

## 第五篇 海上平台结构

### 第二章 导管架设计

#### 第一节 结构总体确定

##### 一、结构总体布置

###### 1. 基本原则

总体布局合理，传力路径短，构件综合利用性好，材料利用率高，满足其他专业对结构型式的要求。

###### 2. 一般考虑

在进行结构总体布置时，一般应考虑如下几个方面：

- 1) 应尽量使杆件在各种受力状态下都能发挥较大作用，杆件数量和规格力求少，结构尽量对称；
- 2) 不宜在飞溅区内设置水平构件；
- 3) 不宜在冰作用区内设置水平构件和斜撑；
- 4) 一般情况下，管节点宜设计为简单节点；
- 5) 导管架斜撑的角度（即与水平面夹角）宜在 45 度左右；
- 6) 导管架腿的表观斜度宜在 10: 1 ~ 7: 1；
- 7) 隔水导管与结构的连接：如业主没有指定，对于动力响应较明显的平台（如三腿或独腿平台），水上部分（包括在甲板和导管架的水上水平层上），隔水导管和甲板、导管架的连接要用焊接方法固定，水下部分用楔块固定；
- 8) 各桩的受力力求均匀；
- 9) 对于滑移装船吊装下水型导管架，滑靴的布置与吊点的布置要协调考虑；
- 10) 装船滑靴的横向间距的确定应考虑预制场地与运输驳船滑道的间距；
- 11) 应考虑钻井、修井的要求。

##### 二、结构构件的选取

1. 结构构件的选取要综合考虑强度、刚度、稳定性和经济性这几方面的因素。
2. 不论是成品钢管还是卷制钢管，如有可能，尽量减少所用材料的规格。
3. 对于管型构件的选择要考虑下列因素：

- 1)  $D/t$  比：不宜大于 60，对于卷制焊接钢管不应小于 20，最好大于 30；

注：D——中性直径，t——壁厚。

- 2)  $Kl/r$ ：对主要杆件不宜大于 120；

注：k——有效长度系数，l——侧向无支撑长度，单位为米（m），r——回转半径，单位为米（m）。

- 3) -Y-K 节点：主要节点： $d/D=0.4\sim0.8$

次要节点： $d/D$  取值可稍小些；

注：d——支杆直径，D——弦杆外径。

##### 三、结构材料选取

###### 1. 基本原则

结构材料的选取既要考虑强度要求，又要考虑结构工作场所的环境条件，在结构中的部位和可能使用的加工方法等。

## 2. 一般考虑

结构用钢材基本上全部实现了国产化。因此除业主有特别要求外，一般考虑使用国产钢材，相应的，应使用国家标准。卷制钢管，组合梁的尺寸应满足规格书中规定的有关国内和国外的标准。还应考虑制造商的卷制能力。

所选的材料（屈服强度、韧性要求等）及规格、型号必须是能够生产和制造的规格。对国内材料的选取更要注意所选的材料或型号是产品目录中列出及能够生产的。结构分析中使用的屈服强度要与所选用的材料一致。选用钢材时要考虑钢材的冲击试验温度低于预期的最低工作温度以下  $10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ （ $D/t$  比大于 30 为  $20^{\circ}\text{C}$ ， $D/t=20\sim 30$  为  $30^{\circ}\text{C}$ ， $D/t$  在 20 以下为  $10^{\circ}\text{C}$ ）。对于关键管节点部位还要考虑材料的 Z 向性能。还应注意在同一最小设计温度（气温或水温）下，选用的钢材等级随着材料厚度的不同而有所不同。

除了导管架腿上的管节点处使用 Z 向钢材外，对浅水导管架（暂以 50 米水深为界），其他位置均不使用；对深水导管架，可根据其结构情况，对其他位置酌情少量使用。对甲板部分，一概不用。

## 3. 材料替代

经平台作业者的同意和检验机构的认可，可以使用化学成分和机械性能相当、能满足设计要求的其他牌号的钢材替代原设计指定牌号的钢材。

## 四、桩基布置

### 1. 与上部荷载的大小有关的设备布置和设备干/湿重

上部设备的布置和干湿重直接影响着上部甲板的尺寸，进而影响桩的根数及尺寸大小。上部荷载包括固定荷载和活荷载。固定荷载是指永久放在甲板上的设备的重量。活荷载包括：可能加到平台上或从平台上移走的钻井和采油设备的重量；可能加到平台上或从平台上移走的生活住房、直升飞机场和其他的生活供应设备、救生设备、潜水设备和公用设备的重量；消耗品和储罐中液体重量等等。有活荷载的开敞区域以及为二期设备预留更多空间的悬伸结构也同样影响桩的数量及尺寸。

### 2. 在安全系数和桩的极限承载力计算方法的选取上受业主的影响

桩的设计贯入深度使桩具有足够的能力，来承受最大的轴向压力和上拔力，并且具有适当的安全系数。贯入深度安全系数是指桩的极限承载力除以桩的允许承载力。API RP 2A 中推荐的安全系数不应小于下列的数值。

荷载条件	安全系数
1) 设计环境条件加适当的钻井荷载	1.5
2) 钻井作业期间的操作环境条件	2.0
3) 设计环境条件加适当的采油作业荷载	1.5
4) 采油作业期间的操作环境条件	2.0
5) 设计环境条件加最小荷载（对上拔情况）	1.5

安全系数是用来保证桩在受到轴向力作用时设计入土深度处的土体不会受破坏。当然桩体本身的应力也不能太大从而导致桩体材料本身的破坏。桩体本身有安全系数并与土的安全系数相对应。桩体应力的校核可参考 AISC Part5 中有关章节。

在做基础的初步设计之前，对应于每个荷载工况的环境条件和上部荷载都必须经过业主的确认和澄清。业主有时要求设计者多考虑一种设计环境条件或者操作环境条件。

目前在海洋石油开发工程中使用的计算桩的极限承载力的方法有 API、DnV 和  $\lambda$  法。通常

情况下，采用 API 方法。不管选用哪一种计算方法都要事先得到业主的认可。

### 3. 桩的斜度的确定

通常情况下布置在 4 个角上的桩是双斜的，布置在中间的桩是单斜的。对于四腿平台来讲，通常有两根桩是双斜的，考虑到靠船件的设置、钻井船的作业等因素，则另外两根桩是单斜的。有时四腿桩都没有斜度即直桩。

主桩和裙桩的斜度可以一样，也可以不一样。在确定桩的斜度时要考虑水深、导管架在泥面处水平层的最大轮廓尺寸、主桩与裙桩之间的相互作用等因素。桩的斜度通常为  $1/8$ ，也可能  $1/10$ ， $1/12$ 。

桩设计成有一定的斜度，主要是用来扩大导管架在泥面处水平层的面积从而增大结构的整体稳定性。导管架在泥面处水平层的面积越大，则由于总的倾覆力矩而引起的单根桩的桩头力就会越小。

### 4. 腿、裙桩的数目与尺寸

在确定腿、裙桩的数目与尺寸时通常要考虑上部荷载的大小、工艺总体布置、水深和以往的经验等等。导管架腿的直径可以基于上部甲板柱子的直径。在波浪作用区内尽量少布置杆件和减少杆件受力面积，减少波浪力进而减少对基础的要求。腿的内径要有一定的富裕量，以适应腿和桩的椭圆度。对于桩基导管架，通常情况下要在导管架腿柱与桩之间的环形空间内灌浆，一般而言，1.0 英寸到 1.5 英寸的环形空间就能满足要求。

### 5. 桩的布置、尺寸和贯入深度受到裙桩数量的影响

桩的布置随着裙桩数量、位置的变化而变化。在通常情况下，裙桩都是围绕着主角桩布置，靠近主桩的里面或外面。附加的裙桩可以紧挨着布置在里面的主桩。导管架的尺度、水深和其他因素决定着裙桩的数量。如果平台恰好安装在土体有可能滑移区域，为了抵抗土体滑移，往往要加大腿及裙桩的尺寸。桩的贯入深度也随之增加，在这种情况下，一般考虑将裙桩布置在里面。

### 6. 导管架腿桩与支撑形成的管节点

海洋平台中的杆件通常是用钢管，结构中的支管是直接焊到弦管上的。在这些连接中，有时应力集中十分严重，从而导致节点强度降低很多。改善节点强度的方法之一是避开搭接结点而采用简单节点，这样可以使节点外力作用下充分发挥作用。小尺寸的导管架腿桩很难避开搭接节点，导管架腿桩尺寸的加大为焊接节点提供了较大的空间，一般做成简单节点。另一方面，腿桩尺寸的加大会导致波浪力加大，这就需要增加桩的贯入深度。因此在波浪力、腿的尺寸、桩的贯入深度和支撑节点之间需要权衡比较，确定合适的尺寸。

### 7. 裙桩结构以及荷载传递

应该合理地将裙桩连接到导管架腿上，以便导管架上的荷载有效地传到裙桩上。裙桩连接结构应避免与导管架的水平撑杆交叉，布置在外面的裙桩相对于布置在里面的裙桩来讲容易做到这些。考虑到群桩效应，裙桩与主桩的距离应选得合适并能有效地传递荷载。

### 8. 桩的贯入深度应避免有下卧软粘土的砂层

在考虑桩的深度时，桩端所在层土的强度不应明显地高于其下一层土的强度，也就是说不应有下卧软土层。在有下卧软土层的情况下，很容易出现桩突然穿过硬层而到软土层，从而引起冲剪破坏。桩端越接近软土层，两层土的强度相差越大，这种潜在的危险就越容易发生。这是由于土体逐渐变软、破坏或者在荷载的作用下下卧粘土层固结造成的。因此选择桩的贯入深度时应使桩端避开有下卧软土层的砂层。另外桩端距离持力层上下边界的距离还

应满 API RP 2A 中的有关规定。

#### 9. 将裙布置在里面

当土层中含砂砾、云母等很难穿透的材料时，往往考虑把裙桩布置在里面。当平台处在土体有可能滑移处或者平台要承受冰力作用时，也要考虑裙桩布置在里面。布置在里面的裙桩同样也要灌浆以提高其抗水平及轴向荷载的能力。把裙桩布置在内面对主桩的尺寸及贯入深度会有一定的影响。

#### 10. 群桩效应

在初步规划桩的布置时，要考虑群桩效应的可能性。当桩距小于 8 倍桩径时，就要考虑并评价群桩效应。对于主桩来说群桩效应可以忽略，因为对于一座平台而言，主桩的间距都较大。然而，当使用裙桩时，这些裙桩一般都是挨着主桩布置，因此群桩效应的考虑及评价就显得尤为重要。

#### 11. 自升式钻井船作业方面的考虑

这主要与桩的布置有关。如果平台用自升式钻井船进行钻井作业，当考虑桩的布置和平台方位时，应保证钻井船能够方便地在平台旁边抛锚就位。平台结构与钻井船之间的相互干扰应减少到最小。

#### 12. 桩安装方面的考虑

在初步规划桩的尺寸和贯入深度时，必须考虑其将来在海上安装施工的可能性。使用现有的桩锤应该能将桩打到设计贯入深度。主桩通常是水上打，裙桩可以在水上打也可以在水下打。布置在里面的桩可以用打的方法或者钻了再打。当遇到拒锤而采取钻孔或喷射方法时，要考虑土层是否有硬层以及由于打桩与裙桩之间保持适当的距离，一般不会给桩的施工带来问题。因此布置裙桩时，应使其安装起不太困难，而且不干扰主桩的安装。

## 第二节 结构模拟

### 一、坐标系

坐标系统为直角坐标系，Z 轴向上为正，X、Y 为水平轴，Y 轴与结构北一致，X 轴的方向按右手法则确定，坐标原点选在海图水深基准面上。

### 二、编号系统

导管架腿在泥线处节点的编号应按逆时针方向编号。

### 三、腐蚀余量

在进行在位状态分析时，对处于飞溅区内的构件，要考虑腐蚀，腐蚀余量应由业主提供，业主未提供时一般取 0.3mm/a。

### 四、冰磨蚀余量

在进行在位状态分析时，对处于冰作用区内的构件，要考虑冰的磨蚀，冰磨蚀余量应由业主提供，业主未提供时一般取 0.1mm/a。

### 五、优化增量

计算机计算时，壁厚优化增量以 2mm（或 1/8 英寸）为宜。

### 六. 结构模拟过程

目前在海总范围内海洋石油平台结构设计普遍使用的结构分析程序为 SACS (STRUCTURAL ANALYSIS COMPUTER SYSTEM)，它是由美国 EDI 公司开发的，国际海洋石油行业通行的结构分析程序，因此本节的结构模拟以 SACS 为例来说明。对其他结构分析软件也有一定的参考价

值。

## 6.0 SACS 结构模拟

SACS 的结构模拟有三大部分：结构单元特性，结构单元的形成，结构结点。

### 6.1 结构单元特性

SACS 程序单元库包含梁单元，板单元和壳单元。

#### (1) 梁单元

梁单元的截面类型分为规则截面和组合截面（包括等截面）

a. 规则截面有以下几种：圆管、双圆管、工字截面、箱型截面、一般棱柱截面、T 型截面、槽型截面、角钢、锥型过渡体

在结构分析中需要计算各种截面特性  $A$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$  等，在结构杆件的规范核中又需要截面特性和截面详细尺度，如高、宽、厚和主轴位置等。对截面特性和尺度的计算和输入，SACS 程序用“SECT”卡来完成，其具体格式见结构截面特性卡（MEMBER CROSS SECTION STRUCTURAL PROPERTY CARD）。这个卡片有四项内容：截面标识、截面类型、截面详细尺度

SCS 对力学特性和截面尺度的计算和输入采用了多种不同的输入方法：

#### 标准工字钢

EDI 公司对美国 AISC 钢材中的宽翼缘工字钢、日本和中国产的工字钢形成了材料库，各产品的标识简单表示如下：

美国	AISC	宽翼缘工字钢	Waxb
日本	JIS G3192	H 型钢	Haxb
日本	JIS G3192	I 型钢	Iaxb
中国	JIS G3192	型号同日本	Haxb

表中最右一列为材料的截面标识，第一个字母为材料名称，a, b 为截面型号，例如 W36×100，W 标明为 AISC 宽翼缘工字钢 36×100 为工字钢的型号，由 W36×100 就可从材料库中找到相应截面尺度和力学特性。这个标识也就是相应规范中的标识或型号，可以从相应的规范查到。

对材料库中的材料，只要将上述的标识填入杆件组“GRUP”，程序就可从材料库中找到相应材料的尺寸和力学特性，不必再填写“SECT”卡片。

#### 标准型钢

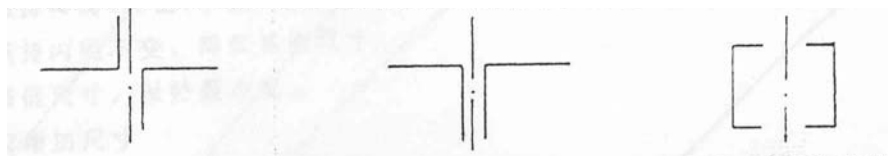
以上列出的规则截面，除美国的 W 型钢，日本的 H 型钢，I 型钢和中国的普通工字钢和轻工字钢已形成材料库之外，还有尚未列入成材料库的钢材。对这一部份材料，包括已编入库文件以外的其他类型的工字钢，其截面尺度和力学特性要用以下两种办法输入：

对圆管截面，不需要“SECT”卡，在“GRUP”中也不需要其截面标识，只要在“GRUP”卡中给出圆管的外径和壁厚，程序就可自动地算出力学特性。

圆管以外的规则截面，包括同心双圆管，需要放置“SECT”卡，用户只填写截面标识、截面类型和截面尺度，对力学特性留以空白，由程序自动计算。

#### b. 组合截面、等效截面

在平台上的各种塔架，往往是轻型桁架，其杆件截面又多是组合截面，如



在设计分析中对桩的等效模拟，或用一个梁来模拟一个上部桁架，则需要设计一个等效的截面。对组合截面和等效截面，其力学特性是比较容易计算的，但其类型和截面尺度则不容易确定。因此对此类杆件，要详细计算其力学特性，初步假定截面类型，估计截面尺度。例如：其算出截面积  $A$ ，扭惯矩  $I_x$ ，抗弯惯性矩  $I_y$ ， $I_z$  后，可以假定其类型为宽翼缘工字钢，估计它的高、宽、厚等。然后填写“SECT”卡，并把截面标识填入相应的“GRUP”卡的相应的列内。

可以看出对此类杆件，其截面类型和尺度都是不确切的，所得到的应力校核结果也是不准确的。必要时，可以根据应力值和具体截面尺度进行手工复核。

## (2) 板单元

如果板单元没有加强筋时，它的截面力学特性就很简单。只给出板厚就可以了，不需要专门的描述。如果带有加强筋，就要有专门的卡片“PSTIF”对其进行描述。

加强筋类型：IMB-I 字梁或 T 型梁、ANG-角钢、CHL-槽钢、BOX-箱型截面

加强筋与板的相对位置：

可以放在板任一侧，也可以放在两侧，只要把贴紧板的一边的尺度记为  $B$  就可以了。

加强筋的力学特性也不需要用户直接计算，只需用户在“PSTIF”卡中填入加强筋的有关尺度，并象杆件单元的“SECT”卡一样，给出加强筋的截面标识。这个标识要填入有关板组的“PGRUP”卡中。

## 6.2 单元分组

### (1) 梁单元分组

梁单元分组，由“GRUP”卡实现。

用“GRUP”卡实现单个单元组的重新设计：

整体结构的重新设计可以用“REDESIGN”卡实现。如果对某个杆件单元组做重新设计，可在“GRUP”卡第 17 列填入相应的参数。

构件长细比

圆柱形受压构件的长细比， $Kl/r$  应按照 AISC 的规定来确定。为确定有效长度系数而作的合理分析应该考虑节点的固定程度和可位移情况。并且，降低系数的合理确定应考虑构件的截面特征和荷载情况。下列数值可以用来代替这种分析。

部位	有效长度系数 $K$	降低系数 $C_m^{(1)}$
上部结构腿柱		
有支撑的	1.0	(a)
门架（无支撑的）	$K^{(2)}$	(a)
导管架腿柱和桩		
灌浆的组合截面	1.0	(c)
不灌浆的导管架腿柱	1.0	(c)
在垫板之间不灌浆的桩	1.0	(b)
甲板桁架的腹杆		

作用于平面内	0.8	(b)
作用于平面外	1.0	(a) 或 (b) (4)
导管架撑杆		
主对角线上, 面到面的长度	0.8	(b) 或 (c) (4)
对K形撑杆, 从腿柱表面到节点中心线的长度 <sup>(3)</sup>	0.8	(c)
对X形撑杆, 较长杆段 <sup>(3)</sup>	0.9	(c)
一般水平杆	0.7	(c)
甲板桁架的弦杆	1.0	(a), (b) 或 (c) <sup>(4)</sup>

注: (1) 降低系数规定如下 (根据 AISC) 的规定:

(a) 0.85

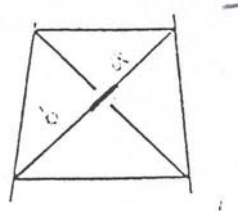
(b)  $0.6 \sim 0.4 (M_1/M_2)$ , 不低于 0.4, 也不高于 0.85。

(2) 采用 AISC 注释中的有效长度计算图。如计算条件与计算图中假定的条件不同时, 可以进行修正;

(3) 如果节点在平面外没有支撑, 则构成节点的构件至少有一对受拉;

(4) 上表给出的 K 值为平面内有效长度系数, 用于平面外时, 要根据平面外的实际支撑长度加以修正。例如, (a) 对如下 X 撑中的 b 杆在平面内的 k 为 0.9。平面外则为:

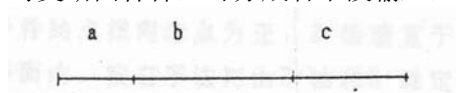
$$K = \frac{a+b}{b} \times 0.9$$



(b) 门架的腿柱, 它的侧向稳定性取决于它本身的刚度和与其连接的梁的刚度。其受压杆件的有效长度不应小于实际的无支撑长度, 也就是说 K 值不得小于 1.0。

#### 杆件分段

对变断面杆件, 可分成若干段输入, 例如一个具有三种断面的梁, 有两种方法输入



a. 输入 a, c 两段的实际长度, b 段长度由程序计算。

b. 输入每段长度和全长的比值。使各段比值之和等于 1.0。

因为三种断面同属于一个杆件, 要用三张标识相同的“GRUP”卡片输入

GRUP ABC.....a

GRUP ABC.....b

GRUP ABC.....c

ABC 为杆件组织标识。a, b, c 为各段的长度, 其顺序是从杆件的始端向末端依次排列的, 既不能颠倒为 c, b, a, 也不能错排为 a, c, b。按比值填写时, 每段的比值都要填写即:

GRUP ABC.....a/L

GRUP ABC.....b/L

GRUP ABC.....c/L

#### (2) 板单元分组

板单元组由“PGRUP”卡来实现

板的分类，在 17 列填写；

M—薄膜板，无出平面变曲刚度

S—剪力板

X—X 方向加筋的板

Y—Y 方向加筋的板

对加筋板，在这里要填入加筋的截面标识，即“PSTIF”卡中指定的标识。

每一板单元中在一个方向，可加入两种类型加筋。如果有与其正交的加筋，可以用另外一张“PGRUP”卡加入。加筋在板中的相对位置，可用 56 列填入的如下参数区别：

B—板底加筋（即在-Z 方向）

T—板加筋

S—对称加筋，即板底，板顶两面加筋

对每一组加筋要给出一个板组标识。

### 6.3 单元描述

#### (1) 梁单元

梁单元描述卡，“MEMBER”

##### a. 梁单元局部座标的确定

参考点注：

根据需要，选择任意一点作为参考点，该点可以是结构上的实际节点，也可以是虚设的点，虚设点必须是固定的。通过参考点和杆件轴线作一平面， $X'$  轴即是杆件轴并从杆件始点指向末点为正， $Z'$  轴垂直于  $X'$  轴并指向参考点的方向。 $X'$  和  $Z'$  同处在这一平面内。按右手法则由  $Z'$  轴和  $X'$  轴定出  $Y'$  轴。参考点不得与杆件轴共线。

参考点缺省法：

参考点缺省时，有两种方法确定杆件局部座标。

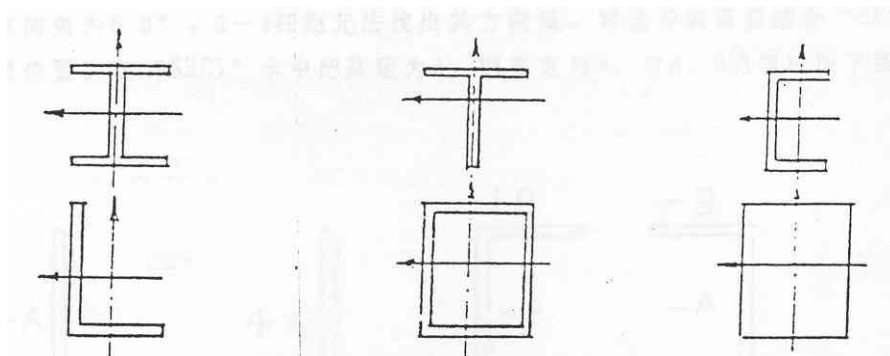
对任意的空间杆件，通过杆件轴作一个平行于总体座标  $Z$  轴垂直于  $XOY$  平面的平面杆件局部座标  $X'$   $Z'$  都处于这个垂直面内。局部  $X'$  轴即杆件轴从杆件始端指向末端。局部  $Z'$  轴垂直于  $X'$  轴，且指向与总体  $Z$  轴成最小夹角的方向。按照右手法则由  $Z'$ ， $X'$  轴定出  $Y'$  轴。

对竖直杆件，即垂直于  $XOY$  平面的杆件：

杆件局部座标  $X'$  轴仍为杆件轴并由始端指向末端。令局部  $Z'$  轴与总体  $Y$  轴平行并同向，然后，按照右手法则确定  $Y'$  轴。

##### b. 梁单元的方向

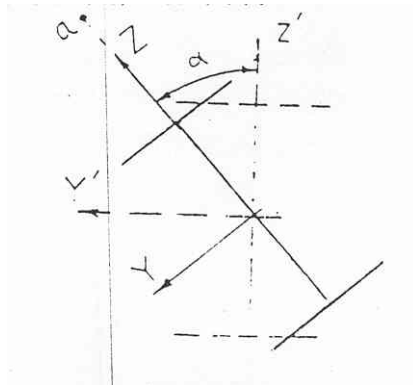
SACS 系统根据 AISC 规范规定了各种型钢截面的主轴如下：



杆件局部座标系统中的  $Z'$  轴与杆件截面的主轴  $Z$  不是相同的。规定了局部座标还不能最后确定杆件在空间的确切位置。还需在确定  $Z'$  与  $Z$  之间的夹角，即方向角。此角以绕  $X'$  转动为正。

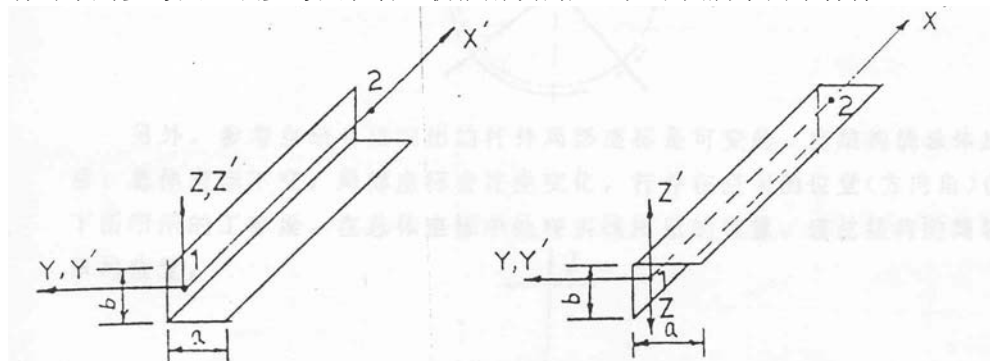
例如在一个斜立面内的水平杆，如下图：



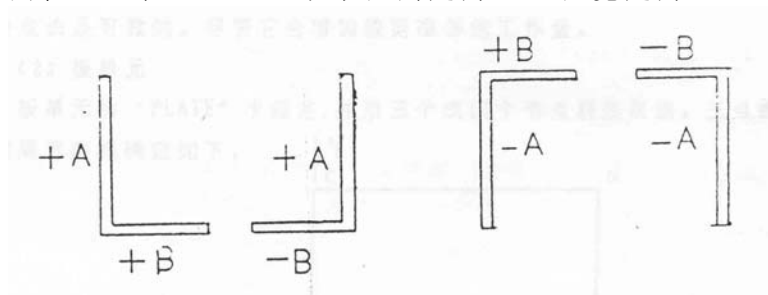


因为这个杆件处于一个斜立面内，它的主轴位置如实线所示，应为  $Y, Z$ 。但是如果采用参考点缺省的方法确定这个杆件的局部座标，它就处于虚线的位置， $Y', Z'$ 。这时  $Z$  轴和  $Z'$  轴就相差一个方向角或称弦角。要正确模拟这个杆件，就必须将  $Z'$  绕  $X'$  轴旋转一个角度  $\alpha$ 。可以看出，正确得到  $\alpha$  的准确值是不容易的。如果在  $Z$  平面内给出一个参考点“a”， $Z'$  轴就被确定与  $Z$  同处于一个平面内，这时的方向角就为零。而零值在程序中又是缺省值。这种作法既准确又方便。

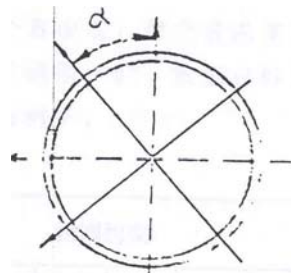
有时采用参考点法或参考点缺省法仍能解决问题，如下图所示两个杆件：



1-2, 3-4 是由截面相同的不等边角钢作成。1-2 杆的局部座标  $Y', Z'$  与截面主轴  $Y, Z$  一致，方向角为  $0.0^\circ$ 。3-4 杆则无法找出其方向角。对这种截面要结合“SECT”卡确定其空间位置。在“SECT”卡中把高定为  $A$ ，把宽定为  $B$ ，对  $A, B$  的填法按下图处理

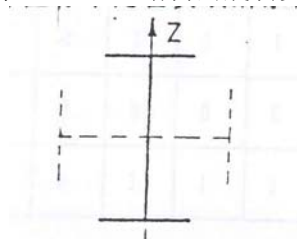


导管架设计中，结构杆件多是圆形截面杆件。圆形截面在空间的位置容易确定，可不考虑方向角。但对斜立面内的圆截面杆件还是给出方向角为好。如果给出了方向角，就可把截面的主轴定在斜立面内，如下图中的实线所示，算出最大的内力。否则程序就以虚线所示的轴线为主轴，可能得到较小的内力。



另外，参考点缺省法定出的杆件局部座标是可变的。当结构绕总体座标轴旋以后，总体座标不变，局部座标会发生变化，杆件在空间的位置（方向角）也会改变。如下图所示的工

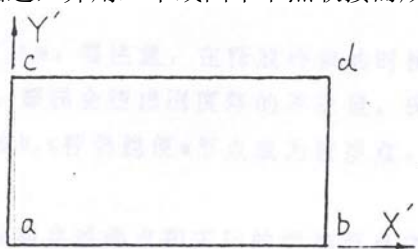
字梁。在总体座标中处在实线所示的位置。通过结构的旋转变为虚线所示的位置。



由于参考点的缺省，程序仍把它的局部座标处理为实线所示的位置。这样算出的内力就错了。结构旋转是经常发生的。在拖航和起吊分析的时候就经常遇到。所以参考点法是可靠的。尽管它会增加数据准备的工作量。

## (2) 板单元

板单元由“PLATE”卡描述，并用三个或四个节点联接而成。三点或四点必须共面。板的



局部座标确定如下：

a, b, c, d 为四个节点，首先填写 a, b 两点，由 a 到 b 定为  $X'$  轴。然后填 c,  $Y'$  轴就由 a 指向 c。按右手法则可定出  $Z'$  轴。板单元可为三角形或四边形。对三角形板单元，只填 a, b, c 三点。三角形或四边形的任一内角不得大于  $180^\circ$ 。

## (3) 壳单元

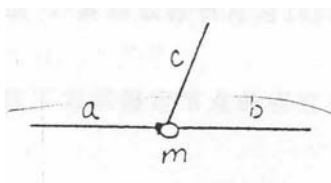
壳单元由“SHLL”卡描述，并由六个、八个或九个节点按逆时针方向依次连接而成。壳单元具有九个节点时，最后一个节点即第九点为中心点。由 1 点到 3 点定为壳单元局部座标的  $X'$  轴的正方向， $Z'$  轴垂直于 1, 3 和 5 点构成的平面。由 1, 3 向量到 1, 5 向量的向量积方向为  $Z'$  的正方向。

## (4) 单元端点约束

梁单元的每端有六个自由度，每个自由度可以是被约束的，也可以是不被约束的，或称约束释放。SACS 系统用“0”或“空白”标识约束，用“1”表示约束释放。下图表示几个简单的约束释放的例子：

梁端类型	始端约束						末端约束					
	$X'$	$Y'$	$Z'$	$\theta_{x'}$	$\theta_{y'}$	$\theta_{z'}$	$X'$	$Y'$	$Z'$	$\theta_{x'}$	$\theta_{y'}$	$\theta_{z'}$
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1

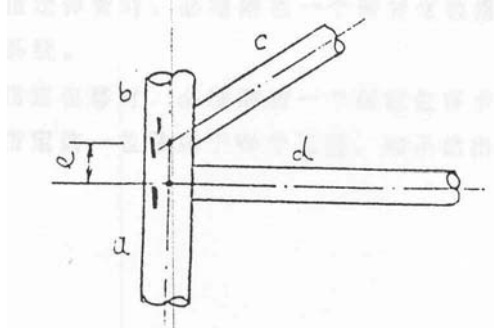
当结构的某个节点为铰节点时，连接到这个节点上的杆件的端部就要释放三个旋转自由度。如下图所示：



三个杆件 a, b, c 连接成节点 m。要注意,在释放约束的时候不能把 a, b, c 三个杆的 m 端的三个转动约束都释放掉。那样会造成刚度阵的不正定。保留一个杆如 a 杆的 m 端的旋转约束而不释放,只释放 b, c 杆仍能使 m 节点成为铰接点。

#### (5) 单元的偏心处理

梁、板、壳单元的自然轴端点或角点和实际的结构节点之间往往会有一定的距离,这一距离称之偏心。



上图表示由杆件 a, b, c 和 d 构成一个节点。在结构模拟中把 1 定为结构节点, 1' 为杆件 c 的自然端点。1 和 1' 之间的距离即为杆件 c 的 1' 偏心。程序把这一偏心处理为一个刚性无限大的刚臂。偏心值可用其在总体座标或杆件局部座标轴上的三个投影分量描述, 并从结构节点到杆件自然端点进行量度。

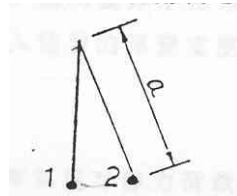
在程度中有相应的卡片用来处理梁、板、壳单元中所存在的偏心问题。同时还可以用偏心的概念处理一些特殊的构造。例如:

不灌浆的桩腿: 这时导管和桩之间用楔块联接, 楔块只传递横向力而不传递竖向剪力和弯矩。

隔水导管和结构的连接也是只传递横向力而不传递竖向力和弯矩。

施工过程中, 可能产生间隙的地方, 只能传递横向力, 而不传递剪力和弯矩。

在这些地方, 两节点往往距离甚近, 或为重合点。这样直接连接两点的杆件甚短或长度为零, 程序不能接受。因此就利用偏心的概念引入 “wishbone”。它的形式如下



上图说明 1, 2 杆的 1 端具有偏心 a。偏心 a 可以是一个指定的适当的长度, 如 15 cm。然后, 将 1-2 杆的一端按上述传力的要求进行释放, 其释放标识可为 100111。

#### 6.4 节点固定性

对不同类型的分析, 用以下方式指定节点的固定性:

静力分析

0 或 2—自由

1—固定, 弹簧, 指定位移

“PILEHD” 或 “111111” —对线性静力分析, SACS

“PILEHD” 或 “222222” —对桩—结构相互作用分析, PSI

“PIXED” 或 “111111” —对 SACS, PSI

“PINNED” 或 “111000” —对线性静力分析, SACS

在某个节点上有指定弹簧时, 必须附加一个弹簧常数指定卡, 在这个卡上给出弹簧常数值和弹簧座标系统。

在某节点上有指定位移时, 必须附加一个指定位移卡。在这个卡上按总体座标给出指定位移, 并且指定这一位移属于哪个工况。如不给出荷载工况。则此位移作用于所有工况。

动力分析

“0” 或 “空白” —自由、表示约化的自由度

“1” —固定

“2” —自由, 表示保留自由度

几点注意:

(1) 空间任意一点, 例如, 作为参考点的点, 可以与任何单元联接, 但必须完全加以固定。

(2) 在泥面处, 隔水导管上的点与结构上的点, 桩上的点与导管上的点不得用“wishbone”联接。

(3) 当隔水导管, 桩在泥面以下与非线性桩联接时, 隔水套管与结构, 桩与导管可在工作点 (working point) 处固结。当隔水导管桩在泥面以下与等效桩联接时, 由于等效桩下端已经固定, 隔水导管与结构, 桩与导管在工作点处仍以“wishbone”联接。

结构必须有几何不变体。结构整体不得作空间的刚体运动。为满足这一要求, 在作结构的吊装分析时, 必须引入适当的弹簧支座。为模拟吊装的真实性, 弹簧常数要足够的小。

## 6.5 桩的结构特性

### 6.5.1 桩的截面特性

在 SACS 系统中, 允许桩截面为圆管和 H 型两种形式。选择 H 型截面时则要用“PLSECT”卡输入截面的力学特性 (如横截面积, 抗扭惯性矩  $I_x$ , 抗弯惯性矩  $I_y$ ,  $I_z$  等), 截面的尺度 (如 H 截面高、宽和剪切面积  $A_y$ ,  $A_z$  等)。对每一截面都要给出相应的截面标识, 对圆管截面可不要“PLSECT”卡。

### 6.5.2 桩的分组描述

在一个结构中可以有截面和长度不同的桩。同一根桩可以分成截面不同的若干段。桩的分组卡“PLGRUP”用来描述桩的这种结构特性。和 SACS 中对杆件的分组卡一样, 对不同截面和长度的桩可用不同的分组标识来区别。对具有不同截面的几个桩段组成的同一根桩, 可用具有相同分组标识的几张“PLGRUP”卡描述。桩的分段是从泥面 (桩顶) 向下依次进行的。各段长度之和等于总的桩长。对每一段, 即每一张“PLGRUP”卡中要填入相应的“PLSECT”卡。对圆管截面则要填入相应的管径和壁厚。

在任意一段中可填入 T 修正系数对该段 T—Z 曲线的“T”值进行修正。

对任意一段都可填入“端部支撑面积”。一般情况下, 只在桩尖一段填入。支撑面积根据实际的土层和桩长, 通过对桩尖具体情况的研究来确定, 一般可按以下几种情况来考虑

闭口桩			桩端封闭面积
开口桩	土塞形成	砂	桩端封闭面积
		粘土	桩端封闭面积×0.8
	土塞未形成	桩的横截面积	

### 6.5.3 桩的几何位置

桩的局部座标

桩的局部座标和结构杆件局部座标的确定方法基本相同。在这里只用参考点缺省法, 同时规定桩的局部 X' 轴沿着从桩底到桩顶的方向。

桩和结构的联接

桩顶点在结构的泥面处通过具有固定性为“222222”或“PILEHD”的结构节点与结构相接。所以除了这些与桩顶点联接的节点以外, 在结构中其他任何节点不得有“222222”或“PILEHD”固定性标识。

确定桩的斜度的两种方法用“PILE”卡实现。

(1) 用两个点确定其斜度。首先填写联接点, 即带有“222222”或“PILEHD”点的节点号, 然后填写沿桩轴线向上结构上的点 (或虚设的点) 节点号。第二点必须在第一点的上方。填卡时必须先填第一点, 再填第二点。

(2) 斜度座标

在“PILE”中填第一点的节点号, 不填第二点的节点号, 可填第一点上方某点的 X, Y, Z 三个座标值。

## 6.6 土壤特性描述

### 6.6.1 土壤对桩的轴向阻力特性

土壤对桩的轴向阻力物性有两类描述方法

(1) 桩的侧摩阻力, ADHESION。这种方法是用桩侧单位面积上所受的磨擦力描述。它不考虑土壤的变形。桩的轴向力首先传给靠近泥面的土层, 超过这层土壤承载能力的轴向力再传给下一层土壤。当桩通过的所有土层都达到了承载能力, 剩下的桩轴力再传给桩尖支撑面积, 如果该面积也达到了它的承载能力, 桩轴力仍有剩余, 则这种传递失败。运行程序给出失败信息。桩顶的轴向位移为桩本身的弹性变形, 无桩的整体下沉。

桩的侧摩阻力的输入又有两种方法: 一种是输入各层土层的土壤物性, 程序自动地按照 API RP 2A 的公式计算出侧摩阻力。一种是根据土工试验结果直接输入侧摩擦阻力。

(2) 桩轴向阻力的 T-Z 曲线

这种描述方法考虑了通过桩表面和其周围土壤之间剪切作用传递桩的轴向力时, 土壤发生变形。剪切力和变形的关系用 T-Z 曲线表达。根据不同的土层, T-Z 曲线可以是反对称的, 也可以不是反对称的。T-Z 曲线可由土工试验得到。利用 T-Z 曲线描述, 在轴向荷载作用下, 桩顶位移包括桩的弹性变形和整体位移两部分。

#### 6.6.2 土壤对桩的横向阻力特性

土壤的这一阻力特性用 P-Y 曲线表达。Y 表示某一桩截面沿垂直桩轴线方向的位移, P 表示单位长度上所受的土壤抗力, P 值直接与桩径有关。

对 P-Y 曲线也有两种输入方法: 一种是利用有关土壤资料, 按照 API RP 2A 的有关公式由程序自动计算形成 P-Y 曲线。一种是直接输入 P-Y 曲线。

#### 6.6.3 土壤对桩的端部支撑特性

当土壤对桩的轴向阻力特性用侧摩阻力, ADHESION 描述时, 或者用 API 法或者用直接输入法, 在 PILEIN.DAT 和 PSIIN.DAT 卡片流中都不需放置端部支撑输入卡片组:

SOIL BEARING HEAD

只在轴向特性输入卡片 SOIL AXIAL HEAD 的 21-30 列填入桩端支撑特性、土壤承载力就可以了。

当土壤对桩的轴向阻力特性用 T-Z 曲线描述时, 在卡片流中就要放置 SOIL BEARING HEAD 为头卡的卡片组。端部支撑特性用 Q-Z 曲线描述。对每一层都可以输入 Q-Z 曲线, 但是在具体分析中只输入桩尖所在土层的 Q-Z 曲线。

#### 6.6.4 土壤对桩的扭转支撑特性曲线

土壤对桩的扭转支撑特性与轴向支撑特性, 横向支撑特性和端部支撑特性都是无关的。在 PSI 分析中要考虑杆件的扭转作用, 同时也考虑桩的扭转作用, 但它在桩的非线性解析中独立进行。单桩分析程序是一个平面解析程序, 无法考虑桩的扭转特性, 因此在 PILEIN.DAT 中不出现桩的扭转特性卡。

扭转支撑特性有两种输入方法:



(1) 用土壤扭转弹簧输入卡片, 在桩顶输入一个扭转弹簧刚度系数, 其取值可依经验设定。当桩的轴向支撑特性用 T-Z 曲线输入时, 这里可用扭转弹簧常数输入扭转支撑特性。

(2) 用侧摩阻力 ADHESION 输入扭转支撑特性, 其输入方法与轴向支撑特性 ADHESION 的输入方法相同。摩阻力取值也可以相同。

#### 6.6.5 土壤分层

实际的桩要穿过各种性质不同的土层。在每一层的顶部和底部要输入如下面各节所提到的轴向支撑特性、端部支撑特性、扭转支撑特性和横向支撑特性。

土壤是从泥面(桩顶)向下逐段垂直分层的。并用从泥面(桩顶)量起的距离确定各层的位置。在每一层土壤中, 土壤的支撑特性可能有两种情况: 一种是从层顶到层底支撑特性保持不变, 另一种是从层顶到层底支撑特性呈直线变化。为完成这两种不同情况的支撑特性输入, 用如下方法填写土层位置:

	层顶位置	层底位置	图 例
①	填 写	填 写	
②	填 写	空 白	

① 支撑特性为常数

② 支撑特性从层顶直线地变化为下层层顶的支撑特性

PILE 程序用有限差分法进行桩分析时，由于差分点的数目远比土层数目为多，差分点与土层分界点不是一一对应的。也就是说不是所有的差分点上都有与其对应的直接输入的支撑特性。为此在每一土层内差分点上的支撑特性可用该土层层顶和底层支撑特性值在内插得到。

支撑特性从泥面（桩顶）开始，向下逐层输入，不得颠倒次序和间断输入，第一土层位置必须从 0.0 开始。

#### 6.6.6 单位制和修正系数

土壤资料所采用的单位制，参考桩径，表达方法与本程序所采用的单位制，桩径、表达方法可能不一样，如果把土壤资料的有关数据都按照本程序的要求加以改变，工作量是相当大的。另外，根据实际情和不同的分析目的有时也需要改变某些土壤数据。程序引入了一些改变单位制的信息和修正系数来解决这些问题。

#### 6.7 Dummy 结构

Dummy 结构是这样一种结构，它是为计算环境荷载的需要而模拟的，它只用于传递荷载，而不考虑其本身的刚度，如登船平台等等。

Dummy 结构通过边界点与主结构相连，由其产生的环境荷载也通过这些边界点传给主结构。

SACS 程序有 Dummy 结构模拟功能，具体方法参考相关的手册。

#### 6.8 非结构单元

非结构单元与Dummy结构的定义类似，但是其不需要与主结构相连，即不像Dummy结构需通过边界点与主结构相连。如立管所产生的环境荷载的模拟可使用非结构单元。SACS程序有非结构单元模拟功能，具体方法可参考相关手册。

### 第三节 荷载模拟

#### 一、固定荷载

##### 1. 固定荷载定义

固定荷载包括平台结构的重量和在某个作业形式下不变化的任何永久设备和附属结构的重量。固定荷载应包括下列各项：

- 1) 平台结构在空气中的重量，还包括适当的桩、水泥浆和压载的重量；
- 2) 永久安装到平台的设备和附属结构的重量；
- 3) 作用在水面以下结构上的静水力，包括外压力和浮力。

##### 2. 结构自重及浮力

计算模型模拟的构件其自重（包括浮力）一般由程序自动计算。至于模拟构件时为简化而省略的构件如板、次梁、楼梯、栏杆、走道、设备基座、防沉板等，则必须由设计人另行将其重量（包括浮力）输入模型中或采用系数法，但针对不同计算状态，应选用不同的系数或方法。

自重和浮力的模拟：

结构自重可以在任一个指定的荷载条件下进行计算。它的计算卡片是“DEAD”。在这个卡片中，用户可以选择总体坐标轴（X，Y，Z）中的任意一个作为垂直坐标轴，这一选择是很有用的，在地震力近似计算中可以用来计算任意方向的地震力。在制造、安装过程中，计算结

构在任意状态下的重力。为此，可以分别以 X, Y, Z 为竖直轴，计算重力，然后利用“LDCOMB”卡按照一定的组合系数将三个方向的重力进行组合，就可得任意方向的重力。

当结构处于水中时，可以计算结构在水中的重量，即计算结构在水中的浮力，然后用空气中的重量减去浮力。

计算浮力的方法有两种，海洋法(MARINE)和理论法(RATIONAL)。

海洋法是用物体排开水体的重力来计算浮力的，浮力沿着杆件轴线垂直向上分布。

理论方法用物体表面所受的水压力计算浮力。浮力在包括杆件在内的竖直面内沿杆件作垂直分布。

在设计中，两种方法都是可用的，海洋法是近似的，也较简单。如果在 SACS 程序中作静水压溃分析时，即在杆件轴力和静水压力共同作用下作静水压溃分析时，其计算公式就因浮力计算的方法不同而略有不同。

对于导管架，根据计算模型的模拟程度和设计阶段的不同，结构重量系数取值不同，一般情况下宜采用如下值：

#### 1) 导管架：

(1) 概念设计：取 1.30（不模拟附属构件）；

(2) 基本设计：取 1.10 -- 1.20（视附属构件的模拟情况取值，如模拟了登船平台、靠船件、立管、电缆护管、泵护管、阳极块、桩腿间环形空间内水泥浆重量和隔水导管内容物的重量等，则可取 1.10）；

(3) 详细设计：取 1.05 -- 1.10（视附属构件的模拟情况取值，如模拟了登船平台、靠船件、立管、电缆护管、泵护管、阳极块、防沉板、隔水导管导向、登船楼梯、吊点、水下桩调平装置、封隔器、桩腿间环形空间内水泥浆重量和隔水导管内容物的重量等，则可取 1.05）。

#### 2) 甲板：

见平台上部结构设计。

#### 3. 设备自重

见平台上部结构设计。二、活荷载

##### 1. 活荷载定义

活荷载是在平台的使用期间作用在它上面的荷载，它可能在一种作业形式期间就发生变化，也可能从一种作业形式到另一种时发生变化。

##### 三、吊机和修井机荷载

##### 四、见平台上部结构设计海洋环境荷载

##### 1. 环境荷载定义

环境荷载是由包括风、流、波浪、地震、雪、冰和土壤移动等自然现象作用在平台上的荷载。环境荷载还包括由于波浪和潮汐引起水位变化而产生的作用在构件上的静水压力和浮力的变化。环境荷载作用的方向是不定的，除非已掌握的特定条件使得不同于上述的假设更合理。

应要求业主提供考虑方向的波浪、风和流三个参数的联合概率值。

##### 2. 风荷载

见平台上部结构设计

##### 4) 风向与波流同向。

##### 3. 波、流荷载

波流荷载的计算应参见API RP 2A中的公式。

计算波浪作用在圆柱形物体上的力取决于波长与杆件直径的比值。当比值较大(>5)时,则杆件不会明显改变入射波浪,那么,波浪力就可按如下的Morison公式作为拖曳力和惯性为的和来计算:

$$F = F_D + F_I = C_D \frac{\omega}{2g} AU |U| + C_M \frac{\omega}{g} V \frac{\delta U}{\delta t}$$

式中:  $F$ —垂直作用于构件轴线单位长度上的水动力矢量,  $N/m(1b/ft)$ ;

$F_D$ —垂直作用于构件轴线并在构件轴线和速度 $U$ 平面内单位长度的惯性力矢量  
 $N/m(1b/ft)$ ;

$F_I$ —垂直作用于构件轴线并在构件轴线和 $du/dt$ 平面内的单位长度的惯性力矢量,  
 $N/m(1b/ft)$ ;

$C_D$ —拖曳力系数;

$\omega$ —水的重度,  $N/m^3(1b/ft^3)$ ;

$g$ —重力加速度,  $m/sec^2(ft/sec^2)$ ;

$A$ —垂直于圆杆轴线单位长度上的投影面积(对圆形杆件为 $D$ ),  $m(ft)$ ;

$V$ —圆杆单位长度上的体积(对圆形杆件为 $\pi D^2/4$ ),  $m^2(ft^2)$ ;

$D$ —包括海生物在内的圆形杆件的有效直径,  $m(ft)$ ;

$U$ —垂直于构件轴线的水流(由波浪和/或海流引起的)速度矢量的分量,  
 $m/sec(ft/sec)$ ;  $|U|$ — $U$ 的绝对值,  $m/sec(ft/sec)$ ;

$C_M$ —惯性力系数;

$\frac{\delta U}{\delta t}$ —垂直于构件轴线的水流局部加速度矢量分量,  $m/sec^2(ft/sec^2)$ ;

这里所用的Morison方程,在计算惯性力时忽略了对流加速度分量。同时也忽略了升力击力和轴向力的Froude-Krylov力。

当结构或杆件的尺寸足够大以致占波长的很大比例时,入射波浪就会发生散射或绕射。这种绕射通常发生在构件的宽度大于波长的1/5时。应该使用绕射理论而不是Morison方程计算作用在结构上的入射波浪和散波浪的压力。根据其直径,沉箱可能位于绕射范围内,特别是对于较低海况的疲劳条件时。T. Sarpkaya和M. Isaacson的“海洋结构物波浪力学(Van Nostrand Reinhold公司1981年出版)”叙述了绕射理论。对于一个从海底一直伸出自由液面的圆形构件(沉箱)的线性绕射问题的解决方法见R. C. Mac Camy和R. A. Fuchs的“桩柱波浪力”: A Diffraction Theory (Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo No. 69, 1954年)。

在计算波浪、流荷载时,如果波浪和流同时存在时,应选择将波浪和流从作用在相同方向,水质点的运动特征应考虑波浪和流的联合作用,所以应将波浪和流在模拟在同一荷载工况。波浪理论的选择应基于平台场址的具体条件,根据API RP 2A的图5-2-3-3 确定。

一般情况下,波、流的方向至少取8个方向,方向为 $0^\circ$ 、斜向、 $90^\circ$ 、斜向、 $180^\circ$ 、斜向、 $270^\circ$ 和斜向。斜向作用方向的确定应通过方向搜索得到,通过比较不同角度下导管架基底剪力和倾复力矩的值,从而确定最大基底剪力和最大倾复力矩的斜向方向。当最大基底剪力和最大倾复力矩的方向不一致时,如果二者产生的桩头力相差在5%以内,可选择产生较大



桩头力的方向，否则两个方向均需考虑。不论是对操作条件还是极端条件，都要进行这样的搜索。

为了考虑海生物对波浪力的影响，可考虑海生物增大杆件直径，即在原杆件直径的基础上增加两倍海生物的厚度。

附属构件可以使用简化后的模拟杆单元代替，模拟杆单元的直径可按等效投影面积的方法确定（考虑海生物的厚度），模拟杆单元的  $C_d$  和  $C_m$  系数，采用如下方法修正：

$$\begin{aligned} \text{修正的拖曳力系数} \quad C_d &= \frac{1}{D'} \sum_1^n D_i C_{di} \\ \text{修正的惯性力系数} \quad C_m &= \frac{1}{(D')^2} \sum_1^n (D_i)^2 C_{mi} \end{aligned}$$

式中：  $D_i, D'$  = 分别为实际的和模拟的构件直径

在计算波浪力时，应根据下列步骤考虑相关因素（计算程序示意图见5-2-3-1）：

- 应根据图 5-3-3-2 确定波浪的表观周期，以便考虑流对波浪的多普勒（Dopper）效应。
- 根据平台所处地理位置的波高、风暴水位和表观周期等参数，采取图 5-2-3-2 中推荐的方法，确定适合该水域的两维波浪运动理论。
- 但是两维的波浪理论并不能真实地反映自然界中波浪形状的不规则性和传播的方向性，所以推荐使用波浪运动系数来折减两维波浪理论中的水平速度和加速度。对于热带风暴，推荐使用 0.85-0.95 的波浪运动系数；对于极热带风暴，推荐使用 0.95-1.0 的波浪运动系数。
- 由于平台产生的阻挡作用，靠近平台附近的水流不同于自由水流中的流态，部分水流偏转绕开结构构件，而不是直接作用于结构构件上，导致作用于结构上的流速减小。所以结构分析中一般根据不同的结构形状，选取一定的阻挡系数来考虑流速的降低。表 5-2-3-1 中对不同腿数的导管架提出阻挡系数推荐值。

稳定流的阻挡系数可由“调节盘”模型（Taylor, 1991）来估算，即：

$$[1 + \sum (C_d A)_i / 4\bar{A}]^{-1}$$

式中，  $\sum (C_d A)_i$  是流场中所有杆件（包括水平杆件）“拖曳面积”的总和，  $\bar{A}$  是平台的周边面积内垂直于海流方向的投影面积值。当结构的几何形状随水深变化较大时，可以根据不同的水深来计算阻挡系数。如果计算的折减系数低于 0.7 时，应考虑将平台模拟成一系列的“调节盘”，而不是一个单一的“调节盘”。

在使用 SACS 程序进行上述计算时，程序需要根据提供的参考高程位置计算阻挡稀疏。实际上该阻挡系数只是反映了选择高程处的阻挡系数，但该系数将作用整个平台的

阻挡系数用于折减流速。所以在选择参考高程时，应避免导管架水平撑所在的位置，以免使用过大的阻挡系数。

- e) 在计算作用于结构的波浪力时，需使用波浪运动系数折减后的波浪水质点的速度与不同水深处的流速叠加。但是流速一般只考虑到波浪的平均水面，对于不同的波面位置的流速，可以采用拉伸或压缩的方法来获得。非线性拉伸是较精确的方法，也可以采用线性拉伸的方法。海流垂向分布线性和非线性延伸的比较见图 5-2-3-4, API RP 2A 中的注释 C2.3.1.b5 对该部分有较详细地描述。
- f) 在海生物活动活跃的海域，平均水位以下的结构构件上，会有海生物聚集，从而增加杆件的尺寸、粗糙度和结构自重。生长海生物的结构杆件称为粗糙杆，无海生物生长的杆件称为光滑杆。海生物的分布及性质如范围、厚度和壁厚等一般应从设计基础数据中获得，尤其是海生物厚度，它对平台荷载影响较大，应予以充分重视。如果设计基础数据中没有给出海生物的数据，海生物厚度可参考临近平台的海生物厚度值，海生物生长的上边界可取平均海平面，下边界取海床表面。海生物的密度一般可取  $1.4\text{t/m}^3$ 。
- g) 对于常规的管状导管架结构杆件，光滑杆件的  $C_d$ 、 $C_m$  推荐值分别为 0.65 和 1.6，粗糙杆件的  $C_d$ 、 $C_m$  推荐值分别为 1.05 和 1.2。对于非圆管构件，可以参见 DNV 的“海上结构的设计、建造和检测规范：附录 B—荷载”。
- h) 当隔水套管间距较近时，由于水动力的屏蔽作用，作用于隔水套管的波浪力减小，这可以通过对拖曳和惯性力系数使用屏蔽系数来实现。屏蔽系数取决于隔水套管的中心距与隔水套管直径之比，系数的取值详见图 5-2-3-5。
- i) 附属构件如登船平台、靠船件、走道、斜梯、立管、各类护管、灌浆和充水管线、控制管线、阳极等，应考虑包括在水动力计算模型中。根据附属结构的类型和数量不同，有可能极大地增加整体波浪荷载。如果附属构件对整个结构的刚度影响不大，可以用虚拟杆件或水下体积模拟附属杆件承受的波浪荷载，然后利用刚性分布的原则将荷载分配到附属构件与主结构的连接点上。阳极一般可以采用同等漂浮重量、同等体积的圆管模拟。

根据设计阶段的不同，波浪、流荷载系数可采用如下值：

- 1) 概念设计：取 1.30（不模拟附属构件）；
- 2) 基本设计：取 1.10 ~ 1.20（视附属构件的模拟情况，如模拟了登船平台、靠船件、立管、电缆护管、泵护管、阳极等，则可取 1.10）；
- 3) 详细设计：取 1.05 ~ 1.10（视附属构件的模拟情况，如模拟了登船平台、靠船件、立管、电缆护管、泵护管、阳极块、防沉板、隔水导管导向、登船楼梯、吊耳、水下桩调平装置、封隔器等，则可取 1.05）；

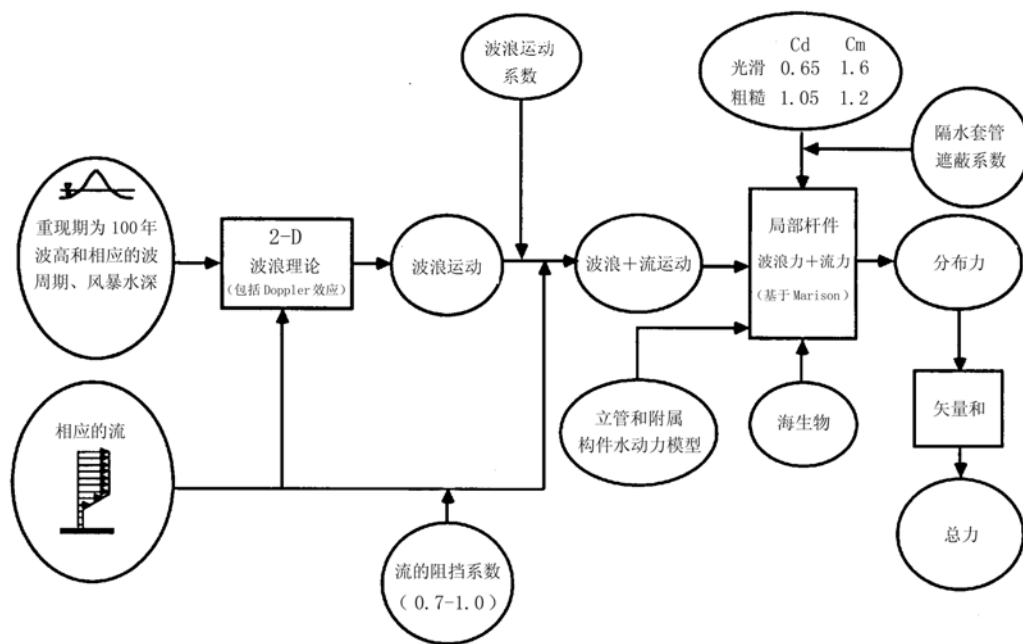


图 5-2-3-1 计算波浪力+流力的静力分析程序

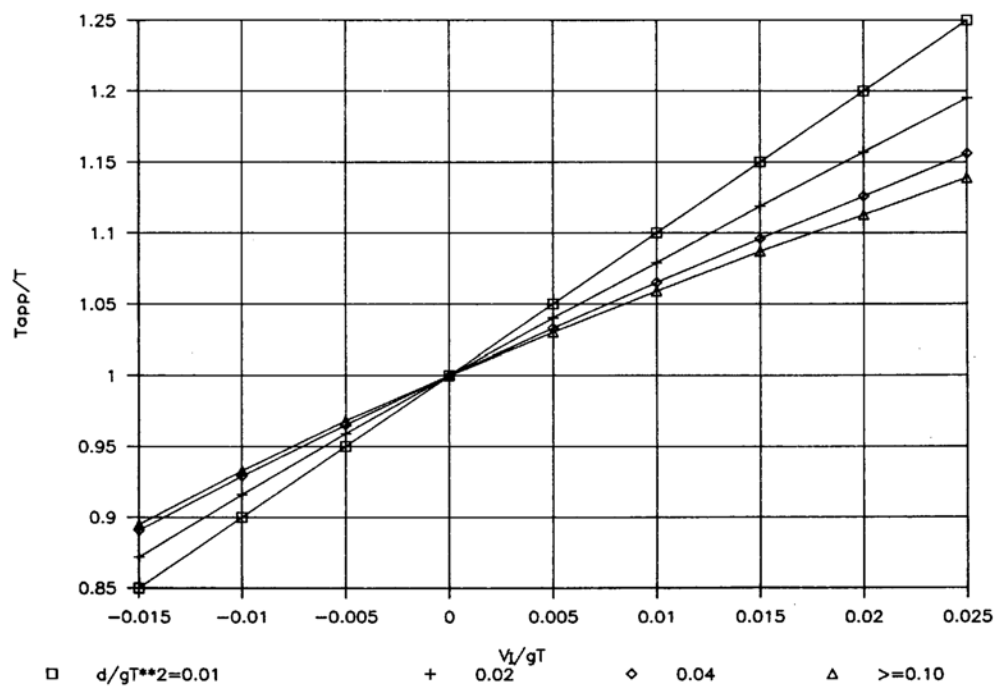
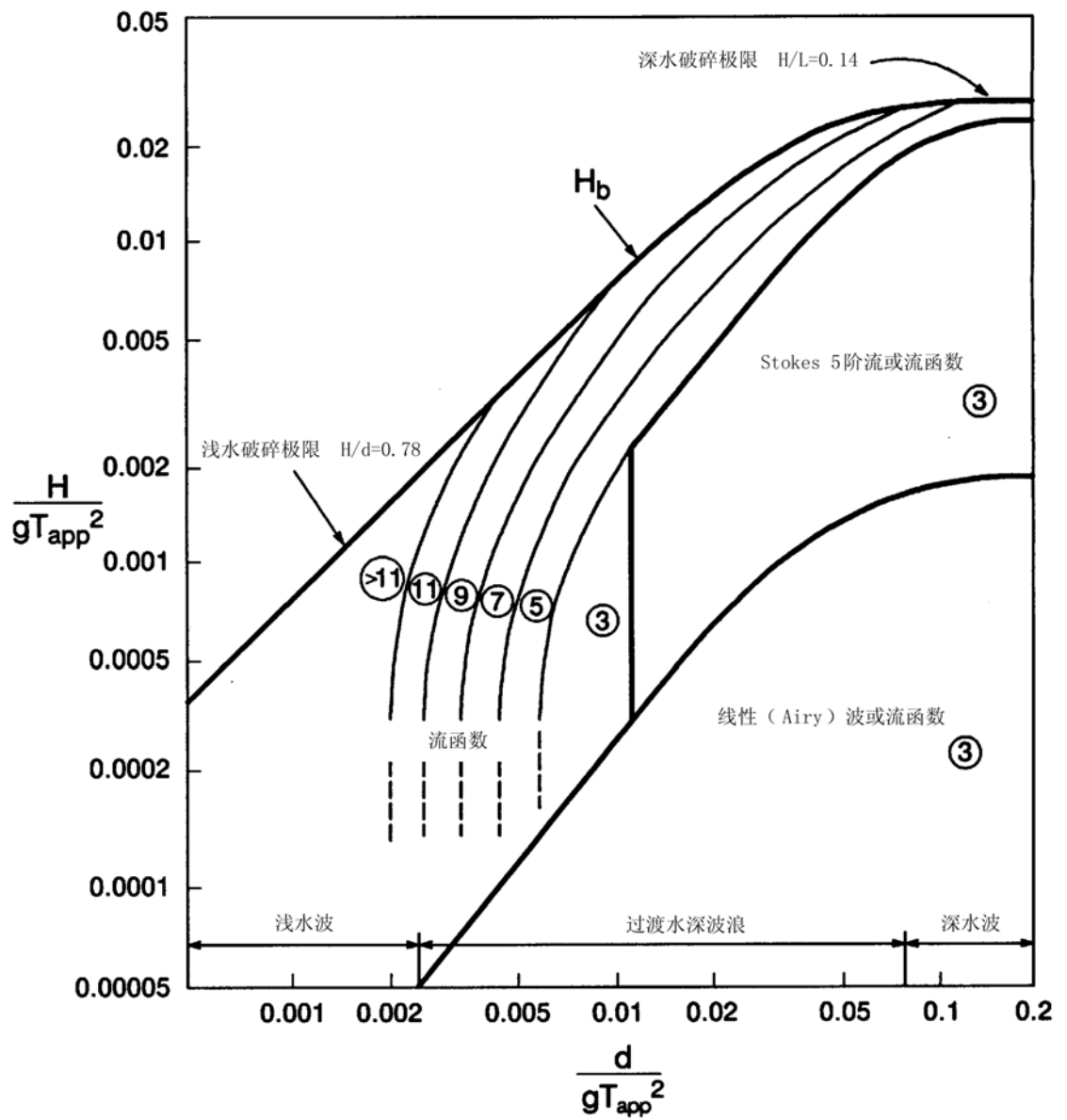


图 5-2-3-2 稳定流引起的 Doppler 变换

表： 5-2-3-1 不同腿数的导管架阻挡系数推荐值

桩腿数	方向	系数
3	各个方向	0.09
4	端面	0.80
	对角线	0.85
	侧面	0.80
6	端面	0.75
	对角线	0.85
	侧面	0.80
8	端面	0.70
	对角线	0.85
	侧面	0.80



$H/gT_{app}^2$  : 无量纲, 波陡  
 $d/gT_{app}^2$  : 无量纲, 相对深度  
 $H$  : 波高  
 $H_b$  : 破碎波高

$d$  : 平均水深  
 $T_{app}$  : 波周期  
 $g$  : 重力加速度

图 5-2-3-3 流函数, stokes 五阶波和线性波理论的适用范围

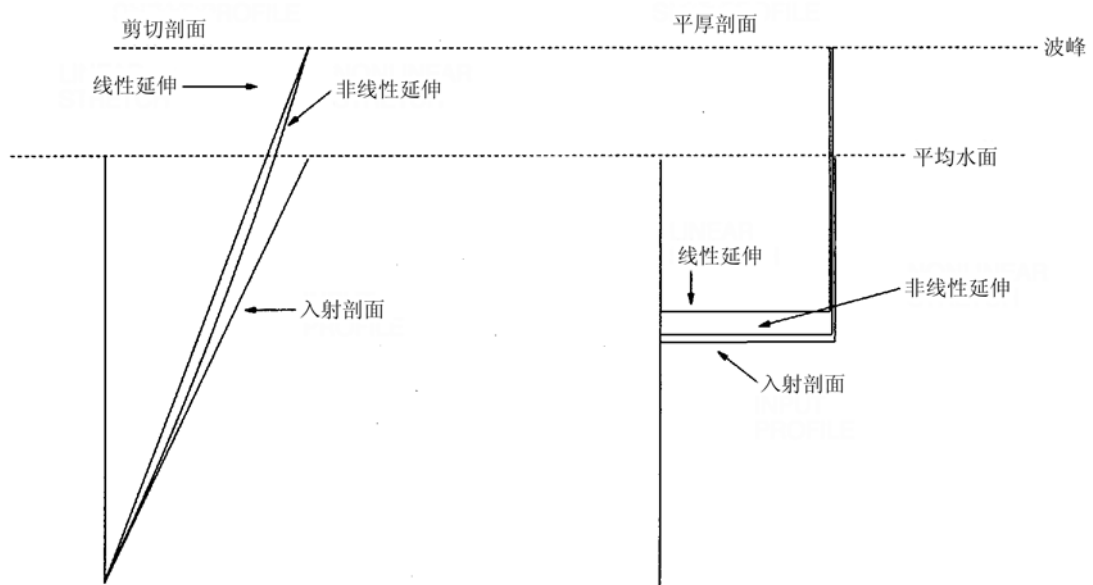


图 5-2-3-4 海流垂向分布线性和非线性延伸的比较

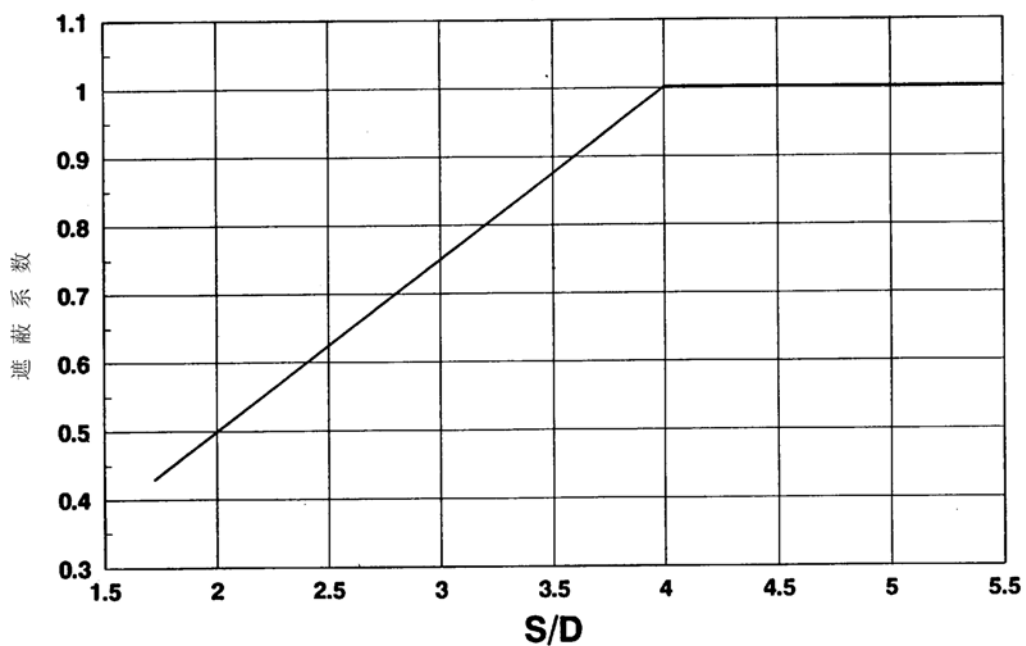


图 5-2-3-5 隔水套管间距函数的隔水套管组上波浪力遮蔽系数

飞溅区的确定：

位于飞溅区的构件，阴极保护系统不能对其提供有效的保护，而涂层又可能遭受船舶等碰撞的损伤，所以对该区域的杆件，应采用特殊的涂层并考虑适当的腐蚀余量。飞溅区的范围可按如下公式确定。对处于飞溅区内的构件，杆件壁厚应扣除腐蚀余量。腐

蚀余量一般取值为设计基础条件中建议的年腐蚀速率和平台的设计寿命（年）的乘积，如果设计基础条件中没有包含建议的年腐蚀速率，对于国内近海海域的固定平台，腐蚀余量可取 0.3 mm/a。

飞溅区上边界标高：DHWL+2H<sub>s</sub>/3+△

飞溅区下边界标高：DHWL-H<sub>s</sub>/3-△

注： DHWL --- 操作条件下的设计高水位,单位为米（m），对于渤海海域，可采用HAT

DLWL --- 操作条件下的设计低水位,单位为米（m），对于渤海海域，可采用LAT

HAT --- 最高天文潮位,单位为米（m）

LAT --- 最低天文潮位,单位为米（m）

H<sub>s</sub> --- 操作条件下的有效波高,单位为米（m）；

△ --- 施工和测量误差：当水深小于等于 50 米时，取 0.5 米

当水深大于 50 米时，取 1.0 米

#### 4. 冰荷载

在寒冷地区，冰可能成为平台的控制荷载。冰可以以单层冰、重叠冰、冰脊或冰山的形式存在，在我国海域一般分为单层冰和重叠冰。单层冰和重叠冰的单轴抗压强度一般不同，在设计中应选择相应的值。

##### 1) 冰磨蚀区的确定

如业主没有规定，则按如下确定。对处于冰作用区内的构件，杆件壁厚应扣除冰磨蚀余量。冰磨蚀余量一般取值为设计基础条件中建议的年冰磨蚀速率和平台的设计寿命（年）的乘积，如果设计基础条件中没有包含建议的年冰磨蚀速率，对于渤海湾海域的固定平台，冰磨蚀余量可取 0.1 mm/a。

磨蚀区上边界标高：WHAT+0.1H+△

磨蚀区下边界标高：WLAT-0.9H-△

注 1： WHAT --- 冬季最高天文潮位,单位为米（m）

WLAT --- 冬季最低天文潮位,单位为米（m）

H --- 冰厚,单位为米（m）

△ --- 施工和测量误差：当水深小于等于 50 米时，取 0.5 米

当水深大于 50 米时，取 1.0 米

注 2： 如无冬季天文潮资料，可用年资料

2) 在确定冰作用点时，冰在水面以上的高度取冰厚的十分之一；

3) 冰力的计算方法：

##### ① 孤立柱冰力

作用在垂直和接近垂直(与水平面交角大于 75 度)的孤立柱（D≤2.5m）上的水平冰力 F 按下式计算：

$$F = m I f_c \sigma_c D h$$

式中：

m—形状系数，取值如下：

圆形截面：0.9

方形截面：

冰正向作用：1.0

冰斜向作用：0.7

I—嵌入系数；

f<sub>c</sub>—接触系数；

$\sigma_c$ —冰无侧限压缩强度(MPa);  
D—冰挤压结构的宽度(m);  
h—冰厚(m)。

对圆形截面的柱, 嵌入系数I和接触系数 $f_c$ 的乘积由下面经验公式确定:

$$If_c = 3.57h^{0.1}/D^{0.5}$$

式中:

h和D单位为cm。

## ② 导管架冰力

非堵塞情况:

导管架总冰力为各腿柱和隔水导管的冰力之和, 单腿柱冰力按①小节计算。在计算总冰力时, 应考虑腿柱和隔水导管间的相互影响。具体如下:

- 所有隔水导管上的冰力按①计算, 并按 0.9 的系数折减;
- 对于阵列布置的隔水导管群, 其遮蔽系数按附图 5-2-3-6 和附图 5-2-3-7 两种情况确定;
- 位于隔水导管群后方, 在冰破碎带内的腿上的冰力按 0.1 的系数折减; 而位于隔水导管群后方, 不在破碎带内腿上的冰力按 0.5 的系数折减。
- 对于没有隔水导管的四腿导管架, 腿的冰力系数按附图 5-2-3-8、附图 5-2-3-9、附图 5-2-3-10 和附图 5-2-3-11 四种情况确定(四腿以上的导管架的冰力系数的确定参照以上处理)。

部分堵塞情况

部分堵塞情况是指仅井口区堵塞的情况, 此时导管架上的总冰力为堵塞区冰力与导管架所有腿上的冰力之和。

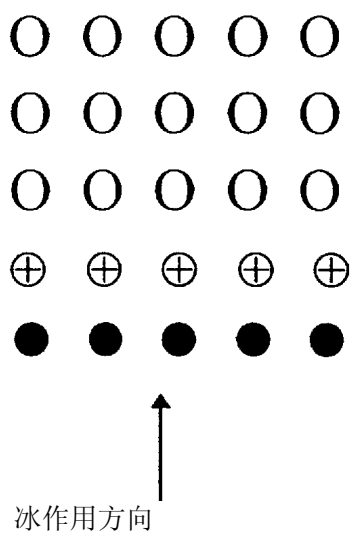
在这种情况下, 对于堵塞区, 取 $If_c=0.4$ , 而形状系数m在冰斜向作用时为 0.9, 正向作用时仍为 1.0。其构件间的相互影响如下考虑:

- 位于隔水导管群后方, 在破碎带内腿上的冰力为零;
- 位于隔水导管群后方, 但不在破碎带内的腿上的冰力按 0.5 的系数折减;
- 在结构分析时, 将堵塞区的冰力按隔水导管数均分加到结构上。

全部堵塞情况

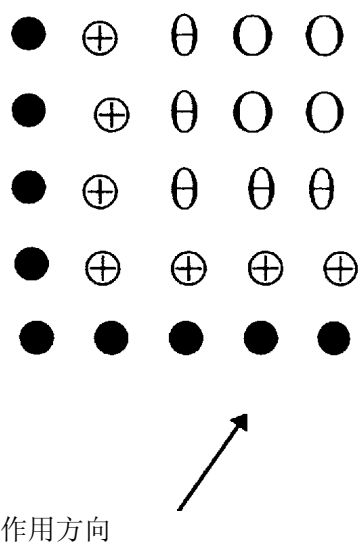
一般不考虑整个导管架全部堵塞的情况。





遮蔽系数  
 ●: 1.00  
 ⊕: 0.10  
 θ: 0.05  
 ○: 0.00

附图 5-2-3-6 冰作用方向

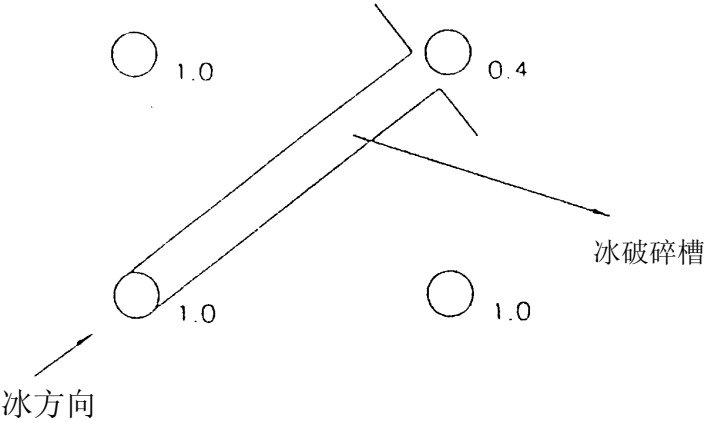


遮蔽系数  
 ●: 1.00  
 ⊕: 0.10  
 θ: 0.05  
 ○: 0.00

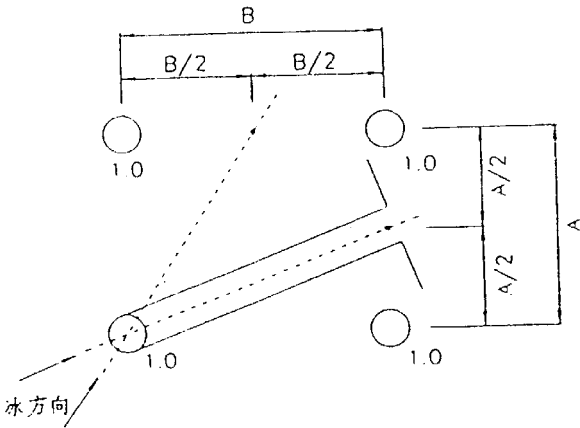
附图 5-2-3-7 冰作用方向 2



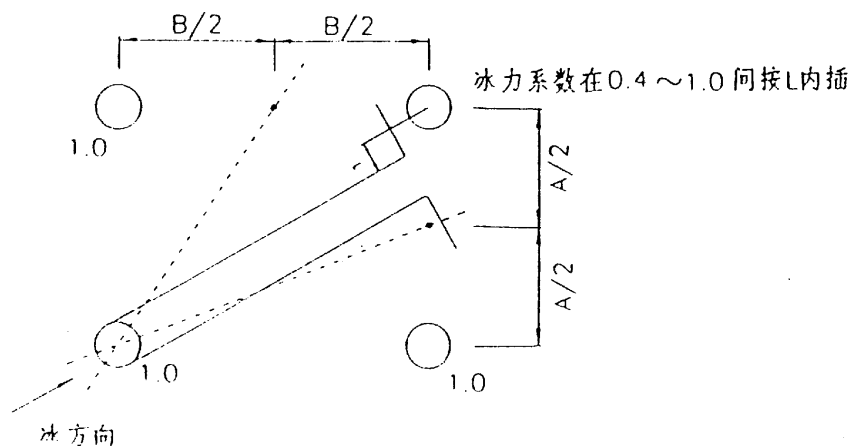
附图 5-2-3-8 冰作用方向 3



附图 5-2-3-9 冰作用方向 4



附图 5-2-3-10 冰作用方向 5



附图 5-2-3-11 冰作用方向 6

## 5. 地震荷载

结构中的地震力是由地面运动引起的，而这个力的大小取决于结构物及基础的刚度。与其它大多数环境力不同，地震力一般是随结构刚度变小而减少，而刚度变小是由于结构构件或基础构件的非弹性屈服或屈曲所引起的。如果这种非弹性效应可能发生，而结构物在重力荷载作用下没有失去稳定，则此结构可经受比第一次屈服时所承受过的更为严重的地面运动而不致倒塌。

由于地震发生的偶然性且不易预测，地震有效加速度重现期的选择一般长于环境荷载的重现期。例如对于20年设计寿命的平台，环境荷载的重现期一般取为100年一遇，而用于强度水平结构校核的地震荷载的重现期可取200年一遇，用于韧性水平结构校核的地震荷载重现期可取1000年一遇。

对于强度水平的地面设计水平加速度小于 $0.05g$ 的地区，可以不进行地震分析，因为这类地区的平台控制荷载往往不是地震，而是设计环境荷载。

有些术语应用到地震工程时有其特殊的含义，部分术语解释如下：

### a) 有效地面加速度

这是一个用来描述地面加速度幅值的设计系数，用这个系数可建立一个如图 5-2-3-12 那样量纲化了的光顺的标准设计谱，它可用于结构设计。“有效”加速度这个术语是相对于通常所用的峰值加速度而言的。虽然任一单个参数是不能足以充分地描述地面运动的破坏能量，但有效地面加速度连同给定的光顺的设计谱，却对这种能量是一个有意义指标。设计用海底地震加速度一般在环境条件中给出，平台各部位之地震响应加速度可以用地震响应谱求得，目前中国海域没有这种谱，则只能暂用美国 API 地震谱。用谱计算响应须先计算平台及其附属结构的几个基本自震周期。

### b) 地面运动

这是由地震引起的地面振动。任何一点的运动都可用加速度、速度或位移的时间历程唯一地表示出来。地震运动要考虑三个正式的分量。1) 结构水平主轴方向之地震响应加速度 $a$ ；

c) 响应谱

d) 时间历程

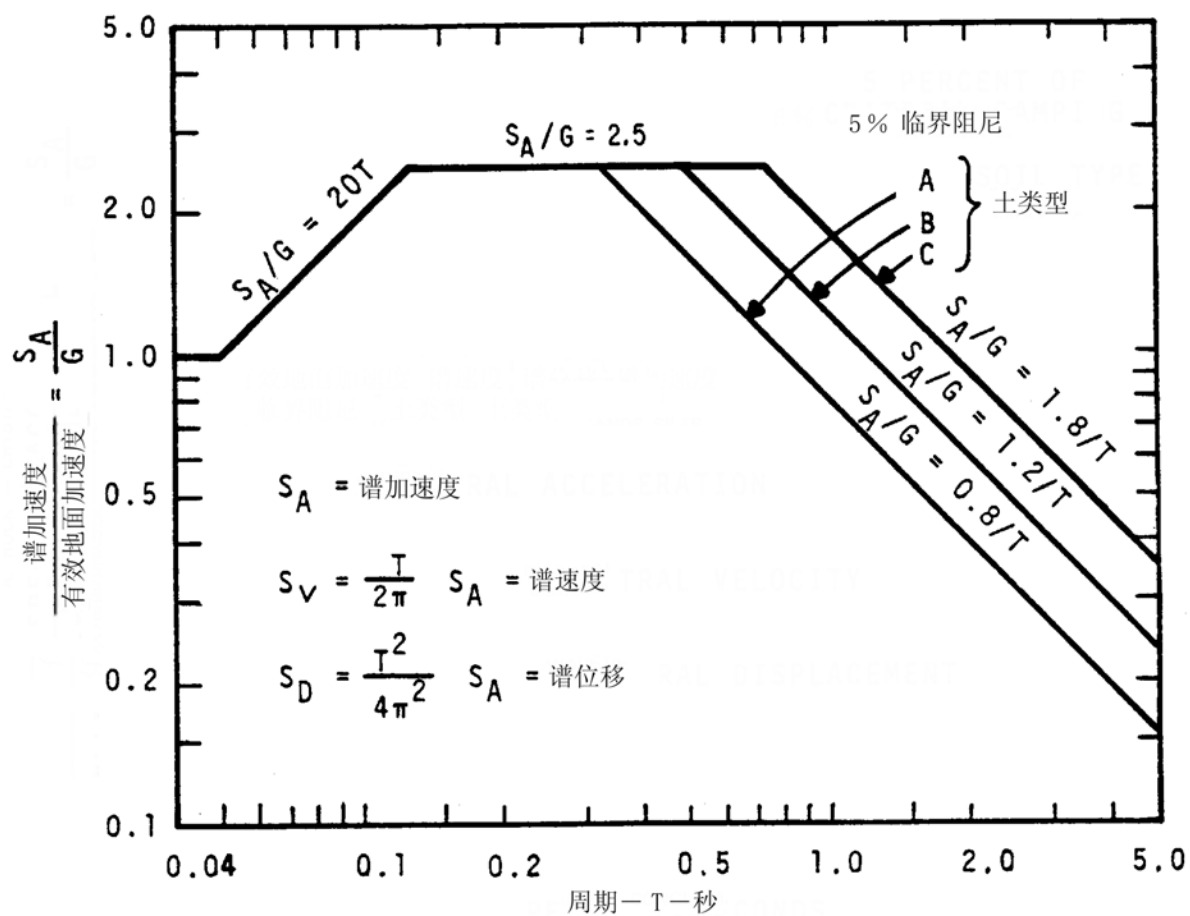
## 五、荷载组合

组合荷载工况应考虑所有可能的最不利的荷载组合，包括结构自重、设备自重、设备操作重量、操作活荷载、操作环境荷载、极端环境荷载、冰荷载等。同时应考虑可能的产生最大桩压力和拔力的荷载工况组合。对于甲板上的运动和移动设备，应考虑不同作业位置与其他荷载的最不利组合。

荷载组合及荷载条件组合系数见表:

	操作	极端风暴	极端冰	拔桩 (极端风暴)	拔桩 (极端冰)	地震
结构自重	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
设备自重	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
储罐等液体	1.0	0.75	0.75	0.25	0.25	0.75
活荷载	1.0	0.75	0.75	0.25	0.25	0.75
操作风、波、流	1.0					
极端风、波、流		1.0		1.0		
冰条件冰、风、流			1.0		1.0	

注：此表仅表示荷载条件在参加组合时应取的系数，并不表示真实的组合。具体参与组合的荷载要按实际情况选取。



#### 土类型

- 岩石—结晶状岩、砾岩或页岩，一般具有超过 914m/s (3000ft/s) 的横波速度。
- 浅硬冲积物—牢固砂、淤泥质和硬粘土，抗剪强度超过大约 72kPa (1500PSF) 深度大约小于 61m (200ft)，并且覆盖在岩性物质的上面。
- 深硬冲积物—牢固砂、淤泥质和硬粘土，厚度超过大约 61m (200ft) 并覆盖在岩性物质的上面。

图 5-2-3-12 响应谱—1.0G 的标准谱