

航空发动机机载健康管理系统设计方法

杨天策¹, 张瑞², 蔡景¹

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要:为解决航空发动机机载健康管理正向设计流程不清晰、设计需求不明确、需求设计对应及追溯不规范的问题,在对比国内外现有健康管理功能架构体系的基础上,结合正向设计中需求捕获、需求分析和功能分配,研究了由上到下的航空发动机健康管理正向设计基本流程,开发了航空发动机健康管理正向设计流程平台,实现了机载功能架构的设计。引入基于模型的系统工程思想,采用面向对象的工程设计思路,建立功能目标量化、功能描述、模块定义等图形化设计方法,验证了该设计方法在硬件设计中的可用性。通过研究航空发动机机载健康管理系统设计方法并分析机载功能组成,建立了可扩展的流程平台,基于模型设计方法建立了可用的硬件设计模型,可为航空发动机机载健康管理系统设计提供参考。

关键词: 健康管理系统; 基于模型的系统工程; 需求分析; 功能设计; 航空发动机

中图分类号: V233

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.06.002

Design Method of Airborne Health Management System for Aeroengine

YANG Tian-ce¹, ZHANG Rui², CAI Jing¹

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to solve the problems of unclear forward design process, ambiguous design requirements, and lack of standardization in the correspondence between requirement and design and requirement traceability of aeroengine airborne health management system, based on the comparison of the existing health management functional architecture systems at home and abroad, combined with requirement capture, requirement analysis and function allocation in forward design, the top-down forward design process of aeroengine health management system was studied, and the forward design process platform of aeroengine health management was developed to realize the design of airborne functional architecture. By introducing model-based system engineering ideas and adopting an object-oriented engineering design approach, graphical design methods such as functional objective quantification, function description and module definition were established to verify the feasibility of this design method in hardware design. By studying the design method of aeroengine airborne health management system and analyzing the composition of airborne function, an extensible process platform was established, and feasible hardware design models were established using the model-based design method, so as to provide a reference for the design of aeroengine airborne health management system.

Key words: health management system; model-based system engineering; requirement analysis; functional design; aeroengine

0 引言

航空发动机健康管理(Engine Health Management, EHM)作为新兴概念,在航空发动机领域越来越受到重视。但EHM系统没有形成一套从需求到物理层的全体系统通用设计方法,传统设计方法难以对EHM系统进行充分设计验证。因此,需要1个严格的

流程平台和基于模型的可扩展设计方案,以实现需求的追溯和管理,实现需求到设计方案的验证。

健康管理系统的本质就是将原始传感信息转化为机载诊断、寿命使用信息,为维修和保障提供决策输入的载体^[1]。目前健康管理概念在工业界得到了充分的认可和研究并应用广泛,开始向综合化、标准化和智能化的方向发展。2007年,SAE^[2]修订出版了

收稿日期: 2022-03-24 基金项目: 中国民用航空局项目(AASA2146903309)资助

作者简介: 杨天策(1998),男,硕士。

引用格式: 杨天策,张瑞,蔡景.航空发动机机载健康管理系统设计方法[J].航空发动机,2023,49(6):6-13. YANG Tiance, ZHANG Rui, CAI Jing. Design method of airborne health management system for aeroengine[J]. Aeroengine, 2023, 49(6): 6-13.

专门对航空发动机健康管理系统的ARP 1587B《航空燃气涡轮发动机健康管理系统指南》,给出了关于EHM系统最顶层方案,介绍了EHM系统的整体结构,并提供了有参考价值的实例,展示了EHM系统可能的选择,定义了广义的EHM功能结构^[3]。实现这些功能架构,依托于硬件系统的设计,EHM这类系统传统依赖基于文档的系统工程开展系统设计,这些设计文档规范不同,其完整性、一致性难以保证,导致设计需求、设计目标与设计结果间存在偏离^[4],因此复杂系统向更有效更规范的基于模型的系统工程设计转变^[5]。在实际应用领域,许多的公司和企业将基于模型的系统工程设计用于自己的产品开发流程中^[6]。包括中电科^[7]、中航工业等都有实际运用场景实例。Baek等^[8]基于模型对集成系统开展分析设计,设计2种不同的集成系统(System of Systems, SoS)案例和场景并评估建模方法的总体适用性;周潇雅等^[9]使用基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)开发运载火箭能源系统;唐小峰等^[10]基于MBSE开展航空装备测试自动化研究,对所建模型进行测试分析;赵良玉等^[11]将SysML模型与Simulink模型进行联合仿真。Benjamin等^[12]基于SysML语言将新的行为模拟库与先前描述函数和组件的通用库相结合,并进行参数分析和描述建模。

本文在典型的国内外功能架构的基础上,分析机载EHM系统的目标功能组成;从需求到功能分配,提出一套EHM系统的正向设计流程和1个流程平台;应用基于MBSE面向对象的设计,探索一套实用的机载EHM系统全系统的设计方法。

1 航空发动机健康管理系统的功能架构

EHM系统获取发动机运行信息,通过监控发动机状态,及时发现故障,为剩余寿命预测提供基础,便于提前采取措施,以提高发动机利用率,降低发动机使用和维护成本。该系统前瞻性和系统性极强,在设计时必须着眼全局,无论对系统本身还是其所依赖的运行环境都必须具有极强的扩展能力。因此,架构设计对于EHM系统的研究具有深层次意义。

机载EHM系统架构设计的目标是得到功能和组成,即明确功能模块和硬件实现。在对比典型的发动机监控管理系统功能架构的基础上,提出机载EHM系统的功能组成,从而为设计流程研究和硬件设计提

供输入。

1.1 典型EHM系统功能架构

对于EHM系统功能架构的研究,国内外存在范围不一、内容各异的标准和设计方案。通常,研究人员都遵循较高层次的面向全部健康管理系统的视情维修的开放体系(Open System Architecture for Condition-Based Maintenance, OSA-CBM)架构体系^[13],尤其是SAE标准下的1587B,是专门针对航空发动机出台的健康管理指南。基于最顶层的健康管理架构体系OSA-CBM内容,对比国内外现有的飞机/发动机健康管理功能架构体系,尤其是SAE 1587B标准,对比分析SAE 1587B和各功能框架之间的区别。

根据OSA-CBM规范,EHM系统的架构的核心模块主要分为6层:数据采集层、数据操作层、状态检测层、健康评估层、预测评估层、建议生成层。2007年,SAE AIR1587B EHM设计指南中给出了一种航空发动机典型高等级的架构^[14],SAE AIR1587B EHM架构体系如图1所示。在这种架构下,EHM系统由征兆、诊断、预测、操作几大核心部分组成。

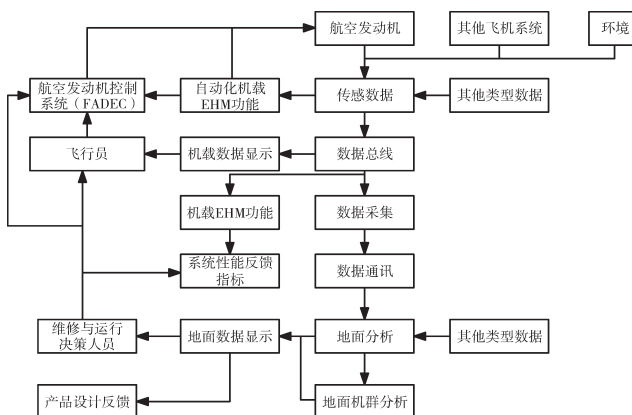


图1 SAE AIR1587B EHM架构体系

GE、波音、Honeywell^[15]和洛马等公司在此基础上相继提出各自的EHM功能架构。上述典型的多种EHM系统的关注点不同,虽然在架构的描述和结构上有不同,但仍具有共同之处。各架构均由机载、空地通讯和地面处理3方面组成。各典型EHM系统架构对比见表1。

EHM系统功能架构主要包括机载、空地传输及地面系统的功能架构3部分。未来,分布式架构体系的发展从全权限数字电子控制器(Full Authority Digital Engine Control, FADEC)向EHM系统逐步递进^[16],

表 1 各典型 EHM 系统架构对比

体系名称或发布单位	基本特点
AIR 1587B	EHM 系统由征兆、诊断、预测和规定操作等 4 部分组成。
GE 公司架构	(1)整机机载传感器得到原始数据,之后对数据进行数据预处理,得到相关特征; (2)处理后的数据发出早期故障告警; (3)经过诊断模块,对失效模式进行分类,并进行性能评估; (4)故障定位/隔离,并预测剩余寿命。
波音公司三推理机	在这种三推理机架构中,异常检测用于表征基准性能并识别偏离基线的状态,例如:早期故障、间歇性故障或活跃故障等。
集成系统的健康管理(Integrated Systems Health Management, ISHM)	监视器集合采集得到数据,并通过一系列诊断推理和预测算法确定整个系统中会出现的失效问题。
OSA-CBM	基于 OSA-CBM 的健康管理系统架构的核心模块分为 6 层,包括数据采集到建议生成的全寿命管理流程。
IMPACT 公司架构	在这种架构中,设置异常检测、诊断和预测功能,主要对象是航线可更换单元(Line Replaceable Unit, LRU)。
洛马公司区域管理	是一种基于区域管理器的体系结构。最高层是飞机级推理机,用于综合飞机各个子系统的信息,得到飞机整体的健康评估信息。

分布式功能架构在未来也将成为研究趋势。

1.2 机载 EHM 系统功能组成

机载 EHM 系统以发动机的 FADEC 等控制系统为基础数据源,实现航空发动机全寿命流程的健康管理,包括设计、试飞、运营、维护等。系统面向的对象是航空发动机制造商、用户以及飞机制造商、后勤保障单位等。机载 EHM 系统功能的实质是采集发动机数据,并生成固定的数据格式进行传输和存储,并同其他机载系统进行连接交互(如飞机指示记录系统,中央维护系统,信息系统和通讯系统等)。

机载模块从专用传感器和数据总线中读取数据,基于硬件模块实现航空发动机机载功能。其功能按照服务对象可分为驾驶舱功能、后台功能和传输功能。其中,传输功能和驾驶舱功能在各架构中均位于机载功能中,而后台功能(如驾驶舱告警、趋势分析、寿命管理等)则因需求不同而不同。

1.2.1 发动机数据采集功能

数据采集依托于 FADEC 这类发动机控制系统的数据,同时根据客户的定制,从新增的专用健康管理传感器中采集数据。数据从专用数据线路或总线网

络中读入机载系统。

1.2.2 发动机数据处理功能

数据处理目的是统一采集的数据类型,通常进入机载数据采集模块数据格式有模拟量、数字量和离散量等,这和采集的对象和数据内容有直接关系。这些量都要在机载 EHM 系统中转化为可读的数字量数据,并按照对应的代码格式整理,便于数据的传输。

1.2.3 发动机状态监控功能

状态监控的目的是根据预先的程序对全部采集的数据进行实时监控,尤其是监控对航空发动机安全有直接影响或潜在影响的数据,如发动机振动、滑油水平、滑油碎屑等关键诊断参数。

1.2.4 发动机报文加载功能

发动机报文加载功能是定制化的功能,通常机载部分和地面部分共同工作,机载部分负责向地面发送定制化的发动机报文。报文内容包括发动机关键状态监控参数、发动机工作环境参数、发动机故障报文等。

除了这些基本功能,基于可编程的硬件系统,可以在机载部件上实现故障阈值设定,以丰富驾驶舱报警或显示的内容。对数字量数据进行再处理,进而对关注的重点故障参数在机载设备上进行分析,降低故障的虚警率,提高故障的隔离率,从而提高航线维护能力。

综上所述,机载 EHM 系统功能架构如图 2 所示。

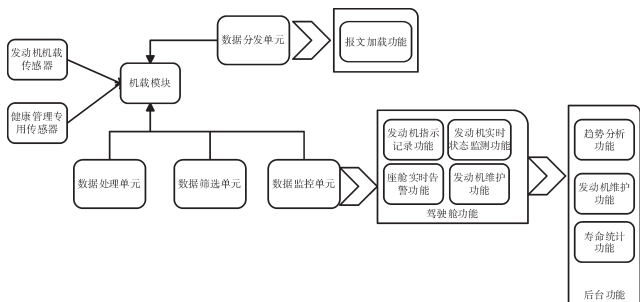


图 2 机载 EHM 系统功能架构

2 机载 EHM 系统功能设计流程

2.1 EHM 系统需求分析

需求分析是健康管理系统正向设计研发的重要步骤。通过需求分析能够明确系统研制的方向和技术要求,保障新型号健康管理系统研发的实用性,提高系统设计效率。

EHM 系统需求的调研对象主要是使用方(用户)

和设计方。使用方是 EHM 系统的主要使用者,设计人员开发系统归根结底是为了满足使用方的需求,因此,使用方是需求的主要来源,也是调研对象的主体。但使用方不具备系统开发和设计方面的相关技术和经验,因此可能会忽略部分必要的需求,需要设计人员对其进行补充。因此,设计方也必须作为总体用户参与到系统开发前的需求调研中。

将 EHM 的用户进行分类,在分类的基础上分析不同用户对于 EHM 的需求并进行整理和归纳形成用户对于 EHM 的需求集合,用以指导 EHM 的设计。各类用户对发动机的不同需求如图 3 所示。

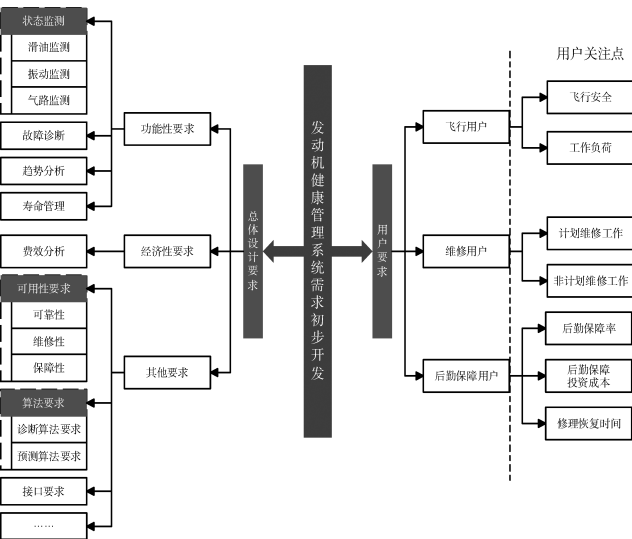


图 3 各类用户对发动机的不同需求

需求分解的目标是把用户对 EHM 系统提出的“要求”或“需要”进行分析与整理,评审确认后形成描述完整、清晰与规范的文档,为待开发的 EHM 系统提供完整、清晰、具体的要求,是具体系统设计的输入。这些需求具体分为功能性需求、非功能性需求与设计约束 3 方面。

(1)功能性需求:EHM 系统必须完成和实现的功能,以及为了向用户提供有用的功能所执行的操作。

(2)非功能性需求:主要包括 EHM 系统使用时对性能、数据采集和处理方面的要求,以及 EHM 系统设计必须遵循的相关标准、规范、协议等,用于人机交互的用户界面设计的具体细节、未来可能的扩展方案、与其他子系统可能的接口类型等。

(3)设计约束:通常是对一些设计或实现方案的约束说明。例如:要求待开发的 EHM 系统必须以型号发动机为对象,相关设计完全匹配该型号发动机;

数据采集要求、传感器精度等必须依据现有技术条件可达到的频率和精度等。

需求分析流程如图 4 所示。

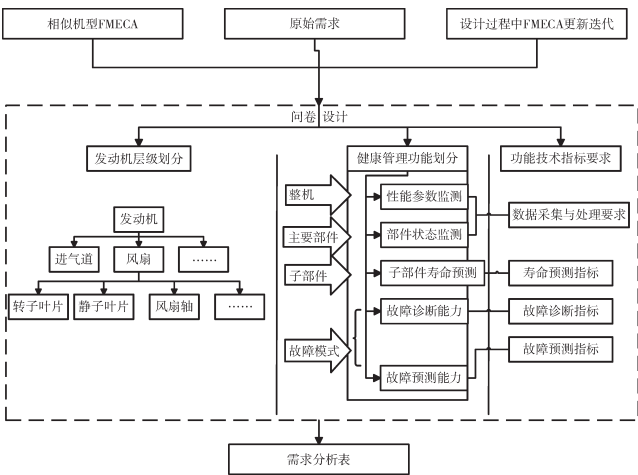


图 4 需求分析流程

2.2 EHM 机载功能分配

在 EHM 系统机载/地面功能设计前,应充分了解健康管理系统的实现过程和具体流程,对需要分配的功能进行详细的分析。根据机载系统、地面系统承担任务的特点逐一确定,各项功能中哪些故障模式由机载系统承担、哪些故障模式由地面功能承担、哪些故障模式由机载和地面协同承担、哪些故障模式的承担对象不确定。针对难以确定待分配功能,采用逻辑决断法、模糊层次分析法等方法进行机载/地面功能分配。地面/机载功能分配流程如图 5 所示。

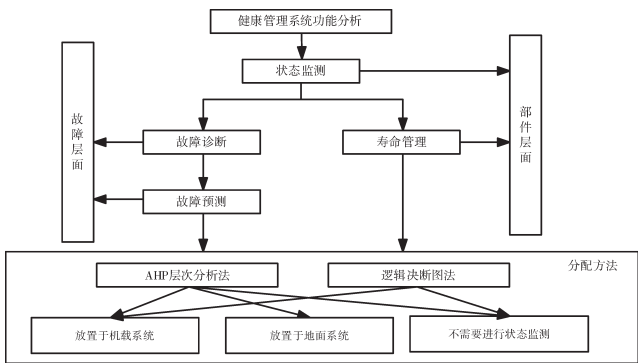


图 5 地面/机载功能分配流程

这些主要功能应具备各自考虑的分配侧重点。状态监测功能应考虑监测对象的重要性、是否具备具体参数供其监测、是否有实时性的要求、是否有已有参数供监测等问题;故障诊断功能考虑监测故障的重要程度、故障特征的明显性、故障是否隔离到 LRU、故障虚警率的高低等问题;故障预测功能考虑故障的重

要程度、故障-功能失效的潜伏周期、故障参数是否可靠、故障预测参数高低等问题;寿命管理这类功能通常在地面EHM系统中完成。

2.3 机载EHM系统功能设计平台开发

按照第2.1、2.2节提出的设计流程,需要一套可用的工具,供新研发的航空发动机工程中的健康管理系统设计使用。流程平台需要实现从需求、指标、功能和功能架构设计的全过程。

流程平台应具备对应的数据接口。平台本身应该具备参考资料。例如:航空发动机的故障模式、影响和严重度分析(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)资料,以供故障模式的定义;机型/既往机型的设计资料,供部件对象的定义等。

流程平台本身解决的问题是需求到功能架构的细化设计。因此,基于对流程平台提出的需求,加上规范化的设计流程,提出了流程平台的模块组成:机型配置、需求管理、指标分配、架构设计和对比确认。该流程平台是可扩展的,不仅供机载系统进行功能设计,而且供地面系统进行设计。

在机型配置模块中,按照发动机结构,形成树状图节点,节点类型包括整机、部件和故障模式,同时提供故障模式的检测率等参数的输入。需求管理按照内部外部进行需求录入、分解和权衡,最终形成需求清单。

指标分配是根据需求提出的可分配指标,按照部件/故障模式进行指标分配,作为功能架构设计的约束。架构设计基于节点,对部件进行状态监测、寿命管理的详细设计,对故障模式进行故障诊断、故障预测的详细设计,同时判断机载/地面功能。对比确认是将需求和架构设计方案进行对比,实现需求覆盖和追溯。

正向流程平台最终得到1个功能架构设计方案,在需求的基础上,明确了机载EHM系统需要对哪些部件进行监控,对哪些故障进行诊断和预测。

功能架构的实现需要依托于硬件模块的设计,这部分将采用MBSE方法,对硬件进行设计,进行功能的实现。

3 基于OOSEM的机载EHM系统硬件架构设计

面向对象的系统工程方法(Object-Oriented Sys-

tems Engineering Method, OOSEM)是基于模型的系统设计方法中1个典型的自上而下、场景驱动型的设计过程^[17]。该过程利用SysML语言进行对象系统的系统需求分析、功能分析、设计验证和规范,同样的可以进行备选方案的迭代筛选。该过程是MBSE方法中较为便于构建灵活且易扩展系统的设计方法,且可大幅降低与面向对象软件开发、硬件开发和测试过程的集成度。

MBSE方法中有许多设计策略,采用OOSEM这类可参与贯穿系统全寿命周期的设计方法显得尤为重要。和MBSE方法中的其他类似方法(如Harmony过程^[18]、针对系统工程的Rational统一过程等)不同之处在于,OOSEM将结构化分析概念(典型的元素是数据流)与选定的面向对象概念进行了集成^[19],这对于对象内部数据流可较简单分为控制信号和参数数据的机载EHM系统来说,无疑是非常方便可行的。

对于基于OOSEM的建模方法而言,首先是建立模型(包括了建立建模包/准则、组织模型等),然后进入分析需求过程(在机载EHM系统硬件设计中需要考虑来自设计方提供的功能需求)。定义逻辑/功能架构是顶层架构设计的主要内容,需要从活动入手,将活动分解到部件,物理部件使用硬件、软件、数据和程序实现。细化物理架构方案是在功能架构(活动图、行为图等)基础上进行精化,完成部件级的设计。优化评估备选方案是通过执行系统设计权衡研究和设计优化的工程分析进行的。管理需求可追溯性用来进行设计方案和需求的追溯。OOSEM同样可以对复杂系统进行验证集成分析。基于OOSEM的机载EHM系统设计流程如图6所示。

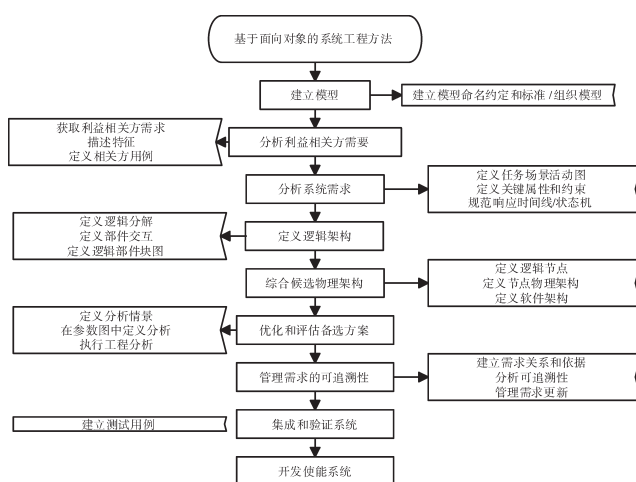


图6 基于OOSEM的机载EHM系统设计流程

采用 Rhapsody 软件建模,硬件基本架构参考波音公司的飞机状态监控系统(Aircraft Condition Monitoring System, ACMS),目标是验证该方法在硬件架构设计中的可用性,提供 1 个示例。

3.1 功能分析

机载模块应该具备通信连接功能、数据处理功能、机载状态监测功能、故障信息报告功能等基本功能项。这些功能项是设计方确定的,作为机载系统的默认选项。在第 2.1 节提到的诸多需求中,客户可以将告警和危险识别预警放置到在机载模块来完成,故障定位也是可以在机载中完成,而降低虚警率、寿命预测等功能需要在软件工程和地面 EHM 系统中完成。

将功能进行分解后,可以得到 2 个分解结果:硬件目标和软件目标。其中,硬件目标指的是完成这个功能需要什么部件来完成,软件目标指的是该项功能在系统中的集成设计。作为基于 MBSE 的机载系统设计来说,要明确基本的硬件目标(块定义图的设计)和所需的功能类别(活动图、序列图等的的设计)。MBSE 中需求和设计对应关系如图 7 所示。

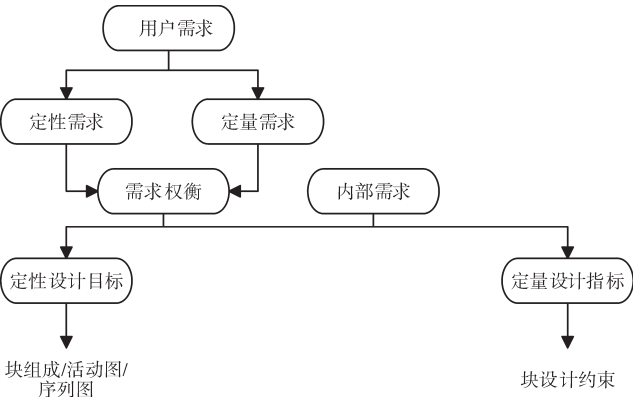


图 7 MBSE 中需求和设计对应关系

将整理捕获得到原始需求用需求图导入(或采用 DOORS 工具和 Rhapsody 连接导入),得到可追溯的需求表和需求关系图。

部分需求关系和用例追溯需求关系分解和满足追溯示例如图 8 所示。在需求关系和用例建模中,对用户提出的原始需求进行分析,得到原始需求对应的分解后的衍生需求,并通过《refine》关系表示原始需求和衍生需求之间的关系。对于产生的可以转化为设计目标的需求,利用关系《satisfy》实现设计模块和需求的对应管理,在需求追溯和覆盖分析中,关系作为需求完成满足设计的依据。用例部分是充分展示

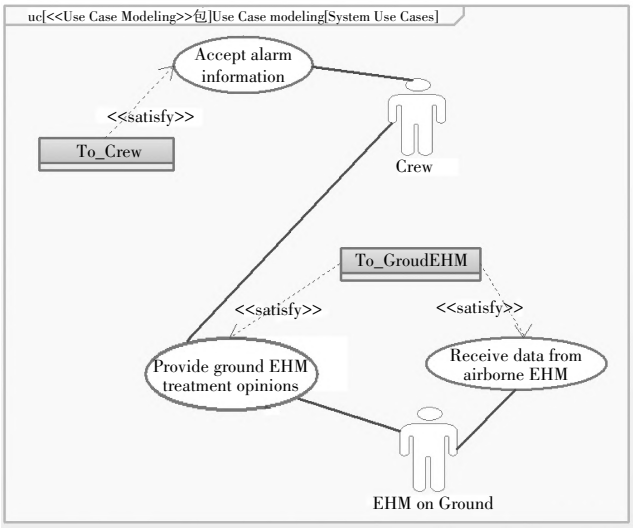


图 8 需求关系和用例追溯示例

需求对应的用户(如机组、地面人员)和所需需求详情用例之间的关系,同样采用《satisfy》实现设计模块同用户需求的设计覆盖。需求分解图和用例也可以生成对应的需求分析矩阵,供设计人员参考。

得到基本的需求和分解后,需要对这些需求进行块的定义和划分,结合上文中分析的机载 EHM 系统架构组成,得到 EHM 架构的块图划分。该 EHM 架构的核心部件是健康管理系统专用传感器、数据采集处理模块、状态监测及故障报文生成模块、通信传输(机组和地面 EHM 系统)模块。这些模块按照组合关联的关系进行连接,代表着父块和子块的包含和参数共用关系。EHM 作为顶层模块涵盖了其下所有子块的内容,并且作为统一的集成模块实现操作的调用和参数的共享。

3.2 功能定义

完成上述的需求分析部分后,对功能的实现进行定义。机载 EHM 系统的主要功能流程可以分为传感器监测、数据处理、数据初分析、数据传出等功能模块。机载 EHM 系统与外界的联系包括机载告警系统、空地传输系统和飞机数据存储系统。基于活动图的泳道划分和第 3.1 节中定义的块进行关联。机载 EHM 系统的工作活动图和建立模块关联并生成实例对象。专用传感器模块进行通电自检、读取数据等活动,向机载模块传递参数信号。状态监测模块执行数据的预处理和筛选,并对设置的参数进行监控,向机组或地面系统传递报文信息,全部的参数通过存储模块进行储存。

EHM系统的专用传感器应具备自检(Built-in Test, BIT)功能,保证传感器数据的准确性。传感器通电后触发自检测事件,并向机载模块发送检测结果,检测对象包括自身工作状态和数据通道健康状态。如果出现故障,可发送简易的故障信号或报文事件至机载模块,并由机载模块中断该传感器的信道传输。时序图是可以由活动图或状态机图自动生成的,亦可由设计人员专门进行定义

在进行基本功能的设计后,便可以在功能的基础上对内部块图进行详细定义,包括端口、对象流、值类型等。设计方案中,默认发动机控制系统的传出数据是机载EHM系统直接可读可用的,因此只需要对机载EHM系统专用传感器进行数据处理定义。建模中,端口Port传递控制信号和对象流,模块之间存在控制信号和对象流(也就是参数传递)的连接关系,内部块图同样存在对外的接口,接口连接的是外围设备(如存储器、机组告警系统)。

以航空发动机专用温度传感器为例,需要将采集的电压数据转化为带有物理量纲的数据,即读出的温度数值,这些内容也需要在内部块图中定义。

这些内部块图中,仍需要定义许多关键参数,如部件监测的阈值参数、信号传输的流参数、通道自检的判断参数等。这些参数可以作为块或者对象流的参数约束进行详细定义,应交由专门的硬件设计部门进行。

3.3 功能实现

功能实现是指对建立的机载EHM系统建立可测试的模型。在MBSE方法中,常常在测试用例中构建活动图,通过构建测试活动完成测试用例的测试,以判断建立的系统部分是否正常运行。

传感器告警测试用例仿真如图9所示,在超过阈值的排气温度(Exhaust Gas Temperature, EGT)进行告

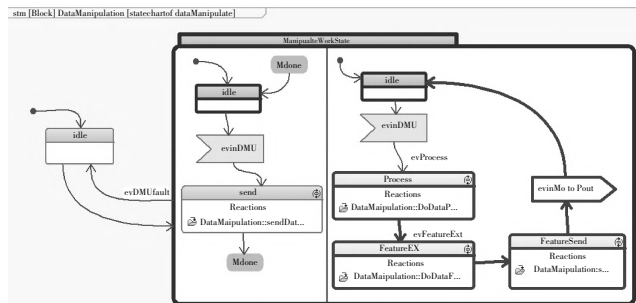


图9 传感器告警测试用例仿真

警的测试用例设计仿真示例中,首先执行了EGT传感器参数的选择和处理,如果触发状态机图中对阈值的判断事件,系统自动调用操作对数据文件进行处理分析,操作外调判断函数对当前温度值进行分析。如果EGT温度超温触发,则向机组和地面模块发送信号。通过测试用例的仿真和测试,显然该功能设计满足了第3.1节中需求提出的告警需求。

除了进行正常的测试用例外,测试模型仍可进行故障测试,借助于安全性分析方法,基于SysML语言和建立的架构模型进行安全性分析。

3.4 联合设计流程

Rhapsody软件是1个多平台集成的平台,支持Modelica这类多领域联合仿真模型的集成。因此,在上述设计模型基础上,对物理参数、传输参数、解码译码等硬件进行设计,并结合Rhapsody的活动图、状态机图等进行联合仿真。联合设计流程如图10所示。

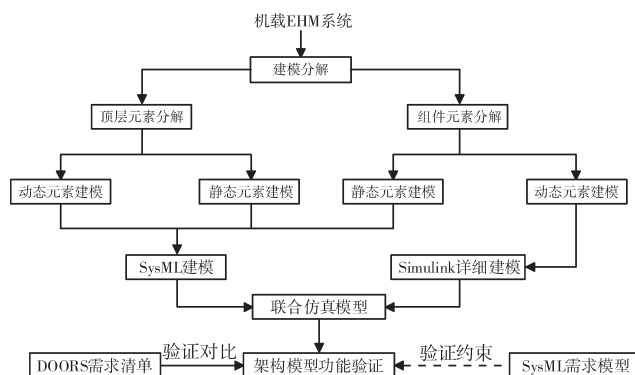


图10 联合设计流程

完成联合设计流程后,对机载EHM系统的硬件进行详细的定义,并可以同前序的功能架构设计进行关联对应。

4 结束语

(1)本文对比了国内外EHM系统架构体系,提出了基于OSA-CBM和SAE AIR1587B标准的航空发动机机载健康管理系统功能基本架构,明确了机载EHM系统的功能组成。

(2)基于基本架构组成和实际正向开发需要,提出了需求捕获、分析流程,应用流程,便于区分设计和用户需求以及定性定量目标。对于地面/机载功能的划分,提出相应的分配流程。在此基础上开发了1个经过验证的正向流程平台。

(3)基于MBSE设计思想和面向对象的设计思

路,对机载EHM系统架构进行需求捕获分解、功能图像化定义、功能测试实现等设计流程研究,可以看出MBSE设计方法对于机载EHM系统可以实现架构覆盖设计的目标,并在架构基础上,可对该系统进行优化迭代和精化设计,并进行联合仿真设计。

(4)随着软件集成度的逐渐提高,自主开发的正向流程平台、基于模型的硬件系统设计平台等可以进行集成,实现多层次、多迭代的机载EHM系统设计。本文提出的设计方法不仅可以在机载系统上使用,同样适用于空地通信系统、地面EHM系统等。

参考文献:

- [1] 王施,王荣桥,陈志英,等.航空发动机健康管理综述[J].燃气涡轮试验与研究,2009,22(1):51-58.
WANG Shi, WANG Rongqiao, CHEN Zhiying, et al. Overview of aero-engine health management[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(1): 51-58. (in Chinese)
- [2] SAE. Guidelines for aviation gas turbine engine monitoring systems: ARP 1587B[S]. Warrendale: SAE International, 2007: 1-22.
- [3] 杨旭.航空发动机健康管理需求及发展分析[J].中国科技投资,2019,(18):241-241.
YANG Xu. Demand and development analysis of aeroengine health management system[J]. China Venture Capital, 2019, (18): 241-241. (in Chinese)
- [4] 李琛,吴新,崔利丰,等.基于MBSE思想的航空发动机控制系统设计方法[J].航空发动机,2021,47(4):123-130.
LI Chen, WU Xin, CUI Lifeng, et al. Design method of aeroengine control system based on MBSE[J]. Aeroengine, 2021, 47(4): 123-130. (in Chinese)
- [5] 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. Overview of system engineering based on model[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 12-16. (in Chinese)
- [6] 蔡昀彤.浅析MBSE在国际民用航空领域的应用[J].科技创新导报,2017,14(18):17-18.
CAI Yuntong. Analysis on the application of MBSE in the field of International civil aviation[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, 14(18): 17-18. (in Chinese)
- [7] 陈斌.基于MBSE的直升机航电系统设计方法研究[J].电子技术与软件工程,2020(23):69-70.
CHEN Bin. Research on design method of helicopter avionics system based on MBSE[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2020(23): 69-70. (in Chinese)
- [8] Baek Y M, Mihret Z, Shin Y J, et al. A modeling method for model-based analysis and design of a system-of-systems[C]//2020 27th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC). Singapore: IEEE, 2020: 336-345.
- [9] 周潇雅,杨亮,张茜,等.基于ARCADIA MBSE在运载火箭能源子系统的应用[J].计算机测量与控制,2020,28(11):211-221.
ZHOU Xiaoya, YANG Liang, ZHANG Qian, et al. Application of ARCADIA MBSE in launch vehicle energy subsystem[J]. Computer Measurement and Control, 2020, 28(11): 211-221. (in Chinese)
- [10] 唐小峰,邹建,文永康,等.基于MBSE的装备测试性自动化技术研究[C]//2020中国航空工业技术装备工程协会年会论文集.西安:《测控技术》杂志社,2020:28-31.
TANG Xiaofeng, ZOU Jian, WEN Yongkang, et al. Research on equipment testability automation technology based on MBSE[C]// Proceedings of the Annual Meeting of China Aviation Industry Technology and Equipment Engineering Association in 2020. Xi'an: Measurement and Control Technology, 2020: 28-31. (in Chinese)
- [11] 赵良玉,叶俊杰,何琪,等.基于MBSE的民机起飞场景仿真[J/OL].系统仿真学报,2021,33(10):1-11[2021-04-16].
ZHAO Liangyu, YE Junjie, HE Qi, et al. Simulation of civil aircraft takeoff scene based on MBSE[J/OL]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 1-11[2021-04-16]. (in Chinese)
- [12] Kruse B, Shea K. Design library solution patterns in SysML for concept design and simulation[J]. Procedia Cirp, 2016, 50: 695-700.
- [13] 陈乐平,余静,褚波,等.基于OSA-CBM体系结构的地面PHM系统研究[C]//2021年中国航空工业技术装备工程协会年会论文集.青岛:中国航空工业技术装备工程协会,2021:471-474.
CHEN Leping, YU Jing, CHU Bo, et al. Research on ground PHM system based on OSA-CBM architecture[C]//Proceedings of the Annual Meeting of China Aviation Industry Technology and Equipment Engineering Association in 2021. Qingdao: China Aviation Industries Technology Equipment Engineering Association, 2021: 471-474. (in Chinese)
- [14] Lesesky A C, Purkey B A, Weant B R. Systems and methods for monitoring and storing performance and maintenance data related to an electrical component: US, EP1522862[P]. 2007-9-18.
- [15] Macconnell J H. ISHM & design: a review of the benefits of the ideal ISHM system[C]//Aerospace Conference. US: IEEE, 2007: 230-214.
- [16] 刘栋.一种基于云计算的居家慢病健康管理的分布式数据组织方法:中国,CN111710378A[P].2020-9-25.
LIU Dong. A distributed data organization method for home chronic disease health management based on cloud computing: China, CN111710378A[P]. 2020-9-25. (in Chinese)
- [17] Saha H. Model-based design[J]. Control Engineering, 2015, 62(1): 20-20.
- [18] 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(4):93-94.
TAN Qilin, WANG Xuhao. Research on integrated process of embedded software design based on harmony SE method[J]. Information and Communication, 2019(4): 93-94. (in Chinese)
- [19] 董文方,黄干明.基于OOSEM的CNI系统架构定义应用研究[J].航空电子技术,2018,49(4):29-33.
DONG Wenfang, HUANG Ganming. Application research on architecture definition of CNI system based on OOSEM[J]. Avionics Technology, 2018, 49(4): 29-33. (in Chinese)

(编辑:兰海青)