

# 基于 Rhapsody 的飞控系统虚拟样机设计环境\*

王西超<sup>1</sup>, 曹云峰<sup>1</sup>, 庄丽葵<sup>1</sup>, 刘兴华<sup>2</sup>, 丁萌<sup>3</sup>, 刘中杰<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院 南京, 210016) (2. 上海飞机设计研究院 上海, 200232)

(3. 南京航空航天大学民航学院 南京, 210016)

**摘要** 为支持飞行控制系统虚拟样机设计, 克服物理样机制造周期长、代价高、效率低的缺点, 研究了飞行控制系统虚拟样机设计环境体系结构, 集成 Rhapsody, Matlab/Simulink, VC++, Doors 和 Oracle 5 个商业软件, 设计了 4 层次结构的飞行控制系统虚拟样机设计环境, 分别为元素模型设计层、虚拟部件设计层、虚拟样机集成层和调度管理层。另外, 基于构建的设计环境设计了某微型飞行器的飞控系统虚拟样机, 并对设计模型进行协同仿真验证。设计结果表明, 该设计环境能够支持不同粒度的飞控系统虚拟样机设计, 提高了飞控系统设计效率, 支持各类飞行器控制系统虚拟样机的设计。

**关键词** 飞行控制系统; 虚拟样机; 设计环境; Rhapsody; 微型飞行器; 协同仿真

**中图分类号** V249; TP319

## 引言

近年来, 飞行控制系统 (flight control system, 简称 FCS) 已经发展成为一种涉及机械、电子、液压和软件等多学科领域的复杂系统<sup>[1-2]</sup>。传统的 FCS 设计方法是一种文档驱动式的设计方法, 设计流程包括从方案设想到验证分析的 32 个步骤。该方法虽然在过去相当长一段时间内成功支持了各类 FCS 的设计, 但存在缺点和不足: 系统设计方案主要以图表、自然语言表达, 存在歧义, 无法模拟仿真; 设计建模语言种类繁多, 不便于设计人员沟通, 信息孤岛现象严重; 软件测试需借助专业的工具软件, 工作量巨大, 难度高。

虚拟样机 (virtual prototype, 简称 VP) 技术<sup>[3-5]</sup>是一种基于计算机仿真模型的设计方法。它通过并行设计技术使得设计人员在系统物理样机实现之前即在数字化环境中将系统研制出来, 得到同物理样机一一对应的虚拟样机。

国内外已有研究机构将 VP 技术引入到 FCS 设计中来。美国国家航空实验室 (fly-by-wire, 简称 FBW) 系统包括完整的 FCS 结构设计模块, 具有图形化用户界面和线性化分析工具, 支持设计数据的交换并能进行系统快速分析<sup>[6]</sup>。上海交通大学使用

Statemate 进行航空电子系统概念设计<sup>[7]</sup>, 但没有进行详细设计。文献<sup>[8]</sup>搭建基于 UML 的数字化设计平台并进行飞控、航电综合系统的快速原型设计, 但没有涉及总体设计方面。航天二院基于 HLA 研究了飞机起落架等复杂系统的虚拟样机设计技术<sup>[4]</sup>, 但在需求设计与需求分析方面尚存在不足。南京航空航天大学在引进 Rhapsody 后, 开展了无人机 FCS 一体化综合设计的具体方法与有效途径<sup>[9]</sup>。基于以上研究, 本研究定义: 飞控系统虚拟样机 (virtual prototype of flight control system, 简称 FCS-VP) 是以飞行器动力学和运动学模型为基础, 以控制系统模型为核心, 其他相关模型为补充, 利用多领域建模工具和仿真技术, 在协同仿真环境支持下设计的数字化虚拟原型系统, 实现导航、制导、控制与飞行器动力学模型的动态联合仿真。

国内一些研究机构在 FCS-VP 方面取得了一些突破性的研究成果, 但使用的 FCS-VP 设计环境 (virtual prototype design environments of flight control system, 简称 FCS-VPDE) 或是一个或两个成熟的商用软件<sup>[7-9]</sup>, 或是基于 HLA 的松散式耦合系统<sup>[4]</sup>, 尚未提供一个完整、通用的 FCS-VPDE。基于 VP 技术在 FCS 设计中的应用情况, 并参考其他领域虚拟样机设计环境特点<sup>[10-11]</sup>, 笔者集成 VC++, Doors, Rhapsody, Simulink 和 Oracle 5 个商用

\* 航空科学基金资助项目 (20120752015, 20110752005); 江苏省 333 人才工程项目; 南京航空航天大学引进人才基金资助项目 (1007-56YAH10047)

收稿日期: 2012-03-20; 修改稿收到日期: 2012-05-28

软件,设计了4层次结构的FCS-VPDE,并在FCS-VPDE上设计某型微型飞行器的FCS-VP,并对设计结果进行仿真分析。结果证明,在该FCS-VPDE上能够方便设计FCS-VP,并对FCS-VP进行功能、性能和行为全方面的验证。

## 1 4层次结构FCS-VPDE

4层结构的FCS-VPDE分层结构如图1所示,第1层为元素模型设计层,包括VC++,Doors,Rhapsody,Simulink和Oracle 5个商用软件,主要进行FCS元素模型的建模;第2层为虚拟部件设计层,提供飞控计算机、传感器、舵机和飞机等模型的虚拟原型生成;第3层为虚拟样机集成层,可以对整个FCS-VP进行协同仿真;第4层为调度管理层,包括模型结构管理、文档管理、设计流程管理和系统日志管理4个模块,并提供可视化界面。

由FCS-VPDE的分层设计思想可以看出:4层结构的FCS-VPDE各层相对独立,每层之间是基于特定接口的递进关系,高层模型不必关注低层模型的内部信息而直接使用;支持并行工程,支持FCS-VP不同领域、不同系统的设计人员协同工作。

### 1.1 元素模型设计层

本层主要功能是对FCS元素模型进行建模,元素模型从性质上可以分为需求模型(功能性/非功能性需求)、离散模型(导航、制导模型)和连续模型(控制律、动力学模型)3大类。

目前,比较流行的需求管理工具主要有RequisitePro,CaliberRM和Doors等。其中:RequisitePro侧重于帮助项目团队改进项目目标的沟通,增强协作开发能力,但需求跟踪与需求变更管理功能较差;CaliberRM侧重于帮助分布式的开发团队平滑协

作,提高系统设计效率,但无法支持对已有文件和信息的重用和共享;Doors则是基于整个项目的需求管理系统,用来捕捉、链接、跟踪、分析及管理信息,确保项目与特定的需求及标准保持一致,是面向管理者、开发者与最终用户及整个生命周期的综合需求管理套件。

SysML<sup>[12-13]</sup>作为系统工程建模语言,能够进行需求模型和离散模型的建模,目前支持SysML/UML的工具具有MagicDraw,Architect,Artisan Studio,TAU G2和Rhapsody等。但MagicDraw和Architect在模型仿真、调试及文档自动生成等方面不能满足FCS的设计需要。Artisan Studio和TAU G2对Statemate等原有模型的重用存在不足。Rhapsody能够对项目全生命周期进行跟踪,提供直观的需求捕获视图与描述方式,通过状态图、顺序图和活动图进行离散模型的建模,可对开发模型进行模拟,生成可执行的应用程序。

Matlab/Simulink是目前控制系统和连续系统动态建模领域最为通用的设计环境。

基于以上分析,选择Doors,Rhapsody,Matlab/Simulink,VC++和Oracle 5个商用软件构建FCS VPDE,如图2所示。其中:Doors平台用来对FCS的用户需求进行管理;Rhapsody平台利用SysML需求图和用例图进行需求分析,构建FCS功能性/非功能性需求模型,分别利用块图/对象图和状态图/顺序图设计静、动态离散模型,建立FCS导航与制导模型;Matlab/Simulink平台用来进行连续模型设计,如控制律模型、动力学模型等;利用VC++开发测控界面连接Rhapsody,Matlab/Simulink和Oracle,VC++采用ADO(ActiveX Data Object)数据库访问技术,与Oracle数据库建立关联,以实现FCS-VP开发过程中的数据、文档和模型的存取。其中:Doors平台中的用户需求能够和Rhapsody平台

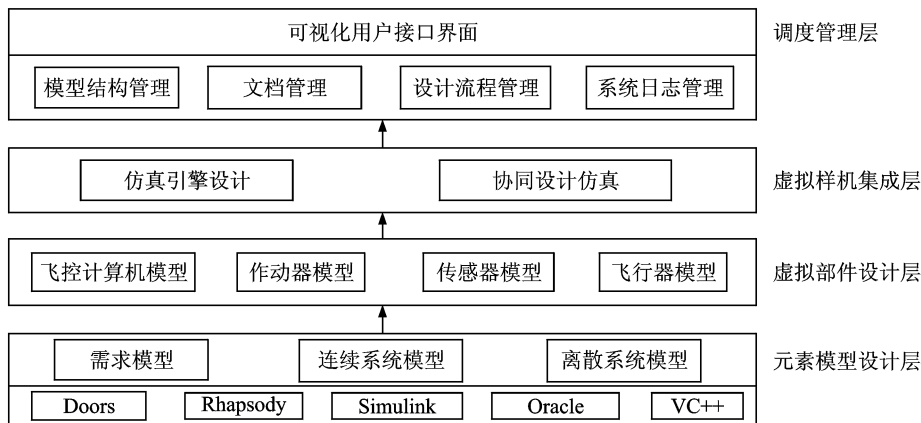


图1 飞控系统虚拟样机设计环境分层结构图

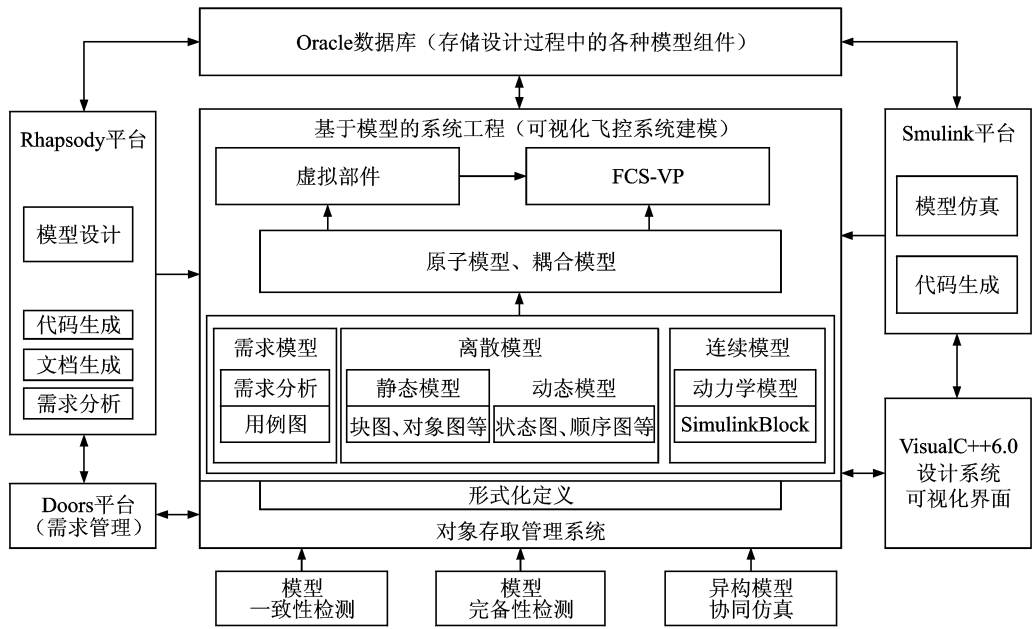


图2 飞控系统虚拟样机设计环境结构

中的需求模型双向动态关联,Rhapsody平台和Matlab/Simulink平台能够实现异构模型的协同设计与协同仿真。

### 1.2 虚拟部件设计层

同构或异构的元素模型通过某种形式的组合构成原子模型,原子模型主要包括数据输入输出端口、事件输入输出端口、端口间的约束、初始化接口、领域接口、属性、操作、仿真算法和基本行为状态机,如图3所示。原子模型和耦合模型(若干原子模型的耦合)通过某种形式的连接就构成虚拟部件。虚拟部件能够直观表达出FCS各部件特定的功能、性能与行为。虚拟部件主要包括虚拟飞控计算机、虚拟传感器、虚拟舵机和虚拟飞行器等。虚拟部件在功能、性能、行为以及接口方面与物理模型具有一一对应的关系。

虚拟部件封装后存入Oracle数据库中,设计时将虚拟部件依据相互间的接口进行特定形式的连接构成完整的FCS-VP。如果要构建新型FCS-VP,现有虚拟部件可以继承使用,即依据新的需求对虚拟部件进行元素模型修改或者参数的重新设置,生成新的虚拟部件。图4所示为在Rhapsody中集成的某型三余度虚拟飞控计算机,可以看出,此虚拟飞控计算机是由4个原子模型构成的耦合模型:①为虚拟飞控计算机;②为飞控计算机的余度状态,在Rhapsody中利用状态图进行设计;③为控制模态状态图,也在Rhapsody中设计;④和⑤分别为纵向控制律模型和横测向控制律模型,利用Simulink进行设计。将④和⑤通过RTW编译为C函数,然后在Rhapsody中利用其profile进行调用,结合②,③构成完整的三余度虚拟飞控计算机。进行FCS-VP设计时此虚拟飞控计算机可以直接使用,也可以将构成它的4个原子模型进行修改或者参数重新设置以形成一个新的虚拟飞控计算机。可以看出,虚拟部件具有通用性、可重用性和继承性;因此,设计人员能够依靠虚拟部件快速设计不同类型FCS-VP。

### 1.3 虚拟样机集成层

主要功能为对虚拟部件集成的FCS-VP进行协同仿真、包括硬件在回路仿真。较为通用的实现软件间协同仿真的方式主要有以下3种。

1) 联合仿真式(co-simulation):各软件在运行前进行数据耦合关系定义和建立连接,仿真开始后,

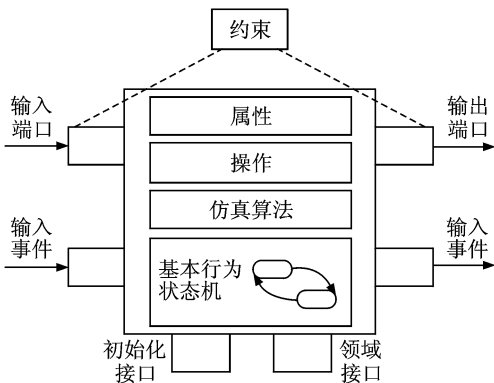


图3 原子模型

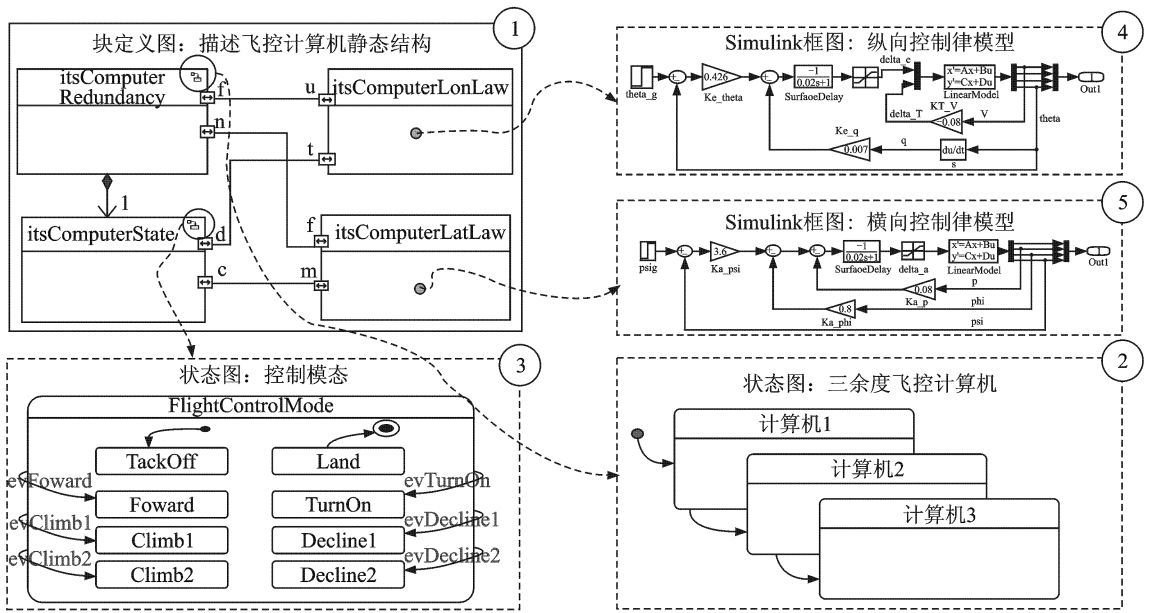


图4 某型三余度虚拟飞控计算机

耦合的仿真数据通过进程间通讯或者网络通讯来实现双向交换和调用。

2) 模型转换式(model transfer)或模型导入式: 将一个仿真软件的模型转化为另一个仿真软件支持的特定格式的包含模型信息的数据文件或者动态链接库文件(dll),实现模型级别的协同仿真。

3) 求解器集成式(solver convergence):实现两个不同仿真软件之间的求解器集成,在其中一个仿真软件中可以调用另一个仿真软件的求解器,从而完成协同仿真。

本设计环境采用点对点的模型转换式协同仿真,即将在 Matlab/Simulink 软件中设计的模型(包括飞行器动力学模型、传感器模型、作动器模型和控制律模型)编译成 C 函数,然后在 Rhapsody 中调用。控制律模型要与在 Rhapsody 中建立的控制逻辑模型结合起来构成完整的虚拟飞控计算机,在 Rhapsody 中进行协同仿真。FCS-VP 可以有数学模型和实物模型共同组成,即支持硬件在回路的半物理仿真,如将物理舵机代替 FCS-VP 的舵机模型,然后进行半物理仿真,分析运行结果并解决仿真过程中所出现的问题。最终过渡到全物理仿真,实现从 FCS-VP 到 FCS 物理样机的过渡。

#### 1.4 调度管理层

FCS-VP 调度管理涉及项目决策、规划设计、实施、终结与后评价项目全生命周期各阶段的计划、组织、控制和协调技术<sup>[14]</sup>。图 5 为 FCS-VPDE 软件界面图。其核心是模型信息管理、文档信息管理、用户

权限管理和系统信息管理,还包括设计进度管理、成本管理(成本预测、计划、分析与控制、和项目财务)和质量(质量规划与质量保证体系的建立、项目质量检查监督、项目质量与控制)。

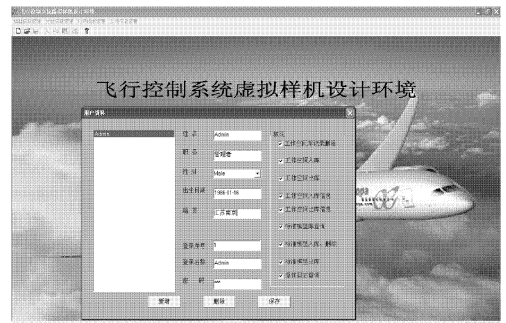


图5 FCS-VPDE 软件界面图

模型信息管理主要是对 FCS-VP 的各个领域模型(包括元素模型、原子模型和虚拟部件)的管理,包括模型的增加、删除、修改和调度使用等。模型信息管理主要包括标准模型管理和用户模型管理,标准模型管理是设计环境中存储的飞控系统领域模型标准组件,设计人员在设计新的工程时可以直接使用或者继承使用,用户模型管理主要是设计者自己设计的工程管理功能。文档主要包括需求分析文件、概要设计文件、详细设计文件和设计说明文件,以文字、图表和曲线的形式存在。对文档的管理也就是文档的新建、查找、浏览、拷贝和删除等。用户权限管理主要是分配不同用户(如管理员,设计人员等)所具有的软件不同使用权限等。系统信息管理主要包括

FCS-VPDE 的概要说明和系统操作日志。

### 1.5 FCS-VPDE 特点

- 1) FCS-VPDE 分为 4 层,各层相对独立,便于 FCS-VP 设计工作开展;
- 2) 集成Rhapsody 等5 个商用软件,是一种典型的多领域工具集成设计环境,基于点对点的交叉式框架集成设计(FCS-VPDE 可裁剪、扩展和重复使用);
- 3) 支持C++,UML, SysML 和 Simulink 等多种建模语言,特别是支持图形化形式化建模;
- 4) 支持并行工程,能够支持 FCS-VP 不同领域、不同分系统的设计人员协同工作;
- 5) 基于 Rhapsody 和 Simulink 实现了 FCS-VP 离散模型和连续模型的协同设计与协同仿真,并支持设计流程中不同阶段小周期,多闭环仿真验证的循环迭代设计模式;
- 6) 支持模型重用,通过模型的继承重用和直接重用,可以快速设计多种不同类型 FCS-VP;
- 7) 支持模型驱动开发,结合 Rhapsody 特殊操作系统适配器和 Simulink 的 RTW,自动生成工业产品级代码;
- 8) 能够完成 FCS-VP 从需求管理、需求分析、需求跟踪、系统分析、系统设计到系统验证的全生命周期设计。

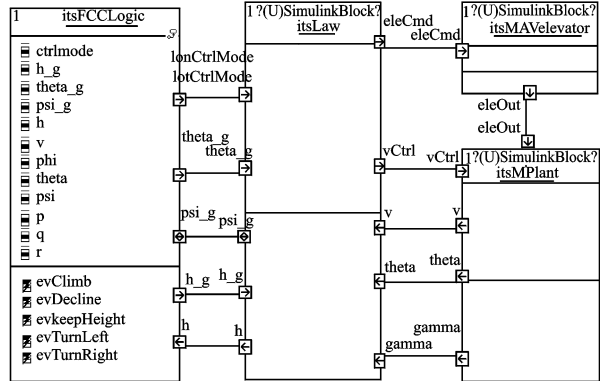
## 2 某微型飞行器的 FCS-VP 应用验证

基于FCS-VPDE,设计某型微型飞行器(MAV)的FCS-VP。FCS-VP 设计共分为 3 个阶段:需求分析、系统分析和系统设计。

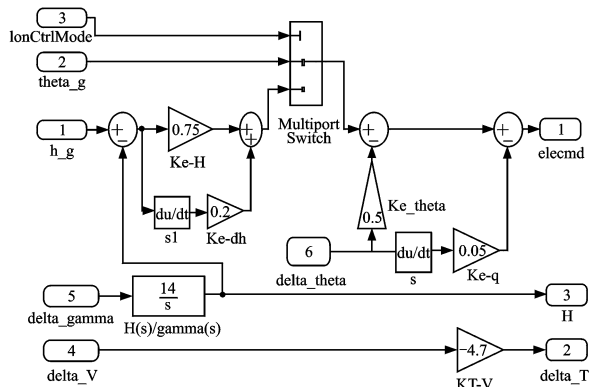
在 FCS-VP 需求分析阶段,利用 FCS-VPDE 中的 Doors 平台和 Rhapsody 平台。首先,将 MAV 的 FCS 需求逐条列举出来并在 Doors 平台上进行管理;然后,将管理好的需求利用 RhapsodyGateway 导入到 Rhapsody 中进行需求分析,得到系统需求模型;最后,利用需求模型建立系统用例模型。用例模型可以作为后续系统分析与系统设计的依据。

在 FCS-VP 系统分析阶段,利用 FCS-VPDE 中的 Rhapsody 平台和 Matlab/Simulink 平台。依据 MAV 的 FCS 用例分析系统应该具有的属性、操作及行为等特性,使用 Rhapsody 平台的块定义图、顺序图和状态图构建离散元素模型,使用 Simulink 框图构建连续元素模型。通过仿真验证设计的元素模型是否满足用例及其背后的需求。

在 FCS-VP 系统设计阶段,利用 FCS-VPDE 中的各个子系统平台,将在系统分析阶段得到的元素模型以同构或异构方式构成原子模型,再由原子模型集成 FCS 虚拟部件,最后将虚拟部件进行特定形式的连接得到完整 MAV 的 FCS-VP。图 6 所示为在 Rhapsody 中集成的 FCS-VP。图 6(a)为在 Rhapsody 中设计的某 MAV 的 FCS-VP,图中 4 个模块分别为导航、制导原子模型(itsLogic),控制律原子模型(itsControLaw),虚拟舵机(itsElevator)与虚拟微型飞行器(itsMPlan),其中导航、制导原子模型和控制律原子模型构成异构的虚拟飞控计算机。图 6(b)所示为图 6(a)中控制律原子模型(itsControLaw)的内部描述。



(a) 某微型飞行器FCS-VP



(b) 控制律原子模型的内部描述

图 6 某微型飞行器 FCS-VP

在 VP 协同仿真阶段,通过各领域模型在各自工具环境中的仿真以及结果后处理,进行 MAV 运动学、动力学在控制系统实时作用下的协同仿真分析,具体方法是将在 Matlab/Simulink 中建立的传感器、舵机和 FCS 的控制律部分模型进行封装后以 SimulinkBlock 块的形式导入 Rhapsody 软件中,与在 Rhapsody 软件中建立的导航、制导模型一起进行整个 FCS-VP 的联合仿真,最终验证其功能、性能和行为是否满足设计要求。

图7为在Rhapsody中进行联合仿真某时刻的仿真图,表示此MAV有4种控制模式:平飞、爬升、下降和定高飞行。仿真时当发送爬升指令(evClimb)时,图7(a)和图7(b)分别为其FCS-VP的制导模型状态图和MAV动态响应图,可以看出其爬升模式(climb)变为深色,且其航迹角 $\gamma$ 增加0.1弧度左右以实现爬升。

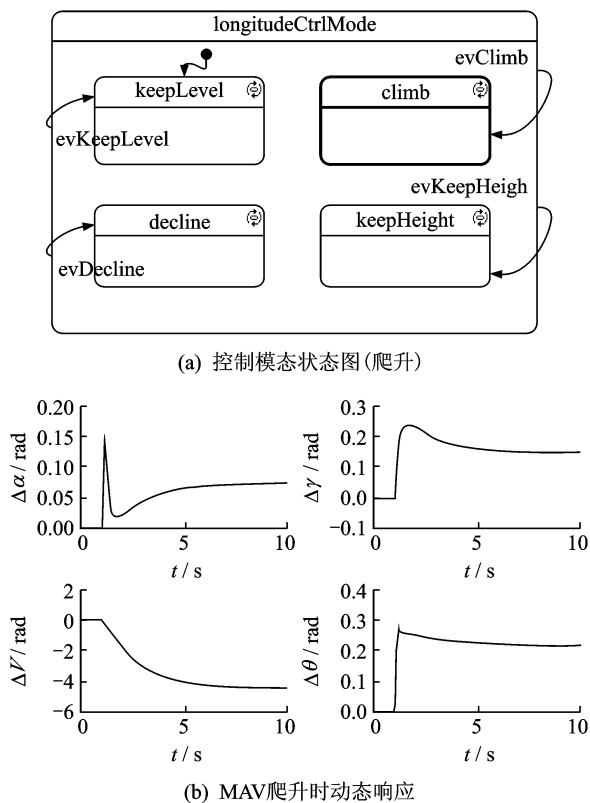


图7 MAV爬升状态仿真图

当发送定高飞行指令(evkeepHeight)时(假设当前时刻MAV在30m的高度上飞行,发送定高飞行指令后期望飞行高度为60m)。图8(a)为其FCS-VP的制导模型状态图,图8(b)和图8(c)为MAV动态响应图,可以看出其定高飞行模式(keepHeight)变粗,且姿态角与速度7s后都回到发送定高飞行指令前的状态,高度在7s内达到并保持在60m上。

由以上仿真分析可以看出:在FCS-VPDE上设计MAV的FCS-VP在结构、功能、行为与性能上对MAV进行仿真验证;设计流程简化为元素模型设计、原子模型设计、虚拟部件设计和虚拟样机集成4个阶段,通过每个阶段小周期、多闭环的迭代仿真实现了FCS-VP的总体优化。

图9为根据用户单位采用FCS-VPDE前后的无人机飞控系统研制情况对比。可以看出,使用传统的设计方法,飞控系统研制需要在顶层与领域工程层次之间经过多次反复的迭代,研制周期长达两年时

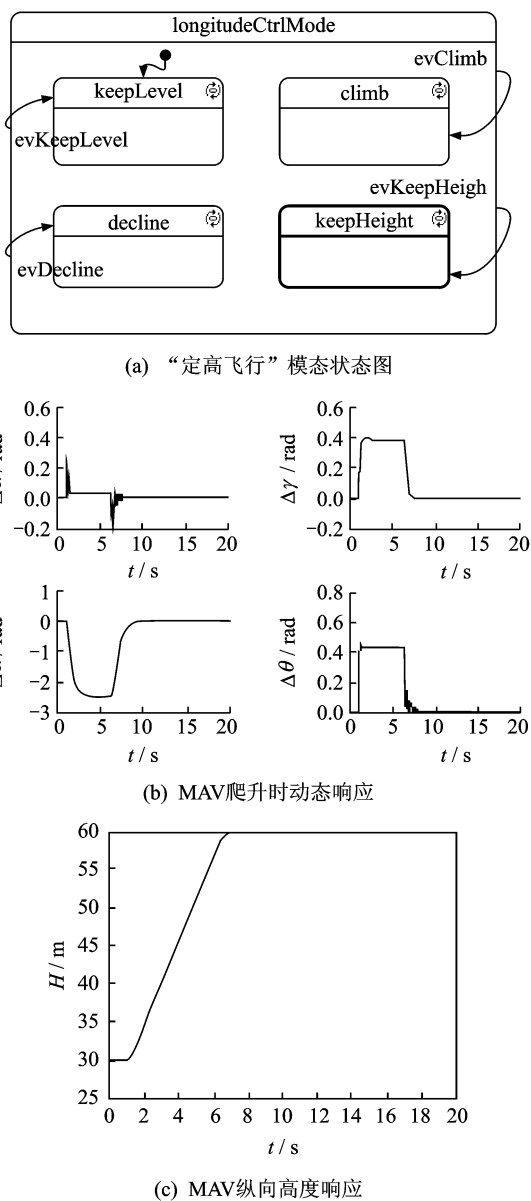


图8 MAV定高飞行状态仿真图

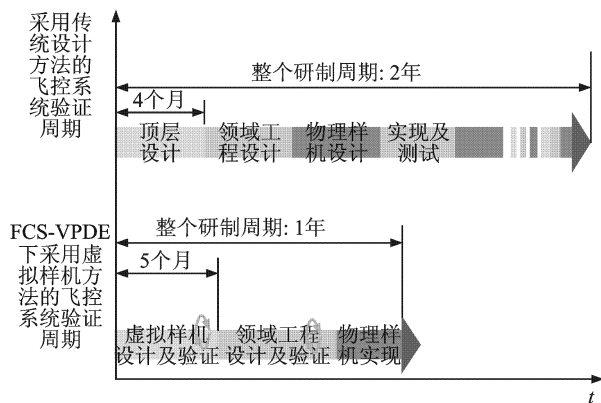


图9 飞控系统研制周期对比

间。在笔者搭建的FCS-VPDE上采用虚拟样机技术后,虽然虚拟样机设计阶段花费了较长的时间,但由

于显著提高了设计质量,因此不会在虚拟样机层次与领域工程层次之间出现反复,在同等的人力投入下研制周期缩短为过去的一半,研制经费降低为大约过去的1/4。

### 3 结束语

笔者设计的FCS-VPDE为FCS-VP开发构建了一个分布式协同设计环境,使设计人员在VP阶段即可对各种设计决策和设计方案进行检查和评估,消除其中的歧义和错误,避免后期工程物理样机研制出现反复,从而达到降低设计成本、提高效率的目的。

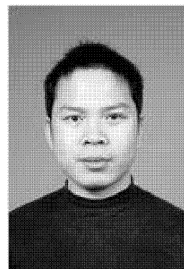
集成Doors,Rhapsody,Matlab/Simulink,VC++和Oracle 5个商用软件设计4层次结构的FCS-VPDE,为FCS-VP设计提供支持。基于FCS-VPDE,将FCS-VP分解为元素模型、原子模型、虚拟部件和FCS-VP 4种不同粒度的模型组件,模型粒度由细到粗,支持不同粒度FCS-VP的设计,并提高了组件模型的可组合性与可重用性。在FCS-VPDE中设计了模型MAV的FCS-VP,并通过爬升模态、定高飞行模态的协同仿真验证,从结构、功能、性能和行为上表明本研究设计的4层次结构FCS-VPDE是可行的。

#### 参 考 文 献

- [1] Jackson P B. Overview of missile flight control systems [J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2010,29(1):9-24.
- [2] 田兆锋,闫楚良. Web方式下飞机飞行实测数据可视化方法[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(6):738-741. Tian Zhaofeng, Yan Chuliang. Flight test data visualization based on web application[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 738-741. (in Chinese)
- [3] Manoj K, Steward B L, Kelkar A G, et al. Modeling and real-time simulation architectures for virtual prototyping of off-road vehicles [J]. Virtual Reality, 2011,15(1):83-96.
- [4] 李潭,李伯虎,柴旭东,等. 复杂产品多学科虚拟样机元建模框架[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(6):1178-1186. Li Tan, Li Bohu, Chai Xudong, et al. Meta modeling framework for complex product multidiscipline virtual prototyping[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011,17(6):1178-1186. (in Chinese)
- [5] Alexandru C, Alexandru P. The virtual prototype of

a mechatronics suspension system with active force control[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2010, 9(9):927-936.

- [6] Smaili M H. Simulation of an affordable fly-by-wire system for small commercial aircraft [C] // AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibition. Reston, USA: AIAA, 2001:33-42.
- [7] 吴建民,敬忠良,肖刚. 基于原型仿真的航空电子系统螺旋式开发方法[J]. 系统工程与电子技术,2007,29(3):488-491. Wu Jianmin, Jing Zhongliang, Xiao Gang. Spiral development for avionics based on prototyping[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007,29(3):488-491. (in Chinese)
- [8] 宫谊凡,蒲小勃,刘军,等. 基于UML语言的航空电子系统快速原型设计[J]. 系统仿真学报,2007,19(4):749-753. Gong Yifan, Pu Xiaobo, Liu Jun, et al. Rapid prototype design method in avionics system based on UML [J]. Journal of System Simulation, 2007,19(4):749-753. (in Chinese).
- [9] 刘兴华,曹云峰. 支持模型驱动开发的飞控系统数字样机设计[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(1):23-29. Liu Xinghua, Cao Yunfeng. Flight control system digital prototype design technology supporting model driven development [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011,17(1):23-29. (in Chinese)
- [10] Park S, Yoon S, Chae S I. Mixed-level virtual prototyping environment for SystemC-based design methodology [J]. Microelectronics Journal, 2009, 40(7): 1082-1093.
- [11] Choi S H, Cheung H H. A versatile virtual prototyping system for rapid product development[J]. Computers in Industry, 2008,59(5):477-488.
- [12] OMG. OMG SysML specification v1.1. [EB/OL]. <http://www.sysmlforum.com/docs/specs/OMGSysML-v1.1-08-11-01.pdf/2010.05.10>
- [13] Constantine J A, Solak S. SysML modeling of off-the-shelf-option acquisition for risk mitigation in military programs [J]. Systems Engineering, 2010, 13(1):80-94.



**第一作者简介:**王西超,男,1982年9月生,博士。主要研究方向为飞行控制系统以及虚拟样机的设计与仿真。曾发表《分层混杂式MAV飞控系统虚拟样机设计》(《华南理工大学学报》2012年第6期)等论文。

E-mail:wangxichao@nuaa.edu.cn