

# 线形布置双方柱平均气动力特性试验研究\*

杨 群<sup>1,2,3</sup>, 吴倩云<sup>3</sup>, 姜会民<sup>3</sup>, 孙亚松<sup>3</sup>, 刘庆宽<sup>1,2,3</sup>, 刘小兵<sup>1,2,3</sup>

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄, 050043)

(2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心 石家庄, 050043) (3. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

**摘要** 为研究线形布置双方柱在不同风向角和不同间距比时的平均气动力特性, 采用刚性模型测压风洞试验的方法, 测试并分析了双方柱在风向角  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 、间距比  $1.2 \leq L/D \leq 8$  范围内的平均升阻力系数。研究表明, 线形布置双方柱的平均气动力特性按照风向角可分为 3 类: 小风向角 ( $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ )、中等风向角 ( $10^\circ < \alpha < 60^\circ$ ) 和大风向角 ( $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )。小风向角下, 平均气动力系数在临界间距比  $3 \leq L/D \leq 4$  时存在明显的跳跃现象; 中等风向角下, 随间距比的增大, 上游方柱的平均阻力系数先减小后增大, 平均升力系数变化不大, 下游方柱的平均阻力系数逐渐增大, 平均升力系数逐渐减小; 大风向角下, 当  $L/D \leq 2$  时, 随着间距比的增大, 上游方柱的平均阻力系数逐渐减小, 平均升力系数先减小后增大, 下游方柱的平均阻力系数先减小后增大, 平均升力系数则相反; 当  $L/D \geq 2.5$  时, 双方柱的平均气动力系数随间距比的增大变化平缓。

**关键词** 线形布置双方柱; 风洞试验; 平均气动力; 风向角; 间距比

**中图分类号** TU312.1; TH138

## 1 问题的引出

线形布置双方柱在高层建筑、桥梁的桥墩和桥塔等实际工程中较多采用。由于两个方柱相互干扰, 导致方柱周围的流场发生变化, 从而使得方柱的局部风压、整体升阻力等发生改变<sup>[1-2]</sup>。为了准确获得线形布置双方柱的气动特性, 人们通过风洞试验和数值模拟等手段进行了一些研究工作。

如图 1 中红色箭头所示, 当来流风方向与平行的对称轴一致时, 双方柱呈并列布置。并列双方柱的气动特性已有很多研究成果。陈素琴等<sup>[3]</sup>通过数值模拟的方法再现了试验中并列双方柱的间距在小于某临界值时的偏流现象, 出现偏流时, 偏流边的柱体具有较大的升力、阻力和涡脱落频率, 且具有相对窄的尾流区。魏英杰等<sup>[4]</sup>通过大涡模拟的方法发现, 并列双方柱的中心间距为 1.5 倍的方柱边长时, 在对称边界条件下, 升力系数和阻力系数的时域过程不对称, 但其频域过程基本对称。Alam 等<sup>[5]</sup>通过热线法、粒子成像测速法等多种方法, 根据流动结构和斯托罗哈数, 确定了雷诺数为  $4.7 \times 10^4$  时的并列双方柱的 4 种流动状态及其间距比范围, 研究了每

种流动状态下的气动特性。Yen 等<sup>[6]</sup>通过风洞试验的方法, 将雷诺数为  $2.262 \times 10^3 \sim 2.8 \times 10^4$ 、间距比 (两方柱中心与方柱边长的比) 为 1~13 的并列双方柱分为 3 种流动状态, 并比较了每种流动状态下平均阻力系数和斯托罗哈数的大小。

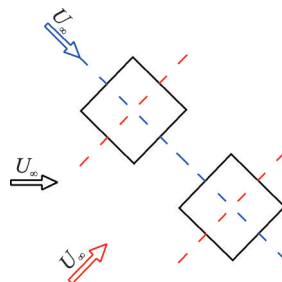


图 1 不同方向来流下的线形布置双方柱

Fig.1 Two square cylinders arranged inline at various angles

如图 1 中蓝色箭头所示, 当来流风方向与重合的对称轴一致时, 双方柱呈串列布置。对于串列双方柱的气动特性也有许多学者进行了研究。杜晓庆等<sup>[7-8]</sup>通过风洞试验的方法研究了雷诺数为  $8 \times 10^4$  时, 不同间距比下串列双方柱的气动干扰效应, 试验发现临界间距比在 3~3.5 之间, 然后通过数值模拟

\* 国家自然科学基金资助项目(52078313, 52008273); 河北省自然科学基金资助项目(E2018210105, E2020210083); 河北省高等学校科学技术研究资助项目(ZD2019118); 省部共建国家重点实验室自主课题资助项目(ZZ2020-14); 河北省协同创新中心资助项目

收稿日期: 2020-10-24; 修回日期: 2020-12-20

的方法将双方柱周围的流场根据间距比划分为单一钝体流态、剪切层再附流态和双涡脱流态,并解释了气动力的干扰机理。Kim等<sup>[9]</sup>通过粒子图像测速技术研究了2种雷诺数下串列双方柱的流场、湍流强度等,发现2种雷诺数下,流动状态在间距比小于等于3和大于等于3.5时有显著差异。More等<sup>[10]</sup>通过多种试验的方法研究了上游方柱受迫振动时串列双方柱的流动状态,发现两柱的间距对旋涡脱落和流动状态有很大的影响。

在实际工程中,由于来流风方向的多样性,线形布置的双方柱很少处于串列和并列两种特殊情况,而是经常处于斜列的情况(如图1中黑色箭头所示,来流风方向既不与平行的对称轴一致,也不与重合的对称轴一致)。对于斜列双方柱,马健等<sup>[11]</sup>通过风洞试验的方法研究了间距比为1.1~4.0时,线形布置双方柱的升阻力系数,发现在某些风向角下,前柱因受到干扰使得气动荷载增大。Du等<sup>[12]</sup>通过风洞试验的方法研究了雷诺数为 $8.0 \times 10^4$ 、中心间距为1.25~5倍的方柱边长时,线形布置双方柱在不同间距比和风向角下气动力的变化规律,并按照间距将双方柱的气动特性划分为3种,分别为小间距、中等间距和大间距。为了准确掌握双方柱气动特性的变化规律, Du等<sup>[12]</sup>建议在更多的间距下开展试验。

综上所述,对于线形布置双方柱,串列和并列状态下的研究较多且相对全面,斜列状态下的研究较少。线形布置双方柱的气动特性与来流风向角密切相关,采用并列和串列两种特殊状态下的气动特性进行实际工程的抗风设计可能带来偏于危险的结果。为了工程结构的抗风安全,有必要深入分析风向角对线形布置双方柱气动特性的影响规律。鉴于此,笔者通过刚性模型测压风洞试验的方法,测试并分析了不同风向角和不同间距时线形布置双方柱的气动特性,且主要分析了线形布置双方柱的平均气动力特性。

## 2 试验设备与模型

本试验在石家庄铁道大学风洞实验室的低速段进行,低速试验段长、宽、高分别为24, 4.38, 3 m,最大风速约为30 m/s,湍流度不大于0.4%。试验模型由板材制作而成,模型高为2 000 mm,横截面边长为80 mm。为保证模型的刚度,中间采用1根方钢支撑,同时为保证模型的二元性,模型两端布置端板。在模型中间位置布置测点,因尖角处流动复杂,故测点在角部处加密。单个模型每边15个测点,共

60个测点。试验使用的仪器主要有微型压力扫描阀和数据采集系统,试验采集时间约为30 s,采样频率为330 Hz,采样总点数为9 900个。为描述方便,在方柱角点处进行编号,并区分方柱1与方柱2。具体测点布置及风向角定义见图2。

如图3所示,模型安装在低速试验段的转盘上。模型及端板通过上下钢构件连接,上端钢构件铰接在试验段上顶面,下端钢构件刚性连接在试验段转盘上,通过转动转盘实现风向角的改变。间距比为 $L/D$ , $L$ 为两个方柱中心间的距离, $D$ 为方柱边长。

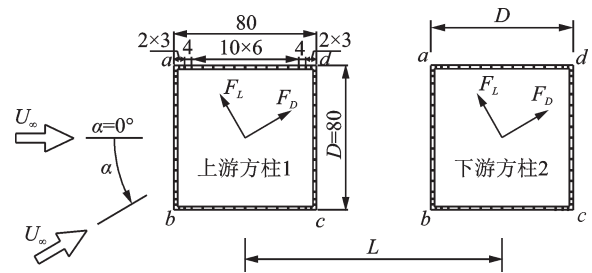


图2 模型测点布置及参数定义(单位:mm)

Fig.2 Pressure tap arrangement and geometry parameters of test mode(unit: mm)



图3 风洞试验照片

Fig.3 Wind tunnel test photo

为保证试验的准确性,先进行了单方柱的试验。由于试验流场和单方柱横截面的对称性,单方柱的试验风向角为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 。根据文献[13],风向角间隔为 $5^\circ$ ,可描述气动力的整体变化规律,故选择风向角间隔为 $5^\circ$ 。双方柱的试验共选取了14个间距比,因小间距时,流动较为复杂<sup>[5]</sup>,故选取间距比分别为1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 7和8。由于双方柱横截面及流场对称,故风向角选取 $0^\circ \sim 90^\circ$ ,间隔为 $5^\circ$ 。试验采用均匀流场。

针对单方柱,分别在6和10 m/s的风速下进行试验。结果表明,两个风速下平均风压的结果吻合很好。风洞试验发现:6 m/s风速时,单方柱模型基本保持静止状态;10 m/s风速时,单方柱模型的中部发生了轻微的晃动,这可能与较高风速时来流经

过模型后产生的强烈漩涡脱落有关。考虑到模型的晃动可能会对双方柱的试验精度带来影响,双方柱的试验在6 m/s的风速下进行。取方柱边长为特征尺寸,风洞试验的雷诺数约为 $3.2 \times 10^4$ 。

### 3 试验结果与分析

图4为双方柱的平均气动力系数云图。如图4

所示,双方柱的平均气动力在 $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ 时,发生明显的突变现象;在 $10^\circ < \alpha < 60^\circ$ 时,平均气动力随间距比的变化规律大体一致;在 $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 时,平均气动力随间距比的变化规律也大体一致,但与 $10^\circ < \alpha < 60^\circ$ 时的变化规律明显不同。所以按风向角将双方柱的平均气动力特性分为3类:小风向角( $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ );中等风向角( $10^\circ < \alpha < 60^\circ$ );大风向角( $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )。

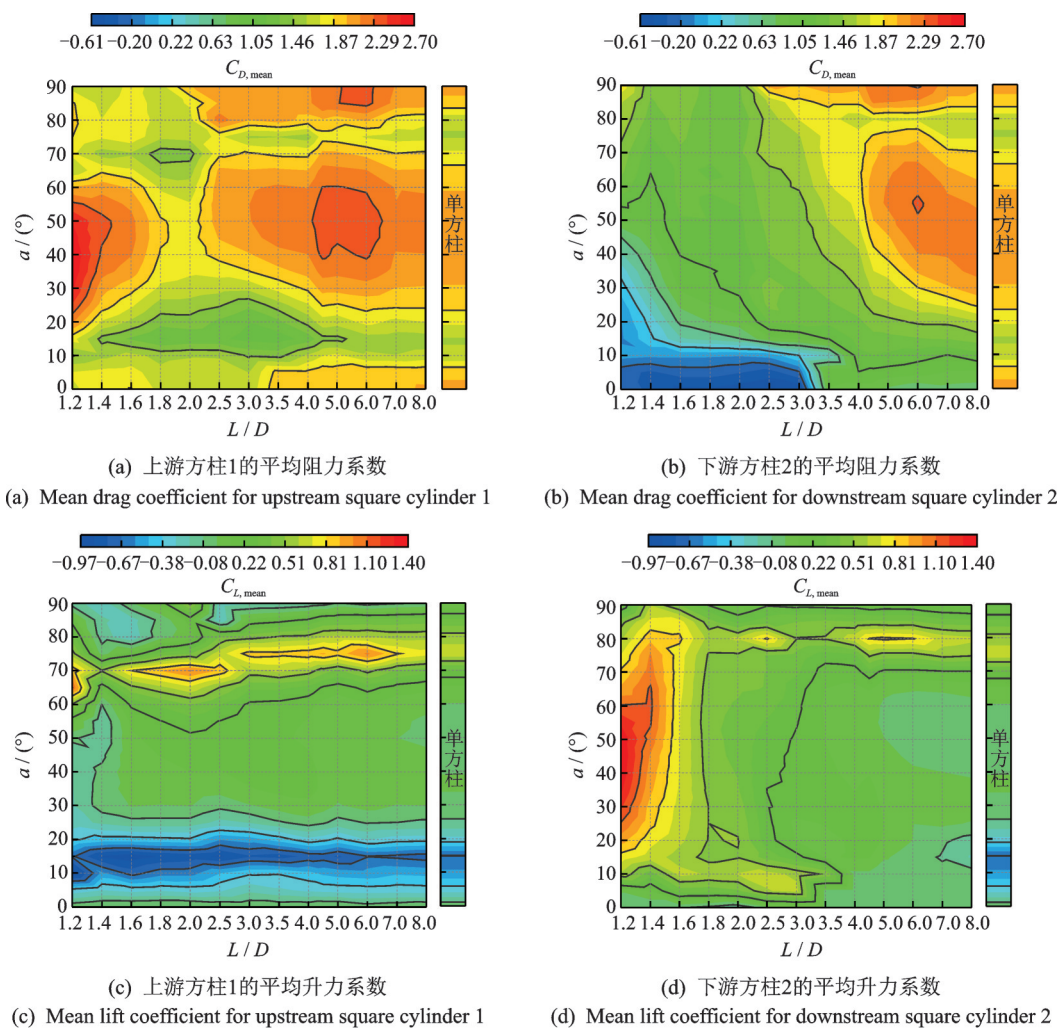


图4 双方柱平均气动力系数云图

Fig.4 Contours of the mean aerodynamic force coefficients for two square cylinders

#### 3.1 小风向角 ( $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ )

图5为小风向角下双方柱的平均阻力系数随间距比的变化曲线。对比上游方柱1和下游方柱2可以发现,小风向角时两个方柱的平均阻力系数随间距比的增大均发生突变。 $0^\circ$ 和 $5^\circ$ 风向角时,发生突变的间距比为 $3 \leq L/D \leq 3.5$ ;  $10^\circ$ 风向角时,发生突变的间距比为 $3.5 \leq L/D \leq 4$ 。小于发生突变的间距比

时,上游方柱1的平均阻力系数随间距比先增大后逐渐减小,下游方柱2的平均阻力系数大致呈现逐渐减小的变化规律;大于发生突变的间距比时,两个方柱的平均阻力系数随间距比的增大均趋于平稳。上游方柱1的平均阻力系数逐渐接近单方柱的值,下游方柱2的平均阻力系数始终小于上游方柱1的值。

值得注意的是,当 $L/D < 3$ 时,下游方柱2的负

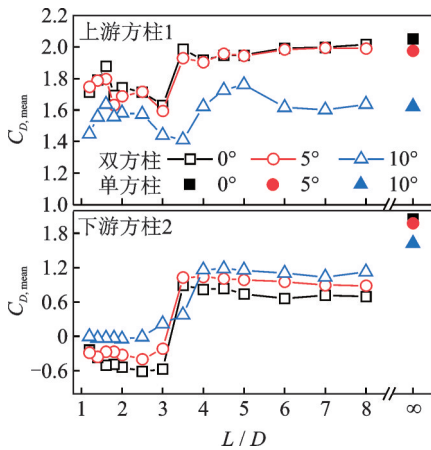


图5 小风向角下双方柱的平均阻力系数

Fig.5 Mean drag coefficients for two square cylinders at small incidence angles

阻力随风向角的增大而减小;当 $L/D > 4$ 时,下游方柱2的正阻力随风向角的增大而增大。随风向角的增加,上、下游方柱平均阻力系数随间距比发生突变的现象逐渐减弱。

图6为小风向角下双方柱的平均升力系数随间距比的变化规律,可以发现,下游方柱2在 $5^\circ$ 和 $10^\circ$ 风向角时平均升力系数发生明显突变现象。

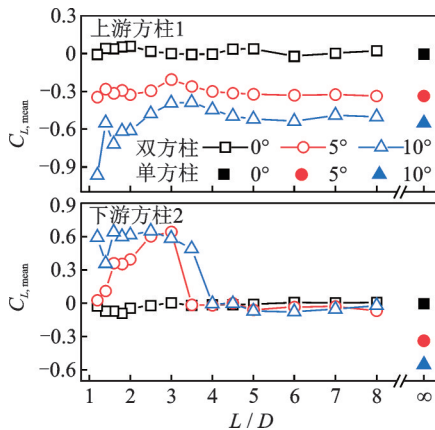


图6 小风向角下双方柱的平均升力系数

Fig.6 Mean lift coefficients for two square cylinders at small incidence angles

上游方柱1随风向角的增加,负平均升力随之增大;随间距比的增加,平均升力系数逐渐接近单方柱的值。 $0^\circ$ 风向角时,平均升力系数接近0; $5^\circ$ 风向角时,平均升力系数集中在 $-0.3$ 左右; $10^\circ$ 风向角时,负平均升力系数在间距比为1.2时出现最大值,平均升力系数随间距比的增大先增大后减小,最后趋于平稳。下游方柱2在 $0^\circ$ 风向角时,平均升力系数随间距比的增加基本不变,接近0值; $5^\circ$ 和 $10^\circ$ 风向角时,在小于发生突变的间距比时,平均升力系数较

大;大于发生突变的间距比时,平均升力系数接近0。

综上所述,小风向角下平均阻力系数和平均升力系数随间距比的增大均存在突变现象,且大于突变的间距后,平均阻力系数和平均升力系数的值均无大幅波动。为了更好地说明小风向角时双方柱的平均气动力特性,以 $5^\circ$ 风向角为例,通过平均风压分布特性初步解释小风向角时双方柱的平均气动力特性。

图7为 $5^\circ$ 风向角时不同间距比下双方柱平均风压系数的变化曲线。 $5^\circ$ 风向角时,对平均升力系数起主导作用的为 $a-d$ 面和 $b-c$ 面,对平均阻力系数起主导作用的为 $a-b$ 面和 $c-d$ 面。

由图7(a)可以发现,间距比为3.5时,上游方柱1各个面的平均风压系数均与单方柱的平均风压系数相差不大,故间距比为3.5时上游方柱1的平均阻力系数和平均升力系数均与单方柱的值接近。当间距比为3时,上游方柱1中 $a-b$ 面平均风压系数的值与单方柱的值接近, $b-c$ 面、 $c-d$ 面和 $d-a$ 面的负压明显小于单方柱的负压。因 $b-c$ 面和 $a-d$ 面上各点的风压大小基本相等但方向相反,故可忽略不计。由于 $c-d$ 面的负压比单方柱的负压小,且风向角较小,从而上游方柱1的平均阻力系数在 $L/D=3$ 时比 $L/D=3.5$ 时小,而平均升力系数相差不大。

图7(b)为下游方柱2的平均风压系数在不同间距比下的变化曲线。当间距比为3时,方柱4个面的平均风压系数均为负值,除 $a-b$ 面外,其余面的负压均小于单方柱的负压,与单方柱平均风压系数的变化规律有很大不同。下游方柱2在 $L/D=3$ 时, $a-b$ 面的负压大于 $c-d$ 面的负压, $b-c$ 面的负压小于 $a-d$ 面的负压。又因为风向角较小,所以下游方柱2在 $L/D=3$ 时,平均阻力系数为负值,平均升力系数为较大的正值。当间距比为3.5时, $b-c$ 面和 $a-d$ 面的风压大小大致相等但方向相反。 $c-d$ 面的负压大于 $a-b$ 面的负压,且均小于单方柱的值,所以在小风向角下,下游方柱2的平均阻力系数小于单方柱的值,平均升力系数接近0。

对比间距比3和3.5可以发现,下游方柱2在 $a-b$ 面和 $c-d$ 面,平均风压系数均为负值,且在 $a-b$ 面, $L/D=3$ 时的负压大于 $L/D=3.5$ 时的负压,在 $c-d$ 面则相反。所以 $L/D=3.5$ 时的平均阻力系数远大于 $L/D=3$ 时的平均阻力系数,从而平均阻力系数的变化规律出现突变的现象。

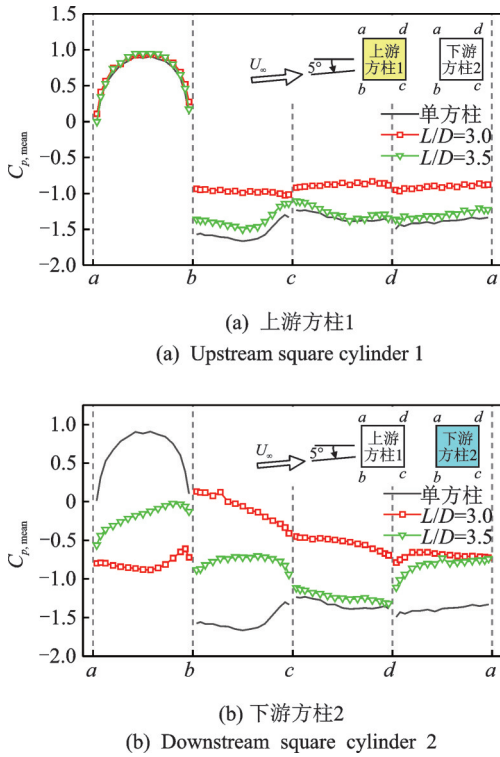


图7 5°风向角下不同间距比时双方柱的平均风压系数  
Fig.7 Mean pressure coefficients of two square cylinders with different spacing at  $\alpha=5^\circ$

3.2 中等风向角 ( $10^\circ < \alpha < 60^\circ$ )

图8为中等风向角下平均阻力系数随间距比的变化规律。可以发现,各个风向角下双方柱的平均阻力系数随间距比的增大,没有出现明显的突变现象。上游方柱1的平均阻力系数随间距比的增大,先减小后增大,最后逐渐接近单方柱的值。下游方柱2的平均阻力系数随间距比的增大,大致呈现出单调递增的变化规律,且平均阻力系数逐渐接近单

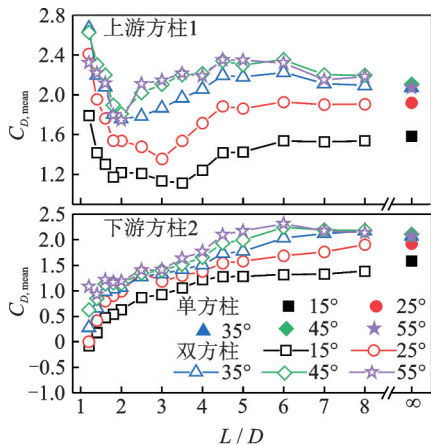


图8 中等风向角下双方柱的平均阻力系数  
Fig.8 Mean drag coefficients for two square cylinders at moderate incidence angles

方柱的值。上游方柱1和下游方柱2在同一种间距比下,均呈现出平均阻力系数随风向角的增加逐渐增大的变化规律。双方柱的平均阻力均在间距比为1.2时出现极值。

图9为中等风向角下平均升力系数随间距比的变化曲线。上游方柱1的平均升力系数随间距比变化不明显,均接近单方柱的值。15°≤α≤25°时,结合图4(c)可以发现,负平均升力系数随风向角的增加明显减小,在35°≤α≤55°时,平均升力系数随风向角的变化不再明显。下游方柱2在L/D=1.2时,平均升力系数最大,随间距比的增加逐渐减小,最后趋于稳定接近0。平均升力系数随风向角的变化不明显。

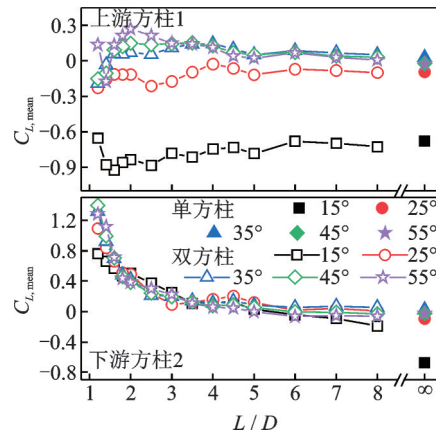


图9 中等风向角下双方柱的平均升力系数  
Fig.9 Mean lift coefficients for two square cylinders at moderate incidence angles

以45°风向角为例,从双方柱平均风压分布特性的角度来说明中等风向角时,双方柱的平均气动力特性。45°风向角时,方柱的4个面均对平均阻力系数和平均升力系数起主导作用。

图10为45°风向角下双方柱在不同间距比时平均风压系数的变化规律。可以发现,上游方柱1在L/D=1.2时,c-d面的负压明显大于单方柱的值,而其余面的平均风压系数与单方柱接近,所以L/D=1.2时,上游方柱1的平均升力系数小于单方柱的值,平均阻力系数大于单方柱的值。当L/D=2时,上游方柱1的a-b面和b-c面的平均风压与单方柱的值接近,c-d面和d-a面的负压均小于单方柱的值,所以L/D=2时,平均阻力系数小于单方柱的值。间距比由1.2增大到2时,上游方柱1的a-b面和b-c面均与单方柱的值接近,c-d面和d-a面的负压均随间距比逐渐减小,所以上游方柱1的平均阻力系数

随间距比的增大逐渐减小。 $L/D=3$ 及 $L/D=5$ 时,方柱的4个面均与单方柱的值接近,所以随着间距比的增大,上游方柱1的平均阻力系数逐渐接近单方柱的值。

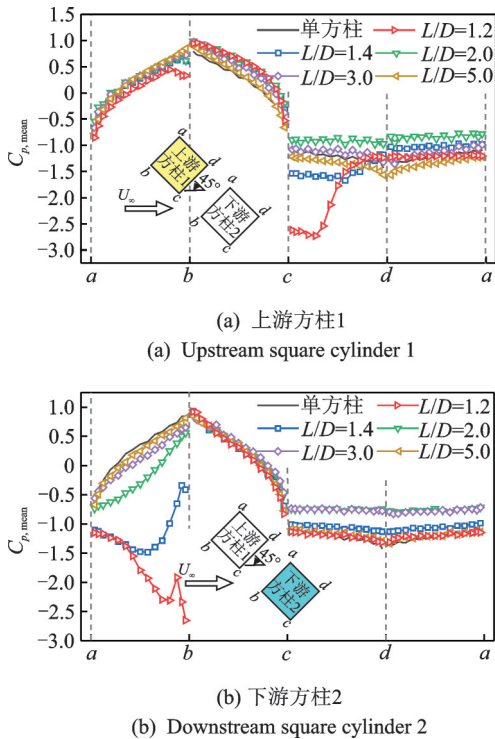


图 10 45°风向角下不同间距比时双方柱平均风压系数  
Fig.10 Mean pressure coefficients of two square cylinders with different spacing at  $\alpha=45^\circ$

当间距比从1.2增大到3时,下游方柱2在 $a-b$ 面平均风压系数的值随间距比的增大由全负压向部分正压转变,逐渐接近单方柱的值; $b-c$ 面的平均风压系数均接近单方柱的值; $c-d$ 面和 $d-a$ 面的风压分布大体一致,负压随间距比的增大逐渐减小,但减小的绝对值小于 $a-b$ 面的减小值,所以阻力系数逐渐增大,升力系数逐渐减小,且在 $L/D<2.5$ 时升力系数远大于单方柱的值。当 $L/D=5$ 时,下游方柱2各个面的值均接近单方柱的值,所以平均阻力系数和平均升力系数均接近单方柱的值。

综上所述,中等风向角时双方柱平均气动力系数在小间距时变化的主要影响因素为狭缝面(上游方柱1的 $c-d$ 面、下游方柱2的 $a-b$ 面)风压的改变。

3.3 大风向角 ( $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )

图 11 为大风向角下双方柱平均阻力系数随间距比的变化曲线。双方柱的平均阻力系数在间距比为2~2.5时发生相对较大的变化。在 $L/D \leq 2$ 时,

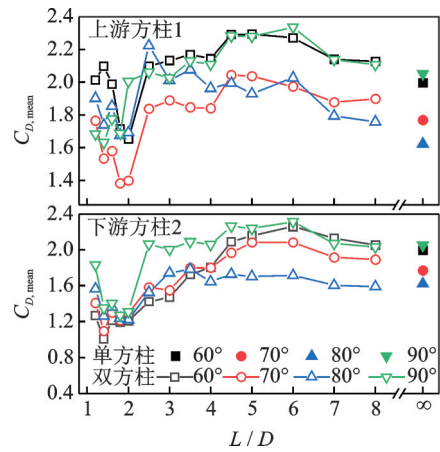


图 11 大风向角下双方柱的平均阻力系数

Fig.11 Mean drag coefficients for two square cylinders at large incidence angles

上游方柱1的平均阻力系数大致呈现出逐渐减小的变化趋势,下游方柱2的平均阻力系数则大致呈现出先减小后增大的变化规律。在 $L/D \geq 2.5$ 时,两个方柱的平均阻力系数随间距比的增加逐渐趋于平稳,接近单方柱的值。上游方柱1和下游方柱2的平均阻力系数随间距比的增加,不再像中等风向角时单调变化。

图 12 为大风向角下双方柱平均升力系数随间距比的变化规律。两个方柱的平均升力系数也在间距比为2~2.5时发生较大的变化。当 $L/D \leq 2$ 时,上游方柱1的平均升力系数随间距比的增大,先减小后增大,下游方柱2则相反。两个方柱的平均升力系数均在间距比为1.4左右取得极值,上游方柱1为极小值,下游方柱2为极大值。当 $L/D \geq 2.5$ 时,两个方柱的平均升力系数均随间距比的增大逐渐趋于平稳,接近单方柱的值。

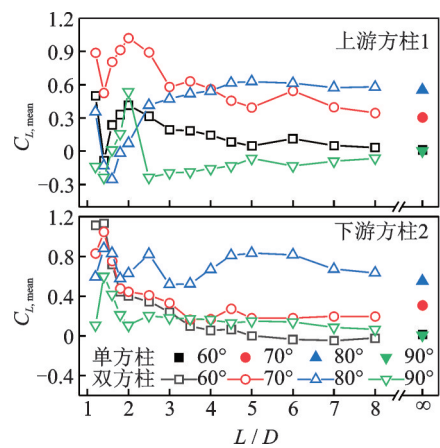


图 12 大风向角下双方柱的平均升力系数

Fig.12 Mean lift coefficients for two square cylinders at large incidence angles

以80°风向角为例,从平均风压分布特性的角度来初步解释平均气动力特性发生变化的原因。80°风向角时,对平均升力系数起主导作用的为a-b面和c-d面,对平均阻力系数起主导作用的为a-d面和b-c面。

图13为80°风向角下不同间距比时双方柱的平均风压系数的变化曲线。在 $1.2 \leq L/D \leq 1.6$ 时,上游方柱1的a-b面的平均风压系数均集中在-1.0左右,c-d面的负压随间距比的增大逐渐增大,所以上游方柱1的平均升力系数逐渐减小。 $L/D=2$ 时,a-b面、b-c面和a-d面的风压接近 $L/D=1.6$ 时的风压,c-d面的负压小于 $L/D=1.6$ 时的负压,所以上游方柱1在 $L/D=2$ 时的平均升力系数大于 $L/D=1.6$ 时的值,平均阻力系数小于 $L/D=1.6$ 时的值。 $L/D=2$ 和2.5时,b-c面的平均风压系数相差不大,但 $L/D=2$ 时,a-b面、c-d面和a-d面的负压明显小于 $L/D=2.5$ 时的值,而a-b面和c-d面的平均风压系数大致相等,且方向相反,此时起主导作用的为a-d面,所以在 $L/D=2$ 和2.5时,平均升力系数和平均阻力系数均明显增大。随着间距比的增大, $L/D=8$ 时,上游方柱1各个面的平均风压系数分布均与单方柱的值接近,平均升力系数接近单方柱的值。

当 $L/D=1.4$ 时,下游方柱2在a-b面的负压大

于 $L/D=1.2$ 时的负压,在c-d面和a-d面则相反,b-c面相差不大,所以下游方柱2在 $L/D=1.4$ 时的平均升力系数大于 $L/D=1.2$ 时的值,平均阻力系数小于 $L/D=1.2$ 时的值。当 $1.4 \leq L/D \leq 2$ 时,下游方柱2的b-c面、c-d面和a-d面的平均风压系数相差不大,a-b面的负压随间距比增大逐渐减小,所以方柱2的平均升力系数逐渐减小。 $L/D=2$ 和2.5时,b-c面的风压相差不大,但 $L/D=2.5$ 时,a-b面、c-d面和a-d面的负压均大于 $L/D=2$ 时的负压,所以 $L/D$ 由2变化到2.5时,平均升力系数和平均阻力系数均相对变化较大。随着间距比的增大, $L/D=8$ 时,下游方柱2各个面的平均风压系数均与单方柱的值接近,故平均升力系数和平均阻力系数也接近单方柱的值。

### 4 结论

1) 根据不同风向角下平均升、阻力系数随间距比的变化规律,可将双方柱的平均气动力特性按风向角划分为3类:小风向角( $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ )、中等风向角( $10^\circ < \alpha < 60^\circ$ )和大风向角( $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )。

2) 小风向角下,平均升阻力系数表现出显著的跳跃现象,发生跳跃的临界间距比为 $3 \leq L/D \leq 4$ 。小于临界间距比时,两方柱平均阻力系数小于单方柱的值,下游方柱甚至表现为负值;大于临界间距比时,上游方柱的平均阻力系数接近单方柱,而下游方柱的平均阻力系数仍表现出减小效应。上游方柱的平均升力系数在大多数间距比下与单方柱接近;下游方柱的平均升力系数在小于临界间距比时表现为正值,在大于临界间距比时趋近于零。

3) 中等风向角下,上游方柱的平均阻力系数随间距比的增大先减小后增大最后接近单方柱的值,平均升力系数则随间距比变化不大,且接近单方柱的值;下游方柱的平均阻力系数随间距比的增大而增大,逐渐接近单方柱的值,平均升力系数则减小,逐渐接近0。

4) 大风向角下,双方柱的平均气动力系数均在 $2 < L/D < 2.5$ 时发生较大的变化。当 $L/D \leq 2$ 时,上游方柱的平均阻力系数随间距比的增大逐渐减小,平均升力系数先减小后增大;下游方柱的平均阻力系数随间距比先减小后增大,平均升力系数则相反。当 $L/D \geq 2.5$ 时,两个方柱的平均气动力系数均随间距比的增大变化平缓,且逐渐接近单方柱的值。

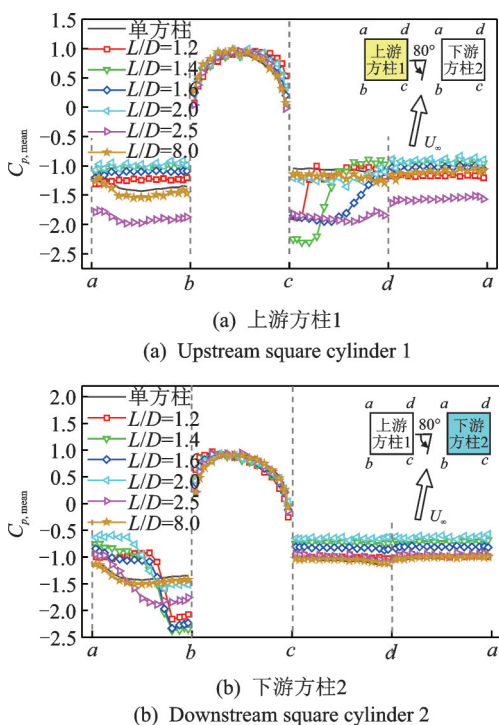


图13 80°风向角下双方柱平均风压系数的变化  
Fig.13 Mean pressure coefficients of two square cylinders at  $\alpha=80^\circ$

## 参 考 文 献

- [1] 韩宁, 顾明. 两并列方形高层建筑局部风压干扰特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 1442-1446.  
HAN Ning, GU Ming. Interference effects on wind pressure of two square tall buildings in side-by-side arrangement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(10): 1442-1446. (in Chinese)
- [2] HAN Z, ZHOU D, TU J, et al. Flow over two side-by-side square cylinders by CBS finite element scheme of Spalart-Allmaras model [J]. Ocean Engineering, 2014, 87(1): 40-49.
- [3] 陈素琴, 顾明, 黄自萍. 两并列方柱绕流相互干扰的数值研究[J]. 应用数学和力学, 2000, 21(2): 131-146.  
CHEN Suqin, GU Ming, HUANG Ziping. Numerical computation of the flow around two square cylinders arranged side by side [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 21(2): 131-146. (in Chinese)
- [4] 魏英杰, 朱蒙生, 何钟怡. 并列双方柱绕流的大涡模拟及频谱分析[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(8): 824-830.  
WEI Yingjie, ZHU Mengsheng, HE Zhongyi. Large eddy simulation and spectrum analysis of flow around two square cylinders arranged side by side [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(8): 824-830. (in Chinese)
- [5] ALAM M, ZHOU Y, WANG X. The wake of two side-by-side square cylinders [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 669: 432-471.
- [6] YEN S, LIU J. Wake flow behind two side-by-side square cylinders [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(1): 41-51.
- [7] 杜晓庆, 许汉林, 马文勇, 等. 串列双方柱气动干扰效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 27-34.  
DU Xiaoqing, XU Hanlin, MA Wenyong, et al. Experimental study on aerodynamic interference effect of two square cylinders in a tandem arrangement [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(11): 27-34. (in Chinese)
- [8] 杜晓庆, 施春林, 许汉林, 等. 串列双方柱气动干扰机理的数模模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(27): 181-186.  
DU Xiaoqing, SHI Chunlin, XU Hanlin, et al. Aerodynamics numerical simulation study on interference mechanism of two square cylinders in tandem arrangement [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(27): 181-186. (in Chinese)
- [9] KIM M, KIM D, YOON S, et al. Measurements of the flow fields around two square cylinders in a tandem arrangement [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(2): 397-407.
- [10] MORE B, DUTTA S, CHAUHAN M, et al. Experimental investigation of flow field behind two tandem square cylinders with oscillating upstream cylinder [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 68: 339-358.
- [11] 马健, 郭明旻, 徐有恒. 同轴双方柱气动载荷的相互干扰[J]. 力学季刊, 2000, 21(3): 365-370.  
MA Jian, GUO Mingmin, XU Youheng. Interference effects on wind loads of two prismatic cylinders arranged in a line [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2000, 21(3): 365-370. (in Chinese)
- [12] DU X, XU H, MA W, et al. Experimental study on aerodynamic characteristics of two square cylinders at various incidence angles [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2019, 191: 154-169.
- [13] YEN S, YANG C. Flow patterns and vortex shedding behavior behind a square cylinder [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(8): 868-878.



**第一作者简介:**杨群,女,1981年11月生,讲师。主要研究方向为工程结构的风荷载与风致振动。曾发表《不同圆角率的方形断面气动特性的雷诺数效应》(《振动与冲击》2020年第39卷第4期)等论文。

E-mail: quny123@126.com