

基于 MBSE 技术的航天器电气系统设计技术

冯忠伟, 王 征, 丁 琳, 朱 红

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 针对 MBSE 技术应用于航天器电气系统设计开展研究, 建立从需求分析、功能定义、逻辑设计、逻辑实现及物理实现的完整的电气系统实现方案, 分析了各个层级之间的映射及关联方法; 针对航天器电气系统特点, 提出了新的、系统的工程解决方案; 以 SystemWeaver 为开发平台, 以典型的飞行器管理平台为研究对象, 至顶向下开展正向设计, 根据顶层输入开展需求分析, 面向功能需求进行功能定义, 在符合相关技术标准、经验基础上利用逻辑设计及逻辑实现满足各项功能定义, 最后通过物理层进行系统实现; 构成基于 MBSE 航天器电气系统正向设计的完整流程。

关键词: 基于模型的系统工程; 模型驱动; 航天器; 电气系统

Design for Spacecraft Electrical System Based on MBSE Technology

FENG Zhongwei, WANG Zheng, DING Lin, ZHU Hong

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The application of model-based systems engineering (MBSE) technology in the spacecraft electrical system design is studied. A complete electrical system implementation scheme is established from the stages of requirement analysis, function definition, logic design, logic implementation, and physical implementation, the mapping and correlation methods between different levels are analyzed. Aimed at the characteristic of the spacecraft electrical system, a new systematic engineering solution is proposed. Taking SystemWeaver as a development platform, and typical spacecraft management platform as a research object, the forward design is carried out from top to bottom, the requirement analysis is developed by the top-level input, and the function definition by the functional requirement. Based on meeting relevant technical standards and experience, the logic design and logic implementation are used to meet various functional definitions. Finally, the system is implemented through the physical layer, the whole process of forward design based on MBSE spacecraft electrical system is built.

Keywords: MBSE; model drive; spacecraft; electrical system

0 引言

数字航天是未来我国航天事业发展的主要方向, 包括航天数字化产品、数字化研制、数字化管理和数字化产业协同发展等方面, 是实现航天产业智能化发展、实现航天强国的必由之路。基于模型的系统工程 (MBSE) 是数字航天发展大背景下一种全新的系统工程模式, MBSE 是用于支持系统需求、设计、分析、验证与确认等活动的建模行为的形式化应用, 从概念设计阶段开始贯穿系统全生命周期^[1-5, 6-12]。MBSE 的应用实施要求对现有的科研管理流程进行优化, 以模型为中心代替文本为中心, 将大大提升科研管理的标准化、精细化、一致性水平, 同时也将改变系统管理的视角、载体和习惯。

航天器上的电气系统是整器的能源、信息中枢系统, 电气系统与航天器整体方案关系密切, 从论证、设计、研制、测试、验收、在轨运行等环节贯穿航天器全生命周期^[10-11, 14]。飞行器管理系统又是航天器电气系统的核心, 主要实现整器时序逻辑管理、数据管理、时间管理及勤务管理等内容, 基于飞行器管理系统实现的功能, 其在设计过

程中与总体耦合紧密, 整器的顶层需求直接影响飞行器管理系统的实现方案, 在设计过程中存在需求、功能及方案设计之间的反复迭代过程。

传统的以文本为中心的系统工程上下游协同复杂, 信息关联度差, 方案更新迭代流程复杂, 不利于未来航天器飞行器管理系统优化设计及改进。基于 MBSE 开展飞行器管理系统设计从顶层建立整器飞行器管理系统模型, 包括需求定义、功能定义、逻辑实现及物理连接等, 在各层级间采用模型进行需求和设计结果传递, 实现模型驱动下各层级的高效协同工作, 达到方案快速设计、验证的闭环目的。

1 总体建设思路

依据系统工程开发过程的“V”字模式, 以飞行器管理系统为具体研究对象, 搭建基于模型的飞行器管理系统总体设计平台。平台支持在飞行管理系统设计过程中依次进行需求定义, 功能设计及分配, 系统架构逻辑设计, 系统架构逻辑实现 (包括组件逻辑设计和总线设计), 系统物理实现, 并将各层次设计成果关联, 建立需求驱动的正向设

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-02-24。

作者简介: 冯忠伟(1982-), 男, 博士研究生。

引用格式: 冯忠伟, 王 征, 丁 琳, 等. 基于 MBSE 技术的航天器电气系统设计技术[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 255-259.

计过程^[13-20]。

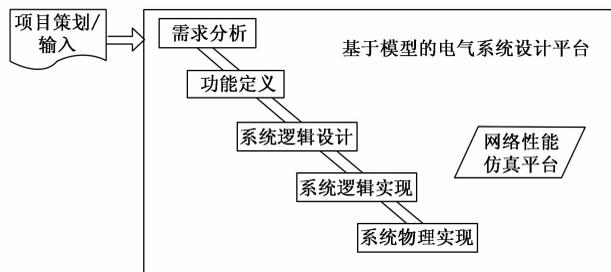


图 1 总体建设思路

在飞行器管理系统开发过程中，需求贯穿整个项目的研发过程，是整个设计方案的来源和约束，也是对设计进行验证的最终准则。

需求分析是系统设计工作的顶层工作。系统工程的第一步是进行需求分析与捕获，并确定适用的国标、军标、院所设计准则、设计规范要求、设计师手册等顶层文件，将需求分析转换成系统的设计需求。在定义系统需求时，根据需求后续实现方式，将系统需求分成功能需求和性能需求两类进行管理。功能需求是对于功能设计提出的设计要求，功能设计人员根据具体的要求进行功能分解；性能需求是对组件的结构、硬件参数提出的设计要求，组件设计人员分别根据性能需求，确定组件硬件部分要满足的设计要求。

当设计过程中，系统接收到的设计要求有变更时，对于变更的部分会再次进行需求捕获、需求分析和需求定义的过程，并分解成功能需求和性能需求进行后续设计，保证整个系统开发过程中的系统需求的一致性。

功能定义层确定系统拥有的功能点，根据功能需求，确定功能点要满足的各个设计要求。系统逻辑设计根据分解后各功能点的设计要求进行系统架构设计。在功能设计要求传递给系统逻辑设计前，需要建立功能设计要求与系统功能需求的追溯关系，保证每个系统功能需求都有功能去承载、实现，避免设计过程出现遗漏。此外，当功能需求出现变更时，追溯关系能帮助进行变更分析，保证设计过程的一致性。

完成系统的功能点定义及功能点的设计要求后，下一个阶段就是进行系统方案设计。在进行系统方案设计时，采用基于功能的设计针对每个功能，通过“传感器—控制单元—执行器”的方式定义系统功能实现方案，确定系统有哪些逻辑模块构成，逻辑模块之间传递的信号流，并且明确信号之间的控制逻辑关系。当在其他项目中有的相同/类似的功能要求时，可以直接复用功能设计方案，可有效提高设计的复用性。

系统逻辑设计方案确定后，需要考虑如何去具体实现。逻辑设计阶段定义的几个逻辑模块分别由哪些组件去实现，确定组件的软件架构。此外，还需要确定组件间传递的信

号，进行总线设计。总线设计要求考虑总线的具体选型，包括总线的物理实现、拓扑结构、节点数量等，总线的物理实现综合考虑总线负载需求、环境适应性、未来可扩展性等需求，拓扑结构考虑总线管理器设置、远置终端设置、总线冗余配置等具体方案，节点数量在整器具体需求的基础上考虑一定的余量。

系统逻辑实现阶段完成后，可以确定各组件的逻辑模块、信号、系统通讯协议。系统通信协议明确了总线上各个终端之间的信息交互的基本框架，包括数据格式、握手机制及数据重传机制等。数据格式综合考虑对整器各系统数据管理需求的兼容性、可扩展性及对数据的容错能力，握手机制考虑 A/B 两终端之间数据的可靠传输，确保在极限负载压力下数据传输不出错，数据重传机制重点考虑飞行器上关键数据在出现错误情况下的重传实现方案。

在完成系统逻辑设计与实现之后，软件组件间的信号需要按实际的总线生成相应的总线信号，通过对总线信号打包成报文消息之后，需要对总线协议的选择、报文消息设计等进行仿真验证，考核在不同任务工况下总线功能及性能满足情况，并对极限工况进行测试，通过仿真分析对总线设计进行反馈迭代，达到飞行器管理系统优化设计目的。

在最后的物理实现阶段，需要确定组件的硬件接口和连接关系，并根据性能要求确定组件参数。飞行器管理系统硬件接口包括供电接口、指令接口、数据接口、时间接口及通信接口等形式，硬件设计过程中针对硬件的具体电路形式、连接形式、冗余设计等具体内容开展详细设计，明确不同组件间的相互连接关系。为后续电缆网等硬件设计提供实现基础。

2 详细设计方案

2.1 总体方案

课题以 SystemWeaver 为开发平台，以航天器飞行器管理系统为具体设计对象，利用 MBSE 思路开展正向设计，具体涉及的设计阶段包括系统需求识别、功能定义、系统设计（逻辑原理设计、单机设计）、电气连接。

以系统设计层代表某个开发的项目，考虑到未来对“V”模式右半部分测试的扩展性，因此，在系统设计层下通过电子电气系统设计层管理电子电气系统开发过程，未来如果要将测试部分融入平台时，将会有与电子电气系统设计层平行的测试层。

按照需求—功能—系统—组件的平台建设思路，结合 SystemWeaver 工具建模方式和设计分工，在电子电气系统设计层下又分成以下几个层级：

- 1) 需求分析：定义系统需求；
- 2) 功能定义：梳理系统需要实现的各项功能，确定功能设计要求；
- 3) 系统逻辑架构：根据功能设计要求，确定系统实现方案，具体分成两层完成；

4) 系统逻辑设计: 对功能进行逻辑原理设计, 确定功能实现方案;

5) 系统逻辑实现: 确定各个组件承担的逻辑模块, 确定系统信号列表, 完成总线设计

6) 系统物理实现: 定义组件的硬件 Pin, 定义 Pin 之间连接关系, 完成电气原理设计。

此外, 在设计过程中, 不同设计层次之间输入输出对象之间是存在关联的。因此, 协同设计平台内需要建立数据对象的关联性, 保证不同层次设计规范的关联性。在 SystemWeaver 平台内, 有两种成熟的数据之间的关联性创建方式, 第一种方式是上层对象对下层对象的关联, 此关联是将上层的设计产物分配给下层, 用于下层的后续开发, 第二种方式是下层对象对上层对象的追溯, 保证上层的设计要求都能被下层需求满足, 不会出现遗漏。

2.2 系统需求

需求分析层是系统设计最顶层的工作。设计师在分析、捕获完系统设计需求后, 会按照系统需求实现的方式, 在系统需求分析层下创建系统功能需求和系统性能需求来定义系统需求, 对系统需求进行条目化管理。

该部分实现系统需求的结构化管理, 可以与其他需求管理工具(如 DOORS 等)进行数据的快速交互。结构化需求管理可以对需求进行快速捕获和识别, 对需求变化进行快速响应, 实现顶层需求的完整有效传递。

飞行器管理系统作为整器的顶层管理系统, 与飞行器整体功能、任务密切相关, 飞行器整器的任务需求决定了飞行器管理系统的顶层需求。以空间某类型飞行器为例, 飞行器整器需求包括进出空间、在轨长期运行、在轨有效载荷任务支持等, 作为整器顶层管理系统的飞行器管理系统, 从需求层面涵盖时间管理、供配电管理、数据管理及勤务管理等方面需求, 以满足航天飞行器的长期在轨运行、时序管理、任务调度等方面的需求。

利用 Systemweaver 进行飞行器管理系统需求创建及管理, 作为项目工作的第一层级, 针对每项需求定义其需求内涵, 向上同飞行器整器的需求建立对应关系, 根据整器的顶层需求具备需求快速定义能力, 向下同下游功能定义建立映射关系, 在实际方案设计过程中可以根据具体需求的变化增加或减少需求条目, 在增加或减少需求条目时同步增加或删除与后续层级的关联, 达到至顶向下快速传递信息的目的。

2.3 功能定义

在 SystemWeaver 平台中, 系统需求定义完成之后, 第二步工作是在开展功能定义及分配。从系统需求到功能定义需要基于现有标准规范、技术文件、类似型号的研制经验等先验知识。以飞行器管理系统为例, 在系统需求阶段识别包括时间管理、供配电管理、数据管理及勤务管理、加解密管理等需求, 针对这些需求结合相似系统研制经验, 定义时间基准维护、配电管理、信息采集、遥测、遥控、

电源管理、加解密管理等功能, 在功能定义之上又可以定义不同的子功能, 并通过 SystemWeaver 提供的层级间连接关系建立需求和功能之间的映射关系。

时间基准管理要求飞行器管理系统提供稳定的时间基准, 该时间基准的稳定度要求优于一定量级, 且具备与地面时间基准比对的条件, 时间基准通过广播等手段进行发布, 为飞行器上各系统提供统一时间参考, 同时为满足可靠性要求, 设计时间基准的冗余备份, 提供主份时钟故障情况下的应急措施。供配电管理按为整器上用电设备提供能源输出, 根据飞行时序及任务管理需求, 实现能源输出的通断管理, 考虑负载的短路风险, 对关键设备增加熔断措施, 确保在发生故障时可以有效隔离故障, 为保证供电可靠性, 对于可控支路进行保通和保断设计。数据管理包括遥测数据管理和数传数据管理, 按照数据传输路径, 可以分为信息采集、组帧(包)、传输、校验、存储等方面的需求, 对有实时性需求的数据, 需要考虑数据管理各个环节的最大允许时延, 飞行器上另一大类数据包括视频数据及载荷数据, 这类数据传输容量较大, 重点考虑数据传输的各个环节上的最大吞吐能力, 兼顾瞬时数据容量。勤务管理针对器上主备份切换、关键设备状态监测、心跳管理、设备重启等进行统一管理, 勤务管理设计的好坏直接决定飞行器各系统正常运行的可靠性和容错性, 勤务管理的设计既要保证关键功能的正常实现, 同时不能过多占用器上资源。加解密管理是为器上数据、指令安全设计的相关软硬件功能, 包括遥控指令解密、遥测及数传数据加密功能, 加解密方案设计在数据协议设计基础上明确加解密区域以及密钥管理方案。

当功能需求分配到功能后, 功能设计人员需要将功能需求内容分解成各个功能点的设计要求。对于每个功能点的设计需求, 对顶层功能需求进行追溯及握手, 保证功能开发的需求符合性, 此后, 应将功能需求分解到具体系统功能设计区域中, 进行功能实现方案的设计。

2.4 系统设计

针对系统定义的各项功能点, 根据分解后的设计要求, 进行功能实现方案设计。确定满足功能所需要逻辑组件模块、传感器逻辑模块和执行器逻辑组件, 以及这些模块之间或者功能设计区域间传递的信号(输入输出)关系。

对于传递的每个信号, 确定信号类型, 并在模块下面创建设计要求, 定义信号控制逻辑。在 SystemWeaver 中, 可以在设计要求描述中, 建立对信号的链接, 保证信号的一致性。模块设计要求会与系统功能要求进行追溯, 保证功能要求都能被设计满足。

基于时间管理功能定义, 考虑时间基准维护、广播、比对等需求, 一种可行的时间管理系统设计架构如图 2 所示, 时间管理系统以总线形式构成硬件架构, 通过总线上协议约定不同终端之间的时间同步机制。飞行器管理系统的主备份钟为高稳定度的时钟系统, 稳定度优于 10^{-9} , 通

过地面遥控或者器上 GPS 授时方式建立器上绝对时间基准, 飞行器管理系统通过总线形式向控制系统、测控系统、电源系统等系统广播时间信息, 各系统根据自身需求周期性获取广播时间, 以此维护。通过该方式建立起整器的时间基准, 从而保证整器时序逻辑的正确性。

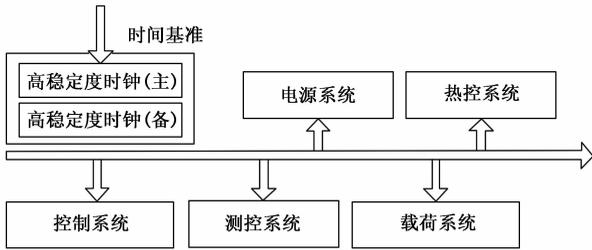


图 2 时间管理功能架构设计

基于整器配电管理功能定义, 进行配电管理功能设计, 考虑因素包括配电路数分配、配电形式确定(直供电/可控支路)、可控支路的通断控制电路形式、配电支路可靠性设计、配电器接地设计等内容。配电路数分配要求根据整器的用电需求进行分类统计, 明确全部供电支路的用电特性、功耗、关键特性等内容, 针对长期工作的关键设备, 考虑采用直供电形式, 降低断电风险。针对可控配电支路, 对开关电路形式的选择是设计的关键要求, 包括继电器控制电路、MOS 管控制电路及 SSPC 控制电路等, 具体电路形式需结合项目实际情况最终明确。在控制电路设计过程中, 综合考虑元器件的降额等因素, 降额参数包括电压、电流、结温等参数。配电器接地要求结合整器接地形式考虑采用浮地、柔性接地及接地等方式。

整器的数据包括遥测数据、视频数据、数传数据等。遥测数据体现器上设备的关键特性, 要求考虑实时性、容错性等要求; 视频数据用于监测飞行器在轨运行过程中关键动作过程, 要求考虑视频分辨率等因素; 数传数据一般为载荷等设备提供大容量事后分析数据, 考虑数据的覆盖性等因素。在数据管理功能设计过程中针对数据采集、数据封装、数据传输、校验及存储等进行分别设计。数据采集重点考虑传感器配置, 数据封装考虑统一数据格式形式, 兼顾通用性及可扩展性, 数据传输考虑传输硬件形式、传输过程中的握手形式等因素, 校验确保经传输后数据的正确性。

勤务管理为飞行器提供内务管理的一般性服务, 包括针对冗余设备的主备切换管理, 关键设备的心跳管理等, 勤务管理要求在消耗有限资源的情况下, 准确可靠地实现相关功能。

加解密功能可以设计单独的加解密单机, 也可以将加解密功能集成到单机内部, 设计加解密功能模块的输入输出信号, 加解密模块的资源分配要满足最大数据吞吐量的需求。

2.5 电气连接

在电子电气系统中, 某个具体功能的原理设计最终通过组件软件和硬件来实现。SystemWeaver 中可以定义组件逻辑架构设计, 并且能统计出系统间的信号列表, 用于进行网络设计。

在系统逻辑设计完成后, 下一步是将设计好的逻辑模块分配到对应的组件中, 由组件承接此部分的设计内容, 不同的组件对应不同的硬件设备, 构成组成单机的基本要素。

考虑到设计过程的备份问题, 在创建组件时, 引入了组件系统的概念对不同备份的组件逻辑模块进行管理, 在统计时, 同一类组建逻辑模块的下的不同实例不会互相影响检查结果, 提高数据的准确性。当设计师完成一个组件模块设计后, 如果这个组件要备份, 可以通过克隆的方式创建需要备份的组件。

当逻辑模块分配完成后, 即可确定组件之间和组件内部的信号传递关系。设计师可以在 SystemWeaver 看到组件之间和内部信号传递关系。

SystemWeaver 内可以定义系统网络拓扑结构, 确定系统中需要的总线类型、数量, 每个总线上的节点, 得到系统网络拓扑图。

在组件电气设计完成后, 将组件的逻辑设计内容和硬件设计内容关联, 形成组件的设计任务书, 从协同设计平台中导出对应的设计任务书传递给组件开发院所。

在飞行器管理系统设计阶段, 将时间管理、配电管理、数据管理及勤务管理等功能具体对应到相应的飞行器管理计算机、远程终端等设备上, 飞行器管理计算机和不同的远程终端设备之间具备不同形式的连接, 包括指令连接、遥测采集连接、供电连接、总线连接等形式。利用 Systemweaver 提供的电气连接工具将不同的单机/设备之间的接口建立物理连接关系, 实现整器物理拓扑关系。通过电气连接实现从最初的需求分析到物理实现的基本过程, 整个过程通过上下层之间的映射关系建立联动, 顶层需求的变化可以及时、快速传递至到物理实现层, 达到快速设计的目的。

通过 Systemeaver 进行电气连接设计时, 需要综合考虑电缆选型、电缆走向及成束等因素, 电缆选型主要考虑电缆的电流承载能力、绝缘层防护、屏蔽防护等因素, 在实现电气连接的基础上尽量减少电缆重量。针对关键信号要求考虑双绝缘防护设计。电缆成束主要考虑不同种类电缆之间的电磁兼容问题, 大电流电缆要求具备较好的散热能力, 避免接近器上热源, 微弱信号电缆避免和强电电缆集成在一束里面, 避免发生信号干扰问题。

基于 Systemeaver 实现的电气连接可以导出通过其他工程软件开展进一步设计。例如通过 CHS 进行电缆网设计, 最终输出电缆网设计图纸, 达到一体化设计目的。同样将 Systemeaver 实现的电气连接导出通过 OMNeT++ 进行网络特性仿真分析, 得到总线负载等特性。

3 结束语

MBSE 是在数字化大背景下应运而生的一种新的系统设计方法, 从需求分析、功能定义、系统设计及电气连接环节建立完整的系统设计流程, 通过映射方法建立不同层级之间的紧密耦合关系, 达到系统需求到物理实现的信息快速传递, 实现系统方案的快速优化和迭代。

飞行器管理系统是航天器的能源、信息及控制中枢系统, 飞行器管理系统设计的需求输入多源, 可选方案众多, 且设计输入随研制的推进变化较为频繁, 传统的基于文档的设计方法在应对设计输入变化时反应滞后, 且在信息传递过程中容易出现信息误码, 将 MBSE 技术应用于航天器飞行器管理系统设计通过模型进行驱动, 在输入变化时设计模型驱动整个设计流程的相关环节作出对应变化, 达到系统闭环目的, 从而实现系统方案的快速迭代和优化。

参考文献:

- [1] JAMSHIDI M. System of Systems Engineering: Innovations for the 21st Century [M]. New York: Wiley & Sons, 2009.
- [2] DENNIS M B. The Engineering Design of Systems: Models and Methods [M]. 2ed. Hoboken, NJ: A. John Wiley & Sons Inc., 2009.
- [3] 梅 芊, 黄 丹, 卢 艺. 基于 MBSE 的民用飞机功能架构设计方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45 (5): 1042 - 1051.
- [4] 张 兵, 陈建伟, 杨 亮, 等. 基于模型的系统工程在航天产品研发中的研究与实践 [J]. 宇航总体技术, 2021, 5 (1): 1 - 7.
- [5] 范海涛, 刘 霞, 赵伶丰, 等. 运用 MBSE 理论和方法实现航天器创新研发 [J]. 网信军民融合, 2020 (7): 22 - 26.
- [6] 王崑生, 袁建华, 陈红涛, 等. 国外基于模型的系统工方法研究与实践 [J]. 中国航天, 2012 (11): 52 - 57.
- [7] CLOUTIER R, SAUSER B, BONE M, et al. Transitioning Systems Thinking to model-based Systems Engineering: Sys-
- (上接第 254 页)
- [15] ZHENG Z, WANG P, LIU W, et al. Distance-IoU loss: Faster and better learning for bounding box regression [C] // Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. 2020, 34 (7): 12993 - 13000.
- [16] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H. Scaled-yolov4: Scaling cross stage partial network [C] // Proceedings of the IEEE/cvf conference on computer vision and pattern recognition. 2021: 13029 - 13038.
- [17] WEIHONG W, JIAOYANG T. Research on license plate recognition algorithms based on deep learning in complex environment [J]. IEEE Access, 2020, 8: 91661 - 91675.
- [18] BAFGHI R A, GURARI D. A New Dataset Based on Images Taken by Blind People for Testing the Robustness of Image

- temigrams to SysML models [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2015, 45 (4): 662 - 674.
- [8] HOLT J, PERRY S, PAYNE R, et al. A mode-based approach for requirements engineering for systems of systems [J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9 (1): 252 - 262.
- [9] 贾晨曦, 王林峰. 国内基于模型的系统工程方法面临的挑战及发展建议 [J]. 系统科学学报, 2016, 24 (4): 100 - 104.
- [10] 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, 23 (3): 119 - 125.
- [11] 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.
- [12] 胡晓义, 王如平, 王 鑫, 等. 基于模型的复杂系统安全性和可靠性分析技术发展综述 [J]. 航空学报, 2020, 41 (6): 140 - 151.
- [13] 李 娇, 隆金波, 彭文胜, 等. MBSE 模式下可靠性安全性测试性一体化建模与评估技术方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (7): 247 - 253.
- [14] 李文屏, 白鹤峰, 赵 毅, 等. 基于 MBSE 的卫星通信系统建模与仿真 [J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2 (1): 69 - 74.
- [15] 邵 健. 基于 MBSE 的航天任务分析与设计方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [16] 陈红涛, 邓显晨, 袁建华, 等. 基于模型的系统工程的基本原理 [J]. 中国航天, 2016 (3): 18 - 23.
- [17] 吴 颖, 刘俊堂, 郑党党. 基于模型的系统工程技术探究 [J]. 航空科学技术, 2015, 26 (9): 69 - 73.
- [18] 丁 健, 田 峰, 金 颖. 基于模型的系统工程 (MBSE) 方法在地面站研制中的应用研究 [J]. 中国高新技术产业, 2016, 12: 47 - 49.
- [19] 卢志昂, 刘 霞, 毛寅轩, 等. 基于模型的系统工程方法在卫星总体设计中的应用实践 [J]. 航天器工程, 2018, 6, 27 (3): 7 - 16.
- [20] 李 庆. 飞机开发技术的全新突破—基于模型的系统工程 [J]. 航空制造技术, 2011 (12): 48 - 53.
- Classification Models Trained for ImageNet Categories [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2023: 16261 - 16270.
- [19] 王 奇, 王录涛, 江 山, 等. 相关滤波目标跟踪算法鲁棒性提升研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (6): 210 - 215.
- [20] CUGU I, MANCINI M, CHEN Y, et al. Attention Consistency on Visual Corruptions for Single-Source Domain Generalization [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022: 4165 - 4174.
- [21] 王 林, 张文卓. 一种融合注意力机制与上下文信息的交通标志检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (3): 54 - 59.
- [22] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks [C] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018: 7132 - 7141.