

科学基金

# “海洋结构与装备的关键基础科学问题” 研讨会学术综述<sup>1)</sup>

周济福<sup>\*,2)</sup> 颜开<sup>†</sup> 詹世革<sup>\*\*</sup> 张攀峰<sup>\*\*</sup> 孟庆国<sup>\*\*</sup> 汲培文<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

<sup>†</sup>(中国船舶科学研究中心, 无锡 214082)

<sup>\*\*</sup>(国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

**摘要** 简要介绍了“海洋结构与装备的关键基础科学问题”研讨会的基本情况, 对邀请报告分类进行了学术综述, 对专家们的自由发言和集中研讨形成的研究对象及前瞻性关键科学问题进行了归纳总结.

**关键词** 海洋结构与装备, 关键基础科学问题, 学术研讨

中图分类号: 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-14-021

为了推动海洋工程领域的研究和发展, 2012 年 11 月 28—30 日, 国家自然科学基金委员会 (以下简称基金委) 在青岛举行了第 87 期双清论坛“海洋工程发展的国家战略需求和关键科学问题”, 通过交流与研讨, 与会专家凝练出 13 个未来应着重研究的关键科学问题. 为了进一步聚焦, 深入探讨海洋结构与装备领域的研究现状和发展趋势, 凝练和提出我国在该研究方向上亟需关注和解决的关键基础科学问题, 研讨今后 5~10 年的重点资助方向, 基金委数理科学部于 2013 年 11 月 29—30 日在江苏无锡主办了“海洋结构与装备的关键基础科学问题”研讨会, 研讨会由中国船舶科学研究中心承办. 基金委数理科学部常务副主任汲培文研究员、副主任孟庆国研究员、力学科学处处长詹世革研究员、中国船舶科学研究中心所长翁震平研究员、中国船舶科学研究中心吴有生院士、中国科学院力学研究所李家春院士以及来自中国科学院、高等院校、中国船舶科学研究中心等 16 个单位近 40 位专家学者参加了研讨会.

研讨会开幕式由詹世革研究员主持. 孟庆国研究员首先讲话强调, 在 2012 年双清论坛的基础上, 本次会议的重点是要聚焦到海洋工程结构与装备上来, 通过各位专家对国内外研究现状及国内战略需求的深入分析, 在充分研讨的基础上, 进一步明确需

要重点关注的海洋结构与装备及其所涉及的关键科学问题, 提出研究思路和设想. 他说, 未来 5~10 年是我国海洋工程领域基础研究的机遇期, 应该牢牢把握这一机遇期, 在基础研究中提出有预见性的研究关键点, 使我国海洋工程基础研究工作能够立足于国际前沿, 与此同时积极发挥基础研究对我国海洋工程发展的有效支撑作用. 随后, 翁震平所长致欢迎辞. 李家春院士回顾了 2012 年双清论坛的研讨主题, 并强调了海洋工程基础研究从近海到深远海、从结构静力响应分析到动力响应分析、从单一学科到多学科交叉的发展趋势, 这给科研工作者提供了新的机遇, 同时也提出了新的挑战, 该领域的研究亟待发展新概念、新思想、新方法和新技术.

开幕式后, 开展了邀请报告与讨论、自由发言和集中研讨, 分别概述如下.

## 1 邀请报告简介

11 月 29 日, 15 位专家做了邀请报告, 并与参会专家进行了深入的讨论, 具体内容分类简述如下.

### 1.1 第 87 期双清论坛概况

詹世革研究员扼要介绍了第 87 期双清论坛“海洋工程发展的国家战略需求和关键科学问题”的基

本文于 2014-01-17 收到.

1) 国家自然科学基金资助项目 (11232012, 11342015).

2) E-mail: zhoujf@imech.ac.cn

本情况和主要目的,详细介绍了论坛研讨的3个议题及提出的主要基础科学问题,并给出了论坛形成的13个“未来着重关注的关键科学问题”,即:极端荷载条件下复杂海洋工程结构的动力学响应与强度理论、深水细长管件系统强非线性力学特性研究、海洋工程结构与基础动力相互作用的机理及规律、船舶与海洋工程结构物轻量化、耐撞性设计理论与方法、海洋可再生能源装备的力学问题、海洋工程结构与装备的健康监/检测方法及其可靠性理论、波流与浮式结构物的相互作用、结构响应与流动控制、高速运动物体的空化与出入水、海洋动力过程与物质输送、极端海洋环境事件发生和演化的规律及描述方法、内波与海洋混合、海洋环境要素与海洋声场的相互作用。

### 1.2 自由表面复杂水动力环境

自由表面是海洋水动力环境的主要特征,自由表面的非线性导致了海洋水动力环境的复杂性。

上海交通大学刘桦教授和何友声院士的报告《强非线性自由表面水动力学理论及其应用》针对自由表面自然破碎、大型水面舰船在高海情下航行时往往面临船首入水砰击和甲板上浪等复杂的大变形自由表面流动、高速运动航行体入水和出水过程伴随着复杂的自由表面效应、大型LNG船液舱晃荡等问题,强调研究以自由表面大变形、破碎和气液两相流动为特征的强非线性自由表面流动机理,发展相应的理论模型、数值模拟方法和精细测量技术既是水动力学研究的前沿领域,也是服务海洋工程结构和装备研发的不可或缺的基础性工作。在强非线性水波和破碎波研究方面,应重点发展描述强非线性水波的数学分析方法和破碎波内部复杂流场的精细测量方法,突破大波高水波的演化与破碎波形成过程的动力学建模理论,实现大波高水波和破碎波对结构物砰击作用的数值模拟,揭示破碎波内部流动和气泡分布特征、破碎波对结构物的作用机理及载荷特征,建立极端大波或破碎波作用下典型海洋结构物的结构响应模拟方法。在航行体入水和出水研究方面,应重点研究考虑不同海况条件下高速运动航行体入水初始冲击、入水空泡演化和闭合过程的力学模型和数值模拟方法,系统地开展高速航行体入水空泡演化的机理性实验,揭示高速航行体入水和出水的自由表面效应及其形成机理,建立高速航行体入水和出水过程的液-气-固耦合力学模型和

模拟方法。在大型水面舰船的入水砰击和舰船甲板上浪研究方面,应发展波浪中水面舰船入水冲击和甲板上浪的完全非线性理论模型,突破自由表面大变形及其与运动结构物相互作用的数值模拟方法和物理实验方法,揭示舰船入水冲击载荷变化规律和甲板上浪对结构物的作用机理,实现波浪中舰船运动模型和入水砰击、甲板上浪等局部水动力学模型的集成,建立波浪中运动舰船的入水砰击和甲板上浪的数值仿真系统。

哈尔滨工程大学段文洋教授的报告《极端海浪动力环境特性问题》阐明,深远海资源开发,不可避免面临恶劣海洋环境的挑战,特别是南海常年频发的台风现象以及诱发的大幅海浪,对于海洋结构物和装备构成极大的威胁。报告认为,现有的随机海浪理论和海洋结构波浪载荷计算条件存在不合理因素,特别是没有合理考虑波面发展的非线性、大幅海浪强色散性。他们通过某飓风海浪实测记录分析和非线性波浪模拟实例,说明当前采用的极端海浪动力环境计算理论偏于不安全,值得开展深入研究,特别是我国南海海上实际恶劣海况观测以及非线性模拟系统化研究急需开展。

中国船舶科学研究中心赵峰研究员做了《水动力学前沿与基础科学问题》的报告,认为以湍流、相变、自由界面等为特征的水动力学经典问题仍是国际前沿的基础性科学难题,并从前沿研究手段和新原理、新概念、新方法等方面概括了七大重点研究方向:复杂流场精细测量和分析方法;精细CFD模拟及验证与确认方法;海洋水动力学环境的建模与仿真;高雷诺数湍流精细结构与减阻增效降噪方法;强非线性自由面模拟与减摇降载方法;空泡/超空泡多相流结构与减载降噪增稳方法;水动力学相关的多学科交叉耦合现象和响应。

### 1.3 复杂环境与海洋结构的流固耦合行为

海洋结构/装备与海洋环境的相互作用一直是海洋工程领域的核心问题。当前,极端海洋环境、强非线性水动力环境与深远海工程结构/装备的流固耦合行为已成为研究的热点。

中国科学院力学研究所周济福研究员做了《海洋工程中的流固耦合问题》的报告,阐述了当前海洋工程从近海走向远海、从浅水走向深水、从水面走向水下的发展趋势,及海洋工程结构与装备从固定式、到顺应式、到浮动式、到水下生产系统的发展

趋势. 报告认为, 新型海洋结构与严峻复杂的海洋环境的流固耦合作用是当前海洋工程所面临的核心科学问题之一, 并在阐述新型海洋结构的几何特征、受力特征和运动特征的基础上, 着重阐述了新型海洋结构系统与海洋流动环境相互作用的流固耦合问题, 包括: 水面大尺度浮体的流固耦合、水下小尺度构件的流固耦合、结构系统的流固耦合. 基于这些问题的研究进展情况和新型海洋结构的特征, 凝练出亟待开展深入研究的科学问题. 水面大尺度浮体的流固耦合需要强调大尺度浮体运动响应与复杂恶劣海况的强非线性相互作用, 主要科学问题包括: 大尺度浮体与强非线性波的相互耦合 (包括: 非线性绕射理论; 慢漂、Springing 和 Ringing 现象的描述理论); 大尺度浮体与内波、畸形波、瞬变恶劣海浪等严峻环境的相互作用; 破碎波砰击特性与载荷; 海冰与结构的相互作用、结构的冰激振动等. 水下小尺度构件的流固耦合需要充分考虑构件的柔性效应、环境流动和结构本身的非线性效应及其相互耦合, 主要科学问题包括: 大长径比柔性构件的涡激振动; 深水条件下横向和流向涡激振动及其相互作用; 波浪和海流共同作用下柔性构件的非线性流固耦合过程; 内波、畸形波等特殊流场环境下柔性构件的涡激振动特征与规律; 大幅运动浮体与水下柔性构件的耦合效应与数学建模等. 结构系统的流固耦合应充分考虑水上结构、水面结构、水下结构的相互约束、相互影响, 加强结构系统的耦合建模研究.

上海交通大学王嘉松教授做了《细长结构涡激振动的关键力学问题及其抑制技术》的报告, 介绍了我国海洋工程细长结构应用背景、面临的科学问题及挑战, 并建议深入开展如下研究: 深水实尺度 (大长细比) 结构的涡激振动机理; 高精度涡激振动模型; 高效率涡激振动数值模拟方法; 多自由度多尺度流固耦合问题; 非线性大变形问题; 大规模混合网格流固耦合并行算法; 风浪流联合作用下涡激振动机理; 平台运动耦合细长结构涡激振动; 极端海况、复杂结构、复杂外载等条件下的深水管线与结构的涡激振动机理; 涡激振动抑制方法、抑制措施及其效果评价等.

海洋环境与结构的流固耦合还应包括海底结构/装备与海床的相互作用. 中国科学院力学研究所高福平研究员报告了《海洋土力学及海底工程结构基础研究的前沿科学问题》, 认为海洋土力学与岩土

工程是海洋工程领域的重要学科, 涉及与海洋结构动力学、水动力学、渗流力学、海洋地质力学等学科的交叉融合, 该学科的发展推动着海洋工程结构基础与海底工程结构型式和设计方法的创新演进. 报告介绍了海洋工程结构的种类, 阐释了当前国际上典型的海洋结构基础型式和设计分析方法, 展望了海洋土力学及海底工程结构稳定性研究的若干亟待解决的前沿科学问题, 包括: 海床土体的动力响应及本构理论、工程尺度海底滑坡的触发机制、流体-结构-海床之间的流固土耦合作用机理等.

#### 1.4 航行体水动力学

水中高速航行体、大型舰船、冰区船舶等航行体涉及空化、空蚀、砰击、上浪、冰船相互作用等前沿科学问题.

对于大型、高速水面舰船, 推进器的空化因涉及到舰船的噪声、推进效率、振动、空蚀等一系列问题而倍受关注. 浙江大学邵雪明教授的报告《推进器空化流动及其机理》认为, 空化是局部压力下降到液体饱和蒸汽压时, 液体内部发生的剧烈液-汽相变过程, 空化流动所包含的物理现象既涉及微米尺度的气核生长、泡泡相互作用、厘米至几十厘米尺度的云空化演化, 也涉及米至几十米尺度的船体和推进器绕流, 因而空化流动本质上既是一种包含相变的汽-气-液多相复杂流动, 也是一种多尺度的复杂流动. 报告将推进器空化按其物理现象分为涡空化、片空化、云空化和泡空化, 简要阐述了研究的现状和进展情况, 并基于此建议重点研究: 空泡生长、溃灭及泡泡相互作用等微观机理; 空化流细观结构和现象与宏观响应之间的关系; 云空化和梢涡空化产生演化的机理及噪声特性; 云空化和梢涡空化的抑制方法; 空化流动高精度数值模拟的新模型和新方法; 空化流的新型精细测量技术等.

中国船舶科学研究中心颜开研究员简要报告了《冰区船舶的力学问题》, 认为北极航道及航运能力对我国具有重要意义, 国际航运中心转向北极, 冰区船成为国际船舶科研的重要方向, 我国冰区船设计能力不足. 报告提出了需要开展深入研究的主要力学问题, 包括: 冰力学特性与本构关系及实验室模拟、冰荷载理论模型与实验技术、冰荷载及最大冰力的确定原则、冰水混合物中船体动力学与抗冰结构、冰区航行船舶性能预报理论与方法等.

上海海洋大学崔维成研究员报告了《全海深载

人潜水器研制过程中需要解决的关键基础科学问题》, 阐述了我国研制全海深载人潜水器的必要性及需要解决的关键技术问题, 并提出了需要研究的关键基础科学问题, 包括: 全海深载人潜水器的线型优化、滑翔原理、主被动减阻措施; 高强度、低密度、耐磨损的新材料及其力学特性; 高速重载条件下高压海水泵的磨损形式及减摩措施; 耐压结构和框架结构的可靠性设计和安全使用评估方法; 多学科优化设计理论和方法等。

中国船舶科学研究中心顾学康研究员做了《波浪中船舶与海洋工程结构非线性载荷与水弹性响应基础与共性科学问题》的报告, 提出了以下共性科学问题和主要研究趋势: 船与波浪三维强非线性相互作用, 包括时空非均匀波面下 VLFS 三维水弹性分析、高浪级下计及砰击和上浪效应的三维强非线性、船体弹塑性变形与黏性流场问题; 砰击与甲板上浪, 包括斜浪或不对称船体的入水砰击理论和描述方法, 空气垫、液体飞溅和流体可压等问题、弹性效应的多相流砰击过程、运动船体甲板上浪过程模拟等; 船舶液舱晃荡问题, 包括三维弹性液舱复合运动、晃荡与弹性船体的耦合作用、高离散性晃荡荷载; 风浪中船舶的波激振动与砰击颤振问题, 包括扭转波激振动、非线性波激振动和预报、纵/横颤振、斜浪中的波激振动等。

### 1.5 海洋结构/装备的可靠性、健康检测与优化设计

同济大学陈建兵教授做了《大型海上风力发电高塔系统的随机动力响应、整体可靠性与性态控制》的报告, 阐述了风力发电向大型化、海洋化发展的趋势, 认为我国风力发电产业发展迅猛, 但在海上风力发电系统的随机动力学与可靠性方面的研究基础较薄弱, 为此, 提出应加强“工程场址尺度的海洋动力过程(风、海浪、海流)立体观测与物理建模, 及考虑并网性能的大型海上风力发电高塔系统基于整体可靠性的性态控制”的研究, 以便我国掌握海上风力发电系统设计的自主性核心技术。

湖南大学徐道临教授做了《超大型浮动平台网络动力学稳定性研究》的报告, 阐述了超大型浮动平台的尺度特征和结构特征, 及其所涉及的基础科学技术问题, 着重阐述了超大型浮动平台涉及的网络动力学现象, 尤其是“振幅死亡”现象, 并认为网络动力学方法可以为超大规模浮动平台的动力学特性研究提供新的视角和途径, 与传统方法相比, 可处

理超大规模平台各子模块的个体和集体行为, 还可处理各类复杂拓扑结构的平台。

中国海洋大学王树青教授做了《海洋工程结构健康检测/监测关键技术》的报告, 阐述了利用结构损伤诊断技术确定结构整体安全健康状况所涉及的若干关键科学问题和关键技术, 并提出了未来研究的发展趋势, 包括: 结构早期损伤、微小损伤的识别; 多学科融合的结构损伤检测; 在线损伤监测; 整体振动检测与局部无损检测的融合; 结构安全评定与寿命预测等。

大连理工大学阎军副教授和郭旭教授的报告《深远海开发工程装备设计中的若干关键力学问题》认为, 目前海洋工程结构和装备的发展趋势是开采生产装备深海化、工艺储存装备集成化、运输安装装备大型化。报告介绍了深水托管架自主设计、FLNG 大型液舱晃荡荷载分析、FDPSO 概念设计及升沉抑制技术、南海流花平台原型检测支撑系统等 4 个深远海开发装备的典型自主设计示例。报告认为, 柔性管/缆是深海开发结构中的主要组成部件, 具有非粘结复合材料、多构件螺旋缠绕、多点接触摩擦等特点, 涉及的关键力学问题包括: 螺旋缠绕非粘结复合材料力学多级建模; 异型开口互锁结构深水高压溃失效机理; 非线性本构柔性管缆的疲劳; 高温高压和超低温柔性复合管道的设计等。未来需加强结构装备设计、超柔性结构与创新构型等的研究。

## 2 自由发言与集中研讨

11 月 30 日上午, 开展了自由发言和集中研讨, 分别由詹世革研究员和孟庆国研究员主持, 汲培文研究员对本次研讨会进行了总结。

吴有生院士在邀请报告研讨中发言指出, 海洋结构与装备的发展既要重视水中航行体减阻的基础问题的研究, 也要高度关注非线性波浪与海洋结构物的相互作用以及结构的动响应问题的研究。他说, 当前运输船舶的节能减排成为船舶订单竞争的焦点问题, 对新型减阻技术的需求非常强烈, 力学工作者要对减阻新原理、新方法进行深入的研究, 甚至可能要用到物理力学方法进行研究。另外, 大型船舶以及海上浮式结构物的柔性越来越强, 非线性水弹性效应越来越显著, 砰击、上浪、晃荡等现象引起的流固耦合问题需要特别重视。

李家春院士在自由发言阶段首先讲话认为, 此

次研讨会的邀请报告围绕研讨主题,提出了海洋结构与装备的新形式,如冰区船、海洋能源开发的新结构,同时也提出了以自由面、流固耦合为特征的关键科学问题.他希望从事固体力学研究的专家积极建言,以利于流体力学内部、力学分支之间、力学和海洋学科之间的交叉研究.他建议:研究对象应以新的海洋结构与装备为主,凝练的科学问题应具有共性,而不是针对某一特定结构或装备.

随后,中国船舶科学研究中心沈泓萃研究员和颜开研究员、西安交通大学王铁军教授、北京理工大学胡更开教授、大连理工大学滕斌教授和刘书田教授、天津大学唐友刚教授、中国科学院力学研究所黄晨光研究员、武汉理工大学朱凌教授、湖南大学徐道临教授、上海理工大学黄典贵教授、解放军理工大学陈徐均教授、基金委工程与材料科学部工程五处项目主任秦洪德教授等分别发言,概括起来主要集中在两个方面,一是研究对象究竟应聚焦到哪些海洋结构与装备上,二是如何凝练这些研究对象所涉及的前沿科学问题.

关于研究对象,应着重关注新型的探海、用海和护海装备.探海装备包括:用于极地勘探的科考船、用于深海考察的深潜器.用海装备包括:用于海洋油气、风能、水合物等资源开发利用的浮式结构、水下生产系统;用于极地运输的船舶;用于海洋空间利用的大型浮动式结构.护海装备包括:大型舰船、高速航行体等.

关于前沿科学问题,应针对上述研究对象,着重于备受关注的、前瞻性的共性科学问题的凝练,可包括以下几方面:

#### (1) 海洋结构与装备服役环境的描述

i 极端海洋环境事件发生和演化的规律及描述方法

ii 强非线性自由表面的水动力学理论

iii 海冰的变形与破坏行为

iv 海洋土体力学特性

(2) 极端海洋环境与海洋结构/装备的流固耦合力学行为

i 浮体与波、流、冰的相互作用

ii 细长柔性构件的涡激振动

iii 海洋结构/装备与土体的相互作用

iv 海洋结构/装备响应抑制的理论与方法

v 深海能源开发的新概念结构及其稳定性

(3) 高速航行体的水动力学

i 高速运动物体的出入水行为

ii 高速运动物体的空化行为

iii 空泡生成与演化的动力学过程

iv 高速运动物体的姿态控制与减阻方法

(4) 海洋结构与装备的健康监/检测与优化设计理论

i 海洋结构与装备的健康监/检测方法 with 寿命评估理论

ii 海洋结构与装备的轻量化、耐撞性设计的理论与方法

最后,汲培文研究员对本次研讨会进行了总结和指导性发言.他简要回顾了第 87 期双清论坛,强调本次研讨会是在双清论坛的基础上,针对海洋结构与装备,充分研讨,从前沿和发展的角度,高度凝练基础性前沿科学问题.他说,基金委十分重视我国海洋工程领域的发展,并从 2009 年开始逐步开展推动我国海洋工程领域前瞻性基础科学问题研究的工作,双清论坛已促成广大科技工作者对这一问题的高度重视,基金委已资助一批相关的面上项目;本次研讨会的成果,可供重点项目立项参考;后续工作应进一步凝练,逐步推进形成重大项目、国家重大科研仪器设备研制专项、重大研究计划项目等.他认为,海洋工程领域的研究工作具有如下特征:问题与对象高度相关;多介质交界面问题突出;多体相互作用、多场耦合问题突出;需求与前沿高度统一.因此,后续工作应以“需求为牵引、力学作支撑、创新促发展”的理念为指导,充分体现力学的特征,充分反映基金委支撑基础研究的内涵,充分体现国家的战略需求,并建议针对“海洋结构与装备”,以“流固耦合问题”为主线,充分凝练基础科学问题,加强研究,以促进我国海洋工程领域基础研究的跨越式发展.

## REVIEW OF THE NATIONAL SYMPOSIUM ON FUNDAMENTAL SCIENTIFIC ISSUES FOR MARINE STRUCTURES AND EQUIPMENTS<sup>1)</sup>

Zhou Jifu<sup>\*2)</sup> Yan Kai<sup>†</sup> Zhan Shige<sup>\*\*</sup> Zhang Panfeng<sup>\*\*</sup> Meng Qingguo<sup>\*\*</sup> Ji Peiwen<sup>\*\*</sup>

*\* (Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)*

*† (China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)*

*\*\* (Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)*

**Abstract** The national symposium on fundamental scientific issues for marine structures and equipments held on November 29-30, 2013 is briefly introduced. The invited reports are reviewed by category. The viewpoints from free discussion and focusing discussion on what kinds of marine structures or equipments and what scientific fronts should be paid specific attentions in the future are summarized.

**Key words** marine structures and equipments, fundamental scientific issues, symposium

---

Received 17 January 2014.

1) This paper was supported by the National Natural Science Foundation of China (11232012,11342015).

2) E-mail: zhoujf@imech.ac.cn