

“十一五”水动力学发展规划的建议

刘 桦¹ 李家春² 何友声¹ 孟庆国³

¹上海交通大学工程力学系, 上海 200030

²中国科学院力学研究所, 北京 100080

³国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085

摘 要 水动力学是流体力学的一个重要分支, 有着悠久的历史与发展历史, 形成了比较完整的学科体系. 进入 21 世纪以来, 资源开发、环境保护、国家安全已成为世界各国普遍关注的战略问题. 我国的海防建设、海洋资源开发与海洋空间利用、海岸带综合规划和水环境保护、水资源开发与利用等为水动力学研究提出了新的迫切需求. 本文阐述了水动力学研究的国家需求、国内外水动力学研究的现状和发展趋势, 提出了近期有待研究的主要科学问题.

关键词 水动力学, 发展规划, 十一五

1 前 言

水动力学是流体力学的一个重要分支, 主要研究以水为介质的流体运动规律, 包括作用在运动物体上的水动力载荷特性以及各种复杂流动条件下动量、物质和能量的输运规律等内容. 若以 Sir Horace Lamb 于 1879 年出版“Hydrodynamics”为标志, 水动力学作为一门独立的学问已有近 130 年的历史. 钱学森先生曾于 1958 年在清华大学给第一届力学研究班的学员讲授过《水动力学》, 讲授的内容包括表面波、波阻、水面滑行板、浅水长波、空化、异重流和泥沙输运. 我国近代水动力学的发展充分反映了钱老当年在人才和方向上高瞻远瞩的见解. 在过去的 100 多年历史长河中, 特别是上世纪第二次世界大战以来, 水动力学研究领域名师荟萃, 成果斐然, 水动力学已成为船舶工程、近海工程、深海工程、水资源与环境等工程科学不可或缺的基础.

进入 21 世纪以来, 资源开发、环境保护、国家安全已成为世界各国普遍关注的战略问题. 我国的海防建设、海洋资源开发、沿海经济带资源利用和环境保护等为水动力学研究提出了新的迫切需求. 在国家中长期科学和技术发展规划中已明确将海洋资源高效开发利用、海水淡化、海洋生态与环境保护、天然气水合物开发技术作为优先发展领域. 面向国家战略需求, 研究制定水动力学学科发展规划, 提出近期有待研究的主要科学问题, 无疑是十分必要的.

2 国家需求与研究背景

当今世界船舶科学在高新技术浪潮的推动下, 正处于工业与军事需求旺盛、发展迅猛的黄金时期. 我国的造船工业虽然在国际造船市场中所占份额已由 20 年前的 1.8% 上升到约 30%, 位居世界第 2. 造船总产值已由 1982 年的 13.8 亿元提高到目前 500 亿元以上, 年均递增达 20%. 潜艇及大型水面舰艇是海防的核心装备, 国防建设对我国舰船科技提出了迫切需求. 但是我国的造船工业技术与先进国家相比仍有很人差距, 作为船舶总体性能研究的重要共性基础支撑性技术之一, 世界各船舶工业大国十分重视服务船舶工业发展的水动力学基础研究. 该领域的水动力学研究目标是掌握各种工况下船舶与周围流场的相互作用机理和规律, 从而形成为确保船型具有优越的航行性能而必需的船舶性能预报和优化技术, 以及船舶总体性能设计的新概念、新原理、新方法和新能力. 作为创新的源泉和发展的动力, 水动力学的研究水平和应用效果在很大程度上影响着船型技术乃至船舶工业的发展.

以潜射导弹、高速鱼雷为代表的水中兵器研发对水动力学基础研究提出了巨大挑战. 发展应用超空泡原理达到水中兵器减阻和突破速度极限的目的, 发展新型高速与超高速水中兵器, 是世界先进大国极为关注的重大课题. 超空泡发生时, 整个绕流体的近壁区域内是汽、气、液的多相混合流. 这种流动现象涉及到了多相流、湍流、相变、可压缩性和非定常等复杂流动机制. 由于其复杂性, 迄今人们对于超空泡流动的特性及机理的了解还十分有限. 当水下高速航行

体被稳定的超空泡所包围时,其运动阻力系数可减少 90% 以上,随着推进力的增加,航速可大幅度提高.超空泡减阻技术已被国外用于研制新一代水下超高速武器,可望广泛地应用在鱼雷、水下射弹和潜射导弹等高速水中兵器的减阻,大大提高武器系统的作战效能.

海洋中蕴藏着全球 70% 的油气资源,在世界油气资源生产总量中,海洋油气资源产量比例与日俱增.已探明我国南海含油气构造 200 多个,油气田 180 个.经初步估计,整个南海的石油地质储量大致在 230 亿~300 亿吨之间,约占中国总储量的 1/3.30 多年来,我国海洋石油工业从无到有,从小到大,不断发展,目前年产量近 4000 万吨,我国石油生产增量主要来自海洋.深海还有丰富的天然气水合物资源,它是未来可资利用的潜在能源.近年来,美国、日本、加拿大在水合物的分解与合成、海底勘探方面的研究进展迅速.我国能源需求急剧增长,陆上油气资源处于开采后期,除了增加进口外,必然更加依赖于海洋油气资源的开采.因此,开发深海油气资源对于我国经济发展、能源安全、领土主权有重要意义.目前,世界上先进国家已经将目标投向 3000 m 水深的海域,我国海洋工程迄今仅有在 300 m 水深海域开发的能力.以石油总储量将近 200 亿吨的曾母盆地、沙巴盆地、万安盆地为例,它们都位于 500~2000 m 的深水区.要实现自主创新开发南海油气资源的目标,必须解决海洋工程结构在深海极端复杂海况下的正常作业和安全保障问题.水波动力学和渗流的理论研究虽已有充分的发展,但紧密结合工程实际,尤其是针对深海工程的挑战开展基础和应用基础研究尚嫌不足.

我国海岸线总长度 18000 多公里,拥有 6500 多个面积在 500 m² 以上的岛屿,海岸带资源是中国 21 世纪经济和社会发展的支柱.我国沿海地区是我国国民经济发展的主要引擎之一,珠江三角洲、长江三角洲、环渤海地区对内地经济发展起着带动和辐射作用.近 10 年来,沿海地区深水港口与航道、跨海通道、围海造地和人工岛等大型基础设施建设一方面为我国沿海地区的可持续发展提供了空间资源,与此相应的沿岸防灾减灾的压力越来越大.同时,愈来愈强烈的近海海洋环境保护压力使得我们必须重新审视大规模人类活动对环境的影响.加强在河流、河口与近海海洋环境保护、近海环境动力要素、近海动力因素与工程建筑物的相互作用等方面的基础理论和关键技术研究,无疑将为这些重大工程建设提供科学指导.

3 国内外研究现状

3.1 高速水动力学方向

国外对超空泡流动进行了长期的深入研究,不断有令人瞩目的工作发表.美国水下武器作战中心、宾州大学 ARL 实验室、佛罗里达大学等开展了大量的

超空泡技术的基础研究,通过系列的水洞试验、约束飞行试验和自由航行试验,研究了通气超空泡的流动特性.德国早在第二次世界大战期间就开始了超空泡的理论与实践研究,20 世纪 70 年代以来在超空泡动能射弹和超空泡火箭武器的研究方面取得瞩目的进展.前苏联在超空泡理论研究和实验研究方面都走在前列,以乌克兰科学院院士 Logvinovich 为代表,对超空泡有深入研究.在 1998 年法国举行的第三届国际空泡会议上,俄罗斯、乌克兰等国科学家发表了数篇论文,探讨了速度高达 1400 m/s 的超空泡流研究.

以高速与超高速水中兵器为对象的水动力学基础研究面临新的发展机遇.对空泡界面形状的测定和定常情况下宏观水动力特性测量方面有一定的研究积累,但在空泡穴内的流场、涡场、压力场、密度场、温度场、相变、通气蒸汽和水成分三相流动的测定方面需要开展细致的研究工作;空泡界面的失稳、空泡末端复杂流动的定量显示也缺乏有效的手段,有关非定常空泡流流场瞬变特性、迟后效应和水动力变化特征研究有待深化.在数值模拟方面,国内在基于势流理论和 N-S 方程的自然空泡流的数值模拟方面取得了较好进展,但通气空泡流动(特别是三维气、汽、液多相非定常超空泡流动)的数值模拟方法需要探索.在数学建模、数值方法、网格生成、计算机软件研制各个方面都需要努力提高.

3.2 船舶水动力学方向

目前该领域的水动力学发展目标是研发低成本、高性能的新型舰船及推进器系统;降低舰船水动力信号特征;提高舰船耐波运动性能及对复杂环境(浅水和近岸海域)的适应性.国际学术界关注的热点问题主要集中在舰船机动性与耐波性;水动力信号特征控制技术;复杂环境适应性以及共性基础技术研究等 4 大方向上.研究重点主要包括 3 大方面:水动力学微观现象与宏观响应之间的关系;强非线性/动态现象的预报与控制新技术;用分析、模拟和评估决策综合的观念进行学科专业交叉研究.主要研究方法是基于分析和优化新概念的流体动力建模;采用现代高性能并行计算机的数值模拟与仿真;空间高精细度和时间高分辨率的物理测试技术.近期研究内容更加突出流动噪声、环境模拟和环境效应、数值模拟技术、先进测试技术、智能流动控制技术、综合航行性能预报技术、自由表面和气液两相流模拟技术等.

国内船舶水动力学经过近 30 年研究积累,面临新的快速发展机遇,但在研究思想的创新性、研究手段和方法的先进性、研究成果的系统性和实用性方面仍与国际先进水平有较大差距.具体表现为跟踪研究多,原始创新少,如独立提出的新船型或新型推进器很少;独立提出的流动模型很少;独创性的试验设施、试验装置乃至测量技术仍是十分罕见.经费投

入不足和国内船舶水动力学研究重工程、轻基础,是造成这种差距的重要原因之一。

3.3 深海工程水动力学方向

自 20 世纪 40 年代第一个平台在墨西哥湾下水以来,海洋工程从浅海走向深海。随着水深的增加,经历了重力式、导管架、顺从式、浮式平台阶段,未来人类将通过深海工作站开发海洋油气田和其它资源。目前,在 3000m 水深范围的海洋工程平台主要形式有: TLP、SPAR、SEMI 和 FPSO。近年来,为适应不同海域与油气储藏情况,各种形式的新型平台不断涌现。

为了确保油气钻探、开采和输送的安全,必须对海洋的风、浪、流环境及其预报有深入了解,并可以预测海洋结构的运动、载荷与动力响应、强度极限、疲劳寿命。通过几十年研究、开发和工程实践,人们已经可以计算不同尺度结构的确定性和随机的环境载荷和动力响应,从而制订规范(如: API, DNV),并进行工程设计。与深水油气资源开发有关的水动力学问题,如涡激振动(VIV)、液仓晃动等,已成为这一领域的 3 大国际学术年会——ISOPE、OMAE、OTC 的研讨热点。

尽管如此,在严峻的海洋环境下,海洋平台的故事频频发生。20 世纪 90 年代初,中国南海东部石油公司在陆丰外海(约 21°27.88'N; 116°37.75'E)进行石油勘探受到内波的破坏性影响。2005 年墨西哥湾 Katrina 和 Rita 飓风使美国石油工业遭受惨重损失。据不完全统计,在该海域有 52 座海上平台遭到毁灭性破坏,另有 112 座海上平台、8 根立管,275 根输油管道受到不同程度的损坏,导致该海域 25.5% 的油井关闭,18% 的气田生产关闭,油气产量剧减。这充分说明人们对海洋环境、流固耦合和非线性动力学问题的认识仍然显得十分不足,亟待进一步深化。此外,对于深水工作站的设计和天然气水合物的开采还刚刚处在探索阶段。

3.4 海岸与近海环境水动力学方向

在海岸与近海工程领域,国际上水动力学研究主要集中在近海工程水动力环境因素及其相互作用、近海水动力因素的现场观测及遥感技术、河口与海岸水动力学过程的数值模拟方法和先进试验技术、自由表面和流场的强非线性现象的理论和模拟技术、灾害与环境动力过程、水动力过程与物质及能量输运过程、环境动力过程、生态动力过程等多过程耦合作用等方面的研究。主要研究河口、海岸与近海环境的水动力学现象及其形成机理,开发与研制海岸与近海工程水动力学数学模型,研究包括近岸波、流、泥沙运动的基本规律及其相互作用,开发海岸与近海区域反映上述基本规律的数学模型。该领域的水动力学数学模型研究大大推动了对波、流、泥沙的一般性规律的认识。

目前欧美各国主要水力研究所(大学)都建立了自己独具特色的海岸与近海工程水动力学数学模型,这些模型经过了实验室和现场大量资料的验证,已投入使用。

近几十年来,我国在海岸与近海工程领域的研究投入了大量的人力和物力,取得了很多重要的研究成果,为我国的深水港口、大型河口水土资源利用、沿海水域环境保护等做出了重要的贡献。与国际先进水平的差距主要表现在对复杂条件下风、浪、潮、流等动力因素及其相互作用机理、耦合机制及其计算方法的基础研究缺乏应有的关注;对海岸与近海工程环境灾害的形成机理研究,特别是深入现场观测的研究有待加强;对河口海岸带资源开发利用中的水动力学应用研究缺乏必要的集成提高。

3.5 复杂水动力学问题的数值模拟和实验技术

复杂水动力学问题面临的是超常环境中的水动力学机理分析和研究,它们通常是非定常、非线性的及多种因素影响下的三维复杂流动,如流动的细观结构对宏观水动力学特性影响的多尺度问题;气液、固液多相流并伴有相变和物理化学演变的复杂流动问题;表面波、内波与结构物之间的动态耦合问题等。

为了促进我国水动力学基础研究的发展,使得实验研究更定量化、机理化,必须突破现有手段和观念的束缚,有所创新;依据现代测试手段获取的试验数据,建立更加符合物理本质的水动力学模型;发展高效、高精度的数值计算方法,研制具有自主知识产权的通用计算软件。

发展具有独创性的实验测量技术以及具有自主知识产权的数值计算工具不仅是我国水动力学基础研究的重要任务,而且,一旦取得突破,将为我国船舶工业、海洋油气工业、港口与水利等行业的科技进步提供源头创新。

4 近期主要研究领域

4.1 超高速水下航行体的水动力学基础研究

4.1.1 超空泡流动特性与机理研究

超空泡流动涉及到多相流、湍流、相变、可压缩性和非定常等物理机制,迄今对于这一复杂流动的了解还十分有限。重点研究超空泡流动特性和水中高速航行体应用超空泡技术减阻的机理,深入认识超空泡穴内流体介质的物理特征、超空泡形态特征与流体动力特性、流动结构和尾部流动特性、超空泡减阻机理,建立超空泡稳定性的分析方法和判据,发展超空泡流动研究的试验技术和数值模拟方法,为发展我国的超空泡高速航行体的研究提供重要的基础数据、理论依据和技术手段。

4.1.2 高速物体出、入水流体动力特性

航行体高速出水与入水过程物理现象极其复

杂, 力学环境变化急剧, 涉及水面效应的显著作用和流体介质密度的突变, 并伴随附体空泡的剧变和溃灭, 使航行体受到脉冲压力和强干扰. 重点研究物体高速带空泡出水与入水过程中的流体动力特性、空泡的动态演化规律及其与水面的相互作用、空泡溃灭机理和冲击载荷特性, 发展物体高速带空泡出水与入水过程的试验技术与精细数值模拟方法, 深化对航行体高速出水流动现象及机理的认识和把握.

4.2 舰船水动力学若干重大基础问题

4.2.1 舰船的流动噪声机理及抑制

舰船周围流场特别是尾流场对其水动力性能和信号特征有着根本性的影响, 由于舰船附体特殊的结构及布置形式, 并且还有螺旋桨运转的影响, 使得其周围流场的流动状况十分复杂, 涡旋强度增高, 不但恶化了流体动力性能, 而且增大了舰船的辐射噪声和自噪声. 通过对舰船湍动流场及其表面脉动压力和辐射噪声之间的有机联系、突破黏流流场与声场耦合的建模技术及求解方法, 提出复杂流场对水动力噪声影响的显著性特征参数, 为了解和控制舰船周围的流动、抑制表面湍流和分离、大幅降低阻力和信号特征, 提供水动力学新概念、新原理和新方法, 指明流动控制的方向, 为水动力学创新研究和跨越发展提供新的能力.

4.2.2 高海情下船舶运动的非线性问题

现代耐波性计算已开始考虑实际海洋环境的影响, 但是还有很多方面没有解决. 这些问题主要包括甲板上浪、砰击、液货船液舱中液体晃动等与非线性水波、船舶大幅运动以及船舶本身线型结构等有关的带自由面的强非线性力学问题. 通过理论分析和机理性实验研究非线性入射水波、物体的几何形状导致的非线性以及物体-自由面相交线的非线性特性, 加深对这类复杂的力学问题的本质和机理的理解, 形成有效的理论预报方法, 促进对带自由面的强非线性力学问题的数值模拟技术和模型试验技术的发展, 推动相关学科的发展.

4.2.3 非传统舰船的水动力学问题

以高航速、良好适航性、优秀机动性及低目标特征(电磁场 / 红外 / 声 / 尾迹)的高技术、高附加值非传统舰船为对象, 研究与之相关的新型推进技术、综合航行性能预报与优化技术、运动控制技术、消波船型技术和降低目标特征的构形与水动力布置技术; 建立起适用于多体船、复合型船和超临界高速船等非传统船水动力性能分析预报、评估优化和运动控制的理论研究、数值模拟和物理模型试验的方法,

并用于揭示非传统船型降阻增速、高适航性、优良机动性及低目标特征的机理, 提出若干非传统舰船的概念方案, 形成该领域的原创性成果.

4.3 深海资源开发中的水动力学问题

4.3.1 南海特殊环境及其工程影响

从工程角度研究南海特殊环境下, 风(含台风)、浪、流等环境条件的非线性耦合作用; 内潮和内波的发生机理、演化与传播规律; 内波流场的特征与参数确定; 沙波、沙脊的迁移机理; 发展相应的试验技术和数值模拟方法. 考察上述环境条件对海洋工程结构水面平台、水下系统和基础的影响.

4.3.2 深海海洋工程结构的环境载荷与动力响应

研究海洋结构物在深海复杂环境条件作用下的流体载荷和动力响应; 锚泊系统和立管等细长挠性结构的动力特性、流固耦合和涡激振动机理; 水流与海底管线的相互作用和床面局部冲刷机理; 发展相应的理论分析方法、试验技术和数值模拟技术. 考察环境载荷与动力响应对新型海洋结构物的安全性、经济性和技术可行性的影响.

4.3.3 天然气水合物开采的基础水动力学问题

以天然气水合物开采为背景, 研究变孔隙率床底多相物理化学渗流和海底稳定性理论; 建立变孔隙率床底多相渗流和海底稳定性分析方法和判据; 发展相应的试验技术和数值模拟方法. 考察多相渗流和海底稳定性对天然气水合物开采的安全性、经济性和可行性的工程影响.

4.4 海岸与近海工程水动力学问题

4.4.1 海岸与近海工程水动力学基础研究

开展浅海水波传播理论、破碎过程、在水流中的传播特性和模拟方法的研究, 建立可满足工程分析要求的快速、大区域分析方法; 研究波生流、裂流和近岸环流产生机理和流动特征; 发展水波破碎引起的海岸破带复杂湍流运动及其模拟方法; 研究水波和近岸流系作用下海岸变形机理和特征, 沙坝形成和演化规律, 海岸韵律地形的形成机理和特征; 关注泥质海岸的动力学特性. 发展浅水内孤波的高阶理论、大振幅内孤立波与近海结构物的相互作用理论. 研究水波与海岸工程结构、基床的相互作用以及破碎波的冲击作用; 研究水波与透空、深海养殖网箱等复杂工程结构物的作用; 研究水波作用下海岸建筑物(包括突堤和离岸堤等)周围引起的海岸变形, 海岸与近海结构物附近的床面局部冲刷机理及数值模拟方法.

4.4.2 与海洋灾害有关的水动力学问题

研究影响我国的台风发生规律与中国近海特殊

海底地貌形态下风暴潮的形成机制和预报方法,分析浪、潮、流、风暴潮非线性耦合机理;分析不同时空尺度下不同物理量间耦合机理和模拟方法;研究浪、潮、流及海平面变化等因素对物质输运及其交换的影响;深入研究海啸情况下海底管线的局部流场及床面冲刷情况,研究海啸与海底管线和海岸结构物的相互作用.通过实验和数值模拟,研究我国沿海地区(特别是长三角和珠三角地区)潜在的海啸灾害特征,对海底通信、油气管线和海堤进行安全性评估.研究灾害性海洋过程对海岸防护工程的破坏机制,探讨风险评估与管理体系统.

4.4.3 与河口及近岸水环境有关的水动力学问题

研究中国近海复合水流动力特征,河口径流、潮流、风浪及咸淡水混合多种因素之间的控制地位和相互关系;研究我国大型河口盐水入侵机理;径流、潮流、水波及咸淡水作用下的河口泥沙运动规律,不同类型河口多种动力条件下的泥沙运动和河口演变规律及其动力响应,河口水污染机理;发展河口泥沙运动模拟理论和模拟技术等关键问题.研究近岸生态环境中污染物迁移转化及与赤潮有关的水动力学问题.

4.5 复杂水动力学问题的高性能计算方法

自由表面变形与破碎及其有关的力学特征是水动力学研究特有的科学问题.表面波的变形、破碎过程含有丰富而复杂的流动机理,涉及湍流、水气二相流动,研究水波传播、变形和破碎过程的建模方法,改进 VOF 和 Level-Set 等方法以适用于重构三维自由表面大变形过程,发展新的自由表面大变形运动的模拟技术,突破从大尺度光滑自由表面流动向以水花飞溅、掺气为特征的局部泡沫状流动转变的建模关键技术.研究大变形自由表面流动与固定结构物或运动结构物相互作用(如破碎波的拍击、甲板上浪等)的数值模拟方法,发展集数值造波(流)和数值消波为一体、达到工程实用水平的数值水池.发展适用于发展高速物体出、入水问题的汽、气、液多相流动的精细数值模拟方法,突破物体高速出、入水过程数值模拟的核心技术.

4.6 复杂水动力学问题的精细实验与测量技术

研究水波破碎过程的精细实验与测量技术,包括流场、掺气水体的含气量、气泡半径分布等.研究水面、水下航行器湍流边界层的细观测量及控制的实验技术,包括湍流边界层中的细观结构和尾迹生成机制;研究海洋分层流、内波实验室模拟及试验技术,包括海洋中分层流、内波的实验室生成与消波技术、内波及表面微幅流动的测量;发展河口海岸及近海复杂水流中泥沙、污染物(油污染,赤潮等)多相流的迁移输运机理实验技术和精细测量方法;发展水动力噪声测量技术及降噪控制实验方法,包括水面、水下航行体噪声测量,湍流边界层细观结构对噪声的影响,以及噪声控制技术的水动力学实验;研发时空高分辨率的微型传感器测量非定常、非线性的三维细观流场,突破某些精细测量的瓶颈.

5 结 语

我国海洋资源开发、国防建设、海岸与近海环境保护为水动力学研究提出了迫切的需求.有必要在高速水中兵器、深海资源开发、新船型开发、海岸与近海工程等领域部署力量,着力解决其中的水动力学关键问题.深入开展水动力学研究已成为在上述这些工程领域实现自主创新,开拓发展的必由之路.突破带自由表面的复杂水动力学问题的力学建模、高性能计算和精细实验技术将显著推进本领域的科学研究水平.

致谢: 中国科学院力学研究所、中国船舶科学研究中心、上海交通大学、大连理工大学、清华大学、河海大学、中山大学、上海大学等单位的一批水动力学专家为本专题研讨提供了翔实的书面材料,并在2006年11月由国家自然科学基金委员会数理科学部组织召开的研讨会上为本文的撰写制定了具体的编写大纲,因此本文是研讨小组集体工作的成果.参加本专题研讨的专家有李家春院士、何友声院士、章梓雄院士、缪国平教授、鲁传敬教授、朱德祥研究员、严以新教授、滕斌教授、戴世强教授、王道增教授、詹杰民教授、余锡平教授、刘桦教授和孟庆国研究员.本文作者对各位专家的贡献表示衷心感谢.

SUGGESTION ON THE RESEARCH FRAME PROGRAMME ON HYDRODYNAMICS FOR THE ELEVENTH FIVE YEAR PLAN

LIU Hua¹ LI Jiachun² HE Yousheng¹ MENG Qingguo³

¹Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

²Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

³Department of Mathematical and Physical Sciences, NSFC, Beijing 100085, China