

2-15-2019

Modular Design Method of Integrated Avionics Simulation System

Mingbo Zhao

Flight Simulation Technology Research Institute, Troop 93199 of PLA, Harbin 150001, China;

Pan Long

Flight Simulation Technology Research Institute, Troop 93199 of PLA, Harbin 150001, China;

Longwei Jiang

Flight Simulation Technology Research Institute, Troop 93199 of PLA, Harbin 150001, China;

Wang Gang

Flight Simulation Technology Research Institute, Troop 93199 of PLA, Harbin 150001, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modular Design Method of Integrated Avionics Simulation System

Abstract

Abstract: In the past, there were some problems in the software design for the flight simulation avionics system such as the decentralized structure and the low degree of modularization. Aiming at these problems, a hierarchical, modular integrated avionics system is constructed. *The logic part dispersed in each function module is independent to form the integrated logic module. Each task function module and its sub module are responsible for the calculation of the relevant task function algorithm. Modular design is carried out in a deeper level.* By dataflow analysis, each module in this design has strong cohesion and weak coupling and strong independence. The whole design structure is reasonable; the program is understandable and readable; and the software is reliable and maintainable.

Keywords

flight simulation, software design, integrated avionics, modular, hierarchical

Authors

Mingbo Zhao, Pan Long, Longwei Jiang, Wang Gang, and Guangxing Zhao

Recommended Citation

Zhao Mingbo, Pan Long, Jiang Longwei, Wang Gang, Zhao Guangxing. Modular Design Method of Integrated Avionics Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(2): 339-345.

一种综合航电仿真系统的模块化设计方法

赵明波, 潘龙, 蒋龙威, 王纲, 赵广兴

(93199 部队飞行仿真技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对以往飞行仿真航电系统软件设计中存在的结构分散、模块化程度不高的问题, 构建一个层次化、模块化的综合航电系统。把分散于各个功能模块中的逻辑解算部分独立出来, 形成综合逻辑解算模块, 各个任务功能模块及其子模块专门负责相关任务功能算法的解算, 并在更深层次上进行模块化设计。通过数据流分析, 该设计中的各个模块具有较强的内聚性和较弱耦合性, 独立性较强。该系统整体设计结构合理, 程序可理解性、可读性好, 软件可靠性、可维护性强。

关键词: 飞行仿真; 软件设计; 综合航电; 模块化; 层次化

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 02-0339-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0079

Modular Design Method of Integrated Avionics Simulation System

Zhao Mingbo, Pan Long, Jiang Longwei, Wang Gang, Zhao Guangxing

(Flight Simulation Technology Research Institute, Troop 93199 of PLA, Harbin 150001, China)

Abstract: In the past, there were some problems in the software design for the flight simulation avionics system such as the decentralized structure and the low degree of modularization. Aiming at these problems, a hierarchical, modular integrated avionics system is constructed. The logic part dispersed in each function module is independent to form the integrated logic module. Each task function module and its sub module are responsible for the calculation of the relevant task function algorithm. Modular design is carried out in a deeper level. By dataflow analysis, each module in this design has strong cohesion and weak coupling and strong independence. The whole design structure is reasonable; the program is understandable and readable; and the software is reliable and maintainable.

Keywords: flight simulation; software design; integrated avionics; modular; hierarchical

引言

飞行模拟器是现代航空科研、教学、试验等不可缺少的技术设备, 在飞行性能研究^[1]、飞行品质评估^[2]和飞行训练^[3]与战术对抗等方面都具有很高的经济价值和军事价值。飞行仿真则是通过构造反应实际的飞机运动行为特性的数学模型, 在仿真载

体(计算机或其他仿真设备构成的飞行模拟器)上复现飞机的复杂活动^[4]。其中, 综合航电系统是飞行仿真中的重要组成部分, 一般由雷达、任务计算机、武器及外挂物管理、惯导、大气数据机、电子战系统、通讯导航识别系统、显控系统、备份仪表等组成^[5-6]。软件的层次化、模块化设计是飞行仿真软件设计的重要方法^[7]。

在以往的飞行仿真航电系统软件设计中, 限于硬件计算资源和总体设计方案, 航电系统的各个功能模块分散于多个计算机中, 逻辑关系和通信结构复杂, 给软件调试和维护带来不便。且以往的技术



收稿日期: 2017-02-16 修回日期: 2017-04-06;
作者简介: 赵明波(1983-), 男, 河南辉县, 博士, 工程师, 研究方向为飞行仿真; 潘龙(1980-), 男, 黑龙江哈尔滨, 硕士, 工程师, 研究方向为飞行仿真; 蒋龙威(1988-), 男, 辽宁朝阳, 硕士, 工程师, 研究方向为飞行仿真。

<http://www.china-simulation.com>

讨论和设计中多限于航电系统、功能模块的层次化、模块化划分,更多侧重于较高层次,对更底层的模块化设计重视不够。本文旨在通过层次化、模块化的软件设计方法,把分散于多个计算机中的各个功能模块综合为一个航电系统仿真软件,重新划分为系统、功能模块、子功能模块、构件 4 个层次,遵循模块内强内聚、模块间松耦合的原则,通过多个独立性较强的模块实现,使整个综合航电系统的结构更合理,数据流更清晰,提高软件的可靠性、可维护性、可复用性。

1 综合航电仿真系统

1.1 存在问题

现代飞行仿真系统集成多种学科知识为一体,涉及到的仿真模型和软件非常多,需要用软件工程设计思想来管理和协调,这样必须使全系统的软件层次化和模块化。为了将仿真软件描述清楚,便于集体开发、测试、集成、扩展、联网,一般将软件分成 3 级结构^[7]:系统级,分系统级,功能模块级,如图 1 所示。综合航电系统属于分系统级,按照功能可划分为综合逻辑解算、综合导航、电子对抗、火控、显控等若干个功能模块。但在航电系统仿真软件以往的设计中,主要存在以下问题:

(1) 整体设计结构分散。限于硬件计算资源和总体设计方案,航电仿真软件的各个功能模块分布于多台计算机中,除显控模块控制多个显示设备需要独立实现外,航电解算(航电系统各类任务功能的计算)功能分散于多台计算机中,通过反射内存卡或以太网相互连接实现数据传输,不仅整体设计结构分散,也增加了出错的风险。

(2) 逻辑解算结构不清晰。受整体设计结构影响,与控制单元密切相关的各个功能模块的逻辑解算部分也分布于多台计算机的仿真软件中,造成逻辑解算结构不清晰,部分地方还存在重复解算的问题。

(3) 调试不便且出现问题不易查找。整体设计

结构分散和逻辑解算结构不清晰的问题,直接增加了在软件调试阶段的复杂性。例如要追踪逻辑解算过程中的某个变量就需要到各个功能模块中查找。结构分散在增加出错风险的同时,也造成了一旦出现问题,根源难以查询的现象。

(4) 模块化程度不高。在各个功能模块的更深层次、更底层的模块化设计与实现上存在不足,给各个功能模块的调试、更换、扩充、升级更加不便,可维护性较低。

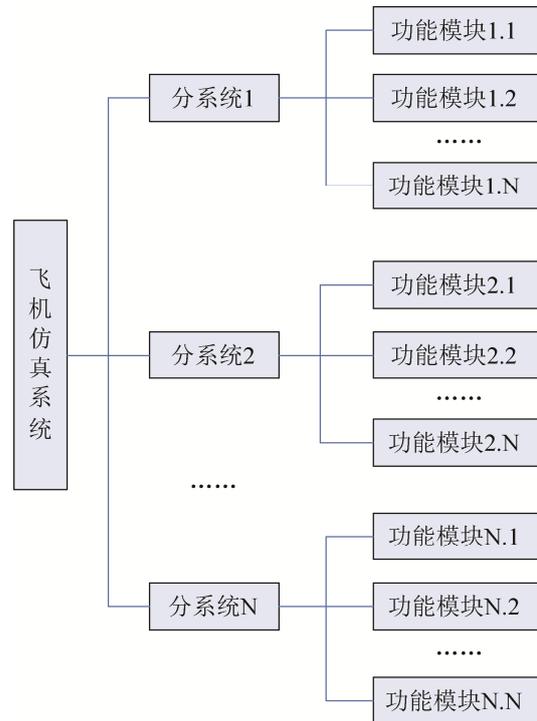


图 1 飞行仿真系统软件组成

Fig. 1 Software composition of flight simulation system

1.2 软件模块化设计

模块化理论源于分工思想,是在产业发展过程中逐步呈现出来的一种用于解决复杂系统问题的方法^[8]。模块化软件是模块化概念和理论在软件设计中的应用,是软件开发的一种重要技巧,在计算机技术中称之为“模块化程序设计”^[9]。在软件设计中引入模块化方法对于以效率为导向的软件开发过程主要有以下优势:在需求分析阶段,可以很好的降低开发者与用户间沟通的难度,对整个系统

和每个模块的功能认识更清晰; 在软件设计阶段, 使搭建大型复杂软件系统架构的工作更为方便, 结构规划更合理; 在软件编码实现阶段, 减少了重复编码, 提高了可复用性和标准化水平, 大大提升了开发效率; 在软件部署阶段, 实现灵活动态、分批次部署, 节省时间并降低了成本; 在软件维护阶段, 降低了维护成本, 缩短了维护时间, 提高了可靠性和可维护性。

尽管模块化的概念和理论引入计算机软件领域、并被采用已有五十余年历史, 但对软件模块化的认识和实践在深度和广度上还需要不断发展, 尤其在软件的系统设计和为解决特定问题的大型应用程序的编制中, 模块化设计运用的水平, 更将影响到软件开发的效率、质量和可维护性。在大型软件设计中, 系统设计的主要任务是确定系统由哪几部分组成, 以及各部分之间的关系。通过合理组织各个部分的关系, 使之既能够减少软件的生命周期费用(Life Cycle Cost, LCC)和系统复杂度, 同时又能在既定的约束条件下增强软件的复用性和经济可负担性。软件系统结构设计一般由两个阶段组成, 即总体设计和详细设计^[9]。总体设计是确定系统的层次化、模块化结构, 它包括以下工作: 如何将一个系统划分为多个模块; 如何确定模块间的接口; 如何评价模块划分的质量。详细设计则主要是对模块过程的说明和语言描述, 保证模块任务功能的实现。软件的总体设计是结构设计(表现各模块之间的组成关系), 属于显性设计; 软件的详细设计是软件模块内的过程设计, 一般属于隐性设计, 即“黑盒设计”。

2 层次化、模块化设计

2.1 系统描述

按照飞行仿真中的一般划分, 在整个飞行模拟器系统中, 综合航电系统主要包括航电解算分系统和显控分系统^[11]。航电解算分系统主要完成航电系统的综合逻辑解算和各类任务功能的算

法计算, 显控分系统主要完成玻璃仪表相关数据的处理及其显示。其中航电解算分系统一般负责综合逻辑解算、火控任务解算、外弹道解算、外挂管理、雷达、综合导航、电子对抗等系统的仿真; 显控分系统一般控制显示平显(Head Up Display, HUD)、多功能显示器(Multi-Function Display, MFD)及其他玻璃仪表的画面。图 2 所示为综合航电系统与整个飞机飞行模拟器系统的关系图, 航电解算分系统分别从座舱控制分系统得到座舱内各个控制单元的开关采集数据, 从飞行性能分系统得到飞机各个维度的飞行和性能数据, 从教员台分系统得到各种特情、环境等其他设置量数据。经过航电解算后, 分别输出到显控分系统并通过 MFD、HUD 及其他玻璃仪表进行显示, 输出到仪表控制分系统并通过对表、空速表、应急地平仪、升降速度表、发动机转速表等机电仪表显示, 以及其他需要输出的数据, 如视景生成、三维态势、状态监控、声音等分系统。

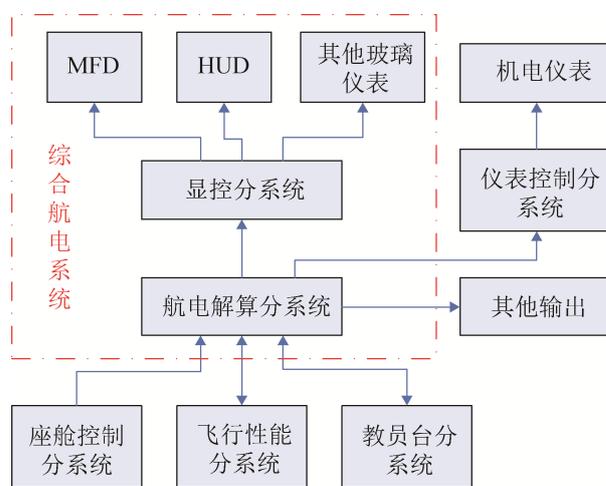


图 2 综合航电系统与整个模拟器结构的关系图

Fig. 2 Relationship between integrated avionics system and the whole simulator

需要注意的是, 广义上讲座舱仪表显示也属于综合航电系统的范畴, 但飞行模拟器中采用的机电仪表, 其控制仅是把综合航电系统的解算结果, 通过网络发送到仪表控制计算机, 仪表控制计算机将相应数据转换后, 发送到仪表驱动设备, 驱动仪表

将相关信息显示出来,因此,这里把其归类为仪表控制分系统的内容,本文不再详述。显控分系统一般是把航电解算分系统的运算结果画图显示在各个显示单元上,虽然飞行仿真中一般把其归类为综合航电系统,但由于其不涉及到航电系统本身的功能解算,所以本文的综合航电系统主要指图 2 中的航电解算分系统,对显控分系统不做详细讨论。

2.2 层次化、模块化结构

为解决航电系统仿真软件设计中存在的整体设计结构分散、逻辑解算结构不清晰、模块化程度不高等问题,对航电解算部分进行重新设计规划,构建一个综合航电解算系统(如图 3),把原来分散于多个计算机中的各个功能模块通过一个单独的系统软件实现,具有统一的对外输入输出接口。

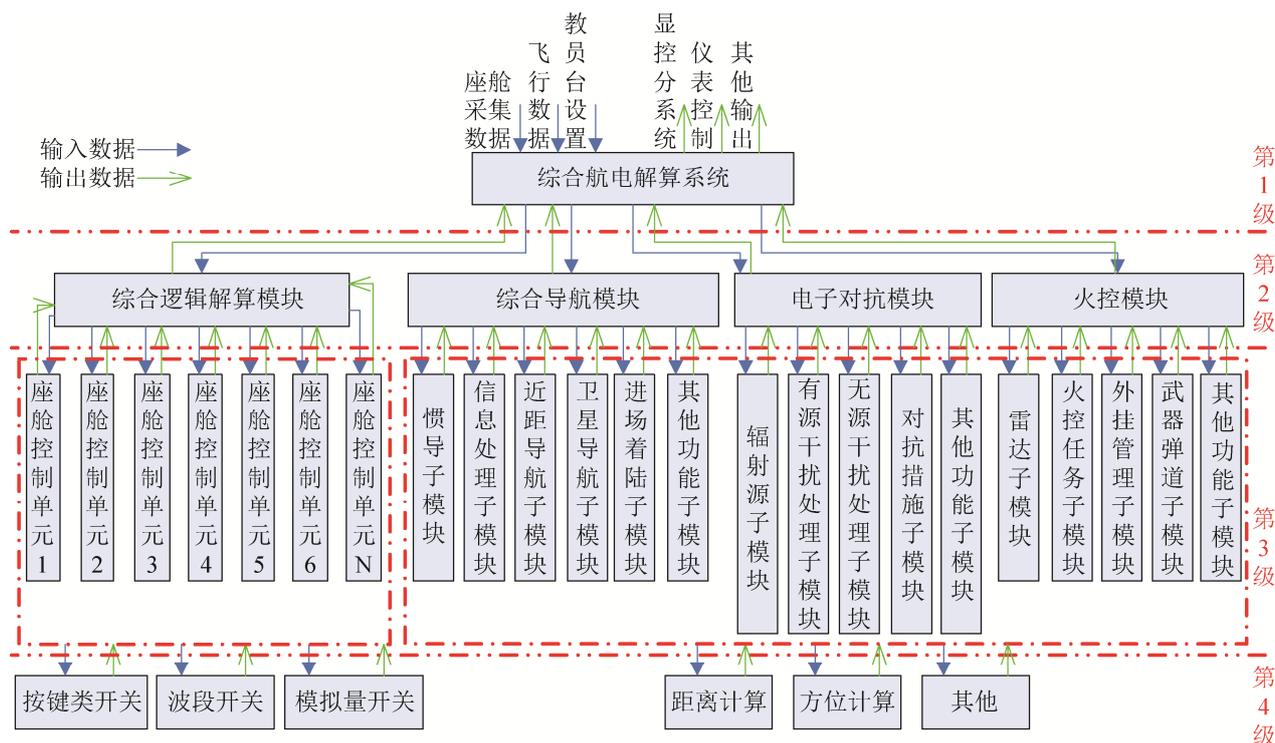


图 3 综合航电解算系统的层次化、模块化设计图

Fig. 3 Hierarchical and modular design of integrated avionics system

按照模块化、层次化的设计思想,根据要实现的任务功能由粗到细、由上至下分为 4 个层级(第 1 级:系统;第 2 级:功能模块;第 3 级:子模块;第 4 级:构件)。综合航电解算系统下包括综合逻辑解算模块、综合导航模块、电子对抗模块、火控模块等多个 2 级模块。把原来分散于各个功能模块中的逻辑解算功能分解出来,并形成统一的综合逻辑解算模块,专门负责整个航电系统的逻辑解算与控制,其他 2 级模块专门负责相关任务功能算法的运算。第 1 级的综合航电解算分系统负责各个 2 级模块之间的协调运行和对外其他分系统的数据

输入输出。

综合逻辑解算模块按照不同机型座舱结构和相关控制单元功能分为各个不同的座舱控制单元子模块,负责各个控制单元内部的逻辑解算,各个控制单元之间的逻辑关系在综合逻辑解算模块层级实现,各个控制单元均由第 4 级的 3 种开关类构件组成。一般座舱控制单元均由按键类开关、波段开关和模拟量开关组成,控制单元上的开关信号一般通过现场总线进行处理,处理结果由座舱控制分系统发送给综合航电分系统。

按照任务功能的不同,综合导航模块、电子对

抗模块、火控模块则分别细分为如图 3 中所示的各个子模块, 如果是民用机型, 则可能不需要电子对抗模块和火控模块, 也可根据需要添加其他 2 级模块。其中, 综合导航模块一般包括惯导子模块、信息处理子模块、近距导航子模块、卫星导航子模块、进场着陆子模块和其他功能子模块。电子对抗模块一般包括辐射源子模块、有源干扰处理子模块、无源干扰处理子模块、对抗措施子模块和其他功能子模块。火控模块一般包括雷达子模块、火控任务子模块、外挂管理子模块、武器弹道子模块和其他功能子模块。第 2 级的功能模块负责对其相应的功能子模块进行输入输出数据处理及共性内容的解算, 第 3 级的各个功能子模块负责相关任务功能的解算, 其中其他功能子模块表示根据所模拟的实际机型进行设计, 可独立进行增减、修改。在这些子模块的构建中都用到了第 4 级的距离计算类、方位计算类构件和其他类构件。

2.3 关键技术

通过以上对综合航电解算系统的层次化、模块化设计, 使航电系统的整体设计结构更合理、逻辑解算结构更清晰, 程序可理解性、可读性更好, 软件可靠性、可维护性更强。主要存在以下特点:

(1) 以所模拟机型座舱内各个控制单元为单位进行逻辑解算子模块的划分, 便于与座舱控制分系统进行联合调试, 同时也方便随机型座舱设备的改变而更改。

(2) 把综合逻辑解算与各个任务功能模块相分离, 把与任务功能模块相关的控制逻辑统一到综合逻辑模块, 更便于任务功能模块算法的调试和改进, 且任务功能模块在不同机型间具有一定的通用性, 软件可复用性更强。

(3) 模块间功能相对独立, 利于各个模块的接口标准化。采用标准接口, 开发功能程序时不必过多地考虑与功能模块相关联的座舱设备接口, 同时能增加软件的开放性、提高可复用性, 从而有助于降低软件 LCC 和开发难度。

(4) 综合化后整个软件用同一高分辨率时钟控制实时性, 避免了原来分散结构设计时多个分布式计算机时钟之间的实时性误差, 同步效果和实时性更好。

3 数据流分析

模块的独立性表示具有单一功能, 并且和其它模块没有过多联系的特性, 一般通过“内聚度”和“耦合度”这两个定性指标来度量^[9]。通过对图 3 中的系统结构进行数据流分析, 理清各个层级模块间的关系, 进一步分析各个模块的独立性。

3.1 数据流分析

如图 3 所示, 蓝色小箭头表示各个模块的输入数据, 绿色大箭头表示输出数据。整个飞行仿真系统的其他分系统(如座舱控制分系统、飞行性能分系统、教员台分系统等)输入至航电系统的数据通过综合航电解算系统整理后分发至各个 2 级功能模块。其中, 座舱采集数据进一步经过综合逻辑解算模块整理后分发给各个控制单元子模块, 各个控制盒单元子模块由组成的开关类构件对输入开关量解算, 解算后输出至控制单元子模块进行内部逻辑解算。控制单元子模块进一步把解算结果输出至综合逻辑解算模块, 由综合逻辑解算模块汇总整理后输出至综合航电解算分系统, 控制其他 2 级模块算法的运行和输出至其他分系统。综合导航模块、电子对抗模块和火控模块则进一步把输入数据整理分发给各个任务功能子模块, 并控制各个子模块之间的协调运行, 各个子模块通过任务功能算法运算后把结果输出至对应的 2 级模块, 2 级模块整理后输出至综合航电解算系统。最后综合航电解算系统对各个 2 级功能模块的输出数据汇总整理后, 输出至其他系统(如显控分系统、仪表控制分系统及其他需要输出数据的分系统等), 构成数据的输入输出回路。

需要注意的是, 在综合航电系统仿真软件层次化、模块化设计过程中, 遵循了以下原则: (1)同

级模块之间的逻辑运算关系和数据交互在其上一级模块中进行,尽量减少通过全局变量进行数据交互,使数据交互更集中,方便管理和查询;(2)模块化设计时尽量使各个模块功能单一化、接口完善,方便程序修改和软件升级。

3.2 模块独立性

按照文献[9]中内聚度和耦合度的分类方法^[9],对图 3 中的各级模块的内聚度、耦合度进行分析。其中,第 4 级模块属于功能内聚类型和非直接耦合类型,具有最强的内聚性和最弱的耦合性,其包括了完成一个功能所具有的所有成分,其输出结果完全不依赖于同级其他模块,同级两个模块间没有任何联系,它们之间的联系完全由其上一级模块的控制单元调用来实现,独立性最强,甚至可以作为公用(标准)程序库,在不同机型飞行模拟器设计时实现程序共享。

第 3 级模块的情况较为复杂,总体上以功能内聚类型为主,顺序内聚类型为次;耦合度属于非直接耦合。其中,隶属于综合逻辑解算模块的各个 3 级子模块中个别属于顺序内聚类型,这是由不同机型座舱内的控制单元结构和飞行操作逻辑决定的;耦合关系上,个别模块间虽然有数据交互,但依然只能由其上一级模块来调用和协调,同级模块间没有直接联系。隶属于综合导航模块、电子对抗模块和火控模块的各个 3 级子模块仍然属于功能内聚类型,独立完成某一航电任务功能算法的运算;模块间无直接联系,共同为上一级模块的任务功能服务,独立性很强。

第 2 级模块中,综合逻辑解算模块兼具逻辑内聚类型和顺序内聚类型的特点,模块内各个子模块都是为了完成综合航电系统的控制逻辑解算而组成的;但个别子模块间又有一定的顺序关系,其与飞行操作有关。其他 3 个 2 级模块属于功能内聚类型,具有独立完成某一单一功能的特性,只是所完成的功能更加复杂而已。耦合度上,综合逻辑解算模块与其他 3 个 2 级模块间属于控制耦合类型,对

其具有逻辑控制功能,控制部分或全部任务功能的运行。其他 3 个 2 级模块间属于非直接耦合类型,相互间没有直接联系,独立性较强。

由上分析可知,在图 3 中的综合航电仿真系统层次化、模块化设计中,最底层的第 4 级构件类模块具有最强的内聚性和最弱的耦合性,独立性最强。由下至上,随着层级升高,模块功能和数据流更复杂,模块的内聚性渐弱、耦合性渐强,独立性有所降低。但总体上讲,通过本文的层次化、模块化设计,使飞行仿真中的综合航电系统仿真软件的各个模块具有较强的独立性,可使软件设计、调试、维护等过程更加容易和方便。

4 结论

综合航电系统是飞行仿真中的重要组成部分,软件的层次化、模块化设计方法是飞行仿真软件设计中的重要方法。针对以往飞行仿真中在航电系统上存在的结构分散、模块化程度不高等问题,用层次化、模块化的软件设计思想和方法,构建了一个综合化的航电仿真系统,把综合逻辑解算模块与各个任务功能模块相独立,重新规划了各个任务功能模块及其子模块,并在更深层次上进行了模块化设计,使整体设计结构更合理,程序可理解性、可读性更好,软件可靠性、可维护性更强。通过数据流分析,各个模块具有较强的内聚性和较弱耦合性,独立性较强。本文方法所构建的综合航电系统仿真软件已基于 VC2008 编程实现,目前在某型飞机飞行模拟器中应用良好,为节省软件开发资源,提高软件开发效能提供了条件,也为飞行仿真中其他机型的综合航电系统设计与实现提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 徐奎. 民用飞机工程模拟器设计研究[J]. 科技资讯, 2013(8): 7-8.
Xu Kui. Design of Civil Aircraft Engineering Simulator [J]. Science & Technology Information, 2013(8): 7-8.
- [2] 饶秋磊, 崔益华, 韩意新. 飞行品质仿真计算与试飞数据对比分析[J]. 航空工程进展, 2014, 5(4): 521-528.
Rao Qiulei, Cui Yihua, Han Yixin. Comparison and

- Analysis of Flying Quality Simulation and Flight Test Data[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2014, 5(4): 521-528.
- [3] 胡建学, 范敏毅, 张万泽, 等. 飞行模拟器协同训练网络互操作仿真[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(8): 1795-1800.
Hu Jianxue, Fan Minyi, Zhang Wanzhe, et al. Simulation for Flight Simulator Cooperative Training Net[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(8): 1795-1800.
- [4] David Allerton. 飞行仿真原理[M]. 刘兴科译. 电子工业出版社, 2013: 1-12.
David Allerton. *Principles of Flight Simulation*[M]. Translated by Liu Xingke. Publishing House of Electronics Industry, 2013: 1-12.
- [5] 张红. 新一代综合航电系统的发展趋势[J]. *航空精密制造技术*, 2016(2): 1-4.
Zhang Hong. Development Trend of the New Generation Integrated Avionics System[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2016(2): 1-4.
- [6] 汪泓, 谢东来. 运输机飞行仿真技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 200-226.
Wang Hong, Xie Donglai. *Flight Simulation Technology and Application of Transport Plane*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 200-226.
- [7] 黄安祥. 现代军机先进仿真技术与工程设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 20-33.
Huang Anxiang. *Advanced Simulation Technology and Engineering Design of Modern Military Aircraft*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 20-33.
- [8] 万雪飞, 朱有为. 模块化软件开发的标准化内涵和优势分析[J]. *信息技术与标准化*, 2006(3): 38-41.
Wan Xuefei, Zhu Youwei. Implication of Standardization in Modularized Software Development and Its Predominance Analysis[J]. *Information Technology and Standardization*, 2006(3): 38-41.
- [9] 童时中. 模块化与计算机软件设计[J]. *标准化报道*, 1997, 18(4): 20-25.
Tong Shizhong. Modular Programming and Computer Software Designing[J]. *Reporting Standardization*, 1997, 18(4): 20-25.
- [10] 耿涛, 张安, 张耀中, 等. 空战模拟器综合火控系统仿真设计与实现[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(12): 2479-2483.
Geng Tao, Zhang An, Zhang Yaozhong, et al. Design and Realization of Integrated Fire Control Simulation System for Air-combat Simulator[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(12): 2479-2483.
- [11] 王志乐, 魏俊淦, 于辉. 基于元模型特性的机载显控系统建模方法[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(11): 2638-2643.
Wang Zhile, Wei Jungan, Yu Hui. Modeling Method of Airborne Display and Control System Based on Meta-model Features[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(11): 2638-2643.

(上接338页)

- [8] Lechevin N, Rabbath C A, Sicard P. Trajectory tracking of leader-follower formations characterized by constant line-of-sight angles[J]. *Automatica* (S0005-1098), 2006, 42(12): 2131-2141.
- [9] Sastry S. *Nonlinear systems: analysis, stability and control*[M]. New York: Springer, 1999.
- [10] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
Liu L. *Orbit theory of spacecraft*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.
- [11] 孙炳磊, 贺亮, 韩飞, 等. 静止轨道卫星高精度悬停编队最优滑模控制器设计[J]. *空间控制技术与应用*, 2016, 42(6): 9-13.
Sun B L, He L, Han F, et al. Optimal sliding mode control for geostationary satellite high-precision hovering formation flying[J]. *Aerospace Control and Application*, 2016, 42(6): 9-13.