

# 基于滑动时间窗的机场流量优化分配

王三强<sup>1,2</sup>, 陈金良<sup>3</sup>, 梅 权<sup>1</sup>, 王得玉<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安, 710077; 2. 61902 部队, 四川宜宾, 644000; 3. 空军工程大学航空管制系, 北京, 100166)

**摘要** 针对机场实际运行过程中飞行流量需求以及机场容量动态变化的特点, 将滑动时间窗概念应用到机场飞行流量分配问题中, 提出了一种基于滑动时间窗的机场流量动态优化分配方法。对基于滑动时间窗的流量优化分配原理进行了阐述, 该方法采用不断进行的动态流量分配代替静态的一次性流量分配, 能够实时得到当前时间段最优化的流量分配方案, 为机场战术流量管理提供决策支持。实例计算表明: 基于滑动时间窗的机场流量优化分配方法在动态环境中能够较好地达到实时优化分配飞行流量目的, 而静态流量分配方法不适用于动态环境, 文中方法实用有效。

**关键词** 机场飞行流量; 跑道容量; 优化分配; 滑动时间窗

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.01.005

**中图分类号** V355.1 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)01-0018-05

机场容量如果不能满足飞行流量需求就会造成飞行延误和空中交通拥堵, 不仅造成经济损失, 而且严重影响飞行安全。飞行流量管理是解决机场空中交通拥堵的重要手段, 而飞行流量分配是机场飞行管理的一种重要策略<sup>[1-2]</sup>。机场流量优化分配在不扩展机场容量的条件下, 通过对机场空中交通流量的最优分配, 能够达到充分利用机场容量、减少机场交通拥堵和延误的目的。相关研究目前主要是根据预测的流量需求和容量数据对较长时间段内的流量进行静态的一次性优化分配<sup>[2-7]</sup>, 没有考虑机场实际运行过程中流量需求以及容量动态变化的特点, 难以达到很好的优化效果。滑动时间窗在预测控制技术中得到了广泛应用<sup>[8-9]</sup>, 本文尝试将其应用到飞行流量优化分配中。

## 1 机场流量优化分配问题描述

机场提供的飞行服务包括进场服务和离场服务, 机场容量包含进场容量( $v$ )与离场容量( $u$ ), 两者存在非线性的关系, 可用公式  $v = \varphi(u)$ <sup>[3]</sup>表示, 见图1。容量曲线上点的坐标代表一定时间段内进/离场飞行架次(如图1为15 min), 曲线范围内的点表示进/离场飞行需求可以得到满足, 当超出容量曲线范围则将延误部分飞行。机场容量影响因素众多, 在不同的运行环境下容量曲线不同, 目视飞行条件(VFR)下的机场容量明显大于仪表飞行条件下(IFR)的机场容量。

飞行流量优化分配是将所优化的时间区间划分为若干相等的时间段, 根据各时间段的预测流量需求以及机场容量求解 Pareto 最优容量配置点<sup>[5]</sup>, 以最优化利用机场容量, 使延误的飞行数量最小。

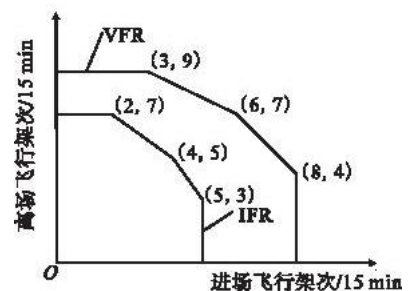


图1 机场容量曲线  
Fig.1 Airport capacity curve

\* 收稿日期: 2010-05-23

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08-ZT13)

作者简介: 王三强(1987-), 男, 四川仁寿人, 硕士生, 主要从事空中交通管理研究. E-mail: wsq\_kg@163.com

## 2 机场流量优化分配模型

飞行流量管理效果通常通过计算飞行延误总和来评价,因此可计算时间区间  $T$  内每一个时间段  $\Delta T$  结束时累计延误数量作为评价准则<sup>[3-4]</sup>。每一个时间段的飞行延误可以通过飞行流量需求与分配的容量之差得到。假设不考虑机型的影响,各时间段流量需求预测数据已知。根据机场运行信息,可得到各个时间段的预测容量曲线  $v = \varphi_i(u)$  构成的机场容量曲线集合  $\Phi$ 。

根据对延误的分析,第  $i$  时间段结束时的进/离场延误队列数量可表示为第  $i+1$  时间段开始时的进/离场延误队列数量:

$$X_{i+1} = \max(0, X_i + a_i - u_i), Y_{i+1} = \max(0, Y_i + d_i - v_i) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中:  $X_{i+1}, Y_{i+1}$  分别表示  $i+1$  时间段开始时的进/离场延误队列数量,其中  $X_1 = X_0 \geq 0, Y_1 = Y_0 \geq 0$ ;  $a_i, d_i$  分别表示第  $i$  时间段进/离场飞行请求数量;  $u_i, v_i$  分别表示第  $i$  时间段进/离场分配的流量。

最优化目标是使所求时段  $T$  内飞行延误总和最小,使用  $F(X_i, Y_i) = \beta_i X_{i+1} + (1 - \beta_i) Y_{i+1}$  作为损失函数,则目标函数可表示为:

$$\min \sum_{i=1}^N [\beta_i X_{i+1} + (1 - \beta_i) Y_{i+1}] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$\beta_i (0 \leq \beta_i \leq 1)$  表示第  $i$  时间段的进场优先比例系数,  $(1 - \beta_i)$  为该时间段离场优先比例系数;通过改变  $\beta_i$  的值,可以调整损失函数中的进/离场比例,  $\beta_i = 0.5$  时表示进/离场比例相等,  $\beta_i > 0.5$  时表示进场优先。

根据递推关系式(1)、(2),进行数学迭代计算,可以得到:

$$X_{i+1} = X_0 + \sum_{j=1}^i a_j - \sum_{j=1}^i u_j, Y_{i+1} = Y_0 + \sum_{j=1}^i d_j - \sum_{j=1}^i v_j \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

则损失函数可表示为  $F(X_i, Y_i) = [\beta_i (X_0 + \sum_{j=1}^i a_j) + (1 - \beta_i) (Y_0 + \sum_{j=1}^i d_j)] - \sum_{j=1}^i [\beta_i u_j + (1 - \beta_i) v_j]$ , 因为

$[\beta_i (X_0 + \sum_{j=1}^i a_j) + (1 - \beta_i) (Y_0 + \sum_{j=1}^i d_j)]$  通过流量预测数据可得到,为已知常量,目标函数可转化为求最大值,经过变换可得到最优化目标函数为:

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i [\beta_i u_j + (1 - \beta_i) v_j] \quad 0 \leq \beta_i \leq 1; i, j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^i u_j - (X_1 + \sum_{j=1}^i a_j) \leq 0, \sum_{j=1}^i v_j - (Y_1 + \sum_{j=1}^i d_j) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$v_i + g_{qi} u_i \leq b_{qi}, \quad 0 \leq v_i \leq D_{mi}, \quad 0 \leq u_i \leq A_{mi} \quad (6)$$

设第  $i$  时间段所对应的容量曲线具有  $n_i$  个倾斜线段,  $g_{qi}, b_{qi}$  表示第  $q (q = 1, 2, \dots, n_i)$  个倾斜线段的特征参数;  $D_{mi}, A_{mi}$  分别表示第  $i$  时间段可用离进场容量最大值。式(5)为延误的非负条件,式(6)描述了预测得到的第  $i$  时间段的容量曲线。

## 3 滑动时间窗的建立

在机场流量管理工作中,容量和流量需求预测数据的准确性都会随着时间增加而降低。若  $k$  表示第  $k$  个时间段,假设  $(1, n\Delta T) (n = 1, 2, \dots, N)$  时间区间内的预测数据准确度较高,则对第  $k$  时间段的分配方案进行计算时,优化分配  $(k, k + m\Delta T), m \in (1, n)$  时间区间的飞行流量,得到第  $k$  时间段的最佳分配方案;在第  $k+1$  时间段,使用新的数据对  $(k+1, k+1 + m\Delta T)$  时间区间进行优化分配,依此类推,不断利用更新的数据进行优化。将  $m\Delta T$  称为时间窗,在优化过程中,保持该区间长度不变,随着时间推移,窗口相应向前滑动,并根据新的数据对该区间进行优化,得到每个时间段的最优流量分配方案,其动态优化原理见图2,图中  $m = 4$ 。

假设动态优化的时间区间为  $(k, k + m\Delta T)$ ,则建立滑动时间窗之后的动态优化模型为:

$$\max \sum_{i=k}^{k+m\Delta T} \sum_{j=k}^{Ti} [\beta_i u_j + (1 - \beta_i) v_j] \quad 0 \leq \beta_i \leq 1, i, j = k, k+1, \dots, k+m\Delta T \quad (7)$$

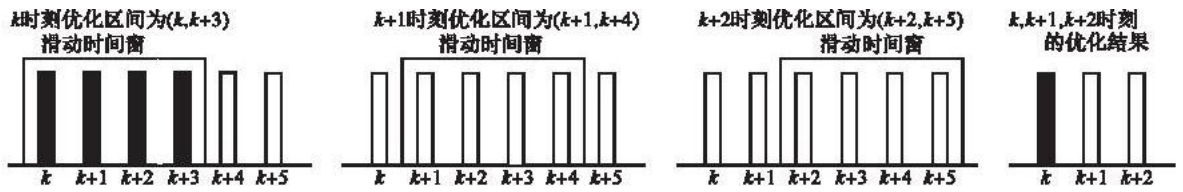


图2 动态优化原理

Fig.2 Dynamic optimization principle

约束条件同式(5) - (6), 此时需将式(5)中的  $X_1, Y_1$  变化为  $X_k, Y_k$ , 表示  $k$  时间段开始时的延误队列; 式(6)中所表示的容量曲线集合变化为  $k$  时间段开始时所预测的时间窗内机场容量曲线的集合。

时间窗长度的确定是动态流量优化分配问题求解的关键, 需要综合考虑3个因素: ①容量及流量预报数据的准确程度。这可以通过统计分析飞行历史数据以及机场气象预报数据得到; ②计算复杂性。虽然可选择  $(\Delta T, n\Delta T)$  以内的任何长度时间区间, 但是随着时间窗长度增加, 所需计算时间也明显增长, 复杂性增大; ③优化效果。选择的时间窗长度减小, 由于利用的数据减少, 优化效果也会较差。因此可结合机场实际情况根据需要确定时间窗长度。根据实际经验, 当  $n$  值较小且时间窗长度为  $n\Delta T$  时可以达到很好的优化效果。

## 4 实例分析

本文采用 LINGO11.0 优化软件对模型进行验证求解。以某机场 16:00 - 18:00 时间段内飞行流量分配为例 ( $T=2, \Delta T=15$  min)。假设  $\beta_i=0.5, X_1=Y_1=0, m=4$ ; 各时间段容量仅受气象影响, 通过容量评估得到机场在 VFR 及 IFR 条件下的容量曲线见图 1 所示; 每个时段飞行流量严格按照分配方案实施。通过对机场静态环境(实际流量和容量数据与预测值相同)、流量数据动态变化、容量数据动态变化、流量与容量数据均动态变化 4 种不同运行情景下的静态与动态流量优化分配进行分析。优化结果见表 1 - 4。

表1 静态环境中流量优化分配结果

Tab.1 Optimization allocation results of airport flow in static environment

时间段	预测气象条件	预测流量需求		静态优化结果		飞行延误		动态优化结果		飞行延误	
		$a$	$d$	$u$	$v$	$X$	$Y$	$u$	$v$	$X$	$Y$
16:00 - 16:15	IFR	4	6	4	5	0	1	4	5	0	1
16:15 - 16:30	IFR	5	5	4	5	1	1	4	5	1	1
16:30 - 16:45	IFR	4	3	5	3	0	1	5	3	0	1
16:45 - 17:00	IFR	5	4	4	5	1	0	4	5	1	0
17:00 - 17:15	VFR	8	6	6	6	3	0	6	6	3	0
17:15 - 17:30	VFR	4	9	6	7	1	2	6	7	1	2
17:30 - 17:45	VFR	4	7	4	8	1	1	4	8	1	1
17:45 - 18:00	VFR	7	8	6	7	2	2	6	7	2	2
合计		41	48	39	46	9	8	39	46	9	8

从表 1 可以看出, 由于基于滑动时间窗的动态优化分配实际上是对每个时间窗内的飞行流量进行静态分配, 在流量以及容量数据与预测数据相同的情况之下, 动态优化分配与静态优化分配得到了相同结果。从流量需求数据可以看出, 多个时间段的飞行流量需求超出了容量限制, 优化分配后的飞行流量满足了跑道容量限制。优化时段结束时, 有 2 架进场飞行与 2 架离场飞行延误, 优化时段的进场总延误为 9 架次, 离场总延误为 8 架次。由于  $\beta_i=0.5$ , 优化结果可以看出进/离场流量大致相同。

表2 动态环境中流量优化分配结果(流量动态变化)

Tab.2 Optimization allocation results in dynamic traffic demands environment

时间段	气象条件	预测流量需求		实际流量需求		动态优化结果		飞行延误	
		$a$	$d$	$a$	$d$	$u$	$v$	$X$	$Y$
16:00 - 16:15	IFR	4	6	4	6	4	5	0	1
16:15 - 16:30	IFR	5	5	5	5	4	5	1	1
16:30 - 16:45	IFR	4	3	4	3	5	3	0	1
16:45 - 17:00	IFR	5	4	4	4	4	5	0	0
17:00 - 17:15	VFR	8	6	6	5	6	5	0	0
17:15 - 17:30	VFR	4	9	5	8	5	7	0	1
17:30 - 17:45	VFR	4	7	3	7	3	8	0	0
17:45 - 18:00	VFR	7	8	7	5	7	5	0	0
合计		41	48	38	43	38	43	1	4

在表2中,流量数据动态变化,进场飞行需求总数减少了3架次,离场飞行需求减少了5架次。经过动态优化分配,优化时段结束时,进/离场均无延误队列,2个小时内进场总延误为1架次,离场总延误为4架次。在这种情况下,静态流量分配方案能够满足机场容量约束条件,但是由于实际流量需求的动态变化,若采用静态分配方案,优化时段结束时,进场延误1架次,离场延误2架次,该时段进场总延误为2架次,离场总延误为6架次,没有达到最优化分配流量、减小飞行延误的目的。

表3 动态环境中流量优化分配结果(容量动态变化)

Tab.3 Optimization allocation results in dynamic capacity environment

时间段	预测气	实际气	流量需求		动态优化结果		飞行延误	
	象条件	象条件	$a$	$d$	$u$	$v$	$X$	$Y$
16:00 - 16:15	IFR	IFR	4	6	4	5	0	1
16:15 - 16:30	IFR	IFR	5	5	4	5	1	1
16:30 - 16:45	IFR	IFR	4	3	5	3	0	1
16:45 - 17:00	IFR	IFR	5	4	4	5	1	0
17:00 - 17:15	VFR	IFR	8	6	4	5	5	1
17:15 - 17:30	VFR	VFR	4	9	6	7	3	2
17:30 - 17:45	VFR	VFR	4	7	6	7	1	2
17:45 - 18:00	VFR	VFR	7	8	6	7	2	3
合计			41	48	38	43	13	11

在表3中,实际容量值动态变化,17:00 - 17:15 气象条件不同于预测的 VFR 条件。经过动态优化分配,优化时段结束时,有2架进场飞行与3架离场飞行延误,优化时段的进场总延误为13架次,离场总延误为11架次。这种情况之下,容量变化时间段的静态流量分配方案不能满足实际的容量约束,更不能保证流量分配的最优性。表3中,由于 IFR 条件下机场容量值明显小于 VFR 条件下容量值,静态流量分配得到的 17:00 - 17:15 流量分配方案(6,6)已经超出了 IFR 条件下的容量限制,该点的流量分配失去意义,不能作为流量管理的依据。而动态流量分配方案能够满足变化的容量限制,根据实际情况得到最优的分配方案。

表4 动态环境中流量优化分配结果(容量与流量均动态变化)

Tab.4 Optimization allocation results in dynamic capacity and traffic demands environment

时间段	预测气	预测流量需求		实际气	实际流量需求		动态优化结果		飞行延误	
	象条件	$a$	$d$	象条件	$a$	$d$	$u$	$v$	$X$	$Y$
16:00 - 16:15	IFR	4	6	IFR	4	6	4	5	0	1
16:15 - 16:30	IFR	5	5	IFR	5	5	4	5	1	0
16:30 - 16:45	IFR	4	3	IFR	4	3	5	3	0	0
16:45 - 17:00	IFR	5	4	IFR	4	4	4	4	0	0
17:00 - 17:15	VFR	8	6	IFR	6	5	4	5	2	0
17:15 - 17:30	VFR	4	9	VFR	5	8	6	7	1	1
17:30 - 17:45	VFR	4	7	VFR	3	7	4	8	0	0
17:45 - 18:00	VFR	7	8	VFR	7	5	7	5	0	0
合计		41	48		38	43	38	43	4	2

在表4中,机场运行过程中的实际容量数据与流量数据均动态变化,这也是实际中经常出现的情况。经过动态优化分配,优化时段结束时进/离场均无延误队列,优化时段的进场总延误为4架次,离场总延误为2架次。在这种情况下,静态分配方案不能保证最优性,同时容量变化的时间段的静态流量分配方案不能满足容量约束条件,只有采用动态优化分配才能满足实际需求。

本文仅考虑了对2个小时的流量进行分配的情况,流量分配的时段越长,预测数据与实际数据不相符的情况越明显。可以看出,静态流量优化分配方案在机场流量以及容量发生变化之后不能保证结果的最优性,甚至有的分配方案不能使用,预先的优化分配就失去了作用和意义,给实时流量管理决策带来困难。动态流量优化分配依据实时可靠的数据,确保了每一个时间段的流量分配方案的最优性以及实用性。

## 5 结束语

基于滑动时间窗的机场流量优化分配方法为解决动态环境中的流量分配问题提供了一种有效途径,能够为机场实施飞行流量管理提供实时的流量分配方案,达到充分利用机场容量,最小化飞行延误的目的,实例验证了其实用性和有效性。将该方法应用于战术流量管理辅助决策系统,通过计算机技术可实现流量优

化分配的动态化、智能化,这也是下一步研究工作的重点。

### 参考文献(References):

- [1] Banavar Sridhar, Grabbe Shon R, Avijit Mukherjee. Modeling and optimization in traffic flow management[J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(12): 2060 - 2080.
- [2] 张洪海, 胡明华, 陈世林. 机场终端区容量利用和流量分配协同优化策略[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(1): 128 - 134.  
ZHANG Honghai, HU Minghua, CHEN Shilin. Collaborative optimization of capacity utilization and flow assignment in airport terminal area[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2009, 44(1): 128 - 134. (in Chinese)
- [3] Gilbo Eugene P. Airport capacity: representation, estimation, optimization[J]. IEEE transactions on control systems technology, 1993, 1(3): 144 - 153.
- [4] Gilbo Eugene P. Optimizing airport capacity utilization in air traffic flow management subject to constraints at arrival and departure fixes[J]. IEEE transactions on control systems technology, 1997, 5(5): 490 - 503.
- [5] Paolo Dell'Olma, Guglielmo Lulli. A dynamic programming approach for the airport capacity allocation problem[J]. IMA journal of management mathematics, 2003, 14(3): 235 - 249.
- [6] 姜雨, 张洪海, 夏洪山. 多机场网络系统流量分配策略[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(2): 379 - 384.  
JIANG Yu, ZHANG Honkhai, XIA Hongshan. Flow assignment strategy in network system of multi-airport[J]. Systems engineering theory & practice, 2011, 31(2): 379 - 384. (in Chinese)
- [7] Jianli Ding, Jinling Ji, Heyi Wang. Optimization of airport flight arrival and departure based on compromise immune algorithm [C]//3rd international conference on natural computation. [S. l.]: ICNC, 2007: 677 - 681.
- [8] 阎威武, 常俊林, 邵惠鹤. 基于滚动时间窗的最小二乘支持向量机回归估计方法及仿真[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(1): 524 - 527.  
YAN Weiwu, CHANG Junlin, SHAO Huihe. Least square SVM regression method based on sliding time window and its simulation[J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2004, 38(1): 524 - 527. (in Chinese)
- [9] 马向玲, 王欣欣, 王永生, 等. 基于滑动时间窗的飞行器航路动态优化方法[J]. 飞行力学, 2010, 28(5): 92 - 96.  
MA Xiangling, WANG Xinxin, WANG Yongsheng, et al. Improved dynamic path optimization based on rolling time window [J]. Flight dynamics, 2010, 28(5): 92 - 96. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

## Optimization Allocation of Airport Flow Based on Sliding Time Window

WANG San-qiang<sup>1,2</sup>; CHEN Jin-liang<sup>3</sup>; MEI Quan<sup>1</sup>; WANG Deyu<sup>1</sup>

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Unit of 61942, Yibing, Sichuan, 644000; 3. Department of Air Traffic Control, Air Force Engineering University, Beijing 100166, China)

**Abstract:** Considering the actual during a flight operation that flight flow and airport capacity has dynamic feature, the concept of sliding time window has been used in airport flight flow optimization allocation problem, and puts forward a method of dynamic optimization allocation of airport flow based on sliding time window. The principle of optimization allocation of airport flow based on sliding time window is discussed in this paper, this method use ongoing dynamic optimization allocation instead of static one-time optimization allocation to get optimal flow allocation scheme of current time period in real time, this method could provide decision support for tactic airport flow management. The experimental results shows this method could achieve real time optimization allocation purpose well in dynamic environment, while static method of optimization allocation could not be used in dynamic environment, verified the feasibility and efficiency of this method.

**Key words:** airport flight flow; runway capacity; optimization allocation; sliding time window