

# 湍流强度对圆角方柱气动特性的影响

刘 玥, 李永贵, 李 卓, 邓玉玺

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年12月26日; 录用日期: 2025年1月10日; 发布日期: 2025年3月5日

## 摘 要

圆角方柱在实际工程中应用越来越广泛,但由于圆角化后的方柱绕流呈现复杂的流动分离和再附着状态,而且实际工程中的结构处于大气边界层中,应评估来流湍流对圆角方柱风荷载特性的影响。针对标准方柱和圆角率为0.15和0.3的圆角方柱在自由流场和3种格栅湍流场下进行了试验研究,对湍流强度在不同入射角下对圆角方柱气动特性的影响开展深入分析。研究发现,湍流显著改变圆角方柱的分离和再附着特性,进而影响其气动力特性;湍流增强流体动能交换和混合,导致小入射角下圆角方柱前缘吸力增加并形成分离泡;湍流促进侧表面流体重新附着,在靠近后缘圆角处再分离,减小平均阻力系数,增加旋涡脱落频率;随湍流强度增加,平均升力系数由正转负,并随入射角变化呈“V”型趋势,且随着入射角增大,下侧壁面流体逐渐完全分离,而上侧壁面流体呈现重新结合特征,进一步改变圆角方柱的整体气动性能。

## 关键词

湍流, 圆角方柱, 风洞试验, 气动特性, 入射角

# Effects of Turbulence Intensity on Aerodynamic Characteristics of Square Cylinder with Rounded Corners

Yue Liu, Yonggui Li, Zhuo Li, Yuxi Deng

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Dec. 26<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 10<sup>th</sup>, 2025; published: Mar. 5<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Square cylinders with rounded corners are increasingly used in practical engineering. However, due to the complex flow separation and reattachment states around these cylinders after rounding

the corners, and the fact that structures in real engineering are situated within the atmospheric boundary layer, it is necessary to assess the impact of incoming turbulence on the wind load characteristics of square cylinders with rounded corners. Experimental studies were conducted on standard square cylinders and square cylinders with rounded corners (corner radius ratios of 0.15 and 0.3) in free flow and three grid-generated turbulent fields. An in-depth analysis was carried out on the influence of turbulence intensity on the aerodynamic characteristics of square cylinders with rounded corners at different angles of incidence. The research found that turbulence significantly alters the separation and reattachment characteristics of square cylinders with rounded corners, thereby affecting their aerodynamic force characteristics. Turbulence enhances fluid kinetic energy exchange and mixing, leading to increased suction at the leading edge and the formation of separation bubbles at small angles of attack. It promotes fluid reattachment on the side surfaces and causes re-separation near the rounded trailing edge, reducing the mean drag coefficient and increasing the vortex shedding frequency. As turbulence intensity increases, the mean lift coefficient changes from positive to negative and exhibits a “V-shaped” trend with varying angles of attack. Moreover, as the angle of attack increases, the fluid on the lower wall surface gradually separates completely, while the fluid on the upper wall surface shows reattachment characteristics, further altering the overall aerodynamic performance of the square cylinder with rounded corners.

## Keywords

Turbulence, Square Cylinder with Rounded Corner, Wind Tunnel Test, Aerodynamic Characteristics, Angle of Incidence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

方柱因设计简单及方便施工的特点,广泛应用于高层建筑、桥塔等实际工程中。作为典型的钝体结构,降低方形截面结构风荷载和风致响应影响是研究人员主要探讨的课题,其中对方形结构进行圆角处理是减小结构风荷载和风致振动的有效气动措施之一[1][2]。与尖锐钝体相比,圆角化后的流场状态和气动特性表现出较大差异。由于圆角方柱在实际工程中应用越来越广泛,不同学者对其进行了研究[3]-[6]。Lee [7]研究了湍流度和入射角对方柱气动特性的影响,结果表明增加湍流强度会使边界层变厚,流动分离点向后移动,平均阻力减小。Tamura [8]研究了湍流度对角部修正的方柱气动特性影响,研究表明高湍流度下较大的圆角半径会促进侧表面上分离的剪切层的重新附着。Carassale [9] [10]研究了自由流和湍流中圆角率为 0, 1/15, 2/15 的方柱表面风压及气动力,结果表明湍流通过改变流动结构、影响分离和再附着过程影响圆角方柱的气动特性。Miran [11] [12]对在  $Re = 500$  下的不同圆角率的方柱气动特性进行数值模拟,发现不同入射角下圆角的存在会减小阻力和脉动升力。Yang [13]等通过入射角对不同圆角率的方柱的气动特性及流动机理进行研究表明圆角方柱的临界入射角会随圆角率的增大而减小。当圆角率增大到一定值时由于剪切层靠近壁面流动,不在迎风圆角处分离,导致与方柱相比流动结构发生了明显的变化。

已有的关于圆角方柱的气动特性的研究多针对于来流湍流度很低的模型,而实际工程中的建筑物均处于复杂的湍流环境,湍流强度可能会改变结构气动特性,有关这两方面的研究不足。鉴于此,针对标准方柱和圆角率为 0.15 和 0.3 的圆角方柱在自由流场和 3 种格栅湍流场下进行了试验研究,对湍流强度在不同入射角下对圆角方柱气动特性的影响开展深入分析。

## 2. 风洞试验

风洞试验在湖南科技大学风工程试验研究中心进行。该试验室为水平直流吸入式风洞，风洞试验段全长 21 m，截面尺寸为 4.0 m × 3.0 m，试验段流场品质良好，风速连续可调范围在 0~30 m/s。试验雷诺数为 14 万，对应风速为 9 m/s。

### 2.1. 试验模型与试验工况

本试验为刚性模型测压试验。试验模型布置图，如图 1 所示。本试验模型截面宽  $D$  均为 250 mm，长  $L$  为 1500 mm，阻塞度随入射角增大而增大，在 45° 最大阻塞度为 4.4%。为消除端部效应[14]，两端设置直径  $D_e$  为 1250 mm 的圆形端板。试验照片如图 2 所示。

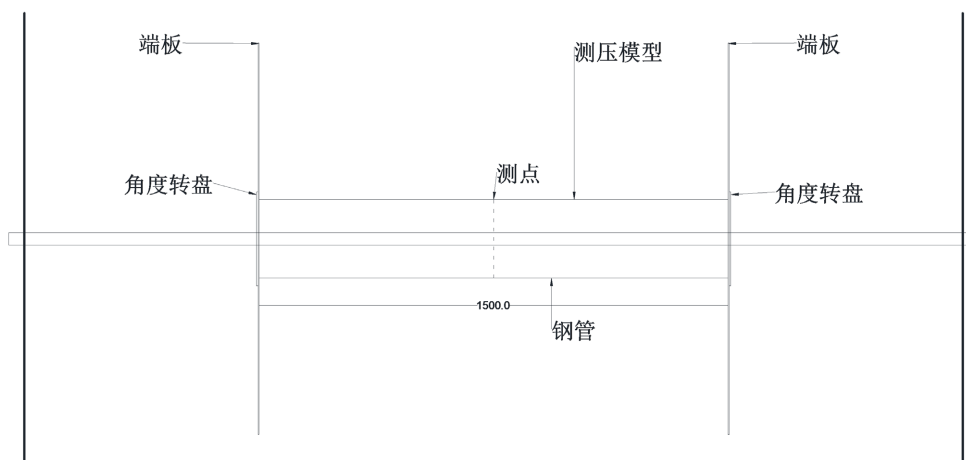


Figure 1. Layout of test model

图 1. 试验模型布置



Figure 2. Test photo

图 2. 试验照片

模型截面圆角半径为  $R$ ，厚度为  $D$ ，圆角率为  $R/D$ 。试验测试了标准方柱及圆角率为 0.15，0.3 三种圆角方柱的测点风压，其测点沿模型跨中位置周向布置。为了更好地捕捉圆角处可能存在的复杂风压分布，在圆角区域采用了更密集的测点布置。为了方便后文描述，将方柱四角点处分别定义为  $a$ ， $b$ ， $c$ ， $d$ 。测点布置见图 3。

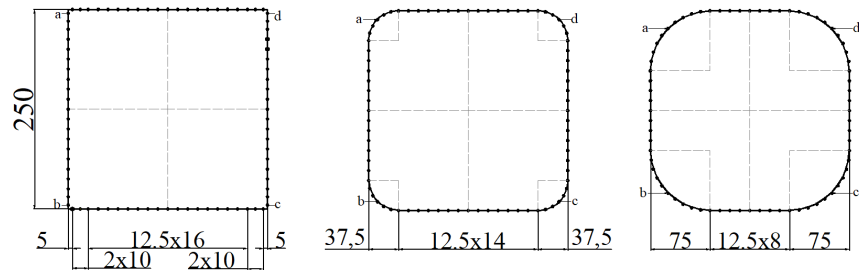


Figure 3. Layout of measuring points  
图 3. 测点布置

## 2.2. 湍流场调节

采用不同栅板宽度和栅板间距的均匀木质格栅板来产生具有类似积分长度和不同湍流强度的均匀流场。其中  $M$  和  $b$  的定义与张明月[15]的研究相同。流场由眼镜蛇风速仪测量，在测量风速时，采样率设定为 1000 Hz，采样时间 90s。流场的网格设置和主要湍流参数如表 1 所示。将风场未布置格栅板的流场称为自由流场，为了方便后文描述，统一以  $I_u$  定义顺风向湍流度， $L_u^x$  定义顺风向湍流积分尺度。

Table 1. Grid plate mesh settings and main turbulence parameters

表 1. 格栅板网格设置及主要湍流参数

| 流场编号 | 栅板宽度 $M/\text{mm}$ | 栅板间距 $b/\text{mm}$ | $I_u$ (%) | $L_u^x$ (m) |
|------|--------------------|--------------------|-----------|-------------|
| A    | 100                | 400                | 6.2       | 0.2027      |
| B    | 150                | 600                | 8.3       | 0.2028      |
| C    | 200                | 800                | 12.4      | 0.2029      |

## 3. 试验结果与讨论

采用无量纲的气动力系数表述模型风荷载，阻力系数  $C_D(t)$  和升力系数  $C_L(t)$  计算公式为

$$C_D(t) = \frac{2F_D(t)}{\rho U^2 D} \quad (1)$$

$$C_L(t) = \frac{2F_L(t)}{\rho U^2 D} \quad (2)$$

其中， $F_D(t)$  和  $F_L(t)$  为模型单位长度的阻力时程和升力时程，通过对测点所代表的表面压力积分所得。对阻力系数时程和升力系数时程取平均值可得平均阻力系数  $C_{D\_mean}$  和平均升力系数  $C_{L\_mean}$ ，取根方差可得脉动阻力系数  $C_{D\_std}$  和脉动升力系数  $C_{L\_std}$ 。采用无量纲参数斯托罗哈数  $St$  描述绕流经过结构表面的尾流旋涡脱落现象，其定义为

$$St = \frac{fD}{U} \quad (3)$$

其中  $f$  为旋涡脱落频率。在本文中用模型升力系数功率谱峰值对应的折算频率来表示斯托罗哈数  $St$ 。

### 3.1. 气动力系数及斯托罗哈数分析

#### 3.1.1. 自由流下圆角方柱气动力系数及斯托罗哈数分析

3 种不同圆角率方柱在自由流下气动力系数和斯托罗哈数随入射角变化的曲线图，如图 4 所示。由

图 4 可知：1) 标准方柱和  $R/D=0.15$  的圆角方柱平均阻力系数随着入射角增大呈现出先减小后增大的规律，其中方柱在  $10^\circ$  入射角时达到小入射角下的最小值，约为 1.73，当入射角大于  $25^\circ$  后，平均阻力系数突然减小并且大入射角下的最小值小于小入射角下最小值，约为 1.54； $R/D=0.15$  的方柱在  $5^\circ$  入射角下达到最小值，约为 1.13； $R/D=0.3$  的圆角方柱平均阻力系数随入射角增大而增大。不同圆角率方柱的平均升力系数随入射角的增大均呈现出先增大后减小的规律，其中标准方柱和  $R/D=0.15$  的圆角方柱  $C_{L\_mean}$  达到最大值的入射角与  $C_{D\_mean}$  达到最小值时的入射角一致； $R/D=0.3$  的平均升力系数在  $10^\circ$  入射角达到最大值。2) 标准方柱的脉动升力系数随入射角的增大呈现先减小后增大的规律，在入射角大于  $25^\circ$  后趋于 0；圆角方柱脉动升力系数随入射角增大而增大。方柱和  $R/D=0.15$  的圆角方柱斯托罗哈数随入射角的增大呈现先增大后减小的规律，其中方柱在  $12.5^\circ$  入射角时达到最大值，约为 0.148； $R/D=0.15$  的方柱在  $5^\circ$  入射角下达到最大值，约为 0.181。 $R/D=0.3$  的圆角方柱的斯托罗哈数随入射角增大逐渐减小。3) 在不同入射角下，随着圆角率的增大，平均阻力系数、平均升力系数逐渐减小；斯托罗哈数随圆角率的增大而增大。

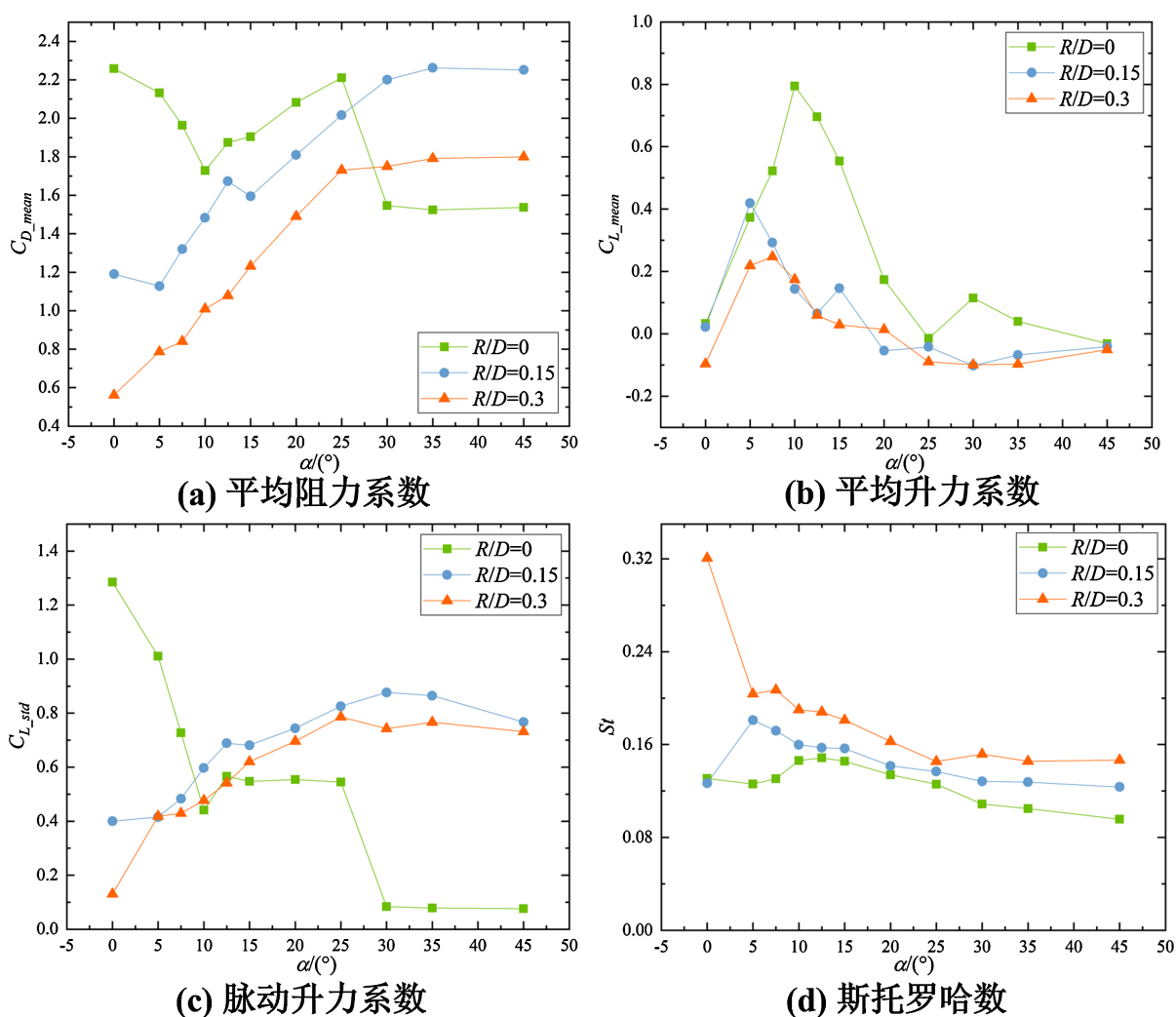


Figure 4. Variation of aerodynamic coefficients and Strouhal number of square cylinders with different rounded corner ratios with incident angle under free-stream

图 4. 自由流下不同圆角率方柱气动系数及斯托罗哈数随入射角的变化曲线

### 3.1.2. 不同湍流强度下光滑圆角方柱气动系数及斯托罗哈数分析

3 种不同圆角率方柱平均阻力系数随入射角在不同湍流度下的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知：1) 在湍流强度为 6.2% 时，标准方柱的平均阻力系数略高于自由流条件下的值。这是因为适中的湍流强度可以增强边界层的能量，同时湍流波动引入额外的表面压力扰动，导致阻力系数增大。随着湍流强度进一步增大，分离点显著延后，尾流结构趋于对称，阻力系数相对于自由流条件呈现降低趋势。小入射角下标准方柱的最小阻力系数出现位置从  $10^\circ$  提前至  $7.5^\circ$ 。同时，在大入射角范围内，平均阻力系数则随湍流强度的增大而增加。2) 对于  $R/D=0.15$  的圆角方柱，其平均阻力系数随湍流强度的增大而逐渐降低，相比自由流条件下的值更小。特别地，在湍流强度为 6.2% 时，当入射角超过  $15^\circ$  后，平均阻力系数开始高于自由流条件下的值，这是由于在大入射角下较高的湍流强度引发了尾流涡的强化以及流动的不稳定性增强。随着湍流强度的增大，平均阻力系数的最小值出现位置从  $5^\circ$  延后至  $7.5^\circ$ 。3) 对于  $R/D=0.3$  的圆角方柱，边界层附着能力更强，使流动在较小的入射角下保持稳定，阻力系数随入射角的增大先保持相对稳定，随后显著增大。整体上，随着湍流强度的增大，平均阻力系数逐渐减小，这是因为湍流进一步削弱了分离涡的强度和尾流压差。在湍流强度为 6.2% 时，当入射角达到  $35^\circ$  时，平均阻力系数开始超过自由流条件下的值。

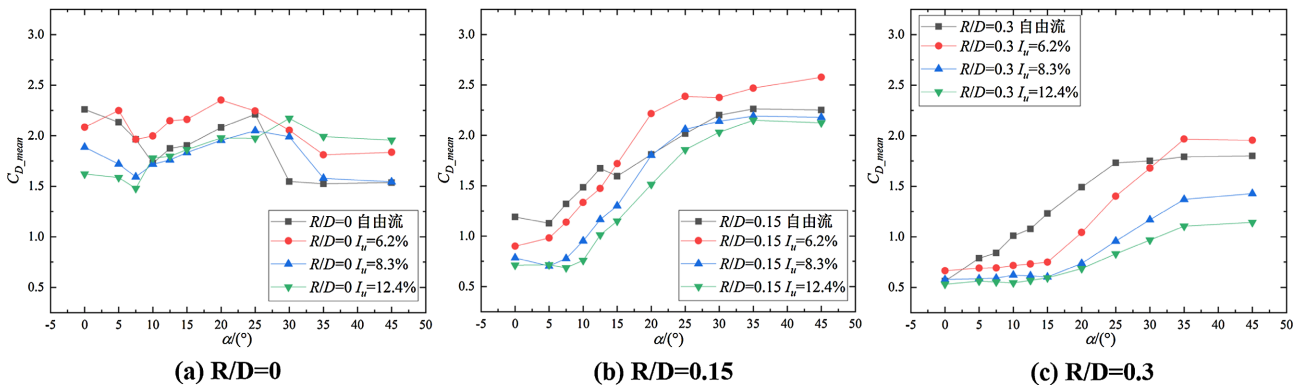


Figure 5. Variation of mean drag coefficient of square cylinders with different rounded corner ratios with incident angle under different turbulence degrees

图 5. 不同湍流度下圆角方柱平均阻力系数随入射角的变化曲线

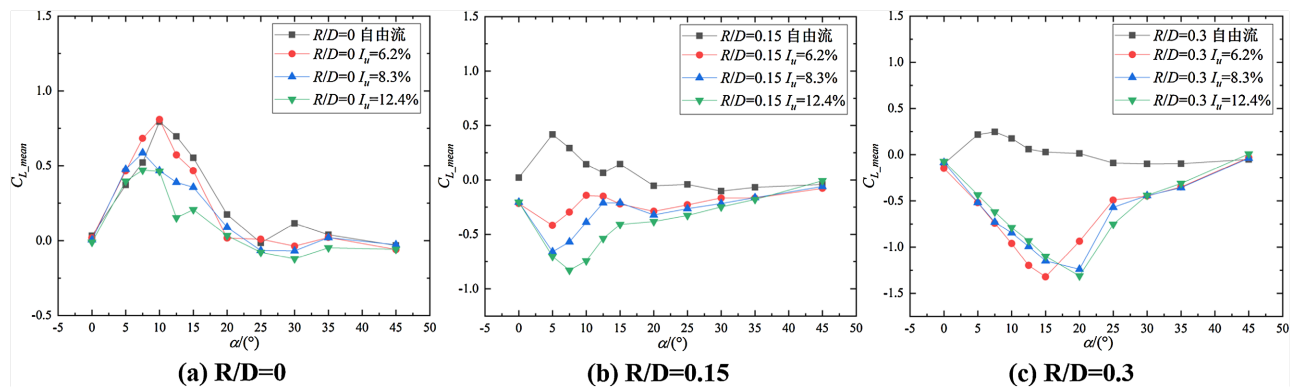


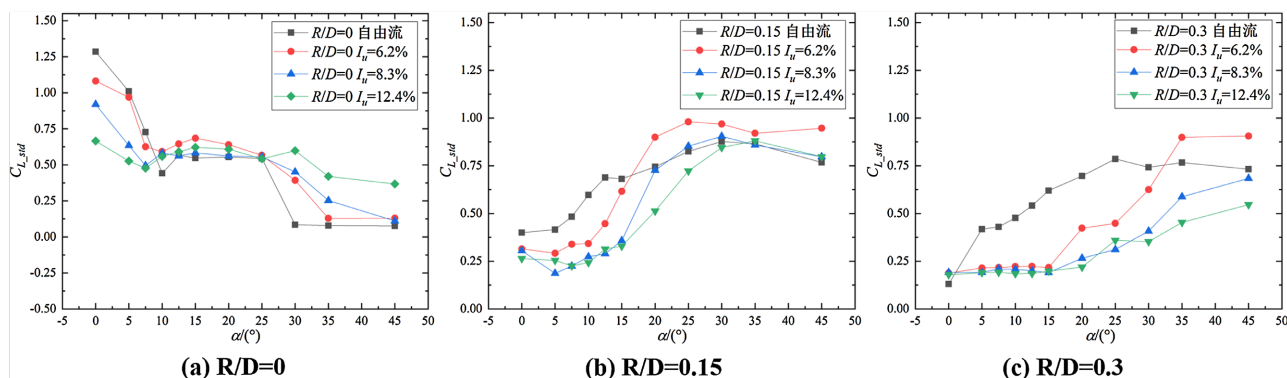
Figure 6. Variation of mean lift coefficient of square cylinders with different rounded corner ratios with incident angle under different turbulence degrees

图 6. 不同湍流度下圆角方柱平均升力系数随入射角的变化曲线

3 种不同圆角率方柱平均升力系数随入射角在不同湍流度下的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知：1)

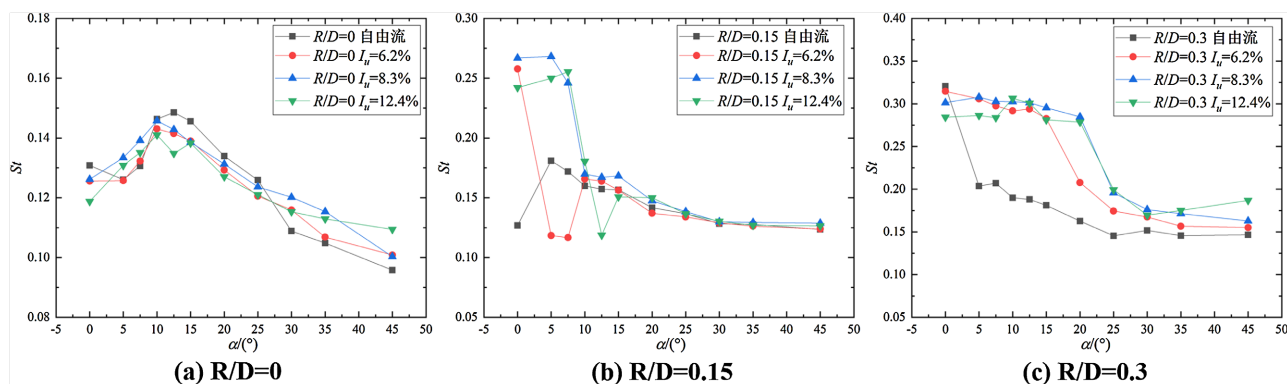
对于标准方柱, 在小入射角范围内, 平均升力系数迅速上升, 这主要是由于来流非对称分离形成的升力随入射角增加而增强。随着湍流强度增加, 湍流削弱了非对称分离的强度, 使平均升力系数峰值降低, 峰值位置从  $10^\circ$  变为  $7.5^\circ$ 。在大入射角范围内, 所有湍流强度下的平均升力系数趋于一致, 接近于零。2) 对于  $R/D = 0.15$  的圆角方柱, 随湍流强度增加, 平均升力系数由正转负, 并随入射角变化先减小后增大的趋势, 最小值位置与平均阻力系数一致, 在湍流影响下从  $5^\circ$  后移至  $7.5^\circ$ 。3) 对于  $R/D = 0.3$  的圆角方柱, 较大的圆角进一步增强了边界层附着能力, 使升力系数对湍流扰动更敏感。随湍流强度增加, 平均升力系数由正转负, 并随入射角变化呈“V”型趋势。

3 种不同圆角率方柱脉动升力系数随入射角在不同湍流度下的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知: 1) 标准方柱的脉动升力系数在小入射角时达到最大值, 随后急剧下降并趋于稳定; 湍流强度的增加通过削弱涡脱落的强度和规律性, 降低了整体脉动升力系数。2)  $R/D = 0.15$  的圆角方柱脉动升力系数随入射角增大而上升, 在大入射角处达到峰值; 湍流强度增加导致小入射角区域数值降低, 而在大入射角时, 湍流增强尾流的不对称性和涡脱落频率, 导致数值升高。3)  $R/D = 0.3$  圆角方柱展现出更为平缓的变化: 脉动升力系数随入射角缓慢增大; 湍流强度的增加进一步削弱了涡脱落强度和尾流波动, 导致整体数值明显降低, 但变化趋势保持一致。



**Figure 7.** Variation of fluctuating lift coefficient of square cylinders with different rounded corner ratios with incident angle under different turbulence degrees

**图 7.** 不同湍流度下圆角方柱脉动升力系数随入射角的变化曲线



**Figure 8.** Variation of Strouhal number of square cylinders with different rounded corner ratios with incident angle under different turbulence degrees

**图 8.** 不同湍流度下圆角方柱斯托罗哈数随入射角的变化曲线

3 种不同圆角率方柱斯托罗哈数随入射角在不同湍流度下的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知: 1)

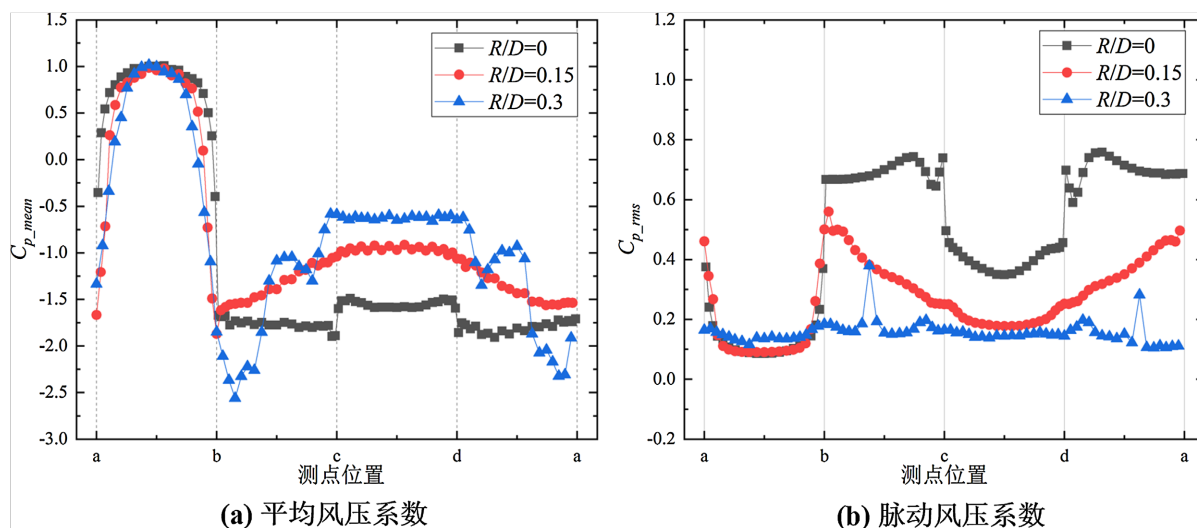
标准方柱斯托罗哈数峰值随着湍流度增大由  $12.5^\circ$  提前到  $10^\circ$ ，而后随入射角增大而减小；湍流强度增加使斯托罗哈数峰值略有降低。2)  $R/D = 0.15$  的圆角方柱随湍流强度的增大斯托罗哈数在  $0^\circ \sim 7.5^\circ$  间突增至 0.26 左右，随后，斯托罗哈数开始下降，但下降程度随湍流强度增加而减缓： $I_u = 6.2\%$  时在  $7.5^\circ$  降至 0.116， $I_u = 8.3\%$  时在  $10^\circ$  降至 0.169， $I_u = 12.4\%$  时在  $12.5^\circ$  降至 0.118。在入射角进一步增大时，所有湍流条件下的斯托罗哈数均呈现先回升至约 0.16，随后平缓下降的趋势。3)  $R/D = 0.3$  圆角方柱在湍流条件下斯托罗哈数整体较高，在  $0^\circ \sim 15^\circ$  范围内保持相对稳定，后随入射角增大缓慢下降；随着湍流强度的增加，斯托罗哈数开始下降的入射角逐渐后移，但各湍流条件下的整体变化趋势保持相似。4) 湍流强度的增加显著减弱了入射角对圆角方柱气动特性的影响。这种效应随圆角率的增大更为显著，因为较大的圆角增强了边界层附着性，减少了分离点位置的变化幅度，使涡脱落频率更加稳定。

## 3.2. 风压分布

### 3.2.1. 在 $0^\circ$ 入射角下风压分布

图 9 显示了不同圆角率的方柱在自由流下  $0^\circ$  入射角时的风压分布曲线。可见：1) 随着圆角率增大，背风侧的负压绝对值整体呈现出逐渐减小的趋势，考虑到迎风面平均风压系数变化不大，对应随着圆角率增大，平均阻力系数逐渐减小。2) 侧风面的平均风压系数均表现为负值，随圆角率的增大，圆角方柱的负压绝对值大于标准方柱，表明气流虽然都在两个前角点处发生了分离但圆角方柱的气流发生初次分离的位置后移，剪切层更贴近方柱侧面，尾流宽度变窄，容易发生再附现象，涡脱强度减弱。这是导致圆角方柱平均阻力系数和平均升力系数下降的主要原因，也是导致斯托罗哈数增大的原因[16][17]。3) 在试验雷诺数下  $R/D = 0.3$  的圆角方柱分离流在模型两侧前缘圆角处产生了较大的分离泡，导致侧风面吸力显著增大，出现明显峰值，形成再附着现象并在后角点再分离，导致尾流宽度缩小，引发特定的漩涡脱落造成平均阻力系数减小，斯托罗哈数增大，对应于临界区特征[10][18]。4) 脉动升力系数主要受模型侧风面脉动风压影响。圆角方柱侧风面脉动风压明显小于标准方柱侧风面脉动风压值，所以脉动升力系数在  $0^\circ$  入射角下随圆角率增大而减小。

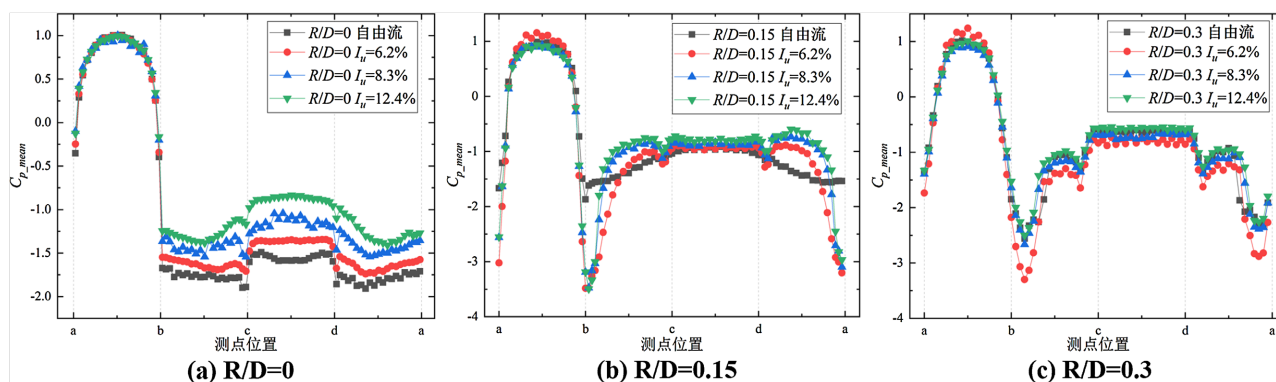
图 10 显示了不同湍流度下的圆角方柱平均风压系数分布曲线，由图 10 可知：1) 湍流度越大，各模



**Figure 9.** Mean wind pressure coefficient of square cylinder with different rounded corner ratios at  $0^\circ$  angle of incidence under free-stream

**图 9.** 自由流下  $0^\circ$  入射角时圆角方柱风压系数分布

型背风面负压极值越小, 对应平均阻力系数随湍流度增大而减小。2)  $R/D = 0.15$  的圆角方柱受湍流的影响, 在前缘圆角处产生较大的分离泡, 且在分离点达到最大的负压值, 且随着湍流度的增大, 分离泡逐渐减小, 造成平均升力系数的减小。可能是由于增加来流湍流使流体在侧表面重新附着, 在靠近后缘圆角处发生再分离, 导致旋涡脱落频率  $St$  增加, 使远离物体表面的自由来流的能量更多地进入边界层中, 促使分离边界层提前进入临界区。3)  $R/D = 0.3$  圆角方柱在 6.2% 湍流强度下, 前缘圆角处负压值最大。随湍流强度增加, 该处负压极值逐渐增大, 但始终保持小于自由流压力。

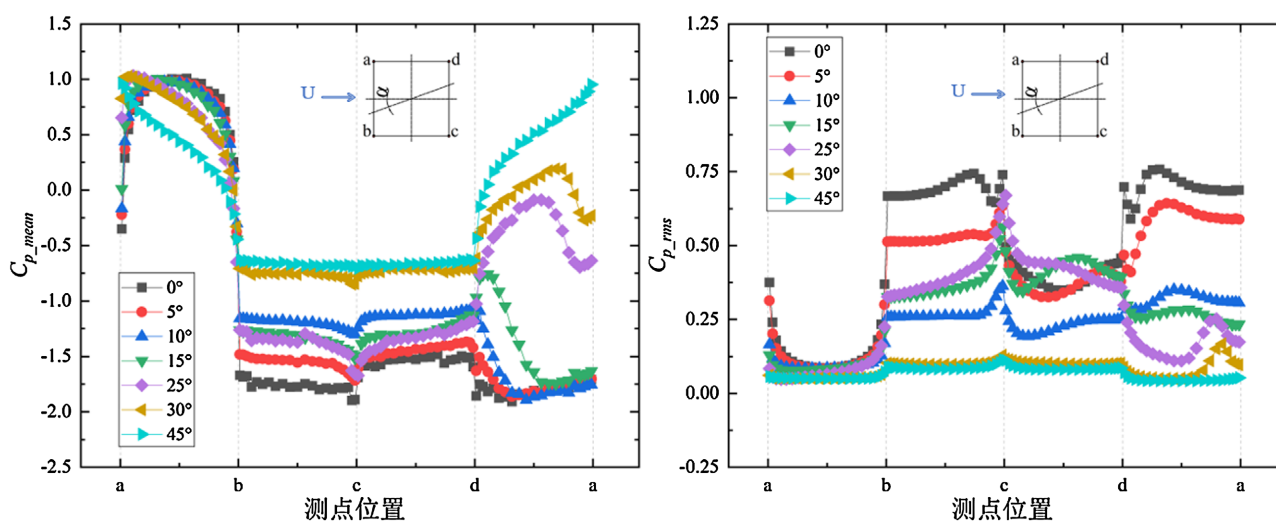


**Figure 10.** Mean wind pressure coefficient of square cylinder with different rounded corner ratios at  $0^\circ$  angle of incidence under different turbulence degrees

**图 10.** 不同湍流度下  $0^\circ$  入射角时圆角方柱平均风压系数分布

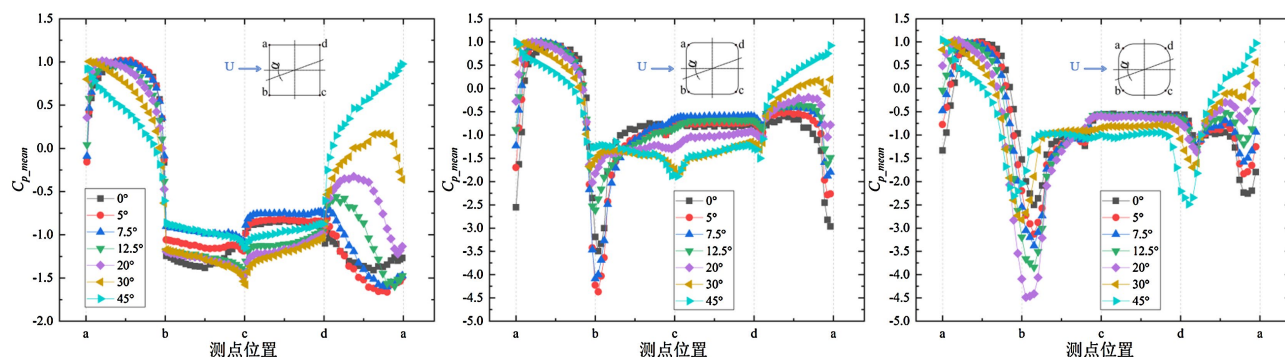
### 3.2.2. 入射角对圆角方柱风压特性影响

图 11 显示了标准方柱在自由流下位于不同入射角时的风压系数分布曲线。由图 11 可知, 随着入射角增加, 方柱上侧风面的平均风压系数逐渐增大。而背风面和下侧风面的风吸力先随入射角增大而增大,  $10^\circ$  时达到最小值。之后随着入射角的增大而减小。在  $30^\circ$  入射角时风吸力突然降低, 可能是因为模型直径较大, 气流在边角处产生剧烈加速效应, 对气流的裹挟能力进一步增强, 抑制了尾流回流的产生, 导致背风面与迎风面压力差异的减小, 进一步造成平均阻力系数减小; 同时各风面脉动风压接近于 0, 可能



**Figure 11.** Variation of pressure coefficient for standard square cylinder with angle of incidence under free flow

**图 11.** 自由流下标准方柱风压系数随入射角的变化曲线



**Figure 12.** Variation of mean wind pressure coefficient of square cylinder with different rounded corner ratios with incident angle under 12.4% turbulence degree

**图 12.** 在 12.4% 湍流度下方圆角方柱平均风压系数随入射角的变化曲线

是因为背风面的流动以低速回流为主，回流不稳定性减弱，造成脉动升力系数趋近于 0。

图 12 显示了在 12.4% 湍流度下方圆角方柱平均风压系数随入射角的变化曲线。由图 12 可知：1) 标准方柱在湍流条件下相比自由流在大入射角下迎风面和背风面的压力差增大，这种压力差的增加抵消了在自由流下大入射角时观察到的风吸力突然降低的现象，使得在湍流条件下平均阻力系数在大入射角时保持相对稳定，这可能是因为湍流涡旋的持续干扰使得方柱尾流区域变得更加复杂和不稳定，增加了尾流中的动能交换和混合过程。方柱背风面负压最小值出现在  $7.5^\circ$  入射角，对应湍流条件下平均阻力系数出现极值的入射角。2) 湍流增加了流体的动能交换和混合，造成流体在圆角处加速，导致小入射角下方圆角方柱前缘圆角处(a、b 点)吸力增加，为了恢复到基础压力，流体在减速过程中形成分离泡，随着入射角的增加，气流逐渐被阻止重新附着在下侧壁上，最终下侧表面(bc 面)的流体完全分离，而上侧表面(da 面)的流体类似于重新结合的流体。这种再附着现象一般出现在细长矩形柱体上[19]，carassale [9]在湍流作用下的  $R/D = 2/15$  的圆角方柱上也观察到类似情况。这解释了升力系数和斯托罗哈数在湍流下和自由流下趋势相反的现象。其中，随着湍流度的增大，圆角前缘处的负压值越大且形成的分离泡越小；在 12% 湍流强度下， $R/D = 0.15$  的圆角方柱前缘风压系数的极值出现在  $7.5^\circ$  入射角， $R/D = 0.3$  的圆角方柱前缘风压系数的极值出现在  $20^\circ$  入射角对应于平均升力系数出现极值的入射角。

#### 4. 结论

本文研究了湍流强度对圆角方柱的气动力系数和表面风压的影响，主要影响结果如下：

- 1) 随圆角率的增大，圆角方柱的平均阻力系数和平均升力系数逐渐减小，而斯托罗哈数逐渐增大。
- 2) 在不同入射角下，标准方柱风压系数变化显著，尤其在  $30^\circ$  时背风面和下侧风面风吸力突然降低，可能由气流加速与回流抑制引起。湍流条件下，方柱大入射角时压力差增大，抵消了自由流中风吸力降低现象，使阻力系数稳定，可能因湍流涡旋增加了尾流复杂性和动能交换。
- 3) 增加湍流强度使流体在圆角方柱侧表面重新附着，后缘圆角处发生再分离，导致平均阻力系数减小，旋涡脱落频率  $St$  增大。随湍流强度增加，圆角方柱的平均升力系数由正转负，并随入射角变化呈“V”型趋势。
- 4) 湍流强度的增加显著减弱了入射角对圆角方柱气动特性的影响。这种效应随圆角率的增大更为显著，因为较大的圆角增强了边界层附着性，减少了分离点位置的变化幅度，使涡脱落频率更加稳定。

#### 参考文献

- [1] 杜晓庆, 刘延泰, 董浩天, 等. 类方柱的气动性能和流场特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 88-98.

- [2] Kawai, H. (1998) Effect of Corner Modifications on Aeroelastic Instabilities of Tall Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **74**, 719-729. [https://doi.org/10.1016/s0167-6105\(98\)00065-8](https://doi.org/10.1016/s0167-6105(98)00065-8)
- [3] Hu, J.C., Zhou, Y. and Dalton, C. (2005) Effects of the Corner Radius on the near Wake of a Square Prism. *Experiments in Fluids*, **40**, 106-118. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0052-2>
- [4] Ajith Kumar, R., Sohn, C.H. and Gowda, B.H.L. (2009) Influence of Corner Radius on the near Wake Structure of a Transversely Oscillating Square Cylinder. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **23**, 2390-2416. <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0630-y>
- [5] Mandal, A.C. and Faruk, G.M.G. (1970) An Experimental Investigation of Static Pressure Distributions on a Group of Square or Rectangular Cylinders with Rounded Corners. *Journal of Mechanical Engineering*, **41**, 42-49. <https://doi.org/10.3329/jme.v41i1.5361>
- [6] Delany, N.K. and Sorensen, N.E. (1953) Low-Speed Drag of Cylinders of Various Shapes.
- [7] Lee, B.E. (1975) The Effect of Turbulence on the Surface Pressure Field of a Square Prism. *Journal of Fluid Mechanics*, **69**, 263-282. <https://doi.org/10.1017/s0022112075001437>
- [8] Tamura, T. and Miyagi, T. (1999) The Effect of Turbulence on Aerodynamic Forces on a Square Cylinder with Various Corner Shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **83**, 135-145. [https://doi.org/10.1016/s0167-6105\(99\)00067-7](https://doi.org/10.1016/s0167-6105(99)00067-7)
- [9] Carassale, L., Freda, A. and Marrè-Brunenghi, M. (2013) Effects of Free-Stream Turbulence and Corner Shape on the Galloping Instability of Square Cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **123**, 274-280. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.09.002>
- [10] Carassale, L., Freda, A. and Marrè-Brunenghi, M. (2014) Experimental Investigation on the Aerodynamic Behavior of Square Cylinders with Rounded Corners. *Journal of Fluids and Structures*, **44**, 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.10.010>
- [11] Miran, S. and Sohn, C.H. (2015) Numerical Study of the Rounded Corners Effect on Flow Past a Square Cylinder. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, **25**, 686-702. <https://doi.org/10.1108/hff-12-2013-0339>
- [12] Miran, S. and Sohn, C.H. (2016) Influence of Incidence Angle on the Aerodynamic Characteristics of Square Cylinders with Rounded Corners: A numerical investigation. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, **26**, 269-283. <https://doi.org/10.1108/hff-02-2015-0058>
- [13] Yang, Q., Yu, C., Liu, X., Yu, W. and Jiang, H. (2024) Study on the Aerodynamic Characteristics and Flow Mechanism of Square Cylinders with Rounded Corners. *Structures*, **62**, Article ID: 106298. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106298>
- [14] 郑云飞, 刘庆宽, 马文勇, 等. 端板对二维矩形风洞试验模型气动特性的影响[J]. 实验流体力学, 2017, 31(3): 38-45.
- [15] 张明月, 李永贵, 谭文俊, 等. 格栅湍流风场风参数变化规律的风洞试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(3): 427-433.
- [16] Cao, Y. and Tamura, T. (2018) Aerodynamic Characteristics of a Rounded-Corner Square Cylinder in Shear Flow at Subcritical and Supercritical Reynolds Numbers. *Journal of Fluids and Structures*, **82**, 473-491. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2018.07.012>
- [17] 杜晓庆, 田新新, 马文勇, 等. 圆角化对方柱气动性能影响的流场机理[J]. 力学学报, 2018, 50(5): 1013-1023.
- [18] Cao, Y. and Tamura, T. (2017) Supercritical Flows Past a Square Cylinder with Rounded Corners. *Physics of Fluids*, **29**, Article ID: 085110. <https://doi.org/10.1063/1.4998739>
- [19] Schewe, G. (2013) Reynolds-Number-Effects in Flow around a Rectangular Cylinder with Aspect Ratio 1:5. *Journal of Fluids and Structures*, **39**, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.02.013>