

# 地形影响的飞机颠簸及其数值仿真实验

李子良<sup>1</sup> 黄仪方<sup>2</sup>

- (1. 中国海洋大学物理海洋实验室, 海洋气象系, 青岛 266003;  
2. 中国民航飞行学院空中交通管理学院)

**提 要:** 首先利用中尺度数值模式 ARPS 模拟气流过山生成飞行数值仿真所需要的风场, 然后利用飞机载荷因数变量方程进行飞机飞行的数值仿真试验。研究结果表明, 气流过山产生的山脉重力波由于风切变临界层破碎, 一方面能在对流层产生较强的湍流引起晴空飞机颠簸, 另一方面也能在山脉背风面产生强烈下坡风, 背风转子环流及低空湍流, 影响飞机的起飞和着陆。揭示了飞机在过山脉地形背风面所产生的大气湍流中飞行时引起飞机颠簸的物理机制, 有助于增强飞机颠簸的预测能力和飞行气象保障能力。

**关键词:** 山脉重力波 转子环流 数值试验 低空湍流 飞机颠簸

## Simulations of Aircraft Bump Caused by Topography

Li Ziliang<sup>1</sup> Huang Yifang<sup>2</sup>

- (1. Department of Marine Meteorology, Ocean University of China, Qingdao 266003  
2. The Department of Air Traffic Management, China Civil Aviation Flying College)

**Abstract:** The equation of aircraft loading coefficient variable is obtained from the equation of aircraft motion, where the aircraft bump is mainly determined by the vertical wind velocity of the atmosphere. The characters of lee rotors, the high-level turbulence and low-level turbulence generated by flow over mountain are investigated using the numerical model ARPS. The results show that the critical layer and surface friction play a significant role in the forming of the rotors and reversal flow, and the high-level turbulence in the troposphere and low-

资助项目: 国家自然科学基金 (批准号 60472126) 项目资助

收稿日期: 2005 年 12 月 26 日; 修定稿日期: 2006 年 8 月 13 日

level turbulence in the lee of the mountain. This is why the airplanes flying over the mountain region often meet with the strong flight bump, and the effect of mountain on the atmospheric turbulence and flight bump is very important and dominant over other factors. This helps to understand the mechanism of flight bump and improve the forecast of the aviation flight meteorological conditions.

**Key Words:** mountain gravity waves rotor reversal turbulence flight bump numerical simulation

## 引 言

叶笃正<sup>[1]</sup>早在 1956 年就深入地研究了小地形对于气流的影响, 指出并讨论了背风波产生的物理机制。巢纪平等<sup>[2]</sup>在 1964 年也利用一个两层密度不同的流体所组成的模式讨论了小地形对于气流的影响, 由一维非常定的解, 研究了“气压跳跃”的形成过程。Doyle and Durran 2002 年成功的模拟了拦截山脉波中转子的形成和表面加热对转子的加强作用<sup>[3]</sup>。尽管数值模拟为山脉波动引起的转子结构和特征的研究提供了新的前景, 但是山脉引起的转子环流及其对航空飞行安全的影响依然难以解释和难以预报。

尽管国内对飞机颠簸的研究工作很多, 如赵树海<sup>[4]</sup>和李子良等<sup>[5]</sup>根据所掌握的国内外有关参考资料, 对颠簸区中的飞行气象条件、影响颠簸的几个主要因素、颠簸对飞行的影响以及在颠簸区中飞行时飞行员应采取的一些措施, 飞机颠簸的天气预报和飞行安全的气象保障等方面做出了详细的分析和研究。朱志愚<sup>[6]</sup>利用高空大气运动及晴空颠簸区的观测事实, 提出了一种判断晴空颠簸区的指标, 并与以前提出的其他一些判断指标进行比较。王永忠<sup>[7]</sup>基于湍流动能倾向方程, 提出了利用风资料判断飞机颠簸出现的一种方法。韩潮等<sup>[8]</sup>进行了飞机对低空风切变的响应的飞行数值仿真试验研究。肖业伦等<sup>[10]</sup>详细分析了飞机颠簸的记录资料及其

产生机理。但是背风转子和低空湍流对飞行影响的研究并不多见。本文首先利用中尺度数值模式 ARPS 模拟气流过山生成飞行数值仿真所需要的风场, 然后建立飞机载荷因数变量方程, 研究了背风转子和低空湍流的产生特征及其对航空飞行安全的影响。

## 1 数值试验设计

数值试验采用美国风暴分析和预报中心 (CAPS) 的三维非静力的区域天气预报系统 ARPS (the Advanced Regional Prediction System)<sup>[11]</sup>模式 5.0 版本, 数值模拟计算网格点数空间分布为, 水平方向 263 层, 采用 1km 的均匀水平格距。垂直方向 83 层, 垂直坐标采用地形追随坐标, 顶部 40 层为上边界的 Rayleigh 吸收阻尼层, 其垂直网格点分辨率为 0.25km, 其垂直分辨率通过伸缩变换自地面 0.05km 缓慢拉伸到计算域层顶 0.25km 的分辨率。模式使用 1.5 阶次网格尺度湍流闭合方案描述其次网格尺度湍流混合。打开表面物理过程软件包, 考虑表面摩擦对流动过山的影响。所有试验均不考虑科里奥利力。关闭其他的物理过程如辐射物理过程、土壤模式、冰相等云雨微物理过程。

模式积分 20 小时, 流动初始条件采用均匀水平风速分布  $U=20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  和具有浮力频率  $N=0.01\text{s}^{-1}$ , 研究强的西风气流对山脉地形的响应, 模式侧边界条件在东西方

向上采用辐射侧边界条件,而在南北方向则采用周期性侧边界条件。山脉地形采用常用的钟形山脉地形

$$h(x, y) = h_m a^2 / (1 + (x - x_0)^2) \quad (1)$$

式中  $h_m$  为山脉高度,  $a$  为山脉半宽度 10km,  $x_0$  为山脉中心位置取 80km。

## 2 试验结果分析

转子环流及其伴随的低空湍流是严重的航空灾害天气,转子及其环流是气流过山所伴随产生的水平环流轴线与山脊线平行的低层水平涡旋,是由于山脉波动引起的逆的气压梯度力导致边界层分离以及边界层过程和背风波引起的扰动之间的耦合相互作用的表现。背风波和边界层的相互作用是转子形成的关键因素,也就是说边界层摩擦及其产生的涡度在边界层转子的形成和演变中起着非常重要的作用。从山脉背风面的水平速度分布(图 1a, 见彩页)可以看出,由于山脉地形的作用,在 5km 高度附近产生了一个风切变临界层,同时由于波动自产生的风切变临界层作用,在山脉背风面低层产生较强的下坡风和低层回流,最大下坡风速达到  $67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而最大的回流强度达到  $-15.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从山脉地形背风面的垂直运动速度分布(图略)和位温分布(图 1b, 见彩页)可以看出,山脉背风面表现为上升运动和下沉运动交替出现的水跃山脉重力波特征。

从湍流动能分布(图 2a, 见彩页)可以看出山脉及其背风面有两个最大的湍流区,一是在山脉及其背风面由于重力波在风切变临界层破碎产生的对流层湍流区,二是与低空转子相伴随的低空湍流区。因此飞机在飞越山脉地区时,无论是在空中飞行还是起飞和着陆,常常会遭遇飞机颠簸。从山脉背风面的流线分布(图 2b, 见彩页)可以

看出,随着山脉背风波的强度的增强,在山脉背风面产生大振幅的山脉背风波并伴随着背风涡旋以及低空转子和转子环流的产生。随着山脉背风波随时间的演变过程,模式积分到 76000 秒时,山脉背风波开始减弱,但是在山脉边界层内出现大范围的低空转子及其环流。

## 3 飞机载荷因数变量方程及其数值仿真

为了揭示产生飞机颠簸的物理本质,从飞机升力方程出发,导出飞机载荷因数变量方程进行讨论。在飞机气动力计算中,选取飞机升力与重力之比来表示飞机承受外力的相对大小,称为载荷因数,亦称过载。即载荷因数  $N$  定义为

$$N = Y/G \quad (2)$$

式中  $Y$  为飞机升力,  $G$  为飞机重力。从式(2)看出,当  $N=1$  时,则飞机平飞,而当  $N>1$  时,则飞机将出现向上的加速运动,当  $N<1$  时,则飞机将出现向下的加速运动。在较短的时间内,  $G$  可以认为是不变的,则  $N$  的变化就取决于  $Y$  的变化。载荷因数变化大时,反应了升力变化大,颠簸也一定比较强;反之,则飞机颠簸较弱。

如果飞行速度和高度保持不变,只考虑垂直阵风时,利用式(2)和飞机升力方程,则可得到飞机载荷因数变量方程<sup>[9]</sup>。

$$\Delta N = \frac{\rho V K}{2G/S} W \quad (3)$$

式(3)中  $K = \frac{\partial C_y}{\partial \alpha}$  为飞机升力系数斜率,在迎角  $\alpha$  小于临界迎角的情况下为常数,  $S$  为机翼面积,  $W$  为空气的垂直运动速度,  $V$  为飞行速度。对于某飞机而言,  $G/S$  为给定值,当飞机速度和高度保持不变时,密度  $\rho$  和  $V$  均视为定值,则飞机载荷增量主要取决于垂直运动速度的大小。当作用在飞机上

的垂直阵性气流的交替周期与机体的振动周期一致时, 飞机颠簸会显著加强。

飞行数值仿真必须解决两个问题, 一是利用数值模式模拟生成我们所需要的垂直速度场, 然后再利用飞机载荷因数变量方程, 求出飞机在大气湍流中响应的时间历程。在飞机过山之前, 飞机飞行处于相对稳定的状态, 但是飞机过山脉地形后在山脉背风面呈现出强烈的湍流颠簸状态, 在山脉背风面附近飞机颠簸最为剧烈, 远离山脉地区后, 飞机颠簸的强度逐步减弱。数值仿真模拟的飞机颠簸状态 (图 3) (假设  $\rho VKS/(2G/S)$  为单位量纲) 与实际条件下飞机发生颠簸所表现出来的飞机性能记录 (图略) 具有很好的 consistency。飞机过山后飞行参数在很短的时间内变化很快, 其中山脉附近过载变化更为剧烈。

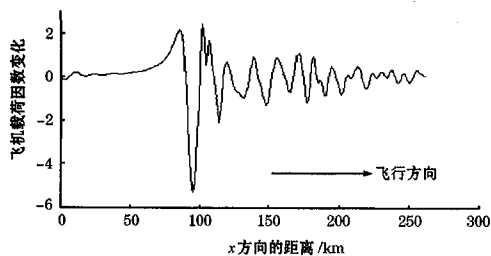


图 3 飞机在山脉背风面 (山脉中心在 80km) 飞行时对大气湍流响应的数值仿真图

## 4 结 论

利用中尺度数值模式 ARPS 模拟气流过山得到飞行数值仿真所需要的风场, 数值仿真分析山脉湍流引起的飞机颠簸。其主要试验结果为:

(1) 气流过山产生的山脉重力波由于风切变临界层破碎, 能在对流层产生较强的湍流影响高空飞行安全, 在对流层产生晴空飞机颠簸。

(2) 气流过山也能在山脉背风面产生强烈下坡风、背风转子环流及低空湍流, 影响飞机的起飞和着陆。

(3) 气流过山产生山脉重力波、强烈下坡风及其相伴随的转子、转子环流及其高低空湍流是严重的航空气象灾害, 飞机颠簸和许多严重的飞行事故大多与转子及其湍流相联系。通过气流过山的数值试验和飞行动力学方程的研究分析, 揭示了山脉地形在背风转子和大气湍流产生中的作用, 有助于理解山脉地区飞机颠簸的产生机制, 增强对航空飞机颠簸的预测能力和航空飞行保障能力。

## 参考文献

- [1] 叶笃正. 小地形对于气流的影响 [J]. 气象学报, 1956, 27 (3): 79-98.
- [2] 巢纪平, 章光锐, 袁孝明. 二层模式中小地形对于气压跳跃形成的初步研究 [J]. 气象学报, 1964, 34 (2): 109-117.
- [3] Doyle, J. D., D. R. Durran. The Dynamics of Mountain-wave Induced Rotors [J]. J. Atmos. Sci, 2002, 59: 186-201.
- [4] 赵树海. 颠簸区中的飞行与对策 [J]. 飞行力学, 1994, 22 (2): 91-96.
- [5] 李子良, 陈会芝. 飞机颠簸的气象条件分析 [J]. 四川气象, 1999, 19 (2): 22-23.
- [6] 朱志愚. 晴空颠簸区一种判断方法及其物理机制分析 [J]. 成都气象学院学报, 1998, 13 (2): 44-50.
- [7] 王永忠. 利用风资料判断飞机颠簸的一种方法 [J]. 成都气象学院学报, 1999, 14 (4): 26-31.
- [8] 韩潮, 金长江. 机载风切变探测系统研究数值仿真与风切变模型 [J]. 光电与控制, 1991, 17: 12-19.
- [9] 赵树海. 航空气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 1994: 114-128.
- [10] 肖业伦, 金长江. 大气扰动中的飞行原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 201.
- [11] ARPS, ARPS Users Guide Version 4. 0, Center for Analysis and Prediction of Storms [M]. University of Oklahoma, 1995: 380.

# 李子良等：地形影响的飞机颠簸及其数值仿真实验

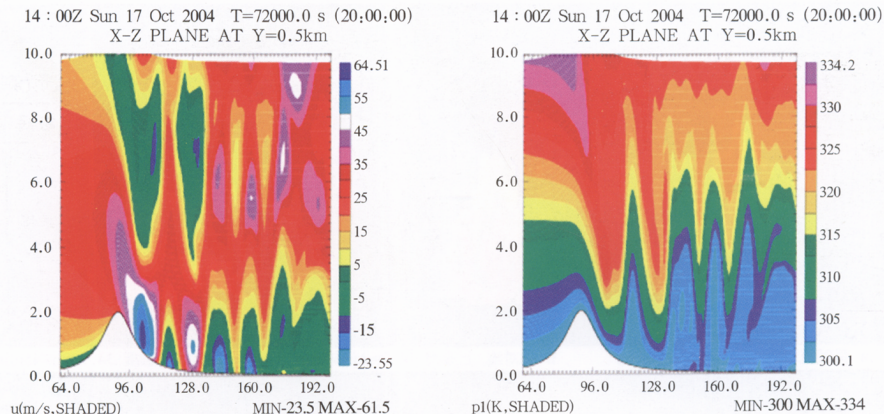


图1 数值模拟气流过山（表面摩擦阻力系数  $C_d = 0.001$ ，山脉高度  $h_m = 2\text{km}$ ）在山脉背风面产生的脉冲下坡风和山脉背风波，水平速度  $u$  分布（左），位温  $\theta$  分布（右）

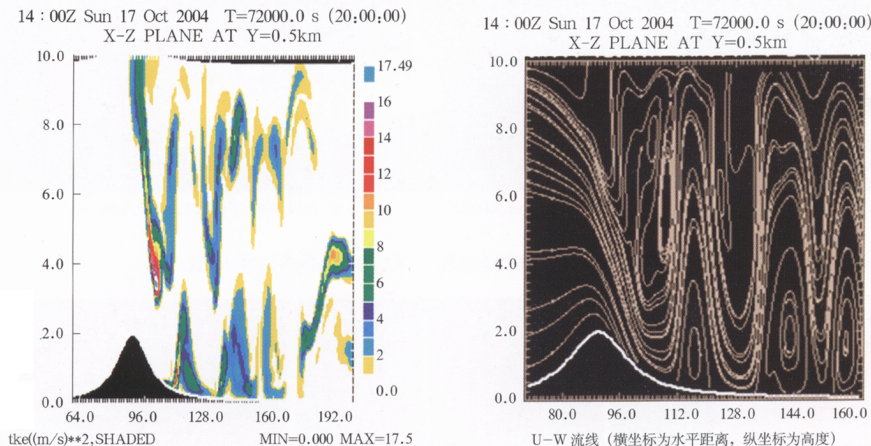


图2 数值模拟气流过山（表面摩擦阻力系数  $C_d = 0.001$ ，山脉高度  $h_m = 2\text{km}$ ）在山脉背风面产生的湍流和背风转子环流，湍流动能分布（左），流线（U - W）分布（右）