

# 工程结构雷诺数效应的研究进展

顾 明, 王新荣

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 工程结构的雷诺数效应一直是风工程界关注的重要基础问题. 随着建筑高度的增加和桥梁跨径的增大, 抗风研究要求更为精细化, 因而在研究中考考虑雷诺数效应就更显重要. 为此, 归纳了国内外有关圆形和矩形结构以及桥梁模型抗风研究中的雷诺数效应的基础研究成果及其工程应用成果, 涉及的内容主要包括建筑物的平均风压、静三分力系数和 Strouhal 数的雷诺数效应; 还讨论了脉动风压和脉动风力的雷诺数效应; 总结了在低雷诺数风洞中模拟高雷诺数效应的措施, 这些措施包括改变模型表面粗糙度和增大来流湍流度. 最后, 对今后的相关研究方向提出了一些建议.

**关键词:** 桥梁模型; 圆柱体结构; 矩形结构; 雷诺数效应

**中图分类号:** TU 317.1

**文献标志码:** A

## Research Progress of Reynolds Number Effect of Engineering Structures

GU Ming, WANG Xinrong

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The Reynolds number effect of engineering structures has always been a fundamental problem in wind engineering. With the increasing of the building height and the bridge span, the wind resistance research needs to be more precise, which makes the Reynolds number effect becoming more and more significant. This paper presents an overview of the basic research achievements and the engineering applications of circular cylinder, rectangular prism and bridge models. The related contents include the surface pressure distribution, the three component forces coefficients, the Strouhal number, the fluctuating pressure and the fluctuating wind force. Two methods of high Reynolds number effect simulation in low Reynolds-wind tunnels are summarized, for instance, changing model surface roughness and increasing the flow turbulence. Finally, some recommendations for future researches are put forward.

**Key words:** bridge model; circular cylinder; rectangular prism; Reynolds number effect

工程结构的雷诺数效应一直是风工程界关注的重要基础问题. 近年来, 超高层建筑越来越柔, 大跨桥梁趋于长大轻型化, 抗风研究要求更为精细化, 因而在研究中考考虑雷诺数效应就更显重要. 以往土木结构模型的风洞试验通常较少模拟雷诺数效应, 主要原因如下: ① 对于带有曲面的结构, 其气动参数存在雷诺数效应已是共识, 但至今尚无精确模拟雷诺数效应的方法. ② 对于带有尖锐边角的结构, 人们认为, 尖锐边角使流体分离, 流体的分离位置是固定的, 与雷诺数无关<sup>[1-2]</sup>. 只要模型的雷诺数与实际建筑的雷诺数相差不是很大, 则雷诺数效应可以忽略. 事实上, 实际情况可能并不是如此简单, 带有尖锐边角的断面也有可能受雷诺数效应的影响<sup>[3-12]</sup>. 气流在前缘尖锐边角分离之后有可能会再附于结构上, 这时流体的流动状态可能取决于雷诺数<sup>[3,13]</sup>. ③ 大部分土木结构都处于大气边界层以内, 而来流的湍流度可降低结构的雷诺数效应. 然而, 人们对这一问题至今并没有清晰的认识.

开展土木结构雷诺数效应的研究具有重要意义. 本文首先归纳了国内外有关圆形和矩形结构以及桥梁模型雷诺数效应的研究进展; 总结了在低雷诺数风洞中模拟高雷诺数效应的现有研究成果; 对今后的相关研究方向提出了一些建议.

## 1 三种典型截面的雷诺数效应

### 1.1 圆形截面柱体结构的雷诺数效应

圆柱体结构在土木工程中得到广泛应用, 其周围气流的绕流模式较为复杂, 分离点与雷诺数、来流湍流度和表面粗糙度有关<sup>[14]</sup>.

### 1.1.1 表面风压分布及流动特征

模型表面风压分布随  $Re$  (雷诺数) 的变化规律可从微观上揭示模型气动特性随雷诺数变化的内在驱动规律. Roshko<sup>[15]</sup> 在  $1.0 \times 10^6 \leq Re \leq 1.0 \times 10^7$  的范围内研究了圆柱表面风压分布, 并将  $Re = 8.4 \times 10^6$  的试验结果与已有的试验结果 ( $Re = 1.1 \times 10^5$  和  $Re = 6.7 \times 10^5$ ) 进行了对比. 研究表明: 当  $Re = 1.1 \times 10^5$  时, 边界层是层流分离; 而  $Re = 6.7 \times 10^5$  时, 边界层是层流分离并伴随着湍流再附, 同时出现了分离泡; 随着雷诺数增加, 分离气泡逐渐消失, 进入跨临界区 ( $Re = 8.4 \times 10^6$ ), 气流变为湍流分离. Achenbach<sup>[16]</sup> 在增压风洞中研究了光滑圆柱的气流绕流模式, 雷诺数变化范围为  $6.0 \times 10^4 < Re < 5.0 \times 10^6$ . 在临界雷诺数  $Re = 3.0 \times 10^5$  处, 气流分离点与滞点绕圆心形成的夹角位置  $\phi$  由  $95^\circ$  突变为  $140^\circ$ . 随着雷诺数的增加, 分离气泡在  $Re = 1.5 \times 10^6$  处突然消失, 表明超临界气流出现, 此时分离点位置保持在  $115^\circ < \phi < 120^\circ$  的小范围内. Bearman<sup>[17]</sup> 发现背压系数绝对值随雷诺数的变化规律与阻力系数相似. Farell<sup>[18]</sup> 根据气流的绕流模式不同将临界区分为两个子区: 第一个子区, 圆柱表面风压对称分布, 尾流中出现明显涡脱; 第二个子区, 圆柱体周围出现分离气泡的形成和破裂过程. Higuchi<sup>[19]</sup> 在  $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 2.0 \times 10^5$  的条件下研究了光滑圆柱尾流的变化规律. 研究表明, 当  $Re \geq 1.5 \times 10^5$  时, 涡脱强度明显减小, 边界层在圆柱体上游表面分离后会对称地再附于下游表面.

综合众多学者的研究成果可知: 在亚临界区, 圆柱周围气流在  $\phi = 70^\circ \sim 80^\circ$  之间分离, 边界层分离之前是层流, 分离之后形成较宽的尾流, 迎风面和背风面形成较大的压差阻力; 在临界区, 尾流特性对雷诺数很敏感, 经过边界层的分离和再附, 分离点向后移动, 尾流宽度减小; 在临界雷诺数, 分离点位置由  $\phi = 95^\circ$  突变为  $\phi = 140^\circ$ ; 在超临界区, 分离点又开始前移, 尾流宽度增大, 分离点位置保持在  $115^\circ < \phi < 120^\circ$  的小范围内; 在跨临界区, 分离点相对固定, 压差阻力系数独立于雷诺数.

3 维悬臂柱体在工程结构中的广泛应用推动了学者们对其气动特性和尾流特性的深入研究. Sakamoto<sup>[20]</sup> 的研究表明, 高宽比对有限长的 3 维悬臂柱体和圆柱的尾流有明显的影响, 当高宽比大于临界值时, 尾流中反对称的卡门涡街 (the Karman-type vortex) 占主导地位; 而当高宽比小于该临界值时, 尾流则主要是对称的拱门形涡街 (the arch-type

vortex). 圆柱体和棱柱体的临界高宽比分别为 2.5 和 2.0. Uematsu 和 Yamada<sup>[21]</sup> 研究了 3 维悬臂圆柱在跨临界区的气动特性和高宽比、相对粗糙度的关系. 以高宽比和相对粗糙度为变量拟合了经验公式, 定量描述圆柱体的阻力系数和风压分布规律; 并将该经验公式应用于湍流边界层中圆柱体的气动特性分析, 结果表明该经验公式能得到合理的气动力系数, 误差在容许的范围之内.

### 1.1.2 阻力和升力

圆柱雷诺数效应的研究起源于其阻力系数的研究. Roshko<sup>[15]</sup> 在  $1.0 \times 10^6 < Re < 3.5 \times 10^6$  的范围内测得圆柱的阻力系数  $C_D$  从 0.3 增大到 0.7, 当  $3.5 \times 10^6 < Re < 1.0 \times 10^7$  时, 阻力系数基本保持不变. Schewe<sup>[22]</sup> 在增压风洞中对圆柱测力试验研究表明: 在临界区, 阻力系数出现不连续跳跃现象; 阻力系数在超临界区的变化规律可以分为两个区域, 当  $3.5 \times 10^5 \leq Re \leq 1.0 \times 10^6$  时, 阻力系数保持不变 ( $C_D = 0.22$ ), 当  $1.0 \times 10^6 \leq Re \leq 5.0 \times 10^6$  时, 阻力系数缓慢增长至 0.52; 在跨临界区 ( $Re \geq 5.0 \times 10^6$ ), 阻力系数基本保持不变 ( $C_D = 0.52$ ). Schewe<sup>[22]</sup> 在跨临界区测得的阻力系数与 Roshko<sup>[15]</sup> 和 Cincotta<sup>[23]</sup> 的试验结果都有一定的差异, 他们测得阻力系数分别为 0.7 和 0.5, Schewe 认为这可能是由于表面粗糙度不同导致的. Higuchi<sup>[19]</sup> 在  $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 2.0 \times 10^5$  时对光滑圆柱的研究表明, 其阻力系数随着雷诺数的增加由 1.15 减小到 0.90.

目前对光滑圆柱在层流中的阻力系数随雷诺数的变化规律已达成了共识, 如图 1 所示<sup>[24-26]</sup>. 可将雷诺数分为亚临界区、临界区、超临界区和跨临界区. 在亚临界区, 阻力系数基本不变,  $C_D \approx 1.20$ ; 在临界区 ( $Re \approx 1.4 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$ ), 阻力系数由 1.20 急剧下降到 0.22; 在超临界区, 阻力系数缓慢增大至约 0.52; 在跨临界区, 阻力系数基本不变, 约为 0.52.

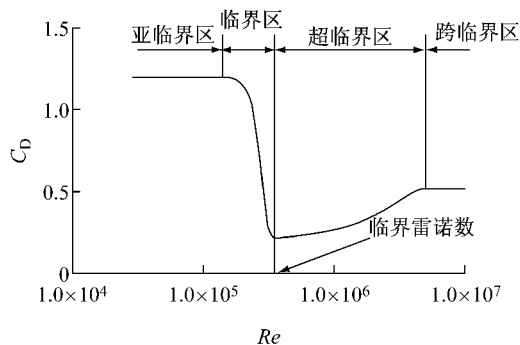


图1 阻力系数随雷诺数变化及其分区<sup>[24-26]</sup>

Fig.1 Four Reynold-number ranges relevant to the drag coefficients

脉动升力对越来越柔的结构的影响越来越重要,故其雷诺数效应也引起了重视。Zdravkovich<sup>[27]</sup>的研究表明,在超临界区,平滑流中的2维光滑圆柱的脉动升力系数比在亚临界区要小很多;在超临界区,由涡脱导致的动态激励比亚临界区要小。由此可知,通常由亚临界雷诺数风洞试验所得的表面脉动风压是偏于保守的。Norberg<sup>[28-29]</sup>总结了2003年之前的关于圆柱体脉动升力的研究成果。在此基础上,拟合了升力系数均方根值随雷诺数变化的经验公式。但是他的研究主要针对 $Re \leq 5.0 \times 10^5$ 的情况,对于 $Re \geq 5.0 \times 10^5$ 的情况需要进一步研究。

### 1.1.3 Strouhal 数

圆柱的 $St$ (Strouhal 数)有明显的雷诺数效应,用低雷诺数风洞试验的 Strouhal 数代替实际结构的 Strouhal 数并不可行。Roshko<sup>[15]</sup>对圆柱的研究表明:雷诺数小于临界值时, $St \approx 0.2$ ;当 $Re > 3.5 \times 10^6$ 时, $St \approx 0.28$ 。Bearman<sup>[17]</sup>在 $1.0 \times 10^5 < Re < 7.5 \times 10^5$ 的范围内对圆柱的研究表明,Strouhal 数随雷诺数的变化呈“几”字形。当 $1.0 \times 10^5 < Re < 5.5 \times 10^5$ 时,尾流中出现规则的涡脱。进入临界区,当阻力系数达到最小时,Strouhal 数达到最大值 0.46。Achenbach<sup>[30]</sup>在 $6.0 \times 10^3 < Re < 5.0 \times 10^6$ 的范围对圆柱涡脱特性的研究表明:在 $1.5 \times 10^5 < Re < 4.0 \times 10^5$ 范围内,圆柱的尾流区没有明显的涡脱,Strouhal 数较分散,并且 Strouhal 数出现明显跳跃;在 $5.0 \times 10^5 < Re < 3.0 \times 10^6$ 范围内,Strouhal 数急剧下降;当 $Re > 4.0 \times 10^6$ 时, $St \approx 0.28$ 。Schewe<sup>[22]</sup>研究了圆柱的 Strouhal 数在 $2.3 \times 10^4 \leq Re \leq 7.1 \times 10^6$ 范围内的变化规律。在超临界区,Strouhal 数的变化规律可以分为两个区域,在阻力系数保持不变的区域 Strouhal 数也相应地保持不变,在阻力系数缓慢增长的区域 Strouhal 数缓慢减小,在 $Re \approx 2.0 \times 10^6$ 处达到 $St \approx 0.4$ ;当 $Re = 7.1 \times 10^6$ 时, $St \approx 0.29$ 。James<sup>[31]</sup>在 $Re = 4.0 \times 10^6$ 测得圆柱的 $St \approx 0.22$ 。Zan<sup>[32]</sup>在 $1.0 \times 10^5 \leq Re \leq 7.0 \times 10^6$ 的条件下采用两种湍流度(5%和13%)对光滑圆柱的研究表明:①当 $Re \geq 5.0 \times 10^6$ 时,Strouhal 数要小于以往的试验结果,这可能是因为模型高宽比不同;②圆柱体在湍流边界层中的漩涡脱落只发生在一个狭窄的圆弧区域内;③在雷诺数约为 $1.0 \times 10^6$ 时,低频激励只存在于模型的迎风面,并且不存在涡脱。

综合众多学者关于 Strouhal 数随雷诺数变化规律的研究结果表明,Strouhal 数随雷诺数的变化呈“几”字形。在 $Re < 1.5 \times 10^5$ 的范围内,Strouhal 数

较平稳,约为 0.20;在 $1.5 \times 10^5 < Re < 3.0 \times 10^6$ 的范围内,Strouhal 数出现两次明显的跳跃,Strouhal 数最大值取值在 0.46~0.50 范围内;随后在 $Re > 3.0 \times 10^6$ 的范围内,不同实验测得的 Strouhal 较分散,取值范围为 0.22~0.29。

## 1.2 矩形断面柱体的雷诺数效应

一般认为,矩形柱是典型的钝体,气流分离点是固定的,只要在低雷诺数风洞中重现结构周围的气流流动,其风压就能正确模拟。这导致了一段时间内研究人员并不重视矩形断面雷诺数效应的研究。近些年来,很多学者对尖锐边角结构的研究表明,这类结构的气动特性也存在一定的雷诺数效应<sup>[3-12]</sup>。

### 1.2.1 矩形断面柱体雷诺数效应的机理

矩形柱的气动特性存在雷诺数效应的主要原因是流体在尖锐边角处分离之后有可能再附于结构上,气流再附区与雷诺数、湍流度有关,这时流体的流动状态取决于雷诺数,进而影响结构的受力<sup>[3]</sup>。文献[13]中有关模型表面风压分布随雷诺数变化的研究表明,矩形截面雷诺数效应的本质就是气流的再附效应。气流在方柱前缘边角处分离之后,形成很宽的尾流,不会再附于方柱两侧截面上;但气流在长宽比更大的矩形柱前缘边角分离之后,有可能会再附于两侧截面,气流的再附不仅会影响两侧面的风压分布,也会影响结构的尾流,进而影响结构的气动特性。Scruton<sup>[12]</sup>对方柱阻力系数的研究也验证了上述结论。

Nakamura<sup>[33]</sup>在低雷诺数的条件下( $200 < Re < 1.0 \times 10^3$ ),利用风洞试验和数值模拟研究了矩形柱的涡脱特性,其中风洞试验和数值模拟所采用模型的 $B/D$ (长宽比)变化范围分别为 $3 \leq B/D \leq 16$ 和 $3 \leq B/D \leq 10$ 。研究表明,数值模拟得到的 Strouhal 数与风洞试验结果吻合。当雷诺数比较小时( $Re = 200$ ),气流在矩形截面前缘分离并在两侧面对称再附,在截面尾部边缘处再次分离之后,在尾流中形成 Karman 涡街;当雷诺数较高时,在截面尾部边缘处存在不稳定的分离剪切层。尾流由 Karman 涡街变为不稳定分离剪切层时所对应的雷诺数:风洞试验结果为 $Re = 250$ ,数值模拟结果为 $Re = 300$ 。

### 1.2.2 阻力和升力

1999年,文献[34]总结了矩形截面的平均阻力系数、脉动升力系数随截面长宽比 $B/D$ 的变化规律。当 $B/D = 0.6$ 时,平均阻力系数最大,随后平均阻力系数随长宽比的增大而减小;关于矩形截面的脉动升力系数随截面长宽比的变化规律的研究成果

有限,但当  $B/D \geq 0.6$  时,脉动升力系数出现明显下降的趋势。

文献[10]总结了矩形截面的阻力系数随截面长宽比的变化规律,如图 2 所示。当截面的长宽比  $2 < B/D < 4$  时,其平均阻力系数存在不确定性,可能的取值如图 2 中阴影部分所示。Larose 和 D'Auteuil<sup>[9]</sup> 认为造成图中阴影部分取值不确定性的原因可能是雷诺数效应或是来流湍流造成的。

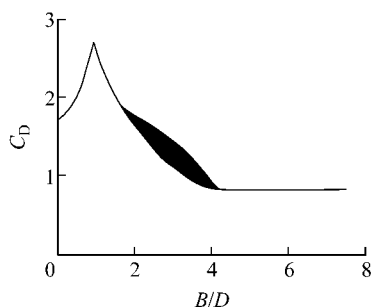


图 2 平均阻力系数随模型长宽比的变化规律

Fig.2 Variation of mean drag coefficients of rectangular cross section with  $B/D$  ratio

由上述分析可知,矩形截面的阻力系数和升力系数随截面长宽比的变化规律很复杂,但是存在雷诺数效应的矩形截面的长宽比有一定范围,为  $2 < B/D < 4$ 。该长宽比范围内的矩形截面的雷诺数效应影响因素众多,有待进一步研究。

### 1.2.3 Strouhal 数

文献[34]总结了矩形截面的 Strouhal 数随截面长宽比  $B/D$  的变化规律。当  $B/D = 2.6$  和  $B/D = 6.0$  时,矩形截面的 Strouhal 数出现了两个明显的跳跃。

Tamai<sup>[35]</sup> 对 3 个 2 维方柱的表面风压和 Strouhal 数进行了实测研究,并与风洞试验结果进行了对比。实测研究采用的 3 个方柱的截面尺寸分别为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ,  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  和  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ ,风洞试验采用的方柱截面尺寸为  $0.07 \text{ m} \times 0.07 \text{ m}$ 。实测中雷诺数变化范围为  $3.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^6$ 。研究表明,雷诺数越大,Strouhal 数越分散,Strouhal 数的下限几乎不随雷诺数变化,但 Strouhal 数的上限随雷诺数的增大而增大;阻力系数随雷诺数的增大而减小,在低雷诺数条件下,阻力系数越大,柱体尾流形成更大的负压区;升力系数随雷诺数的增大而减小,这说明在低雷诺数条件下,分离剪切边界层在两侧面形成了更强的漩涡。

### 1.2.4 湍流度和导圆角率对矩形柱雷诺数效应的影响

大部分土木结构都处于大气边界层以内,故有必要研究来流湍流度对矩形柱气动特性的影响。Laneville, Gartshore 和 Parkinson<sup>[36]</sup> 的研究表明,湍流会抑制矩形柱的气动不稳定性,湍流使  $\frac{dC_L}{d\alpha}$  (升力系数  $C_L$  随攻角  $\alpha$  变化的斜率)在  $\alpha = 0^\circ$  处的取值由负变正,从而抑制矩形柱的驰振。在  $Re = 3.0 \times 10^4$  的条件下对长宽比为 2 的矩形柱的研究表明,使  $\frac{dC_L}{d\alpha}$  在  $\alpha = 0^\circ$  时为正的  $I_u$  (湍流度)需满足:  $9\% \leq I_u \leq 12\%$ 。湍流度也会影响矩形断面的阻力系数, Courchesne 和 Laneville<sup>[37]</sup> 的研究表明,在风向角为  $0^\circ$  时,湍流度会减小长宽比  $1 \leq B/D \leq 3$  的矩形柱的阻力系数。Bearman 和 Morel<sup>[38]</sup> 的研究表明,湍流会增加气流的夹卷,使得在矩形柱前缘边角处分离的分离剪切层更靠近两侧面,从而使气流更易再附。Robertson<sup>[39]</sup> 的研究也表明,湍流使阻力系数减小的原因是来流湍流使气流更易再附于柱体两侧面,使尾流变窄,从而导致阻力系数减小。

Larose 和 D'Auteuil<sup>[9,11]</sup> 研究了模型截面高宽比、导圆角率和来流湍流度对矩形截面雷诺数效应的影响。研究表明:① 升力系数比阻力系数对雷诺数更敏感。在  $0.15 \times 10^6 \leq Re \leq 4.00 \times 10^6$  的范围内,宽高比为  $2:1$ ,  $3:1$  和  $4:1$  的模型升力系数变化幅度分别为  $20\%$ ,  $11\%$  和  $10\%$ ,而阻力系数变化幅度分别为  $6.5\%$ ,  $8.0\%$  和  $9.0\%$ 。② 在  $0.3 \times 10^6 \leq Re \leq 2.5 \times 10^6$  的范围内,导圆角率对宽高比为  $2:1$  的棱柱的升力系数雷诺数效应影响很大,而对阻力系数雷诺数效应影响却很小,直角边缘、小导圆角率和大导圆角率模型的升力系数变化幅度分别为  $20\%$ ,  $55\%$  和  $136\%$ ,而阻力系数变化幅度分别为  $6.5\%$ ,  $10.0\%$  和  $6.3\%$ 。③ 导圆角率对模型表面边界层的形成影响很大。存在导圆角的矩形截面,气流将不在截面前缘分离,气流将附着于结构表面绕导圆角区域后,在导圆角的第二个边缘位置处分离,这会影晌气流在截面两侧的再附状态,进而影响结构的气动特性。④ 来流湍流强度也会影响结构的气动特性。通过增加来流的湍流强度,气流在到达分离点之前将获得更多的能量,增加了气流的夹卷率,影响了气流的分离气泡和再附点,从而影晌结构的升力系数和阻力系数。

Delany 和 Sorensen<sup>[40]</sup> 在平滑流中对多种钝体断面进行了研究。其中长宽比为 2 的矩形截面的研究表明:当截面导圆角率为  $4.2\%$  时,阻力系数  $C_D$  在  $Re \leq 1.0 \times 10^6$  的范围内是不变的,随后  $C_D$  随着

雷诺数的增加而减小,在  $Re=1.5 \times 10^6$  时达到最小值,越过最小值点之后,  $C_D$  随着雷诺数的增加而增大;当截面导圆角率为 16.7% 时,阻力系数  $C_D$  开始减小的雷诺数  $Re=0.9 \times 10^6$ ,  $C_D$  达到最小值的雷诺数是  $Re=1.5 \times 10^6$ ,随后阻力系数开始增大,最终达到的  $C_D$  比低雷诺数条件下要大。

由上述分析可知,来流湍流度和导圆角率对矩形截面的气动特性存在明显影响,在不同雷诺数条件下,其影响程度也不一样。导圆角率影响模型气动特性是通过改变其表面边界层的形成;而来流湍流强度影响模型的气动特性是通过增加来流的夹卷率,从而使气流更易再附于柱体两侧面。

### 1.3 桥梁断面雷诺数效应

近些年来,桥梁跨径越来越大,桥梁断面趋于流线化,其雷诺数效应变得越来越突出。

1989年, Schewe<sup>[41]</sup> 在增压风洞中对 H 形桥梁断面进行了研究,雷诺数变化范围为  $Re=3.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^6$ , 研究表明该桥梁断面存在雷诺数效应,但当时并未引起足够的重视。Larose<sup>[8]</sup> 的试验研究也表明,带尖锐边角的结构也有可能受雷诺数效应影响。因此,在桥梁设计和分析时,必须要考虑雷诺数效应的影响。

1998年,大海东桥引桥截面的低雷诺数风洞试验结果与现场实测结果存在差异, Schewe 和 Larsen<sup>[42]</sup> 利用风洞试验研究了该桥梁截面的静三分力系数和 Strouhal 数在  $3.0 \times 10^4 < Re < 4.0 \times 10^6$  范围内的变化规律。结果表明:在低雷诺数 ( $Re < 8.0 \times 10^4$ ) 条件下测得  $St=0.18$ , 与低雷诺数风洞试验结果  $St=0.16$  基本吻合;在高雷诺数 ( $Re > 4.0 \times 10^5$ ) 条件下测得  $St=0.22$ , 与实测结果  $St=0.21$  也是吻合的;阻力系数随着雷诺数的增大而减小,由  $C_D=0.70$  减小到  $C_D=0.60$ 。由此可知:Strouhal 数的雷诺数效应正是导致风洞试验与现场实测的涡激振动起振风速不一致的原因;由低雷诺数风洞试验获得的阻力系数用于桥梁设计是偏于安全的。Schewe<sup>[3]</sup> 对该桥雷诺数效应的进一步研究表明,带有尖锐边角截面的细长结构气动参数有可能表现出明显的雷诺数效应;油流显示法获得的试验结果表明 2 维细长结构周围的气流也有可能是 3 维流动;该桥梁模型的雷诺数效应是由于其尾流的拓扑结构的改变而导致的。但 Schewe 和 Larsen 的研究都是针对该特定的工程实例,该研究成果具有一定的局限性,不具有普遍性,其他桥梁断面的雷诺数效应还需要更加系统而全面的研究。

Matsuda<sup>[7]</sup> 对 4 种闭合箱梁截面的雷诺数效应进行了系统的研究,雷诺数变化范围为  $1.1 \times 10^4 \leq Re \leq 1.5 \times 10^6$ , 分别在两个截面尺寸为  $9 \text{ m} \times 9 \text{ m}$  和  $1.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  的风洞中对  $1:10$ ,  $1:30$  及  $1:80$  不同缩尺比的试验模型进行静力三分力和非定常气动力的测量。研究表明:在高雷诺数条件下,基于非定常气动力系数计算所得的颤振临界风速高于低雷诺数的试验结果。

Larose 和 D'Auteuil<sup>[9]</sup> 回顾了近些年关于带有尖锐边角的钝体结构的雷诺数效应研究成果,其中关于 4 座桥梁断面雷诺数效应的研究表明,不同几何外形的桥梁断面对雷诺数效应的敏感程度不同,是否忽略雷诺数效应的影响需要对特定桥梁断面进行进一步细致的研究。如果简单地忽略雷诺数效应的影响有可能导致整个研究结果的错误。

Larsen<sup>[43]</sup> 在 3 种雷诺数条件下研究了导流板对分体式钢箱梁截面的涡脱的影响,研究表明在进行导流板效应研究时,必须要保证试验达到足够大的雷诺数,否则模型表面形成很薄的边界层,流经导流板的空气流量不够。

国内对桥梁断面雷诺数效应的研究起步较晚,李加武<sup>[44]</sup> 利用两种缩尺比模型对 4 种高宽比的两种典型断面(Π形断面和流线型断面)的气动参数雷诺数效应进行了研究,试验主要研究了各种截面的三分力系数、表面压力分布和 Strouhal 数随雷诺数的变化规律。此外,他利用改变模型表面粗糙度和增大来流湍流度的方法,研究了这两项措施对控制雷诺数效应的有效性和可行性。

综上所述,桥梁断面雷诺数效应非常复杂,不同桥梁断面对雷诺数效应的敏感程度不同。但现有的研究绝大部分是针对特定的桥梁断面,不具有普遍性。有必要系统而全面地研究常用桥梁断面的雷诺数效应。桥梁模型雷诺数效应的本质是不同雷诺数条件下,气流分离、再附以及尾流的拓扑结构不同。

## 2 雷诺数效应的模拟

研究人员一直在寻找简单而适用的方法在低雷诺数风洞中模拟实际工程结构的雷诺数效应。现有研究成果中,在低雷诺数风洞中模拟高雷诺数效应的主要方法是改变模型表面粗糙度和增大来流湍流度。

### 2.1 表面粗糙度

针对圆柱体, Fage 和 Warsap<sup>[45]</sup> 研究了表面粗

糙度对阻力系数雷诺数效应的影响,如图 3 所示. Achenbach<sup>[26,46]</sup> 分别于 1971 年和 1977 年对 3 种粗糙度和 5 种粗糙度的圆柱体气动特性雷诺数效应进行了补充研究,并与 Fage 和 Warsap<sup>[45]</sup> 的研究成果进行了对比. 研究表明:在亚临界区,表面粗糙度对圆柱阻力系数基本无影响;随着粗糙度的增加,临界雷诺数减小,临界区、超临界区及跨临界区范围都逐渐减小,直至融合在一起;粗糙度越大,阻力系数最小值愈大,跨临界区的阻力系数越大;粗糙度愈大,超临界区向低雷诺数区平移.

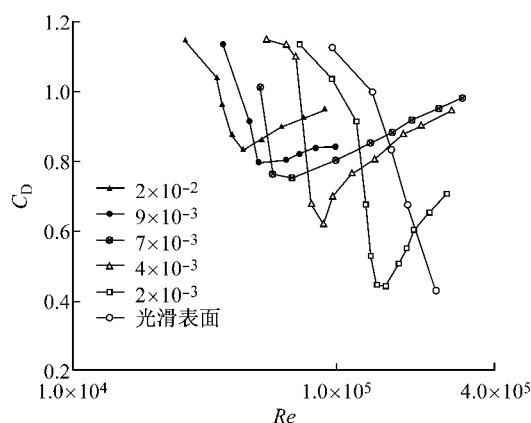


图 3 不同粗糙度圆柱的阻力系数随雷诺数的变化<sup>[46]</sup>

Fig. 3 Variation of different drag coefficients of rough circular cylinders with Reynolds number<sup>[45]</sup>

Szechenyi<sup>[47]</sup> 通过改变模型粗糙度,在低雷诺数条件下重现了模型周围超临界气流的绕流模式. 研究表明:表面粗糙度会影响圆柱体表面边界层的转变,进而影响气流进入临界区时的雷诺数大小. 他同时指出,该方法只适用于对模型平均阻力系数的研究. Güven<sup>[48]</sup> 在均匀流中对 5 种不同粗糙度的圆柱体进行了表面风压测量,但该试验跨越雷诺数范围比较小,仅为  $7.0 \times 10^4 \leq Re \leq 5.5 \times 10^5$ . 结果表明,表面粗糙度对平均风压分布的影响很大;粗糙度越大,边界层越薄,分离点越靠前. Nakamura<sup>[25]</sup> 在  $4.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1.7 \times 10^6$  的条件下,采用表面贴条的模型在低雷诺数条件下成功模拟了光滑表面模型的高雷诺数气流;高雷诺数气流的模拟只能采用表面贴窄粗糙条,而不能采用表面均布粗糙粒. Lawson<sup>[49]</sup> 的研究表明,采用合适的表面粗糙度,并且来流风速必须要大于某个最小风速值,才能在低雷诺数条件下很好地模拟高雷诺数模型表面风压分布. Shih<sup>[50]</sup> 在增压风洞中测得了 4 种粗糙度的圆柱在雷诺数高达  $Re = 8.0 \times 10^6$  时的阻力系数、升力系数和 Strouhal 数.

Achenbach<sup>[30]</sup> 研究了不同粗糙度圆柱体的 Strouhal 数随雷诺数的变化规律. 随着粗糙度的增加,Strouhal 数随雷诺数变化曲线的“几”字形脊背被削除,即增加模型表面相对粗糙度可以稳定 Strouhal 数在临界区、超临界区的波动. 在跨临界区,不同粗糙度圆柱体的 Strouhal 数也比较稳定,其值均在平均值的  $\pm 7\%$  范围内波动.

Scruton<sup>[12]</sup> 的研究表明,表面粗糙度和导圆角率对方柱截面雷诺数效应影响很大. 表面粗糙度不仅影响模型的阻力系数,而且模型表面的气流流动特征也发生了本质的改变,如模型表面的边界层结构及表面压力分布.

众多学者的研究表明,粗糙度是将阻力系数随雷诺数的变化曲线向低雷诺数区平移. 粗糙度将削平 Strouhal 数随雷诺数变化曲线的“几”字形脊背. 部分学者利用改变模型表面粗糙度的方法研究了高雷诺数效应模拟的工程应用. Barré<sup>[51]</sup> 在低雷诺数条件下通过改变模型表面粗糙度重现了高雷诺数气动特性:① 在大气风洞利用表面粗糙厚度为 0.5 mm,缩尺比为 1/300 的圆柱体模型重现了气候风洞中缩尺比为 1/50 的模型在超临界区的气动特性. ② 在气候风洞中利用缩尺比为 1/10 节段模型对长 856 m、宽 23.8 m 的斜拉桥进行了气动特性研究,结果表明,当  $Re = 3.0 \times 10^6$  时,模型已经处于超临界雷诺数区. 然后将缩尺比为 1/50 和 1/200 的节段模型试验结果与上述试验结果进行对比,表明缩尺比为 1/50 的试验结果已经可以很好地反映桥梁主梁断面的气动特性. Zasso<sup>[52]</sup> 通过改变圆锥形屋盖模型表面粗糙度,在低雷诺数条件下重现了其在超临界雷诺数区的气动特性,并将试验结果用于结构设计,指导工程应用.

综上所述,改变模型表面粗糙度会将阻力系数随雷诺数的变化曲线向低雷诺数区平移,从而达到高雷诺数效应模拟的目的. 其基本原理是粗糙度会使模型表面边界层提前转换,进而影响其气动特性. 但相关方法只适用于对模型平均阻力系数的研究,不适用于脉动风压和脉动风力的研究.

## 2.2 来流湍流强度

关于圆柱体阻力系数的已有研究表明,通过增大来流湍流度,其在跨临界区的气动特性可以在低雷诺数条件下重现,并且湍流度越大,阻力系数在临界区的变化就越小,即来流湍流度可降低结构的雷诺数效应. 然而,人们对这一问题至今没有清晰的认识.

Surry<sup>[53]</sup>在亚临界区的研究表明,高湍流度对亚临界区的阻力系数和涡脱频率的组成均无显著影响,仅减小了涡脱频率组成中低频部分的峰值;在亚临界区对平均阻力系数和 Strouhal 数的研究表明,增大来流湍流度,等效于增大了雷诺数所带来的效应. Kiya<sup>[54]</sup>在亚临界区和临界区的研究表明,来流湍流度会使圆柱断面死水区范围减小、压力系数(背压系数)增大、分离点后移,从而导致阻力系数减小. Ronald<sup>[55]</sup>在水洞中对光滑圆柱的研究表明:在阻力系数变化显著的雷诺数区,湍流度对阻力系数影响很大,湍流度在这些区域对雷诺数效应的抑制最为明显;而在亚临界区,即使在来流中引入湍流度,阻力系数基本不随雷诺数变化. Zan<sup>[32]</sup>在  $1.0 \times 10^5 \leq Re \leq 7.0 \times 10^6$  的条件下对光滑圆柱雷诺数效应的研究表明:湍流条件下出现明显涡脱时的雷诺数要远远小于层流状态;湍流使 Strouhal 数随雷诺数变化曲线的“几”字形脊背被削除,稳定了 Strouhal 数在临界区、超临界区的波动. Hunt<sup>[56]</sup>的研究表明:虽然圆柱阻力系数在低雷诺数、湍流中与高雷诺数、层流中表现特性相近,但是脉动压力、展向相关性在高雷诺数的层流中的特性与低雷诺数的湍流中的特性有很大的差别.

Batham<sup>[57]</sup>在  $Re = 1.11 \times 10^5$  和  $2.35 \times 10^5$  的条件下研究了光滑和粗糙表面圆柱在层流和湍流中的风压分布规律. 研究表明,增大湍流度可有效抑制光滑圆柱尾流中出现的连贯涡脱;粗糙圆柱体的表面风压分布受湍流度影响很大,湍流度增大了涡脱能量,使得粗糙圆柱表面风压分布与光滑圆柱在  $Re \geq 1.0 \times 10^7$  时的表面风压分布类似. Zan 和 Matsuda<sup>[58]</sup>在 3 种湍流度中研究了粗糙圆柱体在  $5.0 \times 10^4 \leq Re \leq 9.0 \times 10^5$  的气动特性,研究表明,表面粗糙度和来流湍流度减小了连贯涡脱再次出现时所对应的雷诺数.

Lee<sup>[59]</sup>研究了来流湍流度对 2 维方柱表面风压分布的影响. 研究表明,随着来流湍流度的增大,背压系数增大,阻力系数减小;湍流度增大,剪切边界层变薄,侧向的涡脱进入死水区,从而使背压系数变大. 同时,湍流度越大,涡脱长度越小;湍流度较湍流积分尺度对平均风压分布的影响要大. Vickery<sup>[60]</sup>也研究了平滑流和湍流中方柱表面的脉动升力和阻力的分布规律. 他还研究了升力沿展长的分布和各截面脉动升力之间的关系. 研究表明,方柱脉动升力的量级比圆柱体要大很多,而且沿展长变化很大. Vickery<sup>[60]</sup>和 Huot<sup>[61]</sup>也验证了 Lee<sup>[59]</sup>的研究成果.

Laneville<sup>[36]</sup>在低雷诺数条件下对高宽比为 2 的正方形截面柱的研究表明,该棱柱在不同湍流度条件下的气动特性不同. Larose 和 D'Auteuil<sup>[9]</sup>在高雷诺数条件下 ( $Re = 1.97 \times 10^6$ ) 对不同高宽比的正方形截面矩形柱的研究表明,来流的湍流强度增强了棱柱的稳定性.

在研究粗糙度对雷诺数效应的影响方面,普遍认为粗糙度是将阻力系数随雷诺数的变化曲线向低雷诺数区平移,但湍流度对雷诺数效应的影响更复杂. 不能简单地得出这样的结论,有待进一步研究.

### 3 结语

随着土木工程更加长大轻柔,结构设计要求更为精确的模型风洞试验及荷载计算结果,雷诺数效应的研究及模拟将在结构抗风研究中越来越受到关注. 为此,提出进一步的研究建议:

(1) 现场实测能够获得实际结构在高雷诺数条件下的气动特性. 建议开展对工程结构高雷诺数效应的实测研究.

(2) CFD(计算流体动力学)作为研究各种断面的雷诺数效应的有效辅助手段,在圆柱断面、矩形断面和桥梁模型雷诺数效应的研究都取得了一定的成果,但由于分离流结构复杂,雷诺数模拟仍是 CFD 发展的瓶颈,因此有必要深入研究,争取有所突破.

(3) 建议对各种截面结构的雷诺数效应展开系统研究. 关注模型表面压力分布随雷诺数的变化规律,进而从微观上揭示模型气动参数随雷诺数变化的内在驱动规律. 特别关注脉动风压和脉动风力随雷诺数变化的规律. 在此基础上系统地总结各种截面的气动系数随雷诺数的变化规律.

(4) 在对雷诺数效应机制有更深了解的基础上,深入研究在低雷诺数风洞中模拟高雷诺数效应的方法.

### 参考文献:

- [1] Dalglish W A. Cladding pressure on commerce court tower [C]//Symposium on Full Scale Measurement of Wind Effects on Tall Building and Other Structure. Ottawa: University of Toronto Press, 1974: 23-29.
- [2] Scanlan R H. Airfoil and bridge deck flutter derivatives [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1971, 97: 1717.
- [3] Schewe G. Reynolds-number effects in flow around more-or-less bluff bodies [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 1267.



- [4] Hoxey R P, Reynolds A M, Richardson G M, et al. Observations of Reynolds number sensitivity in the separated flow region on a bluff body[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 73: 231.
- [5] Kubo Y, Nogami C, Yamaguchi E, et al. Study on Reynolds number effect of a cable-stayed bridge girder [C]//*Wind Engineering into the 21st Century*, Copenhagen: Balkema A A, 1999: 935-940.
- [6] 刘健新, 崔欣, 李加武. 桥梁断面表面压力分布及 Strouhal 数的雷诺数效应[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 146.  
LIU Jianxin, CUI Xin, LI Jiawu. Reynolds number effect of surface pressure distribution and Strouhal number of a typical bridge deck section[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(4): 146.
- [7] Matsuda K, Cooper K R, Tanaka H, et al. An investigation of Reynolds number effects on the steady and unsteady aerodynamic forces on a 1: 10 scale bridge deck section model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89: 619.
- [8] Larose G L, Larsen S V, Larsen A, et al. Sectional model experiments at high Reynolds number for the deck of a 1018 m span cable-stayed bridge[C]//*Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering*. Lubbock: TTU Press. 2003: 373-380.
- [9] Larose G L, D'Auteuil A. On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94: 365.
- [10] Simiu E, Scanlan R H. *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*[M]. 3rd ed. New York: John Wiley, 1996.
- [11] Larose G L, D'Auteuil A. Experiments on 2D rectangular prisms at high Reynolds numbers in a pressurised wind tunnel [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 923.
- [12] Scruton C. *An introduction to wind effects on structures*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1981.
- [13] Robertson J M, Cermak J E, Nayak S K. A Reynolds-number effect in flow past prismatic bodies[J]. *Mechanics Research Communications*, 1975(5): 279.
- [14] Niemann H J, Hölscher N. A review of recent experiments on the flow past circular cylinders [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33: 197.
- [15] Roshko A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 10: 345.
- [16] Achenbach E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to  $Re = 5 \times 10^6$ [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1968, 34: 625.
- [17] Bearman P W. On vortex shedding from a circular cylinder in the critical Reynolds number régime [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1969, 37: 577.
- [18] Farell C, Blessmann J. On critical flow around smooth circular cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 136: 375.
- [19] Higuchi H, Kim H J, Farell C. On flow separation and reattachment around a circular cylinder at critical Reynolds numbers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 200: 149.
- [20] Sakamoto H, Arie M. Vortex shedding from a rectangular prism and a circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 126: 147.
- [21] Uematsu Y, Yamada M. Effects of aspect ratio and surface roughness on the time-averaged aerodynamic forces on cantilevered circular cylinders at high Reynolds numbers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 54: 301.
- [22] Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 133: 265.
- [23] Jones G W, Cincotta J J, Walker R W. *Aerodynamic forces on a stationary and oscillating circular cylinder at high Reynolds numbers*[M]. Washington D C: National Aeronautics and Space Administration, 1969.
- [24] Duarte Ribeiro J L. Fluctuating lift and its spanwise correlation on a circular cylinder in a smooth and in a turbulent flow: a critical review[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 40: 179.
- [25] Nakamura Y, Tomonari Y. Effects of surface roughness on the flow past circular cylinders at high Reynolds numbers [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 123: 363.
- [26] Achenbach E. Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, 46: 321.
- [27] Zdravkovich M M. *Flow around circular cylinders: applications* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [28] Norberg C. Flow around a circular cylinder: aspects of fluctuating lift[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15 (3): 459.
- [29] Norberg C. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, 17(1): 57.
- [30] Achenbach E, Heinecke E. On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers  $6 \times 10^3$  to  $5 \times 10^6$  [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 109: 239.
- [31] James W D, Paris S W, Malcolm G N. Study of viscous crossflow effects on circular cylinders at high Reynolds numbers[J]. *AIAA Journal*, 1980, 18(9): 1066.
- [32] Zan S J. Experiments on circular cylinders in crossflow at Reynolds numbers up to 7 million [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 880.
- [33] Nakamura Y, Ohya Y, Ozono S, et al. Experimental and numerical analysis of vortex shedding from elongated rectangular cylinders at low Reynolds numbers  $200-10^3$  [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, 65: 301.
- [34] Shimada K, Ishihara T. Prediction of aeroelastic vibration of rectangular cylinders by  $K-\epsilon$  model[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1999, 12(4): 122.
- [35] Tamai H, Okuda Y, Katsura J. On relation between Reynolds number and Kármán vortex formation on a bluff body in natural wind [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89: 1619.
- [36] Laneville A, Gartshore I S, Parkinson G V. An explanation of



- some effects of turbulence on bluff bodies[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1975: 333-341.
- [37] Courchesne J, Laneville A. An experimental evaluation of drag coefficient for rectangular cylinders exposed to grid turbulence [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1982, 104(4): 523.
- [38] Bearman P W, Morel T. Effect of free stream turbulence on the flow around bluff bodies [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1983, 20(2): 97.
- [39] Roberson J A, Lin C Y, Rutherford S G, et al. Turbulence effects on drag of sharp-edged bodies [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1972, 98(7): 1187.
- [40] Delany N K, Sorensen N E. Low-speed drag of cylinders of various shapes [R]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1953.
- [41] Schewe G. Nonlinear flow-induced resonances of an H-shaped section[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1989, 3(4): 327.
- [42] Schewe G, Larsen A. Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74: 829.
- [43] Larsen A, Savage M, Lafrenière A, et al. Investigation of vortex response of a twin box bridge section at high and low Reynolds numbers [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 934.
- [44] 李加武. 桥梁断面雷诺数效应及其控制研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2003.
- LI Jiawu. Research on Reynolds-number effects of bridge deck section and the effects-restraint [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2003.
- [45] Fage A, Warsap J H. The effects of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder[M]. London: Aeronautical Research Council, 1930.
- [46] Achenbach E. The effect of surface roughness on the heat transfer from a circular cylinder to the cross flow of air[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1977, 20(4): 359.
- [47] Szechenyi E. Supercritical Reynolds number simulation for two-dimensional flow over circular cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, 70: 529.
- [48] Güven O, Farell C, Patel V C. Surface-roughness effects on the mean flow past circular cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980, 98: 673.
- [49] Lawson T V. The use of roughness to produce high Reynolds number flows around circular cylinders at lower Reynolds numbers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1982, 10: 381.
- [50] Shih W C L, Wang C, Coles D, et al. Experiments on flow past rough circular cylinders at large Reynolds numbers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 49: 351.
- [51] Barré C, Barnaud G. High Reynolds number simulation techniques and their application to shaped structures model test [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 57: 145.
- [52] Zasso A, Giappino S, Muggiasca S. Wind tunnel study of a cone-like shaped roof: Reynolds number effects[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94: 431.
- [53] Surry D. Some effects of intense turbulence on the aerodynamics of a circular cylinder at subcritical Reynolds number[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 52: 543.
- [54] Kiya M, Suzuki Y, Arie M, et al. A contribution to the free-stream turbulence effect on the flow past a circular cylinder [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 115: 151.
- [55] SAVKAR S D. Buffeting Force on Rigid Circular Cylinders in Cross Flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 105: 397.
- [56] Hunt J C R, Kawai H, Ramsey S R, et al. A review of velocity and pressure fluctuations in turbulent flows around bluff bodies [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 35: 49.
- [57] Batham J P. Pressure distributions on circular cylinders at critical Reynolds numbers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, 57: 209.
- [58] Zan S J, Matsuda K. Steady and unsteady loading on a roughened circular cylinder at Reynolds numbers up to 900 000 [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90: 567.
- [59] Lee B E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, 69: 263.
- [60] Vickery B J. Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1966, 25: 481.
- [61] Huot J P, Rey C, Arbey H. Experimental analysis of the pressure field induced on a square cylinder by a turbulent flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 162: 283.