



图学学报
Journal of Graphics
ISSN 2095-302X, CN 10-1034/T

《图学学报》网络首发论文

题目：航空发动机健康管理系统功能架构分析与研究
作者：詹轲倚，黄维娜，淳道勇，桂咏涛，张椿林
收稿日期：2024-11-01
网络首发日期：2025-04-29
引用格式：詹轲倚，黄维娜，淳道勇，桂咏涛，张椿林. 航空发动机健康管理系统功能架构分析与研究[J/OL]. 图学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/10.1034.t.20250428.1802.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

航空发动机健康管理系统的功能架构分析与研究

詹轲倚^{1,2,3}, 黄维娜^{1,2}, 淳道勇⁴, 桂咏涛^{1,2}, 张椿林^{1,2}

(1. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵州 贵阳 550081;

2. 贵州省转子结构完整性重点实验室, 贵州 贵阳 550081;

3. 清华大学航空发动机研究院, 北京 100084;

4. 海装广州局驻贵阳地区军事代表室, 贵州 贵阳 550081)

摘 要：针对复杂系统需求边界模糊与架构动态优化难题，融合 MagicGrid 方法论，提出了“场景-需求-功能-逻辑-物理”五层协同建模框架。基于系统建模语言在 MagicDraw 平台在航空发动机健康管理系统中开展了基于模型的系统工程实践：1)通过内部块图建立利益相关方交互关系拓扑，实现场景驱动的系统边界定义；2)利用需求图构建可追溯性矩阵，完成场景验证与需求完整性分析；3)基于用例图-活动图动态组合建模功能行为，经模块化分解形成技术独立的逻辑架构；4)通过块定义图与内部块图构建物理模型，借助接口标准化实现逻辑组件与物理实体的解耦设计。案例验证表明，该方法在降低功能重叠率、提升预测效率、敏捷评估状态影响并降低虚警率上具有显著成效。研究成果不仅构建了航空发动机健康管理系统的全生命周期建模范式，实现了场景-需求-功能-物理全链条追溯，拓展了图学方法在 MBSE 领域的工程应用场景，其多视图协同建模机制对复杂装备系统设计具有普适参考价值。

关 键 词：航空发动机；健康管理系统；基于模型的系统工程；系统建模语言；功能架构

中图分类号：TP 391

文献标识码：A

Analysis and research on the functional architecture of aero-engine health management system

ZHAN Keyi^{1,2,3}, HUANG Weina^{1,2}, CHUN Daoyong⁴, GUI Yongtao^{1,2}, ZHANG Chunlin^{1,2}

(1. AECC Guiyang Engine Research Institute, Guiyang Guizhou 550081, China;

2. Guizhou Province Key Laboratory of Rotor Structural Integrity, Guiyang Guizhou 550081, China;

3. The Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Naval Equipment Department, Guangzhou Bureau, Military Representative Office in Guiyang Area, Guiyang Guizhou 550081, China)

Abstract: To address the challenges of ambiguous requirement boundaries and dynamic architecture optimization in complex systems, integrates the MagicGrid methodology to establish a five-layer collaborative modeling framework encompassing “scenario-requirement-function-logic-physical” domain. Implementing Model-Based Systems Engineering MBSE with Systems Modeling Language on the MagicDraw platform, we conduct systematic modeling practices for an aero-engine health management system. The methodology comprises four critical phases: 1) Scenario-driven system boundary definition through internal block diagrams that model stakeholder interaction topology; 2) Scenario verification and requirement integrity analysis using traceability matrices constructed from requirement diagrams; 3) Dynamic functional behavior modeling via combined use case-activity diagrams, where modular decomposition establishes technology-neutral logical architectures; 4) Physical implementation modeling employing block definition diagrams and internal block diagram achieving logic-physical decoupling through standardized interface design. The case validation demonstrates that the proposed method achieves significant effectiveness in reducing functional overlap rate, improving prediction efficiency, enabling agile assessment of state impacts, and lowering the false alarm rate. The research achievements not only establish a full-lifecycle modeling paradigm for aero-engine health management systems, achieved end-to-end traceability spanning scenarios, requirements, functions, and physical components, but also expand the engineering application scenarios of graphic methodologies in the MBSE domain. The multi-view collaborative modeling mechanism exhibits universal reference value for complex equipment system design, particularly in resolving

收稿日期：2024-11-01；定稿日期：2025-04-12

Received: 1 November, 2024; Finalized: 12 April, 2025

基金项目：中国航发集团自主创新基金(ZZCX-2024-0062)

Foundation items: The Independent Innovation Special Fund Project of Aero-Engine Corporation of China (ZZCX-2024-0062)

第一作者：詹轲倚(1992-)，男，高级工程师，博士研究生。主要研究方向为航空发动机健康管理。E-mail: aecc_gys_zky@yeah.net

First author: ZHAN Keyi (1992-), senior engineer, PhD candidate. His main research interest covers aero engine health management.

E-mail: aecc_gys_zky@yeah.net

cross-domain requirement conflicts and supporting traceable architecture evolution.

Keywords: aero-engine; health management system; model-based systems engineering; system modeling language; functional architecture

航空发动机是实现国防现代化、确保国家安全的重大战略装备,其安全性、可靠性、维护性、经济性是各方关注的热点。航空发动机健康管理技术是提升航空发动机安全性、可靠性、维护性与经济性的必由之路,近年来受到各方青睐并取得了长足的进步,国外将配套健康管理作为先进四代及以上代次发动机的重要标志,诸如 F119 发动机、EJ200 发动机和 F135 发动机均配备了健康管理系统并逐渐发展成熟^[1]。作为一项新兴的技术,系统功能架构设计是一项重要工作^[2]。目前,针对健康管理中气路故障诊断、振动诊断、健康状态评估等具体技术点研究较多^[3-8],针对其功能架构设计却鲜有论述,开展健康管理系统功能架构研究有利于厘清系统内、外部功能、接口及交互关系,牵引工程设计,可有效支撑以需求为驱动的技术创新。国外航空发动机相关组织与制造厂商对于健康管理系统架构较为重视,SAE 提出了基于信息流处理,由征兆、诊断、预测组成的架构^[9];GE Global 提出了由粗略判定、健康状况评估与定位故障的架构,对于飞行中故障告警做出战术控制,与后勤决策系统一同实现可用架构重构,完好率评估,可用资产离线规划,最佳维修决策等功能^[10];Impact 公司采用应用故障等级推理机的架构,定义部件级、子系统三层级健康管理分布式架构,各层级配备了相应数据库与知识库,能够有效提升错误信息的包容能力^[11];洛克希德马丁公司提出了一种由传感器层,区域管理器层,飞机推理机层组成的基于区域管理器体系架构^[12];Honeywell 公司提出了一种集成健康管理系统(Integrated System Health Management, ISHM)架构用于确定执行任务情况下任务状态,采用可扩展标记语言(eXtensible Markup Language, XML)方法开发了通用数据交互采集^[13-14]。

基于模型的系统工程(Model Based System Engineering, MBSE)是一项基于数字模型来执行需求、分析、设计、验证与确认过程的系统工程实践框架,其通过系统建模语言(Systems Modeling Language, SysML)描述、分析、设计和验证复杂系统,能够有效应对复杂系统的管理复杂度,促进以业务价值为驱动的正向设计,

推动系统的尽早验证,旨在解决复杂系统研制中的“拖”,“降”,“涨”的问题。国外航空航天研制机构对 MBSE 技术应用尤为重视并取得了显著成效,NASA 将 MBSE 应用于复杂系统设计中,并将其研究成果大量应用于工程实践,极大的提升了设计开发能力和产品质量,缩减了开发时间,通过搭建部件级仿真模型,实现了对发动机性能的分析、预估,开展了军用级、民用级控制系统仿真模型的开发和验证,为其航空发动机全权限数字控制系统的快速研制奠定了基础^[15-17]。空客公司在 A350 系列飞机的开发中全面采用 MBSE,在飞机研制中逐层细化需求并进行功能分析和设计综合,不仅实现了顶层系统需求分解和确认,向供应商、分包商科学分配需求并牵引有效的需求管理,实现了周期和成本同时降低 30%目标^[18];洛克希德·马丁公司采用 MBSE 统一进行需求管理和系统架构模型,向后延伸到机械、电子设备以及软件等的设计与分析之中,构建了完整了基于模型的航空和防务产品的开发环境,在该框架下产生了 MBSE 运用的开山之作 F35^[19];罗罗公司依据 INCOSE 系统工程手册制定了其自身的系统工程能力框架,涵盖了系统评估、需求管理、系统定义、接口管理、系统功能分析、系统架构设计、确认和验证等能力,实现了从航空动力系统到子系统到部件的系统工程迭代,加速了其新一代发动机 UltraFan 的研制^[20];波音公司构建了以任务和需求定义、逻辑和功能集成、功能和逻辑架构设计为核心的、覆盖产品全生命周期的 MBSE 过程,从运行概念到需求到设计到生产,产生了世界上第一个全三维数字样机的 B777^[20]。

本文采用 MBSE 方法中的系统建模语言 SysML 对航空发动机健康管理系统进行功能架构分析。在方法层面,提出“场景-需求-功能-逻辑-物理”五层协同建模框架,通过 MagicGrid 方法论与 SysML 的有机融合,建立了面向复杂装备系统的全生命周期建模范式,突破了传统 MBSE 方法在需求-功能-物理跨层追溯中的割裂性问题。在技术路径层面,提出了基于内部块图的利益相关方交互拓扑建模技术,实现场景驱动的系统边界动态定义,开发需求图与可追

溯性矩阵的耦合验证机制，解决复杂系统需求完整性与一致性验证难题；理论层面，揭示图形化建模工具与系统工程过程的深度耦合规律，为复杂装备系统提供"需求明确-架构优化-状态评估"三位一体的解决方法，构建航空发动机领域 MBSE 实施参考架构，形成可迁移至其他安全关键系统的标准化建模流程。

1 航空发动机健康管理系统

航空发动机健康管理系统(Engine Health Management, EHM)通过传感、采集、分析、检测和数据处理等手段，提供航空发动机气路、滑油、振动、寿命等方面的实时或近实时信息，实现状态监测、故障诊断、趋势分析和寿命管理等功能，从而提醒用户注意可能影响安全运行的情况，以有针对性地安排检查维修、排除异常故障、改进功能性能、预测备件需求，进而提高航空发动机和飞机的安全性、可靠性与维护性。其一般分为机载部分与地面部分，其中机载部分主要实现数据采集、预处理及超限判断等功能；地面部分利用数据完成更深层次超限报警、事件诊断、发动机寿命状态、参数趋势分析、机群管理、系统硬件完整性检查等功能。

以美国普惠 F135 发动机为例，其机载部分如图 1 所示，作为独立硬件装配于发动机上，负责对机载参数进行采集与初步分析，以实现状态监视，故障告警，寿命统计等功能。其地面部分如图 2 所示，通过融入普惠公司安全保障体系以提高其服役发动机的安全性与可维护性。据相关报导，美军 F135 发动机在应用 EHM 技术后，故障排查时间从 F119 发动机的 20min 缩短为 15min，较现役的 F110、F100 等发动机缩短近 94%，显著提升了航空发动机运行安全性、维护性与装备可利用^[21]。

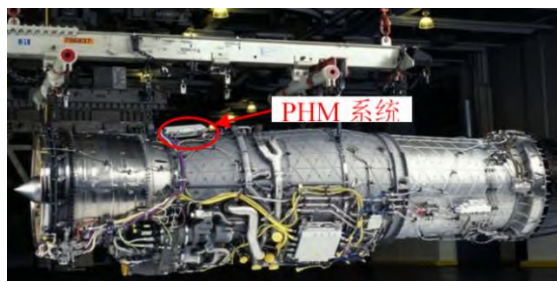


图 1 F135 发动机机载 PHM 系统
Fig. 1 F135 Engine on-board PHM system

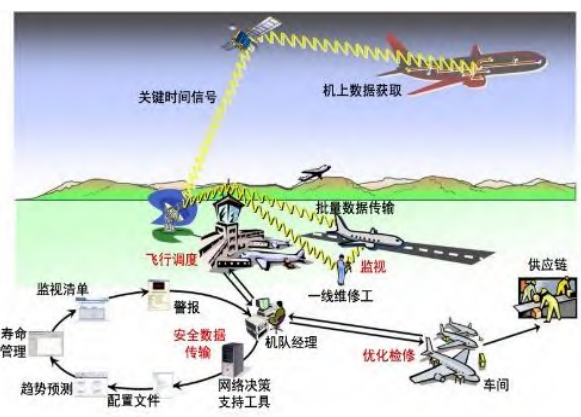


图 2 美国普惠发动机运行安全保障图
Fig. 2 U.S. Pratt & Whitney engine operational safety assurance system

2 基于模型的系统工程

随着工程系统复杂度的不断增加，传统基于文档的系统工程面临数据追溯困难、设计资源重用率低、设计信息不一致等挑战，已经无法满足复杂系统的开发需求。因此，基于模型的系统工程 MBSE 作为解决此类工程问题的有效方法应运而生并被广泛应用于复杂系统的研发过程中^[22-26]。国际系统工程协会(INCOSE)在 2007 年《系统工程愿景 2020》中将 MBSE 定义为一种应用建模方法的形式化应用，用于支持系统需求、设计、分析、检验和验证活动，这些活动从概念设计阶段开始，贯穿整个开发过程及后续的生命周期阶段^[27]。相比于基于文档的系统工程，MBSE 以模型为中心，采用基于模型的方式驱动系统生命周期活动进行，将原有文档化、表格化的需求指标、设计方案等转化为基于建模语言的概念模型。MBSE 将数字化模型视为产品生命周期活动中的主要产出物，通过模型的产生、传递和更新实现系统设计内容的迭代。

MBSE 与传统系统工程的区别在于建模语言和建模方法以及由此带来的工作模式、设计流程等方面的转变与发展。在 MBSE 的实施中，系统架构模型的建模语言从自然语言(文本格式)转向了图形化的系统建模语言 SysML。SysML 为建模系统需求、行为、结构和参数(数学模型)提供了语义基础，并能够与其他工程分析模型集成，以支持复杂系统(可能包括软件、硬件、信息、人员、过程和设备等系统元素)的表述、分析、设计以及验证。按类别划分，SysML 包括需求图、内部块图、包图、块定义图、参数图、用例图、状态机图、序列图、活动图等 9

种基本图类型，可支持表述系统的结构与行为，如图 3 所示。

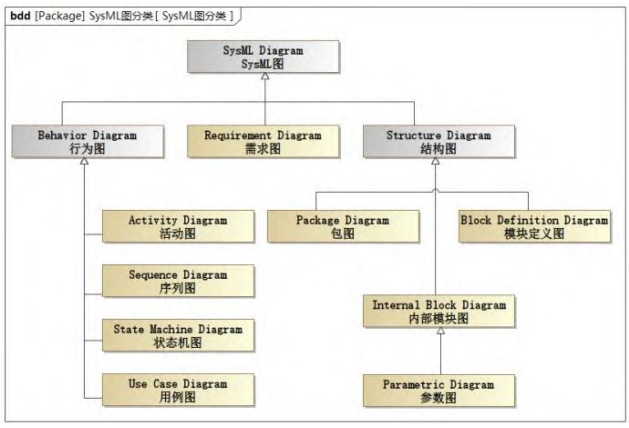


图 3 SysML 的基本图类型
Fig. 3 Basic diagram types of SysML

MBSE 建模方法是设计团队利用系统建模语言的各种图形来建立系统模型的工作流程，是 MBSE 里重要的一环，当前主流的 MBSE 方法论包括：Object-Oriented Systems Engineering Method (OOSEM)、Harmony-SE 与 MagicGrid。

面向对象的系统工程方法(OOSEM)^[26]是一种自顶向下的分析方法，它的过程与“V”流程一致，主要面向复杂系统，其核心流程包括：需求分析、权衡研究以及综合产品开发流程。OOSEM 强有力地发挥了面向对象的概念包括

“块”和对象，以及封装和继承的概念，其设计基线是需求，其功能的设计、分解、分配都是基于需求一层一层迭代以细化和实现的，每个需求层都有功能和架构的概念，最终被分解的功能块需要被分配到架构的每个模块中。

Harmony-SE^[27]主要被用于大型综合系统和软件开发流程，Harmony-SE 使用“服务请求驱动”建模方法，系统结构通过以“块”为基本结构元素

描述。涉众需求作为输入，会经过需求分析、系统功能分析、设计综合、软件分析设计、软件实现等阶段。同时，系统的演化以迭代的方式进行，系统的变更会触发新的迭代循环，最终输出系统设计综合模型及子系统需求说明书。

MagicGrid 系统建模框架从为需求、行为、结构、参数出发，通过对 MBSE 系统模型的构建和迭代分析，实现对系统工程的需求—功能—逻辑—物理(分别对应需求、行为、结构、参数 4 个支柱)设计步骤的综合，形成规范化的建模流程^[28]。

表 1 从 Sysml 兼容性、建模灵活性、适用领域、建模工具支持等维度分析三种典型的 MBSE 方法论特点。

表 1 MBSE 方法论对比

Table 1 Comparison of MBSE methodologies

类型	OOSEM	Harmony-SE	MagicGrid
SysML 兼容性	利用 SysML 的面向对象的概念来进行设计，对标准的支持度很高	未完全兼容 SysML 的 9 类图，针对指标的计算支持度低	标准兼容性最高，将诸如行为图与参数图结合使用，动态表示系统的指标变化
建模灵活性	面向对象方法通常会引入一些复杂性，特别是对于小型项目或简单的系统工程任务可能会显得过于繁琐	需要较为严格按照流程建模，才能够满足模型的一致性检查或者仿真要求；建模过程复杂	对 SysML 支持完整，可以在方法论制定和剪裁过程中提供好的基础和引导，对各方法论适用性较强
适用领域	原始形式是集成系统和软件工程过程，后进一步完善和发展使其适用范围可以面向对象的软件开发、硬件开发和测试综合	主要被用于大型综合系统和软件开发流程，适用于软件开发和嵌入式软件开发	根据方法论的特性其对机械、电气、液压等物理建模的支持力度较大
工具支持	无专用的 OOSEM 流程框架工具，可由 OMG SysML 工具及相关需求管理工具	由 IBM 提供对 Harmony-SE 方法支撑，不同阶段的建模过程在 Rhapsody 软件中都利用相应的工具模块支持	由 MagicDraw 用于完整支持方法论，其他工具只要支持 SysML 标准，其也可以进行方法论的适配

3 功能架构分析

3.1 功能架构分析目的

开展功能架构分析是航空发动机健康管理设计阶段的核心环节,通常在方案阶段中开展,在全生命周期各阶段使用。其目标在于构建从场景需求到物理实现的逻辑闭环,以实现明确系统需求与功能边界、指导架构设计与优化、状态变化影响敏捷评估等作用,具体表述如下:

1) 明确系统需求与功能边界:通过功能架构分析能够将复杂,强耦合的场景需求转化为具体的功能模块,有助于避免需求或功能冗余或遗漏,确保系统设计的完整性与针对性;

2) 指导架构设计与优化:通过明确的功能需求及其逻辑关系,可支撑恰当的技术方案,同时还可以支持架构优化,识别潜在的性能瓶颈或冗余设计;

3) 状态变化影响敏捷评估:通过建立功能与需求之间的追溯关系,可更好地应对需求变更或技术升级。

3.2 功能架构模型构建总体思路

借鉴MagicGrid方法论,基于MagicDraw平台针对健康管理开展功能架构分析,在实践过程中采用“S-R-F-L-P”思路对模型进行构建,如图4所示。在场景模型中,采用内部块图(Internal Block Diagram, IBD)对系统利益相关方及其交互关系进行分析;在需求(Requirement)模型中,通过需求图(Requirement Diagram, RD)对捕获的需求进行显性化、层次化展示,研制过程中需求多为飞机方,上级单位给出了协议与要求,通过从场景图的利益攸关者的角度开展需求的确认,是确保需求完整性的重要手段;在功能(Function)模型中,通过用例图(Usecase Diagram)与活动图(Activity Diagram)、状态图(State Diagram)、顺序图(Sequence Diagram)等动态视图对系统的工作过程及状态进行描述,功能模型应与需求模型完成链接,确保功能及需求的追溯;完功能分析后通过对功能组织与模块化形成系统逻辑(Logic)模型,逻辑模型介于功能与物理之间,以逻辑组件及其交互方式实现功能需求,而不对具体的实

现方式进行明确,通过逻辑视图将系统抽象为与技术无关的模块,便于从整体视角分析问题,提高组件的复用性;物理(Physical)模型是指完成逻辑模型后在具体的物理域中对系统进行集成设计,通常可采用块定义图(Block Definition Diagram, BDD)与IBD的形式,将功能逻辑与物理实体进行拆分是功能逻辑架构设计的重要目标。

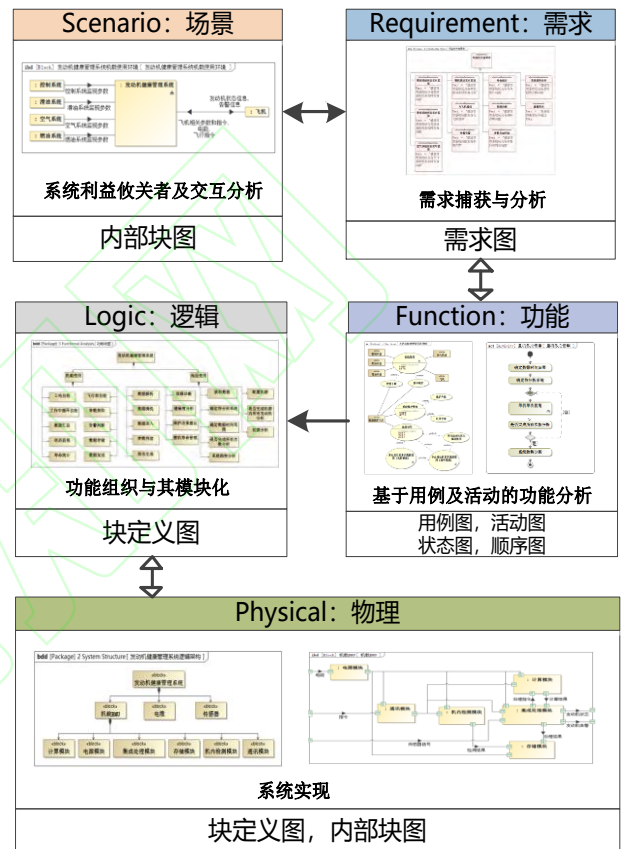


图4 功能逻辑模型构建架构

Fig. 4 Functional logic model construction architecture

3.3 场景分析

航空发动机健康管理系统一般可由机载部分与地面两种使用形式,其场景与利益攸关方分析可从机载使用与地面使用两个维度考虑。在机载使用场景中需从控制系统、滑油系统、空气系统、燃油系统中获取相应监视参数,并从飞机接受相关信息与指令;在地面使用环境,从地面维护人员处获取相应操作指令,并反馈故障预测、诊断隔离、维修建议等信息。在系统建模语言中,可采用内部块图对该关系进行描述,以便实现初步接口分析,如图5~6所示。

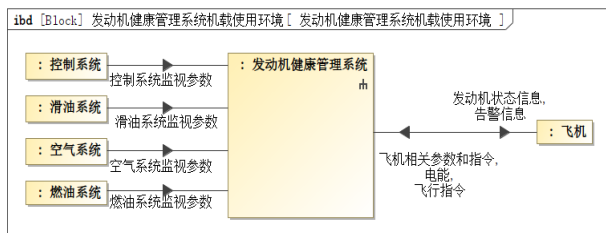


图 5 发动机健康管理系统机载使用环境图

Fig. 5 On-board usage environment for engine health management systems

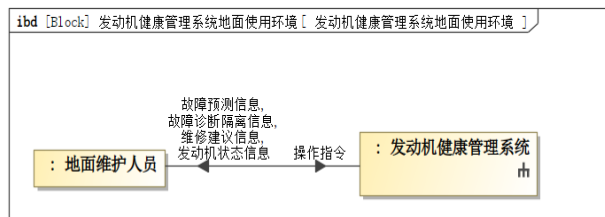


图 6 发动机健康管理系统地面使用环境图

Fig. 6 Ground usage environment for engine health management systems

3.4 需求分析

在型号研制中, 技术协议, 研制规范等输入文件会对系统给出明确的需求, 通过需求管理可实现条目化管理, 并对于需求对应的验证进行确认与规划。需求通常可分为功能需求、非功能系统需求、约束需求、接口需求等类别。系统功能架构分析旨在分析与建模对象主要是功能类需求。在SysML中可采用用需求图对其进行建模, 如图7所示。

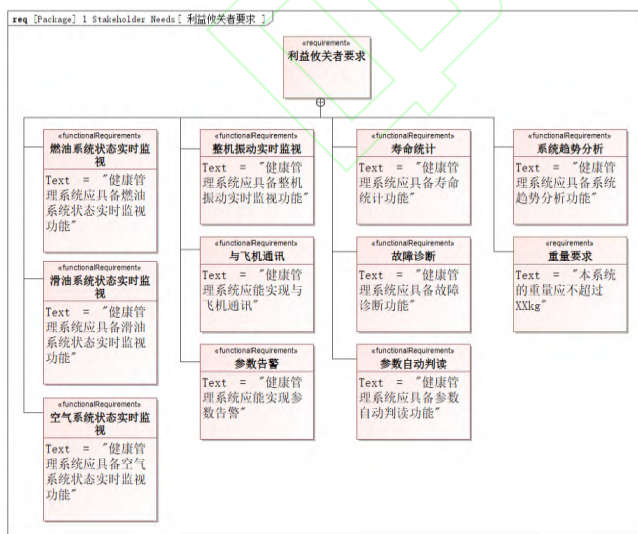


图 7 系统需求图

Fig. 7 Stakeholder requirements

3.5 功能分析

通过 SysML 用例图与活动图的组合应用,

可支持设计团队从使用场景角度进行功能需求分析, 对功能类需求进行补充, 确保需求完整, 以支撑进入功能架构分析阶段。

用例是根据系统使用捕获系统需求的一种机制, 其指定了系统预期与非预期行为。航空发动机健康管理系统典型用例有机载使用与地面使用两个部分组成, 所构建的系统用例图如图 8 所示。图中展示了拓展关系(extension)与包含(inclusion)关系。扩展关系的标识是带虚线的开口箭头, 附近带《extend》关键字, 箭头方向是从扩展用例指向初始用例, 表示的是当初始用例被触发时, 扩展用例可能被选择性执行。包含关系的表示是带的虚线开口箭头, 附近带《include》关键字, 箭头方向是从初始用例到包含用例。包含关系表示的是, 当初始用例被触发时, 其包含用例也会执行

机载使用场景应能对机载系统参数进行采集、分析; 综合机载采集参数与飞机相关参数对燃油与控制系统, 润滑系统、空气系统、整机振动等进行在线监视, 根据设定的告警阈值进行故障告警; 对整机使用寿命进行统计与记录; 对相关参数进行通讯与传输; 对软件进行原位升级; 对数据进行存储以便于地面部分可进行处理与分析。

采用活动图将机载使用用例展开如图9所示, 在机载使用中依次完成上电, 上电自检, 接受飞机指令完成飞行前自检, 从相关系统获取振动、滑油、燃油、空气、控制系统等参数, 完成状态监视、故障诊断、寿命统计等功能, 在过程中实施飞行中自检并将相关参数进行数据存储, 通过通讯手段将相关数据发送给飞机方, 数据应能支持在飞参中进行记录。其中一部分用于座舱显示。在活动图中通过带有“泳道”的活动图可对各相关方在活动顺序与交互进行分析, 便于多专业认知在场景工作中各方功能任务项。

地面使用用例展开如图10~12所示, 整体层面, 系统通过标准化数据解析、清洗与结构化录入建立多源数据仓库, 为后续分析提供高质量输入; 核心流程依次执行参数判读、故障诊断、寿命预测与趋势分析, 并基于单机单次数据生成实时维护决策, 同时融合历史数据与跨机群信息构建健康基线, 实现性能衰退预警与维修策略优化; 技术纵深上, 系统通过单机微观诊断与机群宏观管理的多层级联动, 以及分析结果向设计端的反馈迭代, 形成从数据采集到决策验证的完整逻辑链。

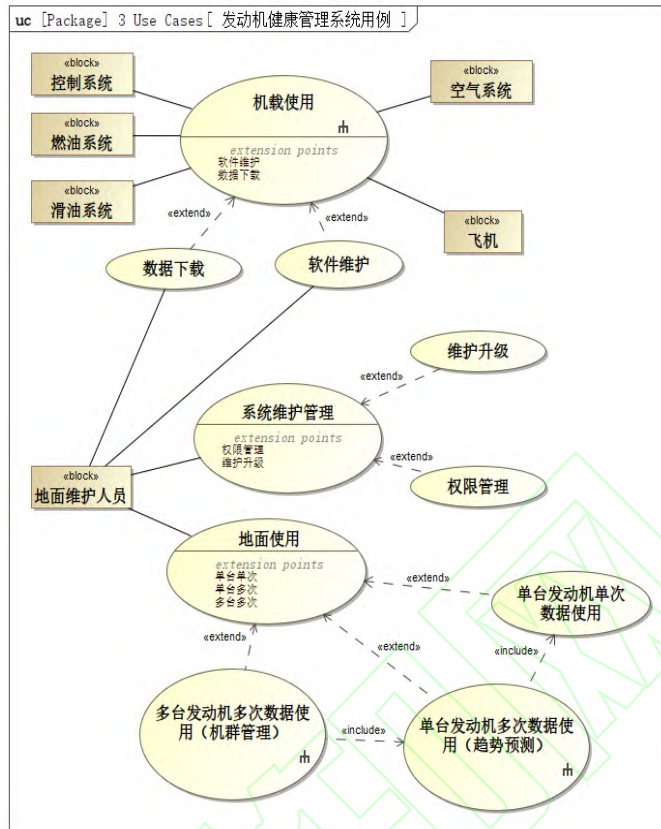


图 8 发动机健康管理系统用例图

Fig. 8 Engine health management system use cases

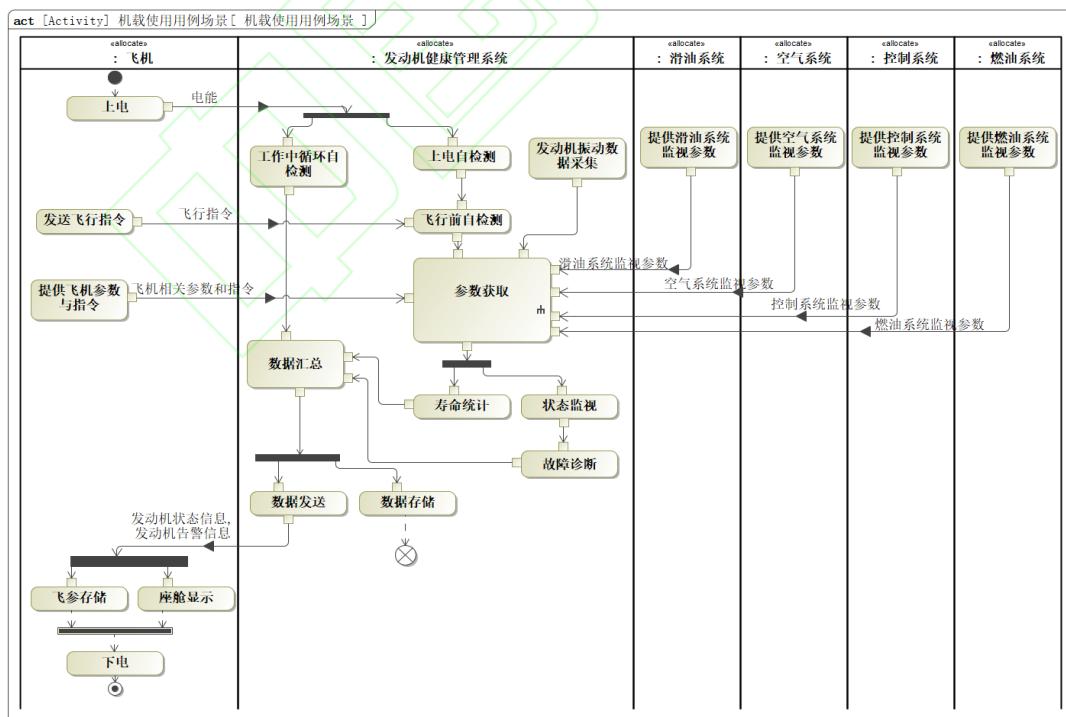


图9 机载使用用例场景活动图

Fig. 9 On-board usage use case scenario activities

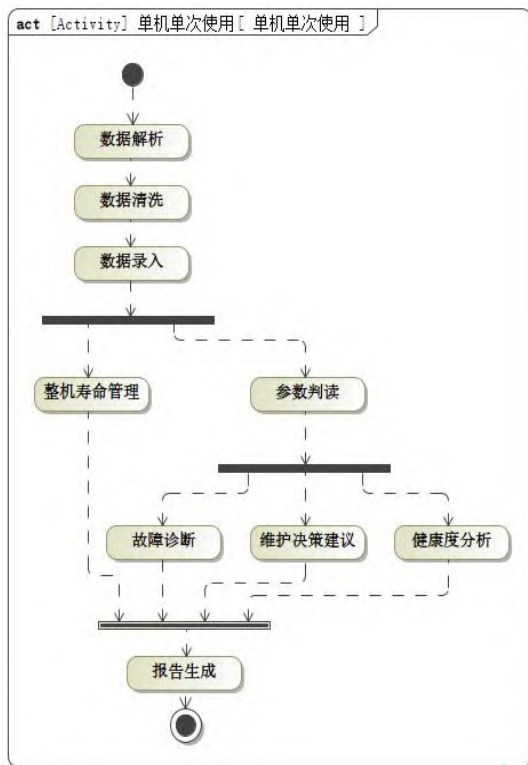


图 10 地面单机单次使用场景活动图

Fig. 10 Ground single unit single usage scenario activities

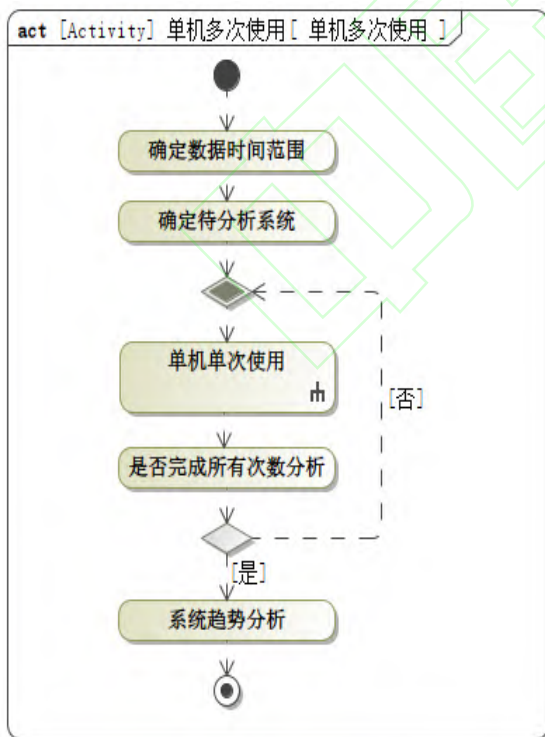


图 11 地面单机多次使用场景活动图

Fig. 11 Ground single unit multiple usage scenario activities

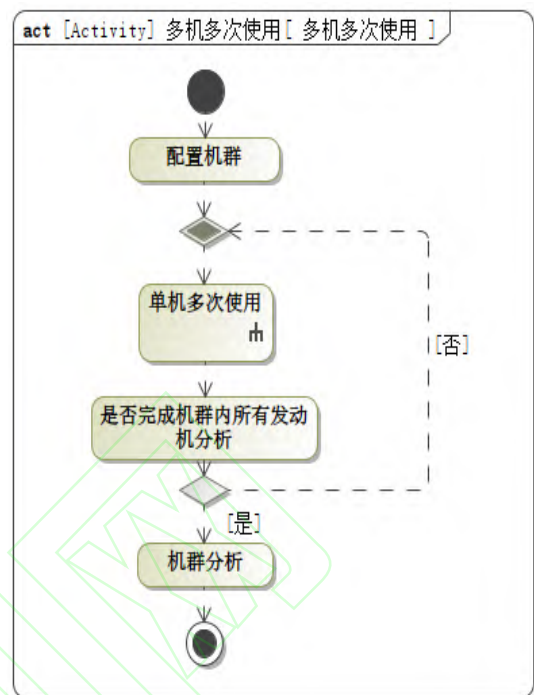


图 12 多机多次使用场景活动图

Fig. 12 Multi-unit multiple usage scenario activities

通过活动图展开用例可获得系统的功能清单与功能组成，并采用块定义图进行归纳，采用内部块图可支撑更进一步的系统功能组成与接口分析。航空发动机健康管理系统功能块如图 13 所示，以机载使用与地面使用两个典型用例为牵引，对系统功能进行归纳与罗列，可实现在需求与功能的追溯。

在对功能进行梳理时应注意保证数据的唯一性，在 MagicDraw 软件中可用 Relation Map Diagram 开展分析，可自动提取系统的功能清单以保证数据的一致性。

以系统机载部分为例，其内部块图如图 14 所示，可看作在图 6 中初步接口分析为基础上进行进一步细化，用于分析系统功能模块组成、外部接口关系以及系统内部功能内部之间的信息接口关系，用于支撑各功能模块的详细设计。构建的系统内部块图可用于分析评估外部接口变化或功能模块变化产生的影响。以寿命统计功能为例，从图中可知其与参数获取，数据汇总功能存在功能接口，即当参数获取功能或数据汇总存在变化时，应对寿命统计功能变化开展评估。

厘清系统中子功能间关系是复杂工程实施的关键，在愈发复杂度的系统中，该工作也愈加重要，科学的功能接口分析收益将愈发显著。在系

统设计中，通过需求与功能追溯可显性化展示可用于评估需求的完备性。在 MagicDraw 中可采用追溯矩阵形式快速实现功能需求与功能活动之间追溯管理。需求追溯矩阵如图 15 所示，矩阵

的横向为相关功能需求，纵向为经过用例图，活动图分析得到的功能。当功能需求与功能追溯存在差异时，应进行评估与补充。

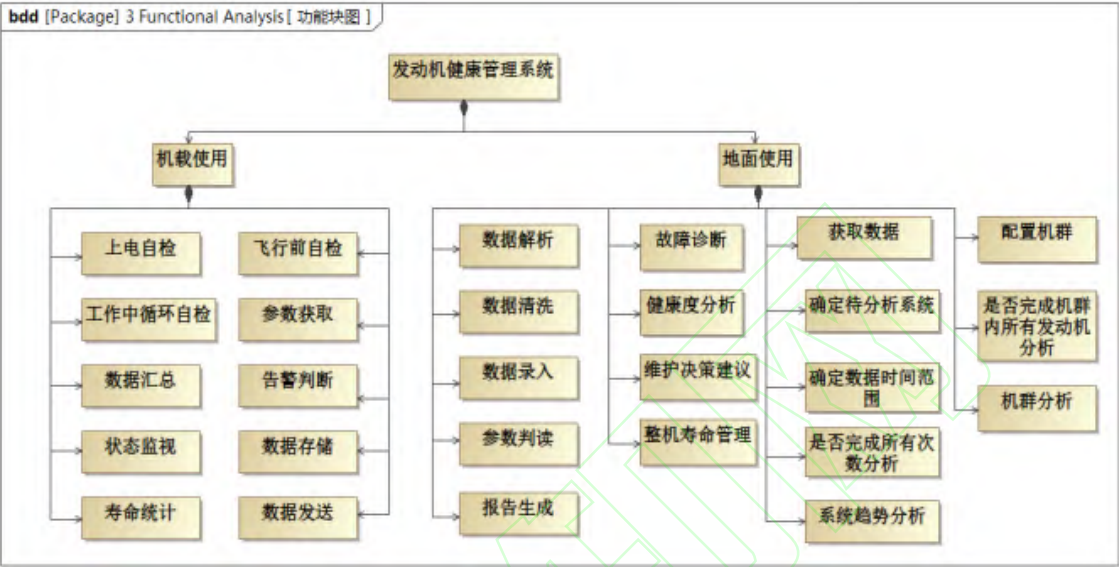


图 13 健康监视系统功能块图
Fig. 13 Health monitoring system functional block

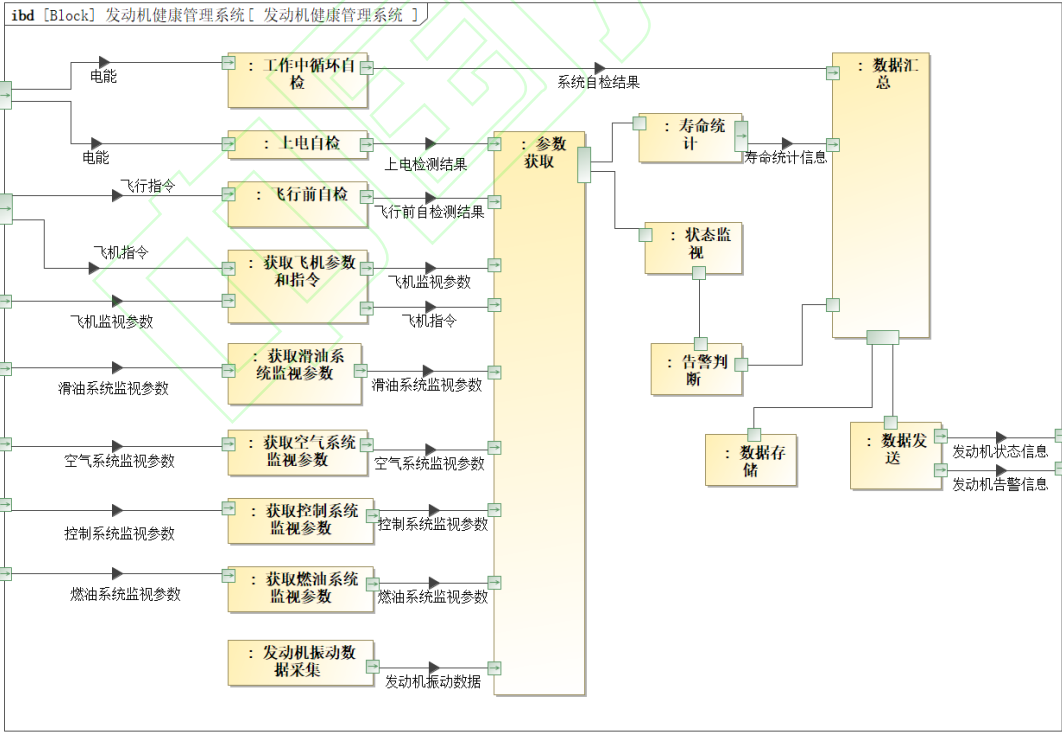


图 14 发动机健康管理系统机载部分内部块图
Fig. 14 Engine health management system on-board section internal blocks

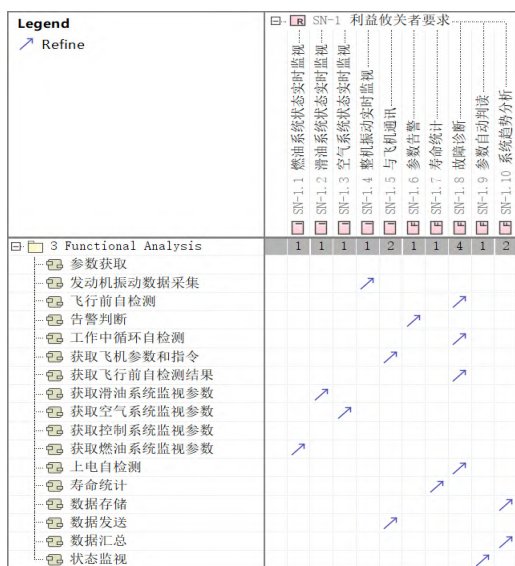


图 15 功能需求与系统功能追溯关系图

Fig. 15 Traceability relationship between functional requirements and system functions

3.6 架构分析

完成系统功能分析及并完成需求与追溯确认核查后可对健康管理系统进行架构设计与分析。架构分析包括逻辑(Logic)模型与物理(Physical)模型两个部分。功能设计目的是确定系统的行为，反应系统内在行为逻辑如何实现利益攸关方对系统能力的要求。而在系统架构设计过程中，系统功能的实现需要具体的物理部件来承载。将功能设计中不同的功能通过泳道划分实现功能逻辑的分配，不同的分配方式是不同的架构设计方案，通过物理性能模型等手段权衡分析系统性能指标、可靠性、安全性、成本、开发周期风险、质量等方面的量化评估指标，进而获取最优架构方案。

架构设计中主要包含端口设计与端口连接规则定义。端口设计体现设计主要体现不同逻辑设备之间的连接关系，需要明确交互的物理信息，

即定义端口以及端口内部的传递信息；端口连接规则定义针对架构设计需要建立端口连接规则库，用于对系统架构模型进行检查，梳理存在错误的端口连接关系以及端口连接关系缺失等问题。

以航空发动机健康管理系统机载部分为例，其主要由机载 EMU、电缆、相关传感器组成。传感器通过电缆将相关信号传输至机载 EMU 单元，机载 EMU 单元通常由计算模块、存储模块、集成处理模块、电源模块、机内检测模块等部分组成，计算模块具备运行数据处理，状态监视，寿命统计，故障诊断等功能的能力；存储模块对机载数据进行数据存储；集成处理模块具备传感器、信号器采集处理能力，通过数据总线与计算模块，存储模块完成数据交互；通讯模块应具备完成通讯调度、通讯数据交互的能力；电源模块负责接收飞机电源，并为机载部分硬件供电；机内检测模块应能组织实施上电自检，飞行前自检，飞行中自检，维护自检，其 BDD 图与 IBD 图如图 16~17 所示。

确定系统架构后应梳理功能与系统组成，构建诸如图 18 所示的追溯关系，确保系统组成的充分性与必要性，针对多方案，可根据项目周期、经费、安装位置限制、功率限制、扩展性要求等因素开展综合权衡。

典型的关系权衡案例为健康管理机载部分与控制系统关系，根据机载监测单元实际载体，健康管理系统机载部分有两种典型形式，一种是以 EJ200 发动机为代表的与系统集成方案，其将机载诊断装置功能电路集成在数字电子控制器中，通过总线数据交互形式进行交联；另一种是以 F119、F135 发动机为代表的独立式方案。

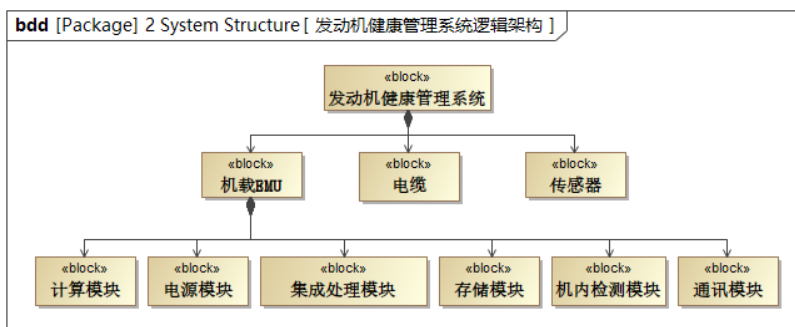


图 16 发动机健康管理系统架构

Fig. 16 Engine health management system architecture

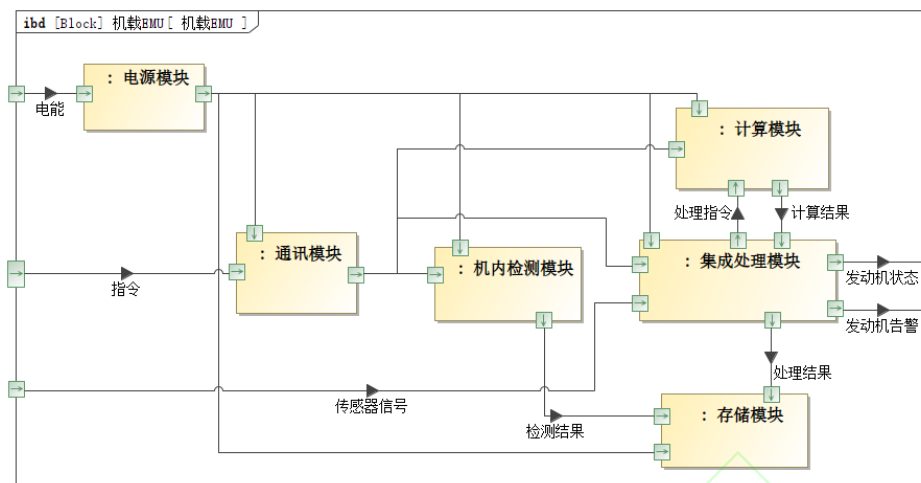


图 17 机载 EMU 内部模块图

Fig. 17 On-board EMU internal modules

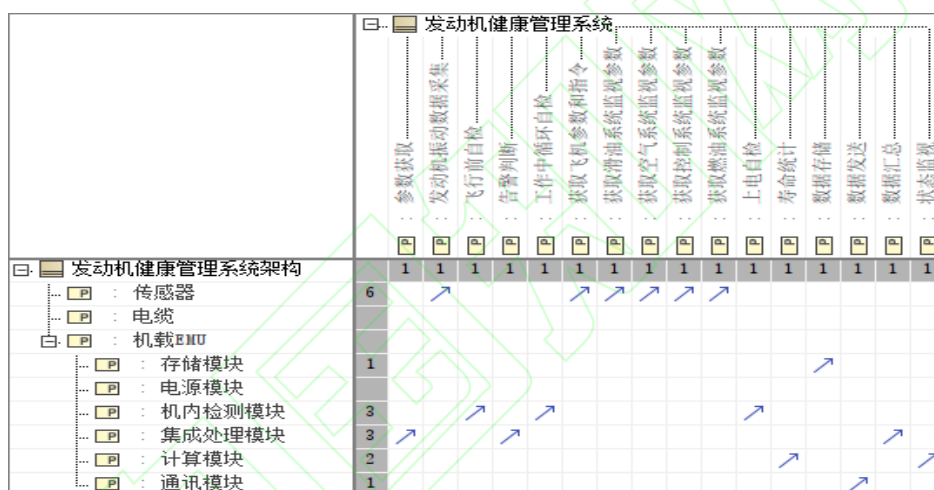


图 18 发动机健康管理系统组成与功能追溯关系(案例)

Fig. 18 Composition and function traceability relationship of the engine health management system (case study)

4 典型案例

4.1 功能逻辑模型的应用

通过建立包括场景、需求、功能、逻辑、物理等相互协调、关联的健康管理系统功能逻辑模型，结合应功能架构分析的目的，从“明确系统需求与功能边界”，“指导架构设计与优化”与“技术状态变化影响敏捷评估”三个层面各列举一项案例，以论证功能逻辑模型的应用及效果。

4.2 明确系统需求与功能边界

航空发动机健康管理系统是由控制系统中的健康监视发展而来。早期的控制系统主要关注发动机的性能及控制，而健康监视功能作为控制系统的辅助模块，用以监视发动机运行状态。随着航空发动机复杂性的增加以及对安全性、可靠性和经济性要求的提高，健康管理系统逐渐成为一

个专门的系统。因此，理清健康管理系统与控制系统之间的关系，明确其功能边界，是功能架构分析的重要目标之一。

厘清关系主要是在场景模型中得以体现，控制系统与健康管理系统承担着不同的职责。控制系统负责发动机的实时控制，包括推力/功率调节、燃油控制、参数限制等，以确保发动机稳定安全运行。而健康管理系统则侧重于状态监测、故障诊断、性能预测和维护决策等。在实际运用中，定义 32 条接口约束规则(如健康管理系统不得干预控制系统核心控制指令)，通过形式化验证实现 100% 规则执行，通过模型的运用使得健康管理系统与控制系统的功能重叠模块占比 < 5%。为从场景角度分析控制系统与健康管理系统的差异，以一组模拟数据分析健康管理系统与

控制系统在功能上的差异，表 2 数据为示例数据。

表 2 健康管理系统与控制系统在功能差异分析

Table 2 Functional differences analysis between health management systems and control systems

时间 /h	涡轮后温度 /(°C)	控制系统	健康管理系统
0	500	正常控制	记录初始温度，建立温度基线
100	520	正常控制	监控温度变化，分析趋势
200	550	调整燃油供给，降低温度	预测叶片寿命，发出预警
300	580	进一步调整策略	建议检修或部件更换

4.3 指导架构设计与优化

系统趋势分析作为健康管理系统的的功能模块，其技术目标在于通过多源异构数据融合(包括气路参数、振动频谱等 18 类监测量)，实现

发动机性能退化特征的早期识别。如图 8 中用例图所示。该模块采用符合 SAE AIR 6217 标准的四层处理架构：①机载数据预处理；②特征提取；③趋势建模；④决策输出。通过运用功能逻辑模型的优化如图 19 所示。

传统线性架构在 20 架次数据处理时存在计算时间>120 分钟，主要源于地面单元的全参数处理模式。本研究提出的分层边缘计算架构创新性地实施参数分级处理策略：①机载端完成 8 项关键参数(如 EGT、N2 转速)的实时特征提取，计算资源占用率降低至 12%；②地面系统专注长期趋势分析，通过分布式计算框架实现处理效率提升。经验证，改进架构使 20 架次数据处理时间从传统模式的 138 分钟缩短至 32 分钟(效率提升 76.8%)。

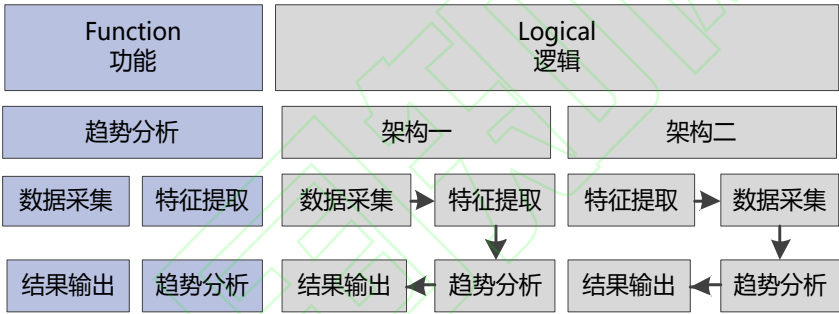


图 19 指导架构设计与优化

Fig. 19 Guidance on architecture design and optimization

4.4 技术状态变化影响敏捷评估

航空发动机健康管理系统与多个系统耦合，当其他系统状态发生变更时，通过功能架构模型能够及时分析对其影响，并指导开展学科仿真工作，如图 20 所示。

以健康管理系统与空气系统的交互进行举例。首先通过场景模型的利益攸关方交互矩阵(Stakeholder Interaction Matrix)解析空气系统与 EHM 的 18 项功能耦合点，其中关键耦合项为压气机出口压力监测通道。

当空气系统调整压力传感器量程阈值时，基于逻辑架构模型生成联合仿真链路：

- 1) 通过 Paramagic 工具将 SysML 参数约束转换为 Simulink 仿真输入；
- 2) 调用 ANSYS Twin Builder 构建空气系统数字孪生体；
- 3) 采用 Model Center 集成 Matlab/Simulink 算法模型进行蒙特卡洛仿真。

仿真结果表明，原监测算法在新型传感器下的虚警率提升为 12.7%，通过功能逻辑模型发现问题，经算法优化后将虚警率降至 0.32%。

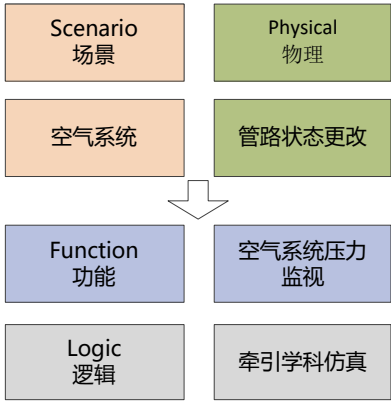


图 20 敏捷技术状态变化影响评估

Fig. 20 Agile impact assessment of technical state changes

5 总结与展望

本文采用 MBSE 方法中的系统建模语言对

航空发动机健康管理系统进行功能架构分析,借鉴 MagicGrid 方法论,在 MagicDraw 软件平台中实施。针对航空发动机健康管理系统功能需求,基于用例图分析系统用例,采用活动图分析具体用例项中功能流程关系,根据系统功能模块构建功能 BDD 图,通过 IBD 图分析各个功能模块内外部接口关系,根据形成的功能 BDD 图建立架构 BDD 图,以支撑开展架构权衡分析。结果表明,采用系统建模方法,显性化建模手段可有效厘清内、外部功能、接口、交互关系,便于多专业联合设计与协同,确保了需求,功能与架构之间的追溯关系与完备性,能够支撑分析各方变更所带来的影响,加强需求传递与能力验证互动,推动装备建设数字化转型。

功能与架构的确定为健康管理系统的指标分解提供了基础,在 MagicGrid 方法论中可采用 MOE 方法对指标类需求进行基于架构的分解,有利于协调健康管理系统各类指标间的冲突,为各级子系统确定合理的指标。同时,带有接口的“功能块”与“架构块”也能够有效支撑开展多学科联合仿真与验证工作。此外,将需求、功能与架构充分解耦,以“问题域”与“解决域”的视角拆分问题,这也是实现需求牵引技术创新的有效手段,也是后续需关注的重点内容。

本文内容还存在模型动态适应性与实时性不足与多源异构数据融合深度不足等局限性。主要表现在:当前建模框架在应对系统动态演化时,主要依赖预设的场景驱动规则库,缺乏基于实时数据的自适应建模机制;功能架构中数据预处理模块与物理传感器接口的关联缺乏量化约束,未建立数据质量(如采样频率、噪声水平)与模型精度的显式映射关系;跨模态特征融合缺失,振动、气路、滑油等多维度监测数据的协同分析停留在功能模块划分层面,未通过参数图建立多物理场耦合的数学模型。

随着近年来人工智能技术的发展,航空发动机设计正面临深刻变革,功能架构作为系统设计的核心牵引,其科学性直接影响后续技术迭代的效率与质量。在航空发动机健康管理领域,基于数字孪生技术的智能模型构建已显著提升了状态监测和故障诊断与预测的精度,而面向快速原型设计的服务化架构则大幅缩短的研制周期,为算法优化提供了支撑。未来,功能架构需进一步强化模块化与可拓展性,MBSE

方法可通过需求量化与功能分配确保人工智能算法与物理系统的深度耦合,这种架构驱动的设计范式不仅能够整合多技术,还将通过全生命周期协作平台促进全流程数据的双相贯通,最终形成“感知-分析-决策-验证”的敏捷高效闭环,为航空发动机健康管理的数智化升级提供可持续的技术底座。

参考文献 (References)

- [1] Volponi AJ, Gas turbine engine health management: past, present, and future trends[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(5): 051201.
- [2] 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 (in Chinese).
- [3] 李少尘, 陈敏, 胡金涛, 等. 航空燃气涡轮发动机气路故障诊断进展综述[J]. 航空发动机, 2022, 48(2): 33-49.
LI Shaochen, CHEN Min, HU Jintao, et al. A review of research progress on aircraft gas turbine engines gas path fault diagnosis[J]. Aeroengine, 2022, 48(2): 33-49 (in Chinese).
- [4] 孙瑞谦, 蔡林峰, 韩小宝, 等. 考虑性能退化的航空发动机故障诊断量化评估 [J]. 推进技术, 2022, 43 (8): 337-348.
SUN Rui-qian, GOU Linfeng, HAN Xiaobao, et al. Quantitative Evaluation of Fault Diagnosability for Degraded Aero-Engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43 (8): 337-348. (in Chinese)
- [5] 尉询楷, 刘芳, 陈良峰, 等. 航空发动机健康管理用户的诊断预测指标体系[J]. 航空发动机, 2012, 38(5): 27-35.
WEI Xunkai, LIUFang, CHEN Liangfeng, et al. Diagnostic and Prognostic Metrics of Aeroengine Health Management Users[J]. Aeroengine, 2012, 38(5): 27-35 (in Chinese)
- [6] 费成巍, 艾延廷. 航空发动机健康管理系统设计技术[J]. 航空发动机, 2009, 35(5): 24-29.
FEI Chengwei, AI Yanting. Design Technology of Aircraft Engine Health Management System[J]. Aeroengine, 2009, 35(5): 24-29.
- [7] 曹明, 黄金泉, 周健, 等. 民用航空发动机故障诊断与健康管理现状、挑战与机遇 I: 气路、机械和 FADEC 系统故障诊断与预测[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 91-41+2.
CAO Ming, HUANG Jinquan, ZHOU Jian, et al. Civil Aero-Engine Fault Diagnosis and Health Management: Current Status, Challenges, and Opportunities I: Fault Diagnosis and Prediction of Gas Path, Mechanical, and FADEC Systems[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 91-41+2 (in Chinese).
- [8] 林京, 张博瑶, 张大义, 等. 航空燃气涡轮发动机故障诊断研究现状与展望[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 7-20.
LIN Jing, Zhang Boya, Zhang Dayi, et al. Research Status and Prospects of Fault Diagnosis for Gas Turbine Aeroengines[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica. 2022, 43(8): 7-20 (in Chinese).
- [9] SAE Committee E-32. AIR1587B-2007 Aircraft gas turbine engine healthy management system guide. Warrendale, [S]. PA: SAE International 2007.
- [10] Bonissone P P. Prognostics and health management[EB/OL]. [2010-1-10]. <http://www.dtic.mil/ndia/2006logistics/bonissone.pdf>.
- [11] Roemer M J, Byington C S, Kacprzynski G J, et al. An Overview of Selected Prognostic Technologies With Application to Engine

- Health Management[C]//Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air.American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [12] Hess A , Calvello G , Dabney T .PHM a key enabler for the JSF autonomic logistics support concept[C]//IEEE Aerospace Conference.IEEE, 2004.
- [13] Blaser R , Nigoghosian B .Integrated System Health Management (ISHM) and Affordable Logistics[C]//Aiaa Space Conference & Exposition.
- [14] Glass B , Jambor B , Chun W , et al. Integrated System Health Management Architecture Design[C]//AIAA Infotech@Aerospace 2010.
- [15] Parker K I, Guo T H. Development of a turbofan engine simulation in a graphical simulation environment[R]. NASA-TM-2003-212543.
- [16] Frederick D K, DeCastro J S. User's guide for the commercial modular aero-propulsion system simulation(C-MAPSS)[R].NASA-TM-2007-215026.
- [17] Conroy M, MazzoneR, Lin W. NASA integrated model-centric architecture(nima)model use and reuse[C]// 2013 IEEE Aerospace Confer-ence. Piscataway: IEEE Press,2013,1-15.
- [18] 张有山, 杨雷, 王平, 等. 基于模型的系统工程方法在载人航天任务中的应用探讨[J]. 航天器工程, 2014, 23(5): 121-128.
ZHANG Youshan, YANG Lei, WANG Ping, et al. Discussion on Application of Model-based Systems Engineering Methods to Human Spaceflight Missions [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(5): 121-128 (in Chinese) .
- [19] Hoffmann H P. SysML-based systems engineering using a model-driven development approach[J]. INCOSE International Sym-posium, 2006, 16(1): 804-814.
- [20] Bone M, Cloutier R. The current state of model based systems engineering: Results from the omgTMSysML request for information 2009[C]// Proceedings of the 8th conference on systems engineering research, March 17, 2010, Hoboken, NJ.
- [21] 尉询楷, 杨立, 刘芳, 等. 航空发动机预测与健康管理[M] 北京: 国防工业出版社, 2014.
WEIXunkai, Yang Li, Liu Fang, et al. Aviation engine prediction and health management[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [22] 兰小平,姚志强,吴绶玄等.面向 MBSE 的复杂系统研发模型追溯管理方法[J].系统工程学报,2023,38(03):289-303.
LAN Xiaoping, YAO Zhiqiang, WU Shouxuan, et al. Traceability management approach of complex system development on MBSE [J].Journal of System Engineering, 2023, 38(03): 289-303 (in Chinese).
- [23] 马彦丽, 张继忠, 郝冀斌, 梁巍, 李秀春. 基于 MBSE 的柴油机系统设计建模方法[J]. 图学学报, 2024, 45(2): 355-362.
MA Yanli, ZHANG Jizhong, HAO Jibin, LIANG Wei, LI Xiuchun. Modeling method for design of diesel engine system based on MBSE[J]. Journal of Graphics, 2024, 45(2): 355-362 (in Chinese).
- [24] 王海芳, 张雷, 刘慧军, 卢益明, 孙铭松. 基于 DoDAF 的动车组 MBSE 的研制方法[J]. 图学学报, 2024, 45(2): 339-346.
WANG Haifang, ZHANG Lei, LIU Huijun, LU Yiming, SUN Minghui. A DoDAF-based method for developing MBSE for EMU[J]. Journal of Graphics, 2024, 45(2): 339-346 (in Chinese)..
- [25] 闫佳宁, 张安, 黄湛钧, 王逸鸣. 基于 SysML 的民机系统功能设计方法及应用[J]. 图学学报, 2024, 45(2): 277-283.
YAN Jianing, ZHANG An, HUANG Zhanjun, WANG Yiming. Function design method and application of civil aircraft system based on SysML[J]. Journal of Graphics, 2024, 45(2): 277-283 (in Chinese)..
- [26] 侯雄, 李东方. MBSE 技术及其在航天控制中的应用[J]. 航天控制, 2023, 41(05): 3-13.
HOU Xiong, LI Dongfang. MBSE Technology and Its application in Aerospace Control [J]. Aerospace Control, 2023, 41(05): 3-13 (in Chinese).
- [27] Hoffmann H P. Model-based systems engineering with rational rhapsody and rational harmony for systems engineering[J]. Deskbook Release, 2011, 3(2).
- [28] Morkevicius A, Aleksandraviciene A, Mazeika D, et al. MBSE Grid: A Simplified SysML - Based Approach for Modeling Complex Systems[C]//INCOSE International Symposium. 2017, 27(1): 136-150.