

A* 算法的场面滑行动态规划方法

刘 帆¹, 张学军¹✉, 马国亮², 刘 玲³

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院,北京,100191; 2. 空军工程大学空管领航学院,西安,710051;
3. 空军装备研究院情报所,北京,100085)

摘要 针对大型繁忙机场交通冲突频发、起飞延误等问题,在战略和战术层面分别对机场场面滑行路径规划方法展开研究。简化了机场路网结构,将滑行路径规划与进离场序列结合,建立了航空器总体滑行耗时最短,延误最少的动态优化模型。在比较了流行的机场滑行路径规划算法基础上,从战术规划的角度提出了一种新的基于 A* 算法的场面滑行动态规划方法和冲突解脱策略。案例仿真结果表明该方法可以快速有效的减少航空器总体滑行时间和解决滑行冲突,实现机场场面运行效率提升和机场运营的自动化。

关键词 场面运行;交通冲突;动态规划;A* 算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.04.004

中图分类号 V32;U416.216 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)04-0019-05

Research on A* Algorithm-Based Dynamic Programming Method for Airport Ground Movement

LIU Fan¹, ZHANG Xuejun¹, MA Guoliang², LIU Ling³

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. Intelligence Section, Air Force Equipment Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Aimed at the problems that frequently traffic accidents arise and takeoff delays in large busy airports, this paper studies the taxi path planning method of airport scene at the strategic and tactical level respectively. The paper simplifies the structure of the airport network, combines the taxiway path planning with the departure sequence, and establishes a dynamic optimization model with the shortest and least delay in the overall taxiing of the aircraft. On the basis of the compared the popular airport taxi route planning algorithm, the paper proposes a new scene sliding dynamic programming method and conflict relief strategy based on A* algorithm from the perspective of tactical planning. The simulation results show that this method can quickly and effectively reduce the overall taxiing time of the aircraft and solve the taxi conflict, thus improving the efficiency of the airport scene and the automatic operation of the airport.

Key words: surface operation; traffic conflict; dynamic programming; A* algorithm

收稿日期: 2017-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(U1533119); 国家自然科学基金创新群体项目(61221061)

作者简介: 刘 帆(1995—),女,山东招远人,硕士生,主要从事空中交通管理研究. E-mail: 13701118204@139.com

通信作者: 张学军(1971—),男,河南郑州人,教授,博士生导师,主要从事空中交通管理研究. E-mail: zhxj@buaa.edu.cn

引用格式: 刘帆, 张学军, 马国亮, 等. A* 算法的场面滑行动态规划方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4): 19-23. LIU Fan, ZHANG Xuejun, MA Guoliang, et al. Research on A* Algorithm-Based Dynamic Programming Method for Airport Ground Movement [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4): 19-23.

大型繁忙机场作为航空运输网的起讫点,通常呈现规模庞大、网络复杂、飞行活动密集等特点。随着航空运输业的迅猛发展,起飞延误、准点率低等问题正日益凸显^[1]。此外,航空器在机场场面滑行过程中的碳排放量也不容小觑^[2]。由此合理的场面运行规划是提升机场运行效率,减少环境污染,降低管制员负荷的关键所在。

滑行路线规划即在停机位和跑道之间为航空器找到最佳滑行路线。在场面运行规划过程中,既要找到从一个位置到另一个位置的最短路径,还要考虑航空器完成滑行消耗的时间。例如2架即将发生冲突的航空器会明显减速以保持安全间隔。国外学者研究滑行路径规划的起步较早。一类方法为分支定界法^[3-4]和动态线性规划^[5-7]等精确算法;另一类方法为蚁群算法^[8]、遗传算法^[9-11]等智能优化算法。近年来,国内学者在此基础上进行了算法上的创新。例如,朱新平等^[12]利用单亲遗传算法,孙广义等^[13]等利用蜂群算法对滑行路由模型进行了优化,冯程等^[14]利用禁忌搜索算法降低了航班进离场资源占用时间。总的来说,智能优化算法具有计算耗时少的优点,但往往不能保证得到最优解,而且严重依赖航空器的精准运行,损耗管制员和飞行员大量精力。在精确算法方面,靳学梅等^[15]改进了Dijkstra算法,李楠等^[16]改进了A*算法来求解最短滑行路径,以上基于图论的搜索算法均属于静态搜索,计算效率不高,冲突解脱策略单一,滑行耗时长。谷润平等^[17]考虑到时间代价,以最短滑行时间为目标,提出了基于D*算法的动态规划方法,明显减少了滑行耗时,但是规划效果不是最优。

本文吸收了谷润平^[17]一文中的时间代价规划思想,从战术规划角度对传统A*算法加以改进。由传统A*算法^[18]把距离作为评价函数启发值改为把滑行时间、冲突解脱时间代价作为评价函数启发值,设定了动态搜索范围,并以滑行时间最短、延误最少为目标对机场场面滑行问题优化,从而提升了运算效率,实现了动态规划,对比实验说明了本算法的优越性。

1 模型建立

1.1 地面节点链路网络模型

机场布局可以表示为一个有向图 $G=(V, E)$ ^[18],每一点 $v \in V$ 都被赋予时间权重。每条边 $e \in E$ 上滑行的航空器之间,在本文中任何时候必须保持至少300 m的距离间距和50 s的时间间隔。机场布局示意图见图1。

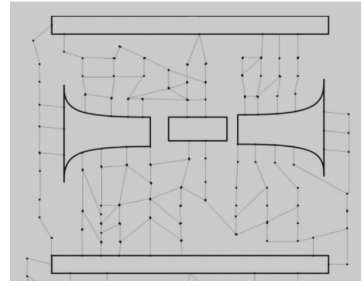


图1 机场局部示意图

Fig. 1 Part of the directed graph representing airport

1.2 目标函数

本文主要是针对一段固定时间内,对所有进出港航空器进行场面运行优化。具体来讲,对于出港航空器,就航空器预定的滑行线路中考虑安全间隔,给出合适的推出时间和为了避免冲突增加必要的途中等待时间,以滑行路径最短和起飞延误最少为目标,基于本文所提冲突解脱的策略,进行路径规划。对于进港航空器,优先级比同时间段内出港航空器高,主要目的是减少进港航空器占用跑道的的时间。

$$\min \sum_{i \in F} k_i D_i + \min \sum_{i \in F} k_i |T^i - t_{Nri}| \quad (1)$$

式中: i 是航空器号; F 是航空器集合; D 是航空器 i 的滑行耗时; T 是航空器 i 的计划起飞时间; t_{Nri} 是航空器 i 的实际到达其跑道口(目标节点)的时间。

1.3 约束条件

对于相邻节点 A 和 B ,航空器 i 和 j 可能发生的冲突分类和冲突发生条件如下,其中 A^+ 表示航空器 j 的后继节点, A^- 表示航空器 i 的前驱节点:

1)超越冲突条件:

$$|t_{jA} - t_{iA}| < T_{\max}, |t_{jB} - t_{iB}| < T_{\max}, \quad \forall i, j \in R, i \neq j \quad (2)$$

2)对头冲突条件:

$$|t_{jA} - t_{iA}| < T_{\max} \&\& jA^+ = iA^-, \quad \forall i, j \in R, i \neq j \quad (3)$$

3)交叉冲突条件:

$$|t_{jA} - t_{iA}| < T_{\max}, \quad \forall i, j \in R, i \neq j \quad (4)$$

2 A*算法的应用

2.1 动态A*算法描述

机场场面运行静态规划属于战略规划问题。在静态环境中,机场网络上各个节点位置都是精确已知的。如果以曼哈顿距离或者欧氏距离作为评价函数启发值,分别采用A*算法、K删除算法^[19]和Dijkstra算法为同一架航空器规划近、中、远3种距离的静态路径进行比较。如图2、3所示,在近距离和中距离静态路径规划中,K删除算法和A*算法速

度优于 Dijkstra 算法;在远距离静态路径规划中, A* 算法和 Dijkstra 算法计算速度优于 K 删除算法;3 种规划中, A* 算法规划的滑行时间最短。综合来看,与目前流行的机场路径规划算法——K 删除算法和 Dijkstra 算法相比, A* 算法滑行规划效果更好,计算耗时更少,更适合复杂的大型繁忙机场滑行路径规划模型。

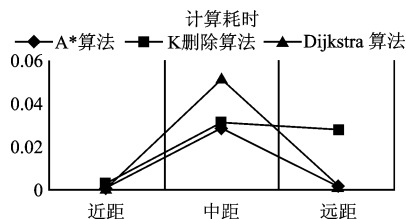


图2 计算耗时比较

Fig. 2 Computational time consuming comparison

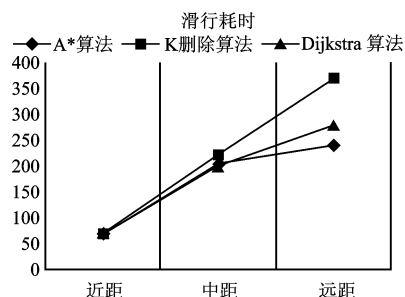


图3 滑行耗时比较

Fig. 3 Taxi time comparison

考虑到机场运营的复杂性和对安全的要求,在实际运营中,更需要对航空器场面运行进行战术层面的动态规划。D* 算法可以看作是动态 Dijkstra 算法^[17]。其表达式为:

$$f_i(n) = g_i(n) \quad (5)$$

本文所提的动态 A* 算法不仅吸收了 D* 算法的动态思想,还具有更好的方向性,其表达式为:

$$f_i(n) = g_i(n) + h_i(n) \quad (6)$$

式中: $f_i(n)$ 是航空器 i 在时间 t 时刻节点 n 从初始点 s 到目标点 d 的评价函数; $g_i(n)$ 是航空器 i 在时间 t 时刻从初始节点 s 到节点 n 的实际时间代价; $h_i(n)$ 是航空器 i 在时间 t 时刻从节点 n 到目标节点 d 最佳路径的时间估计代价。

另外,传统 A* 算法会对相同 F 值的节点逐一寻优,本文设定了动态搜索范围,排除远离目标点的无用节点,提高搜索效率。

本文中,动态 A* 算法首先是计算出一段时间内进离场航空器从各个起点 s 到目的地 d 的最短路径耗时,再从优先级高的航空器路径起始节点向目标节点追溯,遇到冲突则再调用 MODIFY-COST 函数来调整优先级低的航空器路径节点 n 的时间权

重,把修改过权重的节点 n 放入 openlist 表,返回给 A* 算法重新计算路径耗时,最终实现航空器之间无冲突动态规划。

2.2 算法实现

1) 初始阶段,为每一架航空器创建 Openlist 表。初始化使其包含初始结点 s 即离港航空器为停机位,进港航空器为快速脱离道节点,初始结点的父节点即初始节点本身,初始结点到父节点之间的距离为 0,初始结点到父节点的评价函数 G 为 0,到目标节点的评价函数 F 为航空器实际撤轮挡时间或者着落时间 T 。

2) 对于每一架航空器依次搜索最短耗时路径。通过比较,选出当前点 n 。

3) 鉴定 n 是否是目标节点,是则停止搜索,否则实施 4)。

4) 扩展节点 n 。对于每一个航空器,扩展的后继节点因出自当前节点的邻接点集,通过不断比较邻接点到初始点的 G 值来排除、比较。

5) 返回 2),继续路径搜索直至目标点加入 Closelist 表。

6) 由目标节点向初始节点回溯,生成航空器路径初始序列。

7) 对航空器优先级排序处理。

8) 对已生成路径进行冲突检测。对所有航空器依次判断是否与其他航空器有交叉冲突,如果有则修改该节点的时间代价,对优先级低的航空器采取减速、停机位等待、等待前驱点处等待、重新规划路径处理,例如:如果 2 架航空器之间存在对头冲突,则将连通性设为 0,返回路径搜索初始步骤重新搜索。

3 案例分析

以首都机场地面实际运行的航班滑行数据为例。理想情况下,航空器在该机场场面滑行时间一般在 5 min~20 min,过早优化航空器滑行路径不仅不会简化问题的复杂度,而且由于运行过程的不确定性会导致重复计算。因此,选取该机场 2011 年 3 月份繁忙时段(表 1)15 min 计划时间内 36R 和 01 跑道上起降的航班数据进行仿真优化。

以 5 min 内准备出发/着陆的航空器的时间顺序设立优先级。仿真得到规划结果图 4。

结论如下:使用动态 D* 算法的规划方案计算耗时 41 ms,其中发生冲突 2 次,分别采取了延缓推出停机位、减速滑行处理,总滑行距离为 20 600 m,总航空器滑行时间为 2 040 s;使用动态 A* 算法,计算耗时 33 ms,减少了 8 ms,总航空器滑行时间为

2 000 s,减少了 40 s,总滑行距离为 20 500 m,减少了 100 m。

表 1 滑行时刻表

Tab. 1 Taxi schedule

航空器编号	起点	终点	实际撤轮挡/着陆时间	计划进/离场时间	实际进/离场时间
1	275	800	07:10	07:15	07:22
2	551	800	07:11	07:15	07:20
3	544	38	07:10	07:20	07:26
4	777	137	07:11	07:20	07:17
5	555	800	07:21	07:25	07:39
6	548	800	07:21	07:25	07:34
7	520	800	07:25	07:25	07:32
8	280	800	07:26	07:25	07:39
9	265	800	07:24	07:30	07:43
10	356	800	07:24	07:30	07:47

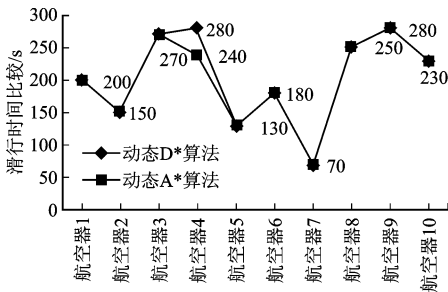


图 4 滑行时间比较

Fig. 4 Taxi time comparison resolution

冲突解脱方面,在采用 Dijkstra 算法进行静态规划时,即如果不采取冲突解脱策略的情况下(图 5),前面滑行的航空器 1 和随后跟进的航空器 2 在经过同一节点 720 时由于不能保持安全间隔而发生交叉冲突(对应的无冲突滑行路径见图 6);图 7 中航空器 1 和航空器 3 在经过节点 554 时由于不满足安全间隔条件将发生对头冲突(对应的无冲突滑行路径见图 8)。

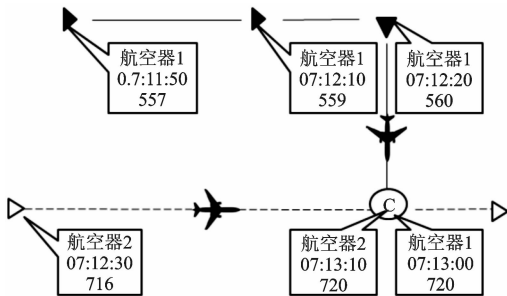


图 5 交叉冲突解脱

Fig. 5 Intersections conflict resolution

图 6 中,在战术规划中,离场航空器 2 通过晚推出停机位 180 s 的策略调整后,在滑行距离和时间没有增加的情况下,避免了和航空器 1 在跑道头附

近的交叉冲突并且缓解了排队压力;图 8 中,航空器 3 从节点 546 处进行邻域搜索,快速修正路径,替换原冲突威胁段,避免了与航空器 1 发生对头冲突。

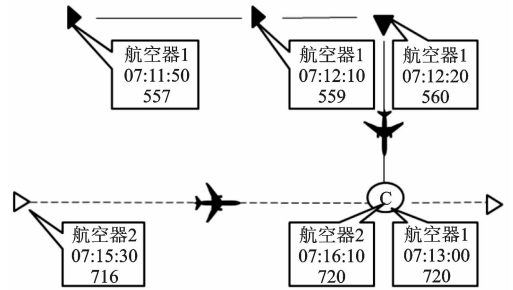


图 6 交叉冲突解脱

Fig. 6 Intersections conflict resolution

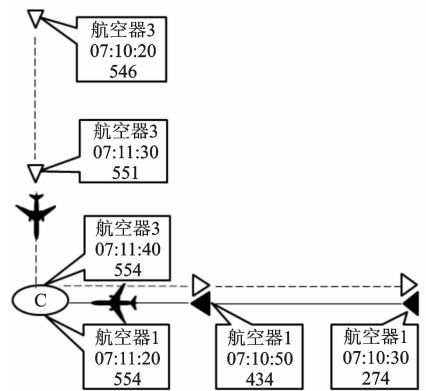


图 7 对头冲突

Fig. 7 Head-on conflict

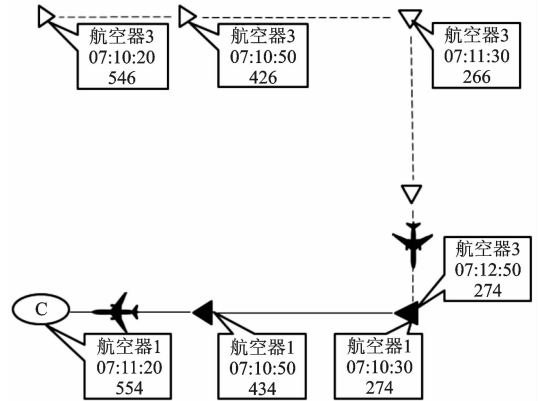


图 8 对头冲突解脱

Fig. 8 Head-on conflict resolution

4 结语

本文分别从战略和战术层面研究了滑行器在大型繁忙机场场面滑行路径规划问题。结合 D* 算法的动态特性^[20]和 A* 算法深度搜索的特性,设定动态搜索范围提高搜索效率,令时间代价成为冲突预测和最优路径的评价函数启发值来实现动态搜索。案例采用首都机场地面实际运行的航班滑行数据进行仿真,实验结果表明本文所提方法有助于实现动

态调度,避免滑行冲突,节约燃油消耗,提升滑行效率。时间有限,本文仅以首都机场为例进行了实验,对其他机场是否适用,需进一步研究。

参考文献(References):

- [1] HANSEN M. Micro-Level Analysis of Airport Delay Externalities Using Deterministic Queuing Models: A case study [J]. Journal of Air Transport Management, 2002, 8(2): 73-87.
- [2] 郑攀. 民用机场停机位分配问题优化模型与算法的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
ZHENG P. Research on Optimization Models and Methods for Civil Airport gate assignment Problem [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [3] GOTTELAND J B, DURAND N. Genetic algorithm Applied to Airport Ground Traffic Optimization [C] // Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation. Canberra, Australia, 2003.
- [4] MARÍN Á. Airport Management: Taxi Planning [J]. Annals of Operations Research, 2006, 143(1): 191-202.
- [5] ROLING P C, VISSER H G. Optimal Airport Surface Traffic Planning Using Mixed-Integer Linear Programming [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2008(1): 1-11.
- [6] CLARE G, RICHARDS A, SHARMA S, et al. Iterative Optimization of Taxiway Routing and Runway Scheduling [C] // Proceedings of the AIAA Guidance Navigation, and Control Conference, Chicago, USA, 2009.
- [7] GUPTA P, SUBRAMANIAN H, PANT S. Generation of Optimized Routes and Schedules for Surface Movement of Aircraft on Taxiways [C] // 10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference. Forth Worth, Texas, 2010.
- [8] MARÍN Á, CODINA E. Network Design: Taxi Planning [J]. Annals of Operations Research, 2008, 157(1): 135-151.
- [9] PESIC B, DURAND N, ALLIOT J M. Aircraft Ground Traffic Optimization Using a Genetic Algorithm [C] // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. San Francisco, USA, 2001.
- [10] GOTTELAND J B, DURAND N, ALLIOT J M. Aircraft Ground Traffic Optimization [C] // Proceedings of the 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. Santa Fe, USA, 2001.
- [11] GARCÍA J, BERLANGA A, MOLINA J, et al. Optimization of Airport Ground Operations Integrating Genetic and Dynamic Flow Management Algorithm [J]. AI Communications, 2005, 18(2): 143-164.
- [12] 朱新平, 汤新民, 韩松臣. 基于 Petri 网与遗传算法的航空器滑行初始路径规划 [J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 565-573.
- [13] ZHU X P, TANG X M, HAN S C. Aircraft Initial Taxiing Route Planning Based on Petri Net and Genetic Algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 565-573. (in Chinese)
- [13] 孙广义, 刘长有. 基于蜂群算法的飞机滑行路径优化 [J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 56-69.
SUN G Y, LIU C Y. Optimization of Aircraft Taxiing Path Based on Artificial Bees Colony [J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(1): 56-69. (in Chinese)
- [14] 冯程, 胡明华, 满青珊. 基于禁忌搜索算法的机场场面联合优化模型 [J]. 航空计算技术, 2015, 45(1): 56-60.
FENG C, HU M H, MAN Q S. Joint Optimization Model of Airport Surface Operation Based on Tabu Search Algorithm [J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(1): 56-60. (in Chinese)
- [15] 靳学梅, 陈培英. 改进的 Dijkstra 算法在机场场面路由规划中的应用 [J]. 现代电子工程, 2009(3): 40-43.
JIN X M, CHEN P Y. Application of Improved Dijkstra Algorithm in the Path Planning of Airport Surface [J]. Modern Electronic Engineering, 2009(3): 40-43. (in Chinese)
- [16] 李楠, 赵擎, 徐肖豪. 基于 A* 算法的机场滑行路径优化研究 [J]. 计算机仿真, 2012(7): 88-92.
LI N, ZHAO Q, XU X H. Research on Taxiing Optimization for Aircraft Based on Improved A* Algorithm [J]. Computer Simulation, 2012(7): 88-92. (in Chinese)
- [17] 谷润平, 崔朋, 唐建勋, 等. 基于 D* 算法的场面滑行动态规划研究 [J]. 科学技术与工程, 2015(1): 88-92.
GU R P, CUI P, TANG J X, et al. Research on Dynamic Planning of Taxi Path Based on D* Algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2015(1): 315-328. (in Chinese)
- [18] UNA B, ALEXANDER E I, BROWNLEE E K. Heuristic Search for the Coupled Runway Sequencing and Taxiway Routing Problem [J]. Transportation Research, 2016, 71(10): 333-355.
- [19] 王志坚, 韩伟一, 李一军. 具有多条最短路径的最短路问题 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010(9): 1428-1431.
WANG Z J, HAN W Y, LI Y J. Shortest Path Problem with Multiple Shortest Paths [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010(9): 1428-1431. (in Chinese)
- [20] 邱磊, 张辉. 2D 游戏地图的寻路实现 [J]. 湖南工业大学学报, 2012(1): 66-69.
QIU L, ZHANG H. Implementation of Path Finding on 2D Game Maps [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012(1): 66-69. (in Chinese)