

机场附近低空风切变的数值模拟预测^{*}

孙 磊

(中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 分别采用 Navier-Stokes 方程和镜像对称的方法, 对机场区域附近发生低空风切变时所形成的三维流场进行了数值模拟; 并根据结果对风切变发生的位置和强度提供有效的预测。计算结果表明, 模型预测具有较好的可靠性和实用性。

关键词: Navier-Stokes 方程; 镜像对称; 低空风切变

中图分类号: V211.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) S2-0150-04

在气象学上有一种称为“风切变”特别是“低空风切变”的气流, 对飞机的起落安全威胁极大, 人们称之为飞机的“克星”。所谓“风切变”, 是指相邻(上下或左右)两部分空气间的风向和风速都有显著差异的现象。通俗地说, 低空风切变是指飞机在起飞和着陆飞行阶段遭遇风向风速突然急剧变化的一种大气现象。相邻两部分空气间气流速度差别越大, 形成的风切变就越强, 对飞机起飞和降落危害就越大。

由于低空风切变具有时间短、尺度小、强度大、发生突然等特点, 因此也给探测、预报等带来很大的困难。而针对机场的实际情况, 准确、迅速地做出风切变发生位置的判断, 也就具有了极其重要的现实意义。

本文是完整的风切变的显示和预报项目中的一个独立部分。其工作就是基于以上背景, 主要针对缺少雷达等自动测试设备的众多中小型机场, 根据机场内个别测点位置的风速, 建立完整的力学模型, 利用有限差分法对风场进行数值求解, 并对结果进行分析, 迅速地对风切变的位置和强度进行预报。本文中所选用的机场地理模型以及算例的风速数据均取自广州白云机场。

1 三维流场的数值模拟

1.1 力学模型的建立

本文首先对风切变所形成的三维流场利用 NS 方程建立力学模型, 如图 1 所示。

由图 1 可以看出下冲气流到地面后向四方扩散, 如果飞机在这种风场下着陆进场, 飞机首先遇到的是迎风, 升力增加使飞机航迹上偏, 到中间地

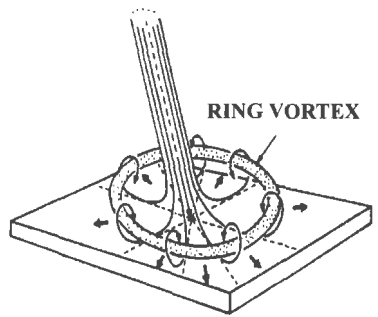
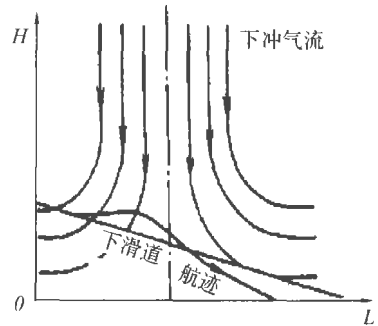


图 1 风切变模型示意图

Fig. 1 Wind shear map

区有下沉气流, 并由迎风转为顺风, 升力降低使航迹转为下降, 这样飞机可能提前着地, 造成事故。

1.2 算法的控制方程及初边条件

采用空间直角坐标系, 建立 NS 方程以及关于压力项的 Poisson 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{p}{\rho} \right) + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} + \frac{\partial uv}{\partial x} = \end{aligned}$$

^{*} 收稿日期: 2003-05-19

作者简介: 孙磊 (1980 年生), 男, 2000 级本科生; E-mail: sailor6666@sohu.com

$$\frac{\partial(-p/\rho)}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]$$
$$\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial z} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} =$$
$$\frac{\partial(-p/\rho)}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$$
$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = S_p$$

式中 u, v, w 分别表示流场各点的水平、垂直、侧向的速度分量(对应于坐标系中的 x, y, z 方向); p 为流场中各点的压力; ν 为流体的运动粘性系数; ρ 为流体密度。

为了求解上述流场方程, 给出以下空间六面体每个面上的速度及压力的边界条件:

(1) 底边固壁的不可穿透条件:

$$v(x, 0, z) = 0; \nabla p = 0;$$

(2) 顶部来流的初速度条件:

$$v(x, y, z) = v_0, (x, y, z) \in \text{给定来流区域 } V;$$

$$v(x, y, z) = 0, (x, y, z) \notin \text{给定来流区域 } V;$$

顶部来流的初始压力条件: $p = p_0$;

(3) 侧面条件: $\nabla v = 0; \nabla p = 0$;

1.3 有限差分法与程序求解

对 NS 方程的差分求解: 首先对定解区域进行离散, 取等间隔的时间和空间步距, 并对 NS 方程采取 FTCS (对时间前差, 对空间中心差) 的差分显格式, 对压力项的 Passion 方程采取二阶差分格式, 可以将微分方程转化为差分方程 (各项分别表达如下, 其中 u 依次取为 u, v, w):

$$\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta t}$$
$$\left(\frac{\partial(u^2)}{\partial x}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{(u^2)_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - (u^2)_{i,j,k}^n}{\Delta x}$$
$$\left(\frac{\partial(uv)}{\partial y}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{(uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^n - (uv)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y}$$
$$\left(\frac{\partial(uw)}{\partial z}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{(uw)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^n - (uw)_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z}$$
$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{p_{i+1,j,k} - p_{i,j,k}}{\Delta x}$$
$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{u_{i+\frac{3}{2},j+1,k}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j-1,k}^n + u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{(\Delta x)^2}$$
$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{u_{i+\frac{3}{2},j+1,k}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i-\frac{1}{2},j-1,k}^n}{(\Delta y)^2}$$

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k+1}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i+\frac{1}{2},j,k-1}^n}{(\Delta z)^2}$$
$$\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_{i,j,k} = -\frac{D_{i,j,k}}{\Delta t}$$
$$\left\{\frac{\partial^2 D}{\partial x^2}\right\}_{i,j,k} = \frac{D_{i+1,j,k} - 2D_{i,j,k} + D_{i-1,j,k}}{(\Delta x)^2}$$
$$\left\{\frac{\partial^2 D}{\partial y^2}\right\}_{i,j,k} = \frac{D_{i,j+1,k} - 2D_{i,j,k} + D_{i,j-1,k}}{(\Delta y)^2}$$
$$\left\{\frac{\partial^2 D}{\partial z^2}\right\}_{i,j,k} = \frac{D_{i,j,k+1} - 2D_{i,j,k} + D_{i,j,k-1}}{(\Delta z)^2}$$
$$\frac{p_{i+1,j,k}^n - 2p_{i,j,k}^{n+1} + p_{i-1,j,k}^n}{(\Delta x)^2} +$$
$$\frac{p_{i,j+1,k}^n - 2p_{i,j,k}^{n+1} + p_{i,j-1,k}^n}{(\Delta y)^2} +$$
$$\frac{p_{i,j+1,k}^{n+1} - 2p_{i,j,k}^{n+1} + p_{i,j-1,k}^{n+1}}{(\Delta z)^2} = (S_p)_{i,j,k}$$

其中,

$$D_{i,j,k} = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k} - u_{i-\frac{1}{2},j,k}}{(\Delta x)}$$
$$\frac{v_{i,j+\frac{1}{2},k} - v_{i,j-\frac{1}{2},k}}{(\Delta y)} + \frac{w_{i,j,k+\frac{1}{2}} - w_{i,j,k-\frac{1}{2}}}{(\Delta z)}$$

根据上述差分方程利用“线松弛”法进行编程处理, 其中考虑到压力项 Passion 方程的差分格式与时间项无关, 因此, 在程序中每次迭代速度项之前, 必须将压力的差分方程迭代至收敛为止, 最终以得到稳定的速度场分布作为程序运行的终点 (实践表明大致运行 30 个周期即可得到比较稳定的流场)。

1.4 NS 方程差分计算的结果分析

顶端的来流 (具有一定宽度范围) 简化为 9 条流线的初始条件: $v_0 = -1.0$; 利用程序计算流场分布, 并用做出近地面区域 (发生风切变的位置) 速度场的三维分布图, 如图 2、3 所示。

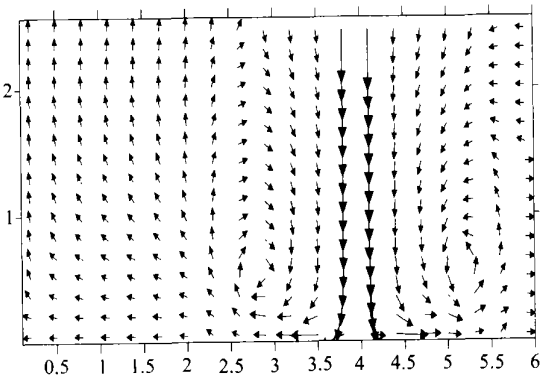


图 2 速度场分布的正视图

Fig 2 Horizontal form of the velocity distribution

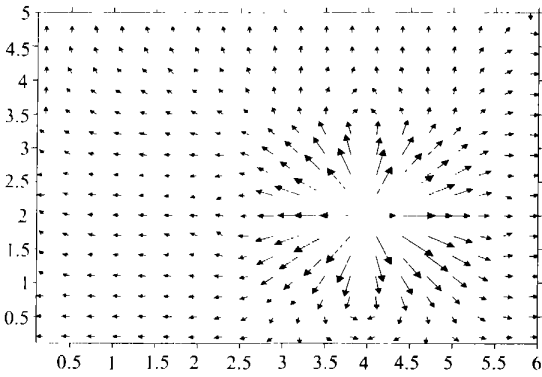


图 3 速度场分布的俯视图

Fig 3 Planform of the velocity distribution

由地面附近发生风切变时速度场的分布图像可以看出：风切变源强处有一股强度集中的气流冲击地面，碰撞地面后向四面散开，并向上空卷起，呈现出以源强点为中心的一个环状。这与图 1 的实际情况非常吻合，从而证明了三维流场数值模拟的准确性。

2 二维简化流场的计算与预测

2.1 利用镜像对称法对三维流场简化的模型

为了简化机场风切变的预报计算过程，从而缩短计算时间，提高预测效率，因此结合广州白云机场的实际地形情况，采用圆弧近似代替山边界，只考虑发生风切变的地表平面，利用“镜像法”得到简化二维流场的示意图如图 4 所示：以机场中心为坐标原点、坐标轴平行于边界建立坐标系， U 为 x 方向的来流速度， V 为 $-y$ 方向上的来流速度， W 为风切变源强，位置在 (x_0, y_0) 。为保证圆弧边界，根据镜像法在圆内有镜像对称的同强度源（上方两个星号表示）和汇（下方一个星号表示）各一个。流场区域中任一点 (x, y) 的速度势函数为（取 $R = 10$ ）：

$$\begin{aligned} \Phi = & U * \left[1 + R * \frac{R}{y} \right] * x - \\ & V * \left[1 + R * \frac{R}{y} \right] * y + \\ & \frac{1}{2} * W * \log \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] - \\ & \frac{1}{2} * W * \log (x^2 + y^2) + \frac{1}{2} * W * \\ & \log \left[\left(x - R^2 \frac{x_0}{h * h} \right)^2 + \left(y - R^2 \frac{y_0}{h * h} \right)^2 \right] \\ & r^2 = x^2 + y^2 \quad h^2 = x_0^2 + y_0^2 \end{aligned}$$

流场区域的速度场 (u, v) 的分布函数为：

$$u = -\frac{100Ux^2}{(x^2 + y^2)^{3/2}} + \frac{100Vxy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} -$$

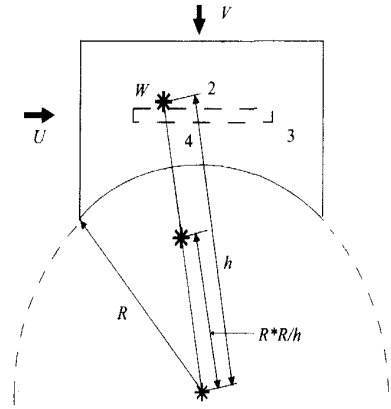


图 4 机场风切变模型简化示意图

Fig 4 Wind shear map near airports

$$\begin{aligned} & \frac{Wx}{x^2 + y^2} + \frac{W \left[-\frac{100u_0}{y_0} + x \right]}{\left[-\frac{100}{y_0} + y \right]^2 + \left[-\frac{100u_0}{y_0} + x \right]^2 +} \\ & \frac{W(-x_0 + x)}{(-x_0 + x)^2 + (-y_0 + y)^2} + U \left[1 + \frac{100}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \\ & v = \frac{100Uxy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} + \frac{100Vy^2}{(x^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{Wy}{x^2 + y^2} + \\ & \frac{W \left[-\frac{100}{y_0} + y \right]}{\left[-\frac{100u_0}{y_0} + x \right]^2 + \left[-\frac{100}{y_0} + y \right]^2 +} \\ & \frac{W(-y_0 + y)}{(-x_0 + x)^2 + (-y_0 + y)^2} - V \left[1 + \frac{100}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \end{aligned}$$

2.2 镜像对称法简化流场的软件求解思想

分别根据给定风速测点 1、点 2、点 3、点 4 的速度值，通过联立非线性方程，借助 Mathematica 软件求解并拟合结果可以求得速势解中的待定常数，再利用速势解的结果进行图像处理，借助 Surfer 软件可以作出整个流场区域的三维速度分布情况，进而可反演出来流速度及风切变源强。最后根据计算结果判断是否发生风切变以及发生的位置（实际预测中可以只考虑沿跑道的一维方向）：若风切变源强 $W \approx 0$ ，则无风切变发生；否则，机场内某点将存在风切变。最后将预测结果与实际情况相比，以检验简化模型的可靠性。

3 简化流场的风切变预测实例

精确计算三维流场分布情况的处理方法，精度较高但运算量较大；为提高实际操作时的预测效率而利用此二维简化模型，通过近似计算流场从而完成预测，并结合实际算例检验预测结果的可靠性。

计算实例：利用白云机场 1998 年 7 月期间某

两日的风速实测数据记录对上述模型进行检验。由记录的测量数据做出相应的速度分布图像(沿跑道方向)如图5所示:

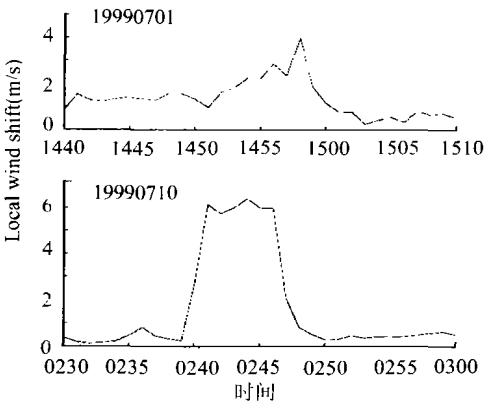


图 5 实测流场的速度分布情况

Fig 5 Velocity distribution of the actual fluent field

根据实测风速的图像可以分析各个网格内最大的风速之差(最大值处即为可能发生风切变的位置),并利用模型理论结果对所选取的固定测点进行数据处理,作图比较(图6),从图中的极值点(即机场跑道区域的风切变的位置与强度)易于得出预测结果。

经过对比,不难看出简化后的风切变预测模型也具有很高的精度,足以逼近真实的风场,较严格地反映了流场的分布趋势,从而充分满足了预测的精确性及快捷性的要求。尤其对于一些中小型机场,由于很难具备类似白云机场的昂贵的精确测风仪器(“脉冲多普勒气象雷达”等),此简化的预测模型更突出了其实用价值。

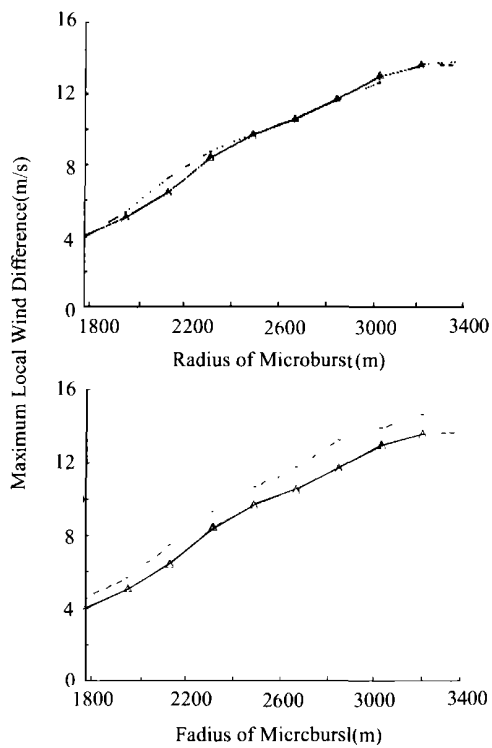


图 6 实测结果与模拟预测的速度曲线对比图

Fig 6 Comparison graph between actual and simulative velocities

△表示实际记录数据, 虚线表示模拟处理

参考文献:

[1] 航空气象编写组. 航空气象[M]. 武汉: 中国民航飞行学院出版社, 2000. 1: 55.

[2] 王学永, 金维明. 关于国外风切变研究现状的综述[A]. 低空风切变论文集[C]. 北京: 北京航空学会, 1985, 4—8.

[3] 肖业伦. 风切变中飞机运动特性的研究方法[A]. 低空风切变论文集[C]. 北京: 北京航空学会, 1985, 108—113

[4] [日] 伊藤田. 航空气象[M]. 北京: 科学出版社, 1978

Numerical Simulation of Forecast for Low Level Wind Shear Nearby Airports

SUN Lei

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: With the methods of Navier Stokes equation and the symmetrical mirror image, the numerical simulation is carried out about the three dimensional fluent field produced by the low level wind shear nearby airports; According to the computational results, the prediction about the location and the intensity of the wind shear can be made out. The computation outcomes show that the prediction in this model has sufficient reliability and practicability.

Key words: Navier Stokes equation; the symmetrical mirror image; low level wind shear