

考虑滑行冲突情形的进离港航班滑行路径优化

杨玉蓉, 吴永强

(中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 针对航班在机场飞行区滑行路径的优化问题,通过按照机场实际布局绘制飞行区网络图,将典型滑行冲突问题简化为节点与路段冲突问题,建立以最小化进离港航班滑行距离为目标的模型,采用遗传算法求解该问题。以南通兴东机场为例进行算例分析,验证模型的有效性,该模型为航班滑行路径优化问题提供了一种可行办法。

关键词: 路径优化; 滑行冲突; 遗传算法

中图分类号: V355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)24-0260-05

在机场飞行区内三大运行系统中,滑行道系统作为主要运行资源之一,连接着停机位系统和跑道系统,在机场运行调度中起到关键作用。国内外许多学者对滑行路径优化做出了很多研究。Zhang^[1]提出一种基于时间的滑行轨迹在线速度曲线生成方法,该方法根据滑行节点的到达时间要求,对每个节点进行速度剖面建模,但是在模型建立中没有加入安全时间间隔约束,使得模型可行解在实际应用中有偏差。Ludovica等^[2]提出把在滑行路段上的等待时间调整至在停机位等待,建立总延误时间和污染物排放最小化的优化模型,不仅提高机场场面安全性还达到排放最少的目标,但是在停机位的等待时间大大加重了机位负担,并且不能一定保证航班在滑行路径上无冲突情形的发生。Ma等^[3]通过优化航班滑行速度、到达和起飞时间以及跑道分配,采用自适应模拟退火算法解决航班滑行拥堵问题,为机场管制员提供决策支持。Michal等^[4]在建立的飞行区节点-边网络图上,为每条边设置了滑行时间、燃料消耗等不同的权重值,采用枚举法求解多目标问题,在飞机序列固定的情况下,为航班找到一组具有代表性的最优解或次优解。Li等^[5]考虑了滑行距离,转弯次数和滑行冲突,建立总滑行时间最短的优化模型,分析航空器发动机排放的污染物种类,计算在不同滑行方式下的油耗和排放模型,与传统优化方法相比具有更高的实际应用价值。邢志伟等^[6]以可变滑行时间为指标,建立场面

的网络模型,利用蒙特卡洛算法得出结果,减少离港航班的等待时间。李斌和谢春生^[7]针对龙嘉机场的冲突点进行分析,结合机场的航班时刻,建立模型,从而得到较少的滑行冲突点,以此达到减少航空器在滑行路径上的等待时间的目的。赵天宇等^[8]针对航班滑行路径选择问题,考虑了航班在滑行过程中的冲突和延误问题,以及在滑行过程中产生的油耗问题,通过建立相关仿真模型进行案例分析,该方法可以有效减少滑行时间和滑行油耗。姜雨等^[9]建立以所有航空器的滑行距离最短为目标的模型,采用双层规划法对模型进行求解,并将优化的结果与先到先服务的结果进行比较,从而验证算法的有效性。张兆宁和王彤^[10]对航班着陆之后的情况进行分析,发现航班选择不同的出口滑行道所得到的滑行路径不同,建立滑行路径优化模型,并通过遗传算法进行求解,得到进港航班占用跑道时间和航空器的场面滑行时间均有减少,从而验证算法的有效性。徐磊^[11]在规划航班滑行路径时,采用了先到先服务原则和更改路径两种冲突解决方法,建立以滑行时间最小的优化目标模型,并采用A*^①算法求得最优滑行路径。何庶等^[12]建立以航班加权滑行时间和等待时间最短的优化目标,通过在传统的遗传算法上设计双链染色体,并将其与蚁群算法进行对比,该改进算法可以同时滑行路径和优先级进行优化。吴闯洋等^[13]基于机场实际运行的滑行路径,提出多目标涟漪扩

收稿日期: 2024-07-20

作者简介: 杨玉蓉(2000—),女,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为民航交通运输;通信作者吴永强(1987—),男,四川峨眉人,博士,副教授,研究方向为民航运输管理。

^①A*算法(A-star)是一种基于启发式的图搜索算法,基本思想是设定一个合适的启发函数,在网络图中通过计算各个扩展节点的估计值,选择开放列表中估计值最小的节点作为下一个节点,直到下一个节点是目标节点。

散算法来优化航班的滑行路径,并将机场监视系统采集的真实路径集合与算法所得路径集合进行对比分析,得出优化后的路径能节约滑行时间。侯冲等^[14]针对双流机场的航班滑行路径进行分析,采用 Floyd 算法进行求解,并利用 SIMMOD 仿真软件进行分析对比。使得模型更具现实性。祁欣月等^[15]考虑燃料排放量在内的滑行路径规划问题,通过加权的方式进行冲突解脱,为航班寻得最短的滑行路径。

截至目前,尽管大量学者针对机场航班滑行路径优化问题取得了一定的成果,但先前的研究大部分只考虑了滑行道系统,鲜有将停机位系统和跑道系统考虑在内,并且针对航班在滑行路径上会发生的滑行冲突考虑的过于复杂化。

因此综合以上问题,本文提出以下内容。

(1)建立机场飞行区网络图,从机场的实际出发,考虑停机位系统、滑行道系统和跑道系统,并且将机位等待节点包含在内,使模型更贴合实际,从根本上解决问题。

(2)将典型的三类滑行冲突(交叉点冲突、追尾冲突、对头冲突)简化为两类冲突,以此避免模型复杂化。

(3)以进离港航班的总滑行路径距离最短为目标建立机场飞行区滑行路径优化模型,并采用遗传算法求解。

1 进离港航班滑行路径优化模型

1.1 问题描述

机场航班实际的地面运行调度分为离港航班调度和进港航班调度。进港航班的滑行过程是指航班接收到塔台管制员允许降落跑道的指令后,降落至指定跑道并从快速出口滑出至滑行道,此时调度指挥由塔台管制员变更为地面管制人员,由管制人员引导滑行至相应的停机位;离港航班的滑行过

程则是机长在停机位接到管制人员允许推出的许可后,由牵引车推至滑行等待点,并等待管制员下达滑行命令,按照规划路线滑至跑道入口等待起飞,随后按照塔台管制员的指令在跑道上加速滑跑起飞。因此进港航班的滑行时间定义为飞机从跑道脱离后开始滑行直至到达停机位的时间差。相对地,离港航班的滑行时间则是指飞机从停机位推出开始滑行到跑道入口的时间差。

进离港航班在滑行过程中不可避免的会发生冲突情况。在这里将滑行冲突分为节点冲突和路段冲突。①节点冲突:两个航班都需经过同一节点;②路段冲突:两个航班先后经过同一路段或者在同一路段迎面相遇。

1.2 模型假设

(1)假设不考虑空域和终端区对飞行区内航班运行的影响;

(2)假设不考虑航班滑行过程中的动态环境及突发情况的影响;

(3)假设航班在地面上的滑行速度为定值,设定速度 $v_k = 8 \text{ m/s}$;

(4)假设进场航班到达时间即为开始滑行时间;

(5)假设所有进离港航班运行正常;

(6)假设已知航班的滑行起点和终点。

1.3 模型构建

飞行区网络图可以用有向图 $G=(V,E)$ 来表示。其中, V 为所有节点的集合, E 为各节点之间的有向边集合。将机场飞行区网络中的节点可分为跑道节点、滑行道节点、停机位节点和滑行等待节点 4 部分。每一条有向边的权重由连接的两个节点间的距离决定。根据南通机场卫星图并用 CAD 软件绘制的网络节点如图 1 所示。

(1)模型中用到的符号说明如下。 F 为研究时段内所有进离港航班集合; F^a 为进港航班集合; F^d

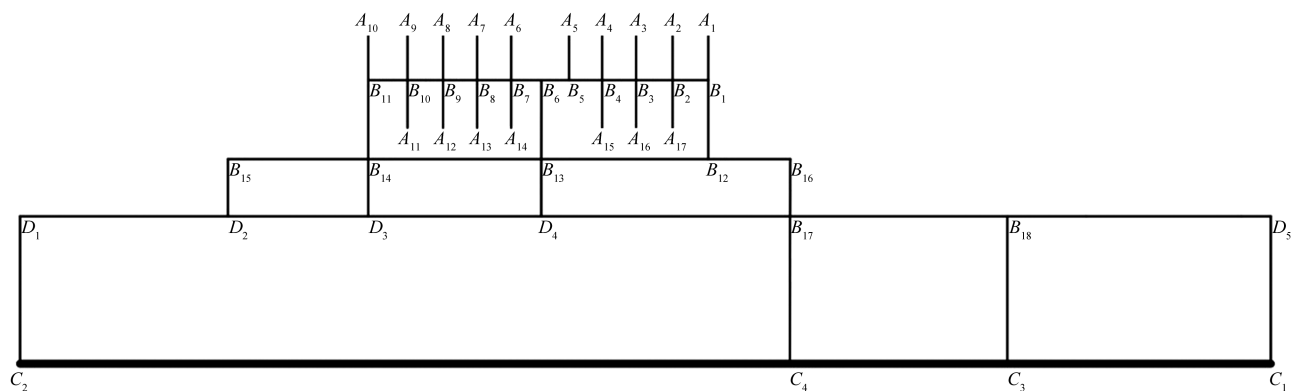


图 1 南通机场飞行区交通网络

为离港航班集合; N 为飞行区网络图中所有的节点; N_A 为停机位节点; N_B 为滑行道节点; N_C 为跑道出入口节点; N_D 为滑行等待节点。

(2)参数。 d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的距离, m ; t_{ij} 为从节点 i 滑行到节点 j 所需的时间, s ; T_{ik} 为航班 k 滑行到节点 i 的时刻, s ; Δt 为最小的安全滑行时间间隔, s ; W_{ik} 为航班 k 在节点 i 处的等待时间; $x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{航班 } k \text{ 从节点 } i \text{ 滑行到节点 } j; \\ 0, & \text{否则。} \end{cases}$

(3)目标函数为

$$\min Z = \sum_k \sum_i \sum_j x_{ijk} d_{ij} \quad (1)$$

(4)约束条件:

$$\begin{cases} x_{ijk} = 0, \forall k \in F \\ \forall i, j \in N, i \neq j, (i, j) \notin E \\ T_{i_{k_0}, k} = t_{i_{k_0}, k}, \forall k \in F \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{i_{k_0}, j, k} - \sum_{j \in N} x_{j, i_{k_0}, k} = 1, \forall k \in F \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{u \in N} x_{uik} = 0, \forall k \in F \\ \forall i \in N_B \cap N_D \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{i_{k_1}, jk} - \sum_{j \in N} x_{j, i_{k_1}, k} = -1, \forall k \in F \quad (5)$$

$$\begin{cases} T_{ik} T_{ih} (T_{ik} - \Delta t - T_{ih}) (T_{ik} + \Delta t - T_{ih}) \geq 0, \\ \forall k, h \in F, k \neq h \\ \forall i \in N_B \cap N_D \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} (T_{ik} + W_{ik} - T_{ih}) (T_{jh} + W_{jh} - T_{jk}) < \\ M(2 - x_{ijk} - x_{jih}), \forall k, h \in F \\ \forall i, j \in N_B \cap N_D \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} W_{ik} \geq 0 \quad \forall k, h \in F \\ \forall i \in N_D \end{cases} \quad (8)$$

式(1)为所有航班滑行的总距离最短;式(2)为保证每个航班有一条可滑行的物理路径;式(3)为初始化每个航班的开始滑行时间,其中 i_{k_0} 为航班的滑行起点;式(4)为航班在出发点的流出为1,流入为0;式(5)为保证航班在滑行路径上的流入流出平衡;式(6)为航班在终点的流出为0,流入为1,其中 i_{k_1} 为航班的滑行终点;式(7)为避免航班发生节点冲突,即航班 k 和航班 h 在节点 i 处发生冲突,在假设航班滑行速度相同的情况下,保证航班 h 不会在航班 k 在节点 i 处所占用的时间段内到达节点 i 即可;式(8)为避免航班发生路段冲突,即当航班 k 和航班 h 有共同路段 (i, j) , 航班 h 到达节点 i 的时间要早于航班 k 离开节点 i 的时间或者航班 h 离开节点 j 的要晚于航班 k 到达节点 j 的时间;式(9)为任意航班只能在滑行道等待节点等待,其余节点处不可停留。

2 遗传算法设计

2.1 种群初始化计算

采用随机生成种群。

2.2 适应度计算

将式(1)目标函数作为适应度函数,目标函数值越小,适应度越高,并根据适应度大小进行排序,将当前种群记为父代。

2.3 选择操作

选择操作是遗传算法中提升种群整体适应度的关键步骤,它能有效挑选出表现较好的个体。因此轮盘赌选择方法是最为合适的选择方式,它优先选择适应度较高的个体,同时适应度低的个体仍有机会被选择,从而保持了种群的多样性。

2.4 交叉选择

采用双切点交叉方法,通过在配对个体的编码串上随机选定两个点作为交叉点,实现基因的部分交换。双切点交叉的操作步骤如下:首先,为两个配对的个体随机确定两个交叉点;接着,交换这两个交叉点之间的染色体片段,该方法有助于在遗传算法中引入多样性,提高解的质量。

2.5 变异操作

变异在遗传算法中起到重要作用,变异过程是指替换个体染色体上某些基因座上的基因值为其他可能的等位基因,从而形成新的个体。并且通过与选择和交叉算子的结合使用,变异能够弥补选择和交叉过程中可能导致的信息丢失,确保遗传算法的有效性。

3 算例分析

以南通兴东机场的飞行区滑行系统为例,南通兴东机场为4E级民用国际机场,也是上海国际航空枢纽辅助机场,该机场跑道长3400 m,航站楼T3承揽了国内与国际所有航班。目前正在使用的停机位有34个,滑行等待点位有5个。由于南通机场的进离港航班机型均为中型机,因此统一设定最小安全间隔时间为20 s。遗传算法中的参数取值:最大迭代次数500,种群大小为100,交叉概率 P_c 为0.85,变异概率 P_m 为0.005。

本文选取2024年5月南通机场某天10:00—12:00时段内航班数据进行计算,航班时刻如表1所示。

仅考虑机场运行规则,不考虑滑行冲突情形,为航班时刻表中的进离港航班规划滑行距离最短的滑行路径如表2所示,进离港航班总滑行距离为25160 m。

表 1 航班时刻

序号	航班号	航班类型	开始滑行时间	起点	终点
1	MF8829	D	10:20:00	A ₃	C ₂
2	CA1900	D	10:35:00	A ₂	C ₂
3	ZH8672	A	10:35:00	C ₂	A ₇
4	ZH9731	A	10:50:00	C ₂	A ₅
5	CA2601	A	11:10:00	C ₁	A ₃
6	ZH9626	A	11:20:00	C ₂	A ₆
7	ZH8652	A	11:25:00	C ₁	A ₁₂
8	DZ6237	A	11:35:00	C ₁	A ₈
9	ZH9259	A	11:40:00	C ₁	A ₂
10	NS8006	D	11:45:00	A ₄	C ₁
11	CA2602	D	12:00:00	A ₃	C ₁
12	ZH9921	A	12:00:00	C ₁	A ₇

表 2 不考虑冲突情形的滑行路径

航班	路径
MF8829	A ₃ →B ₃ →B ₄ →B ₅ →B ₆ →B ₁₃ →B ₁₄ →B ₁₅ →D ₂ →D ₁ →C ₂
CA1900	A ₂ →B ₂ →B ₃ →B ₄ →B ₅ →B ₆ →B ₇ →B ₈ →B ₉ →B ₁₀ →B ₁₁ →B ₁₄ →B ₁₅ →D ₂ →D ₁ →C ₂
ZH8672	C ₂ →D ₁ →D ₂ →B ₁₅ →B ₁₄ →B ₁₁ →B ₁₀ →B ₉ →B ₈ →A ₇
ZH9731	C ₂ →D ₁ →D ₂ →B ₁₅ →B ₁₄ →B ₁₁ →B ₁₀ →B ₉ →B ₈ →B ₇ → B ₆ →B ₅ →A ₅
CA2601	C ₁ →D ₅ →B ₁₈ →B ₁₇ →B ₁₆ →B ₁₂ →B ₁ →B ₂ →B ₃ →A ₃
ZH9626	C ₂ →D ₁ →D ₂ →D ₃ →B ₁₄ →B ₁₁ →B ₁₀ →B ₉ →B ₈ →B ₇ →A ₆
ZH8652	C ₁ →D ₅ →B ₁₈ →B ₁₇ →B ₁₆ →B ₁₂ →B ₁₃ →B ₆ →B ₇ →B ₈ → B ₉ →A ₁₂
DZ6237	C ₁ →D ₅ →B ₁₈ →B ₁₇ →D ₄ →B ₁₃ →B ₆ →B ₇ →B ₈ →B ₉ →A ₈
ZH9259	C ₁ →D ₅ →B ₁₈ →B ₁₇ →B ₁₆ →B ₁₂ →B ₁ →B ₂ →A ₂
NS8006	A ₄ →B ₄ →B ₃ →B ₂ →B ₁ →B ₁₂ →B ₁₆ →B ₁₇ →B ₁₈ →D ₅ →C ₁
CA2602	A ₃ →B ₃ →B ₄ →B ₅ →B ₆ →B ₁₃ →D ₄ →B ₁₇ →B ₁₈ →D ₅ →C ₁
ZH9921	C ₁ →D ₅ →B ₁₈ →B ₁₇ →B ₁₆ →B ₁₂ →B ₁₃ →B ₆ →B ₇ →B ₈ →A ₇

将本算法与不考虑滑行冲突的最短路径算法结果相比,虽然最短路径算法的总距离为 25 160 m,但其中有 4 架航班发生了路段冲突。航班 CA1900 与 ZH8672 共同占用(B₁₄,B₁₅)路段。航班 CA1900 占用(B₁₄,B₁₅)路段的时间区间为 10:36:36—10:37:14,航班 ZH8672 占用(B₁₅,B₁₄)路段的时间区间为 10:36:35—10:37:13,若按照最短路径方案滑行,将会发生迎面冲突,因此基于进港航班优先的原则,通过选择更改离港航班 CA1900 的滑行路径来解除冲突,由 B₁₄ 节点滑至 D₃ 节点避免此次滑行冲突;同样的航班 CA2602 与 ZH9921 共同占用(B₁₇,B₁₈)路段,而此时 B₁₇ 与 B₁₈ 节点处均无其他路径可供选择,因此不能选用更改滑行路径方案来解决冲突问题,从而选择节点等待策略,进港航班相对于离港航班拥有相对的优先权,进港航班 ZH9921 按照最短路径滑行,离港航班 CA2602 在 12:00:00 从 A₃ 节点出发滑行至 D₄ 等待节点处等

待,在 D₄ 节点等待 204 s 后于 12:04:09 滑行至 B_{S17}。采用遗传算法所得的路径相比较于最短路径距离增加了 4 m,同时滑行时间也有所增加,增加了 204 s,但有效的避免了滑行冲突。采用遗传算法优化得到的航班滑行路径如表 3 所示。

表 3 优化后的滑行路径

航班	更改后的路径
CA1900	A ₂ →B ₂ →B ₃ →B ₄ →B ₅ →B ₆ →B ₇ →B ₈ →B ₉ →B ₁₀ →B ₁₁ →B ₁₄ →D ₃ →D ₂ →D ₁ →C ₂
CA2602	A ₃ →B ₃ →B ₄ →B ₅ →B ₆ →B ₁₃ →D ₄ →B ₁₇ →B ₁₈ →D ₅ →C ₁

4 结语

航班在飞行区的滑行路径选择是由塔台管制人员、地面管制人员协作完成的任务,同时航班的滑行效率对机场的整体运行效率具有重要影响。本文以进离港航班的总滑行距离最短为研究目标,根据南通机场飞行区实际的网络结构图,设定了多个等待节点,并对滑行冲突作了简化处理,避免模型复杂化。并采用遗传算法进行优化求解,为每个航班规划了一条无冲突的滑行路径,可以为机场工作人员提供决策帮助,提高机场运行效率。结果表明,遗传算法不仅能够缩短滑行距离,还能有效避免滑行过程中可能出现的冲突情形,此外通过结合机场实际的结构图进行建模与路径规划,确保了研究结果的现实适用性。

参考文献

- [1] ZHANG T, DING M, ZUO H, et al. An online speed profile generation approach for efficient airport ground movement[J]. Transportation Research Part C, 2018, 93: 256-272.
- [2] LUDOVICAA, MARTA F, ELPIDIO R. Airport ground movement problem: minimization of delay and pollution emission[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19 (12): 3830-3839.
- [3] MA J, DELAHAYE D, SBIHI M. Integrated optimization of terminal maneuvering area and aerodrome at the macroscopic level[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 98: 338-357.
- [4] MICHAL W, EDMUND K B, CHEN J. Multi-objective routing and scheduling for aerodrome ground movement [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 119: 102734.
- [5] LI N, SUN Y, YU J, et al. An empirical study on low emission taxiing path optimization of aircrafts on airport surfaces from the perspective of reducing carbon emissions[J]. Energies, 2019, 12 (9): 1649-1669.
- [6] 邢志伟, 徐铭怡, 罗晓, 等. 离港飞机滑行路径优化与仿

真[J]. 中国民航大学学报, 2018, 36 (4): 1-5.

[7] 李斌, 谢春生. 基于 AirTOp 的龙嘉机场地面滑行路径优化研究[J]. 科技风, 2019 (28): 29-32.

[8] 赵天宇, 陈思远, 闫冉, 等. 基于航空器油耗最小的无冲突路径规划模型[J]. 科技创新与应用, 2019 (15): 31-32.

[9] 姜雨, 王欢, 樊卫国, 等. 场面航空器滑行时空协同优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19 (1): 127-135.

[10] 张兆宁, 王彤. 基于跑道出口滑行道选择的机场滑行路径优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39 (6): 33-39.

[11] 徐磊. 航班滑行路径和推出时刻优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

[12] 何庶, 卢朝阳, 王颜颜, 等. 侧向跑道机场滑行路径优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (20): 8695-8701.

[13] 吴闯洋, 胡小兵, 马霁. 基于涟漪扩散算法的航空器滑行路径优化[J]. 计算机仿真, 2023, 40(12): 87-92.

[14] 侯冲, 何秋钊, 宋金豆, 等. 基于 Floyd 算法的双流机场滑行路径优化研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43 (6): 54-58.

[15] 祁欣月, 张汛, 陈长煜, 等. 面向枢纽机场的多因素滑行路径规划综合研究[J]. 科技与产业, 2024, 24 (9): 201-207.

Taxiing Path Optimization of Arriving and Departing Flights Considering Taxiing Conflicts

YANG Yurong, WU Yongqiang

(Airport Academy, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the optimization problem of flight taxiing paths in airport flight zones, the network diagram of the flight zones was drawn according to the actual layout of the airport, and the typical taxiing conflict problem was simplified into the node and section conflict problem. A model was established to minimize the taxiing distance of incoming and outgoing flights, and the genetic algorithm was used to solve the problem. An example analysis was carried out using Nantong Xingdong Airport as an example to verify the effectiveness of the model, which provides a feasible method for flight taxiing path optimization.

Keywords: route optimization; taxiing conflict; genetic algorithm