

文章编号:1674-8190(2014)01-116-08

飞行管理系统机载性能数据库应用技术研究

钱向农, 杨丰辉, 阎良民

(中国航空工业集团公司 第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 飞行管理系统(FMS)在垂直轨迹预计、垂直导航参数信息预报和垂直导引功能方面对飞行性能数据计算提出了大量需求,为了高效管理和实时使用飞行性能数据,提出了设计与创建机载性能数据库,分析了性能管理中机载性能数据库的组成、表结构、数据库文件生成与加载过程。提出采用性能数据库管理功能,进行读取、索引、查询、插值等方式处理性能数据,提高了飞行管理机载软件实时计算效率,有力地支持了机载软件工程化开发和系统验证。

关键词: 飞行管理系统;性能计算;机载性能数据库文件;机载软件

中图分类号: V243

文献标识码: A

Study on the Airborne Performance Database Application of the Flight Management System

Qian Xiangnong, Yang Fenghui, Yan Liangmin

(The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Requirement of performance calculation are provided for vertical section forecasting, vertical navigation parameter predicting and critical directing in flight management system(FMS). In order to manage and use flight performance data high efficiently, designing and creating airborne performance database are proposed, and furthermore, their data table structure and database composition are analyzed. In addition, the course of generating and loading airborne performance database document are analyzed. It is provided that managing airborne performance database and reading, indexing, querying and inserting performance data, improving real time calculation efficiency of flight management airborne software. It can greatly support the engineering development of airborne software and system validation.

Key words: flight management system; performance calculation; airborne performance database document; airborne software

0 引言

飞行管理系统(FMS)^[1]是大型运输机航空电子系统中的核心子系统,是对导航、轨迹优化、飞行性能、导引、控制和显示高度综合化的航电子系统。

飞行管理系统十分重要的一部分功能^[1]是要求提供垂直最优轨迹预计、垂直导航参数信息预报和垂直导引功能。飞行垂直剖面的上述功能都依

赖于飞行性能计算^[1-2],在大型运输机飞行管理系统设计与开发方面,如何有效管理和使用大量的飞行性能数据,一直是备受关注的问题。

国际上,以波音和空客等大型客机为代表的民用飞行管理系统,其重要组成部分为机载性能数据库^[3-7],在机载软件工程应用中采用性能数据查表方式^[2]实时计算性能数据,并运用数据库管理功能,为机组人员提供飞行管理服务。

本文提出设计与创建机载性能数据库,分析机载性能数据库的组成、表结构、数据库文件生成与加载过程,为飞行管理系统实时性能计算、机载软件研发工程^[8-9]及系统维护提供参考依据。

收稿日期:2013-08-07; 修回日期:2013-10-02

通信作者:钱向农, qianxiangnong@sina.com

1 ARINC702A 飞行管理系统规范中的性能计算需求分析

ARINC702A 飞行管理计算机系统规范^[6]对飞行管理性能计算^[10]需求进行了明确和完善的规定,根据规定及垂直制导对性能计算功能的要求,建立 FMS 性能计算需求与功能框架,并对该框架下的各个子模块分别进行机载性能算法研究。

在性能计算中,规范为爬升、巡航、下降阶段的

垂直航迹预测和垂直制导定义提供了不同的性能模式,对各阶段的每个性能模式都会提供一个相应的速度计划表,FMS 根据各阶段选定的性能模式,按照该模式的速度计划表进行航迹预测和垂直制导目标速度的计算。

爬升、巡航、下降阶段各个性能模式的速度计划表的表现形式均为常量校正空速(CAS)和常量马赫数(Mach)对,称为爬升和下降阶段的速度剖面,如表 1 所示。

表 1 不同性能模式的速度计划表
Table 1 Speed schedule of the different performance patterns

阶段	性能模式	说 明	结果形式
爬升	标准	制造商提供的该机型的标准爬升速度	常值 CAS/Mach
	经济	使直接运营成本最低的爬升速度	常值 CAS/Mach
	最大爬升角	使飞过的水平距离最短的爬升速度	常值 CAS/Mach
	最大爬升率	使爬升垂直速率最大的爬升速度	常值 CAS/Mach
	要求到达时间(RTA)	能在要求时间内到达航路点且燃油消耗最少的爬升速度	常值 CAS/Mach
	人工输入	机组人员指定的爬升速度	常值 CAS/Mach
巡航	标准	制造商提供的该机型的标准巡航速度	常值 Mach
	经济	使直接运营成本最低的巡航速度	动态 Mach
	远程巡航(LRC)	对应 99%最大燃油里程的巡航速度	动态 Mach
	最大续航时间	燃油流量最低的巡航速度	动态 Mach
	要求到达时间(RTA)	能在要求时间内到达航路点且燃油消耗最少的巡航速度	动态 Mach
	人工输入	机组人员指定的巡航速度	常值 CAS/Mach
下降	标准	制造商提供的该机型的标准下降速度	常值 CAS/Mach
	经济	使直接运营成本最低的下降速度	常值 CAS/Mach
	最大下降率	使下降垂直速率最大的下降速度	常值 CAS/Mach
	要求到达时间(RTA)	能在要求时间内到达航路点且燃油消耗最少的下降速度	常值 CAS/Mach
	人工输入	机组人员指定的下降速度	常值 CAS/Mach

在上述模式指导下,性能计算需求包含的内容有:最大和最优的高度计算、行程高度计算、备降机场性能数据计算、梯度爬升和下降、巡航阶段爬升、建议的 T/C 位置、T/D 位置、中间 T/D 位置、推力限制数据的计算、起飞参考数据、进近参考数据、剩余燃油计算、单台发动机失效性能计算、最大航程预测、最大留空时间预测等。

2 机载性能数据库创建与组成

2.1 创建机载性能数据库

飞行管理系统中性能计算功能主要为垂直制导的航迹预测子功能和制导子功能提供速度、耗油量、时间、高度、距离、推力等性能信息的查询和实

时计算^[1],并在飞行过程中以此为基础进行航路信息计算^[11],同时显示其他性能提示信息。

原始性能数据计算或地面状态的性能计算过程主要依赖于建立性能动力学模型和运动学模型,计算数据以大量的图形和表格形式由飞机制造商提供给用户。

在飞行管理系统机载设备运行过程中,飞行管理机载软件进行的性能计算功能体现为高级管理行为:在不同条件下,索引各项性能数据表,然后查询与综合计算性能数据。因此,需要在飞行管理系统中创建机载性能数据库,系统管理机载状态下的性能数据,飞行管理性能计算模块的运行依赖于通过查询数据库中存贮的性能数据进行各项计算。

根据 ARINC702A 中的性能计算需求,机载性

能数据库由三方面组成:气动模型数据库、发动机模型数据库、空中性能数据库。

(1) 气动模型数据库是由升力系数、阻力极面等飞机气动外形数据组成的数据库;

(2) 发动机模型数据库是由发动机推力模型和耗油特性数据组成的数据库,包含各种推力模式、推力限制、推力使用状态数据及对应的耗油特性数据;

(3) 空中性能数据库包含起飞、爬升、巡航、下降、着陆阶段各种模式中有关速度、燃油、时间、距离和重量等的性能数据,此外,还有与航路相关的各种性能数据,以及其他性能咨询数据,以上数据是根据基本性能数据计算得到的二次应用性能数据,目的是便于机载性能管理使用。

2.2 机载性能数据库主要组成

2.2.1 推力数据子项

主要包括用于计算推力参数以及推力限制的相关数据。

(1) 用来完成计算每个阶段推力限制的数据(起飞阶段、最大连续爬升阶段、最大速度巡航阶段);

(2) 用来完成减推力起飞和假设温度起飞阶段的数据;

(3) 进气道风门使用状态下的相关数据;

(4) 剩余推力设置;

(5) 在推力、燃油流量、颤振阻力之间的关系数据;

(6) 推力设置参数(压缩比或 $N1$ 转数)。

2.2.2 起飞/进场着陆数据子项

(1) 完成计算 V_1 、 V_R 和 V_2 速度的数据;

(2) 进场着陆速度数据;

(3) 爬升速度数据。

2.2.3 空中飞行性能数据子项

主要包括飞行各阶段的速度计划、高度数据以及其他性能参数和性能限制。

(1) 经济性爬升速度数据(所有发动机失效状态及单台失效状态);

(2) 经济性巡航速度数据(所有发动机失效状态及单台失效状态);

(3) 经济性下降速度数据(所有发动机失效状态及单台失效状态);

(4) 进场阶段下飘速度数据;

(5) 等待航线飞行速度数据;

(6) 最大持续飞行速度数据;

(7) 久航速度数据(LRC);

(8) 最大爬升角爬升速度数据;

(9) 最大爬升率爬升速度数据;

(10) 襟翼/缝翼/起落架使用状态下的速度;

(11) 最大飞行高度(所有发动机失效状态及单台失效状态);

(12) 起飞时间、燃油、起飞距离数据;

(13) 复飞时间、燃油、飞行距离数据;

(14) 备用飞行计划时间、燃油、飞行距离数据;

(15) 最优高度/最优梯度爬升下的重量数据;

(16) 燃油和重量间的关系数据。

3 机载性能数据库主要表结构

3.1 构建机载性能数据库飞行参数表结构

为了满足飞行管理轨迹预测和飞行进程性能数据计算调用需求,根据不同模式下的性能数学模型,性能手册、机组成员使用手册信息,以及轨迹预测、导引的需求,在机载性能数据库中设计以下飞行参数表结构项:

(1) 起飞阶段:根据不同的推力模式,在不同的机场气压高度、总重及初始爬升速度条件下,计算的飞行距离、时间和燃油消耗量;

(2) 爬升阶段:根据不同的爬升模式,在不同的机场气压高度、总重、指示空速/马赫数、温差条件下,计算的飞行距离、时间和燃油消耗量;

(3) 巡航阶段:根据不同的爬升模式,在不同的高度、总重、指示空速/马赫数、温差条件下,计算的燃油流量、距离和时间;

(4) 下降阶段:根据不同的爬升模式,在不同的高度、总重、指示空速/马赫数、温差以及垂直路径角(VPA 角)条件下,计算的燃油流量、距离和时间;

(5) 进近阶段:在机场气压高度、总重及最终下降速度条件下,计算的飞行距离、时间和燃油消耗量。

3.2 构建机载性能数据库起飞与着陆阶段 V 速度表结构

为了满足飞行管理在起飞、着陆阶段的机组人

员操作功能,根据起飞和着陆 V 速度性能数学模型、飞行性能手册和机组成员使用手册提供的性能资料,在机载性能数据库起飞与着陆 V 速度组成部分,设计以下表结构项:

(1) 在坡度、风速条件下,计算的平衡场长 (BFL);

(2) 在起飞推力、跑道道面状态、襟翼构型、温度、气压高度、跑道坡度、风速净空道、停止道等条件下,计算的起飞决断速度 V_1 ;

(3) 在温度、气压高度条件下,计算的最小决断速度 V_1 ;

(4) 在总重、温度、气压高度条件下,计算的最大刹车能量速度;

(5) 在起飞推力、襟翼构型、温度、气压高度条件下,计算的抬轮速度 V_R ;

(6) 在起飞推力、襟翼构型、温度、气压高度条件下,计算的起飞安全速度 V_2 ;

(7) 在气压高度、温度条件下,计算的最终起飞安全速度 V_{fto} ;

(8) 在推力状态、道面状态、襟翼构型、气压高度、跑道长度、外界环境温度条件下,计算的越障与爬升最大重量限制;

(9) 在坡度、风速条件下,计算的着陆场长;

(10) 在重量、气压高度、襟翼构型条件下,计算的襟翼速度。

4 性能数据库性能参数计算过程用例分析

以大型客机波音 787 训练手册提供的起飞阶段 V_1 、 V_R 、 V_2 速度数据为例,组成机载性能数据库起飞阶段部分数据表,分别描述和分析 V_1 、 V_R 、 V_2

性能参数计算用例的流程。

以 V_1 速度为例:

(1) 确定 V_1 速度的参数维度:跑道状态、跑道坡度、机场标高、风速、温度、重量、襟翼状态、净空道、停止道。

(2) 主要计算方法:一元多项式插值算法和二元多项式插值算法。

将 V_1 速度的多维输入参数与计算结果,转化成二维形式的表 2~表 6 内容,使用一元多项式插值算法和二元多项式插值算法,计算流程为

①确定起飞跑道状态(干或湿状态),如果跑道为干状态,使用表 2~表 5 干状态相关部分数据进行计算;如果跑道为湿状态,使用表 2~表 5 湿状态相关部分数据进行计算。②根据襟翼伸展角度、起飞重量和跑道状态,确定 V_1 速度基本数据,如表 2 所示。③根据气温、气压高度和跑道状态,确定相应的 V_1 速度调节量,由步骤②得到的 V_1 速度基本数据和本 V_1 速度调节量相加,如表 3 所示。④根据跑道坡度、风速、起飞重量和跑道状态,确定相应的 V_1 速度调节量,由步骤③得到的 V_1 速度数据和本 V_1 速度调节量相加,如表 4 所示。⑤根据净空道、停止道和跑道状态,确定相应的 V_1 速度调节量,由步骤④得到的 V_1 速度数据和本 V_1 速度调节量相加,计算得到 V_1 速度数据,如表 5 所示。⑥根据温度、气压高度和跑道状态,确定 V_1 (MCG),如表 6 所示。

(3) 将 V_1 速度数据计算结果与 V_1 (MCG) 比较,必须满足 V_1 速度数据大于或等于 V_1 (MCG),得到合理的 V_1 速度最终数据。

V_R 、 V_2 速度计算过程描述与 V_1 类似, V_1 、 V_R 、 V_2 速度计算流程图如图 1 所示。

表 2 V_1 、 V_R 、 V_2 起飞速度(干跑道/湿跑道)

Table 2 V_1 、 V_R 、 V_2 takeoff speed(dry runway/wet runway)

跑道状态	重量/(10 ³ lb)	襟翼 5°			襟翼 15°			襟翼 20°		
		V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2
干跑道	540	165	170	174	160	163	168	153	156	161
	500	159	162	168	153	156	162	147	149	155
	460	154	157	164	148	151	158	142	144	151
湿跑道	540	160	170	174	154	163	168	147	156	161
	500	152	162	168	146	156	162	139	149	155
	460	145	157	164	140	151	158	133	144	151

注:①检查 V_1 (MCG) 和/或最小 V_R ;② V_1 、 V_R 、 V_2 的单位为节,下同。

表 3 温度、气压高度对 V_1 、 V_R 、 V_2 的调节数据(干跑道/湿跑道)

Table 3 Temperature, pressure altitude adjustment data to V_1 、 V_R 、 V_2 (dry runway/wet runway)

跑道状态	温度/°C	气压高度/(10 ³ ft)																				
		-2			0			2			4			6			8			10		
		V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2
干跑道	40	1	1	-1	2	1	-1	3	2	-1	5	3	-1	6	5	-2	8	6	-2	9	7	-3
	30	0	0	0	0	0	0	2	1	-1	3	2	-1	5	3	-1	6	5	-2	8	6	-2
	20	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	0	3	2	-1	5	3	-1	6	5	-2
	-60	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	0	3	2	-1	4	3	-1	5	4	-1
湿跑道	40	2	1	-1	2	1	-1	4	2	-1	6	3	-1	9	5	-2	11	6	-2	13	7	-3
	30	0	0	0	0	0	0	2	1	0	4	2	-1	6	3	-1	8	5	-2	11	6	-2
	20	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	0	4	2	-1	6	3	-1	8	5	-2
	-60	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	0	3	2	-1	4	3	-1	6	4	-1

注: V_1 不能超过 V_R 。

表 4 跑道坡度、风速对 V_1 的调节数据(干跑道/湿跑道)

Table 4 Runway gradient, wind speed adjustment data to V_1 (dry runway/wet runway)

跑道状态	重量/(10 ³ lb)	V_1												
		坡度/%						风速(KIAS)						
		-2	-1	0	1	2	-15	-10	-5	0	10	20	30	40
干跑道	540	-4	-2	0	2	3	-3	-2	-1	0	1	1	2	2
	500	-4	-2	0	1	2	-3	-2	-1	0	0	1	1	1
	460	-3	-2	0	1	1	-2	-1	-1	0	0	0	1	1
湿跑道	540	-2	-1	0	1	2	-15	-10	-5	0	10	20	30	40
	500	-6	-3	0	2	5	-4	-3	-1	0	0	1	2	2
	460	-5	-2	0	2	5	-4	-2	-1	0	1	1	2	3

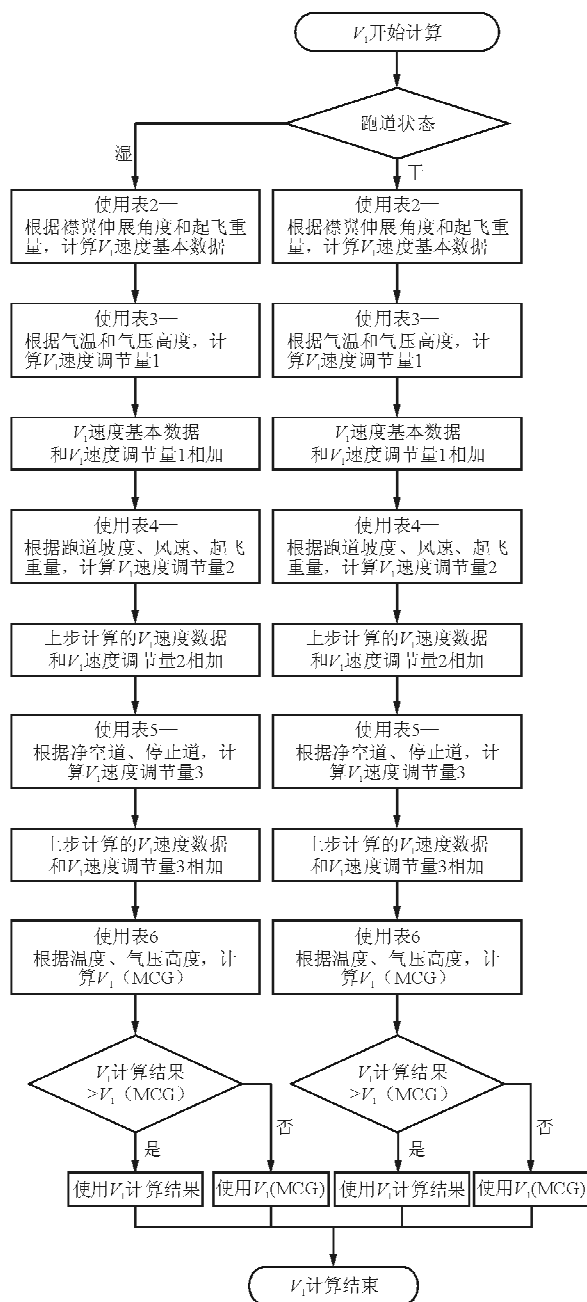
表 5 净空道和停止道参数对于 V_1 的调节数据

Table 5 Clearway and stopway adjustment data to V_1

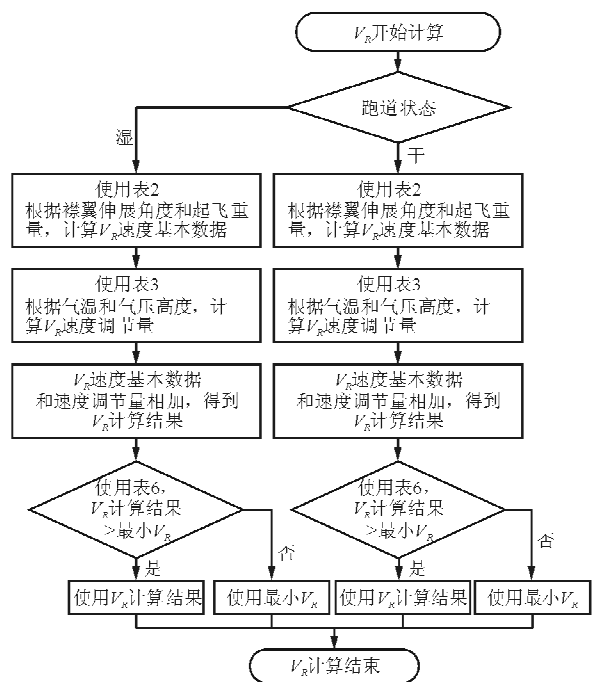
净空道减去停止道/ft	干跑道正常 V_1 (KIAS)			湿跑道正常 V_1 (KIAS)			
	120	140	160	100	120	140	160
0	0	0	0	0	0	0	0
-200	6	2	0	2	2	1	1
-400	7	3	1	4	3	2	1
-600	7	3	0	5	4	3	2
-800	7	4	0	6	5	3	2
-1 000	7	4	0	7	6	4	2

表 6 V_1 (MCG)和最小 V_R 数据(干跑道/湿跑道)
Table 6 V_1 (MCG)and minimum V_R (dry runway/wet runway)

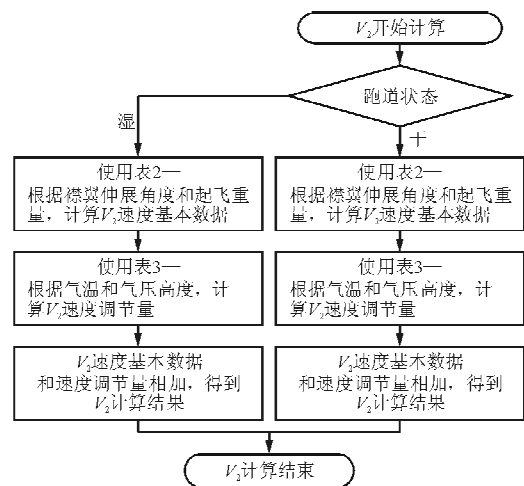
跑道状态	温度/°C	跑道的标准海拔高度/ft											
		-2 000		0		2 000		4 000		6 000		8 000	
		V_1 (MCG)	min V_R	V_1 (MCG)	min V_R	V_1 (MCG)	min V_R	V_1 (MCG)	min V_R	V_1 (MCG)	min V_R	V_1 (MCG)	min V_R
干跑道	40	122	130	121	129	116	124	111	119	105	114	101	110
	30	128	136	126	135	121	130	116	125	111	120	107	115
	20	133	142	132	141	126	135	120	129	116	125	112	120
	-60	135	143	134	142	128	137	122	130	118	126	115	123
湿跑道	40	122	130	121	129	116	124	111	119	105	114	101	110
	30	128	136	126	135	121	130	116	125	111	120	107	115
	20	133	142	132	141	126	135	120	129	116	125	112	120
	-60	135	143	134	142	128	137	122	130	118	126	115	123



(a) V_1 计算流程



(b) V_R 计算流程



(c) V_2 计算流程

图 1 $V_1/V_R/V_2$ 计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of $V_1/V_R/V_2$

上述各个性能表数据的构建与处理流程很容易在飞行管理机载软件中实现,由于插值算法属于线性算法,实时响应快、算法稳定,表格数据的修正或更改可以单独进行,不影响飞行管理性能计算或管理主模块的运行,耦合度低,对飞行管理机载软件的开发、移植与软件工程维护起到很好的支持作用。

5 机载性能数据库数据文件生成和管理

将每项性能计算形成的数据表格,转化成性能数据文件,以机载性能数据库形式存储在机载综合处理机中,机载性能数据库数据文件组成如图 2 所示,飞行管理机载软件可以根据各种需求调取机载性能数据库中的数据文件,完成各种功能。

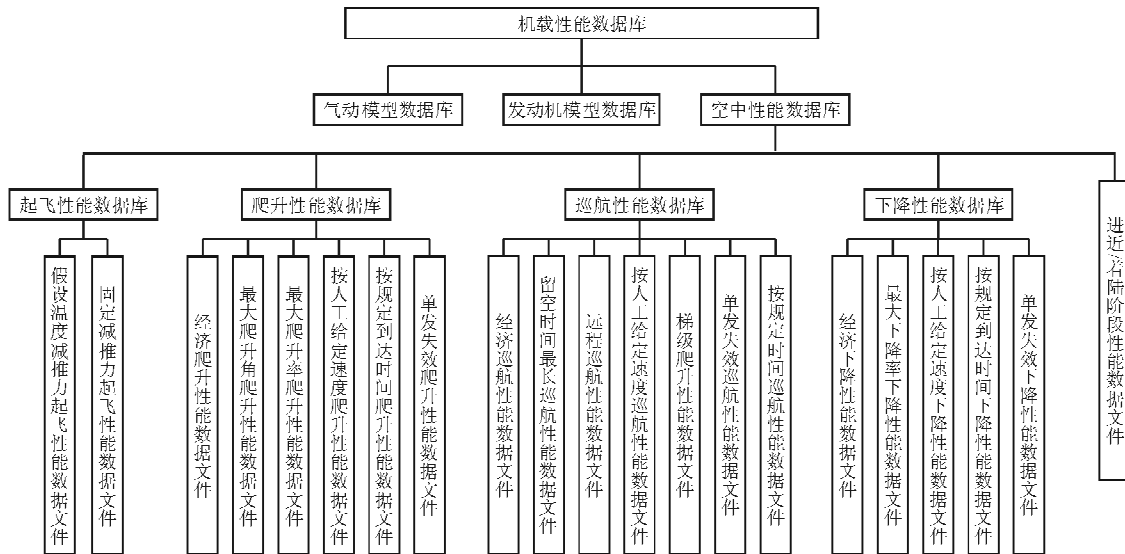


图 2 机载性能数据库结构

Fig. 2 Structure of airborne performance database

飞行管理系统组成(含加载机载性能数据库功能)如图 3 所示。

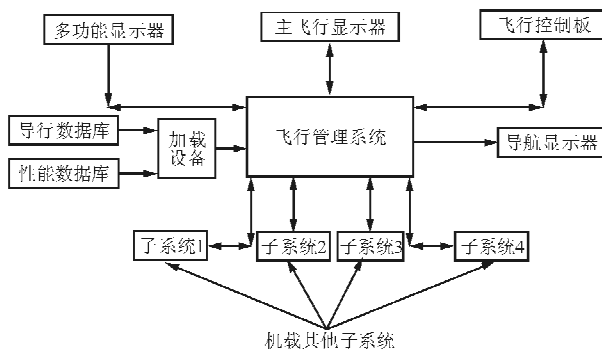


图 3 机载性能数据库加载系统组成

Fig. 3 Loading system composition of airborne performance database

在此系统中,机载性能数据库数据文件生成、加载及应用过程如下:

(1) 针对某飞机型号,根据飞行性能理论,在地面建立完整的解析计算模型;

(2) 利用地面软件工具,计算得到一套完整的性能数据;

(3) 根据用户关于某飞机型号飞行管理对飞行性能提出的各种应用需求,对各种飞行性能数据进行分类和整理;

(4) 按照图 2 转换生成完整的机载性能数据库文件;

(5) 在地面生成机载性能数据库文件后,可以操作加载设备与机载总线传输系统^[6],在飞行管理计算机和显控系统共同工作下,加载到飞行管理系统中;

(6) 在机载飞行管理性能计算时,实时管理机载性能数据库数据文件,对性能数据文件按照需求进行读文件操作,调取需要的性能数据文件,然后进行性能数据的索引、查询、插值或其他计算;

(7) 计算结果为飞行管理轨迹预测、垂直导引提供输入,同时将有关性能数据进行显示。

机载性能数据库数据文件生成、加载及应用过

程如图 4 所示。

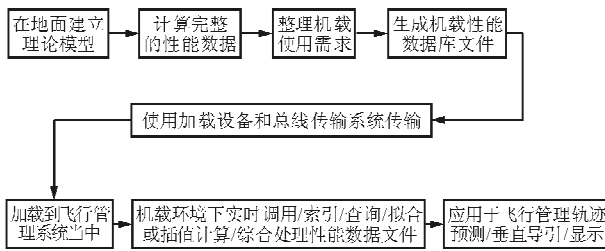


图 4 机载性能数据库数据文件生成、加载和管理过程

Fig. 4 Data files generating, loading and management course of airborne performance database

6 结束语

飞机性能模型数据量庞大,性能计算过程非常繁杂,涉及到整个飞行过程。因此,在飞行管理系统中,研究高效率的性能管理和性能计算过程十分必要。采用性能数据库管理方式,为飞行管理系统的性能计算模块及轨迹预测、垂直导航模块的标准化设计、机载软件工程化开发、系统试验及验证提供了必要条件。

参考文献

- [1] 钦铁生. 飞行管理计算机系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
Qin Tiesheng. Flight management computer system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [2] 黄太平. 飞机性能工程[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Huang Taiping. Aircraft performance engineering[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 伊恩·莫伊尔, 阿伦·西布里奇. 民用航空电子系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
Lan Moir, Allan Seabridge. Civil avionics systems[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [4] 金德琨, 敬忠良, 王国庆, 等. 民用飞机航空电子系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
Jin Dekun, Jing Zhongliang, Wang Guoqing, et al. Civil

aircraft avionics systems[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992. (in Chinese)

- [5] C. R. 斯比策. 数字航空电子技术[M]. 谢文涛, 等译. 北京: 航空工业出版社, 2010.
Cray R Spitzer. Digital avionics handbook — avionics elements, software and functions[M]. Xie Wentao, et al. translated. Beijing: Aviation Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [6] ARINC 公司. 先进飞行管理计算机系统规范[S]. 美国 ARINC 公司, 2000.
ARINC company. The advanced flight management system criterion[S]. America ARINC Company Press, 2000. (in Chinese)
- [7] 美国联邦航空局. 飞机飞行手册[M]. 陈新河, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
Federal Aviation Administration. Airplane flying handbook [M]. Chen Xinhe, translated. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010. (in Chinese)
- [8] 美国航空无线电技术委员会. DO-178B 机载系统和设备合格审定中的软件考虑[S]. 美国: 1992.
Radio Technical Commission for Aeronautics. DO-178B software considerations in airborne system and equipment certification[S]. USA: 1992. (in Chinese)
- [9] 王勇领. 系统分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
Wang Yongling. Systems analysis and design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991. (in Chinese)
- [10] 徐明友, 丁松滨. 飞行动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Xu Mingyou, Ding Songbin. Flight dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:

钱向农(1969—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空电子系统设计、飞行管理系统设计。

杨丰辉(1981—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空电子系统机载软件设计和开发。

阎良民(1972—),男,高级工程师。主要研究方向:航空电子系统验证和测试。

(编辑:马文静)