

文章编号: 1674-8190(2024)02-166-07

FMS巡航阶段的垂直轨迹预测算法及应用

郑起彪, 迟哲敏, 陈祺, 齐林

(中国航空无线电电子研究所 民航航电系统部, 上海 200233)

摘要: 飞机的飞行过程涉及多个垂直飞行阶段, 巡航阶段占了绝大部分的飞行时间、飞行距离及燃油消耗, 研究飞行管理系统(FMS)巡航阶段的垂直轨迹预测算法, 对于提升飞行的经济性、舒适性、安全性是非常重要的和必要的。为了满足不同类型飞机巡航阶段垂直轨迹预测算法的通用性, 提高垂直轨迹预测的精确度和可信度, 提出一种适用于巡航阶段的垂直轨迹预测算法。首先, 通过计算巡航阶段的速度剖面, 并构建预测过程中更加符合实际的大气模型; 然后基于第一性原理(第一法则)的飞机模型计算所需的巡航燃油流量数据, 通过设计的巡航阶段垂直轨迹预测算法逻辑, 给出巡航阶段预测的垂直轨迹; 最后通过地面仿真试验和空中试飞验证算法的有效性与准确性。结果表明: 本文提出的基于第一性原理飞机模型的FMS巡航阶段垂直轨迹预测算法能够预测飞机的巡航轨迹, 且预测精度误差低于1%。

关键词: 飞行管理系统; 巡航阶段; 垂直轨迹预测; 速度剖面; 大气模型; 第一性原理

中图分类号: V249

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.18

The vertical trajectory prediction algorithm of FMS for the cruise flight phase and its application

ZHENG Qibiao, CHI Zhemin, CHEN Qi, QI Lin

(Department of Civil Aircraft Avionics Systems, Chinese Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: It is well known that there are several vertical flight phases for the aircraft in the flight. The cruise flight phase takes most of the flight time, flight distance and fuel consumption, so it is important and necessary to develop the flight management system (FMS) vertical trajectory prediction algorithm for the cruise flight phase, aiming to improve the economy, comfort and safety of the flight. In order to meet the versatility of the vertical trajectory prediction algorithm between different types of aircraft in the cruise phase and improve the accuracy and reliability of the vertical trajectory prediction, the algorithm of vertical trajectory prediction for cruise flight phase is proposed in this paper. Firstly, the cruise speed profile is calculated, and the realistic atmospheric model of prediction is constructed. Then the cruise fuel flow data is calculated based on the aircraft model of first-principles, and the vertical trajectory prediction for the cruise phase is given by designing the vertical trajectory prediction algorithm logic. Finally, the effectiveness and accuracy of the algorithm are verified by ground simulation and air flight test. The results show that the vertical trajectory prediction algorithm of FMS cruise phase based on the aircraft model of first-principles can predict the cruise trajectory of the aircraft, and the prediction accuracy error is less than 1%.

Key words: flight management system(FMS); cruise flight phase; vertical trajectory prediction; speed profile; atmospheric model; first principle

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-11-20

通信作者: 郑起彪(1991-), 男, 硕士, 工程师。E-mail: hitwhzheng@163.com

引用格式: 郑起彪, 迟哲敏, 陈祺, 等. FMS巡航阶段的垂直轨迹预测算法及应用[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 166-172.

ZHENG Qibiao, CHI Zhemin, CHEN Qi, et al. The vertical trajectory prediction algorithm of FMS for the cruise flight phase and its application[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 166-172. (in Chinese)

0 引言

随着全球化进程的加快,世界各国航空运输业也在高速发展。航线网不断密集,空域内飞行流量呈逐年增长的趋势,空域拥堵现象日渐突出^[1]。为了应对有限的空域资源与航空发展需求之间的矛盾,飞机的高精度轨迹预测与轨迹的精确控制显得尤为重要。

飞行管理系统(Flight Management System,简称FMS)作为飞机航空电子的核心系统,目前安装在大多数飞机之上,该设备于1982年作为一种专门的机载计算机被引入民用飞机^[2],可以有效地帮助飞行机组完成综合导航、飞行计划管理、轨迹预测、飞行引导、性能计算等多项飞行任务^[3-4]。

FMS的垂直轨迹预测功能基于飞机未来的飞行意图,根据飞行计划信息、垂直轨迹预测开始时的各种飞机状态,以一定的垂直剖面积分步长,以上一次积分结束时的状态作为下一次积分开始时的状态,周期性地对飞机做快速的模拟飞行^[5],计算沿指定飞行计划的完整四维飞行轨迹,提供飞行计划后续航路点及垂直事件点的预计到达时间(Estimated Time of Arrival,简称ETA)、预计速度、预计高度、预计剩余燃油(Estimated Fuel on Board,简称EFOB)等预测信息^[4],提前向其他机载系统、机组人员和空中交通管理中心提供飞机未来的飞行状态^[6-7]。

巡航阶段通常介于爬升阶段和下降阶段之间,在不考虑巡航阶梯爬升与阶梯下降的情况下按照巡航高度层进行等高度飞行,是飞行过程中飞行时间最久、航程最长、燃油消耗最多的垂直飞行剖面部分^[8-9]。巡航阶段性能分析的目的在于选择巡航高度和巡航速度,对巡航的飞行轨迹进行预测,提前计算巡航飞行所需的时间和燃油^[10]。因此研究飞机在巡航阶段的垂直轨迹预测,可以有效减轻飞行机组工作负担并减少飞行成本,提高飞行的经济性、舒适性与安全性^[11]。

构建精确的大气模型是提高垂直轨迹预测精度的重要条件之一,现有的大气模型构建方法^[12-13]仅在三维空间上对大气预报数据与大气实测数据进行融合。此外,飞机模型提供生成垂直轨迹所需的飞机性能数据,目前大多数的垂直轨迹预测算法研究是直接基于性能数据库的飞机模型,虽然具有较高的计算效率,但需要对离散的数据进

行插值计算,会在一定程度上引入插值计算的误差。例如,王娜等^[7]研究了使用飞机性能数据库计算全飞行过程垂直剖面的轨迹预测算法;Mendoza等^[14]研究了使用飞机性能数据库进行完整的飞行轨迹预测并计算飞行总成本的算法;Ghazi等^[15]研究了使用飞机性能数据库预测飞机爬升阶段与巡航阶段垂直轨迹的算法;Dancila等^[16]提出了一种使用飞机性能数据库构造垂直飞行路径积分段集合的方法,用于飞行轨迹的预测和优化;邹翔等^[17]研究了使用BADA模型的快速飞行全过程航迹预测算法。

随着机载硬件设备综合能力的提升和算法设计能力的技术发展,针对算法模型复杂化的趋势,为了消除数据插值引入的计算精度误差、尽可能最小化大气建模引入的误差、解决算法通用性较差的问题,本文根据实时计算、不依赖于数据插值手段且计算数据连续变化的第一性原理的飞机模型,考虑大气预报数据的时效性与大气数据的预报误差,即完善现有大气模型的构建方法,基于计算的巡航阶段的速度剖面,通过设计巡航阶段垂直轨迹预测算法逻辑,给出巡航阶段预测的垂直轨迹,进一步提高巡航阶段垂直轨迹预测的算法精度、增加算法的通用性,并通过地面仿真试验和空中试飞验证算法的有效性与准确性。

1 巡航阶段的速度剖面

巡航阶段的预测通常是按照指定巡航高度层下的速度剖面进行预测的。巡航阶段的速度剖面,即飞机在巡航过程中的飞行速度随时间或距离的变化曲线。速度剖面的确定是巡航阶段垂直轨迹预测的重要基础之一,只有提前确定了巡航的速度剖面,才可以基于该速度剖面对巡航过程进行预测。飞机在巡航阶段有多个速度模式可以选择,常见的有经济巡航速度、人工巡航速度、远航速度、久航速度等速度模式,以及为了满足航路点时间约束的所需到达时间(Required Time of Arrival,简称RTA)速度模式,每一种速度模式都可以提供一种巡航速度计划。

对于预测的每一个巡航飞行积分段,巡航阶段速度剖面的确定除了考虑预先定义的巡航速度计划,还需要根据如下的优先级考虑飞机性能限制、机场速度限制、等速度段、航段速度限制等^[18]。

飞机性能限制是指飞机的速度包线,即飞机设计的最大速度与最小速度,是一个无论如何都必须满足的范围;机场速度限制是空管限制的一个与高度相关的速度值,在高度以下不能超过该速度;等速度段是指从一个巡航航路点到后续的一个巡航航路点之间,指定一个常数值的速度约束;航段速度是为了满足航路点的时间约束(RTA)做出的航段速度调整。

2 巡航阶段大气模型的构建

大气模型提供沿着垂直飞行剖面上各个位置上的大气预测,巡航阶段使用的大气模型包括风模型与温度模型。对于四维垂直轨迹的预测与控制,不精确的大气模型会导致预测精确度降低,因为必须改变飞机的飞行速度等方式来补偿大气建模的误差。精确的大气模型是提高垂直轨迹预测精确度的必要条件,巡航阶段大气模型的使用,可以提供更加准确、可信度更高的预测数据。

大气数据可以分为大气预报数据和大气实测数据,前者是根据气象观测提前给出的估计数据,后者则是实际飞行中传感器测量的飞机当前位置的大气数据。巡航阶段大气模型的构建方法,通常是基于在FMS页面上输入或数据链上传的巡航航路点的一个或多个高度层的大气预报数据,并与实际飞行过程中传感器测量的当前实际大气数据进行融合,以确定飞机前方航路点的大气预测数据。在飞机当前位置大气模型使用100%的实际测量数据,随着远离飞机位置为大气测量数据赋予更小的权重。

在空间维度上构建的大气模型,必须最小化大气建模未考虑因素的影响,一个更符合实际的大气模型应同时考虑大气预报数据的时效性和大气预报数据的预报误差。所谓时效性,即给出大气预报数据与使用大气预报数据时所经过的时长,时长越长的预报数据可信度越低。由于预报大气与实际遭遇的大气之间可能存在偏差,将垂直轨迹的预测偏差与大气预报数据的预报误差关联起来,即根据当前位置的大气实测数据与大气预报数据之间的误差去修正后续的大气预报数据。通过计算时效性影响因子、大气预报数据的预报误差影响因子,而后结合统计学特性将两者的结果进行融合,综合考虑空间和时间上的变

化规律,从而计算修正后的大气预报数据。将修正后的大气预报数据与实测数据进行融合,构建更符合实际的大气模型。

巡航阶段大气模型的构建流程、大气模型中实测数据与修正预报数据进行融合时百分比的取值,如图1~图2所示(图2中,1 n mile=1.852 km)。

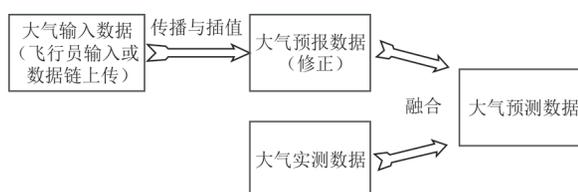


图1 巡航阶段大气模型的构建
Fig. 1 Construction of the atmospheric model for cruise phase

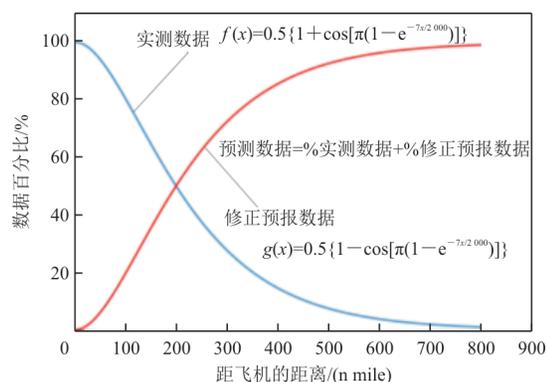


图2 大气模型中数据融合的百分比
Fig. 2 Blended percentage of the atmospheric models' data

3 基于第一性原理的巡航阶段飞机模型

飞机模型提供生成垂直轨迹所需的飞机性能数据。垂直轨迹预测的精确度和可信度,不仅依赖于预测垂直轨迹的相关算法,一定程度上还取决于预测飞机性能的数学模型,因此建立与真实飞机相接近的飞机模型至关重要。

基于第一性原理的飞机模型计算方法通常使用飞机的气动参数、发动机相关的原始飞机模型参数,基于飞行动力学基本方程,可以实时计算所需的飞机性能数据。第一性原理模型直接从已建立的基本物理定律出发,不依赖历史经验模型和参数拟合等手段,其数据计算结果是连续变化的,因此基于第一性原理建立的飞机模型可以很好地接近真实飞行。

飞机的燃油流量代表飞机单个发动机在单位

时间内消耗的燃油质量,其数据单位一般为 lb/h (1 lb \approx 0.453 6 kg)或 kg/h。飞机在巡航阶段的垂直轨迹预测,依赖于巡航燃油流量数据计算的飞机模型,基于第一性原理计算巡航燃油流量需要的原始飞机性能数据如表 1 所示,表 1 中 Δ ISA 表示国际标准大气偏差,非国标单位的换算关系为:1 ft=0.304 8 m,1 lbf \approx 4.448 2 N。

表 1 计算巡航燃油流量所需的原始飞机性能数据
Table 1 Required data of original aircraft performance to calculate cruise fuel flow

数据库类型	子数据库	输入	输出
气动数据	基本阻力系数	升力系数 C_L 马赫数 Ma 飞机构型 C_{Config}	基本阻力系数 C_{D1}
	附加阻力系数	升力系数 C_L 马赫数 Ma 飞机构型 C_{Config}	附加阻力系数 C_{D2}
发动机数据	巡航推力	高度 H /ft 马赫数 Ma ISA 偏差 Δ ISA/ $^{\circ}$ C	巡航推力 F_N /lbf
	巡航燃油流量	高度/ft 马赫数 Ma ISA 偏差 Δ ISA/ $^{\circ}$ C 巡航推力 F_N /lbf	巡航燃油流量 $F_{t,f}/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$

对于处在巡航阶段的飞机,通常保持升力和重力相等,推力和阻力相等,并接近于定常直线的飞行^[19-20],其受力分析如图 3 所示。

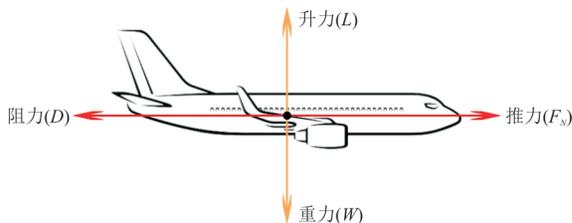


图 3 飞机巡航阶段的受力分析

Fig. 3 The force analysis for aircraft in cruise phase

因此有:

$$F_N = D \quad (1)$$

$$L = W \quad (2)$$

升力计算公式:

$$L = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_L \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度; S 为机翼面积; V 为真空速。

则由式(2)和式(3)可知,升力系数为

$$C_L = \frac{2W}{\rho S V^2} \quad (4)$$

由升力系数和其他所需参数,查找阻力系数的性能数据库表格,进而可以计算阻力系数;再由式(5)可以计算出当前阻力的大小。

$$D = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_D \quad (5)$$

则由式(1)和式(5)可以计算推力(F_N),是巡航所需推力。查找巡航推力的性能数据库表格,计算的巡航所需推力再与当前条件下可以输出的巡航推力限制值进行比较,确认是否可以输出该推力。

最后根据燃油流量的性能数据库表格和所需推力(F_N),可以计算出所需推力下的燃油流量,该值即为单个发动机燃油流量的计算结果。

4 巡航阶段的垂直轨迹预测算法

为了能够使用飞机模型对巡航阶段的垂直剖面进行预测,需要人为地对巡航剖面进行切割与划分,直到可以使用简单的预测模型来处理某一垂直飞行过程,这种能够进行预测的递增单元或间隔被称为积分段,通过使用积分步长来定义一个积分段。飞行过程的水平轨迹与垂直轨迹相互耦合。巡航阶段内部可能包含若干个水平航段,一条航段也可能跨越多个飞行阶段;一条航段内部可能包含多个积分段,一个积分段也可能跨越多个航段。

一个完整的巡航阶段的预测通常开始于爬升阶段结束的位置和高度,即爬升顶点(Top of Climb,简称 TOC);当前飞行阶段为巡航阶段时,巡航阶段的预测开始于当前飞机位置和高度。巡航阶段的预测结束于下降阶段开始的位置和高度,即下降顶点(Top of Descent,简称 TOD)。

首先对落入巡航阶段内的飞行计划航段进行处理,然后对水平航段进行垂直的积分段处理,在一个积分段内遇到水平航段终止时回退到水平航段终止位置,将水平剖面与垂直剖面相互耦合。从轨迹预测起始位置向 TOD 点推进,初始条件在积分段开始时建立,预测过程基于飞机模型计算一个积分段内的巡航燃油流量,采用时间、距离、重量三种积分步长的任意一种,将累积对飞行时间、到 TOD 点距离以及飞机总重三个基本参数的更改,这些参数的数值在每个预测积分段的开始和结尾处进行更新。巡航阶段的垂直轨迹由一系

列这种积分段首尾相连组成,一个积分段的终止条件是下一个积分段的初始条件,积分过程将一直持续到预测到达 TOD 点,可以建立起首尾相连的巡航预测轨迹。

综上,积分段采用距离积分步长的巡航阶段垂直轨迹预测算法具有更强的算法通用性,可以适用于不同类型、最大起飞重量不同的飞机,其算法流程步骤如下:

-
- 步骤 0: 初始化索引位置, $i = 1$, 基于构造的下降路径, 计算 TOD 点的位置;
- 步骤 1: 获取飞机的巡航高度 H 、初始时间 T_i 、初始距离 S_i 、初始质量 W_i ;
- 步骤 2: 基于巡航速度剖面计算的指示空速 V_{IAS} 及马赫数 Ma , 计算一个积分段内的真空速 V_{TAS} ;
- 步骤 3: 使用大气模型, 计算在巡航高度 H 的国际标准大气偏差 ΔISA 和当前积分段上的风速 V_{Wind} ;
- 步骤 4: 计算一个积分段内的地速 V_{GS} ;

$$V_{GS} = V_{TAS} + V_{Wind}$$
- 步骤 5: 基于距离积分步长 D_{Step} , 计算一个积分段的时间变化量 Δt ;

$$\Delta t = D_{Step} / V_{GS}$$
- 步骤 6: 基于第一性原理计算该积分段内的巡航燃油流量 $F_{f,i}$;
- 步骤 7: 计算积分段内的距离变化量 ΔS 与燃油变化量 ΔF ;

$$\Delta S = D_{Step}$$

$$\Delta S = \Delta t \times F_{f,i}$$
- 步骤 8: 计算积分段结束处的时间 T_j 、距离 S_j 、质量 W_j ;

$$T_j = T_i + \Delta t$$

$$S_j = S_i - \Delta S$$

$$W_j = W_i - \Delta F$$
- 步骤 9: 判断是否遇到水平航段终止, 并处理与存储积分段数据;
- 步骤 10: 更新索引 $i = i + 1$, 更新积分段初始数据:

$$T_i = T_j, S_i = S_j, W_i = W_j$$
- 步骤 11: 回到步骤 2, 重复该过程, 直到 TOD 点
-

5 算法测试与验证

基于上述巡航阶段的垂直轨迹预测算法研制的 FMS 样机, 经过桌面端测试和半物理仿真测试, 并搭载于某型号飞机进行试飞试验, 巡航飞行过程中周期性记录各个巡航阶段航路点的预测数据, 并记录各个巡航航路点的实际到达数据。

目前公开的标准可以查找到关于 ETA 的验证指标^[21-22], 其他预测参数的验证指标目前未找到可供参考的公开材料。标准 DO-236C Change 1 内给出的 ETA 的验证指标为: 在没有预测环境误差的条件下, ETA 与实际到达时间 (Actual Time of Arrival, 简称 ATA) 的误差应当小于距航路点剩余飞行时间的 1% 或 10 s, 并以两者中的较大者

为准。

记录的某一个巡航航路点的 ETA 及 EFOB 数据随剩余飞行时间的变化曲线分别如图 4~图 5 所示。需要说明的是, 航路点的各个预测数据是相互关联的, 在核心软件计算中各个预测数据是一起计算的, 其中一个不准确, 其他参数也不会特别准确。

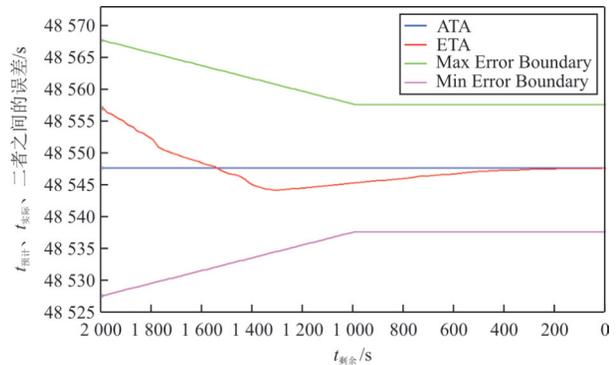


图 4 巡航阶段某航路点的 ETA 变化曲线

Fig. 4 The ETA change curve of a certain cruise waypoint

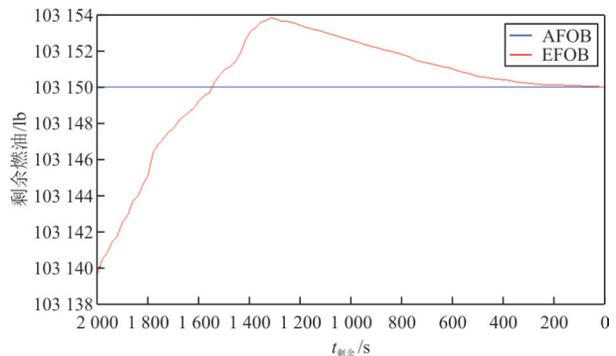


图 5 巡航阶段某航路点的 EFOB 变化曲线

Fig. 5 The EFOB change curve of a certain cruise waypoint

图 4 与图 5 针对单个巡航航路点证明了算法的正确性, 其中预测数据的变化趋势是类似的, 符合算法设计的预期。为了能够从整体上说明算法的有效性与准确性, 即根据记录的所有试飞数据对算法精度进行评估, 基于标准给定的 ETA 验证指标, 分别定义 ETA 相对误差 ($e_{\text{相对_ETA}}$) 与 ETA 绝对误差 ($e_{\text{绝对_ETA}}$)^[23]:

$$e_{\text{相对_ETA}} = \frac{t_{\text{预计}} - t_{\text{实际}}}{t_{\text{剩余}}} \times 100\% \quad (6)$$

$$e_{\text{绝对_ETA}} = t_{\text{预计}} - t_{\text{实际}} \quad (7)$$

式中: $t_{\text{预计}}$ 为航路点的 ETA; $t_{\text{实际}}$ 为航路点的 ATA; $t_{\text{剩余}}$ 为到航路点的剩余飞行时间, 为记录 ETA 时的时刻与 ATA 时间之间所经过的飞行时间。

式(6)针对剩余飞行时间大于等于 1 000 s 的情

况,式(7)针对剩余飞行时间小于1 000 s的情况。

根据记录的巡航阶段航路点的ETA数据与ATA数据,对数据进行统计学分析,分别绘制直方图并给出正态分布的概率曲线,如图6~图7所示。

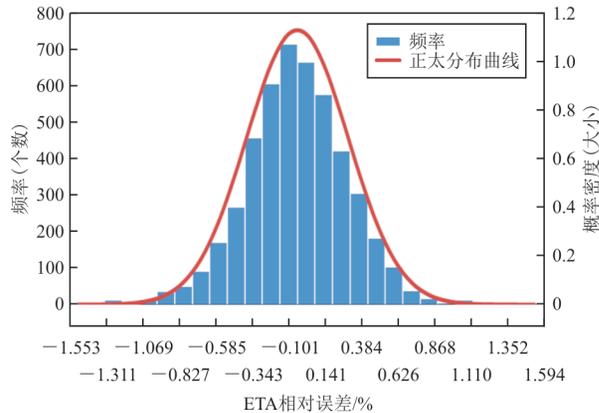


图6 巡航阶段垂直轨迹预测算法的ETA相对误差分布
Fig. 6 ETA relative error distribution of the vertical trajectory prediction algorithm for cruise phase

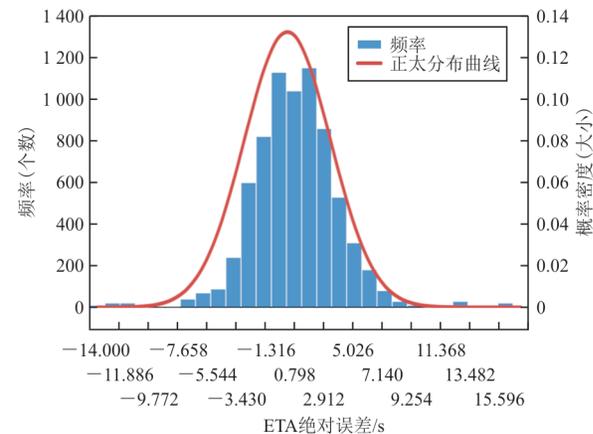


图7 巡航阶段垂直轨迹预测算法的ETA绝对误差分布
Fig. 7 ETA absolute error distribution of the vertical trajectory prediction algorithm for cruise phase

从图6可以看出:平均误差为 -0.041% 、标准差为 0.35% ,99%的数据介于 $[-1\%,1\%]$ 之间。

从图7可以看出:平均误差为 0.34 s 、标准差为 3.01 s ,99%的数据介于 $[-10\text{ s},10\text{ s}]$ 之间。

综上,预测精度误差低于1%,满足标准给定的要求,说明基于该算法的巡航阶段垂直轨迹预测功能可以满足功能要求与性能要求。

6 结论

本文完善了现有大气模型的构建方法,依据第一性原理的飞机模型,提出了通用性更强的巡

航阶段的垂直轨迹预测算法,经过地面测试验证以及最终的试飞验证,可以同时满足功能要求和性能要求。基于上述算法研制的FMS,巡航阶段的垂直轨迹预测数据具有较高的精确度和可信度。

参考文献

- [1] 魏君. 高速增长后的谨慎乐观——全球航空运输业发展预测与展望[J]. 大飞机, 2019(3): 54-58.
WEI Jun. Cautiousness and optimism after high speed growth: prediction and outlook for the development of global air transport[J]. Jetliner, 2019(3): 54-58. (in Chinese)
- [2] AVERY D. The evolution of flight management systems[J]. IEEE Software, 2011, 28(1): 11-13.
- [3] 金德琨. 民用飞机航空电子系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011: 52-82.
JIN Dekun. Civil aircraft avionics systems[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2011: 52-82. (in Chinese)
- [4] ARINC. Advanced flight management computer system: ARINC 702A-5[S]. Bowie, Maryland, USA: SAE Industry Technologies Consortia, 2018: 18-87.
- [5] SPITZER C R, FERRELL U, FERRELL T. Digital avionics handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015: 412-419.
- [6] 王金岩, 孙晓敏, 齐林, 等. 民用飞机飞行管理系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019: 219-229.
WANG Jinyan, SUN Xiaomin, QI Lin, et al. Flight management system for civil aircraft[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019: 219-229. (in Chinese)
- [7] 王娜, 郭伟, 孙晓敏. 飞行管理系统垂直剖面预测研究[J]. 航空电子技术, 2017, 48(4): 1-6.
WANG Na, GUO Wei, SUN Xiaomin. Research on vertical profile prediction of flight management system[J]. Avionics Technology, 2017, 48(4): 1-6. (in Chinese)
- [8] 魏志强, 张文秀, 韩博. 考虑飞机排放因素的飞机巡航性能参数优化方法[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3485-3493.
WEI Zhiqiang, ZHANG Wenxiu, HAN Bo. Optimization method of aircraft cruise performance parameters considering pollution emissions[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3485-3493. (in Chinese)
- [9] 杨杰, 薛建平, 王发威, 等. 大型运输机巡航航迹优化方案建模与分析[J]. 飞行力学, 2012, 30(4): 314-317.
YANG Jie, XUE Jianping, WANG Fawei, et al. Cruise trajectory optimization modeling and analysis for large transport[J]. Flight Dynamics, 2012, 30(4): 314-317. (in Chinese)

- [10] 惠辉辉, 李广文. 基于飞机模型的性能计算与管理[J]. 飞机设计, 2019, 39(2): 24-28.
HUI Huihui, LI Guangwen. Performance calculation and management based on aircraft model[J]. Aircraft Design, 2019, 39(2): 24-28. (in Chinese)
- [11] 樊刘屹, 郑智明, 薛飞, 等. 基于成本指数的民机四维航迹预测优化算法[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(2): 85-91.
FAN Liuyi, ZHENG Zhiming, XUE Fei, et al. 4D trajectory prediction and optimization method for civil aircraft based on cost index[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020 (2): 85-91. (in Chinese)
- [12] Honeywell. Boeing 787 flight management system pilot's guide[M]. Honeywell: Boeing Company, 2014: 385-391.
- [13] Airbus. A380 flight crew operating manual[M]. Toulouse, France: Airbus, 2011: 899-908.
- [14] MENDOZA M A, BOTEZ R M. Methodology for vertical-navigation flight-trajectory cost calculation using a performance database[J]. Aerospace Information Systems, 2015, 12(8): 519-532.
- [15] GHAZI G, MENNEQUIN A, BOTEZ R M. Method to calculate aircraft climb and cruise trajectory using an aeropropulsive model[C]// AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. Grapevine: AIAA, 2017: 3550-3561.
- [16] DANCILA B D, BOTEZ R M. Vertical flight path segments sets for aircraft flight plan prediction and optimization [J]. Aeronautical Journal, 2018, 122: 1-54.
- [17] 邹翔, 程朋, 程农. 快速的飞行全过程航迹预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(7): 685-691.
ZOU Xiang, CHENG Peng, CHENG Nong. Fast entire-flight-phase trajectory predictions[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(7): 685-691. (in Chinese)
- [18] 王娜, 孙晓敏, 薛广龙. 基于成本指数的飞机垂直剖面优化研究[J]. 航空电子技术, 2019, 50(1): 1-5.
WANG Na, SUN Xiaomin, XUE Guanglong. Research on vertical profile optimization based on cost index[J]. Avionics Technology, 2019, 50(1): 1-5. (in Chinese)
- [19] BLAKE W. Jet transport performance methods[M]. Seattle: Boeing Commercial Airplanes, 2009: 617-624.
- [20] 方振平. 飞机飞行动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 3-8.
FANG Zhenping. Aircraft flight dynamics [M]. Beijing: Beihang University Press, 2005: 3-8. (in Chinese)
- [21] RTCA. Minimum aviation system performance standards: required navigation performance for area navigation: RTCA DO-236C Change 1[S]. Washington DC: RTCA, 2014: 2-6.
- [22] RTCA. Minimum operational performance standards for required navigation performance for area navigation: RTCA DO-283B[S]. Washington DC: RTCA, 2015: 70-71.
- [23] CRAMER M, HERNDON A, MILLER S, et al. Estimated time of arrival (ETA) performance system comparative evaluation [C]// 2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Prague: IEEE, 2015: 1-17.

(编辑: 马文静)