

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.06.013

基于分类与优化的进场航空器调度方法

杜卓铭, 张军峰, 杨春苇

(南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

摘要:为兼顾进场运行效率与管制工作经验,提出了一种基于分类与优化的进场调度方法。在分析进场管制特点的基础上,将进场排序问题转化为机器学习领域的分类问题,并构建随机森林分类器预测航空器着陆次序;利用综合得分机制和滑动时间窗实现进场航空器动态在线排序;针对预测着陆次序建立多目标优化模型,实现着陆时间优化;采用长沙黄花机场 3 组繁忙时段的进场运行数据,验证方法的可行性。结果表明:随机森林分类器预测着陆次序与实际着陆次序高度吻合,正确率达到 99.00% 以上;相比于传统先到先服务策略,本文方法减少了平均延误时间、平均飞行时间、最大飞行时间、最大延误时间和着陆位置变动次数;相比于常规优化方法,本文方法能够在保障优化指标的基础上,将航空器着陆位置变动由 12 次降为 2 次。

关键词:航空运输;进场调度;空中交通管理;分类;优化

中图分类号:V335 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2023)06-1065-07

Arrival Scheduling Based on Classification and Optimization

DU Zhuoming, ZHANG Junfeng, YANG Chunwei

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: A new arrival scheduling method based on classification and optimization is proposed to balance the efficiency of arrival operation and working experiences of air traffic controllers (ATCOs). The arrival scheduling problem is transformed into a binary classification problem based on analyzing the operational characteristics of arrival control. A classifier based on the random forest algorithm is built to predict the landing sequence of arrival aircraft. The dynamic sequencing for arrival aircraft is achieved by using a composite scoring method and implementing a rolling time window mechanism. Furthermore, the landing times are optimized by concerning the landing sequence and optimization model. Finally, three groups of actual arrival operation data of Changsha Huanghua International Airport in rush hours are used to verify the feasibility of the proposed method. The results indicate that the random forest classifier's prediction results are close to the real landing sequence results with an accuracy of more than 99.00%. Compared with the traditional first-come-first-served heuristic, the proposed method reduces the average delay, average flight time, maximum flight time, maximum delay, and variation of the landing sequence. Compared with the conventional optimization method, the proposed method reduces the number of landing position shifts from 12 to two while not significantly decreasing arrival scheduling performance.

Key words: air transportation; arrival scheduling; air traffic management; classification; optimization

空中交通需求的持续增长为民用航空的高速发展提供了机遇,然而可用空域资源的长期受限又给空中交通管理带来了挑战。基于雷达引导的传统管制指挥方式,在高交通需求与空域资源受限情

基金项目:国家自然科学基金(U1933117);南京航空航天大学科研与实践创新计划(xcxjh20220714)。

收稿日期:2022-08-23; **修订日期:**2023-01-07

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

引用格式:杜卓铭,张军峰,杨春苇. 基于分类与优化的进场航空器调度方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(6): 1065-1071. DU Zhuoming, ZHANG Junfeng, YANG Chunwei. Arrival scheduling based on classification and optimization [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(6): 1065-1071.

况下,极易导致机场运行效率低、管制工作负荷高等问题。因此,如何优化时隙与空域资源,一直是空中交通管理领域的研究热点,而进场航空器调度是该领域的典型问题。

进场航空器调度旨在满足各类约束的前提下,面向各利益相关方秉持的不同诉求,实现跑道分配、着陆次序与时间的优化,以期达到提升跑道容量、减少航班延误、提高运行效率、缓解管制工作负荷的目的^[1]。Bennell等分别从静态^[1]和动态^[2]优化角度,研究了进场航空器调度问题。Khasiba等^[3]考虑了空管运行的不确定性,利用随机型优化策略实现进场调度优化。张军峰等^[4]采用了多目标帝国竞争算法,兼顾了机场、航司及空管对于进场调度优化的诉求。Hong等^[5]基于点合并系统(Point merge system, PMS)设计了启发式算法,解决了调度问题并提供了相应的管制建议。上述方法主要关注于模型构建和算法设计,往往忽略了实时性需求和管制经验等方面因素。

为了满足进场调度的实时性需求,两阶段优化策略,即先优化着陆次序、再优化着陆时间逐渐引起重视^[6-8]。张军峰等^[9]借鉴机器调度领域的研究成果,提出了进场航空器调度的两阶段优化策略。利用复合分派规则确定进场航空器的着陆次序,进一步采取精确算法或启发式算法实现进场调度。着陆次序的预先确定,能够有效减少决策变量的数量,从而提升调度效率。然而实际运行经验表明,完全依赖优化调度结果,不仅无法达到既定目标,反而加重管制负荷,进而产生冲突风险^[10]。因此,如何充分利用管制经验实现进场调度显得尤为必要。毕竟,进场调度系统的实际装配和现场使用中,最大的问题在于运行场景的“配置”^[11]。

本文一方面以雷达综合航迹数据为基础,考虑进场航空器运行态势,基于分类算法实现航空器着陆次序的确定;另一方面综合各利益相关方的诉求,考虑3种目标构建调度模型,优化航空器的着落时间。通过结合两阶段优化策略与数据驱动的学习算法,以期达到充分利用管制经验又全力提升运行效率的目标。

1 问题描述与建模

进场航空器调度往往根据进场航空器的状态信息更新预计着陆时间(t_j^{ETA}),从而为航空器优化着陆次序与着陆时间(t_j^{STA})。该过程需要考虑如下约束限制:(1)时间窗约束,优化着陆时间必须位于最早着陆时间(t_j^E)和最晚着陆时间(t_j^L)之间;(2)尾流间隔约束,任意两架相邻航空器(k 和 j)的

着陆间隔必须大于规定的最小安全间隔,即尾流间隔(s_{kj})。

本文基于历史数据,采用机器学习方法获得着陆次序,将获得的着陆次序作为进场调度模型的输入,求解该模型以实现着陆时间的优化,其流程示意图如图1所示。首先,构建特征,训练随机森林回归器,学习管制员的排序经验。其次,根据分类所属概率计算综合分类得分,预测新到航空器的着陆排序。最后,将着陆排序作为约束输入进场调度模型,优化得到航空器到达时间。

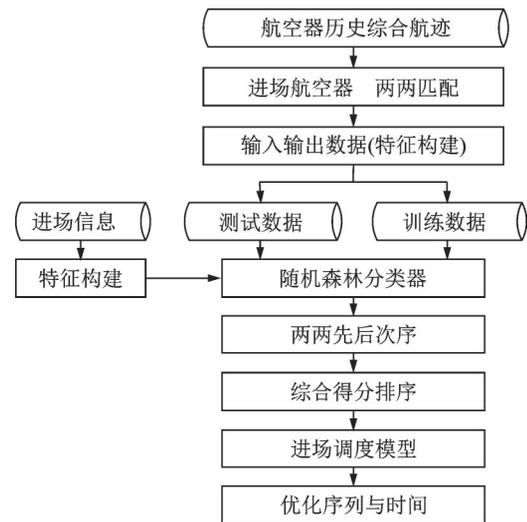


图1 进场调度流程

Fig.1 Flowchart of arrival scheduling

该方法属于进场调度的两阶段优化策略,既可以充分考虑管制员的经验,确定着陆顺序;也可以针对进场运行利益相关方的不同诉求,优化着陆时间;还可以降低进场调度优化的复杂度。进场调度模型如下列公式所示,可通过CPLEX求解。

$$\min \alpha \sum T_j + (1 - \alpha) \sum F_j \quad (1)$$

$$\text{s.t. } F_j \leq F_{\max} \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$t_j^{STA} \geq t_j^E \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$t_j^{STA} \leq t_j^L \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$t_{Seq_j+1}^{STA} \geq t_{Seq_j}^{STA} + s_{Seq_j, Seq_j+1} \quad (5)$$

$$T_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$T_j \geq t_j^{STA} - t_j^{ETA} \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$T_j \leq t_j^L - t_j^{ETA} \quad \forall j \in J \quad (8)$$

$$F_j = t_j^{STA} - a_j \quad \forall j \in J \quad (9)$$

式中: a_j 、 F_j 和 T_j 表示进场航空器在终端空域出现时刻、飞行时间和延误时间, F_{\max} 为最大飞行时间限制;式(1)与式(2)定义了进场调度的目标,最小化延误时间、飞行时间、最大飞行时间^[12];式(3)与式(4)限定了进场航空器的时间窗约束;式(5)给出

了连续着陆航空器之间的尾流间隔约束,该间隔取决于进场着陆航班的尾流等级,其着陆顺序 Seq. 通过分类算法确定;式(6~8)刻画了进场航空器的延误时间;式(9)定义了进场航空器的飞行时间。

2 基于分类的进场排序

2.1 两两对比判断

进场管制运行具有如下特点:随着时间推移,航空器从各方向进入终端空域,管制员依据航空器实时态势,根据经验对航空器进行两两排序,从而确定着陆次序。一旦确定着陆次序,随即发布指令,通过雷达引导方式实现着陆次序的保持与安全间隔的配备。因此,可以将该过程视作一个分类的过程,输入为两架进场航空器的特征信息,输出为变量“0”或“1”,分别表示某架航班后着陆或先着陆。

基于分类方法实现上述过程的核心在于分类算法的选择,以及表征航空器态势的特征构建。对于分类算法,由于随机森林的分类准确率较高且训练及测试速度快,具有较好的数据推广和泛化能力,因此本文选择随机森林作为分类算法。利用随机森林分类器,可以获得上述分类过程中,航空器所属类的概率。至于特征构建,可以保证两两航空器先后着陆判断的准确率。航空器着陆顺序涉及的因素包括^[13]:航空器当前所处位置、高度与地速。当两架航空器剩余距离相同时,管制员安排速度快或高度低的航空器优先着陆的可能性较高。综上,本文采取 4 类信息构建特征:进场航空器的经度、纬度、高度以及速度。

2.2 综合得分排序

基于两两对比判断,能够区分任意两架进场航空器着陆的先后顺序。然而判断若干架航空器的着陆次序时,难免会出现如下问题:假设 4 架进场航空器 #1、#2、#3、#4,通过两两对比判断,航空器 #1、#2 和 #3 相对于 #4,均是优先着陆,因此 #4 的排序位置为 4。前三架的对比判断结果为 #1 早于 #2

着陆,#2 早于 #3 着陆,而 #3 早于 #1 着陆,产生了矛盾。此时,难以确定最终着陆次序。于是,本文选用随机森林获得着陆次序的概率,通过引入综合得分的方式,解决上述问题。将一段时间窗内的任意航空器两两分类,获得每一架航空器在其余各航空器前着陆的概率,并求和作为其着陆综合得分,得分高的航空器得以最终优先着陆。具体过程如下所述:

首先,基于分类算法获得进场航空器两两对比的着陆次序概率 $p(j > k)$,其中 $j > k$ 表明航空器 j 较之航空器 k 先着陆,且 $p(j > k) + p(k > j) = 1$ 。然后,利用 $v^{Score}(j) = \sum_{k \in J} p(j > k)$ 计算任意一架航空器的排序得分。最后,对比该时段内航空器的排序得分,确定进场航空器的着陆次序。具体案例可参见表 1,进场航空器 #1 早于 #2、#3、#4 着陆的概率分别为 0.6、0.2、0.3,其排序得分为 1.1。

表 1 基于综合得分的着陆排序

进场航空器对 (j, k)	k				$v^{Score}(j)$	排序
	#1	#2	#3	#4		
#1	0	0.6	0.2	0.3	1.1	Seq.4
#2	0.4	0	0.3	0.9	1.6	Seq.2
#3	0.8	0.7	0	0.25	1.75	Seq.1
#4	0.7	0.1	0.75	0	1.55	Seq.3

2.3 在线动态策略

由于进场运行存在动态特性,因此需要考虑进场排序的在线动态策略。以 n 架连续进场航空器为例,其具体在线动态排序过程如下(图 2):

(1) 每个排序窗口包含 4 架航空器,每次只对滑动窗口内的 4 架航空器进行排序,给出 4 架航空器的降落次序,初始结果为进场航空器 #2 排序为 1。

(2) 当后续航空器进入终端区时,滑动窗口向后滑动一架次,继续对滑动窗口内的 4 架航空器进行排序,此时将进场航空器 #4 分配为着陆次序 2,以此类推,直至确定最后一组的着陆序列。

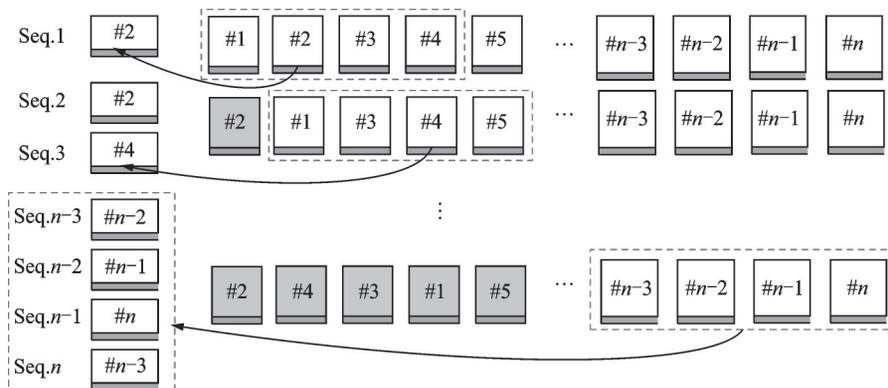


图 2 进场航空器在线动态排序示意图

Fig.2 Diagram of online dynamic sequencing for arrivals

(3) 对于最后排序的进场航空器组,滑动窗口不再后移,4架进场航空器按滑动窗口给出的次序依次着陆。

3 实例验证与结果分析

3.1 验证场景与数据准备

长沙黄花国际机场(ZGHA)进近管制空域共有5个进港点(BEM, LLC, LIG, OVT, DPR)。

由于BEM与LLC位置接近且进入进近管制区后沿相同的进场程序降落,为建模方便视为同一个进港点,记作LLC。

本文采用2019年12月长沙北向运行的航迹数据实施仿真验证。遵循数据解析、数据划分、数据清洗、信息提取、数据分割与重构输入输出空间的流程,完成数据准备的工作,具体如图3所示。

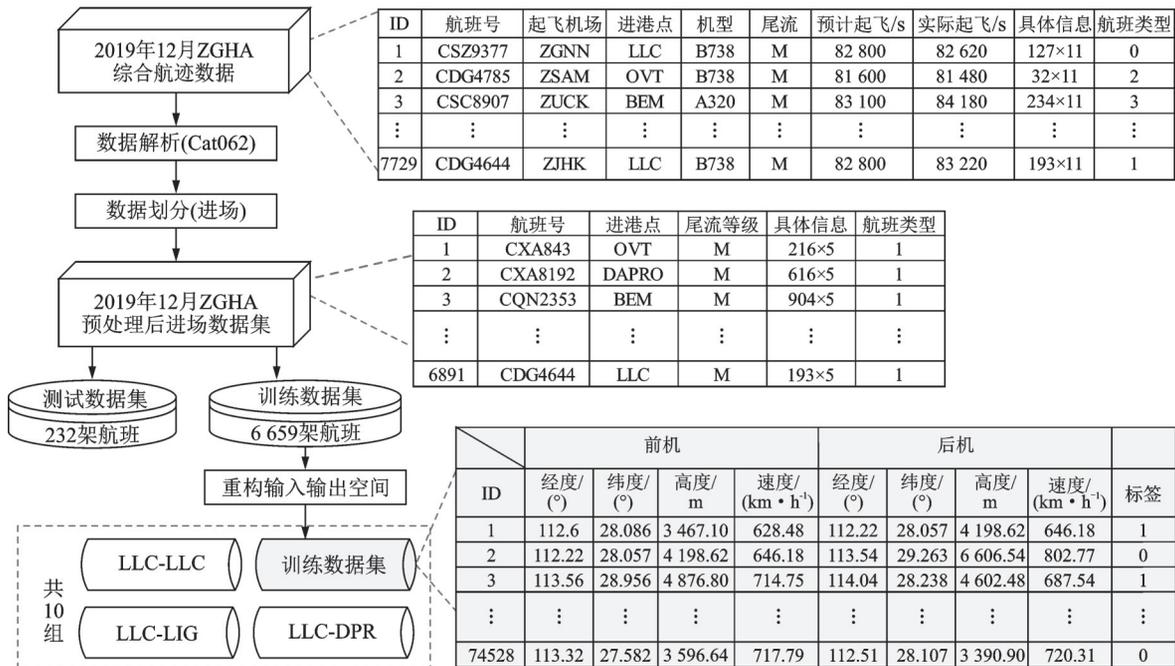


图3 数据预处理流程示意图

Fig.3 Flowchart of data preprocessing

数据解析:基于Eurocontrol 062类监控数据交换标准,解析原始数据,获得综合航迹数据。

数据划分:综合航迹数据包含雷达捕获的所有离场、进场和飞越航班信息。一方面可以通过飞行计划,另一方面可以通过高度信息,提取进场航空器的航迹数据。

数据清洗:剔除异常数据,如未捕获着陆信息、未捕获进入终端空域信息、混杂多个轨道号的数据段、校验飞行等。保留可用的北向进场数据共计6 891架次。

信息提取:数据清洗后,每条航迹包含大量与训练模型无关的冗余信息,仅保留与模型相关的信息(航班号、进港点、尾流等级、高度、速度、经纬度等)。

数据分割:利用提取的进场航空器信息,构建训练集和测试集。由于评估进场密集时段的排序效果更有实用性,因此:(1)将6 891架航班按照进场时间升序排列;(2)16架次为一组,分为430组。

重构输入输出空间:针对上述数据,提取任意时间段内每对航空器的航迹信息。然后,对于每一对,进行时间戳匹配,共收集1 383 727个成对数据,分别对应到10个不同的子模型,完成后续机器学习的数据准备。

3.2 排序结果验证

本节主要验证利用随机森林实现基于分类的排序精度(分类正确度指标),并将其与管制员操作获得的着陆序列进行对比(斯皮尔曼秩指标)。

排序精度主要考察测试集的分类正确率,测试集包含240架次进场航班,按4架次为一组,共存在60组的数据。每组内的进场航空器相继进入终端空域,其进入时间前后不超过300 s。按照不同进场点的组合,选择相应训练模型,最终分类正确率结果如表2所示。由表2可知,基于综合航迹数据使用随机森林获得的两两航空器着陆次序与实际着陆次序高度吻合,正确率均达到了99.00%以上。一方面,说明了本文选取的属性特征(经纬度、

表 2 两两航空器先后顺序分类精度
Table 2 Classification precision of any two arrival aircraft

模型	LLC-LLC	DPR-DPR	OVT-OVT	LIG-LIG	LLC-DPR
精度/%	99.35	99.68	99.85	99.35	99.78
模型	LIG-LLC	OVT-LIG	DPR-OVT	LIG-DPR	OVT-LLC
精度/%	99.85	99.24	99.92	99.90	99.71

高度和速度)以及随机森林算法能够完成两两对比判断的任务;另一方面,也从侧面验证了管制员针对进场运行的相关管制工作与着陆次序建立存在可循的规律。

上述工作完成了两两对比判断,每组 4 架航空器还需要计算综合得分(如 2.2 节所述)实现最终着陆次序的确定。假设 4 架航空器实际着陆序列为 Seq^{ATC} , 本文方法获得的着陆序列为 Seq^{RF} , 其斯皮尔曼秩为

$$\rho = 1 - \frac{6 \cdot \text{dis}(Seq^{ATC}, Seq^{RF})}{m(m^2 - 1)} \quad (10)$$

式中: $\text{dis}(Seq^{ATC}, Seq^{RF})$ 表示两类排序之间的排序距离; m 表示航空器的数量, 本文中 $m = 4$ 。斯皮尔曼秩的取值范围为 $[-1, 1]$, 1 表明两类序列完全相同, -1 表明完全相反。

60 组测试数据的平均斯皮尔曼秩为 0.95, 其中 $\rho = 1$ 的组数为 48 组; $\rho = 0.8$ 的组数为 11 组; $\rho < 0.5$ 的组数为 1 组。此时, 采用使用 2.3 节提出的在线动态策略可以解决上述问题, 按照滑动窗的方式确定整体序列, 其平均斯皮尔曼秩可达到 $\rho = 0.995 1$ 。

3.3 调度结果验证

将本文提出的基于分类的两阶段调度方法应用于实际交通场景, 分别与实际运行(先到先服务)

和不使用分类手段获取着陆排序的传统进场调度模型(直接优化)进行对比。实际场景为长沙黄花机场某 3 组繁忙时段的进场运行。

航空器最早着陆时间、预计着陆时间以及最晚着陆时间分别定义为

$$t_j^E = a_j + F_{25\%}^{Entry}, t_j^{ETA} = a_j + F_{50\%}^{Entry}, t_j^L = a_j + F_{100\%}^{Entry}$$

式中 $F_{xx\%}^{Entry}$ 表示经由不同进港点的航空器对应百分比的飞行时间, 可以基于统计分析或者采用四维航迹预测^[14]获取飞行时间, 本文通过统计分析 2019 年 12 月北向运行各进港点的进场飞行时间获得。

为了实现对比分析, 式(1)中 α 取值 0.5, 式(2)的约束限制 F_{max} 取值 1 500 s。评估 3 种方法的指标分别为: 平均延误时间($\sum T_j/n$)、平均飞行时间($\sum F_j/n$)、最大延误时间($\max T_j$)、最大飞行时间($\max F_j$)以及航空器着陆位置变动($\#P_Shift$)。其中, 航空器着陆位置变动是指优化着陆次序与实际着陆次序的对比, 计算对应位置变动的总和, 该指标衡量优化着陆序列与管制实际运行的一致性。对比分析的结果如表 3 所示, 其优化的着陆时间(Scheduled time of arrival, STA)与实际着陆时间(Actual time of arrival, ATA)的时间轴对比如图 4 所示。

表 3 不同方法下进场优化调度结果对比表
Table 3 Comparison of arrival scheduling under different methods

组别	方法	指标				
		$\sum(T_j/n)/s$	$\sum(F_j/n)/s$	$\max T_j/s$	$\max F_j/s$	$\#P_Shift$
第一组	先到先服务	122.2	1 200.8	672	1 346	8
	直接优化法	4.7	937.4	67	1 089	3
	基于分类	16.6	961.3	174	1 334	0
第二组	先到先服务	160.6	1 247.3	730	1 461	4
	直接优化法	46.9	1 060.2	267	1 380	7
	基于分类	81.1	1 088.5	435	1 380	2
第三组	先到先服务	65.6	1 155.9	273	1 247	2
	直接优化法	0	916.3	0	1 114	2
	基于分类	0	925.2	0	1 029	0

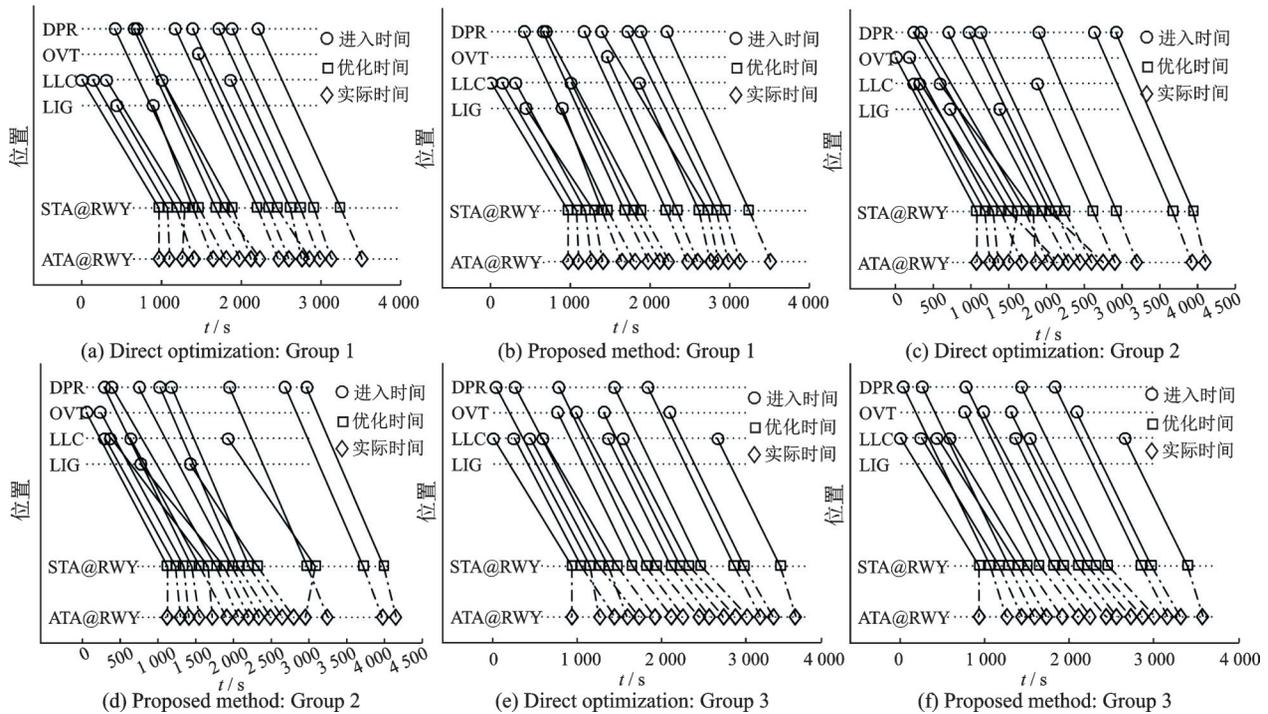


图4 优化与实际着陆时间对比示意图

Fig.4 Comparison between scheduled and actual time of arrival

结合表3和图4分析可得如下结论:

(1)传统的先到先服务策略无论是平均延误时间、平均飞行时间、最大延误时间、最大飞行时间,还是航空器着陆位置变动等指标,效果不理想。结果表明,先到先服务策略不仅无法提升进场运行效能,也不能兼顾管制员的管制习惯。

(2)基于传统优化模型,进而利用CPLEX求解工具获得的优化着陆时间,的确能够提升进场运行效能,然而上述效能优化的代价在于片面追求效能指标(优化目标),而忽视了管制员日常工作涉及的场景复杂性与态势动态性的特点(较大的航班位置变动量)。

(3)本文提出的方法不仅使得优化着陆序列更符合管制员经验,而且能够兼顾进场运行效能,从而实现优化目标和管制接受度之间的平衡。以第二组实例验证为例,与直接优化方法相比,本文提出的组合调度方法将最大延误的误差控制在3 min内,但是能够将航空器着陆位置变动从7次降为2次。

4 结 论

(1)基于雷达综合航迹、借鉴管制工作经验、采用机器学习方法、引入滑动窗机制,将进场排序问题转化为动态分类问题。相对于实际着陆次序,本文方法获得的着陆次序其平均斯皮尔曼秩可达到0.995 1。

(2)采用进场排序与调度的两阶段优化策略,可以实现进场调度的快速、多目标优化。3组实例

验证表明,本文提出的方法在保证进场效能指标的同时,能够将航空器着陆位置变动从传统优化模型的12次降为2次。

(3)本文主要解决了数据驱动的基于分类和优化的进场调度问题,未来的研究会考虑引入更为丰富的特征或尝试其他机器学习算法。

参考文献:

[1] BENNELL J A, MESGARPOUR M, POTTS C N. Airport runway scheduling[J]. Annals of Operations Research, 2013, 204(1): 204-249.

[2] BENNELL J A, MESGARPOUR M, POTTS C N. Dynamic scheduling of aircraft landings[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258(1): 315-327.

[3] KHAASSIBA A, BASTIN F, CAFIERI S, et al. Two-stage stochastic mixed-integer programming with chance constraints for extended aircraft arrival management[J]. Transportation Science, 2020, 54(4): 855-1152.

[4] 张军峰,游录宝,杨春苇,等. 基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 324439. ZHANG Junfeng, YOU Lubao, YANG Chunwei, et al. Arrival sequencing and scheduling based on multi-objective imperialist competitive algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 324439.

[5] HONG Y K, CHOI B H, LEE K J, et al. Dynamic

- robust sequencing and scheduling under uncertainty for the point merge system in terminal airspace[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 19(9): 2933-2943.
- [6] 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.
- [7] VADLAMANI S, HOSSEINI S. A novel heuristic approach for solving aircraft landing problem with single runway[J]. Journal of Air Transport Management, 2014, 40: 144-148.
- [8] ZHANG J F, ZHAO P L, YANG C W, et al. A new meta-heuristic approach for aircraft landing problem [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(2): 197-208.
- [9] 张军峰, 郑志祥, 葛腾腾. 基于复合分派规则的进场航班排序方法[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 141-150.
ZHANG Junfeng, ZHENG Zhixiang, GE Tengting. Sequencing approach of arrival aircrafts based on com-
- posite dispatching[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(3): 141-150.
- [10] JUNG S, HONG S, LEE K. A data-driven air traffic sequencing model based on pairwise preference learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(3): 803-816.
- [11] RAMANUJAM V, BALAKRISHNAN H. Data-driven modeling of the airport configuration selection process[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2015, 45(4): 490-499.
- [12] ZHANG J F, ZHAO P L, ZHANG Y, et al. Criteria selection and multi-objective optimization of aircraft landing problem[J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 82(1): 101734.
- [13] BARNHART C, BERTSIMAS D, CARAMANIS C, et al. Equitable and efficient coordination in traffic flow management[J]. Transportation Science, 2012, 46(2): 262-280.
- [14] ZHANG J F, LIU J, HU R, et al. Online four dimensional trajectory prediction method based on aircraft intent updating[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 77(1): 774-787.

(编辑: 胥橙庭)