

马明根 主编

近海工程设计与计算

同济大学出版社
TONGJIDAXUE CHUBANSHE

近海工程设计与计算

马明根 主编

同济大学出版社

(沪) 204 号

内 容 提 要

本书全面论述了海洋结构的设计荷载、结构的静力分析、结构杆件的强度和稳定计算、管结点的设计方法和疲劳分析,以及平台结构的动力分析等内容。

本书介绍适合于微型计算机使用的海洋钢结构的设计和 分析程序的理论基础、源程序清单、程序的使用方法以及计算实例。全书内容是以国际上通用的API规范(美国石油学会规范)最新版本的相关条文为依据而编写的。全书内容完整、新颖,文字比较简练,反映了国内和国际上海洋钢结构平台设计和计算分析的最新内容和研究成果,本书可供海洋工程科学工作者和大专院校土建专业师生参考之用。

责任编辑 曹炽康

封面设计 王肖生

近海工程设计与计算

马明根 主编

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

上虞科技外文印刷厂排版

同济大学印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张 10.5 字数: 264 千字

1992 年 3 月第 1 版 1992 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 定价: 16 元

ISBN 7-5603-0987-1/TK·5

浙江省长兴县长桥保温材料厂

经 营 范 围

膨胀珍珠岩散料；

膨胀水泥珍珠岩、沥青珍珠岩、水玻璃珍珠岩、憎水珍珠岩、防水树脂珍珠岩、乳化沥青珍珠岩等制品。

产品规格齐全，特殊要求可另行加工。

国家重点工程：长兴发电厂、镇海发电厂。
浙江省重点工程：省化纤二厂、民生制药厂、东风酒厂。上海市重点工程：大中华橡胶厂30万套子午胎车间。以上各重点工程均采用本厂的保温材料。

本厂承接各种保温材料的现场施工。

厂址：浙江省长兴县长桥(姚家桥)

联系人：肖连根

电话：长兴 24992—12 电挂：0202

邮政编码：313114

前 言

自本世纪 40 年代在墨西哥湾出现第一座钢质海洋平台以来,在世界范围内掀起了海洋石油开发的高潮,从而促使海洋石油生产和海洋工程技术的迅猛发展。

处于海洋环境中的构筑物,承受着恶劣的环境荷载作用,给从事海洋工程设计和计算的工程技术人员带来了极大的困难。从 1985 年以来,在胡瑞华教授的指导下,以 API(美国石油学会)规范的最新版本为依据,并参阅了国内外海洋钢平台的设计与计算的最新成果和文献,作者与同事们开始了海洋工程结构的设计计算软件的开发。这些软件经南海东部石油公司等单位的多次应用,不断地加以改进而日趋完善。

考虑到目前微型计算机较为普及的这一事实,因此软件是在微机上进行开发的,它适合于中小型海洋平台结构的静、动分析和设计,也更适合于对工程的方案筛选和概念设计之用。软件只要略加修改便可移植到大型计算机上,使之适合于大型海洋工程结构的设计与计算。当然,经一定修改后,软件亦可为从事土木、水利等方面的科技人员采用。

编写本书的目的主要在于介绍本软件的应用。每章在介绍基本理论后,便以较详细的例题或计算实例来加深理解,便于读者使用本软件。

本书由马明根编写第一、二、三和四章,翁秀玲编写第五章。全书由马明根主编。

作者于本书出版之际要感谢指导本项软件开发的胡瑞华教

授，他对整个软件的开发工作进行了精心指导并亲自参加了软件的开发，最后对书稿又进行了多次悉心审阅，并提出了重要的修改意见；作者借此机会还对参加部分软件早期开发工作的李健潮、李新、诸国栋和吴苻深表谢意。

期望本书能对读者有所裨益。热忱欢迎读者对本书的不足之处给予批评指正。

作者

1991年9月

目 录

第一章 荷载	1
第一节 环境荷载	1
一、风荷载	1
二、冰荷载	2
三、波浪荷载	3
四、海流荷载	4
五、地震荷载	5
第二节 波浪荷载计算	6
一、波浪理论简述	6
二、波浪力	14
三、等效结点荷载	18
第三节 例题	18
第四节 计算机程序	31
一、程序框图	32
二、输入数据与输出结果说明	32
三、算例	35
四、源程序	37
第二章 静力分析	78
第一节 基本原理	78
一、杆件单元刚度方程	78
二、桩单元刚度方程	82
三、结构(包括杆件和桩)刚度方程	87
四、静力求解过程	89
第二节 例题	90
第三节 计算机程序	103
一、程序框图	103
二、输入数据与输出结果说明	103
三、算例	106

四、源程序	111
第三章 杆件强度与稳定计算	133
第一节 许用应力	133
一、许用抗拉应力	134
二、许用抗压应力	134
三、许用抗弯应力	137
四、许用抗剪应力	138
五、局部屈曲临界应力	138
第二节 杆件的强度与稳定校核	139
一、管形杆件受轴向压力和弯矩的共同作用	139
二、管形杆件受轴向拉力和弯矩的共同作用	142
三、例题 3.1	142
四、静水中管形杆件的稳定性计算	145
五、例题 3.2	148
第三节 加劲环与锥形接头	150
一、等截面管形杆件的加劲环计算	150
二、锥形连接	151
三、例题 3.3	153
第四节 计算机程序	156
一、程序框图	157
二、输入数据与输出结果说明	157
三、算例	160
四、源程序	162
第四章 管结点设计与应力校核	166
第一节 管结点的静强度设计方法	167
一、管结点类型	167
二、简单管结点	168
三、搭接管结点	178
第二节 管结点的疲劳设计	180
一、API 的简化疲劳设计方法	180
二、Kung、Potvin 和 Leick 设计方法	183
三、API 设计方法和 Kung 等人设计方法的管结点校核步骤	185
第三节 管结点的构造	189
一、简单管结点	189

二、搭接管结点.....	189
第四节 计算机程序.....	190
一、相贯线长度计算.....	191
二、管结点设计程序框图.....	195
三、输入数据与输出结果说明.....	195
四、算例.....	195
五、源程序.....	193
第五章 海洋结构动力分析.....	225
第一节 确定性动力响应分析.....	225
一、基本原理.....	225
二、[K]、[M]、[C]矩阵的建立.....	225
三、Wilson- θ 法求结构的动力响应.....	230
四、计算机程序.....	234
五、算例.....	238
六、源程序.....	244
第二节 随机动力响应分析.....	275
一、基本方程.....	275
二、等效线性化方法.....	275
三、海浪谱.....	276
四、波浪力谱密度.....	279
五、随机动力响应的解.....	279
六、[K]、[M]和[C]矩阵的建立.....	282
七、计算机程序.....	284
八、算例.....	288
九、源程序.....	299
参考文献.....	322

第一章 荷 载

海洋结构物在进行响应分析以前,应根据建造和使用期间结构物可能受到的荷载进行定量分析。这些荷载通常可分为三类:环境荷载、使用荷载和施工荷载。环境荷载是指海洋结构物在建造和使用期间由风、浪、流、冰和地震等自然环境条件引起的荷载。使用荷载是指海洋结构物在使用期间除环境荷载以外的其它荷载。例如,对于海上钻(采)平台有结构自重、结构水下部分的浮力以及各种设备器材等在使用过程中可能影响结构或构件的荷载。施工荷载是指海洋结构物在建造过程中受到的荷载,例如,在结构建造过程中出现的吊装、装船、运输力以及下水和扶直时对结构或构件有影响的荷载等。

通常环境荷载和使用荷载是结构物设计的依据,而施工荷载则用来对结构或构件进行校核。

本章将简要介绍各种环境荷载的计算方法,并重点介绍海洋桩基钢平台上波浪荷载的计算,最后给出计算例题和计算程序。

第一节 环境荷载

一、风 荷 载

风产生于空气的运动,它可以由地球的重力、偏转力或风路径转变的离心力所引起。由于风具有动能,当结构物位于风经过的位置时,则风在运动路径中受阻或改变方向,这时风的运动就转变成压力势能。风自由流动受阻引起的压差在结构上便产生了风力。风力的大小同风速、受风面积和受风物体的形状有关。

结构上作用的风荷载严格讲应是动力问题，但在工程计算中往往把风荷载看作等效静荷载。根据实验，作用在结构上的风荷载可以下式表示：

$$F = \frac{1}{2} \rho_a C_s A_p V^2 \quad (\text{N}) \quad (1.1)$$

当考虑空气密度 $\rho_a = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 时，根据上式，API 规范中风荷载的计算公式为

$$F = 0.0473 V^2 C_s A_p \quad (\text{N}) \quad (1.2)$$

式中 V ——风速 (km/h)；

A_p ——物体垂直于风向的轮廓投影面积 (m^2)；

C_s ——形状系数，对梁取 1.5，建筑物侧面取 1.5，圆柱体侧壁取 0.5。平台总投影面积取 1.0。

API 规范中风荷载沿高度的变化按下式考虑：

$$V = V_{10} (y/10)^x \quad (\text{km/h}) \quad (1.3)$$

式中 V_{10} ——在水面以上 10 m 处的风速 (km/h)；

y ——水面以上风荷载计算点的高度 (m)；

x ——指数，通常在 1/13 和 1/7 之间，由海况、离岸距离以及设计风速的持续时间来确定：当阵风时 $x = 1/13$ ，持续风时 $x = 1/8$ 。

对海洋平台上的高耸结构，应考虑风压脉动对结构物的影响。

二、冰 荷 载

在可能会有严重冰情的海域建造海洋结构物时，冰荷载将是一个非常重要的荷载，有时还可能成为设计中的控制荷载。大面积冰块挤压垂直孤立桩柱所产生的冰荷载可按下式计算：

$$F = C_o f_o A_s \quad (\text{N}) \quad (1.4)$$

式中 C_o ——冰荷载系数；

f_o ——冰块的挤压极限强度 (MPa)；

A_i ——冰块对桩柱的挤压面积, $A_i = bh(\text{mm}^2)$, 其中 b 为桩柱宽度, h 为冰层厚度。

C_i 和 f_i 应尽可能通过长期观察来分析确定, 当现场无实测资料时, 我国渤海和黄海北部沿海的冰荷载可按式计算:

$$F = 1.488 A_i \quad (\text{N}) \quad (1.5)$$

潮汐会对静水位的高程有很大影响。因此, 除了计算冰荷载大小外, 尚应确定冰荷载对结构物可能作用的位置。在我国, 根据渤海多年海洋平台的使用经验, 在潮差段一般不布置撑杆, 这将大大减少冰荷载对结构物的作用。

三、波浪荷载

波浪荷载是海洋结构物受到的重要环境荷载之一, 它是由风对水表面的作用, 使水面以下水质点运动形成的波浪对海洋中的结构物产生的巨大作用力。对小尺度直立圆杆, 其垂直于杆件轴线方向单位长度上的波浪荷载可采用 Morison 公式来计算:

$$f = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |u| u + \rho_w C_I \frac{\pi D^2}{4} a_x \quad (\text{N/m}) \quad (1.6)$$

式中 ρ_w ——海水密度 (kg/m^3);

C_D ——拖曳力系数, 由试验确定, 在试验资料不足时, 对圆形杆件可取 $C_D = 0.6 \sim 1.2$;

C_I ——惯性力系数, 由试验确定, 在试验资料不足时, 对圆形杆件可取 $C_I = 2.0$;

D ——圆形杆件直径 (m);

u ——垂直于杆件轴线的水质点相对于杆件的速度分量 (m/s);

a_x ——垂直于杆件轴线的水质点相对于杆件的加速度分量 (m/s^2)。

直立圆杆上的波浪力分布如图 1.1 所示。

由式(1.6)可知, 作用在杆件上的波浪力的大小与垂直于该杆轴线方向上水质点的速度和加速度有关, 而速度和加速度应视波

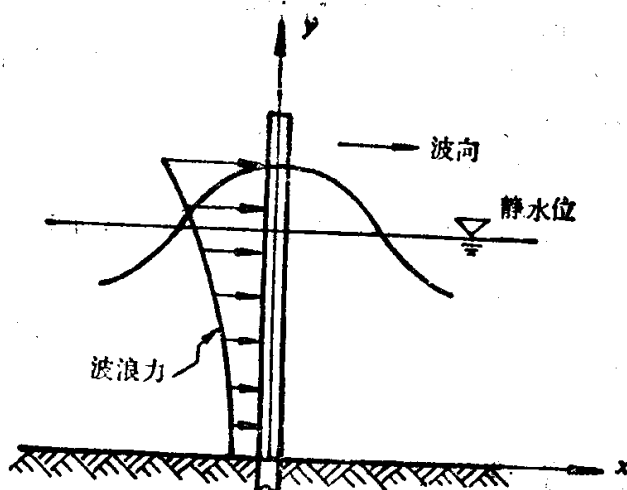


图 1.1 直立桩柱上波浪力分布

浪要素的不同来选用不同的波浪理论计算，并且随时刻的不同不断地改变其大小。这部分内容将在下一节作详细介绍。

四、海流荷载

海流通常指的是由潮的作用、风的拖曳等原因引起的比较稳定的水流运动。

海流的流速随水深的变化应尽量通过现场实测确定，若实测资料不足时，潮流和风海流的流速随水深变化可按图 1.2 取用。

海流流速的计算公式为：

$$u_o = u_{oi}(y/h)^{1/7} + u_{ow}(y/h) \quad (\text{m/s}) \quad (1.7)$$

式中 u_o ——设计泥面以上 y 高处的流速速度 (m/s)；

u_{oi} ——水面的潮流速度 (m/s)；

u_{ow} ——风在水面引起的海流速度 (m/s)；

y ——设计泥面以上的垂直距离 (m)；

h ——水深 (m)。

海流单独作用时，圆形杆件单位长度的海流荷载可按 Morison 公式的拖曳力分量计算：

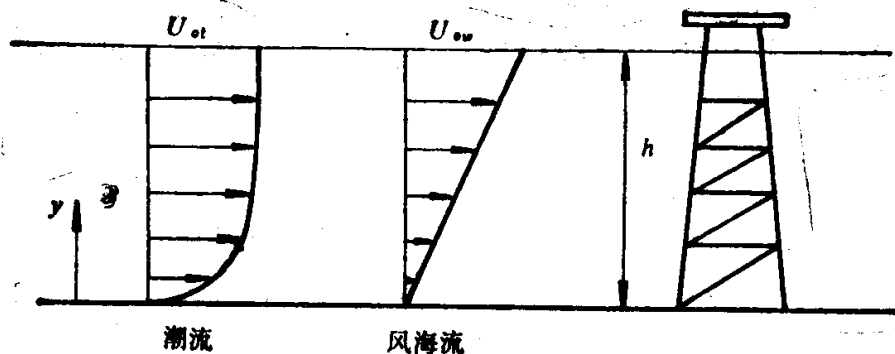


图 1.2 潮流与风海流的流速风布

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w A_p u_c^2 \quad (\text{N/m}) \quad (1.8)$$

式中 C_D ——海流拖曳力系数,可取与波浪力的 C_D 相同;

ρ_w ——海水密度 (kg/m^3);

u_c ——设计海流速度 (m/s);

A_p ——单位长度杆件垂直于海流方向的投影面积 (m^2/m)。

当考虑波浪与海流同时作用时,仍可按 Morison 公式计算,其计算公式为

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w A_p |u|u \quad (\text{N/m}) \quad (1.9)$$

这里的 u 应取波浪水质点速度矢量和海流速度矢量之和在垂直于杆件方向上的分矢量。

在计算海流荷载时,应考虑杆件周围可能出现的 Korman 涡流引起的颤振,避免该振动频率与结构自振频率接近时引起的共振。

五、地震荷载

地震荷载与其它环境荷载的不同之处是它并不直接作用于结构物上,而是由地震引起结构物基础运动而随之产生的。

海洋结构物的地震荷载主要是地震惯性力和动水压力，它可根据海上平台设计规范的有关规定并结合所在海域的设计烈度来进行计算。限于篇幅，本书不作赘述，读者可参见有关书籍。

第二节 波浪荷载计算

在进行海洋结构物的方案筛选和概念设计的过程中，通常取结构物中的某一榀刚架来进行内力分析。为方便计算，平面刚架的内力计算程序常以结点荷载的形式输入。因此须把计算的环境荷载（主要为波浪荷载和海流荷载）化为结构物上的等效结点荷载。对小尺度的结构杆件可用 Morison 公式来计算波浪荷载和海流荷载。为此，应先根据海况和波浪要素来选用并确定合适的波浪理论，以便用 Morison 公式来计算波浪荷载，并且最终求得等效结点荷载。

一、波浪理论简述

1. Airy 波理论

Airy 波理论是 G. B. Airy 于 1842 年提出的，该理论假定波浪为一正弦波形式，并且其波高 H 与波长 L 和水深 h 相比为很小（图 1.3）。尽管 Airy 波理论常常不能很精确地适用于海洋工程环境，但由于其形式简单、计算方便，因而对于工程的初步计算以及揭示波浪的基本特征还是很有用的。

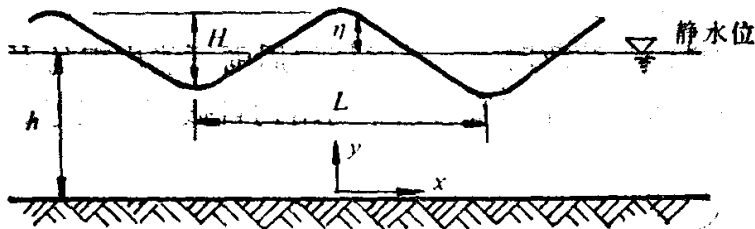


图 1.3 Airy 波

Airy 波的波面形式为

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (1.10)$$

由流体动力学和 Airy 波理论, 可得在时间 t , xy 平面的水质点水平速度 u 和垂直速度 v 。

$$u = \frac{\omega H}{2} \frac{\cos h(ky)}{\sin h(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (1.11)$$

$$v = \frac{\omega H}{2} \frac{\sin h(ky)}{\sin h(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (1.12)$$

式中, 波数 $k = \frac{2\pi}{L}$; 波频率 $\omega = \frac{2\pi}{T}$, T 为波周期。根据 Airy

波理论, 波数 k 和波频率 ω 有以下关系:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (1.13)$$

其中 g 为重力加速度。

在时间 t , xy 平面的水质点水平加速度 a_x 和垂直加速度 a_y 可近似地由 $a_x = \partial u / \partial t$ 和 $a_y = \partial v / \partial t$ 来求得。这样, 利用式 (1.11) 和式 (1.12) 便得

$$a_x = \frac{\omega^2 H}{2} \frac{\cos h(ky)}{\sin h(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (1.14)$$

$$a_y = -\frac{\omega^2 H}{2} \frac{\sin h(ky)}{\sin h(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (1.15)$$

2. Stokes 五阶波理论

除 Airy 波理论外, 目前海洋工程上用得较多的便是 Stokes 五阶波理论。Stokes 波理论是 G.G. Stokes 在 1847 年从 Airy 波理论的基础上发展起来的, 并由 Skjelbreia 和 Hendrickson (1961) 推广到 Stokes 五阶波理论, 该理论对相对深度 $h/L > 1/10$ 尤为适用, 因为海上固定平台设计中所遇到的风暴波往往满足这个条件。

与 Airy 波类似, Stokes 五阶波的波面方程为

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 B_n \cos[n(kx - \omega t)] \quad (1.16)$$

式中

$$B_1 = a$$

$$B_2 = a^2 B_{22} + a^4 B_{24}$$

$$B_3 = a^3 B_{33} + a^5 B_{35}$$

$$B_4 = a^4 B_{44}$$

$$B_5 = a^5 B_{55}$$

这里 $B_{22}, B_{24}, \dots$, 是与 kh 变化有关的波形参数, 其表达式分别为

$$B_{22} = (2c^2 + 1)c / (4s^3)$$

$$B_{24} = c(272c^8 - 504c^6 - 192c^4 + 322c^2 + 21) / (384s^9)$$

$$B_{33} = 3(8c^6 + 1) / (64s^6)$$

$$B_{35} = (88128c^{14} - 208224c^{12} + 70848c^{10} + 54000c^8 - 21816c^6 + 6264c^4 - 54c^2 - 81) / [122885s^{12}(6c^2 - 1)]$$

$$B_{44} = c(768c^{10} - 448c^8 - 48c^6 + 48c^4 + 106c^2 - 21) / [384s^9(6c^2 - 1)]$$

$$B_{55} = (192000c^{16} - 262720c^{14} + 83680c^{12} + 20160c^{10} - 7280c^8 + 7160c^6 - 1800c^4 - 1050c^2 + 225) / [12288s^{10}(6c^2 - 1)(8c^4 - 11c^2 + 3)]$$

在时间 t 、任意位置 (x, y) 水质点的水平速度 u 和垂直速度 v 为

$$u = \frac{\omega}{k} \sum_{n=1}^5 u G_n \cos h(nky) \cos[n(kx - \omega t)] \quad (1.17)$$

$$v = \frac{\omega}{k} \sum_{n=1}^5 n G_n \sin h(nky) \sin[n(kx - \omega t)] \quad (1.18)$$

与 Airy 波理论相类似, 同样可近似求得水质点在时间 t 、任意位置 (x, y) 的水平加速度 a_x 和垂直加速度 a_y 为

$$a_x = \frac{\omega^2}{k} \sum_{n=1}^5 n^2 G_n \cos h(nky) \sin[n(kx - \omega t)] \quad (1.19)$$

• 8 •