

A Modeling Technology of Aircraft Landing Safety Prediction under the Extreme Weather Conditions in the Future Based on Cloud Theory

Yangjun Wang¹, Ren Zhang^{1*}, Shuang Shen², Zhenghua Wu²

¹Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

²Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

基于云理论对未来极端天气条件下飞机起降安全预测建模技术

汪杨骏¹, 张韧^{1*}, 申双², 胡正华²

¹解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101, 中国

²南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044, 中国

Abstract

This paper focus on hazards, vulnerability and prevention ability three aspects to establish a model for evaluating the safety of aircraft take-off and landing, choosing high winds, low cloud and low visibility as the hazards. Among them, the trend of wind speed is obtained directly from the CMIP5 multi-model set data, and the cloud base height is replaced by the calculation of the lifting condensation level. For the prediction of visibility, this paper proposes a time series forecasting method based on the cloud theory, combined with a variety of meteorological elements of the airport ground. The vulnerability and prevention ability based on the security data of the local airport. Finally, we use the model to assess the risk of three different types of aircraft take-off and landing from 2016 to 2020. The results showed that: when other conditions remain unchanged, the weather and climate are not conducive to the normal operation of the airport in the future, and the different types are performed differently in the adaptability to climate change.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41276088)
作者简介: 汪杨骏(1990-), 男, 硕士研究生, 从事海洋环境风险评估研究。Tel: 18652097232; E-mail: 492670449@qq.com
*通讯作者: 张韧, 教授、博士生导师, 从事海洋环境影响评估与决策研究。E-mail: zrpaper@163.com

Keywords: extreme weather; risk assessment; cloud theory; aircraft taking off and landing

摘要

本文从致险因子、脆弱性、防范能力三个方面建立了飞机起降安全的评估模型, 通过选取大风、低云及低能见度作为影响飞行安全的致险因子。其中, 风速的变化趋势由 CMIP5 多模式集合资料直接获得, 云底高的预估通过计算抬升凝结高度代替。而对于能见度的预测, 本文提出了一种基于云理论的时间序列预测方法, 结合机场地面多种气象要素资料计算得出。而脆弱性、防范能力则由当地机场多年保障数据确定。最后, 本文利用该模型对某机场 2016-2020 年三种不同机型飞机起降的风险进行了评估, 结果表明: 在机场其他条件不变的情形下, 未来天气气候正在朝着不利于机场正常运行的方向变化, 且不同机型针对气候变化的适应能力不同。

关键词: 极端天气; 风险评估; 云理论; 飞机起降

1. 引言

气象条件是影响军事活动特别是军事航空活动的重要环节。相关研究指出航空活动的安全性大致可以分为人、飞机本事和环境因素三类。其中, 约有 1/3 的飞行事故是由环境因素引起的。而环境要素主要就是气象要素和重要天气(见表 1) [1]因此, 认识和掌

握航空气候规律，充分利用天气气候条件，有效组织气象保障，对顺利完成各项飞行任务具有重要意义。

表 1. 1951-1991 年国内运输机与天气气候原因有关的飞行事故统计

原因	云中飞行	综合复杂天气 (低云、低能见度和降水)	飞机积冰	误入雷暴云中	低空风切变	大风、大侧风
事故次数	21	14	5	4	2	2

当前国内外针对危险天气对飞行影响的研究主要有两个方面：一方面是针对单一气象要素，研究其对飞行安全影响机理，建立动力学模型进行故障分析与仿真。周川等研究了强降雪天气对飞机性能及结构的影响，分析了飞机各部分在遭遇强降雪积冰后对飞行安全的影响[2]。Manuela 等针对飞行过程中雷暴的影响，建立了 DIVMET 气象回避模型，用以安全飞行路线的选定[3]。Connolly 研究了极端风暴对飞行的影响机理，并提出了所需的防范措施[4]。另一方面是综合气象要素的分析，这部分研究侧重于分析局地气象要素及重要天气气候的时空分布特征，其对飞行安全的影响以定性描述为主。方艳艳归纳了影响飞行安全的气象条件，其成因、特点及可能造成的危害[5]。陈志平对温州机场的飞行气象要素和重要条件进行了统计与分析，着重之处了气温、风、低云、低能见度等气象要素和雷暴、台风、暴雨等重要天气的分布特点及其对飞行安全的影响[6]。贺治华研究了沿海地区复杂的气象条件下航空保障工作[7]。王永忠分析了天气因素对飞机飞行安全性和经济性的影响，并针对如何利用有利或不利天气改善我国飞行经济效益提出了具体运用方法[8]。

综上，当前阶段对于气象气候条件对航空飞行安全综合定量的研究并不多，且研究主要集中在对历史气象气候条件的统计与分析上。因此，本文首先参考《航空器机场运行最低标准的制定与实施规定》(CCAR—97FS—R₁)，选取合适的气象要素，基于历史数据、CMIP5 多模式集合数据及相关预测技术对未来气候进行预估。其次，结合当地机场保障数据确定脆弱性与防范能力，从而建立相应的风险评估模型对 2016-2020 年机场飞行安全进行评价。

2. 飞机起降风险评估模型

2.1. 建模思路与方法

本文从致险因子、脆弱性、防范能力三个方面着手建立飞机起降安全的评估模型。其中，评估模型的脆弱性与防范能力可由当地机场的相关保障数据得到，

并认为在一定时间内保持稳定。而评估的难点在于对于致险因子未来变化趋势的预估上，本文选取大风、低云及低能见度作为影响飞行安全的致险因子，其中风速的未来变化趋势可由 CMIP5 多模式集合资料直接获得，云底高的预估采用何小东等提出的一种利用地面气象资料，结合查算表，计算抬升凝结高度用以代替云底高度的方法进行预估[9]。而对于能见度的预测，本文提出了一种基于云的时间序列预测方法。

2.2. 飞机起降安全风险评价指标

低能见度条件常常结合当时天气条件下低云、风速状况一起，作为影响飞机作业的致险因子。主要包括飞行作业所允许的云底高度、能见度以及地面风速最大值。只有当实际天气高于机场运行标准时，飞行作业才能进行，否则，不允许进行作业。机场的脆弱性包括机场基础设施情况与飞机所属的机型。针对不同的飞机机型，其最低飞行作业标准也有所不同。同时，机场的基础设施完备与否，对飞机作业的效率与安全性也有重大的影响，一般而言，机场的基础设施越完备，飞机作业的效率与安全性能越有保障，反之，则越脆弱。同时，飞行作业受到机场地理环境的制约，地理环境影响不同，从而面临不同自然现象时的脆弱性也有出现不同，一般而言，机场选址应具有好的净空条件、开阔的视野。机场的防范能力，指的是机组人员面对恶劣天气时的应变能力，依赖于驾驶员的综合技能，以及机组其他人员的相互配合。具体指标体系见表 2。

表 2. 飞行起降安全风险评价指标

风险 R	致险因子 H	能见度
		云底高
		风速
	脆弱性 V	飞机机型
		机场设施
		机场地理环境
防范能力 D	机组人员综合能力	

2.3. 飞机起降安全风险概念模型

2.3.1. 致险因子 H

2.3.1.1. 技术路线

致险因子包括能见度、云底高度和风速，其中风速、云底高度以及能见度的观测数据都可以通过当地场站的自动气象站获取，未来不同情景下风速的预估也可以通过 IPCC 第五次报告提供的 CMIP5 模式获得。但未来不同情景下的云底高度以及能见度没有直接预估数据，但可以基于 CMIP5 提供的不同情景下各气象要素预估值通过一定的数学模型推理得到[10-12]。其中，云底高度可利用抬升凝结高度近似；而能见度可通过云预测模型求得。技术路线见图 1。

2.3.1.2. 能见度预估

常见的时间序列预测方法很多[13]，建立云预测模型[14]对未来不同情景下能见度进行预估，首先通过场站历史数据，对各气象要素与能见度进行相关分析，找出具有明显相关关系的气象要素进行建模。其次，对数据进行预处理，将原始数据通过一定方法（主成分分析，SVD，小波分析等）去噪，提取特征值。再通过高斯云变换方法对各个属性进行聚类，将所得类型通过云综合方法进行概念跃迁得到各个属性的一个个定性云。将各气象要素数据输入云推理模型，通过极大判别法确定数值所属的定性概念，结合 Apriori 算法挖掘出各气象要素与能见度之间的强相关规则，建立其云预测模型。最后 CMIP5 模式不同情景下的气象要素数据输入到云预测模型中，得到相应的能见度预估值，其流程图见图 2。

2.3.1.3. 云底高度预估

根据相关研究表明，云形成的主要原因是未饱和湿空气绝热上升运动达到饱和，其上升的高度即为抬升凝结高度。因此可用抬升凝结高度来近似表征层状云的云底高度。其具体计算方法如下：

$$\theta_0 = T_0(1000/P_0)^{0.286} \quad (1)$$

$$e_0 = 6.1078 \times \exp[17.269(T_{d0} - 273.16)/(T_{d0} - 35.86)] \quad (2)$$

$$q_0 = 622E/(P - 0.387E) \quad (3)$$

其中， T_0 ， P_0 ， T_{d0} 分别为初始位置的气压、气温和露点温度。 θ_0 ， q_0 为初始位置的位温，比湿。

设凝结高度上的气压为，根据式(1)(2)(3)得：

$$T = \theta_0(P/1000)^{0.286} \quad (4)$$

$$E = 6.1078 \times \exp[17.269(T - 273.16)/(T - 35.86)] \quad (5)$$

$$q_s = 622E/(P - 0.387E) \quad (6)$$

其中， T ， E ， q_s 分别为凝结高度上的气温，饱和水汽压和饱和比湿。根据不同估计值 P ，与初始位置上的位温值 θ_0 ，计算结果可以得到一些列饱和比湿结果： $q_s = f(\theta_0, P)$ 。而比湿 q 在感觉热过程中守恒($q_s = q_0$)。

因此，可通过 θ_0 和 q_0 反查出对应的 P 值，即为抬升凝结高度上的气压值 P_{LCL} ，即

$$P_{LCL} = f(\theta_0, q_0) \quad (7)$$

结合求得抬升凝结高度上的气温 T_{LCL} ，最后求得抬升凝结高度值：

$$Z_{LCL} = \frac{(\ln P_0 - \ln P_{LCL})R}{g} \left(\frac{T_0 + T_{LCL}}{2} \right) \quad (8)$$

利用 CMIP5 模式不同情景下的各气象要素预估值代入模型中计算即可得到云底高度预估值。

2.3.2. 脆弱性 V

飞机起降安全的脆弱性包括三个方面，飞机机型、机场基础设施建设情况及机场地理环境。

飞机机型方面：不同机种机型针对不同气象条件其脆弱性是不同的。各种气象条件下，不同机型（A、B、C 三种机型）的脆弱性依据机场局地有关规定制定。

机场基础设施建设对机场的正常运行、飞机的正常作业影响主要体现在两个方面：一是起飞时的影响；二是着陆时的影响。不同的机场基础设施建设可容许的致险因子下限不同，结合不同等级的机型，可建立相应的最低起飞标准和最低着陆标准。针对现实问题，可查阅待评估机场所制定的相关标准。

机场所在的地理环境对飞行作业的影响主要在于三个方面：一是机场范围内障碍物情况，其方位、距离以及高度制约着飞机爬坡的高度。二是机场跑道的设置，飞机起降时侧风、顺风及逆风的大小由跑道的走向与局地风向共同确定。三是当地地理环境对于洪水、台风等自然灾害的脆弱程度。这三个方面都可以根据当地机场的保障数据确定。

2.3.3. 防范能力 D

防范能力是对机组人员综合能力的评估，包括驾驶员对飞机驾驶的熟练程度、处理飞机上的意外事件、突发情况的能力、地面工作人员的指挥能力等等。

2.3.4. 飞机起降安全风险评估模型

在本概念模型中，假设所有机组人员都是熟练的，可在脆弱性 V 所容许的相应致险因子 R 临界条件下，进行正常作业。因此，对飞机作业风险进行评定时，只要一一比较该机场单位时间内的致险因子 R 的指标是否超过飞机作业本身的脆弱性 V 的指标，若有一项指标不符合，则记为该单位时间内飞机不可作业，计算总时间内飞机的不可作业率，记为风险 R。

3. 极端天气条件下飞机起降的风险评估

3.1. 数据资料

1) 某机场 2005.1.2-2015.10.24 各气象要素（近地表温度、平均海平面大气压、相对湿度、风向、平均风速、总云量、云底高、降水量、水平能见度）三小时观测数据。

2) GFDL-ESM2M 模式在 RCP26 和 RCP85 情景下 2016.1.1-2020.12.31 气象要素（云量、云高、气温、相对湿度、气压、风速）逐日资料。

3) 某机场多年保障数据。（飞机起降临界风速、临界云底高、临界能见度）

3.2. 极端天气气候下机场各气象要素预估

3.2.1. 云推理模型对能见度的预测

利用某机场 2005 年 1 月 1 日至 2015 年 10 月 24 日气象要素资料进行云推理模型的验证性试验。其中，以 2005 年 1 月 1 日至 2015 年 8 月 31 日气象要素资料作为训练样本；以 2015 年 9 月 1 日至 2015 年 10 月 24 日气象要素资料作为试验样本，对云推理模型预测效果进行检验。

3.2.1.1. 相关关系分析

对各气象要素资料与能见度资料进行相关关系分析，结果见表 3。结果可以证实能见度是由多个气象要素综合作用而成。选取相关性大于±0.1的气象要素资料，构建云推理模型。

表 3. 各气象要素与能见度之间的相关关系

	云量	云高	气温	相对湿度	气压	风速
能见度	-0.199	0.003	0.233	-0.464	-0.102	0.332
	5	8	7	8	6	8

依据上表，我们选取云量、气温、相对湿度、气压和风速 5 组数据资料作为影响因子对能见度进行预测。

3.2.1.2. 云变换聚类

通过高斯云变换方法将各选中气象要素资料进行聚类，部分聚类结果见图 3。对所划分的多个云滴进行概念跃迁，获得符合评估需要的 5 个云滴，部分结果见图 4。

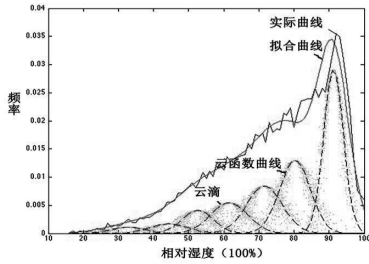


图 3. 高斯云变换对相对湿度的分类结果

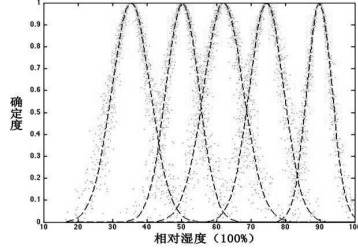


图 4. 相对湿度概念跃迁

图 3，图 4 反映的是高斯云变换方法对一个相关气象要素的聚类，将其划分为若干个云滴，再通过云综合方法将这些小云滴综合成为若干个具有显著意义的属性值。其中，相对湿度的属性分别为湿度小、湿度较小，湿度适中，湿度较大，湿度大五类。

3.2.1.3. 云推理模型对能见度模拟效果

将云变换后的各气象要素属性值代入云推理模型对能见度预测，其模拟效果见图 5。

图 5 中，云推理模型对能见度预测值用“*”表示，而真实值用“o”表示，其误差用“点划线”表示。其中，为简便将图中能见度属性用代号：{26, 27, 28, 29, 30}表示，分别代表：{能见度低、能见度较低，能见度中等，能见度较好，能见度好}五个属性。分析可得，云推理模型对能见度的模拟准确率达到 73.76%。而常规多元线性回归模型的对未来 24 小时内能见度模拟的准确率仅为 67%，且随时间推移准确率逐步下降。因此，采用云推理对能见度预测具有一定优势。

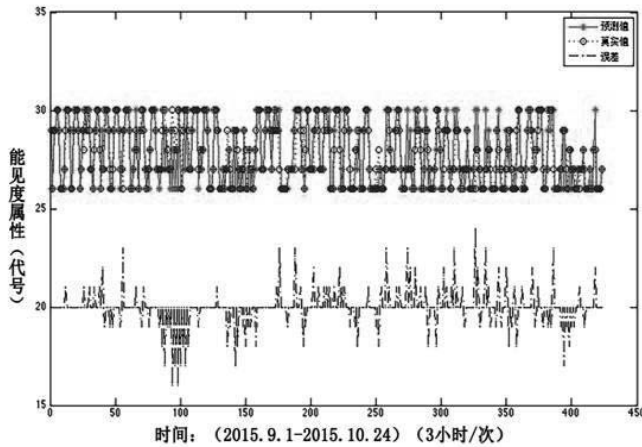


图 5. 云推理模型对能见度的模拟效果检验

3.3. 2020 年极端天气气候情景对机场安全的风险评估

基于某机场多年保障经验, 得到脆弱性条件见表 4, 其中能见度临界条件 1.5km 和 2km 分别是划分能见度低和较低属性的期望值。将 2020 年预估的极端天气气候结果代入表 4 中, 若在一天中有一项保障条件不符合, 则认为该日机场某机型不能正常运行。计算 2016-2020 年机场某机型正常运行率。2016-2020 年不同机型的飞机正常运行风险随时间变化趋势见图 6。

表 4. 某机场正行运行的航空气象保障经验

云底高 (m) 条件			
机型保障规范	A 型飞机	B 型飞机	C 型飞机
临界条件	≥ 125	≥ 175	≥ 165
能见度 (km) 条件			
临界条件	≥ 1.5 (低)	≥ 2 (较低)	≥ 2 (较低)
风速(取逆风、侧风、顺风的最低条件) (m/s) 条件			
临界条件	≤ 12	≤ 12	≤ 12

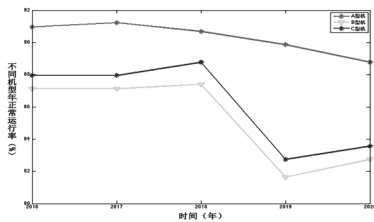


图 6. 2016-2020 年不同机型正常运行效率的时间变化趋势

分析图 6 可以得出以下结论:

1) A、B、C 三种机型在未来五年中受到极端天气气候影响, 年正常运行率随时间呈下降趋势。在机场其他条件不变的情形下, 表明未来天气气候正在朝着不利于机场正常运行的方向变化, 采取有效措施应对极端天气气候的变化显得十分重要。

2) A、B、C 三种机型中, A 机型受极端天气影响最小, 年正常运行效率保持较高的水平, 而 B 机型次之, C 机型受极端天气影响最大。

4. 结论

本文从致险因子、脆弱性、防范能力三个方面建立了飞机起降安全的评估模型, 通过选取大风、低云及低能见度作为影响飞行安全的致险因子。其中, 风速的变化趋势由 CMIP5 多模式集合资料直接获得, 云底高的预估通过计算抬升凝结高度代替。而对于能见度的预测, 本文提出了一种基于云理论的时间序列预测方法, 结合机场地面多种气象要素资料计算得出。而脆弱性、防范能力则由当地机场多年保障数据确定。最后, 本文利用该模型对某机场 2016-2020 年三种不

同机型飞机起降的风险进行了评估, 结果表明: 在机场其他条件不变的情形下, 未来天气气候正在朝着不利于机场正常运行的方向变化, 且不同机型针对气候变化的适应能力不同。

参考文献

- [1] 陈会芝. 危险天气条件下的航空飞行与安全. 西南交通大学, 2003.
- [2] 周川, 张序, 谭力, 等. 强降雪天气对飞行的影响分析. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(3):78-83.
- [3] Manuela SAUER, Thomas HAUF, Ludmila SAKIEW, 等. 论香港国际机场起着陆滑行区域气象回避路线的识别(英文). Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2016(3).
- [4] Connolly J W. An overview of severe storms given by a representative of the U.S. Department of Commerce/NOAA and how they affect aviation is presented. What is being done and the organizations responsible for the work in this area are briefly discussed. A partial list o. 1978.
- [5] 方艳艳, 戴宏发. 威胁飞行安全的几种气象条件[J]. 今日科苑, 2008(22):76-76.
- [6] 陈志平. 温州机场飞行气象条件分析. 浙江气象, 2010, 31(3):23-27.
- [7] 贺治华. 沿海地区复杂气象条件下飞行的航卫保障. 航空军医, 1998(2):64-65.
- [8] 王永忠. 天气因素对我国民航飞行安全性和经济性的影响分析. 西南交通大学, 2001.
- [9] 何小东, 周毓荃, 胡志晋. 利用地面资料计算云底高度的一种新方法// 第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集(II). 2008.
- [10] 王淑英, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析. 气象科技, 2003, 31(2): 109-114.
- [11] 洪全. 重庆市大气能见度变化趋势及影响因子. 重庆大学学报, 2003, 26(5): 151-154.
- [12] 刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 降水现象对大气消光系数和能见度的影响. 应用气象学报, 2010, 21(4):433-441.
- [13] Liu D, Wang D, Wang Y, et al. WD-RBF Model and its Application of Hydrologic Time Series Prediction. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2013, 3(4):185-191.
- [14] 李德毅, 刘常显, 杜嵩, 等. 不确定性人工智能. 软件学报, 2004, 第 11 期(11):1583-1594.