

# 定常流作用于波浪形边界附近的 圆柱上的水动力<sup>1)</sup>

鄂学全 金俐 凌国灿

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**提要** 本文介绍在水洞中做的作用于波浪形边界附近的水动力特性的实验研究。在基于圆柱模型直径的  $Re = 10^4 \sim 1.9 \times 10^5$  范围内, 测量了圆柱在波谷、波峰和不同距离上的阻力、升力脉动变化的频率。流谱显示实验揭示了尾流结构随距离-直径比  $G/D$  的变化情况及圆柱与边界相互作用的机制。

**关键词** 水动力, 圆柱, 波浪形边界

## 一、引言

飞机等飞行物的掠海飞行, 海浪构成的波浪形边界会对其气动特性产生影响; 海洋离岸工程中铺设在水下的输油气等管线, 海底地形(如铺管的沟渠和沙浪等波状地形), 会引起其流场和水动力改变的问题。因此, 研究在波浪形边界附近的物体的流体动力是航空和海洋工程均感兴趣的问题。另外在自然界(如海湾、河流、沙漠的沙丘, 起伏的山峦等)、工业和建筑中都广泛存在波状边界问题。本文目的在于考虑离岸工程中在波状海底附近的管线的水动力特性问题。

浸没式管线的波和流的水动力已有许多研究<sup>[1,2]</sup>, 在海底平面上的圆柱的波力研究也相当多<sup>[3]</sup>, 而在定常流中, 圆柱在海底边界附近的水动力的研究相对较少。在海底平面上存在边界层, 它对圆柱的升力和阻力有很大影响; 其次, 圆柱置于平面附近改变流动的对称性。这种非对称流动对于很小的间隙可能产生很大的垂直于来流的升力。Bearman和Zdravkovich<sup>[3]</sup> 1978年在风洞中,  $Re$  为  $4.5 \times 10^4$  时, 测量了在离平面边界不同高度上的圆柱周围和沿平板的压力分布。Zdravkovich<sup>[4]</sup> 1985年在风洞中, 在  $Re = 4.8 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$ , 间隙比  $G/D < 2$  范围内测量了圆柱在平面边界层的升力和阻力。鄂学全等<sup>[5]</sup> 1989年在水洞中,  $Re$  为  $3.3 \times 10^4 \sim 1.54 \times 10^5$  范围内研究了均匀来流作用于离平面边界不同距离的圆柱上的水动力和升力频率, 得出了阻力、升力系数与升力频率的 *Strouhal* 数随间隙-直径比  $G/D$  减小而增大的规律。

本文在定常来流中对圆柱在波浪形边界附近的水动力特性作了研究, 测量了圆柱在波浪形边界上方的不同位置上的阻力、升力及升力变化频率, 并同圆柱在平面边界附近的

1) 国家自然科学基金和科学院资助项目。

本文于1990年2月10日收到, 1990年5月25日收到修改稿。

水动力作了比较。同时对圆柱在波浪形边界附近的流场结构作了显示观察。

## 二、实验设备及方法

实验是在重力开式循环水洞中进行的。水洞实验段由透明有机玻璃制成,其截面为  $20 \times 10\text{cm}^2$ ,长为  $100\text{cm}$ 。流速连续可调。实验  $Re$  数为  $9.8 \times 10^3 \sim 1.9 \times 10^4$ 。

实验模型为铝空心圆柱体,直径  $D$  为  $2\text{cm}$ 、长为  $9.8\text{cm}$ 、壁厚为  $1\text{mm}$ 。波浪形边界板也为铝制成,其长为  $26\text{cm}$ 、宽为  $10\text{cm}$ ,板的前缘呈尖劈状。从前缘距波浪最低点有一长为  $2\text{cm}$ 、厚为  $2\text{mm}$  的平板过渡段。波浪形边界为  $y = \frac{h}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$  的余弦曲面(图 1),这里  $h$  为波高等于  $0.5D$ ,  $\lambda$  为波长等于  $2D$ 。平板边界是前缘呈尖劈状,宽为  $10\text{cm}$ 、长

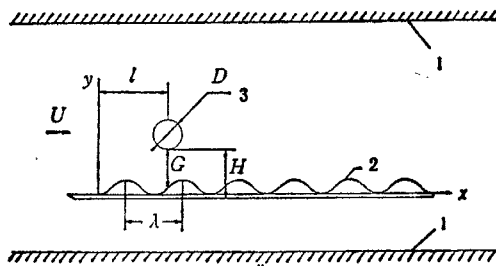


图 1 实验布置示意图

1. 实验段壁 2. 波浪形边界 3. 圆柱模型

30cm 的有机玻璃板。圆柱模型位置距平板的前缘为  $3D$ , 无模型时, 平板边界层在圆柱位置上的厚度为  $0.085D \sim 0.072D$ 。两种边界模型板可垂直上下移动获得所需要的间隙-直径比  $G/D$  ( $0 \sim 3.6$ )。

实验用的测力天平系防水应变二分量水动力天平<sup>①</sup>, 具有良好的精度 ( $0.5\%$ ), 两分量之间干扰系数等于零。

空心圆柱模型套在天平杆的外面, 其端头用螺钉固定在天平杆的一端上, 天平的另一端固定在水洞实验段的侧壁上, 天平测出的电压(mV 值)信号经过 YD-15 型动态电阻应变仪放大, 由 TEACPS-85 型微机采样, 存于磁盘待后作数据处理, 采样频率取  $150\text{Hz}$ , 每次采样 1080 点, 每种状态下采 2 至 3 次。

实验用的测力天平系防水应变二

为了获得合理的实验方法, 进行一下量纲分析是必要的。作用在单位长度上圆柱上的力由流速  $U$ 、密度  $\rho$ 、粘性系数  $\mu$ 、圆柱直径  $D$ 、波浪边界的高度  $h$ 、波长  $\lambda$  以及圆柱相对边界的位置坐标  $x, y$  所确定。可用圆柱下边与边界的间隙  $G$  或在边界上方的高度  $H$  和水平位置  $l$  代替  $x$  和  $y$  (见图 1)。则力可表示为下列函数

$$F = f(U, \rho, \mu, D, h, \lambda, H, l) \quad (1)$$

八个变量的量纲只有 3 个是独立的量纲。故可组成五个无量纲组合。

$$c = F/0.5\rho U^2 D = f(R_e, G/D, h/D, \lambda/D, l/D)$$

或

$$c = F/0.5\rho U^2 D = f(R_e, G/D, h/\lambda, \lambda/D, l/\lambda) \quad (2)$$

方程(2)的左边就是力系数。因此,  $c_D$  和  $c_L$  均可作为  $R_e, G/D, h/\lambda, \lambda/D$  和  $l/\lambda$  五个无因次量的函数来确定。在我们的实验中,  $h/\lambda$  和  $\lambda/D$  为固定的常数, 分别为  $0.25$  和  $2$ 。只要改变波长  $\lambda$  就可得到力系数随参量  $h/\lambda$  和  $\lambda/D$  的变化。为实验方便, 我们把模型放在三种不同的位置上(见图 1), 即  $l/\lambda = \frac{1}{2}, 1$  和  $\frac{3}{2}$  处, 分别进行  $Re = 10^4, 1.4 \times 10^4, 1.7 \times 10^4, 1.9 \times 10^4$  的四个实验。对每个  $Re$  数, 改变间隙-直径比  $G/D$ , 在

$G/D = 0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 2.00$  和  $3.00$  的情况下进行测力实验。为比较起见, 在相应的  $Re$  数情况下对定常均匀来流作用于在平面边界附近的圆柱的水动力进行了测量, 以便分析边界形状及不同间隙-直径比  $G/D$  对圆柱水动力特性影响, 用氢气泡示踪法对圆柱在波谷处的不同高度上的情况作了流谱显示、观察尾流结构。

### 三、数据处理

水动力是用多个系数来表征的。水动力的分量的平均值关系到管线的强度设计, 而周期性的脉动分量直接影响管线的疲劳寿命, 力的最大分量对管线有偶然性破坏。因此, 有必要对测出的水动力进行适当的处理。

测量数据的处理采用时间平均法。因此, 所说的平均量就是时间平均量, 各力系数如平均阻力  $c_D$ 、平均升力(或上拾力)  $c_{L0}$ 、均方根升力  $c_{Lrms}$ 、均方根脉动升力  $c'_{Lrms}$ 、平均最大脉动升力  $c'_{Lmax}$  等系数(详见[5])分别由以下公式确定。

$$c_D = \left( \sum_{i=1}^N F_{Di} \cdot \Delta t_i \right) / \left( \frac{1}{2} \rho U^2 D L T \right) \quad (3)$$

$$c_{L0} = \left( \sum_{i=1}^N F_{Li} \cdot \Delta t_i \right) / \left( \frac{1}{2} \rho U^2 D L T \right) \quad (4)$$

$$c_{Lrms} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^N F_{Li}^2 \cdot \Delta t_i \right) / T} / \left( \frac{1}{2} \rho U^2 D L \right) \quad (5)$$

$$c'_{Lrms} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^N (F_{Li} - F_{L0})^2 \cdot \Delta t_i \right) / T} / \left( \frac{1}{2} \rho U^2 D L \right) \quad (6)$$

$$c'_{Lmax} = \left( \sum_{i=1}^n |F_{Li} - F_{L0}|_{\max, i} \right) / \left( \frac{1}{2} \rho U^2 D L \cdot n \right) \quad (7)$$

其中:  $\Delta t_i$  为两个相邻采样点的时间差,  $\Delta t_i = 1/f_s$ ,  $f_s$  为采样频率;  $T$  为采样时间;  $N$  为采样点数(或数据个数);  $L$  为模型长度;  $F_{Di}$  和  $F_{Li}$  分别是阻力和升力的瞬时测量值;  $F_{L0} = \left( \sum_{i=1}^N F_{Li} \cdot \Delta t_i \right) / T$  是平均升力(或称上拾力);  $n$  为升力脉动的数目,  $n = T/T_s = f_s/f_r$ ,  $T_s$  和  $f_r$  是升力脉动周期和频率。升力频率的 Strouhal 数为:

$$S = \frac{f_r \cdot D}{U} \quad (8)$$

记录在磁盘上的阻力和升力信号(毫伏值)都可用快速傅立叶变换计算力的功率谱, 进行频谱分析。力的脉动频率, 如  $f_r$ , 由功率谱中信号峰值所对应的频率位置所确定(如图 6)。

### 四、实验结果及讨论

实验是在基于圆柱直径的 5 个  $Re$  情况下完成的。力的测量是在  $Re = 1 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4$  范围内进行的。在  $Re = 1.73 \times 10^3$  时进行了流谱显示。为了图象分明, 这

里只给出了  $Re$  为  $1.4 \times 10^4$  和  $1.9 \times 10^4$  的测量结果。其余两个  $Re$  为  $1 \times 10^4$  和  $1.7 \times 10^4$  的结果与此类似。

### 1. 阻力

图 2 给出圆柱在波浪形边界的波谷处和波峰处的阻力系数随间隙-直径比的变化关系。图 2 表明: 当  $G/D > 0.50$ ,  $l/\lambda = 1$  (波谷处) 时,  $c_D$  的变化趋势与圆柱在平面边界的阻力系数相似; 当  $G/D = 0.50$ , 即波峰与圆柱中心线齐平时, 阻力系数  $c_D$  达到最大值, 随后下降, 呈波浪形变化。

圆柱在波峰 ( $l/\lambda = \frac{1}{2}$ ,  $l/\lambda = \frac{3}{2}$ ) 处的阻力系数随  $G/D$  减小逐渐增大。当  $G/D$  等于某一值时, 急剧增大; 当  $G/D$  在 0.4 与 0.1 之间时达到最大值, 然后急剧下降。

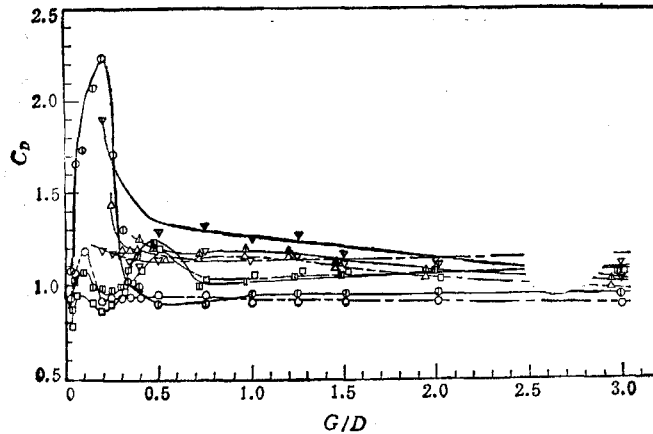


图 2 圆柱在波谷和波峰处的阻力系数随间隙-直径比的变化

- |                 |                        |                     |
|-----------------|------------------------|---------------------|
| $\nabla$ ---    | $Re = 1.4 \times 10^4$ | } 平板边界              |
| $\nabla$ ---    | $Re = 1.9 \times 10^4$ |                     |
| $\square$ ---   | $Re = 1.4 \times 10^4$ | } $l/\lambda = 1$   |
| $\square$ ---   | $Re = 1.9 \times 10^4$ |                     |
| $\triangle$ --- | $Re = 1.4 \times 10^4$ | } $l/\lambda = 1/2$ |
| $\triangle$ --- | $Re = 1.9 \times 10^4$ |                     |
| $\circ$ ---     | $Re = 1.4 \times 10^4$ | } $l/\lambda = 3/2$ |
| $\circ$ ---     | $Re = 1.9 \times 10^4$ |                     |

### 2. 升力

图 3 给出圆柱在波谷和波峰处的平均升力(或称上拾力)系数与间隙-直径比的关系, 在同一位置的两个  $Re$  的曲线基本重合。圆柱在波各处平均升力系数随  $G/D$  的变化与圆柱在平面附近的相差较大, 仅当  $G/D > 1$  时两者的变化趋势相同。在平板附近的圆柱  $c_{L0}$  随着  $G/D$  的减小逐渐增大, 到  $G/D = 0.2$  时, 很快增大到一定值  $c_{L0} = 1.4$ , 这与已有结果一致<sup>[5]</sup>。而在波谷处的圆柱的  $c_{L0}$  值, 从  $G/D = 1$  起开始减小到负值, 在  $G/D \approx 0.5$  处达到最小值。此后上升到正值, 然后再减小, 再增大, 最后达到一定值。在  $0.25 < G/D < 0.75$  范围, 呈现出向下的压力, 管线比较稳定。

在圆柱第 1 波峰 ( $l/\lambda = 1/2$ ) 与平面边界附近的平均升力的趋向一致, 随  $G/D$  的减小而逐渐增大。而在第 2 波峰 ( $l/\lambda = 3/2$ ) 的  $c_{L0}$  不同于第 1 波峰的  $c_{L0}$ , 在  $G/D <$

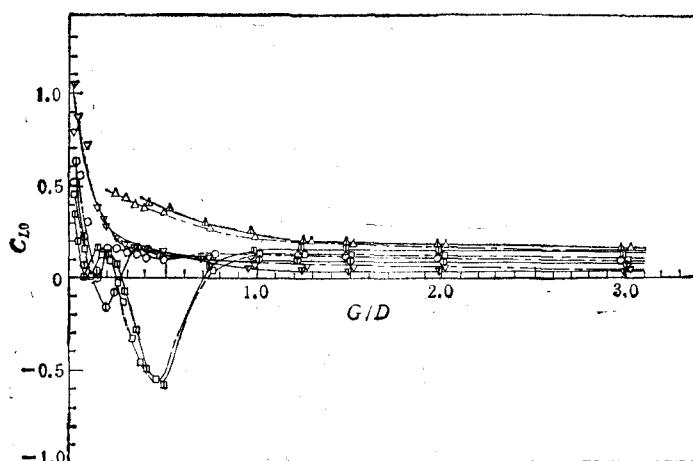
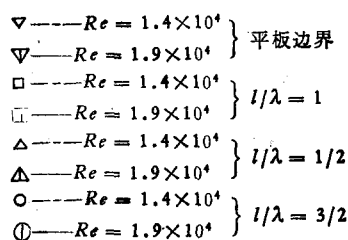


图 3 圆柱在波谷和波峰处的平均升力系数随间隙-直径比的变化关系。



0.4 时,其变化极平缓;在  $0.1 < G/D < 0.4$  之间有极小值,而且与  $Re$  数有关。 $Re$  大的呈现负升力,有使圆柱向边界靠拢的趋势。

图 4 和图 5 分别给出圆柱在波浪形边界的平均最大脉动升力系数和均方根脉动升力系数随  $G/D$  的变化关系。从图中可以看出,在  $G/D < 0.8$  时,脉动急剧增大,在  $0.1 < G/D < 0.8$  之间达到最大值。这意味着管线在此区间经受很大的脉动力。

### 3. 测量的升力频率

升力周期变化的频率是从升力的频谱分析中得到的。图 6 是用快速傅立叶变换方法所计算的升力信号的功率谱。峰值所对应的频率就是所测的升力的频率。升力的周期变化是由涡的脱落引起的。因而他们的频率应该相同。所用天平在升力方向上的自振频率为 33Hz,带有模型为 25Hz,套上模型后在水中为 19Hz,在阻力方向的自振频率更大。在我们实验范围内孤立圆柱的涡的脱落频率不大于 10Hz,即使圆柱在边界附近涡的脱落频率不超过 19Hz<sup>[7]</sup>。所以天平完全能够跟上力的变化频率。在测量时模型的振幅很小,与流场的耦合作用可以忽略,所以,所测的升力频率可视为涡的脱落频率,实验测量的数据也证明了这一点。

图 6 表明频谱特性与  $Re$  数没有多大关系,而与  $G/D$  的关系很大。当  $G/D \geq 0.25$  时峰值清晰。当  $G/D = 0.20$  时峰值与噪声混在一起。说明有规律的涡脱落受到抑制,这与圆柱在平板附近的情形不同。后者涡的脱落受到抑制的  $G/D$  值小于或等于 0.35,比前者的大。此外,功率谱图 6 的左上方的数字是为使峰值落在图框内的缩放因子,比较峰

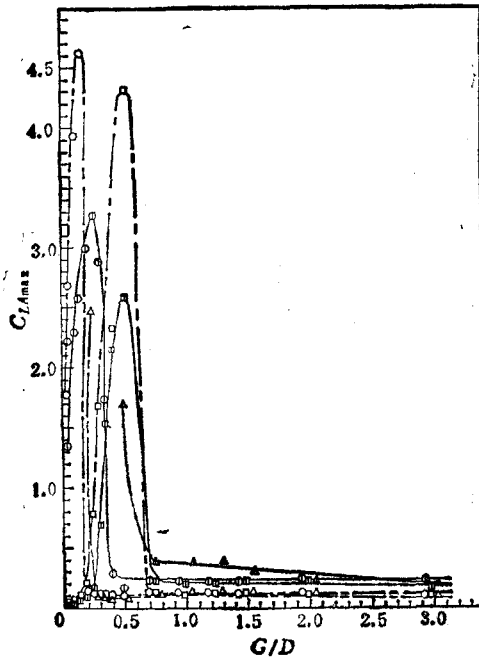


图4 平均最大脉动升力系数随间隙-直径比的变化关系

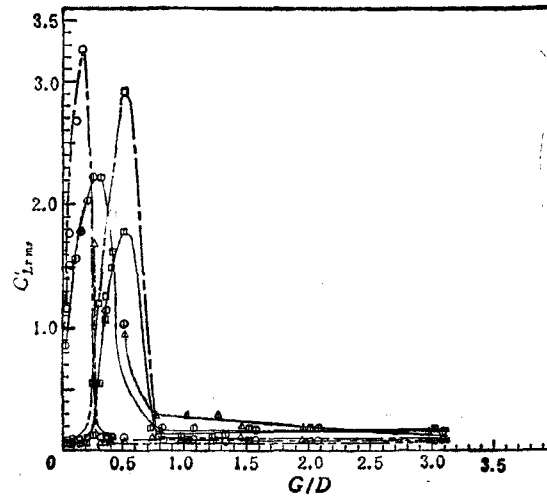
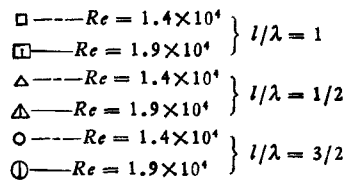
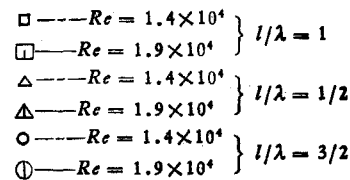


图5 均方根脉动升力系数随间隙-直径比的变化关系

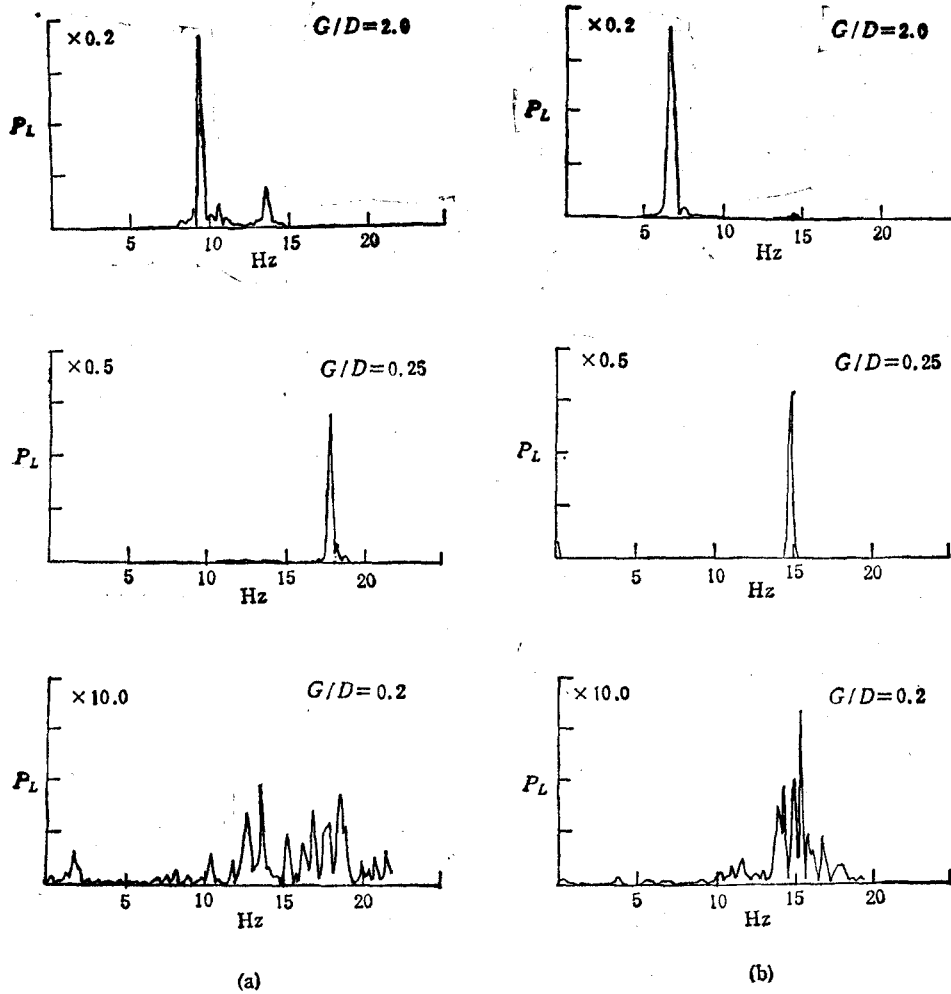


值,可以看出涡脱落能量的大小,  $G/D$  减小能量减小。

归一化的 Strouhal 数  $S/S_\infty$  ( $S_\infty$  为孤立圆柱的涡脱落频率或所测升力变化频率的 Strouhal 数)如图 7 所示,在  $G/D > 0.25$  时,随  $G/D$  减小而增大,在 0.25 达到最大值,然后下降。实验发现,圆柱无论是在波谷还是在波峰处,当  $G/D = 0.5$  时,出现多个频率值(或  $S/S_\infty$  值);当  $G/D < 0.15$  时,又是单一频率。这说明在这个范围内,波浪形边界与圆柱之间的相互作用较强,严重地影响流场的稳定性。

#### 4. 流谱显示

图版 I 照片 1 给出圆柱在波谷处 ( $l/\lambda = 1$ ) 的流谱。圆柱上游有很明显的分离区,分离区的尺度与来流速度有关。速度越小分离区越大。圆柱下游的分离更为明显。当  $G/D = 0.20$  时,流体开始穿过圆柱和边界之间的间隙,形成自由射流,射流由于曲壁的作用向上偏转,与圆柱上方的自由剪切层相互作用(图版 I 照片 1(b)-(d)) 改变了涡的正常脱落频率和流场结构。这与测量的结果(见图 6)符合。这种作用直到  $G/D$  达到 0.9 时才减弱。在  $0.20 \leq G/D \leq 0.80$  范围内,射流加速产生顺压梯度,使圆柱下表面的分离推迟(见图版 I 照片 1(d) 和 (e)) 升力可能出现负值。这也与测量的升力结果一致。负升力使管线的底部移动,间隙减小,又会产生射流,射流冲刷底部达到一定间隙时升力



(a)  $Re = 1.4 \times 10^4$

(b)  $Re = 1.9 \times 10^4$

图6 圆柱在波谷处 ( $l/\lambda = 1$ ) 的升力功率谱实例

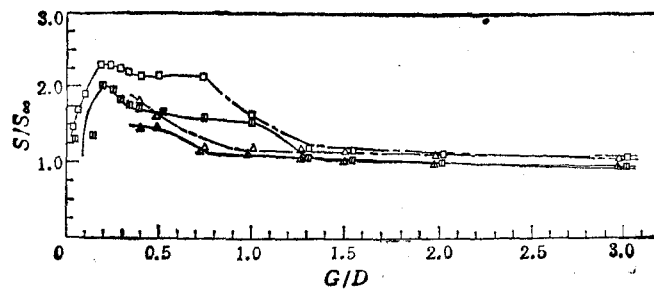


图7 归一化 Strouhal 数  $S/S_0$  随  $G/D$  的变化

$\square$  ---  $Re = 1.4 \times 10^4$   
 $\square$  —  $Re = 1.9 \times 10^4$  }  $l/\lambda = 1$   
 $\triangle$  ---  $Re = 1.4 \times 10^4$   
 $\triangle$  —  $Re = 1.9 \times 10^4$  }  $l/\lambda = 1/2$

又变为负值,如此使管线不稳定。

当  $G/D$  大于 1.0 时,涡的脱落很有规律,波浪边界上似乎有一较厚的边界层(图版 I 照片 1(e))。当  $G/D$  大于 2.0 边界影响基本消失。

## 五、结 论

圆柱模型在波浪形边界附近的水动力的测量和流谱显示,给出了平均阻力系数、平均升力系数、均方根升力系数、平均最大脉动升力系数和升力的变化频率的 Strouhal 数,揭示了边界形状的影响及其与圆柱模型相互作用改变流场结构的机制。

阻力系数可分为两个区域:在  $G/D > 0.65$  时,阻力系数  $c_D$  与  $l/\lambda$  关系不大,而随  $G/D$  值的减小而增大,变化趋势与圆柱在平面边界附近的类似;当  $G/D < 0.65$  时,阻力系数变化很大与  $l/\lambda$  值(即在波峰或是波谷处的位置)有很强的依赖关系。受边界形状的控制。

平均升力系数,在  $G/D > 0.1$  时,有与圆柱在平面边界附近的平均升力系数相似的变化趋势,随着  $G/D$  的减小出现上拾力。当  $G/D < 0.1$ ,  $c_{L0}$  的变化与  $l/\lambda$  和  $G/D$  都有关系,在此  $G/D$  的范围出现负升力。不同的是,在波峰处的  $c_{L0}$  出现负值的  $G/D$  范围比波谷处的小。

平均最大脉动升力和均方根脉动升力在  $0.1 < G/D < 0.8$  有最大值 4.8 和 3.3,这表明管线在此区间经受很大的横向振动。

升力变化频率的 Strouhal 数与  $G/D$  和  $l/\lambda$  有关。当  $G/D > 1.2$  时,  $S/S_0$  基本上是常数与两参数  $G/D$  和  $l/\lambda$  无关;当  $G/D < 1.2$  时,  $S/S_0$  变化较大;在  $0.6 < G/D \leq 1.2$  时,  $S/S_0$  达到最大值。

流谱显示表明,圆柱在波谷处,当  $G/D > 0.2$  就开始出现间隙射流,冲刷底部边界,增加管线的不稳定性。

关于波浪形边界上的边界层  $h/\lambda$ ,  $\lambda/D$  和  $l/D$  等参数对水动力特性的影响有待进一步研究。

李东晖参加了其中流谱的显示工作。

## 参 考 文 献

- [1] Sarpkaya, T. and Isaacson, M., *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, (1981).
- [2] Davis, D.A. and Ciani, I.B., *Wave Forces on Submerged Pipelines—A Review with Design Aids*, Civil Engineering lab. NCBC, port Hueneme, CA., Tech. Report No. R-844, (1976).
- [3] Bearman, P.W. and Zdravkovich, M.M., *Flow around a circular cylinder near a plane boundary*, *J. Fluid Mech.* **89**, part 1, (1978), 33—47.
- [4] Zdravkovich, M.M., *Forces on a circular cylinder near a plane wall*, *Applied Ocean Research*, **7**, 4 (1985), 197—201.
- [5] 鄂学全,李战华,凌国灿,海底边界对水下管线的水动力影响,海洋工程 **1**, 1989.
- [6] 李战华,鄂学全,用于水下测量的二分力天平,水动力学研究与进展, A 辑, **5**, 1 (1990), 46—55.
- [7] Grass, A.J., Raven, P.W.J., Stuart, R. J. and Bray, J.A., *ASME, Journal of Energy Resources Technology* **106**, (March 1984), 70—78.



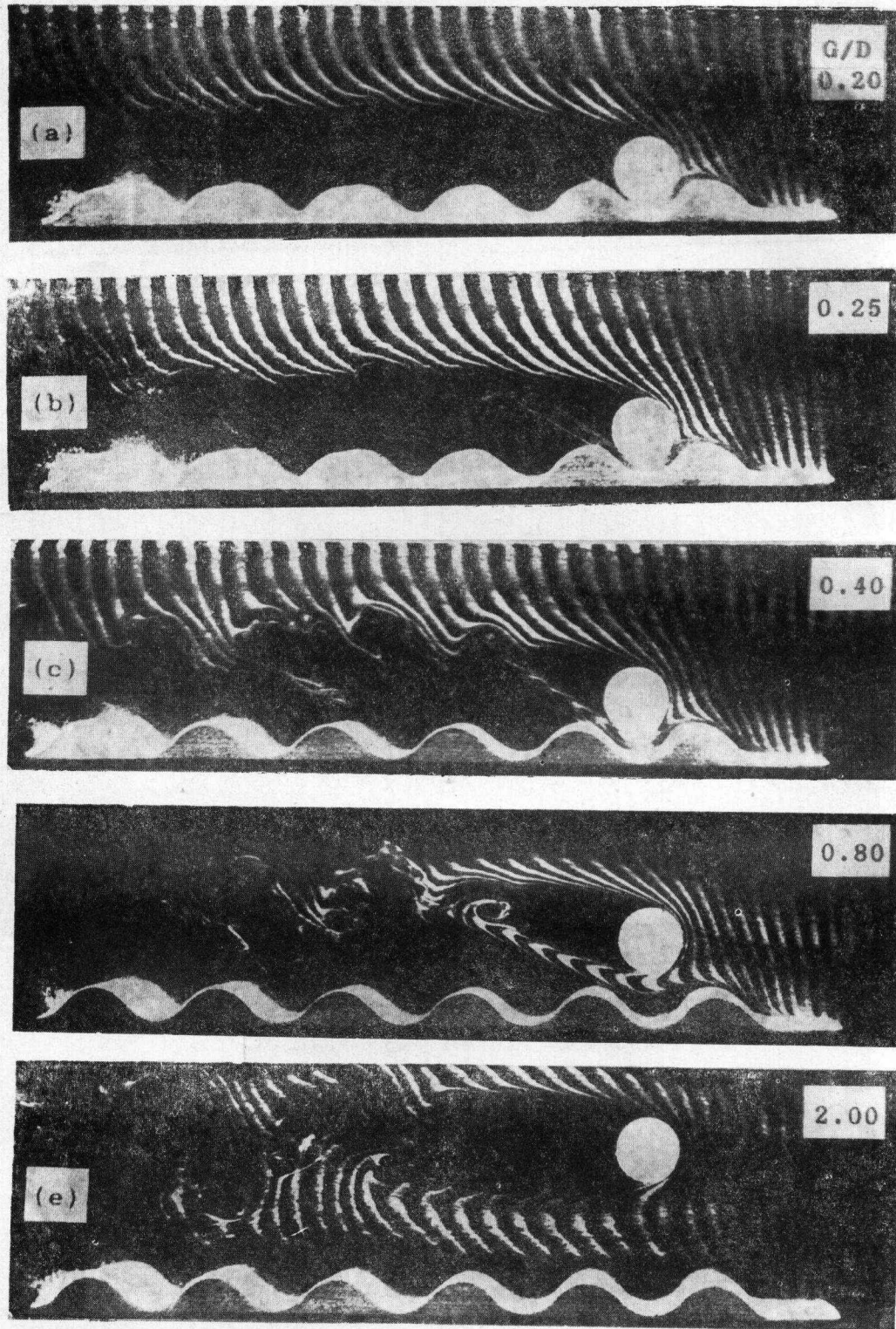
## HYDRODYNAMIC FORCES ACTING ON A CIRCULAR CYLINDER NEAR A WAVY BOUNDARY IN STEADY FLOW

E Xuequan   Jin Li   Ling Guocan

*(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

**Abstract** The characteristics of drag and lift forces on a circular cylinder model near a wavy boundary have been experimentally investigated in a water tunnel. In the range of the Reynolds numbers, based on the diameter of cylinder model, from  $10^4$  to  $1.9 \cdot 10^4$ , the drag, lift force on the cylinder and lift force frequencies have been measured at the wave crest and trough and various distances from the wavy boundary. Flow visualization experiments revealed the wake structure varying with the gap-to-diameter ratio ( $G/D$ ) and mechanism of interaction between the cylinder and the boundary.

**Key words** hydrodynamic force, circular cylinder, wavy boundary



照片 1  $Re = 1.73 \times 10^5$  的流谱