

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.011

## 基于分支定界的离场航空器动态排序

王 菲 张军峰 葛腾腾 陈 强

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

**摘要:**离场航空器优化排序是加速终端空域内航班流动、提高航班正点率、缓解管制工作负荷的有效手段。采用滚动时域控制(Receding horizon control, RHC)策略构建离场航空器实时动态排序框架,并基于分支定界法获取时间窗内优化的目标起飞时间。在此基础上,利用修正的离场滑行时间确定允许开车时间,从而为管制员提供决策支持。以上海浦东机场离场运行为例进行仿真验证,结果表明文中提出的方法不仅有效地实现了管制决策支持(为管制员提供目标起飞时间与允许开车时间),也能够提升跑道离场容量,降低离场延误水平。

**关键词:**交通运输规划;离场排序;滑动时间窗;分支定界法;决策支持

中图分类号:V355

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)04-0547-06

## Dynamic Departure Sequencing Based on Branch and Bound Algorithm

Wang Fei, Zhang Junfeng, Ge Tengting, Chen Qiang

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Departure sequencing is an effective means to expedite terminal air traffic flow, improve departure punctuality and alleviate controllers' workload. The framework for dynamic sequencing is built based on receding horizon control (RHC) strategy. And through the branch and bound algorithm, target takeoff time (TTOT) is optimized within the sequencing window. Furthermore, target start-up approval time (TSAT) is obtained depending on the amendment of taxi-out time so as to provide the decision support for tower controller. Taking ZSPD airport as an example for simulation, the result indicates that the proposed algorithm can realize decision support for controllers (providing TTOT & TSAT), enhance the runway departure capacity, and reduce the departure delay.

**Key words:** transportation planning; departure sequencing; sliding time window; branch and bound algorithm; decision support

近年来,空域拥堵、航班延误等问题频繁发生,终端空域航班排序问题逐渐受到国内外研究者的重视。目前,对终端空域航班排序问题的研究主要集中在进场领域,研究者提出了诸多算法解决该问题,如动态规划法<sup>[1]</sup>、贪心算法<sup>[2]</sup>、模拟退火算法<sup>[3]</sup>及遗传算法<sup>[4]</sup>等。各国民航组织与科研部门也陆续开发出相应的进场管理系统,如美国的 Center-TRACON 自动化系统(Center-TRACON automa-

tion system, CTAS), 欧洲的进场管理系统(Arrival management, AMAN), 如法国 MAESTRO、德国 4D-Planner 及比利时 OSYRIS 等。然而,仅研究进场排序无法有效解决空域拥堵问题。因此,离场排序问题的研究逐渐得到重视,而且将主要目标限定于<sup>[5]</sup>:在满足约束与优先级的前提下,优化离场航空器的目标起飞时间(Target take off time, TTOT)与允许开车时间(Target start-up time,

**基金项目:**国家自然科学基金(71401072)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20130814)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金(NS2013064)资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地开放基金(kfj201446)资助项目。

**收稿日期:**2015-03-01; **修订日期:**2015-06-15

**通信作者:**张军峰,男,副教授, E-mail: zhangjunfeng@nuaa.edu.cn。

TSAT),以期加速离场运行、提升空域容量及缓解管制负荷。

文献[6]将先进先出(First in first out, FIFO)法则引入离场排序,通过建立混合整数规划模型实现离场优化排序。文献[7]从管制指挥角度出发,建立了等待约束的离场排序模型,并采用禁忌搜索算法求解。文献[8]考虑了离场航空器在停机位以及廊桥处的等待,引入延误饱和度加权因子,提出了改进混合整数规划算法解决离场排序问题。文献[9]提出基于稀疏优化的近似算法实现离场排序,并与蚁群算法及基于 CPLEX 工具优化结果进行比较。文献[10]以跑道容量最大化、离场延误最小化为目标建立了多跑道机场离场航空器的多目标优化排序模型。文献[11]以航班延误、跑道容量和环境污染为联合优化目标,建立了独立离场模式下多跑道时空资源优化调度模型,设计带精英策略的非支配排序遗传算法解决多跑道离场排序问题。此外,诸如动态禁忌搜索算法<sup>[12]</sup>、模拟退火算法<sup>[13]</sup>、动态规划法<sup>[14]</sup>等也被用于解决离场排序问题。

上述研究虽然实现了离场航班的 TTOT 优化

排序,然而并未对离场航空器的 TSAT 进行优化,因此无法为管制决策提供支持,同时将增加航空器在跑道入口处的等待,极易造成场面交通拥堵。另一方面,上述研究均采用静态策略实现离场航空器的排序,无法满足终端空域实际的动态运行需求。本文采用滚动时域控制策略,基于分支定界法实现了离场航班的动态优化排序,在分析离场航空器滑行时间基础上,反推得出航空器的允许开车时间,为地面管制员和塔台管制员提供有效的决策支持,从而提升机场运行效率,降低管制工作负荷。

## 1 离场排序问题与建模

### 1.1 问题描述

航空器离场运行涉及机场、航空公司与空管的通力协作,机场提供离场航空器的停机位信息,航空公司给出预计撤轮挡时间(Estimated off-block time, EOBT),塔台管制的放行席位根据跑道时隙分配给离场航空器预计起飞时间(Estimated take-off time, ETOT),塔台管制的地面席位依据 ETOT 为离场航空器发布开车许可,即航空器允许开车时间,具体运行流程如图 1 所示。

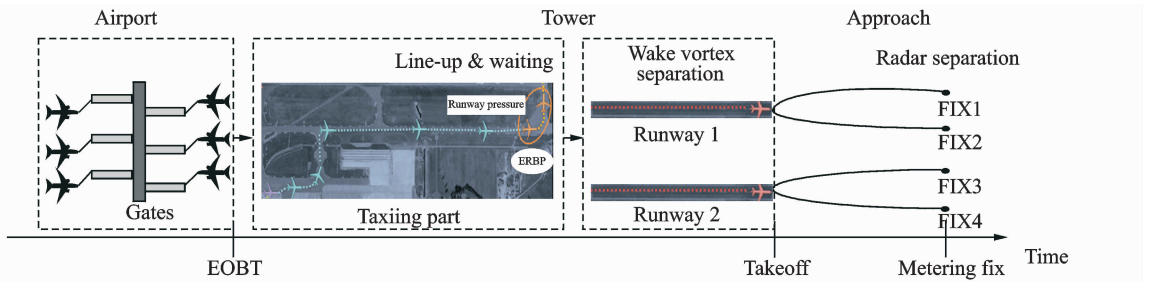


图 1 航空器离场运行示意图

Fig. 1 Diagram of aircraft departure operation

根据上述分析可见,离场航空器排序难点在于:(1)塔台管制放行席位在确定离场时间时,不仅要充分考虑跑道时隙、离场航班的尾流间隔,同时应当保障离场航空器在共用离港点处满足雷达间隔的要求,也即必须提前控制冲突风险,而不能将潜在的风险移交给进近管制员;(2)离场航空器开车许可的发布时机也是难点,毕竟场面滑行时间影响因素众多,且由于离场序列的确定,导致后续离场航班在跑道端口存在一定等待时间。因此,为了加速离场运行、提升空域容量、缓解管制负荷,离场排序必须同时考虑起飞时间与允许开车时间。

### 1.2 模型构建

与进场航班排序问题相同,离场航空器排序问题与空管、机场、航空公司等利益相关方的需求紧密联系,目标函数种类繁多。本文从跑道运行效率

和航空器公平性的角度出发,选取优化灵敏度较高的最小化系统总延误作为目标函数。除此之外,离场排序需满足下列约束:

(1)最小尾流间隔。同跑道连续起飞的航空器,后机会受到前机尾流的影响。为保证起飞安全,同跑道连续放行的航空器需满足尾流间隔。本文选用基于距离的尾流间隔,并将其转化为时间间隔,如表 1 所示。

表 1 尾流间隔标准

Tab. 1 Separation standards of wake vortex

前机	后机间隔 <sup>[15]</sup>		
	重型(H)	中型(M)	轻型(L)
重型(H)	94	114	167
中型(M)	74	74	136
轻型(L)	74	74	98

(2)最小放行间隔。从同一离港点连续离场的航空器为保证在离港点处的安全间隔,需在放行时满足最小放行间隔。该间隔约束是引发离场排序研究的关键因素。

(3)时间窗约束。离场放行中,航班的最早起飞时间不得早于 ETOT。

假设机场停机位足够多,对离场航空器离场调度不产生影响;不考虑进场航空器对离场排序调度的影响。离场航班优化排序模型的数学描述为

$$\min \sum_{i=1}^n (t_{TTOT_i} - t_{ETOT_i}) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } p_{ij} + p_{ji} = 1, p_{ij} \in \{0,1\} \quad j > i \quad (2)$$

$$t_{TTOT_i} \geq t_{TTOT_j} + d_{ij} - (t_{TTOT_i} + M + d_{ij} - t_{TTOT_j}) \cdot p_{ij} \quad (3)$$

$$t_{TTOT_i} \geq t_{ETOT_i} \quad (4)$$

式中: $t_{TTOT_i}$ 与 $t_{ETOT_i}$ 分别表示航空器*i*的目标起飞时间与预计起飞时间; $d_{ij}$ 为起飞离场的尾流间隔与放行间隔的较大值; $M$ 为足够大的正整数。式(1)表示最小化系统总延误目标;式(2)表示航空器*i,j*的起飞先后次序;式(3)表示离场航空器*i,j*之间满足尾流间隔及放行间隔;式(4)表示航空器*i*需满足的时间窗约束。

## 2 离场动态排序算法

### 2.1 动态排序策略

终端空域内运行的航空器信息与数量不断发生变化,随着时间的推移,将导致排序问题规模越来越大,模型计算效率下降,甚至无法得出可行解。因此,需要建立动态排序机制。

滚动时域控制 (Receding horizon control, RHC)是一种在线调度策略,通过将问题转化为固定时长的优化问题,依据优化性能指标来确定当前时刻到未来有限时域内问题的最优解,然后向前推移至下一优化时域。本文利用滚动时域控制策略,如图 2 所示,依据航班离场时刻将时间划分为多个时间窗,每个时间窗由滚动时间窗和滑动时间窗组成。依据时间窗内航班信息(如离港点、机型、预计起飞时间等)对该时域内航班进行优化排序,然后滑动至下一时间窗对航班进行优化排序。通过限界给出的局部信息消除得出次优解的候选点,从而缩小解空间,提高解算效率,实现离场航班的动态在线实时排序。

### 2.2 滑行时间估算

滑行时间估算对于离场排序而言至关重要<sup>[5]</sup>,一方面,预计离场时间是目标离场时间优化的基

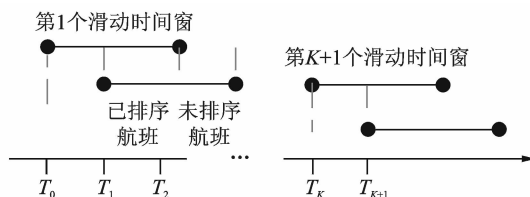


图 2 滚动时域控制示意图

Fig. 2 Diagram of RHC

础,而预计离场时间的确定需要根据滑行时间与预计撤轮挡时间确定;另一方面,优化目标离场时间之后,又需基于滑行时间获取目标允许开车时间。在无先进的场面引导系统(如高级场面滑行引导与控制系统(Advanced surface movement guidance and control system, A-SMGCS)的情况下,离场滑行时间往往取决于航空器所在停机位、机型及滑行路线,同时受诸多因素影响,如天气、跑道构型、停机位布局以及机坪的繁忙程度。

本文在估算滑行时间时,首先根据停机位、机型、使用跑道及滑行路线信息,基于滑行速度计算无障碍滑行时间;然后以该时间段内进场航班以及离场航班的数量作为衡量机坪繁忙程度的指标,给出滑行时间的修正值;最终获得估算离场滑行时间。以浦东机场停机位布局以及滑行路线为例,利用滑行的平均速度大致估算出从各停机坪滑行至跑道入口处的无障碍滑行时间,也即最快滑出时间,如表 2 所示。表中,停机坪 7L,7R,8L,8R 分别表示位于 T2 候机楼的北向、南向两侧的 7 号机坪和 8 号机坪;停机坪 5E 和 5W 分别表示属于东、西地面管制范围内的 5 号机坪。

表 2 浦东机场滑行时间表

停机坪	Tab. 2 Estimated taxi-out time in ZSPD min	
	至 RWY34	至 RWY35R
7L,8L	15	19
7R,8R,5E	13	17
1,2	19	15
5W	17	13
4	19	8

### 2.3 离场排序算法

离场航班动态优化排序流程图如图 3 所示,具体步骤如下:

(1)设置排序时间窗参数,包括重叠时间窗与滑动时间窗。

(2)结合预计撤轮挡时间及场面滑行时间,计算航班的计划起飞时间。

(3)滑动时间窗内航班按照 TTOT 升序排列。

(4)以重叠时间窗内最后一架与滑动时间窗首架航空器离港点相同的航班为排序队列的初始航班,构建航班排序队列。

(5)基于分支定界法对当前时间窗内离场航班进行优化排序。

①构建解空间树,定义解空间树的树梢为 E-结点。

②选出与当前 E-结点关联的孩子结点并加入活结点表。

③从活结点表中选取新的 E-结点,扩展解空间树直至活结点为空。需要说明的是,每架航空器仅能在每一分支中出现一次。

④结合间隔约束与时间窗约束得出离场航班的计算起飞时间(Calculated take off time, CTOT)。以最小化系统总延误为目标,选出当前时间窗最优起飞序列。

(6)结合航班滑行时间,更新航班的计划撤轮挡时间,获得允许开车时间,增加管制员对场面交通态势的把握,从而进一步提高场面的运行效率。

(7)滑动至下一时间窗,重复上述步骤。

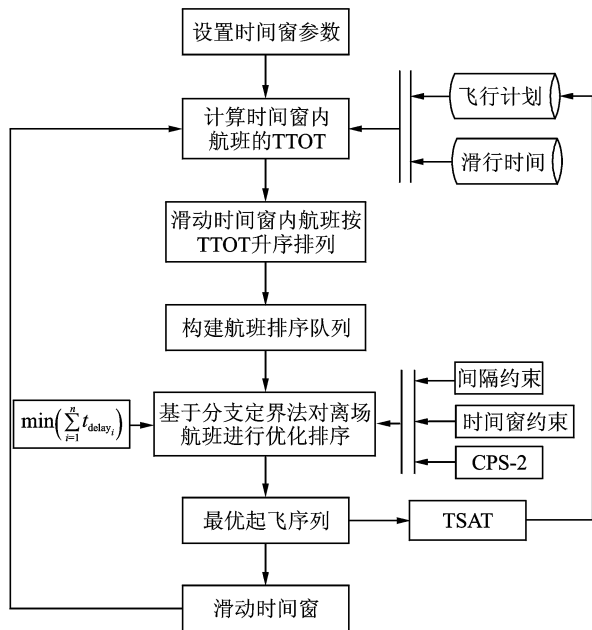


图3 离场航班动态优化排序流程图

Fig. 3 Flowchart of dynamic departure sequencing

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真准备

以上海终端空域浦东国际机场离场运行作为仿真场景,实施案例验证,如图4所示。其中外围点画线表示终端空域扇区划分,黑色线表示浦东机场

某日离场航班的雷达轨迹。PIKAS, LAMEN, NXD, ODULO, PINOT 等表示浦东机场离场程序航路点。

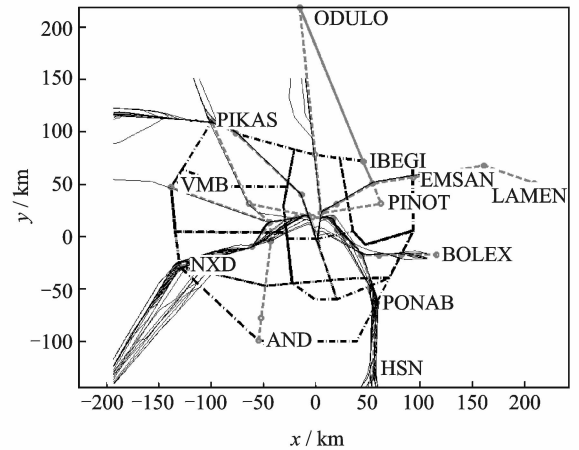


图4 上海终端空域北向运行场景示意图

Fig. 4 Diagram of northbound operation scene in Shanghai terminal airspace

浦东国际机场有3条跑道,其中34,35R跑道用于离场航班放行。原则上,从35R跑道起飞的航空器主要从PIKAS和NXD方向离港,34跑道起飞主要从ODULO, LAMEN, BOLEX及HSN方向离港。同一离港点连续离港的航班除了要满足尾流间隔外,还需满足最小放行间隔,即从LAMEN点连续离港的航班放行间隔不小于5 min,从HSN, ODULO, PIKAS, NXD及BOLEX连续离港的航班必须保持不小于3 min的放行间隔。

选取某日7点40分至8点35分离场高峰时段的40架离场航班为样本,进行仿真验证。设定初始排序时间窗为30 min,滚动时域为15 min,最大约束位置转换值为2。

### 3.2 滑行时间

根据表2所示的浦东机场滑行时间表,以15 min为一个时间段,分析不同时段内离场航班的滑行时间与离场航班数量、进离场总航班数量的关系,如图5所示。

从图中可以看出,6点至9点、15点至16点、22点30分至23点45分离场的航班平均滑行时间在20 min左右,24时离场的航班平均滑行时间为10 min,其余时段平均滑行时间在25 min左右。离场航班的平均滑行时间的变化曲线与离场航班的平均数量的变化曲线大致相同。相较进离场总航班,当前时段内离场航班的总数量对滑行时间的影响较大,并以此给出滑行时间的修正,估算离场滑行时间。

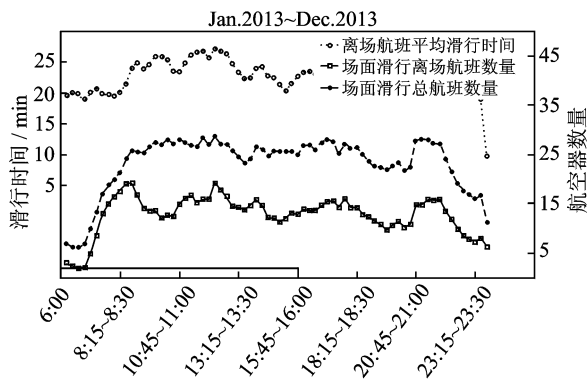


图 5 上海浦东机场离场航班滑行时间分布图

Fig. 5 Distribution diagram of taxi-out time in ZSPD

3.3 结果分析

由于仿真样本中只有中型与重型机两类,容易导致优化结果不唯一。本文仅将航班位置变动次数少的优化结果与基于先到先服务(First come first serve,FCFS)规则的离场序列进行比较,具体的仿真结果如表 3 和图 6 所示,离场航班的延误水平对比如图 7 所示。

从上面的结果可得出,(1)基于分支定界法得出的最优起飞序列较传统的 FCFS 算法可使最后一架航空器的起飞时间提前 220 s,系统总延误时

间由 7 686 s 减少至 4 536 s,延误时间在 5 min 至 15 min 的航班架次较 FCFS 算法减少 4 个架次,无延误航班架次提高了 3 架,这充分说明本文提出的模型和算法可有效提高跑道容量,减少航班延误,提高正点率。(2)通过估算出的从各停机坪内滑出的航空器滑行至跑道入口处的平均时间及各航空器的计算起飞时间可得出允许开车时间,从而提高地面管制员对机场交通态势的把握,减少航空器在跑道入口处的等待,提高机场的运行效率,增大跑道容量。(3)由于最优起飞序列不唯一,所以当机场某些条件发生变化时,管制员可再调配某些航班的顺序,不影响总的离场耗时。

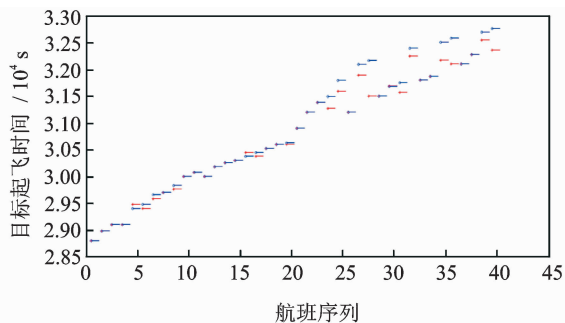


图 6 仿真结果示意图

Fig. 6 Schematic diagram of simulation results

表 3 部分仿真结果

Tab. 3 Schematic table of partial simulation results

号码	航班号	机型	EOBT	ETOT	起飞跑道	分支定界		FCFS	
						TTOT	TSAT	TTOT	TSAT
1	CSN6374	A320	07:39:15	08:00:00	34	08:00:00	07:39:15	08:00:00	07:39:15
2	CSH9123	B738	07:39:15	08:00:00	34	08:03:00	07:42:15	08:03:00	07:42:15
3	DKH1231	A320	07:44:15	08:05:00	35R	08:05:00	07:44:15	08:05:00	07:44:15
4	DKH1189	A320	07:44:15	08:05:00	34	08:05:00	07:44:15	08:05:00	07:44:15
5	CQH8833	A320	07:50:51	08:10:00	34	08:11:14	07:52:05	08:10:00	07:52:05
6	CSH9171	B738	07:50:51	08:10:00	34	08:10:00	07:50:51	08:11:14	07:50:51
7	DKH1163	A320	07:50:51	08:10:00	34	08:13:00	07:53:51	08:14:14	07:53:51
8	CSH9147	B738	07:55:51	08:15:00	35R	08:15:00	07:55:51	08:15:00	07:55:51
9	CSH9177	B738	07:55:51	08:15:00	34	08:16:00	07:56:51	08:17:14	07:56:51
10	CCA1216	A321	08:01:16	08:20:00	35R	08:20:00	08:01:16	08:20:00	08:01:16
11	DKH1221	A320	08:01:16	08:20:00	35R	08:21:14	08:02:30	08:21:14	08:02:30
12	CPA3257	B744	08:01:16	08:20:00	34	08:20:00	08:01:16	08:20:00	08:01:16
13	CCA1258	A320	08:01:16	08:20:00	35R	08:23:00	08:04:16	08:23:00	08:04:16
14	SIA827	B772	08:01:16	08:20:00	35R	08:24:14	08:05:30	08:24:14	08:05:30
15	HDA871	A321	08:06:16	08:25:00	34	08:25:00	08:06:16	08:25:00	08:06:16

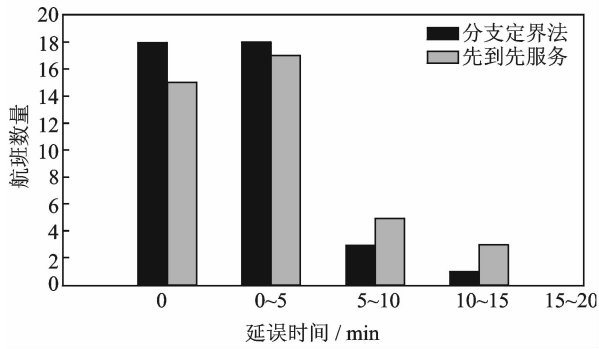


图7 延误水平对比图

Fig. 7 Time delay comparison between branch and bound algorithm and FCFS

## 4 结束语

本文针对离场排序问题,提出基于分支定界的离场动态优化排序算法,并以上海浦东机场为例进行仿真验证,结果显示本文提出的模型与算法可有效地减少航班延误,提高正点率。然而,本文未考虑进场运行对离场排序的影响,同时如何实现进离场协同排序,将是未来研究需重点解决的问题。

## 参考文献:

- [1] Balakrishnan H, Chandran B. Algorithm for scheduling runway operations under constrained position shifting[J]. *Operation Research*, 2010, 58(6):1650-1665.
- [2] Cao Y, Rathinam S, Sun D F. Greedy-heuristic-aided mixed-integer linear programming approach for arrival scheduling[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2013, 10(7):323-336.
- [3] Salehipour A, Modarres M, Naeni L. An efficient hybrid meta-heuristic for aircraft landing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(1):207-213.
- [4] 张启钱,胡明华,施赛锋.基于RHC的航班着落调度多目标优化算法[J].*南京航空航天大学学报*, 2012, 44(3):393-398.  
Zhang Qiqian, Hu Minghua, Shi Saifeng. Multi-object optimization algorithm for aircraft landing based on receding horizon control strategy[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(3):393-398.
- [5] Eurocontrol Experimental Center. The eurocontrol DMAN prototype—Description of DMAN in the A-CDM context[R]. NO. 10/12/14-04, 2010.

- [6] Gupta G, Malik W, Jung Y C. A mixed integer linear program for airport departure scheduling[C]//9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations conference (ATIO). Hilton Head, South Carolina: AIAA, 2009:1-13.
- [7] Atkin J A D, Burke E K, Greenwood J S, et al. An examination of take-off scheduling constraints at London Heathrow airport[J]. *Public Transport*, 2009, 1(3):169-187.
- [8] Bae S W, Park J W, Clarke J P. Modified mixed integer linear program for airport departure scheduling [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Boston, MA: AIAA, 2013:1-13.
- [9] Ma W M, Xu B, Liu M, et al. An efficient algorithm based on sparse optimization for the aircraft departure scheduling problem[J]. *Computational and Applied Mathematics*, 2014, 10(7):1-17.
- [10] D'Apice C, De Nicola C, Manzo R, et al. Optimal scheduling for aircraft departures[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2014, 5(6):799-807.
- [11] 尹嘉男,胡明华,张洪海,等.独立离场模式下多跑道时空资源优化调度方法[J].*航空学报*, 2014, 35(11):3064-3073.  
Yin Jia'nan, Hu Minghua, Zhang Honghai, et al. Optimized method for multi-runway spatio-temporal resource scheduling in the mode of independent departures[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(11):3064-3073.
- [12] Wang L J, Shi Z K, Lei X J. Dynamic tabu search algorithm for solving departure scheduling problem [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University: English Edition*, 2007, 15(2):132-137.
- [13] Atkin J A D, Burke E K, Greenwood J S, et al. A meta-heuristic approach to aircraft departure scheduling at London Heathrow airport [J]. *Journal of Scheduling*, 2008, 11(5):323-346.
- [14] Rathinam S, Wood Z, Sridhar B, et al. A generalized dynamic programming approach for a departure scheduling problem [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Chicago, Illinois: AIAA, 2009: 1-12.
- [15] Hancerliogullari G, Rabadi G, Al-Salem A H, et al. Greedy algorithms and metaheuristics for a multiple runway combined arrival-departure aircraft sequencing problem [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2013, 32:39-48.

