

# 方柱风荷载特性的数值模拟研究

杨露

(安徽建工检测科技集团有限公司 合肥 230000)

**摘要:** 基于计算流体力学软件 ANSYS FLUENT, 采用 SST k- $\omega$  湍流模型, 对雷诺数为  $2.2 \times 10^4$  和  $5.4 \times 10^4$  的均匀流场下方柱进行模拟, 归纳并总结了不同速度下方柱的升力系数、阻力系数以及扭矩系数, 选择出最优的模拟方案, 并分析方柱表面风压系数。结果表明: 边界层网格高度、时间步长等参数均对模拟结果有影响, 当首层网格高度为  $1.5 \times 10^{-4}$  m、时间步长取 0.002s 时, 计算结果最优; 方柱的平均阻力系数为 2.052, 平均升力系数和平均扭矩系数均接近 0; 脉动升力系数为 1.481。

**关键词:** 方柱; SST k- $\omega$  湍流模型; 气动力系数; 风压系数; 数值模拟

Numerical simulation study of wind load characteristics of square column

Yang Lu

((The Construction Engineering Inspection Technology Group Limited of Anhui Province, Hefei 230,000)

**Abstract:** Based on the computational fluid dynamics software ANSYS FLUENT, the SST k- $\omega$  turbulence model was used to simulate a square column under a uniform flow field with Reynolds number of  $2.2 \times 10^4$  and  $5.4 \times 10^4$ . The lift coefficient, drag coefficient and torque coefficient of the square column at different velocities were summarized and concluded, and the optimal simulation solution was selected. The results show that: the height of the boundary layer grid and the time step have an influence on the simulation results, when the height of the first layer grid is  $1.5 \times 10^{-4}$  m and the time step is 0.002s, the calculation results are optimal; the average drag coefficient of the square column is 2.052, the average lift coefficient and the average torque coefficient are close to zero; the pulsation lift coefficient is 1.481.

**Keywords:** square column; SST k- $\omega$  turbulence model; Aerodynamic coefficient; Wind pressure coefficient; Numerical simulation

## 0 引言

方形截面是实际工程中最为常见的截面形式之一, 由于其分离点位置确定且截面形式简单, 一直是数值模拟的主要研究对象之一, 在数值模拟研究中, 方形截面建筑常被简化为方柱结构, 目前国内外学者对方柱绕流展开了一系列研究。

李真子<sup>[1]</sup>对雷诺数 22000 的方柱绕流进行了细致的模拟研究, 并研究了其瞬态流场和尾流发展的轨迹。周强<sup>[2]</sup>对高雷诺数下的方柱绕流特性进行了数值模拟研究, 并定量的给出了一系列细致的结果。秦浩<sup>[3]</sup>利用 PIV 技术对大雷诺数下的方柱绕流进行分析, 并基于 POD 方法重构流场。郜阳<sup>[4]</sup>研究了二维方柱的阻塞效应, 对比方柱平均阻力系数、脉动升力系数和斯托罗哈数随阻塞率的变化规律。也有学者对类方柱结构进行研究工作, 杜晓庆<sup>[5]</sup>采用数值模拟方法, 对低雷诺数下的 6 种类方柱进行了研究, 并对比了其气动性能。

本文采用 SST k- $\omega$  湍流模型, 以雷诺数为  $2.2 \times 10^4$  和  $5.4 \times 10^4$  的方柱为研究对象, 对均匀流下方柱的气动力特性及风压特性进行数值模拟研究, 验证数值模拟方法的准确性和有效性, 并明确方柱的各项风荷载参数数值特征。

## 1 湍流控制方程

### 1.1 质量守恒方程

质量守恒定律是指单位时间内, 微元体中流体质量的增加与质量的流入相等, 方程如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中,  $\rho$ —空气密度;

T—时间;

u、v、w—速度在 x、y 和 z 方向的分量。

### 1.2 动量守恒方程

动量守恒方程是指微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体的各种力之和。动量守恒方程可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div} \nabla (\rho u u) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div} \nabla (\rho v u) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div} \nabla (\rho w u) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, p—微元体上的压力;

$\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{xz}$ —粘性应力  $\tau$  的分量;

$F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  是微元体上的体力。

### 1.3 SST k- $\omega$ 模型

SST (Shear Stress Transport) k- $\omega$  湍流模型又称剪切应力输运模型, 它既有 k- $\omega$  湍流模型在壁面附近的准确特性, 又拥有 k- $\epsilon$  湍流模型不依赖于自由流动的特点。其在计算屋面分离流时具有较高的精度, 并且具有良好地收敛性。SST k- $\omega$  模型的控制方程定义为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\Gamma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\Gamma_\omega) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (4)$$

式(5)和式(6)中,  $G_\omega$  表示为速度梯度引起的湍动能生成项,  $\Gamma_k$  表示为 k 的对流项, 代表的对流项,  $Y_k$  代表由于湍流运动引起的 k 的有效扩散项,  $Y_\omega$  代表由于湍流运动引起的  $\omega$  的有效扩散项。

### 2 计算模型及参数设定

本文的流场采用均匀流场, 来流速度分别为 4m/s 和 10m/s, 对应流场雷诺数为  $2.2 \times 10^4$  和  $5.4 \times 10^4$ , 雷诺数的计算公式为:

$$Re = \frac{\rho U d}{\eta} \quad (5)$$

式中 U、 $\rho$ 、 $\eta$  分别为流体的流速、密度与动力黏性系数, d 为特征长度。

计算域具体细节：方柱边长为  $L=0.08m$ ，为保证阻塞率为5%以下，计算域大小取为  $37.5L(\text{流向 } x) \times 25L(\text{横向 } y)$ ，建筑前流场长度为  $12.5L$ ，为使风场充分发展，后流场长度取  $25L$ 。

### 3 不同参数对结果的影响

为了明确不同来流风速下边界层网格高度和时间步长对计算结果的影响，分别采用三组各四种不同网格方案对比不同参数对模拟精度的影响，并将结果与文献中的试验结果和模拟结果对比，对比结果如表 1。表格中  $C_D$ 、 $C_L'$ 、 $C_M$  分别代表平均阻力系数、脉动升力系数和平均扭矩系数。

#### 3.1 时间步长结果对比

CaseB1- CaseB4 对应了时间步长从  $0.0002s-0.004s$  的计算结果，计算时长均控制为  $10s$ ，对应的计算步数分别为  $50000$ 、 $10000$ 、 $5000$ 、 $2500$ ，由于 Case B3 和 Case B4 对应的计算步数较少，为了防止由此原因引发的误差，故又对这两个方案进行了补充计算，均将其计算步数补充至  $10000$  步，对应时长为  $20s$  和  $40s$ ，数据结果已列出（括号中的数据）。

由对比结果可知，当时间步长增加至  $0.004s$  时，脉动升力系数已远超文献中的试验值。而 CaseB1- CaseB3 的平均阻力系数和脉动升力系数均满足文献中的试验值和模拟值，其中 CaseB3 的平均阻力系数最小且最接近规范中对于平均阻力系数为  $2.000$  的规定。

#### 3.2 边界层网格高度结果对比

CaseA1- CaseA3 和 CaseC1- CaseC3 分别对应了不同雷诺数下方柱首层网格高度的对比结果（如表 1 所示），边界层网格高度在  $5 \times 10^{-5}-2 \times 10^{-4}$  变化时，对计算结果影响不大，且均在文献值的范围之内，但低雷诺数方案（ $Re=2.2 \times 10^4$ ）的平均升力系数结果偏大，高雷诺数方案（ $Re=5.4 \times 10^4$ ）中 CaseC1 和 CaseC4 的平均阻力系数和脉动升力系数出现较明显的突变，这对数值模拟不利，考虑计算时间和计算效率，最终认为边界层网格高度为  $1.5 \times 10^{-4}$  时最优。

综合对时间步长和边界层网格高度的对比分析，最终选择 CaseB3 作为后续研究的网格方案，其对应的时间步长为  $0.002s$ ，边界层网格高度为  $1.5 \times 10^{-4}m$ 。

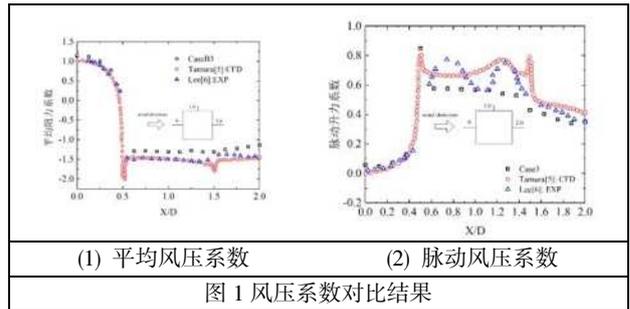
表 1 方柱计算结果对比及验证

网格方案	边界层网格高度(m)	时间步长(s)	$C_D$	$C_L'$	$C_M$
CaseA1	$5 \times 10^{-5}$	0.001	2.109	1.548	-0.012
Re=2. CaseA2	$1 \times 10^{-4}$	0.001	2.092	1.586	0.011
CaseA3	$1.5 \times 10^{-4}$	0.001	2.117	1.605	-0.015
CaseB1	$1.5 \times 10^{-4}$	0.0002	2.187	1.472	-0.009
CaseB2	$1.5 \times 10^{-4}$	0.001	2.122	1.417	-0.002
Re=5. CaseB3	$1.5 \times 10^{-4}$	0.002	2.053(2.052)	1.479(1.481)	-0.003(-0.003)
CaseB4	$1.5 \times 10^{-4}$	0.004	2.162(2.165)	1.861(1.854)	-0.005(-0.006)

CaseC1	$5 \times 10^{-5}$	0.001	2.218	1.499	0.013
Re=5. CaseC2	$1 \times 10^{-4}$	0.001	2.147	1.402	0.011
$4 \times 10^4$ CaseC3	$1.5 \times 10^{-4}$	0.001	2.122	1.417	-0.002
CaseC4	$2 \times 10^{-4}$	0.001	2.100	1.562	-0.017
EXP <sup>[1,2]</sup>	—	—	2.050-2.290	1.260-1.600	$\approx 0$
CFD <sup>[3,4]</sup>	—	—	2.020-2.770	1.150-1.790	$\approx 0$

#### 4 方柱模拟结果

基于 CaseB3 的网格方案，对方柱表面的风压系数进行了计算，计算结果如图 1 所示。方柱侧立面和背立面的平均风压系数模拟值较大于文献值，迎风面平均风压系数拟合度较高且结果较好的反映出方柱迎风面角部的平均风压突变。对于方柱的脉动风压系数，方柱侧立面和背立面结果均较小，这是由于模拟方法基于时间平均，计算时忽略小尺度旋涡，导致模拟值比文献值偏小。总体来说，平均风压系数和脉动风压系数的模拟结果趋势与文献结果一致，证明了模拟方法的准确性和有效性。



#### 5 结论

本文基于 SST  $k-\omega$  湍流模型，对方柱的气动力特性及风压分布进行了详细的研究，首先介绍了湍流控制方程，并展示了计算模型及参数设置；然后对比了时间步长和边界层网格高度的设置对方柱绕流计算结果得影响。由对比结果可知，设置合适的时间步长和边界层网格高度对模拟的精度和计算效率有较大的提高。通过风压系数的对比进一步验证了本文所用网格方案的准确性和有效性，为进一步的研究奠定基础。

#### 参考文献：

- [1]李真子,林自城,高志栋,叶建.Reynolds 数 22000 的孤立方柱绕流的大涡模拟[J].气体物理, 2017, 2(03): 17-23.
- [2]周强,廖海黎,曹曙阳.高雷诺数下方柱绕流特性的数值模拟[J].西南交通大学学报, 2018, 53(03): 533-539.
- [3]秦浩,肖姚,宋文武,孙延国.大雷诺数下方柱绕流 PIV 试验及数值模拟[J].工程热物理学报, 2018, 39(08): 1731-1737.
- [4]邵阳,全涌,顾明.二维方柱绕流阻塞效应的大涡模拟[J].同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(08): 1018-1025.
- [5]杜晓庆,刘延泰,施定军,马文勇.低雷诺数下方柱绕流的数值模拟研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(05): 49-57.