

# 海底边界对水下管线的水动力影响

鄂学全 李战华 凌国灿

(中国科学院力学研究所)

## 提 要

本文叙述了在定常流中,用平板模拟海底平面边界,在雷诺数 $R_e$ 为 $1.0 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^5$ 范围内,测量了孤立圆柱和离平板不同距离上的单柱的阻力( $C_D$ )、升力( $C_L$ )、上抬力( $C_{Lo}$ )等水动力系数和响应频率 $f$ 。研究了管道距平板边界的相对间距 $H/D$ ( $H$ 为圆柱与平板之间的间距; $D$ 为圆柱直径)对水动力特性的影响。

## 一、引 言

海底输油气管的铺设是海上石油及天然气开采中的重要工程。与陆地铺管不同,海上环境复杂,管线在海底要承受波浪、海流和地震载荷,而且一旦铺设下去检修很困难,因此,管线设计时,必须保证具有长期使用的强度和稳定性。这与流体对管线的载荷有关,有必要研究水动力载荷的有关特性。

从海洋流体力学角度考虑,影响管线安定性和疲劳寿命的主要水动力载荷是波浪和海流作用下管线承受的流向载荷和横向载荷。流向载荷主要是由于柱体绕流表面压力分布不均匀造成的;横向载荷垂直于流向方向,主要由旋涡诱导产生。在海流中,绕圆柱的流动将分离,并形成尾迹。由于分离层的不稳定性和相互作用,将产生旋涡,并从圆柱两侧周期性地脱落,其结果是产生流向的定常和脉动的阻力以及横向的非定常的升力(横向力)。如果管线是挠性或挠性支撑的,就会在这些力的作用下产生振动。横向上的涡诱导最大振幅远比流向上的涡诱导最大振幅为大,因而对管线的疲劳寿命起主要作用的是升力产生的振动。我们称这种振动为涡激振动。升力是一种周期性的交变力,其频率取决于旋涡的脱落频率。当旋涡脱落频率与管线本身的自然频率接近或与它的倍频接近时,将会引起管线的共振。旋涡激振会使管线产生较大位移,破坏管线的强度;交变力的长期作用会影响管线的疲劳寿命。因此,研究管线的涡诱导力及其频率特性,对海底管线的设计有着重要的实际意义。

管线在海底的铺设方式有:支架悬跨、平铺和埋设三种方式。对于悬跨的管线,海底边界的存在使管线周围的流动与孤立柱不同,水动力系数 $C_D$ 、 $C_L$ 等会有所变化,涡脱落频率改变,横向力振幅平均值不再为零,出现上抬力。这些流体动力的新现象也是管线

静、动力疲劳分析时必须考虑的。实际经验表明<sup>〔1〕</sup>，设置在强海流区的管线，由于管线下面的海床被海流冲刷掏空，而发展成悬跨的管线。因此，管线离海底边界的距离对流体动力特性的影响也是很重要的研究内容。

目前，孤立圆柱的阻力系数 $C_D$ 与雷诺数 $R_e$ 的关系已有经典曲线供使用<sup>〔2][3〕</sup>，而横向力（即升力）系数 $C_L$ 的测量受实验条件影响很大，测量数据往往很分散<sup>〔4〕</sup>，定常流中受边界影响的圆柱的水动力系数 $C_D$ 、 $C_L$ 和响应频率（或升力的变化频率） $f$ 的测定更少，尚无曲线可供使用<sup>〔5〕</sup>。本文着重介绍在定常流中，对孤立圆柱和有平板边界影响的单圆柱的阻力、升力、响应频率和上抬力等水动力系数进行了较系统的测量，总结分析管道对海底平面的相对距离对于流体动力的影响。

## 二、研究方法

真实海底管线的水动力特性的测定是极为困难的，况且海底边界的表面形状很复杂，高低不平，有珊瑚礁、沙丘等，实际上完全模拟海底管线的水动力实验是不可能的，因此只能抓住影响水动力特性的主要而又带有普遍性的因素来进行研究。我们把海底看作为平板边界，用平板模拟海底边界对置于离平板不同高度的圆柱体的水动力影响。

目前，对距真实海底底面1m以内的流速分布还难以测定，没有数据可供模拟，因此本实验只在均匀来流情况下，测量孤立圆柱和以平板模拟海底边界影响的单圆柱的水动力系数。

实用管线很长，有弯曲变形，是挠性管，流动且有三维性。本实验只考虑刚性圆柱和三维流动。

## 三、实验条件

**1. 实验设备：**实验分别在实验段截面为 $200 \times 100 \text{mm}^2$ 、最大流速 $1 \text{m/s}$ 的重力式水洞和 $200 \times 200 \text{mm}^2$ 、最大流速为 $13 \text{m/s}$ 的循环水洞中进行。经过激光测速仪校测，水洞水流速度分布均匀，达到实验要求。基于模型尺寸的雷诺数范围分别可达 $1.7 \times 10^4$ 和 $2.6 \times 10^5$ ，考虑到流速过大在模型周围会产生空泡现象，本实验的雷诺数范围为 $4.0 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^5$ 。

**2. 测量仪表：**为测定水动力系数，我们研制了一套适于水洞测量的防水应变式二分量水动力天平<sup>〔6〕</sup>；1号天平的阻力量程为 $0 \sim 1 \text{kg}$ ，升力量程为 $0 \sim 0.5 \text{kg}$ ；2号天平的阻力量程为 $0 \sim 6 \text{kg}$ ；升力量程为 $0 \sim 1 \text{kg}$ ；3号天平的阻力和升力量程均为 $0 \sim 10 \text{kg}$ 。所有天平的精度为 $0.5\%$ ，两分量之间的干扰系数为零。这些天平的不同量程能满足不同雷诺数下的测力要求。

**3. 数据采集系统：**从天平出来的电信号经过直流放大器（日产DC Strain Amplifier 6M72  $10 \sim 10 \text{kHz}$ ），用TEAC PS-85（配EPSON R<sub>s</sub>80打印机和Graphes xy Plotter WX 4636型绘图仪）微机采集和处理数据，采样频率 $100 \text{Hz}$ ，采样点为1040

4. 模型：模型为圆柱体，直径为 2.0cm 和 2.2cm 两种，长 10cm。模型套在天平杆上。在较大的试验段（ $200 \times 200 \text{mm}^2$ ）的水洞中，由于天平杆长度的限制，模型不能增长。为了消除端头的影响，在模型端头的对应洞壁上装一等直径的假模型，两端之间留有 0.5mm 的间隙。模拟海底边界的平板尺寸为  $30 \times 10 \times 1 \text{cm}^3$  和  $30 \times 20 \times 1 \text{cm}^3$ ，前缘呈尖劈状。前缘距柱中心距离  $l$  与圆柱直径  $D$  之比为 3（见图 1）。

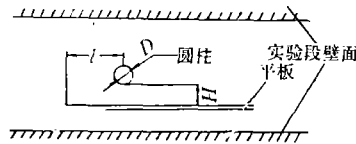


图1 实验装置示意图

## 四、数据处理方法

### 1. 水动力系数定义

定常流中单位长圆柱所受的阻力和升力可分别以下式表示<sup>[7]</sup>：

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 D [C_D + C'_D \sin(2\omega t + \phi_D)] \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_L \sin(\omega t + \phi_L) \quad (2)$$

式中  $\rho$  为流体密度； $U$  是来流速度； $D$  是圆柱直径； $C_D$  为平均阻力系数或称定常阻力系数； $C'_D$  是旋涡诱导的流向脉动阻力系数； $\omega$  是角频率， $\omega = 2\pi f$ ，这里的  $f$ ，是涡脱落频率； $\phi_D$  和  $\phi_L$  是相位角； $C_L$  是脉动升力系数。实验证明，当存在平面边界时，圆柱上将产生一向上的推力，使圆柱离开平板<sup>[8]</sup>。因此更合理的升力表达式应写为

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 D [C_{L0} + C'_L \sin(\omega t + \phi_L)] \quad (3)$$

式中  $C_{L0}$  为上抬力系数， $C_L = C_{L0} + C'_L$ 。

由 (1)、(2) 和 (3) 式可得出各系数的定义式为

$$C_D = \frac{\overline{F_D}}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} \quad (4)$$

$$C'_D = \frac{F'_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} \quad (5)$$

$$C_{L0} = \frac{\overline{F_L}}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} \quad (6)$$

$$C'_L = \frac{F'_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} \quad (7)$$

$$\left( \text{对孤立柱 } C_L = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} \right)$$

其中  $\overline{F_D}$ 、 $\overline{F_L}$ 、 $F'_D$  和  $F'_L$  分别表示单位长圆柱上的相应平均值和脉动值， $\overline{F_L}$  也可称为上抬力。

## 2. 数据处理公式

水动力的脉动分量是涡诱导的周期变化的力，直接影响海底管线的疲劳寿命。起偶然破坏作用的是最大脉动分量；起长期作用的则是均方根脉动分量，因而也必须测量和处理这方面的量值和数据。

数据处理所使用的主要公式是：

平均阻力系数

$$C_D = \frac{\sum_i^N F_{D,i}}{N \frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (8)$$

最大升力系数

$$C_{L_{max}} = \frac{|F_L|_{max}}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (9)$$

均方根升力系数

$$C_{L_{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i^N F_{L,i}^2}{N}}}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (10)$$

上抬力或平均升力

$$F_{L_0} = \frac{\sum_i^N F_{L,i}}{N} \quad (11)$$

上抬力系数

$$C_{L_0} = \frac{F_{L_0}}{\rho U^2 DL} \quad (12)$$

最大脉动升力系数

$$C'_{L_{max}} = \frac{|(F_L - F_{L_0})|_{max}}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (13)$$

均方根脉动升力系统

$$C'_{L_{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i^N (F_{L,i} - F_{L_0})^2}{N}}}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (14)$$

无量纲响应频率系数 $S$ 数为

$$S = \frac{fD}{U} \quad (15)$$

其中 $L$ 为圆柱模型长度； $F_{D_i}$ 为测量的瞬时阻力值； $F_{L_i}$ 为测量的升力瞬时值； $N$ 为采样点数； $f$ 为圆柱模型横向振动的响应频率。

## 五、结果及讨论

实验得到的主要结果以表1和曲线图的形式给出。文献〔9〕对测量的结果作了更为仔细的分析讨论。下面仅就这些结果作一简要讨论。

### 1. 阻力系数

本实验在雷诺数 $R_e$ 为 $3.3 \times 10^4 \sim 1.54 \times 10^5$ 范围内，测量了孤立柱的定常阻力系数和平板边界存在时的阻力系数 $C_D$ 值。在 $R_e$ 为 $3.3 \times 10^4 \sim 1.54 \times 10^5$ 范围内，本实验所得孤立圆柱的 $C_D$ 约为1.0。这些值接近经典曲线给出的 $C_D$ 值〔3〕。

考虑平面边界影响，在 $H/D$ 为0.2~0.3范围内，测量了圆柱的阻力系数 $C_D$ 。由图2可以看出，总的趋势是，随着 $H/D$ 值减小，即圆柱靠近平板时， $C_D$ 值逐渐上升。当 $H/D$ 为0.2时， $C_D$ 值可达到孤立柱阻力系数 $C_{D\infty}$ 的1.35倍。

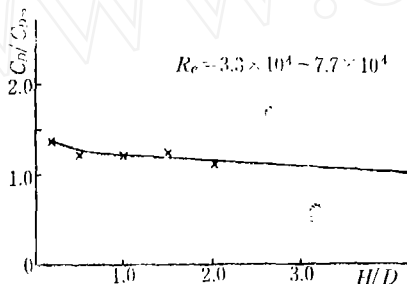
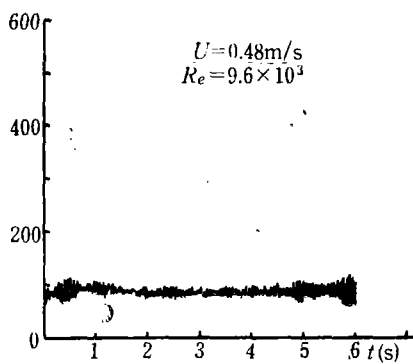
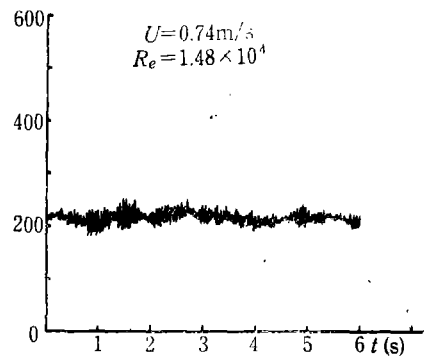


图2 相对阻力系数 $C_D / C_{D\infty}$ 与 $H/D$ 关系



(a)

阻力的脉动分量很小，其脉动阻力系数 $C'_D$ 一般比平均（或称稳定）阻力系数 $C_D$ 小一个量级〔10〕，Blevins〔7〕更精确地指出： $C'_D$ 约等于 $0.07C_D$ ，因此测量比较困难。本次实验只在阻力值接近天平量程的上限时，测出阻力的脉动分量（见图3）。从力的波形图看出，阻力随着时间的变化不再是直线而是有脉动，这证明流向脉动分量的确存在。



(b)

图3 定常流中孤立圆柱脉动阻力波形图

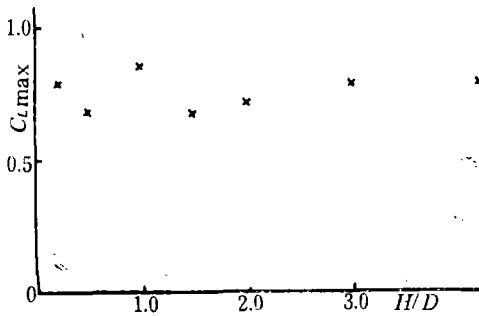


图4 最大升力系数 $C_{Lmax}$ 与 $H/D$ 关系

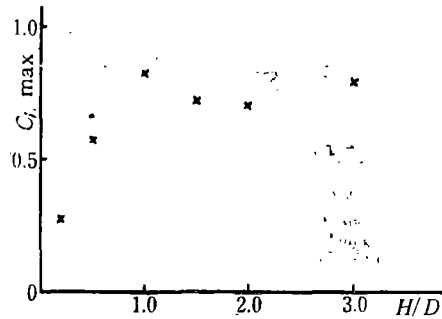


图5 最大脉动升力系数 $C'_{Lmax}$ 与 $H/D$ 关系

### 2. 升力系数

在雷诺数 $R_e$ 为 $3.3 \times 10^4 \sim 7.7 \times 10^4$ 范围内, 测量了孤立柱和有平板边界的单柱的 $C_{Lmax}$ 、 $C_{Lrms}$ 、 $C'_{Lmax}$ 、 $C'_{Lrms}$ 和 $C_{Lo}$  (定义见第四节), 数据列于表1。

对于孤立柱,  $C_{Lmax}$ 和 $C'_{Lmax}$ 都在0.8左右,  $C_{Lrms}$ 和 $C'_{Lrms}$ 都在0.19。

有平板边界时,  $C_{Lmax}$ 仍在0.8上下波动 (见图4),  $C'_{Lmax}$ 在 $H/D > 1.0$ 范围变化不大, 而在 $H/D < 1.0$ 后明显下降 (见图5), 说明平板边界影响了圆柱后旋涡的充分发展, 使涡诱导力减小。图6表明, 在 $H/D < 0.2$ 以后上抬力开始出现, 即平均升力不再为零。在 $H/D < 1.0$ 以后 $C_{Lo}$ 迅速增大; 在 $H/D$ 为2.0时,  $C_{Lo}$ 达到0.4。这就是说, 上抬力系数随着柱与平板间的间距减小而增大。这同振荡流中的实验结果<sup>[6, 11]</sup>类似。

升力的波形图 (见图7) 使升力的脉动形象化。 $H/D$ 从1.0变为0.5后, 波形产生两种变化: (1) 波形振幅的平均值向上平移 (这对应圆柱受到上抬力); (2) 单位时间内波形振动次数略有提高, 这是因为流速提高和 $H/D$ 减小而造成的。

### 3. 响应频率

对升力波形做功率谱分析, 研究了升力的频率特性。图8给出孤立圆柱和 $H/D=0.2$ 时有平板边界的圆柱以受升力的功率谱。对孤立圆柱, 其功率谱峰值很集中, 峰值对应的频率是圆柱的响应频率。表1中所列出的频率是用此法得到的。由表中可看出孤立圆柱的响应频率的无量纲 $S$ 数约为0.20, 这与圆柱后的涡脱落频率的Strouhal数相同。这意味着装有圆柱模型的天平能跟上落脱涡频率而振动。在此情况下, 可以把响应频率看作是涡脱落频率, 也就是升力的脉动变化频率。

对于有平板边界的圆柱, 从图9可看出, 随 $H/D$ 减小 $S$ 数有增加的趋势, 在 $H/D=0.5$ 时,  $S/S_\infty=1.25$ , 这里 $S_\infty$ 为孤立柱的 $S$ 值。 $H/D=0.2$ 以后,  $S$ 有两个值, 比较难确

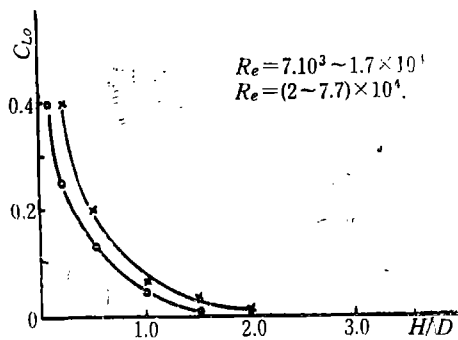


图6 上抬力系数 $C_{Lo}$ 与 $H/D$ 关系

表1 水动力系数测量值

$H/D$	$R_c(\times 10^4)$	$C_D$	$ C_{Lmax} $	$C_{Lrms}$	$C_{Lo}$	$ C'_{Lmax} $	$C'_{Lrms}$	$f$	$S$
∞	3.3	1.11	0.74	0.16	0	0.74	0.16	14.78	0.22
	4.4	1.06	0.72	0.20	0	0.72	0.20	18.81	0.21
	5.5	1.07	0.86	0.21	0	0.86	0.21	23.20	0.20
	6.6	0.96	0.80	0.22	0	0.80	0.22	26.80	0.20
	11.0	0.98			0				
	13.2	0.97			0				
	15.4	0.95			0				
2.0	3.3	1.30	0.52	0.09	0.015	0.52	0.09	15.44	0.23
	4.4	1.17	0.58	0.09	0.019	0.56	0.09	19.70	0.22
	5.5	1.19	0.59	0.11		0.58	0.11	25.30	0.22
	6.6	1.15	0.82	0.14	0.012	0.80	0.14	28.60	0.21
	7.7	1.17	1.10	0.30		1.08	0.30	34.14	0.21
	11.0	1.11							
	13.2	1.10							
15.4	0.86								
1.0	3.3	1.31	0.48	0.13	0.06	0.45	0.11	15.60	0.23
	4.4	1.43	0.79	0.17	0.05	0.73	0.16	21.84	0.24
	5.5	1.34	0.67	0.17	0.07	0.63	0.16	26.00	0.23
	6.6	1.27	1.04	0.24	0.06	1.02	0.23	30.24	0.22
	7.7	1.29	1.30	0.35	0.08	1.22	0.34	35.40	0.22
	11.0	1.22							
	13.2	1.20							
15.4	1.12								
0.5	3.3	1.28	0.68	0.21	0.20	0.47	0.055	16.84	0.25
	4.4	1.32	0.44	0.22	0.21	0.32	0.064	20.31	0.22
	5.5	1.38	0.56	0.24	0.22	0.36	0.092	34.00	0.30
	6.6	1.27	0.84	0.26	0.19	0.74	0.170	34.40	0.25
	7.7	1.28	0.95	0.28	0.21	0.02	0.200	37.20	0.23
	11.0	1.23							
	13.2	1.22							
15.4	1.17								
0.2	3.3	1.76	0.66	0.44	0.43	0.23	0.073	36.48	0.54
	4.4	1.51	0.80	0.41	0.40	0.46	0.065	38.16	0.42
	5.5	1.38	0.61	0.39	0.38	0.22	0.064	36.48	0.32
	6.6	1.27	0.62	0.38	0.36	0.30	0.068	36.88	0.27
	7.7	1.29	0.64	0.40	0.39	0.25	0.078	36.80	0.23
	8.8	1.31	0.64	0.41	0.40	0.23	0.076	37.76	0.21
	11.0	1.35							
13.2	1.36								
15.4	1.12								

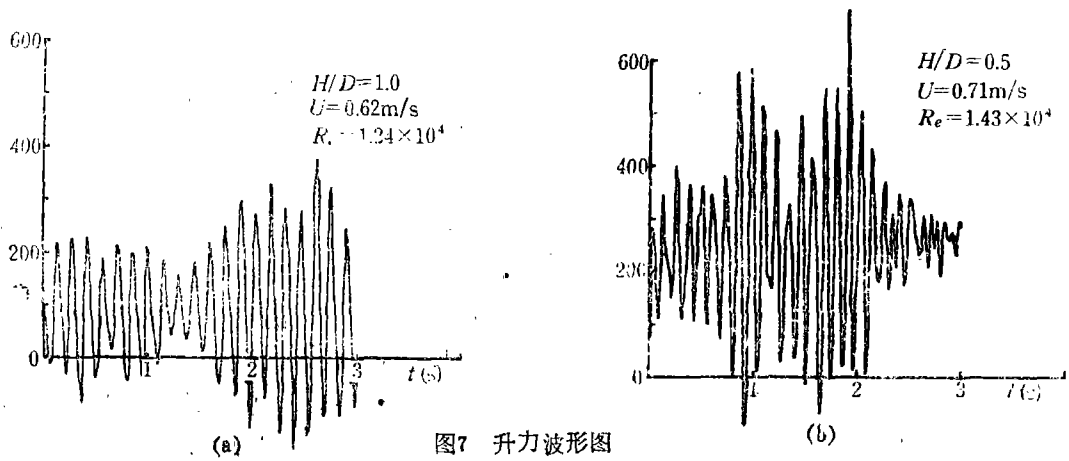


图7 升力波形图

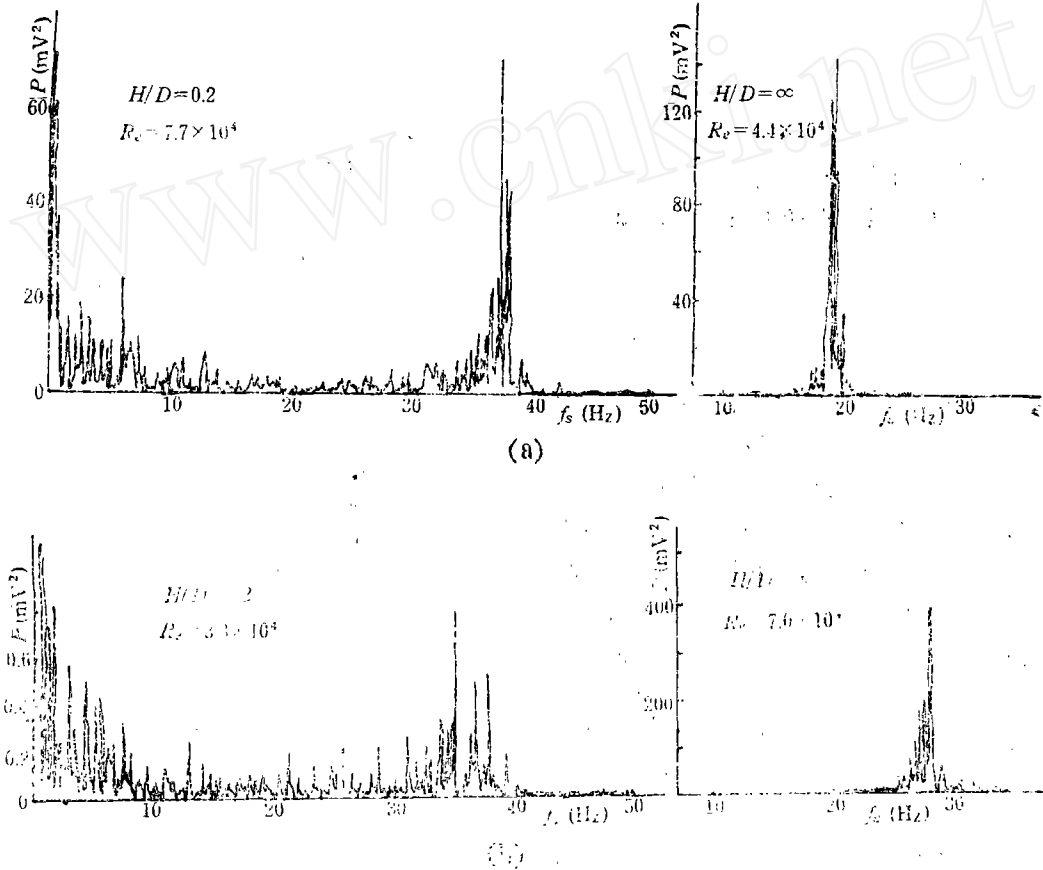


图8 升力的功率谱

定。由图8可看出，低频区和高频区都有峰值出现，而且不论 $R_e$ 是否变化，高频区峰值对应的频率变化不大。



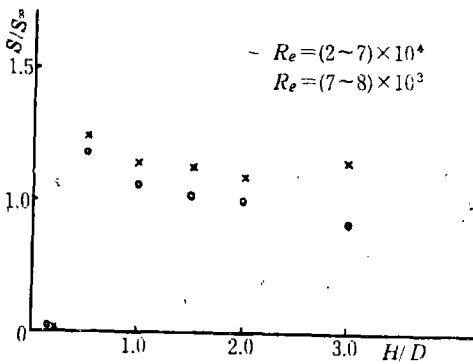


图9 相对S数 $S/S_\infty$ 与 $H/D$ 关系

升力, 脉动升力系数 $C_L$ 用均方根值 $C_{L,r.m.}$ 代替, 因为 $C_L$ 的瞬时值不便使用。

当 $0.5 \leq H/D \leq 1.0$ 时, 上抬力(即离开边界的力)出现, 并与脉动的升力共同作用, 升力公式可采用(3)式。 $H/D < 0.5$ 时, 升力的脉动分量减小, 升力以上抬力为主, 可用下式计算:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_{L0} \quad (16)$$

这时管线在流向的垂直方向上受到一较大定常力的作用和一个小振幅较高频率的脉动力作用, 这对于通常具有低频的自然振荡频率的管线来说, 距海底位于这种位置上较为安全。

## 七、结 论

1. 本工作在 $R_e$ 为 $3.3 \times 10^4 \sim 1.54 \times 10^5$ 范围内给出了随 $H/D$ 变化的阻力系数 $C_D$ 值; 在 $R_e$ 为 $3.3 \times 10^4 \sim 7.7 \times 10^4$ 范围内给出了最大升力系数 $C_{L,max.}$ 、均方根升力系数 $C_{L,r.m.}$ 和S数的值, 可供外载荷计算参考。

2. 边界对圆柱的水动力的影响十分明显。一般说, 当 $H/D$ 减小时, 阻力系数 $C_D$ 增大, 升力系数(即均方根值 $C_{L,r.m.}$ )也增大。在 $H/D > 1.0$ 时, 水动力系数变化很小, 海底管线的水动力, 可按孤立柱处理。在 $0.5 \leq H/D \leq 1.0$ 时, 阻力系数 $C_D$ 增大, 升力中出现上抬力, S数略有提高。 $H/D < 0.5$ 时, 阻力系数可以增大到孤立柱的1.35倍, 升力以上抬力为主, 脉动分量幅值减小, 而脉动频率提高。

3. 上抬力的出现, 类似于振荡流的情况, 可使管线离开海底边界, 将促使海流对管线下海床的冲刷。这可能就是平铺于海底的实际管线最后发展成有悬空跨度的主要原因。

4. 研制的水下水动力天平经实验检验是可行的, 达到了较高精度和防水要求, 稳定可靠。

本工作得到林同骥、朱新瑜先生的积极支持、关切, 在此表示感谢。李坤、米庆录和鲍秋生同志参加了设备管路系统的改装工作; 王书京同志参加了实验测量工作,

## 六、海底管线的水动力

在定常流中, 孤立圆柱的水动力由(1)和(2)式确定。对于铺设在海底的管线, 在海流作用下, 海底边界会影响各个水动力系数。根据本实验的研究, 当管线离海底距离 $H$ 与管线直径之比 $H/D > 1.0$ 时, 可以不考虑边界的影响, 可用公式(2)确定升力,

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Demos T. Tsahalis and Warren T. Jones, The Effect of the Sea-Bottom Proximity on the Fatigue Life of Suspended Spans of Offshore Pipelines Undergoing Vortex-induced Vibrations, Offshore Tech. Conf. Houston, 1982, O.T.C. 4232.
- [ 2 ] Schlichting H., Boundary-Layer Theory, Sixth Edition, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [ 3 ] Det Norske Veritas, Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures, 1977, Appendix B.
- [ 4 ] Sarpkaya T. and M. Isaacson, Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1981.
- [ 5 ] Det Norske Veritas, Rules for Submarine Pipeline Systems, 1981.
- [ 6 ] 李战华、鄂学全, 水下二分天平的研制, 力学所技术报告, 1988年4月.
- [ 7 ] Blevins, R.D., Flow-induced Vibration, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1977.
- [ 8 ] Bearman P.W., Flow around a Cylinder near a Plane Boundary, *J. Fluid Mech.*, Vol. 87, 1977.
- [ 9 ] 鄂学全、李战华, 定常流中孤立柱及考虑平板边界影响的单柱的水动力系数的测量, 力学所技术报告, 1988年4月.
- [ 10 ] 顾懋祥, 离岸工程水动力与水弹性力学近年来的发展, 海洋工程, 1984年第1期.
- [ 11 ] Sarpkaya T., In-line and Transverse Forces on Cylinders near a Wall in Oscillatory Flow at High Reynolds Numbers, OTO, paper 2980, May 1977.

# THE EFFECT OF THE SEA-BOTTOM PROXIMITY ON THE HYDRODYNAMIC FORCES FOR SUBMARINE PIPE LINES

E Xuequan, Li Zhanhua and Ling Guocan  
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing*)

## ABSTRACT

This paper presents the experimental results of the hydrodynamic coefficients  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_{L0}$  and response frequencies  $f$ , measured in the water tunnel for the solitary cylinder and the single cylinder which is placed on the different distances from the plane for simulating the effect of sea-bottom, in the steady flow. The Reynolds numbers are in the range of  $4.0 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^5$ . The effect of the relative gaps  $H/D$  ( $H$  is the gap between the cylinder and the plane,  $D$  is the cylinder diameter) on the characteristics of hydrodynamic forces is studied.