

建立在数值预报系统上的航空气象要素预报试验*

李耀东 金维明 王炳仁 王洪芳 刘健文

(北京航空气象研究所, 北京 100085)

提 要

文章介绍了建立在数值预报基础上的航空气象要素(颠簸、积冰和云等)预报技术, 给出了预报颠簸强度的晴空湍流指数和预报积冰的积冰强度和积冰严重性指数, 并利用预报模式进行了模式成云预报和云区诊断分析, 给出了一些具体的模拟及预报试验结果。

关键词: 数值预报 航空气象 颠簸 积冰 云区

引 言

影响飞行的航空气象要素通常包含能见度、雷电、颠簸、积冰、云、低空风切变等。目前我国对颠簸、积冰和云的预报, 经验预报的因素仍然很大。这些年来, 新的预报方法特别是客观量化的航空气象要素预报方法尤为缺乏。积冰的预报基本是采用沿袭多年的 Godske^[1]的“8D”方法。在实际使用中我们发现, 其对积冰产生的条件要求过于苛刻, 漏报率较高。对于颠簸, 早些时期多采用由经典湍流理论得出的 Richardson 数表示法, 但这种方法对观测资料要求很高, 且在使用中发现用其预报颠簸阈值非常难定。80年代末期, Keller^[2]提出了一种用特定晴空湍流指数(SCATR)来预报颠簸的方法, 取得了成功。但是, 这种预报方法同样对资料精度有较高的要求。另外, 常常发生在地理局部不大范围内的 SCATR 指数值较大的正负反号, 物理意义不清。由于这些原因, SCATR 指数没有被广泛使用。近年来, 随着中 β 尺度的数值预报模式日趋成熟和一些新的航空气象要素指数的出现, 我们尝试用数值预报方法直接预报或用预报产品来诊断某些航空气象要素, 取得了一些进展。

1 预报模式系统简介

预报模式系统按业务系统设计。系统以原始气象报文为基础, 对资料进行综合质量控制, 客观分析采用逐步订正方案, 并采用整层无辐散的初值化方案。预报模式为 NCAR/PSU MM4^[3]模式, 模式采用通量形式的原始方程形式, 并采用地形坐标系。模式在水平方向上采用“Arakawa B”型跳点网格, 垂直方向可选用 10 或 15 层(高分辨边界

* 1996-09-14 收到, 1997-03-13 收到修改稿。

层)。模式预报结果用2次拉格朗日插值结合线性插值分析到标准等压面层,结合航空气象需要,对影响飞行的颠簸、积冰、云等进行了诊断分析。

构成模式的基本方程组有:水平运动方程、热力学方程、连续方程、静力方程、水汽方程。模式包含的物理过程有:水平扩散、垂直扩散、地表热力交换、边界层过程、干对流调整及水循环过程。其中,水平扩散在侧边界采用2阶形式,区域内部采用4阶形式;垂直扩散采用K理论进行诊断;地表热平衡方程中包括辐射通量、感热交换和潜热交换;当垂直分层为10层时用总体边界层方案,为15层时采用高分辨边界层方案;干对流调整的原则为:调整遵循质量权重的平均温度不变及不稳定层位温调整至临界位温递减率。

模式提供4种侧边界方案:固定边界、时变边界、流入流出边界、海绵边界。模式采用质量、动量和总能量守恒的有限差分方案,并采用Brown和Campana的显式时间积分方案。

2 航空气象要素的预报方案

2.1 颠簸预报

造成飞机颠簸的大气湍流的空间和时间尺度都是比较小的。对它进行有效的探测需要采用大密度、小间隔(时间、空间)的方法。这在常规的气象业务中是达不到的,因此给预报工作带来了极大的困难。但是,颠簸的出现往往是成片的,颠簸区的水平范围可以从几公里到上千公里,时间尺度可以从几十秒到十几个小时,这说明利用常规资料制作颠簸预报是可能的。

大量个例研究表明,飞机颠簸和晴空湍流密不可分,晴空湍流往往发生在:①风的垂直切变区;②风的水平切变区;③流场的辐散或辐合地带;④流场的水平形变区;⑤流场变化的不连续区;⑥强的水平温度梯度区。所有这些特定环境往往多存在于锋带。Ellrod^[4]用Petterson锋生强度公式推出了湍流指数的一种近似表达形式:

$$TI_1 = |VWS| \times [DEF + CVG] \quad (1)$$

这里 $CVG = -(\partial u/\partial x + \partial v/\partial y)$, $VWS (= \Delta V/\Delta z)$ 为风的垂直切变, DEF 为流场的水平伸展形变和切变形变的结合,表达形式为:

$$DEF = [(\partial u/\partial x - \partial v/\partial y)^2 + (\partial v/\partial x + \partial u/\partial y)^2]^{1/2} \quad (2)$$

在使用式(1)对实际发生的颠簸个例进行模拟中发现, CVG 和颠簸没有很好的对应关系,对湍流指数总体计算效果没有改进,因此把公式(1)修改为:

$$TI = |VWS| \times DEF \quad (3)$$

TI 的单位为 10^{-7}sec^{-2} ,根据实际的飞机报告历史资料,拟合出颠簸指数和飞机颠簸的对应关系如表1所示。

2.2 积冰预报

大量的飞行实践表明,对飞行有严重影响的积冰是云中的过冷水滴在机体表面上冻

结成的冰.水汽在机体上直接凝华成的冰对飞行影响不大.

Godske 用“—8D”法来预报飞机积冰,他推得发生积冰的大气临界温度为^[1]

$$T_c \approx -8(T - T_d) \quad (4)$$

试验发现,用这种方法漏报太多.实际上,对于液态水滴组成的云来说,探空资料上往往不都是

温度等于露点,而只是接近.也就是说,往往温度曲线和露点曲线靠近到一定程度就可以有云层,在两条曲线明显分开处就是云顶.对于霜点曲线,情况类似.金维明^[5]根据大量探空资料分析并结合经验,把判断云中是否存在过冷水滴的条件修正为:

$$0.7 T_f > T \quad (5)$$

式中 T_f 为霜点温度.利用上述关系,可把式(4)修改为:

$$T_c \approx -2.35(T - T_d) \quad (6)$$

对于某个层次,若 $T < T_c$,即可能有飞机积冰发生.飞机在飞行时的动力增温^[6]可用下式表示:

$$\Delta T = 3.87 \times 10^{-5}(V_0)^2 \quad (7)$$

其中, V_0 为飞行速度(km/h).考虑在云中雨水的感热影响,对式(7)作经验修正^[5],变为:

$$\Delta T = 1.9 \times 10^{-5}(V_0)^2 \quad (8)$$

根据式(6)计算的临界温度值,再考虑式(8)的动力增温影响,若满足 $T < T_c$ 和 $T + \Delta T < 0^\circ\text{C}$,预报有积冰,否则预报没有积冰.

积冰强度有两种计算方案,一种为积冰强度 I ,用下式计算:

$$I = EV_0L/60\rho_i \quad (9)$$

其中: E 为捕获系数,一般取 0.4; L 为液态水含量,由数值模式预报结果提供或诊断估算; ρ_i 为冰的密度,取 0.917 g/cm^3 .积冰强度等级按表 2 划分.

积冰的另一表示法引进了积冰严重性指数^[7]概念.该方法是把积冰的严重性用数字 0~10 共 11 个数值来表示.严重性随数值的增大而变大(表 3).考虑的主要因素有:过冷水含量、温度以及云滴的中位数体积直径 3 个参数,它们可分为若干档次(表 4),按照不同的温度段,由云的中位数体积直径和液态水含量组成一特定的积冰严重性指数矩阵(表 5),矩阵中的元素是从大量的试验中总结出来的.云中过冷水含量由模式计算提供(暖云方案)或由经验诊断估算(积云参数化).云的中位数体积直径,根据预报初始实况时的云况由经验方法给定^[5].实践证明,这种方法在一定时段内预报效果较好.系统对两种积冰预报结果按等权重集成.若计算结果不同,则取跨这两个等级的强度.

2.3 云的预报

模式的水循环方案有积云对流参数化方案和暖云方案两种,可根据天气形势进行选定.当选用暖云方案时,系统对云水和雨水含量作分析,若其和大于 1 mg/kg ,认为模式预报生成云.系统中,云的另一种预报方法是诊断方法,当相对湿度达到一定值时,即 $q/q_c > RH(p)$ 临界相对湿度,认为有云.系统提供云量预报供参考,云量按下式估计^[8],

表 1 颠簸强度与晴空湍流指数(TI)对照表

颠簸强度	TI 值
轻	$TI \leq 4$
轻—中	$4 < TI \leq 8$
中	$8 < TI < 16$
强	$TI \geq 16$

表 2 积冰强度与成冰速度对照表

积冰等级	成冰速度 $I(\text{mm}/\text{min})$
微量	$k \leq 0.2$
轻度	$0.2 < k \leq 0.6$
中度	$0.6 < k \leq 1.0$
强度	$k > 1.0$

表 3 积冰强度与积冰严重性指数对照表

积冰强度	积冰严重性指数
无积冰	< 3
轻	3
轻—中	5
中	7
强	≥ 9

表 4 过冷水含量、温度、云中位数体积直径分类

	过冷水含量 L (g/m)		环境温度 T ($^{\circ}\text{C}$)		中位数体积直径 D (μm)
L_1	$L < 0.01$	T_1	$T \geq 0$	D_1	$D < 1$
L_2	$0.01 \leq L < 0.1$	T_2	$-5 \leq T < 0$	D_2	$1 \leq D < 17$
L_3	$0.1 \leq L < 0.3$	T_3	$-10 \leq T < -5$	D_3	$17 \leq D < 28$
L_4	$0.3 \leq L < 0.5$	T_4	$-20 \leq T < -10$	D_4	$28 \leq D < 50$
L_5	$0.5 \leq L < 1.0$	T_5	$T < -20$	D_5	$D \geq 50$
L_6	$L \geq 1.0$				

表 5 积冰严重性指数构成

	$T_2: -5 \leq T < 0$					$T_3: -10 \leq T < -5$					$T_4: -20 \leq T < -10$					$T_5: T < -20$				
ln	D1	D2	D3	D4	D5	D1	D2	D3	D4	D5	D1	D2	D3	D4	D5	D1	D2	D3	D4	D5
L_1	0	0	0	0	10	0	0	0	0	10	0	0	0	0	10	0	0	0	0	10
L_2	0	1	2	3	10	0	1	2	3	10	0	1	2	3	10	0	1	2	3	10
L_3	0	4	5	6	10	0	4	5	6	10	0	3	4	5	10	0	2	2	3	10
L_4	0	5	7	7	10	0	5	6	7	10	0	4	5	6	10	0	3	3	4	10
L_5	0	6	8	8	10	0	6	7	8	10	0	5	6	7	10	0	5	5	6	10
L_6	0	8	9	9	10	0	8	8	9	10	0	7	8	8	10	0	7	7	7	10

最大值取 1.

$$\text{低云: } C_L = 3.3 \times (q/q_s)_L - 1.98 \tag{10}$$

$$\text{中云: } C_M = 2.0 \times (q/q_s)_M - 0.70 \tag{11}$$

$$\text{高云: } C_H = 1.8 \times (q/q_s)_H - 0.50 \tag{12}$$

3 试验结果

颠簸、积冰属特殊气象要素，无法通过常规探测直接获取资料。为了检验预报方法的效果，我们一方面通过建立预报方法时所用的有飞机报告历史资料的个例作验证，再对另外的一些历史资料作模拟试验。另外，本系统于 1995 年 10~11 月在空军某区域气象中心实时业务环境中进行了逐日试验，试验时水平网格取 31×31 ，格距 80 km，中心点取在北京 (39.4°N , 116.5°E)，垂直为 10 个不等距 σ 层。试验以每日 08:00(北京时，下同)常规高空和地面报制作 12、24 h 的常规及航空气象要素产品。下面简要介绍试验

期间几个预报个例和一些历史个例的模拟结果。

3.1 颠簸预报

飞机颠簸预报的检验以气象部门收集到的实际飞机报告作为依据。系统对 1982~1989 年 43 次飞机颠簸个例作了历史验证，其中，正确预报的为 31 次，准确率达 72.1%。对 1990~1994 年发生的 6 次颠簸的模拟试验结果为正确预报 4 次，准确率达 66.7%。

试验期间，系统预报中度以上的颠簸 9 次，收到飞机颠簸报告 2 次，系统均正确预报出来，强度也基本相符。

1995 年 10 月 17 日，一架挑战者 601 型飞机从深圳飞往北京，飞行高度 10000 m，飞机报告在衡水附近有中度颠簸。当日 08:00 的 12 h 250 hPa 的颠簸预报图(图 1)上，菏泽以北有轻度颠簸，衡水到保定有中度颠簸，预报正确。

1990 年 5 月 16 日，民航在北京—哈尔滨、北京—齐齐哈尔航线上有 3 个架次飞行，飞机均在赤峰附近遇到强烈颠簸，当时的飞行高度为 10000 m。其中一架飞机受损严重，被迫改降沈阳，更换飞机后才完成飞行任务。据飞机报告，飞机在 10000 m 附近颠簸最为强烈，下降飞行高度后颠簸明显减弱。

图 2 为本系统利用 5 月 15 日 20:00 的常规地面及高空资料制作的 12 h 颠簸模拟预报结果，预报在赤峰附近有一强颠簸中心，高度在 250 hPa。颠簸强度随高度的下降明显减弱(图略)，这和飞机报告非常一致。

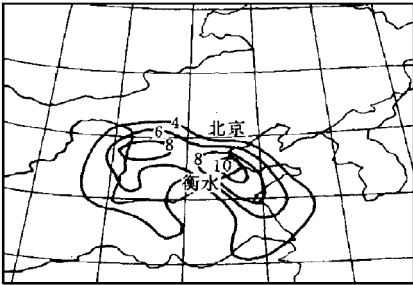


图 1 1995 年 10 月 17 日 20:00 12 h 250 hPa 颠簸指数预报图

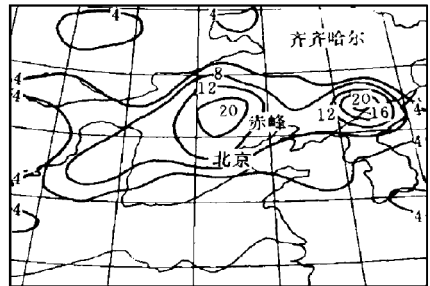


图 2 1990 年 5 月 16 日 08:00 12 h 250 hPa 颠簸指数预报图

3.2 积冰预报

与飞机颠簸预报一样，飞机积冰也以收集到的飞机报告作为检验依据。系统对 1971~1991 年武汉等地区的 89 次飞机积冰的历史验证表明：积冰有无的拟合率为 98.9%，积冰强度的拟合率为 70.8%。对 1992~1994 年所发生的 18 次飞机积冰的模拟试验表明，有无准确率为 94.4%，强度准确率为 83.3%。

试验期间，系统预报中度以上程度的积冰 4 次，遗憾的是没有飞机报告，无法评定预报效果。试验前 5 天，即 1995 年 9 月 25 日，一架直升机，执行从北京飞往贺兰山的任务，飞机起飞后不久，遇到中等强度积冰，当时的飞行高度为 3000 m。系统在等同业务

环境下的模拟试验表明,当时北京附近存在产生积冰的条件,飞机积冰严重性指数表明北京处于轻到中等强度积冰区(图3 a),飞机积冰强度预报北京处于中度积冰区(图3 b),北京东北方向有大范围中等强度的积冰区,预报基本正确.

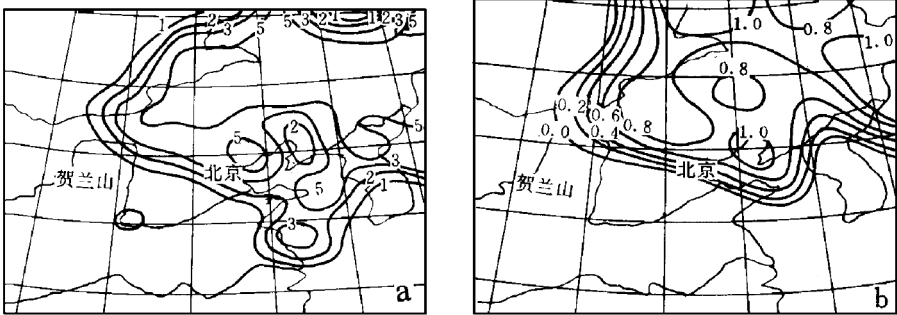


图3 1995年9月25日20:00 12 h 700 hPa (a)积冰严重性指数预报图(b)积冰强度预报图

3.3 云区预报

本系统设计的两种云区预报方案在试验中同时使用,试验期间实时制作各层次的云区分布.因目前云的客观量化检验尚不成熟,故我们只能参照观测实况和卫星云图进行主观评估.总的看来,系统对云的发展变化有较好的描述.图4是1995年10月13日系统的两种方案12 h 700 hPa云区预报,当日模式区域中有一锋面气旋,与该日实况云场的演变对比表明(卫星云图略),预报与实况比较吻合.

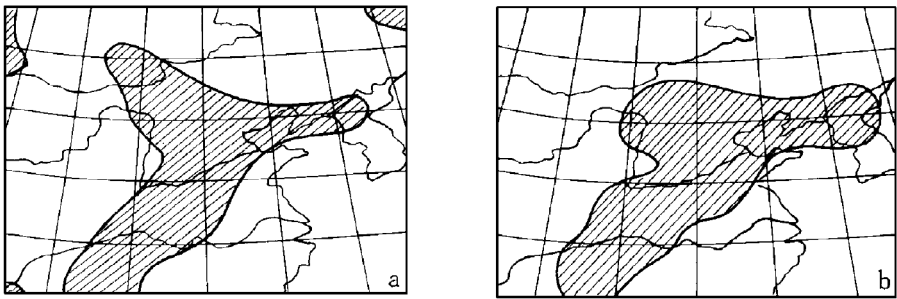


图4 1995年10月13日20:00 12 h 700 hPa (a)云区诊断图(b)云区预报图

4 结论

通过建立包含航空气象要素的数值预报系统及其对历史个例的模拟试验以及初步业务试验结果表明:

(1) 用中尺度数值预报系统来预报一些航空气象要素产品或用数值预报的产品来诊断一些航空气象要素的方法是可行的.

(2) 选择好的物理指数来描述颠簸强度、积冰和云可以从很大程度上客观定量解决这些要素的预报问题。

(3) 为简单实用,模式系统水循环过程选用暖云方案或积云参数化方案,这两种方案都与实际大气的物理过程有差别,从而不能较好反映实际大气中的水物质分布。本系统采用的格距较大,在这种格距下,暖云方案描述较为系统性的云尚可。本模式为准静力模式,这与实际航空需求还有差距。若计算条件和业务条件允许,采用更好的非静力模式动力框架,配以混合云模式,则对云、积冰及整体航空气象要素预报效果可能会有改进。

参 考 文 献

- 1 Godske C L. Dynamic meteorology and weather forecasting. American Meteorological Society, 1957, 769.
- 2 Keller J L. Clear air turbulence as a response to meso-and synoptic-scale dynamic process. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **103**: 2228~2242.
- 3 Richard A Anthes, Eirt-Yu Hsie, Ying-Hwa Kuo. Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4). NCAR Technical Note, May, 1987.
- 4 Ellrod G P. An index for clear air turbulence based on horizontal deformation and vertical, Third International Conference on Aviation Weather Systems. American Meteorological Society, 1989, 339~344.
- 5 金维明等. 飞机积冰的业务预报方法研究. 航空气象科技, 空军第七研究所. 1993年第五期.
- 6 中国人民解放军空军司令部. 天气学教程. 中国人民解放军空军司令部, 1975年. 1249.
- 7 Marcia K. Palitovish and Wayne R Sand. A proposed icing severity index based upon meteorology. Fourth International Conference on Aviation Weather Systems, June, 1991, 24~28.
- 8 Chang C B. On the influence of solar radiation and diurnal variation of surface temperatures on Africa disturbance. Rept. No. FSU 79-3. Department of Meteorology, FSU, Tallahassee, 1979.

EXPERIMENT ON AVIATION METEOROLOGICAL FACTOR FORECASTING BASED ON A LIMITED AREA MODEL

Li Yaodong Jin Weiming Wang Bingren Wang Hongfang Liu Jianwen

(Air Force Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085)

Abstract

The aviation meteorological factors (turbulence, icing, cloud, etc.) forecasting techniques based on limited area model system are introduced. The clear-air-turbulence index for bump, severity index for icieing and distribution specification for cloud are given. And, by using this forecast model the model cloud formation forecast and cloud field diagnostic analysis are made, some simulated and forecasting results are obtained.

Key words: Numerical prediction Aviation meteorology Turbulence Icing Cloud field