

C-670050

船舶结构译文集



中国船舶及海洋工程设计研究院

6

53

目 录

建立在统计分析基础上的船舶基本强度	(1)
船舶结构安全性和可靠性的概率设计概念	(30)
船舶结构设计的载荷标准	(62)
第一章 引论	(62)
第二章 临界载荷	(67)
第三章 静水载荷	(72)
第四章 波浪载荷	(76)
第五章 动力载荷	(84)
第六章 砰击和波浪载荷的相位	(88)
第七章 热效应	(92)
第八章 设计用合成载荷	(94)
第九章 载荷计算举例	(104)

建立在统计分析基础上的船舶基本强度

[美] S. G. Stiansen A. E. Mansour

内 容 提 要

近年来在海船上及航行于北美洲五大湖的巨轮上进行了收集实船数据和应力测量方面的大量工作, 这些研究工作的主要目的是为了提高船舶环境载荷的预报能力及为选择合适的结构设计准则以建立一些合理的方法。这些耗资巨大的实船计划必须与测得数据的统计分析一起进行, 以便把新的知识和所得到的资料运用到设计过程中去。必须用有效的统计资料建立、检验和鉴定综合设计方法和理论分析模型, 以便在新船设计中充分利用这样的资料。本文介绍了初步的研究结果, 希望能对这方面的工作有所推动。

一、引 言

在工程问题的许多领域里用概率方法解决结构安全问题的重要性已经被公认了, 然而, 这方面的大多数工作局限于估算几何确定系统的可靠程度, 只是近年来才在把概率概念结合到设计过程本身方面有了一些进展, 并有可能在一些专业组织的各种标准和规则中明显或不明显地反映出来。本文的最终目标是想有助于推进这方面的工作。

本文所叙述的直接目的有二方面: 第一, 进一步发展概率设计方法, 以便确定适当的综合设计方法; 第二, 将所得到的方法应用到那些已经收集了实船数据的同类船上。这样一些方法考虑了海浪载荷的动力随机性质, 同样也考虑了结构材料和生产工艺的变化。

近年来, 由于实船数据的收集和分析方法的改进, 预报作用在船上的海浪载荷的能力有了提高[1—6]。然而仍缺乏合成各类载荷的综合方法, 诸如静水弯矩、低频波浪诱导弯矩(垂直的、水平的和扭转的)、高频振动弯矩(波激振动、砰击)和其他一些次要载荷(如局部水压)的合成。为了逼真地表示这些环境载荷, 还需要进一步地发展和改进。在考虑到各自的相位关系的特定条件下合成海浪载荷的相关组通常是一个复杂问题, 而在设计中却是重要的。

本文所用的求合成载荷所需统计学的方法是基于这样的事实, 即波浪载荷能被模拟为复合系统的随机响应, 而海浪则作为此系统的准平稳公共输入。低频载荷被认为是由主要载荷诸如垂直、水平和扭转力矩及由局部水压引起的次要载荷组成。当可能时找出理论分析模型和实船测量的相关, 本文所介绍和讨论的在 Universe Ireland 号上预报和测量的应力就是这样一种相关的例子。

高频载荷的一种形式可能是由于船舶低阶主振动通过在海浪谱高频范围内出现的能量激发产生的, 这种“波激振动”在频率比较低的大船上和遭遇频率比较高的快速船上都是特别重要的, 本文介绍了把这样的高频载荷并入船上总载荷中的方法的梗概, 并讨论了考虑到船体梁挠度的响应幅频算子(RAO)和响应谱。响应幅频算子的特征是具有若干不同的峰值, 其中第一个峰值出现在相应于波长接近船长的频率时, 其他的峰值出现在船舶低阶主振动的频率时。在几艘船的预报

的自然频率及主振动形状与实船测量之间进行了比较。本文还给出在远洋船 Fotini L 号上应用合成高频波激弯矩和低频波浪弯矩的方法所得的数字结果,并讨论了与实测数据的相关性。

在大湖上航行的大船代表了这样一类船,在这种船上波激振动载荷甚至比海船更为重要,这些船的柔性和比较浅的吃水产生了波激振动所需要的条件。此外,由于这些船运行在比海洋低的海况中,它的波激弯矩与低频波浪弯矩的比例比典型海船的要高。作为例子介绍了对大湖船 Stewart, J. Cori 号用波激振动/波浪诱导弯矩的电算结果,并讨论了与实船测量的一些相关。

另一种主要高频载荷是由于船舶在激烈的海况中碰击而发生的,这种形式的载荷通常对于在波浪中运动幅度大的小船更为重要。本文讨论了船舶在不规则波中的碰击诱导弯矩的概率模型,所提供的概率统计模型考虑了碰击载荷的随机间歇性质。碰击暂时被描述为发生在随机时间间隔内的一系列随机密度的冲击载荷,随机密度和时间间隔取决于海况的激烈程度、船速、船的几何特征及其载荷状态。然后用振动系统的模态技术研究全船的瞬时响应,并注意到由于这样一些随机碰击引起的船舶弯矩。对 Mariner 级应用这种概率模型以说明其使用方法,并获得一些数字结果。

上面所描述的合成载荷的方法可提供对任何船舶结构进行可靠性和安全分析时所必需的基本输入。本文的最后一节讨论了衡量船舶结构安全的方法,这些方法包括确定性的安全因素法以及纯概率方法。也讨论了半概率自由分布(Semiprobabilistic distribution-free)方法。比较这些方法并指出每个方法的有关优缺点。给出了船舶极限弯矩平均值和安全度关系的一些表达式作为所考虑的每一种安全度的例子。为了提供一些比较的基础并检验安全指数的范围,介绍了九艘船的可靠性分析,并指出了某些一般性的趋势。本文结论一节汇集了主要的研究结果,并列出了供进一步研究的一些题目。

二、低频载荷

本文中低频载荷被定义为用一定频率范围表征的海浪载荷,这一频率落在波浪遭遇频率的“主要频率”范围内。主要的低频载荷有垂直(纵向)波浪弯矩、水平(侧向)波浪弯矩和扭转力矩等,其他如船体加强板上水压变化引起的为次要载荷。为了避免低估船体不同部分的应力水准,在一定条件下以恰当的相位关系合成这样一些载荷,或者在全船范围内综合这些载荷的作用是很重要的,这样一些条件通常需要考虑相关的随机过程。本节简要地讨论了这种随机过程并举了一些应用的实例。

在一定条件下船舶运行在不规则斜浪上能被看作为复合线性系统,用海浪波表示对这个系统的

公共输入。在一个短的时间周期内,波浪可以在广义上被描绘成平稳随机过程。通常,系统的输出可以是任意可测量的量(运动、速度、加速度、载荷等)随时间的变量。本节只集中考虑载荷方面。

具有公共输入(波浪)的这个复合系统的输出 $\tilde{y}(t)$ 的总和可以表示为船上指定位置处的弯矩或应力的总和。所以输出 $\tilde{y}(t)$ 的总和的统计资料在设计中是感兴趣的。图 1 中绘出了几

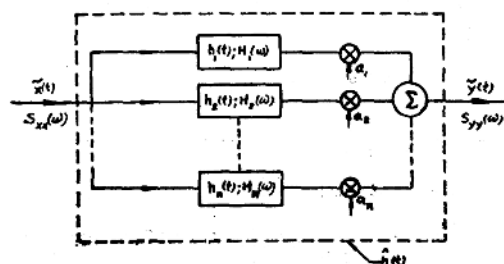


图 1 用公共输入的复合系统的输入-输出

个线性系统的输入/输出过程。一般常数 a_i 被用作衡量各线性系统 $h_i(t)$ 对总和 $\tilde{y}(t)$ 的影响，输出用

$$\tilde{y}(t) = \sum_{i=1}^n a_i [h_i(t) * \tilde{x}(t)] \quad (1)$$

表示，式中 $h_i(t)$ 是脉冲响应函数，“*”号表示卷积积分。

因为 $h_i(t)$ 是对式(1)所有各项的公共输入，因而可引入一个合成脉冲响应函数 $\hat{h}(t)$ 使得

$$\tilde{y}(t) = \hat{h}(t) * \tilde{x}(t) \quad (2)$$

式中

$$\hat{h}(t) = \sum_{i=1}^n a_i h_i(t) \quad (3)$$

所以，对单个线性系统有效的所有常见的自相关、互相关和谱密度关系可以引伸到用 $\hat{h}(t)$ 作为系统的脉冲响应的复合线性系统。用作频域分析的相应系统函数 $\hat{H}(\omega)$ 给出为：

$$\hat{H}(\omega) = \int_0^\omega \hat{h}(t) e^{-j\omega t} dt = \sum_{i=1}^n a_i H_i(\omega) \quad (4)$$

式中 $H_i(\omega)$ 是用各个 $h_i(t)$ 的傅里叶变换给出的复数系统函数。

输入和输出谱间的关系为：

$$\begin{aligned} S_{yy}(\omega) &= S_{xx}(\omega) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j H_i(\omega) H_j^*(\omega) \\ &= \sum_{i=1}^n a_i^2 S_{xx}(\omega) |H_i(\omega)|^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j S_{xx}(\omega) H_i(\omega) H_j^*(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

(i ≠ j)

式中 $H_j^*(\omega)$ 是系统函数的共轭复数，而 $|H_i(\omega)|$ 是系统函数的模，也就是幅频响应算子，式中双重级数表示交互谱的项数。

必须指出，如果系统函数不重叠在频率轴上（见图2），即如果它们是断续的，就表示它们是不相关的，并且式(5)中的双重总和项由于 $H_i(\omega) \cdot H_j^*(\omega) = 0$ 而去掉。还有，如果认为波浪输入 $\tilde{x}(t)$ 是正态的，而如果输入是断续的，就表示输出是独立的。

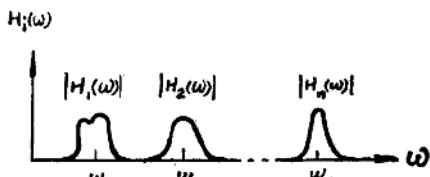


图2 断续的系统——不相关的

通常，凡是 n 个系统中有几个或没有一个是断续的并且具有平均值为零的公共波浪输入，则输出的方差为：

$$\sigma_y^2 = \int_0^{+\infty} S_{yy}(\omega) d\omega \quad (6)$$

式中 $S_{yy}(\omega)$ 由式(5)给出。我们有意地保留了式(2)、(3)、(5)和(6)的普遍形式，因为它们将用于包括一些高频载荷在内的许多不同类型的载荷合成，应用这些式子的条件是满足公共波浪输入（平均值为零）的平稳性及复合系统的线性。波浪输入的平稳性适用于短期分析，而线性假定是为了用迭加原理，但是在较高的海况时降低了精确性。这两个常见的假定导致输出 $y(t)$ 也是平稳过程。

如果进一步假定能用正态的（高斯）随机过程来描述海面，那么就能确定峰值的概率密度函数了。然而应该指出，通常观察到的波峰高出平均水平面大于波谷下落于水平面的那种性质在

“正态”模型中不可能表示出来，为适应这种峰-谷的不等性，海面可用多变概率律的一般二阶随机过程来描述[8]。不过，这样的概括必然影响用海浪谱进行概率预报的能力。正态模型中波谱完全表征了随机过程，并且可供确定不同波浪高度的概率，而在更为一般的二阶模型中，只有波谱知识就不足以做这样的概率预报。

符 号 一 览 表

a_i	与第 i 个系统有关的常数	m, σ	假定为正态分布时静水弯矩的平均差和标准差
$b(x)$	特征宽	m_n	谱的 n 次矩
C	常数	m_0, m_w	分别为静水及波浪诱导弯矩最大值
$\bar{C}_i$	i 阶广义阻尼	N	最大样本数目
$E[\cdot]$	$[\cdot]$ 的期望值或平均值	N_s	单位时间砰击数
$E^2[\cdot]$	$[\cdot]$ 的平均值平方	n	整数
$f_M(m)$	$\tilde{M}(t)$ 的概率密度函数	P, P_t	分别为砰击压力和阈压力
$f_P(p)$	砰击压力的概率密度函数	i_t	相对阈速度
$f_W(w)$	随机砰击密度的概率密度函数	S_v, S_h	分别为剖面对水平及垂直中和轴的剖面模数
H	吃水	$S_{xx}(\omega)$	输入谱密度(波浪)
$ H(\omega) $	复数系统函数的模; 响应幅频算子	$S_{yy}(\omega)$	输出谱密度(弯矩或应力)
$H_i(\omega)$	第 i 个系统的复数系统函数	$U(t)$	阶跃函数
$H_i^*(\omega)$	第 i 个系统函数的共轭复数	V	船速
$\hat{H}_i(\omega)$	复合复数系统函数	V_z, V_s	分别为总弯矩和强度的变动系数
$H_s(\omega)$	波激振动弯矩的复数系统函数	$\bar{W}_i$	第 i 次冲击的随机密度
$H_v(\omega), H_h(\omega)$	分别为垂直和水平弯矩的复数系统函数	$[X]$	特征矢量
$h(t)$	与砰击有关的脉冲响应函数	$X_i(t)$	第 i 阶主振动振形
$\hat{h}(t)$	复合脉冲响应函数	$\bar{x}(t)$	公共输入(随机过程)
$h_i(t)$	第 i 个系统的脉冲响应函数	$\bar{x}(t)*h(t) = \int_0^{\infty} \bar{x}(t-\alpha)h(\alpha)d\alpha$	卷积积分
j	$\sqrt{-1}$	$\hat{y}(t)$	输出(随机过程)
K	垂直剖面模数与水平剖面模数之比, S_v/S_h	$\bar{z}(t)$	砰击输入随机过程
$[K]$	船舶刚度矩阵	β	安全指数 $= \ln \frac{n}{1-L}$
k_0, k	安全因素	τ	安全指数
$k_f(x)$	形状系数	$\delta(\cdot)$	狄拉克 (Dirac) δ 函数
k_p	冲击的脉冲时间函数的面积	ϵ	带宽参数
k_s, α	常数	ζ	从平均值测出的随机过程的最大值
L	可靠性函数	$\xi(t)$	波面升高
$[M]$	船舶的集积质量	$[\Delta]$	特征值
$M(t)$	砰击诱导弯矩响应	$\lambda(x)$	空间变化参数
$\tilde{M}_0(t)$	当量合成弯矩	λ_w	波浪弯矩平均值
$\tilde{M}_h(t)$	水平弯矩	μ	波浪分量和主波浪系统间的角度
$M_i(x)$	第 i 阶空间函数	$\bar{\mu}_i$	第 i 阶主振动的广义有效质量
M_{rms}	$\tilde{M}(t)$ 的均方根值	ρ_0	水的重量密度
$\tilde{M}_v(t)$	垂直弯矩		

ρ_{vh} 垂直和水平弯矩的相关系数	$\tilde{\sigma}_{TP}(t), \tilde{\sigma}_{TS}(t)$ 分别为主要应力和次要应力
σ 强度的标准差	σ_v^2 垂直和波激振动合成弯矩的方差
$\tilde{\sigma}_c(t)$ 甲板边缘处的合成应力	σ_y^2 输出的方差
$\sigma_{M_c}^2, \sigma_{M_v}^2, \sigma_{M_h}^2$ 分别为合成弯矩、垂直弯矩和水平弯矩的方差	σ_0^2 总主要和次要应力的方差
$\sigma_{M_v}^2, \sigma_c^{1/2}, \rho_{LMv}$ 分别为主要弯曲应力和次要弯曲应力的相关系数及方差	$\sigma_0, \tilde{\sigma}(t)$ 总主要和次要应力与时间无关及与时间有关的部分
$\sigma_{M_c}^2$ $\tilde{M}_c(t)$ 的方差	$\tilde{\tau}_i$ 第 i 个撞击的随机到达时间
σ_m^2 $\tilde{M}(t)$ 的方差	ω 频率
σ_r^2, σ_f^2 分别为相对运动和速度的方差	ω_i 与 $i+1$ 节点的主振动有关的频率
$\tilde{\sigma}_T(t)$ 总的主要和次要应力	在量上的“ $\sim$ ”记号表示随机变量。

对公共波浪输入的正态模型，复合系统的输出也是正态的，而且由平均值测量的输出峰值的概率密度函数由[6, 7, 9]给出为：

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{m_0}} \left\{ \epsilon \tilde{\sigma}^2 J^2 \epsilon^2 m_0 + \left[\frac{2\pi(1-\epsilon^2)}{m_0} \right]^{1/2} \times \xi e^{J^2 2 m_0} \phi \left[\frac{\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon} \cdot \frac{\xi}{\sqrt{m_0}} \right] \right\} \quad (7)$$

式中

$$\epsilon^2 \text{ (带宽参数)} = 1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}$$

$$\phi(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2 J^2 dz}$$

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S_{vv}(\omega) d\omega$$

在计算作用于船上的载荷时，带宽参数 ϵ 的两种极限情况是重要的，当 $\epsilon=0$ 时，也即过程是狭带时，式(7)化为一般用于表征峰值概率的 Rayleigh 分布，这种情况可以近似为低频载荷：如垂直和水平弯矩的合成或主要和次要载荷的合成。通常，这种合成可以描述为相关正态随机过程的线性合成，每一个这类过程中的谱容量都集中在频率中心 ω_0 附近。

另一方面，如果 $\epsilon=1$ ，即宽带输出谱，计算峰值的(7)式化为平均值为零的正态分布，也就是化成海面升高本身的分布。这种情况比较适应于低频载荷和高频载荷的合成（例如波浪弯矩和“波激振动”弯矩的合成）。更一般地它表示这样一些相关正态随机过程的线性合成，每一个这种随机过程的谱容量分布在 ω_i 周围，且 ω_i 在频率轴上相隔很宽。

在两种极限情况中，峰值分布（从平均值测量的）的参数仅取决于输出的方差[式(6)]，也就是取决于输出谱的面积。

通常，运行在斜浪上的大油轮会遭遇与垂直弯矩有同样量级的水平弯矩，所以垂直和水平弯矩的合成结果对有些类型的船是关键的。由于垂直和水平弯矩相应的相位不同，它们的幅值通常不是同时作用的。甲板上的应力分布是不均匀的并假定最大值在某一边缘。除垂直和水平弯矩外，如果翘曲过大，如象某些大开口船上发生的那样，扭转力矩也可能引起纵向应力。不过在大油轮上扭转力矩对纵向应力的影响一般很小，可以忽略。

甲板边缘合成应力 $\tilde{\sigma}_c$ 为：

$$\tilde{\sigma}_c(t) = \frac{\tilde{M}_v(t)}{S_v} + \frac{\tilde{M}_h(t)}{S_h} \quad (8)$$

$$\text{或:} \quad \tilde{M}_c(t) = \tilde{M}_v(t) + K \tilde{M}_h(t) \quad (9)$$

式中:

$\tilde{M}_c(t) = \tilde{\sigma}_c(t) S_v$ 相当的合成弯矩;

$$K = \frac{S_v}{S_h} \quad \text{垂直剖面模数与水平剖面模数之比。}$$

对于用二元海浪谱表示的波浪, 从上面的讨论表明在一个短的时间周期内 $\tilde{M}_c(t)$ 是正态分布的且平均值为零, 方差给出为[见式(5)和(6)]:

$$\begin{aligned} \sigma_{M_c}^2 = & \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega, \mu) |H_v(\omega)|^2 d\omega d\mu + K^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega, \mu) |H_h(\omega)|^2 d\omega d\mu \\ & + 2K \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega, \mu) H_v(\omega) H_h^*(\omega) d\omega d\mu \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $H_v(\omega)$ 和 $H_h(\omega)$ 分别是垂直和水平弯矩的复数系统函数^①, $|H_v(\omega)|$ 和 $|H_h(\omega)|$ 是相应的响应幅频算子, 而 S_{xx} 是定向的或二元的输入海浪谱。

按照水平和垂直弯矩的各自的方差和相关系数, 式(10)可以写为:

$$\sigma_{M_c}^2 = \sigma_{M_v}^2 + K^2 \sigma_{M_h}^2 + 2\rho_{vh} K \sigma_{M_v} \sigma_{M_h} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{aligned} \sigma_{M_v}^2 &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega, \mu) |H_v(\omega)|^2 d\omega d\mu \\ \sigma_{M_h}^2 &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega, \mu) |H_h(\omega)|^2 d\omega d\mu \\ \rho_{vh} &= \frac{1}{\sigma_{M_v} \sigma_{M_h}} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega, \mu) H_v(\omega) H_h^*(\omega) d\omega d\mu \end{aligned} \quad (12)$$

应当指出, 式(10)中最后一项被积函数中包含了与垂直和水平弯矩间相位有关的数据, 而这种与频率和角度 μ 有关的数据的积分可以确定如(12)式给出的相关系数了。如果假定是线性的, 则应用式(5)给出的一般公式就能把式(10)引伸到包括扭转力矩对纵向应力的影响。

上述分析被应用到 Universe Ireland 号上, 并且在预报值和测量数据间作了一些比较, Universe Ireland 号是为了实船测量在实际营运中所经受的应力而装有测量仪器的五艘不同尺度的船中最大的一艘。在参考文献[1]中报告了这次由美国造船局发起的三年半试验计划的描述和分析, 并提供了与若干理论分析得到的值作比较的基础, 完整的测试系统和数据收集过程是由 Teledyne 材料研究所完成的。

Universe Ireland 号的一般特征为:

近似载重量(吨)	326,585
总 长(英尺)	1135.17
垂线间长(英尺)	1076
宽(英尺)	174.87
深(英尺)	105
设计吃水(英尺-英寸)	81-5
方形系数	0.86
垂直剖面模数(顶)(平方英寸-英尺)	566,794

① 复数系统函数除频率 ω 外还取决于船舶速度矢和波浪分量间的夹角, 为简单起见, 在符号中省略了这个角度。

垂直剖面模数(底)(平方英寸-英尺)

671,350

横向剖面模数(对舷边)(平方英寸-英尺)

643,078

编制了一个五个自由度的电算程序用以计算垂直和水平弯矩的复数系统函数 $H_v(\omega)$ 和 $H_h(\omega)$ ，并用合理的相位关系把它们合成得到合成弯矩，基于切片理论^①的这个程序可求得用波谱的余弦平方传播函数表示的短峰传波浪上的结构响应。这个程序被用于三种船速：6、12和16节；从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 间隔 22.5° 的九种波浪首向（这里指船相对波浪的航向）；和用有义波高和相应周期代表的九种海况。由计算机的输出端可得到所有各种速度（三种）、航向（九种）、海况（九种）组合下响应的均方根、有义波高和其他较高的平均统计数据。可以分别得出垂直、水平和合成波浪弯矩的输出结果。三种响应值按船长方向 21 个站计算，虽然在分析中只需知道船部的响应值。海浪数据必须小心选取，使之符合在使用仪器测量周期时船所经历的实际航道，船舶经好望角在波斯湾和西欧之间定期航行（初次航行除外）。在理论分析计算中计算了 40 种频率的波谱坐标；而 26 个点被用作描述系统函数，其中大多数点位于期望峰值附近。

垂直、水平和合成弯矩的计算的均方根值(随机过程)在图 3 和图 4 上表示成波浪首向的函数，为了比较，这个图作成对应于 7.4 英尺、19.2 英尺和 43.3 英尺三种有义波高在长峰传和短峰传海浪中的响应，目的是为了表明在低的、中等的和高的海况中的一般特性。这几个图表是为有代表性的船速而作出的，响应的一般特性随船速略有变化。

在较为现实的短峰传海浪中(图 4)可以看到水平弯矩不比垂直弯矩小，在较低到中等的海况中前者至少和后者一样大，中等海况时垂直和水平弯矩随首向发生比较小的变化。另一方面，低海况时，在偏离迎浪和随浪的航向角处有一段宽的响应峰值区。在激烈的海况中，垂直弯矩和合成弯矩的响应在迎浪和随浪时最大，而水平弯矩随首向变化极小。显然，从结构设计观点看，最后一种激烈海况更为重要。

在长峰传海浪中(图 3)，高海况下垂直弯矩假

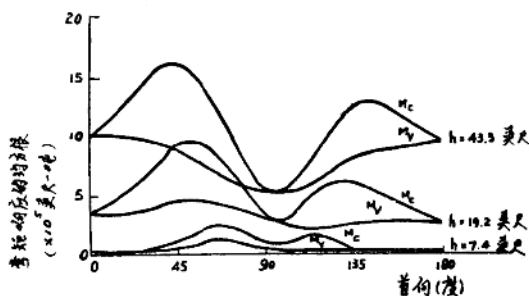


图 3 在长峰传波浪中弯矩响应的均方根和首向的关系

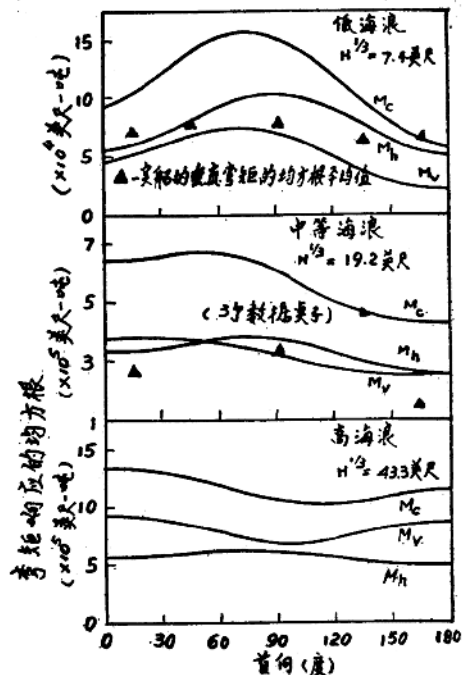


图 4 在低的、中等的和高的短峰传海浪中弯矩响应的均方根

① 切片理论的近似性和推断在有关文献中很好地说明过，所以这里不再进一步讨论了。

定极限值发生在迎浪和随浪的情况，而对于低的到中等的海况，峰值在 60° 左右。合成弯矩总是有二个峰值；在 60° 和 120° 附近，当海况发展得更激烈时，则峰值向迎浪或随浪方向移动。

必须指出，由图 3 和图 4 给出的一般特性不仅取决于海况，也和船长有关，所以这些图仅对像 Universe Ireland 那样尺度的船才有代表性。通常，在低海况中水平弯矩相对比较大，这是因为水平弯矩对高频激发比垂直弯矩更为敏感。通常水平弯矩的响应幅频算子的峰值位于比相应的垂直弯矩所处的更高的频率处，所以当波激发的能量集中在更高频区，即在低的海况时，水平弯矩出现很大的值而且变得重要了。高海况时产生相反的趋势。同样理由，均方根曲线的峰值在低海况中发生偏离迎浪和随浪的情况，这种现象可以用检验在斜浪中船长与有效波长的关系来解释。为了比较，在图 4 中低的和中等的海况的二张分图上表示了实船测量的垂直弯矩均方根平均值(整理过的)，没有高海况下的实船数据。

图 5 表示用三种稍有不同的方法求得的合成弯矩均方根随海况的变化。第一种方法根据式(10)和编好的电算程序。第二种方法根据式(11)，用了从 1973 年 ISSC 学报[10]上得到的相关系数 $\rho_{vh} = 0.32$ ，参考文献[10]中所介绍的相关系数的值是指的参考值而不是设计所用的值，单独的垂直和水平弯矩的方差用电算程序确定。显然，从图 5 中可以看出用二种方法得到的结果差别不大。再用式(11)作进一步比较，但所用的相关系数 ρ_{vh} 是根据在低、中、高海况中所有各种首向下短峰传波浪上的响应(由式(10)求得)的平均值得来，照这样得到的 ρ_{vh} 的平均值为 0.53，明显地比 ISSC 的值高。相应的曲线也表示在图 5 中。表 1 表示了不同方法所得 ρ_{vh} 的差别的百分数。从推导 ρ_{vh} 的平均值的过程中，可以发现这个系数随海况和波浪方向急剧地变化，所以没

表 1 对二种速度用三种方法计算在船舯的总弯矩响应均方根的比较

速 度 节	有义波高 英 尺	第一种方法 响应的均方根	第二种方法 响应的均方根 (ISSC, $\rho_{vh} = 0.32$)	百分差	第三种方法 响应的均方根 ($\rho_{vh} = 0.536$)	百分差
$V = 16$	3.6	26,763	27,091	+ 1.2	29,113	+ 8.8
	7.4	115,468	104,024	- 9.9	111,951	- 3.0
	10.7	240,620	213,556	- 11.2	230,044	- 4.4
	14.6	405,516	361,705	- 10.8	390,090	- 3.8
	19.2	586,565	530,581	- 9.5	572,308	- 2.4
	24.3	756,493	695,879	- 8.0	750,088	- 0.8
	30.0	911,865	848,872	- 6.9	913,872	- 0.2
	36.4	1,050,906	988,128	- 6.0	1,062,235	+ 1.1
	43.3	1,167,628	1,201,646	+ 2.9	1,286,184	+ 10.0
$V = 6$	3.6	22,238	21,159	- 4.8	22,694	+ 2.0
	7.4	112,552	99,455	- 11.6	106,928	- 5.0
	10.7	236,044	208,225	- 11.8	224,172	- 5.0
	14.6	398,461	371,193	- 6.8	397,994	- 0.1
	19.2	580,125	529,671	- 8.7	571,350	- 1.5
	24.3	756,008	700,822	- 7.3	755,840	0.0
	30.0	913,821	856,749	- 6.2	923,295	+ 1.0
	36.4	1,056,466	998,556	- 5.5	1,074,976	+ 1.8
	43.3	1,175,724	1,118,861	- 4.8	1,203,121	+ 2.3

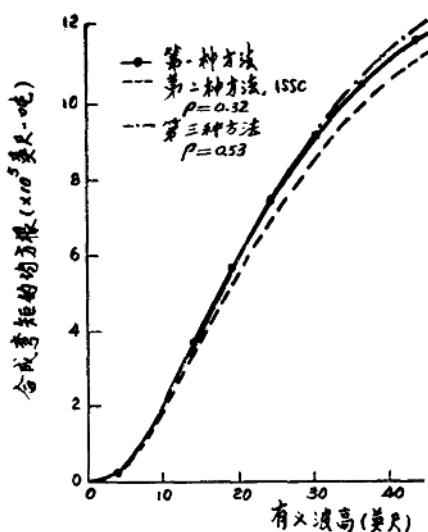


图 5 用三种方法计算的船舯合成弯矩响应均方根的比较

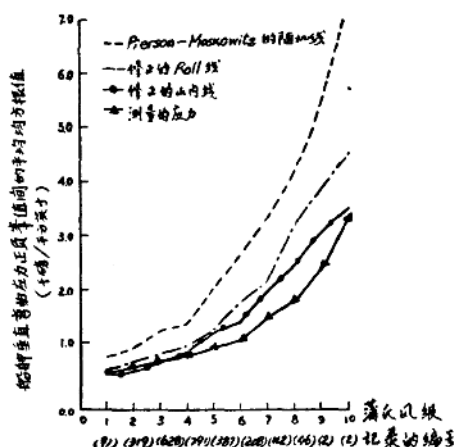


图 6 对 Universe Ireland 预报的和测量的垂直弯曲应力的比较

有一个值能适用于所有海浪状态。

下面将讨论预报的弯曲应力和实船测量之间的比较，在 Universe Ireland 号船舯和沿船长方向其他几站的左右舷贴上了应变片，遗憾的是这样的布置只测出了垂直弯曲应力，因此只能就这些应力作比较。图 6 表示了用蒲氏风级所规定的气象级进行的这种比较，比较所用的值是对每一风级的正、负峰值间应力的平均均方根值。弯矩的均方根换算到应力的均方根通常是用船舶剖面模数进行的，波浪换算成风或蒲氏风级是用 Pierson-Moskowitz、Roll 和山内 (Yamanouchi) 建议的三个关系式进行的，[11]中概述了这些式子。利用每一个都有相应的有义波高的九个海浪谱，就有可能计算应力预报值的标准差，为了和测量的数据比较，这些标准差必须修正到得到基于风级测量的那些值。表 2 表示实船测量和按三个关系式换算的预报的标准差之间的比较。

在比较中(图 6)，Pierson-Moskowitz 关系式的应用导致最坏的结果，显然在这个关系式

表 2 垂直弯曲应力标准差与风力的关系

蒲氏风级 №	测量的偏差 千磅/平方英寸	Pierson-Moskowitz 公式 千磅/平方英寸	Roll 公式 千磅/平方英寸	山内 (Yamanouchi) 公式 千磅/平方英寸
1	0.400	0.550	0.374	0.309
2	0.400	0.549	0.414	0.322
3	0.425	0.604	0.435	0.405
4	0.475	0.639	0.430	0.457
5	0.500	0.738	0.516	0.498
6	0.500	0.938	0.668	0.621
7	0.625	0.973	0.758	0.786
8	1.000	1.134	0.997	0.935
9	0.575	1.489	1.225	1.145
10	0.500	1.421	1.403	1.251

中有一个接近于充分发展海况的倾向,而船遭遇的海况是在随机的发展过程中。所以根据这种风-浪换算关系并考虑到理论预报往往偏高的倾向,所得的分析值是大大高于测量的应力。Roll 和山内的风-浪关系式是根据观察到的波高并对有义波高作了修正的波高。从图 6 可看到,在营运中遇到的气象谱的下半部分看来是很相符的,在较高的海况下,理论分析所得的均方根应力平均值偏高,对于这种误差有几个可能的原因:一个可能的原因是由于线性化假定,因为在高海况中始终存在着极大的偏差;另一个原因是在测量时船的实际载荷状态和理论分析模型所选用的个别情况之间有一些差别;第三个可能的原因是由于在极端的气象条件下记录的数据不充分,或夸大了它们所报告的事件,或二者兼有。表 2 中给出了用标准差衡量的离散程度的比较,除了高海况记录的数量较少以外,表 2 的结果看来是合理的。

对中等和高的二种海况下长峰传海浪中垂直弯矩响应和短峰传海浪中合成弯矩响应间作了比较,图 7 表示了这些比较。可以看出,无论是中等还是高的海况中,短峰传海浪的合成弯矩总是比较高的,在高海况中它们的差别在 15%—20% 之间。

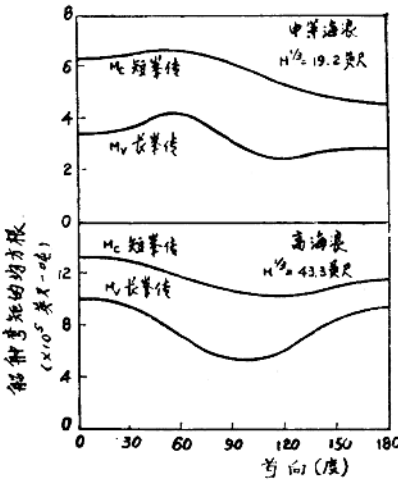


图 7 弯矩间的比较

表 3 说明按所有各个风-浪方向平均的短峰传海浪中响应的峰值-平均值(幅值)的均方根随速度的变化,这个表指出短峰传海浪中弯矩随速度变化很小,这些值不包括那些对速度很敏感的高频载荷。整理过的实船数据似乎可以证实这个观测,特别是低海况时。

按几种典型情况校核 Universe Ireland 号的合成弯矩响应的带宽参数 ϵ , 计算结果表明合成弯矩谱是比较狭带的,但不像单独的垂直和水平分量谱那样狭。合成弯矩谱的宽度很可能随船的尺度变化,因而现在还不能作出普遍的结论以肯定应用 Rayleigh “乘数”来预估各种尺度船舶的合成弯矩响应统计值是否合适。

一般情况下 ϵ 的值在 0 与 1 之间,从平均值量取的最大值的统计数据,例如在一样本总数中最高 $\frac{1}{n}$ 平均值,可由 Cartwright 和 Longuet-Higgins

表 3 在不规则海浪中速度对弯矩的影响

有义波高 英尺	速 度 节	单幅的垂直弯矩均 方根 M_v (英尺-吨)	单幅的水平弯矩均 方根 M_H (英尺-吨)	单幅的合成弯矩均 方根 M_c (英尺-吨)
$h = 7.4$	16	76,668	112,629	163,295
	12	72,738	110,631	159,227
	6	70,636	110,136	159,172
$h = 19.2$	16	473,399	490,273	829,528
	12	463,361	506,827	828,541
	6	453,427	510,401	820,420
$h = 43.3$	16	1,307,839	811,011	1,651,275
	12	1,146,911	845,107	1,657,771
	6	1,133,966	870,121	1,662,724

得出[7], 并表明在图 8 中(由[7] 摘录的)。一旦 ϵ 计算出来, 就可以用这些曲线预报合成弯矩幅的较高的平均值。当 $\epsilon \approx 1$ 时, 从式

$$E[\zeta_{\max}] = \sqrt{2m_0} \{ [\ln(1 - \epsilon^2)^{1/2} N]^{1/2} + 0.2886 [\ln(1 - \epsilon^2)^{1/2} N^{-1/2}] \}$$

就能计算出在 N 最大的样本中所期望的最大的 $E[\zeta_{\max}]$ 了。

可以从[13]中找到用[12]中叙述的方法对 Universe Ireland 号短期和长期的合成弯矩预报。对于短期分析, 要考虑到在船的航线中最坏的海况条件, 计算出的合成弯矩平均值为 459,800 英尺-吨, 垂直弯矩和水平弯矩分别为 246,800 英尺-吨和 288,000 英尺-吨。对于长期分析, 计算了船舶在整个航程中的合成波浪弯矩的平均值 646,800 英尺-吨, 垂直弯矩平均值为 155,700 英尺-吨, 在短期和长期二者的分析中, 由于船遭遇低到中等海况多于高海况, 所以水平弯矩比垂直弯矩大。可以用统计方法把静水弯矩加到合成弯矩中得到总弯矩。对正态分布的或是确定性的静水弯矩, 这样一种合成的过程在参考文献[12]中有所阐述。为了长期试验计划[5,14]服务的其他一些长期分析方法可以连同求合成弯矩的式(10)和(11)一起应用。

其他一些低频载荷的合成可能在设计中是感兴趣的, 例如平面主载荷和由作用在船体上的静水压力引起的次要载荷的合成作用, 特别在底部结构的板架分析中将是重要的。总的主要和次要应力 $\tilde{\sigma}_r(t)$ 为:

$$\tilde{\sigma}_r(t) = \tilde{\sigma}_{rP}(t) + \tilde{\sigma}_{rS}(t) = \sigma_0 + \tilde{\delta}(t) \quad (13)$$

其中:

$$\sigma_0: \text{总应力中不随时间变化(常数)部分} = \frac{M_{sw}}{S_v} + CP_{sw}$$

$$\tilde{\delta}(t): \text{总应力中随时间变化(随机)部分} = \frac{\tilde{M}_v(t)}{S_v} + C_{\rho\theta} \tilde{\zeta}(t)$$

C : 把水压力变换为应力的常数(在线性理论范围内), 假定板保持小的挠度。

常数 C 取决于板和加强材的几何特性以及材料性质, 并且可以由各种加强板线性理论来确定, 例如板架理论、正交各向异性板理论或有限元法。随机分量 $\tilde{\delta}(t)$ 是在平稳条件下平均值为零的正态分布, 因为它的二个分量即弯矩 $\tilde{M}_v(t)$ 和波浪标高 $\tilde{\zeta}(t)$ 都是平均值为零的正态分布。

总应力 $\tilde{\sigma}_r(t)$ [或 $\tilde{\delta}(t)$] 的方差 σ_{δ}^2 可以用频域分析及式(10)和(11)确定, 在长峰传海浪中方差为:

$$\sigma_{\delta}^2 = \frac{1}{S_v^2} \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) |H_v(\omega)|^2 d\omega + (C_{\rho\theta})^2 \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega + 2 \frac{C_{\rho\theta}}{S_v} \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) H_v(\omega) d\omega \quad (14)$$

$$= \sigma_{M_v}^2 + \sigma_{\zeta}^2 + 2\rho_{LM_v} \sigma_{M_v}^1 \sigma_{\zeta}^1 \quad (15)$$

比较(14)和(15)式中各项或用式(12)决定主要弯曲应力的方差 $\sigma_{M_v}^2$ (由垂直弯矩产生的)、次要应力的方差 σ_{ζ}^2 和相关系数 ρ_{LM_v} , 平均值 σ_0 和方差 σ_{δ}^2 完全确定了总应力 $\tilde{\sigma}_r(t)$ 的正态分布。如果需要, 水平弯矩的作用也可用式(10)加以考虑。

为了计算长峰传海浪中垂直弯矩的复数系统函数 $H_v(\omega)$ 和按(14)式的总应力方差, 编制了

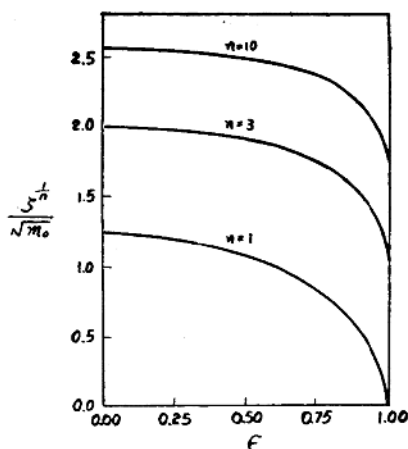


图 8 在样本中最高的 $1/n$ 的平均值

TOST (总应力)电算程序[15], [15]中给出了把这个程序用于 Mariner 级船的一些例子, 这些例子表明在主要应力和次要应力之间存在很高的相关性 ($\rho_{\text{LTV}} = 0.7 \sim 0.78$), 因而在分析中是不能忽略的, 同时还表明船速对相关系数影响很小。

三、波激振动和低频波浪诱导力矩

在船上波激振动现象公认为是一种高频载荷, 这种高频载荷是由于最低的主垂直振动(二节点)通过出现在海浪谱高频范围内的能量激发而发生的。这种海浪载荷的形式对一阶频率值比较低的大船和遭遇频率较高的快速船是特别重要的。在低的和中等的海况中, 当低频波浪诱导弯矩比较小时, 波浪载荷中的波激振动部分变得大了, 因此在设计过程中应当考虑反映这种情况。这种“连续的”高频载荷在疲劳裂缝传播分析中可能是特别重要的。

有些迹象表明, 运行在大湖中的大船, 高于二节点的主振动是由高频波浪能量激发的, 事实上试验数据[16]似乎表明三节点主振动有利于总弯矩响应[⊖]。由于这个理由, 本文把波激振动定义为高频载荷, 它是由二节点及二节点以上的波激垂直主振动而产生的。

除了前述的二节点和二节点以上主振动外, 应当注意与升沉及纵摇有联系的“刚体”的主振动频率 ω_{-1} 和 ω_0 , 在理想的均匀梁的情况中, 这些主振动形式是没有被歪曲的, 因而只与纯粹的升沉和纯粹的纵摇运动有关(或者和它们的线性合成有关), 相应的自然频率 ω_{-1} 和 ω_0 是相等的。在实船情况中, 这些主振动的形式是受歪曲的, 因而自然频率也不相等。不过, 正如以后将指明的, 这种歪曲和自然频率的差别是小的。

由于若干原因船体振动的另一些形式如水平振动和扭转振动在波激振动分析中常常是不考虑的, 垂直主振动的自然频率通常比水平和扭转振动低, 而激振的振幅比较高。此外, 由于船舶纵向对称于垂直平面, 垂直主振动不受水平和扭转主振动的影响, 所以这儿只考虑垂直主振动。

波激振动的预报和其他的船舶振动现象一样很大程度上取决于自然频率和主振动形状的精确估算, 在波激振动情况下, 标准的主振动解的级数中仅有限的项对总响应有明显影响, 幸而在这个频率范围内船舶保持类似梁的性质, 而且求解这种特征问题时, 可以利用具有剪切和弯曲挠度的完全自由不均匀梁的模型。不过, 对于较高阶主振动及自然频率, 必须考虑计及船体局部振动部分的三元模型, 在参考文献[17, 18]中给出了对这个问题的评论。

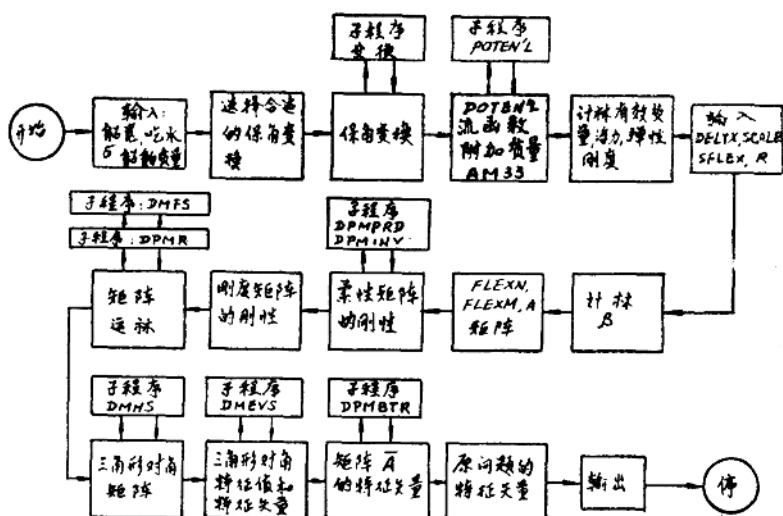
为了初步设计阶段使用, 推导了计算低阶垂直主振动[⊖]的相应频率 ω_{-1} 、 ω_0 、 ω_1 和 ω_2 的完全自由梁的电算法, 所编的 EIGEN-V 电算程序采用了质量集积法(lumped-mass technique), 即认为船舶的弹性特征沿船长的间距内为常量, 而质量则集结在这些间距的端点。此外, 还规定了与浮力成比例的、有一定刚性的弹性支座也位于间距的端点。集积质量包括船舶在水中垂直振动引起的附加质量。包括集积质量在内的弹性元件反映了船舶的弯曲和剪切刚度, 但是忽略了转动惯量的影响。

剖面的附加质量用势流理论计算, 用两个参数把船的横剖面变换为 Lewis 形状或球状。因为附加质量是随频率变化的, 当预先不知道自然频率时, 为了保证附加质量的精确性用了迭代过程。通常情况下用汇编各种不同构件的刚度编制系统的刚度矩阵。

编好刚度矩阵后, 问题就化为:

⊖ 因为在三节点主振动时拐点出现在船艏附近, 它对总弯矩的影响是小的。

⊖ 对较高阶的主振动, 如果需要, 可用三元有限元电算程序 SAP[19]。



$$[K]\{X\} = [M]\{X\}[\Lambda] \quad (16)$$

对照几艘船上的测量数据检验 EIGEN-V 程度, 用这个程序计算了几艘海船和大湖船的 0、1、2 和 3 节点主振动的波形和自然频率。表 4 给出了所研究的几艘船的一般特性, 图 10、11 和 12 分别表示 Fotini L 号、Universe Ireland 号和 Mariner 级船的主振动形状和自然频率。为了比较, 这个程序也被用于计算具有和 Mariner 级同样主尺度、舢剖面惯性矩相等且质量相同的等截面梁的自然频率和主振动波形, 图 12 表示了均匀梁的主振动波形及自然频率, 以便和 Mariner 级的结果作直接比较。船舶上实际存在的不等截面性质使得在 -1 和 0 阶主振动中引起了很小的改变(很难看到, 但是存在), 而且相应的自然频率与等截面梁在这种情况下频率也不相等。表示在图 12 中的 Mariner 级的实测主振动波形取自参考文献[20]。

表 4 一般特性

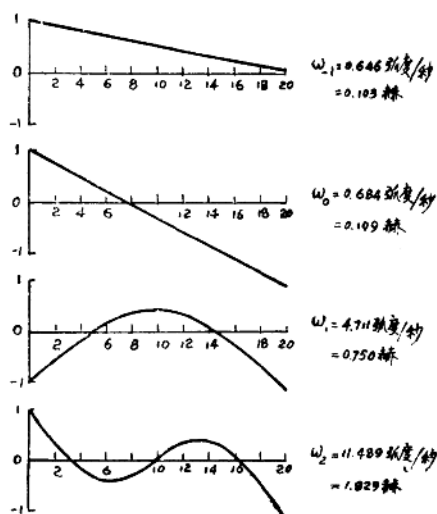


图 10 MS Fotini——压载状态

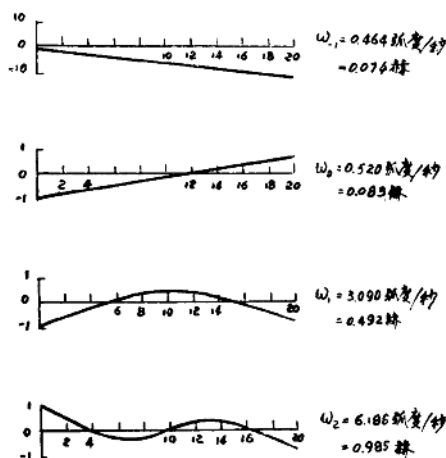


图 11 SS Universe Ireland——满载状态

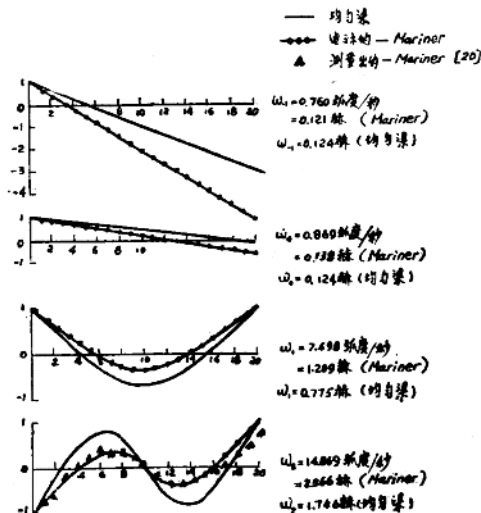


图 12 Mariner 级——重载状态

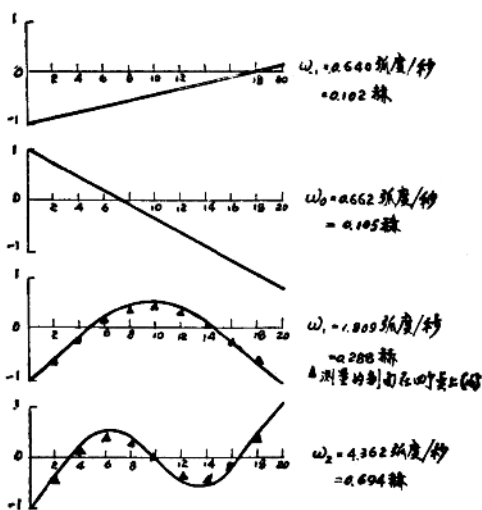


图 13 Stewart J. Cort——满载状态

还表示了取自[16]的 Stewart J. Cort 号所测得的主振动波形。表 5 给出了测量的自然频率(从实船数据中选取的数据, 任何时候都是有用的)和那些用 EIGEN-V 程序所计算出的频率之间的比较。用严密的理论及 EIGEN-V 程序决定的等截面梁的频率也列入表中以便与 Mariner 级的频率比较。Mariner 的实测频率取自文献[20]。

实测自然频率和计算值之间十分一致, 相差的百分数始终低于 8%, 而且大多令人满意地在 5% 以内。主振动的形状与计算值也很符合(见图 12 和 13)。这些结果表明, 为初步设计目的两端自由的不等截面梁的集积质量模型在预报低阶主振动形状和频率方面是足够精确的。这些结果也可用作波激振动的标准波形分析的输入。下面将讨论这个问题。

表 5 测量的和计算的自然频率之间的比较

船 名	状 态	主 振 动 形 式	计算的频率(赫)	测量的频率(赫)
Fotini L	压 载	二 节 点	0.70—0.75	0.70—0.74
Universe Ireland	压 载	二 节 点	0.49	0.52
Mariner	重 载	0 节 点	0.12	
		1 节 点	0.14	
		2 节 点	1.21	1.33
		3 节 点	2.37	2.57
均 匀 梁	与 Mariner 相似	0 和 1 节点	0.12	0.12(精确值)
		2 节 点	0.78	0.76(理论值)
SS Charles M Beeghly	轻 压 载	2 节 点	0.46	0.48
	满 载	2 节 点	0.43	0.46
MV Stewart J. Cort	压 载	2 节 点	0.32	
	重 载	2 节 点	0.29	0.31
		3 节 点	0.69	0.72

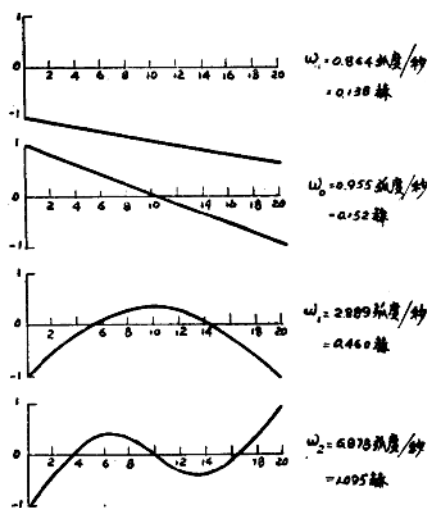


图 14 SS Charles M. Beeghly——轻压载状态

当研究船舶对波浪的响应时，通常假定船舶如像刚体一样呈现线性反应，因而船舶对波浪的响应可由船舶在组成不规则海况的各规则波分量的单独响应迭加而成。只要船体是足够刚性的，其自然频率在海浪谱上能量出现的范围以外，则有关刚体的假定是说得过去的。随着具有低自然频率的柔性船和遭遇频率高

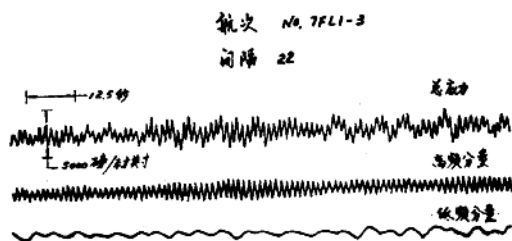


图 15 应力时历的样本——Fotini L

的快速船的发展，这个假定就不合理了。这样一些船能够吸收能量，并能对波浪的高频分量弹性地响应。图 15 表示 Fotini L 的总应力时历的样本及整理过的低频和高频分量^①。

在研究船舶的响应时，本文所用的标准主振动波形的处理计入了船体挠度的影响。波激振动被看成是一种常见现象，当遭遇频率接近于船的自然频率时，这种现象变得特别明显。

波激振动和一般波浪弯矩两者都具有同样的公共输入(即波浪)，因而可以看作为平稳正态随机过程。前一节介绍的统计模型是可以用的，并且可以用式(5)和(6)来决定总应力方差 σ_{σ}^2 。对长峰传海浪，这个方差为

① 必须注意高频分量的连续性，这种连续的特性表示激力的非瞬时特性，这种响应多半是由于波激振动而不是由于砰击。