

文章编号: 1000-8055(2006)05-0891-06

建筑物顶部锥形涡空间演化的数值模拟

李鹏年^{1,2}, 邹正平^{1,2}, 陈学锐³, 顾志福³

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083;

2. 北京航空航天大学 航空发动机数值仿真研究中心, 北京 100083;

3. 北京大学 力学与工程科学系, 北京 100871)

摘 要: 运用通用流体力学计算软件 FLUENT, 对建筑物表面风荷载问题进行了数值模拟, 讨论和分析了采用不同湍流模型获得的结果差异。通过与风洞实验结果的对比, 选择了 v^2-f 湍流模型对 40° 风向角建筑物顶面出现锥形涡现象进行了成功的模拟。进而利用数值模拟的优势给出了典型建筑物顶面锥形涡的空间演化规律及其和侧面脱体涡的相互作用。还获得了锥形涡的演化、强度和位置与建筑物表面压力分布的内在联系。

关 键 词: 航空、航天推进系统; $k-\varepsilon$ 湍流模型; v^2-f 湍流模型; 锥形涡; 数值模拟

中图分类号: O357

文献标识码: A

Numerical study of conical vortices space evolvement on a flat roof

LI Peng-nian^{1,2}, ZOU Zheng-ping^{1,2}, CHEN Xue-rui³, GU Zhi-fu³

(1. National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Aeroengine Numerical Simulation Research Center,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

3. Department of Mechanics and Engineering Science,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Using the computational fluid dynamics software FLUENT, wind load and conical vortices of a building were simulated with the v^2-f turbulence model and $k-\varepsilon$ turbulence model. The wind angle of attack is 40° relative to the eave of the building. It shows that the v^2-f turbulence model can give fairly good results compared to the experimental pressure data. With the increase of x , the sizes of the conical vortices on the flat roof increase firstly and then fall off when they arrive at the ackside of the building. Simultaneously conical vortices and the vortex shed from the lateral wall of the building have great interaction. Also it gets the immanence relation of the space evolvement, intensity and positions of the conical vortices on the flat roof.

收稿日期: 2005-08-04; **修订日期:** 2005-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助(10172008)

作者简介: 李鹏年(1982-), 女, 山西翼城人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院硕士生, 主要从事空气动力学研究。

Key words: aerospace propulsion system; $k-\varepsilon$ turbulence model; v^2-f turbulence model; conical vortices; numerical simulation

当风以一定的角度吹过建筑物表面时,会产生复杂的流动结构,包括在平面屋顶的锥形涡和在背风侧面的脱体涡。在实践中,人们发现在建筑物表面产生的锥形涡会产生很大的负压区,从而使建筑物在某个具体位置承受很大的压差力,这是强风地区建筑物受破坏的主要原因之一^[1]。

由于涉及到复杂的来流条件和钝体绕流问题,如流体分离、旋涡脱落、尾流和湍流等流体力学基本问题,对建筑物绕流的研究采用较多的是实验手段。因此,早在上世纪 60,70 年代就有人开始了建筑物风洞实验研究。从 90 年代开始,由于注意到建筑物表面锥形涡的重要作用,很多人做了基于锥形涡的风洞实验研究,得到一些很有用的数据和理论。Marwood & Wood^[2]用压力、速度同步测量方法研究了建筑物顶部瞬时锥形涡,结果表明建筑物顶部压力脉动和锥形涡瞬时位置密切相关;Kawai^[3]利用速度测量得出了建筑物顶部锥形涡的具体结构(45°风向角下),层流锥形涡的强度强于湍流锥形涡的强度,两个锥形涡交替生成,耗散引起了表面压力沿对角线不对称的脉动;Wu F, Sarkar & Mehta^[4]利用流场显示技术同步测量风速和压力,得到锥形涡结构随着风向角改变,顶部最大负压位置与锥形涡核心位置有关。上述这些基本还是从满足具体工程项目需要的角度出发进行研究,主要目的也仅仅停留在对这类锥形涡现象的了解。就锥形涡的产生机理和影响而言,目前还没有比较全面地阐述和分析。

由于模型试验方法周期较长,费用较高,不利于初期分析。随着计算机技术、数值计算技术和湍流模拟技术的发展,采用数值方法对建筑物绕流进行数值模拟则更为简捷、经济,同时还可以得到某些实验不能测量的结果。本文运用通用流体力学计算软件 FLUENT 对 40°风向角(风向角定义见图 6)矩形建筑物表面风载荷问题进行数值模拟,为了减少湍流模型的影响,选取了标准 $k-\varepsilon$ 模型和 v^2-f 两种湍流模型,通过与实验对比分析两种模型计算的差异,最终选择 v^2-f 模型作为计算条件,利用数值模拟的优势给出了典型建筑物顶面锥形涡的空间演化规律及其和侧面脱体涡的相互作用。

1 模型和边界条件

1.1 模型

本文以立方体作为建筑物简化模型见图 1,模型尺寸: $L \times W \times H = 120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,计算域尺寸: $L \times W \times H = 1\,050 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。采用非均匀网格对立方体周围进行加密,网格数为 597 960。图 2 和图 3 分别给出了 z 方向和 y 方向网络分布示意图。

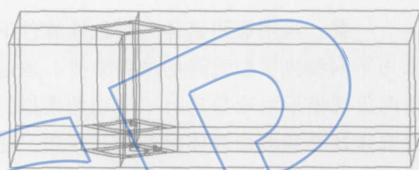


图 1 建筑物和计算域模型

Fig. 1 Model of a building

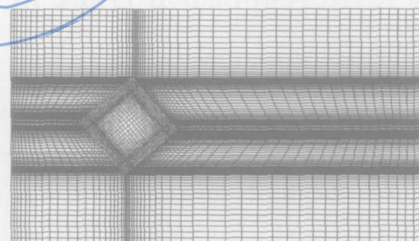


图 2 z 方向网格示意图

Fig. 2 Grid layout around a building
(z plane)

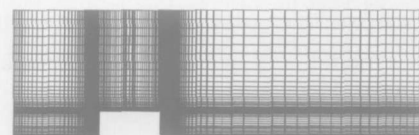


图 3 y 方向网格示意图

Fig. 3 Grid layout around a building
(y plane)

1.2 边界条件

进口边界条件:采用压力进口边界,通过进口总压给定速度形(满足速度公式 $u/u_g = (z/z_g)^{0.22}$,符合一般大气边界层),模型最高处速度为 15 m/s,进口速度方向为 x 轴方向,静温 $T =$

288.15 K, 湍流强度为 22%, 湍流特征尺度为 0.028 m。

出口边界条件: 采用压力出口边界, 出口压力 $P = 101\,325\text{ Pa}$, 出口速度方向外推, 温度 $T = 288.15\text{ K}$, 湍流强度为 22%, 湍流特征尺度为 0.028 m。

左右侧面边界条件: 采用对称边界条件。

上端边界条件: 采用远方压力边界, 给定压力 $P = 101\,325\text{ Pa}$, $Ma = 0.063$, 速度方向为 x 轴方向, 静温 $T = 288.15\text{ K}$, 湍流强度为 22%, 湍流特征尺度为 0.028 m。

壁面边界条件: 在固体壁面和地面采用无滑移边界条件。

2 湍流模型选择

2.1 模型原理

目前, 基于 RANS(雷诺平均) 方法的湍流模型种类繁多, 考虑到钝体绕流的特性, 本文选用了标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型(壁面采用标准壁面函数) 和 v^2-f 湍流模型进行试算。

标准 $k-\varepsilon$ 模型是两方程模型, 可以计算比较复杂的湍流流动, 是目前工程中广泛应用的模型, 各个方面的计算结果较为可信。但标准 $k-\varepsilon$ 模型有一定的局限性:

(1) 模型仍采用 Boussinesq 假设, 不能反映雷诺应力的各项异性, 因而难以准确地模拟剪切层中平均流场方向的改变对湍流场的影响;

(2) 在近壁面区域使用代数壁面法则代替控制方程描述流场的流动, 壁面法则不能准确描述强烈的三维作用和负压梯度以及分离点, 同时, 即使在充分发展的湍流场区也很难将最内层节点准确地置于壁面法则适用的区域。

由于上述原因, 本文还采用 v^2-f 模型进行对比计算。 v^2-f 模型是四方程模型, 最早是 Stanford 大学提出^[5]。它由标准 $k-\varepsilon$ 模型发展而来, 因此有涡粘模型的优点可以避免近壁区湍流进行修正, 普适性更强。一般湍流模型(不使用壁面函数) 通过引入衰减函数来描述湍流粘性和近壁面影响, 但是这种单点相关不能反映近壁面压力的非当地效应。为了模拟近壁面湍流的非当地特性, 避免使用两点相关, v^2-f 模型采用了椭圆型松弛方程 f 来计算压力应变相关项, 考虑了近壁面湍流的各项异性。 v^2-f 模型的另一项重大改进是利用垂直于流线方向的速度脉动项 v^2 代替湍动能 k 作为湍流速度尺度, 对于近壁区, 湍动能 k 不能描述湍流运输的衰减, 速度脉动项 v^2 则可以给出正确的结果。模型的具体描述参考文献 [6, 7]。

2.2 具体算例

旋涡对其周围气体压强有影响, 会引起旋涡处压强下降。图 4 表示 40° 风向角建筑物顶面和右背风侧面压力系数图。图 4(a) 为实验结果, 阴影部分是压力系数小于 0.7 的区域; 图 4(b) ~ (c) 是标准 $k-\varepsilon$ 模型和 v^2-f 模型的数值计算结果。

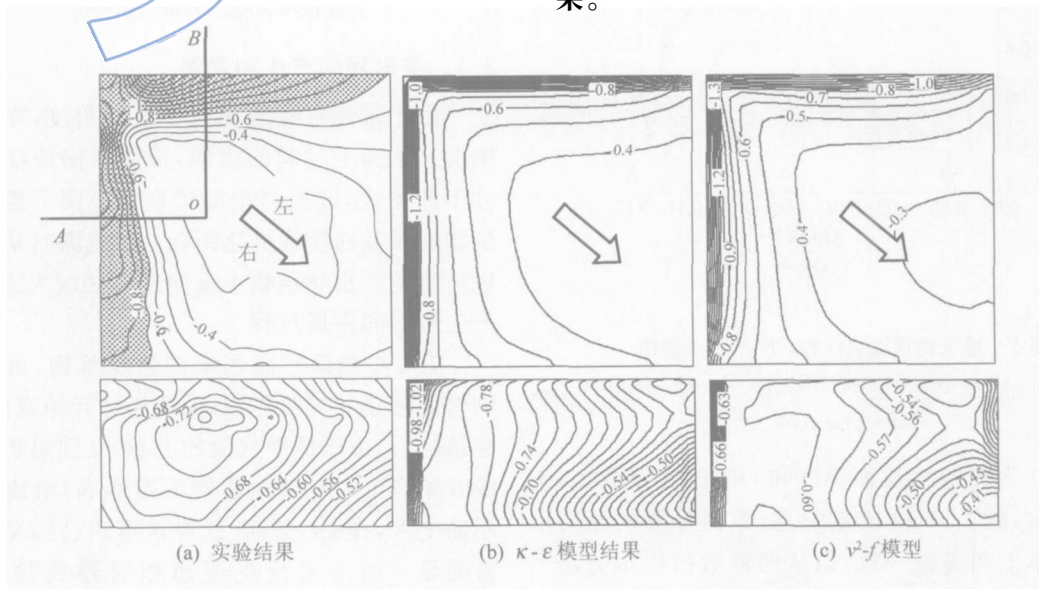


图 4 建筑物顶面和右背风侧面压力系数分布图 (箭头为来流方向)

Fig. 4 Contour maps of mean pressure coefficients on a flat roof and a right backside wall

在模型的迎风边缘局部,实验结果和数值计算得到的风压分布差别很大,从图 5 的 A 点和 B 点附近也可以看出,数值计算得到的等压线分布很密,说明这里的压力变化梯度很大。产生这种差别的原因包括实验和计算模型两方面的差异所造成。由于技术条件的限制,在风洞实验的模型边缘附近无法布置密集的测压孔,因此无法测量在边缘附近由于剪切层分离产生的非常激烈的压力梯度变化;另一方面,风洞实验的矩形体边缘会有一定的圆角半径,与数值模拟的理想直角交接面有很大区别,这种区别对气流的分离以及表面压力分布会产生重大影响。幸运的是本课题研究屋面锥形涡的结构,而锥形涡的产生通常距离上述边缘有相当的距离。因此,从这意义上来讲,数值模拟结果和相应的风洞实验结果符合良好。

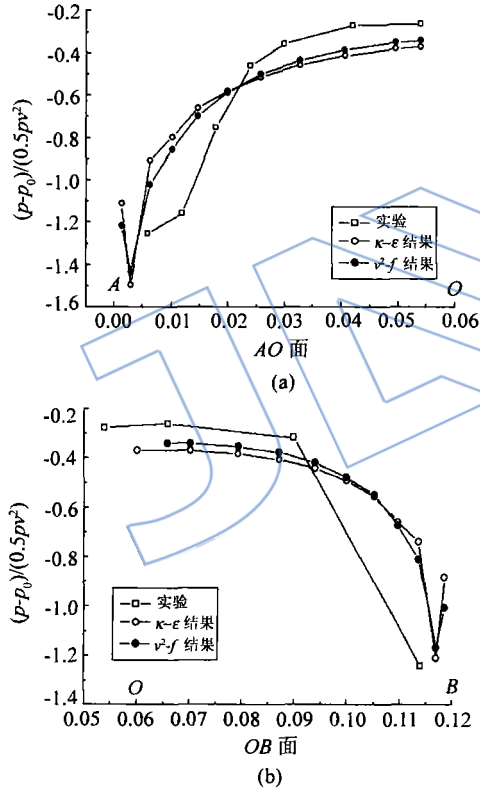


图 5 建筑物顶面 AO 和 OB 压力系数图
Fig. 5 Mean pressure coefficients on AO and OB of a plat roof

图 5 为建筑物顶面 AO 和 OB 压力系数图,可以看出,除了 A 和 B 点附近,数值计算的压力系数基本上和实验一致,但从两种数值模拟方法与实验的对比来看, v^2-f 模型的结果比 $k-\epsilon$ 模型更接近实验。同时从图 4 的建筑物右背风侧面压力系数图也可以看出,相对实验, $k-\epsilon$ 模型计算的

压力系数比实验偏大, v^2-f 模型与实验更相近。因此,在下文选择 v^2-f 模型的结果进行分析。

3 计算结果

图 6 给出了建筑物各截面的分布,图 6(a)是沿流动方向,划分 8 个截面,分别为 (a) ~ (h);图 6(b)是垂直于流动方向,由下至上 4 个截面,分别为 1~4。图 6 还给出了各截面的位置尺寸。

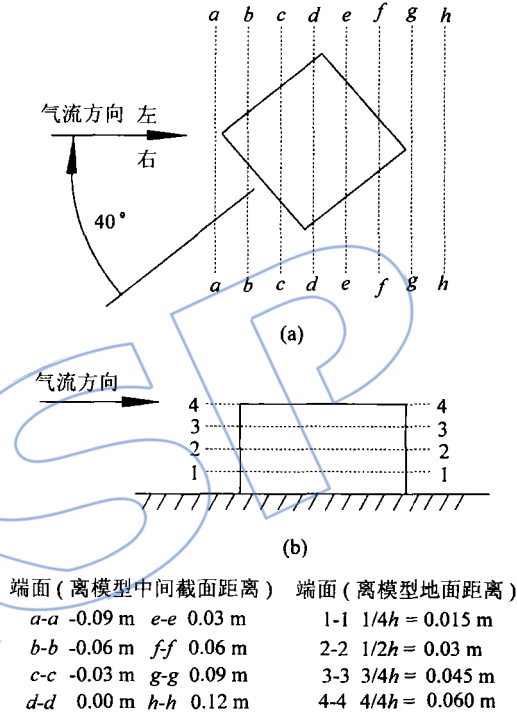


图 6 建筑物断面示意图
Fig. 6 Sketch of sections

3.1 锥形涡的产生和发展

由于来流对建筑物有一定的角度,在迎风屋檐会产生向上卷起的旋涡,该旋涡沿流动方向尺寸不断变大,即所讨论的锥形涡。图 7 给出了建筑物迎风截面流线变化图(a~d 截面),从图中可以清楚的看出建筑物上表面迎风区域内锥形涡的产生和空间发展过程。

在 σ_a 截面气流还未到达建筑物,由于建筑物壁面滞止和位势作用,流线已经开始弯曲;到达建筑物后,由于侧壁气流的上卷,在建筑物顶部前端开始产生一对反向旋转的锥形涡;沿流向旋涡不断变大,在 $c-c$ 截面,这对锥形涡已经发展得非常明显。由于来流气流角相对建筑物不对称 (40°),形成的锥形涡也呈现较为明显的不对称,而且旋涡之间相互诱导,相互作用,在 $d-d$ 图可以清晰看出:左侧锥形涡的一部分气流被卷入了右

侧的锥形涡。这种相互作用现象可能是因为建筑物右侧壁面的后掠角比左侧壁面小 10° ，对气流的阻碍作用强，所以右侧气流上卷效应更明显，产生的锥形涡比左侧的强，负压也就会比左侧锥形涡产生的负压要大，于是一部分气体就被“吸”了过来，出现了如图的流动现象。

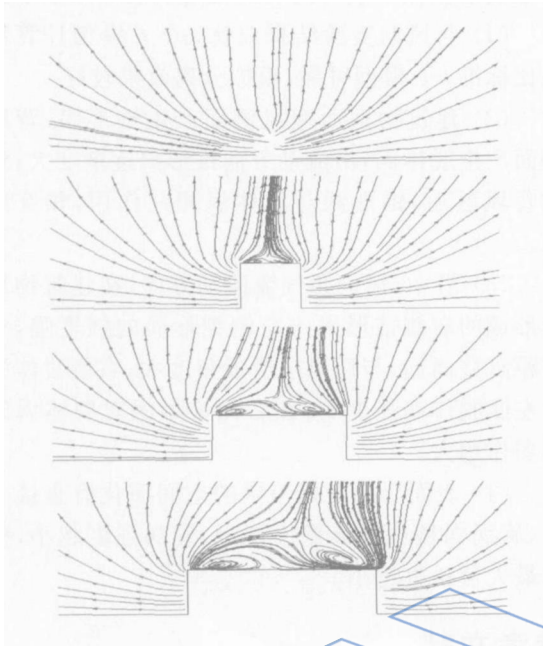


图 7 迎风各截面流线图 (依次为断面 $a\sim d$)
Fig. 7 Streamline in sections normal to flow ($a\sim d$ Planes)

图 8 给出了建筑物顶部锥形涡涡核(旋涡旋转的中心,径向、周向速度为零处)位置分布图,图 8(a)为水平面投影(xoy)的涡核位置变化曲线,表示涡核与迎风边的相对位置。涡核连线与迎风边所成角度用 α 表示,计算结果表明左侧 α 约为 8.8° ,右侧 α 约为 13° 。左侧涡核角度比右侧涡核角度偏小。

图 8(b)是竖直面投影(xoz)的涡核位置变化曲线,表示涡核与壁面的相对位置。涡核连线与壁面所成角度用 β 表示,左侧 β 约为 4.3° ;右侧 β 约为 8.7° 。左边旋涡离建筑物顶部较近。

3.2 锥形涡的脱落及其与侧面脱体
涡的相互作用

在背风区,建筑物上表面不再对锥形涡进行支撑,它失去了壁面上卷气流的作用,同时由于下卷气流的影响,锥形涡就会产生脱落,图 9 为建筑物后端背风区的截面流线图。在建筑物最大横截面之后,气流在背风壁面附近出现分离产生脱体

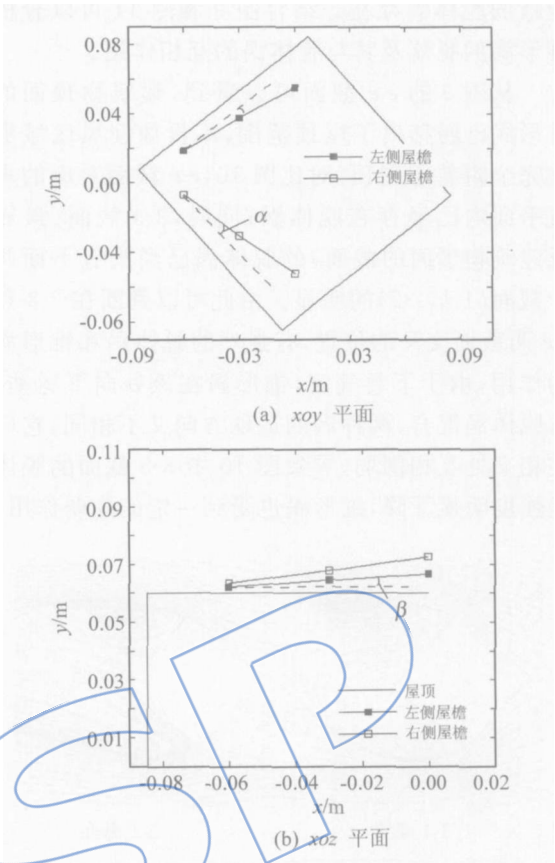


图 8 旋涡核心位置分布
Fig. 8 Position of vortex core

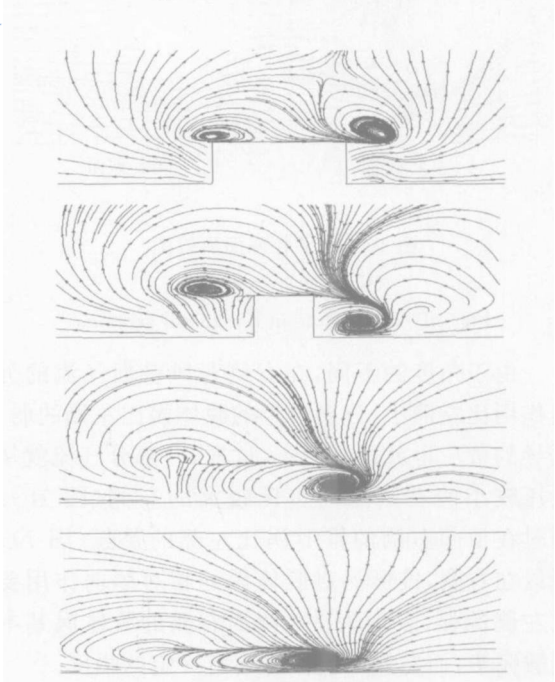


图 9 背风各截面流线图 (依次为断面 $e\sim h$)
Fig. 9 Streamline in sections normal to flow ($e\sim h$ Planes)

涡,图 10 给出了不同高度横截面的流线图,有很

清晰的脱体涡存在。结合图 9 和图 11 可以分析锥形涡的脱落及其与脱体涡的互相作用。

从图 9 的 $e-e$ 截面可以看到,建筑物顶面的锥形涡已经移出了屋顶范围,不再像迎风区域那样完全附着于屋顶,对比图 10, $e-e$ 截面对应的垂直平面内已经存在脱体涡;同时,3-3 截面(最靠近建筑物顶面的截面)的脱体涡已经没有下面两个截面(1-1, 2-2)的明显。由此可以判断在 3-3 和 $e-e$ 两截面交叉的位置,有强烈的脱体涡和锥形涡的作用,由于下卷气流,锥形涡在该处向下运动,与脱体涡混合,两种涡的运动方向又不相同,它们在相交处互相削弱,导致图 10 中 3-3 截面的脱体涡强度明显下降,锥形涡也受到一定的削弱作用。

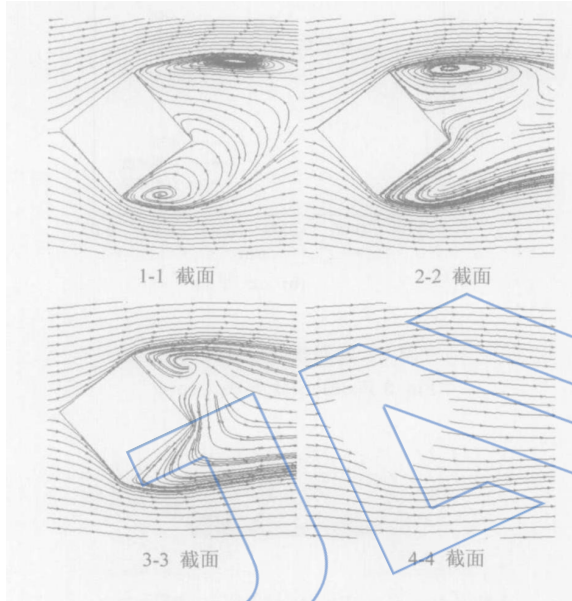


图 10 水平各截面流线图
(依次为 1~4 截面)

Fig. 10 Streamline in horizontal sections

由于角度的不同,在右侧背风壁面气流的分离作用比左侧小,分离产生的脱体涡比左侧的弱,诱导的负压也就比左侧小,这样,一部分气流就从负压较小的右侧流向负压较大的左侧(图 10)。同时在顶部右侧的锥形涡比左侧的要强(图 7),所以在右侧,锥形涡对脱体涡的相对削弱作用要比左侧的强,表现为 3-3 截面右侧的脱体涡基本耗散完毕,而左侧的脱体涡还有一定的强度。

值得注意和研究的是,图 9 中后 3 个截面($f \sim h$)靠近地面和侧壁的旋涡不是脱落的锥形涡。考虑到锥形涡在背风区已经失去了动力,只存在耗散,图中的那些旋涡有一定的强度,并且方向与

锥形涡的方向相反,所以它不是脱落的锥形涡,应该是下卷气流诱导出来的涡。

4 结 论

本文应用通用流体力学计算软件 FLUENT 对 40° 风向角建筑物顶面产生的锥形涡的现象进行了数值模拟。获得的有关锥形涡的结果如下:

(1) 与风洞实验结果对比, v^2-f 模型计算结果比标准 $k-\varepsilon$ 模型可靠,模拟分离效果较好。

(2) 建筑物顶面迎风侧面产生锥形涡,背风侧面产生脱体涡,沿流动方向锥形涡逐渐变大;到达背风区后,锥形涡与脱体涡相互作用,相互削弱。

(3) 沿 40° 风向角气流流动方向,在建筑物顶面形成的右侧锥形涡比左侧锥形涡的强度高,涡核距离壁面远,与迎风边所成角度大;右侧脱体涡比左侧脱体涡强度弱;在右侧锥形涡对脱体涡的削弱作用大。

(4) 表面压力变化与涡的空间演化有直接关系,旋涡涡核位置离壁面越近,旋涡强度越小,壁面最大负压也越小。

参考文献:

- [1] Kawai H, Nishimura G. Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow[J]. Journal of Wind Engineering and industrial aerodynamics, 1996, 60: 211-225.
- [2] Marwood R, Wood C J. Conical vortex movement and its effect on roof pressures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69 - 71: 589-595.
- [3] Kawai H. Structure of conical vortices related with suction fluctuation on a flat roof in oblique smooth and turbulence flow[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69 - 71: 579-588.
- [4] Wu F, Sarkar P P, Mehta K C. Understanding the conical-vortex flow on roof[A]. Wind Engineering into the 21st Century[C]. Larsen, Larose & Livesey (Eds), Balkema, 1999: 1867-1873.
- [5] Durbin P. Near-wall turbulence closure without damping functions[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1991, 3(1): 1-13.
- [6] Behnia M, Parneix S, Durbin P. Accurate predictions of jet impingement heat transfer[J]. In: HTD - Vol. 343, National Heat Transfer Conference, Baltimore, 1997, 5: 111-118.
- [7] Behnia M, Parneix S, Durbin P. prediction of heat transfer in a jet impinging on a flat plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41: 1845-1855.