

Harmony SE 在民用飞机设计中的应用

刘晚移¹, 冯蕴雯¹, 侯杰然², 陈俊宇¹, 郭英男¹

(1.西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072; 2.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要:随着民用飞机技术精细化和产品复杂性的提高,民用飞机设计已从传统的基于文档的系统工程转变为基于模型的系统工程,系统表达也从以文档为中心转变为以模型为中心。为进一步提高民用飞机设计中系统建模的模型质量与正确性,进而缩短设计的开发周期与成本,探究以模型驱动及验证为主导的系统工程方法在民用飞机设计领域的适用性,建立民用飞机设计的系统工程框架,用以支持民用飞机的可靠设计与高效交付。以 Harmony SE 建模方法为切入点,介绍其工作流程和建模思想;分析民用飞机在系统工程实践中出现的突出问题,说明 Harmony SE 方法在民用飞机系统工程领域的适用性,建立民用飞机设计的系统工程实践体系;以油箱增压组件为研究对象,应用实践体系开展组件级系统工程实践。结果表明,文中所提出的民用飞机设计系统工程体系和方法能够正确合理地分配设计需求并建立完整的系统模型,有助于提升现阶段民用飞机设计的效率与准确性。

关 键 词:基于模型的系统工程;Harmony SE;民用飞机;架构模型;油箱增压组件

中图分类号:V37 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2024)01-0035-10

为保障民用飞机的快速设计与高效交付,统筹协调设计阶段的全部数据,并为后续民机的可靠运营提供支持,民用飞机设计以系统工程思维为导向,应用专业的系统工程方法和工具开展民用飞机设计的系统工程实践。民用飞机设计在早期以基于文档的系统工程方法(text based systems engineering, TBSE)为应用重心^[1],随着飞机产品复杂度的不断提升和数字协同设计的增多, TBSE 在数据管理、信息一义性、设计内容的可读性及复用性等方面受到较大限制^[2-3]。故以模型传输需求进而分析系统的思想为指引,基于模型的系统工程方法(model based systems engineering, MBSE)逐渐被用于民用飞机设计的理论探究及工程实践。MBSE 以模型为中心,着力于需求、功能、逻辑及架构 4 个关键技术^[4],实现以需求管理及约束为始端,开展基于场景的功能多视角建模,确定系统逻辑实现功能设计的正向响应,进而建立符合逻辑要求的执行架构,以高可读性及高驱动性的设计信息,实现对目标系统的最优方案制定。

MBSE 工作的开展包含建模方法、建模语言及建模工具三大要素^[5]。其中,建模方法指导设计团队以同一建模路线开展系统模型的创建,确保团队在模型的创建上能够保持广度、深度和准确度的整体一致性,从而成为 MBSE 要素中的重中之重^[6]。国内外学者在此方面开展了相关研究,闫杰^[7]基于 MagicGrid 建模方法建立民用飞机导航系统的系统模型,并结合 SysML 中参数分析模型计算系统性能参数,开展导航系统的架构评估;彭新家等^[8]基于 Arcadia 建模方法开展了船舶雷达系统的需求、设计和验证建模;崔展博等^[9]应用面向对象的系统工程方法(object-oriented system engineering method, OOSEM)建立了无人机飞控系统的功能逻辑架构,并结合状态机和 Simulink 开展了系统架构的仿真验证;Madni^[10]应用 MBSE 传统方法对无人机试验台开展了架构模型设计,并采用动态场景执行、监视等实验对模型架构开展了仿真验证。上述学者采用不同建模方法开展系统工程实践时,主要使用手动建模结合物理仿真验证的方式对系统级进行模型构建和验证,并未完全展现出 MBSE 在复杂产品系统工程中应有的优势,具体原因可归纳为两方面。其一,上述建模方法主要服务于系统级或子系统级应用,

系统模型完全依赖于工程人员的手动创建,导致在面向复杂产品的系统工程实践时,会因建模量激增、建模人员水平不一而产生系统模型的建模效率与质量问题;其二,模型在创建完成后缺乏有效的逻辑验证手段,无法保障模型的设计正确性,进而开展无用的物理仿真验证,从而造成设计上的早期失误。

针对上述问题,部分学者采用 Harmony SE 方法开展复杂产品的系统工程实践。姬晓慧等^[11]应用 Harmony SE 方法提出了适用于直升机系统设计的研发实施流程,定义了从设计到逻辑验证和仿真验证的建模实施路径;黄干明等^[12]通过对比 Harmony SE、RUP SE 和 OOSEM 建模方法后,选择 Harmony SE 方法构建了综合通讯导航识别系统的系统建模流程,设计由需求模型、架构模型和实现模型构成的 3 层虚拟样机模型;张彦等^[13]应用 Harmony SE 方法建立了飞机综合数据管理系统的系统功能架构模型,建模工作中结合 Rhapsody 软件的动态建模能力提高了系统模型的建模效率。上述学者应用 Harmony SE 方法的“模型驱动”和“模型自验证”思想有效解决了复杂产品系统工程实践中的建模效率低和缺少逻辑验证问题。但在民用飞机系统工程领域,Harmony SE 方法目前仅被应用于系统级建模实践中,还未形成一个适用于民用飞机产品级的系统工程实践框架,故在民用飞机系统工程领域有必要提出基于 Harmony SE 方法的民用飞机系统工程实践框架。

为建立民用飞机设计系统工程实践的崭新视角,提高民用飞机设计系统工程的建模效率及模型质量,降低飞机设计周期和成本。本文首先对 Harmony SE 方法论进行了剖析,包含其主要流程和应用优势;然后分析和总结了民用飞机在系统工程实践中存在的问题,并基于 Harmony SE 方法建立了民用飞机系统工程实践体系;最后以民用飞机液压系统中的油箱增压组件为设计对象,应用所建立的体系框架开展系统工程实践。

1 Harmony SE 方法论

Harmony SE 方法论由国际商业机器公司(international business machines corporation, IBM)提出,用于指导复杂产品基于模型的系统工程实践^[14]。

Harmony SE 的设计以迭代式流程为特点,即通过需求的逐层分解依次开展复杂产品的产品级、系统级、子系统级和组件级的系统工程增量循环工作^[15],直到将顶层系统模型分解成可被硬件、软件表达的各个子模型,最终所有子模型逐层集成整合为产品全系统模型,Harmony SE 方法论和其增量循环的产品工作模式如图 1 所示。

不同级别的系统工程实践均包括模型/需求库和模型创建两部分,前者负责管理各级系统建模的成果和需求的跟踪链接,后者采用自顶向下的设计流程开展系统设计,主要包括需求分析、功能分析和设计综合 3 个阶段^[16]。

需求分析阶段的重点是确定系统工程的输入,将分散的、文本化的用户需求整理为系统需求,创建需求模型,对系统需求开展统一管理和存储,并在充分理解需求后建立用例模型,用以驱动功能分析^[17]。

功能分析以需求的管理及约束为工作基础,目的是将系统需求中的功能性需求转换为与之匹配的系统功能,即将每个用例模型转化为能被详细描述的黑盒行为模型,通过系统的功能行为来理解、确认和验证功能性需求^[18]。该阶段会创建和执行黑盒状态机模型,对系统的功能行为与信息交互进行一致性验证,从而确保设计综合阶段输入的正确性。

设计综合阶段的工作目标是综合考虑系统需求中的功能性和非功能性需求,建立最优系统架构模型并开展架构模型的验证工作。最优系统架构模型的确定来自于多种候选方案的分析 and 权衡,并由此开展系统行为和需求的子结构分解,创建和生成了白盒的活动图、顺序图和状态机图等模型;分析结束后同样以执行状态机的方式验证架构模型的正确性。

相较于其他建模方法,Harmony SE 方法论的突出优势是具备建模工作的驱动性及建模成果的可验证性,形成了 MBSE 建模方法中独有的建模思想,即“模型驱动”与“模型自验证”。“模型驱动”思想可有效提高复杂系统工程的建模效率,保证模型创建上的逻辑一致性;“模型自验证”思想能通过执行状态机验证系统功能符合性和逻辑符合性。故 Harmony SE 方法论可适用于复杂产品的系统工程实践中。

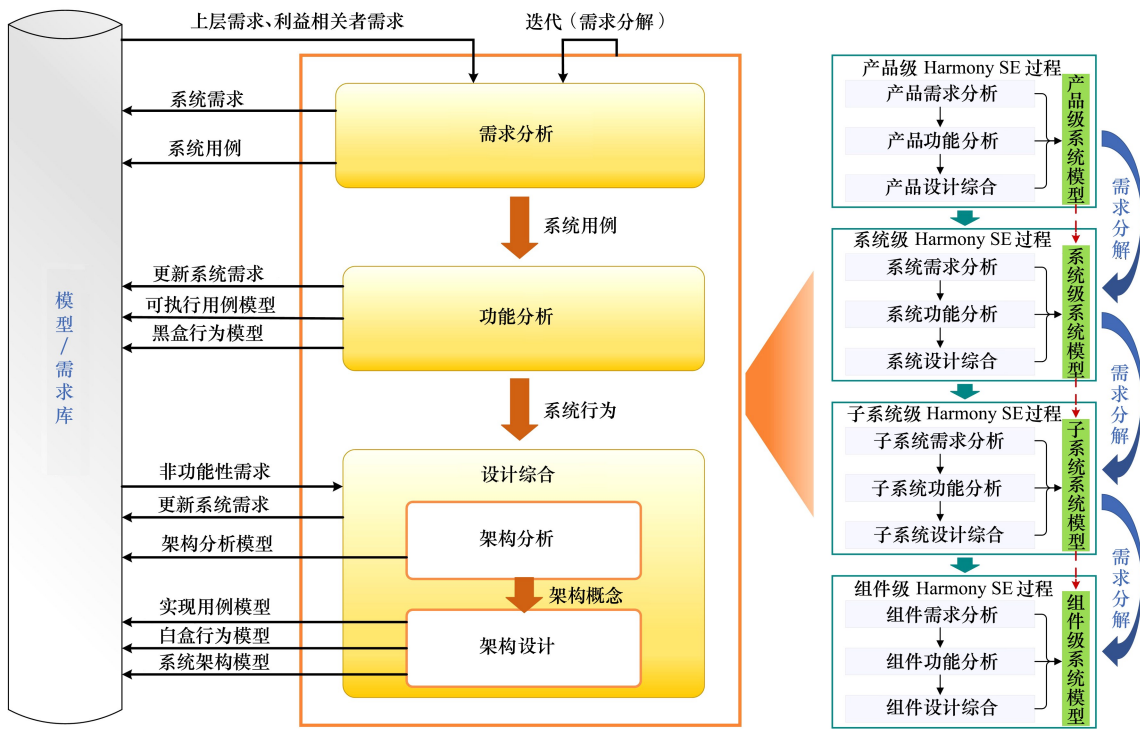


图 1 Harmony SE 方法论和增量循环工作模式

2 基于 Harmony SE 的民用飞机设计系统工程实践体系

民用飞机作为复杂产品的代表,具备高度复杂性和设计上的分布性^[19],传统的基于文本的系统工程设计方法已无法满足民用飞机对于产品快速迭代和统一高效管理的设计要求,因此针对民用飞机开展基于模型的系统工程并输出完整无误的全机系统模型是一项极其严峻的挑战。主要原因可归于两方面。一方面民用飞机可称为最复杂的民用产品,其系统工程实践的建模范围要从产品级到底层设备级,随之产生的建模工作量繁重,同时由于飞机设计的分布性,建模工作通常由多部门协同开展,各部门工程人员的建模水平存在差异,最终导致产出的系统模型无法有效地把控建模的效率和质量;另一方面,民用飞机重视前期设计的准确性,因为前期的设计失误会造成后期的修正迭代,从而造成巨大的经济和时间损失,Nowodzienski 等^[20]指出复杂产品研发过程中,约 50%~70%的设计错误是设计阶段引入的;Sohier 等^[21]发现设计错误的修正成本会随着项目进展阶段呈指数型增长,在飞机设计阶段发现

设计错误并修正的成本为 1 个单位,在试飞阶段发现设计错误并修正的成本则为 29~1 500 单位以上。因此针对民用飞机开展系统工程实践时,不仅要重视建模的质量和效率问题,还要保障系统模型的正确性。

针对民用飞机系统工程实践的上述问题,Harmony SE 方法给出了对应的解决方案。Harmony SE 的“模型驱动”思想能在建模过程中自动生成相关模型,减少建模工作量,准确优化建模人员的工作分配,使得少数专业建模工程人员能专注于状态机等复杂模型的建模工作,进而提高系统模型整体的建模效率和质量;“模型自验证”思想可在建模完成后验证系统模型的正确性,并根据验证结果及时修正模型,确保输出模型的正确性。Harmony SE 方法对民用飞机系统设计具备较高的应用适用性和工程优势,有必要基于 Harmony SE 方法进一步建立合理的民用飞机设计系统工程实践体系,明确民用飞机系统设计的实施流程,指导民用飞机的系统工程实践。

基于 Harmony SE 的民用飞机设计系统工程实践体系如图 2 所示,主要包括确定实践对象,捕获用户需求及创建系统模型 3 层。

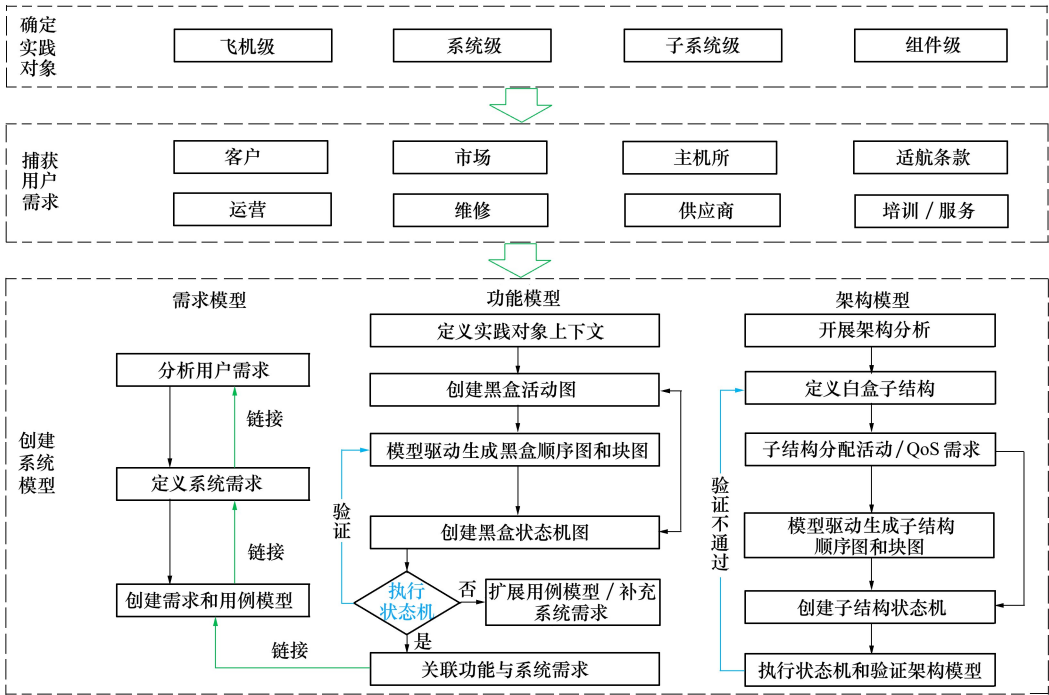


图 2 基于 Harmony SE 的民用飞机设计系统工程实践体系

民用飞机设计系统工程实践的基础是确立具有层级关系的实践对象,从而基于实践对象开展需求捕获与系统建模工作。民用飞机的层级可分为飞机级、系统级、子系统级及组件级,确定实践对象时要根据设计需要明确本级与上级实践对象的关系,并梳理两者的接口信息和需求传递信息,为系统工程实践工作的开展奠定基础。确定实践对象后,以客户、供应商和适航条款等 8 个方面为需求导向,捕获相关方的详细需求信息,并对需求信息进行筛选、合并与规范,从而为系统模型的创建提供文件化、统一化的需求文档。创建系统模型层以需求文档为输入,利用 Harmony SE 方法的“模型驱动”和“模型自验证”思想依次创建实践对象的需求模型、功能模型和架构模型,并对模型开展逻辑验证工作,确保模型输出与需求满足的正确性,从而对实践对象开展完整的系统工程实践。

3 案例分析

为详细说明民用飞机设计系统工程实践体系的工作流程,下面对 737NG 飞机开展体系应用。首先确定实践对象为 1 号液压子系统下的油箱增压组件,并明确液压子系统与油箱增压组件间的信息接

口与需求关联信息;进而对油箱增压组件开展全面的需求捕获工作,形成组件级需求文档,为系统模型的创建工作奠定基础;最后,以组件需求文档为输入,在 Rhapsody 建模工具上使用 SysML 依次开展组件级需求模型、功能模型和架构模型的创建与逻辑验证工作。

3.1 确定实践对象

油箱增压组件是保障民机飞行安全的重要组件,其作用是保证飞机在各种飞行状态和飞行高度下,为液压油箱提供稳定的增压压力,确保发动机具备稳定的燃油输入^[22]。选择油箱增压组件作为体系实践对象的原因有三方面:一是组件的行为交互简洁,与油箱增压组件交互的对象包括气源系统、液压油箱、飞行员和机务人员,交互对象与行为活动清晰直接,不涉及多系统或组件的复杂行为交互,有利于体系应用的明确展示;二是组件的需求明确,组件涉及的系统需求主要包括加压功能性需求和安全性非功能性需求,需求易被整理和收集,同时需求能被清楚地分解到各子结构;三是组件的系统模型支持后续的快速验证,组件可被分解为多种硬件,如气滤、单向活门、释压活门和限流器等,便于后期的仿真验证与样品制造。故选择 737NG 飞机的油箱增压组件开展基于 Harmony SE 的民用飞机设计系统

工程实践。

3.2 捕获用户需求

油箱增压组件的上级系统为 1 号液压子系统,在 1 号液压子系统的需求模型中定义了油箱增压组件的最底层关联需求为油箱增压组件的加压需求和安全性需求。在油箱增压组件的需求捕获阶段,要基于上述需求深入调研和拓展组件的详细需求,并生成需求文档。需求捕获的主要途径分为需求探究、需求供应及需求约束 3 类。需求探究的实施方案为建立需求捕获团队,团队人员涉及到组件的各个利益攸关方和交互对象,需求团队与各方多次开展深入交流,力求全面准确地获取用户需求;需求供应的工作方案为基于利益攸关方设计目标,结合组件整个生命周期的特点,从组件的市场要求、设计要求、制造要求、使用要求、运营需求和维护与服务要求等方面出发,将用户需求进行粗略分类和整理;此外,结合 737NG 设计文件、民机适航条款 FAR-25-R4 与 737NG 的故障隔离手册等文件,开展需求约束,剖析组件的详细要求,并基于该文件对上述需求开展定性或定量的准确描述,最终生成文件化需求文档,作为系统模型创建的需求输入。

3.3 创建系统模型

创建系统模型是实践体系中最重要的一环,其工作流程包括创建需求模型、功能模型和架构模型三部分。创建需求模型以需求文档为输入,依次建立需求和用例模型;然后以用例模型驱动功能模型的创建,并通过功能模型验证系统功能的正确性和需求模型的完备性;最后在功能模型的基础上建立系统架构,并基于架构对功能模型进行功能和需求上的分解,并在开展逻辑验证后输出组件级的系统模型。

3.3.1 创建需求模型

针对油箱增压组件开展需求建模,分析需求捕获阶段提供的需求文档,将其整理为结构化系统需求,然后通过用例图构建用户使用场景。油箱增压组件的系统需求包含加压功能性需求和安全性非功能性需求,加压功能性需求中包含气体增压、气体清洁、自动释压和手动增/减压;安全性非功能性需求包含下游管路故障保障组件安全性、上游管路故障保障组件安全性、增压管路故障保障组件安全性和增压异常报警求。各级需求采用 YA.#的形式定义需求标识符,整理后的组件系统需求如表 1 所示。

表 1 油箱增压组件需求表

需求标识符	名称	描述
YA.1	油箱增压组件需求	油箱增压组件可满足加压功能需求和安全性非功能性需求
YA.1.1	加压	增压组件可保持液压油箱有 310~345 kPa 的稳定空气压力
YA.1.1.1	气体增压	组件可对气源气体进行持续增压
YA.1.1.2	气体清洁	组件可清除气源气体中的污染物,防止液压油受到污染
YA.1.1.3	自动释压	油箱空气压力增加到 414~448 kPa 时可自动释压,最少可释压到 380 kPa
YA.1.1.4	手动增/减压	机务人员在检修维护时可手动调节油箱压力
YA.1.2	安全性	当增压组件零部件发生故障时,不会引发连环故障
YA.1.2.1	下游管路故障保障组件安全性	下游管路漏气,能防止气源系统和增压管路的严重失压
YA.1.2.2	上游管路故障保障组件安全性	上游气源系统故障不会引起增压组件的压力泄露
YA.1.2.3	增压管路故障保障组件安全性	增压管路破坏不会引起气源系统气体的快速泄露
YA.1.2.4	增压异常报警	油箱增压组件出现异常时,飞行员能在仪表盘准确收到异常报警

通过对需求进行理解和行为合并,可构建得到增压组件工作的应用场景,并创建顶层用例图如图 3 所示。用例图中地面机务人员对油箱增压组件执行调节压力用例;气源系统和液压油箱对油箱增压组件执行增压用例;飞行员和增压用例包含了过滤空气、气体加压和自动释压 3 个用例。创建需求模型阶段的输出为具体的用例模型,后续会针对每个顶层用例开展功能分析和设计综合工作,最后将用例的分析结果合并,得以产出完整的架构模型。

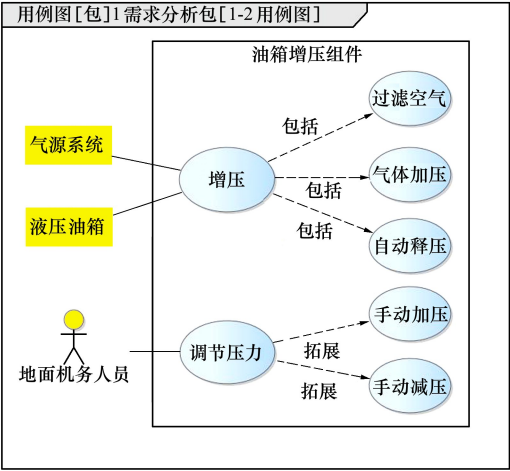


图 3 油箱增压组件用例图

时,均会执行异常处理行为,在异常处理中会向飞行员进行异常报警,然后由地面机务人员对异常开展修复工作。

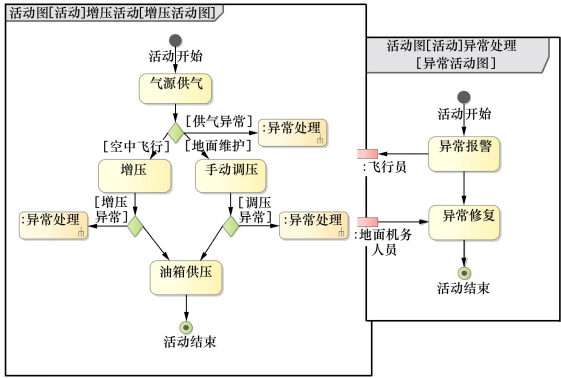


图 4 油箱增压组件黑盒活动图

3.3.2 创建功能模型

用例模型由需求驱动生成,该阶段通过对用例模型开展功能分析,将系统需求转化为与其一致的系统功能,并通过该阶段的模型验证理解、确认和验证系统需求,切实做到需求的分解和实现。将用例模型转化为系统功能首先要定义用例的上下文,创建黑盒的初始块图模型,即明确执行用例有关的主体元素,如执行增压、异常报警和调节压力的主体元素有气源系统、油箱增压组件、地面机务人员、飞行员和液压油箱;然后针对具体用例行为,使用黑盒活动图描述用例的具体工作流程。黑盒活动图如图 4 所示,油箱增压组件在工作时首先会执行气源供气,然后根据使用条件执行增压或手动调压,最后执行油箱供压活动,当活动中出现供气、增压和调压异常

在黑盒活动图和初始块图的基础上,利用 Rhapsody 工具可直接生成相应的黑盒顺序图。顺序图不仅描述了活动图中的工作流程,更对交互方、交互信息进行了准确描述。在活动图与顺序图的信息基础上,可拓展黑盒初始块图,并进一步生成具备信息端口和信息交互的黑盒块图,用以描述各元素间的行为和信息交互。黑盒块图如图 5 所示,图中使用 Aport、Bport 和 Cport 3 个接口定义元素间的端口信息,各元素间通过端口流进行信息或物质交互,通过定义操作来描述元素行为,油箱增压组件具备供压和增压的行为能力,同时它和液压油箱通过 Aport 端口来进行气体上的交互。

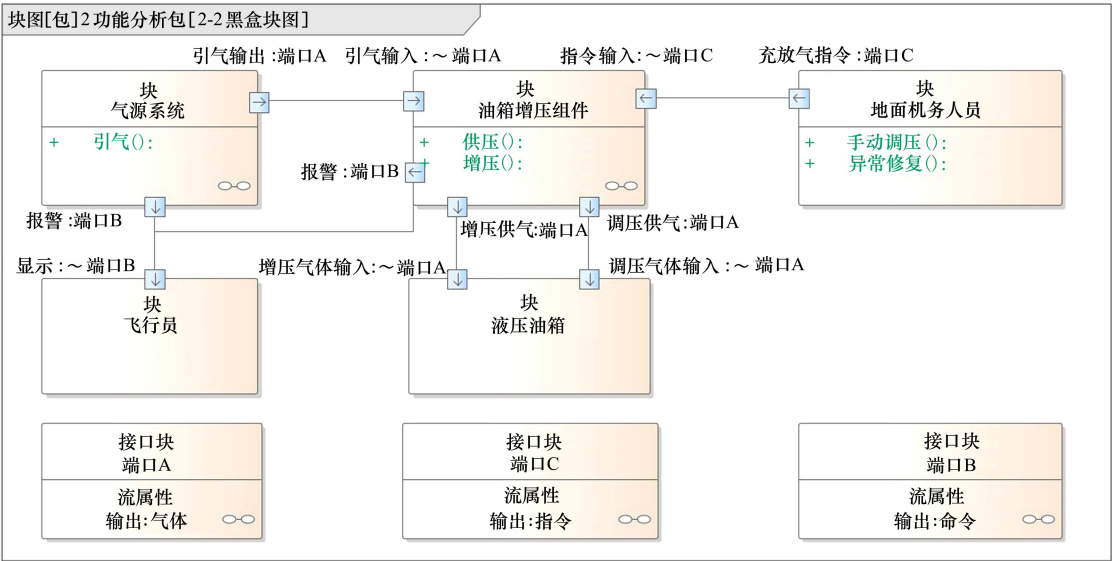


图 5 油箱增压组件黑盒块图

通过黑盒活动图、顺序图和黑盒块图描述了黑盒的工作流程、行为交互和元素交互后,已将系统需求转化为系统功能,但其正确性仍需验证。该阶段要结合组件的实际工作状态开展验证工作,首先确定组件工作状态并建立正确的状态机模型,用以作为黑盒阶段功能验证的基准;然后以顺序图中的具体场景为输入来执行黑盒状态机模型,并通过状态机模型的执行结果与上述黑盒顺序图和块图开展一致性验证,若状态机模型的状态变迁与顺序图的行为交互、块图的信息交互一致,则表明系统功能的转化正确,可将系统功能与需求进行关联,并开展需求覆盖率分析;反之则要对黑盒活动图、顺序图和黑盒块图进行更正,直到通过验证工作。

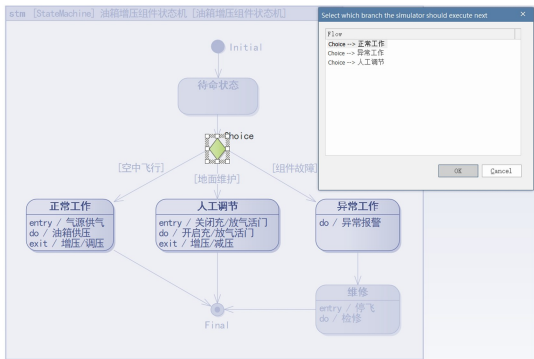


图 6 油箱增压组件的黑盒状态机模型及执行过程

组件的黑盒状态机模型及执行过程如图 6 所示,执行状态机模型后首先经过组件待命状态,然后根据顺序图选择不同的应用场景,可选择正常工作、异常工作和人工调节 3 种场景,然后对 3 个场景的状态变迁与行为、信息交互进行对比验证,根据对比结果开展验证工作。

3.3.3 创建架构模型

创建架构模型分为架构分析和架构设计 2 个阶段。架构分析的目的是确定最优系统架构,要求在结构上对组件进行分解,然后根据各零部件功能要求提出多种候选方案,从使用成本、可靠性、易用性和寿命等多方面建立综合评判标准评估各零件的最佳候选方案,并合并为组件的系统架构模型,油箱增压组件的系统架构如图 7 所示,组件被分解为上下游限流器、单向阀门、气滤、释压活门和充放气活门零件。

架构设计的重点是针对最优系统架构开展功能与需求分解,将功能和需求下移,分配到各子结构,并通过白盒状态机模型验证其分配的正确性和需求的满足性,在组件级系统工程实践中,使得最底层的软/硬件能完整覆盖和满足系统需求。如图 7 所示,组件子结构已对需求进行分配,下面通过白盒模型对组件的功能行为进行分配与验证。

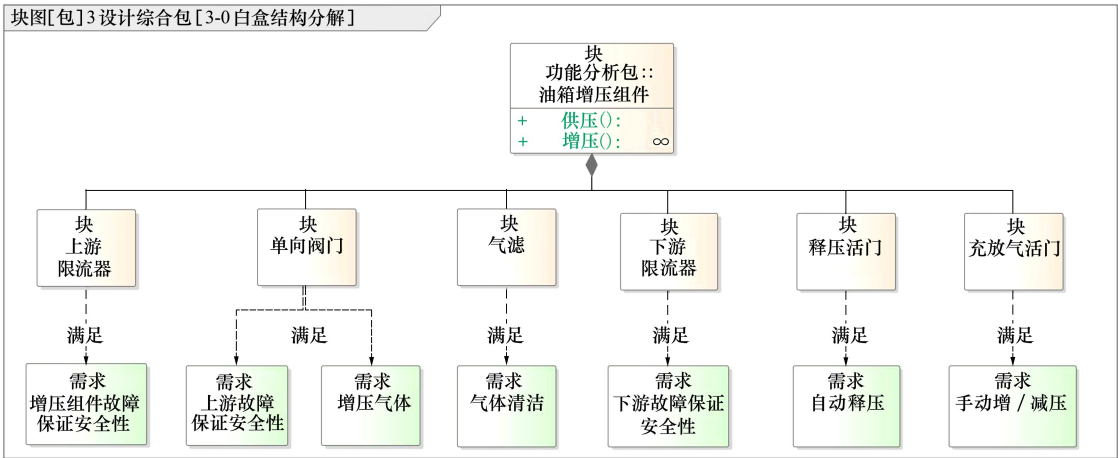


图 7 油箱增压组件的架构分解

确定油箱增压组件的架构后,将系统行为进行细化,建立白盒的活动图,并依次生成白盒顺序图和块图。首先对功能分析阶段的增压活动进行细化,细化后的白盒活动图如图 8 所示。在增压活动中判断增压管路是否存在管路损坏等故障,当增压管路

存在故障时,通过上游限流器来降低引气流速,防止引气的大量流失,无故障时,直接引气然后过滤气体中的杂质,经过单向阀门开始进气;然后在管路中,当出现液压油箱故障时,通过下游限流器避免管路失压,无故障时则会通过单向阀门,并自动调节气体

压力至合适压强;最终将合适压强的气体提供给液压油箱。

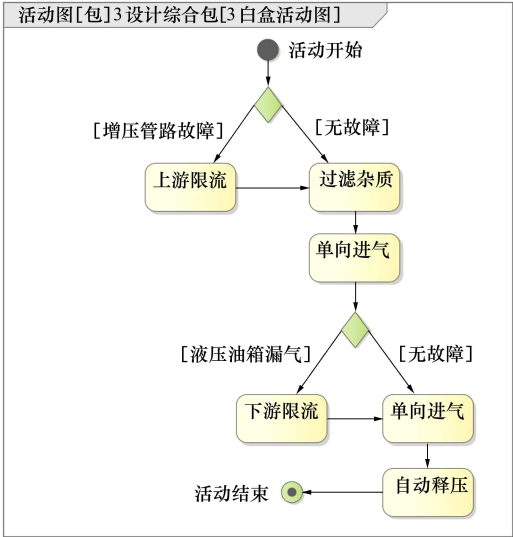


图 8 油箱增压组件的白盒活动图

根据白盒活动图可进而驱动生成油箱增压组件的白盒顺序图和白盒块图。白盒顺序图同样是根据子结构将黑盒顺序图进一步细化,白盒块图即油箱增压组件的内部块图,用以说明组件内部各子结构如何开展信息和行为的交互活动。组件内部块图如图 9 所示,图中详细描述了气体和行为指令在各子结构间的具体交互过程。

最后,与功能分析阶段的黑盒验证过程相似,建立准确的白盒状态机模型开展白盒活动图、顺序图和内部块图的逻辑验证工作。考虑到架构模型分解的复杂性,故通常先建立各子结构状态机模型,然后经各子结构专家的协同设计与建模,获得组件的白盒状态机模型,进而开展状态机模型的执行和验证。验证成功后表明系统需求被准确分配给各子结构,并由各子结构准确实施和满足系统需求。故上述建立的架构模型可作为油箱增压组件的设计输出,供后续的仿真验证和生产制造部门开展进一步的设计工作。

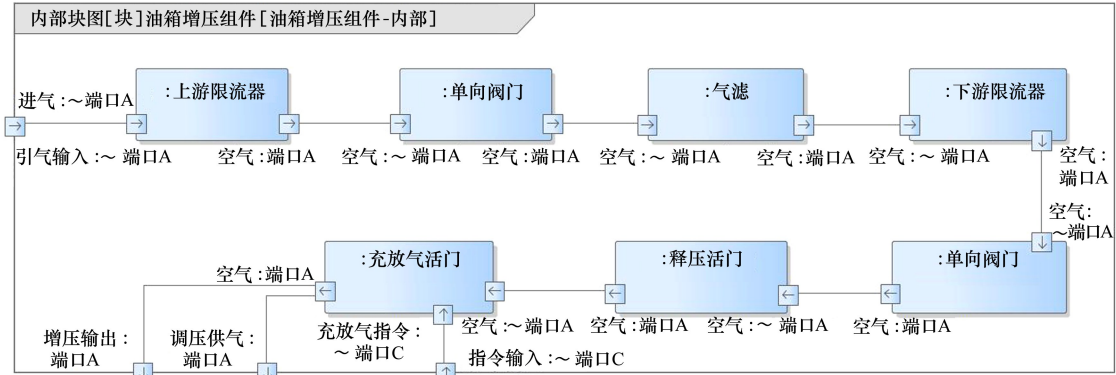


图 9 油箱增压组件的内部块图

4 结 论

- 1) Harmony SE 通过模型驱动与自验证的思想实现了对系统工程的高效应用和建模验证。本文通过对 Harmony SE 应用特点的分析梳理,探究了其在民用飞机设计领域的适用性,形成了基于 Harmony SE 的民用飞机设计方法。
- 2) 提出基于 Harmony SE 的民用飞机设计系统工程实践体系,建立了确定实践对象、捕获用户需求

- 和创建系统模型 3 个实践层次,并形成了基于 Harmony SE 的民用飞机设计系统工程实践体系的具体建模流程和方法,为现阶段民用飞机设计系统工程建立了系统工程实践框架。
- 3) 以 737NG 飞机的油箱增压组件为设计对象,开展组件级系统工程应用。实践了油箱增压组件需求捕获工作,创建了具备模型驱动与验证思想的组件级系统模型,验证了实践体系的可实施性和工程优势。

参考文献:

- [1] WIBBEN DR, FURFARO R. Model-based systems engineering approach for the development of the science processing and operations center of the NASA OSIRIS-REx asteroid sample return mission[J]. Acta Astronautica, 2015, 115(C): 147-159
- [2] GOUGH K M, PHOJANAMONGKOLKIJ N. Employing model-based systems engineering(MBSE) on a NASA aeronautic research project: a case study[C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2018: 3361
- [3] 范秋岑, 毕文豪, 张安, 等. 民用飞机高度控制系统 MBSE 建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(1): 164-171
FAN Qiucen, BI Wenhao, ZHANG An, et al. MBSE modeling method of civil aircraft altitude control system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(1): 164-171 (in Chinese)
- [4] GREGORY J, BERTHOUD L, TRYFONAS T, et al. The long and winding road: MBSE adoption for functional avionics of spacecraft[J]. The Journal of Systems & Software, 2020, 160: 110453
- [5] 吴颖, 刘俊堂, 郑党党. 基于模型的系统工程技术探析[J]. 航空科学技术, 2015, 26(9): 69-73
WU Ying, LIU Juntang, ZHENG Dangdang. Research on the technology of method based system engineering[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(9): 69-73 (in Chinese)
- [6] 朱静, 杨晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程概述[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 12-16
ZHU Jing, YANG Hui, GAO Yahui, et al. Summary of model based system engineering[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 12-16 (in Chinese)
- [7] 闫杰. 民机导航系统的 MBSE 架构建模研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021
YAN Jie. Research on MBSE architecture modeling of civil aircraft navigation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021 (in Chinese)
- [8] 彭新家, 马振康. 基于 Arcadia/Capella 的雷达系统设计方法[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(5): 21-26
PENG Xinxia, MA Zhenkang. Radar system design method based on Arcadia/Capella [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2022, 45(5): 21-26 (in Chinese)
- [9] 崔展博, 景博, 焦晓璇, 等. MBSE 技术在飞控系统 PHM 中的应用研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(3): 69-78
CUI Zhanbo, JING Bo, JIAO Xiaoxuan, et al. Application research of MBSE technology in PHM of flight control system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(3): 69-78 (in Chinese)
- [10] MADNI A M. Exploiting augmented intelligence in systems engineering and engineered systems[J]. Insight, 2020, 23(1): 31-36
- [11] 姬晓慧, 陈国定. MBSE 方法论实施方法研究[J]. 中国新技术新产品, 2022, 458(4): 33-38
JI Xiaohui, CHEN Guoding. Research on the implementation method of MBSE methodology [J]. New Technology & New Products of China, 2022, 458(4): 33-38 (in Chinese)
- [12] 黄干明, 吴敏, 彭文攀, 等. 基于模型的综合通信导航识别系统虚拟样机设计[J]. 航空电子技术, 2018, 49(2): 1-6
HUANG Ganming, WU Min, PENG Wenpan, et al. Model-based virtual prototype design for distributed integrated communication navigation identification system[J]. Avionics Technology, 2018, 49(2): 1-6 (in Chinese)
- [13] 张彦, 倪忠建, 肖忠炳, 等. 基于 Harmony 的系统建模方法在综合数据管理系统中的研究与应用[J]. 航空电子技术, 2012, 43(1): 42-47
ZHANG Yan, NI Zhongjian, XIAO Zhongbing, et al. Research and application of Harmony-based system modeling method in integrated data management system[J]. Avionics Technology, 2012, 43(1): 42-47 (in Chinese)
- [14] CHEN W. Model-based integration and verification of air-borne system[J]. Journal of Physics, 2021, 1939(1): 012043
- [15] 谭琪璘, 王旭昊. 基于 Harmony SE 方法的嵌入式软件设计综合过程研究[J]. 信息通信, 2019, 196(4): 93-94
TAN Qilin, WANG Xuhao. Research on synthesis process of embedded software design based on Harmony SE method[J]. Information & Communications, 2019, 196(4): 93-94 (in Chinese)
- [16] SHAMS M, EL-BANBI A, SAYYUOH H. Harmony search optimization applied to reservoir engineering assisted history matching [J]. Petroleum Exploration and Development Online, 2020, 47(1): 154-160
- [17] 王崑声, 袁建华, 陈红涛, 等. 国外基于模型的系统工程方法研究与实践[J]. 中国航天, 2012(11): 52-57
WANG Kunsheng, YUAN Jianhua, CHEN Hongtao, et al. Research and practice of foreign model-based system engineering methods[J]. Aerospace China, 2012(11): 52-57 (in Chinese)

[18] GROSSETTI G, BAYLARD C, FRANKE T, et al. Interface and requirements analysis on the DEMO heating and current drive system using systems engineering methodologies[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 146: 2078-2082

[19] YUAN Y, JIAO J, LI X L, et al. Man-machine modeling and safety analysis method for landing process based on SysML and simulink[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 6971652

[20] NOWODZIENSKI P, NAVAS J. From Model-based to model and simulation-based systems architectures-achieving quality engineering through descriptive and analytical models[J]. Insight, 2003, 26(11): 40-50

[21] SOHIER H, LAMOTHE P, GUERMAZI S, et al. Improving simulation specification with MBSE for better simulation validation and reuse[J]. Systems Engineering, 2021, 24(6): 425-438

[22] 李大伟, 左子璋, 刘赞. 某型飞机液压油箱增压系统设计改进[J]. 液压与气动, 2017, 315(11): 105-108

LI Dawei, ZUO Zizhang, LIU Zan. Design improvement for hydraulic reservoir pressurization system of a certain type of aircraft [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(11): 105-108 (in Chinese)

Application of Harmony SE in civil aircraft design

LIU Wanyi¹, FENG Yunwen¹, HOU Jieran², CHEN Junyu¹, GUO Yingnan¹

(1.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: With the refinement of civil aircraft technology and the enhancement of product complexity, civil aircraft design has changed from traditional text-based system engineering to model-based system engineering, the expression of the system has also transformed from text-centered to model-centered. To further improve the model quality and correctness of aircraft system modeling, this paper explores the applicability of model-driven and verification-oriented system engineering methods in the field of civil aircraft design, and establishes the system engineering practice framework of civil aircraft design, which can ensure the rapid design and efficient delivery of civil aircraft. Firstly, starting from the Harmony SE modeling method, the workflow and modeling ideas of system are introduced; then the noticeable problems in the practice of civil aircraft system engineering are analyzed, and the system engineering practice of civil aircraft design is established with the support of the applicability of the Harmony SE method; finally, the fuel tank pressurization component is taken as the research object of the practice system in component-level. The results show that the system engineering practice framework of civil aircraft design and method proposed in this paper can correctly and reasonably allocate design requirements and establish a complete system model, which is helpful to improve the efficiency and accuracy of civil aircraft design at this stage.

Keywords: model-based system engineering (MBSE); Harmony SE; civil aircraft; architecture model; fuel tank pressurization component

引用格式: 刘晚移, 冯蕴雯, 侯杰然, 等. Harmony SE 在民用飞机设计中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(1): 35-44

LIU Wanyi, FENG Yunwen, HOU Jieran, et al. Application of Harmony SE in civil aircraft design[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(1): 35-44 (in Chinese)