

* 设计·计算 *

渤海采油平台低温冰载作用下设计问题的研究

石油大学(北京)(北京市102200) 方华灿 贾星兰

中国科学院力学研究所 段梦兰

摘要 针对渤海冬季低温冰载荷作用的环境特点,着重研究冰载引起的振动及其动力响应。给出冰激振动产生的平台位移及热点应力的计算方法;提出冰激振动下采油固定平台的疲劳强度设计方法;推荐渤海采油平台减小冰激振动、增长疲劳寿命的结构设计建议。

叙词: 海上油气开采设备 低温 动载荷 振动 位移 应力 疲劳强度 设计方法

引言

渤海总面积77 000 km²,油气资源丰富,是我国东部油区的重要资源接替地带。但渤海的特殊海况是每年冬季自12月至次年3月为结冰期,最大风速达32 m/s,最低气温达-22℃,大约每10 a出现一次重或常重冰情,最大冰厚可达80 cm。固定采油平台在冰载荷作用下引起的振动严重,会使人有恐惧感;冰激振动使平台构件产生的疲劳远比波浪力的作用严重,会使平台疲劳寿命缩短;低温下材料的疲劳特性受影响,会使湖差带暴露于空气中的平台构件的疲劳强度带来新的问题。总之,从这些特点出发,用于渤海的固定采油平台均需考虑低温冰载作用下的特殊强度与结构设计问题。石油大学围绕这一课题曾进行了4 a多的科研工作,得出了一些有实用价值的结果,填补了我国在这个领域的空白。本文即是石油大学这项科研成果的一个组成部分。

冰激振动动力响应分析

渤海采油固定平台在海上所受的冰力是随时间变化的,冰的作用是一个平稳的且台

态历经的随机过程。因此,冰激振动是随机振动,而其动力响应如位移、应力等,则均为随机动力响应。由于渤海的冰情很复杂,冰的形状、种类、大小、强度、厚度、速度以及海冰与平台的作用等因素,均影响着冰力,因此对于固定平台的冰激振动的随机动力响应分析,必须抓住主要矛盾,采用合理简便的方法进行。下面拟介绍石油大学通过试验研究,给出的一种冰激振动动力响应分析方法:

1. 建立结构模型

渤海石油公司在辽东湾JZ20海区建立的一座采油平台JZ20-2-1,在冬季结冰期去掉上部模块,换上简易甲板,可用作测冰的测冰平台(IMP)。由于该公司利用这个IMP,近年来曾进行过多次海冰实际测量,积累了大量有关冰力、冰激振动位移,热点应力等方面的实测数据。因此,为了便于应用实测数据检验,作者即以JZ20-2-1的IMP平台结构来建立结构模型。模型是按照有限元离散化方法建立的。平台导管架共被划分为118个单元及66个节点,如图1所示。模型的建立,基于下列假设:

(1) 平台甲板以上部分离散化为管单

元。

(2) 导管架桩腿的桩与土壤的相互作用以等效长度的等效桩来处理。

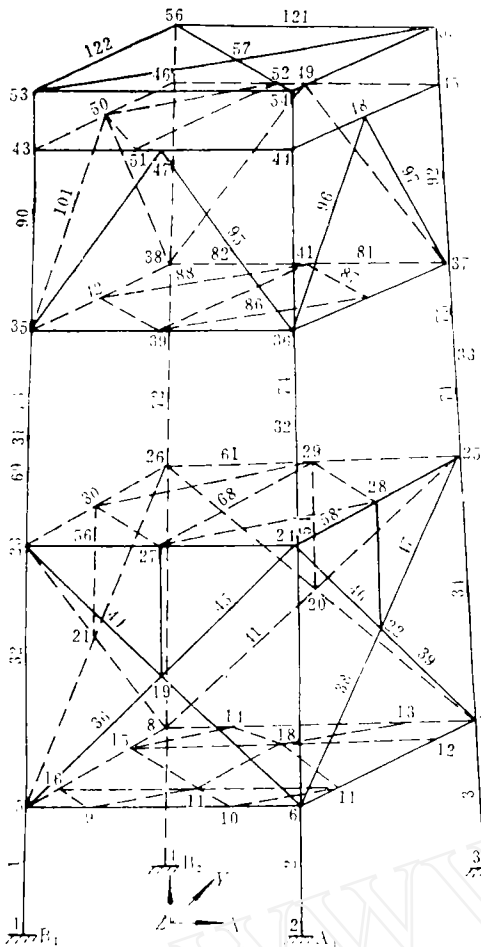


图1

2. 给出动力方程

分析冰激振动的动力响应，必须要给出运动微分方程式，然后求解这个动力方程，即可得出位移响应。对平台结构均采用下列动力方程：

$$[M]\{\ddot{\xi}\} + [C]\{\dot{\xi}\} + [K]\{\xi\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中的质量矩阵 $[M]$ 包括平台本身结构的质量和海水的附连质量 M_{AD} ，

$$M_{AD} = C_A \rho \pi \frac{D^2}{4} L \quad (2)$$

式中 C_A ——附加质量系数，对渤海可取 1.0

ρ ——海水质量密度

D ——圆柱直径

L ——圆柱浸入水中部分的长度

$[C]$ ——阻尼矩阵，阻尼值 C 根据渤海石油公司现场实测，取0.05

$[K]$ ——刚度矩阵，根据单元节点坐标、单元尺寸和材料特性而定，可由SAP5程序计算求得

式(1)中的矩阵 $\{F(t)\}$ 是激振力，因海上结冰时海面形不成波浪，无波浪力作用，冰载是唯一的控制载荷，故 $F(t)$ 只考虑冰力，输入某一选定的冰载时间历程即可。根据冰与结构相互作用时，冰有3种破坏形式，因而冰载的时间历程也同样具有挤压、弯曲、屈曲3种破坏形式时的时间历程曲线，如图2所示。

3. 校验结构模型

图1用有限元离散化方法建立起的结构模型是否合理正确，需要进行校验，直至检验正确之后，才能使用这个模型，运用动力方程，计算动力响应。由于渤海石油公司已多次在这个ZJ20-2-1的IMP上进行过冰压力、频率、位移响应等数据的实测，因此，校验的方法就是将实测的冰载时间历程曲线输入，然后按照结构模型与动力方程进行计算，再将计算的结果与实测的响应值进行比较。若吻合较好，则认为结构模型正确；否则不正确，则需通过修改平台甲板上部构件离散化以后的管单元来调整结构模型，直至校验正确为止。表1给出IMP的自振频率的计算结果与现场测定值的对比。表5给出测冰平台在日常冰作用下的最大位移响应。由于多年来实测IMP的振动位移响应在1~3mm，故自表5对比可看出位移响应吻合较好。表1表明自振频率的两者相对误差很小，因此图1给出的结构模型经校验表明是

正确的。

4. 分析动力响应

结构模型校验正确后, 即可运用模型及动力方程, 解式(1), 见表2~4。

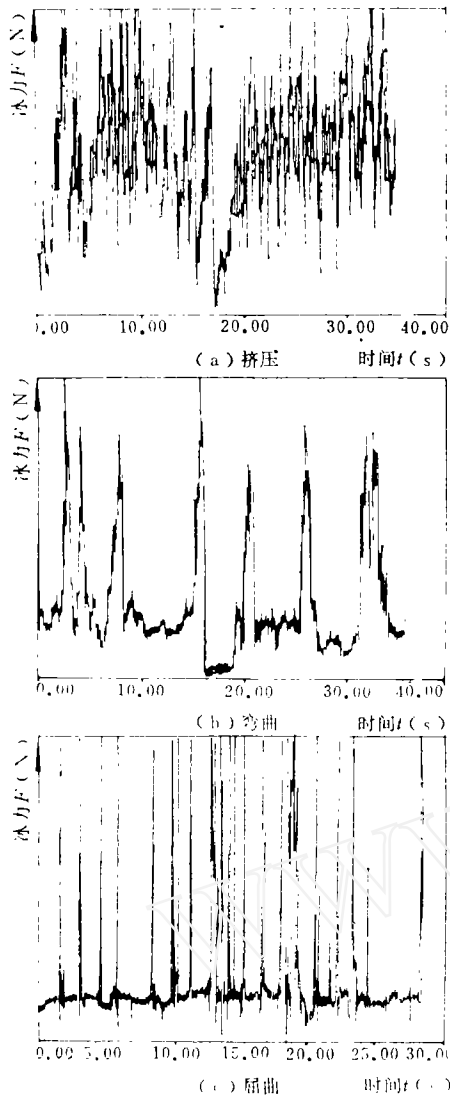


图2

表1 测冰平台的自振频率*f*

—	计算结果 (Hz)	现场测定 (Hz)	相对误差 $e, \%$
第一阶	2.078	2.1	1.05
第二阶	2.232	2.2	1.45
第三阶	2.519	2.3	9.52

表2 冰不同作用方向时的位移响应值

冰力作用方向	X方向 l_x (mm)	Y方向 l_y (mm)	扭转角 α (rad)
平台正南	1.384	4.66×10^{-4}	4.457×10^{-7}
平台东南45°	1.41	1.10	2.60×10^{-6}
相差倍数	1.02	234.0	0.583

表3 冰不同破坏形式时的位移响应值

冰的破坏形式	挤压	弯曲	屈曲
第54节点X方向最大位移 $l_{m,x}$ (mm)	8.744	2.630	6.400

表4 3个不同重量平台的位移响应值

平台型号	IMP(轻)	SW(重)	MSW(最重)
X方向位移 l_x (mm)	1.384	8.056	8.744

计算位移响应时, 应将IMP实测的冰载时间历程放大以后再输入。因为实测的只是平台桩腿某一点的压力盒中测出的时间历程曲线, 而并非是整个桩腿上作用的总冰力。因此, 应按照下列的适合我国渤海用的单腿总冰力公式计算, 并以此与实测曲线峰值相比, 进行放大。

$$F = 0.56\sigma_c h^{1.1} D^{0.5} \text{ 单层平整冰 (3)}$$

$$F = 0.36\sigma_c h^{1.1} D^{0.5} \text{ 重迭冰 (4)}$$

表5 日常冰作用下的最大位移响应及扭转情况

冰 况	节点54			节点57		
	X方向 l_x (mm)	Y方向 l_y (mm)	扭转角 α (rad)	X方向 l_x (mm)	Y方向 l_y (mm)	扭转角 α (rad)
结构正南单层平整冰16 cm厚	1.384	4.6×10^{-4}	4.457×10^{-7}	1.385	1.8×10^{-4}	1.149×10^{-8}
结构正南重迭冰41 cm厚	2.339	7.8×10^{-4}	7.536×10^{-7}	2.243	3.1×10^{-4}	1.942×10^{-8}

式(3)、(4)系由渤海石油公司根据渤海冰情,在国际公认的计算公式的基础上,修正之后提出的。式中的系数及指数均只适合我国渤海冰情; σ_c 为冰的抗压强度, h 为冰厚, D 为平台桩腿的外径。

为了计算应力响应,石油大学自己编制了固定平台管节点热点应力的计算程序,这样即弥补了SAP5只能计算单元的内力,而不能直接计算管节点热点应力的缺点。同上所述,选择50a重现期的单层平整冰冰厚为40cm时,依式(3)计算出平台单腿上总冰力,按照这个总冰力将实测的冰力时间历程放大,输入进行计算,即可得出热点峰值应力响应,如图3所示。表6,表7分别给出了不同工况下的计算结果。

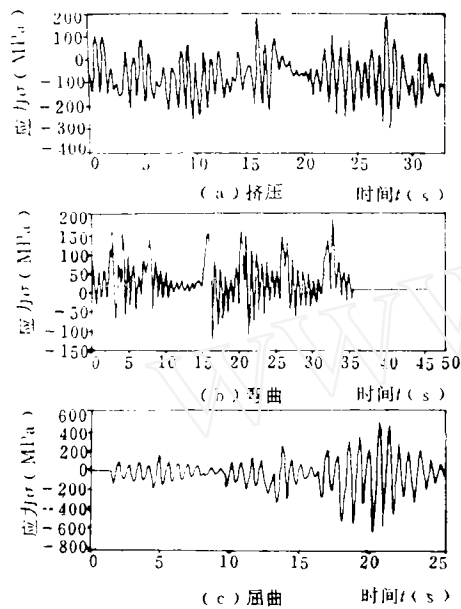


图3

表2~4表明:从振动位移来看冰自平台正南方向作用,在冰弯曲破坏形式下,平台甲板上部质量最轻时,位移响应最小。表6、表7表明:平台同一个节点冰自正南方向作用于平台,在弯曲破坏形式下,平台甲

表6 冰不同作用方向时的热点峰值应力 σ_{max} (MPa)

节点号	冰作用在平台正南		冰作用在平台东南	
	冰挤压破坏	冰弯曲破坏	冰挤压破坏	冰弯曲破坏
7	262.5	515.1	275.5	792.0
49	47.0	88.1	44.6	120.8

表7 不同类型平台在不同冰的破坏形式下的热点峰值应力 σ_{max} (MPa)

平台类型	节点号	冰挤压破坏	冰弯曲破坏	冰屈曲破坏
MSW(重)	7	407.0	267.4	837.8
	49	47.1	47.7	80.0
SW(轻)	7	262.5	171.0	515.1
	49	47.0	45.4	88.1
MSSW(最重)	7	1724.3	1145.8	3529.8

板上部质量最轻时,热点峰值应力响应值最小。

固定平台抗冰结构设计

本建议是基于渤海采油固定平台冰激振动的位移及热点峰值应力响应分析,从抗冰角度出发,对渤海采油固定平台结构设计提出的。

1. 桩腿冰作用部位设正倒锥体

上文分析中已经得出明确结论,即冰弯曲破坏形式与其它形式相比,无论是振动位移,或是热点峰值应力均为最小。这是由于海冰的弯曲强度远低于挤压强度所致。因此,在设计采油固定平台时,若能根据斜面结构可以造成海冰弯曲破坏的原理,在平台桩腿冰作用的部位,增设正倒锥体,则平台结构有利于抗冰。结合我国渤海海冰的实际情况,具体设计时建议:

(1)采用正倒锥组合体 这种组合体是把两个底圆面直径相同的锥体组合在一起的结构,因其中间圆面直径大,而两端小,故称为正倒锥组合体,其平面示意图如图4

所示。这种组合体的结构,既可充分发挥正锥体破冰作用,又可使锥体体积不过大,而且还可保证在退潮时,借助倒锥体进行弯曲破冰。正、倒锥体角度不同,正锥为 60° ,倒锥因破冰能力差,故将冰的爬滑角度变小,设计成 45° ,见图4。

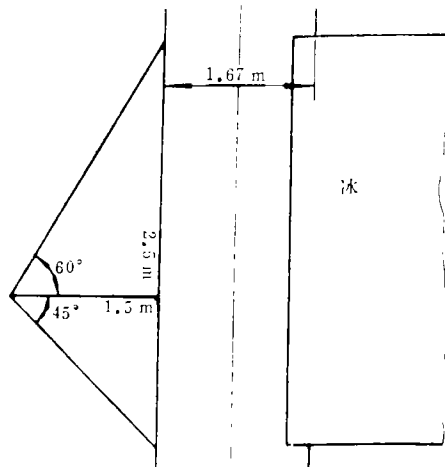


图4

(2) 合理确定锥体高度 正倒锥组合体的高度不宜过高,应根据有效作用冰厚及潮差来确定,以保证在涨潮和退潮的标高上,冰均可作用于组合体上。考虑到渤海的有效作用冰厚为70 cm,潮差一般在2~3 m,因此可采取正锥体高2.5 m,倒锥体高1.5 m,两者并不相等,而总高度保证4.0 m的方案。

(3) 只在外围桩柱装设 由于渤海固定平台大部分是多桩柱结构,即外围是近于直立的桩柱(倾斜度小于 15°),而中间带有4至32根隔水套管。因此,只在外围直立桩柱上装设组合体,即可保证中间桩柱不受或少受冰力。

(4) 同一平台尺寸相同 为了避免由于组合体存在而引起平台的受力不对称,应使同一平台上装设的正倒锥组合体的尺寸相同。

(5) 锥体表面减小阻力 为了减小海冰力,应将锥体表面设计成弧面,以减小表

面阻力。同时,应使锥体表面尽量光滑,以减小锥体表面的摩擦系数。

(6) 控制锥体自振频率 为了防止在冰作用下产生局部振动,应控制正倒锥组合体的自振频率 $f > 10$ Hz。

2. 平台正面面向来冰方向放置

自上文对冰激振动的动力响应分析中,自表2及表6可看出冰作用方向对位移及应力响应的影响均很大。当冰的来冰方向正面向平台正面时,无论是位移还是应力均比其它方向小,而且无论冰的破坏形式是3种形式中哪一种,均是如此。因此,设计渤海采油固定平台时,为了抗冰应使平台正面向着来冰方向放置。

3. 尽量减轻甲板上部组块质量

表4及表7表明:平台甲板上部组块质量对平台振动位移及热点应力影响很大。根据计算,若质量减小3倍,则平台的冰激振动位移将减小6倍。表4、表7中共给出了IMP(最轻)、SW(次轻)、MSW(较重)、MSSW(最重)4个质量不同的平台,其位移与热点应力响应差异显著,充分说明了这一问题。因此,尽量减轻甲板上部组块质量应是渤海平台抗冰设计的重要问题。

平台抗冰疲劳强度设计

为了解决渤海采油平台在低温冰载作用下的疲劳强度设计问题,石油大学以海洋结构物常用钢材A537及A131钢为对象(如表8所示),进行了大量疲劳强度试验,历时3年,其试验目的与内容如表9所示。

主要试验结果

试验得出低温下国外A537钢及国产海洋用钢管节点的S-N曲线,关系为

$$\ln N = 12.604 - 3.1731 \ln S \quad (\text{A537 钢})$$

(5)

$$\ln N = 14.142 - 3.8361 \ln S \quad (\text{国产海洋})$$

表 8 A537及A131钢的主要机械性能

钢号	屈服点 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	弹性模量 E (GPa)	断后伸长率 $\delta, \%$	断后收缩率 $\varphi, \%$	泊松比 μ
A537	362.6~411	519.4~558.6	194.3	>22	72.10	0.27
A131	294.7	439.2	210.8	42.24	78.32	0.27

表 9 海洋用钢疲劳试验内容及试件数

加载条件	试验目的	试件类型	温度条件		
			-6℃	室温(20℃)	-25℃
常幅加载	S-N 曲线	光滑圆试棒	—	16个(A537)	18个(A537)
		对接板焊接接头	—	—	7个(A537) 13个(A131)
	$\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线	十字形二锥板 焊接接头	—	6个(A537)	13个(A537) 16个(A131)
		T形二锥板 焊接接头	—	3个(A131)	5个(A131)
		紧凑拉伸试件 (A537)	3个(母材) 3个(焊材)	2个(母材) 2个(焊材)	4个(母材) 3个(焊材)
裂纹张开位移 (COD)	小型三点弯曲焊接 接头试件(A131)	—	—	77个	
随机加载	$\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线	紧凑拉伸试件 (A131)	—	1个(弯曲) 2个(挤压) 1个(屈曲)	1个(弯曲) 2个(挤压) 1个(屈曲)
试件数目小计(总数199个)			6个	33个	160个

用钢) (6)

而在美国API及挪威船级社DNV设计规范中给出的在室温下的S-N曲线方程分别为:

$$\ln N = 15.06 - 4.381 \ln S \quad \text{API曲线 (7)}$$

$$\ln N = 14.57 - 4.100 \ln S \quad \text{DNV曲线 (8)}$$

通过式(7)、(8)与(5)、(6)的对比,既表明试验所得与之接近,又表现出低温与室温下材料疲劳特性的差异。所有上述曲线的存活率均为97.7%。

试验得出A131钢低温下的疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线,其表达式为

$$\frac{da}{dN} = 6.260 \times 10^{-14} (\Delta K)^{3.902}$$

(9)

根据上述海洋用钢疲劳强度试验结果,对渤海固定平台的抗冰疲劳强度设计,则应按照本文给出的冰激振动动力响应分析方法,求出固定平台导管架管节点的热点应力,再依上文给出的S-N曲线,水面上依式(7)或式(8),水面上依式(5)或式(6),或者采用断裂力学方法依式(9)来计算疲劳寿命。

结 论

(1) 冰载引起的振动严重, 渤海采油固定平台必须要进行冰激振动响应分析, 本文提供的分析方法, 可用于工程实际。

(2) 冰激振动的位移与热点应力响应均直接受冰力作用方向、冰的破坏形式及平台甲板以上质量的影响。渤海采油固定平台的结构设计必须考虑这些因素, 本文提出的建议可供参考。

(3) 从渤海实际情况看, 冰载的作用远比波浪力为大。因此, 渤海采油固定平台必须要进行冰激振动引起的疲劳强度设计, 处于水面上的热点部位, 还应考虑低温下材料机械性能的影响。

(4) 进行渤海采油平台抗冰疲劳强度设计时, 本文提供的海洋用钢的 $S-N$ 曲线及 $\frac{da}{dN}-\Delta K$ 曲线方程式等均可供设计时参考。

参 考 文 献

- 1 方华灿. 海洋石油钻采设备理论基础. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- 2 方华灿. 海洋石油钢结构的疲劳寿命. 北京: 石油大学出版社, 1990.
- 3 Fang Huacan et al. Low-Temperature Fatigue Safety Index for Offshore A537 Steel Structures OMAE'92. Calgary, Canada. July, 1992.
- 4 Fang Huacan et al. Temperature Dependent Crack Propagation of Steel A537 at Room & Lower Temperature. ISOPE'92. San Francisco, USA. June, 1992.
- 5 方华灿等. 热循环疲劳损伤及其简化计算方法. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17(4): 48~53
- 6 方华灿等. 海洋石油平台用钢A537的Paris公式简化模型. 石油矿场机械, 1994, 23(1): 1~5

直线振动筛结构的固有频率计算

西南石油学院(南充市637001) 艾志久
长庆石油勘探局钻采工艺研究所 龚伟安

摘要 按三维有限元法, 采用I-DEAS计算机辅助设计和分析程序, 对油田用直线振动筛结构的固有频率进行了计算, 并与实测值作了比较, 为今后的动态响应分析和结构的动态修改提供了依据。

叙词: 振动筛 频率 有限元分析 结构 设计

就振动筛设计而言, 最重要的是避免筛体结构的固有频率与激振频率接近或重合。长期以来, 由于分析手段的限制, 只能把整个振动筛简化为单自由度的质量弹簧模型, 近似估算其固有频率值^[1]。但实际的振动

筛则是一个多部件构成的弹性系统, 用单自由度质量弹簧系统难以反映真实结构的固有振动特性。有限元分析程序的发展为解决这类问题提供了强有力的手段。近年来, 一些研究人员在振动筛强度计算方面做了不少工