



高等学校统编教材

舰船耐波性基础

彭英声 编

国防工业出版社

国防工业出版社

1981年1月

（北京）



U66/1.32

251

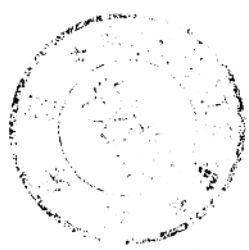
458361

舰船耐波性基础

彭英声 编



00458361



国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地阐明了舰船耐波性的基础理论和基本计算方法。内容包括：海浪、单自由度线性振荡、非线性横摇、减摇装置、耐波性船模试验、垂荡和纵摇的耦合运动、动力效应和耐波性在舰船设计论证中运用等八章。书中，既重视理论的完整性，又没有追求数学的繁琐证明，理论联系实际，重要内容都附有例题，便于学习，也便于应用。因此，本书可作为高等院校船舶设计与制造专业的教材，也可供从事舰船论证、检验及设计研究人员参考。

0245/01

舰船耐波性基础

彭英声 编

国防工业出版社出版

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张12¹/₂ 280千字

1989年5月第一版 1989年5月第一次印刷 印数：0,001—2,280册

ISBN 7-118-00475-8/U·46 定价：2.55元

出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

舰船主要航行战斗在海上。海洋的显著特点是其经常的、不规则的波动性。波动的海浪将使舰船产生摇荡运动；在汹涌中，剧烈的摇荡运动及与其相联系的一系列后果，将严重地妨碍舰船的航行和战斗，甚至危及舰船的安全。因此，舰船必须具备在尽可能高的海情中保持其完成基本任务的能力，这就是耐波性的一般含义。过去长时间里，传统的舰船设计是以静水航行性能为主要依据。如今，由于耐波性学科的迅速发展和电子计算机技术的普遍应用，在舰船设计论证中已日益重视耐波性能的要求，具体的方法，也在实践中不断发展和提高。

舰船耐波性是一门理论性比较强的和综合性的应用学科，近30年来发展很快，资料很多，“舰船耐波性基础”，顾名思义，在编写中力求阐明耐波性学科中的基本的或基础的理论和计算方法；比较深入的有关理论和专门性问题，可以和需要在此基础上作进一步的学习和掌握。因此，本书可作为高等院校船舶设计与制造专业的教材，也可供舰船设计论证和检验以及设计研究人员参考。

编写专业教科书，既要按照教学大纲的要求，又要尊重教学的认识规律，还必须面向学科的发展水平，处理好这三者的关系是一个颇费思考的问题。借此作如下几点说明，可能对读者是有益的。

概率论中的平稳随机过程，是学习耐波性不可缺少的前置课程，如果未具备这方面知识，则应有充分时间先学习这部分内容。本书附录一（平稳随机过程）和第一章（海浪）组成了本书的理论基础。

第二章以横摇为主阐述了单自由度线性摇荡运动，其后是非线性横摇（第三章）、减摇（第四章）和模型试验（第五章），用了较多的篇幅讨论横摇问题，其意图是：（1）线性横摇问题比较容易理解，以它为入门来阐述一些耐波性的基本概念、理论和方法是有利的；（2）横摇是耐波性中重要的特征量之一，舰船设计和使用中首先要碰到，必须认真对待；（3）通过这一系列讨论才可以有根据地得出这样的观点：横摇能通过减摇装置来有效控制，在舰船总体设计论证中，可把它当作独立问题来考虑。这将给方案选择带来很大方便。

50年代以来迅速发展起来的切片理论，已成为耐波性的基本理论之一，并已在实践中成功应用。第六、七两章以其中的普通切片法为基础，讨论了垂荡和纵摇的耦合运动及与其相联系的动力效应，更具理论性的内容只能割爱。这是必要的，也是适宜的。

如何把耐波性要求运用于舰船设计论证中还是一个发展中的课题。第八章所介绍的观点、标准和方法，是各学者在具体实践中提出来的，可根据不同情况选择应用。并望在实践中认真总结经验，通过共同努力，求得不断完善。

耐波性学科的迅速发展，重要原因之一要归功于电子计算机技术的应用。因此，学习耐波性和学习电子计算机技术的关系十分密切。附录二——横摇运动计算程序——就是为这个目的而编制的。附录三——简易纵向运动计算程序——则不作为教学内容，但它与第八章相配合，提供了初期舰船设计论证阶段近似预估舰船耐波性的手段，可供

参考。

本书的编写，基本上以笔者的讲稿为线索，参阅了有关教科书和参考文献，得到许多同志的关怀和支持。徐德嘉和王长沛同志曾给予大力帮助，上海交通大学陶尧森同志为本书的主审，他认真审阅了书稿，提出了宝贵意见，不胜铭谢。但由于笔者学识不广，实践经验少，对书中存在的缺点错误，敬请读者不吝赐教。

编 者

于海军工程学院

目 录

第一章 海浪	1
1.1 平面进行波	1
1.2 不规则波及其能谱密度	4
1.2.1 波高的试验统计平均值	4
1.2.2 浪级	5
1.2.3 海浪表达式	6
1.2.4 波能谱密度(方差谱密度)	9
1.2.5 海浪谱公式	11
1.3 波幅(或波高)的统计平均值	20
1.3.1 波升直方图和高斯分布	20
1.3.2 波幅直方图和雷利分布	21
1.3.3 雷利分布和波幅统计平均值	23
1.4 海浪预报	25
第二章 单自由度线性振荡	28
2.1 船在静水中横摇	29
2.1.1 静水无阻横摇	29
2.1.2 静水有阻横摇	32
2.2 船在规则横浪中线性横摇	36
2.2.1 波浪的扰动力矩	37
2.2.2 强迫横摇运动	38
2.2.3 影响摇幅的主要因素	40
2.2.4 响应幅值算子(RAO)	42
2.3 船在规则斜浪中线性横摇	43
2.3.1 遭遇频率	43
2.3.2 扰动力矩幅	44
2.3.3 斜浪横摇近似解	45
2.4 船在不规则波中线性横摇	47
2.4.1 横摇谱密度	47
2.4.2 线性横摇预报	49
2.5 舰船在波浪中垂荡和纵摇	51
2.5.1 扰动力和力矩	51
2.5.2 船在规则波中(顶浪)垂荡	53
2.5.3 船在规则波中(顶浪)纵摇	54
2.5.4 惯性力(矩)系数和阻尼系数的确定	56
2.6 垂荡和纵摇预报	60
第三章 非线性横摇	62
3.1 非线性阻尼-线性恢复力矩	63
3.1.1 非线性阻尼的等效线性化	63
3.1.2 等效线性化阻尼系数的确定	65
3.1.3 非线性横摇的线性化解	67
3.2 线性阻尼-非线性恢复力矩	70
3.2.1 恢复力矩线性化	70
3.2.2 固有频率曲线	71
3.2.3 幅频曲线	72
3.3 舰船在不规则波中非线性横摇	73
3.4 非线性横摇预报	77
第四章 减摇装置	78
4.1 舳龙骨	78
4.2 减摇鳍	79
4.2.1 减摇原理	80
4.2.2 控制系数	83
4.2.3 减摇效果	86
4.2.4 例	87
4.3 被动式减摇水舱	88
4.3.1 水舱减摇的基本原理	89
4.3.2 U形被动式减摇水舱	90

4.3.3 槽形减摇水舱	92	8.3 莫尔公式	136
第五章 耐波性船模试验	93	8.4 限制航速图	139
5.1 基本试验设备	93	8.5 轻型舰船的耐波性品级	141
5.2 相似准则和船模准备	95	8.6 优选船型	146
5.3 横摇阻尼系数和附加质量惯性矩的试验测定	98	附录	149
5.3.1 自由横摇试验	98	附录一 平稳随机过程	149
5.3.2 激振横摇试验	101	A1.1 随机过程	149
5.4 波浪中垂荡和纵摇运动试验	103	A1.2 随机过程的数字特征	150
5.4.1 垂荡和纵摇运动试验	103	A1.2.1 随机过程的数学期望 (均值)	150
5.4.2 阻力增值试验	105	A1.2.2 随机过程的方差	150
5.4.3 池壁效应	106	A1.2.3 随机过程的相关函数	151
5.5 尺度效应	107	A1.3 平稳随机过程	153
第六章 垂荡和纵摇的耦合运动	108	A1.3.1 定义和数字特征	154
6.1 规则波中垂荡和纵摇	108	A1.3.2 具有各态历经性的平稳随机过程	154
6.2 影响规则波中垂荡和纵摇耦合运动的主要因素	116	A1.3.3 相关函数的性质	157
6.3 预报垂荡和纵摇的耦合运动	119	A1.3.4 相关函数的近似计算	158
第七章 动力效应	121	A1.3.5 两平稳随机过程的互相关函数	158
7.1 切片的垂向运动	121	A1.4 平稳过程的谱密度	159
7.1.1 切片的绝对垂向加速度	121	A1.4.1 富里埃变换	159
7.1.2 切片的垂向相对运动和相对速度	123	A1.4.2 平稳过程的谱密度函数	161
7.2 甲板上浪	124	A1.4.3 方差谱密度的特性	164
7.3 首底砰击	126	A1.4.4 谱密度函数的近似计算	165
7.4 增阻和失速	128	A1.5 线性系统对平稳过程的响应	165
7.4.1 规则波中阻力增值	129	A1.5.1 线性系统	166
7.4.2 不规则波中阻力增值	130	A1.5.2 频率响应函数	167
7.4.3 失速或功率增加	132	A1.5.3 线性系统的输入和输出	168
第八章 耐波性在舰船设计论证中运用	133	A1.5.4 线性系统对随机输入的响应	169
8.1 耐波性标准	134	附录二 横摇运动计算程序	173
8.2 舰船设计参数和耐波性特征量	135	附录三 简易纵向运动计算程序	178
		参考文献	188

第一章 海 浪

据统计,海面上,在70%左右的时间内都有不同大小的波浪,这说明舰船是经常处于风浪的环境条件下航行和战斗,海浪是舰船在海上不可避免地作复杂摇荡运动的外部条件。因此在讨论舰船的摇荡运动之前,先要讨论海浪的特性。

使海面上产生海浪的原因,除日月引力引起的潮汐和地震造成的海啸外,风是形成海浪的最常见的原因之一。

大气中,由于各处气压高低不同促使空气流动而产生风。风的强弱按风速大小分成0~12级。一定速度的风(风速)吹过海面,通过复杂的作用把风能传给海水,海面逐渐形成波浪,并向外传播。若风吹过的路程(风程)足够长,连续作用于海面的时间(风时)也足够长,则海水从风接受的能量和由波浪向外传播带走的能量达到平衡时,海面就形成与该风速相应大小的波浪。所以,海浪的大小决定于风速、风程和风时三个因素,有一个发生、成长和衰亡的过程。

在风区,海浪的显著特点是它的不规则性。这是容易理解的,大气中气流的运动是极不规则的,由此而产生的波浪自然也是极不规则的随机过程,称为风浪。

风浪具有相当大的能量。风停止后或波浪传出风区后,具有较小能量的小波逐渐消失,剩下具有大能量的大波则逐渐形成比较规则的、可以用平面进行波来近似表示的涌浪。实际海上,经常还有由邻近风区传播来的涌浪与本区域生成的风浪的迭加,使海浪更形复杂,或可称为混合浪。本章将主要讨论风浪的特性。

海洋学者的研究表明不规则的海浪可由大量均匀微小的规则波迭加而成。造船学者的研究表明,舰船在不规则波中的摇荡运动,可由舰船对大量均匀微小的规则波的响应的迭加来描述。这些研究成果是讨论不规则波和舰船在不规则波中摇荡运动的基本依据。可见,理想化的简单的规则波,不仅可以近似表示涌浪,也是描述真实的不规则海浪的基础。

1.1 平面进行波

理想化的简单的规则波可用正弦型的平面进行波来表示。流体力学课程中已对微幅平面进行波作了详细的推导、证明和讨论,这里我们将不加说明地摘引有关的概念、公式和结论以备后面应用。

由基本假设:

- (1) 流体是理想不可压缩的;
- (2) 运动是无旋的,具有速度势;
- (3) 波浪是微幅波。

可求得沿坐标 ξ 轴 $\pm$ 方向传播的平面微幅进行波的波形表达式为

$$\zeta = \zeta_0 \cos(k\xi \pm \omega t) \quad (1.1)$$

波形竖坐标 ζ 是位置 ξ 和时间 t 的函数。若固定时间 t ,例如 $t=0$,则

$$\zeta = \zeta_0 \cos k\xi \quad (1.2)$$

相当于在某一时刻对波形拍照摄下的波形曲线,如图 1.1(a) 所示。若固定一点,例如 $\xi = 0$, 则

$$\zeta = \zeta_0 \cos \omega t \quad (1.3)$$

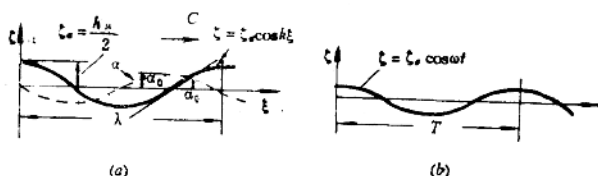


图 1.1 波形曲线

相当于浪高仪在海上定点测量的波面随时间起伏的记录曲线,如图 1.1(b) 所示。图中:

ζ —— 波面偏离静水面的高度, 或称波升;

ζ_0 —— 波幅;

$h_w = 2\zeta_0$ —— 波高;

λ —— 波长;

T —— 周期;

$k = 2\pi/\lambda$ —— 波数;

$\omega = 2\pi/T$ —— 波浪圆频率;

$C = \lambda/T$ —— 波形传播的速度, 简称波速。式 (1.1) 中 ω 前取 “-” 号, 表明波形沿 ξ 的正方向传播; 反之, 取 “+” 号。

并有关系式:

$$\begin{aligned} k &= \frac{\omega^2}{g}, \quad g \text{ 为重力加速度} \\ T &= \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \approx 0.8 \sqrt{\lambda} \\ C &= \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \approx 1.25 \sqrt{\lambda} \end{aligned} \quad (1.4)$$

ζ_0 或 h_w 理论上是小量, 但据统计有如下近似关系式:

$$h_w = 2\zeta_0 = 0.17\lambda^{3/4} \quad (\text{m}) \quad (1.5)$$

海面单位面积中的波能与波幅平方成正比, 即

$$E = \frac{1}{2} \rho g \zeta_0^2 \quad (1.6)$$

式中, ρ 为水的密度, g 为重力加速度。

式 (1.1) 对 ξ 求导数, 则

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} = -k\zeta_0 \sin(k\xi \pm \omega t) = -\alpha_0 \sin(k\xi \pm \omega t) \quad (1.7)$$

称 α 为波倾角, α_0 为最大波倾角,

$$\alpha_0 = k\zeta_0 = kh_w/2 = \pi h_w/\lambda \quad (1.8)$$

有时称 h_w/λ 为波陡。

波浪中水的波动不仅在自由表面上出现, 也出现在水中。这是因为波浪中水质点近似

围绕其静水位置作圆周运动, 但轨圆的半径随水深而迅速减少, 例如水深 $|z|$ 处的波形方程为

$$\zeta_{|z|} = \zeta_a e^{-k|z|} \cos(k\xi \pm \omega t) \quad (1.9)$$

与式 (1.1) 比较, 波幅 $\zeta_a e^{-k|z|}$ 比自由表面波幅 ζ_a 小, 如图 1.2 所示, 称式 (1.9) 描绘的波面为次波面。当 $|z|$ 很大时, 例如 $|z| = \lambda/2$, $\zeta_a e^{-k|z|} \rightarrow 0$, 该处以下水质点就基本不动了。

波面和次波面都是等压面, 即

$$p_A = p_B = p_C (= p_0, \text{大气压})$$

$$p_{A'} = p_{B'} = p_{C'}$$

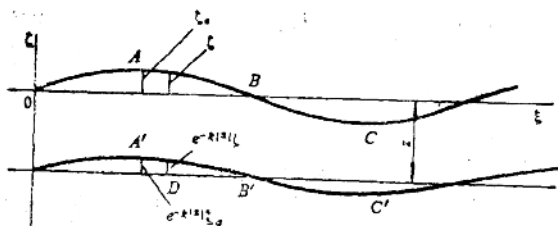


图1.2 波面和次波面

因此, 波浪中水的动压力不能应用阿基米德原理按水柱高度来度量。例如水深 $|z|$ 处 D 点的动压力:

$$(p_D)_d = p_0 + \rho g(|z| + \zeta_{|z|}) = p_0 + \rho g|z| + \rho g \zeta_a e^{-k|z|} \cos(k\xi \pm \omega t) \quad (1.10)$$

按水柱计算

$$(p_D)_{*d} = p_0 + \rho g(|z| + \zeta)$$

由此可知, 波中水压力若按水柱高度计算, 在波峰处夸大了, 在波谷处则算小了, 只有在节点处才与动压力相等。 $p_{*d} \neq p_{*n}$ 这个差别是史密斯首先指出来的, 称为“史密斯效应”。

以上讨论的是波形沿 ξ 轴传播的深水平面进行波。若水深有限, 或波形传播方向偏离坐标 ξ 轴一角度, 则有关表达式应作相应考虑, 此处从略。

例 某一深水平面进行波波长 $\lambda = 100 \text{ m}$, 试求该波浪的其他主要参数。

解 由 $\lambda = 100 \text{ m}$, 则

$$T = 0.8\sqrt{\lambda} = 8 \text{ s}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 2 \times 3.1416/100 = 0.0628 \text{ 1/m}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.28}{8} = 0.785 \text{ 1/s}$$

$$C = 1.25\sqrt{\lambda} = 12.5 \text{ m/s}$$

$$h_w = 0.17\lambda^{3/4} = 5.28 \text{ m}$$

$$\zeta_a = h_w/2 = 2.64 \text{ m}$$

$$\alpha_0 = k\zeta_a = 0.166 \text{ rad} = 9.51^\circ$$

$$E = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 = \frac{1}{2} \times 1025 \times 2.64^2 \times 9.81 = 3.504 \times 10^4 \text{ N/m}$$

于是, 波形 $\zeta = 2.64 \cos(0.0628\xi \pm 0.785t) \text{ m}$

波倾角 $\alpha = -9.51^\circ \sin(0.0628 \pm 0.785 t)$

动压力 $p = p_0 + 1025 \times 9.8 [z + 2.64 e^{-0.0628|z|} \cos(0.0628 \xi \pm 0.785 t)]$ (Pa)

1.2 不规则波及其能谱密度

理想化简单化的平面进行波决不是真实的海浪。真实的风浪，海面起伏极为复杂，波型极不规则。一般，不仅沿风吹的主要方向产生波浪并向该方向传出去，在主风向两侧 $\pm \pi/2$ 角度范围内都有波浪传播出去，所以海面形成极不规则的波场。为了简化讨论，假定风向只沿一个方向吹，从而海浪只沿风吹方向产生并传播出去，虽然如此，所产生的海浪仍然是极不规则的，但其波峰和波谷线彼此平行并垂直于波浪前进的方向，称为“平面不规则波”或“长峰不规则波”。与此不同的，不作上述假定的海浪，则没有连续的长的波峰和波谷线，波面象一个个小丘，是为“三元不规则波”或“短峰不规则波”。我们主要讨论长峰不规则波。

虽然做了“长峰”的假定，海浪仍然是极不规则的随机过程。但若风速一定，在广阔的海面上，吹了相当长时间之后，海浪得到了充分的发展，当海浪从风吸收的能量和由形成的波浪传播走的能量达到基本平衡时，从统计的意义上讲，海浪的统计规律基本不变，此时的海浪可以认为是平稳随机过程。因为波面总是在静水平面上下起伏，因此可进一步认为海浪是均值为零的、具有各态历经性的正态平稳随机过程。于是，有关平稳过程的理论（附录一）完全可以应用于海浪的研究。

1.2.1 波高的试验统计平均值

既然海浪是均值为零的，具有各态历经性的正态平稳随机过程，就可以用一个定点记录时间比较长的现实（一条定点记录的波升曲线）作时间平均来代替过程的样集平均。

图 1.3 是一条这样的海上定点记录曲线。

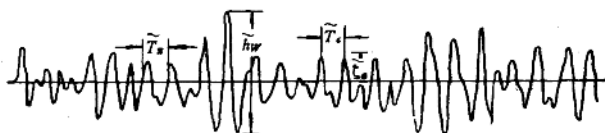


图1.3 不规则波的典型的定点记录曲线

图中：

- ξ_s ——表观波幅，波峰至静水平面的距离；
- $\tilde{h}_w$ ——表观波高，相邻峰谷间的垂直距离；
- $\tilde{T}_s$ ——表观跨零周期，曲线相邻两次向上穿越零线的时间；
- $\tilde{T}_p$ ——表观峰峰周期，出现两个相邻波峰所经过的时间。

在记录曲线上取出所有波高子样，譬如共 n 个，一般 n 应大于 200，然后从小到大加以排列，

$$\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_i, \dots, \tilde{h}_n$$

于是, 平均波高

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^n \tilde{h}_i / n \quad (1.11)$$

有义波高 (或有效波高) $\bar{h}_{1/3}$ 等于三分之一大波的平均值, 即

$$\bar{h}_{1/3} = \sum_{i=\frac{2}{3}n+1}^n \tilde{h}_i / (n/3) \quad (1.12)$$

十分之一大波平均波高 $\bar{h}_{1/10}$ 等于十分之一大波的平均值, 即

$$\bar{h}_{1/10} = \sum_{i=\frac{9}{10}n+1}^n \tilde{h}_i / (n/10) \quad (1.13)$$

通常用有义波高来区分海浪的等级, 它与有经验的航海人员目测的平均波高相近。但在舰船耐波性中, 也常常要采用十分之一大波平均波高, 有时甚至采用更大的平均波高。

1.2.2 浪 级

一般都以有义波高区分浪级的大小, 但国际上尚没有统一使用的浪级表。表 1.1 是表 1.1 浪 级 表

浪 级	名 称	有义波高 $\bar{h}_{1/3}$ (m)
0	无浪	0
1	微浪	< 0.1
2	小浪	$0.1 \leq \bar{h}_{1/3} < 0.5$
3	轻浪	$0.5 \leq \bar{h}_{1/3} < 1.25$
4	中浪	$1.25 \leq \bar{h}_{1/3} < 2.5$
5	大浪	$2.5 \leq \bar{h}_{1/3} < 4.0$
6	巨浪	$4.0 \leq \bar{h}_{1/3} < 6.0$
7	狂浪	$6.0 \leq \bar{h}_{1/3} < 9.0$
8	狂涛	$9.0 \leq \bar{h}_{1/3} < 14.0$
9	怒涛	$\bar{h}_{1/3} \geq 14.0$

表 1.2 风 级 表

风 级	名 称	风速范围 (m/s)
0	无风	0 ~ 0.2
1	软风	0.3 ~ 1.5
2	轻风	1.6 ~ 3.3
3	微风	3.4 ~ 5.4
4	和风	5.5 ~ 7.9
5	清风	8.0 ~ 10.7
6	强风	10.8 ~ 13.8
7	疾风	13.9 ~ 17.1
8	大风	17.2 ~ 20.7
9	烈风	20.8 ~ 24.4
10	狂风	24.5 ~ 28.4
11	暴风	28.5 ~ 32.6
12	飓风	≥ 32.7

我国现行的浪级表, 表 1.2 是我国使用的风级表。

表 1.2 中风速系指海平面以上 10m 高的风速。若只有距海平面 z 米高的风速资料 v_z , 可用下式换算到 10m 高风速 v_{10} :

$$v_{10} = v_z \left(\frac{10}{z} \right)^{1/10} \quad (\text{m/s}) \quad (1.14)$$

虽然海浪是风引起的, 但风速与浪高之间并没有严格的关系, 因而风级和浪级之间也没有严格的关系。这是因为海面上的波浪经常处于发生、发展和衰亡过程, 不同阶段的风速与浪高之间的关系有较大差别, 难于得出一个较确定的关系式。图 1.4 和表 1.3 是统计资料。

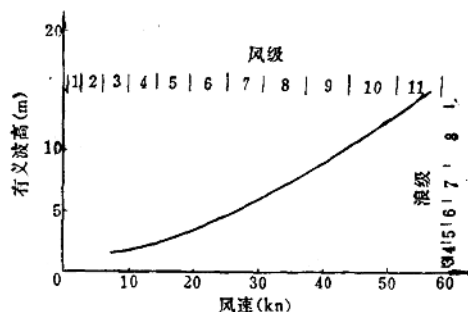


图1.4 风级、风速与浪级关系曲线

1.2.3 海浪表达式

极端复杂的不规则波能否取某种适宜的数学模型来描述它? 在回答这个问题之前, 请先看一个有益的事实: 取三个正弦型规则波的迭加, 其中:

波浪编号	1	2	3
波幅 ζ_{0i} (m)	3.0	3.4	3.2
波数 k_i (1/m)	0.0590	0.0205	0.0385
波长 λ_i (m)	107	307	163
圆频率 ω_i (1/s)	0.759	0.448	0.615

于是 $\zeta = \zeta_{01} \cos(k_1 \xi - \omega_1 t) + \zeta_{02} \cos(k_2 \xi - \omega_2 t) + \zeta_{03} \cos(k_3 \xi - \omega_3 t)$

迭加的波形曲线如图-1.5 所示。取定 t , 如 $t = 0$, 合成一条沿 ξ 轴不规则变化曲线, 随着时间的变化, 如 $t = 3$, 合成的不规则曲线也不同了。这一事实说明, 仅仅三个规则的正弦波形迭加之后就可以得到如此不规则的波形, 有理由设想, 极不规则的海浪可以由迭加大量规则的波形来描述。海洋学者的研究表明, 定点记录的海浪可用如下数学模型来描述:

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \zeta_{0i} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (1.15)$$

式中每一个被加项都是各具不同的波幅、频率和相角的微幅平面进行波

$$\zeta_i(t) = \zeta_{0i} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (1.16)$$

称为子波或单元波。其中波幅 ζ_{0i} 是均匀微小量, 相位差 ε_i 是在 $(0, 2\pi)$ 之间均匀分

表1.3 海况的定义(风和充分成长的海浪)

海面概貌			风				浪						
海况等级	特征	蒲福风级	名称	风速范围 (kn)	风速 (kn)	波高		主要周期范围 (s)	谱峰周期 $T_{max} = T_0$	平均周期 $\bar{T}$	平均波长 $\bar{\lambda}$ (未指明者均为ft)	最小风强 (n mile)	最小风速时 (未指明者均为h)
						平均值	有义值						
0	海面平静如镜	0	无风	1	0	0	0	—	—	—	—	—	—
	形成鱼鳞状波紋, 但峰无泡沫	1	微风	1—3	2	0.04	0.07	0.09	1.2	0.75	10in	5	18min
1	微浪, 短小而明显, 波峰呈玻璃状但不破裂	2	微风	4—6	5	0.3	0.5	0.6	0.4~2.8	1.9	6.7	8	39min
	微浪, 波峰开始破裂, 泡沫呈玻璃色, 也有白浪	3	微风	7~10	8.5	0.8	1.3	1.6	0.8~5.0	3.2	20	9.8	1.7
2	小浪, 波峰拉长, 常翻白浪	4	和风	11~16	10	1.1	1.8	2.3	1.0~6.0	3.2	27	10	2.4
					12	1.6	2.6	3.3	1.0~7.0	4.5	40	18	3.8
3					13.5	2.1	3.3	4.2	1.4~7.6	5.1	52	24	4.8
					14	2.3	3.6	4.6	1.5~7.8	5.3	59	28	5.2
4					16	2.9	4.7	6.0	2.0~8.8	6.0	71	40	6.5
					18	3.7	5.9	7.5	2.5~10.0	6.8	90	55	8.3
5					19	4.1	6.6	8.4	2.8~10.6	7.2	99	65	9.2
					20	4.6	7.3	9.3	3.0~11.1	7.5	111	75	10
6					22	5.5	8.8	11.2	3.4~12.2	8.3	134	100	12
					24	6.6	10.5	13.3	3.7~13.5	9.0	160	130	14
7					24.5	6.8	10.9	13.8	3.8~13.6	9.2	164	140	15
					26	7.7	12.3	15.6	4.0~14.5	9.8	188	180	17
8					28	8.9	14.3	18.2	4.5~15.5	10.6	212	230	20
					30	10.3	16.4	20.8	4.7~16.7	11.3	250	280	23
9					30.5	10.6	16.9	21.5	4.8~17.0	11.5	258	290	24
					32	11.6	18.6	23.6	5.0~17.5	12.1	285	340	27

海面概况		风				浪							
海况等级	特征	傅里风级	名称	风速范围 (kn)	风速 (kn)	波		主周期范围 (s)	波峰周期 $T_{max} = T_0$	平均周期 $\bar{T}$	平均波长 λ (未指明者均为ft)	最小风程 (n mile)	最小风时(未指明者均为h)
						平均值	1/10大波峰值						
7	巨浪, 波浪更长, 波峰边缘破裂成浪烟, 飞沫吹成沿风向的明显条带, 浪花影响能见程度	8	大风	34~40	34	13.1	21.0	5.5~18.5	12.8	9.1	322	420	30
						14.8	23.6	5.8~19.7	13.6	9.6	363	500	34
8	狂浪, 泡沫成沿风向的密集条带, 海浪开始翻浪, 能见受影响	9	烈风	41~47	44	15.6	24.9	6.0~20.5	13.9	9.9	376	530	37
						16.4	26.3	6.2~20.8	14.3	10.2	392	600	38
9	狂涛, 长峰暴垂, 大片泡沫吹成沿风向的密集白色条带, 整个海面呈白色, 海浪翻滚严重, 轰隆声似雷。能见受影响	10	狂风	48~55	40	18.2	29.1	6.5~21.7	15.1	10.7	444	710	42
						20.1	32.1	7~23	15.8	11.3	492	830	47
					46	22.0	35.2	7~24.2	16.6	11.8	534	960	52
						24.1	38.5	7~25	17.3	12.3	590	1110	57
					50	26.2	41.9	7.5~26	18.1	12.9	650	1250	63
						28.4	45.5	7.5~27	18.8	13.4	700	1420	69
					52	30.2	48.3	8~28.2	19.4	13.8	736	1560	73
						30.8	49.2	8~28.5	19.6	13.9	750	1610	75
					54	33.2	53.1	8~29.5	20.4	14.5	810	1800	81
						35.7	57.1	8.5~31	21.1	15	910	2100	88
		11	暴风	56~63	59.5	40.3	64.4	10~32	21.4	15.9	985	2500	101
		12	飓风	46~71	>64	>46.6	74.5	94.6	24.1	17.2	—	—	—

① 引自(16), 波高单位为英尺。● 难于达到所需的风时, 海浪未能充分成长。

① 引自(16), 波高单位为英尺。● 等于达到所需的风时, 海浪未能充分成长。

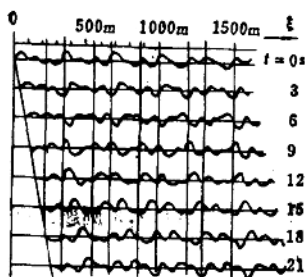


图1.5 正弦型规则波的迭加

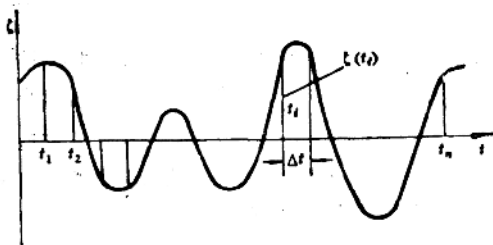


图1.6 取波升子样

布的随机变量，由此，式 (1.15) 才是随机过程。可见，子波 (式(1.16)) 是类似于 A 1.2.3 例题中的微幅随机相位正弦波，它是均值为 0、具有各态历经性的平稳随机过程，取定 t 时，它是随机变量，而且各子波之间统计上彼此独立。因此，由它们迭加组成的式 (1.15) 是均值为 0，并具有各态历经性的正态平稳随机过程（正态问题后面还要讨论）。

1.2.4 波能谱密度（方差谱密度）

参考 A1.4，那里从理论和方法上详细讨论了均值为 0，并具有各态历经性的平稳随机过程的方差谱密度，这些理论和方法完全可以直接应用于海浪，因此，波浪谱密度问题已经解决了，不妨在这里简要归纳如下：

(1) 取样。在一条定点记录时间比较长的海浪记录曲线上，等时间间隔地（如 1 s）取波面升高 $\zeta(t_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$)，即波升子样，如图 1.6 所示。

(2) 计算过程的相关函数，

$$R_{\zeta\zeta}(\tau) = \frac{1}{n-r} \sum_{i=1}^{n-r} \zeta(t_i) \zeta(t_{i+r}) \quad r = 0, 1, 2, \dots, m, m < n.$$

(3) 对相关函数作富里埃变换，得方差谱密度，

$$S_{\zeta\zeta}(\omega_i) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_{\zeta\zeta}(\tau) \cos \omega_i \tau d\tau \quad i = 1, 2, \dots, p$$

然后加权光滑之，得 $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ 曲线，就是方差谱密度。

(4) 积分方差谱得海浪的方差，

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_{\zeta\zeta}(\omega) d\omega$$

下面我们从海浪的表达式 (1.15) 出发，对海浪谱再作具体说明，以加深对这一重要概念的认识。其海浪的方差或能谱如图 1.7 所示。

式 (1.15) 表明不规则波由大量（理论上是无穷多）波幅非常小（理论上无穷小）的随机平面进行波迭加组成。而根据式 (1.4)，海面单位面积中每一个平面进行波的能量为

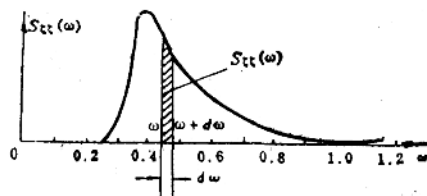


图1.7 海浪的方差谱或能谱