

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.06.074

基于模型的飞机机电综合管理系统设计应用研究

聂同攀*, 梁伟

航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 针对飞机机电综合管理系统功能高度集成、系统架构和接口设计复杂等特点, 基于 Harmony MBSE 设计方法, 开展了基于模型的机电综合管理系统设计应用研究。采用系统建模软件 Rhapsody 构建了某型飞机机电综合管理系统需求模型、功能分析模型和架构设计模型, 实现了系统需求确定、功能分解、架构设计等关键技术过程, 并通过状态机模型对系统设计的正确性进行了验证。应用结果证明, 该方法可以有效支持机电综合管理系统的研制, 为复杂系统的设计提供了一种有效的实施途径。

关键词: 机电管理系统; 系统工程; MBSE; Rhapsody

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2017) 06-0074-05

随着军事需求的变化和科学技术的发展, 飞机机电系统目前正在向综合化、多电化和智能化方向发展^[1]。机电综合管理系统作为飞机机电控制和管理的“心脏”, 通过将起落架系统、液压系统、环控系统、电源系统等机电系统的控制功能进行综合, 改变了传统飞机机电系统控制“散、乱、杂”的布局, 在减轻体积、重量的同时增强了系统的容错能力、故障诊断能力, 大幅提高了飞机的作战效能和可用性, 是新一代飞机先进性的重要体现^[2]。

机电综合管理系统一般采用综合化、开放式的系统构型, 对大量的机电控制功能、不同类型的接口进行一体化设计, 同时能通过动态的任务配置、数据融合和资源共享实现全系统的余度管理。因此, 机电综合管理系统是典型的复杂系统, 其设计理念与传统飞机机电系统分散化、自成一体的控制设计有着显著区别, 必须有一套全新的设计方法和技术体系支持。

基于模型的系统工程 (Model-Based System Engineering, MBSE) 是设计复杂系统的有效方法, 它改变了传统以文档

方式传递信息的设计模式, 而是通过可视化和图形化的系统模型更加清晰和准确地反映系统功能和行为, 并通过需求验证尽早设计阶段对方案和架构进行修正, 从而有效地提升复杂系统的设计效率和质量^[3, 4]。

本文结合目前主流的 MBSE 设计流程和方法, 重点探讨 MBSE 技术在某型飞机机电综合管理系统中的应用过程, 最后给出相关的研究结论与建议。

1 Harmony MBSE 设计流程

国外基于模型的系统工程技术发展得很快, 并提出了多种不同的技术思路, 被普遍采用的 MBSE 方法是 IBM 公司提出的 Rational Harmony 设计方法, 如图 1 所示, 主要过程包括需求分析、功能分析和设计综合 3 个过程^[5]。

(1) 需求分析

需求分析是将系统的利益攸关者需求转化为设计要求, 同时, 针对系统的功能性需求建立系统“用例” (Use

收稿日期: 2017-05-05; 退修日期: 2017-05-15; 录用日期: 2017-05-25

* 通讯作者: Tel.: 029-86832265 E-mail: nietp60315@sina.com

引用格式: NIE Tongpan, LIANG Wei. Application research on model-based design of integrated electromechanical management system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (06): 74-78. 聂同攀, 梁伟. 基于模型的飞机机电综合管理系统设计应用研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28 (06): 74-78.

Case),

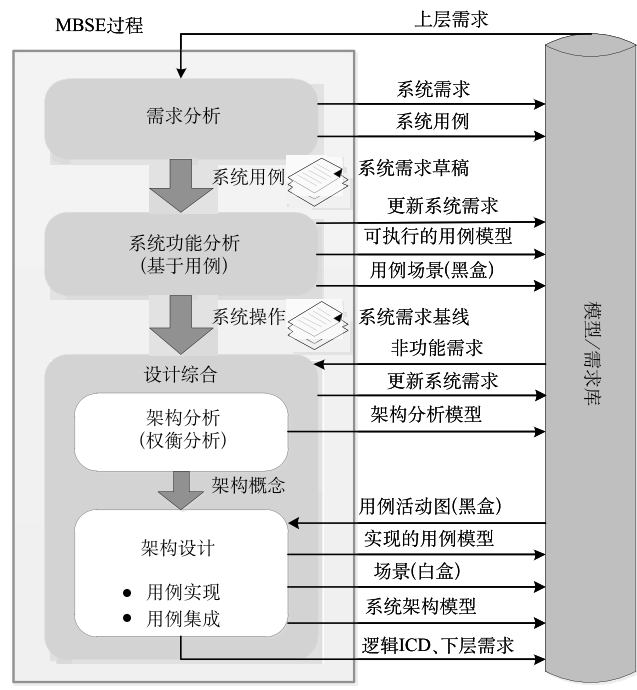


图 1 Harmony MBSE 设计流程
Fig.1 Design flow of Harmony MBSE

并将系统功能需求与设计用例之间建立追溯关系 (Trace) 的过程。

(2) 功能分析

功能分析是将系统看作“黑盒”，通过分析每一个系统用例的执行过程，识别系统与外界设备的交互关系的过程。在功能分析阶段，可通过模型仿真实现系统需求和功能逻辑的确认和验证，最终完整描述系统的外部逻辑接口。功能分析的重点是建立系统的逻辑架构，即将需求文档中“描述性”的系统功能需求转化为一系列可向下游分配的系统操作需求（包括衍生操作需求），但该阶段并不关心系统的物理实现。

(3) 设计综合

设计综合是在综合考虑所有系统功能的基础上进行的架构分析与设计的过程，这一阶段主要将系统的功能架构转化为物理架构，将功能分析阶段形成的一系列操作需求分配到物理单元，同时形成内部单元之间的逻辑接口，最后通过仿真对系统架构进行验证与确认。

基于 Harmony MBSE 方法，IBM 公司开发了 DOORS 需求管理工具和 Rhapsody 建模工具，使用 SysML 语言中的活动图、顺序图、状态机图等模型，将传统系统设计的核心成果（如需求列表、功能架构、物理架构等）进行模型化和显性

化，促进不同专业设计人员之间的交流，保证各阶段需求的可追溯性，从而在一定程度上提升复杂系统的开发效率。

2 基于模型的某型飞机机电综合管理系统设计应用

以某型飞机机电综合管理系统的设计为例，说明 MBSE 方法在系统设计过程中的应用实现过程。

2.1 概述

某型飞机机电综合管理系统是各机电系统的控制管理与信息处理中心，系统采用分布式网络架构，由远程接口单元、核心处理机、远程配电装置等多台计算机构成，计算机之间通过系统总线进行数据和信息传递。同时，系统可利用航电系统的多功能显示器进行各机电系统的数据综合显示、故障告警与管理等功能，通过飞机总线网络实现机电综合管理系统与航电、飞行控制等其他系统的信息交换。

机电综合管理系统的 MBSE 应用过程，基本遵循了 Harmony 系统工程设计理念，同时根据我国装备研制实际对部分技术过程进行了剪裁和改造，主要是将原技术过程中“设计综合”阶段的“架构分析”“架构设计”更改为“架构设计”“架构分析评估”两个环节。Harmony 技术过程主张先通过功能、性能、体积、重量等专业的权衡分析优选一个可用的架构，确定架构以后，再将操作需求分配到待定架构中。而在实际应用中，这个过程是不尽合理的，因为装备研制中系统架构的评估和选择涉及到多个专业，如果不首先对操作需求进行分配，类似安全性、可靠性等很多专业工程的分析是无法开展的（包括无法建立有效的故障逻辑模型、无法针对性地收集可靠性数据等），因此，先提出一个架构，将功能分配到具体架构，再通过架构分析和综合评估对架构进行迭代完善的流程更为合理。

2.2 需求分析

需求分析的目的是分析利益攸关者需求，并将其转化为系统功能需求，根据功能需求确定合适的建模场景即用例，后续建模工作全部基于用例展开。对于机电综合管理系统而言，其功能性需求（包括功能和性能需求）一般应从机电总体设计或飞机总体设计单位获得，非功能性需求（如可靠性、安全性、经济性和试航要求等）应从四性专业和其他专业工程部门获得，系统用例主要针对功能性需求进行构建。

2.3 功能分析

功能分析的作用是形成能描述系统功能和其与外部交

互关系的一系列模型元素,主要包括活动图(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)、内部块图(系统与外部角色的所有交互接口)和状态机(可执行的模型)。功能分析的过程相当于把系统看成一个“黑盒子”,通过模型分析系统具有哪些操作、与外界的交互关系,并通过模型执行对功能进行确认。

2.3.1 黑盒活动图

在功能分析阶段,设计人员需要构思系统在当前用例中为了完成这个功能所要执行的一系列活动与操作,并以活动图(Activity Diagram)的方式来展示。活动图本质是一种流程图,着重表现从一个活动到另一个活动的控制流,直观地说,就是系统为了要完成某个功能都需要一步一步做什么。由于在同一流程中的前后两个功能不能以相反的顺序执行,因此,在活动图中隐含了功能之间的依存关系。借助这一关系在白盒分析中就能够挖掘出功能接口信息。

2.3.2 黑盒顺序图

顺序图又称为时序图/序列图,它通过描述对象之间发送消息的时间顺序显示多个对象之间的动态协作,表示用例的行为顺序,顺序图侧重在描述对象之间是如何交互的,也就是说,描述消息是如何在对象间发送和接收的,一个活动图对应多个顺序图。

与活动图相比,顺序图并没有增加新的内容,但是因为其独特的展示方式,能够更有效地揭示系统与外界相关方之间的交互内容^[4]。顺序图的重要意义还在于能够在其基础上生成代表系统功能的操作,交互过程的消息、事件和系统与外界的接口,这是后续功能分配的基础。

2.3.3 黑盒内部块图

内部块图(Internal Block Diagram)是在黑盒阶段根据用例图形成的,它以图形方式展示系统与外部交互者的所有交互,同时融入了模型的基本元素,包括活动图、顺序图设计生成的操作和事件。

2.3.4 黑盒状态机图

状态分析的主要目的是分析系统在其全生命周期内的完整动态行为,包括定义系统的状态及依赖于状态的行为、分析系统状态之间的转换及伴随转换的行为,主要通过状态图建模和仿真来完成。状态图实质是系统期望行为的一种抽象,包括一系列有限状态、状态间的转换及执行的工作。

对于机电管理系统而言,总共存在两个并行的状态群,即信号采集判断状态和动作执行状态,这两个状态群始终是同步运行的。在信号采集判断状态的内部,可细化为采集和

指令解算两个状态,动作执行状态内部可细化为主起落架收起和主起落架放下两个状态。

状态机模型构建完成后,可通过仿真方式验证系统状态是否按照设计的目的运行相应支路,得到预定的系统运行结果。状态机作为功能分析阶段唯一可执行的模型,其运行结果是验证系统是否符合系统需求的重要手段^[5]。

2.4 设计综合

设计综合分为架构设计和架构分析评估两个步骤。架构设计是针对每个预定的系统设计方案,将系统的功能分配给物理单元,同时形成内部子系统之间的逻辑接口。系统架构分析则是通过对系统功能、性能、安全性、可靠性等各专业进行综合考量,验证系统架构是否满足需求。

本文主要关注系统架构设计的过程,主要是对已定义的系统功能进行分析和分配,同时检查是否存在某一项功能跨越多个子系统的情况,进行必要的拆分后形成白盒设计模型。

2.4.1 白盒活动图

白盒活动图是在黑盒活动图基础上,将功能分析阶段活动图中定义的操作分配到子系统/设备中,形成泳道图,通过图形化语言建立各子系统间的信息传递关系,即各子系统间的接口关系^[6]。直白地讲,黑盒阶段只是笼统地说系统要做某个动作,而白盒阶段则明确地说是哪一个子系统来执行这个动作。

2.4.2 白盒顺序图

白盒顺序图主要描述各子系统之间、子系统和外部参与者之间的信息交互,展示系统各部件的连接情况、接口情况。白盒顺序图相比黑盒阶段,增加了各子系统间信息流的传递过程。在黑盒阶段只需要说明角色与系统的统一交互,而白盒阶段则需要指明外部角色具体与哪个子系统进行交互,以及子系统之间是如何进行事件及数据的传递。

值得注意的是,白盒设计阶段的顺序图并不是活动图的重复,因为在架构设计阶段需要对系统进行拆解,需要补充一部分内部单元的交互信息,如远程接口单元自身的数据处理,以及向航电综合处理机发送数据等内容,这些操作接口在黑盒阶段通常是无法一次性考虑的。因此,最终的白盒顺序图一般在活动图自动生成的模型基础上进行修改得到,限于篇幅,此处不再赘述。

2.4.3 白盒内部块图

白盒内部块图集中展现了系统架构设计阶段的主要成果,包括系统的物理架构设计模型、各组成单元的功能操作

分配结果和逻辑接口要求。

2.4.4 白盒状态机图

白盒状态机图主要定义系统组成单元的状态行为及单元之间的状态交互过程。通过对各单元状态机进行协同仿真,可对系统内外部控制逻辑的正确性进行可视化验证。

2.5 模型向下一级产品的传递

系统设计的最终目的:一方面要获得一个满足需求的、合理权衡的系统架构,另一方面要明确提出对下一级产品的设计要求。在基于模型的系统设计体系下,大量的设计信息和设计要求在模型中进行体现,下一级产品应以此为依据,继续开展细化的产品设计。应转交给下一级产品的模型和文件主要包括:

(1) 产品的 Port/interface 模型文件,代表该产品的功能分配结果和逻辑接口要求,是下一级产品开展详细设计的关键输入。

(2) 与该产品功能和接口定义相关联的系统用例图、顺序图和内部块图,用于明确本级产品所承担功能的上下文环境。

(3) 由活动图、顺序图形成的系统测试用例,作为下一级产品验收和确认的测试输入。

3 结束语

本文以 Harmony MBSE 设计流程为基础,开展了基于模型的机电综合管理系统设计应用,通过图形化的建模方式构建了机电综合管理系统的活动图、顺序图、内部块图和状态机图等设计模型,应用过程证明该方法相对传统文档式的设计过程更加直观、清晰,对于功能高度集成、设计构型和接口类型复杂的机电综合管理系统是适用的,可以为机电综合管理系统的设计提供一种新的设计理念和技术框架。

通过以上工程实践表明,Harmony MBSE 的设计流程和方法是适用于机电综合管理系统的,但是,机电综合管理系统的研制又有其自身特点,因此,后续在此方向上仍有诸多工作需要深入研究和完善,主要包括:

(1) 系统用例的设计准则。从应用过程看,设计人员对于“用例”的理解和使用普遍存在争议,尤其对于机电综合管理系统,由于其集成的功能非常多(某型飞机可达到上千条功能性需求),如何在保证用例能覆盖系统需求的前提下缩减数量和规模,需要有一套完整的设计准则要求进行约束。

(2) 状态机方法的适用性讨论。相对于活动图、顺序

图,状态机的构建过程相对复杂,而且机电综合管理系统的状态从宏观上看,大部分功能性需求是简单的、连续稳定的,对于此类系统是否需要所有的用例构建离散的状态机模型进行功能验证是值得商榷的。

(3) 与接口设计的关联。接口种类繁多是机电综合管理系统的典型特征,因此,接口设计是系统研制中的重点工作,MBSE 主要形成的是逻辑性接口,是后续详细接口控制文件接口控制定义(ICD)设计的输入,如何将接口设计有效地融入 MBSE 设计过程也是后续应重点考虑的问题。

(4) MBSE 模型与专业模型的转化和集成问题。系统架构的评估需要多个专业的参与,但目前各专业使用的模型种类非常多,因此,有必要进一步研究 MBSE 设计模型与专业分析模型(如性能模型、可靠性模型)的接口兼容性,以有效支持系统架构的分析和评估工作,提高工作效率。

(5) 模型化设计与文档设计的协调。尽管基于模型的设计在直观性、可验证性和知识积累方面体现出了明显的优势,但在目前装备研制体系下,大量的工作还需要编制文档来完成,如何将模型设计的成果规范化应用到技术文件的编制中,也是决定该方法是否具有工程实用性的关键。 **AST**

参考文献

- [1] 林明,蔡增杰,朱武峰.飞机机电系统发展趋向与启示[J].机械研究与应用,2011(6):153-156.
LIN Ming, CAI Zengjie, ZHU Wufeng. Development trend and illumination of the aircraft mechanical and electrical system[J]. Mechanical Research & Application, 2011(6):153-156. (in Chinese)
- [2] 郭震中,黄伟华,姚有温,等.直升机机电综合管理系统发展趋势及关键技术分析[J].直升机技术,2011(3):63-68.
GUO Zhenzhong, HUANG Weihua, YAO Youwen, et al. Development and key technique analysis of the utility management systems of helicopter [J]. Helicopter Technique, 2011(3):63-68. (in Chinese)
- [3] 倪忠建,张彦,李漪,等.模型驱动的系统设计方法应用研究[J].航空电子技术,2011,42(1):18-23.
NI Zhongjian, ZHANG Yan, LI Yi, et al. Application research on model-driven system design method [J]. Avionics Technology, 2011, 42(1):18-23. (in Chinese)
- [4] 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): 47-54.

DING Ding. Application of model-based system engineering in civil aircraft design [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2012, 29 (4): 47-54. (in Chinese)

[5] Hoffmann H P. System engineering best practices with the rational solution for systems and software engineering[R]. Digital Avionics Systems Conference, 2013.

[6] 汤超, 方俊伟, 谢陵, 等. MBSE 在民机起落架系统设计中的应用 [J]. 民用飞机设计与研究, 2015, 118 (3): 56-60.

TANG Chao, FANG Junwei, XIE Ling, et al. Application of

MBSE method during landing gear system design for civil aircraft [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2015, 118 (3): 56-60. (in Chinese)

作者简介

聂同攀 (1978—) 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 机电系统设计、系统工程仿真。

Tel: 029-86832265 E-mail: nietp60315@sina.com

梁伟 (1981—) 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 机电综合管理系统设计。

Application Research on Model-based Design of Integrated Electromechanical Management System

NIE Tongpan*, LIANG Wei

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: According to the complex feature of the integrated electromechanical management system in design of system function, system architecture and interfaces, application research on model-based design of integrated electromechanical management system was implemented based on Harmony MBSE. It applied the system development software Rhapsody to build requirement model, function model and architecture model, the critical technical processes of requirement determination, function decomposition and physical structure design were implemented, and system design accuracy was verified through the state machine simulation. Application results show that this method is applicable for development of electromechanical management system, also can provide an effective implementation route for the complex system design.

Key Words: electromechanical management system; system engineering; MBSE; Rhapsody

Received: 2017-05-05; Revised: 2017-05-15; Accepted: 2017-05-25

*Corresponding author. Tel.: 029-86832265 E-mail: nietp60315@sina.com