飞控系统虚拟设计环境

秦旭东 陈宗基 高金源 黄浩东

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 开展面向设计的飞控系统虚拟原型机开发环境研究,提出了飞控系统虚拟设计环境的3层次结构:第1层为运行管理层,以数据库为基础,其核心为PDM(产品数据管理)软件.第2层为虚拟技术层,提供余度飞控计算机、舵回路、传感器等的虚拟原型的生成.第3层为仿真支持层,支持人在回路的仿真验证.分析了实现每层功能的关键技术,并基于该虚拟设计环境,完成了虚拟四余度飞控计算机的设计和验证,使该开发环境具有面向主要结构参数、性能参数、价格参数的虚拟余度飞控计算机系统生成功能.

关 键 词: 虚拟技术; 设计环境; 飞控计算机; 产品数据管理

中图分类号: V 247.1^{+}2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)12-1274-05

Virtual design environments of flight control system

Qin Xudong Chen Zongji Gao Jinyuan Huang Haodong

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Design-oriented virtual design environment of flight control system was established. The virtual design environment had a three-level structure. The top level was operations management based on database technology, in which product data management(PDM) systems were used to manage design documents, product configurations, workflow and design process of virtual prototype(VP). The middle level was VP technology in which VP of redundant flight control computers, sensors and actuators were provided. The bottom level was environments supporting for man-in-the-loop simulation of flight control systems. The key technology was analyzed to realize the function of each level. The parameters of virtual prototype of redundant flight control computers(RFCC-VP) were discussed. With different parameters, architecture and performance of RFCC-VP were different. Design processes of RFCC-VP were the processes to determinate the parameters of RFCC-VP. Validation of RFCC-VP was accomplished in the environments, and RFCC-VP can be built according to its major parameters such as architecture, performance and price.

Key words: virtual technique; design environments; flight control computers; product data management

飞行控制系统正向着数字化、综合化、智能化的方向发展.系统功能增加,构成复杂,和机上其它系统交联越来越多,设计难度增大.传统的方法从系统设计,到制造实现,然后装配样机,最终试验验证,已经不能满足现代飞控系统功能多样,结构复杂,信号繁复的要求[1].近十几年来兴起的虚拟原型机技术 VP(Virtual Prototyping)已经广泛应用于机械、电子、计算机、航空航天和武器设计制造领域,为这些领域中复杂系统设计提供了强有力的支持,并取得了非常明显的效果.

在我国航空技术比较落后,飞控系统研制、设计制造水平同国际先进水平差距很大.探索基于

收稿日期: 2004-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90205011)

作者简介: 秦旭东(1976-),男,湖北长阳人,博士生, qinxudong@buaa.edu.cn.

虚拟原型技术的新设计方法,缩短飞控系统研制周期,提高研制质量,减少研制风险度和提高一次设计成功率,将对航空工业的发展具有特别重要的意义.618 所和北航在“95”预研课题的支持下,完成了某型飞控系统的工程化应用研究,分析了构筑虚拟原型机需要重点解决的关键技术,但尚未能提供一个飞控系统虚拟设计环境. 本文借鉴国外研究成果,结合我国实际情况,对飞控系统虚拟设计环境进行研究,确定了虚拟设计环境的 3 层次结构,并在该环境上进行了四余度虚拟飞行控制计算机的设计与验证.

1　国内外研究的技术水平和指标

美国波音公司,通用动力公司,西科斯基公司等许多商业和军用公司都在使用虚拟原型机技术,并且已经有了产品. 华盛顿大学,北卡罗来纳大学,爱荷华大学也在进行相关的研究[2]. 在飞行控制领域,针对飞控计算机的设计,在 JSF(联合攻击战斗机)的研制中获得了成功应用,避免了造价太高的弊病,兼顾成本和性能.

我国 863 计划的 CIMS 主题,开展了虚拟原型机技术在机械领域的应用研究工作,取得了一定成果. 参考文献[1]对飞控系统虚拟原型机以及采用虚拟原型技术后飞控计算机的设计方法进行了研究,对飞控系统设计过程中 VP 的分层次使用和不同层次的 VP 进行了定义,提出了 VP 在飞控系统设计中的系统初步设计、系统软件的交互设计、系统软硬件联合设计与综合、测试 3 层次应用方案[3].

在飞控系统设计中,VP 只在对某型飞控系统设计中得到很好的应用,当需求发生变化,控制对象和控制系统改变后,设计工作需要重新进行,不能适应不同飞控系统的创新性设计. 本文力图探索并解决这个问题,开展面向设计的飞控系统虚拟原型机开发环境研究. 飞控系统虚拟设计环境,是基于高性能 PC 机组成的计算机网络,在 CAX 技术,系统仿真技术和虚拟现实技术的支持下,具有支持创新性飞控系统的顶层设计,概要设计,详细设计,系统综合,台架试验及飞行试验对比的功能. 与物理原型相比较,要达到飞控系统的功能、性能、软件代码,交联关系的一致性,具有变结构,变特性的能力,以适应不同飞控系统的创新性设计;具有与飞控系统研制过程共享信息的能力,向制造系统传递产品数据信息,具有产品数据管理的能力;具有工程师现场设计与验证,驾驶员现场驾驶与评价的功能.

2　飞控系统虚拟设计环境的结构

面向设计的飞控系统虚拟原型机开发环境能够对可分可合的模块式软件进行结构分析、性能分析、价格分析,对在模块内和模块之间结合设计人员的工程活动改善模块结构和功能;按照给定参数重新组合现有软件,生成满足特定需求的飞控系统虚拟原型机. 使飞控系统虚拟原型机开发环境真正具有结构化、信息化、智能化的特点. 具有变结构,变特性的能力,以适应不同飞控系统的创新性设计.

飞控系统虚拟设计环境从结构上分为 3 层:第 1 层为运行管理层. 运行管理层是以 PDM(产品数据管理)软件为核心的管理系统,对虚拟原型机的全过程进行文档管理,产品配置管理和工作流程管理. 第 2 层为虚拟技术层. 虚拟技术层是提供多余度飞控计算机、舵回路、传感器、仪表显示的虚拟原型的生成,控制对象动力学、导航系统仿真模型的建立和子系统验证. 第 3 层为仿真支持层. 仿真支持层是支持整个飞控系统在虚拟原型机层次上,以及与部分物理样机混合连接的层次上的系统综合、台架试验和飞行试验对比. 其总体结构图如图 1 所示.

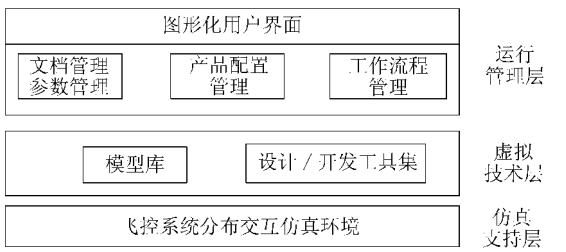

图 1　飞控系统虚拟设计环境总体结构

2.1　运行管理层

运行管理层的对外直接表象为图形化用户界面,以数据库为基础,其核心为 PDM(产品数据管理)软件. PDM 工具能从宏观上将各种应用软件集成起来,并对其产生的大量数据统一管理与控制,也能管理并行设计过程,在大型复杂产品研制、软件开发、设计制造等领域得到了广泛的应用[4,5].

虚拟飞控系统的许多信息是以文档的形式存储的. PDM 的文档管理就是把这些文档的内容作为管理的对象. 虚拟原型机中的文档主要包括:说明文档;静态和动态的设计数据. 对文档的管理也就是文档的新建、浏览、查询、拷贝、删除等操作.

虚拟原型机的产品配置管理主要为对虚拟原型机运行、验证环境的资源进行配置管理. 虚拟原

型机在运行、验证时,需要仿真支持层的支持,只有选取了必要的仿真节点,合理的配置了仿真资源,才能够进行实时的和半物理的仿真. 这包括在仿真开始之前,系统进行初始化时的资源管理以及内、外回路的仿真资源管理.

虚拟飞控系统的整个设计工作分成若干阶段,每个阶段具有不同的步骤. 明确步骤之间的相互关系,建立系统设计、验证全过程的工作流程模型,从而对整个工作流程进行监控和管理.

2.2 虚拟技术层

虚拟技术层提供余度飞控计算机、舵回路、传感器等的虚拟原型的生成. 本文主要对余度飞控计算机的虚拟原型生成进行研究. 虚拟技术层具有面向主要结构参数、性能参数、价格参数的余度飞控计算机的虚拟原型的生成功能. 该开发环境能够通过运行管理层提供给用户有关虚拟原型机的余度方案、任务的调度方案、当前内存和 CPU 的使用记录以及它们的价格等各种结构参数、性能参数、价格参数;也能够通过用户给定的参数对各种模块重新配置以便生成满足给定需求的虚拟原型机. 这样的开发环境能够满足自治-协同系统设计中快速构筑系统原型的需要. 具有相当的灵活性和可配置性. 能够实现软件对象的重用,从而进一步提高了对虚拟飞控计算机进行设计的效率.

2.3 仿真支持层

虚拟原型机完成之后,就可以转入人在回路的半物理仿真验证阶段. 此时的虚拟原型机可以由数学模型和实际物理部件共同组成. 模型和实物之间可以方便的切换,并由半物理仿真向全物理仿真过渡,最终完成实验室和实际运行仿真平台的实物仿真. 由此可知,虚拟原型机的建立只是过程的一部分,还需要观察它的运行情况,分析运行结果,并解决其中所出现的问题. 应实现人机交互,将运行中产生的数据记录下来供以后的分析.

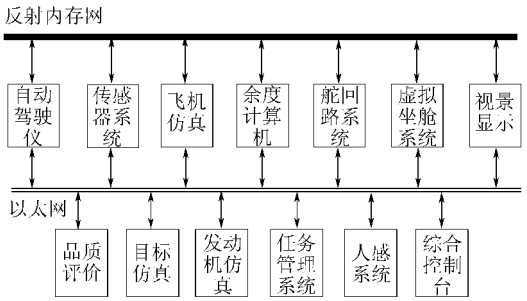

图 2 仿真支持层混合实时通讯网络

仿真支持层的网络通讯结构如图 2 所示. 每个节点分别实现一个或多个分系统的实时仿真,可以把虚拟原型机如 RFCC-VP(虚拟余度飞控计算机)联入该仿真环境进行验证,节点之间通过以太网和实时通讯网络连接. 仿真支持层中,所有的分系统计算机用以太网连接起来,通讯数据量大且实时性要求比较高的分系统计算机之间用反射内存网连接起来.

3 RFCC-VP 的设计与实现

RFCC-VP 的开发平台为 VxWorks 实时操作系统,辅以基于 MATRIXx 的控制律设计、仿真、代码自动生成及加载运行系统,组成余度飞控计算机的虚拟设计、仿真环境.

3.1 RFCC-VP 的参数化设计

RFCC-VP 的设计过程也是确定各类设计参数的过程. 在设计和验证过程中,改变各种参数,观察样机运行情况,最终确定合适的参数. 同时,系统也能按照用户给定的虚拟飞控计算机参数,对可分可合的模块式软件进行智能重组,生成为用户量身订制的虚拟飞控计算机. 该层包括 2 个方面的内容:余度飞控计算机的参数传递,模型库的管理.

在 RFCC-VP 的设计中,涉及到各种不同的结构参数、性能参数、价格参数. 这些参数贯穿虚拟飞控计算机设计的整个过程,参数的可选值如表 1 所示.

表 1 虚拟飞控计算机的参数值

参数	可选值
余度方案	相似余度;非相似余度(硬件非相似,软件非相似)
监控方案	四余度表决监控;三余度表决监控/备份切换;二余度比较监控
调度方案	给出了 4 种基本的任务调度方案;用户可定制的任务调度方案
表决方案	多数表决;中值选择
同步方案	各通道同步工作;各通道异步工作
字长	4 bit,8 bit,12 bit,32 bit 等
CPU	CPU 的类别
内存	内存的大小
硬件设备价格	CPU、内存的价格;A/D、D/A 卡的价格;通道自检测、在线检测等部分的价格;飞控系统的其它子系统,如传感器、与其它系统连接的数据总线,舵机等执行机构的价格.
软件价格	开发工具 VxWorks 的价格;PDM 软件的价格;其它系统/应用软件的价格

3.2 RFCC-VP 的模块化设计

RFCC-VP 的设计,要保证在实现其基本功能的前提下,尽可能提高灵活性和可配置性,使可设计参数达到最大. 从软件的设计角度来讲,除遵循

软件工程的要求和实时系统任务分配、通讯等方面的要求外,还要求虚拟实现的软件任务模块应与其它任务模块能明确的分开,虚拟实现的硬件任务模块应与其它任务模块明确分开. 虚拟实现的任务模块对内、对外接口应与飞控计算机一致. 虚拟实现的硬件任务模块的调度接口、数据接口应与真实硬件基本一致. 系统需要的调度、控制功能的任务模块应该分隔清楚,接口关系明确. 控制接口与数据接口分离,每个任务模块应有 2 套接口,控制量和数据量应完全分离. 控制流的改变意味着系统的结构变化,数据流的改变意味着实现不同的算法,两者的改变都应不影响整个系统的输入、输出结构. 模块间的运行顺序,应完全由调度任务模块完成,模块之间不应有任何除数据传输外的关系.

RFCC-VP 的全部软件模块使用模板结构编制. 一个典型软件模板包括变量声明段,调度参量开关段,运行监控参数段,调度框架段,算法实现函数段,运行监控参数段,调度参量开关段等部分组成,结构如图 3 所示.

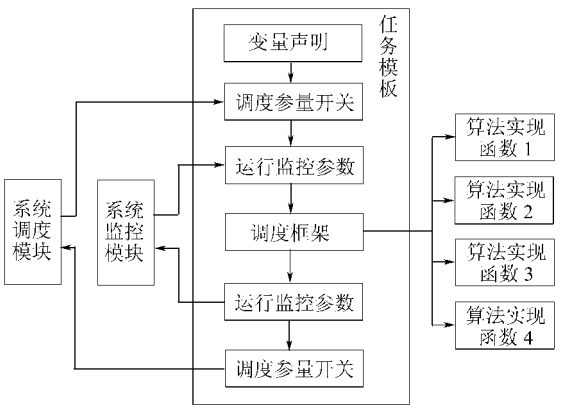

图 3　模板结构及关系图

使用模板编制用户模块时,直接将用户的算法和参数填入模板中. 同时,模板也具有自身的算法和参数,可以直接按不同方案进行综合,组成系统. RFCC-VP 的功能结构具体由 8 个主要的设计模板和设计工具组成,参见图 4.

3.3　RFCC-VP 的硬件结构

从计算机可选用的 CPU 种类来讲,工业控制中较多使用的是 68000 系列、PowerPC 系列、x86 系列、i960 系列等芯片. 在操作系统的支持下,在 BSP 和实时操作系统的隔离下,不同的 CPU 体系结构对于应用层的设计差别不大,可以在某一种类的 CPU 上进行设计,然后进行代码的转平台工作. 从价格参数的角度来讲,x86 系列的 CPU 芯片

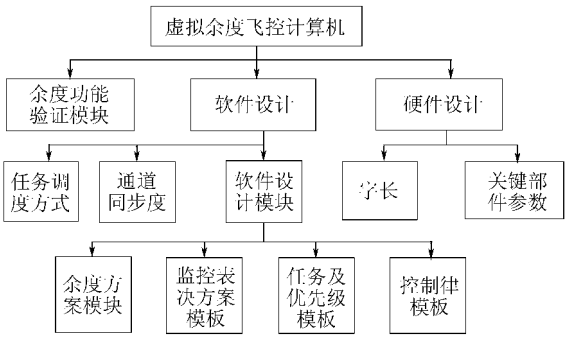

图 4　RFCC-VP 的功能结构图

价格较低. 使用由操作系统厂商提供的标准 BSP,避免了自行编制 BSP 可靠性低可能带来的问题.

选择四余度为基准方案,用 4 台计算机构筑 RFCC-VP,能够满足相似四余度的全部需要. 由于多数表决机制的最小单元是 3 台计算机,4 台机器可以实现带备份的三余度管理机制. 4 台机器的两两组合,还可以构筑比较式系统的余度结构. 因此 4 台计算机可以完成 3 种余度方案.

选用 4 台主机构筑虚拟飞控计算机,分称通道 1 ~4. 此外,使用 2 台计算机完成控制、管理、显示功能. 一台为数据综合处理计算机,虚拟飞控计算机的所有数据接口都通过它与虚拟原型机验证环境相联. 一台为系统运行状态显示计算机,负责显示各个通道任务的运行状态、CPU、内存状态等. 系统控制关系如图 5 所示. 正常运行时,各通道的运行、显示、控制均由数据综合处理计算机在远端控制完成,必要时用户可通过各通道的键盘进行控制. 采用这样的结构,一方面可以充分利用 Windows 操作系统的强大图形功能,弥补实时操作系统显示功能弱的缺陷. 另一方面使 RFCC-VP 对外有统一的接口,便于系统的切换和维护.

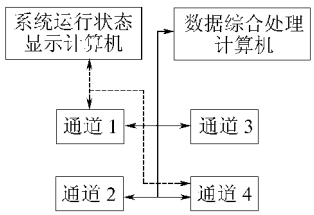

图 5　系统控制关系图

3.4　RFCC-VP 的软件设计

RFCC-VP 的软件程序在 VxWorks 环境下编制全部代码. 按照系统参数最大化原则,编制成不同的任务. RFCC-VP 的软件共有 23 个任务,以此作为最小的调度单元. 由于系统是周期运行的,全部任务都在时钟任务的调度下,通过通讯与同步

机制实现循环运行. 所有任务按其完成的功能及与被仿真对象的关系分类,可分 3 类:

软件任务:虚拟飞控系统软件的功能是通过软件任务的不同组合,改变系统参数,可以虚拟实现不同飞控系统的功能.

混合任务:虚拟飞控系统由软硬件共同完成的功能,如交叉通道数据链(CCDL);系统硬件的不同性能参数,可在混合任务中调整改变.

支持任务:完成系统调度,运行控制等功能,在初始化时选择不同的系统参数,或修改支持任务,可以达到改变系统功能的目的.

4 RFCC-VP 的验证

RFCC-VP 的验证,就是选择不同的余度结构和监控表决方案,按照不同的任务调度方式和通道同步方式,改变字长等系统参数,在虚拟设计环境下,将不同的设计方案进行综合,检查其工作效能;进行实时仿真,检查其总体性能. 下面分别对以下 4 种任务调度方案进行综合测试.

方案 1 将 1 小帧时间分为 10 份,按照份数安排不同数量的任务. 方案 2 以小帧为调度单位,到达小帧的整数倍时,执行相应任务. 方案 3 是方案 1、方案 2 的综合. 方案 4 在每一小帧均允许所有任务运行,由操作系统根据任务优先级调度.

对其进行试验,在余度结构一致的情况下,改变调度方案,观察任务完成的情况,进行任务调度方案的设计.

在 CPU 为 penturnMMX 200,RAM128M 的情况下,从系统监控中,获得数据如表 2 所示. 结果表明 4 种调度方式对于 CPU 的使用基本一致,处于同一量级,但方案 2、方案 3 占用资源最多,方案 1 最少. 可选用调度方案 1 作为使用的方案.

表 2 不同调度方案 CPU 占用对比

调度方案	采样总时间/s	累计 CPU 空闲时间/s	CPU 利用率/%
1	1.018 118	0.385 893	62.10
2	1.266 712	0.417 806	67.02
3	0.846 226	0.279 120	67.02
4	1.017 387	0.373 380	63.30

5 结束语

本文提出了飞控系统虚拟设计环境的基本框架,分析了实现 3 层次结构的虚拟设计环境所需要的关键技术,并且在该环境基础上,完成了虚拟四余度飞控计算机的工程化实现. 由于 RFCC-VP 提供了多种测试手段,使进行实际设计时,各种方案均可进行充分、详细的比较和验证. 减少设计的盲目性,目的性大大增强. 可以在需求发生变化时快速构筑系统,同时为外围系统的设计提出参数要求.

参考文献 (References)

[1] 黄浩东. 飞控系统虚拟原型机技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动控制系,2001
Huang Haodong. Research on virtual prototyping for flight control system[D]. Beijing: Dept. of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001(in Chinese)

[2] Garcia A B, Gocke R P, Johnson N P. Virtual prototyping: concept to production report of the DSMC 1992-1993 military research fellows[R]. Defense System Management Coll PB 94-174026/XAD, 1994

[3] 陈宗基,黄浩东,秦旭东. 飞控系统虚拟原型技术[J]. 航空学报, 2002, 23(5):441~447
Chen Zongji, Huang Haodong, Qin Xudong. Virtual prototyping for flight control system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(5):441~447(in Chinese)

[4] He W, Ni Q F, Lee I B H. Enterprise business information management system based on PDM framework[A]. IEEE International Conference[C]. Singapore: Product Design and Development Group, 2003. 1475~1480

[5] Fan Ip-Shing. The power of PDM[J]. Manufacturing Engineer, 2000,79(6):224~228