

6-4-2020

Model-Based Design and Simulation for an Aircraft Flight Control System

Chi Yue

AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;

Shan Dong

AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;

Zhenxin Yan

AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;

Hei Peng

AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;

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 Paper 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.

Model-Based Design and Simulation for an Aircraft Flight Control System

Abstract

Abstract: The process and method of model-based system engineering (MBSE) and its implementation in highly complex flight control system were clearly introduced. By comparing with traditional design methods, *MBSE applied models as baseline instead of documents* to handle the complexity of modern systems. The *top-down workflow* is more capable of ensuring coherence of design process, completeness of requirements verification and system testability. With the simulation of system model, *the integrality of design and verification process*, system function behavior simulation, *implementation of the failure mode, effect analysis (FMEA)* and the decreasing of system risk grade are well achieved.

Keywords

model-based system engineering (MBSE), function analysis, flight control system, simulation

Recommended Citation

Chi Yue, Shan Dong, Yan Zhenxin, Hei Peng. Model-Based Design and Simulation for an Aircraft Flight Control System[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2556-2566.

基于模型的仿真设计在某飞控系统中的应用

迟玥, 单栋, 阎振鑫, 黑鹏

(中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 介绍基于模型的系统工程开发流程与方法及其在某型复杂飞控系统方案设计中的应用。相比于传统设计方法, 利用模型基线取代文档基线能够更好的应对现代大型系统的复杂性, 利用系统工程方法进行自顶向下的设计也能够更好地保证系统设计过程的一致性、需求验证的完整性和系统的可测试性。最后通过对模型的仿真验证, 实现了需求设计到验证的完全覆盖, 在系统硬件实现前完整地模拟了系统的功能行为, 并完成复杂系统基于模型的功能故障模式与影响分析, 降低了系统研制风险等级。

关键词: 基于模型的系统工程(MBSE); 功能分析; 飞控系统; 仿真

中图分类号: V249.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 10-2556-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710041

Model-Based Design and Simulation for an Aircraft Flight Control System

Chi Yue, Shan Dong, Yan Zhenxin, Hei Peng

(AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The process and method of model-based system engineering (MBSE) and its implementation in highly complex flight control system were clearly introduced. By comparing with traditional design methods, *MBSE applied models as baseline instead of documents* to handle the complexity of modern systems. The *top-down workflow* is more capable of ensuring coherence of design process, completeness of requirements verification and system testability. With the simulation of system model, *the integrality of design and verification process*, system function behavior simulation, *implementation of the failure mode, effect analysis (FMEA)* and the decreasing of system risk grade are well achieved.

Keywords: model-based system engineering (MBSE); function analysis; flight control system; simulation

引言

传统的飞控系统研制开发均依托于各种文档, 利用文本形式和自然语言在设计人员之间传递, 对于大型复杂飞控系统来说, 由于涉及的学科很多, 仍旧使用文档进行需求传递极易出现各学科交流

之间理解的不一致性^[1]。同时, 在装备研制的过程中, 风险分析一直是研发设计中必须考虑的重要因素。传统的设计流程往往是在系统产品样机阶段甚至是研制后期才能暴露出方案设计中的问题, 由此带来的工程更改会增加费用并拖延进度, 增加系统研制风险指数。

而基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)^[2]能有效解决这些问题。MBSE从需求阶段开始即通过模型的不断演化、迭代递增而实现产品的系统设计。通过其结构化的、模型化的系统需求、功能与架构的定义、分配与追踪链路



收稿日期: 2017-05-11 修回日期: 2017-07-24;
作者简介: 迟玥(1990-), 女, 山东, 硕士, 工程师, 研究方向为飞行控制; 单栋(1989-), 男, 河南, 硕士, 工程师, 研究方向为飞行控制; 阎振鑫(1985-), 男, 辽宁, 硕士, 高工, 研究方向为飞行控制。

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

• 2556 •

能够快速响应需求的变化, 并及时指导后期的设计、实现、综合和验证过程, 可尽早通过模拟分析发现大量不合理的设计方案^[3]。模型还为各方提供了一个通用的、无二义性的设计交流工具, 这一点对于大型复杂系统设计尤其重要。同时也会大大减少系统研制过程中由于方案未充分验证带来的风险源, 降低了风险等级。

本文首先介绍了基于模型的系统工程的设计方法, 然后着重介绍了这套方法在某大型运输机电传飞控系统设计中的运用, 包括利用 Doors 和 Rhapsody 进行需求捕获和系统黑盒、白盒设计, 并根据分析的结果进一步利用 Simulink 和状态机进行系统架构模型与子模型的搭建与仿真, 并逐条验证是否满足前端设计需求, 最后对本文进行总结。

1 基于模型的系统工程设计流程

MBSE 的基础是系统工程, 系统工程是实现成功系统的一个跨学科方法, 其思想体现了自顶向下的分解和自底向上的综合, 在 MBSE 中, 系统工程“V 形”流程中的模型和需求被保持在集中的模型/需求库中, 如图 1 所示。在此基础上, 系统工程师将完成以下工作:

1) 需求分析-识别所要求的系统功能

需求分析主要通过捕获用户基本及潜在的需求, 确定系统的边界和环境, 建立系统的用例模型, 最终形成系统顶层需求库。对于复杂的系统, 用例模型可以有效避免需求在传递时被开发人员误解。

2) 功能分析-识别相关系统的状态

功能分析的目的是形成能描述系统功能及其相互之间关系的一系列模型元素, 一般称为“黑盒”阶段。可以通过构建活动图(功能流)、顺序图(系统内部运转及与外部信息交换的先后次序)和状态机(可执行的模型验证功能运转)^[4]来进行系统功能描述。

3) 架构设计-系统功能分配到物理架构^[5]

架构设计是属于“白盒”阶段, 主要是将系统

功能分解、定义并分配到相关的部件及组件, 构建功能层次的系统集成架构图。在此过程中还需完成产品性能指标向部件及组件的分配, 包括产品可靠性、维修性、测试性指标等^[6]。

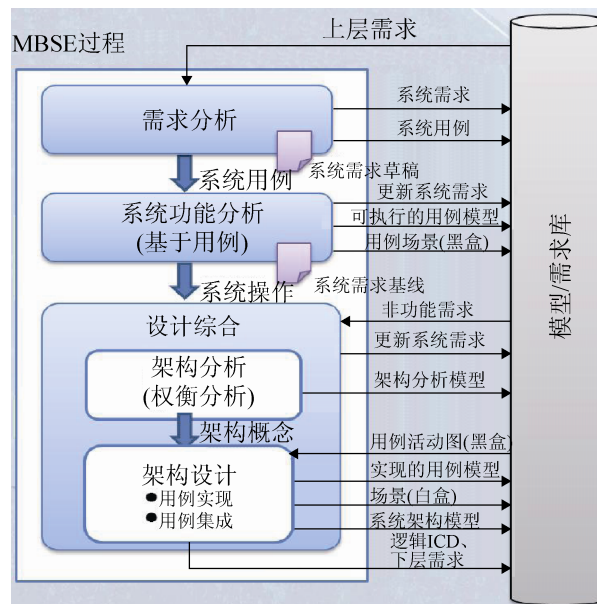


图 1 基于模型系统开发流程图
Fig. 1 MBSE development procedure

上述的每个阶段都有一个模型与开发活动相对应, 主要包括需求捕获分析阶段的用例模型、系统分析设计阶段的架构模型和子系统模型等, 如图 2 所示。在开发的全过程中通过模型传递需求并进行验证, 对整个系统的行为方式进行动态的调试, 能够从前端开始验证系统功能、最大程度地保证需求的覆盖率。

MBSE 在需求分析和架构设计阶段主要关注系统的逻辑行为, 利用建模工具进行需求分解和设计综合, 并针对系统功能进行需求验证和确认, 但对系统的连续性动态行为和性能的仿真分析支持不够。而 Matlab/Simulink 是目前连续系统建模领域的标准软件, 在连续性动态行为仿真分析时具有优势, 所以本文在 MBSE 分级的基础上, 利用 Simulink 和状态机完成了白盒阶段的综合建模工作。

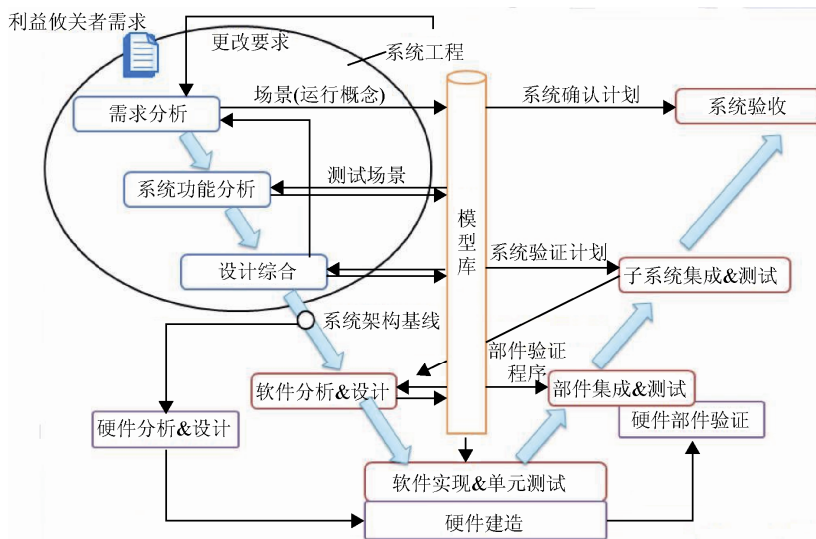


图 2 基于模型系统开发元素图
Fig. 2 MBSE development element

2 复杂飞控系统建模设计流程

飞行控制系统是飞机系统中的重要组成部分，而运输类飞机的飞控系统，由于需要满足高可靠高安全的要求和复杂多操纵面的布局，其实现的功能以及与机上其它系统的数据连接都更为十分复杂，对于此类大型复杂系统，更需要利用 MBSE 方法进行自顶向下的迭代设计。

本文以某运输机飞控系统中扰流板控制功能为例，进行了基于模型的系统工程开发设计与验证。扰流板控制功能主要分为辅助滚转及减速功能。在不同的任务模式下，系统进行辅助滚转或减速控制，其中减速控制还可以分为手动减速控制以及着陆时的自动减速控制。本文首先利用 DOORS 工具完成需求的捕获，然后利用 Rhapsody 进行系统的功能分解及初步架构设计，最后在 Simulink 中完成系统的建模及仿真验证，并验证是否与 DOORS 需求库中的条目化需求对应。

2.1 需求捕获

需求从军方、上级系统、研制过程中各阶段人员需求和相关标准规范中捕获，一般从功能要求和性能要求等几个方面进行定义。功能要求一般包括扰流板控制功能正常运行时以及故障条件下的功能

要求；性能要求主要从扰流板控制功能的精度、延迟及初始状态等进行定义；还要对系统的接口、测试及构型管理等方面提出要求。最终在 DOORS 中形成需求库，通过梳理需求，在 Rhapsody 中构建飞控系统的整体框架，实现功能的分解，并按照功能要求划分出七个子用例(Use case)，包括系统启动与关闭(Start and close the system)、空中减速(Air speed down)、地面减速(Ground Speed Down)、辅助滚转(Assistant Roller)、应急备份飞行控制(Emergency Flight Control)、自检测与维护(Maintenance)、系统监控与告警(Monitor system and alert fault)，最后完成用例图的绘制，定义系统边界与外部利益相关方，如图 3、4 所示，系统的外部交互对象如表 1 所示。

需求ID	需求描述	需求类型	需求状态	需求来源
7	5 交联准备	功能	是	
101	5.1 释源释控	功能	是	
102	5.1.1 释源释控	功能	是	
103	5.1.2 释源	功能	是	
104	5.1.3 释源释控	功能	是	
105	5.1.4 释源	功能	是	
106	5.1.5 释源	功能	是	
107	5.1.6 释源	功能	是	
108	5.1.7 释源	功能	是	
109	5.1.8 释源	功能	是	
110	5.1.9 释源	功能	是	
111	5.1.10 释源	功能	是	
112	5.1.11 释源	功能	是	
113	5.1.12 释源	功能	是	
114	5.1.13 释源	功能	是	
115	5.1.14 释源	功能	是	
116	5.1.15 释源	功能	是	
117	5.1.16 释源	功能	是	
118	5.1.17 释源	功能	是	
119	5.1.18 释源	功能	是	
120	5.1.19 释源	功能	是	
121	5.1.20 释源	功能	是	
122	5.1.21 释源	功能	是	
123	5.1.22 释源	功能	是	
124	5.1.23 释源	功能	是	
125	5.1.24 释源	功能	是	
126	5.1.25 释源	功能	是	
127	5.1.26 释源	功能	是	
128	5.1.27 释源	功能	是	
129	5.1.28 释源	功能	是	
130	5.1.29 释源	功能	是	
131	5.1.30 释源	功能	是	
132	5.1.31 释源	功能	是	
133	5.1.32 释源	功能	是	
134	5.1.33 释源	功能	是	
135	5.1.34 释源	功能	是	
136	5.1.35 释源	功能	是	
137	5.1.36 释源	功能	是	
138	5.1.37 释源	功能	是	
139	5.1.38 释源	功能	是	
140	5.1.39 释源	功能	是	
141	5.1.40 释源	功能	是	
142	5.1.41 释源	功能	是	
143	5.1.42 释源	功能	是	
144	5.1.43 释源	功能	是	
145	5.1.44 释源	功能	是	
146	5.1.45 释源	功能	是	
147	5.1.46 释源	功能	是	
148	5.1.47 释源	功能	是	
149	5.1.48 释源	功能	是	
150	5.1.49 释源	功能	是	
151	5.1.50 释源	功能	是	
152	5.1.51 释源	功能	是	
153	5.1.52 释源	功能	是	
154	5.1.53 释源	功能	是	
155	5.1.54 释源	功能	是	
156	5.1.55 释源	功能	是	
157	5.1.56 释源	功能	是	
158	5.1.57 释源	功能	是	
159	5.1.58 释源	功能	是	
160	5.1.59 释源	功能	是	
161	5.1.60 释源	功能	是	
162	5.1.61 释源	功能	是	
163	5.1.62 释源	功能	是	
164	5.1.63 释源	功能	是	
165	5.1.64 释源	功能	是	
166	5.1.65 释源	功能	是	
167	5.1.66 释源	功能	是	
168	5.1.67 释源	功能	是	
169	5.1.68 释源	功能	是	
170	5.1.69 释源	功能	是	
171	5.1.70 释源	功能	是	
172	5.1.71 释源	功能	是	
173	5.1.72 释源	功能	是	
174	5.1.73 释源	功能	是	
175	5.1.74 释源	功能	是	
176	5.1.75 释源	功能	是	
177	5.1.76 释源	功能	是	
178	5.1.77 释源	功能	是	
179	5.1.78 释源	功能	是	
180	5.1.79 释源	功能	是	
181	5.1.80 释源	功能	是	
182	5.1.81 释源	功能	是	
183	5.1.82 释源	功能	是	
184	5.1.83 释源	功能	是	
185	5.1.84 释源	功能	是	
186	5.1.85 释源	功能	是	
187	5.1.86 释源	功能	是	
188	5.1.87 释源	功能	是	
189	5.1.88 释源	功能	是	
190	5.1.89 释源	功能	是	
191	5.1.90 释源	功能	是	
192	5.1.91 释源	功能	是	
193	5.1.92 释源	功能	是	
194	5.1.93 释源	功能	是	
195	5.1.94 释源	功能	是	
196	5.1.95 释源	功能	是	
197	5.1.96 释源	功能	是	
198	5.1.97 释源	功能	是	
199	5.1.98 释源	功能	是	
200	5.1.99 释源	功能	是	
201	5.1.100 释源	功能	是	

图 3 利用 DOORS 进行需求捕获
Fig. 3 Requirement in Doors

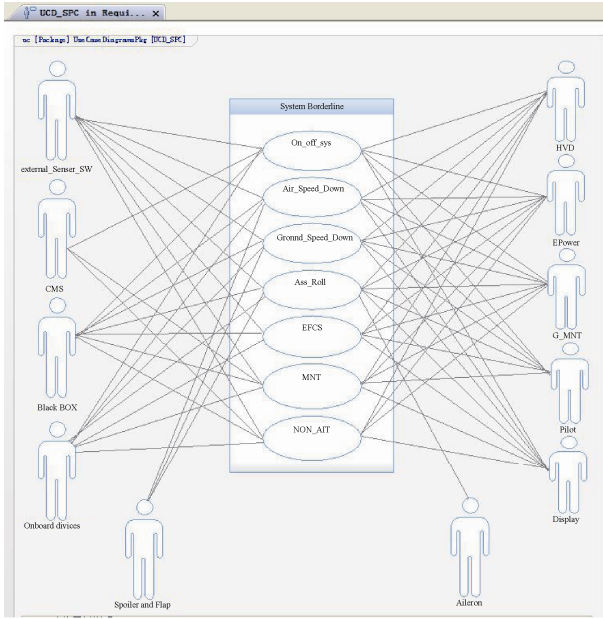


图 4 扰流板控制系统用例图
Fig. 4 Use case view for spoiler control system

表 1 扰流板控制系统的外部交互对象
Tab. 1 Actors for spoiler control system

Actor	外部对象说明
1 HYD	油源
2 EPower	电源
3 Spoiler and Flap	扰流板和减速板
4 Aileron	副翼
5 G_MNT	维护人员与设备
6 Pilot	飞行员
7 Display	座舱显示
8 External_Senser_SW	外部传感器
9 CMS	中央维护系统
10 Black BOX	飞行数据与事故记录
Onboard Devices	其他机载设备

2.2 建模设计

2.2.1 功能建模(黑盒模型)

基于用例图中的划分, 分别搭建各用例反映功能流程的活动图(Activity Diagram)和反映运行时序的序列图(Sequence Diagram), 细化系统的运行状态。图 5 为扰流板控制系统空中减速的活动示意图, 在系统上电后, 首先等待飞行员的操作指令, 接下来判断系统当前模态、对外部传感器收集的姿态数据进行采集, 控制律解算出输出的控制指令, 最后通过控制扰流板作动器带动舵面进行偏转完

成减速功能, 在这一过程中, 实时监控外部传感器的值, 任何出现的故障都会被记录到 NVM 区中。图 6 为描述这一过程的时序示意图。

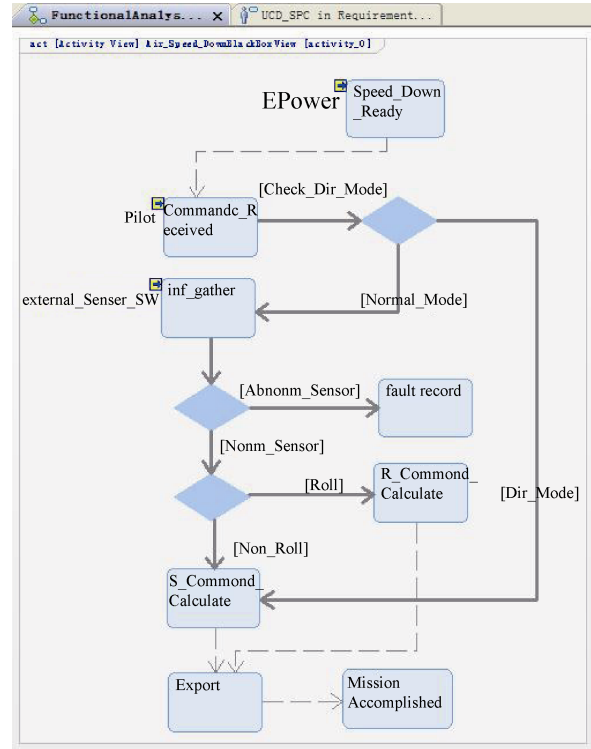


图 5 扰流板空中减速的活动示意图
Fig. 5 Activity view for spoiler control system

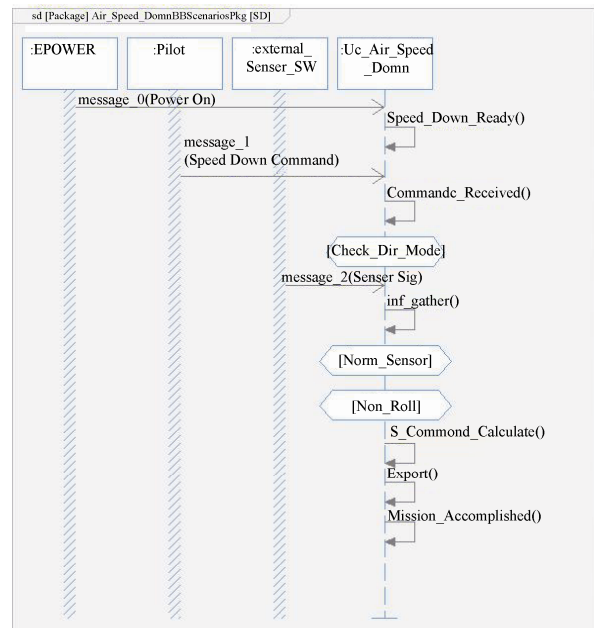


图 6 扰流板空中减速的时序示意图
Fig. 6 Sequence view for spoiler control system

2.2.2 行为逻辑建模(白盒模型)

基于系统功能分析阶段的黑盒模型,对系统内部各子功能模块或子系统间的行为进行定义并完成进一步划分,如将扰流板空中减速用例根据供电、数据处理等功能进一步划分为电源、总线、离散数据接收处理、故障申报与记录、信号监控等子模块,其他用例亦可根据功能进一步划分。接下来将活动图中的各个元素分配到不同的子模块中。

同时根据控制模式的切换逻辑,确定子模块之间的交联关系。如在主飞控计算机失效状态下,可

由扰流板伺服电子单元由执行主飞控计算机控制律指令切换至模拟备份控制,即由扰流板伺服电子单元内部的模拟控制律完成控制。因此传感器子系统应与扰流板伺服电子交联,以满足模拟备份控制的要求,如图 7 所示。此处进行对需求的覆盖分析,在扰流板控制系统的 314 条需求中,有 62 条满足了确认关系,其余的未验证需求主要为性能需求、五性需求和软硬件需求等,需要在后面的模型仿真中进一步验证。

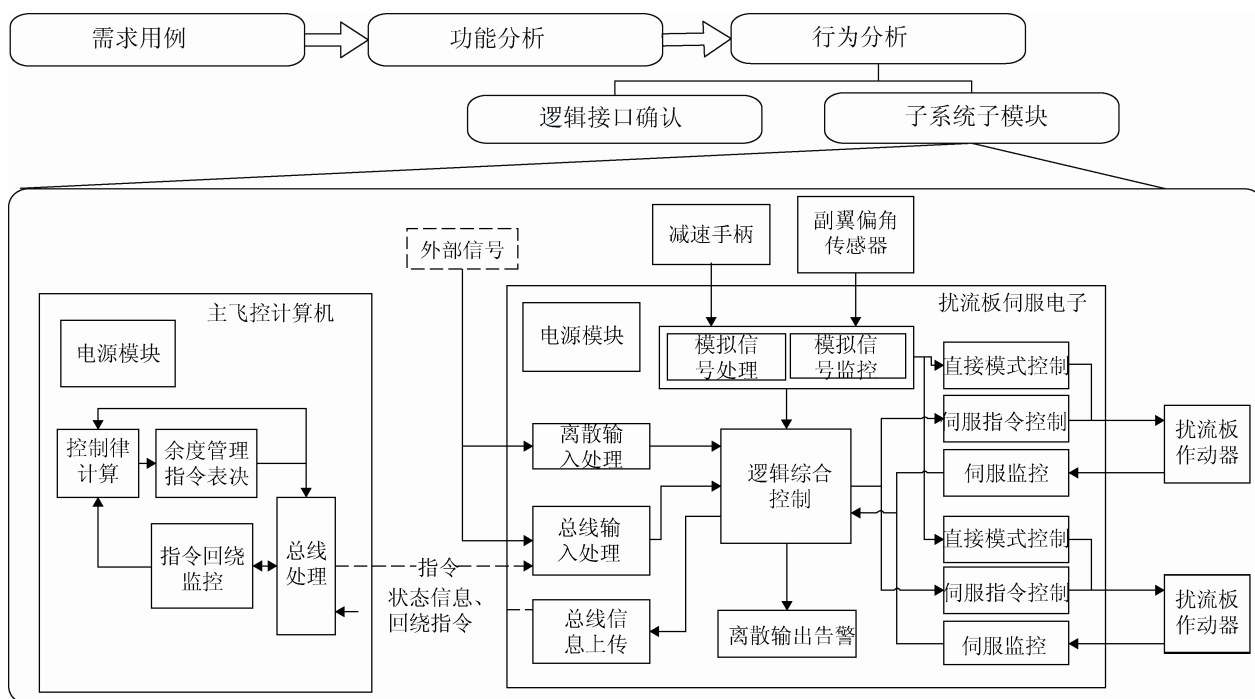


图 7 系统架构分析子系统模型
Fig. 7 Model for subsystem in configuration analysis

2.2.3 模型集成管理

根据 Rhapsody 架构分析得出的上述白盒模块,通过 Simulink 进行进一步模型化,实现系统的功能模型拓展,对飞控系统仿真所涉及的模型如动力学模型、控制律模型、传感器模型、作动器模型和航电显示等模型,按照其表征的功能进行建模,建立系统的架构模型和信号流向关系,并利用 State flow 进行仿真分析。

系统模型实现如图 8~13 所示,包括计算机、

减速手柄传感器、左右副翼偏角传感器、SPC 作动器 LVDT、测试模块的 Simulink 实现模型。

其中,减速手柄传感器子系统的接口和功能行为模型 Simulink 实现如图 14~15 所示;伺服电子伺服控制及模拟备份模块的接口和功能行为模型 Simulink 实现如图 16~17 所示;余度表决模块的接口和功能行为模型 Simulink 实现如图 18~19 所示。其余子系统类似,此处不一一列举。

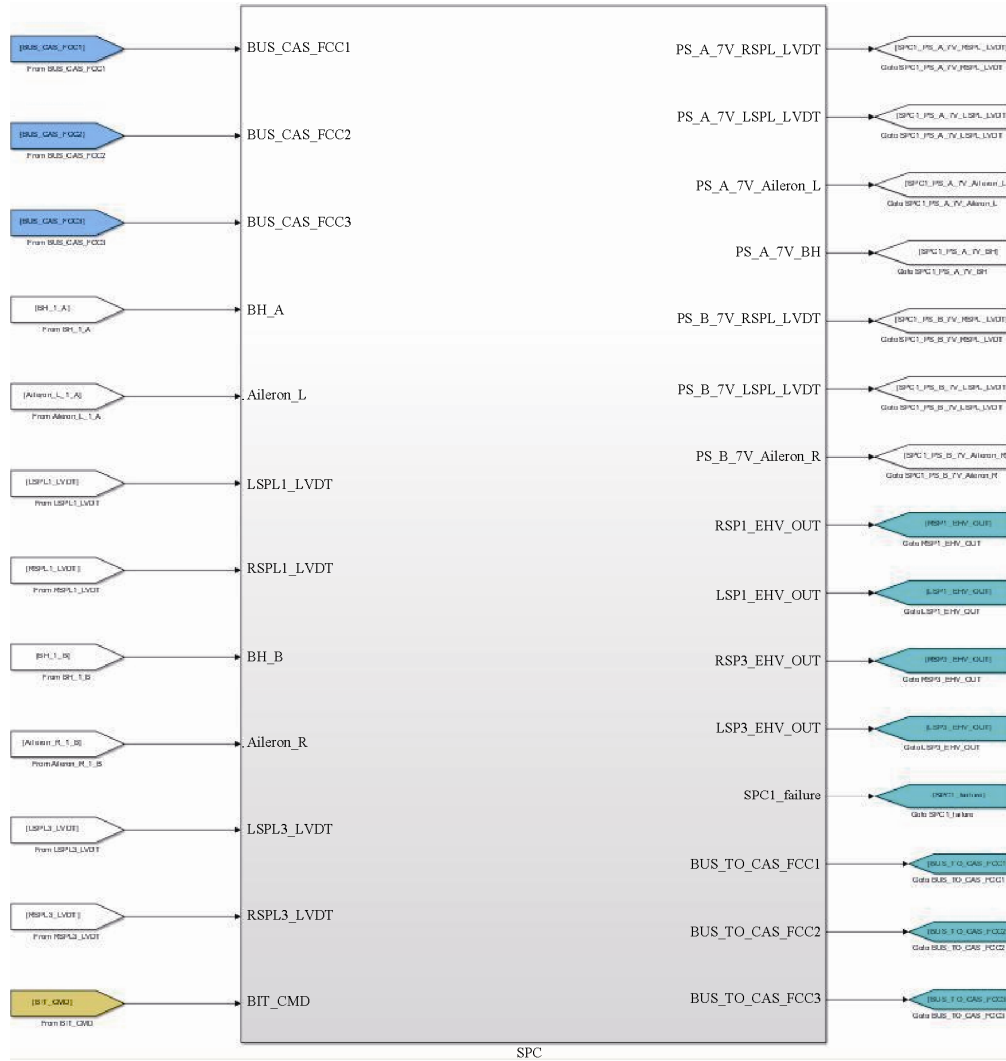


图 8 子系统模型 Simulink 实现-计算机
Fig. 8 Simulink model for subsystem-SPC

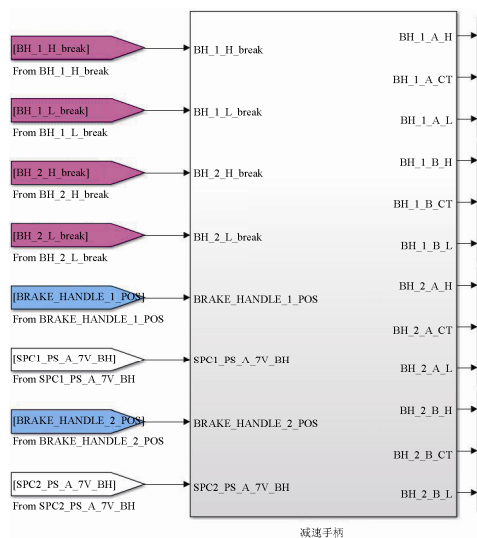


图 9 子系统模型 Simulink 实现-减速手柄传感器
Fig. 9 Simulink model for subsystem-speedbrake handle sensor

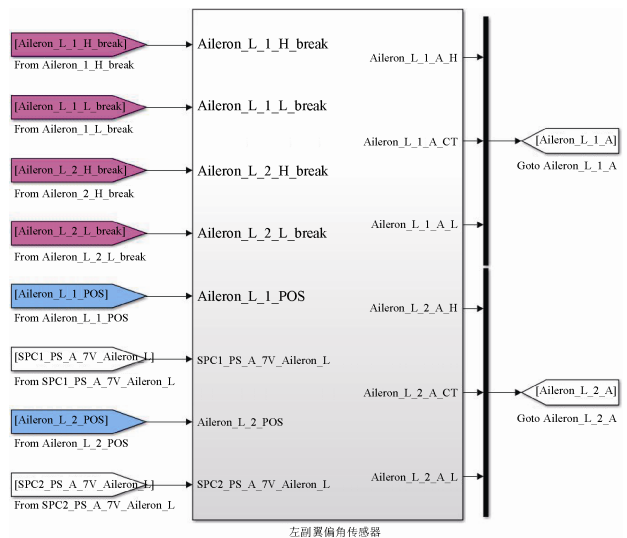


图 10 子系统模型 Simulink 实现-左副翼偏角传感器
Fig. 10 Simulink model for subsystem- left AIL sensor

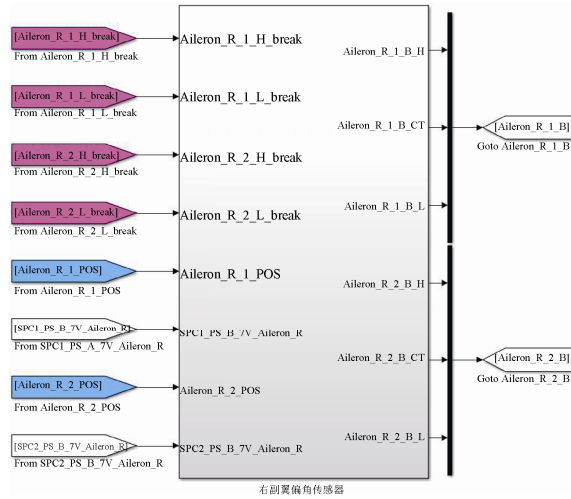


图 11 子系统模型 Simulink 实现-右副翼偏角传感器
Fig. 11 Simulink model for subsystem- right AIL sensor



图 12 子系统模型 Simulink 实现-SPC 线位移传感器
Fig. 12 Simulink model for subsystem- SPC LVDT

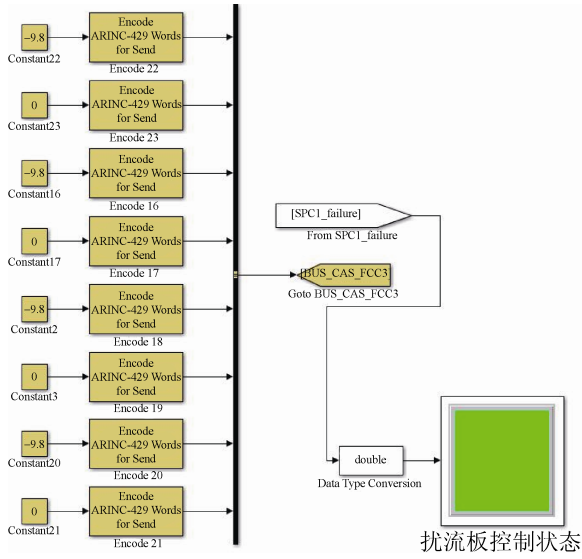


图 13 子系统模型 Simulink 实现-测试模块
Fig. 13 Simulink model for subsystem- test model

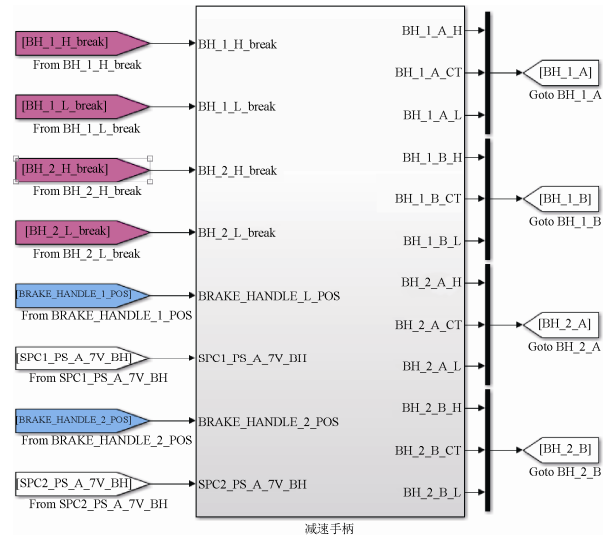
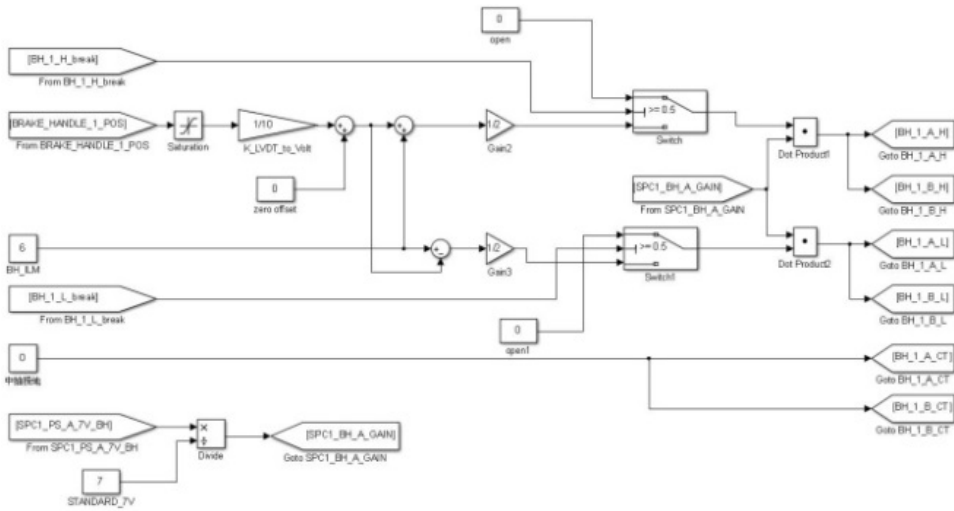
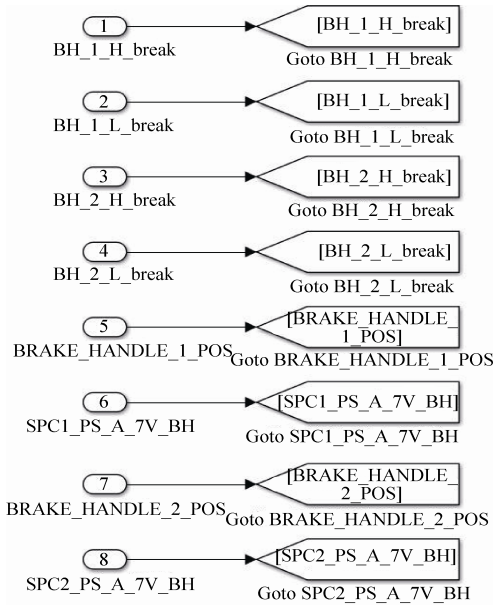


图 14 减速手柄传感器接口模型 Simulink 实现
Fig. 14 Simulink interface model of speedbrake handle



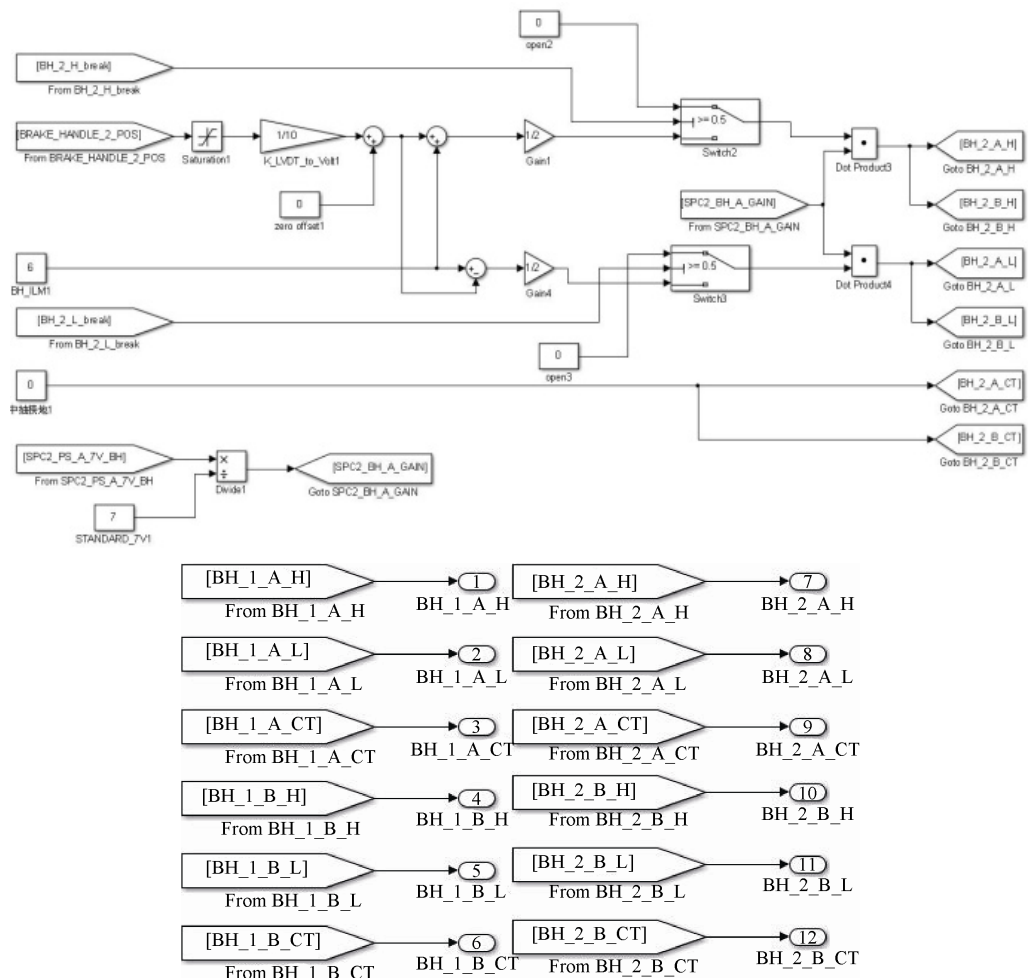


图 15 减速手柄传感器功能行为模型 Simulink 实现
Fig. 15 Simulink function model of speedbrake handle

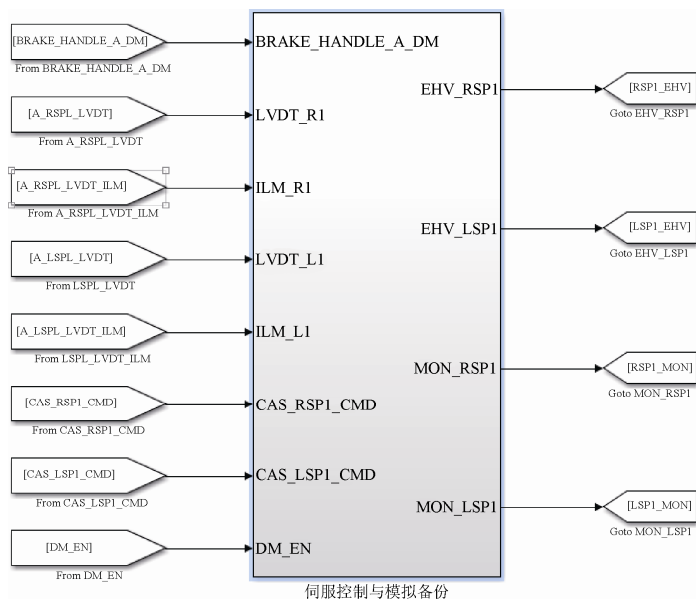


图 16 伺服电子伺服控制及模拟备份模块接口模型 Simulink 实现
Fig. 16 Simulink interface model of ACE and EFCS

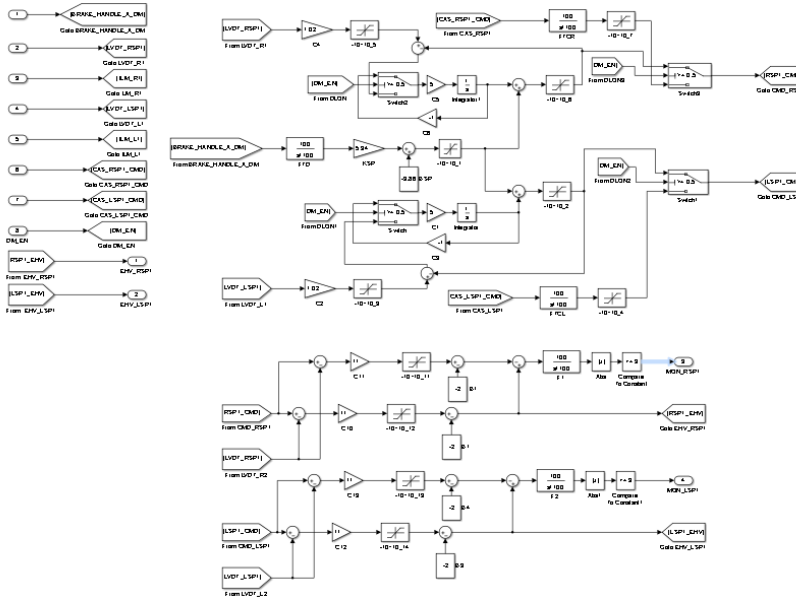


图 17 伺服电子伺服控制及模拟备份模块功能行为模型 Simulink 实现
Fig. 17 Simulink function model of ACE and EFCS

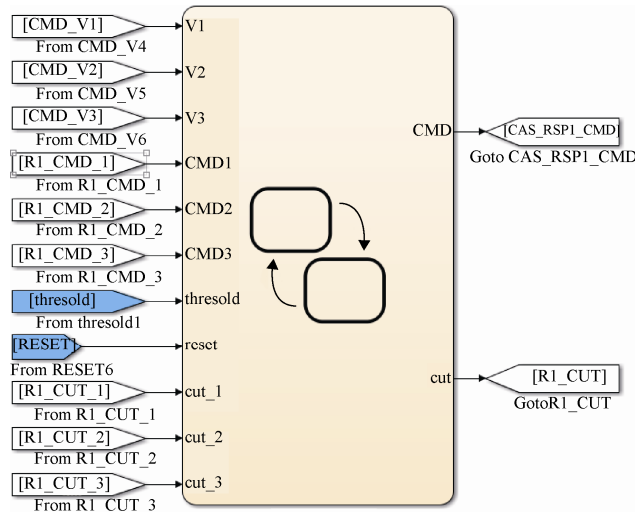


图 18 余度表决接口模型 Simulink 实现
Fig. 18 Simulink interface model of RM function

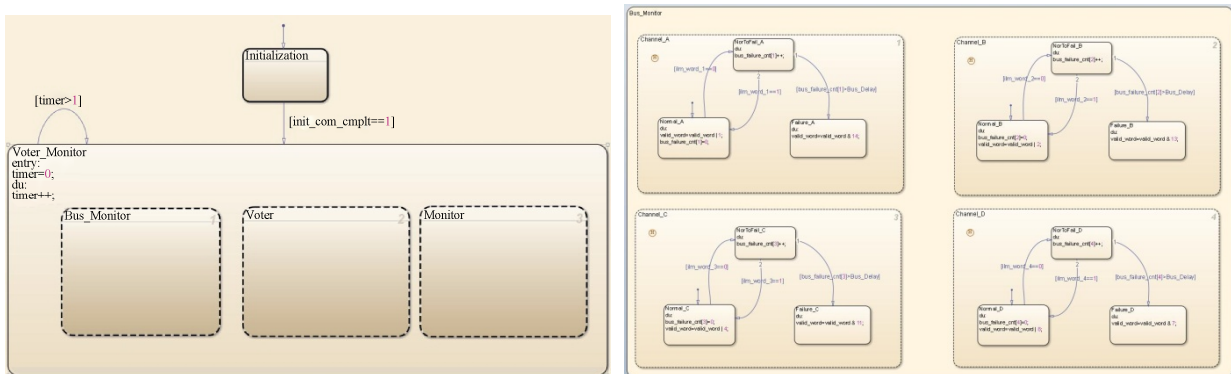


图 19 余度表决功能行为模型 Simulink 实现
Fig. 19 Simulink function model of RM function

2.3 仿真验证

通过脚本语言对需求库中每条需求建立自动测试用例,实现系统设计需求与功能模型、行为模型的集成验证,满足系统设计需求验证的完整覆盖,避免后期工程实现出现反复更改设计的情况,大大减少系统研制中由于方案验证不充分带来的风险隐患。

仿真得出,共有 267 条扰流板控制系统需求得到了验证,包括所有的功能需求,大部分性能需求,其余未验证的 47 条需求为需要实物进行验证的硬件需求等,需要在真实验证环境中进一步验证。

同时,按照最低约定层次对系统模型进行故障的逐一设置,通过故障注入可得出各故障模式对系统产生的影响,最终完成基于功能模型的故障模式及影响分析(FMEA),能及早发现方案设计中的安全性隐患,及时进行修正,提高系统方案的安全性。

3 结论

基于模型的系统工程是复杂系统研发的重要创新,对复杂系统的设计起着至关重要的作用。本文选用了 DOORS 需求库、Rhapsody 建模分析,结合 Simulink 系统建模仿真的方法对复杂飞控系统进行了基于模型的系统开发设计。

该方法能够有效地指导复杂系统的需求确认、功能架构设计、逻辑架构设计等相关工作,进一步为探索系统需求分析、功能分析和综合架构设计工作建立一套行之有效的方法。而基于多物理域和连续动态行为的一体化模型设计与仿真验证等关键技术研究,将对我国面向复杂大型飞控系统研发设计以及工程实现,具有重大现实指导意义。

在基于 MBSE 方法的飞控系统开发设计中,如何实现 Rhapsody 在连续仿真中的应用,实现由

顶层需求到架构分析乃至子系统详细设计仿真一体化,多学科仿真建模工具在同一平台的集成与交互^[7],也是下一步值得研究与探索的重要问题。

参考文献:

- [1] 吴颖,刘俊堂,郑党党. 基于模型的系统工程技术剖析 [J]. 航空科学技术, 2015, 26(9): 69-73. (Wu Ying, Lui Juntang, Zheng Dangdang. Technical Analysis of Model-Based System Engineering [J]. Aeronautical Science and Technology, 2015, 26(9): 69-73.)
- [2] Hoffann H P. System engineering best practices with the rational solution for systems and software engineering [M]. New York, United States: IBM Corporation, 2011.
- [3] 韩凤宇,林益明,范海涛. 基于模型的系统工程在航天器研制中的研究与实践 [J]. 航天器工程, 2014, 23(3): 119-125. (Han Fengyu, Lin Yiming, Fan Haitao. Research and Practice of Model-Based System Engineering in Spacecraft Research [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(3): 119-125.)
- [4] 白洁,吕伟,张磊,等. 基于模型的系统工程在机载电子系统领域的应用 [J]. 机载设备及技术, 2015, (4):96-99. (Bai Jie, Lv Wei, Zhang Lei, et al. Application of Model-Based System Engineering in the Field of Airborne Electronic Systems [J]. Airborne Equipment and Technology, 2015, (4):96-99.)
- [5] 丁鼎. 基于模型的系统工程在民机领域的应用 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(4):47-50. (Ding Ding. Application of Model-Based System Engineering in the field of civil aircraft [J]. Shenyang: Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2012, 29(4):47-50.)
- [6] 孙刚,曹云峰,庄丽葵,等. 基于模型的飞控系统虚拟样机平台 [J]. 云南民族大学学报, 2014, 23(4): 289-292. (Gang Sun, Yunfeng Cao, Likui Zhuang, et al. Model-based virtual prototyping platform for flight control system [J]. Journal of Yunnan Nationalities University, 2014, 23(4): 289-292.)
- [7] 乔文峰,李正强,黄帅,等. 基于模型的民用飞机集成设计研究 [J]. 航空制造技术, 2015(4): 72-77. (Qiao Wenfeng, Li Zhengqiang, Huang Shuai, et al. Model based integrated design of civil aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 2015 (4): 72-77.)