

串列双方柱体流体动力载荷研究*

呼和敖德 孟向阳

(中国科学院力学研究所, 100080)

提要 本文通过流动显示, 热线测频和流体动载荷测量在水槽中研究了绕经不同柱间距比 S/D (S 为双柱间距, D 为柱体截面宽) 串列双方柱体流动特性。实验雷诺数为 $Re = 6 \times 10^4$, 柱间距比 $0.5 \leq S/D \leq 10$ 实验测量了涡脱落频率、时间平均阻力、动态阻力和动态升力。通过实验结果综合分析给出临界柱间距范围 $2.5 \leq (S/D)_c \leq 3.0$, 并将串列双方柱流动随柱间距的变化划分为二种流态区。在临界柱间距, 作用于双柱体的流体载荷、涡脱落频率以及流谱都发生跃变。文中分析讨论了二个流态区的特性以及在临界柱间距出现的双稳态特性。

关键词 双方柱, 流体动载荷, 涡脱落频率, 流谱

一、引言

工程结构物常以群的形式存在, 如高层建筑群、电厂冷却塔群、海洋平台桩柱群等。当流体绕经相互靠近的柱群结构, 由于流动分离、再附以及涡旋的相互作用会出现复杂的流动。因此绕双柱流动无论在流态或在流体动载荷方面都比单柱绕流有很大差异。双柱是桩柱结构的最基本形式。对柱群绕流及其流体动力特性的研究在理论上和实际应用上具有重要意义。绕经双圆柱体的流动问题的研究工作已相当之多^[1]。矩形截面柱群结构是工程结构中普遍采用的一种形状, 由于截面高宽比的不同和双柱间距和排列形式的变化, 因此绕经双矩形柱体的流动的影响因素多, 问题复杂, 目前还很少见有关问题的深入系统研究。Azuma^[2] 等在其早期的风洞实验中, 测量了串列双方柱体时间平均阻力, 并发现在 $S/D = 3.0$ 时, 平均阻力出现跃迁, 该实验雷诺数为 $Re = 1.5 \times 10^5$ 。Reinhold^[3] 等在风洞中进行了单方柱体流体动载荷实验, $Re = 1.2 \times 10^5$ 。该实验在实验单方柱前放置了另一个同尺寸的方柱体。研究了位于尾迹流中单方柱体的时间平均阻力、动态阻力和升力。由于测试探头的不足, 实验结果精度受到影响。最近 Sakamoto^[4] 等, 对串列双方柱阻力和升力进行了风洞实验研究, 实验雷诺数为 5.5×10^4 , 风洞堵塞度为 9.8%。在文献 [5] 中又研究了来流湍流度的影响, 取湍流度 1.4%~8.3%。其实验结果表明当来流湍流度增高, 作用在双柱体上的流体动载荷减小。国内对矩形柱体动态力的研究很少见, 林胜元博士论文中有一部分风洞实验测量了串列双方柱的平均压力分布, 实验雷诺数为 $3 \times 10^4 \sim 10^5$ 。对动态力的研究尚未见到。

综上所述, 目前对该问题的研究还仅仅是初步的, 缺少对各种因素(如来流湍流度、湍

* 国家自然科学基金资助项目。

本文于 1990 年 12 月 19 日收到第一稿, 于 1991 年 5 月 29 日收到修改稿。

流尺度、雷诺数及各种高宽比等)对作用双柱体流体动态力影响的深入系统研究。尤其缺乏对双稳态机制及其影响参数的探索。鉴于此,本文主要从三个方面对绕经串列双方柱体流动特性进行综合研究。首先对绕串列双方柱的流动,包括柱间隙流态,涡脱落过程,近尾迹结构进行流场显示;测量涡脱落频率随柱间距的变化并重点研究双柱的平均阻力、动态升力和动态阻力的变化规律。

二、实验设备及实验方法

实验在长 6 米,高 0.5 米,宽约 0.4 米拖曳式水槽中进行,拖车携带模型在水中匀速运动,模型为两根相同尺寸的方柱体,截面宽度 33 毫米,总长 360 毫米,由三段组成,中间段为 120 毫米长的实测柱,两端虚柱为消除端部效应而设置。流体作用于实测柱体的动态力采用小量称测力传感器量测。关于模型和传感器详见文献 [7]。流体动态力信号经两级放大,低通滤波。A/D 转换,然后经微机进行数据采集和处理,后柱体涡脱落频率用自制热线探头测量,探头置于柱体侧下游适当位置。

双柱绕流流场流动显示用电解沉淀方法,显示的光源为 1000W 缝隙光源,从模型侧面照射,光源,相机和模型安装拖车之上与车同步运行。

三、实验结果及讨论

1. 涡脱落频率

在实验中串列双方柱相互平行布置,迎风面与来流垂直(见图 1)。在后柱下游用热线探头测量的涡脱落频率 f ,随柱间距比 S/D 变化示于图 1。纵座标以 Strouhal 数 $St = f \cdot D/v$ 表示(其中 v 为来流速度)实验得到频率发生跃迁的临界柱间距比值为 $2.5 \leq (S/D)_{cr} \leq 3.0$ 。由此可以把串列双方柱流动划分为两种流态区:第一流态区 $S/D < (S/D)_{cr}$, St 数随柱间距比增大而减小,在达到临界间距时, St 达到最小。当跨越临界柱间距, St 值突然升高,在 $S/D > (S/D)_{cr}$ 流态区, St 数的变化很缓慢并逐渐趋向单方柱结果。

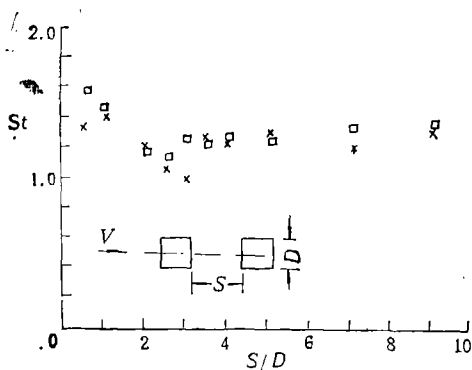


图 1 涡脱落频率 St 与 S/D 关系

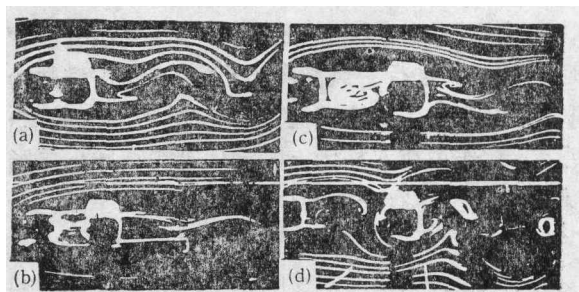


图 2 串列双方柱流谱。

(a) $S/D = 0.5$, (b) $S/D = 2.0$
(c) $S/D = 3.0$, (d) $S/D = 4.0$

2. 流动显示

图 2 给出用电解沉淀方法显示得到的串列双方柱绕流流谱照片。流谱随双柱间距变化显示出两种流态特征,在第一流态区 $S/D < (S/D)_{cr}$,从前柱脱落的剪切层在其下游不形成交替涡而直接再附于后柱壁,而此时两柱之间的流动是准稳态的对称涡流区,绕双柱的流线非常平滑,如同绕细长单柱体流动(见图 2a)。在第一流态区随柱间距的不断增大,后柱下游的涡形成区长度也随之增长,因此从后柱两侧脱落的剪切层在柱下游很长距离内只以光滑波动形式存在未见形成卷曲大涡。当柱间距一旦超过临界值, $S/D > (S/D)_{cr}$,两柱下游分别形成周期交替脱落涡,从前柱脱落的剪切层在形成卷曲涡之后再附于后柱(图 2d)。

3. 双方柱阻力系数

实验分别测量了流体作用于双柱体的瞬态阻力 F_D 。图 3 上给出了位于不同流态区的 3 个典型柱间距比情况下后柱体瞬态阻力采集信号。很显然这是随时间变化的量,因此将其处理为由两部分组成: 时间平均阻力 \bar{F}_D 和随时间变化阻力部分 F_{Df} , 下面称 F_{Df} 为动态阻力。分别相应于上述两个阻力分量的时间平均阻力系数 C_D 和均方根动态阻力系数 $C_{D,rm}$, 定义如下:

$$C_D = \bar{F}_D / \left(\frac{1}{2} \rho v^2 DL \right); \quad C_{D,rm} = \sqrt{\bar{F}_{Df}^2} / \left(\frac{1}{2} \rho v^2 DL \right)$$

根据双柱阻力测量结果计算得到的 C_D 和 $C_{D,rm}$ 随双柱间距变化分别示于图 4 和图 5。实验结果说明均方根动态阻力系数远比平均阻力系数低,而且这两个阻力系数在临界柱

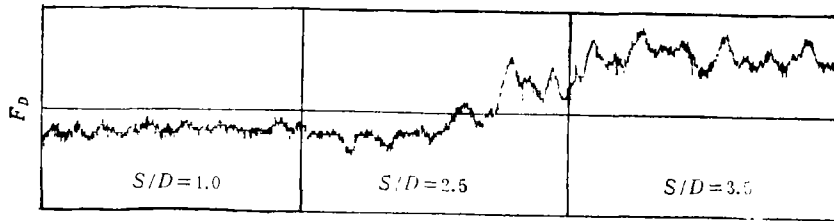


图 3 后柱体瞬态阻力采集信号

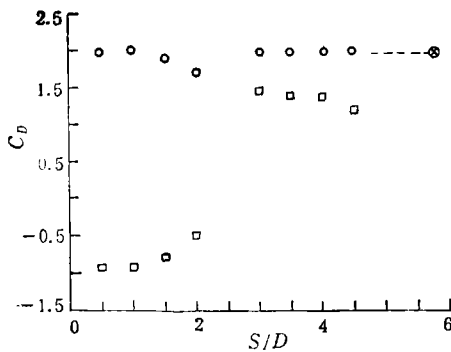


图 4 时间平均阻力系数 C_D 随 S/D 变化

○,前柱; □,后柱; ⊗,单柱

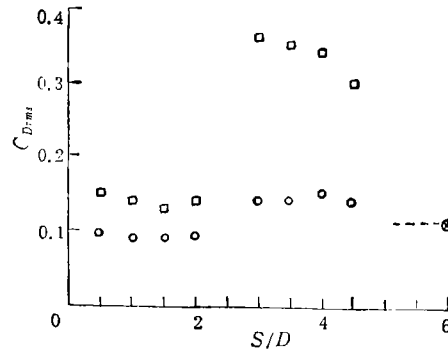


图 5 均方根动态阻力系数 $C_{D,rm}$ 随 S/D 变化

○,前柱; □,后柱; ⊗,单柱

间距出现明显的跃迁。作用在双柱体的阻力在两个流态区也表现出截然不同的特征。当 $S/D < (S/D)_{cr}$, 前柱体的平均阻力系数随柱间距趋近临界值而逐渐下降。而后柱的平均阻力系数为负值, 远低于前柱和单柱结果。这主要由于后柱正处于前柱后面形成的准稳态对称涡流区所造成。当 $S/D > (S/D)_{cr}$, 正如流动显示所示, 在前后柱下游分别形成周期交替脱落涡。这是形成高阻力的主要机制, 因此实验结果作用两柱体上的阻力迅速增高。后柱 C_D 值从负上升到 $1.5(S/D = 3.0)$, 然后随 S/D 增大而逐渐降低。前柱平均阻力系数高于后柱。再来观察一下动态阻力系数的变化, 高 $S/D < (S/D)_{cr}$, 绕双柱体流动很光滑, 扰动受到抑制, 因此降低了作用在前后柱体的动态阻力幅度, 此时 $C_{D, rms}$ 约为 $0.1 \sim 0.15$ 。但当 S/D 超过临界值, 后柱的 $C_{D, rms}$ 值明显高于前柱, 最高可达 0.35 。

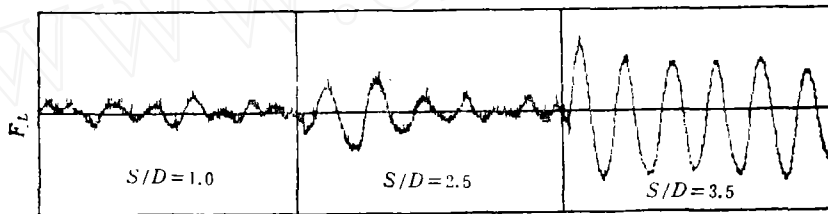


图 6 后柱动态升力实测信号

4. 双方柱均方根动态升力系数

柱体在其自身周期交替脱落涡作用下受到周期交变侧向力作用, 下面称为动态升力 F_L 。图 6 给出位于不同流态区的 3 个典型柱间距比情况下动态升力实测信号, 其均方根动态升力系数定义为:

$$C_{L, rms} = \sqrt{\overline{F_L^2}} / \left(\frac{1}{2} \rho v^2 DL \right)$$

由 F_L 实测结果计算得到的 $C_{L, rms}$ 随柱间距 S/D 变化示于图 7。实验结果说明由于涡诱导作用于方柱的均方根动态升力系数在临界柱间距出现跃升, 并在 $S/D = 3.0$ 达到最高值, 约为 2.1 。

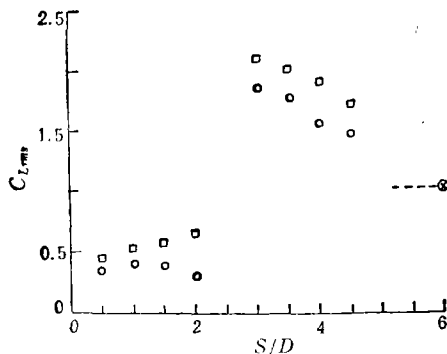


图 7 均方根动态升力系数 $C_{L, rms}$ 随 S/D 变化
○, 前柱; □, 后柱; ⊗, 单柱

下面结合本文给出的流动显示结果进一步分析双柱动态升力随柱间距变化的实验结果。当 $S/D < (S/D)_{cr}$, 流谱表明绕双方柱流动比较平滑, 侧向扰动较小, 后柱具有很长的涡形成区, 这必将削弱了涡对物体的诱导作用, 从而导致作用双柱的动态升力幅值降低, 在图 7 上给出的 $C_{L, rms}$ 值对后柱约为 0.5 , 而前柱结果低于后柱。但是, 当 $S/D > (S/D)_{cr}$, 作用双柱上的动态升力幅值突然增高,

这当然是由于前后柱后交替脱落涡的形成和涡形成区缩短的结果。本文实验得到后柱

$C_{L,m}$ 高于前柱, 前后柱动态升力这种变化规律非常类似于双圆柱。但有别于文献[4], 后者指出当 $S/D > 3.0$, 前柱 $C_{L,m}$ 值高于后柱, 该文对这种现象解释为前柱尾流中产生的强湍流导致从前柱分离的剪切层间歇地再附于后柱侧壁的结果。然而这种解释与其文献[5]中对湍流度影响所得到的研究结果相互矛盾, 研究结果说明串列双方柱的动态升力幅度随湍流度增高而减小, 而且后柱减小幅度比前柱高。Nakamura^[8] 对单方柱动态力的研究关于湍流度影响规律与上一致, 然而当湍流度相同而湍流积分尺度改变所得实验结果说明动态升力幅值随湍流积分尺度增大而增高。分析这些实验结果可以认为来流湍流度对串列双方柱前柱动态升力影响趋势与单方柱很类似, 但是后柱却不同, 它不仅受到来流条件的影响, 还受到前柱尾流场中各种复杂因素的影响如湍流度、湍流尺度、涡结构以及流动的相互干扰等等。因此各自不同实验条件下上述诸因素对后柱动态升力影响的综合效果将会有差别, 这是一个比较复杂的问题, 不宜用简单的湍流强度进行解释。当前对有关各种因素对动态力影响的系统研究工作非常缺乏。这正是今后值得深入研究的一个方向。

双稳态特性: 本文在测量柱体阻力和升力过程中发现在临界柱间距范围测量的阻力和升力的瞬态信号出现间歇跃变。如图 3 给出阻力实测过程的信号记录, 当 $S/D < (S/D)_{cr}$, 这里给出 $S/D = 1.0$ 结果, 记录的阻力值为负, 而且幅值很小。当 $S/D > (S/D)_{cr}$, 如 $S/D = 3.5$ 时, 记录的阻力信号为正值, 且幅值高。在临界柱间距 $S/D = 2.5$ 时记录的信号出现间歇变化, 即负值与正值的切换。这是一种双稳态的特征。这种特征同样反映在动态升力测量过程中, 如图 6 所示, 在临界柱间距 $S/D = 2.5$, 图上记录的周期变化的动态升力幅值出现高低交替切换现象。与此同时, 双稳态特征在流谱上的表现主要是: 双柱间隙流的准稳态对称涡流态与非对称交替涡流态之间的切换。

四、结 论

本文通过对串列双方柱在临界柱间距前后流态变化的流场显示、测量动态升力和阻力随柱间距的变化以及对涡脱落频率的测量系统综合地研究了绕串列双方柱流动和流体动态力特性并得到以下几点结论:

1. 根据流谱、涡脱落频率和流体动载荷随双柱间距变化, 本文给出临界柱间距范围为 $2.5 \leq (S/D)_{cr} \leq 3.0$ 。作用双柱体的流体阻力、动态升力在 $(S/D)_{cr} = 3.0$ 时达到最高值。
2. 绕串列双方柱流动存在两种流态区: 在 $S/D < (S/D)_{cr}$, 双柱区间流为准稳态流态区, 后柱具有较长的涡形成区, 侧向扰动小。在 $S/D > (S/D)_{cr}$, 双柱下游各自形成交替脱落涡, 涡形成区立即缩短, 侧向扰动增大。
3. 双柱的流体动载荷在两流态区具有很大差异。当 $S/D < (S/D)_{cr}$, 前柱受到较高阻力作用, 而后柱平均阻力为负值。在该流态区, 双柱动态升力和阻力受到抑制, 其幅值较小。当 $S/D > (S/D)_{cr}$, 上述诸动态力显著升高。
4. 在临界柱间距范围内, 绕串列双方柱的流动具有双稳态特征。
5. 关于来流雷诺数、湍流度、湍流尺度以及涡的相互干扰等诸因素对双方柱动态力的影响有待今后深入系统研究。

参 考 文 献

- [1] Zdravkovich M M. *Trans ASME Journal of Fluid Engineering* 1977: 618—632
- [2] Azuma A, Iuchi N, Watanabe K, Saida K and Watanabe K, *Jpn Soc Aerodyna Space Sci*, 1974, 22: 209—295 (in Japanese)
- [3] Reinhold T A, Tieleman H W and Maker F J. *Wind Eng. Industrial Aerodynamic*, 1977(2), 223—241
- [4] Sakamoto I, Haniu H and Obata Y. *J Wind Eng and Industrial Aerodyn*, 1987: 85—103
- [5] Sakamoto H, Haniu H. *Trans ASME*, 1988, 110(6): 140—146
- [6] 林胜天, 绕经双矩形柱流动, 1988 北京大学博士论文
- [7] Huhe-Aode and Meng Xiangyang. *Acta Mechanica Sinica*, 1991, 7(2): 104—110
- [8] Nakamura Y and Ohya Y. *J Fluid Mech*, 1984, 149: 255—273

AN EXPERIMENTAL STUDY OF HYDRODYNAMIC FORCES ON TWO SQUARE-SECTION CYLINDERS IN A TANDEM ARRANGEMENT

Huhe-Aode Meng Xiangyang

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China*)

Abstract The characteristics of the flow past two square-section cylinders in a tandem arrangement were studied experimentally. The vortex-shedding frequencies, time-mean drag forces, time-varying lift and drag forces were obtained for various spacing ratios S/D (S , spacing; D , width of the cylinder). The Reynolds number of the experiment was 6×10^3 , the spacing ratios were in the range 0.5 to 10. It was found that the critical spacing ratios were in the range 2.5 to 3.0, and the flow can be divided into two regimes with respect to spacing ratios. There were abrupt changes for the hydrodynamic forces, the vortex-shedding frequencies and the flow structures within the critical spacing ratios.

Key words two square-section cylinders, hydrodynamic forces, vortex-shedding frequencies, flow visualization