

二维矩形截面柱体气动力系数雷诺数效应

王新荣, 顾明, 全涌

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 在 TJ-2 风洞中, 测量了 5 种截面宽厚比(B/D 为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 和 4.0)的二维矩形截面柱体的表面风压时程, 雷诺数(Re)的变化范围为 $1.1 \times 10^5 \sim 6.8 \times 10^5$, 然后通过风压时程积分的方法获得了模型的气动力系数时程. 研究了各模型气动力系数的雷诺数效应, 分析了模型的平均阻力系数随截面宽厚比的变化规律, 并与以往的研究成果进行了对比, 最后分析了各模型的气动力系数功率谱随雷诺数的变化规律. 研究表明, 宽厚比 $2 \leq B/D \leq 4$ 的二维矩形截面柱体的气动特性受雷诺数的影响, 且随着截面宽厚比的增大, 二维矩形截面柱体模型的气动特性对雷诺数越来越敏感. 尾流区的旋涡脱落对模型顺风向脉动风荷载有一定程度的贡献, 但横风向升力主要来源于尾流的旋涡脱落.

关键词: 二维矩形截面柱体; 雷诺数效应; 气动力系数; 功率谱

中图分类号: TU317.1

文献标志码: A

Reynolds Number Effects on Aerodynamic Force Coefficients of 2D Rectangular Prisms

WANG Xinrong, GU Ming, QUAN Yong

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

Abstract: Experiments on 2D rectangular prisms with side ratios of 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 and 4.0 are reported in this study. The tests were conducted in TJ-2 wind tunnel to measure the wind pressures on the surfaces of 5 models for the testing Reynolds numbers ranging from 1.1×10^5 to 6.8×10^5 . Aerodynamic forces were obtained by integrating the wind pressures around the model surface. The Reynolds number effects on the aerodynamic force coefficients and the power spectrums of aerodynamic force coefficients are presented, and the influence of side ratio on the drag force coefficients is analyzed. The results show that the aerodynamic characteristics of rectangular prisms with side

ratio between 2 and 4 are Reynolds number dependent, and the rectangular prisms appear to be more sensitive to the Reynolds number with increasing side ratio. The along fluctuating wind force is produced mostly by the along fluctuating wind speed, and the vortex shedding plays a second role, whereas the crosswind lift force is mainly from the vortex shedding.

Key words: 2D rectangular prism; Reynolds number effects; aerodynamic force coefficient; power spectrum

在结构抗风研究中, 结构的风荷载通常是通过缩尺模型风洞试验获得, 但缩尺模型风洞试验难以满足雷诺数相似的条件, 这就导致风洞试验结果与实际结构的真实值之间存在一定的差异, 这就是雷诺数效应. 长期以来, 带有尖锐边角的结构的气动力系数雷诺数效应一直没有引起重视, 人们认为带有尖锐边角的结构的气流分离位置是固定的, 其气动力系数的雷诺数效应可以忽略不计^[1-2]. 但 Schewe 的研究^[3]表明带有尖锐边角的结构的气动特性也有可能受到雷诺数的影响, 主要是因为气流在尖锐边角处分离之后有可能再附于结构上, 这时结构周围的流动状态受雷诺数的影响. Larose 等的研究^[4-5]表明二维矩形截面柱体的气动力系数受雷诺数的影响, 且模型的切角处理和来流紊流度会影响气流的分离和再附, 进而影响模型表面气流边界层的形成, 其阻力系数和升力系数也会随之发生变化.

Simiu 等^[6]总结了二维矩形截面柱体的阻力系数 C_D 随截面宽厚比(B/D)的变化规律, 如图 1 所示. 当 $2 < B/D < 4$ 时, 其平均阻力系数的取值不确定, 取值范围如图 1 中阴影部分所示. Larose 等^[4]认为造成平均阻力系数取值不确定的原因可能是雷诺数效应或者来流紊流度.

收稿日期: 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(90715040, 91215302)

第一作者: 王新荣(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: xinrong0106@126.com;

通讯作者: 顾明(1957—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

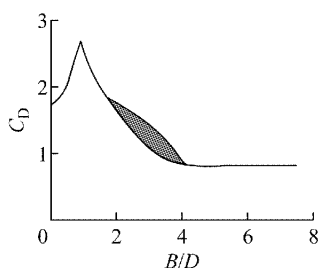


图1 矩形截面柱体平均阻力系数随模型截面宽厚比的变化^[6]

Fig. 1 Mean drag coefficient of rectangular prisms versus B/D ratio^[6]

综上所述,二维矩形截面柱体的气动力系数随截面宽厚比的变化规律很复杂.以往并没有针对不同截面宽厚比的二维矩形截面柱体模型的雷诺数效应的系统研究,相关研究主要针对特定截面宽厚比的二维矩形截面柱体模型在某一个雷诺数条件下的气动特性,然后通过总结不同学者在不同雷诺数条件下的研究成果,以分析二维矩形截面柱体的雷诺数效应,但各试验的试验条件有可能不是完全相同的,比如说堵塞度、来流紊流度等,这可能会影响分析结果的可信度.此外,以往的研究更多地关注模型的平均气动力的研究结果,很少涉及脉动风力和气动力系数功率谱的雷诺数效应,但脉动风力和气动力系数功率谱的研究对越来越柔的结构越来越重要.本文在雷诺数(Re)为 $1.1 \times 10^5 \sim 6.8 \times 10^5$ 的范围内测量了5种截面宽厚比的二维矩形截面柱体模型的表面风压时程,再通过压力积分的方法获得了模型的气动力时程,研究了各模型气动力系数的雷诺数效应,并分析了平均阻力系数随截面宽厚比的变化,最后研究了气动力系数功率谱随雷诺数的变化规律.本文的研究跨越雷诺数范围广,克服了以往学者仅研究特定截面宽厚比的模型在某一个雷诺数条件下的气动力特性的缺憾.

1 试验概况

1.1 试验设备和模型概况

试验在同济大学 TJ-2 风洞中进行,风洞实验段尺寸为 3 m 宽、2.5 m 高、15 m 长,空风洞最高试验风速为 $68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,流场性能良好.本试验采用低紊流度的均匀流风场.在试验之前,利用风速靶标定了两端版之间的风剖面,当平均风速 U 约为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,紊流度约为 1%,当平均风速大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,紊流度小于 0.5%.试验模型采用 5 种截面宽厚比(B/D)的二维矩形截面柱体模型:2:1,2.5:1,3

:1,3.5:1 和 4:1.模型的截面宽厚比 B/D 指的是模型的顺风向宽度 B 与迎风面厚度 D 之比.所有模型的迎风面厚度为 0.2 m,长 1.5 m,顺风向宽度分别为 0.4,0.5,0.6,0.7 和 0.8 m.模型表面测点间距不超过 15 mm,在角部区域加密,以监测气流分离区的风压变化规律,5 个模型的测点布置如图 2 所示.试验风速变化范围为 $8 \sim 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,以试验模型迎风面厚度 $D=0.2 \text{ m}$ 为特征尺寸,当试验风速为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,试验所能达到的雷诺数分别为 1.1×10^5 和 6.8×10^5 .所有模型均采用 7 mm 有机玻璃板制作,模型表面光滑平整.利用刚性端板将试验模型固定于风洞截面正中间,如图 3 所示.支撑钢架具有足够的强度和刚度,在试验风速下不发生变形,并且不出现明显的振动现象,以保证测压试验的精度.

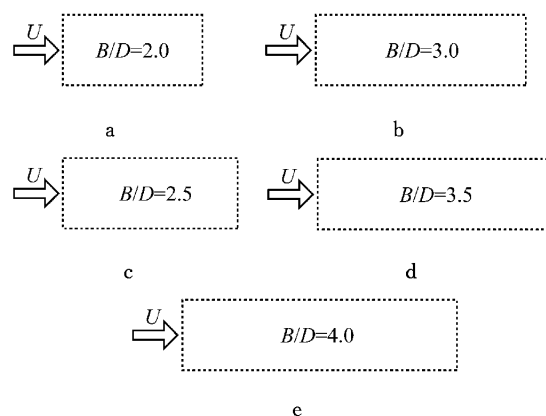


图2 模型表面测点分布示意图

Fig. 2 Sketch of arrangement of pressure taps

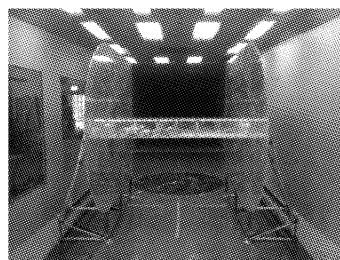


图3 风洞中的试验模型

Fig. 3 Wind tunnel test model

1.2 二维流动的模拟和验证

本试验采用二维节段模型,二维流动的模拟是试验数据是否可信的关键.模型两端的气流绕流是影响其二维流动的主要原因,本试验同时采用端板分流法和模型补偿段来模拟其二维流动.模型总长 1.5 m,其中测压段长 0.4 m,两端有 0.55 m 的补偿段. Kubo 等的研究^[7]表明,端板的尺寸应根据 Karman 涡街理论来确定,端板的横风向宽度应该大

于模型迎风向宽度的 8.5 倍,端板在尾流区延伸长度应该大于模型迎风面厚度的 4.28 倍. 根据上述研究成果,本试验所采用的端板的尺寸如图 4 所示,为保证端板的强度和刚度满足高风速的试验要求,本试验采用 0.8 cm 厚的铝板,并将其前缘进行了削角处理,以优化其分离尾迹宽度,从而尽量减小端板对测压模型的干扰.

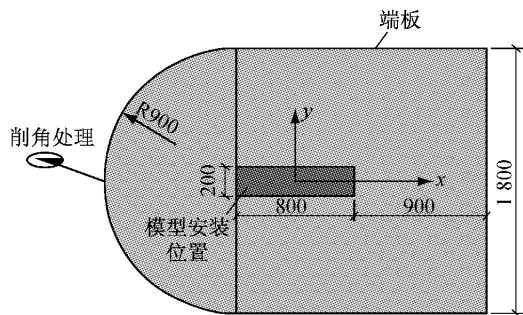


图4 端板的尺寸(单位:mm)

Fig.4 The size of the end plate(unit: mm)

2 试验数据处理

作用在模型上的气动力(阻力和升力)是通过对模型表面的压力积分所得,模型的阻力系数与升力系数计算公式如下:

$$C_D(t) = \frac{1}{D} \sum_i C_P(i, t) \cdot \Delta S_i \cdot \cos \theta_i \quad (1)$$

$$C_L(t) = \frac{1}{D} \sum_i C_P(i, t) \cdot \Delta S_i \cdot \sin \theta_i \quad (2)$$

式中: $C_D(t)$ 和 $C_L(t)$ 为模型的阻力系数时程和升力系数时程; $C_P(i, t)$ 为测点 i 的风压系数时程; D 为模型的迎风面厚度; ΔS_i 为测点 i 所代表的模型表面宽度; θ_i 为测点 i 所受风压方向与来流方向的夹角,取值如图 5 所示.

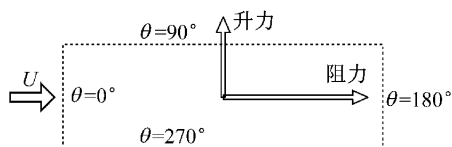


图5 模型阻力与升力示意图

Fig.5 Sketch of the drag and lift force

3 试验结果

以往关于二维矩形截面柱体模型的试验研究往往是针对特定截面宽厚比的模型在某一个雷诺数条件下的气动特性,并未系统地研究不同的截面宽厚

比模型在不同雷诺数条件下的气动特性,并且以往的试验研究的试验条件也并不完全相同,比如堵塞度,来流紊流度等. 此外,以往的研究很少涉及脉动风力和气动力系数功率谱的雷诺数效应. 本文系统分析了 5 种截面宽厚比模型在雷诺数为 $1.1 \times 10^5 \sim 6.8 \times 10^5$ 范围内的试验结果,给出了模型的气动力系数及其功率谱的雷诺数效应的分析成果.

3.1 平均阻力系数的雷诺数效应

图 6 给出了不同截面宽厚比的二维矩形截面柱体模型的平均阻力系数(C_D)随雷诺数的变化规律. 对于 $B/D=2.0, 2.5, 3.0$ 和 3.5 的 4 个模型,其平均阻力系数随雷诺数的变化曲线可分为两个区域:在低雷诺数区域($Re < 3.0 \times 10^5$),其平均阻力系数随雷诺数的增大而略有增大,当 $Re > 3.0 \times 10^5$ 时,其平均阻力系数基本不随雷诺数而改变. 而对于 $B/D=4.0$ 的模型,其平均阻力系数随雷诺数的增大呈现先增大后减小的变化规律,当 $Re < 5.0 \times 10^5$ 时,其平均阻力系数随雷诺数的增大而缓慢增大,且增大的斜率与其他截面宽厚比模型基本一致,但越过最高点 $Re \approx 5.0 \times 10^5$ 后,其平均阻力系数急剧下降. 由此可知,不同截面宽厚比的二维矩形截面柱体模型的平均阻力系数对雷诺数的敏感程度不同,随着截面宽厚比的增大,二维矩形截面柱体模型对雷诺数越敏感.

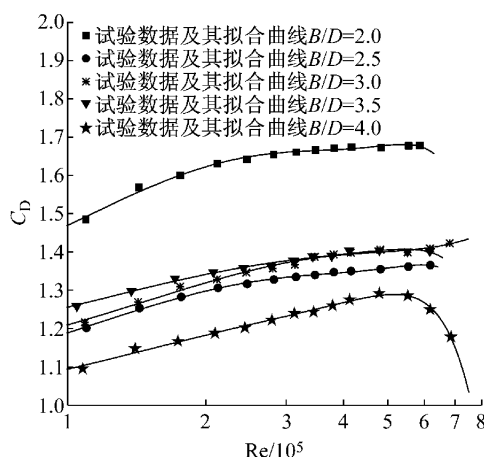


图6 二维矩形柱体模型的平均阻力系数随雷诺数的变化规律

Fig.6 Variation of the mean drag coefficients of rectangular prisms with Reynolds number

图 7 总结了不同截面宽厚比的二维矩形截面柱体模型的平均阻力系数的以往研究成果^[8-12]. 当 $B/D=0.6$ 时,模型的平均阻力系数最大,随后模型的平均阻力系数随截面宽厚比的增大而减小. 本试验

所采用的截面宽厚比为 $2 \leq B/D \leq 4$, 本试验的结果与以往研究结果^[8-12]的对比如图7所示, $B/D=2$ 模型的试验结果在低雷诺数区域与以往的研究成果较接近, 而在高雷诺数区域, 本试验结果比以往的研究成果偏大; $B/D=2.5$ 模型的试验结果在低雷诺数区域比以往的研究成果偏小, 而在高雷诺数区域, 本试验结果与以往的研究成果接近; $B/D=3$ 模型的试验结果与以往的研究成果接近; $B/D=3.5$ 模型的以往研究成果较少, 相比于 Sohankar^[8]的研究结果, 本试验的结果偏大; $B/D=4$ 模型的以往研究成果较分散, 本试验的结果分布于以往的研究结果之间。

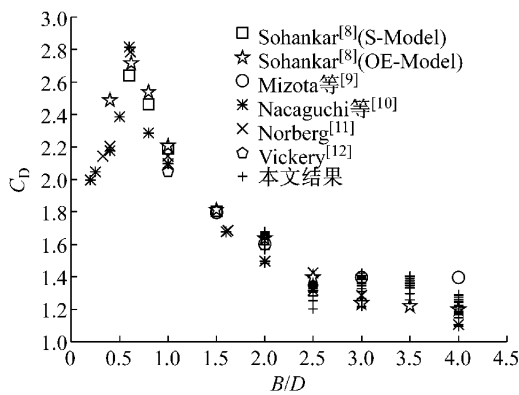


图7 二维矩形柱体模型的平均阻力系数随模型截面宽厚的变化规律^[8-12]

Fig. 7 Variation of the mean drag coefficients of rectangular prisms with side ratio

根据第3.1节分析可知, 本文的试验结果与以往的研究结果^[8-12]的分布规律基本吻合, 但具体取值略有偏差。以往的研究表明, 二维矩形柱体模型在截面宽厚比 $2 \leq B/D \leq 4$ 的范围内, 阻力系数的取值不确定, 而本文的研究成果也验证了这一结论。本试验过程中, 实验条件的唯一改变就是来流风速, 即试验雷诺数。因此, 本文的试验成果表明造成不同截面宽厚比模型的阻力系数取值不确定的原因就是由于雷诺数效应的影响。

3.2 均方根阻力系数的雷诺数效应

不同截面宽厚比的二维矩形截面柱体模型的均方根阻力系数 ($C_{D,RMS}$) 的雷诺数效应比平均阻力系数的雷诺数效应更复杂, 图8给出了5个试验模型在不同雷诺数条件下的均方根阻力系数。由图可知, 在5个模型中, $B/D=2.0$ 模型的均方根阻力系数最小, 且根据其均方根 (root mean square, RMS) 阻力系数随雷诺数变化的拟合曲线可知: 当 $Re < 2.5 \times 10^5$ 时, 其均方根阻力系数随雷诺数的增大而减小,

当 $Re > 2.5 \times 10^5$ 时, 其均方根阻力系数基本不变, 约为 0.055。 $B/D=3.0$ 模型的均方根阻力系数最大, 且随雷诺数的增大, 其均方根阻力系数呈现先减小后增大的趋势。此外, $B/D=2.5, 3.5$ 和 4.0 的模型的均方根阻力系数的变化规律类似, 随着雷诺数的增大, 其均方根阻力系数略有减小。由此可知, 所有模型的均方根阻力系数在高雷诺数区域都略有减小, 由低雷诺数风洞试验获得的均方根阻力系数用于结构设计和分析是偏于保守的。但实际结构的雷诺数将达到 $10^6 \sim 10^7$ 数量级, 该雷诺数区域内均方根阻力系数的变化规律有待进一步研究。

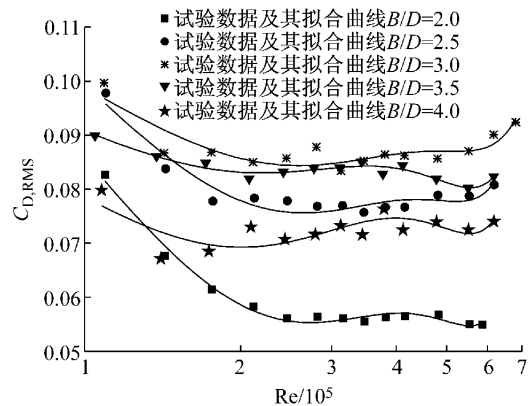


图8 二维矩形柱体模型的均方根阻力系数随雷诺数的变化规律

Fig. 8 Variation of the RMS drag coefficients of rectangular prisms with Reynolds number

3.3 均方根升力系数的雷诺数效应

本试验采用完全对称的二维矩形截面柱体模型, 故模型的平均升力系数约为零, 且基本不随雷诺数而改变, 但均方根升力系数是受雷诺数影响的, 图9给出了试验模型在不同雷诺数条件下的均方根升力系数 ($C_{F,RMS}$), 并拟合了均方根升力系数的雷诺数效应曲线。由图可知, 5个二维矩形截面柱体模型中, $B/D=2.0$ 模型的均方根升力系数随雷诺数的变化较小, 而另外4个模型 (B/D 为 2.5, 3.0, 3.5 和 4.0) 的均方根升力系数随雷诺数的增大呈现相似的变化趋势: 当 $Re < 4.0 \times 10^5$ 时, 各模型的均方根升力系数随雷诺数的增大而缓慢增大, 越过最高点 ($Re \approx 4.0 \times 10^5$) 之后, 各模型的均方根升力系数开始减小, 且减小的速度明显比增大的速度快。分析均方根升力系数随模型截面宽厚比的变化规律可知: 在5个试验模型中, $B/D=2.0$ 模型的均方根升力系数的取值基本在 0.60~0.70 之间; $B/D=3.0$ 模型的均方根升力系数最大, 且越过最高点之后的下降速度

最快; $B/D=4.0$ 的模型的均方根升力系数最小, 基本在 $0.40 \sim 0.55$ 之间. 由此可知, 不同截面宽厚比模型的均方根升力系数对雷诺数的敏感程度不同, $B/D=3.0$ 模型的均方根升力系数对雷诺数最敏感, 而 $B/D=2.0$ 模型最不敏感.

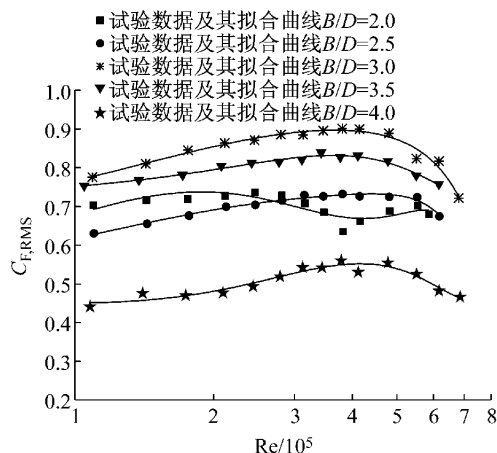


图 9 二维矩形柱体模型的均方根升力系数随雷诺数的变化规律

Fig. 9 Variation of the RMS lift coefficients of rectangular prisms with Reynolds number

3.4 脉动阻力系数的功率谱

图 10 给出了 5 个雷诺数条件下, 不同截面宽厚比模型的脉动阻力系数功率谱. 图中, $S_{C_D}(f)$ 为脉动阻力系数功率谱, $\sigma_{C_D}^2$ 为脉动阻力系数方差. 由图可知: 5 种截面宽厚比模型的脉动阻力系数功率谱都出现了两个窄带的峰值, 其中 $B/D=2.5, 3.0, 3.5$ 和 4.0 的模型的脉动阻力系数功率谱的两个峰值较为明显, 而 $B/D=2$ 模型的脉动阻力系数功率谱的峰值不明显. 功率谱曲线的第一个峰值折算频率恰好是横风向脉动升力系数功率谱的峰值折算频率 (即 Strouhal 数), 而第二个峰值折算频率恰好是 Strouhal 数的两倍. 以往对矩形截面柱体的研究也表明顺风向阻力系数功率谱的峰值折算频率为横风向升力系数功率谱的峰值折算频率的两倍^[13]. 分析功率谱曲线的峰值位置可知, 各模型的阻力系数功率谱曲线的峰值随雷诺数的增大而向高频区略有偏移, 这说明峰值折算频率 (fD/U , f 为频率) 随雷诺数的增大而略有增大, 5 种截面宽厚比模型的峰值折算频率取值范围见表 1.

3.5 脉动升力系数功率谱

图 11 给出了不同截面宽厚比模型在 5 个雷诺数条件下的脉动升力系数功率谱 $S_{C_L}(f)$ ($\sigma_{C_L}^2$ 为脉动

表 1 不同截面宽厚比模型的峰值折算频率的取值范围

Tab.1 Value ranges of peak frequencies of models with various side ratios

截面宽厚比	第一个峰值	第二个峰值
$B/D=2.0$	$0.080 \sim 0.084$	$0.158 \sim 0.169$
$B/D=2.5$	$0.183 \sim 0.199$	$0.365 \sim 0.399$
$B/D=3.0$	$0.167 \sim 0.181$	$0.335 \sim 0.362$
$B/D=3.5$	$0.161 \sim 0.167$	$0.322 \sim 0.334$
$B/D=4.0$	$0.144 \sim 0.154$	$0.288 \sim 0.310$

升力系数方差). 其谱峰所对应的折算频率即为 Strouhal 数, 可以用来表征漩涡脱落的卓越频率^[14].

由图可知: 各模型的脉动升力系数功率谱曲线都出现明显的峰值, 这说明模型的横风向升力主要来源于尾流的漩涡脱落; 各模型的脉动升力系数功率谱的峰值折算频率 (fD/U) 随雷诺数的增大略有增大, 各模型的 Strouhal 数的取值与表 1 中的第一个峰值折算频率相同; 当 $B/D=4.0$ 时, 脉动升力系数功率谱曲线在 $Re=6.17 \times 10^5$ 时出现了两个峰值, 分别为 0.154 和 0.300 .

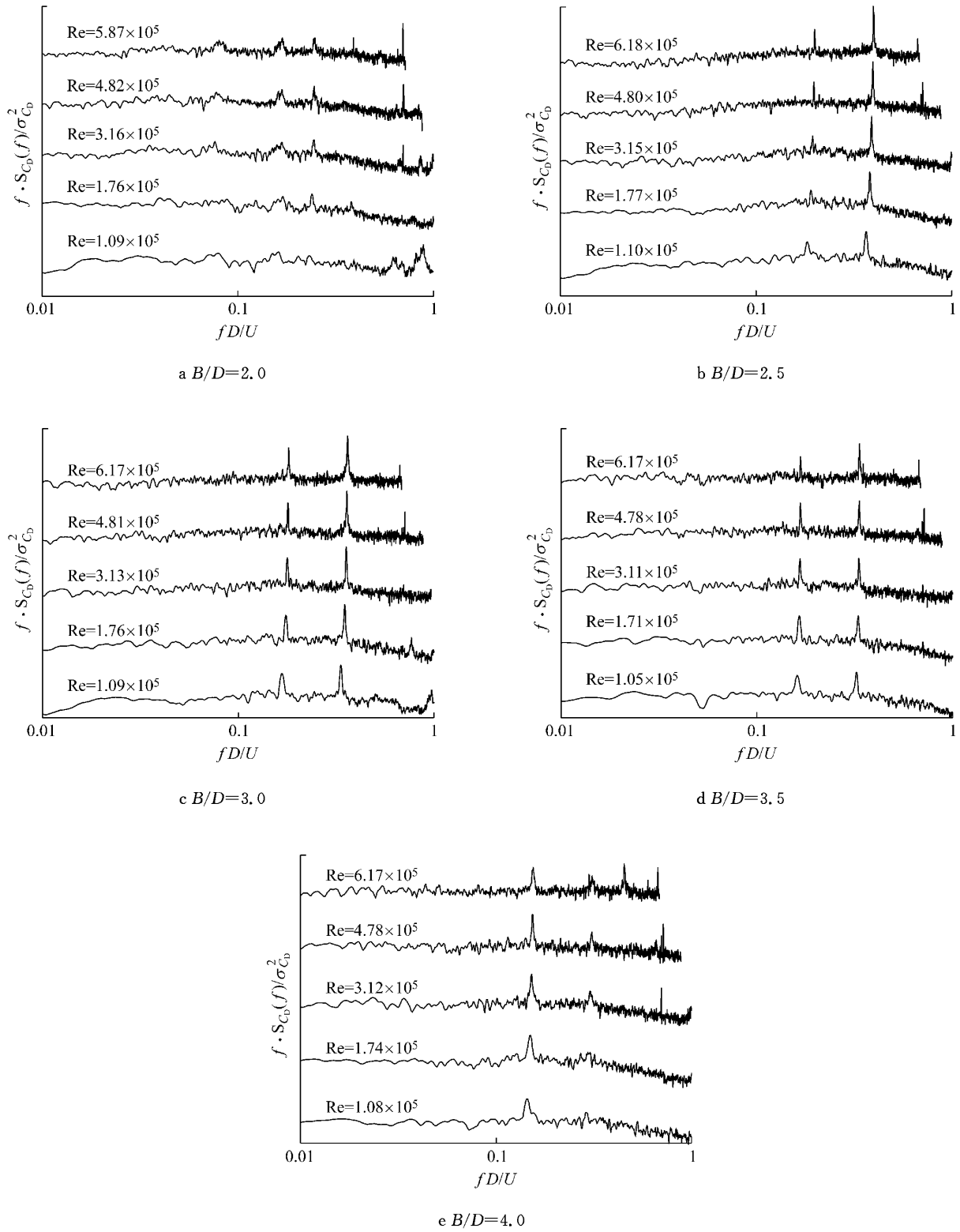
4 结论

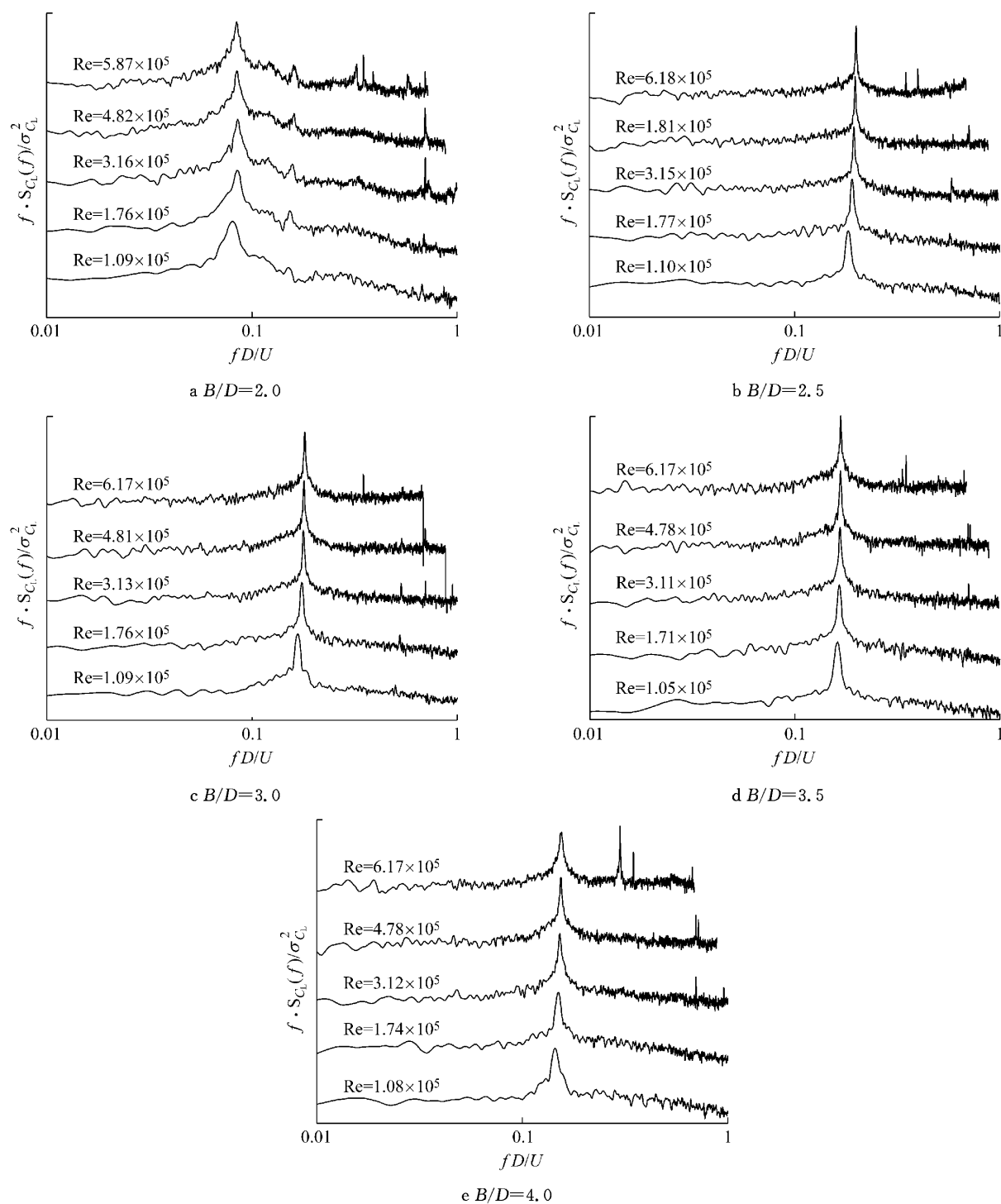
本文利用刚性模型测压试验的方法系统研究了 5 种截面宽厚比的二维矩形截面柱体模型的雷诺数效应, 得到了以下结论:

(1) 二维矩形截面柱体模型在截面宽厚比 $2 \leq B/D \leq 4$ 的范围内, 平均阻力系数受雷诺数的影响, 并且不同截面宽厚比的模型的阻力系数对雷诺数的敏感程度不同, 随着截面宽厚比的增大, 二维矩形截面柱体模型对雷诺数越敏感.

(2) 所有模型的均方根阻力系数在高雷诺数区域都略有减小. 不同截面宽厚比模型的均方根升力系数随雷诺数的变化规律较复杂, 且 5 个模型的均方根升力系数对雷诺数的敏感程度不同, $B/D=3$ 模型的均方根升力系数对雷诺数最敏感, 而 $B/D=2$ 的模型最不敏感.

(3) 不同截面宽厚比模型的阻力系数功率谱曲线的峰值折算频率随雷诺数的增大而略有增大, 且两个峰值折算频率恰好分别为横风向升力系数功率谱的峰值折算频率 (即 Strouhal 数) 以及 Strouhal 数的两倍, 这说明尾流区的漩涡脱落对模型顺风向脉动风荷载有一定程度的贡献, 但不同雷诺数条件下的升力系数功率谱分析结果表明横风向升力主要由尾流的漩涡脱落产生的.

图10 模型的阻力系数 C_D 功率谱随雷诺数的变化规律Fig.10 Variation of the spectra of fluctuating drag coefficients C_D with Reynolds number

图 11 模型的脉动升力系数 C_L 功率谱随雷诺数的变化规律Fig. 11 Variation of the spectra of fluctuating lift coefficients C_L with Reynolds number

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(6): 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(14): 1267.
- [4] 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(5): 365.
- [5] 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(6): 923.
- [6] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design [M]. New York: John Wiley, 1996.
- [7] Kubo Y, Miyazaki M. Effects of end plates and blockage of structural members on drag forces [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1989, 32(3): 329.
- [8] Sohankar A. Large eddy simulation of flow past rectangular-section cylinders: Side ratio effects [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(5): 640.
- [9] Mizota T, Yamada H, Kubo Y, *et al.* Aerodynamic characteristics of fundamental structures (part 1) [J]. *Journal of Wind Engineering*, 1988, 36: 50 (in Japanese).
- [10] Nakaguchi H, Hashimoto K, Muto S. An experimental study on aerodynamic drag of rectangular cylinders [J]. *Japan Society of Aeronautical Space Sciences Transactions*, 1968, 16(1): 1 (in Japanese).
- [11] Norberg C. Flow around rectangular cylinders: pressure forces and wake frequencies [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 49(1): 187.
- [12] Vickery B J. Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a turbulent stream [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 25(3): 481.
- [13] 顾明, 项海帆. 几种矩形二维柱体节段模型上脉动力的测量 [J]. *空气动力学学报*, 1994, 12(1): 115.
GU Ming, XIANG Haifan. Measurements of fluctuating force on 2-dimensional models of rectangular cylinders [J]. *ACTA Aerodynamica Sinica*, 1994, 12(1): 115.
- [14] Liang S G, Liu S C, Li Q S, *et al.* Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12): 1757.

(上接第 497 页)

- via a fully nonlinear continuum formulation [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 24(1): 112.
- [7] 胡晓红. 大跨度拱桥等效风荷载试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
HU Xiaohong. Experimental study on the equivalent wind loading of long span arch bridge [D], Shanghai: Tongji University, 2002.
- [8] Davenport A G. Gust loading factors [J]. *Journal of the Structural Division*, 1967, 93(3): 11.
- [9] Holmes J D. Wind loading of structure [M]. New York: Spon Press, 2001.
- [10] 葛耀君, 宋锦忠, 曹丰产, 等. 上海卢浦大桥风荷载及抗风稳定性研究[C]//第十五届全国桥梁学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2002: 349-357.
GE Yaojun, SONG Jinzhong, CAO Fengcan, *et al.* Wind loading and wind resistance stability of Shanghai Lupu Bridge [C]// Proceeding of the National 15th Academic Conference on Bridge. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 349-357.