

## 终端区动态容量预测模型

杨尚文<sup>1</sup> 胡明华<sup>1</sup> 赵征<sup>1</sup> 李晓明<sup>2</sup> 常勋<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016; 2. 中国东方航空江苏有限公司, 南京, 211113)

**摘要:**为有效预测终端区动态容量,提出了一种危险天气影响下的动态容量预测模型。该模型根据危险天气预报概率的大小,将受影响空域的范围做区间化处理,认为危险天气预报概率大于70%的空域为完全避让空域,危险天气预报概率在70%以下的空域为可能避让空域。引入航班进离场优化排序和危险天气避让路径规划策略,以平均航班延误最小为目标,采用捕食搜索算法予以求解;并根据终端区实际容量评估的一般流程,运用仿真方法预测一定延误水平下的动态容量区间。以某机场终端区为例,验证了模型的有效性。

**关键词:**空中交通管制; 机场; 容量; 仿真

**中图分类号:** V355.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2012)01-0113-05

### Forecasting Model for Dynamic Throughput of Terminal Area

Yang Shangwen<sup>1</sup>, Hu Minghua<sup>1</sup>, Zhao Zheng<sup>1</sup>, Li Xiaoming<sup>2</sup>, Chang Xun<sup>2</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. China Eastern Airlines Jiangsu Ltd, Nanjing, 211113, China)

**Abstract:** A model for forecasting dynamic throughput of terminal area is proposed for the terminal area in heavy weather. According to the probability of forecasting heavy weather, the model separates the affected airspace into different spaces. The unavaible airspace is defined as the airspace covered by forecasting heavy weather with the probability exceeding 70%, and the partially available airspace is defined as the airspace covered by forecasting heavy weather with the probability less than 70%. The strategies of flight arrival and departure scheduling as well as rerouting are introduced into the model aiming to minimize the average flight delay. Predatory search algorithm is used to solve the model. According to the general process of practical throughput evaluation for terminal area, simulation is used to forecast the space of dynamic throughput with a certain level of flight delay. Setting a terminal area as an example, a case study is performed to certify the rationality of the model. Test results show that the model can effectively forecast dynamic throughput of terminal area in heavy weather.

**Key words:** air traffic control; airports; throughput; simulation

终端区动态容量是指天气、设备故障、军方活动等随机性因素影响下的终端区空中交通容量。随着航空运输量的快速增长,终端区动态容量限制导致的空中交通拥挤问题日益突出,尤以雷暴、积雨云等对流性危险天气对终端区动态容量的影响最为显著,它们具有随机性强、难以准确预报、一定时期内发生频率高等特点。动态容量预测是制定空中

交通流量管理方案的基础。国内外学者针对危险天气影响下的空域容量评估问题,取得了一定的成果。Krozel<sup>[1]</sup>在航空器不受航路约束的情况下,用网络流算法研究了对流天气影响下的空域容量。Zou<sup>[2]</sup>考虑了与文献[1]相同的条件,用网络流算法研究了对流天气影响下的空域和航路方向性容量。Song<sup>[3]</sup>通过统计不同危险天气覆盖率条件下扇区

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2011BAH24B08)资助项目; 国家自然科学基金(61104159)资助项目。

**收稿日期:** 2010-12-09; **修订日期:** 2011-05-23

**通讯作者:** 胡明华, 男, 教授, 博士生导师, 1962年生, E-mail: minghuahu@263.net。

内的飞机数量,研究了危险天气影响下的扇区容量计算方法。Kim<sup>[4]</sup>研究了对流天气预报误差导致空域容量预测结果变化的灵敏度,所涉及的天气预报误差包括时间误差、范围及强度误差、位置误差。现有研究主要针对区域航路,很少涉及终端区。

常茂军<sup>[5]</sup>使用马尔可夫决策过程规划航班避让危险天气的路径,并通过引入进离场优化排序算法计算终端区动态容量。由于危险天气的较强随机性,危险天气预报一般表现为概率预报的形式<sup>[6]</sup>,例如美国的协同对流天气预测(Collaborative convective forecast product, CCEP)和国家对流天气预测(National convective weather forecast, NCWF);而上述研究所涉及的危险天气信息一般具有确定的范围和强度,体现了实时的动态容量,难以满足动态容量预测的要求。有学者根据概率天气预报构造了相应的概率容量情景树或决策树,优化了流量管理策略<sup>[6-8]</sup>。但是情景树或决策树根据各种概率下的损益值进行决策,当实际发生的情景不同于预计的最可能情景或者与最优情景偏离较大时,预先做出的决策将与实际最优决策存在难以接受的差异;而且对于那些预报出现危险天气概率较低的空域,尽管其在一定概率下不可用,但事后证明这些空域往往全部或部分可用<sup>[5]</sup>,所以通过情景树或决策树表示概率容量的方法也不能有效预测动态容量。本文根据危险天气预报概率的大小,将受影响空域的范围做区间化处理,引入终端区航班进离场优化排序策略和避让危险天气路径规划方法,以平均航班延误最小为目标,采用仿真方法不断增加航班量,从而预测一定延误水平下终端区动态容量的范围,为制定具有较强鲁棒性的流量管理策略提供决策依据。

## 1 问题描述

NCWF 能够为美国国家空域系统提供6 h内概率天气预报,它用不同颜色标明不同发生概率的对流天气区域,其中最可能(概率大于70%)发生对流天气的空域用深色表示,随着发生概率的降低,相应空域的颜色也逐渐淡化<sup>[7]</sup>。本文根据NCWF的预报结果,对受影响空域范围做如下区间化处理:认为危险天气发生概率大于70%的空域为完全避让空域,航班必须避让;危险天气发生概率在70%以下的空域为可能避让空域,允许航班选择性地穿越,如图1所示。航班延误时间是反映终端区容量的主要指标。本文的基本思路是按照进离场航班比例和机型比产生随机航班流;根据受影响空域的范围界定,以平均

延误最小为目标对进离场航班进行路径规划和优化排序,确定延误值的取值区间,不断增加航班量,产生相应的航班量——平均延误曲线;根据这些曲线确定一定延误水平下的终端区动态容量区间。动态容量预测的关键问题是对危险天气影响下的航班延误时间的计算,详细阐述如下。

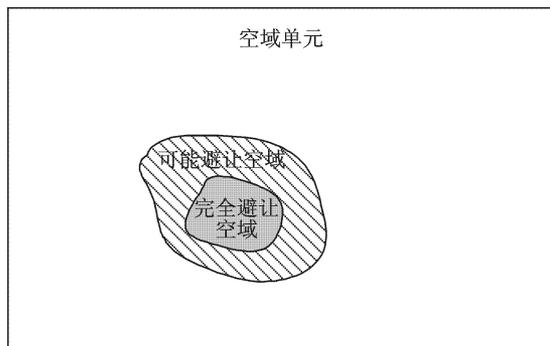


图1 受影响空域示意图

设随机生成某时间段内的进离场航班量为 $n$ ,航班集 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 。对于 $\forall F_i \in F, E_i$ 为计划着陆或起飞时刻, $L_i$ 为实际着陆或起飞时刻,如果 $F_i$ 的标称航路受危险天气影响, $R_i$ 为规划改航路径后的预计着陆或起飞时刻;若航班 $F_{i+1}$ 紧随航班 $F_i$ 之后着陆或起飞,则两航班的放行间隔标准为 $S_i$ 。本文假设航班避让危险天气区域时可以选择绕飞或采用其他进离场航路。经优化排序,航班量为 $n$ 时的最大、最小平均延误分别为

$$D_{\max} = \frac{\max \min \sum_{i=1}^n (L_i - T_i)}{n} \quad (1)$$

$$D_{\min} = \frac{\min \min \sum_{i=1}^n (L_i - T_i)}{n} \quad (2)$$

式中

$$T_i = \begin{cases} E_i, & \text{航班 } F_i \text{ 的标称航路未受危险天气影响} \\ R_i, & \text{航班 } F_i \text{ 的标称航路受危险天气影响} \end{cases}$$

约束条件

$$L_i \geq T_i \quad (3)$$

$$L_{i+1} - L_i \geq S_i \quad (4)$$

$$R_i \in [R_{i\min}, R_{i\max}] \quad (5)$$

式(3)表示航班预计着陆或起飞时刻约束;式(4)表示安全间隔约束;式(5)为受危险天气影响的航班着陆或起飞时刻区间。

航班规划改航路径后的预计着陆或起飞时刻与所避让空域的大小及终端区航路结构关系密切,由规划路径和航空器速度决定,文献[5]已有详细

论述,本文引用其方法,具体过程不再赘述。通过不断增大航班量 $n$ ,可以得到航班量——最大平均延误曲线和航班量——最小平均延误曲线,从而确定该时间段内一定延误水平下的终端区最小容量和最大容量,得出动态容量区间。

## 2 求解算法

区间化处理受影响空域的范围后,任一确定不可用空域条件下的航班优化排序都是NP完全问题<sup>[9]</sup>,因此确定情景下的优化算法是整个求解过程的基础,直接关系着求解效率,对算法性能要求较高。捕食搜索算法是文献<sup>[10]</sup>提出的一类新的仿生计算方法,该算法模拟动物的捕食策略,利用控制搜索空间的限制大小,实现局域搜索和全局搜索以及它们之间的转换,具有很好的局部集中搜索和跳出局部最优的能力。

采用基于航班排列的顺序编码,即对 $n$ 个航班分别产生着陆或起飞次序的整数序列,检验其可行性,从而形成一个可行解对应的顺序编码,例如 $1-2-\dots-n$ 。采用逆转法实现邻域操作,即随机选择解的两个位置,将它们之间的编码进行逆转,并剔除不可行解,得到当前解的一个邻域。本文采用Linhares提出的目标函数值限制法,即通过多次搜索当前较好解的邻域获得一组目标函数值,选取其中较小的部分值作为局域搜索限制,较大的部分值作为全局搜索限制。

设 $Level\_Num$ 为总限制值, $Local\_Level$ 为局域搜索限制, $Global\_Level$ 为全局搜索限制,三者满足 $Level\_Num > Global\_Level > Local\_Level > 0$ , $Counter\_Max$ 为每个限制下的最大循环次数, $W$ 为当前解邻域的搜索次数,捕食搜索算法的具体步骤如下<sup>[11]</sup>:

步骤1:随机产生一个初始解 $x$ ,令至今最优解 $x_{min}=x$ ,限制级别 $Level=0$ ,循环次数 $Counter=0$ ;

步骤2:如果 $Level \leq Level\_Num$ ,则搜索 $x$ 的邻域 $W$ 次,并取得临时最优解 $x_{n\_min}$ ,然后转步骤3,否则结束, $x_{min}$ 即为求得的最优解;

步骤3:如果 $f(x_{n\_min}) \leq Restriction(Level)$ ,则令 $x=x_{n\_min}$ ,然后转步骤4,否则转步骤5;

步骤4:如果 $f(x) < f(x_{min})$ ,则令 $x_{min}=x$ , $Level=0$ , $Counter=0$ ,重新计算限制,然后转步骤2,否则转步骤5;

步骤5:令 $Counter=Counter+1$ ,如果 $Counter > Counter\_Max$ ,则令 $Level=Level+1$ , $Counter=0$ ,然后转步骤6,否则转步骤2;

步骤6:如果 $Level=Local\_Level$ ,则令 $Level=Global\_Level$ (通过限制级别 $Level$ 的跳跃实现从局域搜索到全局搜索的转换),否则直接转步骤2。

每当解得到改善时,即获得一个至今最好的解,则执行以下操作计算限制:

(1)搜索 $Level\_Num$ 次至今最好解的邻域,得到 $Level\_Num$ 个解的目标值;

(2)将这 $Level\_Num$ 个值与至今最好解的值按升序排列;

(3)将排列后的 $Level\_Num+1$ 个值依次赋给限制 $Restriction(0), Restriction(1), \dots, Restriction(Level\_Num)$ ;

(4)取其中 $Restriction(0), Restriction(1), \dots, Restriction(Local\_Level)$ 部分作为算法的局域搜索限制,而 $Restriction(Global\_Level), \dots, Restriction(Level\_Num)$ 部分作为算法的全局搜索限制。

## 3 算例分析

设预报某机场终端区未来一段时间内将有危险天气出现,终端区结构如图2所示(箭头所指为磁北方向,不按比例;为简化、直观起见,未画出等待航线、转弯航线和部分起落航线),各进离场航线已标明,各定位点的计划航班流量相同,使用06号跑道起降;灰色区域表示完全避让空域,阴影区域表示可能避让空域。由图2可以看出,虚线所示部分进离场航路在受影响空域的覆盖下。

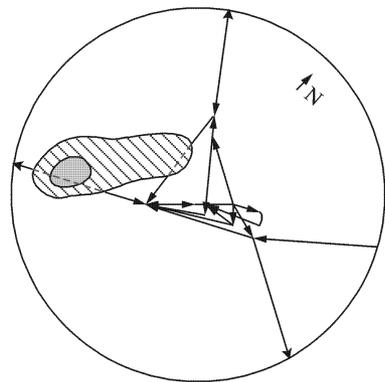


图2 某机场终端区及危险天气形势示意图

设标称航路可能受危险天气影响的航班的比例为40%,重(H)、中(L)、轻(S)3种机型的比例分别为50%,40%和10%,进场、离场比例分别为60%,40%。航班进离场放行间隔按照国际民航组织规定的尾流间隔标准,如表1所示;进离场航线上的间隔按照雷达间隔标准设置。

参照文献<sup>[11]</sup>的参数设置规则,结合本文模型的特点,捕食搜索算法的参数设置如下: $W=0.5n$ ;

表1 国际民航组织尾流间隔标准

间隔/s		后机		
		H	L	S
前机	H	99	133	196
	L	74	107	131
	S	74	80	98

$Level\_Num = n$ ,  $Local\_Level = \lceil Level\_Num/4 \rceil$  (这里 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整),  $Global\_Level = n$ ,  $Counter\_Max = 2n$ 。根据文献[12]所述的终端区容量仿真评估流程及关键技术,产生随机航班流,并不断增加航班量,对该终端区航班流进行仿真,得出危险天气影响下的终端区航班量——平均延误曲线分别如图3,4所示;无危险天气影响的航班量——平均延误曲线如图5所示。

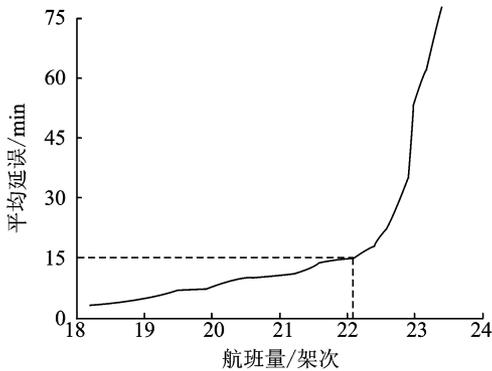


图3 航班量——最大平均延误曲线

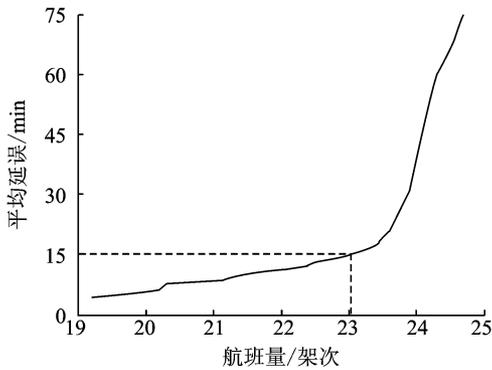


图4 航班量——最小平均延误曲线

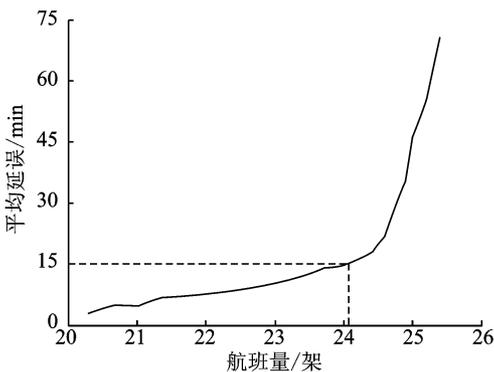


图5 一般情况下航班量——平均延误曲线

延误水平没有统一的标准可供参考,一般因机场而宜。国内关于终端区实际容量评估的理论研究和应用项目中,主要以平均延误15 min为可接受延误水平。以此为参考,则该时间段内的实际小时容量约为 $[22.1, 23.0]$ 架次,一般情况下的实际小时容量约为24.1架次。

## 4 结束语

天气的不确定性给动态容量的预测带来了困难。本文根据概率天气预报的特点,将未来一定时间内的受影响空域做区间化处理,引入航班进离场排序和航路规划策略,对终端区实际容量进行仿真评估,预测了危险天气影响下的终端区动态容量区间,为动态容量评估的研究提供了新思路,也为流量管理策略鲁棒性的提高奠定了基础。

由于危险天气的随机性强,对天气预报信息的处理方法还有待研究,从而提高动态容量预测的精度。影响终端区动态容量的因素还有设备、人员等,研究它们的性能(表现)和可靠性与终端区动态容量的关系对于流量管理方案的制定及空管系统建设具有重要的参考价值。后续工作将引入多种不确定因素,考虑空域单元间的耦合关系,开展多机场终端区动态容量预测研究,并逐步研究区域和扇区动态容量预测方法。

## 参考文献:

- [1] Krozel J, Mitchell J S B, Polishchuk V, et al. Capacity estimation for airspaces with convective weather constraints[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Hilton Head; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007: 1-15.
- [2] Zou J, Krozel J W, Krozel J, et al. Two methods for computing directional capacity given convective weather constraints [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1-15.
- [3] Song L, Wanke C, Greenbaum D, et al. Methodologies for estimating the impact of severe weather on airspace capacity[C]//The 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences. Anchorage; ICAS Secretariat, 2008: 1-12.
- [4] Kim J, Zou J, Mitchell J S B, et al. Sensitivity of capacity estimation results subject to convective weather forecast errors [C]//Proceedings of AIAA

- Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1-15.
- [5] 常茂军. 机场终端区容量动态预测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学民航学院,2007:3-43.  
Chang Maojun. Research on the method of airport terminal airspace capacity dynamic estimation[D]. Nanjing: College of Civil Aviation Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007: 3-43.
- [6] Davidson G, Krozel J, Green S M. Strategic traffic flow management concept of operations[C]//Proceedings of AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations Forum. Chicago: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004: 1-10.
- [7] Hoffman R, Krozel J, Davidson G, et al. Probabilistic scenario-based event planning for traffic flow management[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Hilton Head: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007: 1-11.
- [8] Liu P B, Hansen M, Mukherjee A. Scenario-based air traffic flow management: From theory to practice [J]. Transportation Research Part B, 2008, 42(7/8): 685-702.
- [9] Beasley J E, Krishnamoorthy M, Sharaiha Y M, et al. Scheduling aircraft landings-the static case[J]. Transportation Science, 2000, 34(2): 180-197.
- [10] Linhares A. Preying on optima: A predatory search strategy for combinatorial problems[C]//Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Diego: IEEE, 1998: 2974-2978.
- [11] 蒋忠中,汪定伟. 有时间窗车辆路径问题的捕食搜索算法[J]. 控制与决策,2007,22(1):59-62.  
Jiang Zhongzhong, Wang Dingwei. Predatory search algorithm for vehicle routing problem with time windows[J]. Control and Decision, 2007, 22(1): 59-62.
- [12] 蒋兵,胡明华,田勇,等. 终端区空中交通容量评估的仿真方法[J]. 交通运输工程学报,2003,3(1):97-100.  
Jiang Bing, Hu Minghua, Tian Yong, et al. Simulation method of airspace capacity evaluation at terminal area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(1): 97-100.