

基于启发式隐枚举算法的多机场 GDP 放行策略

吕双回, 胡明华

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要:终端区内航空器的放行策略制定往往因涉及多机场航路结构的耦合效应,对终端区运行能力产生影响.应用地面等待策略,并考虑多机场系统具有公共离场定位点的空域结构特点,建立了多机场系统的航班放行策略模型.结合启发式隐枚举算法,通过引入机场优先级,并协调经由公共离场定位点的各机场航班比例,优化各机场航班的放行时刻.仿真结果表明,与FCFS策略相比,HLEA算法能显著减少多机场系统的航班总体延误,提高终端区空域的运行效率.

关键词:多机场系统;地面等待;放行策略

中图分类号:V355.1

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.01.028

0 引言

多机场系统的离场放行策略是协同流量管理问题的子问题.同一终端区内的多个机场构成多机场系统,使用多个公共离场定位点,相应的标准离场航路因此形成耦合.尽管各国学者在离场排序问题方面进行了大量研究,但以往的研究多集中于单机场离场航班排序策略问题,协调同一终端区内多机场系统的离场放行策略研究才刚刚起步,多机场系统航班离场排序问题是NP难题.已有的单机场航班排序相关研究表明:先到先服务(First come first served)排队方法整体效率较低^[1];滑动时间窗动态排序方法的局部最优解与全局最优解差异较大^[2-3];作为一种群智能多点并行随机搜索方法,粒子群算法在进行大规模搜索时收敛速度有待提高^[4];考虑实际地理因素限制的离场排序模型在采用退火、禁忌搜索和陡峭下降搜索等算法时,某些情况下结果差异很大^[5];遗传算法的适应度和交叉算子参数较难确定^[6];基于动态理论的排序算法的特征系数得出的排序位置对实际改动太大^[7].

考虑地面等待策略,并基于多机场系统具有公共离场定位点的空域结构特点,建立多机场系统的航班放行策略模型.在此基础上提出启发式隐枚举算法(HLEA),通过引入机场优先级,并协调经由公共离场定位点的各机场航班比例,优化各机场航班的放行时刻,使多机场系统的航班总体延误最小.

1 多机场系统航班放行策略模型

模型的目标函数为

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F_k} \sum_{t \in T} (t_{dk}^f - t_{dc}^f) \cdot x_t^f \quad (1)$$

表示研究时段内所有机场离场航班的总延误时间最小.

其中, x_t^f 是决策变量,若航班 f 能在时段 t 内起飞, x_t^f 为1,否则为0; K 为所有起飞机场 k 的集合; k 为航班 f 的起飞机场; F_k 为在机场 k 起飞的所有航班的集合; T 为航班起飞时刻集合; t_{dk}^f 为航班 f 的预定离场时刻; t_{dc}^f 为航班 f 的控制离场时刻,即航班 f 实际分配到的起飞离场时刻.

模型约束为:

$$\sum_{t \in T} x_t^f = 1 \quad \forall f \in F_k, \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{f \in F_k, k \in K} x_t^f \leq D^k(t) \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sigma(f) \sum_{f' \in F_k, p \in P(f)} x_{ft}^f \leq C^p(t) \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sigma(f) = 1, \forall t \in T, \forall k \in K \quad (5)$$

$$t_{dk}^f \leq t_{dc}^f, \quad \forall f \in F_k, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (6)$$

$$t_{dc}^f + w \leq t_{dc}^{f'} \quad \forall f \in F_k, \forall f' \in F_k, \forall k \in K \quad (7)$$

$$ft_f^p + MIT \leq ft_f^p \quad \forall f \in F_k, \forall f' \in F_k, \forall k \in K \quad (8)$$

$$x_t^f = \{0, 1\}, \quad \forall t \in T, \forall f \in F_k, \forall k \in K \quad (9)$$

其中,式(2)确保航班在起飞时刻所在的时间

片只起飞一次;式(3)表示起飞机场容量约束, $D^k(t)$ 为在时段 t 内机场 k 的离场容量, $k \in K$;式(4)表示有公共离场定位点的各机场的航班流比例不超过定位点容量限制, $\sigma(f)$ 是航班 f 起飞机场 k 的优先级因子, $P(f)$ 为航班 f 在航路中经由离场定位点的集合, $C^p(t)$ 为在时段 t 内离场定位点的容量, $p \in P$, ft_f^p 是航班 f 由起飞机场到达各离场定位点的飞行时间, $p \in P(f)$;式(5)表示航班控制起飞时间不早于航班预计起飞时间;式(6)是尾流间隔限制, w 为航班 f 的尾流间隔, f' 表示相继 f 的航班;式(7)是航迹间隔(Miles-In-Trail)限制, $MIT(l)$ 是在时段 l 内离场定位点的限制间隔;式(8)表示决策变量只能取 0 或 1。

2 启发式隐枚举算法

由于多机场系统的航班放行策略模型是 NP 难问题,因此考虑用启发式方法进行求解,本文采用隐枚举算法。起飞机场的离场容量和离场航路的各定位点容量是确定的。

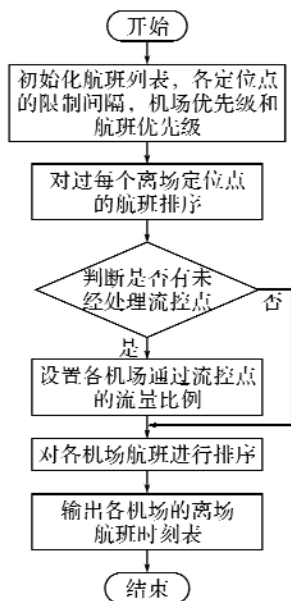


图 1 启发式隐枚举法流程图

Fig. 1 The heuristic latent enumerate algorithm flow chart

隐枚举算法首先通过对有共同离场定位点的各机场航班放行序列算法求出初始可行解,再通过机场优先级的设定,以及公共离场定位点各机场航班流的比例调节,进行放行时刻的最优化求解。算法中,航班的优先级根据延误时段数动态提高,当预计到达离场定位点的时刻相同时,航班流量大的起飞机场拥有更高的优先级。

3 算例分析

交通运输是一门实践性非常强的学科^[8]。因

此仿真采用 VC++ 编写仿真程序,原始数据选自 2008 年 3 月 5 日 18:00~19:00 广州白云机场(CAN)和珠海三灶机场(ZUH)的航班数据,包括 39 个航班,离场跑道占用时间为 2 分钟一个时隙。两机场共同离场定位点 LMN 点有流量控制,流控限制时间从 18:00 至 19:00,经过 LMN 点的航路时间间隔为 8 分钟,即航迹间隔(Miles-In-Trail)。19:00 后,流控消除,过 LMN 点航班只要满足安全间隔即可。其他航路点没有流量限制。广州白云机场比珠海三灶机场的优先级高。

表 1 显示了不同机场流量比例因子下对应机场的总延误时间(CAN 是广州机场的三字代码,ZUH 是珠海机场的三字代码)。可以看出,经由 LMN 离场定位点的航班架数较多的起飞机场,其航班延误的总时间较少,机场航班延误总量与其经由公共离场定位点的航班流量呈现此消彼长的关系。因此,可以调整两个机场通过 LMN 点的航班架次比例,优化空域资源配置,使多机场系统的延误总量最小,提高空域使用的效率。

表 1 优先级比例因子不同时机场延误时间 min
Table 1 The delay time when different priority rate factors

| 流控架次比例关系 | CAN | ZUH | 合计 |
|-------------|-----|-----|-----|
| CAN-3,ZUH-3 | 211 | 25 | 236 |
| CAN-4,ZUH-2 | 146 | 72 | 218 |
| CAN-5,ZUH-1 | 130 | 114 | 244 |
| CAN-6,ZUH-0 | 106 | 178 | 284 |

由表 2 可知:对于航班预计起飞时间分布不紧凑的珠海机场来说,航班能按时起飞,不涉及地面等待,两种算法对其航班的离场时刻影响不大;对航班预计起飞时间分布紧凑的广州机场来说,HLEA 较之 FCFS 算法使其平均延误减少了 34.84%、最大延误时间减少 17.95%,放行时刻配置获得了较好的优化。

HLEA 较之 FCFS 算法使两机场的总延误减少了 26.35%、两机场的平均延误减少了 26.37%,因此可以较大幅度提高多机场系统的整体运行效率。

表 2 两种时刻表的统计比较 min
Table 2 Compared two schedule time

| 延误指标 | HLEA | FCFS | 减少延误 |
|---------|------|------|------|
| 两机场总延误 | 218 | 296 | 78 |
| 两机场平均延误 | 5.89 | 8 | 2.11 |
| 广州平均延误 | 5.03 | 7.72 | 2.69 |
| 珠海平均延误 | 9 | 9 | 0 |
| 广州最大延误 | 32 | 39 | 7 |
| 珠海最大延误 | 53 | 53 | 0 |

4 结 语

以上对多机场系统的协调放行策略进行了探索性的研究,基于地面等待策略提出了多机场系统的航班放行策略模型,并采用启发式隐枚举算法对该模型进行了求解.与基于FCFS的算法相比较,隐枚举算法不仅算法简捷,还考虑了机场优先级和机场通过耦合定位点的流量比例,可以大幅度减少离场延误和地面等待时间.其他协同决策的影响因素、多机场多跑道的使用、不同SID的相互影响因素等对离场放行的效应更加复杂,也是今后需要进一步探索和研究的课题.

参考文献:

- [1] 孙霞林,曾华,熊德之,杨建华.基于排队的服务系统的最小成本[J].武汉工程大学学报,2008,30(1): 125-126.
- [2] 张兆宁,王莉莉.基于流量和滑动窗的空中交通管理动态排序法[J].交通运输工程与信息学报,2004, 2(3):22-25.
- [3] 胡雄鹰,熊茜,黎伟东.基于结点的网络最大流算法[J].武汉工程大学学报,2009,31(12):7-69.
- [4] 高海超,胡明华.基于最小延误成本的进港航班公平排序[J].交通运输工程与信息学报,2008,6(4):57-62.
- [5] Atkin JAD, Burke EK, Greenwood JS, et al. Hybrid metaheuristics to aid runway scheduling at London Heathrow airport[J]. Transportation Science, 2007, 41(1), 90-106.
- [6] 陶冶,白存儒,由嘉.基于遗传算法的起降航班动态排序模型的研究[J].中国民航学院学报,2005, 23(4):6-9.
- [7] 胡明华,李丹阳,韩松臣.被动空中交通流量管理中的动态排序算法[J].南京航空航天大学学报,2000, 32(1):85-90.
- [8] 张培林,刘清,丁涛,等.交通运输专业虚拟实习平台的建设[J].武汉工程大学学报,2009,31(9):72-77.

Multi-airport ground delay program departure policy based on heuristic latent enumerate algorithm

LV Shuang-hui, HU Ming-hua

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

Abstract: Departure scheduling strategy in terminal refers to the coupling effect of the path structure in Multi-airport system, and impacts the traffic capability of the terminal. Considering to the common departure fixes in Multi-Airport System, we use the Ground Delay Program, and build a model of Multi-Airport System departure scheduling strategy. Then we consider a heuristic latent enumerate algorithm (HLEA). This algorithm gets the optimized departure scheduling in multi airports, through cooperate the multi traffic flow rate passing a common departure fix from the multi airports, simultaneously introducing the priority of airports. By simulating algorithm and comparing with FCFS algorithm, some results are given to show that HLEA can minize the total delay of multi airports and improve the effectiveness of the airspace capability in terminal.

Key words: multi-airport system; ground delay program; departure schedule strategies

本文编辑:陈小平