

## 进港航班排序与最小方差控制

华克强<sup>1</sup>, 屈文芳<sup>1</sup>, 王秀娟<sup>1</sup>, 刘政<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 工程技术训练中心, 天津 300300; 2. 中国南方航空股份有限公司, 广州 510000)

**摘要:**为实现民航空中交通管制自动化,详细分析了由空域、航路、飞机、空管组成的具有连续时间和离散事件动态系统组合的混合系统特性,将系统动态性能的分析综合转化为离散事件动态系统事件发生排序和随机动态系统分析综合。采用极大代数方法对进港航班进行排序,用最小方差控制方法使进港航班时间间隔趋于一致。仿真结果表明:离散事件动态系统理论与传统控制理论的有机结合取得了空中交通管制自动控制好的效果,是解决该类系统分析设计的新思路,为进一步将控制理论用于空中交通管制的研究提出了新途径。

**关键词:**离散事件动态系统;空中交通管制;排序;进港过程

**中图分类号:** V37; TP    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009-3516(2009)02-0019-05

国外空中交通管理的理论研究工作开始得比较早,美国的 Heinz Erzberger 等研究了基于时间的空中航班实时调度问题,并把在此基础上设计出的自动着陆系统在丹佛机场进行了试用<sup>[1-2]</sup>。在终端区到达航班的动态排序问题的研究中,Andreussi 等在 1981 年提出排序问题(sequencing problem),用离散事件模型对它进行了描述,并且用具体的算例进行了验证<sup>[3]</sup>。1991 年, Dear 和 Sherif 研究了终端区飞行器的动态和静态排序问题<sup>[4]</sup>; Brinton 通过枚举所有可能的飞机队列,提出一个深度优先树搜索算法<sup>[5]</sup>。Abela 等以遗传算法理论为基础,提出一个 0-1 混合整形规划问题,并给出了包括 20 架飞机的计算结果<sup>[6]</sup>。Bolender 和 Slater 通过排队论和离散事件仿真来解决航空器动态着陆问题<sup>[7]</sup>。Tether B S 和 Metcalfe J S 针对繁忙的 Heathrow 机场提出了到达飞机动态排序法<sup>[8]</sup>。

我国近几年才开始对空中交通管理的关键技术进行系统研究。胡明华等人<sup>[9]</sup>针对我国空中交通流量管理现状,提出了多元受限航班时刻表优化算法,以确定性地面等待策略为基本的流量管理方法,把昂贵的空中等待转化为成本相对较低的地面等待,并应用于航班时刻表的制订中。丁峰等人<sup>[10]</sup>对到达飞机流进行排序,给出了一个到达飞机流之间时间间隔之和最小的排序方法。

本文在此基础上进行了研究,为实现航空交通管制自动化提供了新思路。

### 1 空中交通管制系统属性分析

就一个繁忙机场来说,为使单位时间有更多的航班起降,可以选择增加跑道、减小航班之间间隔等方法。显然增加跑道意味着要增加数十亿的投资,而通过科学调度可以保证安全条件下合理的航班间隔,与此同时还缩短了发动机工作时间,实现了节省能源、减少污染的目的。图 1 为航班进港过程示意图。图中  $D_i$  为飞行等待区,航班可以在该区域盘旋,调整进场顺序和航班间隔; $A_i$  为汇聚点,从不同航路进入的航班在该区域汇聚。显然这样一个系统是典型的离散事件动态系统<sup>[11]</sup>。

为保证航班进港安全,航班间必须保证一定的间隔。我们把为调整进港飞机间隔时间的飞行员决策分为“战术”决策和“战略”决策 2 部分:战术决策是以调整飞机飞行状态参数为主的决策;战略决策是为保证

\* 收稿日期:2008-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60472124)

作者简介:华克强(1944-),男,天津人,教授,主要从事飞行器自动控制、离散时间动态系统在民航的应用研究。

E-mail: kqhua@yahoo.cn

航空安全,保证航班在航路上的相互间隔大于最小允许值,同时为优化航路资源利用,尽量使间隔小而均匀。实现战术决策调整时间的大小是秒级的,而实现战略决策是几十秒或分级的。执行战术决策主要表现为人和飞机系统的动态反应过程,而执行战略决策则以稳态飞行为主,着眼于调整运行时间。因此系统表现出来的主要是战略决策及其执行过程,即以航班进港事件发生的排序和时间间隔为着眼点,而战术决策及执行过程相对可以忽略。当考虑空中交通管理部门的管制时,简化的原理见图2。

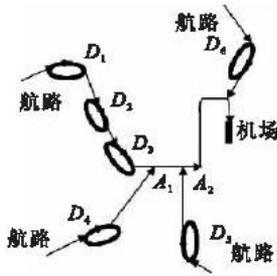


图1 进港过程示意图

Fig.1 Schematic of aircrafts arriving

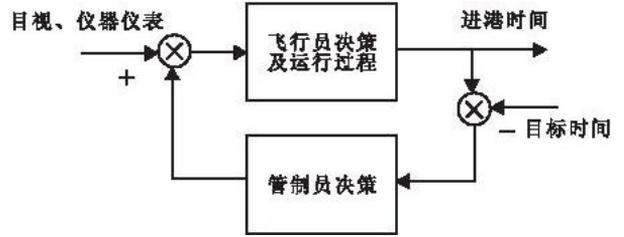


图2 进港时间调整原理图

Fig.2 Schematic of arriving time adjustment

## 2 航班排序

### 2.1 排序模型的假设

航班汇聚可在不同航路上进行,但从空中交通管制来看,区域管制和进近管制要确定的预计到达时间(EAT)序列和实际进港时间序列都是信号序列,与有多少航路无关。为此做如下假设<sup>[12]</sup>:①目前繁忙机场起降的飞机基本上为空客、波音等大中型客机,可不计尾流间隔时间 $R_s$ 的差别。②飞机的速度和位置信息都可由航班发回的信息直接得到(目前已经实现)。③航班进港的优先级别 $I_D$ 与飞机的重要程度(如专机等)、载客人数、是否故障及故障等级等因素有关, $I_D$ 越大,优先级别越高。

### 2.2 模型的建立

航班排序是严重逻辑非线性的,难于研究系统演化规律。极大代数运算规则可把逻辑非线性关系转化为这类代数意义下的线性关系,建立形式简单模型<sup>[13-14]</sup>。极大代数的基本运算为:定义域 $\tilde{R}, R \cup \{-\infty\}$ ;加法运算, $a \oplus b = \max\{a, b\}$ ;乘法运算, $a \otimes b = a + b$ ;零元, $\varepsilon = -\infty$ ;单位元, $e = 0$ 。

设有 $m$ 个航班,每个航班顺序经过 $n$ 个进港程序。将航班和进港程序中航路和跑道统一看作资源投入,资源的序号按航班序号在前、进港程序序号在后进行排序,极大代数下的线性模型为:

$$\begin{cases} x(k) = A \otimes x(k) \oplus B \otimes uk \\ y(k) = C \oplus x(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中:输入分量为 $u_l (l=1, 2, \dots, n+m)$ ,定义为“第 $l$ 个资源投入其第一个活动的开始时间”;状态变量为 $x_{ij} (j=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m)$ ,定义为“进港程序 $M_j$ 对航班 $P_i$ 服务的最早开始时间”;输出变量为 $y_l (l=1, 2, \dots, n+m)$ ,定义为“第 $l$ 个资源从过程中完全释放的最早时间”。

设有4条航路汇聚航班进港,各路的第一架飞机参与排序,即 $m=4$ ;为简化问题,将进港过程考虑为一个进港程序,即 $n=1$ 。该系统的输入变量 $u(k) = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5]^T$ ,  $u_1$ 为机场可以降落的最早时间,  $u_l (l=2, 3, 4, 5)$ 为第 $l-1$ 架飞机预计降落的时间;状态变量 $x_{i1} (i=1, 2, 3, 4)$ 为第 $i$ 架飞机预计降落的最早时间;为使用极大代数求极小,定义 $y = -[C \otimes (-x(k))]$ 为对第一个航班开始服务的时间,即应当排在第一架降落的时间。假设航班在汇聚前的各航路上已经完成各自排序,因此 $\{A\}_{ij}$ 均为极大代数零元。如果算法扩展到汇聚前各段排序,则要考虑 $\{A\}_{ij}$ 为非极大代数零元的情况。 $T_{NST_i} (i=1, 2, 3, 4)$ 为标准服务时间,经分析,确定 $T_{NST_i} = R_s I_D$ 。

$$A = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & -T_{NST_1} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & -T_{NST_2} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & -T_{NST_3} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -T_{NST_4} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中“.”均为极大代数零元,“0”为极大代数单位元。

如果一个排序计算周期有  $m$  架飞机参与排序,利用极大代数的方法推出预计进港时间在先的飞机,其余的  $m - 1$  架飞机加上被推出航路上的下一架飞机参与下一周期的排序,直至所有的飞机排序完毕。下面举例加以说明。设4条进近航路上的第一架飞机分别为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ ,其预计到达时间(整点部分相同,略去)、优先级见表1。

表1 预计到达时间及优先级

Tab. 1 EAT and priority

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
EAT/min	2	3	6	9
$I_D$	0	1	0	0

由2.1的假设取  $R_S = 2 \text{ min}$ ,所以  $T_{NST_2} = 2, T_{NST_1} = T_{NST_3} = T_{NST_4} = 0$ ,经计算  $\mathbf{x}(k) = [2 \ 1 \ 6 \ 9]^T, y = 1$ 。由上述计算结果可知,第一架飞机开始降落的时间为1 min,对应于飞机  $P_2$ ,因此飞机  $P_2$  首先进入标准起落航线。上述算法使排序问题规范化,便于应用到空管自动化系统中。

### 3 航班间隔控制

#### 3.1 过程模型

假设航班排序已完成,需要对航班间的间隔进行控制。在不同航路的飞行过程中航班受各种不同风向等气候条件影响,随机性较大,因此假设预计进港时间间隔互不相关<sup>[11]</sup>。设预计进港时间为  $T_1(k)$ ,实际进港时间为  $T_2(k)$ , $k$  为进港航班排序号;预计航班进港时间间隔序列为  $\Delta T_1(k) = T_1(k) - T_1(k - 1)$ ,实际进港时间间隔为  $\Delta T_2(k) = T_2(k) - T_2(k - 1)$ ,其中  $T_1(0)$  和  $T_2(0)$  为研究问题的前一时间段最后一个航班的预计进港和实际进港时间。设该时间段有  $N$  个航班,记  $\Delta T_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta T_i(k) = (T_i(N) - T_i(0))/N$ , ( $i = 1, 2$ ),只要  $N$  充分大,则有  $\Delta T_1 \approx \Delta T_2$  (由航班时刻表可得)。记  $y_1(k) = \Delta T_1(k) - \Delta T_1, y_2(k) = \Delta T_2(k) - \Delta T_2, (k = 1, 2, \dots, N)$ ,飞行员通过目视、仪表以及综合监视信息和人工管制能了解局部范围飞机的相互关系,并逐渐调整航班间的进港时间间隔趋于均匀。进近过程可视为航班由随机性较大的  $y_1(k)$  变换为较为平滑的  $y_2(k)$ ,相当于经过一个“低通窄带滤波器”的动态环节。因此,可以将进港过程飞行间隔的调整看作一个动态系统。

过程动态用受控 ARMA 模型描述,设受控过程模型为:

$$A(q^{-1})y_2(k) = q^{-d}\mathbf{u}(k) + C(q^{-1})y_1(k) \tag{3}$$

$A(q^{-1})$  和  $C(q^{-1})$  由实测数据经辨识得到。计算表明不同的时间段模型是有些差别的,但由于白天航班比较密集,从7:00到22:00各时间段差别不大。以某机场记录的10:35到13:23的168 min内65个航班数据为例(没实施最小方差控制)进行辨识,表2为部分原始数据。

表2 部分数据

Tab. 2 Parts of data

$k$	...	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	...
$y_1$	...	5	1	2	1	3	2	2	8	2	3	4	3	6	2	...
$y_2$	...	5	2	1	1	3	2	2	7	3	3	4	3	5	3	...

采用最小二乘辨识方法,分别用2阶、3阶、5阶 ARMA 模型近似。表3列出了辨识后各阶模型计算的结果。显然,损失函数会随着阶数的提高降低,采用3阶模型有足够的精度。

表3 辨识结果

Tab. 3 Results of the identification

阶数	$A(q^{-1})$	$C(q^{-1})$	极点	零点	损失函数
2阶	$1 - 0.016q^{-1} - 0.059q^{-2}$	$0.7 + 0.20q^{-1}$	$0.24; -0.22$	$-0.25$	0.73
3阶	$1 - 0.012q^{-1} - 0.037q^{-2} - 0.048q^{-3}$	$0.78 + 0.18q^{-1}$	$0.40; -0.19 \pm 0.29i$	$-0.23$	0.69
5阶	$1 - 0.014q^{-1} - 0.037q^{-2} - 0.051q^{-3} + 0.0068q^{-4} - 0.0041q^{-5}$	$0.078 \pm 0.23i$	$0.42; -0.28 \pm 0.29i;$	$-0.23$	0.68

#### 3.2 进港航班间隔最小方差控制算例

未来的空中交通管制要实现自动化,使用自动管制代替人工管制或作为空中交通管制辅助决策系统。 $y_1(k)$  和  $y_2(k)$  都是随机信号,考虑用最小方差控制策略,使输出  $y_2(k)$  的方差达到最小。

取3阶过程模型的系数多项式为:

$$A(q^{-1}) = 1 - 0.012q^{-1} - 0.037q^{-2} - 0.048q^{-3}; \quad C(q^{-1}) = 0.78 + 0.18q^{-1} \quad (4)$$

假设除时间延迟外,飞行员能较好地执行控制指令,设 $B(q^{-1}) = 1, d = 3$ 。引入最小方差控制,策略为:

$$\mathbf{u}(k) = -\frac{G(q^{-1})}{F(q^{-1})}y_2(k) \quad (5)$$

$G(q^{-1})$ 、 $F(q^{-1})$ 满足:

$$C(q^{-1}) = C_0 + C_1q^{-1} = C_0(1 + \frac{C_1}{C_0}q^{-1}) = C_0C_i(q^{-1}); \quad C_i(q^{-1}) = A(q^{-1})F(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}) \quad (6)$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2}; \quad G(q^{-1}) = g_0 + g_1q^{-1} + g_2q^{-2} \quad (7)$$

式中: $f_1 = 0.24, f_2 = 0.40; g_0 = 0.058, g_1 = 0.013, g_2 = 0.0019$ ,从而得到 $\mathbf{u}(k)$ 如下:

$$\mathbf{u}(k) = -f_1u(k-1) - f_2u(k-2) - g_0y(k) - g_1y(k-1) - g_2y(k-2) \quad (8)$$

### 3.3 仿真与分析

经仿真计算,采用最小方差控制使实际进港时间间隔方差明显减小。例如某算例预计到达时间间隔的方差为 $S_1 = 214$ ,采用最小方差控制后, $S_2 = 110$ 。图3为仿真结果。虚线为未施加最小方差控制时的结果,星划线为施加最小方差控制的仿真结果。

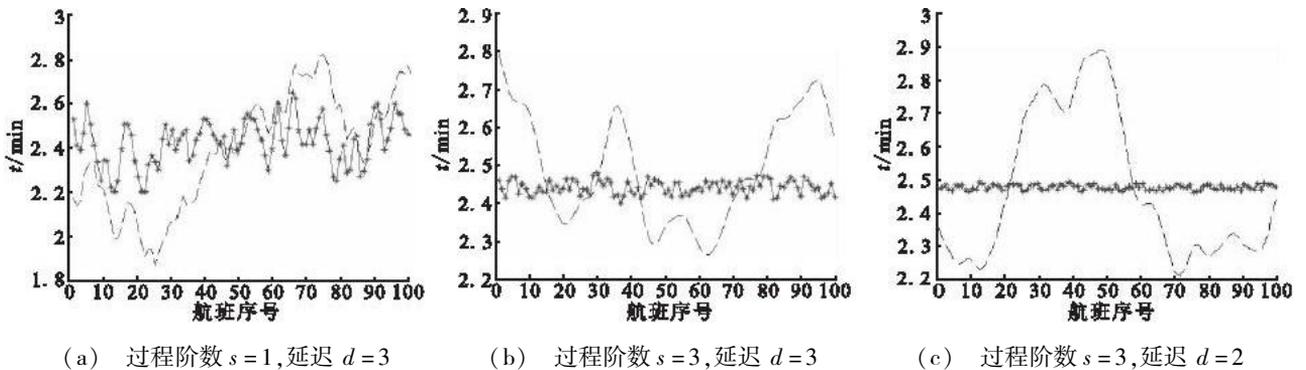


图3 对进港过程实施最小方差控制

Fig. 3 Minimum variance control of arriving process

以上仿真结果是进港过程稳定运行的结果。利用24组实际航班数据建模,并实施最小方差控制所得结果说明通过控制可以减小航班间隔的方差,使航班间隔趋于均匀。仿真结果说明:

- 1) 在相同过程模型形式的情况下,过程的阶数越高,输出的方差减小。说明关注的前后相关飞机越多,管制效果越好。
- 2) 在同样的过程模型情况下控制延迟增加时,方差增加。说明飞行员反应时间增加,管制效果变差。
- 3) 可以将繁忙机场进港时间间隔控制研究结果应用到一般机场。在一般机场,航班的时间间隔比较大,如果大于一定的时间间隔 $t$ 没有进港航班,插入 $t$ 分钟间隔的一个虚设航班,仍保证算法有效。仿真结果证明这样处理是可行的。

## 4 结束语

本课题以繁忙机场为对象,详细地分析了航班进港的动态过程。认为该系统由空域、航路、飞机(含飞行员)、空管等组成,是一个由连续时间动态系统和离散事件动态系统组合的混合系统。为适应空管自动化的要求,将系统动态性能的分析综合转化为离散事件动态系统事件发生排序和随机系统的分析综合。这里提出的新思路为使用控制理论解决空中交通管制系统的分析综合提出了新的途径。

### 参考文献:

- [1] Heinz Erzberger, Willian Nedell. Design of Automated System for Management of Arrival Traffic [R]. NASA - TM - 102201.
- [2] Leonard Tobias, Uwe Volekers, Heinz Erzberger. Control Evaluation of the Descent Advisor Automation Aid [R]. NASA - TM - 102197.
- [3] Andreussi A, Bianco L, Ricciardelli S. A Simulation Model for Aircraft Sequencing in the Near Terminal Area [J]. European

- Journal of Operational Research, 1981, 8(4):345 – 354.
- [ 4 ] Dear R G, Sherif Y S. An Algorithm for Computer Assisted Sequencing and Scheduling of Terminal Area Operation [J]. Transportation Research Part A – Policy and Practice 25, 1991,25(2): 129 – 139.
- [ 5 ] Brinton C R. An Implicit Enumeration Algorithm for Arrival Scheduling[C]// AIAA Digital Avionics System Conference. CA: AIAA, 1992;268 – 274.
- [ 6 ] Abela J, Abranmson D, Krishnammoorthy M, et al. Computing Optional Scheduling for Landing Aircraft[C]// Proceedings of 12th National ASOR Conference, Australia:ASOR,1993: 71 – 90.
- [ 7 ] Bolender M A , Slater G L. Cost Analysis of the Departure En – Route Merge Problem[C]// AIAA Guidance, Navigation , and Control Conference. Portland:AIAA,1999:1815 – 1825.
- [ 8 ] Tether B S, Metcalfe J S. Incremental Innovation through Procedural Change at A Congested Airport[C]//European Meeting on Applied Evolutionary Economics. Grenoble:[s. n],1999: 1 – 35.
- [ 9 ] 胡明华, 李顺才. 空中交通地面等待问题的网络流规划模型[J]. 东南大学学报:自然科学版,2000,30(3):104 – 108.  
HU Minghua, LI Shuncai. The Network Flow Programming Model of Air Traffic Problems on the Ground Waiting [J]. Journal of Southeastern University: Nature& Science Edition, 2000, 30(3): 104 – 108. (in Chinese)
- [ 10 ] 丁 峰,贺尔铭,张加圣,等. 空中交通自动化管理中飞机等待队列的排序算法[J]. 中国民航飞行学院学报,2000,11(4): 456 – 460.  
DING Feng, HE Erming, ZHANG Jiasheng, et al. Ranking Algorithm of Queue Waiting for the Plane in Air Traffic Management Automation [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China,2000, 11(4): 456 – 460. (in Chinese)
- [ 11 ] 郑大中,赵千川. 离散事件动态系统[M]. 北京:清华大学出版社,2001.  
ZHENG Dazhong, ZHAO Qianchuan . Discrete Event Dynamic System [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
- [ 12 ] 高 峥. 模糊控制在进场航班调度优化中的应用[J]. 中国民航学院学报,2006,24(4):1 – 5.  
GAO Zheng. The Application of Fuzzy Control in Flight Scheduling Optimization [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2006,24(4):1 – 5. (in Chinese)
- [ 13 ] Pepyne D L, Cassandras C G. Performance Optimization of A Class of Discrete Event Dynamic Systems Using Calculus of Variations Techniques [J]. Journal of Optimization Theory and Applications,1999,100(3): 599 – 622.
- [ 14 ] 华克强,蔡毓峰,高 峥. 基于极大代数的离港航班优化调度[J]. 中国民航学院学报,2005,23(3):1 – 5.  
HUA Keqiang, CAI Yufeng, GAO Zheng. Maximum Algebra Based on Optimizing Control of Airport Departure Operations [J]. Journal of Civil Aviation University of China,2005 ,23(3): 1 – 5. (in Chinese)

(编辑:姚树峰,徐敏)

## The Scheduling and Minimum Variance Control of Arriving Flights

HUA Ke – Qiang<sup>1</sup>, QU Wen – fang<sup>1</sup>, WANG Xiu – Juan<sup>1</sup>, LIU Zheng<sup>2</sup>

(1. Engineering Techniques Training Center, Civil Aviation University of China , Tianjin, 300300;2. China Southern Airlines, Guangzhou, 510000)

**Abstract:** In order to realize the auto control of ATC, it is necessary to discuss the scheduling and the time interval control of aircrafts' arrivals. This paper gives a detailed analysis of the process of aircrafts' arrivals and expounds the features of the mixed system integrated by CTDS and DEFS, which is composed of airspace, fairway, aircraft, ATC. And the analysis of the system dynamic performance is transformed into the Scheduling of DEFS and the integration of random dynamic system. The great algebra is adopted to schedule the aircrafts, and the minimum variance control is used to depress the intervals. The simulation result indicates that the integration of CTDS and DEFS is very effective, which becomes a new way of application in ATC.

**Key words:** DEFS; ATC; Scheduling; Process of Aircrafts' Arrivals