http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0415

繁忙终端空域连续爬升与下降运行的调度优化

杜卓铭，张军峰*，归旭豪
(南京航空航天大学 民航学院，南京 210016)

摘　　要：基于现行终端空域结构，提出了一种融合航迹优化、冲突探测与多目标优化的进离场航空器调度方法，助力繁忙终端空域实施连续爬升与下降运行。基于多阶段最优控制理论，采用高斯伪谱法，提出了连续爬升与下降运行的垂直剖面优化方法，实现了基于成本指数的连续爬升与下降运行的航迹优化。依据跑道使用的尾流间隔与放行间隔、空中运行的水平与垂直间隔，采用马氏距离建立了航空器冲突探测模型。考虑空管、航司、机场等运行单位的诉求，提出了优化结果可达的进离场航空器多目标调度模型和方法。选取繁忙时段广州白云国际机场两组进离场数据，设置多种间隔参数，引入备选路径，开展实例分析与对比研究。结果表明：在离场占优的繁忙时段，广州白云国际机场终端空域能够实现繁忙时段下的连续爬升与下降运行；在进场占优的繁忙时段，出现2架航空器无法调度的情况，引入备选路径的方法可以减少无法调度航空器的数量。

关 键 词：空中交通管理；连续下降运行；航迹优化；航空器调度；多目标优化
中图分类号：V355
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2025)09-3193-10

连续爬升与下降运行作为一种新型运行理念，由于其显著的节能减排降噪特点，已在国内外诸多机场开展验证与实施。早期研究主要聚焦于垂直剖面的设计与优化[1]，以及相应节能减排降噪效果的评估[2]。结果表明，连续爬升与下降运行确实达到了节能减排降噪的效果，然而实际运行往往受限于夜间空闲时刻，无法适应繁忙时段的终端空域运行。毕竟，在繁忙时段，连续爬升与下降运行的实施无疑增加了管制员的工作负荷[3]。

为了实现连续爬升与下降运行在繁忙终端空域实施，并进一步节能减排降噪的目标，国内外诸多学者进行了不同领域的尝试。

一方面，部分学者通过设计新型的进场程序以实现繁忙终端空域内进场航空器连续下降运行。张军峰等[4]提出了多目标帝国竞争算法，研究了基于点融合系统的多目标进场排序与调度问题。Liang等[5]提出了考虑离场运行的点融合程序，研究了平行跑道进离场协同调度问题。杨磊等[6]设计了一种倒皇冠型的柔性进场路径，相较于点融合系统，柔性进场路径能够更好地融合各方向的进场交通流，增强了进场延误的吸收能力。上述新型的进场程序确实能够助力繁忙终端空域的连续下降运行，然而终端空域资源受限的现状[7]，导致了点融合系统或倒皇冠型结构难以顺利推广。

另一方面，部分学者基于现行空域结构和飞行程序，通过改变飞行路径以调整航空器到达时隙，从而提升繁忙终端空域内进场航空器连续下降运行的成功率。Sáez等[8]通过外扩终端空域与引入“延长三边”(parallel-offset)，为进场调度获得更强的冲突解脱与延误吸收能力。进一步，Sáez等[9]利用最优控制与混合整数规划，基于扩展进场管理实现繁忙机场的连续下降运行。Gui等[10]基于现行

收稿日期：2023-06-28；录用日期：2023-08-25；网络出版时间：2023-09-01 18:01
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230901.1703.005
基金项目：国家自然科学基金(52372315,U1933117)；南京航空航天大学科研与实践创新计划(xcxjh20220714)
*通信作者. E-mail：zhangjunfeng@nuaa.edu.cn

引用格式：杜卓铭，张军峰，归旭豪. 繁忙终端空域连续爬升与下降运行的调度优化[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51(9)：3193-3202. DU Z M，ZHANG J F，GUI X H. Scheduling optimization for continuous climb and descend operations in busy terminal area[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2025，51(9)：3193-3202 (in Chinese).

空域结构，使用标准进场程序，辅以“延长三边”和“进场偏离”（dog-leg）等冗余路径，达到冲突解脱与进场调度的目的。上述飞行路径改变的方式[8-10]更符合实际运行，也更容易推广，然而目前的研究并未将离场运行纳入考量，因此繁忙终端空域内同时实现连续爬升与下降运行仍然是亟待解决的关键问题。

此外，为了增强管制员对连续下降运行航空器的态势感知能力，Hong 等[11]在点融合的框架下，提出了动态鲁棒的航空器调度算法，考虑飞行时间的不确定性，最小化连续航空器额外缓冲间隔；Kamo 等[12]将气象不确定性纳入考量，构建了鲁棒的连续下降运行航空器航迹优化与调度模型；Toratani 等[13]则通过设置固定航径角，增强了管制员对繁忙空域内连续下降航空器到达时间的控制手段。

分析上述研究进展，不难发现：繁忙终端空域实现连续爬升与下降运行的核心离不开进离场航空器调度优化，而进离场调度优化研究经历了从进场[14-15]到进离场[16-17]，从静态到动态[18]，从单目标到多目标[19]，从确定性到不确定性[20]，从模型驱动到数据驱动[21]的漫长历程。对于繁忙终端空域连续爬升与下降运行调度优化问题，如何构建融合进离场航迹优化与排序调度模型是核心。

鉴于此，本文首先基于高斯伪谱法，提出了单航空器连续爬升与下降运行的航迹优化方法，实现基于成本指数的连续爬升与下降运行的垂直剖面优化。其次，提出了一种基于马氏距离（Mahalanobis distance）的四维航迹冲突探测方法，能够准确识别潜在冲突，进而构建冲突集合。接着，充分考虑空管、航司、机场等不同运行主体的诉求，设计了多种目标函数，基于冲突集合完善了约束限制，从而构建了繁忙终端空域连续爬升与下降运行调度优化模型，并提出了多目标的优化方法。最后，以广州白云国际机场的实际运行为例展开案例分析，验证了模型和方法的有效性。

1 连续爬升与下降运行调度优化方法

本文提出的繁忙终端空域连续爬升与下降运行调度优化的结构框架，如图 1 所示，主要由 3 个模块组成。

1）航迹优化模块，基于现行空域结构和飞行程序，对于进场航空器，通过采用不同成本指数（cost

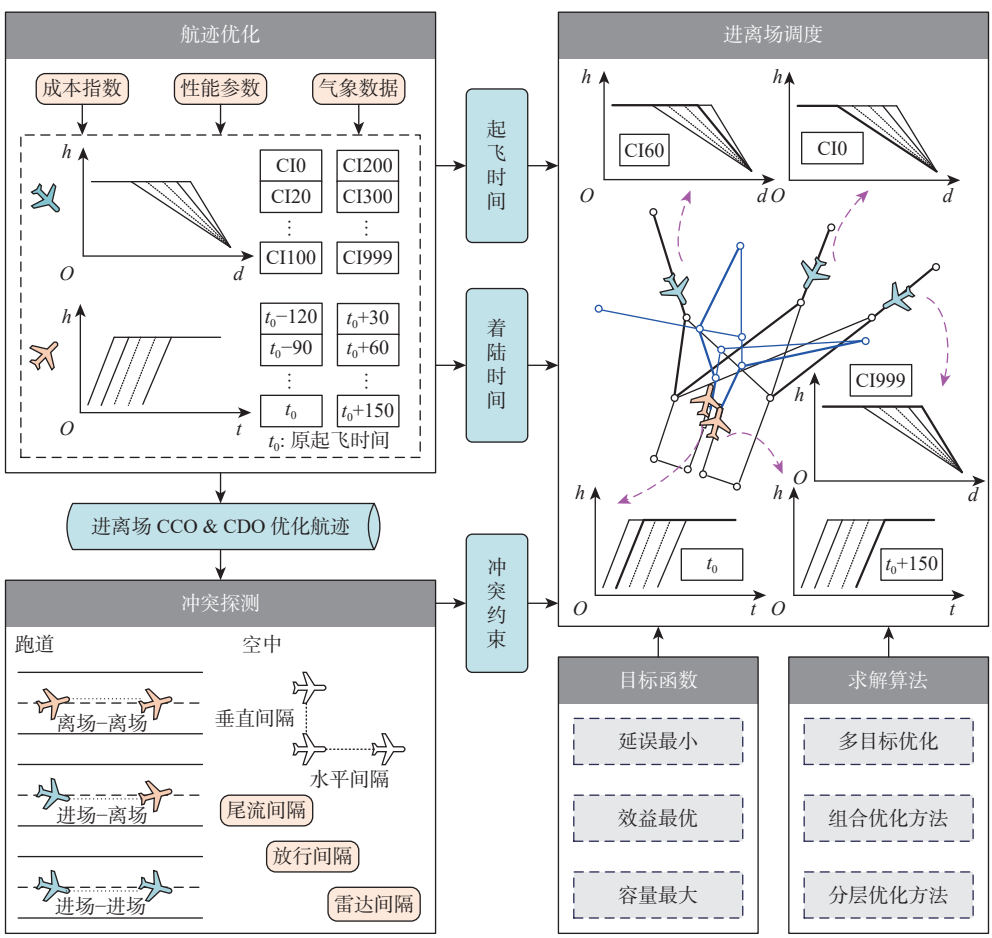


图 1 连续爬升与下降运行调度优化方法的框架示意

Fig. 1 Schematic diagram of the scheduling optimization method for the continuous climb and descent operation

index, CI), 实现航空器连续下降运行的航迹优化; 对于离场航空器, 通过采用不同离场时间, 实现航空器连续爬升运行的航迹优化。

2) 冲突探测模块, 基于进离场航空器之间在跑道和空中的间隔需求, 设计快速冲突探测算法, 识别不同航空器连续爬升与下降运行航迹间的冲突, 构建约束限制。

3) 进离场调度模块, 基于空管、航司、机场的不同诉求, 设计多目标函数, 考虑连续爬升与下降运行航迹间的冲突约束, 构建多目标进离场调度模型, 采用多目标优化算法进行求解。

本文提出的繁忙终端空域连续爬升与下降运行调度优化方法, 可以简化为: 在满足进场连续下降运行、离场连续爬升运行的前提下, 考虑终端空域运行安全间隔、跑道放行和尾流间隔等约束, 以期达到减少延误、提升效益、增强容量的目的。

2　连续爬升与下降运行调度优化模型

2.1　航迹优化模型

鉴于本文提出的方法基于现行空域结构和飞行程序, 因此航迹优化主要涉及垂直剖面的优化。连续爬升与下降运行的垂直剖面优化, 可以描述为多阶段 Bolza 型的最优控制问题:

$$\begin{cases} J=\sum_{p=1}^{N_p}\left[\Phi^{(p)}\left(\boldsymbol{x}_0^{(p)},t_0^{(p)},\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}^{(p)},t_{\mathrm{f}}^{(p)}\right)+\int_{t_0^{(p)}}^{t_{\mathrm{f}}^{(p)}}G^{(p)}\left(\boldsymbol{x}^{(p)},\boldsymbol{u}^{(p)},t\right)\mathrm{d}t\right] \\ \quad \text{s.t.}\quad \dot{\boldsymbol{x}}^{(p)}=f^{(p)}\left(\boldsymbol{x}^{(p)},\boldsymbol{u}^{(p)},t\right) \\ \quad \phi_{\min}^{(p)}\leqslant\phi^{(p)}\left(\boldsymbol{x}_0^{(p)},t_0^{(p)},\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}^{(p)},t_{\mathrm{f}}^{(p)}\right)\leqslant\phi_{\max}^{(p)} \\ \quad C_{\min}^{(p)}\leqslant C^{(p)}\left(\boldsymbol{x}^{(p)},\boldsymbol{u}^{(p)},t\right)\leqslant C_{\max}^{(p)} \\ \quad P^{(s)}\left(\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}^{(p-1)},t_{\mathrm{f}}^{(p-1)},\boldsymbol{x}_0^{(p)},t_0^{(p)}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{x}_0^{(p)}$、$t_0^{(p)}$、$\boldsymbol{x}_{\mathrm{f}}^{(p)}$、$t_{\mathrm{f}}^{(p)}$分别表示在最优控制阶段$p$的初始与终端状态变量与时间; N_p表示阶段总数; $\boldsymbol{x}^{(p)}$、$\boldsymbol{u}^{(p)}$表示阶段p关于自变量时间t的状态变量与控制变量; $\Phi^{(p)}(\cdot)$、$G^{(p)}(\cdot)$分别表示p阶段 Mayer 型与拉格朗日(Lagrangian)型指标; 式(1)中, $f^{(p)}$、$\phi^{(p)}$、$C^{(p)}$分别表示阶段p的动态、边界、路径和连接约束函数, $P^{(s)}$表示第s对左右待连接阶段的连接约束函数, 分别对应着系统的动力学微分方程、阶段始末状态、阶段过程中状态的约束。

对于连续爬升与下降运行而言, 其动态约束将影响垂直剖面优化的结果。采用下式所示的质点运动模型作为动态约束。

$$\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{TAS}}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{m}(T-D)-g\sin(\gamma) \tag{2a}$$

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}=V_{\mathrm{TAS}}\sin(\gamma) \tag{2b}$$

$$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=V_{\mathrm{TAS}}\cos(\gamma)+W_{\mathrm{h}} \tag{2c}$$

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=-f_{\mathrm{Fuel}} \tag{2d}$$

式中: T、D、m、g分别表示航空器推力、阻力、质量与重力加速度; γ表示飞行航径角; h、s、V_{TAS}分别表示航空器高度、距离与真空速; W_{h}表示风速的沿航迹分量; f_{Fuel}为燃油流量。式(2)中推力和阻力可以通过 BADA 提供的性能参数获得[22]。边界约束、路径约束分别是用于约束优化过程始末端点处和约束优化过程中的状态、控制变量, 而连接约束则用于优化过程中不同阶段状态变量的衔接。

鉴于高斯伪谱法具有结构简单、精度较高和收敛速度较快的特点, 因此本文采用高斯伪谱法求解多阶段最优控制问题(1)。具体步骤包括: 时域变换、离散化、变量逼近与问题转化[23]。如此多阶段最优控制问题则可以转化为代数约束下的非线性规划问题, 并通过软件包 SNOPT[24] 对上述非线性规划问题进行求解, 从而获得不同成本指数对应的进场连续下降运行四维航迹与不同起飞时间的离场连续爬升运行四维航迹。

2.2　冲突探测模型

获取进离场航空器所有的连续爬升与下降运行四维航迹后, 本文通过遍历起降航空器的进离场四维航迹组合, 得到航空器发生冲突的剖面组合, 作为后续进离场调度的约束限制。进离场航空器发生的冲突可以分为空域和跑道 2 个场景。

在空域中, 航空器间需满足符合中国民用航空规章规定的最小垂直和水平间隔标准。为了准确、快速识别运行中的潜在冲突, 本文使用马氏距离确定航空器空中冲突。利用马氏距离判断空中冲突, 可以很好地适应仪表着陆中航空器截取下滑道后横向间隔改变的需要[25]。

在跑道上, 航空器间隔主要依赖于多跑道的运行模式。同一跑道, 进场与进场航空器间需满足尾流间隔, 离场与离场航空器间需满足放行间隔, 进场与离场航空器间需满足尾流间隔。不同跑道, 相关平行进近与隔离平行运行需要考虑雷达间隔; 独立平行进近与独立平行离场, 本文不考虑起降航空器在跑道上的间隔, 毕竟空中的冲突探测能够弥补此类情形的潜在冲突。

2.3　进离场调度模型

2.3.1　决策变量

模型的决策变量为$x_{i,k}$,

$$x_{i,k}=\begin{cases}1 & \text{如果航空器}i\text{使用剖面}k\\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

式中: $i\in A$, A为待调度的航空器集合; $k\in P_i$, P_i为

航空器i可使用的连续下降或爬升的剖面集合。

2.3.2 目标函数

1）最小化进场平均延误。对于进场运行，其延误时间往往是空管、航司、机场等各方关注的重点指标，在满足约束条件的前提下，优化进场飞行延误，使得终端空域内进场平均延误最小，即

$$\min \frac{1}{N}\sum_{i\in A}\sum_{k\in P_i} x_{i,k}\left(t_{i,k}^{\mathrm{TTOA}}-t_i^{\mathrm{ETOA}}\right) \tag{3}$$

式中：$i\in A$、$k\in P_i$，N表示航空器集合A中的航空器数量；$t_{i,k}^{\mathrm{TTOA}}$为航空器i使用剖面k的到达跑道目标着陆时间（target time of arrival, TTOA），t_i^{ETOA}为航空器i在性能约束允许的最早到达跑道时间（earliest time of arrival, ETOA），$t_{i,k}^{\mathrm{TTOA}}-t_i^{\mathrm{ETOA}}$即为航空器$i$使用剖面$k$到达跑道所产生的延误。以往研究表明[26]，最小化进场平均延误与最小化进场交通流的最晚着陆时间等价，也即最小化该目标能够确保跑道进场容量的提升。

2）最小化平均离场偏离。对于离场运行，每架航空器在起飞前需要历经机位推出、滑行、等待排队、进入跑道等过程。本文不涉及机坪的运行优化，因此对于起飞航班，将调度后的目标起飞时间与实际起飞时间的平均偏离作为目标，即

$$\min \frac{1}{N}\sum_{i\in A}\sum_{k\in P_i} x_{i,k}\cdot\left|t_{i,k}^{\mathrm{TTOT}}-t_i^{\mathrm{ATOT}}\right| \tag{4}$$

式中：$t_{i,k}^{\mathrm{TTOT}}$为航空器i使用剖面k的目标起飞时间，$t_{i,k}^{\mathrm{ATOT}}$为航空器i的实际起飞时间（actual take off time, ATOT），$\left|t_{i,k}^{\mathrm{TTOT}}-t_i^{\mathrm{ATOT}}\right|$即为航空器$i$使用剖面$k$与实际起飞时间的偏差。

3）最小化最大进场飞行时间。前述2个目标函数可以从总体上提升终端空域内进离场运行效率，其结果往往会通过优化某一架次或某几个特定架次的起降航航班实现运行效率的提升，这显然有失公允。因此，本文引入最小化最大进场飞行时间的目标，以期保障进离场调度的公平性，即

$$\min \quad \max\left(x_{i,k}\cdot\left(t_{i,k}^{\mathrm{TTOA}}-t_i^{\mathrm{TOE}}\right)\right) \tag{5}$$

式中：t_i^{TOE}为航空器器i进入终端空域的时间（time of entry, TOE），$t_{i,k}^{\mathrm{TTOA}}-t_i^{\mathrm{TOE}}$即为航空器器$i$使用剖面$k$到达跑道的飞行时间。

2.4 多目标优化方法

本文主要探究进场航空器连续下降运行在考虑离场航空器时的调度情况，而航空器的调度往往需要同时考虑多个目标，如公平性、效率等。为使得模型求解时能够在多个目标之间进行权衡，得到更加全面的优化结果，因此，考虑对前述2.3节目标函数赋予一定的优先级和权重系数，研究在不同优先级和权重条件下的调度情况。

考虑以下3种优化方式：

1）分层优化。将多个目标函数按照优先级顺序进行优化，先优化优先级较高的目标函数，在不降低较高优先级目标函数的前提下，优化次优先目标函数。

2）组合优化。将多个目标按照一定权重系数加和，模型会自然地偏向权重较高的目标函数。

3）混合优化。在分层优化中嵌套了组合优化，即在分层优化的某一层中以组合优化方法处理多目标函数。

3 连续爬升与下降运行调度仿真验证

3.1 场景与参数

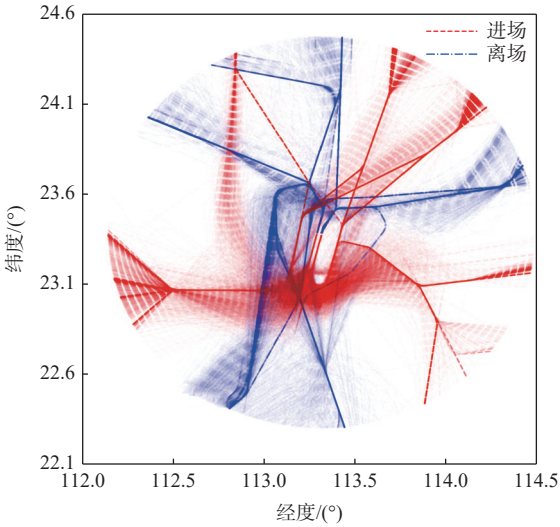
3.1.1 验证场景

以广州白云国际机场（ZGGG）为研究对象，对连续下降和爬升运行的进离场航空器进行调度。实例数据取自2019年12月3至4日某2个繁忙时段的进离场航空器雷达综合航迹数据（如图2(a)所示），包括航班号、机型、起飞机场、着陆机场、进离港点、计划起飞时间、实际起飞时间、计划着陆时间、实际着陆时间等字段。12月3日繁忙时段共80架次起降航班，其中进场36架，离场44架；12月4日繁忙时段共82架次起降航班，其中进场47架，离场35架。运行场景的进离场程序来源于广州白云国际机场的航行资料汇编（aeronautical information publication, AIP），如图2(b)所示。

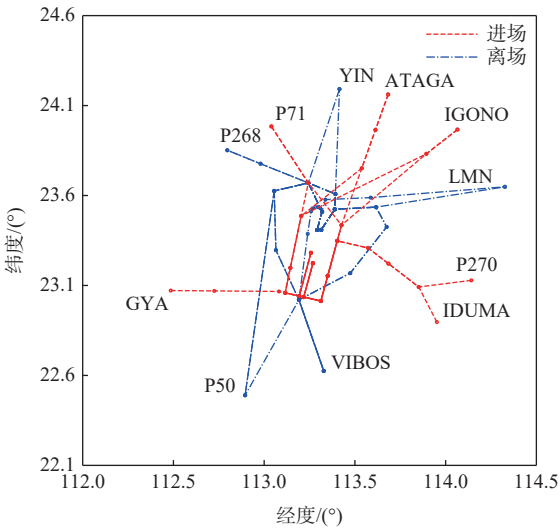
本文涉及的模型与算法应用Python 3.9编程实现，运行环境：Windows 11操作系统，八核AMD R7-5700H CPU、3.2 GHz主频和16 GB内存的微机。航迹优化部分使用的求解器为内置SNOPT的GPOPS 5.0工具箱，进离场调度部分使用的求解器为Gurobi 10.0。

3.1.2 参数设置

对于进场航空器的航迹优化，其航迹起始于以机场参考点为圆心、固定距离为半径的截取边界，终止于机场跑道。其初始状态沿用真实历史数据中的记录，即出现时间、高度、速度与历史数据一致；其终止位置为进场程序中的最后进近定位点（final approach fix, FAF），状态为高度2 000 ft、校正空速160节。鉴于航空器由FAF点至着陆跑道往往以3°下滑方式进近着陆，本文估算耗时约220 s。该参数的设置，方便推算航空器着陆时间，有助于后续进离场航空器跑道上间隔的计算。在航迹优化过程中，最小航径角的约束限制为最小−7°，以保



(a) 雷达综合航迹示意



(b) 进离场程序示意

图 2　广州白云国际机场验证场景示意

Fig. 2　Schematic diagram of ZGGG validation scenario

障所优化航迹实际可飞。

对于离场航空器的航迹优化, 其航迹起始于机场跑道, 终止于离港点。其初始状态沿用真实历史数据中的记录; 其终止高度根据离港点管制移交协议而定, 终止速度不做额外限制。起飞爬升推力需小于最大可用推力, 大于三档减推力(即 80% 最大可用推力), 具体参数由离场航空器的所属机型决定。

离场偏离时间是指航空器可以选择在实际起飞时间前后一定时间内择机起飞, 本文分别考虑以 1 min 为间隔、提前 4 min、延后 5 min 和以 0.5 min 为间隔、提前 2 min、延后 2.5 min 这 2 种离场偏离策略。如此, 2 种策略均可生成 10 个时刻作为离场备选起飞时间集合。

对于航空器间隔配备, 同样考虑 2 组参数, 具体如表 1 所示。其中, 起飞间隔配备 90 s, 着陆间隔及起降间隔配备 120 s 和 150 s; 空中间隔配备: 垂直 300 m 和 400 m, 水平 6 km 和 10 km。联合离场偏离时间, 共构建 4 组参数组合, 目的在于考察不同调配裕度和间隔裕度的进离场调度效果。

表 1　参数设置

Table 1　Parameters setting table

参数组合	离场偏离/min	跑道运行间隔			空中运行间隔	
		离场/s	进场/s	进离/s	垂直/m	水平/km
1	[−4:1:5]	90	120	120	300	6
2	[−4:1:5]	90	150	150	400*	10*
3	[−2:0.5:2.5]	90	120	120	300	6
4	[−2: 0.5:2.5]	90	150	150	400	10

注: *垂直间隔400 m与水平间隔10 km为本文仿真设置的比实际运行更严格的间隔标准。

由于本节主要验证本文方法的有效性, 因此对于间隔配备采取了简化处理。例如, 忽略航空器尾流等级对于起降运行的影响, 统一采取宽泛的间隔配备。再如, 忽略不同跑道之间起降运行的影响, 其依据在于: ①广州白云国际机场采取独立平行进近与独立平行离场的运行模式; ②后续终端空域进离场的冲突探测能够识别潜在的冲突航班。

3.2　航迹优化结果分析

以 B737-800 机型为例, 本节展示航迹优化的结果与分析, 图 3 为从终端区东北部进港点 ATAGA 进港的一架 B737-800 航班优化的最早和最晚到达的连续下降运行的垂直剖面示意, 该进港点对应 2 条距离不同的标准进场航路。

最早到达剖面(图 3(a))中, 航空器选择距离较短的进场航路, 先是等速平飞, 到达下降点后开始下降, 随后保持等校正空速(CAS)下降, 最后减速下降直至 160 kn 到达 FAF 点高度 2 000 ft。最早到达剖面(图 3(b))中, 航空器使用距离较长的进场航路进场, 到达下降点后减速下降至某一校正空速, 以该速度缓慢下降一段时间后, 再减速至 FAF 点(以满足优化的边界条件)。该示例中, 最早到达耗时 1 014 s, 最晚到达耗时 1 304 s。

图 4 是成本指数变化下, 该航空器飞行时间与燃油消耗的变化。

由图 4 可见, 成本指数在 0～200 kg/min 时, 随着成本指数的增加, 时间成本占目标函数的比重逐渐上升, 优化得出的燃油消耗逐渐增加, 飞行时间逐渐降低。当成本指数大于 200 kg/min 时, 所优化航迹已达最早到达剖面, 燃油和飞行时间不再随成本指数的增加而变化。

3.3　进离场调度结果分析

3.3.1　引入离场后的调度结果对比

本节对比仅进场调度[7-8]与进离场协同调度的结果, 数据采取 12 月 3 日繁忙时段 80 架次起降航

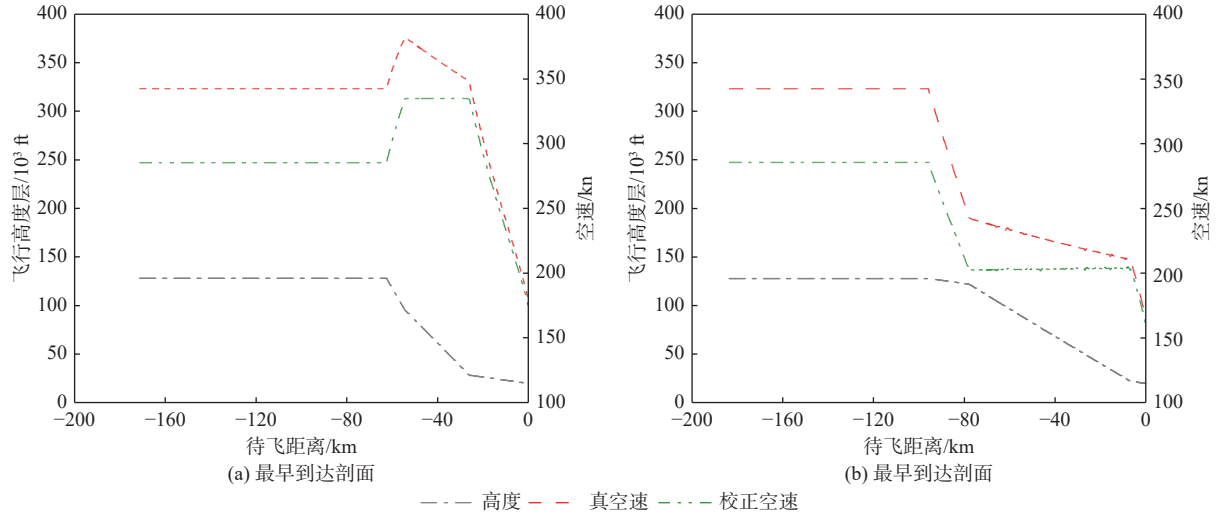


图 3 连续下降运行垂直剖面示意

Fig. 3 Diagram of the vertical profiles of CDO

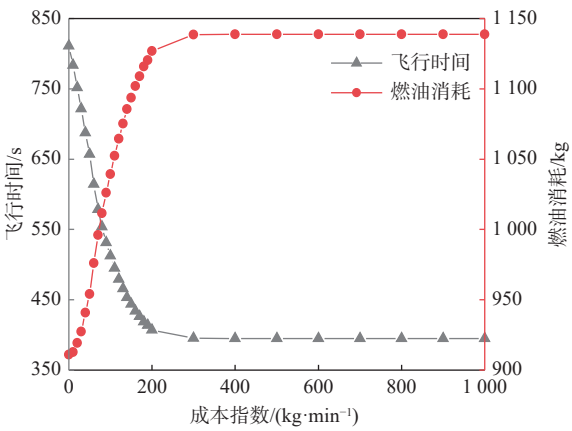


图 4 飞行时间与燃油消耗随成本指数的变化

Fig. 4 Variation of flight time and fuel consumption with different cost index

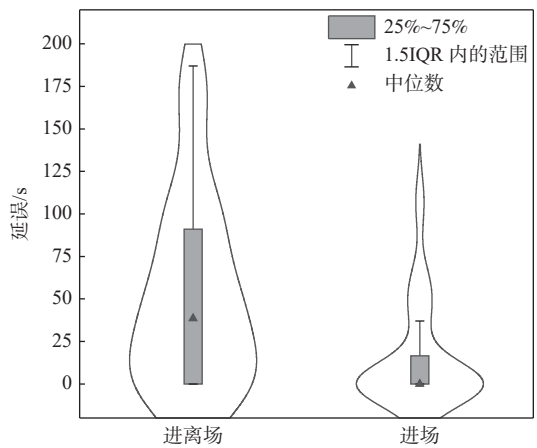


图 5 进离场调度与进场调度延误分布对比

Fig. 5 Variation of flight time and fuel consumption with different cost index

班，间隔标准采用表 1 中的参数组合 1，具体结果如表 2 所示。进一步，通过小提琴图展示进场延误分布的对比，如图 5 所示。

表 2 进场调度与进离场调度结果对比

Table 2 Arrival scheduling versus arrival and departure scheduling results s

调度类型	平均进场延误	平均离场偏离	最大飞行时间	平均飞行时间
进场	15.5		1 359.0	1 120.0
进离场	53.5	47.7	1 407.0	1 158.0

由表 2 可知，仅考虑进场调度，平均延误、最大飞行时间和进场平均飞行时间等指标都显著优于进离场协同调度的结果。其中，仅考虑进场调度的平均延误仅为 15.5 s，而考虑进离场的调度平均延误会高达 53.5 s。由图 5 可知，进离场协同调度最大延误达 187 s，而进场调度最大延误仅 114 s。因此，引入离场运行会对原有的进场调度产生较大影响，原本的进场调度为了满足离场航空器的约束做出了时间空间上的调整，导致进场飞行时间增加，进场延误提高。

实际运行中，航空器进离场运行同时发生，只将进场连续下降纳入考量，而不顾离场航空器对进场运行的影响，会使优化结果过于理想，难以客观反映现实环境中的调度表现。因此，引入离场运行，实现连续爬升与下降运行的协同调度优化，能够提升繁忙终端空域内同时实施连续爬升与下降运行的可行性。

3.3.2 不同优化方法的调度结果对比

本节考察不同优化方法如表 3 所示的调度结果的对比，数据依旧采取 12 月 3 日繁忙时段 80 架次起降航班，间隔标准采用表 1 中参数组合 1。具体结果如图 6 所示。

首先，考虑平均进场延误和与平均离场偏离的优化。a、b、c、d 这 4 种优化方法对进场延误权重

表 3　多目标优化的权重系数与优先级

Table 3　Weights & priorities of multi-objective optimization

优化方案	最小化平均进场延误式(3)		最小化平均离场偏离式(4)		最小化最大进场飞行时间式(5)	
	权重	优先级	权重	优先级	权重	优先级
a		首先		其次		
b	2.0		1.0			
c	1.0		1.0			
d	1.0		2.0			
e		其次		再次		首先
f	1.0		1.0			首先
g		再次		其次		首先
h				其次		首先

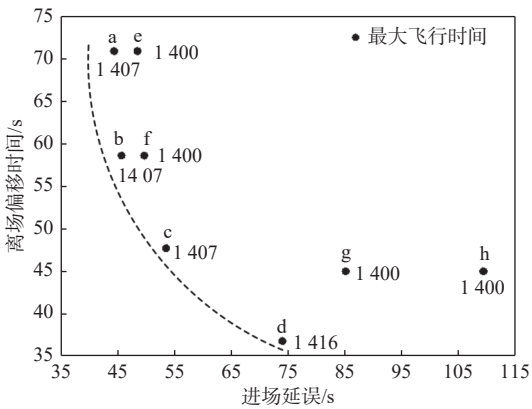


图 6　不同优化方法优化结果对比

Fig. 6　Comparison of the optimization results with

降低、离场偏离权重升高, 由图 6 可知, 这 4 种方法构成帕累托前沿, 随着二者权重和优先级的变化, 进场延误逐渐变大, 离场偏移逐渐变小。

其次, 将最大飞行时间纳入优化考量。e、f、g、h 这 4 种优化方法均优先最小化最大飞行时间, 在此基础上进行进场延误和离场偏离的优化。

由图 6 可知, 4 种方法的结果构成第二级的帕累托前沿。本案例中最小的最大飞行时间为 1 400 s, 与不考虑最大飞行时间的优化方法相比, 最大飞行时间减少 7～16 s。考察其对进场延误和离场偏离的优化情况, 可以发现, 最大飞行时间的降低往往是以更多的延误或偏离为代价的。例如, 使用方法 #e, 相较于方法 a 减少最大飞行时间(7 s), 然而会导致平均延误增加超过 4 s。该现象表明, 若降低最大飞行时间, 会造成终端空域内所有进离场航空器受到额外延误或偏离的影响。

最后, 对优化前后航空器所使用的跑道进行分析。原始数据与优化跑道分布如图 7 所示。

由图 7 可见, 2019 年 12 月 3 日的历史运行, 01 跑道作为进离场混合运行的跑道, 1 h 内共有 43 架次起降航空器。02L(仅离场)和 02R(仅进场)

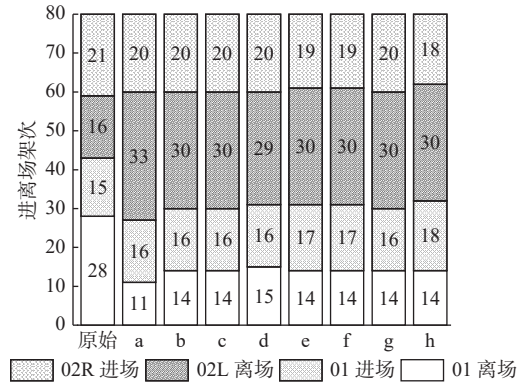


图 7　不同优化方法对应的跑道使用分布

Fig. 7　Distribution of runway use with different optimization methods

分别有 16 架次起飞和 21 架次降落。因此, 该时段的实际运行中管制员更倾向于使用 01 跑道完成航班起降运行。

本文提出的考虑连续爬升与下降运行的进离场调度模型, 在使用不同优化方法时, 跑道使用总体较为均衡。一方面, 将 01 跑道负责的离场航空器, 部分转移至负载较低的 02L 跑道, 充分利用了 02L 的跑道容量, 有利于实现连续爬升与下降运行, 进一步减少延误, 提高运行水平。另一方面, 02R 跑道在优化前后, 均保持了较为一致的着陆航空器数量, 这说明 02R 跑道的实际运行已经达到较为理想的运行状态。

3.3.3　不同间隔参数的调度结果对比

本节考察不同间隔参数(如表 1 所示)的调度结果的对比, 如表 4 所示, 数据采取 12 月 3 日繁忙时段 80 架次起降航班, 优化方法采用方案 c。

表 4　进场调度与进离场调度结果对比

Table 4　Arrival scheduling versus arrival and departure scheduling results　　s

参数组合	平均进场延误	平均离场偏离	最大飞行时间	平均飞行时间
1	53.5	47.7	1 407.0	1 158.0
2	115.6	100.9	1 512.0	1 220.1
3	65.1	27.3	1 462.0	1 169.6
4	110.9	64.1	1 512.0	1 211.3

分析表 4, 对比标准间隔(参数 1, 参数 3)和大间隔(参数 2, 参数 4)的优化结果可以发现, 空中和地面间隔的扩大, 导致进离场调度各项指标的降低。

对比疏(参数 1, 参数 2)密(参数 3, 参数 4)起飞偏移时间的优化结果可以发现, 离场偏移窗口的压缩和偏移间隔的缩小, 可以使得离场航空器找到更优的起飞时间, 即平均离场偏移时间更短。因为离场可选时间更密集, 离场航空器前后

调节的阶跃就越小，离场时间变化更平滑，有利于减少对进场航空器的影响，进而减少因为离场偏移间隔过大而导致的时间窗浪费。然而，进场延误随离场偏离参数的改变并不固定，较密的偏移可能会使进场延误增加。究其根本，在于进离场偏离与延误同权重优化，当离场时隙参数的改变使得离场偏离能够为相应目标函数带去更多的提升时，模型会通过增加进场延误来达到整体优化。对于造成进场变差的情况，可以考虑赋予进场更高的优先级或权重解决。

3.3.4 路径变化的调度结果对比

前述分析结果表明，本文提出的面向连续爬升与下降运行的进离场调度模型均能在标准进离场程序下完成优化调度，本节选取更为繁忙时段（12月4日，82架次起降航班，其中进场47架，离场35架），考察标准进离场程序下无法完成连续运行调度的解决方法及其效果。具体结果如表5所示，其中优化方法选择方案c。

表5 路径变化的进场调度与进离场调度结果对比

Table 5 Arrival scheduling versus arrival and departure scheduling results under the change of arrival routes

参数组合	进场路径	平均进场延误/s	平均离场偏离/s	最大飞行时间/s	平均飞行时间/s	无法调度/架
1	STAR	66.8	21.8	1 512.0	1 200.9	2
2	STAR	67.7	40.0	1 444.0	1 203.9	7
1	GYA-DL	86.3	21.8	1 549.0	1 223.9	0
2	GYA-DL	112.6	36.4	1 602.0	1 241.5	5
2	GYA-DL IDUMA-SC	117.3	36.4	1 602.0	1 241.5	5

由表5可知，采用标准进离场程序，针对更为繁忙时段的数据，基于标准间隔（参数1）与大间隔（参数2），均无法实现连续爬升与下降运行的进离场调度。具体而言，标准间隔下2架（GYA）航空器无法调度，大间隔下7架（来自GYA、IGONO、IDUMA）航空器无法调度。与此同时，随着间隔的加大，调度优化的指标也相应下降。鉴于此，为GYA进场程序设计一条进场偏离路径（dog-leg, DL），为IDUMA进场程序设计一条直飞路径（short-cut, SC），考察路径变化下的进离场调度优化结果，具体路径如图8所示。

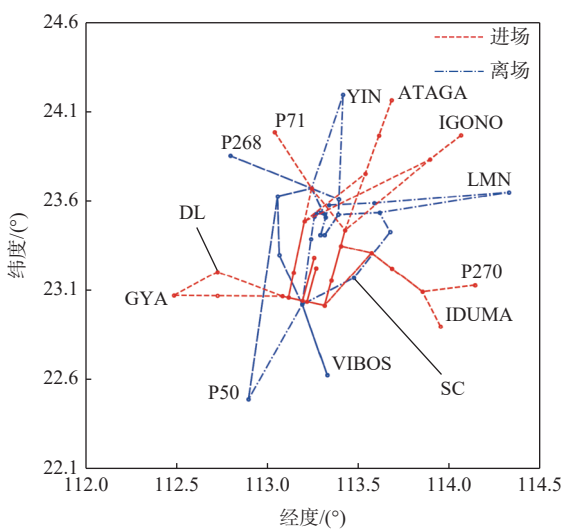


图8 进场路径设计示意

Fig. 8 Diagram of the arrival routes design

由表5可知，在标准进离场程序的基础上新增GYA的进场偏离路径，针对更为繁忙时段的数据，基于标准间隔（参数1），可以实现连续爬升与下降运行的进离场调度。当然，不可避免地会导致调度优化指标的下降。进一步，修改标准间隔（参数1）为大间隔（参数2），此时将会出现5架进场航空器无法调度。究其原因，GYA方向的进场偏离路径在大间隔下，只能解决机场西侧航空器调度问题，而对于东侧（IDUMA、IGONO）并没有帮助。

此外，本节引入IDUMA方向的直飞路径。由表5可知，并不能进一步降低无法调度的航空器数量，反而使得进场延误进一步恶化。这是因为本文对于进场延误的定义是实际到达时间减去最早到达时间，直飞路径的加入使得最早到达时间进一步提前，而由于空域十分繁忙，调度模型无法为

航空器安排更早的到达时间，航空器实际到达时间几乎未发生变化，因而使得延误有所提升。因此，对于解决无法调度的进场航空器，需要更多考虑“延长三边”和“进场偏离”等，而非允许航空器以捷径更快着陆。

4 结 论

1）融合航迹优化、冲突探测与进离场调度，构建了面向繁忙终端空域连续爬升与下降运行的调度优化模型。此外，以最小化进场平均延误、平均离场偏离、最大进场飞行时间为目标，同时满足了空管、航司、机场以及民众的不同诉求。

2）与仅考虑连续下降运行的进场调度相比，同时考虑连续爬升与下降运行的进离场调度的进场延误和飞行时间将会增大，表明连续爬升与下降运

行的进离场调度会相互影响, 本文方法更贴近繁忙终端空域的实际运行。

3) 多目标优化的权重选择可以得出不同偏好的调度结果。赋予进场延误较大的权重, 调度模型可以获得较低的进场延误; 赋予离场偏离时间较大的权重, 则可以获得较低的离场偏离时间。实际运行过程中可以根据具体的进离场交通需求进行权重设置。

4) 现行标准进离场程序难以满足特别繁忙时段下的进离场连续爬升与下降运行的实施, 通过增加进场备选路径(如“延长三边”“进场偏离”“直飞”等), 能够有助于连续爬升与下降运行在繁忙终端空域的实施。

5) 本文主要解决了单机场繁忙终端空域连续爬升与下降运行的调度优化, 未来的研究会扩展到多机场繁忙终端空域的运行场景。

参考文献（References）

[1] LIU J, ZHANG J F, DAI X M, et al. Research on trajectory generation and optimization in continuous descent operations[C]//Proceedings of the 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. AIAA, 2018: 2018-3986.

[2] JIN L, CAO Y, SUN D F. Investigation of potential fuel savings due to continuous-descent approach[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(3): 807-816.

[3] DALMAU R. Optimal trajectory management for aircraft descent operations subject to time constraints[D]. Barcelona: Technical University of Catalonia, 2019: 5-6.

[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(6): 324439.
ZHANG J F, YOU L B, YANG C W, et al. Arrival sequencing and scheduling based on multi-objective Imperialist competitive algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 324439(in Chinese).

[5] LIANG M, DELAHAYE D, MARECHAL P. Conflict-free arrival and departure trajectory planning for parallel runway with advanced point-merge system[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 207-227.

[6] 杨磊, 李文博, 刘芳子, 等. 柔性空域结构下连续下降航迹多目标优化[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 324157.
YANG L, LI W B, LIU F Z, et al. Multi-objective optimization of continuous descending trajectories in flexible airspace[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 324157(in Chinese).

[7] HU R, FENG H L, WITLOX F, et al. Airport capacity constraints and air traffic demand in China[J]. Journal of Air Transport Management, 2022, 103: 102251.

[8] SÁEZ R, PRATS X, POLISHCHUK T, et al. Traffic synchronization in terminal airspace to enable continuous descent operations in trombone sequencing and merging procedures: An implementation study for Frankfurt airport[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 121: 102875.

[9] SÁEZ R, POLISHCHUK T, SCHMIDT C, et al. Automated sequencing and merging with dynamic aircraft arrival routes and speed management for continuous descent operations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 103402.

[10] GUI D D, LE M L, HUANG Z C, et al. Optimal aircraft arrival scheduling with continuous descent operations in busy terminal maneuvering areas[J]. Journal of Air Transport Management, 2023, 107: 102344.

[11] HONG Y, CHOI B, LEE K, et al. Dynamic robust sequencing and scheduling under uncertainty for the point merge system in terminal airspace[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(9): 2933-2943.

[12] KAMO S, ROSENOW J, FRICKE H, et al. Robust optimization integrating aircraft trajectory and sequence under weather forecast uncertainty[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 152: 104187.

[13] TORATANI D, WICKRAMASINGHE N K, WESTPHAL J, et al. Feasibility study on applying continuous descent operations in congested airspace with speed control functionality: fixed flight-path angle descent[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 107: 106236.

[14] LIEDER A, BRISKORN D, STOLLETZ R. A dynamic programming approach for the aircraft landing problem with aircraft classes[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 243(1): 61-69.

[15] 张军峰, 游录宝, 周铭, 等. 基于点融合系统的多目标进场排序与调度[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(1): 66-73.
ZHANG J F, YOU L B, ZHOU M, et al. Multi-objective arrival sequencing and scheduling based on point merge system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(1): 66-73(in Chinese).

[16] BENNELL J A, MESGARPOUR M, POTTS C N. Airport runway scheduling[J]. Annals of Operations Research, 2013, 204(1): 249-270.

[17] IKLI S, MANCEL C, MONGEAU M, et al. The aircraft runway scheduling problem: a survey[J]. Computers & Operations Research, 2021, 132: 105336.

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

[19] SAMÀ M, D'ARIANO A, D'ARIANO P, et al. Scheduling models for optimal aircraft traffic control at busy airports: tardiness, priorities, equity and violations considerations[J]. Omega, 2017, 67: 81-98.

[20] YANG Y C, GAO Z C, HE C. Stochastic terminal flight arrival and departure scheduling problem under performance-based navigation environment[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 119: 102735.

[21] DU Z M, ZHANG J F, KANG B. A data-driven method for arrival sequencing and scheduling problem[J]. Aerospace, 2023, 10(1): 62.

[22] 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: 774-787.

[23] RAO A V, BENSON D A, DARBY C, et al. Algorithm 902: GPOPS, a MATLAB software for solving multiple-phase optimal

control problems using the Gauss Pseudo-spectral method[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2010, 37(2): 1-39.

[24] GILL P E, WONG E, MURRAY W, et al. User's guide for SNOPT version 7.5: software for large-scale nonlinear programming[R]. San Diego: University of California, 2015.

[25] GUI X H, ZHANG J F, TANG X M, et al. A data-driven trajectory optimization framework for terminal maneuvering area operations[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 131(1): 108010.

[26] 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: 101734.

Scheduling optimization for continuous climb and descend operations in busy terminal area

DU Zhuoming，ZHANG Junfeng*，GUI Xuhao

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

Abstract：Based on the current terminal airspace structure, a novel scheduling method for arrival and departure aircraft based on trajectory optimization, conflict detection, and multi-objective optimization is proposed to assist in continuous climb and descent operations in busy terminal airspace. Firstly, a vertical profile optimization method for continuous climb and descent operations is proposed based on multi-stage optimal control theory and the Gaussian pseudo-spectral method, achieving trajectory optimization for continuous climb and descent operations by cost index. Secondly, according to the wake separation and clearance separation used by the runway operations and the horizontal and vertical separation of air operations, an aircraft conflict detection model is established using Mahalanobis distance. Subsequently, considering the demands of operational units such as air traffic control, airlines, and airports, a multi-objective scheduling model and method with achievable optimization results were proposed for arrival and departure aircraft. Finally, two sets of arrival and departure data from Guangzhou Baiyun Airport during peak hours were selected, multiple interval parameters were set, alternative paths were designed, and case analysis and comparative research were conducted. The results indicate that during peak departure hours, the terminal airspace of Guangzhou Baiyun Airport can achieve continuous climb and descent operations during peak hours. Furthermore, during peak arrival hours, two aircraft cannot be scheduled. Introducing alternative paths can reduce the number of aircraft that cannot be scheduled.

Keywords：air traffic management; continuous descent operation; trajectory optimization; aircraft scheduling; multi-objective optimization

Received：2023-06-28；**Accepted**：2023-08-25；**Published Online**：2023-09-01 18：01

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230901.1703.005

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (52372315, U1933117); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of NUAA (xcxjh20220714)

* **Corresponding author**. E-mail：zhangjunfeng@nuaa.edu.cn