

西北太平洋波浪统计集

方钟圣 主编

方钟圣 金承仪 缪泉明 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

西北太平洋波浪统计集/方钟圣主编. —北京:国防工业出版社,1996.5

ISBN 7-118-01593-8

I. 西… II. 方… III. 海浪-统计数据-太平洋 IV. P73
1.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 02472 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 1/16 印张 29 1/4 942 千字

1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同努力!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员：怀国模

主任委员：黄宁

副主任委员：殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长：刘琯德

委 员：尤子平 朱森元 朵英贤 刘 仁

(按姓氏笔划为序)

何庆芝 何国伟 何新贵 宋家树

张汝果 范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生 崔尔杰

序

海洋风、浪资料是船舶研究、设计中必不可少的依据。近 30 年来,不同海区的波浪和风的统计资料专集在国际上已出版多本。英国海事技术公司及其前身英国国家物理实验室船舶部于 1967 年和 1986 年出版了两本波浪统计集;日本船舶技术研究所于 1965 年、1970 年、1980 年和 1992 年先后出版了 4 种不同时期的风、浪统计图册;美国舰船研究发展中心积极发起并参与了美国海军的风、浪后报气候计划,出版了多种风、浪环境标准手册,供舰船研究和设计之用。然而,由于缺乏适用于我国周围海域和西北太平洋区域的波浪资料,多年来我国的船舶工程师和研究人員只能从国外的资料中寻找一些粗略的风、浪数据以代用。依据我国自身的扎实工作,编著出适用于我国船舶各种运营航区之波浪统计专集,以解此困扰,已成当务之急。

中国船舶科学研究中心是我国船舶总体运动性能和结构安全性的理论与实验研究基地。为预报船舶性能及优化船型之所需,长期关注着船舶航行海域风、浪基本环境资料的搜集,并于 80 年代初开始进行有关波浪统计技术的研究。本书作者方钟圣高级工程师即在该领域中做了大量的工作。他曾于 1982 年与英国著名的波浪统计专家霍格本博士合作,在对(仪)器测的资料与船舶报资料作相关分析的基础上,研究了处理船舶报资料的波候综合模式。其后,取得了国防科工委等部门研究经费的支持,和他的课题组一起,经过多年的努力,系统地搜集了长达 30 年的国内外船舶报资料和浮标站器测资料约 800 万条,进一步改进了波候综合模式,计算分析了大量数据,终于建立了船舶用西北太平洋风与浪数据库。本书的内容即取自该数据库中的一个重要部分——波高、周期和波向的

长期联合分布,现特予以发表,以便工程界应用。

本书提供的数据具有以下特点:原始资料丰富,并经规格化的预处理;波候综合模式的处理方法及其结果业已经过世界上各海域器测数据的检验,尤其是经用日本浮标站的多年器测数据对本书与其他图册的结果作了比较,验证了其可信度高于国际同类图册;海区划块能反映波候规律,满足我国船舶和海洋工程的环境分析需求;统计结果的表达形式,包括表的编排和波高参数的划分等均经过了精心的设计,并与我国现行的浪级划分相对应,查用方便。这些特点使本书能满足船舶、海洋工程和航海界之急需,为从事这些领域的研究、设计人员提供了较为可靠实用的资料。

建立前述数据库和编著本书的工作,由前任所长顾懋祥院士倡导,刘楚学副总工程师鼎力组织,在方钟圣高级工程师带领下,课题组的金承仪、缪泉明等付出了辛勤的劳动。特别应该提到的是,在有关工作中得到了青岛海洋大学、国家海洋局、上海气象局、南京空军气象学院、南京气象学院等国内单位和英国、日本的一些单位的许多专家的关心和支持,谨向他们表示衷心的感谢。

我们相信,随着我国造船事业和海运事业的进一步发展,这一科技成果将会得到更广泛的应用。对本书的不足之处,恳切地希望得到海洋界和工程界的专家同仁们的批评指正。

中国船舶科学研究中心

吴有生(所长)

1995 年 8 月

前言

现代船舶和海洋工程设计中需要确定各种海洋环境条件。为此,国际船舶与海洋工程界的两大权威组织之一,国际船舶与海洋工程结构会议(ISSC)专设一个环境条件委员会,每三年综合交流、报告这方面进展情况。这些需要海洋、气象和船舶等有关方面专家通力合作,从该委员会历届成员的组成情况可以得到明证。

在上述海洋环境条件中最主要的是波浪条件,要确定它需要各种海浪要素的统计资料和必须的基本知识。近几十年来,海浪理论和其应用有长足的发展,但相对来说对海浪要素的气候性变化规律的探索进展不快。这主要是因它须有长期观测的大量资料作为基础,而观测动态的海浪是十分困难的,自动计测的浮标和卫星遥测的发展只有近十几年的历史,并受到各种条件的制约。按照世界气象组织规定的船舶天气报告(简称船舶报)资料具有数量大、分布广和历史久的特点,但波浪是目测的,可靠性需要检验。近年来,由前英国海事研究所(NMI,现合并改名为BMT)和英国气象局发起研制的、包括有本书作者参与和改进的波候综合模式,采用器测波浪长期统计数据 and 风速与波高联合分布资料以确定模式中参数和检验有关结果,能较好地克服目测波浪资料所存在的缺点,提高了统计结果的可靠性。这种利用器测数据确定模式中参数也是波浪预报或波浪后报的各种模式所必经的,因当前的预报或后报理论仍包含许多不确定因素,需要用经验的方法确定;同时在预报或后报中确定外海的风场时也必须利用船舶观测资料,因此很难笼统地说,以某种后报模式的统计结果一定优于基于船舶报并经波候综合模式处理的结果。

工程需要的波候统计资料往往被认为是属于海洋或气象部门的事,船舶等工程部门只是使用而已。纵观几十年中为船舶等部门所用的英、

日、美等国出版的波浪统计图册,大多是以船舶研究部门为主编撰或发起编撰的。例如包含世界各海区统计资料的《海洋波浪统计》(1967)及其后继改进本《全球波浪统计》(1986)是英国前国家物理实验室船舶部和后来的英国海事技术公司(BMT)为主编著的;日本船舶技术研究所先后编著了4种不同时期的北太平洋风、浪统计图册。这样做能较好地体现工程需要,如在统计中不再划分为风浪或涌浪两大部分,因为对于工程系统的响应计算,诸如船舶运动或波浪载荷,一般难以区分是由风浪还是涌浪诱导产生的,只能依照系统的频率响应特性和外界波作用的海浪谱计算各种频率成分的组成波所诱导产生的运动或波力分量而后合成之。

根据我国的实际情况和中国船舶科学研究中心(以下简称本中心)所承担的使命,在上级领导和国内外海洋、气象部门支持下,由本中心组织笔者和有关同志进行了西北太平洋海域风和浪要素统计的研究探索。研究认为,在现阶段采用波候综合模式并结合本海域浮标站的器测波浪数据统计处理多年的船舶报资料是一种有效途径。本书的各统计表正是在这种背景和实践产生的,力图及有关工程设计、研究人员解决其迫切所需的、切合我国实际的、比较可靠、实用的波浪长期统计资料。

另一方面,在船舶和海洋工程有关设计研究中,正确运用和吸纳海浪研究成果,无论是过去还是现在都证明是必要的。但由于原始文献分散,寻找和阅读费时,工程设计人员很希望把有关海浪研究中与工程有关的概念和结果集中地予以介绍。为此,笔者曾参与编写手册,举办过讲座。在原有讲义基础上,结合近年来国内外研究进展和应用实践,也包括笔者的一些工作,在本书作一综述,以便为船舶和海洋工程设计研究人员提供一份有关海浪应用计算的手册性资料。但限于本书篇幅,有的进展结果未能

详细写出,只是说明其原始文献出处,以供查考。

本书的编著工作主要由方钟圣负责承担;金承仪和缪泉明分工承担原始资料的搜集、整理,模式中程序的研制和数据的计算工作。原课题人员戴顺孙和黄树梅在前期也做了很多工作。

在从事海浪与风的统计研究和本书的编著出版过程中得到本中心和国内外多方面的支持与帮助。

本中心的前任所长顾懋祥院士倡议、发起这一研究计划,在上级支持下落实了前期研究经费,他多方联系国内外友人协助解决研究所需的关键资料;现任所长吴有生院士继续促进此项研究,并为本书作序;刘楚学副总工程师在组织落实计划中,尤其是在促进形成本书过程中给予详细指导和帮助,对于本书的初稿提出了许多中肯的意见;何承渊副总工程师和董世汤顾问与徐信度、刘志容、邵晓立、刘森、李润田、李定高级工程师以及中国国际海洋石油工程公司的肖淑先处长等在协助搜集资料与促进出版中给予了各种帮助。

青岛海洋大学的文圣常院士始终关心这一工作,指导、促进我们工作的发展;海洋大学的汪炳祥、张大错教授和国家海洋局南海分局陈奇礼研究员以及上海气象局秦曾灏研究员各自提供了许多研究成果,供我们借鉴;南京空军气象学院(王勉照、刘训美主任等)、青岛海洋大学、南京气象

学院和国家海洋局有关部门提供了有关资料;上海科技情报所葛如琛高级工程师为解读、整理有关资料和江南造船厂计算中心郑南生高级工程师等为数据处理提供了帮助。

英国海事技术公司的霍格本博士曾在笔者访英期间给予指导性合作,详细介绍他在发展波候综合模式中的经验,在此期间和以后提供了许多资料;日本船舶技术研究所前任副所长高石敬史博士积极为我们联系日本气象厅,由后者提供了不少资料;香港天文台和日本气象协会提供了船舶报资料。

国防科技图书出版基金评审委员会资助本书出版,解决了资金问题的严重困难;国防工业出版社为保证本书的出版质量作出了很大的努力。

感谢中国舰船研究院科技委尤子平主任关心支持本书的出版,并为本书题写书名。

限于笔者的水平和条件,作为抛砖引玉的本书,其中不当或错漏之处在所难免,热诚希望有关专家、同仁和读者批评指正。

方钟圣

1995年10月

内 容 简 介

本书提供西北太平洋各海域波浪要素(波高、周期和波向)的长期统计数据,按照地理位置(区块)、季节和波向的不同,以相应的有效波高与平均跨零周期的联合概率分布表的形式给出。

这些数据是基于对长达30年约760万条的船舶报资料经过专门研制的波候综合模式统计处理的结果。该模式原在英国提出及使用,本书作者曾参与研制,后又有改进,其间分析了分布在世界各地的仪器测量的风和浪长期统计资料,特别是利用了 in 西北太平洋的日本浮标站器测资料约10万条。此外,书中专列一章综述海洋波浪统计研究的进展和应用情况,以便有关工程人员查考、使用。

本书实用性强,编撰紧致,可供从事船舶和海洋工程等的研究、设计人员、航海作业的指导人员使用,以及有关高等院校师生参考。

ISBN 7-118-01593-8/P·6

定价:48.00元

目 录

绪 论	(1)
-----------	-----

第一篇 海浪研究进展和西北太平洋波浪要素的统计方法

第一章 海浪研究进展及其在船舶和海洋工程中的应用	(3)
§ 1-1-1 耐波性研究与海浪	(3)
§ 1-1-2 海浪的随机线性模式	(4)
§ 1-1-3 海浪要素的短期统计特性	(7)
§ 1-1-4 海浪谱的表达式	(13)
§ 1-1-5 海浪要素的长期分布	(16)
§ 1-1-6 极值海浪要素的推算	(19)
§ 1-1-7 海浪理论与资料在船舶和海洋工程中应用示例	(22)

第二章 西北太平洋波浪要素的统计方法	(28)
§ 1-2-1 现有波浪资料来源综述	(28)
§ 1-2-2 原始资料 and 统计方法——波候综合模式	(31)
§ 1-2-3 统计方法与结果的检验和评述	(35)

第二篇 西北太平洋各区块波浪要素统计表及使用说明

第一章 波浪统计表集的使用说明	(43)
§ 2-1-1 表集的内容与编排	(43)
§ 2-1-2 表集的使用算例	(47)
第二章 西北太平洋波浪要素统计表集	(48~448)
附录 A 波候综合模式的依据和参数确定	(449)
参考文献	(457)

绪 论

海洋波浪可对船舶等海上结构物施加很大作用力,导致其性能变差、人员疲劳、效率降低,甚至发生海损事故。其他环境因素,例如风和流量也有不小的影响,但在设计船舶和海洋平台等时,波力往往是主要的。

海浪是一种海面波动现象,按其发生、发展的不同原因,主要可分为风浪、涌浪和近岸浪三种。风浪是由当地的风直接吹刮起来的浪;涌浪或者是因当地风力或风向改变遗留下来的浪或者是由其他海区传播至本海区的浪。这二种浪或二种不同方向的涌浪可以并存于同一海区,称之为混合浪,在实际海洋中经常是这种情况。

海洋波动属于流体力学中的一个分支,如同其他的科学分支一样,人们对于海浪的认识是不断地通过实际观测和理论相比较、作修正而发展起来的。但是由于海浪生成环境与现象的复杂性,观测困难,花费巨大。对于它的许多特性常只能用统计的术语来描述,要检验它需要作长期与系列的测量和分析。在40年代,为了预报和描述海浪,曾提出有效波的概念和理论,所谓有效波是指可观察到的海面上有较完好形状的著目波,这显然是一种定性描述。在50年代,提出了把海面瞬时波动视为随机平稳的正态过程的理论,它与从船舷测波仪和其他测波仪测量的结果基本符合,其精度对许多应用者来说已能满足要求。这种统计处理方法一方面用各组成波的能量谱(海浪谱)表示其内在结构;同时也衍生出十分有用的对海情的参数化表达,特别是导出了与上述有效波概念相关的有效波高 H 和平均跨零周期 T 。这两个重要的海情参数的数学定义。然而该理论仅适用于所谓短期的情况,即在大约几小时内海面是统计平稳的、有效波高 H 为常数的情形。即使这样,该理论的发展还有一定的困难。例如,除非有进一步的假定,对于单个波高与周期的联合分布,还缺乏公认有效的简

单结果;同时该理论意味着没有非线性效应,因此波峰和波谷值在理论上具有相同的分布。然而对于一些工程设计来说,特别是计算极值波的波力,非线性效应必须计及。当前的一般处理方法是先按随机统计模式推断出极值波的要素值(波高、周期与波长等),然后应用各种非线性水波理论计算波动中水质点的速度和加速度等等。当船舶等的动力响应如也认为是线性时,则可由海浪谱乘以传递函数得到动力响应谱以及确定相应的统计参数。

进一步当需知波浪长期(波候)统计时,例如要求全年的有效波高的分布,目前还没有一个一般的理论可以遵循,只有根据对实测资料的分析、综合而归纳出来的一些经验公式,常见的是对数正态分布和威布尔(Weibull)分布,其中的分布参数是随海域等变化而异的。很明显,一年中各波高值的变化不是平稳的,其变异大多数源于季节性的差别。同样还可能年与年间的变化,但是现有的资料期限较短,对于后一问题的研究尚不成熟,因此目前在作极值波要素等推断时一般均假定无年间的变化。极值波要素推断的方法虽有多种,分别基于不同的长期统计的资料,主要则有基于年或月最大值系列的方法和基于非最大值要素的长期分布的两大类推算方法。这些都需要有长期积累的统计资料作为推断分析的基础。

在工程上常以上述极值波要素,如取50年或100年一遇的设计波来计算海上结构物的极限波浪荷载;另一种情形是需要确定船舶等在波浪作用下的动响应的长期统计特性(例如作结构的疲劳分析时须知其波浪诱导应力的长期发生次数),此时常先求出船舶的动响应在各种波浪要素下的短期统计特性,然后以这些波浪要素的长期概率分布作为加权函数进行累积统计。再如从耐波性要求研究船舶在某一海域的作业率时预计

算在作业界限线以下部分的波浪要素的长期联合概率。这是波浪长期统计资料在工程应用中的两个方面。

以上很简单地介绍了海浪的基本概念和工程应用。对于海浪理论与计算原理,文献[1]有系统全面的论述;文献[2]、[3]包含了许多较新的结果;对于海洋风、浪、流环境与海浪长期统计方面的综述可见文献[4]及[2]中的第8章。至于如何计算船舶等在波浪中的响应可见文献[5]~[7]。本书则主要提供有关海域的波浪长期统计资料。

本书包含了西北太平洋内各海域波浪要素的长期统计数据,即波高、周期和波向各要素单独的或联合出现的概率分布,主要是为从事船舶、海洋平台或其他海上工程的设计、研究人员提供比较可靠、实用的环境波浪资料,也可有关海上作业的规划人员和其他方面读者所用。

书中把西北太平洋与相邻海域(简称本洋区)划分为80个区块(见图2-1-1),对每个区块分别按春、夏、秋、冬4个季节和全年作出统计,每一季节的统计结果安排在一页内的9个表中,每个表给出一种波向下的波高与周期的联合概率分布。各个区块的经纬度范围与统计表的页次见表2-1-1。这些统计表是在对分布在本洋区的长达30年(1961~1990年)的760万条船舶报的风和浪资料经过专门研究的波候综合模式的统计处理后的结果,并经本海域的浮标站器测波浪长期统计数据的检验,因此其可靠性高于以往出版的仅以船舶报资料直接统计整编的图册的结果,特别是关于波周期的统计值。如后面所述,若对船舶报的波周期观测值作直接

统计,在开阔海区情况下,则其平均值偏小而标准差偏大。通过波候综合模式的处理可克服这一弊端。

为了使从事有关工程的人员能更好地把海浪研究的现有成果和本书的统计数据应用到设计、研究的实践中去,本书分两篇引入相关的内容。第一篇(共二章)阐述有关海浪理论和统计方法,其中:第一章集中地介绍有关海浪研究的进展及工程应用,包括海浪要素短期与长期的分布模式和统计特征、海浪谱的表达式和极值推算等内容,以及它们在预报船舶和海洋平台性能时的应用示例;第二章扼要阐述采用波候综合模式对搜集得到的本洋区的船舶报风和浪资料统计处理的各个步骤,以及对所获得的波要素统计数据有效性的检验与评述。第二篇给出了西北太平洋80个区块的波浪要素全部统计结果表,包括这些表的使用说明。书末的附录A是对本书采用的波候综合模式的依据及模式中有关参数确定方法的论述。

鉴于工程应用的考虑,对波高的统计,我们不再分别给出风浪高和涌浪高的结果,而采用总的合成结果,即以混合浪的波高作为统计的对象,但其数值已变换处理成相应于器测的有效波高。类似地,关于周期的统计是以相应于器测的平均跨零周期作为统计的要素,因它和已发表的大多数的器测波浪站资料中的周期定义相一致,便于各结果之间可直接参比。

第一篇 海浪研究进展和西北太平洋 波浪要素的统计方法

第一章 海浪研究进展及其在船舶和海洋工程中的应用

§ 1-1-1 耐波性研究与海浪

船舶等海洋结构物在海洋风、浪中的运动性能及相应的现象通称为其耐波性,它历来是船舶等工程的设计 and 使用者关心的问题。由于问题复杂,长期以来仅在有限的条件下进行讨论和研究。50年代以前,限于当时的研究水平,把海浪视为规则的波列,即按有效波的处理;而对船舶本身特性的估计则大多采用简化了的经典力学和工程近似相结合的方法,这就是以某种等效的规则波代替实际海浪作用下计算船舶响应的确定性方法。由于这种替代的真实性差,所得到的运动等响应结果一般是较粗略的或偏于保守的。50年代以后,随着概率统计方法在电信工程和海浪研究中的成功运用^[8,9],海浪随机模式的有效性不断得到证实,丹尼斯(Denis)和皮尔逊(Pierson)^[10]紧接着提出:船舶在海浪中的运动应按照随机海浪力输入作用下经过船舶系统的传递所产生的随机响应输出来确定。这一革新的大量实践,连同计算机和计算力学的飞跃发展使之对系统本身响应特性的许多复杂计算成为可能,再加上耐波性模拟水池实验技术的不断进步使耐波性这门学科起了质的变化。目前它能够对船舶在海上的动力响应作出短期和长期的预报,并进一步发展了船舶耐波性综合评价

和船型耐波性设计的优化方法,成为在船舶设计及营运计划中不可缺少的手段。

另一方面,为了近海石油开发的需要,从40年代开始建造了各种海洋平台,它毋需考虑快速性要求,但对它的耐波性要求却十分突出。这是由于平台结构大多数都是固定在海上长期工作,无法避开海上恶劣的风浪等的侵扰,因此它的设计必须考虑到海上可能发生的最恶劣情况,从而对当地海洋风和浪等环境条件的确定提出更进一步要求:除了常规工作条件的环境数据外,还需要极端海情的风、浪要素的数据。这反过来促进对风和浪研究的深入开展,例如:在平台上实测风和浪,为风速谱、风速和波浪要素的分布积累了不少资料;风浪后报技术研究和实施构成了新的一种资料来源;对波群以及波面包络的研究等等。

从确定性方法到随机统计处理法的发展过程说明,耐波性学科的发展和其实际应用离不开海浪研究的进展,包括须有可靠的海浪统计资料作为系统计算的基本输入;同时也表明,船舶和海洋工程是海浪理论研究的重要应用领域,是推动海浪研究的一种原动力,两者有互相促进作用。标志着这一情况的事例有:国际船舶与海洋工程结构会议专门设立了环境条件委员会,每三年汇总报告有关的海洋环境研究的进展情况,许多海洋学家和耐波性专家曾先后汇聚在该委员会内合作共事;再如美国海军

组织实施的“北半球风、浪后报计划”原是在一次舰船耐波性专题讨论会上提出来的,这一计划的参加者除海洋、气象专家外,也包括了耐波性专家和船舶性能研究单位。图 1-1-1 所示为耐波性预报计算的一般性框图。

在预报基础上建立起来的船舶耐波性优化设计的优劣和海洋平台的使用效率与其造价的平衡抉择均在相当程度上依赖于所使用的环境资料的可靠性。

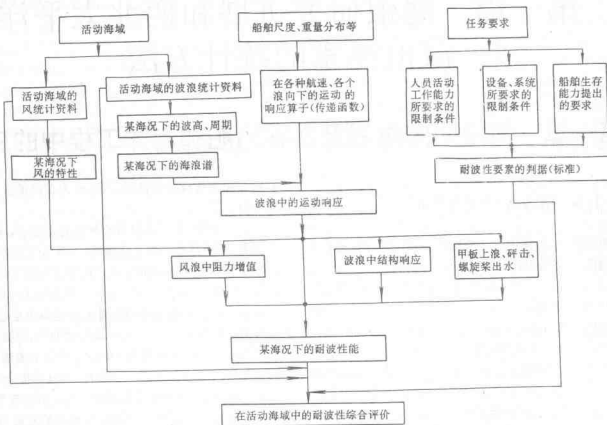


图 1-1-1 根据活动海域及任务要求预报船舶耐波性的方法框图

为了在船舶等海洋结构物的有关性能的研究和计算中能更好地掌握有关波浪环境条件,本章其余各节将对有关海浪表示模式、波高与周期统计特性、海浪谱式以及极值波要素推算等研究进展情况作一扼要述评,还将给出这些研究结果在船舶和海洋平台设计计算中的应用示例。

§ 1-1-2 海浪的随机线性模式

随机性是海浪的重要特性。海浪理论应用于船舶和海洋工程设计时

要求把海浪的随机特性和有关的工程实践结合起来。当前经常采用的是随机线性模式,即假定多个波系可以叠加而不引起互相干扰,至于非线性随机波理论可参见文献[1]~[3]中的有关章节。

一、随机波面表示式、方向谱和频率谱

在一般情况下,常把海浪视为无限多个频率不等、方向不同、振幅变化而相位杂乱的微幅简谐波(通称组成波)叠加而成的不规则波系。

对于在空间 (x, y) 处、时间 t 时的波面位移 ζ 可以表达为

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_{ij} \cos[k_i(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_i t + \epsilon_{ij}] \quad (1-1-1)$$

式中 a_{ij} ——组成波的振幅;

k_i ——组成波的波数;

θ_j ——组成波的传播方向,即波向;

ω_i ——组成波的频率,它与波数 k_i 存在色散关系:

$$\omega_i^2 = g k_i \times \text{th}(k_i d) \quad (1-1-2)$$

其中 d 代表水深, g 为重力加速度;

ϵ_{ij} ——组成波的初始相位角。

假定各组成波振幅微小,而其相位随机地在区间 $[-\pi, \pi]$ 内均匀分布并且相互随机独立,根据概率论可以证明:上述波面位移 ζ 服从均值为零的正态分布,而全体 $\{\zeta(x, y, t)\}$ 构成一个正态过程,并具有平稳性,即其统计特性不随时间的推移而改变。此外,一般还假定这一过程具有各态历经性,即过程 $\{\zeta(x, y, t)\}$ 的统计特性可从它的一个“现实” $\zeta(x, y, t)$ 得到反映,或者说,过程的总体平均等于它的一个现实的依时间或依空间的平均。

在实践中,这种正态又平稳的特性已为分析许多实测海浪记录所证实。可以认为,在短时间内通常的海面风场以及由风生成的浪的统计特性是不会改变的(平稳性);由一个测波仪测得的波浪记录的统计特性等同于在同样条件下安设于该海域的许多测波仪所测得的全部记录的统计特性(各态历经性)。

在数学上,一个平稳过程可用谱密度表示其统计特性,而上述海面位移过程的谱密度恰与组成波的振幅平方成正比。从物理上看,各组成波在单位面积海域上提供的平均能量是与其振幅的平方成正比的,故这种谱

密度可称为能量谱密度或方差谱密度,并定义谱密度 $S(\omega, \theta)$ 为

$$S(\omega, \theta) \Delta \omega \Delta \theta = \sum_{\substack{\omega_i < \omega + \Delta \omega \\ \theta_j < \theta + \Delta \theta}} \frac{1}{2} a_{ij}^2 \quad (1-1-3)$$

反过来,则可把 a_{ij} 与 $\zeta(x, y, t)$ 记为

$$a_{ij} = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) \Delta \omega_i \Delta \theta_j} \quad (1-1-4)$$

$$\zeta(x, y, t) = \sum_i \sum_j \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) \Delta \omega_i \Delta \theta_j} \cdot \cos[k_i(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_i t + \epsilon_{ij}] \quad (1-1-5)$$

上述波面表达式对应于风向是在一个范围内变动时所生成的海浪,各组成波来自不同的方向,其波峰线甚短,故称为短峰不规则波或短峰(海)浪,它的谱 $S(\omega, \theta)$ 通常称为方向谱。

对于风向保持不变的风场所生成的海浪或由远处水域传播过来的单向涌浪,各组成波来自同一方向,具有所谓长峰性(通常是指波峰线长度大于3倍波长的情形),此时称为长峰不规则波或长峰海浪,其波面表式可简化为

$$\zeta(x, t) = \sum_i \sqrt{2S(\omega_i) \Delta \omega_i} \cos[k_i x - \omega_i t + \epsilon_i] \quad (1-1-6)$$

其中 x 轴为波浪传播方向,此时海浪能谱 $S(\omega)$ 只依赖于频率,故也简称为频率谱或频谱,但它与一般的电信号中的频谱含义不同,后者定义为信号本身的傅氏变换。

无论是短峰或长峰海浪,在一个固定地点的测波仪记录下来的波形即定点海浪总可表示为

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= \sum_i a_i \cos(\omega_i t + \epsilon_i) \\ &= \sum_i \sqrt{2S(\omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \epsilon_i) \end{aligned} \quad (1-1-7)$$

它的能谱 $S(\omega)$ 总是频率谱,后者与短峰海浪的方向谱 $S(\omega, \theta)$ 有关系式:

$$S(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) d\theta \quad (1-1-8)$$

频率谱的求取可通过对定点海浪的实测记录作谱分析得到,而方向谱的获取则远为复杂。在谱获得后即可求取谱矩,常用的是频率谱 $S(\omega)$

的 n 阶矩 m_n , 其定义为

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (n \text{ 为整数}) \quad (1-1-9)$$

特别当 $n = 0$ 时, 有

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \sum_i \frac{1}{2} a_i^2 = [\overline{\xi(t)^2}] = \sigma^2 \quad (1-1-10)$$

即海浪在单位面积上的平均能量正比于海面瞬时位移的均方差(方差)。公式(1-1-10)中的 $[\overline{\xi(t)^2}]$ 表示变量 $[\xi(t)]^2$ 的统计平均值, 以下总是用上横杠符号“—”表示某变量的统计平均值。

此外, 依平稳过程理论(或直接通过对波面 $\xi(t)$ 表示式(1-1-7)的运算), 频率谱 $S(\omega)$ 与波面位移的自协方差函数 $C(\tau)$ 之间有以下傅氏变换关系存在:

$$C(\tau) = \overline{\xi(t)\xi(t+\tau)} = \int_0^{\infty} S(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad (1-1-11)$$

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} C(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (1-1-12)$$

求取频率谱的布莱克曼(Blackman)和图基(Tukey)的方法^[12]正是基于上述公式的演变结果。

如上所述, 在固定点波面位移 $\xi(t)$ 服从正态分布, 其概率密度函数为

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0}} \exp\left\{-\frac{\xi^2}{2m_0}\right\} \quad (1-1-13)$$

而任意 n 个时刻或地点的波面位移则服从 n 维正态分布。以上这些重要性常会用到, 例如可导出下段中的诸结果。

二、海浪中水质点的速度、加速度和海面斜率的随机表示式与它们的谱式

由于上述海浪模式是随机独立的各组成波线性叠加结果, 故可以利用其基本表示式和线性的微幅波理论导出海浪中水质点的速度、加速度和海面斜率等的随机表示式与它们的谱式(上述物理量仍具有平稳正态性质), 结果如下。

1. 短峰海浪情形

设用 $V(u, v, w)$, $\dot{V}(\dot{u}, \dot{v}, \dot{w})$ 分别表示海浪中水质点的速度和加速

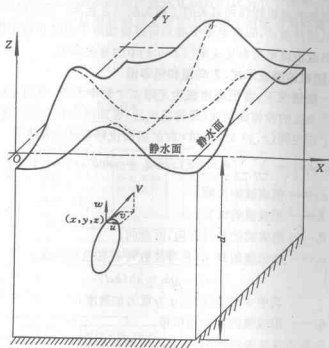


图 1-1-2 海浪中水质点速度与坐标系示意

度(见图 1-1-2), 令

$$a_{ij} = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) \Delta \omega_i \Delta \theta_j} \quad (1-1-14)$$

$$T_i(z) = \frac{\omega_i \operatorname{ch}[k_i(z+d)]}{\operatorname{sh}(k_i d)} \quad ([T_i(z)]_{z=-\infty} = \omega_i e^{k_i z}) \quad (1-1-15)$$

$$\phi_{ij}(x, y, t) = k_i(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_i t + \epsilon_{ij} \quad (1-1-16)$$

则速度分量 u 的随机表示式为

$$u(x, y, z, t) = \sum_i \sum_j a_{ij} \{T_i(z) \cos \theta_j\} \cos[\phi_{ij}(x, y, t)] \quad (1-1-17)$$

而它的方向谱 S_u 与波面方向谱 S 有以下关系:

$$S_u(\omega_i, \theta_j) = S(\omega_i, \theta_j) \{T_i(z) \cos \theta_j\}^2 \quad (1-1-18)$$

即是在原先波面方向谱基础上乘以 u 的随机表示式中的带花括号的部分的平方, 以下各分量的谱式也有同样的关系存在, 故不再列出各谱式。

$$v(x, y, z, t) = \sum_i \sum_j a_{ij} \{T_i(z) \sin \theta_j\} \cos[\phi_{ij}(x, y, t)] \quad (1-1-19)$$

$$w(x, y, z, t) = \sum_i \sum_j a_{ij} \{T_i(z) \operatorname{th}[k_i(z+d)]\} \cdot \sin[\phi_{ij}(x, y, t)] \quad (1-1-20)$$

$$\dot{u}(x, y, z, t) \approx \sum_i \sum_j a_{ij} \{\omega_i T_i(z) \cos \theta_j\} \sin[\phi_{ij}(x, y, t)] \quad (1-1-21)$$

$$\dot{v}(x, y, z, t) \approx \sum_i \sum_j a_{ij} \{\omega_i T_i(z) \sin \theta_j\} \sin[\phi_{ij}(x, y, t)] \quad (1-1-22)$$

$$\dot{w}(x, y, z, t) \approx \sum_i \sum_j a_{ij} \{-\omega_i T_i(z) \operatorname{th}[k_i(z+d)]\} \cdot \cos[\phi_{ij}(x, y, t)] \quad (1-1-23)$$

以下用 (ζ'_x, ζ'_y) 表示波面在 x 和 y 方向的斜率,则

$$\zeta'_x(x, y, t) = \sum_i \sum_j a_{ij} \{-k_i \cos \theta_j\} \sin[\phi_{ij}(x, y, t)] \quad (1-1-24)$$

$$\zeta'_y(x, y, t) = \sum_i \sum_j a_{ij} \{-k_i \sin \theta_j\} \sin[\phi_{ij}(x, y, t)] \quad (1-1-25)$$

2. 长峰海浪情形

设海浪沿 x 轴方向传播,此时海浪中水质点速度和加速度分别为

$V(u, 0, w)$ 和 $\dot{V}(\dot{u}, 0, \dot{w})$;波面斜率为 $(\zeta'_x, 0)$,令

$$a_i = \sqrt{2S(\omega_i) \Delta \omega_i} \quad (1-1-26)$$

$$T_i(z) = \frac{\omega_i \operatorname{ch}[k_i(z+d)]}{\operatorname{sh}(k_i d)} \quad (1-1-27)$$

$$\phi_i(x, t) = k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i \quad (1-1-28)$$

上述各分量的随机表示式见下列各式,而其频率谱则为波面频率谱乘以各式中的带花括号的部分的平方。

$$u(x, y, z, t) = \sum_i a_i \{T_i(z)\} \cos[\phi_i(x, t)] \quad (1-1-29)$$

$$w(x, y, z, t) = \sum_i a_i \{T_i(z) \operatorname{th}[k_i(z+d)]\} \sin[\phi_i(x, t)] \quad (1-1-30)$$

$$\dot{u}(x, y, z, t) \approx \sum_i a_i \{\omega_i T_i(z)\} \sin[\phi_i(x, t)] \quad (1-1-31)$$

$$\dot{w}(x, y, z, t) \approx \sum_i a_i \{-\omega_i T_i(z) \operatorname{th}[k_i(z+d)]\}$$

$$\cdot \cos[\phi_i(x, t)] \quad (1-1-32)$$

$$\zeta'_x(x, y, t) = \sum_i a_i \{-k_i\} \sin[\phi_i(x, t)] \quad (1-1-33)$$

§ 1-1-3 海浪要素的短期统计特性

对于一个定点的海浪记录(见图 1-1-3),其波面线与平均零线的交点,称为零交点,其中波面线是上升时的交点称为上跨零点,反之称下跨零点。两个相邻上跨零点之间的时间间隔称为上跨零周期 T_z 。在一个上跨零周期内的最高波峰点与最低波谷点之间的垂直距离称为(上跨零)波高,如图 1-1-3 中的 H_z 。除跨零波高和跨零周期外,还有把波峰点与相邻的波谷点间的垂直距离称为峰谷波高 H_i ;把相邻峰点的时间间隔定义为波峰周期 T_e 。以下如无声明,对波高取跨零波高的含义。

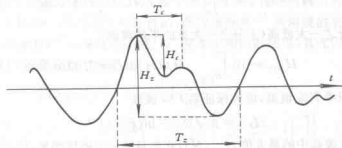


图 1-1-3 海浪波高与周期的两种定义

把记录中各个波高值记录下来进行统计分析即可得到波高的概率分布及其统计值,同样可得到周期的统计特性,这是对实测记录的时域分析结果;另一方面,基于上述关于海浪是平稳正态随机过程的描述和进一步假定,可求得波要素的统计特征公式,这些公式中包含了频率谱的谱矩等参数,故可通过对记录的频率谱分析求得有关结果(频域分析值)。下面着重讨论后者。

一、波高的概率分布与统计值

朗桂-希金斯(Longuet-Higgins)^[13]基于海浪谱是窄带谱的假定和对一些实测记录的分析,求得波高的概率分布是雷利(Rayleigh)分布,而波