

文章编号: 1000-2634(2004)05-0024-03

海洋深水钻井锚链的动力特性探讨*

王林¹, 石晓兵¹, 陈平¹, 罗平亚¹, 周俊昌²

(1. 西南石油学院石油工程学院, 四川 成都 610500; 2. 国海洋石油总公司上海分公司)

摘要: 在深水及恶劣环境海域, 锚泊系统作为平台或钻井船定位装置, 显得至关重要。在深水钻井中, 锚泊系统的锚链长, 尺寸大, 对应的强度也大。锚链的受力越来越复杂, 随着水深的增加, 动力学分析显得越来越重要。考虑了锚链工作时最小运动与最小系泊力之间矛盾的要求, 即锚泊系统要求最适宜的刚度, 选择合适的连续模型。并对深水钻井锚链的动力特性进行了计算分析, 得到锚链的特征频率和振型, 由此分析其动力响应的上限和下限。在设计和施工中应特别注意锚链的动力特性, 以避免与海浪产生共振的频率。

关键词: 深水钻井; 锚链; 动力特性; 力学模型

中图分类号: TE852

文献标识码: A

引言

在海上进行钻探等工程作业时, 就必须使钻井船或浮动平台在海上保持一个比较固定的位置(例如钻井作业时要求平台位移不能超过水深的 1/20), 但是船舶及浮动平台对于水平面内的运动(纵振、横振、垂摇)不具有回复力, 目前锚泊系统和先进的动力定位系统都在应用^[1]。采用锚泊系统, 作用在钻井船上的环境外力是由锚索张力提供的反力来平衡的, 而该锚索张力传到安放在海底的锚上。钻井船所受的载荷有风力、流力、波浪力和钻井船本身运动的惯性力。锚泊系统的主要作用是减小浮体的水平运动, 但同时为保证锚泊系统本身的强度, 又不宜产生过大的约束力。从锚索的使用观点出发, 要求它具有充分的柔韧性。在抛锚停泊时, 锚索的主要作用是锚的抓力, 以平衡作用在船体上的外力, 使船体不致发生位移, 同时, 又吸收作用在船体上的动载荷, 以缓和对外力对船体的冲击, 这又要求它必须具有充分的弹性^[2]。本文运用连续体系模型研究结构部件是抗拉伸而不考虑弯曲刚度的锚链。

1 锚链动力学分析的基本模型

在研究海洋结构动力模型时, 很多情况只涉及

到有限个数目的独立坐标和运动的常微分方程。在单自由度坐标系中, 选用一个坐标来描述结构在平面内的主振型; 在多个自由度体系中, 可以运用具有描述滑移和摇摆运动的坐标来研究刚性的重力平台, 也可以运用描述集中在节点处的离散质量运动的坐标来研究导管式平台。对于线性部件, 象很长的梁、管线以及锚链等, 另一种连续体系模型可能对部件的运动进行更精确、更经济的描述, 由于一个连续部件要用偏微分方程来表征其运动, 它的解比起相应的集中(质量和刚度)系统要涉及到更多的数学知识。然而, 如果连续模型能选择合适, 那么就可以得到部件的特征频率和振型的封闭表达式, 由此可以导出其动力响应的上限和下限。本研究运用连续体系模型研究结构部件是抗拉伸而不考虑弯曲刚度的锚链。

锚链的模型如图 1 所示。这个线型部件单位长度有效质量是 \bar{m} , 长度为 l , 该线型部件的纵向轴 X 相交于端部固定点, 离开它的平衡位置 $v = 0$ 的横向动力位移是 $v = v(x, t)$, 并假定这个位移足够小, 以保证斜率 $\theta = \frac{\partial}{\partial x}$ 始终比 1 小很多。符合经典理论的进一步假设是: 处于平衡位置, 即 $v = 0$ 的横向平面, 当运动即 $v \neq 0$ 时, 同样还保持在平面内。取长度为 dx 为的微元来说明弯矩 M 、横向剪切载荷 μ 和拉

* 收稿日期: 2003-06-23

基金项目: 中国海洋石油总公司“九五”重点科技项目“海洋深水钻井项目准备”的部分研究内容(部 324)。

作者简介: 王林(1963-), 男(汉族), 四川南充人, 副教授, 硕士, 从事石油工程教学与海洋石油工程及油气井固井等科研工作。

伸载荷 R ; 所有这些载荷在穿过这个微元时都发生很小的变化。单位长度的横向激励力是 $\bar{q} = \bar{q}(x, t)$, 以及单位长度的线性阻力是 cv ; 这些力相应于微元上的平均载荷分别是 $\bar{q}dx$ 和 $cvdx$, 它们作用在微元的中心。当斜率很小时, θ, M, V, P 产生一阶变化是合适的, 将牛顿第二定律应用于这个微元, 经过推导整理, 得到

$$-\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[P \frac{dv}{dx} \right] + \bar{q} - c \frac{\partial v}{\partial t} = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (1)$$

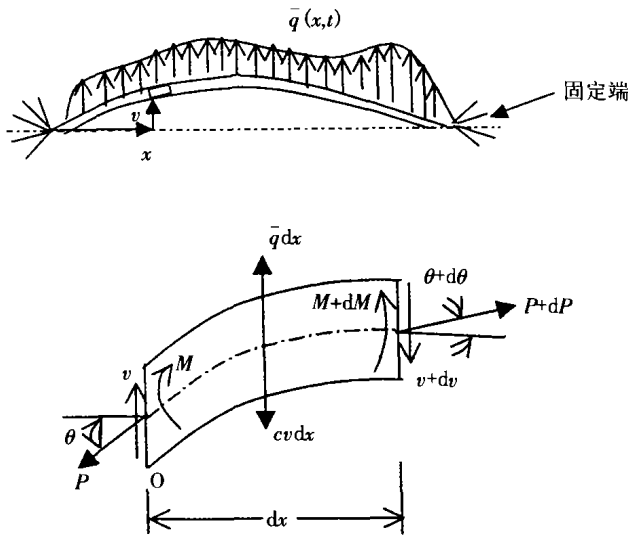


图 1 锚链线性单元的动力学模型

下一步是求绕点 O , 即微元左下角点的力矩之和, 并让这个和等于零。在这个近似中, 所谓转动惯量被忽略不计了。由于锚链的频率较低 (低于 100Hz), 那么转动的能量比横向运动产生的能量小得多, 这正好说明这个假设是正确的。从而得到, $\sum M_0 \approx 0$, 因此

$$M - (M + dM) - \bar{q} dx \left(\frac{dx}{2} \right) + (v + dv) dx = 0 \quad (2)$$

注意, P 和 $P + dP$ 可以产生绕点 O 的力矩, 其中含有二阶 $(dx)^2$ 项。忽略这样的高阶项, 由方程 (2) 得到剪切载荷为 $v = \frac{\partial M}{\partial x}$, 对于弹性构件来说, 由基本的梁理论得到 $M = EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ (EI 为弯曲刚度)。求微商, 整理, 结果为

$$\frac{\partial}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[P \frac{\partial v}{\partial x} \right] + c \frac{\partial v}{\partial t} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \bar{q}(x, t) \quad (3)$$

这就是伯努力 - 欧拉线性动力梁 - 缆绳方程的一般形式。式中 EI, P 和 \bar{m} 是 x 的函数, 而激励载荷 $\bar{q}(x, t)$ 是 x 和 t 的函数。对于水下的缆绳, 比方程 (3) 中线性近似值 $c \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)$ 更实际的阻尼形式是

$$c' = \frac{\partial v}{\partial t} \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right| \quad (4)$$

在这里 c' 是一个试验常数, 通常取决于部件的振动频率。

为了得到方程 (3) 的唯一解, 必须确定特殊的初始和边界条件。对于缆绳 ($EI = 0$), 始终要求下列两个初始条件

$$v(x, t), \quad \frac{\partial v}{\partial t}(x, t), \quad 0 \leq x \leq l \quad (5)$$

此外, 缆绳的解还要求确定端部位移 $v(0, t)$ 和 $v(l, t)$ 。

对于承受与 x 无关的拉伸载荷的无阻尼柔性锚链 ($EI = 0$) 来说, 方程 (3) 变为

$$-P \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \bar{q}(x, t) \quad (6)$$

在此, \bar{m} 可能随纵向尺寸变化, 但是, 对于大多数情况来说它是常数。

2 锚链的频率和振型

对于实际的结构来说, 频率和振型是结构固有的属性, 只与结构本身的刚度和质量分量分布有关, 而与其它因素无关。由于没有外载, 方程的解反映了结构本身的固有特性, 这就是结构的固有频率与振型。在实际工程应用中, 分析结构的自振频率和振型是非常重要的内容。

随着海洋钻井向深水领域发展, 钻井锚链的受力越来越复杂; 钻井锚链的动力分析的重要性已越来越显示出来。钻井锚链由水面到海底的全长中, 根据能量转换的不同形式, 可分为激发带, 剪切带, 阻尼带。

在接近水面的锚链部分承受几种动力作用, 能量从海水转换给锚链, 称之为激发带; 而随着水深的增加, 由于水质点的阻尼作用, 将使能量从锚链转换给海水, 称之为阻力带; 两者之间的过度区域称之为剪切带。

在锚链所处的激发带, 锚链除承受由船体引起的动力外, 还承受几种与时间有关的动载荷: ① 海流与波浪合成造成的水平阻力的周期性变化; ② 惯性

力的周期性变化。阻力与惯性力的最大合成力的区域使波峰向前, 波峰前移距离是阻力与惯性力之比及水深的函数; ③ 水面垂直位置的周期性变化和水平力的周期性变化。

锚链在激发带由于上述几种周期性变化的动力作用, 将激发动力反应, 但是锚链在阻力带又受到海水的阻力作用, 将动态挠曲限制在一个较小的数值, 因此对于附加的因波浪力引起的周期性的挠曲和应力是非常复杂的。

在同一动力载荷条件下, 不同结构的动力反应是不相同的, 反应的大小与结构的自振频率有着直接的关系。为了掌握结构的动力特性, 必须计算结构的自振频率和振型。因此, 锚链的自振频率和振型分析是锚链动力分析的一个主要内容。

体系振动的自由度是动力分析的重要概念。所谓振动的自由度是指确定体系全部质量位置所需独立参数的数目。一般地, 结构的质量是连续分布的, 因此惯性力也是连续分布的, 确定一个实际结构全部质量位置所需的独立参数将有无穷多个。因此实际结构物振动是一个无限自由度体系振动问题, 对它求解十分困难。在工程中常将实际的无限自由度体系振动分析问题近似地转化为有限自由度体系的振动分析问题的做法。

在方程(6)中, 让 $\bar{q} = 0$ 来描述一个柔性锚链在不变拉力 $P = P_0$ 和常数质量 \bar{m} 下的无阻尼自由振动, 即

$$P_0 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

令 $X = X(x)$ 是振型的一般表达式, 而且假定一个频率参数为 $\sqrt{\lambda}$ 的谐波运动, 即

$$v = X e^{i\sqrt{\lambda}t} \quad (8)$$

将方程(7)和(8)组合, 就得到

$$X'' + \gamma^2 X = 0 \quad (9)$$

频率参数由下式给出

$$\sqrt{\lambda} = \gamma \sqrt{\frac{P_0}{\bar{m}}} \quad (10)$$

在这里必须计算常数 γ 。当锚链两端固定时, 就得到

$$v(0, t) = 0 \text{ 或 } X(0) = 0 \quad (11)$$

$$v(l, t) = 0 \text{ 或 } X(l) = 0 \quad (12)$$

利用有关方程, 由 v 的端部条件确定出 X 的端部条件。

利用两个任意常数 D_1 和 D_2 得到方程(9)的通

解

$$X(x) = D_1 \sin \gamma x + D_2 \cos \gamma x \quad (13)$$

将方程(12)的边界条件应用于方程(13)可得其解为(14)式

$$\gamma = \frac{n\pi}{l}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (14)$$

根据方程(12)和方程(14)就可以得到锚链的频率(15)式

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{P_0}{\bar{m}}} \quad (15)$$

式中, $\omega_n = \sqrt{\lambda}$, 所带脚标表明有多个频率。对于每一个 γ (或特征值) 来说, 可以确定的频率 ω_n 和相应的振型 $X = X_n$ (或特函数), (13) 式中 $D_1 = C_n, D_2 = 0$ 即

$$X_n = C_n \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (16)$$

3 结 论

作用在锚泊系统结构上的波浪载荷, 按其随时间变化的不同特点可划分为: ① 数值恒定的平均载荷; ② 缓慢变化的低频载荷; ③ 以波浪频率变化的高频载荷。平均载荷使锚泊结构具有一平衡位置, 结构将围绕这一平衡位置作振荡运动。低频力是不规则波力引起的二阶漂力, 它的数量不大, 但因其变化频率接近锚泊系统的固有频率, 因此会使结构产生慢漂振荡, 这是锚泊系统的主要问题。高频力就是线性波浪载荷, 因为锚泊系统的固有频率通常比波频低得多, 因此锚泊系统分析中常忽略高频效应。

本文所研究和探讨的数学模型说明, 随着 n 的增大, 频率可能会增大。实际上, 在数学模型中, 由于忽略了阻尼和交叉耦合的效应, 就使得这些高阶的频率和伴随而来的模型变得不太重要了。因此, 为了分析和设计锚链, 取 $n = 20$ 作为现实的上限是实际的。

参考文献:

[1] 方华灿. 海洋石油钻采装备与结构[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
[2] Aldemir Bonfim, DOS Santos. Main aspects considered in the upgrade of a semi-submersible platform to operate in ultra deep water as a dynamically positioned drilling unit [C]. IADC/SPE 62753, 2003.

(编辑 罗先碧)