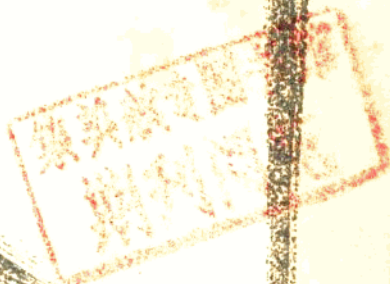


练 淦 孙复中 编



海上建筑物结构分析 和计算方法

上海海洋石油平台工程设计公司

内 容 简 介

本书分十五个专题论述海上建筑物的结构分析计算方法,每个专题既是独立的又是互相联系的。主要内容包括:海上建筑物在风、浪、流和地震等各种环境条件下结构所受的外力和在此外力作用下结构的强度和疲劳分析;建筑物在海上运输和下水过程中的运动和受力分析以及作为建筑物基础的钢管桩的强度和可打性分析等。所有这些结构分析计算方法除了深海建筑物的动力强度和疲劳分析外,其他的计算方法都已编制成电算程序并作了实例计算。其中静力分析系统程序已经美国船级社考核,结果良好。

本书提供的一整套浅海导管架平台设计计算方法可供从事海上建筑物结构分析的工程技术人员、高等院校师生以及科研设计人员参考使用。也可推广应用于深海导管架平台和其他类型海上建筑物的结构计算。

目 录

1. 序言练 淦(1)
2. 初论海洋结构的动力耦合响应
——兼评各种现有方法的适用性.....孙复中(3)
3. SOECO 海洋平台工程计算程序和系统
..... 练 淦 胡 恺(16)
4. SOECO 近海固定平台结构静力分析
系统程序校核报告..... 周懋承 徐国平(24)
5. 海洋平台设计计算中的有关波浪理论赵慰民(40)
6. 近海结构确定性分析和强度校核
..... 周懋承 金国斐 徐国平(51)
7. 导管架平台的疲劳分析
..... 练 淦 胡 恺 高志龙(59)
8. 管节点冲剪法设计衡准分析顾宏鑫(69)
9. 导管架装驳运输频-时域联合动力分析
..... 孙复中 高志龙(83)
10. 导管架下水运动轨迹计算
..... 赵慰民 刘灿培 张洛希 胡耕富(96)
11. 近海桩-土特性曲线电算程序.....仇玉炳(107)
12. 考虑土的非线性因素及 P- Δ 效应的
钢管桩强度分析..... 倪 侃 郭文辉(123)
13. 桩的可打性分析郭文辉 倪 侃(136)
14. 海洋平台振动模态分析
..... 高志龙 徐国平 牟善晔(158)
15. 海洋结构地震响应及其参数的影响
..... 周昌年 孙复中 金国斐(167)

序 言

1980年间,受到我国海上石油开发前景的吸引,我们开始了固定式采油平台的预研工作。1981年初我随国家经委海上石油设备考察团赴美,看到各家平台工程设计公司都自己组织力量编制了专用的导管架计算及计算机辅助设计程序,而且都列为技术诀窍,概不转让。归来后,在各方面的支持下,我们选择了平台导管架结构设计研究作为课题,正式成立了平台导管架预研小组,主要任务就是建立我们自己的导管架结构计算程序系统,次序是先浅水后深水。后来这个课题列入了国家经委的重点攻关项目,这对工作的顺利开展起了关键的促进作用。

本书发表了我们四年来在这个课题上取得的成就。通过本书可以清楚地看到,我们已经完成了浅水区域平台导管架结构计算的几乎所有程序。明确地说,对于位于100米水深以内的平台导管架,我们能够在两个星期左右的时间内拿出报价设计并具备进行详细设计结构分析的全部能力。提请注意的是,导管架与船舶不一样,由于风、浪、地质等环境条件各异,不可能像船舶那样可以采用母型船进行比较,而只能通过理论计算确定技术参数。这在四年前是不可能的。

通过本书还可以看到我们的研究成果具有明显的实用性和先进性。我们的目的是尽快地建立一套完整的、实用的、可靠的导管架计算程序,可以在报价和工程设计中和外商竞争,而不是在局部的细节上出人头地。因此,我们没有发明什么定理,创造什么定律,只是应用前人已经找到、阐明了的规律来解决特定的导管架结构设计计算问题。可能有人对此不以为然,但我却始终不悔。实用性还表现在我们对国际公认的规范如美国的API作规范,挪威的DNV规范规定的衡准条件十分注意,并尽量满足,而且还作了大量的论证与推敲工作。先进性方面,首先是考虑到海浪的随机性,因此在计算理论中大量应用了随机分析理论与判别衡准;在非线性影响方面作了适当考虑;另外在适应计算机计算,应用线性代数求解方面也作了努力。

浅水导管架的许多计算程序无疑将通用于深水导管架的计算。今后研

究小组的任务将是在进一步完善浅水计算程序的基础上逐渐把重点转移到深水导管架的动力分析上去。在这方面，本书的第2、3、14和15篇文章已经给出了解的途径，困难的可能是确定阻尼，特别是桩基表土层的阻尼。这样，进行一些试验将是必不可少的，在时间上，可能要多花些。

我们编制的这批程序，没有组织过鉴定会；我们认为常规的鉴定往往会流于形式，不能深入解决问题。我们采取了另一种办法，即派遣人员携带我们的程序去美国船级社，同时使用我们和他们的程序计算同一个假定的导管架，以比较其结果的一致性。高兴的是已经校核的程序得到良好的评价，详见第4篇。今后我们还将陆续派出人员到国外的权威检验机构校核我们的其余程序，并将核校结果作为成果鉴定上报。也只有这样的鉴定，才能使国内外用户能放心地使用我们的程序。

对于参加导管架预研小组的同志来说，四年不是一个短的时间；当然，参加小组的时间也有先后，但是大家都还是可以通过本书的出版检视一下自己的工作。对我来说感到很惭愧，只是在1981年中做过一些工作，以后就具体参与不多。这里的成就主要都是小组同志们的贡献。

预祝我们的成果能尽快地用到海上石油开采工程建设上去。

练 淦 1984.11.25

初论海洋结构的动力耦合响应 —兼评各种现有方法的适用性

孙 复 中

提 要

本文概要地论述了海洋工程结构动力分析中结构弹性变形和刚体运动的耦合响应,提出了表征此耦合响应的统一运动方程并对其耦合项作了初步探讨。

按此统一运动方程,本文对现有的各种结构分析方法作了简要的评述。在评述这些方法的同时,本文还将综合模态时域分析法推广应用于海洋固定平台在随机海浪中的非线性动力分析。

一、前 言

海洋结构形式众多,大致可分为三大类:一类是浮式结构,结构主要靠自身的浮力漂浮于海面(允许有柔性的锚泊系统与海底相连),如常规船舶,多体船和半潜式船舶等;第二类是固定结构,结构牢固地直接与海底连接,如导管架平台,重力式平台和塔柱平台等;第三类是应顺式结构或称半固半浮态结构,此类结构既处于漂浮状态,底部又与海底相连(包括由张紧的锚索与海底相连的结构),如张力腿平台,各类单点系泊和立管系统,以及塔式关节平台等。见图1。所有这些海洋结构都处于不同的介质(大气、海水和砂土)中,并受到风、浪、流、冰和地震等各种环境载荷的作用,其中某些载荷又是随机的和非线性的。为了恰当地分析这些结构的运动和受力,出现了各种不同的计算方法——静力分析、动力分析、准静力分析、确定性分析、随机分析、线性分析和非线性分析等。这些计算方法都有其各自的特点,在实际使用时必须根据各类海洋结构的特性和受到的外力情况选择不同的计算方法。由于不同的计算方法会得出不同的计算结果,有时还会有很大的差别,因此给评价结构的强度和安全性带来了一定的困难。

另一方面,上述各种计算方法在分析海洋结构的运动和强度时均把结构的刚体运动和结构的弹性变形予以分割处理,也就是忽略了二者间的耦合影响。对于大多数海洋结构这样处理一般不会引起大的误差,特别是在计算结构的刚体运动时忽略结构的弹性变形引起的误差是很小的。但是必须强调指出,在计算结构的强度时,也就是计算结构的弹性变形时不能忽略结构的刚体运动,即使是分别计算,也必须在计算结构的强度和变形时计入刚体运动引起的各项外力。对于某些海洋结构,如浮式结构中的超大型油轮,固定式结构中的重力平台和塔柱平台,应顺式结构中的某些单点系泊和立管系统以及塔式关节平台等,耦合影响一般都不能忽略。

对于运动和变形的耦合影响,长期来并未得到人们的足够重视。七十年代中在研究超大型油轮在波浪中的运动和受力响应时提出了船舶的流弹性问题和统一动力分析^[1]。与此同时在研究高层建筑的动力响应中也提出了地基运动(平移和倾斜)对结构的影响^[2]。这些研究也还在不断发展

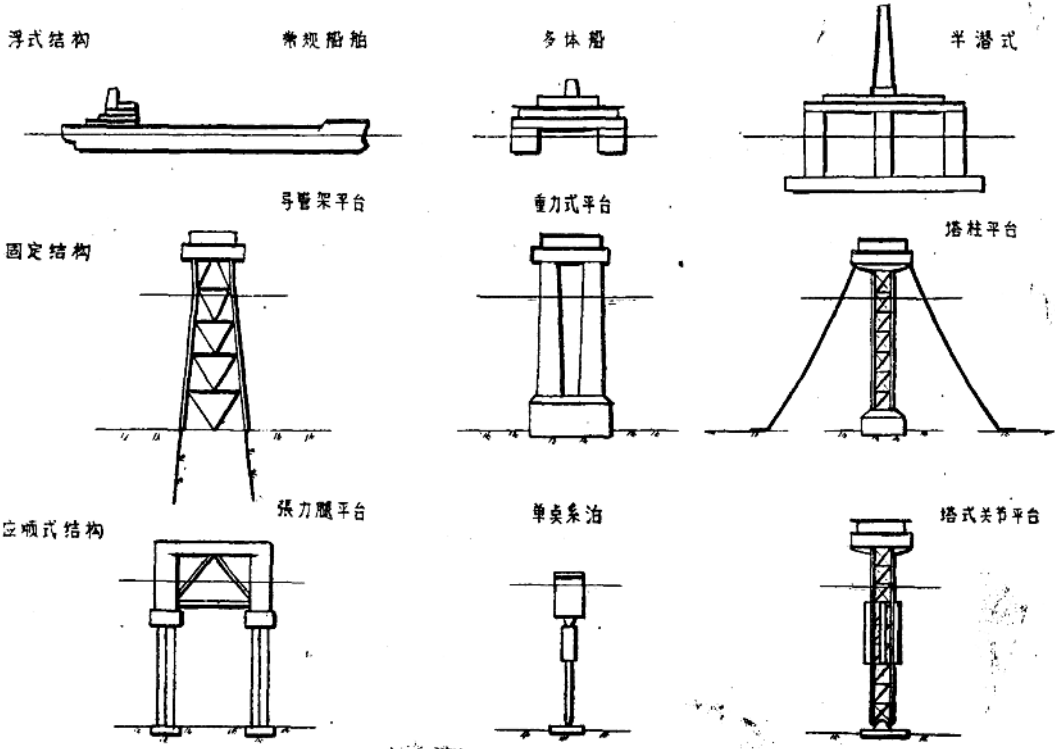


图 1 各种类型海洋建筑物

和完善中。

本文将耦合响应分析应用于一般海洋结构的动力分析中，进行了初步探讨，列出了运动-变形耦合响应方程，并按此方程对现有的各种结构分析方法作了概要的评述。澄清了某些计算方法的物理概念，统一了数学表达式，指出了这些方法的适用范围，以供有关海洋工程的设计和计算时选用。在综述各种结构分析方法的同时本文还将综合模态法推广应用于分析桩基导管架平台在随机海浪中的非线性动力响应。

二、耦合响应方程

任何结构物，不管是陆上的、空中的或海上的，在受到外界载荷作用下都可能产生结构的刚体运动和结构的弹性变形，海洋结构也不例外。在把整个结构分解成许多单元体并把每一单元体的质量集中于单元体的端部(各单元体连接在一起的节点处)后，此离散化结构模型在任意外力作用下某节点的各自由度的运动可表示为

$$[M]\{\ddot{S}\} + [C]\{\dot{S}\} + [K]\{S\} = \{F(t)\} \quad (2.1)$$

此是一二阶常系数线性非齐次微分方程组，其中 $\{S\}$ 、 $\{\dot{S}\}$ 、 $\{\ddot{S}\}$ 是以绝对坐标表示的节点处各自由度的位移(或转角)、速度和加速度列阵； $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为质量、阻尼和刚度阵； $\{F(t)\}$ 为与时间有关的外力阵。将以绝对坐标表示的运动分解成刚体运动和相对于刚体运动的结

构变形运动后式(2.1)可表示为

$$\begin{bmatrix} M_{rr} & M_{re} \\ \dots & \dots \\ M_{re}^T & M_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{S}_r \\ \dots \\ \dot{S}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{rr} & C_{re} \\ \dots & \dots \\ C_{re}^T & C_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_r \\ \dots \\ S_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{rr} & K_{re} \\ \dots & \dots \\ K_{re}^T & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_r \\ \dots \\ S_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_r(t) \\ \dots \\ F_e(t) \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

此即结构在任意外力作用下刚体运动和弹性变形的耦合响应方程, 又称统一运动方程。其中脚标 r 和 rr 表示刚体运动, e 和 ee 表示弹性变形, re 表示耦合项, 上标 T 为转置阵。有关各类海洋结构刚体运动和弹性变形各自对应的质量, 阻尼和刚度(或复原系数)阵许多文献都有较详细的介绍, 本文不一一说明。此处只对耦合项作一些初步探讨。耦合项的物理意义即是刚体自由度的运动引起弹性变形自由度上的力和力矩, 反之亦然。这些力和力矩的计算对于绝大多数海洋结构来说都是不困难的(就工程精度而言)。大多数海洋结构都可分解成由许多单元体组成。对于单元体的流体动力计算, 小截面单元体可用莫立森公式, 大截面者可用场流理论。而耦合项的计算实质上也只是进行某些转换而已。以质量项为例, 式(2.2)中刚体运动加速度 \dot{S}_r 引起结构弹性变形的力为 $[M_{re}^T]\{\dot{S}_r\}$ 。此力也可以弹性变形坐标表示, 写成 $[M_{ee}]\{\ddot{S}_e\}$ 。二者必然相等, 由此得

$$[M_{re}^T]\{\dot{S}_r\} = [M_{ee}]\{\ddot{S}_e\} \quad (2.3)$$

其中 $\{\ddot{S}_e\}$ 为刚体运动自由度加速度转换成弹性变形自由度的加速度, 二者间成立下列关系:

$$\{\ddot{S}_e\} = [T]\{\ddot{S}_r\} \quad (2.4)$$

代入式(2.3)后得

$$[M_{re}^T] = [M_{ee}][T] \quad (2.5)$$

其中 $[T]$ 就是坐标转换阵, 表示为

$$[T] = [T_1 \dots T_i \dots T_n]^T$$

$$[T_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & z_n & -y_n \\ 0 & 1 & 0 & \dots & -z_n & 0 & x_n \\ 0 & 0 & 1 & \dots & y_n & -x_n & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

其中 x_n, y_n, z_n 为节点 i 的坐标, $i=1 \sim n$, n 为节点总数。

对于耦合刚度项, 按耦合项的力学概念可直接写出耦合刚度阵为

$$[K_{re}] = [K_1 \dots K_i \dots K_n]$$

$$[K_i] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & Ay_n & 0 & 0 & 0 \\ -B & 0 & -Ax_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

其中 A 为穿出水面的单元体的截面面积, 如为水下或水面上的单元体, $A=0$; B 为集中于节点 i 处的浮力和重力差。

对于耦合阻尼项, 因阻尼来自许多方面, 有材料本身的阻尼, 流体动力阻尼和土的动力阻尼等, 计算比较复杂, 一般可采用经验公式, 以临界阻尼比的百分数或以刚度阵和质量阵的百分数

表示。这样也有利于运动方程的解耦和求解。一般海洋结构的阻尼项主要来自流体动力阻尼，而流体动力引起的耦合阻尼项可类似于式(2.5)表示为

$$[C_{re}^T] = [C_{ee}][T] \quad (2.8)$$

从上述耦合质量、刚度和阻尼阵的表式中可以看出，这些耦合阵的量级与自身质量、刚度和阻尼阵相比是同一量级的，是不能忽略的。只是因为某些海洋结构的弹性变形与刚体运动相比是一小数，因此可忽略弹性变形对刚体运动的影响，而刚体运动引起的力对弹性变形的影响则是不能忽略的，即可忽略式(2.2)中的 $[M_{re}]\{S_e\}$ 和 $[K_{re}]\{S_e\}$ 等而不能忽略 $[M_{re}^T]\{S_r\}$ 和 $[K_{re}^T]\{S_r\}$ 等。但此时方程已解耦，可先计算刚体运动，然后再把刚体运动引起的力作为外力加入结构弹性变形的方程中，即式(2.2)的下式中。这也就是常规的动力分析方法。至于某些特殊的海洋结构，如前言中提到的那些海洋结构，耦合影响是不可忽略的。

三、常规计算方法评述

1. 静力分析

静力分析是所有计算方法中最简单的一种，此方法把海洋结构受到的各种外力看成是变化缓慢的或定常的力，这样，结构在受到这些力时产生的运动(包括刚体运动和弹性变形)也是缓慢变化的。因此运动加速度引起的惯性力和速度引起的阻尼力均可忽略不计，动力耦合响应方程式(2.2)变成

$$\begin{bmatrix} K_{rr} & K_{re} \\ \dots & \dots \\ K_{re}^T & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_r \\ \dots \\ S_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_r(t) \\ \dots \\ F_e(t) \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

对于固定式结构，刚体位移为零，耦合响应方程再度简化为

$$[K_{ee}]\{S_e\} = \{F_e(t)\} \quad (3.2)$$

此是一线性代数方程，原则上讲求解非常方便。结构本身的刚度阵可由有限元法得出。因固定式结构往往都与海底直接连接。而海底地基土的特性是非线性的。因此求解时还需进行多次迭代。此外由于海洋结构一般都较复杂，结构离散化后自由度很多，求解时一般仍需使用较大型的计算机。

固定结构受风、流、冰等环境载荷的作用以及结构自身的重量和浮力等都可按静力考虑。波浪载荷对浅水固定式导管架平台(自振周期小于2.5秒者)也可按静力考虑。此时需计算不同瞬时的波浪载荷以确定结构的最大受力。对于浮式结构，则需考虑结构在定常力作用下的刚体运动即浮态变化。此时需按式(3.1)求解。因浮式结构的结构变形相对于刚体的运动是很小的，因此式(3.1)中的 $[K_{re}]\{S_e\}$ 项可忽略。对于应顺式结构一般均需按耦合方程式(3.1)同时求解刚体运动和结构的弹性变形。

2. 准静力分析

准静力分析是一种针对浮式结构和应顺式结构的近似计算方法，最早是在研究半潜船在波浪中的强度时提出的^[3]。该方法忽略结构本身的刚体位移和速度以及结构变形对刚体运动的影响，即环境载荷等引起的外力完全由刚体运动加速度产生的惯性力平衡。将此加速度引起的惯性力按结构本身的质量分布分配到各节点处(或构件上)，并和结构受到的外力一起按静力分析计算结构的变形和内力。这样耦合响应方程式(2.2)变成

$$\begin{aligned} [M_{rr}]\{\ddot{S}_r\} &= \{F_r(t)\} \\ [M_{re}^T]\{\ddot{S}_r\} + [K_{ee}]\{S_e\} &= \{F_e(t)\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

此方程的求解是方便的。此所谓的准静力分析实际上仍是静力分析，在应用准静力分析时必须严格掌握下列各点：

1) 结构的刚体运动周期必须远大于外力的扰动周期，这样才能使刚体运动的响应(位移和转角)接近于零。

2) 结构的自振周期大大低于外力的扰动周期，这样结构弹性变形的速度和加速度才能接近于零，才能用静力法求解结构的变形。

3) 结构的受力和强度对自身的刚体运动(位移和转角)是不敏感的。像高层结构、塔式结构、空腹刚架结构等的受力对自身的刚体运动是非常敏感的，一般不能使用。

要满足上述条件一般是很困难的，但只有严格满足这些条件准静力法才是可靠的，合理的。半潜船在波浪中的强度分析一般能满足第一、第二条，但不太满足第三条。常规船舶满足第二、第三条，但不满足第一条。因此在应用准静力分析这些结构的强度时只能作为初步估算。

3. 动力分析

上述静力和准静力分析使用时都有很多限制。计算结果带有一定近似性。对于结构的自振频率接近于外力扰动频率的那些结构，必须进行动力分析。以往在进行动力分析时一般都忽略运动和变形间的耦合影响，忽略结构弹性变形对刚体运动的影响。在求得刚体运动后将刚体运动引起的力作为外力，也即把耦合响应方程式(2.2)下式中有关刚体运动的各项移至方程的右边后求解。求解的方法很多。详见第四节。

4. 确定性分析与随机分析

上述三种方法是按耦合响应方程左边的不同处理而分的。就方程右边的外力的不同处理，又可分为确定性分析和随机分析。一般而言，静力和准静力分析中的外力往往按确定性外力考虑，而动力分析中则按随机外力考虑。但这不是绝对的，静力分析中的外力也可作随机分析；动力分析中的外力也可作确定性分析。这要看结构本身的特性和外力的情况而定。

确定性分析一般均凭人们的经验选择一种或几种最危险的外力状态计算结构的受力和强度，对于风、流、冰等环境载荷，最危险的外力状态是比较容易确定的。但对于波浪载荷，最危险的外力状态就很难确定了。波浪引起的外力取决于波高、波浪周期和波浪相对于结构的位置。波高越大外力越大，这是肯定的。但周期和外力的关系就很难说，一般周期越大外力越小，但不是绝对的，这要看结构的形式而定。且波高和周期间没有确定的关系，因此在计算中往往需要计算几组不同的波高和周期。对于波浪相对于结构的位置，一般也很难确切地看出那一位置最危险，也需要计算几个不同的位置。这样，计算工作量也是很大的，再则，即使某一波浪状态对结构中的某些构件是最危险的，受力最大的，但也不是所有构件的受力都是最大的。这是确定性分析用来分析结构在波浪中的强度的一个致命弱点。对于那些离岸较近水深较浅的海洋结构，由于海浪受地形和水深的影响逐步趋于规则化，则可近似地应用确定性分析。对于浅海的非线性波，随机分析时计算工作量很大，也可采用确定性分析。有关各种波浪理论和不同类型结构上的波浪载荷可参见文献[4]。

为了真实地反映海洋结构在海浪中受到的外力，耦合响应方程式(2.2)右边的外力应按随机载荷考虑，这就是随机分析。随机分析中又可分为频域分析和时域分析。

时域分析中随时间变化的外力可直接由随时间变化的海浪(或其它环境条件)要素确定。但要真实地记录且要同时同点地记录波浪水质点位移，速度和加速度的时历变化是非常困难的(地震引起的外力只取决于地震的位移或加速度的时历变化，直接记录并计算外力的时历变化是可能

的)。因此波浪外力的时历变化一般都可按海浪谱计算。对应于任一海浪谱的波浪水质点运动可表示为

$$\begin{Bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{Bmatrix} = \sum_{\omega} \sum_{\alpha} \sqrt{2 S_{hh}(\omega, \alpha) \Delta\omega \Delta\alpha} e^{kz} \begin{Bmatrix} \cos \gamma \sin \\ \sin \gamma \sin \\ \cos \end{Bmatrix} (kx \cos \gamma + ky \sin \gamma - \omega t + \delta) \quad (3.4)$$

其中 $S_{hh}(\omega, \alpha)$ 为海浪谱密度; α 为主浪向和次浪向的夹角; γ 为浪向与 x 轴的夹角; δ 为随机位相角; k 为波数。

波浪水质点的速度和加速度由式(3.4)对时间的导数得。由此波浪运动即可求得作用在结构上的外力的时历变化。结构在此外力作用下的动力响应即式(2.2)的求解见第四节。时域分析的应用范围是较广的,可用于非线性外力(外力与环境条件如波高,风速等不成线性关系)作用下的动力响应;也可推广应用于非线性系统的动力响应。对于固定式结构,采用时域分析是比较合适的。但对于那些质量、阻尼和刚度阵随频率变化而变化的结构,如浮式结构的附加质量和阻尼阵(流体动力),重力式平台的地基刚度和阻尼阵(在高频区)都与频率有关,采用时域分析就相当困难了。此时可采用频域分析。

频域分析时把随时间变化的外力变换成频率的函数(富里哀变换)。式(2.1)右边的外力可写成

$$\{F(t)\} = \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right\} \quad (3.5)$$

按线性叠加原则,系统(海洋结构)在此外力作用下的动力响应等于系统在各个不同频率下响应的总和。求解时一般都采用谱分析法,见第四节。由于频域分析是建立在线性叠加原则的基础上,因此原则上只适用于线性系统,如水面船舶的微幅运动和受力等。对于半潜式船舶和重力式平台等弱非线性系统(外力和阻尼项中非线性曳力所占的比重很小),在进行线性处理后仍可采用频域分析^[6]。

5. 非线性分析

一般海洋结构的动力响应都带有一定的非线性成分,其中有结构材料的非线性,流体动力的非线性和地基土的非线性等。对于非线性系统,严格的理论解是很困难的,目前一般仍只能在进线性处理后按线性微分方程来解,只是求解时还需采用迭代法。

材料的非线性对于处于弹性变形范围内的结构影响是很小的,可忽略不计。流体动力的非线性可按能量法和统计误差法等予以线性处理。外力的非线性包括非线性波浪理论和波浪载荷的非线性,可通过选择合适的求解方法(如直接时域积分等)加以防止,在采用频域分析时可以相当波高来求解传递函数^[6]。对于地基土的非线性刚度(刚度随时间变化),也可用直接时域积分或时域模态分析加以适当考虑,见第四节。

6. 强度校核和疲劳校核

海洋结构需在海上长期工作,在长期的周期性的外力作用下结构的破坏形式一般有三种:强度破坏,稳定性破坏和疲劳破坏。强度破坏是指结构的最大受力超过了强度极限。此最大受力可由确定性分析或随机分析中得到。随机分析的最大受力按结构在整个使用年限内最可能出现的最大值。稳定性破坏是指整个结构或主要构件的整体失稳或局部屈曲。一般稳定性校核可与强度校核合并为联合强度校核^[7]。疲劳校核又可分为确定性疲劳校核和随机疲劳校核。确定性疲劳校核以一组确定概率分布的规则波代替随机的海浪,计算结构在这些波浪条件下各构件的应力和应力

循环次数, 然后按 Miner 法则核算构件的疲劳。随机疲劳校核应用频域分析或时域分析计算结构在随机海浪中的应力和应力循环次数核算构件的疲劳。理论上讲, 确定性疲劳校核带有较多的经验性, 随机疲劳校核能更真实地反映结构的受力, 但计算工作量较大。对于浅海结构, 在进行静力疲劳校核时一般可用确定性疲劳分析, 应用时的关键问题在于以一组什么样的波浪和对应的概率来代替真实的海浪。

四、方程的求解

一般海洋结构的离散模型均具有大量节点自由度。求解时往往受计算机容量和计算时间的限制。工程设计和计算时从经济性出发均要作适当的简化。

1. 自由度缩聚

缩聚方法有静力缩聚、动力缩聚和集中参数法。

1) 静力和动力缩聚

缩聚时把自由度分成独立自由度和非独立自由度, 一般质量集中、刚度较大处作为独立自由度。刚体运动自由度均作为独立自由度不得缩聚。缩聚时可按式(2.1)或式(2.2)进行, 此处按式(2.2)缩聚。此时式(2.2)下式结构弹性变形方程写成

$$\begin{aligned} [M_{ee}]\{\ddot{S}_e\} + [C_{ee}]\{\dot{S}_e\} + [K_{ee}]\{S_e\} &= \{F_{ee}(t)\} \\ \{F_{ee}(t)\} &= \{F_e(t)\} - [M_{re}^T]\{\dot{S}_r\} - [C_{re}^T]\{\dot{S}_r\} - [K_{re}^T]\{S_r\} \end{aligned} \quad (4.1)$$

式(4.1)按独立和非独立自由度分块成

$$\begin{bmatrix} M_{ii} & M_{id} \\ \dots & \dots \\ M_{di}^T & M_{dd} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{S}_i \\ \dots \\ \ddot{S}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ii} & C_{id} \\ \dots & \dots \\ C_{di}^T & C_{dd} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{S}_i \\ \dots \\ \dot{S}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{id} \\ \dots & \dots \\ K_{di}^T & K_{dd} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_i \\ \dots \\ S_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{ii}(t) \\ \dots \\ F_{di}(t) \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

缩聚时刚度和质量按动力缩聚(忽略非独立自由度惯性项的影响), 外力按静力缩聚。缩聚后化简得

$$\begin{aligned} [M_{ei}]\{\ddot{S}_i\} + [C_{ei}]\{\dot{S}_i\} + [K_{ei}]\{S_i\} &= \{F_i(t)\} \\ \text{其中: } [M_{ei}] &= [M_{ii}] + [D]^T[M_{dd}][D] \\ [K_{ei}] &= [K_{ii}] + [K_{id}][D] \\ \{F_i(t)\} &= \{F_{ii}(t)\} - [K_{id}][K_{dd}]^{-1}\{F_{dd}(t)\} \\ \{S_d\} &= [D]\{S_i\} + [K_{dd}]^{-1}\{F_{dd}(t)\} \\ [D] &= -[K_{dd}]^{-1}[K_{id}]^T \end{aligned} \quad (4.3)$$

上式中的阻尼系数 $[C_{ei}]$ 也可按质量缩聚的形式表示或用比例阻尼表示。缩聚后的运动和变形耦合方程仍可写成式(2.2)的形式, 只是以式(4.3)的 $[M_{ei}]$ 等代替式(2.2)中的 $[M_{ee}]$ 等, 耦合项如式(2.5)等也以 $[M_{ei}]$ 代替 $[M_{ee}]$ 。此自由度缩聚方法可用于任何海洋结构。

2) 集中参数法

此方法把结构模型简化成一串或几串多质点弹簧系。把质量和外力都集中到附近的质点处。此系统的刚度阵由各质点自由度处分别施加一单位力(静力), 计算在此单位力作用下各自由度处的位移, 由此得系统的柔度阵, 求逆得刚度阵。此方法大大地减少了自由度数目, 求解比较方便。可用来分析多层结构如导管架平台和塔式平台等的动力响应。但计算结果带有一定的近似性, 特

别对结构形式或重量分布很不对称的海洋结构。

2. 综合模态法

综合模态法是在模态叠加法的基础上发展而成的。模态叠加法的基本原理是把结构的振动以各振动模态的叠加来表示。结构的动力响应即为结构各模态响应的总和。因结构各振动模态间存在正交关系，因此在以模态坐标表示时运动方程解耦成各模态的非耦合(单自由度)运动方程，求解非常方便。且模态数目的选取可按自振频率和扰动频率之比值来确定。一般自振频率大于扰动频率一倍以上的模态均可忽略动力影响。这样往往只要几个模态就能充分代表结构的动力响应(如结构在波浪中的动力响应，因波浪的频率一般均比自振频率小得多)。计算大大简化了。因此，结构动力分析的一个主要方面在于计算结构的自振频率和对应的模态。

自振频率和模态计算可由无阻尼自由振动的特征方程求解，以式(4.3)缩聚后的结构振动方程为例，特征方程可写成

$$([\mathbf{K}_{el}] - \text{diag}[\lambda_i][\mathbf{M}_{el}])[\Phi_i] = 0 \quad (4.4)$$

其中 $\text{diag}[\lambda_i]$ 为特征值的对角阵， $\lambda_i = \omega_i^2$ ； $[\Phi_i]$ 为特征向量阵。此特征方程的求解可按常规的方法如子空间迭代法、Householder 法和行列式搜索法等。一般地讲，子空间迭代法适用于只需要少量振型的大型结构，Householder 法适用于要求多振型的小型结构。由于海洋结构自由度很多，即使缩聚后仍有很多自由度，应用上述方法解特征方程的工作量仍很大。为了再度减少结构自由度，出现了综合模态法。

综合模态法中又有固定界面法和自由界面法两大分支。固定界面法一般运用于固定式结构，自由界面法适用于浮式结构。此处以导管架平台为例对固定界面法的计算步骤作简单的介绍。以导管架的自体作为结构的主体部分，桩作为结构的分支部分。

1) 计算桩的固定对接主模态 $[\Phi_{dp}]$ 和桩在对接处的拘束模态 $[\Phi_p]$

桩的固定对接主模态由对接处刚性固定的桩的刚度阵 $[\mathbf{K}_{dp}]$ 和质量阵 $[\mathbf{M}_{dp}]$ 按式(4.4)计算得。对接处的拘束模态是指桩端各自由度处单位位移引起的桩的其他自由度处的位移。此位移值可由桩的静力计算中得到。拘束模态的数学表式可写成

$$[\Phi_p] = -[\mathbf{K}_{dp}]^{-1}[\mathbf{K}_{pa}] \quad (4.5)$$

其中 $[\mathbf{K}_{pa}]$ 为桩对接处的耦合刚度阵。

2) 计算桩在对接处的缩聚质量和刚度阵

此缩聚质量和刚度阵可按拘束模态转换得，表示为

$$\begin{aligned} [\mathbf{K}_{dd}] &= [\Phi_{pd}]^T [\mathbf{K}_p] [\Phi_{pd}] \\ [\mathbf{M}_{dd}] &= [\Phi_{pd}]^T [\mathbf{M}_p] [\Phi_{pd}] \end{aligned}$$

其中：

$$[\Phi_{pd}] = \begin{bmatrix} \Phi_p \\ \dots \\ \mathbf{I}_d \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$[\mathbf{K}_p] = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{dp} & \mathbf{K}_{pa} \\ \dots & \dots \\ \mathbf{K}_{pa}^T & \mathbf{K}_{aa} \end{bmatrix} \quad [\mathbf{M}_p] = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{dp} & \mathbf{M}_{pa} \\ \dots & \dots \\ \mathbf{M}_{pa}^T & \mathbf{M}_{aa} \end{bmatrix}$$

其中 $[\mathbf{I}_d]$ 为桩对接处自由度单位阵； $[\mathbf{K}_p]$ 、 $[\mathbf{M}_p]$ 分别为桩端非固定的刚度和质量阵； $[\mathbf{K}_{aa}]$ 、 $[\mathbf{M}_{aa}]$ 分别为桩端刚度和质量阵。

3) 计算导管架对接加载刚度和质量阵及对接加载主模态

导管架对接加载后的刚度和质量阵分别为

$$\begin{aligned}
 [K_\varphi] &= \begin{bmatrix} K_{ss} & \vdots & K_{sb} \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{sb}^T & \vdots & K_{bb} + K_{dd} \end{bmatrix} \\
 [M_\varphi] &= \begin{bmatrix} M_{ss} & \vdots & M_{sb} \\ \dots & \dots & \dots \\ M_{sb}^T & \vdots & M_{bb} + M_{dd} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

其中下标 ss 表示对接处刚性固定的导管架, bb 表示导管架对接处的, sb 为耦合项。由此对接加载刚度和质量阵按式(4.4)计算对接加载主模态 $[\phi_\varphi]$ 。此对接加载主模态可分块成

$$[\phi_\varphi] = \begin{bmatrix} \phi_a \\ \dots \\ \phi_b \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

4) 计算整个结构的广义质量和刚度阵

将上述导管架和桩的非耦合离散坐标变换为整个结构(耦合系统)的模式坐标, 可表示为

$$\{S_1\} = [\phi_T]\{X\} \tag{4.9}$$

其中 $[\phi_T]$ 为坐标转换阵, 表示为

$$[\phi_T] = \begin{bmatrix} \phi_a & 0 \\ \phi_b & 0 \\ \phi_p \phi_b & \phi_{pp} \\ \phi_b & 0 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

导管架和桩综合后的广义质量和刚度阵表示为

$$\begin{aligned}
 [M_T] &= [\phi_T]^T \begin{bmatrix} M_\varphi & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & M_{pp} \end{bmatrix} [\phi_T] \\
 [K_T] &= [\phi_T]^T \begin{bmatrix} K_\varphi & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & K_{pp} \end{bmatrix} [\phi_T]
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

此时综合模态运动方程可表示为

$$\begin{aligned}
 [M_T]\{\ddot{X}\} + [C_T]\{\dot{X}\} + [K_T]\{X\} &= \{F_T(t)\} \\
 \{F_T(t)\} &= [\phi_T]^T \{F_1(t)\}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

5) 计算解耦后的综合模态运动方程和各系数阵。

综合模态方程式(4.12)可再解耦, 令 $\{X\} = [\phi]\{\eta\}$ 代入式(4.12)并前乘 $[\phi]^T$, 得

$$[\bar{M}]\{\ddot{\eta}\} + [\bar{C}]\{\dot{\eta}\} + [\bar{K}]\{\eta\} = \{\bar{F}(t)\}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 \{\bar{F}(t)\} &= [\phi]^T [\phi_T]^T \{F_1(t)\} \\
 [\bar{M}] &= [\phi]^T [M_T] [\phi] \\
 [\bar{C}] &= [\phi]^T [C_T] [\phi] \\
 [\bar{K}] &= [\phi]^T [K_T] [\phi]
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

此方程中 $[\bar{M}]$ 等均为对角阵, 求解非常方便。阻尼阵 $[\bar{C}]$ 一般无法解耦, 通常可以临界阻尼或质量和刚度阵的百分数表示。综合模态法原则上只适用于线性系统, 对于某些非线性系统如桩基导管架平台的动力分析也可应用综合模态法并能节省计算时间, 见下一小节中的时域模态分析法。

3. 动力响应

1) 直接时域积分法

这是一种最一般性的方法, 适合用于受到复杂外载荷和系统本身具有特殊阻尼形式的结构。

对于非线性系统, 进行线性处理后也能应用此直接积分法。求解时不需要计算结构的自振频率和模态。可直接按自由度缩聚前或缩聚后的运动方程求解。直接积分法中有许多不同的方法, 如中心差分法、线性加速度法、Newmark β 法和 Wilson θ 法等^[8]。这些方法的基本思想是相似的, 即把随时间变化的运动和外力分成许多微小的时区, 在每一时区内假定运动的加速度按一定的规律变化, 这样把求解二阶线性微分方程组变成求解一线性代数方程组。将此计算结果回代至运动方程一般是不平衡的, 还需有一迭代过程直至达到要求的精度。因此计算工作量很大。此外某些数值积分法不是无条件收敛的, 对时间步长(以下简称时步)的选择也有较严的限制。此方法的优点是适用范围广, 可用于任何形式的海洋结构, 缺点是对结构振动的形式和频率缺乏直观的了解。对于分析结构的特点和避免结构的共振等是很不利的。

2) 时域模态分析法

此方法适合用于分析线性系统承受非线性外力时的动力响应。也可推广用于非线性系统的动力分析。现仍以桩基导管架平台为例。由于导管架平台中桩与土的相互作用是非线性的, 其刚度和阻尼都是非线性的。因此其模态是不确定的, 模态和自振频率均取决于桩端(与导管架对接处)的位移和转角, 而导管架部分虽然受到的外力是非线性的, 流体动力中的阻尼也是非线性的, 但刚度和质量阵是线性的, 因此导管架主体部分的模态和自振频率是确定的。这样在应用综合模态法时是非常有利的。在运动方程解耦后可采用直接时域积分计算每一时步的运动响应, 并按对接处的位移和转角修正非线性桩的刚度阵, 计算其对应的模态和自振频率。具体计算步骤如下:

i) 假定一组不同的桩端水平位移(垂向位移和转角的非线性影响不大, 一般可忽略), 按前述综合模态法计算不同桩端位移下桩的对接主模态 $[\Phi_{pp}]$ 、桩的拘束模态 $[\Phi_p]$ 、导管架的对接加载主模态 $[\Phi_q]$ 、坐标转换阵 $[\Phi_T]$ 和综合模态 $[\Phi]$ 以及解耦后的质量、阻尼、刚度阵 $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 。

ii) 假定初始位移和速度为零或某一确定值, 按式(4.13)计算 $t=0$ 时的 $\{\bar{F}_0(t)\}$ 和加速度 $\{\ddot{\eta}_0\}$:

$$\{\ddot{\eta}_0\} = [\bar{M}_0]^{-1}\{\bar{F}_0(t)\} \quad (4.14)$$

iii) 逐次计算 $t = n\Delta t$, $n = 1 \dots m$ 时的运动响应。按 Newmark Wilson 法每一时步的位移和速度和前一时步的位移、速度和加速度间存在下列关系:

$$\begin{aligned} \{\dot{\eta}_t\} &= \{\dot{\eta}_{t-\Delta t}\} + \Delta t(1-\delta)\{\ddot{\eta}_{t-\Delta t}\} + \Delta t\delta\{\ddot{\eta}_t\} \\ \{\eta_t\} &= \{\eta_{t-\Delta t}\} + \Delta t\{\dot{\eta}_{t-\Delta t}\} + \Delta t^2(0.5-\alpha)\{\ddot{\eta}_{t-\Delta t}\} + \Delta t^2\alpha\{\ddot{\eta}_t\} \end{aligned} \quad (4.15)$$

此处 α 和 δ 为二常数, 分别取为0.25和0.5。代入解耦后的运动方程式(4.13), 此时式(4.13)写成

$$\{\ddot{\eta}_t\} = [\bar{M}_t]^{-1}\{\bar{F}_t(t)\} - [\bar{C}_t]\{\dot{\eta}_t\} - [\bar{K}_t]\{\eta_t\} \quad (4.16)$$

因此式中 $\{\bar{F}(t)\}$ 一般也是 $\{\dot{\eta}_t\}$ 的函数, 求解时可用迭代解。可先假定 $\{\dot{\eta}_t\} = \{\dot{\eta}_{t-\Delta t}\}$, 由式(4.15)计算 $\{\dot{\eta}_t\}$ 和 $\{\eta_t\}$ 以及外力 $\{\bar{F}_t(t)\}$, 再按式(4.16)计算 $\{\ddot{\eta}_t\}$, 重复计算直至前后二次计算所得的 $\{\dot{\eta}_t\}$ 非常接近为止。在同一时步内迭代计算时质量和刚度阵 $[\bar{M}_t]$ 和 $[\bar{K}_t]$ 等可假定为常数(因是非线性系统, 这些系数阵是位移或时间的函数, 但在这一微小的时区内可假定为常数)。因式(4.16)已解耦, 计算是方便的。

iv) 将上述每一时步的位移(对接处的位移)转换成物理坐标的位移

$$\{S_t\} = [\Phi_T][\Phi]\{\eta_t\} \quad (4.17)$$

并按此位移以插入法计算各综合模态 $[\Phi]$ 和广义质量阵等。重复步骤iii)计算下一时步的运动响应直至整个时间历程。

此方法特别适用于那些只要几个模态就能精确地反映结构真实运动的海洋结构, 如导管架平

台和塔式平台等在波浪中的动力响应。

3) 频域分析法

此方法主要用于分析线性系统承受线性载荷时的动力响应,如常规船、半潜船和重力平台等在波浪中的动力响应。特别适用于质量和刚度阵等与频率有关时如浮式结构的运动和受力。频域分析法中又有直接频域法和模态频域法。两种方法的基本思想是相同的,均把与时间有关的外力以与频率有关的调和函数表示,只是模态频域法先将运动方程解耦后求解而直接频域法不解耦直接用调和函数解耦合运动方程。对于每一确定频率的外力(确定性分析)频域分析时的外力和运动响应即方程的解可写成

$$\begin{aligned} \{F_i(t)\} &= \{\overline{F}_i(\omega)e^{i\omega t}\} \\ \{S_i\} &= \{\overline{S}_i\}e^{i\omega t} \\ \{\overline{S}_i\} &= \{S_n\}e^{-i(\omega t)} \end{aligned} \quad (4.18)$$

对于模态频域法,将式(4.18)代入解耦后的运动方程式(4.13)即得

$$\{\overline{S}_i\} = [\Phi_r][\Phi]([\overline{K}] - \omega^2[\overline{M}] + i\omega[\overline{C}])^{-1}[\Phi]^T[\Phi_r]^T\{\overline{F}_i(\omega)\} \quad (4.19)$$

其中质量阵等均为单角阵,计算非常方便。对于直接频域法,将式(4.18)代入未解耦运动方程式(4.3)得一组复数线性方程组,其解为

$$\{\overline{S}_i\} = ([K_{ei}] - \omega^2[M_{ei}] + i\omega[C_{ei}])^{-1}\{\overline{F}_i(\omega)\} \quad (4.20)$$

其中质量阵等为非对角阵,求解比较费时,但省略了结构本身的模态计算。对于结构自由度不太多的海洋结构,可用直接频域法;对于结构能以较少模态表示的多自由度海洋结构,则以使用模态频域法为宜。

对于随机的外力,一般均可采用频谱分析法,此时把引起此随机外力的环境条件(如海浪等)看作一平稳随机过程。海洋结构在此海浪中的各种响应(运动、内力和应力等)也是一平稳随机过程,均可以谱密度来表示此二平稳随机过程的特性。对于线性系统,按照线性叠加原理,系统在由各种频率组成的海浪作用下的响应等于系统在组成海浪的各频率的波浪分别作用下响应的总和。且在系统的输入(浪高)和输出(运动等的响应)间存在简单的线性关系即传递函数,表示为

$$\begin{aligned} T(\omega, \alpha) &= |T(\omega, \alpha)|e^{-i\alpha} \\ |T(\omega, \alpha)| &= \frac{S_s(\omega, \alpha)}{h_s(\omega, \alpha)} \end{aligned} \quad (4.21)$$

此振幅传递函数 $|T(\omega, \alpha)|$ 可通过式(4.19)或(4.20)的计算得到。而在输入和输出谱之间存在下列关系:

$$G_{ss}(\omega, \alpha) = |T(\omega, \alpha)|^2 G_{hh}(\omega, \alpha) \quad (4.22)$$

由此输出的响应谱 $G_{ss}(\omega, \alpha)$ 即可得到响应的各项统计特性。

严格地讲,频域分析只能用于线性系统在线性外力(外力与浪高等成线性关系)作用下的动力响应,但对于某些弱非线性系统如半潜船和重力式固定平台等的运动和强度分析,在将非线性影响线性化后并应用相当波高的概念也可采用频域分析。为了把频域分析也即谱分析方法推广应用于非线性外力,可直接以各节点处的外力作为随机的输入。一般地讲这样计算的工作量是极大的,但不是完全不可能的。对于像集中参数法那样把结构简化成非常简单的结构模型后,以节点外力作为随机输入计算结构的响应是完全可能的。如以模态外力作为随机的输入,则计算更方便。

4) 模态响应谱分析法

此方法又称响应谱分析。比较确切地应称为时域响应谱分析,以区别于频域分析中的谱分析。

此处的所谓响应谱与频域分析中响应谱的概念完全不同。此响应谱是指一具有确定的固有周期的单自由度系统在时历变化的外力或环境条件下系统的最大响应值。在将系统解耦成各独立的模态运动方程后就能方便地确定系统每一模态(固有频率)的运动响应最大值, 总合各模态下的运动响应最大值并转换至物理坐标即为该系统的最大响应。

以一固定式结构在 seismic 时的运动响应为例, 式(4.13)中的外力可写成

$$\{\bar{F}(t)\} = -[\phi]^T[\bar{M}]\{I_i\}A \quad (4.23)$$

其中 A 为地震有效加速度, $\{I_i\}$ 为方向单位阵, 如 X 向地震则对应于 X 向的行为 1, 其余为零。在求得各模态的固有频率后, 由此频率即能从地震响应谱(各国有关的规范中都有)中查得最大响应值和地震有效加速度 A 的比值 S_{\max}/A 。此响应值对应于各模态坐标的加速度响应为

$$\{\ddot{\eta}_i\} = \frac{-[\phi]^T[\bar{M}]\{I_i\}}{[\phi]^T[\bar{M}][\phi]} \ddot{S}_{\max} \quad (4.24)$$

将此模态坐标按式(4.17)转换成物理坐标的加速度并以此加速度引起的各节点的惯性力按静力考虑计算各构件在该模态下的内力或应力。此即为惯性力法。在计算内力或应力时也可采用直接位移法, 此时利用近似关系式

$$\{\eta_i\} \approx \{\ddot{\eta}_i\}/\omega_i^2 \quad (4.25)$$

其中 ω_i 为结构的固有频率。将此位移转换成物理坐标的位移, 乘上结构的刚度阵即得构件的内力。因响应谱分析是在时域范围内的响应, 响应也是时历变化的, 响应不存在固有频率, 也不一定在系统固有频率处响应值最大, 因此式(4.25)是近似的。也即如响应谱是以加速度表示的话, 直接位移法的误差较大。而在响应谱以位移表示时惯性力法(一般认为比直接位移法正确)的误差反而比直接位移法大, 计算工作量又大, 此时应采用直接位移法。

求得结构在各模态下的应力后, 综合各模态的应力即得结构在 seismic 时的最大应力, 综合时一般可用下列关系式

$$\sigma_T = |\sigma_{\max}| + \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sigma_{\max}^2 \right)^{1/2} \quad (4.26)$$

此关系式也带有很强的经验性。因响应是时域的响应, 每一模态响应, 最大值出现的瞬时是不确定的。如结构各模态对应的频率集中在某一狭窄的频率区间内(一般不大可能, 但某几个频率集中在一起是可能的), 则上式是偏于危险的。如自振频率比较分散, 则上式是完全的。

此外模态响应谱分析从理论上讲还有不少不严密之处。如所谓的最大响应其含义是不确切的, 如是指最可能出现的最大值则应和外力施加的时间长短有关; 如是指其他统计极值, 则应和出现的概率相对应。再则此最大响应值还应和外力的统计特性(仅有效加速度是不够的)如平均周期等有关, 这些在响应谱中也没有得到反映。总之此方法是一种经验方法。对特定的外力情况如地震等, 一方面因地震的统计特性和时历变化等很难确定, 另一方面地震引起的外力比较简单又都是作用在基础上的, 影响响应谱的参数相对减少, 这样就有可能得出比较确定的响应谱。且目前各国规范在有关地震分析的条款中都承认此方法的有效性, 因此仍不失为一种可供使用的方法。

五、结 束 语

本文在分析各类海洋结构的特点的基础上概要地论述了海洋结构在任意外力作用下结构的弹性变形和刚体运动间的耦合影响。提出了表征此耦合响应的统一运动方程。此统一运动方程代表