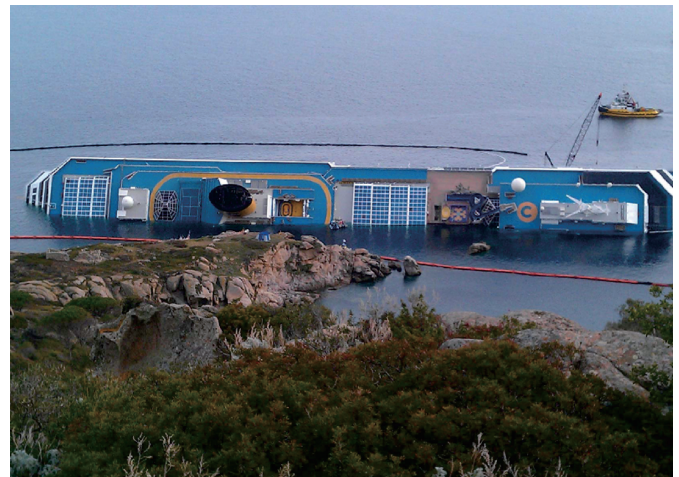


图 6. 2012 年 1 月，*Costa Concordia* 号邮轮在意大利 Giglio 岛附近海域触礁。(私人照片)

述如下。

### 2.2.1 改进的 CFD 计算程序

需要数字流体动力学计算工具，包括描述如静水与波浪中船体周围流场的自由面的预报、静水阻力和尺度效应、黏性与兴波尺度效应、螺旋桨来流场、螺旋桨扭矩、推力和空化现象、适航性、非线性杂波中波浪诱导压力的分布、砰击压力和操纵性 [5]。

### 2.2.2 流体结构相互作用的一致性理论的发展

需要有解决下述问题的一致性的方法：波浪冲击载荷与结构耦合作用的计算；船体柔度对波浪载荷的影响；液舱中液体晃荡的结构效应；波浪引起的船体波激振动激励 [6]。

### 2.2.3 非线性概率设计方法

如海洋本身，海浪产生的载荷是随机的，只能以概率的形式加以描述 [7]。因此，一般不可能用一个值来确定譬如一艘船在北大西洋 25 年航行期间可能遭遇的最大载荷。相对地，必须用一种概率方式表述该载荷。而且，因为结构自身的复杂性和我们分析能力的局限性，即使载荷确切已知，也不可能绝对精确地预报结构响应。设计过程必须建立在可靠性方法的基础上 [8]，且必须考虑由腐蚀、疲劳裂纹等因素引起的结构随寿命的老化。

### 2.2.4 新型轻材料

为减少船体重量和能耗，应该研发先进的轻型复合材料用于船舶设计。这些材料不仅有优良的强度和重量特性，还抗腐蚀。

### 2.2.5 意外载荷方法

需要开发概率工具来合理地预测意外载荷带来的风险，如船舶碰撞和触礁事故的可能性和后果，以此为未来船舶设计引进合理的风险控制方案 [9]。

## 3 深海探测和开发设备

在发展用以探测和开发海床矿物的设施方面，人类面临着一些特殊的结构挑战。过去是用遥控潜器（ROV）在预定海底矿区收集矿物标本。最近，中国研发出一种载人潜器“蛟龙号”（图 7），可用于收集水下深度达 7000 m 处的矿物样本。这种载人装备的工作区域可以覆盖地球海床总面积的 99% 以上 [10]。

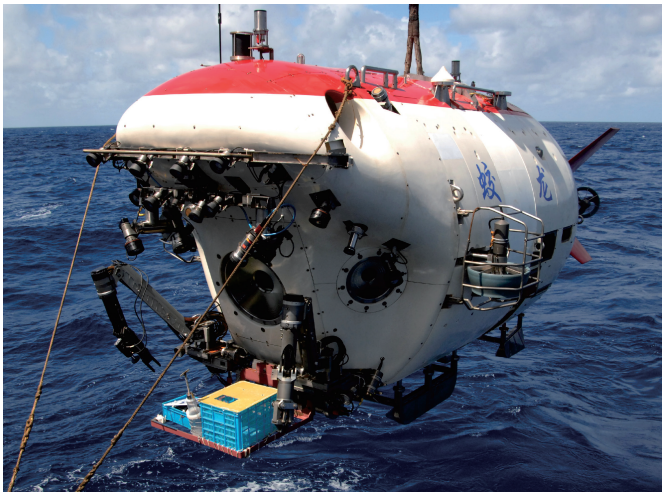


图 7. 中国的深海载人潜器“蛟龙号”。（摘自 China.org.com, 新华社, 2011 年 7 月 28 日）

这种潜器结构的挑战在于设计载人耐压壳，使其重量轻，同时，能在高压载荷下为驾驶员和科研人员提供安全的容身空间。

ROV 和潜器对资源测绘虽然关键，但在采矿及往海面运输的方面仍有其他亟待解决的难题。

## 4 海洋结构

海洋结构都为大量离岸活动而建造，如海床下油气和海底表面矿物的开采，以及近海可持续能源的生产。在未来的许多年，石油和天然气仍将是人类社会的主要能源。但是，如何开采新近发现的深海区海床下与北冰洋海域的石油和天然气资源，对于人类来说仍是巨大的技术挑战。

目前从海洋表面开发深海石油的水深可达约 3000 m，采用浮式生产储油卸油装置（FPSO）、张力腿平

台（TLP）或立柱式平台。这 3 种平台都属于大型浮式装置，需要水弹性力学、流固耦合和概率设计方法等领域设计技术的发展。在极深水域的开发还包含应用水下生产系统。

这些平台的总体设计目标在于防止与海浪优势频率直接发生共振。如图 8 所示，北大西洋的波浪能量主要集中在 7~25 s 的波浪周期期间，与有效特征波高无关。因此，固定结构的总体谐振周期应当短于 6~9 s。例如，TLP 的垂向固有振动周期一般低于 5 s，水平固有振动周期高于 25 s。

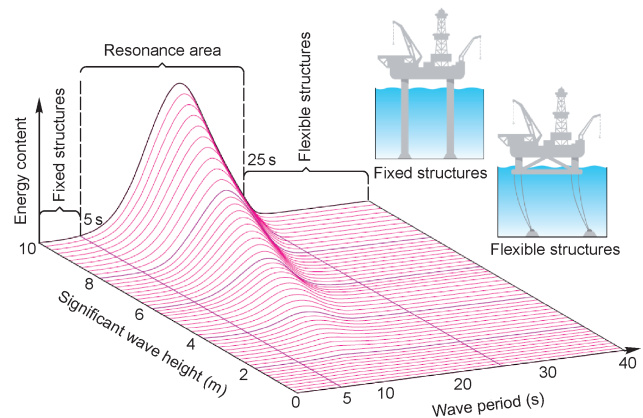


图 8. 北大西洋波浪谱 [2]。

### 4.1 海洋结构的研究需求

对这些结构的波浪载荷和波浪载荷效应的合理预测不仅需要包含非线性效应，同时（对船舶而言）也应该考虑波浪诱导载荷的随机性。但是，固定设施与船舶并不相同，船舶适用于全球通航，而海洋结构只适用于特定海域。因为这种设施造价高昂，一般使用波浪浮标来收集待布设海域波浪环境的详细信息，以得到可以更加精确地描述海况的统计数据。波浪载荷的非线性特征往往只能通过短期海况的时域模拟来分析。这些模拟结果随后须与长期的极值预报和疲劳损伤估算进行整合。

即便考虑到这些设施的高成本，直接的时域分析也太耗费时间。因此，一些近似的，其实也够精确的方法便得以研发和验证。对于短期分析来说，在结构力学领域发展起来的一阶可靠性方法（FORM）被证明在随机波和风力载荷的预报方面十分有效。FORM 分析方法的一个结果给出了引起结构某一响应的最有可能的波浪状态 [10]。例如，图 9 展示了一座自升式平台极端的倾覆时刻的波况。这种平台主要用于水深 120 m 以内的石油勘探。动态效果对这种平台非常重要，因为自升式钻井平台处于最大水深时的基频周期约为 9 s。

部分由于这些动力学条件的制约，开采最新发现的极深水区海床下或北冰洋海域的石油和天然气资源需要

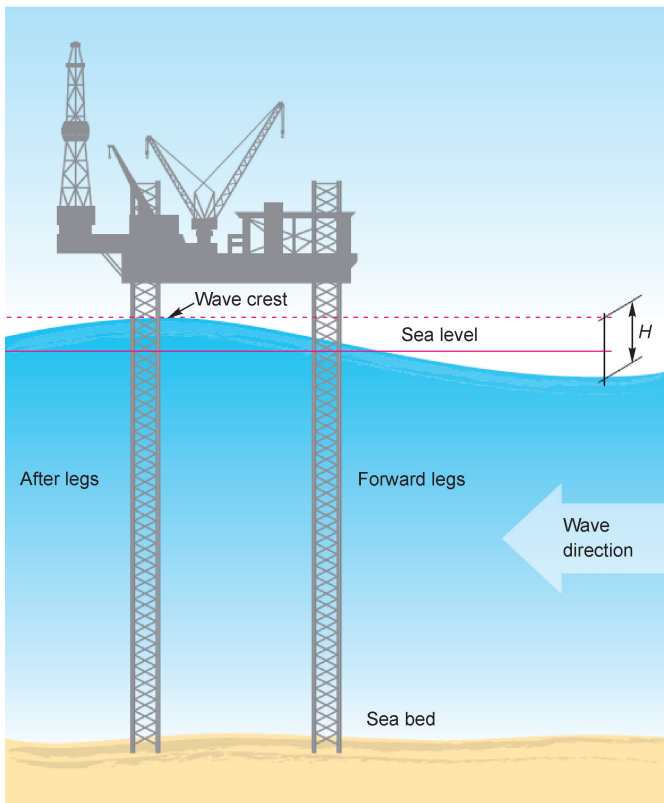


图 9. 自升式平台上的倾覆波浪载荷。

先进的分析和设计技术，包含流固耦合与极端状态和疲劳极限状态的概率设计方法。至于船舶结构，在海洋结构海上安装时有必要考虑其意外载荷。经验表明，火灾和爆炸风险相对较高；而统计数据 [11] 显示世界范围内，每个安装年内船只碰撞的平均频率约为每 1000 个平台年发生 1 次碰撞。这些数据具有浓烈的区域性色彩。例如，数据显示，北海的事故率甚至比全球平均水平还要高。目前，事故风险很大程度上限制了人类开发北冰洋油气资源的意图。

近海能源开采方面，风力发电和波浪能开发设备最具前景。近年来，近海风力发电机组快速增长。在浅水区域，近海石油产业主要采用标准单桩或导管架模式（图 10）。冲刷和共振频率是主要的设计障碍，但这些问题和石油生产平台的问题差距不大。在深水区，立柱型浮式风力发电机和半潜式风力发电机均已投入使用。其他海上风力发电机概念正在评估中。基于 TLP 和承载多个风力发电机的浮岛等其他海上风力发电机的概念也在评估中，但全尺度的商用建筑尚未投入运营。

与石油产业的平台相比，海上浮式风力发电机面临新的挑战：对机舱加速度和平台艏摇与纵摇运动有限制。

从海浪获取可持续能源的概念仍处于起步阶段。研究人员提出并评估了许多不同的模型设计（图 10），但尚未实现真正的突破。问题在于，与风力相比，波浪力



图 10. 一个 1:2 的自升式装置通过浮点吸收器从海浪中提取能量。（Wave Star 公司批准）

的变化要大得多。因此，如何设计出一个波浪能设施，使它既可应付极端波浪载荷，又在低特性波高下的能源开发中保持经济可行性，将是一项挑战 [13]。

#### 4.2 需要可用的分析工具

不同类型的海洋结构和诸如立管的二级设施所需的基本的科学分析与设计工具，与大型船舶基于第一原理的设计所需的工具相似。需要在以下几个领域取得进展：

- 水动力学计算方法，包括细长体周围的绕流、砰击压力和海上作业；
- 极限强度计算，包括不确定性分析、结构可靠性和极端载荷效应的随机动力学分析；
- 随机载荷和腐蚀环境下的疲劳损伤预测方法；
- 意外载荷方法，包括概率、后果和风险控制方案；
- 新的轻质材料，如可以改善重量/强度关系和降低全寿期成本的复合材料；
- 对结构的监控，包括决策支持系统和作业。

### 5 高校的任务

工程教育对构成海洋结构产业开发核心内涵的活动、要求和科学体系攸关重要，如图 11 所示。

目前，多数大学有 3 个主要目标，如图 12 所示。

历史上，大学的首要目标是教育，欧洲的大学最早兴起于纯粹的教育（神学）。今天，政府仍以教育为首要目标为大学提供资金。第二个目标，基础和应用研究，在过去几个世纪中变得日益重要。第三个目标是创新。近年来，更期待大学为创新做贡献，如推动设施、系统、产品、工艺和服务的设计或创建。

在海洋结构领域，这 3 个目标分别起到以下作用。

- 培训合格的候选人：过去，造船是一门技艺（造船

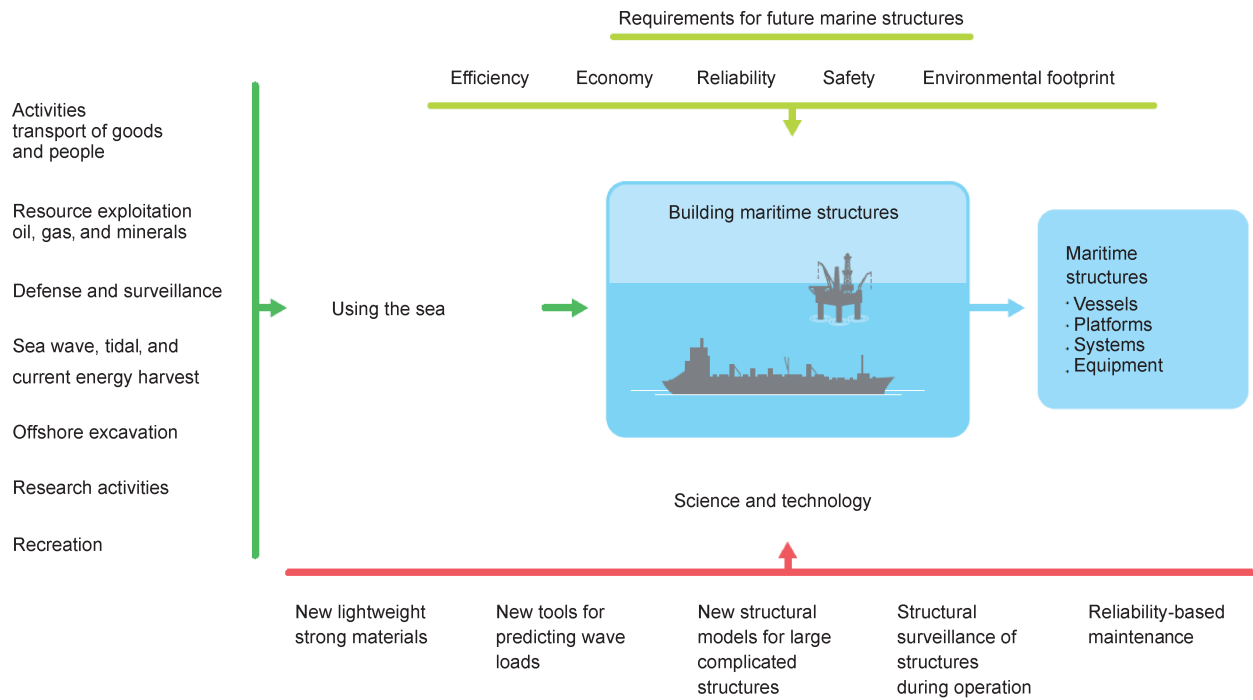


图 11. 构成海洋结构工业开发复杂体系的活动、需求和科技内涵 [2]。

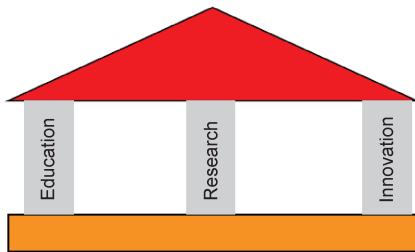


图 12. 一所大学的 3 个主要目标，或其大学结构的“支柱”：教育，研究和创新。

学），但现在它已基本成为一门应用科学，海工工程师们必须掌握范围广泛的学科科目。

- 打开一扇科学发展的窗口：新的发现和分析工具通常来自大学，如有限元法（FEM）、CFD、断裂力学和概率论。

- 与政府和行业合作：高校往往在开发分析工具方面具有优势，但设计能力薄弱。大学需要与外部保持良好的联系，以选择有前景的研究领域。

### 5.1 海洋技术课程

相关课程设置应确保技术科学和自然科学之间的互动，为学生传授最具针对性的知识和专长。提供以研究为基础的教育十分重要，这样才能把

尖端知识和专门技术整合到课程和项目。这样做旨在为学生提供长期可持续的知识；也就是说，让学生专注于基本功，并教会学生持建设性和批评的观点对待研究结果。

海洋技术领域是国际性的，因此大学课程应使学生能通过积极融入国际研究环境而获得国际经验。

### 5.2 工程学院研究

相关研究必须推动新知识的产生和对海洋技术问题的理解。此外，研究活动应提供基于研究的应急准备，以便在预测长期问题、其影响和可能的解决方案方面向行业和政府部门提供分析和咨询服务。

由于海洋技术是一个多学科的领域，而大量的相关研究在其他领域进行，因此从其他领域汲取知识和经验是一项重要的任务。本领域的研究成果应以公开文献的形式发表，以促进国际科研合作。同时通过研究生传播研究成果也很重要。

所有优秀的研究应该符合以下 3 个准则。

- 质量：无质量的研究毫无价值，只不过是浪费时间。
- 抱负：研究应有雄心壮志，研究人员应该时刻认清在未来能发挥重要作用的研究领域。
- 实用性：研究的价值是由其在海工产业、教育和公共部门的应用创造的。

### 5.3 国际合作

世界顶尖的研究中心之间，以及顶尖大学之间的国际合作必不可少。相当数量的毕业生应当在他们自己的大学之外开展部分研究，并应鼓励科研人员（即客座教授）的交流。大学应提倡在顶尖学术期刊上发表学术论著和参加各类国际学术会议。

## 6 结论

对于海洋产业的各个领域来说,气候变化既是风险也是机遇。这个问题需要来自社会各界广泛而迅速的行动,以避免对世界繁荣和安全造成严重损害。因此,海洋研究的重点自然应聚焦于减少排放和研发新型可再生能源。

一般来说,航运是最节能的运输模式,因此货物从陆运向船舶运输转变可显著减少能源消耗。但是,如果不断增加的大量货物由船舶运输,未来海上活动的温室气体排放量将在人类产生的总排放量中占有重要比例,除非进行技术革新。

在可预见的将来,人类仍然离不开石油和天然气。油气资源的新发现将更多地来自环境更为苛刻的海上勘探,而不是我们现今适应的地区。另外,海洋集中了地球从太阳获得的绝大部分可持续能源,不难预测将来的研究会更加重视海上风能和波浪能的采集,而这些技术的发展都离不开海洋结构。

海洋结构的常见因素一般包括:

- 处在海洋这个特殊的环境中,对载荷、响应和材料具有独特需求;
- 通常无法进行实物测试,因此分析和设计必须基于第一原理;
- 载荷和响应只能以概率方式表达;
- 它们涉及全球经济活动,因此受国际法律和法规的制约;
- 需要高投资。

由于这些原因,为了确保该领域的发展,在海洋结构研究和发展方面,未来的人才需求将会异常迫切。

大学应该在以下几个方面推动海洋结构领域的发展:

- 重点发展基础科学能力,开展长期科研,为创新打基础;

- 维护学术自由和科学独立性;
- 与海洋产业协同培训具备专业技能的工程师;
- 掌握技术和自然科学的最新知识和见解;
- 成为一个有吸引力的知识构建伙伴,以收集和交换研究成果与专业知识;
- 注重毕业生在传播和利用研究成果的重要作用。

## References

1. International Maritime Organization. Prevention of air pollution from ships, MEPC 59/INF 10, April 2009
2. P. T. Pedersen, J. J. Jensen. Marine structures: Consuming and producing energy. In: C. B. Hansen, ed. *Engineering Challenges: Energy, Climate Change & Health*. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2009: 6–17
3. I. M. V. Andersen. Full scale measurements of the hydro-elastic response of large container ships for decision support (Dissertation for the Doctoral Degree). Copenhagen: Technical University of Denmark, 2014
4. European Maritime Safety Agency. Annual overview of marine casualties and incidents. 2014
5. O. M. Faltinsen. *Hydrodynamics of High-speed Marine Vehicles*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
6. Y. S. Wu, C. Tian. A non-linear hydroelasticity theory of ships and its application. In: Edwin Kreuzer, ed. *IUTAM Symposium on Fluid-Structure Interaction in Ocean Engineering*. Springer, 2007: 307–320
7. J. J. Jensen. *Load and Global Strength*. Elsevier Science Publ., 2001
8. A. Mansour, D. Liu. *Strength of Ships and Ocean Structures*. Jersey City, USA: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2008
9. P. T. Pedersen. Review and application of ship collision and grounding analysis procedures. *Mar. Struct.*, 2010, 23(3): 241–262
10. F. Liu, W. Cui, X. Y. Li. China's first deep manned submersible, JIAOLONG. *Sci. China Earth Sci.*, 2010, 53(10): 1407–1410
11. J. J. Jensen. Extreme value predictions using Monte Carlo simulations with artificially increased load spectrum. *Probabilist Eng. Mech.*, 2011, 26(2): 399–404
12. International Association of Oil & Gas Producers. Worldwide statistics for ship collisions against offshore oil installations during 1980–2002. Risk Assessment Data Directory Report No. 434/16, 2010
13. A. F. de O. Falcão. Wave energy utilization: A review of technologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2010, 14(3): 899–918