

# 飞行管理系统中飞行计划模块的功能设计与仿真实现

## Design and Simulation of Flight Planning Modules in Flight Management System

魏志强 王超 / Wei Zhiqiang Wang Chao

(中国民航大学空管学院, 天津 300300)

(College of Air Traffic Management, CAUC, Tianjin 300300, China)

### 摘要:

飞行计划模块包括飞行计划管理、航迹优化计算、飞行中实时执行等子功能模块。首先研究了飞行计划的人工创建、自动创建、状态管理等功能模块的实现方式;然后研究了水平航迹(水平计划)合成、三维航迹(垂直轨迹)优化和四维航迹生成模块的实现方式;对于飞行计划的实时执行功能模块,研究了由于危险天气、空管限制、飞机构形等因素限制而进行计划偏离、直飞、等待、激活备用计划、航路备降、盘旋等待等功能模块的实现方式;最后以波音 737-800 飞机的相关数据为例进行了仿真计算,研究结果可为飞行管理系统的研究提供参考。

**关键词:** 飞行管理系统; 飞行计划; 四维航迹; 航迹预测; 飞机性能

[Abstract] Flight planning module includes the sub-functions such as flight plan management, flight path optimization calculation, and in-flight real-time implementation. Firstly, how to realize the artificial creation, automatic creation, and state management of flight plans is discussed. Secondly, the realization of parallel tracks combination, three-dimensional trajectory optimization and four-dimensional track creation is studied. For the flight plan real-time implementation module, the realization of such functional modules as flight plan deviation, direct flight, holding, backup flight plan activation, en-route diversion, and circling holding is discussed, which are usually due to dangerous weather, ATC limitations, or aircraft configuration. Finally, the simulated calculation is done based on the data of B737-800 the results can provide a reference for the research of Flight Management System.

[Key words] Flight Management System; Flight Planning; Four-dimensional Trajectory; Trajectory Prediction; Aircraft Performance

## 0 引言

在航空电子研制领域,飞行管理系统(FMS)已成为建立在各个机载子系统之上的“顶层结构”,其相关核心技术基本掌握在欧美等极少数航空设备制造公司手中。国内在早些年虽然开始了对 FMS 的研究,但到目前为止,还没有一个成形的、可以商用的 FMS 产品。即使是在我国民航发展历程上具有划时代意义的 ARJ21 客机,其包括 FMS 在内的很多航空电子设备也都是直接购买国外公司的产品进行安装。

飞行计划模块是飞行管理系统的核心功能模

块之一,它根据机载导航数据库、飞机性能数据库和用户通过 CDU 所定义的飞行任务剖面,通过调用飞行航迹合成、飞机性能优化计算等子模块,实现对飞机四维飞行过程的预测、优化和管理,以提高飞行的安全性、便捷性,并降低飞机的飞行成本和废气排放。

本文对飞行管理系统的键功能模块——飞行计划进行了系统研究,针对飞行计划的管理、航迹优化计算、飞行中实时执行等子功能模块进行了设计,并以波音 737-800 飞机的性能数据和真实的空域导航数据为例进行了仿真计算,研究结果可为飞行管理系统的研究提供必要的理论和实践应用参考。

## 1 飞行计划的管理功能设计

飞行计划的管理功能模块包括飞行计划的创建、修改、删除、加载等内容。飞行管理系统根据飞行员的输入、机载导航数据库参数、飞机机型功能数据库参数,按照优化方式对飞行计划进行创建、优化和预测,得到安全、便捷和经济的四维飞行剖面。

### 1.1 飞行计划的人工创建

对于民用飞机,飞行员可通过控制显示组件(CDU)实现对飞行计划基本信息(起降机场、进离场程序、航路与航路点、巡航高度、巡航模式、相关约束等)的编辑。同时也可以在地面建立飞行计划的基本信息后,通过地空数据链发送或存储介质拷贝到飞行管理系统中。飞行计划的具体编辑流程如图1所示。

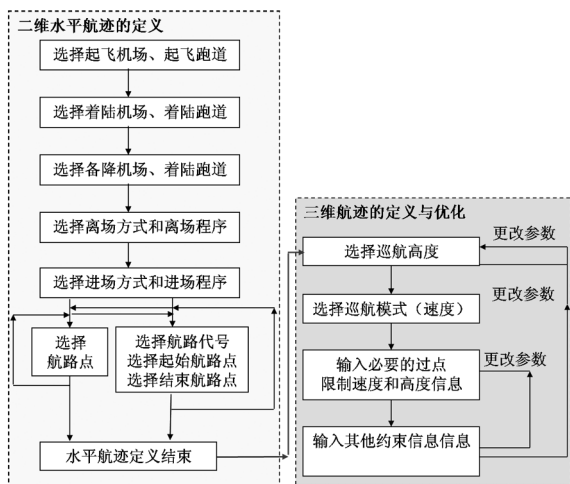


图1 飞行计划的创建流程

### 1.2 飞行计划的自动创建

飞行计划既可以按照用户自定义的方式来创建,也可以按照优化的方式自动创建。具体的优化方式有无约束全自动创建、无约束半自动创建和考虑航路约束的飞行计划自动创建等三种,具体如下。

(1)无约束全自动创建:输入起飞机场与跑道、目的机场与跑道,由飞行管理系统自动按照优化方式来创建。创建的流程与自定义创建时类似,只不过由计算机自行确定最优航迹。首先进行水平航迹优化,按照大圆航线的飞行方式将起飞机场跑道头与目的机场五边起始点连起来(由于通航飞机的飞行距离较短,此时的大圆航线近似于航迹角固定的直线飞行);然后再根据飞机性能参数,确定最佳巡航速度和最佳巡航高度。

(2)无约束半自动创建:输入起飞机场、跑道、离场程序,目的机场、跑道、进场与进近程序,由飞行管理系统自动按照优化方式来创建。首先进行水平航迹优化,按照大圆航线的飞行方式将离场程序的结束点与目的机场进场程序的起始点连起来(由于通航飞机的飞行距离较短,此时的大圆航线近似于航迹角固定的直线飞行);然后再根据飞机性能参数,确定最佳巡航速度和最佳巡航高度。

(3)考虑航路约束的飞行计划自动创建:上述两种优化方式都没有考虑航路走向、导航台位置、空域限制等因素。若要考虑上述因素,则需要按照人工智能优化算法来进行二维路径搜索,可以采用的算法有稀疏A\*搜索算法、进化算法、禁忌搜索算法、动态规划算法等;然后再根据飞机性能参数,确定最佳巡航速度和最佳巡航高度。由于人工智能算法对计算机的软硬件配置要求较高,会占用大量的计算内存和计算资源,因此不建议在飞行管理系统装机产品中采用该方式自动创建飞行计划。

### 1.3 飞行计划的状态管理

一旦航路被手动输入或者选定作为主要飞行计划,那么它就作为飞行阶段FMS生成的所有导引和建议参考的基础。备用飞行计划包含相同的终点,同时包含与主要飞行计划完全不同的航路点。它可在不影响主要计划的情况下,测试修正主要飞行计划并检查修正产生的作用。机组人员可参照修正飞行计划,决定是否选择将飞行计划改为修正飞行计划。

## 2 航迹预测功能的设计

根据用户建立的飞行计划信息、导航数据库中的航路、导航台、航路点(waypoints)、进离场程序、进近程序等信息,通过对飞机的整个三维飞行剖面的详细计算,获得飞机飞越各关键点和关键参数改变时的预计到达时间、剩余燃油和其它数据的预测值。具体计算流程如下:

(1)水平航迹(水平计划)合成模块。根据输入的起飞机场与目的机场、航路/航路点名称、飞行程序,形成拟飞的水平航迹。

(2)三维航迹(垂直轨迹)合成模块。根据高度约束、速度约束、运行参数、预计的航路气象参数等信息,选定积分步长,根据速度、爬升率/下降率、加速度、转弯半径/角速度等参数,积分计算三维飞行航迹。

(3) 四维航迹生成模块。根据飞机参数、起飞时间、时间约束等参数,生成满足各种约束的、从起飞到着陆、完整的四维飞行航迹,进而计算出关键点(参数改变点)和任意时刻的飞行参数(包括重量、表速、马赫数、真空速、地速、真航向、转弯半径、气压高度、推力、阻力、迎角、俯仰角、坡度角、意图信息等)。

(4) 航迹修改模块。根据输入的更改信息(如增删航路点、指定航向、改变高度、改变速度、增删约束等),调用四维航迹生成模块,形成新的四维飞行航迹。

飞行计划中航迹优化与预测模块的实现流程如图2所示。

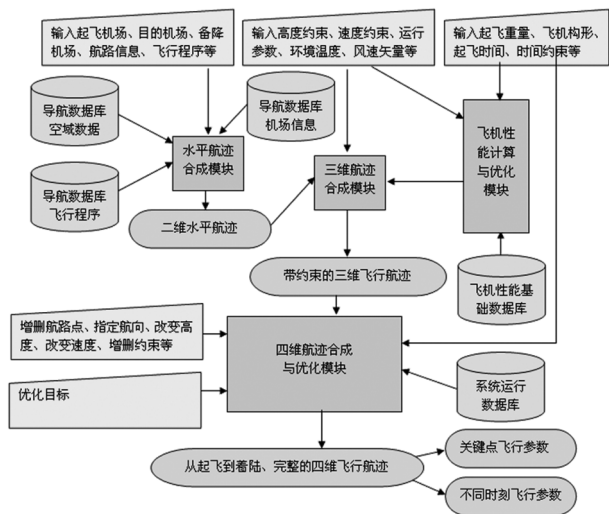


图2 飞行计划中航迹优化与预测模块的实现流程

### 3 飞行计划的执行功能设计

在飞行中,由于受到危险天气、空管限制、飞机构型等因素限制,飞机可能需要偏离预定义的飞行计划进行飞行,因此飞行管理系统还需要实现计划偏离、直飞、等待、激活备用计划、航路备降等功能。

(1) 沿给定航向或航迹角飞行:在机场终端区进行机动飞行时(如延长三边、调配冲突),飞机需要按照管制员指定的航向或航迹角进行直线飞行,直到飞行员人工干预为止。

(2) 加入航线(复航、归航):飞机通过保持航向或航迹飞行偏出预定的航路,在飞行冲突消除后,飞行管理系统应控制飞机自动加入原有航路飞行,加入方式如图3所示。

计算时,首先判断飞机从当前位置转弯后按 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 切入角能否在目标航段结束点前(转弯开始点之前)切入目标航段。如果可以切入(如左虚

线图所示),则飞机进行转弯、直线飞行、再转弯后切入目标航段;如果计算出的预计切入点超过了目标航段的结束点,此时则需要将已飞航段数加一,考虑能否切入下一段,切入方式与前类似,如图3中右图虚线所示。

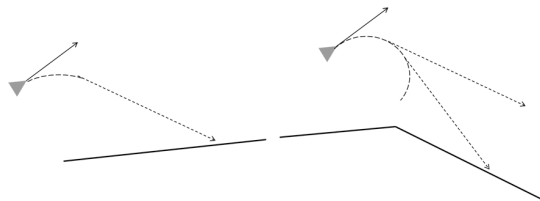


图3 飞机的归航飞行方式

(3) 直飞航路点:为降低燃油消耗或加快空中交通流量,在军方空域开放的情况下,有时空中交通管理部门会要求飞机从当前位置直飞某一航路点。如果该航路点是飞行计划中预定的航路点,则飞行管理系统需要删除从当前位置的下一航路点到目标航路点之间的所有航路点,然后把水平轨迹再次相连即可,如图4所示。

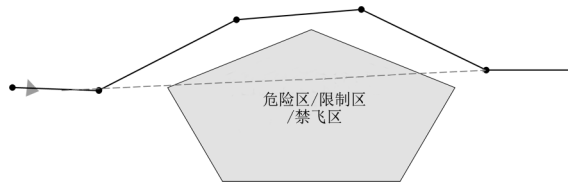


图4 直飞到飞行计划中的航路点

如果要求直飞的目标航路点不是飞行计划中预定的航路点,此时往往是为了调配飞机之间的间隔或冲突。飞行管理系统需要将目标航路点插入到下一航路点之前,当飞机飞到目标航路点后,按照固定的航迹角/航向飞行,或根据管制员的进一步指令进行更改,如图5所示。

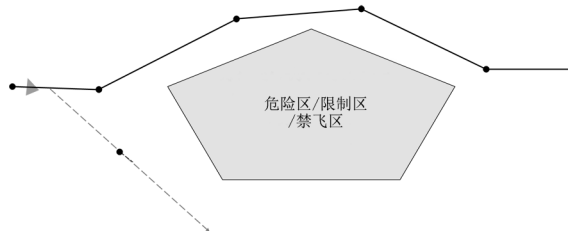


图5 直飞到飞行计划中没有的航路点上

(4) 加入等待:由于受到空中交通拥塞、恶劣天气、军方活动等影响,飞机在空中可能需要进行等待。此时,飞机的飞行过程可以分为以下三个阶段:引导飞机去等待、加入等待程序和控制飞机进行等待。根据飞机的当前位置和要求的等待程序参数,飞行管理系统首先需要更新飞机的航路点列

表,以便引导飞机到等待区域。

当飞机进入等待区域后,需要根据飞机的位置、航迹角,确定加入等待程序的方式。按照 ICAO 的规定,飞机加入等待航线有三种方式:直接进入、偏置进入和平行进入。这三种进入方式都由飞机与等待航线入航边的方位所决定。直接进入的具体实施方法是,第一次通过等待参考点后,加入出航边盘旋等待;平行进入的具体实施方法是,第一次通过等待参考点,与平行边成约 30° 夹角背台飞行。背台飞行一段距离后,右转加入入航边,第二次过台;偏置进入的具体实施方法是,不过等待参考点,直接加入出航边,然后右转加入入航边,或者第一次过台后左转,与入航边平行,与磁航向相反,平飞一段距离,然后左转加入入航边。因此,无论选择何种方式,首先都需要根据飞机的位置和航向判断加入方式,然后再改变飞机的航向参数,引导飞机进入等待,如图 6 所示。

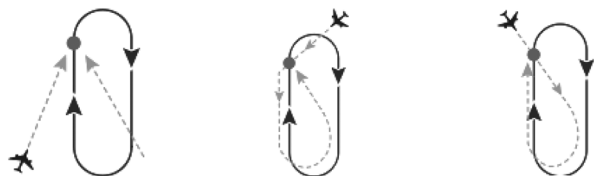


图 6 进入等待的方式

飞机进入等待后,需要实时调整飞机的目的航向和目标位置点,引导飞机自助进行等待,直到飞行员决定要退出等待为止。在飞机等待中,等待的出航边时间和航向是给定的(根据 CDU 输入的信息或导航数据库中存入的等待程序记录信息),而入航边的时间与航向则需要根据飞机的转弯半径变化、风向与风速进行实时计算。在等待过程中,转弯半径是实时计算的。因此,如果在等待过程中飞机改变表速/马赫数或飞行高度(飞机在调整高度时会相应地改变速度,因此也就改变了转弯半径),飞行等待半径会产生变化,入航边的航向和时间也会有较大调整,但飞机会在再次通过等待点后逐步保持航向和时间的规律变化(出航边与入航边航向相反、长度相同)。

(6) 激活备用计划与航路备降:在飞行中,若需要激活备用计划或进行航路备降时,则需要清空当前的飞行航段列表,然后根据备用计划或备降计划重新进行飞行计划计算,形成新的可飞行航段列表,然后控制飞机按照新的航段列表飞行,所需要的飞行控制方式与执行正常飞行计划类似。

## 4 飞行计划航迹的仿真计算

本文以波音 737-800 飞机 CFM56-7B26 发动机为例,用 DELPHI7.0 编程计算出整个飞行过程中的四维飞行航迹数据。计算条件为:ISA+10、静风、滑出机坪时间 17min、从西安咸阳机场 23 号跑道起飞、起飞重量 70 000kg、离场程序 YIJ23、巡航高度 10 700m、进场程序 HCH1A、目的机场烟台国际机场 04 号跑道、滑入机坪时间 9min。计算出的各关键点四维航迹剖面数据如图 7 所示。

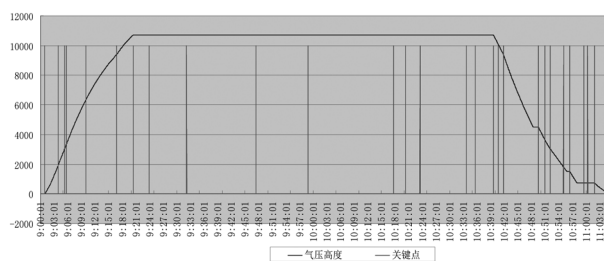


图 7 飞行计划中四维航迹剖面数据

## 5 结论

飞行计划模块是飞行管理系统的核心功能模块之一,本文对飞行计划的管理功能、航迹优化计算功能、飞行中实时执行功能进行了设计,并以波音 737-800 飞机的性能数据和真实的空域导航数据为例进行了仿真计算,证明功能设计的合理性和正确性。飞行管理系统是国产大飞机中航空电子系统的研制关键,也是飞机飞行过程全程最优控制的核心。本文的研究可为飞行管理系统的研究提供必要的理论和实践应用参考。

### 参考文献:

- [1] 王超,郭九霞,沈志鹏. 基于基本飞行模型的 4D 航迹预测方法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 295-300.
- [2] 魏志强. 基于最小成本的高度能力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2005.
- [3] 魏志强. 基于最远航程的巡航性能计算分析[M], 2005.
- [4] 倪桂明,杨东援. 机场系统计算机仿真研究的应用与发展[J]. 系统仿真学报, 2002, 19(1): 14-16.
- [5] Swierstra, S., S. Green, 2003, "Common Trajectory Prediction Capability for Decision Support Tools", 5th USA/Euro-control ATM R&D Seminar, Budapest, Hungary.
- [6] Euro-control, Coverage of European Air Traffic with BADA 3.6, 2004.
- [7] Suckhov, Alexander et al., Aircraft Performance Modeling for Air Traffic Management Applications, 5th USA/Europe Seminar on ATM R&D Budapest, Hungary, 2003.