

AI-Oriented Data-Driven Systems Engineering (DDSE) Architecture: Design and Partial Process Study

Hao Hai^{1,2} Zhigang Wang^{1*}

1. Nanjing Quanxin Cable Technology Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai, 201103, China

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030, China

Abstract

The methodology of Systems Engineering (SE) has evolved from DBSE to MBSE, yet persistent limitations remain in data continuity, process collaboration, and lifecycle consistency. In recent years, advances in artificial intelligence have created a demand for intelligent systems engineering (AI4SE), placing new requirements on high-quality, structured engineering data. While foreign scholars have introduced the concept of Data-Driven Systems Engineering (DDSE) to support MBSE practices with data-centric approaches, most existing studies regard DDSE merely as an auxiliary mechanism of MBSE and lack an independent methodological framework. To address these issues, this paper analyzes the developmental requirements of SE and then designs a methodological framework for DDSE based on prior research. The framework establishes a lifecycle architecture integrating technical and management processes, elucidates the mechanism by which data-driven approaches achieve unified engineering management, identifies key elements for intelligent evolution, and performs partial validation. Results indicate that DDSE effectively compensates for the limitations of DBSE and MBSE, providing methodological and technical guidance for the evolution of SE from data-driven, and ultimately toward intelligent-driven paradigms.

Keywords

systems engineering; data-driven systems engineering (DDSE); intelligent systems engineering (AI4SE); lifecycle continuity; data governance; integrated engineering management

面向人工智能的 DDSE 系统架构设计及局部过程研究

海浩^{1,2} 王志刚^{1*}

1. 南京全信传输科技股份有限公司上海分公司, 中国·上海 201103

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 中国·上海 200030

摘要

系统工程 (SE) 方法论经历了从基于文档 (DBSE) 到基于模型 (MBSE) 的阶段性演进, 但在工程数据贯通、过程协同及生命周期一致性方面仍存在局限。近年来, 人工智能的发展催生了智能化系统工程 (AI4SE) 的需求, 对高质量和结构化的工程数据提出了新的挑战。国外学者提出了数据驱动系统工程 (DDSE) 的概念, 尝试以数据为核心支撑 MBSE 的工程实践, 但多将其视作 MBSE 的辅助机制, 缺乏独立的方法论框架。针对上述问题, 本文分析了系统工程发展的系统需求, 在现有研究基础上设计了 DDSE 的方法论框架, 构建贯通技术过程与管理过程的生命周期架构, 阐明了数据驱动实现工程管理一体化的基本机理, 提出其智能化发展的若干关键要素, 并进行了局部验证。研究表明, DDSE 可有效弥补 DBSE 和 MBSE 的局限, 为系统工程向数据驱动, 并最终迈向智能驱动 (AI4SE) 提供方法论支撑和技术路径参考。

关键词

系统工程; 数据驱动系统工程 (DDSE); 智能化系统工程 (AI4SE); 生命周期贯通; 数据治理; 工程管理一体化

1 引言: 系统工程方法演进背景

系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法^[1]。其思想源于 20 世纪中期的系统

科学, 在二战后美国的大型国防与航天项目中逐步工程化。

1957 年, Goode 和 Machol 合著《Systems Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems》^[2], 首次以“系统工程”命名。1962 年, Hall 在《A Methodology for Systems Engineering》中提出“霍尔三维结构”^[3], 奠定了系统工程的方法论基础。

传统系统工程以文档为主要载体, 被称为基于文档的系统工程 (Document-Based Systems Engineering, DBSE)。随着系统复杂度的增长, DBSE 在一致性协同等方面暴露出局限。1990 年代, Wymore 提出基于模型的系统工程

【作者简介】海浩 (1990-), 男, 回族, 中国湖北襄阳人, 在读硕士, 从事网络通信, 工程管理研究。

【通讯作者】王志刚 (1974-), 男, 中国上海人, 博士, 从事网络与高性能计算研究。

(Model-Based Systems Engineering, MBSE) 理念^[4], 主张以模型取代文档, 提升系统的可追溯设计与验证效率。2006年, 对象管理组织(OMG)发布 SysML 建模语言^[5], 推动 MBSE 标准化与工程化, 并在航空航天等领域成功应用。

随着系统工程迈向数字化阶段, 2010年代 NASA 启动数字工程转型计划^[6], 构建贯穿生命周期的数字主线。在人工智能快速发展的推动下, 2020年 McDermott 提出 AI4SE (AI for Systems Engineering) 的理念^[7], 倡导用 AI 来增强系统工程效率。然而, Poulsen 认为全生命周期工程数据的可用性、可信性和一致性成为人工智能在系统工程领域应用的阻碍^[8]。Lindblad 提出数据驱动的系统工程(Data-Driven Systems Engineering, DDSE)^[9], 尝试以数据为核心支撑 MBSE 工程实践, 将 DDSE 视为 MBSE 的优化机制, 其研究重心集中在工具实现与验证层面, 尚未形成独立的方法论体系与过程模型。

在此背景下, 本文将 DDSE 定位为独立于 MBSE 的系统工程方法论, 重点探讨两项核心问题: 一是如何以数据为中心重构系统工程生命周期逻辑, 驱动技术过程与技术管理过程的统一协同; 二是如何通过统一数据平台建立支撑全生命周期的数据治理、追溯与协同机制。研究旨在结合现有标准体系, 为系统工程的数字化与智能化发展提供方法论基础与渐进式实现路径。

2 DDSE 的系统需求分析

DDSE 被提出以改进 DBSE 和 MBSE 存在的问题, 并支撑向 AI4SE 的演化。因此, 在设计 DDSE 方法论之前, 需要明确其系统级需求, 它应克服 DBSE 和 MBSE 的固有瓶颈, 并满足 AI4SE 对数据驱动的底层需求。

2.1 来自 DBSE 的改进需求

DBSE 以文档为主要工件, 符合传统管理逻辑, 但带来了静态化、割裂化和不可追溯的问题。针对这些问题, DDSE 在系统层面需满足以下改进需求:

(1) 数据结构化与可关联性: 文档信息需转化为结构化数据, 建立跨阶段、跨领域的关联机制, 实现需求—设计—验证间的自动追溯。

(2) 过程同步与状态可视化: 克服文档更新滞后的问题, 实现工程活动与数据状态的实时同步与版本控制, 将文档视为过程产物。

(3) 多学科协同支撑: 通过数据共享与语义对齐支撑电子、软件、机械、测试以及质量管理、项目管理等多学科同步运行, 减少沟通失真。

2.2 来自 MBSE 的改进需求

MBSE 通过“模型即核心工件”实现了信息的形式化管理, 但仍面临落地实施门槛高、模型维护困难、工具生态割裂、生命周期覆盖不足等问题。由此, DDSE 方法论需进一步满足:

(1) 可操作性与易用性需求: 不依赖专用建模语言与复杂工具链降低建模门槛, 通过数据驱动的统一接口, 使工

程师和非工程角色均可基于数据开展协同工作。

(2) 灵活集成与渐进部署需求: 具备开放的体系结构和可插拔机制, 允许在现有流程中逐步接入数据驱动组件, 实现平滑演进。

(3) 生命周期贯通与动态维护: 支撑从需求、设计、实现、验证到维护的全过程数据流转, 支持系统数据与工程实际保持同步。

(4) 工具与平台互操作性: 通过开放标准与中间语义层实现跨工具、跨组织的数据互联互通, 打破数据孤岛。

2.3 来自 AI4SE 的前瞻需求

AI4SE 旨在利用人工智能增强系统工程的设计、分析、推理与决策能力, 其实现依赖于高质量、结构化、语义一致的数据。DDSE 作为支撑 AI4SE 的实现路径, 应具备以下数据特征:

(1) 统一的数据底座: 工程数据需集中管理、版本唯一, 以支撑 AI 算法调用与自动验证。

(2) 语义层与本体支撑: 建立可机器理解的工程语义体系, 使 AI 能够进行逻辑推理与一致性检验。

(3) 动态与开放的数据流: 支持实时数据更新、跨工具数据交换与 AI 可访问接口, 为 AI4SE 提供计算基础。

3 DDSE 的系统架构设计

3.1 DDSE 的核心理念

DDSE 从工程实践的痛点出发, 旨在通过统一数据平台实现需求、设计、实现、验证与运维的贯通, 形成可追溯、可协同、可演化的系统工程体系, 推动系统工程方法论从“记录与抽象”转向“贯通与驱动”。其核心理念可归纳为三点:

(1) 以数据为中心: 工程活动的组织单元是可检索、可追溯的工程数据条目, 而非文档或模型, 减少跨介质传递引起失真;

(2) 数据驱动智能: 数据的流转与演化成为过程执行的核心动力, 数据及其关联关系构成驱动知识推理、智能分析与优化决策的基础;

(3) 工程协同管理: 技术数据(需求、设计、测试)和管理数据(进度、资源、风险)共用同一数据底座, 技术数据既驱动工程执行, 又为管理活动提供依据, 实现工程与管理的过程统一与信息同源, 避免研发与管理割裂, 提高管理效能。

3.2 DDSE 的系统架构

系统生命周期过程体系包括四大类: 协议过程、组织使能过程、技术管理过程和技术过程^[10]。DDSE 方法论并不重新定义生命周期阶段, 而是重点聚焦于技术实施过程和技术管理过程, 强调通过数据贯通各环节, 实现信息的闭环与反馈。本文在不改变其内涵的前提下, 将技术实施过程中的十四个子过程抽象归纳为以下五个主要阶段(如图1所示), 分别描述 DDSE 的价值与机制:

(1) 需求阶段: 需求属性(来源、优先级、状态、责任人)均以结构化数据存储, 具备唯一 ID 与变更记录, 支

持需求变更自动向下游传递。

(2) 设计阶段：围绕需求生成架构、接口和参数等设计定义，形成系统实现的抽象蓝图。DDSE 通过需求与设计数据的双向映射，确保设计与需求保持一致。

(3) 实现阶段：基于设计定义开展硬件设计、软件开发与逻辑实现等工作，工件由 PLM 或 SVN/Git 归档。统一平台管理其任务、版本与关联关系，保证跨学科产物与设计需求的可追溯性。

(4) 验证阶段：测试用例与需求条目和设计要求绑定，验证结果回写数据库，形成需求、设计、验证的三层闭环。

(5) 运维阶段：系统投入使用后，运行日志、故障记录与改进建议持续回流到需求与设计条目，支撑面向下一周期的优化迭代。

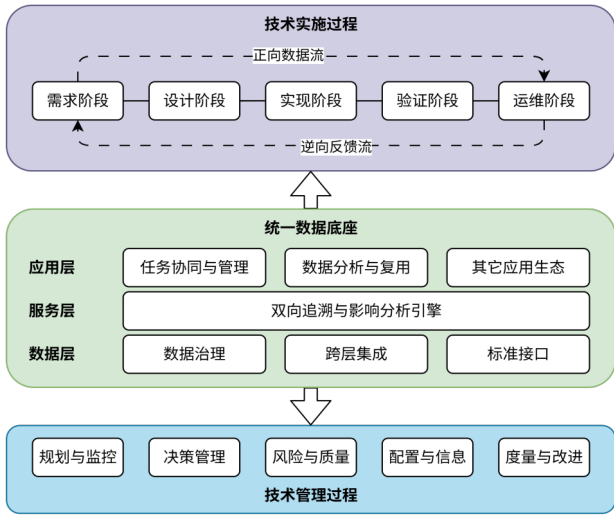


图 1 DDSE 系统架构图

系统生命周期除技术过程外，还包括用于保证工程活动有序实施的技术管理过程，贯穿项目的全生命周期，与技术过程相互作用，实现项目目标的协调与受控执行。本文将归纳为以下五个方面：

(1) 项目规划与监控：依托平台的任务与进度管理功能，制定总体计划、资源配置与进度基线，并基于实时数据反馈进行状态监控与动态调整，形成闭环控制。

(2) 决策管理：利用平台的追溯与影响分析机制，使方案权衡与关键节点决策建立在统一数据基础上，确保过程透明、可验证、可追溯。

(3) 风险与质量管理：通过风险库与质量指标体系，统一管理风险与质量数据，实现风险识别、评估与处置的可视化，并支持质量评审与持续改进。

(4) 配置与信息的管理：利用平台的数据治理与版本控制，对工程工件进行基线管理与变更追踪，支撑跨团队、跨平台的工程信息一致性与可追溯性。

(5) 度量与绩效改进：基于平台的度量与可视化分析模块，采集关键性能与质量指标，为评估与改进提供量化数

据支撑。

在 DDSE 系统架构中，技术管理过程通过统一数据平台与技术过程在数据层面实现融合，使项目状态、任务进展、风险与配置等管理信息与工程数据同源，从而实现工程与管理的一体化、过程控制的可视化。

3.3 DDSE 智能化发展的若干关键要素

DDSE 的智能化发展建立在统一的数据底座之上，涵盖数据治理、接口标准、跨层集成、生态拓展与智能演化等关键环节，构成由数据驱动向智能驱动演进的体系框架。

(1) 数据治理：以数据为核心，通过统一平台实现半结构化元数据管理，确保数据一致性和完整性。具备轻量化和渐进式特征，在不依赖形式化建模的前提下整合多源数据，为跨系统协同提供可扩展的共享数据底座。

(2) 接口标准：统一的接口规范是数据互联的前提。DDSE 需建立标准化 API 与元数据描述规则，实现跨工具链的数据同步、差异识别与变更传导，确保系统在迭代演进中保持可追溯、可维护、可移植与可替换。

(3) 跨层集成：在实际工程中，不同层次学科的实现依赖于专业工具。DDSE 通过桥接机制将的工件元数据纳入统一平台，实现跨层级的语义关联与版本追踪。该机制不替代专业工具，而在其上构建开放的数据中台，支撑复杂系统的协同开发。

(4) 生态拓展：在统一数据底座和标准化接口的支持下，DDSE 应构建开放的应用生态。类似 VS Code 或 Jira 的插件体系，平台可通过模块化接口支持第三方扩展与社区共享，形成以统一数据为核心的多样化工程应用环境，实现“数据即服务”的模式创新。

(5) 智能演化：随着结构化与语义化数据的积累，DDSE 逐步具备基于知识图谱和机器学习的推理与优化能力。通过应用生态提供的智能化工具，可实现设计优化、风险预测、智能决策等功能，推动系统工程迈向 AI4SE 阶段的智能化系统工程。

3.4 方法对比分析

如图 2 所示，DBSE、MBSE 与 DDSE 的主要差异不在于系统工程的技术过程本身，而在于工程数据的载体与贯通方式。在 DDSE 的数据基础上进一步引入智能算法，可向智能驱动的 AI4SE 渐进式演化。

DBSE 以文档为主，信息割裂、追溯性弱；MBSE 以模型为核心，能实现系统级形式化表达并提升一致性，但模型封闭、更新依赖人工维护，跨学科集成困难；DDSE 则以数据为中心，通过统一平台实现技术过程与技术管理过程的动态关联，在保持专业学科独立的同时实现跨平台追溯与协同，表现出更高的工程适配性与可扩展性。三者的主要差异对比如表 1 所示。

4 DDSE 系统的局部过程验证

为验证所提出 DDSE 方法论的可行性，本研究在当前采用 DBSE 的工程组织内，以某型网卡研制项目为背景，

利用 Confluence 与 Jira 作为统一数据平台，构建了一个覆盖需求与设计阶段的局部子系统验证环境。该验证旨在评估数据驱动方法在系统工程早期阶段的信息贯通与协同能力，而实现、验证及运维阶段则仍待后续的综合验证。



图 2 系统工程方法论在技术过程各阶段的信息载体对比

表 1 DBSE、MBSE 与 DDSE 方法论比较

对比维度	DBSE	MBSE	DDSE
核心理念	文档为中心	模型为中心	数据为中心
主要工件	文档	模型	数据对象
需求与设计	静态描述	模型化表达	数据关联、实时追溯
实现与验证	各学科独立	可建模仿真	多学科跨平台桥接
运维与改进	记录分散	模型演化能力有限	支持持续改进
管理协同	工程与管理分离	模型与管理脱节	一体化数据底座
信息一致性	弱	中	强
实施成本	低	高	中，可渐进实施
典型优势	简单直观	形式化可仿真	实时协同、数据贯通
主要局限	割裂严重	工具复杂	依赖数据治理与接口标准

在该验证环境中，Confluence 承担工程数据的知识化管理职能，用于记录需求条目和设计说明。各类信息通过插件实现语义化链接与追溯，使需求变更可实时反映至设计任务。Jira 作为过程控制与任务管理核心，与 Confluence 的数据条目保持同步，利用需求管理及任务分解插件实现需求—设计的闭环追溯。



图 2 局部过程验证覆盖范围

此外，依托 Jira 的插件生态，系统自动生成进度评估与状态监控视图，实现工程数据与项目管理数据的同源化展示。该机制体现了 DDSE 中技术数据与管理数据共用统一底座核心理念。

验证结果表明，基于 DDSE 构建的验证环境原型具备为后续环节提供持续集成的能力。

5 小结与展望

本文针对 DBSE 与 MBSE 的局限性以及 AI4SE 的前瞻性，提出了更具开放性、轻量化与演化潜力的 DDSE 方法论框架，构建了贯通技术过程与技术管理过程的生命周期逻辑，阐明了以数据为核心驱动工程管理一体化的基本机理。与现有研究多将 DDSE 视为 MBSE 的数据支撑机制不同，本文从方法论层面对其进行了体系化定义，并通过 Confluence 与 Jira 平台局部验证了数据驱动体系在需求与设计阶段进行技术和管理协同的可行性，为 DDSE 的系统落地提供了参考。

DDSE 的智能化发展需以数据治理、接口标准、跨层集成、开放生态与智能演化为关键要素。当前研究仍局限于方法框架与原型验证层面，未来随着人工智能的持续发展，开放生态与智能演化将成为推动系统工程向 AI4SE 模式演进的决定性因素。

参考文献

- [1] 钱学森等. 论系统工程[M]. 上海交通大学出版社, 2007.
- [2] GOODE H H, MACHOL R E, TEICHMANN T. System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems[J]. Physics Today, 1957,10(9):34-36.
- [3] HALL A D. A methodology for systems engineering[M]. Princeton, N.J.: Van Nostrand, 1962.
- [4] DIATTE K, O HALLORAN B, VAN BOSSUYT D L. The Integration of Reliability, Availability, and Maintainability into Model-Based Systems Engineering[J]. Systems, 2022,10(4):101.
- [5] 董梦如, 王国新, 鲁金直, 等. 基于WordCloud技术的MBSE发展态势研究[J]. 系统工程与电子技术, 2024,46(2):534-548.
- [6] HILL T R, NICOLI P, PIERCE G J, et al. Digital Transformation of the NASA Engineering Domain: 2024 IEEE Aerospace Conference[C], Big Sky, Montana, USA, 2024. IEEE, March 1-9, 2024.
- [7] MCDERMOTT T, DELAURENTIS D, BELING P, et al. AI4SE and SE4AI: A Research Roadmap[J]. Insight (International Council on Systems Engineering), 2020,23(1):8-14.
- [8] POULSEN V V, GUERTLER M, EISENBART B, et al. Advancing systems engineering with artificial intelligence: a review on the future potential, challenges and pathways[J]. Proceedings of the Design Society, 2025,5:359-368.
- [9] LINDBAARD L, WITZMANN M, VANDEN BUSSCHE S. Data-Driven Systems Engineering: Turning MBSE into Industrial Reality: Systems & Concurrent Engineering for Space Applications Conference[C], Glasgow, United Kingdom, 2018.September 26-28, 2018.
- [10] ISO. ISO/IEC/IEEE 15288:2023(E) Systems and software engineering—System life cycle processes[S]. Switzerland: ISO, 2023.