

## 等离子体流动控制试验与仿真对比研究

李正农<sup>†</sup>, 王鹏, 张学文

(湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**采用数值模拟与风洞试验相结合的方法,研究了当来流风速为 7 m/s、湍流度小于 10% 时,在 4 种不同方向的等离子体射流激励下,低矮房屋平屋面上流动分离的规律.研究表明:施加顺风向等离子体激励,能减小屋面的平均风压系数和极值风压系数;施加逆风向等离子体激励,能增大屋面前檐的平均风压系数和极值风压系数,同时减小屋面中部及后檐的平均风压系数和极值风压系数;施加引起由中间射向两边的等离子体激励,能增大屋面前檐的平均风压系数和极值风压系数,能减小屋面后檐的平均风压系数和极值风压系数;施加引起由两边射向中间的等离子体激励,能减小屋面前檐以及屋面后檐的平均风压系数,同时能增大屋面中间的平均风压系数和极值风压系数.

**关键词:**流动控制;等离子体;风洞试验;数值模拟

**中图分类号:**TU312.1

**文献标志码:**A

## Comparative Study of Experiment and Simulation on Plasma Flow Control

LI Zhengnong<sup>†</sup>, WANG Peng, ZHANG Xuwen

(Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** This article studied the rule of flow separation in low-rise building with flat roof through the combination of experimental method and numerical simulation, when the wind speed is 7 m/s and the turbulence is less than 10%. The results indicated that the mean wind pressure coefficient and extreme wind pressure coefficient of the roof decreased when applying along-wind plasma actuation; The mean wind pressure coefficient and extreme wind pressure coefficient increased in the front portion of the roof, and decreased in the back portion of the roof when applying headwind plasma actuation; The mean wind pressure coefficient and extreme wind pressure coefficient increased in the front portion of the roof and decreased in the back portion of the roof when applying the plasma actuation from middle to the both sides; The mean wind pressure coefficient decreased in the front portion of the roof and in the back portion, and the mean wind pressure coefficient and extreme wind pressure coefficient increased in the middle portion of the roof when applying the plasma actuation from the both sides to middle. The results of this paper can provide reference for wind resistance studies of building.

**Key words:** flow control; plasma; wind tunnel experiment; numerical simulation

\* 收稿日期:2018-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678233, 51478179), National Natural Science Foundation of China(51678233, 51478179)

作者简介:李正农(1962—),男,湖北武汉人,湖南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: zhn88@263.net

在各种自然灾害当中,风灾对人们的生活生产影响最大.虽然其作用幅度一般比地震小,但其发生的频率却比地震高得多.国内外统计资料表明,众多的自然灾害中,风灾造成的损失位列各种灾害之首<sup>[1]</sup>,近年来,风灾造成的损失逐年增加,比如,2016年9月,“莫兰蒂”台风造成17907间房屋损毁,直接经济损失至少102亿元,同时造成多人死亡.风灾造成的经济损失及人员伤亡巨大.如果在风灾发生前,能够对建筑进行有效的抗风设计来减少结构受到的风荷载,经济损失和人员伤亡将会得到一定的控制.

建筑的抗风问题是近年来风工程研究的热点.国内外有关科研学者通过现场实测、风洞试验、数值模拟等研究方法进行了大量建筑物风载特性的研究,并取得了重要的研究结论和成果.程志军等人<sup>[2]</sup>揭示了结构风致破坏机理分别有流动分离、内外压力共同作用、风荷载作用下的动力效应,其中流动分离是导致建筑物破坏最普遍的原因.

众多学者对如何减小建筑物所受风荷载进行了研究,传统的抗风设计是增加结构的强度和刚度来抵抗风荷载,这是一种消极、不经济的方式,随着结构抗风的发展,流动控制是基于建筑物受风荷载破坏的机理而提出的一种方法.流动控制称为边界层控制,指采取一定的局部控制措施来改变物体周围的全局流场,而达到改善流场结构、兴利减弊效果的方法. Choi等人<sup>[3]</sup>认为流动控制能实现延迟或者加速流动的转捩、减弱或者加强湍流掺混以及抑制或者促进分离等,从而实现控制尾流区的湍流结构、加强传热传质、减阻增升以及抑制流动引起的振动和噪声等目的.流动控制分为被动流动控制及主动流动控制.被动流动控制不需要任何辅助能量的输入,主要通过改变建筑结构的气动外形和边界条件等方式,从而实现不同的流动控制目的.尾部设置障碍物、水平或竖向贯穿开洞、增加表面粗糙度和优化截面形状等<sup>[4]</sup>都是常见的被动流动控制.主动流动控制需要借助于辅助能量,向流动环境中直接注入合适的扰动模式,系统内在模式相耦合达到控制边界层流动的目的.向流场中注入角动量<sup>[5]</sup>、等离子体流动控制<sup>[6]</sup>及采用吸/吹气方法<sup>[7]</sup>控制结构的风荷载及风致响应是常见的主动流动控制.研究表明<sup>[7]</sup>,被动控制具有控制不灵活、控制效果不明显等缺点,而主动控制则具有易控性及控制效果好等优点.等离子体流动控制是运用最广泛的主动流动控制方法<sup>[6]</sup>.

等离子体是处于一定温度下的电离气体,通常等离子体被称为“物质的第四态”,它是由许多带电粒子组成的一个体系.等离子体可从外加电磁场中获得能量,使其产生温度和压强的升高或者产生宏观的定向运动.利用等离子体的这一特性,可以对流场施加一定的可控扰动,在主动流动控制领域表现出潜在的应用前景<sup>[8]</sup>.

截止目前,等离子流动控制主要运用于航天飞行器中<sup>[9-10]</sup>,等离子体流动控制在建筑抗风领域研究还很少,本文是基础性研究,研究基本现象,旨在将等离子体流动控制运用到建筑风工程中,先对简单的情况进行研究.航天飞行器飞行时主要处于一种低湍流度的环境中,因此本文是研究建筑物在低湍流度风场中的情况.在实际情况中,建筑的形态各异,建筑周围的流场也很复杂,但本文为了方便观察试验现象,试验选取了一个较为简单的平屋顶进行研究.

## 1 试验概况

### 1.1 试验设备

试验在湖南大学风洞试验室的HD-3大气边界层风洞中进行,该风洞为低速、直流边界层风洞.模型试验区横截面宽3m,高2.5m,试验段风速0.5~20.0m/s连续可调.大气边界层模拟风场调试和测定用澳大利亚TFI眼镜蛇三维脉动风速测量仪(Cobra Probe)进行测量.该仪器的测量精度为0.5m/s,测量范围为2~100m/s.可用来测量流场的平均风速、湍流度以及脉动风功率谱等数据.风压测量、数据采集与处理系统采用美国Scanivalve扫描阀公司的DSM3400电子压力扫描阀系统.该系统能接8个压力扫描阀采集模块,每个扫描阀采集模块可接64个测点.采样频率为312.5Hz,量程为±10英寸水柱.

等离子体激励器有很多种,常见的有辉光放电、电晕放电、介质阻挡放电、大气压辉光放电、射频电晕放电、微波放电等.介质阻挡放电(DBD)激励器放电电极安装在介质板两侧,放电发生在电极附近,放电空间受限制较小,有利于生成较大面积的等离子体层,由于介质的存在,避免了火花或电弧的产生.介质阻挡放电激励器包括对称结构和非对称结构两种常见的形式,非对称结构激励器,多应用于流动控制领域,图1为非对称介质阻挡放电激励器示意图,文中采用的介质阻挡等离子体激励器

两电极中心的中心间距为 4 mm. 电极采用铜片, 长度为 170 mm, 宽度为 4 mm, 厚度 0.1 mm, 绝缘平板采用聚四氟乙烯, 试验时, 将电极用环氧树脂类胶粘剂粘接在绝缘平板的上、下表面. 在试验中, 为提高激励强度和扩大激励范围, 试验中将 6 个等离子体激励器组合使用, 其上电极连接电源的正极, 同时下电极接地. 图 2 为试验时的等离子体激励器, 试验时, 两边粘在模型侧面, 地面上的线将其固定在地面上. 高压高频电源给平板上的等离子体激励器提供能量, 使电极间具有电势差并能够维持稳定的放电现象. 电源的输出电压和频率连续可调, 范围分别为 0~30 kV 和 5~20 kHz, 且输出波形为正弦波. 试验时, 等离子体激励器两端的峰-峰值电压皆采用 15 kV, 频率皆采用 6.5 kHz.

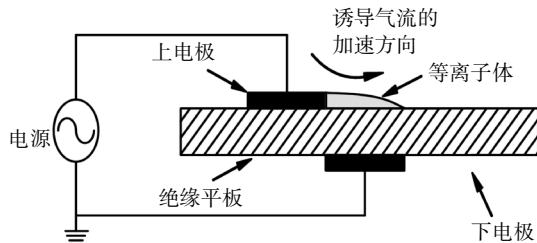


图 1 DBD 等离子体激励器示意图

Fig.1 The schematic of the DBD plasma actuator

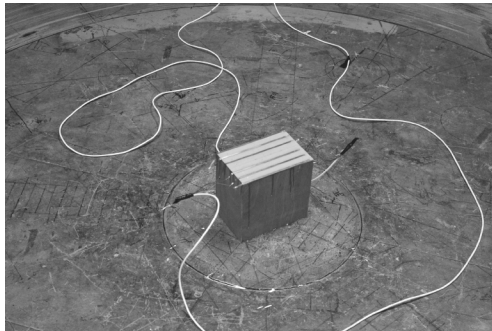


图 2 试验时的等离子体激励器

Fig.2 The plasma actuator during the experiment

## 1.2 试验模型

试验模型为无挑檐的平屋顶低矮房屋, 形状为长方体. 模型几何缩尺比为 1:40, 模型尺寸为 177.5 mm(长)×118 mm(宽)×200 mm(高), 如图 3 所示.

低矮房屋由 4 面墙体和 1 块屋盖组成, 等离子体激励器安装在平屋顶上. 墙体厚度为 1 mm. 屋板材料采用聚四氟乙烯, 厚度 1 mm, 相对介电常数为 5.5. 图 4 为低矮房屋放置在风洞试验室试验段, 其阻塞率远小于 5%, 满足风洞试验要求.

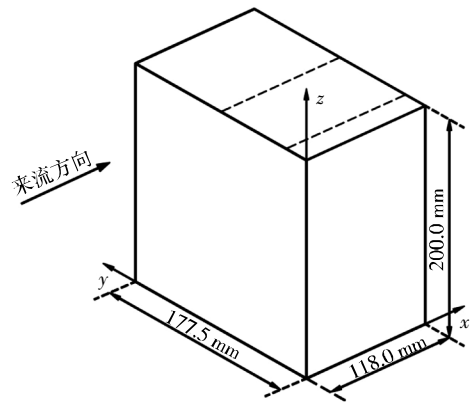


图 3 平屋顶低矮房屋示意图

Fig.3 The schematic diagram of the building model



图 4 试验布置图

Fig.4 Photograph of experimental set-up

## 1.3 风场及试验工况

大气边界层的模拟, 平均风速剖面 and 湍流度剖面如图 5 所示. 其风速介于 5.5~7 m/s 之间, 湍流度小于 10%, 屋面高度处风速为 7 m/s, 湍流度小于 2%.

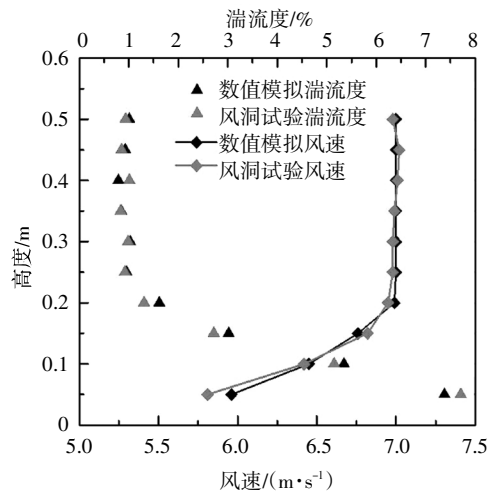
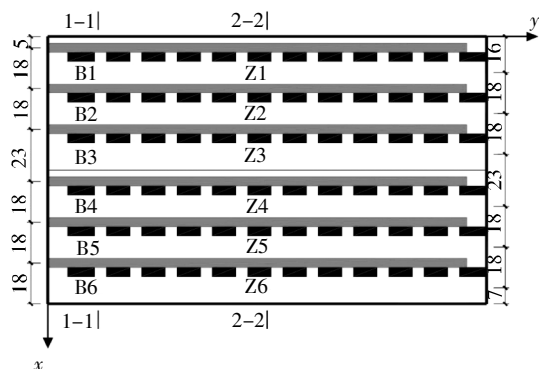


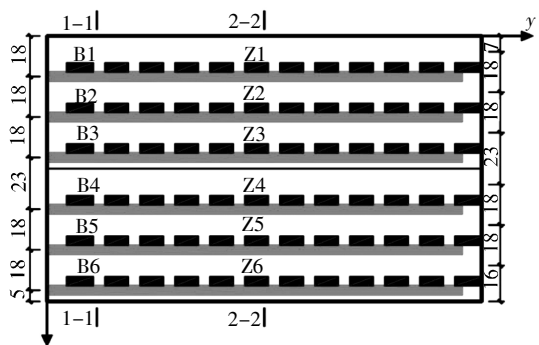
图 5 平均风速剖面 and 湍流度剖面

Fig.5 Profile of mean velocity and turbulence intensity

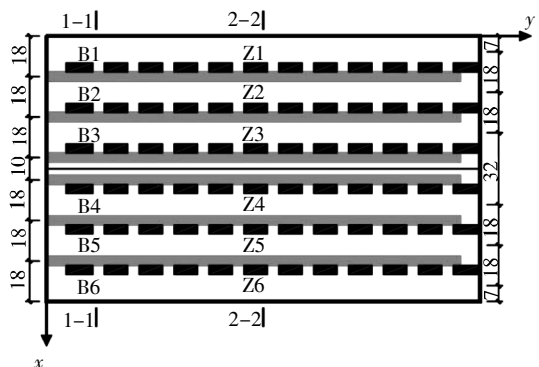
屋盖由 2 块平板组成, 每块平板都装有 3 对电极, 所有电极都平行于屋盖前缘, 每对电极诱导的射流都平行于屋面。根据两块平板的射流方向来分, 屋盖的等离子体激励器有 4 种不同的布置方式, 分别命名为工况 A、B、C 和 D, 如图 6 所示。图 6 中的屋盖安装在图 3 中的低矮房屋上。图 7 展示了各工况在截面 2-2 的剖面图。其中, 工况 A 诱导的射流方向和来流方向相同, 即引起顺风向射流; 工况 B 诱导的射流方向与来流方向相反, 即引起逆风向射流; 工况 C 能诱导出由屋盖中间射向屋檐两侧的射流; 工况 D 能诱导出由屋檐两侧射向屋盖中间的射流。



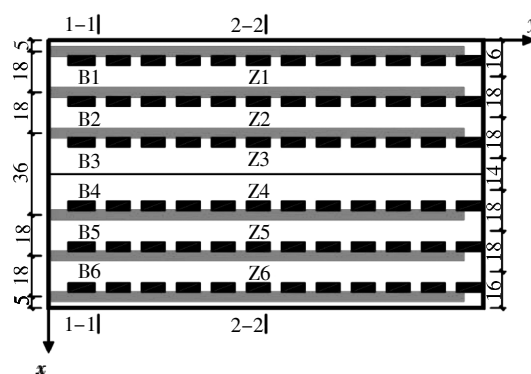
(a) 工况 A, 引起顺风向射流



(b) 工况 B, 引起逆风向射流



(c) 工况 C, 引起射向两侧屋檐的射流



(d) 工况 D, 引起射向屋盖中间的射流

图6 各工况等离子体激励器和测孔位置的布置图(单位:mm)

Fig.6 Arrangement sketch of plasma actuators and pressure holes in flat roofs (Unit:mm)

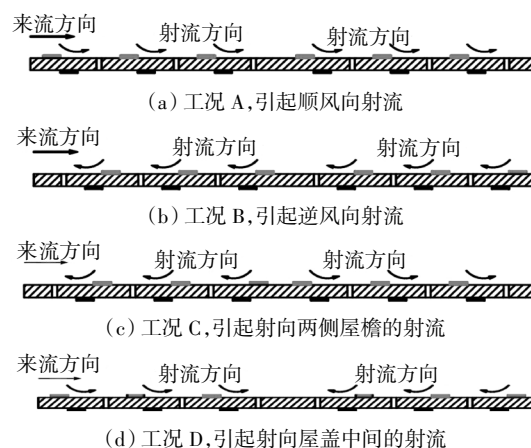


图7 各工况在截面2-2的剖面图

Fig.7 Cross-section sketch of flat roofs in section 2-2

测点布置基于对称性,测量只在中间及一测进行,在平屋盖中线及一侧共设置两排测压孔,如图3中虚线位置所示,测点布置图如图6所示.两排共有12个测压孔.两排测压孔所在的截面分别命名为截面1-1和截面2-2,分别处于 $y = 20.75\text{ mm}$ 和 $y = 88.75\text{ mm}$ 处.每个测压孔的直径为 $1.2\text{ mm}$ .连接扫描阀的绝缘塑料管(内径 $1\text{ mm}$ )的末端连接钢管,钢管(长度 $10\text{ mm}$ ,内径 $1\text{ mm}$ )的另一头插入测压孔中,沿着顺风向依次对各工况下的测孔进行编号,则截面1-1包括B1、B2、B3、B4、B5和B6;截面2-2包括Z1、Z2、Z3、Z4、Z5和Z6.由于电极布设方式不完全一样,导致图6中工况A、B、C和D之间的测孔位置存在差别.图8展现了等离子体激励器在黑暗房间中的发光现象.

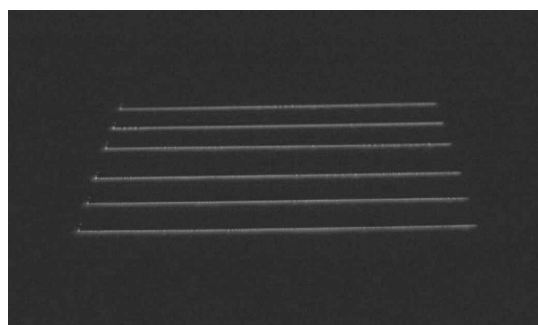


图 8 激励器发光图

Fig.8 The light of the glow discharge

## 2 模拟概况

### 2.1 等离子体的处理

众多研究学者在结构抗风研究中,对房屋进行现场实测研究<sup>[1]</sup>,但现场实测研究对客观条件要求苛刻,还需要大量的人力物力,相反,数值模拟是一种简便低成本的研究方法<sup>[2]</sup>.为了研究等离子激励的流动控制机理,需要对等离子体模型进行简化,并建立合理的计算模型.对 DBD 等离子体激励器进行简化的计算模型有多种,例如基于唯象模型的仿真,以及粒子群-蒙特卡罗的模型.但是,由于流体力学计算本身特别复杂,存在着流动分离、旋涡等复杂的流动结构,使用电场和流场耦合等算法会非常复杂,计算工作量会非常大.因此,本文采用 Shyy 等人<sup>[3]</sup>提出的一种唯象模型,其主要原理就是根据试验和理论分析,得到等离子体激励器产生的电场力分布范围以及大小,并将得到的电场力作为体积力,直接将其添加到流场计算的 N-S 方程中,从而模拟出等离子体激励对流场的影响.

Shyy 根据经验和理论分析,认为可以将等离子体激励器作用的区域简化为一个宽度为  $b$ 、高度为  $a$  的三角形区域  $OAB$ ,如图 9 和图 10 所示.图 9、图 10 分别表示等离子体激励器实际产生的电场线和简化后电场线的分布.从图 9 中可以看出,由于等离子体激励器产生的电场线在正极附近非常集中,而在负极上的分布很均匀,电场强度随着与正极的距离的增大而减小,因此,可以将其近似为平行于  $OAB$  三角形  $AB$  边的电场,电场强度近似为线性分布,在原点  $O$  处具有最大的电场强度  $E_0$ ,在  $OA$ 、 $OB$  以及  $AB$  边上的电场强度为截断电场强度  $E_b$ .当电场强度低于截断电场强度  $E_b$  时,电场力的强度不能击穿空气而不能产生等离子体,因此可以忽略不计.在整个三角形区域内,电场力平行于  $AB$  边,并呈线性分布.

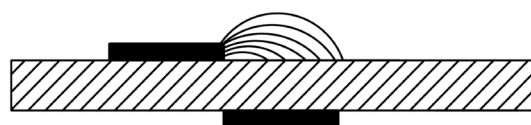


图 9 实际电场线分布示意图

Fig.9 The schematic of the actual electric field lines

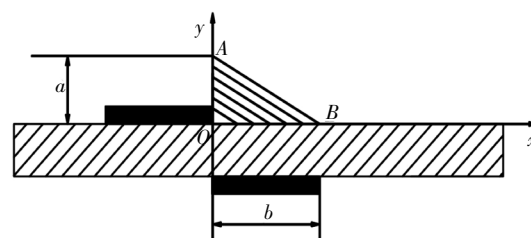


图 10 简化后电场分布示意图

Fig.10 The schematic of the simplified electric field lines

从简化后的电场分布示意图可以看出电场强度值在原点处最大,随着  $x, y$  的增加,以线性关系逐渐递减.整体呈阶梯分布,电场强度

$$|E| = E_0 - k_1x - k_2y, \quad k_1 = \frac{E_0 - E_b}{b}, k_2 = \frac{E_0 - E_b}{a} \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为原点处的电场强度值,定义为最大电场强度;  $E_b$  为  $AB$  边界上的电场强度值,定义为截止电场强度,小于此值,则不计电场力的作用.

根据电场的方向平行于三角形斜边  $AB$ ,可以得到电场强度在  $x$  和  $y$  方向的大小分别为:

$$E_x = \frac{Ek_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}, E_y = \frac{Ek_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \quad (2)$$

根据 Shyy 提出的唯象模型,等离子体诱导的  $x$  和  $y$  方向的体积力为:

$$F_{\text{tan ex}} = v\alpha\rho_e e_c E_x \Delta t \delta \quad (3)$$

$$F_{\text{tan ey}} = v\alpha\rho_e e_c E_y \Delta t \delta \quad (4)$$

本文中等离子体有效三角形区域的底边取 4 mm,高取 2 mm,峰-峰值电压为 15 kV,其它参数取值如下:  $v$  为频率取 6.5 kHz;  $\alpha$  为弹性碰撞有效系数,取为 1;电荷的密度  $\rho_e = 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ;电子电荷常数  $e_c = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ;边界的截止电压  $E_b = 30 \text{ kV/cm}$ ;放电时间  $\Delta t = 6.7 \text{ } \mu\text{s}$ ;  $\delta$  为狄克拉函数,用来确定电场力的范围,当  $E \geq E_b$ ,取  $\delta = 1$ ,反之为 0.

UDF 是 Fluent 软件提供给用户的接口,用户能够通过输入 UDF 与 Fluent 软件进行数据交流,从而解决一些 Fluent 未定义的问题.通过二次开发接口将用户自定义的函数(UDF)将体积力输入到 Fluent 中.

## 2.2 控制方程

流体的流动与传热过程千变万化,十分复杂,但都遵循自然界的普遍规律,Fluent 数值模拟遵循质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程三大基本方程。

### 1) 质量守恒方程

质量守恒方程在流场中的数学表达,又称作连续性方程。流场中任意一流体微元,单位时间内通过控制面流入的质量等于控制体中质量的增量。质量守恒的方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

式中: $\rho$  为流体密度; $t$  为时间; $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向流体的流速。

### 2) 动量守恒方程

动量守恒在流场中的数学表达式,又称作运动方程。控制体受到的外力以及单位时间内流入控制体的动量等于单位时间内控制体中流体动量的增量。动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (6)$$

式中: $p$  为静压; $\tau_{ij}$  为应力张量; $g_i$  为  $i$  方向上的重力体积力; $F_i$  则表示其它源项。等离子体体积力与坐标的关系通过 Fluent 的自定义函数添加到 N-S 方程中作为源项。Fluent 会根据自定义函数中的等离子体施加区域和对应体积力大小,在相应区域添加上体积力,就可模拟出等离子体激励对流场的影响。

### 3) 能量守恒方程

能量守恒定律是单位时间内外界传递到控制体的各种能量之和与该控制体在单位时间内能量的增量相等。能量守恒定律的本质是热力学第一定律,有热量交换的流体都满足该定律。能量守恒方程是关于能量守恒定律的数学描述,能量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho U T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (7)$$

式中: $T$  表示温度; $c_p$  表示比热容; $k$  表示流体的传热系数; $S_T$  为粘性耗散项,包括粘性作用所产生的机械能和内热源转化为热能的部分。

## 2.3 计算域、边界条件及网格

对所研究的对象建立物理模型,并将其抽象成数学、力学模型,然后确定结构周围流场空间的区域。本文研究等离子体激励对低矮房屋周围风场的影响,所建立的模型与风洞试验所使用的模型一致,建立的模型如图 11 所示。

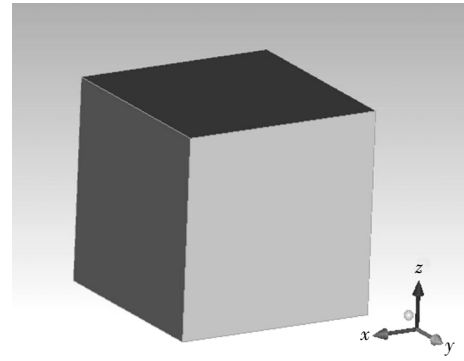


图 11 数值模拟低矮房屋模型

Fig.11 The numerical model of low-rise building

文中所建立模型的计算区域的尺寸为  $3\,000\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ ,阻塞率为 1.78%,同时也保证流场在计算区域内能够得到充分发展。数值模拟使用的网格采用结构化网格,其占用内存小,计算所需的资源较非结构化网格少。为了能够在结构表面加密网格,本文对计算域采用 C 型块的划分,共有 1 174 400 个网格,1 203 410 个节点,如图 12 所示。

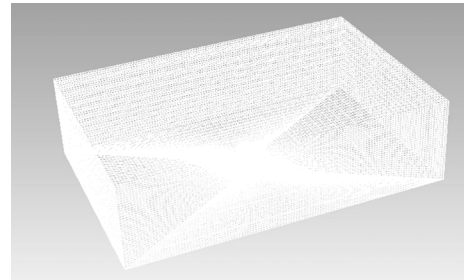


图 12 计算网格

Fig.12 The compute grid

入口处数值模拟风剖面与湍流度剖面如图 5 所示,其与风洞试验风剖面、湍流度剖面一致,数值模拟入口边界条件与风洞试验入口边界条件一致。

出口处选用充分发展的自由出流边界(out-flow),流域顶部、两侧面以及建筑表面和地面选用无滑移的静止壁面(wall)。

为了减少计算所需的时间,加快收敛进度,在进行大涡模拟前,首先使用雷诺平均法(RANS)来进行与时间无关的稳态计算,并为后续大涡模拟创造初始流场。稳态计算时,湍流模型选用具有较高精度和稳定性的 RNG  $k-\varepsilon$  模型,并使用非平衡壁面函数(Non-Equilibrium Wall Functions)来对近壁面进行处理,从而补充湍流模型。流体材料选用理想不可压缩气体,材料参数使用默认值。速度压力方程组采用 SIMPLEC 方法进行解耦,离散格式使用二阶迎风格式(Second Order Upwind)。在稳态计算收

敛以后,对流场进行初始化,这样能够利用稳态计算的结果作为大涡模拟的初始流场,从而加快大涡模拟的收敛速度.在使用大涡模拟计算时使用 Smagorinsky-Lilly 模型,同时使用基于解耦思想的 SIMPLEC 算法来对离散方程进行解耦,使用标准(Standard)离散格式离散压力项,使用中心差分格式(Bounded Central Differencing)来离散动量方程,同时瞬态方程的离散格式使用二阶隐式格式(Second Order Implicit).

对于稳态的模拟计算,收敛标准为各项残差下降至  $10^{-5}$  以下,对于大涡模拟,设置  $10^{-4}$  作为收敛的标准.瞬态计算的时间步长取为 0.005 s.

为了便于风洞试验与数值模拟的对比,在数值模拟中设置的监测点的数量与位置与试验中测压孔的数量与位置一致.

### 3 风洞试验与数值模拟结果的对比

#### 3.1 平均风压系数的变化

风压系数是结构风工程中一个重要的参数,本文参考点位置的坐标为  $x=-1.2$  m,  $y=-0.088$  5 m,  $z=0.2$  m,无量纲的风压系数  $C_p$  的计算公式如下:

$$C_p = \frac{p_i - p_0}{0.5 \rho U_0^2} \quad (8)$$

式中:  $p_i$  为测孔处的风压;  $p_0$  为参考点的风压;  $\rho$  为空气密度,取  $1.225$  kg/m<sup>3</sup>.

同时,由于各测孔所测的风压是非稳态的,因此采用时平均风压值.平均风压系数  $C_{p,mean}$  为:

$$C_{p,mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_p(t_i) \quad (9)$$

式中:  $N$  代表每一测点时程的数据量.

为了便于比较风洞试验及数值模拟屋面在等离子体激励前后屋面平均风压系数的变化,将各测点的风压系数进行分析,具体见图 13.

对于工况 A、工况 B、工况 C、工况 D 无等离子体激励时风洞试验的屋面平均风压系数分布的位置及大小与数值模拟的基本一致,差异在 3% 以内.这个差异由模拟过程中的假设及采集仪器的稳定性等原因造成,但对于本文来说差异在可接受范围之内.文中计算风压系数的变化量取风洞试验和数值模拟的平均值,屋面平均风压系数的最小值出现在屋面后檐,屋面平均风压系数介于  $-0.67 \sim -0.60$  之间.施加顺风向等离子体激励,能减小屋面的平均风压系数,屋面前檐减小量最大,最大处减小了 6.4%;施加逆风向等离子体激励,能增大屋面前檐的平均风压系数,最大处增大了 11.3%,同时减小了屋面中部及

后檐的平均风压系数,最大处减小了 4.6%;施加引起由中间射向两边的等离子体激励,能增大屋面前檐的平均风压系数,最大处增大了 6.5%,能减小屋面后檐的平均风压系数,最大处减小了 4.3%;施加引起由两边射向中间的等离子体激励能减小屋面前檐以及屋面后檐的平均风压系数,最大处减小量了 3.1%,同时能增大屋面中间的平均风压系数,最大处增大了 3.2%.

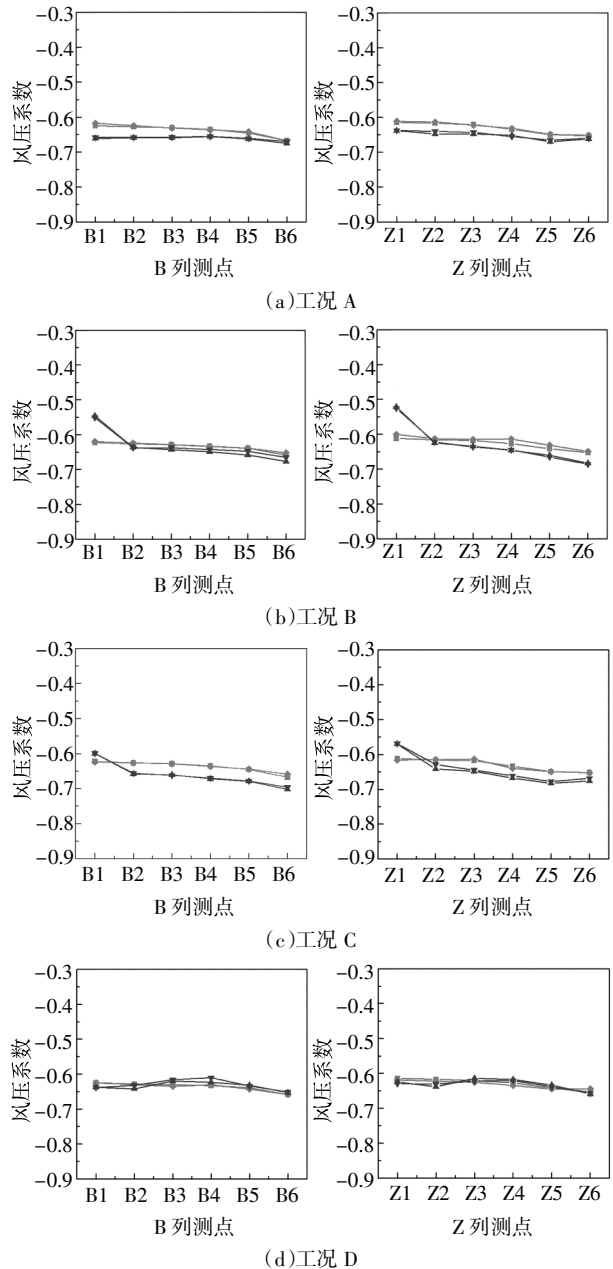


图 13 试验和模拟各测点平均风压系数图

Fig.13 The wind pressure coefficient from experimental data and numerical simulation

### 3.2 极值风压系数的变化

房屋在风灾下的破坏往往是由于风荷载超过了房屋的承载力引起,建筑物在风灾下的破坏是由于风压极值超过房屋的承载力引起,因此本文对风洞试验及数值模拟所测得的数据进行处理,计算出90%保证率下的极大值风压系数及90%保证率下的极小值风压系数的变化,见图14。

对于工况 A、工况 B、工况 C、工况 D 无等离子体激励时风洞试验的屋面在 90% 保证率下极值风

压系数分布的位置及大小与数值模拟的一致,差异在 3% 以内. 这个差异由模拟过程中的假设及采集仪器的稳定性等原因造成,但对于本文来说差异在可接受范围之内. 文中计算风压系数的变化量取风洞试验和数值模拟的平均值,施加顺风向等离子体激励,在 90% 保证率下,屋面的极大值风压系数均减小,最大处减小了 6.5%,屋面的极小值风压系数均减小,最大处减小了 5.5%;施加逆风向等离子体激励,在 90% 保证率下,屋面前檐处极大值风压系

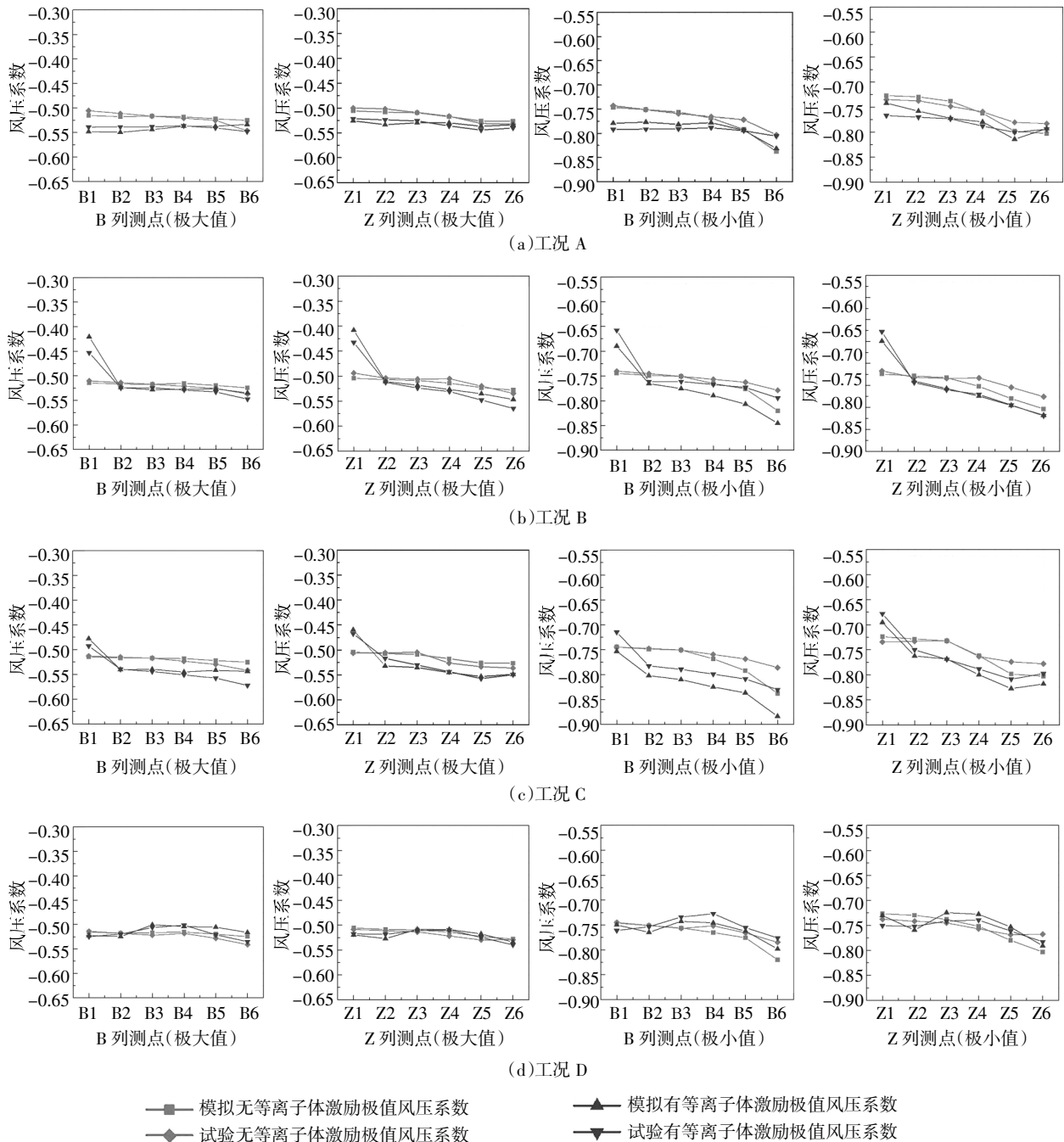
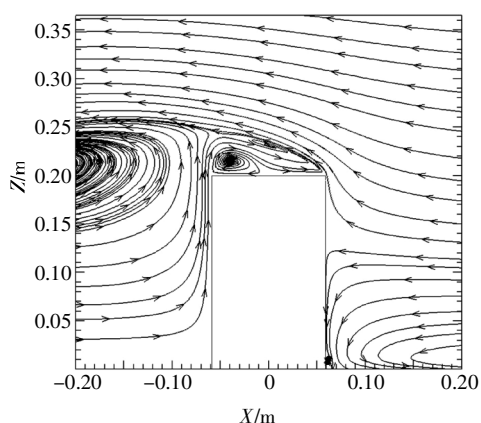


图 14 90%保证率下各测点的极值风压系数图

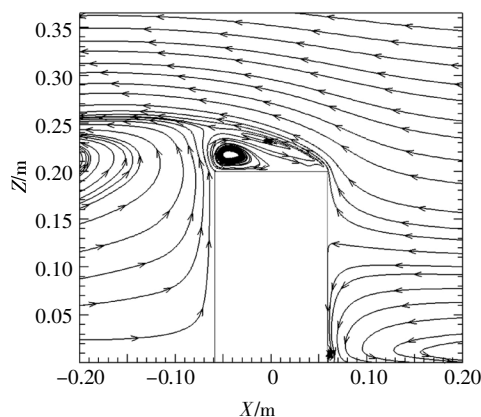
Fig.14 The extreme wind pressure coefficient below 90% guarantee rate

数增大,最大处增大了 15.8%,其他地方均减小,最大处减小了 4.5%;屋面前檐处极小值风压系数增大,最大处增大了 11.3%,其他地方均减小,最大处减小了 4.5%;施加引起由中间射向两边的等离子体激励,在 90%保证率下,在屋面前檐处极大值风压系数增大,最大处增大了 8.2%,其他地方均减小,最大处减小了 5.5%,在屋面前檐处极小值风压系数增大,最大处增大了 5.8%,其他地方均减小,最大处减小了 6.7%;施加引起由两边射向中间的等离子体激励,在 90%保证率下,在屋面前檐处极大值风压系数减小,最大处减小了 2.7%,其他地方均增大,最大处增大了 3.2%;在屋面前檐处极小值风压系数减小,最大处减小了 2.9%,其他地方均增大,最大处增大了 3.0%。

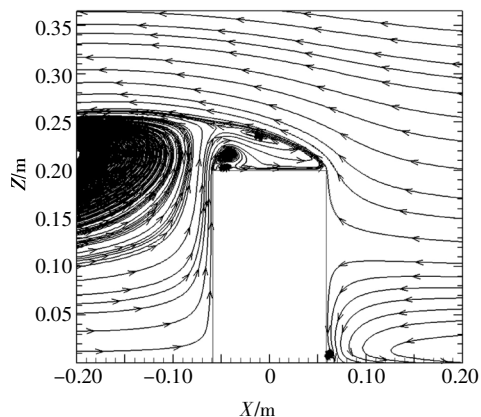
由于屋面上部的剪切层产生的环流,形成涡旋区,涡旋气流的风向与来流风相反,因此会在屋面产生吸力,文中整个屋面都是负压,屋面负压大小与漩涡区的位置和屋顶近壁面流速有关,在本文中各工况下,屋顶近壁面来流风速和漩涡的位置在等离子激励作用下各不相同,来流工况 A 引起顺风向射流,顺风向射流使位于屋面后檐的旋涡增大并向下游移动,减小了屋面正上方的旋涡,顺风向等离子体射流使该区域流体的流速加快,从而导致整个屋面风压系数变小,增大了屋面的负压;工况 B 引起逆风向射流,逆风向射流能在屋面后半部分的上方诱导出两个反向旋转的旋涡,同时减小了屋面正上方的旋涡,逆风向的射流使屋面流体流速减小,从而导致屋面前檐的风压系数增大,减小了屋面前檐的负压,屋面中部及后部风压系数减小,增大了屋面中部及后部的负压;工况 C 引起屋盖中间射向屋檐两侧的射流,使屋面后半部分的旋涡增大并向下游移动,屋面正上方的旋涡减小并向下游移动,诱导的射流减小了屋面前檐来流风速,增大了屋面后檐来流风速,从而使屋面前缘风压系数增大,减小了屋面前檐的负压,屋面中部及后檐风压系数减小,增大了屋面中部及后檐的负压;工况 D 引起屋檐两侧射向屋盖中间的射流,使屋面后半部分的旋涡增大并向下游移动,屋面正上方的旋涡减小并向下游移动,在屋面前檐形成了一个新旋涡,诱导的射流使减小了屋面后檐来流风速,增大了屋面前檐来流风速,从而使屋面前缘及后檐风压系数减小,增大了屋面前檐及后檐的负压,屋面中部的风压系数增大,减小了屋面中部的负压. 其流线图变化见图 15.



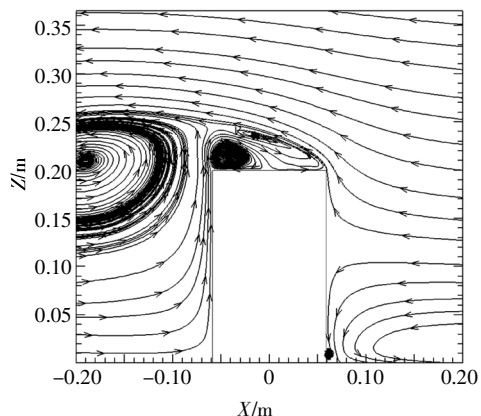
(a) 无等离子体流线图



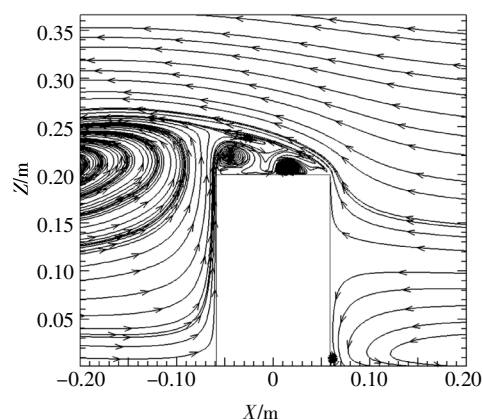
(b) 工况 A 流线图



(c) 工况 B 流线图



(d) 工况 C 流线图



(e)工况 D 流线图

图 15 各工况下的流线图

Fig.15 The streamline under different operating conditions

## 4 结论

通过在房屋上安装等离子体激励器诱导出 4 种不同方向的等离子体射流进行风洞试验,试验研究了不同方向的等离子体射流对屋面平均风压系数和极值风压系数的影响.采用 Fluent 对试验工况进行数值模拟,研究了不同方向的等离子体激励对屋面平均风压系数及极值风压系数的影响.试验结果和数值模拟结果吻合.试验结果表明:等离子体能有效地进行流动控制,能改善屋面的局部风压系数的大小及分布,可用于建筑结构抗风.具体描述如下:

1) 本文的数值模拟简化方法能有效地模拟出等离子体的激励效果.在边界条件与风洞试验条件一致的情况下,将等离子体激励简化为体积力通过 UDF 接口加入到数值模拟软件中,数值模拟结果与风洞试验结果吻合.

2) 施加不同方向的等离子体对平屋顶屋面的平均风压系数和极值风压系数的影响不同,但在不同方向的等离子体激励下,极值风压系数的变化规律与平均风压系数的变化规律一致.

3) 在湍流度小于 10% 的时候,等离子体流动控制能有效地减小局部风荷载,施加逆风向等离子体激励及中间射向两边的等离子体激励能有效减小屋面前檐的风荷载,但施加逆风向等离子体激励对屋面前檐风荷载减小效果更明显.施加引起由两边射向中间的等离子体激励,能有效减小屋面中间的风荷载,这对以后的结构抗风具有参考意义.

## 参考文献

[1] 黄本才.结构抗风分析原理及运用[M].上海:同济大学出版社,

2001:9—15.

HUANG B C.Principle and application of structural wind resistance analysis [M]. Shanghai:Tongji University Press,2001:9—15.(In Chinese)

[2] 程志军,楼文娟,孙炳楠,等.屋面风荷载及风致破坏机理[J].建筑结构,2000,21(4):39—47.

CHENG Z J,LOU W J,SUN B N,*et al.* Wind load on roof structures and mechanism of wind-induced damage [J]. Journal of Building Structures,2000,21(4):39—47.(In Chinese)

[3] CHOI H,JEON W P,KIM J. Control of flow over a bluff body[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2008,40:113—139.

[4] 李正农,宫博,卢春玲,等.低矮建筑物的抗风研究现状[J].自然灾害学报,2007,16(6):115—121.

LI Z N,GONG B,LU C L,*et al.* Status quo of research on wind-resistance of low-rise buildings [J]. Journal of Natural Disasters,2007,16(6):115—121.(In Chinese)

[5] KUBO Y,MODI V J,KOTSUBO C.Suppression of wind-induced vibrations of tall structures through moving surface boundary-layer control [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1996,61:181—194.

[6] 吴云,李应红.等离子体流动控制研究进展与展望[J].航空学报,2015,36(2):381—405.

WU Y,LI Y H. Progress and outlook of plasma flow control [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica,2015,36(2):381—405.(In Chinese)

[7] 辛大波,欧进萍.定常吸气改善桥梁断面风致静力特性的数值研究[J].沈阳建筑大学学报,2008,24(1):1—5.

XIN D B,OU J P. Numerical investigation in improving aerodynamic performances of drag force of cross section for bridge box girders by steady air-suction [J]. Journal of Shenyang Jinzhu University Natural Science,2008,24(1):1—5.(In Chinese)

[8] 马腾才,胡希伟,陈银华.等离子体物理原理[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2012:368—370.

MA T C,HU X W,CHEN Y H. Plasma physics[M]. Hefei:Press of University of Science and Technology of China,2012:368—370.(In Chinese)

[9] POST M L,CORKE T C. Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators [J]. AIAA Journal,2004,42(11):2177—2184.

[10] LI Y H,WU Y,ZHOU M,*et al.* Control of the corner separation in a compressor cascade by steady and unsteady plasma aerodynamic actuation[J]. Experiments in Fluids,2010,48(6):1015—1023.

[11] 李正农,余蜜,吴红华,等.某低矮模型房屋实测风场和风压的相关性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(5):70—78.

LI Z N,YU M,WU H H,*et al.* Correlation research of the measured wind field and wind pressure of a low-rise building [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2016,43(5):70—78.(In Chinese)

[12] 卢春玲,李秋胜,黄生洪,等.大跨度屋盖风荷载的大涡模拟研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2010,37(10):7—12.

LU C L,LI Q S,HUANG S H,*et al.* Large eddy simulation of wind loads on long-span roofs [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2010,37(10):7—12.(In Chinese)

[13] SHYY W,JAYARAMAN B,ANDERSSON A. Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics[J]. Journal of Applied Physics,2002,92(11):6434—6443.