

近海结构动力分析

〔英〕 C. A. 布雷比亚 著
S. 瓦 尔 克



海洋出版社

P734
B.02

近海结构动力分析

〔英〕 C.A.布雷比亚 著
S.瓦尔克

边启光 译

陆焕生 校

海洋出版社

1984年·北京

DU61/69
内 容 简 介

本书用于解决海洋采油平台结构设计中的动力分析问题。书中首先从概率方法的基本原理讲起,继而讲述海况描述与动力分析中所需的理论,以及结构反应的随机振动分析方法。第三章阐明波浪的流体力学和波浪的预报技术,以确定海况描述的统计参数。第四章讨论细长杆件(如钢架式结构中的杆件)的波力计算(用莫里森公式)。第五章扩大讲述绕射理论在计算大直径物体(如混凝土重力式平台中的构件)波浪力方面的应用。第六章描述海流与风的作用,从而结束环境力的讨论。第七章是振动理论的概述,其中包括了对谱方法的介绍。第八章则将振动理论引伸于多自由度的结构,并简要介绍结构反应的矩阵分析方法。在最后的第九章则报道了一些研究情况,并讨论了疲劳问题和土壤与结构相互作用的问题。

本书可作为海洋石油建筑工程专业的大学生、研究生的教材使用,也可供海洋建筑物以及石油平台设计、建造的科研和企业单位的技术人员参考使用。

**Dynamic Analysis of
Offshore Structures**

C.A. Brebbia S. Walker

Newnes Butterworths, London, 1979

近海结构动力分析

[英] C.A. 布雷比亚 著
S. 瓦 尔 克

边启光 译

陆焕生 校

海洋出版社出版 (北京市复兴门外大街)

新华书店北京发行所发行 轻工业出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 11¹/₂。字数: 250千字

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷

印数: 2000

统一书号: 13193·0272 定价1.90元

前 言

深水海域大量油气藏的发现，促进了大型钻采平台的兴建，这些大型平台往往要经受严酷海域的恶劣环境条件的考验。它们的自振周期又往往与环境外力的典型振动周期相接近，这就必须进行动力的谱分析。

本书首先从概率方法的基本原理讲起，继而讲解海况描述与分析中所需的理论，以及结构反应的随机振动分析方法。第三章讲解波浪的流体动力学；介绍波浪预报技术；确定有关海况描述的统计参数。第四章讨论细长杆件（如钢构架式结构中的杆件）的波力计算（用莫里森公式）。第五章扩大讲述绕射理论在计算大直径物体（如混凝土重力式结构中的构件）波力方面的应用。第六章描述海流与风的作用，从而结束环境力的讨论。

第七章是振动理论的导论，其中包括对谱方法的叙述。第八章则将该理论引伸于多自由度结构，并简要介绍结构反应的矩阵分析方法。最后在第九章报道一些研究情况，并讨论疲劳问题和土壤与结构的相互作用问题。

本教科书适合作为高年级大学生或研究生水平的海洋结构分析课的一年教程，它对在职的结构、土木、海洋工程师们也会有用。

（下略）

C.A. 布雷比亚

S. 瓦尔克

目 录

第一章 导论	(1)
1.1 引言.....	(1)
1.2 海况.....	(3)
1.3 波浪力.....	(6)
1.4 分析方法.....	(10)
第二章 概率方法基础	(14)
2.1 基本概念.....	(14)
2.2 二维概率函数.....	(25)
2.3 n -维概率密度函数.....	(27)
2.4 自相关与谱密度函数.....	(28)
2.5 自相关与谱密度的关系.....	(36)
2.6 窄带过程与宽带过程.....	(38)
2.7 跨越分析.....	(45)
2.8 峰值分布.....	(50)
2.9 一般过程的最大值.....	(52)
2.10 宽带情况.....	(56)
2.11 最大值分析, 有限样本.....	(64)
2.12 威布尔分布.....	(66)
第三章 海浪与海况	(69)
3.1 引言.....	(69)
3.2 表面波.....	(70)
3.3 波浪数据分析的统计方法.....	(89)
3.4 波浪预报技术.....	(98)
第四章 细长构件上的力	(121)

4.1	动态力	(121)
4.2	固定细长杆件上的波浪力	(129)
4.3	运动杆件上的波浪力	(146)
4.4	惯性力系数的计算	(150)
4.5	地震效应	(154)
第五章	绕射问题	(159)
5.1	引言	(159)
5.2	关于绕射问题的波浪理论	(163)
5.3	独立柱上的波力	(174)
5.4	柱群	(186)
5.5	潜体	(191)
5.6	数值解法	(200)
5.7	柱体运动的影响	(209)
第六章	流与风的效应	(212)
6.1	引言	(212)
6.2	海流	(215)
6.3	大直径杆件	(218)
6.4	细长杆件	(226)
6.5	冲刷	(239)
6.6	风特性	(243)
6.7	风荷载	(248)
第七章	单自由度体系的反应	(259)
7.1	引言	(259)
7.2	有阻尼体系的强迫振动	(264)
7.3	复反应法	(268)
7.4	谱密度法	(270)
7.5	近似解法	(271)

7.6	单自由度体系分析的应用	(274)
第八章	多自由度体系的离散化	(285)
8.1	引言	(285)
8.2	梁单元公式建立	(286)
8.3	板单元	(300)
8.4	体系反应	(307)
第九章	海洋结构物的反应	(316)
9.1	引言	(316)
9.2	单柱	(319)
9.3	多腿重力式结构	(323)
9.4	格式结构	(329)
9.5	疲劳分析	(331)
9.6	土壤—结构的相互作用	(337)

第一章 导 论

1.1 引 言

目前，海上结构物的建造水深越来越大，因此需要对结构物的设计方法重新给予评价。自从二十世纪四十年代以来，在深水中修建固定式海上结构物的趋势一直在稳步增长（图1.1）。在圣巴巴拉海峡260米水深建起的钢固定平台，以及为墨西哥湾300米水深设计的一个平台就是两个突出的实例。随着在1000米左右水深进行勘探而出现的新型设计还

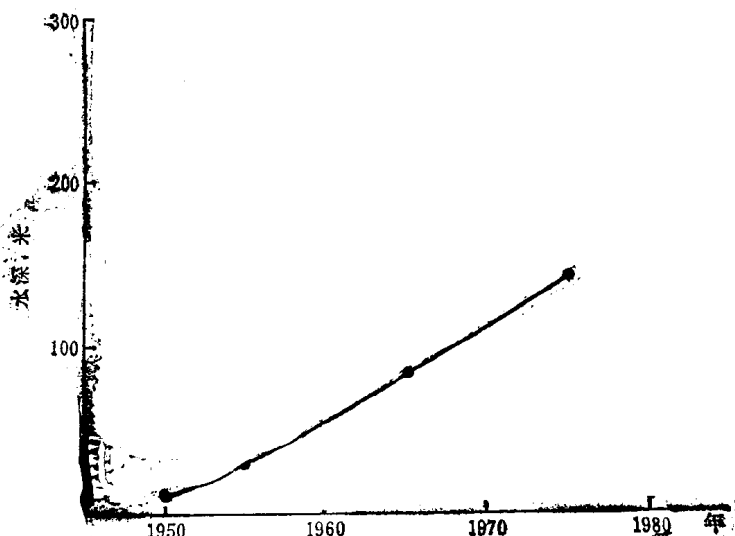


图 1.1 海上结构最大水深的持续增长

表明，海上平台的尺寸将会加速增大。

重要的问题在于：我们的现有知识在深水结构分析方面能引伸到何等地步；以及我们对于那些能对结构反应给出较好估计的最新分析方法掌握得如何。

我们应当特别注意了解各分析过程中存在的缺点。现行的设计方法都是从取用风候、波候以及其他力的估计值着手（图1.2），而这些估计值可能很粗略。随后须把这些估计

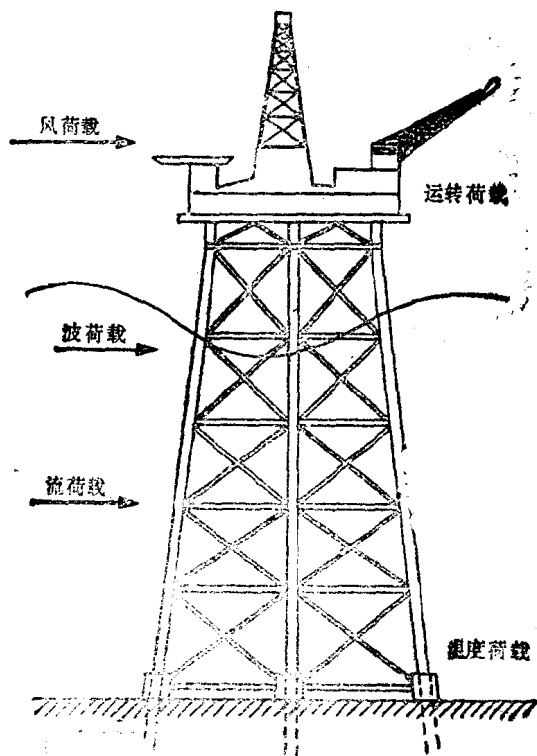


图 1.2 作用于近海结构物的荷载

值转变为作用于结构物的荷载，于是就把最初的误差引入分析之中。对线性体系来说目前能够精确地决定（使用计算技术）此荷载所产生的结构反应。主要的误差发生于对结构疲劳寿命及土壤特性的估计中。有关这两个问题的设计指导文件现在很少，也不大可靠；这是由于试验数据不足和缺乏适当的分析方法的缘故。

除了上述这些不精确性之外，还应考虑到构造上与材料上发生重要变化的可能性。

本书的目的是要向分析人员提供海洋结构分析的现代技术的评价，并指出设计过程中的主要误差来源。

1.2 海 况

近海结构对波浪荷载的反应，是分析中的最重要的内容。波浪是结构荷载的最主要来源，并且随时间而变，因此会产生动力效应，而此动力效应是趋向于增加应力数值并损害结构的长期性能。

我们可用波浪预报方法来决定结构寿命期内遇到的海况，尤其是最不利条件下的海况，这个海况通常与百年重现期的风暴相对应。要决定结构的最大应力及位移，就须了解最不利的可能风暴；而知道了所有海况，就能计算长期统计特性。这些长期统计特性通常是更为重要的，因为，最大应力仅仅发生在平台寿命的很短时期中。

第三章将评述海况的确定问题，但在图1.3中也概括了两种确定海况的主要方法。这两种方法所需要的最低限度的资料是风分布图或风玫瑰图。风玫瑰图（通常按蒲福风级表给出）可以转变成波散布图（通常把风及其延时间海况的基本参数即有效波高及平均跨零周期相联系）。这个转变可借

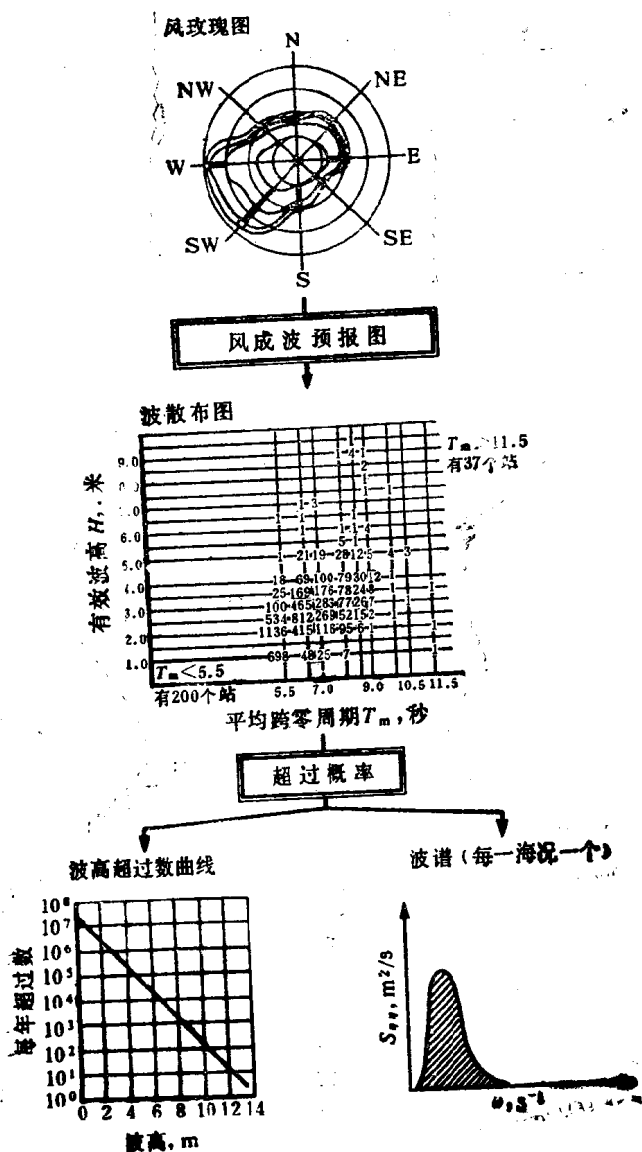


图 1.3 海况的分析

达比希尔 (Darbyshire)、德雷珀 (Draper) 等人提供的曲线来实现 (见第三章), 其中考虑了风区与风时。由波散布图又可得到波高超过曲线 (波高累积曲线) 或波谱密度曲线。

把波高对波数的关系画在半对数纸上, 便得到波高超过曲线。其结果可用一条直线来逼近。此曲线图可按所有的波, 或按某一特定方向的波来绘制。(波的方向性对疲劳计算是重要的, 因为它可给出较低的长期损害估计值)。将此结果外延, 可决定某一指定重现期的最大波。由波散布图也能得到波高对周期的关系曲线, 把它画在半对数纸上, 也接近于一条直线; 由此结果可推出某指定重现期的最大波。

完全的预测过程需要使用风生波的预报曲线, 并要求波高超过概率能用严格的数学式表出 (通常表为雷利 (Rayleigh) 型概率函数)。

在谱方法中不使用波高超过曲线, 而是把波散布图所示各个海况均转变成谱。然后再用这些谱来研究某概率的体系反应。谱方法一般来说适用于充分成长的风浪, 尽管有的也不是这样。其中的误差来自具体谱形式的选取 (见第三章)。应当注意, 比谱的最大值的差异更为重要的乃是谱的高频部分 (谱的尾部) 的差异, 也就是对结构反应更有影响的那部分的差异。此外测得的谱并不是单峰的, 而是带有一系列较高频率 (通常数倍于最大峰频率) 的次峰。这些次峰, 也对反应有一定影响, 但通常忽略不计, 并用一条光滑的解析曲线来代替。

谱方法可用来决定最大反应 (使用百年波的波谱)。一旦完成概率分析并求得反应的标准差, 就可将它乘以一个常数 $\pm \lambda$ (对高斯过程, 一般取 3 至 4), 从而得到某一概

率的最大反应。另一种可能，是考虑记录延时，即风暴延时，然后再用第二章给出的公式来计算期望反应。

1.3 波浪力

确定波浪作用于结构的力，是一项很复杂的工作，即使对细长杆件也是这样。在分析中，波浪可用不同理论的解析式来描述，但它们可能产生无法用简单解析方法处理的特殊作用（如对于结构杆件的冲击与拍击作用）。在波浪的运动特性受到结构影响的情况下，结构与波浪的相互作用也会产生波力。

从海洋结构设计者的观点来看，对结构与波浪相互作用引起的不同波力状态加以区分是重要的。现将它们概括如下：

- 1) $d/\lambda > 1$ (d = 直径，或特征尺寸； λ = 波长)，情况接近纯反射；
- 2) $d/\lambda > 0.2$ ，绕射愈加重要；
- 3) $d/\lambda < 0.2$ ，绕射可以忽略；
- 4) $d/\omega_0 > 0.2$ (ω_0 = 轨道宽度参数，在深水中等于波长)，惯性力占优势；
- 5) $d/\omega_0 < 0.2$ ，拖曳力较重要。

确定上列任一状态中的力，可分为两个基本步骤：第一步，从水面高程着手，采用某一波浪理论进行流场运动学的计算；第二步，应用莫里森公式或者绕射理论确定流体的动力。

莫里森 (J.R. Morison) 等人 (见第四章) 推导出了一个表示细长柱上单位长度总波力的公式。此公式包括惯性力分量与拖曳力分量，即

$$F(t) = C_I \dot{v} + C_D v |v| \quad (1.1)$$

波力的方向与波前进方向相同；水质点速度 v 与加速度 $\dot{v}$ ，按柱体轴线处计算。 C_I 是惯性力常数，它由两项组成：一项来自水动力质量的影响；另一项来自加速流内压力梯度的改变，即

$$C_I = C_M + C_A = C_m \frac{\rho \pi D^2}{4} + \rho A \quad (1.2)$$

式中 C_m = 断面的水动力系数， A = 横断面面积。于是，每单位长度柱体上的惯性力可写成：

$$F(t)_{\text{惯}} = C_I \dot{v} = C_M \dot{v} + C_A \dot{v} \quad (1.3)$$

C_I 的值随断面形状而变。即使对同样的形状（如圆柱体），其实验数值也有将近 50% 的变化。

当考虑柱体的运动时，则式 (1.3) 写成：

$$F(t) = C_M (\dot{v} - \dot{u}) + C_A \dot{v} + C_D (v - \dot{u}) |v - \dot{u}| \quad (1.4)$$

其中第一项是附加质量项，即水动力质量项，它随柱体的运动而定。第二项是惯性项，它反应液体中流线的变形，并被认为同结构加速度无关。

曳力项是上列表达式中唯一的非线性项。为了使之线性化，可假定速度符合于零均值高斯 (Gauss) 分布 (见第四章)。于是给出：

$$F(t) = C_M (\dot{v} - \dot{u}) + C_A \dot{v} + \sqrt{(8/\pi)} \sigma C_D (v - \dot{u}) \quad (1.5)$$

式中的标准差 σ 适合于 v 或 $\dot{u}$ ，但当用 $(v - \dot{u})$ 取代 $\dot{u}$ 时，高斯分布假定就不对了，在此情况下，一般要用迭代法求得 $\sigma(v - \dot{u})$ 。

如果在计算中不用迭代改进值而取初始值 σ_i ，那么，

在曳力效应具有重要影响的海洋结构分析中，就会造成误差。

对于系数 C_I 与 C_D 的取值，是莫里森方程应用中的两个误差来源。根据水质点速度及相应波力的量测而得出的 C 值，具有24%的标准差，惯性系数具有22%的标准差。即使取这些较低的标准差，所得反应值的变化也很大。例如，对只有惯性力的情况采取 $C_I \pm 3\sigma_I$ ，则反应的差异可达 $\pm 66\%$ 。

对于莫里森方程中的速度与加速度，使用不同波浪理论来计算，则是误差的又一个来源。不同的理论给出的波浪力，其大小变化虽然不大，但波力-时间曲线的形状却不相同。图1.4画出了用线性爱丽(Airy)波理论与斯托克斯(Stokes)五阶波理论算得的标准化的波力。五阶理论的曲线形状与正弦波很不相同，而且它的不对称性将在小波效应趋于放大的动力反应中产生次峰。

对于不适用莫里森方程的大型构件而言，绕射是一个重

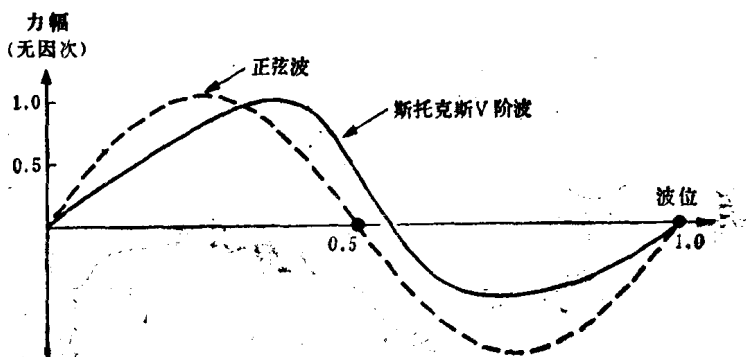


图 1.4 波力曲线的形状，关于 $H=22.5$ ， $T=12$ 秒的波

要效应。它是因结构的存在扰动了流场而产生的。结构的存在会引起波浪扩散；在结构构件处于纯惯性作用下，绕射理论的建立就以势流为根据。总速度势由入射势与绕射势之和给出。这两个流场须满足边界条件。最终结果是一个不同于波未扰动时的力分布。图1.5是以力谱密度形式给出的结果。此结果是很重要的，因为处于100—150米水深的多数大直径结构的自然频率都在 $\omega=1.5$ (重力式)至3.0(钢平台)范围内。接近表面的构件直径，重力式结构的可达10米，钢结构的可达2米。为了说明绕射的重要性，我们对于10米水中的—个12米直径的柱体，分别按照考虑与不考虑绕射来计算甲板位移，结果相差100%。考虑绕射时位移较小，因此，在若干情况下对绕射不考虑。然而，绕射对重力式结构的基座及其他组件而言具有根本性的重要意义。一般是把它作为线性问题处理，但它是强烈依变于频率的。第二章将详细讨论绕射理论。

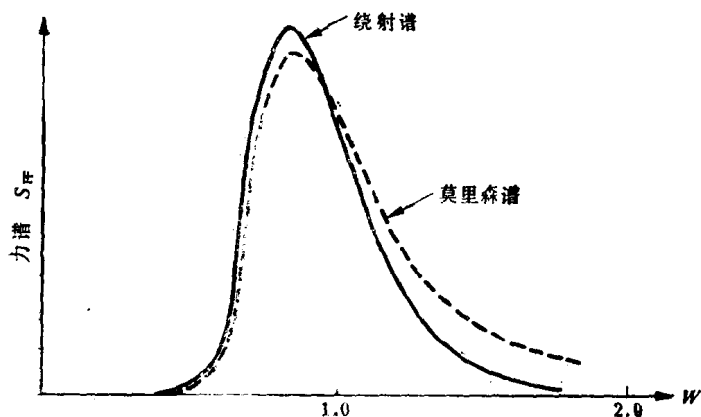


图 1.5 绕射谱与莫里森谱的对比

1.4 分析方法

分析方法，大概是设计过程中较可信赖的部分，因为近来在计算力学方面已有不少进展。然而面临各种方法，分析者还有一个选择问题。图1.6概括了可供选择的最重要方法。

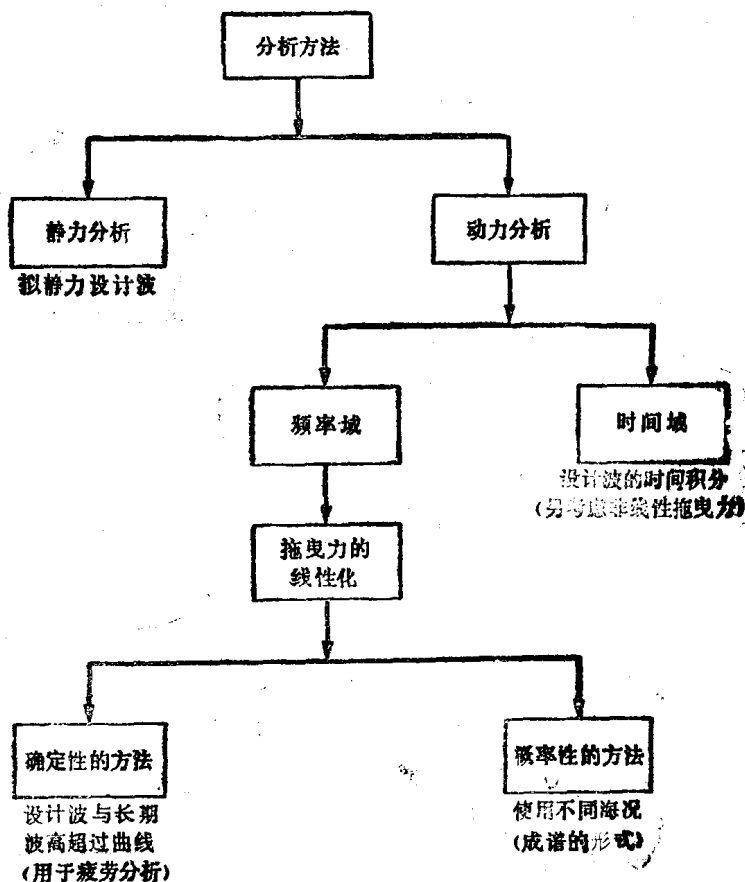


图 1.6 分析的方法