

引用格式:刘利朝,严林芳.基于第一法则的机载飞行管理系统性能数据库应用技术研究[J].电光与控制,2021,28(5):103-106,110. LIU L Z, YAN L F. On application of first-principle based onboard FMS performance database[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5):103-106, 110.

基于第一法则的机载飞行管理系统性能数据库应用技术研究

刘利朝, 严林芳

(中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院,上海 200030)

摘要:飞行管理系统性能管理等功能的实施依赖于对机载性能数据库的内容的反复调用和运算。机载性能数据库的应用技术一直是飞机主制造商和系统供应商的研究重点和难点。为解决飞机原始性能数据的机载格式转化问题,提出基于第一法则的飞行管理系统性能数据库设计方法。第一法则法是通过在FMS内部建立基础的性能模型,采用算法和公式计算飞行中性能参数和油耗数据。研究了机载数据库内容、数据表格创建及格式分析,数据库的软件使用及构型控制,为性能数据库应用、机载软件开发和系统适航验证提供了重要依据。

关键词:飞行管理系统;性能管理;第一法则;机载性能数据库;构型管理

中图分类号:V241.6 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2021.05.023

On Application of First-Principle Based Onboard FMS Performance Database

LIU Lizhao, YAN Linfang

(Shanghai Aircraft Design & Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: The functions of Flight Management System (FMS) of performance management and so on depend on repeated invocation and calculation of the onboard performance database. Thus the application of the onboard performance database has become the research focus of the aircraft manufacturers and system suppliers. To convert the raw aircraft performance data into onboard database, first-principle based method for FMS performance database design is proposed. The method establishes a basic performance model inside the FMS, and uses built-in aircraft model and algorithms to calculate performance parameters and fuel consumption. The contents of the airborne database, the table creation and format analysis, the software application and configuration management are studied, which supplies a reference for future onboard software development and airworthiness verification.

Key words: flight management system; performance management; first-principle; onboard performance database; configuration management

0 引言

随着航空电子技术的发展,基于性能的导航和四维航迹运行已成为未来航空运行的目标,而飞行管理系统(FMS)则是实现这个目标的主要载体^[1]。当前民用飞机的FMS已发展成为集数据库管理、航迹预测、性能管理和航迹导引于一体的综合系统^[2]。先进民用飞机上FMS通常作为纯软件驻留在综合模块化航空电子(IMA)平台中。

性能数据库是系统实现航迹预测、导引和燃油管理功能的必要输入,其中包含飞机本体相关的数据^[3]。性能数据库的机载应用技术一直是飞机主制造商和系统供应商的研究重点,目前国内主要采用查表法进行读取、索引、查询、插值等方式处理性能数据^[4]。与查表法不同,第一法则下FMS通过内部建立基础的性能模型,采用算法和公式计算飞行中性能参数和油耗数据,可以极大地减少数据容量,并能够应对更为灵活复杂的飞行剖面。

本文提出基于第一法则的性能数据库设计方法,以解决原始飞机性能数据在机载系统的应用问题。研究包含了数据库内容分析、数据表格创建及格式分析等,为FMS性能管理模板开发提供参考。

收稿日期:2020-05-25

修回日期:2021-04-09

作者简介:刘利朝(1989—),男,河北石家庄人,硕士,工程师,研究方向为民用飞机导航系统。

1 FMS 功能研究

1.1 执行飞行任务

FMS 提供多项综合性功能来辅助机组操纵飞机沿着预设路径由起飞机场飞行至降落机场,性能管理通过获取机载存储的性能数据库执行一系列的性能参数计算。依据 ARINC702 A-5 中的要求,性能管理的参数应基于创建的飞行计划规划出完整的飞行剖面用于轨迹预测^[3]。FMS 规划的典型飞行剖面包括起飞、爬升、巡航、下降、进近和着陆 6 个阶段。

1.2 系统架构

为提升系统性能且便于整体软件开发,FMS 根据功能耦合度划分为不同的功能模块,包含飞行计划模块、导航计算模块等。飞行计划功能通过读取机载导航数据库的内容创建从起飞机场到目的地机场的完整航路。导航计算功能通过组合来自多种传感器的数据信息来获得更高精度的飞机位置和速度信息,同时,计算实际导航性能(ANP)以支持所需导航性能(RNP)的运行^[5]。

在第一法则下,性能管理功能基于机载性能数据库内存储的飞机个性化参数计算飞机不同爬升、巡航和下降模式下的速度和高度参数,同时,根据飞机的重量和飞行环境,基于内建的性能模型为轨迹预测和轨迹导引功能提供优化速度边界和导引速度以及油耗信息。轨迹预测功能将根据飞行计划信息和性能信息构建出完整的水平和垂直飞行剖面。轨迹导引功能根据性能计算结果、预测的飞行轨迹和当前位置信息计算水平导引、垂直导引和推力控制指令。典型的 FMS 内部架构见图 1。

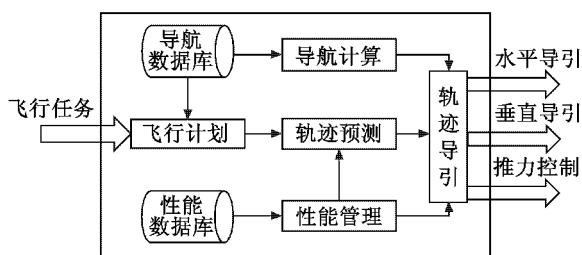


图 1 典型的 FMS 内部架构
Fig. 1 Typical FMS architecture

2 机载性能数据库内容分析

2.1 性能数据库数据处理方法

在实际应用中,性能管理模块在为机组和其他模块提供性能咨询和计算服务时,主要运用 2 种方法构建相应的数据库。

1) 查表法。飞机主制造商将飞机个性化性能数据以特定表格结构和形式打包制作为数据库,并针对不同的参数明确表格使用方法和假设条件,在使用时根据性能数据表格查表,通过表格插值方法计算相关的

性能数据^[6]。

2) 第一法则法。用分析的方法对飞机性能建立特定运动模型和场景,只在性能数据库中存储一些与模型相关的特征参数,在使用时将参数代入模型中,计算所需数据。

查表法应用于短程支线和传统飞机较为广泛,主要由于其算法简单、速度快,对参数的计算精度和系统的计算资源要求不高,在工程应用中具有特定优势。在大型客机和长航程宽体飞机上,受益于 IMA 系统的应用,FMS 作为纯软件可以最大程度地运用通用处理模块(GPM)的强大计算能力、网络配置和存储资源。与查表法相比,第一法则法的性能数据库设计具有以下优势: 1) 在复杂的飞行场景下预测更为准确,尤其在处理包括加速和减速过程的飞行剖面时; 2) 在实现相同性能计算功能的情况下可以减少数据表格容量; 3) 在实时计算过程中提供更好导引性能参数。

2.2 内容分析

FMS 机载性能数据库用于支持性能管理功能。飞行过程中,机组通过操作页面选择的爬升、巡航和下降模式最终通过性能管理功能基于性能数据库中的内容完成计算。典型的爬升模式包括经济模式、最大爬升率模式、最大爬升角模式、手动模式和所需到达时间(RTA)模式;典型的巡航模式包括经济模式、远程巡航(LRC)模式、手动模式和 RTA 模式;典型的下降模式包括经济模式、手动模式和 RTA 模式。

为实现不同的飞行模式,在第一法则下 FMS 的性能数据库应包含飞机性能部分数据、发动机性能部分数据和部分常数。其中,与查表法最大的差异在于飞机性能数据中包含性能模型所需的升阻特性和速度边界内容。此外,由于发动机性能的复杂性,即推力和油耗参数通常是多个函数的变量,这些参数在以表格形式表示时会形成高维的数据空间。查表法中的油耗通常简化飞行模型为固定速度或马赫数飞行以进行预测燃油计算,而第一法则下将包含完整的发动机参数信息。FMS 性能数据库的组成如图 2 所示。



图 2 基于第一法则的机载 FMS 性能数据库内容
Fig. 2 First-principle based onboard FMS performance database content

1) 飞机性能数据包含了飞机的个性化起飞进近

参考速度、不同飞行模式速度、升阻特性参数、单发特征速度,飞行速度包线和高度包线参数以及最优高度。

2) 发动机性能数据包含了发动机在不同引气、单双发构型、推力等级和飞行环境下的推力参数和油耗参数。

3) 性能常数部分将以表格形式包含性能计算所需的各种限制和识别信息,在软件开发过程将算法中的特定参数以自定义的形式放入性能中可以减少性能数据库的更新影响。

3 性能数据库创建及格式分析

3.1 发动机性能创建

发动机性能数据的目的是提供飞机所安装的发动机构型的推力数据和燃油消耗率数据。发动机推力和燃油消耗率都是高维度函数,自变量输入包括离散状态变量和连续变量2种:离散变量包括引气构型、推力等级和单双发状态;连续变量包括高度、速度、温度和N1转速。由于推力和N1,N1和燃油消耗率之间存在一一对应关系,在FMS性能计算和燃油管理过程中不需要N1转速的相关特性,因此可以直接采用由推力到燃油消耗率的对应关系。

在理论研究中,可以通过数学建模将推力和燃油消耗率采用基于多项式的方式进行描述,但在工程应用中,复杂多项式模型的引入会极大地增加软件的复杂度,延长计算时间。在第一法则下,发动机参数表格包含推力和燃油消耗率通过降维的方式制作成三维数据表格用于软件开发。基于第一法则的发动机性能模型如图3所示。

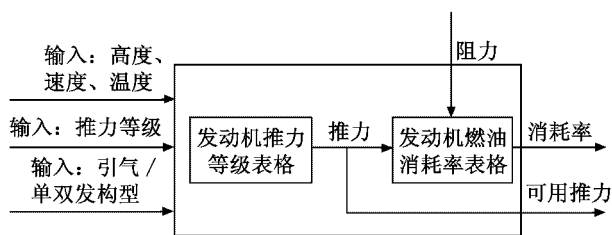


图3 基于第一法则的发动机性能模型

Fig.3 First-principle based engine performance model

结合发动机理论,在第一法则应用时人为将发动机推力和燃油数据进行建表。机载系统应用表格时,推力可表示为

$$T = f(G_{PR}, C_{EC}, C_{BS}, A, Ma, E_{DISA}) \quad (1)$$

在机载软件开发时可使用线性插值或多项式插值方式。式中: T 为发动机推力; G_{PR} 为发动机推力等级(离散量,无量纲); C_{EC} 为发动机单双发状态(离散量,无量纲); C_{BS} 为发动机引气状态(离散量,无量纲); A 为飞机气压高度; Ma 为飞机飞行马赫数; E_{DISA} 为大气温度与标

准大气温度偏差。

通过一系列油耗数据表格进行的燃油消耗率插值为

$$W_f = f(C_{EC}, C_{BS}, A, Ma, T) F_{FFF} \quad (2)$$

式中: W_f 为发动机燃油消耗率; F_{FFF} 为燃油流量因子(无量纲)。

3.2 飞机性能创建

飞机性能数据中的常规起飞和进近参考速度、最大爬升率/角速度、远程巡航速度等参数可以通过简单的三维表格插值方法实现。为实现飞机的实时速度监控和导引,第一法则下FMS根据飞机性能模型,通过计算飞机的升力、重力、阻力和推力得到实时的性能参数和发动机参数。升力系数的计算可以通过引入飞机迎角基于升力曲线计算^[7]。但此方法需要对机头的局部迎角进行修正,模型复杂,不适用于机载系统。

升力系数为

$$C_L = \frac{2 \times W}{\rho \times V_{TAS}^2 \times S} \quad (3)$$

式中: C_L 为飞机升力系数(无量纲); W 为重力; ρ 为大气密度; V_{TAS} 为真空速;常数 S 为机翼有效面积。

阻力为

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times V_{TAS}^2 \times S \times C_D \quad (4)$$

式中: D 为飞机阻力; C_D 为飞机阻力系数。

基于式(3)和式(4),第一法则下机载FMS性能管理模块内部力学模型建立如下:

- 1) 飞行过程中重力持续等于升力;
- 2) 爬升过程中可用推力由发动机性能决定,采用式(1)和数据表格计算;
- 3) 巡航和下降过程中需用推力持续等于阻力。

阻力模型的计算中根据升力系数查询飞机的阻力系数。阻力系数应考虑到飞机的襟缝翼、减速度、发动机构型的差异,根据飞机速度和升力系数进行查表。阻力模型在应用中应在基本阻力系数外增加雷诺数修正、减速板修正、单发失效修正和襟缝翼构修正。

3.3 机载数据库格式分析

在表格制作过程中,为提供软件运行效率,表格采用三维方形矩阵进行制作。对于输入变量多于3个的参数采取降维进行处理,如推力、阻力、经济速度参数多为七维或八维变量,通过将高于三维的变量扩展在表格名称中,并指定索引方式和步骤便于快速计算。工程实践证明,性能数据库的表格制作过程中采用以下方法可有效提高表格构建与处理效率:

- 1) 表格采用唯一可辨识的名称,在降维处理时,表格名称中的自变量以枚举变量表示,枚举值存储于独立的常数表格中;

- 2) 参数的输入自变量组合不是规整的矩形表格时,超出实际边界部分以边界值延伸;
- 3) 表格内部自变量取值单调递增;
- 4) 不同发动机和飞机性能参数的高度、温度和重量包线之间保持匹配。

4 数据库使用

FMS 性能管理功能在执行时需要基于实际的飞机模型和飞行计划,同时反复调用创建的机载数据表格^[7]。以爬升阶段燃油预测为例,第一法则的性能数据库使用流程如图4所示。

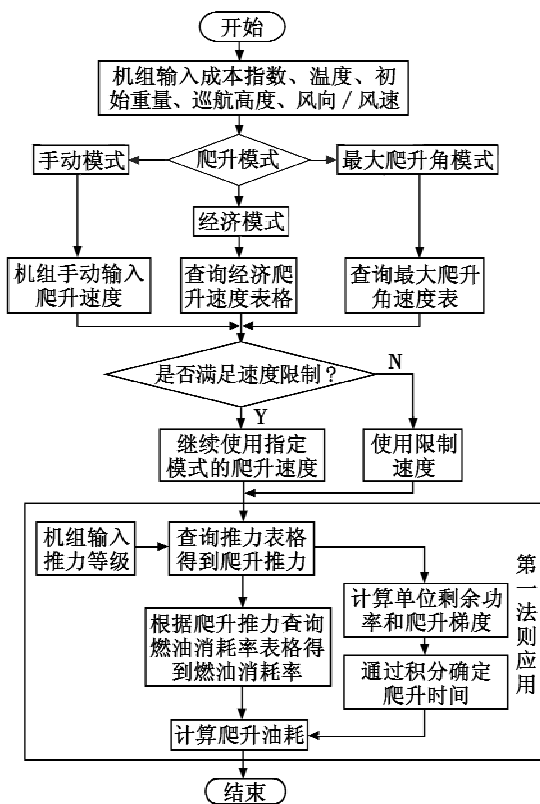


图4 基于第一法则的爬升燃油预测流程

Fig. 4 First-principle based climb fuel prediction

燃油预测的初始条件需要由机组在系统初始化页面输入,包括成本指数、温度、初始重量、巡航高度和风向/风速。初始条件输入包括:爬升起始高度 $H_0 = 457$ m,巡航高度 $H_1 = 10668$ m,成本指数 $I_{CI} = 40$,初始温度 $T_0 = 20$ °C,巡航高度顺风量 $Q_{wind} = 10$ kt,初始重量 $W_0 = 37000$ kg,爬升模式设定为经济模式,速度限制为 250 kt/10000 ft(10000 ft 即 3048 m)。

根据给定初始条件和机载数据库中的数据,飞机在经济模式下爬升速度剖面计算结果如图5(a)所示。根据预测的爬升速度和高度剖面,结合发动机性能数据库和阻力数据,计算飞机按指定模式爬升过程中的实际推力和燃油消耗率结果如图5(b)所示。

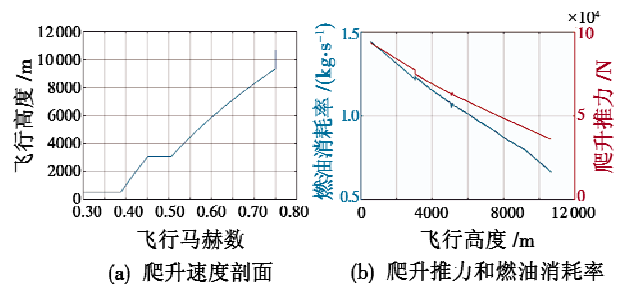


图5 基于第一法则的FMS爬升性能计算结果

Fig. 5 First-principle based FMS climb performance calculation result

5 构型管理

在 FMS 软件开发过程中,性能数据库的应用是性能管理、轨迹预测和轨迹导引功能的前置条件。在系统软件构型冻结之前,性能数据库的构型需要提前到位。由于飞机和发动机数据必须在相关的试飞验证后才能最终确认,性能数据库在应用过程中根据不同的阶段规划不同的构型以解决这种矛盾。在第一法则下性能数据库可以规划至少包含初始构型、开发构型和验证构型3个大构型,如图6所示。

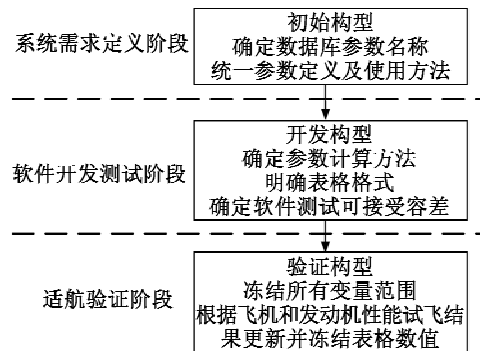


图6 机载FMS性能数据库构型

Fig. 6 Onboard FMS performance database configuration

6 结束语

FMS 性能数据库是根据飞机自身特性按照特定格式和方法制作的应用于机载软件开发的一套数据内容。基于第一法则的性能数据库应用技术在大型客机和长航程宽体飞机的机载 FMS 上具有较大的应用潜力。本文基于工程经验,分析研究了基于第一法则的性能数据库内容、数据表格创建及格式分析、数据库的软件开发使用和构型控制,为性能数据库应用、机载软件开发和适航验证提供了重要依据。

参考文献

[1] Joint Planning Development Office. NextGen avionics roadmap V2.0[R]. Washington D. C. :FAA, 2011.

(下转第110页)

同时尽量使圆半径足够大^[10],然后选择圆周上相距较远的 2 点 A_1, A_2 作为监测点,通过控制无人机在这 2 个监测点的自旋及俯仰,实时观测信号幅度的变化,当信号幅度出现最大值时,记录此时的经纬度坐标及相应角度信息。其中: A_1 的经纬高坐标为(112.439 779°,34.637 253 08°,146.412 m),方位角为 101°,俯仰角为 11.828°; A_2 的经纬高坐标为(112.441 997°,34.635 921°,146.376 m),方位角为 12.8°,俯仰角为 13.848°。

利用地面站功能模块中的干扰源定位功能可得干扰源计算位置坐标为(112.442 353°,34.637 219°,157.43 m),干扰源实际位置坐标为(112.441 956°,34.637 564°,146.72 m),同时将干扰源的实际位置与计算位置显示在地图上,如图 6 所示,通过地图测距测得二者相距约 52 m,具有一定实用价值。

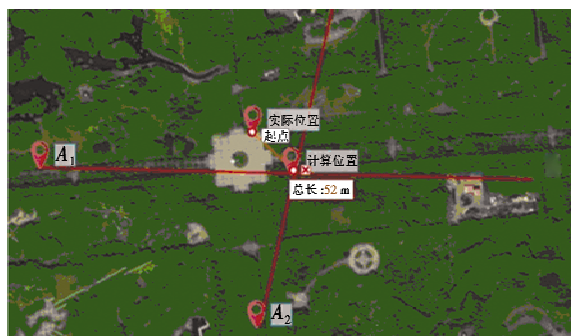


图 6 干扰源的实际位置与计算位置

Fig. 6 The actual position and calculated position of the interference source

5 结束语

本文初步搭建了一套空中无线电监测定位系统,通过对 Mission-Planner 开源地面站平台进行二次开发,使其不仅具有传统地面站的无人机操作监视等功能,还在此基础上融合了无线电信号测向定位功能。最后利用该系统进行了相关测试,既验证了基于无人

机的民航无线电监测系统监测民航无线电干扰的优越性,又验证了该地面站系统的可行性,基本达成了由一名地面站操作人员同时完成无人机操作与民航无线电干扰源监测定位的预期目标。本文搭建的系统可以降低运行成本,提高排查民航无线电干扰的效率,具有一定的实际指导意义。

参考文献

- [1] 张美红. 基于无人机的民航无线电干扰空中监测与分析研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2019.
- [2] THOMPSON F, GALEAZZI R, GUIHEN D. Field trials of an energyaware mission planner implemented on an autonomous surface vehicle[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6):1040-1062.
- [3] 韩英慧. 基于局域网的通信系统的开发与设计[J]. 黑龙江教育学院学报,2013, 32(7):190-191.
- [4] 张凌浩,王胜,周辉,等. 基于 MAVLink 协议的无人机系统安全通信方案[J]. 计算机应用,2020, 40(8):2286-2292.
- [5] 王楠. 支持 MAVLink 通信协议的微型无人机数传电路设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [6] 张梦花. 基于无人机低空摄影测量成图实例研究[D]. 西安:西安科技大学,2017.
- [7] BASTARI A, SUPARMANTO D, SUNARTA S, et al. Design of autopilot tank prototype monitoring system on ground station using google maps[J]. Journal Asro-Sittal-International, 2020, 11(3):31-46.
- [8] 邱日鹏. 基于四旋翼飞行器的大气环境监测系统研究与设计[D]. 南昌:南昌航空大学,2018.
- [9] 李凯,夏爽,崔铠韬,等. 多旋翼空中无线电监测系统[J]. 中国无线电,2015(6):42-43, 48.
- [10] 范祥玲. 运动单站测向定位技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.

(上接第 106 页)

- [2] ARINC Industry. Advanced flight management computer system ARINC 702A-5[S]. Bowie:SAE ITC, 2018.
- [3] 钱向农,杨丰辉,阎良民. 飞行管理系统机载性能数据库应用技术研究[J]. 航空工程进展,2014,5(1):116-123.
- [4] SPITZER C R, FERRELL U, FERRELL T. Digital avionics handbook[M]//3rd ed. WALTER R. Flight manage-

ment system. Boca Raton:CRC Press LLC, 2017.

- [5] 杨丰辉,钱向农. 飞行管理系统性能计算策略分析[J]. 航空计算技术,2013, 43(4):105-108.
- [6] 黄太平. 飞机性能工程[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [7] 程农,拓朴筠,李清,等. 新航行体系下大型客机飞行管理系统关键技术研究及仿真验证[J]. 中国科学,2018, 48(3):264-276.