

民用飞机航路智能规划技术研究



池恽*,余磊

航空工业航空无线电电子研究所, 上海 200241

摘要:针对民用飞机在执行航线飞行过程中遇到飞行员失能等异常情况,传统的飞行管理系统(FMS)无法自动重新规划合理路径。本文采用与路径平滑技术相结合的动态A*算法作为轨迹规划算法。基于导航数据库构建初始路径,考虑天气限制、禁飞区域、空管指令、机场条件等约束条件的影响,建立路径规划的代价函数,通过最小化实际成本和启发式成本的总和来选择后继点,减少了不必要节点的搜索负担。在异常情况下,能够监控检测到这些变化并规划出最适合降落机场的航路,在扩展民用航空应急响应措施、提高安全性方面具有重要意义。

关键词:飞行管理系统;航路规划;航路约束;动态A*;导航数据库

中图分类号:V355

文献标识码:A

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2020.10.008

民航飞行员通常使用飞行管理系统来规划航路,通过在机上选择预定航线来生成飞行计划,然而由于受到逐台飞行空域体系的制约,当遇到飞行员恶意操作等异常情况时,传统飞行管理系统无法越过飞行员操控权限,重新规划飞行路径来保证飞行安全。随着下一代空管体系架构的推进,空地协商机制的不断完善^[1-3],航路在线智能规划技术在民航领域的应用也越来越具有重要意义。

目前,航路规划算法多用于无人机避撞问题,有许多例子表明Dijkstra算法或动态规划等离散方法在无人机航路规划中的普及^[4-6],由于飞行管理系统对航路规划计算时间的需求在100ms以下,考虑到在空中交通法规施加在商用飞机上大量约束的情况,因此,采用动态A*算法,并利用该算法的高效性,实现航路智能的轨迹规划的研究。

本文主要的研究内容包括基于导航数据库的场景建模、轨迹规划算法研究、紧急着陆和航路偏移算法研究,最后通过仿真软件来完成算法的验证。

1 基于数据库的场景建模

1.1 数据库的构建

正常的民航飞行轨迹中,一个完整的轨迹被分解为一系列的飞行航段。飞机的水平飞行和使用航路点以一定倾斜角的转向可以定义一个横向剖面,一个横向剖面通常用一系列

的航路点来描述,航路点的高度限制定义了垂直的剖面。在起飞后,飞机遵循标准仪表离场程序(SID),SID提供了起飞阶段到航路阶段的飞行程序。在着陆前,飞机遵循标准进近程序(STAR),STAR提供了航路过渡到终端区的飞行程序^[7]。

航路点、SID、STAR、跑道、航线等信息通常存储在导航数据库中。航空数据供应商将航空公司选择范围内的航空情报资料(AIP)进行ARINC 424格式编码^[8]后提供给飞行管理系统(FMS)制造商。FMS制造商将这些信息汇总后,转换成FMS所能存储和读取的机载导航数据库格式文件。导航数据库内容如图1所示。

在进行民用飞机轨迹规划建模时,应使用标识搜索、嵌套查询等方法从导航数据库中选取:航路点经纬度、航路点高度限制、机场经纬度、SID、STAR、航线方向等存到航路点

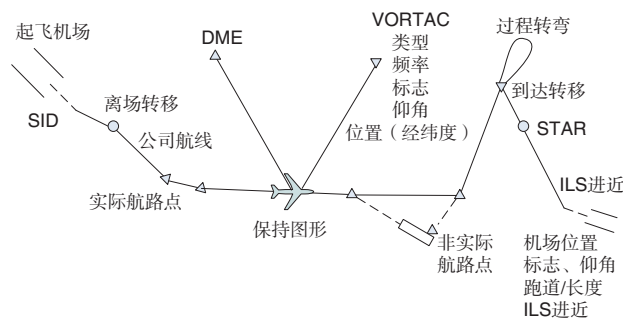


图1 导航数据库内容

Fig.1 Navigation database content

收稿日期: 2020-06-30; 退修日期: 2020-08-25; 录用日期: 2020-09-20

*通信作者: Tel.: 13601869624 E-mail: chi_yi@careri.com

引用格式: Chi Yi, Yu Lei. Research on civil flight intelligent trajectory planning technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(10):46-50. 池恽,余磊. 民用飞机航路智能规划技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(10):46-50.

路径中,并建成有向连通带权图。以供路径规划时使用。

1.2 约束条件

(1) 禁飞区

可以通过 x, y 和 h 坐标,使用几何形状或形状的组合来定义空间中的禁飞区,连接位于该区域中的任何两个节点的线被标记为障碍,由轨迹搜索算法进行评估,从而完全避免该指定区域。

(2) 天气

在实际环境中,天气是制约飞机飞行能力的一大重要因素。在飞行过程中飞机会收到从地面控制中心发送的天气预报,每半小时一次,预报的内容会包括发布天气预报的时间、天气的类型、该天气的中心点纬度、中心点经度、起始半径、结束半径以及天气情况等级,其中天气情况等级共分为0~9的10级情况,9表示需要绕飞。对于特殊的天气(如雷暴、飓风)会提示紧急天气。在实现过程中,将天气状况量化到每两个航路点之中,作为航路选择的代价进行参考。

(3) 地面监管和空中交通管理

商业航班在空中的飞行需要遵循一定的程序。一般来说,飞机在飞行中需要沿着固定的航路飞行。飞机飞行过程中,一些极端天气的发生或者空中交通管理的出现,使得飞机需要就近选择降落机场,或者执行绕飞操作。

2 轨迹规划算法研究

Dijkstra算法使用广度优先搜索策略,忽略了很多有用信息,考虑到禁飞区、天气、空中交通管理等大量约束的情况,A*算法既能够像Dijkstra算法那样搜索到最短路径,又能像广度优先搜索算法(BFS)一样使用启发式函数进行搜索,是适用于民用飞机路径规划的一种智能路径规划算法^[9]。

航路在线智能规划的核心规划算法是A*算法。通过最小化实际成本加上启发式成本的总和来选择后继点,轨迹规划先通过基于图论的A*算法,求出两个航路点之间的低精度最小权重路径。在使用基于三维地图网格化的A*算法,在基于低精度规划的路径基础上,进行迭代细化生成高精度路径。

2.1 低精度轨迹规划

经过数据库的搭建、应用场景的建模,此时已经得到了一个供进行规划的包括天气等信息的全局的“地图”或者“图形”,在该图上,根据起飞机场、降落机场以及航路点进行分割,点与点之间连线填入成本函数值,然后在这个地图上使用A*智能路径搜索算法,规划出一条最优的航迹,该航迹使得总体的成本函数值最小。机场、航路点这些点与点之间连线构成了低精度下的横向剖面轨迹,如图2所示。

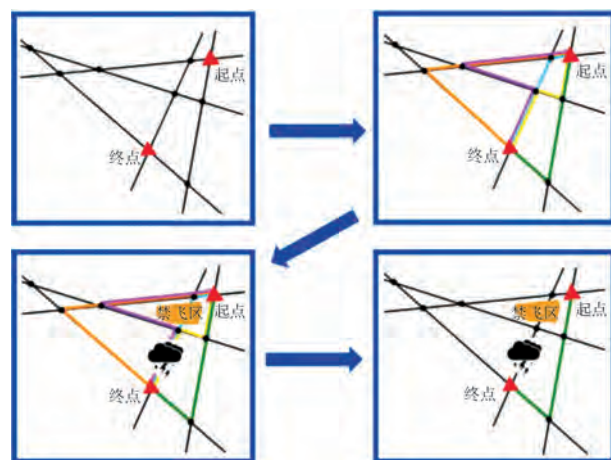


图2 低精度航路规划示意图

Fig.2 Low-accuracy trajectory planning

航路点的位置以经纬度等二维信息表示,根据相应的航空飞行规定、飞机的性能和载重以及考虑到天气等因素,给每个航路点规划出一个高度,生成低精度下的垂直剖面轨迹。低精度的航路搜索算法在飞行前已经开启。飞机在已知飞行的任务的情况下,根据起始机场以及天气预报等信息,能够生成一个低精度的包含航路点序列信息的路径。低精度规划流程图如图3所示。

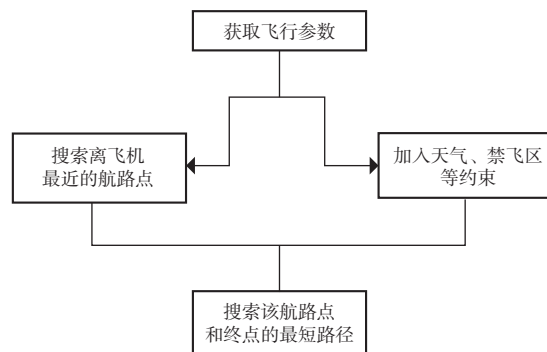


图3 低精度规划流程图

Fig.3 Low-accuracy trajectory flow chart

2.2 高精度规划节点拓展

低精度下的轨迹的建立侧重在起飞前进行整体规划,它对飞行员如何驾驶飞机完成从出发机场到目的地机场的整段飞行轨迹进行了规划。但是低精度针对实时威胁效果不佳,因此需要高精度动态航线生成算法进行辅助。高精度下的算法侧重于及时监控检测动态威胁变化并通过规划的轨迹将飞机拉回原有航线、回到设计的包线中去,以顺利达到下一航路点。高精度规划流程图如图4所示。

在高精度下,当飞机即将转弯时,在每个检测到的转弯角度大于一定数值的地方进行一次杜宾斯路径平滑,最大转弯

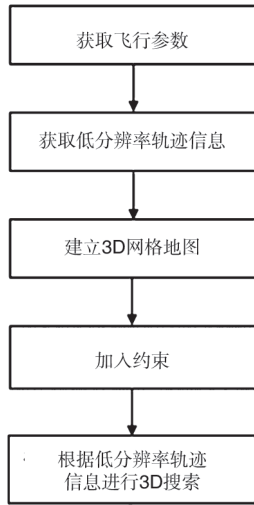


图4 高精度规划流程图

Fig.4 High-accuracy trajectory planning flow chart

角和最大爬升、下降角将作为约束加到后继节点的扩展中。

在扩展节点 x 时,使用的A*算法并不遍历该区域内的每一个位置单元,而是在记录飞机当前节点与父亲节点的情况下,选择处于飞行方向前进的位置的单元,从而使得算法搜索的时间复杂度更低。

2.3 代价函数的选取

在航线规划时,节点与节点之间的连线需要设定一个代价函数的值。代价函数的选择综合考虑航线的长度、禁飞区、天气等的因素。对于低精度航路搜索,最主要的考虑是航线的长度,航线的长度是影响燃油消耗的最主要的因素,对于禁飞区和动态威胁,可以通过设置一个极大的系数,使得航线避开,此外,考虑天气复杂度等限制因素:

$$\text{COST} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad (1)$$

其中:

$$x_1 = \alpha_1 \times D \quad (2)$$

$$x_2 = \alpha_2 \times B_2 \quad (3)$$

$$x_3 = \alpha_3 \times A \times L \quad (4)$$

$$x_4 = \alpha_4 \times B_4 \quad (5)$$

式中: x_1 为基础航路代价, x_2 为禁飞区代价, x_3 为天气代价, x_4 为动态威胁代价; α_1 为基础航路代价系数, D 为航线长度; α_2 为禁飞区代价系数, B_2 为是否经过禁飞区; α_3 为天气代价系数, A 为天气与航路的交叉面积, L 为天气等级; α_4 为动态威胁系数, B_4 为是否与动态威胁相交。

在执行高精度搜索时,要么是飞机被严格限制在既定航路,要么是执行飞机包线等紧急情况,此时非极端天气不再是考虑的因素。因此只将极端天气等价为禁飞区一样,

成为必须避开的区域,化为约束。

3 紧急着陆规划和航路偏移算法研究

3.1 紧急着陆规划

紧急着陆规划应评估因飞行员恶意操作可能带来的应急状况,自动选定合适的着陆备降机场,最大程度上保障乘客、机组人员以及地面人员安全,需要考虑以下因素:(1)紧急着陆备选机场距离当前位置的距离,当前位置到备选机场的航线距离、航线的天气等因素;(2)飞机估计可着陆范围内的潜在着陆点,以及这些着陆点的特征,如城市密度、跑道长度和宽度、天气条件和应急设施^[10]等。

综合考虑途中、进近、跑道和机场设施风险等因素,能够评估不同的潜在的紧急着陆计划,并作为紧急迫降的机场选择的主要参考指标。

当收到紧急降落信号时,飞机需选择紧急降落机场并进行路径规划。其做法为:在初始化时就已经对每段航路的紧急降落机场进行了规划。针对每段航路,都有两个列表,一个列表存储最近的5个机场,另一个列表存储综合代价最小的5个机场。所谓综合代价,指的是对每个航道而言,给每个机场定义一个权重,其权重公式为:

$$W = D + \omega_1 \times L_1 + \omega_2 \times L_2 + \omega_3 \times L_3 \quad (6)$$

式中: D 为飞机当前位置到机场的距离, ω_1 为消防系数, L_1 为消防等级, ω_2 为救援系数, L_2 为救援等级, ω_3 为跑道系数, L_3 为跑道等级。权重 W 就是综合代价,代价越小代表越该机场容易到达。当收到紧急降落信号时,可选择这两个表中的一个进行输出,同时将权重最小的机场默认为新目标点。

3.2 航路偏移修正

航路偏移修正算法将飞机经度、纬度、高度、速度、航向角、航迹角与已规划的路径点进行比较,用误差计算函数以设定好的算法将两者误差量化。当误差在可调整范围内时,调整当前路径。当误差超过调整上限,重新规划路径。对应的流程图在飞机飞行过程中,定时往程序中发送飞机的位置以及状态信息,并判断是否距离下一目标节点的距离在不断减小。当飞机距离下一目标节点的距离增大时,判断是否已经到达目标节点,到达当前目标节点后及时更新目标节点为规划路径上的下一节点。当未到达目标节点,但是此时与目标节点距离在不断增大时,判断根据偏差大小分别启动高精度路径规划和低精度路径规划。流程图如图5所示。

4 仿真试验结果

仿真试验中使用FlightGear作为仿真激励,使用的飞机

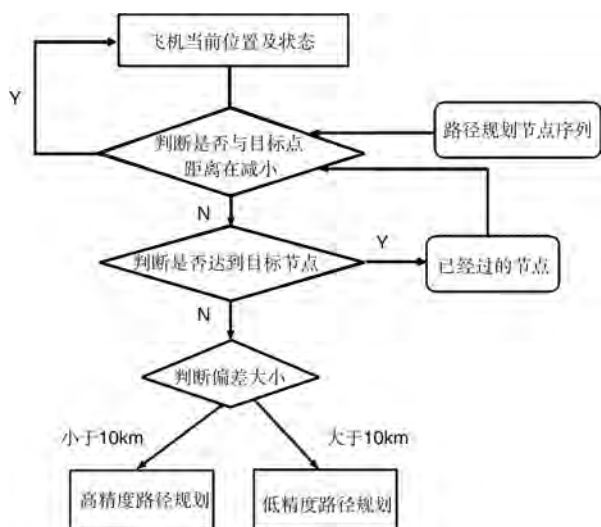


图5 航路偏移修正流程图

Fig.5 Trajectory offset correction flow chart

模型为Cessna550,通过UDP与FlightGear通信进行数据交互,使用C语言完成算法软件实现。

(1) 导航数据库应用测试

以上海虹桥机场(ZSSS)到广州白云机场(ZGGG)的航路搜索为例。算法软件搜索出的上海虹桥机场到广州白云机场的航路序列为: ZSSS, NXD, KAKIS, TOL, ELNEX, SHR, XUVGI, NF, SAGON, PLT, MABAG, IGONO, ZGGG, 长度为1213.4km。与AIRCN全球航路查询系统比较,该网站搜索出的航路为: ZSSS, NXD, KAKIS, TOL, ELNEX, SHR, XUVGI, NF, SAGON, PLT, MASGU, MABA, IGONO, ZGGG, 长度为1210.7km。两个规划结果基本一致,因此能够验证规划算法可以基于标准导航数据库完成从起飞机场到目的地机场的规划。

(2) 轨迹规划测试

将ZSSS-ZGGG作为拟定航线,添加禁飞区信息,禁飞区1经度为28.416667°,禁飞区1纬度为118.970000°,禁飞区1半径为100km,禁飞区2经度为30.700000°,禁飞区2纬度为114.800000°,禁飞区2半径为300km。规划的航路序列为: ZSSS, AND, VEXEX, SHZ, REMIM, PAMVU, DST, RUPOX, LJG, FQG, ENVEN, ATSAB, AMURI, XLN, TEBON, IKATA, SWA, BEBEM, SUMDO, OVGOT, VIPAP, GLN, IDUMA, ZGGG,该条航路可绕过禁飞区。

(3) 航路偏移测试

设计在水平和垂直方向上两个测试场景,完成航路偏移测试。(1)当飞机偏离航道中心10km以上;将ZSSS-ZGGG作为拟定航线,在FlightGear的Map中,拖动飞机偏离航线10km以上,规划出新路径能够到达ZGGG。(2)当飞机还在航道内,

但当前目标点高度过低时;测试通过加入地形数据来模拟飞行过低的情况,在普通情况下(即无任何障碍时),ELNEX(119.49,29.631667)航路点附近的高度规划,如图6所示。

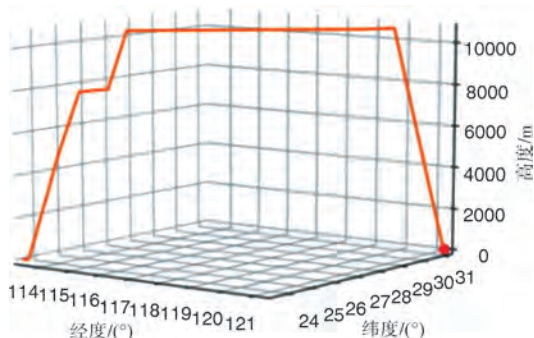


图6 未添加地形障碍前的高度图

Fig.6 Height diagram without terrain obstacle

增加地形障碍:经度为29.529972°,纬度为119.362778°,地形半径为1000m,起点高度为0,终点高度为12000m,ELNEX(119.49,29.631667)航路点附近的水平路径规划路线及其高度规划如图7所示。规划出的路径能够绕开地形障碍,在高度过低时重新规划路径。

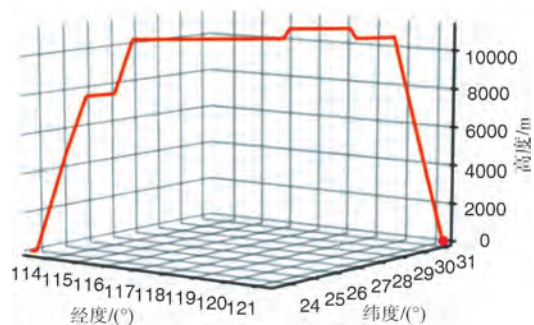


图7 添加地形障碍后的高度图

Fig.7 Height diagram with terrain obstacle

(4) 紧急着陆规划测试

将ZSSS-ZGGG作为拟定航线,当实时获得塔台的指令后,会给出5个适合降落的机场信息,选择ZSWX之后,能够规划出到该机场的轨迹。

5 结束语

本文提出了基于导航数据库的民用飞机智能航路规划方法,在提高安全性方面具有重要意义。针对异常情况,在传统飞行管理系统计划能力的基础上提升了自动规划合理路径的能力。通过仿真试验,验证基本能够实现动态规划、紧急着陆规划、航路偏移修正,而在机载设备上的算法效率问题还有待后续研究。

参考文献

- [1] ICAO. Global air navigation plan[R]. ICAO, 2013.
- [2] Sesar JU. European ATM master plan[Z]. Sesak JU, 2012.
- [3] Wickens C D. Airspace system integration: the concept of free flight[Z]. The Future of Air Traffic Control, 1998.
- [4] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.
- [5] 徐琳, 宋万强, 严冲, 等. 基于威胁评估和扩展 Voronoi 图的技术飞行轨迹规划方法[J]. 航空科学技术, 2019, 30(1): 35-43.
Xu Lin, Song Wanqiang, Yan Chong, et al. Tactical flight trajectory planning methods based on threat assessments and improved Voronoi graphics[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(1): 35-43. (in Chinese)
- [6] 吴剑, 张东豪. 基于改进 D* 算法的无人机航路规划及光顺 [J]. 航空科学技术, 2013(6): 69-71.
Wu Jian, Zhang Donghao. UAV route planning and smoothing based on improved D* algorithm[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(6): 69-71. (in Chinese)
- [7] Eric M, Gano C. Analysis of aircraft arrival and departure delay characteristics[C]//AIAA's Aircraft Technology, Integration and Operations(ATIO), 2002.
- [8] ARINC 424 navigation system database (424-21) [S]. SAE ITC, 2016.
- [9] 刘云翔, 杜杰, 张晴. 基于路径优化的 A* 算法与 Dijkstra 算法的性能比较[J]. 现代电子技术, 2017(13): 189-191.
Liu Yunxiang, Du Jie, Zhang Qing. Performance comparison between A* algorithm and Dijkstra algorithm based on path optimization[J]. Modern Electronics Technique, 2017(13): 189-191. (in Chinese)
- [10] Meuleau N F, Plaunt C J, Smith D E, et al. An emergency landing planner for damaged aircraft[C]//Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence, DBLP, 2009.

(责任编辑 王为)

作者简介

池怿(1991-)女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞行管理系统系统设计。

Tel: 13601869624

E-mail: chi_yi@careri.com

余磊(1993-)男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞行管理系统软件开发。

Tel: 15618628949

E-mail: yu_lei@careri.com

Research on Civil Flight Intelligent Trajectory Planning Technology

Chi Yi*, Yu Lei

AVIC Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China

Abstract: In the abnormal situation such as pilot trying to fly off the envelope or hit the ground during the flight, the traditional flight management system (FMS) cannot automatically re-plan a reasonable trajectory. In this paper, the dynamic A* algorithm combined with path smoothing technology is used as the trajectory planning algorithm. Based on the navigation database, the initial trajectory is constructed, and the weather restrictions, no-fly zones, air traffic control instructions, airport conditions are concerned. The search cost on unnecessary nodes is reduced by minimizing the actual cost plus the heuristic cost to select successor point. The cost function of trajectory planning is established, and the route to the airport most suitable for landing is planned. Under abnormal conditions, it is possible to monitor and detect these changes in time and plan the route to the most suitable airport for landing, which improves emergency disposal method and safety of civil aviation.

Key Words: flight management system; trajectory planning; trajectory constraints; dynamic A*; navigation database

Received: 2020-06-30; Revised: 2020-08-25; Accepted: 2020-09-20

*Corresponding author. Tel.: 13601869624 E-mail: chi_yi@careri.com