

8-17-2020

Dynamic Arrival Sequencing & Scheduling Based on Branch & Bound Algorithm

Junfeng Zhang

School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Wang Fei

School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Tengteng Ge

School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Arrival Sequencing & Scheduling Based on Branch & Bound Algorithm

Abstract

Abstract: Optimization of arrival sequencing and scheduling is not only the prerequisite for properly allocating and fully utilizing the runway resource, but also the fundamental element for improving terminal operation efficiency. *Dynamic arrival sequencing* was obtained by time-triggered sliding time window method. On the basis of *accurate 4D trajectory prediction*, branch and bound algorithm was adopted to generate an optimal sequence, combined with the actual operation constraints. Taking Shanghai Pudong Airport as an example for simulation, the optimization results were compared with the actual landing time and simulation results based on first come first serve strategy. The results indicate that the proposed algorithm could effectively not only enhance the runway capacity but also alleviate flight delays, and could be an effective method to realize runway resource proper allocation.

Keywords

transportation planning, sequencing and scheduling, sliding time window, branch and bound algorithm, decision support

Recommended Citation

Zhang Junfeng, Wang Fei, Ge Tengting. Dynamic Arrival Sequencing & Scheduling Based on Branch & Bound Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1909-1914.

基于分支定界法的进场航空器动态排序与调度

张军峰, 王菲, 葛腾腾

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 进场航空器优化排序和调度是跑道资源合理分配和充分利用的前提, 是提高终端空域运行效率的基础。通过基于时间触发的滑动时间窗实现了进场动态排序。在精确四维航迹预测的基础上, 结合管制运行约束, 采用分支定界法对时间窗内航班进行优化排序与调度。以上海浦东机场为例进行仿真验证, 将优化结果分别同先到先服务算法结果与航班的实际到达时间进行对比。结果表明: 该算法可有效地提高跑道容量, 缓解航班延误, 是实现跑道资源优化配置的有效方法。

关键词: 交通运输规划; 排序与调度; 滑动时间窗; 分支定界; 决策支持

中图分类号: V355

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 08-1909-06

Dynamic Arrival Sequencing & Scheduling Based on Branch & Bound Algorithm

Zhang Junfeng, Wang Fei, Ge Tengting

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Optimization of arrival sequencing and scheduling is not only the prerequisite for properly allocating and fully utilizing the runway resource, but also the fundamental element for improving terminal operation efficiency. *Dynamic arrival sequencing* was obtained by time-triggered sliding time window method. On the basis of *accurate 4D trajectory prediction*, branch and bound algorithm was adopted to generate an optimal sequence, combined with the actual operation constraints. Taking Shanghai Pudong Airport as an example for simulation, the optimization results were compared with the actual landing time and simulation results based on first come first serve strategy. The results indicate that the proposed algorithm could effectively not only enhance the runway capacity but also alleviate flight delays, and could be an effective method to realize runway resource proper allocation.

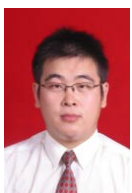
Keywords: transportation planning; sequencing and scheduling; sliding time window; branch and bound algorithm; decision support

引言

目前终端空域空中交通管制员主要基于经验, 采用先到先服务(FCFS)策略为进场航空器确定着陆顺序, 该策略具有与管制员实际操作方式相符, 保证着陆航班公平性的特点。然而随着空中交通流

量的持续增长, 保守的间隔配备与频繁的调配手段进一步加剧了终端空域拥堵, 从而导致航班延误问题日益突出。鉴于此, 国际民航组织“航空系统组块升级”(ASBU)战略、美国联邦航空局“新一代航空运输系统”(NextGen)计划以及欧洲航行安全组织“单一欧洲天空与空管研究”(SESAR)项目均建议通过空管自动化与智能化的手段解决终端空域拥堵与航班延误问题, 于是进场航班优化排序与调度成为当前的研究热点。

进场航班优化排序与调度旨在不违反安全间



收稿日期: 2015-03-18

修回日期: 2015-11-10;

基金项目: 国家自然科学基金(71401072), 江苏省自然科学基金(BK20130814);

作者简介: 张军峰(1979-), 男, 江苏建湖, 博士, 副教授, 研究方向为空管自动化与智能化。

<http://www.china-simulation.com>

• 1909 •

隔的条件下,结合运行约束,合理高效地为进场航班分配着陆跑道,提供最优着陆次序与时间,以期达到提升跑道容量、减少延误、缓解管制员工作负荷的目的^[1]。Mesgarpour^[2]将进场调度描述为混合整数规划问题,然而该问题属于非确定性多项式难解(NP-Hard)问题,其算法复杂度在寻找最优解时会随着航空器数量的增加成指数倍增长。为了解决算法复杂度问题,Balakrishnan^[3]以最大化跑道容量为目标,在考虑位置转换约束(CPS)限制的基础上,利用动态规划将调度优化问题描述为具有 $O(n(2k+1)^{2k+2})$ 条弧的网络最短路径搜寻问题,其中 n 表示航空器数量, k 表示航空器的最大位置转换数。Balakrishnan^[4]扩展了前期研究,综合考虑容量提升、延误减小和保障公平的目标,提出了具有多项式时间复杂度的进场调度优化算法。除了动态规划方法,诸多元启发式方法也被用来解决进场调度问题:Yu^[5]基于元胞自动机,Cao^[6]采取贪心算法,Salehipour^[7]利用模拟退火算法,实现了多跑道进场调度优化。然而,无论是动态规划方法,还是元启发式方法均采取静态调度策略实现进场航空器的优化排序与调度,无法满足终端空域实际的动态运行需求。

Hu 和 Chen 基于滚动时域控制(RCH),将静态调度推广到动态调度领域^[8],使得在动态进场运行环境中减少航班延误成为可能。在滚动时域控制的框架下,Hu^[9]和 Paolo^[10]分别应用带有二进制描述和均匀交叉算子的遗传算法,求解多跑道机场的进场动态调度问题。Zhan^[11]提出了基于滚动时域控制的蚁群系统进场排序与调度算法(RHC-ACS-ASS)。然而,上述动态排序与调度算法一方面未涉及四维航迹的动态预测,另一方面未考虑管制员的管制习惯与工作负荷(基于 FCFS 序列获取进场航班的着陆序列),因此难以成功应用。本文在精确的进场航空器四维轨迹预测^[12]基础上,考虑约束位置转换限制,提出了基于滑动时间窗策略与分支定界法的进场航班动态排序与调度算法。

1 问题定义

终端空域进场航空器排序与调度问题涉及进场航班的排序、调度、跑道分配。基于航空器四维轨迹预测得出预计到达时间(Estimated Time of Arrival, ETA),针对优化目标,结合约束限制,利用优化算法给出进场航班的最优着陆序列,同时为航空器分配相应的计划到达时间(Schedule Time of Arrival, STA);当多个跑道可用于着陆时,还需要给每一架航空器分配着陆跑道。

进场航空器排序与调度问题与空管、机场、航空公司等利益相关方的需求紧密联系,因此导致其优化目标种类繁多^[1]。与空中交通管制运行需求相关的典型优化目标包括:

1) 最小化航班的平均延误:

$$\min \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max \{ t_{STA_i} - t_{ETA_i}, 0 \} \right) \quad (1)$$

2) 最小化航班的平均降落时间:

$$\min \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{STA_i} \right) \quad (2)$$

3) 最小化最后一架航空器的降落时间:

$$\min \left(\max_{i \in \{1, \dots, n\}} \{ t_{STA_i} \} \right) \quad (3)$$

其中, t_{STA_i} 表示航班 i 的计划到达时间(STA); t_{ETA_i} 表示航班 i 的预计到达时间(ETA); n 表示当前时间窗内航空器的数量。

本文主要从降低管制负荷和提升终端容量的角度出发,选择最小化序列中最后一架航空器的降落时间为优化目标。此外,进场航空器排序与调度问题还需满足如下的运行约束与限制:

1) 间隔要求。航空器在进近着陆阶段,需保持尾流间隔(满足如下的三角不等式约束),该间隔标准主要取决于航空器着陆次序以及前后机的尾流等级。

$$S_{ik} \leq S_{ij} + S_{jk} \quad i, j, k \text{ 为航空器尾流型别} \quad (4)$$

2) 到达时间窗。考虑到终端空域范围有限,优化序列中航班的计划到达时间(t_{STA_i})必须处于

该航空器的到达时间窗内, 即最早达到时间 E_i 与最晚到达时间 L_i 之间。

$$E_i \leq t_{STA_i} \leq L_i \quad i \in \{1, \dots, n\} \quad (5)$$

3) 最大约束位置转换(MPS)。一个严重偏离 FCFS 序列的优化序列将增加管制员的工作负荷, 不利于安全运行。因此, 需要设定航空器的最大位置偏移量, 设当前有 6 架航空器, 当 $k=1$ 时, 对于航空器 3 而言, 它可能变动的位置为 2, 3, 4。考虑管制员工作负荷及操作限制, 通常将 k 值定义为 1 或 2。

4) 优先级约束。从飞行安全角度出发, 同一航路进场的航空器不允许超越, 而且管制员需尊重航空公司对于公平的诉求。文中通过 $n \times n$ 的矩阵 $\{\delta_{ij}\}$ 来表示优先级关系, $\delta_{ij}=1$ 表示航空器 i 早于航空器 j 降落, 否则 $\delta_{ij}=0$, 即:

$$t_{STA_i} \cdot \delta_{ij} < t_{STA_j} \quad i \neq j \quad (6)$$

综上, 进场优化排序与调度问题可以描述为: 对于给定的 n 架航空器, 航空器 i 的最早与最晚到达时间 E_i 和 L_i , 安全间隔矩阵 $\{S_{ij}\}$, 优先级矩阵 $\{\delta_{ij}\}$, 航空器位置允许的最大偏移量 k , 以最小化当前时间段内最后一架航空器的着陆时间为目标, 计算航班进场着陆序列及计划到达时间。

2 多跑道机场动态优化排序与调度

终端空域是一个复杂的动态运行环境, 航空器的数量与信息不断在发生变化。由于静态模型中排序时间窗、航空器的数量与预计到达时间是固定的, 无法在实际运行中及时给管制员提供建议。因此, 需要建立航空器的动态排序与调度模型。航空器的动态排序与调度离不开精确的航迹预测与高效的排序与调度算法。

2.1 四维航迹预测

精确而快速的四维航迹预测是进场动态排序与调度的基础与保障, 本文利用航空器在进场飞行阶段的动力学、运动学、质量变化以及导航方程构

建航迹计算模块。基于欧控实验中心(EEC)发布航空器基础资料(BADA)所涉及的航空器性能参数, 联合航空器意图模型, 考虑风对进场飞行的影响, 依据进场航空器的初始状态(时间、位置、高度)对航空器进行四维航迹预测^[13]。四维航迹预测模型的结构示意图如图 1 所示。

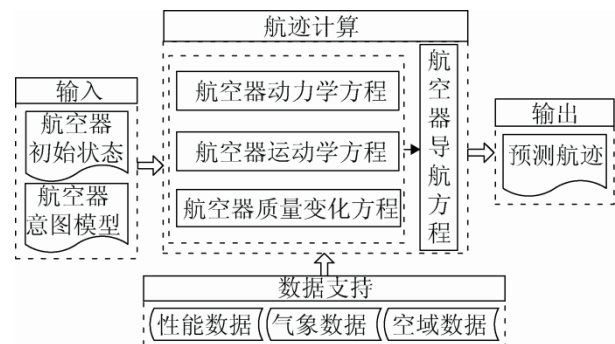


图 1 四维航迹预测模型的结构示意图

2.2 进场航班动态优化排序

利用滑动时间窗, 依据进场航空器进入终端空域的时间将时间段划分成多个排序窗口, 实现进场航班的动态排序与调度。每个排序窗口由重叠时间窗和滑动时间窗组成, 利用分支定界法对滑动时间窗中未排序航班进行优化排序与调度。分支定界(branch and bound)的基本思想在于按照一定的规则将问题的解空间分割成若干个子空间(分支过程), 利用合理的定界方法删除不满足条件的子空间(定界过程), 从而得出问题的最优解。本文所用的分支定界算法是根据限制条件产生每一个节点所有可行解, 扩展解空间树, 然后通过遍历解空间树得出该问题的最优解。

假设当前滑动时间窗内航班有 n 架, 航班的最大位置偏移量为 k 。当 $n=5$, $k=1$ 时, 各阶段可能分配的航班如表 1 所示。

表 1 当 $n=5$, $k=1$ 时的航班分配情况

阶段	1	2	3	4	5
可能分配的	1	1	2	3	4
航班	2	2	3	4	4
		3	4	5	5

加入优先级约束可在排序之前删除一些不可行解。以表 2 为例, 假设航班 2, 3 属于同一航路上的航空器, 则航空器 2 与航空器 3 不可交换位置, 将其从表 2 中删除得出航班最终分配情况, 如表 2 所示。此外, 每一个节点还必须保证在每一个分支中仅出现一次。

表 2 航班最终分配情况

阶段	1	2	3	4	5
可能分配的	1	1	3	3	4
航班	2	2	4	4	5

依据表 2 构建解空间树。S 为解空间树的根节点, E-结点为扩展节点。排序过程如下:

第一步, 根据表 2 选出与当前 E-结点相关联的孩子结点。例如, 与根结点 S 相关联的结点是表 2 中第一阶段的航空器 1 与航空器 2; 与第四阶段的结点 4 相关联的下一阶段结点是航空器 5。

第二步, 计算与当前 E-结点关联的孩子节点所对应航空器 j 的计划到达时间。考虑到进场优化排序与调度的目标在于为航空器分配计划到达时间(STA), 因此需要将基于距离的尾流间隔标准 $\{S_{ij}\}$ 转换为基于时间的间隔标准 $\{\sigma_{ij}\}$ 。

航空器 j 的 STA 可通过以下公式计算得出:

$$t_{STA_j} = \max\{E_i, t_{STA_i} + \sigma_{ij}\} \text{ 且 } t_{STA_j} \leq L_j \quad (7)$$

第三步, 依据步骤 2 剪掉所有无法产生可行解的结点, 将其余节点依次加入活结点表中。

第四步, 从当前活结点表中选择一个结点作为下一个 E-结点, 扩充解空间树。重复上述步骤, 直到活动表为空时, 结束解空间树的扩充过程。依据目标函数选出最优解, 最优解所对应的分支为当前时间窗内航空器着陆的最优序列。

2.3 算法流程

多跑道机场动态优化排序与调度算法流程图如图 2 所示。

具体步骤如下:

1) 确定排序时间窗, 对时间窗内航空器进行 4D 航迹预测, 得出航空器的 ETA。

2) 时间窗内航班按计划到达时间分类, 分成已排序航班与未排序航班。

3) 对着陆于不同跑道的航班按 ETA 升序排序, 判断是否有新进航空器插入到已排序列中。

4) 若有新进航空器插入, 判断当前跑道是否有时隙分配; 若有时隙, 则将航班插入到已排序航班中; 若无时隙分配, 交换跑道, 计算插入航班的计划到达时间。

5) 若无新进航班插入, 则结合实际管制运行限制, 采用分支定界法对滑动时间窗内未排序航班进行优化排序与调度。

6) 滑动至下一时间窗内进行优化排序, 重复步骤 1, 2, 3, 4, 5。

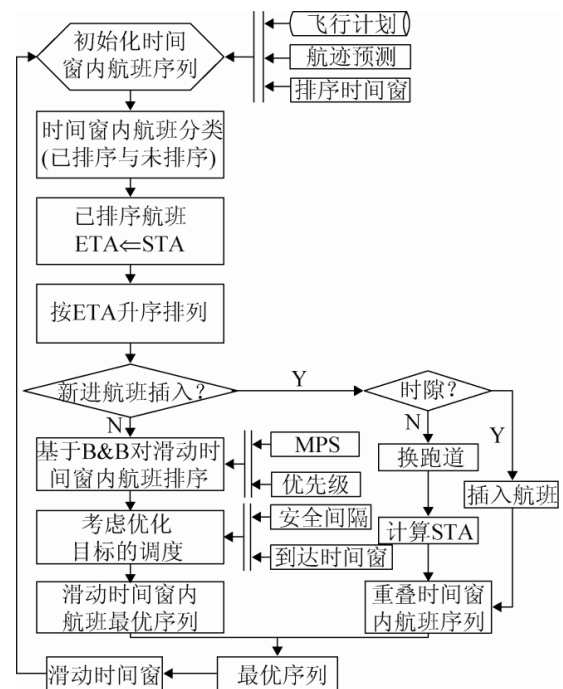


图 2 多跑道机场动态排序与调度流程示意图

3 仿真验证

3.1 仿真准备

以上海浦东机场为例, 对 2013-01-05 T 09:00:00~10:00:00(UTC)进场航班进行仿真验证, 航班飞行计划如表 3 所示。上海浦东机场有

SASAN, BK, PINOT, DUMET 四个进港点, 可用于进场着陆的跑道有两条, 分别为 35L, 34。通常, 从 SASAN、BK 进港的航空器着陆于 35L 跑道; 从 PINOT, DUMET 进港的航空器着陆于 34 跑道。

表 3 2013-01-05 T 09:00:00~10:00:00 航班飞行计划

航班号	进港点	机型	进港时刻	高度/m	速度/(km/h)
CES5406	SASAN	B763	90105	6 310	750
CES572	DUM	A332	90138	5 090	650
CCA406	DUM	A319	90343	6 130	710
CSN6225	PIN	A319	90425	6 740	790
CES5034	DUM	A320	90712	5 590	580
CES291	SASAN	A320	90855	6 240	880
CCA177	SASAN	A332	91309	6 320	750
CES586	DUM	A346	91326	4 830	670
CSN6501	PIN	A319	91654	6 310	780
CES720	DUM	A321	91744	4 540	600
CES504	BK	A320	92112	5 330	690
HDA834	BK	A321	92927	5 280	710
CSH9174	PIN	B738	93042	6 250	800
CES2008	BK	A320	93132	6 360	910
ANA153	DUM	B763	93144	4 450	600
CCA175	SASAN	A332	93157	6 300	740
CSN6251	PIN	A320	93350	6 270	820
AFR116	SASAN	B773	93534	6 930	940
CES790	BK	A320	93648	6 610	790
CES5268	BK	A319	93811	6 900	860
PAL336	BK	A343	93955	5 090	640
CSN6756	PIN	A320	94144	6 290	770
QFA129	BK	A332	94217	5 490	680
HDA896	BK	A333	94336	7 060	810
CES5688	SASAN	A320	94516	6 040	760
CSN3755	BK	B738	94651	5 200	660
CES5684	PIN	A320	94746	6 990	780
UAL857	DUM	B772	94802	5 170	660
CSC8965	SASAN	A321	95044	6 480	930
CES748	DUM	B738	95404	5 690	580
CSH840	BK	B738	95609	5 970	800
CCA4541	SASAN	B737	95741	6 770	830
CSH830	DUM	B738	95830	5 520	670

基于 Visual Studio 2005 环境、利用 SQL Server 2005 和 MapX 控件设计动态优化排序与调度工具, 其主界面如图 3 所示。设定排序时间窗 $t_{\text{window}}=20 \text{ min}$, 滑动时间窗 $t_{\text{sliding}}=10 \text{ min}$, 最大位置转换 $k=1$ 。

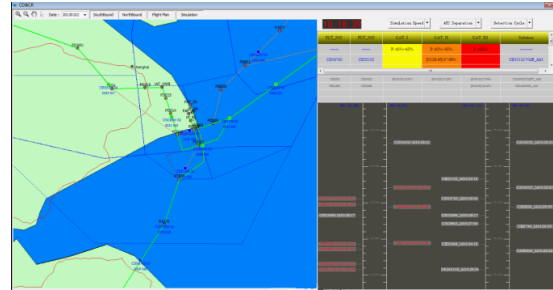


图 3 多跑道机场动态优化排序与调度工具主界面

3.2 结果分析

根据表 3 所示飞行计划, 利用 2.1 节的四维航迹预测模型, 获得的航班的预计到达时间如图 4 所示。图中点划线表示从 SASAN 进港的航班, 点线表示从 BK 进港的航班, 虚线表示从 PINOT 进港的航班, 实线表示从 DUMET 进港的航班。空心圆表示航班着陆于 34 跑道, 星号表示航班着陆于 35L 跑道。

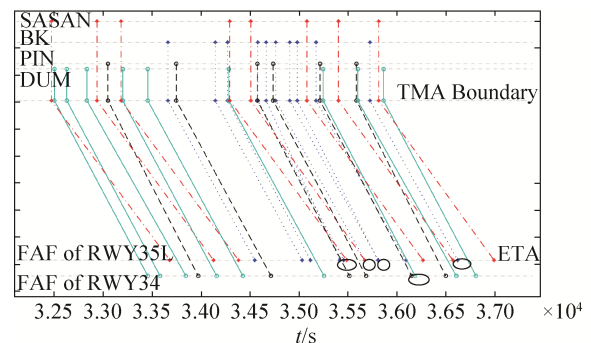


图 4 进场航班预计到达时间示意图

利用图 3 所示的多跑道机场动态优化排序与调度工具, 得出该时间段内进场航班的最优着陆序列、计划到达时间以及跑道分配结果, 如图 5 所示。将航班的计划到达时间与实际到达时间进行比较, 如图 6 所示。

从图 4 可以看出, 如果仅基于飞行计划, 则该时段内的进场航班存在六处冲突。通过本文提出的算法可有效地解决该时段内所有航班冲突(如图 5 所示)。其中, 着陆于 35L 跑道的航班 AFR116 与 PAL336 位置交换; 着陆于 34 跑道的航班 UAL857 与 CSN6756 位置交换。将仿真数据与基于先到的先服务算法得出的航班数据进行对比分析, 如图 7 所示。

结果表明着陆于 35L 跑道与 34 跑道最后一架航班的着陆时间分别提前了 200 s, 150 s。与航班实际到达时间比较发现该时间段内最后一架航空器的计划到达时间较实际时间提前了 382 s, 航班延误率减少了 21%, 有效地提高了跑道容量, 缓解了延误。

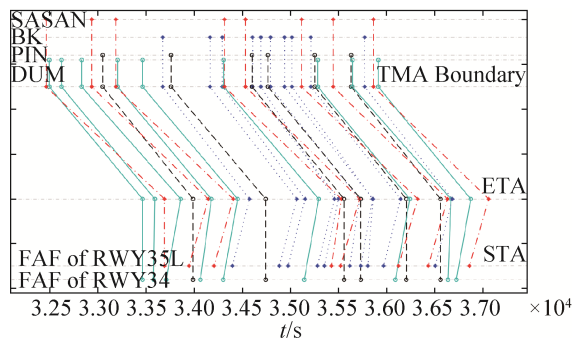


图 5 进场航班计划到达时间示意图

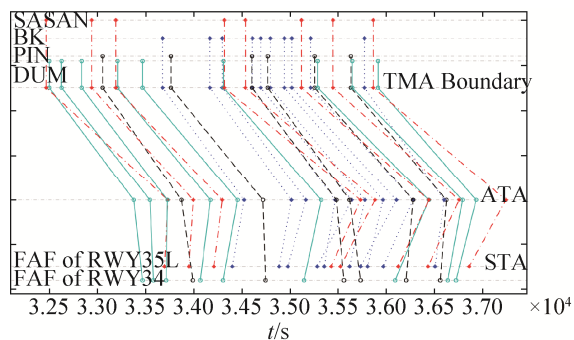


图 6 航班计划到达时间与实际到达时间对比示意图

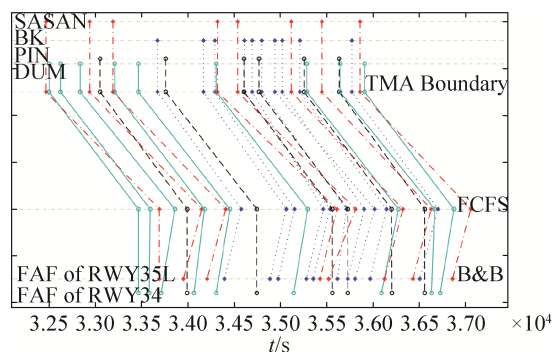


图 7 基于 FCFS 与 B&B 的航班到达时间对比示意图

4 结论

针对终端空域进场调度问题, 提出了基于分支定界法的多跑道动态排序方法。该方法通过滑动时间窗策略实现了航班的在线排序, 并采用分支定界法对每个时间窗内的航班序列进行优化。未来的研

究主要集中于以下两个方面: (1) 如何依据计划到达时间给出航班的调度策略(改变航向、速度、路径或三者组合), 从而为管制员提供决策支持; (2) 建立离场航班动态优化排序与调度模型, 并实现进离场融合的动态协同排序与调度。

参考文献:

- [1] Bennell J A, Mesgarpour M, Potts C N. Airport runway scheduling [J]. Quarterly Journal of Operations Research (S1619-4500), 2011, 9(2): 115-138.
- [2] Mesgarpour M, Potts C N, Bennell J A. Models for Aircraft Landing Optimization [C]// Proceeding of the 4th International Conference on Research in Air Transportation. Hungary: Eurocontrol, 2010: 1-4.
- [3] Balakrishnan H, Chandran B. Scheduling Aircraft Landings under Constrained Position Shifting [C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. USA: AIAA, 2006: 1-23.
- [4] Balakrishnan H, Chandran B. Algorithm for Scheduling Runway Operations under Constrained Position Shifting [J]. Operation Research (S0030-364X), 2010, 58(6): 1650-1665.
- [5] Yu S P, Cao X B, Zhang J. A real-time schedule method for ALS problem based on Cellular Automation [J]. Applied Soft Computing (S1872-9681), 2011, 11(4): 3485-3493.
- [6] Cao Y, Rathinam S, Sun D F. Greedy-Heuristic-Aided Mixed-Integer Linear Programming Approach for Arrival Scheduling [J]. Journal of Aerospace Information Systems (S2327-3097), 2013, 10(7): 323-336.
- [7] Salehipour A, Modarres M, Naeni L M. An efficient hybrid meta-heuristic for aircraft landing problem [J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2013, 40(1): 207-213.
- [8] Hu X B, Chen W H. Receding Horizon Control for Aircraft Arrival Sequencing and Scheduling [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2005, 6(2): 189-197.
- [9] Hu X B, Paolo E D. Binary-Representation-Based Genetic Algorithm for Arrival Sequencing and Scheduling [J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2008, 9(2): 301-310.
- [10] Hu X B, Paolo E D. An efficient genetic algorithm with Uniform Crossover for Air Traffic Control [J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2009, 36(1): 245-259.
- [11] Zhan Z H, Zhang J, Li Y, et al. An Efficient Ant Colony System Based on Receding Horizon Control [J]. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2010, 11(2): 399-412.
- [12] 张军峰, 蒋海行, 武晓光. 基于 BADA 及航空器意图的四维航迹预测 [J]. 西南交通大学学报. 2014, 49(3): 553-558.