

MBSE 在民机起落架系统设计中的应用

Application of MBSE Method During Landing Gear System Design for Civil Aircraft

汤超 方俊伟 谢陵 张磊 夏语冰 / Tang Chao Fang Junwei Xie Ling Zhang Lei Xia Yubing
(上海飞机设计研究院,上海 201210)
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

详细介绍基于 Rhapsody 的大型民机系统功能开发流程与方法,及其在民用飞机起落架系统设计中的应用。通过模型的方式对系统建立用例、功能流、时序关系和可用于执行验证的状态机来描述系统,指导大型民机复杂系统设计过程中的需求分析、功能分析和设计综合工作,探索 MBSE 方法在民机复杂系统设计中的指导作用。

关键词:基于模型的系统工程(MBSE);功能分析;大型民机;起落架系统

中图分类号:V214

文献标识码:A

[Abstract] This paper clearly introduces function analysis process and method of large-scale civil aircraft based on Rhapsody, and its implementation in landing gear system design. Use case, function flow, sequence and executable state machine of system are set up by model. to guide the requirement analysis, function analysis and architecture design of highly complex system in large-scale civil aircraft, and to explore practice of MBSE in highly complex system of civil aircraft.

[Key words] model-based system engineering (MBSE); function analysis; large-scale civil aircraft; landing gear system

0 引言

传统的民用飞机系统研制都是基于文档的,但由于民机研制是一项涉及多学科融合的系统工程,不同设计人员所关注的领域不同,从文档中读取信息很容易产生理解的不一致性,在产品的设计过程中经常出现反复迭代修改等情况。虽然近年来,文档已从过去的纸质形式转换为电子形式,但并未从根本上改变这一状况。

基于模型的系统工程(Model-Based System Engineering,简称 MBSE)能有效解决这些问题,它是采用模型驱动(Model-Driven)的方式进行系统综合设计的现代工程方法,其重点是在不同的场景条件下进行功能分析,采用模型形式来描述、分析和检验

飞机及其系统在各种飞行任务或运行场景下的活动内容、状态特性、交互信息,并生成与之匹配的功能需求、功能接口、测试场景和逻辑架构的过程。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^[1]。

本文首先介绍基于 Rhapsody 的功能分析流程和方法,然后着重介绍这套 MBSE 方法在某大型民机起落架系统设计中的应用,最后对本文进行总结。

1 基于 Rhapsody 的系统工程设计流程

图 1 为模型驱动的系统研制过程,基于 Rhapsody 的功能场景建模的主要内容包括需求分析(Re-

quirement Analysis)、功能分析(Function Analysis)和设计综合(Design Synthesis)。

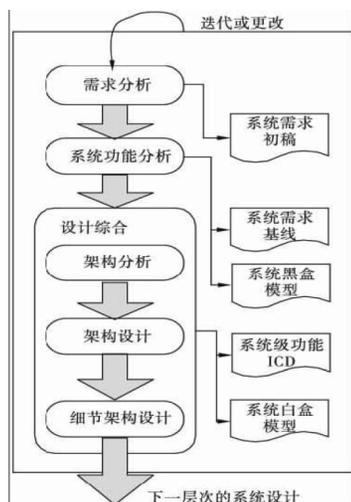


图1 模型驱动的系统研制过程

(1) 需求分析(Requirement Analysis)

需求分析一般指的是需求确认,利用建模工具建立需求矩阵,反映需求与用例之间的追溯关系(Trace)及需求与系统活动的满足关系(Satisfy),最终进行需求覆盖率的统计。

(2) 功能分析(Functional Analysis)

功能分析是建模中最重要和最主要的内容,一般称为“黑盒”(Black Box)阶段,如图2所示,主要构建有:例图(界定范围和外部交互对象)、活动图(功能流)、时序图(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)。

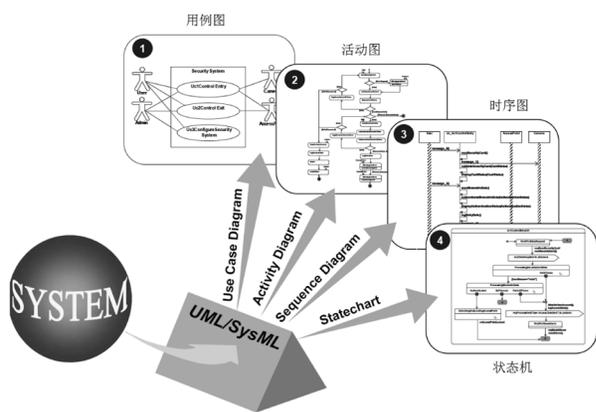


图2 基于 Rhapsody 的系统开发流程

(3) 架构设计(Architecture Design)

架构设计是属于“白盒”(White Box)阶段,它直接将系统的功能活动分配到选用的一系列系统

中,构建功能层次的系统集成架构图。

2 起落架系统综述

起落架系统是影响飞机安全的重要系统之一,也是唯一支撑整架飞机的部件,当飞机起飞后,可以视飞行需要而收回起落架。起落架控制系统一般包括起落架结构、起落架收放系统、前轮转弯系统、机轮刹车系统及起落架位置指示与告警系统。机轮刹车系统分为自动刹车和人工刹车,主要为飞机在地面滑跑时提供减速功能,在起落架收起时提供止转刹车功能以及当飞机在地面停放时提供停机刹车功能,此外,系统还具有刹车温度监视和轮胎压力指示功能。国际上大型民机起落架控制系统技术比较成熟,目前国内尚有一定差距^[2]。

起落架系统模型按飞机运行场景可分为两个用例,分别是起飞(UC1_TakeOff)和着陆(UC2_Land),下文将用起飞场景介绍 MBSE 方法在民机起落架系统设计中的应用。

2.1 需求分析

需求分析的目的是对系统级需求进行分类,筛选出其中的系统级功能需求,根据功能需求确定合适的建模场景即用例(Use Case),建模工作则基于用例展开。

图3为起落架系统起飞用例图,定义了系统的边界和外部交互对象,为后续建立系统与外部的关联关系,生成接口文件打好基础,外部交互对象列表见表1。

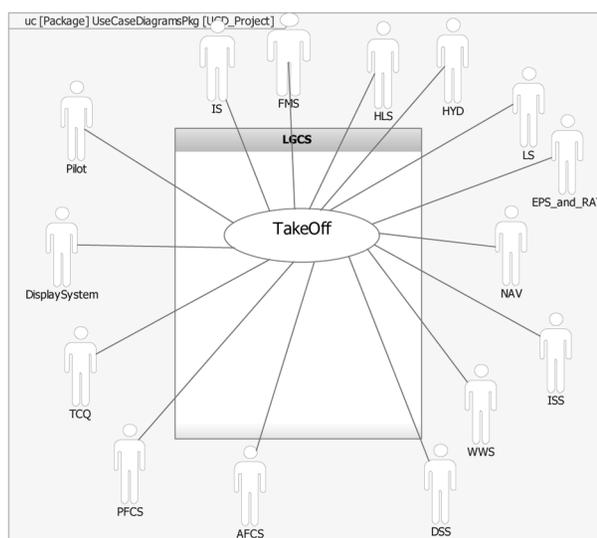


图3 起落架系统起飞用例图

表 1 起落架系统用例的外部交互对象

Actor	外部交互对象
Pilot	飞行员
Display System	显示系统
TCQ	油门台
PFCS	主飞控系统
AFCS	自动飞行系统
DSS	舱门信号系统
WWS	水废水系统
ISS	综合监视系统
NAV	导航
EPS_and_RAT	电源/冲压空气涡轮
LS	照明系统
HYD	液压系统
HLS	高升力系统
FADEC	全权限数字电子控制系统
FMS	飞行管理系统
IS	信息系统

需求分析包括关联 (Trace) 关系和满足 (Satisfy) 关系,前者相对简单,只需把所有功能性需求(由 Rational Doors 管理)关联到对应的用例即可,后者则需要把每条功能性需求链接到模型中相应的操作 (Operation)、事件 (Event) 和属性参数 (Attribute) 上,再进行需求矩阵和覆盖率分析,satisfy 分析将在 2.2 节中介绍。

图形化的显示可以直观反映需求的覆盖率,如图 4 所示,该起落架产品的 251 条功能性需求中有 199 条关联到了起飞用例,覆盖到该用例的需求比例为 79%。当然,该 199 条需求中有一部分也被着陆模型所覆盖,剩余 52 条需求分为两部分,其中 31 条被着陆模型覆盖,另外 21 条是地面维护相关的需求,不属于飞机运行场景,暂不作分析。

2.2 功能分析

在功能分析阶段,针对系统用例,搭建反映系统运行情况的活动图 (Activity Diagram),反映系统运行时序的序列图 (Sequence Diagram) 以及用于模型执行的状态机 (State Machine),描述系统的运行状态。图 5 为起落架正常放下的活动图示意,飞行员摁下收起落架手柄之后,系统依次执行打开起落

架上位锁、放下起落架、下位锁锁住起落架,在此过程中下位锁传感器会一直监控等待已锁定的信号,锁定后在显示系统显示起落架放下成功。图 6 为刹车控制的时序示意图,在整个过程中,系统监视刹车温度和轮胎压力,当激活手动刹车后,根据传感器的状态可能会运行在正常模式、备用模式或是应急模式,过程中可以采用差动刹车,如果飞机地速为零时飞行员运行停机刹车。

Overall Quality: 79%



Project Details

2 documents
Storage: File
Size: 705 K

Requirements

251 requirement(s)
50 uncovered requirement(s)

图 4 需求对起飞用例的覆盖率

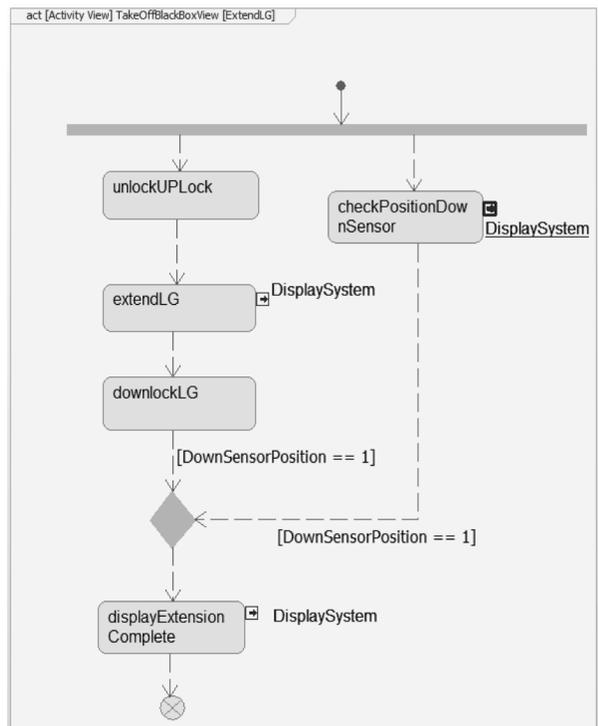


图 5 起落架正常放下的活动示意图

在活动图、时序图和状态机完成之后,通过 satisfy 分析实现模型对需求的确认。在 2.1 节已经关联到起飞用例的 199 条需求中,有 54 条作了满足 (satisfy) 关系,即链接到了相应的操作 (Operation)、事件 (Event) 和属性参数 (Attribute) 上,剩余的 145

条未链接的需求为 Rhapsody 功能模型中未能体现的其他类型的需求,主要包括安全性需求、软硬件实现、性能、效能及模型中尚未包含的地面维护、构型改进功能等,如图 7 所示。

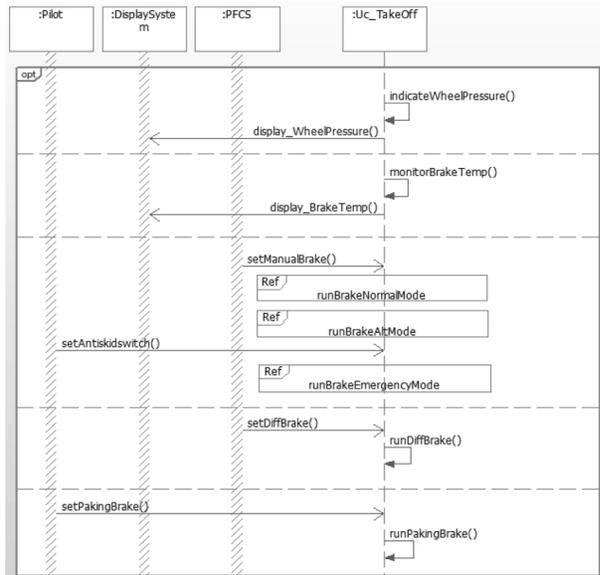


图 6 刹车控制的时序示意图



图 7 需求满足关系 (satisfy) 分析覆盖率

内部模块图是功能分析阶段的重要输出物之一,如图 8 所示,它是在黑盒阶段根据用例图自动生成,同时融合进了模型的基本元素,包括活动图、时序图阶段生成的操作 (operation) 和事件 (event),反映的是系统和外部交互对象间的接口关系,由图中划线部分(飞行员和用例间的接口 iPilot_Uc_TakeOff)可知,内部模块图 (IBD) 中包含了所有接口中的详细信息内容。

2.3 设计综合

设计综合阶段是基于系统功能分析阶段的黑盒模型,综合考虑系统安全性相关需求及黑盒模型建模阶段发现的安全性相关问题,用模型的方式建

立系统内部各子功能模块或子系统间的行为,以及子系统之间、子系统与系统外部的交联关系,该阶段模型即为系统白盒模型。

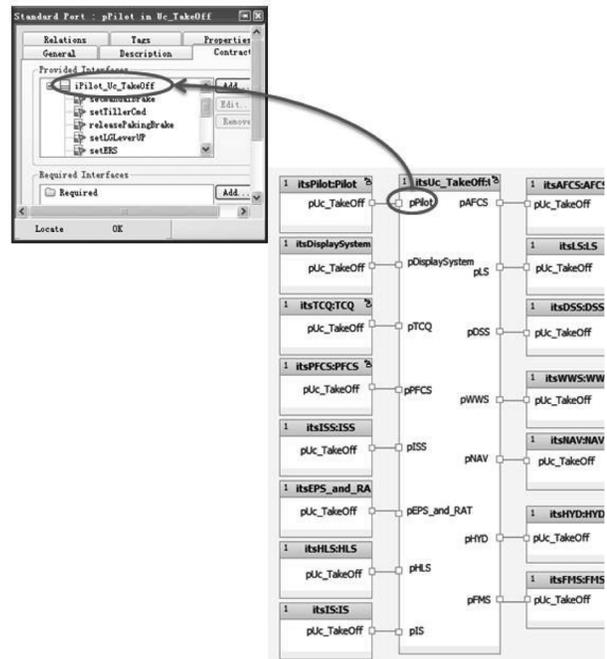


图 8 黑盒阶段的系统内部模块图 (IBD)

在此阶段,首先建立系统的模块定义图 (Block Definition Diagram),初步建立了起落架系统内部的逻辑架构,如图 9 所示,不仅显示了系统与外部交互对象的接口关系,同时也把系统分配成了各个子系统。起落架用例 (LGS) 根据功能分为五个子模块^[3-6],分别是主模块 (Main)、收放起落架 (Retract_and_Extend_LG)、前轮转弯系统 (NWS)、自动刹车 (AutoBrake)、手动刹车 (ManualBrake),其中主模块包括起落架结构和告警的部分。

基于建好的 BDD 图,接下来要做的工作是把黑盒阶段活动图中各元素 (action) 分配到五个子模块功能中,形成泳道图,通过这种图形化语言建立了五个子系统间的信息传递关系,即各子功能间的接口关系,各层活动图按照相同的办法处理。

相应的,白盒阶段时序图相比黑盒阶段增加了一些各子系统间信息流的传递过程。用于执行的状态机与黑盒阶段保持一致,在此不再赘述。

可知,白盒阶段已把系统分解成子系统,此时的 IBD 图 (如图 10 所示) 相比黑盒阶段的 IBD 图 (如图 8 所示),一方面是已经把黑盒打开,描述的是外部交互对象与子系统间的关系,另一方面,此时的接口信息还包含各子系统或功能间的接口关系。

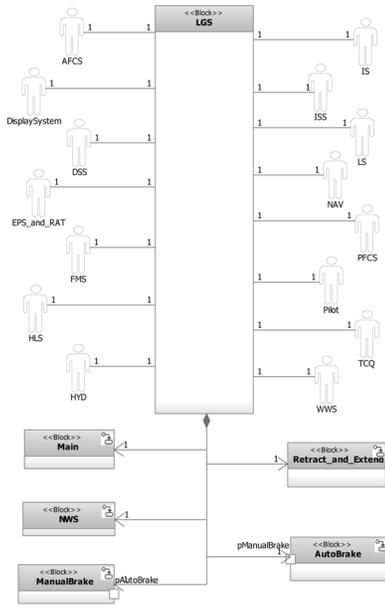


图9 白盒阶段的系统模块定义图(BDD)

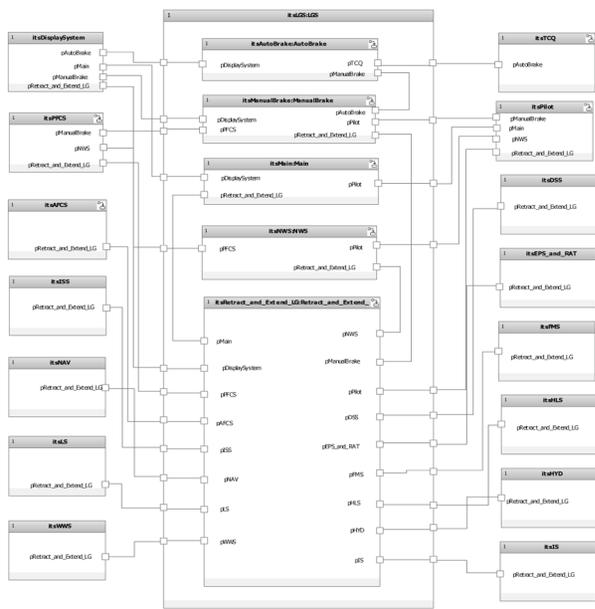


图10 白盒阶段的系统内部模块图(IBD)

至此,完成了基于 Rhapsody 的系统研制过程,通过建立用例、功能流、时序图和可执行的状态机完成了系统的需求分析、功能分析和设计综合,通过模型的方式指导系统的研制。

3 结论

近年来随着 MBSE 在航空、航天等复杂系统研制中得到广泛认可,如何把这套方法更为有效地实践到型号的研制中就成为了众多研究人员的新课题。

本文介绍的基于 Rhapsody 的系统工程设计方法通过图形化的方式建立对象系统的用例图、活动图、时序图和状态机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,进一步为探索系统研制双 V 模型左侧 top-down 开发过程中的需求分析、功能分析和设计综合工作建立一套行之有效的方法。

参考文献:

[1] 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(6).
 [2] 孙建全. 大型民机起落架控制系统技术发展[J]. 航空制造技术, 2009, 8:51-53.
 [3] 夏语冰, 钟科林, 姜逸民. 民用飞机转弯控制系统研究[J]. 科技资讯, 2010, 32:2-3.
 [4] 冯永胜. 起落架系统轮载信号分析[J]. 科技资讯, 2011, 29:28.
 [5] 郑占君. 某民用飞机应急刹车系统蓄压器性能仿真计算分析[J]. 科技资讯, 2011, 27:62-63.
 [6] 薛东青. 某型飞机刹车系统浅析[J]. 科技促进发展, 2012(8).

(上接第 43 页)

(1) 在拉伸载荷下,长桁梢部结构在第 1 颗紧固件位置,蒙皮剪切破坏;

(2) 长桁梢部在斜削段存在局部弯曲;

(3) 对应 15°、30°和 45°斜削角的试验件,30°斜削角对应的试验件平均破坏载荷最低,局部弯曲变形率最小,载荷过渡相对平缓。

以上结论可以有效指导某型飞机金属机翼下壁板长桁梢部结构的设计。然而,本文仅通过静力拉伸

试验对长桁梢部结构进行了分析,下一步则需要通过疲劳试验对长桁梢部结构进行更加深入的研究。

参考文献:

[1] 郑晓玲, 鲍蕊, 费斌军. 综合环境下民机机身典型长桁接头疲劳分析[J]. 北京: 航空航天大学学报, 2007, 4:379-382.
 [2] 刘杨. 民用飞机机翼壁板长桁斜削端头改进设计[J]. 江苏科技信息, 2013, 3:63-65.