仿真设计与控制

文章编号:1001-2060(2025)06-0080-12

# 基于 MBSE 的复杂流体输送系统架构模型构建方法

## 魏天一,赵观辉,谭巍巍,夏 翔,赵翠娜

(中国舰船研究设计中心,湖北 武汉 430064)

摘 要:为提升船舶动力系统的设计与验证水平,解决复杂流体输送设计面临验证成本高、调试难度大等问题,提出 了基于模型的系统工程(MBSE)的系统架构数字化正向设计方法。研究遵循 MBSE 设计思想和需求分析 - 功能 - 逻 辑架构 - 物理模型(RFLP)建模方法论,利用 M-Design 和 MWORKS 等国产化建模平台,结合 SysML 语言和 Modelica 语言等建立了船舶复杂流体输送系统架构,可完备覆盖流体用户及系统内外部环境需求。针对关键指标进行快速 验证,在实物调试前驱动深化物理模型开展联调仿真,在虚拟空间内提前完成流体输送系统运行方案和控制参数 的计算校核,验证流体输送流量分配技术及运行方案。结果表明:基于 MBSE 方法开展流体输送系统的架构设计 具有科学、高效、可溯性强等优点,后续可在船舶动力系统设计中进一步推广。

关键 词:基于模型的系统工程(MBSE);SysML语言;流体输送;架构设计

中图分类号:U664.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.009

[引用本文格式]魏天一,赵观辉,谭巍巍,等. 基于 MBSE 的复杂流体输送系统架构模型构建方法[J]. 热能动力工程,2025,40(6): 80-91. WEI Tianyi, ZHAO Guanhui, TAN Weiwei, et al. Construction method of architecture model of complex fluid transport system based on MBSE[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2025,40(6):80-91.

## Construction Method of Architecture Model of Complex Fluid Transport System based on MBSE

WEI Tianyi, ZHAO Guanhui, TAN Weiwei, XIA Xiang, ZHAO Cuina

(China Ship Development and Design Center, Wuhan, China, Post Code: 430064)

Abstract: To elevate the design and verification standards of marine power systems and address the challenges of high verification costs and difficulties in debugging in terms of complex fluid transportation designs, a forward digital design method for system architecture based on model-based systems engineering (MBSE) was proposed in this paper. The study adhered to the MBSE design concept and the requirement analysis-functional analysis-logical architecture-physical model (RFLP) modeling methodology, employing domestic modeling platforms such as M-Design and MWORKS, and integrating SysML and Modelica languages to construct the architecture of complex fluid transport systems for ships, which can provide comprehensive coverage of the needs of fluid users and both internal and external environments, enabling rapid verification of key indicators. It prompted the refinement of physical models for co-simulation before physical debugging, completed the computational verification of fluid transport system operation plans and control parameters in the virtual space ahead of time, and validated fluid transport flow distribution technology and operational schemes. The research confirms that the architectural design of fluid transport systems using the MBSE approach is scientific, high-efficient and strongly traceable, warranting further promotion in the design of marine power systems in the future.

收稿日期:2024-07-31; 修订日期:2024-09-29

作者简介:魏天一(1998-),男,中国舰船研究设计中心助理工程师.

通信作者:赵观辉(1989-),男,中国舰船研究设计中心高级工程师.

Key words: model-based systems engineering (MBSE), SysML language, fluid transport, architecture design

## 引 言

船舶动力设计是跨专业和多学科的系统工 程[1-2].其核心为流体介质的输送运用,具有可靠性 要求高、技术难度大、协同单位多等特点[3-4]。近年 来,国产邮轮建设等一系列重大工程的开展使船舶 动力系统设计面临新的挑战<sup>[5]</sup>,譬如设计周期压 缩、新型设备数量增加、多模块集成等。传统设计存 在信息传递缺乏一致性、需求变更缺乏可溯性、依赖 试验验证等问题, 亟需开展设计方法革新, 推动船舶 动力设计数字化转型。基于模型的系统工程(Model-Based System Engineering, MBSE)是基于模型分析 系统及传递需求的方法,用于支持复杂系统设计分 析及验证确认<sup>[6]</sup>。该方法的优势在于设计过程均 由模型承载与传递,闭环验证工作增加且前移,可改 善传统设计弊端,即使无法取代物理试验,也可基于 前期充分的模型验证提升试验成功率.促成"设计 多次迭代、试验一次成功"[7]。

关于 MBSE 方法在船舶运载领域及复杂流体输 送研究等方面,杨元龙等人<sup>[8]</sup>提出了基于 MBSE 的 船舶动力系统数字化正向设计方法,搭建了船舶发 电机组辅助系统的数字模型,证明 MBSE 方法可有 力支撑系统设计。杨冰洁等人<sup>[9]</sup>以航空动力的蒸 发循环输送系统为研究对象,运用 MBSE 建模,阐述 压缩机故障的原因,并提出了单线通信的优化改进 措施。曾小康等人<sup>[10]</sup>基于系统工程方法论详细阐 述了数字试验平台的顶层架构,并以"华龙一号"核 电站的二次侧非能动余热排出系统(PRS)试验系统 为对象进行应用验证。扶靓虔等人<sup>[11]</sup>利用 MBSE 方法,逐层分解实际案例和匹配系统功能,完成了研 究堆的启停方案设计以及关键设备维护策略设计分 析,明确利用该方法可以高效实现设计目标。朱俊 志等人<sup>[12]</sup>采用 MBSE 建模方法开展了破口事故分 析和系统安全设施设计,结果表明数字模型可有效 规避传统设计流程中存在的系统缺陷在后期集中涌 现等问题。

流体输送系统作为多类船舶的组成核心,与多

型设备紧密关联,是保护旋转机械、相关轴承及支撑 构件正常工作的重要保障系统。流体输送的实物验 证成本高、周期长,且多用户间强耦合使得调试难度 大,具有代表性。故本文以邮轮等船舶的流体输送 系统为例,基于 MBSE 方法建立了复杂流体输送系 统架构模型,完备覆盖了流体用户及内外部环境的 需求,提前验证了流体输送系统设计及运行方案,为 MBSE 在船舶动力系统数字化正向设计中的应用提 供了典型范例。

## 1 建模方法

本文基于支持 SysML 建模的 M-Design 和支持 Modelica 建模的 MWORKS 建模平台构建了船舶复 杂流体输送系统架构,包含需求分析,功能分析,逻 辑架构,物理模型以及接口等模块。其中,SysML 建 模强调系统的功能构成和功能活动,主要实现梳理 需求和明确架构,用于方案论证和方案设计阶段; Modelica 建模强调工艺系统的数学模型和方程求 解,主要实现建模仿真和设计验证,用于技术设计和 综合验证阶段。

流体输送架构模型的前期开发与调试等流程均 在国产化自主建模平台 M-Design 上开展完成。该 建模平台提供遵循 ISO/IEC19514 国际标准的图形 建模 SysML 语言开发环境,支持利用具有不同功能 属性的图表完成对复杂系统进行需求分析、功能分 析、架构设计<sup>[13]</sup>,从而呈现系统和设备之间的逻辑 交互关系等。本文基于 SysML 语言和平台,利用 SysML 中包括需求,行为,结构,参数等系统设计要 素的9类图表实现了规范完整的图形化建模,结合 MWORKS 等关联工具完成了领域扩展及仿真验证 工作,并采用统一标准 XML 数据格式存储相关的数 据资源,构建得到涵盖数字样机 1.0 要素的系统架 构模型。

MBSE 通用方法的建模研制流程如图 1 所示。 通过小回路需求验证闭环、大回路性能仿真闭环,半 实物测试以及系统集成测试闭环等环节,驱动系统 产品设计、制造、测试及交付运行。



图 1 基于 MBSE 建模方法的研制流程 Fig. 1 Development process based on MBSE modeling method

V 模型研制流程的底层逻辑是 RFLP 开发方 法,即需求分析 – 功能分析 – 逻辑架构 – 物理模型 建模流程。RFLP 方法需要依次完成4 个设计流程, 其中包括:需求分析,定义并管理产品的需求,要求 全面、完整、可追溯;功能分析,明确并分解产品的功 能,需要清晰、可分解、可验证;逻辑架构,从逻辑实现 角度出发设计系统架构,需要合理、可扩展、可重用; 物理模型,从技术实现角度出发明确逻辑架构对应的 物理系统,需要准确、可仿真、可验证。

## 2 建模过程

除上述建模技术和方法论外,建模规范性和标准化是保证 MBSE 模型质量和可重用性的重要基础。本研究遵循相关国军标,船舶行业标准、ISO/IEC 19514 SysML标准、OMG SysML规范、Modelica语言规范等文件,保证建模语言、建模元素、建模流程、模型验证等方面的规范性和标准化。

本文开发了流体输送数字模型,针对船舶动力 领域数字化转型需求,依托基于模型的架构设计,对 关键指标进行快速验证,快速生成清晰完备的复杂 流体输送架构。

总体建模流程可分为需求分析、功能分析、逻辑 架构和参数论证及需求验证 5 部分,保证分架构顺 序与 RFLP 设计思路对应一致,其中参数论证和需 求验证是物理模型的抽象简化。

## 2.1 需求分析

需求是指研制模式中的顶层输入和总体要求, 需求分析是牵引系统总体设计和验证系统架构方案 的重要依据,主要包括系统运行周期分析、利益相关 者分析及系统需求管理等。

在系统运行周期分析环节,通过定义任务阶段 的方式有序建立满足需要的框架,有助于获得完备 的流体输送各阶段的利益相关者及其需求,为下游 提供设计依据。流体输送运行周期分析如图 2 所 示。由图 2 可知,本文通过状态机图定义流体输送 任务阶段,建立满足系统需要的框架,其主要阶段包 含启动、稳态工况、应急工况、动态工况及停机,并明 确了不同工况切换的主要依据是输送总管压力值。



Fig. 2 Operating cycle analysis of fluid transport

系统上下文分析,是流体输送及其利益相关者 的静态呈现方式,利益相关者是指可能受系统影响 或能够影响系统的所有人员和组织,本文以模块定 义图的形式呈现系统与各利益相关者的关系及其交 互内容。从资源、限制、输入、输出等角度梳理复杂 流体输送系统的利益相关者。系统上下文分析如图 3 所示。

知,本文依据向下传导的方式将功能及性能需求进行

分类,将流体输送目标需求、试验项目需求、设计指标

约束需求、设备需求、外部保障约束需求等合理地归纳展开。一方面明确不同工况快速切换过程中各支路流

量及用户压力满足规定要求等定性要求,同时设定用

户流体用量等定量约束,为后续设计奠定基础。



图 3 系统上下文分析 Fig. 3 Context analysis of the system

通过"运行周期分析""系统利益上下文分析" 等各环节之间的相互迭代、互相补充,明确利益相关 者及其衍生项目生成的最终状态或目标产品,并为 项目目标增加范围限制和条件约束,确保所得流体 输送系统的需求全面、完整且有效。

流体输送系统整体需求如表1所示。由表1可

**m** 1

表 1	流体输送系统整体需求	


<b>1</b> ab. 1	Overall	demand	IOF	nuia	transport	system	

名 称	内 容
输送系统目标需求	设计复杂流体输送系统,开展流量分配模拟,验证输送系统流量分配技术及输送系统运行方式,支撑系
	统深化方案研究,释放邮轮建造风险。
复杂流体压力需求	-
输送系统温度需求	复杂流体系统运行过程中流体温度满足40℃。
输送系统加热需求	输送系统可以模拟运行过程中用户加热场景。
蒸汽加热需求	输送系统模拟加热可使用蒸汽系统所供蒸汽。
设备组件需求	主要系统设备如输送泵、循环泵、流体滤器、流体冷却器的参数均使用科研样机参数。
输送系统规模需求	搭建与借鉴型号上单舷复杂流体系统等规模的模拟与试验系统,系统管路规格与布置均与邮轮总体空
	间保持匹配,确保了系统架构与未来邮轮实际系统流量分配、压力分布类似。
法休田户带州壮思重击	以邮轮用户设备科研样机实测数据为输入,通过调节阀门阻力系统,使其与实际设备阻力特性相似,模
<b>抓冲用厂快扒衣且而</b> 不	拟柴油机组、发电机组、推进器、输送泵、循环泵、邮轮用户等设备的用油流量特性。
流体品质量需求	系统输入为清洁的复杂流体。

除需求关联的语义表征外,基于 MBSE 的架构 模型可针对不同类型的语义关联,本文从流体输送 总体至各系统的任务下发、指标分配等业务角度出 发,定义与之匹配的矩阵、视图及表格等映射追溯呈 现方式。本文基于流体输送需求映射矩阵,围绕流 体输送的需求关联开展设计信息追溯和输入变更性分析,可提升信息传递一致性,及时跟踪需求变更并做出用例、逻辑及功能上的响应,直接弥补传统文本模式应对需求变更和需求追溯管理上的不足,提高研制效率,规避质量问题。

此外,针对利益相关者需求中有关"做到什么 程度"的信息字段,需要根据系统目的和运行意图 基于标准或经验公式分解成细粒度的性能度量。本 文根据实际系统运行方案和控制策略抽象提取出了 系统有效性度量(Measurement of Effectiveness, MoE)指标,用于衡量系统在完成其任务目标方面的 有效性,流体输送 MoE 分析如图4所示。由图4可 知,得到的流体输送系统 MoE 指标包括总管温度、 总管压力(系统控制目标)、系统最高流量(系统安 全限值)等,至此即完成了初步的需求分析工作。 MoE 指标通常来源于上级系统对本系统的要求,或 来源于本系统正常运行或控制策略所要求的指标参 数,可以反映系统需要达到的目标和性能,可以参考 相关行业标准规范或行业专家的经验。

## 2.2 功能分析

· 84 ·

功能是连接需求和架构的桥梁,流体输送的顶 层系统功能较为抽象,难以直接映射到逻辑架构去 实现和执行,需进一步细化拆解。流体输送功能模型如图5所示。由图5可知,本文将流体输送的顶层系统功能逐级分解成子系统功能,将稳态供流、回收流体、动态供流及应急供流4部分任务工况内容拆解,在正向设计中预先设定数十种功能活动,并基于模块定义图来描述其层级关系,形成较完备的流体输送功能架构。



图 4 流体输送 MoE 分析





图 5 流体输送功能模型

Fig. 5 Function model of fluid transport

完成顶层功能架构搭建后,需要考虑功能延续 性分析来判断某一功能或功能段是否存在连续执 行,若存在则分析得到连续执行的条件或持续时间 乃至性能指标的变化;若不存在则需要考虑功能中 断分析,从设计的安全性、可操作性进行分析,用于 实现功能的异常判断和分析等。

动态供流活动如图6所示。本文以动态供流功

能为例,通过活动图清晰地定义各动态供流步骤,且 每步中都将该活动分配到不同的子系统中,即加热 子系统(蒸汽加热)对流体预热后,贮存子系统存储 流体,后续通过粗过滤子系统、输送子系统、冷却子 系统等,最终在分配子系统基于阀门调节与流量整 定等手段,实现复杂流体的合理分配。



图 6 动态供流活动 Fig. 6 Dynamic supply and flow activity

## 2.3 逻辑架构分析

逻辑架构是在得到完备的功能流程后,根据功 能分配模型进行逻辑架构分析,以识别相关的执行 子系统并得到逻辑架构模型,其衔接系统需求分析 和后续详细设计可以给系统级别仿真和分析提供支 持。流体输送逻辑架构如图7所示。本文首先明确 详细的流体输送逻辑架构组成,设计了包含过滤子 系统、冷却子系统、回收子系统、加热子系统以及分 配子系统等在内的9类子系统。





Fig. 7 Fluid transport logic architecture

基于复杂流体输送系统的逻辑架构组成和动态 功能活动,可以初步明确组件间交互的项目和信息, 并根据系统黑盒规范上的属性信息明确组件的端 口,建立物理组件之间的信息流和物质流。本文以 图 8 为例,完备地阐述了蒸汽加热方案的系统逻辑。 输送系统合理利用邮轮等船舶蒸汽源进行加热,经 过蒸汽加热后,流体进入贮存子系统并送至粗过滤 系统,由输送泵或备用输送泵送至精过滤子系统,再 进入冷却子系统,经流体冷却器冷却处理后经分配 子系统送至各用户,并流至回流柜,形成完整的复杂 流体输送系统闭环运行方案。



#### 图 8 流体输送逻辑运行方案

Fig. 8 Logic operation plan of fluid transport

## 2.4 物理模型及接口

基于图 8 所述的逻辑运行方案,根据功能分析 模型,进行子系统的物理架构设计,识别和设计对应 的物理组件并进行功能到物理的分配。在分配过程 中尽可能使功能到物理遵循多对一的映射关系,保 证物理组件相对稳定。 以分配子系统为例,文中架构模型逐步将输 送系统组成细化至设备和管道等物理组件,完成分 配子系统与输送总管、船舶推进器供流管路、船舶 用户供流管路、柴油机组供流管路、发电机组供流 管路等的定向组合。分配子系统物理架构如图 9 所示。



图 9 分配子系统物理架构

Fig. 9 Physical architecture of allocation subsystem

杂流体用户及相关管路绘制得到支路流体参数 计算的内部模块图,详细阐述了各支路与用户之间 的约束关系,随着仿真计算进行和边界条件变更, 图例将实时显示参数变化,达到初步的持续验证 效果。



图 10 分配子系统参数计算

Fig. 10 Parameter calculation of allocation subsystem

在完成分配子系统参数计算后,当前的流体输 送架构模型可以涵盖主要设备及其功能和上下游 的接口关系,并能够进行初步的代数方程运算,但 仍需要多物理场统一建模进行深化的性能验证, 即基于需求功能出发,针对不同设计阶段、不同模 型持续开展设计验证,保证设计过程的准确性,同 时打通架构模型与各专业仿真分析工具壁垒,实现 架构模型驱动仿真。在此过程中需要各专业工具 基于 FMI 协议互通,提高模型复用程度,提高设计 效率。

本文遵循模型间的映射关系,基于 M-LINK 插 件和自定义接口将 SysML 模型转换为可执行的 Modelica 模型,结合 M-Design 和 MWORKS 建模平台, 实现架构模型到深化物理模型的映射,从而深入求 解常微分方程组和代数方程组。基于统一多物理场 模型进行"机、电、气、液、控、热"等联调仿真,实现 完整的架构模型闭环验证工作。SysML 与 Modelica 模型转换如图 11 所示。



## 3 模型验证

## 3.1 关键指标验证

传统设计模式中复杂流体输送验证依赖大型 实物试验,台架设计、建造、调试周期冗长,多用户 强耦合系统调试难度大,且受限于系统固有安全, 无法验证系统边界性能。基于流体输送的架构模 型,可准确描述系统的需求及功能,建立完备的架 构模型后,可通过功能逻辑仿真对系统运行方案进 行演示。

本文预先明确整体需要执行的需求验证,针对 包含船舶推进器供流管路在内的供流管路、输送泵、 循环泵等流体用户,从管路压力和流量两方面明确 了约束参数。同时针对输送总管等部件进行了相关 值属性的完备说明。 在此基础上,本文通过创建并求解指标运算数 学模型来验证量化指标,利用最终求解值验证是否 满足系统设计限值。M-Design 平台可提供模型参 数指标计算功能,借助内置解算器和外部解算器计 算参数指标。设置好模型的相应约束后,通过仿真 运行计算,将参数计算结果输入指标判断约束模块, 即可自动判断参数计算结果是否符合系统指标 需求。

本文生成的需求验证表如表2所示。可确保在 全部的运行工况下,直观体现邮轮等船舶的输送总 管流体流量、输送总管压力、输送泵供流管路压力和 输送泵供流管路流量等定量指标,并且同步生成压 力和流量的判定结果(本模型的所有判定结果均符 合设计要求),为后续设计定型释放风险。

名称	总管流体流量/t·h <sup>-1</sup>	总管压力/MPa	压力判定结果	是否满足动态工况需求
分配子系统_常规输送总管 - 工况 1	309.04	0.44	是	是
分配子系统_常规输送总管 - 工况 2	291.94	0.44	是	是
分配子系统_常规输送总管 - 工况 3	278.68	0.44	是	是
分配子系统_常规输送总管 – 工况 4	274.80	0.44	是	是
分配子系统_常规输送总管 – 工况 5	270.43	0.44	是	是
分配子系统_常规输送总管 – 持续倒车	263.92	0.44	是	是
分配子系统_常规输送总管 - 全速倒车	263.64	0.44	是	是

表 2 流体输送指标验证结果 Tab.2 Verification results of fluid transport indicators

## 3.2 加热方案对比

通过 MBSE 方法进行模型化设计,将系统不同 运行方案以实例的形式承载,多种方案条目化显示 在实例表或者模块图中,方便查找每种方案的组成 及重要指标参数,从而能够在初步设计定型后进行 系统设计多方案权衡比选,进一步获取最优方案。 本文进一步论证分析了不同加热方案的特点,将不 同的需求指标作为分类器,预先对流体输送总管电 加热方案、支路电加热方案、蒸汽加热方案等进行成 本计算,即以实例承载流体输送不同物理方案模型, 并计算各方案关键参数指标。加热方案成本计算如 图 12 所示。

除加热成本外,本文针对电力负荷、方案成本、 加热介质、可靠性、时效性等不同层次的需求同步 开展相应指标计算,根据权重进行方案权衡。采用 了不同等级对流体输送的3种加热方案进行精准定 性描述,后续设计可针对需求侧重点改进并迅速筛 选合适的方案。不同加热方案对比分析如表3 所示。



图 12 加热方案成本计算

Fig. 12 Heating scheme cost calculation

表 3	不同	加热方	案对	比分析
		/211 /111 / 2 2	2124.3	PU / J / /

Tab. 3 Comparative analysis of different heating schemes

名 称	分类器	电力负荷	方案成本	加热介质	可靠性	时效性
蒸汽加热方案	加热方案	无	低	蒸汽	吉同	阶段性
总管电加热方案	加热方案	低	中	电	中	随时
支路电加热方案	加热方案	声同	声同	电	低	随时

## 3.3 模型联调仿真

为实现模型联调仿真,打通数字化正向设计链路,基于 M-Design 建模平台内置的 M-LINK 插件将.md3.文件导出为 MWORKS 平台可以直接读取的.mo文件。具体思路如下:在系统的正向设计过程中,基于系统设计架构,自顶向下对复杂流体输送系统、子系统、设备和接口的名称进行统一编码,并作为架构模型的名称或属性;在导出 Modelica 模型时能够确保模型按照设定的编码进行架构组织,删除由于 SysML 语言与 Modelica 语言不一致产生的inner/outer 接口模型的前缀属性,依据设计架构导出模型的框架;将已有的设备组件模型库的组织架构重新整理,与设计架构模型保持一致;将设计架构模型的系统模型复制到 Modelica 仿真模型库中,即可实现系统模型的自动映射,形成可进行仿

真应用的 Modelica 系统物理模型;同时基于 M-LINK 插件实现两个平台间的数据传输,其中 SysML 语言进行逻辑活动仿真并传输控制信号, Modelica 语言承担微分方程求解工作, 两者并行完成联合仿真。

具体操作以及效果展示中,需首先在 SysML 模型与 Modelica 模型上分别定义模型的通信接口。启动通信程序后,在 SysML 模型中运行参数仿真,当触发通信活动时发送联调信号至 Modelica 模型,仿真平台接收信号同时启动多物理场耦合计算。借助深化物理模型仿真,对流体输送架构设计实现验证闭环,可以得到整定后 10 个复杂流体用户的阀门开度等信息。仿真界面将以曲线图形式呈现系统动态运行结果。完成计算后数据返回 SysML 模型,结果会显示在参数图或内部模块图中的相应值属性中。

为方便工况动态调整及数据交互展示,可以绘制仿真 UI 界面,直观展示输送总管及复杂流体用户的压力和流量数据。此外,还可以手动进行信号输入和工况切换,通过 SysML 模型自动操控 Modelica 深化物理模型的仿真工况。在架构模型驱动 Modelica 深化物理模型后,对流体输送进行联调仿真,在虚拟空间内提前完成系统工况整定策略的计算和校核,验证流体输送的流量分配技术及运行方案。通过对运算结果校核,可证明架构模型设计合理,逻辑闭环,且上下游接口有效。

## 4 结 论

本文以复杂流体输送系统的研发设计过程为研 究对象,创新性运用 MBSE 方法构建架构模型,支撑 实现流体输送系统的需求追溯验证、方案迭代优化 及物理联调仿真,初步形成较为可靠的复杂流体输 送系统架构模型,证明基于 MBSE 方法开展流体输 送系统的架构设计具有科学,高效,可溯性强等优 点,可在船舶动力系统设计中进一步推广。所得具 体结论如下:

(1)基于 MBSE 思想,遵循标准建模方法、标准 建模语言和标准图形图表完整描述了复杂流体输送 系统的组成要素,改善传统文本表达不足,避免传递 歧义,提高设计效率;

(2)通过开展需求分析与建模,构建了以需求 为导向的架构模型,可生成需求与功能、逻辑间的关 联矩阵,实现了需求追溯及其变更管理,同时可实现 流体输送系统关键指标验证与方案的权衡对比,实 现系统架构的初步定型;

(3)使用模型驱动接口以及相关自主软件,完成了 SysML 和 Modelica 模型之间的交互贯通和联调仿真,使验证工作整体前置,方案设计持续闭环,得到功能与性能均初步满足需求的复杂流体输送系统架构模型。

船舶动力领域数字化转型面临政策和法规导向、基础设施条件、新技术成熟度、管理变革与适应 等多方面的挑战,本文作为 MBSE 应用的摸索尝试, 难免存在不足,为促进 MBSE 进一步落地应用,深化 赋能船舶动力设计数字化转型,仍需积极开展后续 工作。

## 参考文献:

- [1] 蒋佳炜,胡以怀,方云虎,等. 船舶动力装置智能故障诊断技术的应用与展望[J].中国舰船研究,2020,15(1):56-67.
  JIANG Jiawei, HU Yihuai, FANG Yunhu, et al. Application and prospects of intelligent fault diagnosis technology for marine power system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(1): 56-67.
- [2] 马晓红,李名家,屈 鑫,等.基于系统工程的燃气轮机全生命 周期数字孪生体研究[J].热能动力工程,2022,37(S1):83 -90,101.

MA Xiaohong,LI Mingjia,QU Xin,et al. Study on gas turbine full lifecycle digital twins based on systems engineering[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(S1):83 – 90,101.

- [3] 杨子龙,方忆平,赵晋成.船用燃气轮机复杂循环技术综述
  [J].热能动力工程,2017,32(10):132-136,148.
  YANG Zilong, FANG Yiping, ZHAO Jicheng. Overview of complex cycle technologies for marine gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2017,32(10):132-136,148.
- [4] 吉桂明.船舶核动力装置造价[J].热能动力工程,2016, 31(5):81.

JI Guiming. The cost of nuclear power plant for ships [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(5):81.

- [5] 张金国,刘春林,王刚伟,等. 船舶动力装置模块化建造工艺设 计及精度分配[J]. 中国舰船研究,2018,13(1):140-144.
  ZHANG Jinguo, LIU Chunlin, WANG Gangwei, et al. Process planning and accuracy distribution of marine power plant modularization [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13 (1): 140-144.
- [6] 姚 元,周传睿,梁 浩. MBSE 应用于系统研发的效能分析
   [J]. 现代雷达,2023,45(11):7-12.
   YAO Yuan,ZHOU Chuanrui,LIANG Hao. Effectiveness analysis of model-based system engineering applied to system research and development[J]. Modern Radar,2023,45(11):7-12.
- [7] 王 为,彭 坤. MBSE 技术在我国载人航天器研制中的应用
  [J]. 航天器工程,2022,31(6):69-75.
  WANG Wei, PENG Kun. Application of MBSE technology in development of China manned spacecraft [J]. Spacecraft Engineering,2022,31(6):69-75.
- [8] 杨元龙,何庆林,吴 炜,等. 基于 MBSE 的船舶动力工程总体 设计方法研究[J].中国舰船研究,2023,18(5):11-21.
  YANG Yuanlong, HE Qinglin, WU Wei, et al. Study on the overall design method of ship power system engineering based on MBSE
  [J]. Chinese Journal of Ship Research,2023,18(5):11-21.

[9] 杨冰洁,张 行. 基于 MBSE 的机载蒸发循环系统优化设计
 [J]. 中国科技信息,2022(7):29-30.

YANG Bingjie, ZHANG Hang. Optimization design of airborne evaporative cycle system based on MBSE [J]. China Science and Technology Information, 2022(7):29-30.

[10] 曾小康,黄彦平,张利琴,等.系统工程方法论在核反应堆数 字实验中的应用研究[J].核动力工程,2020,41(3): 177-182.

> ZENG Xiaokang, HUANG Yanping, ZHANG Liqin, et al. Application of system engineering methodology in digital experiment of nuclear reactor engineering [J]. Nuclear Power Engineering, 2020,41(3):177-182.

 [11] 扶靓虔,苗 壮. 基于系统工程的研究堆启停与关键设计维 护策略设计研究[J]. 核动力工程,2021,42(S2):159-164.
 FU Liangqian,MIAO Zhuang. Research on start-up and shutdown

## (上接第71页)

- [2] GUO L, JIN H. Boiling coal in water; Hydrogen production and power generation system with zero net CO<sub>2</sub> emission based on coal and supercritical water gasification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(29);12953 - 12967.
- [3] 王 巍,刘晓薇,毛晨旭,等. 基于超临界水煤气化工艺的发电系统设计[J]. 工程热物理学报,2019,40(5):1004-1009.
  WANG Wei,LIU Xiaowei, MAO Chengxu, et al. Design of power generation system based on coal gasifcation in supercritical water
  [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40 (5): 1004-1009.
- [4] 王 巍,刘晓薇,孙伟文,等.超临界水煤气化工艺发电气轮机 排气压力分析[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(1): 119-125.

WANG Wei, LIU Xiaowei, SUN Weiwen, et al. Exhaust pressure analysis of a power turbine based on the coal supercritical water gasification technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021,42(1):119 – 125.

[5] 亓星岩. CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 混合气管外凝结换热特性的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2019.

QI Xingyan. Numerical analysis on condensation heat transfer char-

and key design and maintenance strategy of research reactor based on system engineering [J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(S2):159 - 164.

- [12] 朱俊志,杨 珏,万 蕾,等. MBSE 在核电设计中的初步应用 研究[J]. 核动力工程,2022,43(1):163-168.
  ZHU Junzhi, YANG Jue, WAN Lei, et al. Research on preliminary application of MBSE in nuclear power design[J]. Nuclear Power Engineering,2022,43(1):163-168.
- [13] 张天目,安晓强,孙志彬,等. 基于 SysML 的系统架构设计与 建模方法[J].飞机设计,2023,43(4):46-51.
  ZHANG Tianmu, AN Xiaoqiang, SUN Zhibin, et al. The system architecture design and modeling method based on SysML[J].
  Aircraft Design,2023,43(4):46-51.

(刘 颖 编辑)

acteristics of  $CO_2/H_2O$  mixture outside tube [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

- [6] DYKAS S, MAJKUT M, STROZIK M, et al. Experimental study of condensing steam flow in nozzles and linear blade cascade[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80:50-57.
- [7] 候天博. 汽轮机湿蒸汽区非平衡相变流动及激波效应特性研究[D]. 吉林:东北电力大学,2023.
  HOU Tianbo. Research on Non-eqilibrium phase change flow and shock wave in wet steam zone of steam turbine[D]. Jilin:Northeast Electric Power University,2023.
- [8] 牛佳宝,原 泽,张 建,等. 跨声速涡轮平面叶栅实验与激波 控制研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2020,33(2):14-19,52.
  NIU Jiabao, YUAN Ze, ZHANG Jian, et al. Experiment and numerical study on transonic turbine planar cascade and shock control [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(2):14-19,52.
- [9] WYSLOUZIL B E, HEATH C H, CHEUNG J L, et al. Binary condensation in a supersonic nozzle [ J ]. The Journal of Chemical Physics, 2000, 113(17):7317-7329.

(姜雪梅 编辑)