

# 海洋工程力学

曹春华 (中国科学院力学研究所)

海洋工程力学是近几年随着生产和科学技术的蓬勃发展,随着人们的注意力逐渐转向海洋而兴起的一门新兴学科。它的诞生,就象一块巨大的磁石,立刻把许多国家的部门与学者紧紧地吸引在它的周围。

## 海洋工程力学的兴起

近几年来,人们逐渐将注意力转向海洋,因为人们意识到,过去曾是生命起源摇篮的海洋,对于人类具有十分重要的现实意义。海洋占地球表面积的71%,它不仅是海上交通和军事活动的重要场所,而且是天然大宝库。据不完全统计,各大陆周围浅海区海底蕴藏的石油就有数千亿吨。已经探明,大陆架、陆基和小型洋盆的深水海域海底的石油储藏量也十分可观。海洋还蕴藏着巨大的矿物资源,深海沉积物表层含有丰富的锰结核矿,各大洋锰结核矿的总储量约2~3亿吨。海洋又被称为“蓝色的宝库”,陆地有的天然元素,海水中大部分都有,以重要的战略物资铀为例,海水中约含有45亿吨,为大陆储藏量的二、三千倍。海水中铀的总含量为2400亿吨,重氢为4.2万吨。海水还是取之不尽,用之不竭的核燃料来源,海水还拥有丰富的动力资源和生物资源,海洋生物不久将成为人类食物的重要来源,海洋是人类广阔的活动场所。

人类社会,特别是工业发达国家,由于工业的过度发展,必然会引起能源危机。据专门人士推测,二十一世纪人类将面临陆上石油资源枯竭的困境,解决的办法是节约能源消耗,提高石油采收率,开发海底石油和天然气,以及利用新能源,但是当前最重要和最现实的办法就是开发海底石油。开发海洋已成为当代工业发达国家的重要技术发展方向。

正当各国竞相开发海洋的时候,世界上却意外地发生三起重大的近海事故。1974年10月14日,一座8000吨的油田钻井钢质栈桥,在北海北面从驳轮卸入100米水深的海中,开始象预料那样,栈桥浮在驳轮侧面,一部分由桩柱导管中的长形钢质浮管支撑着,然后调整浮力,准备将栈桥直立起来,可是就在栈桥即将直立起来的时候,出现了巨大的气泡,使栈桥缓缓坠入海底,后来查明事故原因是16条浮管的底部被压跨,栈桥的两条支撑腿也被结构下部外来压力损坏。

1979年1月9日,一座5500吨的Namordo钻井栈桥平台装在世界最大的驳轮上,由两艘拖轮拖着离开了苏格兰,准备驶往巴西,行至第二天,海上的天气突然起了风暴,两艘拖轮失去控制,驳轮的侧面向海面倾斜,栈桥便从驳轮掉入60米水深的海中,事故原因是栈桥是按风平浪静条件下工作设计的,未考虑暴风的影响。1980年3月27日,这天,北海南部的风速达到18米/秒,海浪高达7米,一座停放在北海南部的Alexander L. Kielland号五条腿半潜式石油钻塔突然倾倒,海水迅速进入甲板,20分钟后,钻塔全部倾覆,沉入海底,钻塔上125人丧生,造成十分重大的损失,事故的原因是钻塔横向支撑大腿五条拉筋中的一条疲劳破坏造成的。

惨痛的教训,使人们逐渐认识到,为了开发海洋,除了需要了解和预测环境情报、环境质量、海藏资源和生物资源外,在海洋工程结构和设施装置中还有许许多多的重大的力学问题需要解决,这就是海洋工程力学面临的问题。

## 海洋工程力学的任务

一个采油平台,由于在海洋作业受到的载荷大、环境恶劣,一般还要求平台在30年左右的使用期间站得住,而且有足够的安全系数。这样,海洋工程结构固定式结构物基础设计所遇到的一个问题就是稳定性。在重力式结构出现以后,基础的问题变得更加复杂和突出,它不仅要求有可靠的稳定性,而且对结构的水平位移和垂直沉降都有很高的要求,这是向海洋工程力学提出的一个重要课题。

海洋工程结构,不管是固定式平台,半固定式平台,可移动式平台,还是系泊式平台,通常都是一个大尺寸的复杂装置。它由各式各样结构的部件组成,这些部件又由不同的材料制成,它所受的载荷历史和环境条件都是十分复杂的,绝大多数是随机性质的。环境荷载由于结构本身的存在,又会发生大范围的变化。结构物有动态惯性荷载,自身应力和残余应力,温度效应,疲劳腐蚀,不均匀沉降及应力重新分布,还有基础桩或土壤与结构的相互作用等。在这么多复杂因素影响下,怎样确保结构物的安全可靠,这也是

海洋工程力学所要解决的任务。

海洋工程学是为海洋资源的开发、能源的利用、工农业生产、海外交通运输和国防等方面有关的工程设施的建造,提供勘探、设计、制造、施工理论基础和实施方法的一门综合性技术科学。它是以海洋为环境的所有陆地工程的移植,涉及到许多基础学科和应用学科。

海洋工程力学是海洋工程学的核心组成部分。它应用力学的概念和法则,去解释和解答海洋工程建设中存在的各种力学问题,为工程设计和建造提供必要的理论依据,提供计算分析方法和模型,提供工程设计参数等。

由于海洋环境因素(受浪、风、流、冰、地震载荷等作用)严峻多变,海洋工程结构特殊,海底土性又难以了解,所以给海洋工程设计人员造成很大的困难,一旦事故发生,后果往往十分严重,因此海洋工程力学的研究变得十分重要和迫切。

### 海洋工程力学的研究内容

由于海洋工程力学是一门与其他学科相关性很强的综合学科,因此研究的内容十分广泛。综合起来,海洋工程力学的研究大致包含下列几个方面:

海洋流体力学——主要研究海洋波以及波浪与海洋工程结构的相互作用,解决海洋工程结构物的载荷问题。波浪是海水基本运动的形态,波浪对海上船舶、舰艇、海洋工程结构以及海岸设施所产生的流体动力作用是最基本的载荷形式。波浪可以分为规则波和随机波两类,规则波浪涉及波浪的生成机理,波浪的破碎机理,波浪遇到障碍物时的反射、折射、绕射及波能的吸收问题。随机波浪与概率统计密切相关。离岸海面的波浪是一个随机现象,它与风速、吹风时间、水深和海底特征等许多因素有关。波浪谱的统计处理方法有两种,一是离散波分析法,每一个有义波高和平均跨零周期的组合可形成一规则波,用它单独作用于结构就可得出结构的响应,然后再综合各海况的规则波的结构响应,计及相应出现的概率,应用线性累积损伤理论就可算出结构的寿命。另一是谱分析法,它考虑波浪的随机特性并用统计方法描述海况。一般认为,在一个短时间内,海面升起的时间历史是符合高斯分布的,并且是一个具有窄带功率谱密度的平稳随机过程,因此,对每一海况可用其功率谱密度函数来反映其特性,功率谱密度反映了波浪中每一频率成分的能量分布。在谱分析法中,除了由实测波浪记录得出海况的波浪谱外,还可根据海况参数选用适当的波谱来表达,从而建立波谱与表征海况参数之间的关系。

有色金属 6卷5期

海洋结构动力学——主要研究海洋工程结构中的振动响应和疲劳破坏等问题,提出合理的海洋工程结构形式,解决海洋工程结构材料的选用原则、设计理论和分析方法等,并且解决怎样使结构防震、消振、保证结构可靠安全,而且造价低廉。疲劳本身就是一个很复杂的问题,再加上海水腐蚀的影响,形成了腐蚀疲劳,对海洋工程结构的威胁更大。对于近海结构物,基础的稳定与变形也是十分关键的问题,因为这种结构对基础的水平位移和垂直沉降都有严格的要求。对于海洋结构物来说,还有许许多多新的问题,如动力载荷与动力反应的基本特性,包括谐振载荷反应、冲击载荷反应、随机载荷反应、桩柱对波力的反应、白噪声反应等;动力分析中结构的物理特性,包括质量、刚度和阻尼计算,结构动力特性的量测,结构的起振,土壤与结构的相互作用,群桩效应线性理论,波力的计算等;结构物的动力反应计算,包括一维、二维和三维大型结构的动力分析,动力相似与动力模型,模型的试验等,这些问题都是海洋结构动力学所要研究的内容。

海洋土力学和地基基础——主要研究海洋土的静动态变形-强度破坏特性,研究土的刚度和阻尼特性,提出土性模型和参数及其在设计中的应用方法,桩基和土体的相互作用及其静态动态承载能力、重力式平台地基基础的变形和稳定性问题,地基基础与上部结构的相互作用等。海洋土力学和海洋工程密切相关,海洋工程结构物的地基基础普遍认为是海洋工程成败的关键。基础的稳定性是用周期的风暴波浪加上“百年波”的环境来检验的,基础设计的可靠性基本上又依赖于它所依据的土层性质资料的可靠程度。对于桩基来说,除了要考虑巨大的轴向载荷外,还要考虑波压、冰压、桩在海底平面处承受很大的横向力和弯矩。随着近海石油开发的进展,需要在一些地震倾向大的地方建平台,这就还需要研究地震波引起土的运动及对平台施加的载荷。精确的分析还应考虑在地震期间和地震以后土性质的变化以及土不均匀运动使桩发生的位移。这些问题都属于土力学和地基基础的研究范畴。

海洋工程力学的测试技术——海洋实际上是一种具有不同温度和盐度、不停运动变化的水体,要在浩瀚无垠的海洋上建造海洋工程结构物,就必须了解海水的各种运动规律,为此必须进行现场的观察与测量,包括海流、海浪潮汐的观测,由于海水运动对海洋工程结构物产生载荷的实测,海工结构在受到这些载荷后本身的变形、位移、应力、速度、加速度、稳定性等方面的测量,应用在海洋工程测量上的技术的研制,包括电子学、光学、声学、遥感技术等。观测海洋的

方法还包括水面船、浮标、飞机、潜水器、水下实验室、海洋卫星等。

此外,还有海洋工程材料力学性质的研究,由于海洋环境的特殊和恶劣,因此应用在海洋工程结构中的材料必须保证寿命长和不能发生灾难性破坏,材料必须有耐化学、耐电化学腐蚀、耐生物的污损等特性。除了研究常用的金属材料外,还必须研究一些非金属材料,比如混凝土、塑料、陶瓷、玻璃和复合材料等的力学性质,以适应日益发展的海洋工程结构的需要。

### 海洋工程力学的进展

科学技术的历史证明,一旦自然科学理论通过实践取得重大突破,就会大大推动技术和生产的进展。七十年代以来,海洋工程科学和技术获得了非常迅速的发展,成为与原子能科学、空间科学并驾齐驱的三大科学技术领域之一。以美国而论,五十年代是原子能工程科学时代,六十年代是空间技术科学时代,七十年代则是海洋工程科学时代。人们预言,随着世界许多国家和地区大规模地向海洋进军,不久,人类将进入海洋时代。

截至1979年,全世界已有海上油田120多个,油井16000多口,日产原油1000多万桶。到1982年,全世界已有100多个国家在积极勘探海底石油,已有40多个国家在海上开采石油和天然气。1979年海上石油总产量为6.4亿吨,约占陆海总产量的20%,预计到1990年,海底石油产量约为石油总产量的35~40%,到2000年可达50%。

目前海洋流体力学的研究取得了较大的进展,已经建立了以莫里森(Morison)方程为中心的半经验载荷公式和绕射理论,初步满足了工业设计的迫切要求。为了分析结构的长期动态特性,现在已发展了统计分析方法。最近不少人对环流的运动学和动力学进行了理论研究,研究结果已经揭示出大洋稳定的风生环流和热生环流的基本机制。由于电子计算机的应用,目前已有可能在比较完全的流体动力学命题条件下,即从基本控制方程出发,考虑具体海岸和海底地形,进行大洋不同海区定常流动计算,从而将海洋环流的定性描述提高到定量描述阶段。1977年美苏等国合作,开始进行多边形中大洋动力学实验,对中尺度旋涡进行详细测量,取得了大量资料,证明无论开阔海洋,还是大陆边缘,都普遍存在着中尺度旋涡。这一发现从根本上推翻了五十年代初建立的大洋风生环流概念。海洋环流的研究,目前也十分活跃,1968年和1979年曾两次召开过国际海洋湍流学术讨论会,现在这方面的研究正朝半经验理论和局部各向异性湍流的统计理

论方向发展。关于海洋和大气相互作用方面,目前小尺度相互作用的研究取得了可喜的进展,最近以湍流边界层半经验理论为基础,发展了大气稳定边界层相当完善的理论,并已将这一理论应用于海气界面的热力和动力相互作用的计算上,应用大气湍流边界层理论和关于大洋波动表面特性的经验值,已能根据标准的气象观测资料正确地确定海上的湍流通量。

在海洋结构动力学方面,目前出现了新的动向和苗头,菲什(Fish)、迪安(Dean)和希夫(Heaf)在滨海结构设计中用莫里森方程考虑流体-结构的相互作用问题,提出了计算各种海况中结构动力响应的计算机程序。克雷布(Crabbs)和李(Lee)提出了一个估计在作业载荷条件下系泊叉臂结构性能的方法,利用有限元法结合预先处理方法,完成了确定环境载荷的分析,对照各种设计标准,进行了耐久性试验。泽柳政弘和福冈哲二对管状接头进行了实验研究,得出一些在海洋工程结构设计中非常有用的经验公式。如无加强T型接头的疲劳强度与其静破坏载荷有密切关系,交变载荷与破坏载荷的比( $\Delta S$ )与疲劳寿命间遵循 $\Delta S = 1.99N_c^{-0.208}$  ( $N_c$ 为疲劳裂纹形成寿命)或 $\Delta S = 2.60N_f^{-0.188}$  ( $N_f$ 为疲劳破坏寿命),还认为管子接头部分疲劳试验强度取决于交叉部位产生的最大局部应变,其平均疲劳寿命可由公式 $\Delta s = 0.01327N_c^{-0.1908}$ 推出( $\Delta s$ 为局部最大应变)。大竹、阪本等人以大量的试验研究了海洋结构物高强度钢管接头的静强度和疲劳强度,证明使用铸件接头代替焊接接头,接头的疲劳强度和寿命可提高3倍;常规疲劳曲线,如美国焊接学会推荐的s曲线,适用于高强度钢管接头疲劳寿命估算,并发现部分加厚主管管壁对于改善静强度和疲劳强度都很有效;高强度钢N型接头的最大静强度可按主管管壁上中剪应力的计算方法进行预算。皮埃特(Pieter)和威布罗(Wybro)应用格林函数积分方程的方法,精确计算了普通柱式稳定平台的水动力载荷和响应性能,评定平台各柱腿相互作用所引起的波浪干扰效应,并确定这一效应对不规则海浪中平台振荡性能影响的程度。1975~1980年,欧洲共同体(英、法、西德、荷兰和意大利)以及挪威六国共同制订了一个海洋焊接钢结构在疲劳和腐蚀疲劳载荷下工作性能的研究计划,有40多个实验室参加,耗资二千多万美元,完成了管状接头的应力分析,管状接头包括T、K、X、Y、KT型接头的疲劳试验并对影响接头疲劳寿命的因素如尺寸、焊缝、焊料、钢材、循环比、加载形式、腐蚀介质等进行研究,取得了大量的数据。

在海洋土力学和地基基础的研究上,近几年来,不少国家大量地开展海浪周期加载对土的强度和变形

性质影响的研究,取得了显著进展.无论对桩基或重力式平台基础,在设计时都应考虑波浪力的周期动载荷效应.海洋固定式平台基础的地震效应也已开始研究,在有的设计中已采用按地震准则控制的分析.波动方程分析已广泛应用于桩基设计,有限元分析、概率论和数理统计也已逐步应用到海洋工程基础的分析中.目前对于重力式平台基础的深层滑动分析,即承载力的计算普遍采用哈森(Harsen)公式,以后陈(Chen)提出了建立在塑性理论基础上的能量法,它可以处理有不同土层的分析.最近简布(Janbu)又提出一种重力式结构有效应力稳定性分析方法关于基础的变形计算方面,齐恩基威次(Zienkiewicz)等人提出了为估算周期载荷下变形的计算程序.安德森(Andersen)发展了一种简化了的但与实际接近的不排水变形的周期加载分析方法,实践表明,用此法来估算模拟暴风的试验室试样在周期加载下的剪应变是很成功的.

在海洋工程力学的测试技术方面,也取得许多新的进展.目前美国已研制出深度达7千米的三轴声学海流计,它能分辨50赫兹以内、频率分量为10厘米小尺度的湍流现象.在海上长期进行观测波浪的仪器已有声学测波仪、重力测波仪和超声波测波仪等.最近中国科学院声学研究所张顺义和郑昌武研制出高能量联合气枪,此枪一经发射,地下4~5千米地质构造情况可以清晰地显示在图纸上,犹如为地层拍照,成为石油勘探的有力武器.

### 海洋工程力学的展望

海洋工程力学虽然是一门年青的学科,但它已显示出强大的生命力.各国研究海洋工程力学的专门组织如雨后春笋般地出现,国际学术交流会也非常频繁.在挪威皇家科学及工业研究局的资助下,挪威理工学院建议组织一个国际会议,专门研究近海结构性能并设法在各国间促进交流和协作,这一建议受到英国伦敦大学、美国麻省理工学院和荷兰工业大学的响应,共同商定每三年召开一次会议,定名为近海结构性能国际会议,简称BOSS会议,会议主要讨论设计采油平台涉及到的水动力学、结构、土力学和基础,以及它们之间的相互作用问题.1976年8月在挪威的Trondheim召开了第一次会议,参加会议的代表有400人,提出论文70余篇.1979年8月在英国伦敦大学帝国理工学院召开了第二次会议,会议突出讨论了基础-结构-流体以及流体-结构间的相互作用,提出了许多明确的问题,包括波浪与海流的关系,结构的动力响应,材料性能,疲劳分析等.1982年8月在美国麻省理工学院召开了第三次会议,有20多个国家400多名代表参加,交流了近百篇报告.

《力学杂志》6卷5期

美国曾制订过几次海洋工程和海洋开发规划,从1966年开始将重点转向海洋的全面开发利用,1967年美国海洋科学总预算为四亿一千万美元,到七十年代美国进一步明确海洋科学为“重大科学”,1971~1980十年总预算达八十亿美元.日本从七十年代起开始重视海洋工程力学,1971年设立海洋开发审议会,1973年研究和探讨了推进日本海洋开发事业的基本方案,1971年建立了海洋科学中心,提出一个《种子挖掘报告》,详细规定了今后23年急需研究的课题,重点是矿物资源的开发和能源利用.苏联的海洋和海洋工程力学方面的研究所有170多个,研究人员超过美国,投资率每年增长1.5倍,美国仅为7%.法国1976年成立了海洋开发中心.西德由教育部长统管海洋和海洋工程事业,仅在汉堡就有6个海洋研究所.

我国有长达18000多公里的海岸线,在我国沿海辽阔的海域里,蕴藏着极其丰富的石油与天然气资源.已在渤海及南海局部地区初步进行了勘探,并相应地开展了一些海洋工程力学方面的研究工作.在渤海已建立了不少桩基钢平台.东海、东海和黄海也正着手普查和勘探,形势十分喜人.我国第一艘半潜式石油钻探船主体部分已在黄浦江顶升合龙,半潜式钻探船,由于体积庞大,结构复杂,设备特殊,质量要求和建造难度高,目前世界上只有少数几个先进国家能够单独建造,这标志着我国海洋工程力学的研究进入了一个新的时代.目前,我国已着手制订海洋开发的宏伟规划,相信不久,海洋工程力学的研究将有更大的发展.

海洋工程力学的研究虽然已为我们展现出灿烂的前景,但是,它毕竟还是一门年青的学科,目前尚处在向纵深发展的阶段,还有许多新的问题还没有解决,急待我们去探索.

科学 SCIENTIFIC AMERICAN 1983年第5期

#### 要目预告

我国水资源及其开发利用  
哺乳动物细胞的大规模培养  
走路的机器  
内耳的毛细血管  
绝灭动物的脚印  
活细胞的核磁共振谱技术  
风琴管的物理学  
宇宙X射线背景的起源  
中国古代铁铸件的大批量生产

科学与大众·游戏教学·业余科学家