

装备数字试验闭环管理模式与 关键技术研究

宋敬华, 罗 飞, 陈 昱

(陆军兵种大学, 合肥 230031)

摘要: 对传统装备试验存在的生命周期阶段割裂、数据孤岛严重、虚实试验脱节、开环运行难以迭代优化、极限工况复现困难与试验成本效率失衡等问题进行了研究, 对物理试验覆盖不足、全流程决策滞后、试验可信度难以保障、知识无法沉淀复用等技术瓶颈进行了分析; 采用数字线程贯通、数字孪生映射、多域统一建模、模型校准、数据融合评估与反馈控制理论等技术方法, 构建装备全生命周期“需求—试验—评估—优化—再验证”闭环管理架构与运行模型, 实现装备论证、研制、生产、使用、退役全周期数字试验一体化管控、数据双向流转、虚实融合验证与智能闭环迭代; 相关技术成果破解了传统装备试验的核心技术瓶颈, 为装备试验鉴定数字化转型与实战化效能提升提供了理论体系与技术支撑。

关键词: 数字试验; 闭环管理; 数字孪生

Research on the Closed-Loop Management Mode and Key Technologies of Digital Equipment Testing

SONG Jinhua, LUO Fei, CHEN Yu

(Army Military University, Hefei 230031, China)

Abstract: In traditional equipment testing, research is conducted on issues, such as the fragmentation of lifecycle stages, severe data silos, disconnection between virtual and physical testing, difficulty in iterative optimization due to open-loop operation, challenges in reproducing extreme operating conditions, and imbalances between testing costs and efficiency, and the technical bottlenecks of insufficient coverage of physical testing, lagging full-process decision-making, difficulties in ensuring test credibility, and inability to retain and reuse knowledge are analyzed. By employing the technical approaches of digital thread integration, digital twin mapping, multi-domain unified modeling, model calibration, data fusion evaluation, and feedback control theory, a closed-loop management architecture and operational model covering the entire equipment lifecycle “requirements-testing-evaluation-optimization-revalidation” is constructed. This framework enables integrated digital testing management, bidirectional data flow, virtual-physical fusion validation, and intelligent closed-loop iteration throughout the entire equipment lifecycle of demonstration, development, production, operation, and retirement phases. Relevant technical achievements solve the core bottleneck of traditional equipment tests, providing a theoretical framework and technical support for the digital transformation of equipment testing and evaluation, as well as the enhancement of combat effectiveness.

Keywords: digital test; closed-loop management; digital twins

0 引言

现代武器装备呈现复杂化、智能化、体系化与多域耦合特征, 作战环境覆盖陆、海、空、天、网、电全

域, 装备试验鉴定已从传统性能考核转向全生命周期实战化验证。传统物理靶场分阶段试验模式存在周期长、成本高、风险大、极限场景难以复现、数据链断裂、改进反馈滞后等问题, 无法满足现代装备研制与体系化作

收稿日期:2026-03-23; 修回日期:2026-05-08。

作者简介:宋敬华(1976-),女,博士,副教授。

引用格式:宋敬华,罗 飞,陈 昱. 装备数字试验闭环管理模式与关键技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(9):274-281.

战需求。以数字孪生、数字线程、人工智能、大数据为支撑的数字试验,通过数字化建模、虚实融合与数据驱动实现装备全要素虚拟验证,构建全生命周期闭环迭代机制是突破传统试验瓶颈的关键^[1]。

目前国内外相关研究主要集中在数字孪生建模、仿真试验及单阶段优化等方面^[2],缺少面向全生命周期的统一闭环架构、数理模型、量化评估方法与标准化技术体系,尚未形成可计算、可控制、可追溯、可优化的闭环管理理论。为此,构建装备全生命周期数字试验闭环管理架构,提出数理模型与控制机制,设计核心功能模块与流转流程,建立多域数据融合、可信度评估及闭环反馈优化模型,完善支撑技术体系,为装备试验数字化转型提供理论与工程支撑^[3]。

1 基本概念与相关理论基础

1.1 核心概念界定

装备全生命周期 (EFLC, equipment full life cycle): 指装备从作战需求论证、方案设计、工程研制、定型试验、生产交付、使用保障、改进改型直至退役报废的完整过程。

数字试验 (DT, digital test): 以数字化模型为核心、多源数据为驱动、仿真系统为载体,对装备性能、效能、可靠性、安全性、体系适配性进行虚拟验证、分析评估与预测推演的试验活动,包括纯仿真试验、半实物试验、虚实融合试验、分布式协同试验等形态。

闭环管理 (CLM, closed-loop management): 基于控制理论反馈机制,将输入—执行—检测—评估—修正—再输入构成闭合回路,实现过程动态校正与目标持续优化。装备数字试验闭环管理强调全生命周期数据贯通、试验迭代、决策反馈与优化验证。

1.2 相关理论基础

装备数字试验闭环管理是控制科学、建模仿真、数据工程、装备全生命周期管控等多学科理论交叉融合的工程化应用体系,其核心管控逻辑、虚实融合实现、跨域数据贯通、结果可信度保障与全流程体系化运行,均建立在成熟的基础理论体系之上。相关理论为装备试验从传统开环验证模式向虚实融合、数据驱动、迭代优化的闭环管控模式升级,提供了底层逻辑支撑、技术实现范式与顶层管控框架,核心理论内涵及其与装备数字试验闭环管理的内在联系如下。

1.2.1 控制理论与反馈机制

控制理论是研究动态系统在闭环反馈作用下的状态演化规律与稳定控制方法的核心理论,其中负反馈闭环控制是其核心范式,也是工业过程管控的底层逻辑。

控制理论与装备数字试验闭环管理存在本质的内在契合性:装备数字试验闭环管理的本质,是面向装备战

技指标达成的试验全流程动态闭环控制系统。负反馈闭环控制机制为装备数字试验闭环管理提供了底层管控逻辑与核心运行范式,其以装备战技指标、试验大纲考核要求为系统预设目标值,以数字孪生体实时映射的装备试验状态、虚实试验数据比对结果、试验过程运行参数为系统输出量,通过试验数据实时采集与目标偏差智能解算生成管控偏差信号,驱动试验流程、试验工况、环境边界、仿真模型参数的动态修正,构建形成“目标设定—虚实试验—数据采集—偏差解算—动态修正—目标收敛”的完整闭环管控链路,从根本上解决传统装备开环试验模式中存在的试验与设计脱节、状态修正滞后、风险管控被动、指标达成度不可控等核心痛点。

1.2.2 数字孪生五维模型理论

数字孪生五维模型是数字孪生技术体系的核心建模范式,在传统三维几何映射的基础上,拓展形成了几何维、物理维、行为维、故障维、环境维五维一体化的精准映射体系。

数字孪生五维模型为装备数字试验闭环管理构建了与物理世界完全镜像的虚拟试验空间,是实现“虚实共生、以虚控实”闭环试验模式的核心基础。一方面,五维模型通过全维度精准映射,突破了物理试验的工况边界、环境限制、成本约束与安全瓶颈,可实现全工况、全边界、极限工况与故障工况的数字预试验与虚拟验证,为试验方案优化、风险前置识别提供了数字化手段;另一方面,五维模型的双向实时交互能力,实现了物理试验数据对虚拟孪生体的实时校准与动态更新,同时虚拟试验的优化结果可直接驱动物理试验流程、工况、边界的动态调整,为闭环管理的偏差修正环节提供了精准的虚拟验证支撑与数字化执行抓手,打通了“虚拟预试验—物理实测试验—虚拟迭代优化—物理闭环管控”的全链路,实现了装备试验从“物理单域验证”向“虚实融合闭环迭代”的范式升级。

1.2.3 数字线程数据流转理论

数字线程是支撑复杂装备全生命周期数据贯通与价值释放的核心理论体系,其核心机理是通过装备全生命周期、全业务域、全系统的数据进行统一的语义定义、唯一标识、结构化解析与全链路追溯,构建跨设计、制造、试验、运维、退役全阶段,跨仿真、测试、管控、保障多系统,跨院所、承制单位、试验场、用户多主体的端到端数据贯通链路,打破异构系统间的数据孤岛,实现数据的全链路可追溯、可共享、可复用,为复杂装备全生命周期的协同管控提供统一、可信、实时的数据底座^[4]。

装备数字试验闭环管理的全流程高效运行,高度依赖设计数据、仿真数据、物理测试数据、环境数据、管控数据的跨域贯通与实时流转。数字线程理论通过

统一的数据语义与标识体系,实现了装备设计阶段的战技指标、模型参数向试验阶段的无损传递,解决了传统试验模式中“设计—试验”数据脱节、指标传递偏差的核心问题;通过跨系统端到端数据链路构建,实现了虚拟试验系统、物理测试系统、试验管控系统的数据实时交互与双向流转,为闭环管控的偏差解算、动态修正提供了实时、完整、一致的数据输入;通过全链路数据追溯机制,实现了试验全流程数据的可追溯、可审计、可复盘,为闭环管理的迭代优化、试验结果的可信度验证提供了完整的数据链支撑,从根本上解决了传统试验模式中数据碎片化、流转不畅通、追溯无依据的行业痛点。

1.2.4 模型校核、验证与确认(VV&A)理论

模型校核、验证与确认(Verification, Validation and Accreditation, VV&A)是建模仿真领域保障模型可信度与仿真结果权威性的核心理论体系与标准化流程,是数字仿真结果具备工程应用与决策支撑价值的核心前提^[5]。

装备数字试验闭环管理的核心决策环节,高度依赖虚拟孪生模型的数字试验结果进行偏差解算、方案优化与管控决策,模型可信度不足将直接导致闭环管控的决策偏差,甚至引发重大试验风险。VV&A理论通过贯穿孪生模型构建、虚拟试验执行、模型迭代优化全流程的标准化校核、验证与确认流程,实现了对数字孪生五维模型全生命周期的可信度管控:在模型构建阶段,通过校核确保模型实现的准确性与规范性;在虚拟试验执行前,通过验证确保模型输出与物理实体的一致性,满足试验场景的置信度要求;在试验闭环迭代过程中,通过物理实测数据持续对模型进行再验证与再校准,保障模型在全试验周期内的动态可信度;最终通过权威确认,赋予数字试验结果与物理试验等效的法定效力,使数字试验结果能够正式作为装备定型、状态管控、闭环决策的核心依据,从根本上解决了数字试验结果可信度不足、无法支撑工程化闭环管控的核心痛点。

1.2.5 全生命周期管理(PLM)理论

全生命周期管理是面向复杂装备产品,覆盖从需求论证、方案设计、研发制造、试验验证、运维保障直至退役报废全生命周期的一体化管控理论体系,其核心目标是通过流程的一体化贯通、数据的一体化管控、业务的一体化协同,打破全生命周期各阶段、各业务域、各参与主体的壁垒,实现全生命周期的资源优化配置、风险前置管控、效能持续提升,是复杂装备体系化管控的核心方法论^[6]。

全生命周期管理理论为装备数字试验闭环管理提供了顶层体系化管控框架,将试验环节从传统的“设计后验证环节”升级为贯穿装备全生命周期的核心迭代环

节,与闭环管理存在顶层架构层面的深度契合。一方面,PLM的一体化管控框架,将装备数字试验闭环管理纳入装备全生命周期的整体管控体系,实现了试验需求与装备顶层作战需求、战技指标的无缝衔接,试验数据与设计、制造、运维数据的一体化管控,试验流程与全生命周期业务流程的一体化贯通,解决了传统试验模式中试验环节与全生命周期其他环节脱节、试验成果无法向前后端有效传递的问题;另一方面,PLM的全生命周期视角,推动装备数字试验闭环管理从“单次试验闭环”向“全生命周期迭代闭环”升级,试验过程中积累的模型、数据、知识可反向支撑装备的设计优化、制造工艺改进、运维保障方案升级,同时设计、制造、运维环节的数据可正向支撑试验方案的优化、试验边界的完善,形成贯穿装备全生命周期的“需求—设计—制造—试验—运维—优化”大闭环管控体系,实现装备性能的全生命周期持续迭代优化。

1.2.6 核心理论的装备数字试验闭环管理应用机制

前述五大核心理论并非孤立存在,而是形成了“顶层框架—底层逻辑—核心载体—数据底座—可信度保障”五位一体的协同应用体系,深度嵌入装备数字试验闭环管理的全流程环节,其具体应用方式、工程化实现路径与预期应用效果如下。

1) 控制理论与反馈机制的闭环应用机制:

具体应用方式:以负反馈闭环控制为核心逻辑,构建装备数字试验闭环管控的三级闭环控制架构,分别为指标级闭环、过程级闭环、模型级闭环。其中,指标级闭环以装备战技指标与试验大纲考核要求为管控目标,实现试验最终结果的偏差管控;过程级闭环以试验流程、试验工况、环境应力为管控对象,实现试验过程的实时动态管控;模型级闭环以孪生模型参数为管控对象,实现虚拟模型与物理实体的动态一致性管控。

工程化实现路径:①预设管控目标:基于装备战技指标、试验大纲要求,量化设定各层级闭环的目标阈值、管控边界与收敛条件;②实时数据采集:通过分布式测试系统、高精度传感器、数字线程贯通链路,实时采集物理试验数据、虚拟试验输出数据、试验过程状态数据;③偏差智能解算:基于预设目标与实时采集数据,自动解算指标偏差、过程偏差、模型偏差,精准识别偏差来源、影响程度与传递链路;④控制律动态执行:基于偏差解算结果,通过预设的管控规则与智能控制算法,生成试验流程调整、工况参数修正、模型参数优化、风险应急处置的标准化控制指令;⑤闭环迭代执行:将控制指令同步下发至虚拟试验系统与物理试验系统执行,再次采集执行后的输出数据进行偏差复核,直至偏差稳态收敛至预设目标区间。

预期应用效果:实现装备数字试验全流程的自校

正、自稳定、抗扰动闭环管控,试验指标达成度提升30%以上,试验过程风险前置识别与处置率达到100%,彻底解决传统开环试验模式的指标失控、修正滞后、风险被动等问题,保障试验任务的精准、高效、安全执行。

2) 数字孪生多维模型的闭环应用机制:

具体应用方式:以多维数字孪生体为核心虚实融合载体,构建“虚实双生、双向驱动”的闭环试验模式,在试验全流程中落地虚拟预试验、虚实同步试验、虚拟迭代优化三大核心应用场景,为闭环管控提供全流程数字化验证与执行支撑^[7]。

工程化实现路径如下。①试验准备阶段:基于装备设计数据、物理属性测试数据、历史试验数据构建多维数字孪生体,通过VV&A标准化流程完成模型可信度验证与确认,在虚拟空间开展全工况、全边界、极限工况与故障工况的数字预试验,优化试验方案、识别潜在风险、确定最优试验工况与边界条件,形成正式试验大纲的核心输入;②试验执行阶段:通过高速数据采集与传输链路,实现物理试验系统与虚拟孪生体的实时数据交互,开展虚实同步试验,物理试验的实时数据驱动孪生体同步运行,孪生体的虚拟仿真结果实时预判物理试验的发展趋势与潜在风险,为过程级闭环管控提供实时决策支撑;③试验优化阶段:基于虚实试验数据的比对偏差,在虚拟空间开展多方案迭代优化与仿真验证,确定最优试验调整方案并下发至物理试验系统执行,实现“以虚控实”的闭环优化,同时基于物理实测数据完成孪生体的动态校准与更新,实现孪生体与物理实体的同生共长。

预期应用效果:突破物理试验的工况边界、成本约束与安全限制,试验方案优化效率提升60%以上,极限工况与故障工况的验证覆盖率达到100%,大幅降低物理试验次数与试验成本,同时为闭环管控提供精准的虚拟验证支撑,确保管控决策的科学性与有效性。

3) 数字线程数据流转理论的闭环应用机制:

具体应用方式如下。以数字线程为核心数据链路,构建装备数字试验闭环管理的统一数据底座,实现全生命周期数据、跨系统数据、跨域数据的端到端贯通、全链路追溯与实时共享,为闭环管控的全流程运行提供统一、实时、一致的数据输入。

工程化实现路径如下。①统一数据标准体系构建:基于装备全生命周期业务需求,制定统一的数据元标准、语义定义规范与唯一标识体系,对设计、仿真、试验、管控等全业务域数据进行标准化治理与结构化解析;②端到端数据贯通链路搭建:基于数字线程理论,构建跨设计、制造、试验全阶段,跨仿真系统、测试系统、管控系统、PLM系统多系统,跨承制单位、试验

场、用户多主体的端到端数据贯通链路,彻底打破异构系统间的数据孤岛;③闭环全流程数据实时流转:在试验闭环管控的全流程中,实现设计指标数据向试验环节的正向无损传递,物理试验数据向虚拟孪生体的实时同步,试验结果数据向设计、制造环节的反向反馈,管控指令数据向各执行系统的实时下发,形成闭环全流程的数据双向高速流转;④全链路数据追溯管控:基于数字线程的唯一标识体系,实现试验全流程数据的全链路追溯、审计与版本管控,确保闭环管控所有决策环节的数据可追溯、可验证、可复盘。

预期应用效果:彻底解决传统试验模式的数据碎片化、流转不畅通、追溯无依据等问题,数据贯通效率提升80%以上,闭环管控决策的数据输入延迟降低至毫秒级,数据一致性准确率达到100%,为闭环管理的全流程数据驱动提供坚实的底座支撑。

4) VV&A理论的闭环应用机制:

以VV&A标准化流程为核心,构建贯穿孪生模型全生命周期、覆盖试验闭环全流程的模型可信度管控体系,实现模型构建、虚拟试验、迭代优化全环节的可信度闭环管控,确保数字试验结果具备支撑闭环管控决策的权威性与有效性。

工程化实现路径如下。①模型构建阶段全流程校核:在数字孪生多维模型构建过程中,开展分阶段、全流程校核工作,验证概念模型、数学模型、计算机模型的实现过程是否符合建模规范与设计要求,确保模型的正确实现;②试验前模型验证与权威确认:在虚拟预试验开展前,基于装备基准测试数据、历史试验数据、地面标定数据,对模型输出结果与物理实体的一致性进行量化验证,确保模型在预设试验场景下的置信度满足工程应用要求,并通过权威机构完成模型适用性的正式确认,赋予模型法定应用效力;③试验过程中动态再验证:在虚实同步试验过程中,基于物理试验实时采集的实测数据,持续对孪生模型的输出结果进行动态比对与再验证,量化识别模型偏差,若偏差超出预设阈值,立即暂停虚拟试验的决策支撑权限,启动模型校准流程;④模型迭代后闭环校核验证:基于物理实测数据完成模型参数优化与迭代更新后,再次执行标准化的校核与验证流程,确保迭代后模型的可信度满足工程应用要求,形成“模型构建—校核验证—试验应用—偏差识别—迭代优化—再校核验证”的可信度闭环管控。

预期应用效果:实现数字孪生模型全生命周期的可信度量化管控,模型置信度稳定保持在95%以上,确保数字试验结果与物理试验具备等效性,彻底解决数字试验结果可信度不足、无法支撑工程化决策的核心痛点,为闭环管控的决策制定提供权威、可靠的数字试验依据。

5) PLM 理论的闭环应用机制:

以 PLM 一体化管控框架为顶层设计, 构建贯穿装备全生命周期的试验闭环管控体系, 将数字试验闭环管理与装备需求论证、方案设计、研发制造、运维保障全环节深度融合, 实现从“单次试验闭环”向“全生命周期大闭环”的升级。

工程化实现路径如下。①顶层一体化管控架构设计: 基于 PLM 理论, 将装备数字试验闭环管理纳入装备全生命周期一体化管控体系, 制定统一的管控流程、数据标准、业务规范与协同机制, 实现试验业务与全生命周期其他业务的流程一体化、数据一体化、管控一体化; ②全生命周期需求闭环传递: 将装备顶层作战需求、战技指标, 通过 PLM 体系无缝传递至试验环节, 转化为可量化、可验证的试验考核指标, 确保试验闭环管控的目标与装备顶层需求完全一致; ③试验成果全生命周期反向反馈: 将数字试验闭环管理过程中积累的试验数据、性能数据、故障数据、优化方案, 通过 PLM 体系反向反馈至设计、制造、运维环节, 支撑装备设计优化、制造工艺改进、运维保障方案升级; ④全生命周期数据一体化管控: 基于 PLM 平台, 实现装备全生命周期所有数据的集中管控、统一共享与复用, 设计、制造、运维环节的数据可正向支撑试验方案的优化与试验边界的完善, 形成贯穿装备全生命周期的“需求—设计—制造—试验—运维—优化”大闭环管控体系。

预期应用效果: 打破传统试验环节与装备全生命周期其他环节的壁垒, 实现试验成果的全生命周期复用, 装备研发迭代周期缩短 40% 以上, 全生命周期研发与试验成本降低 35% 以上, 推动装备性能从“设计定型即固化”向“全生命周期持续迭代优化”的根本性升级。

2 装备全生命周期数字试验闭环管理总体架构

2.1 总体架构设计

装备全生命周期数字试验闭环架构, 可贯通论证、研制、试验、使用、保障全流程, 以数字孪生与虚实结合试验替代传统分段试错, 大幅降低实装损耗与成本。通过数据闭环迭代, 提前暴露设计缺陷、优化性能指标, 实现从“事后整改”向“事前预测”转变, 提升装备可靠性、战备完好率与作战适配性, 通过分析可以提出“4 层架构、3 条主线、2 类支撑、1 个闭环”的装备全生命周期数字试验闭环管理体系^[9], 如图 1 所示。

三条主线: 需求牵引主线、数据贯通主线、迭代优化主线;

两类支撑: 标准规范体系、安全可信体系;

一个闭环: 全生命周期数字试验输入—执行—评估—反馈—优化闭环。

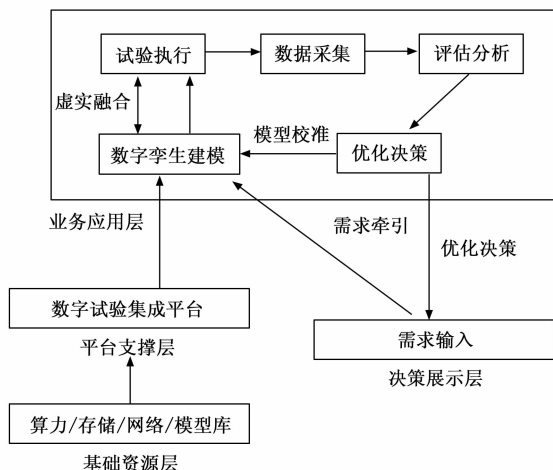


图 1 装备数字试验闭环管理总体架构框图

2.2 闭环管理运行流程框图

以数字孪生为基础, 以作战需求/指标为起点, 构建装备数字孪生模型, 生成数字试验方案并执行虚实融合试验。通过采集治理试验数据, 开展多维度评估、偏差计算与缺陷定位, 形成优化决策与方案, 优化结果一方面数据交互与校准孪生模型, 另一方面返回校准初始需求与指标, 形成完整闭环。该流程实现了从需求到优化的全链路数据流转^[10], 可提前发现缺陷、降低实装试验成本, 持续迭代提升装备性能, 支撑全生命周期精准管控与作战适配^[11]。

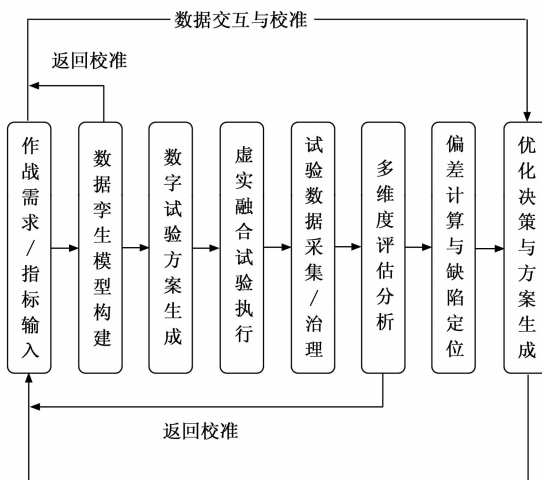


图 2 全生命周期数字试验闭环运行流程框图

闭环运行满足连续性、可追溯性、可量化性、可迭代性、可优化性。

3 闭环管理数理模型与控制机制

3.1 闭环系统状态空间模型

将数字试验闭环视为多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 动态控制系统, 建立状态空间模型^[12]:

- 1) 状态方程:
$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + W(t)$$
- 2) 输出方程:
$$Y(t) = CX(t) + V(t)$$
- 3) 反馈控制律:
$$U(t) = K[Y_d(t) - Y(t)]$$

式中, $X(t)$ 为系统状态向量 (模型状态、数据状态、试验状态、装备状态); $U(t)$ 为控制输入向量 (试验参数、设计参数、工艺参数、保障策略); $Y(t)$ 为系统输出向量 (性能指标、效能指标、可靠性指标、评估结果); $Y_d(t)$ 期望输出 (需求指标 / 阈值); A, B, C 为系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵; $W(t), V(t)$ 为过程噪声与观测噪声; K 反馈增益矩阵。

3.2 闭环偏差量化模型

定义试验输出与需求目标的偏差函数:

$$E(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i \left| \frac{y_i(t) - y_{id}}{y_{id}} \right|$$

式中, ω_i 为指标权重, 满足 $\sum \omega_i = 1$; $y_i(t)$ 为实测/仿真输出; y_{id} 为设计阈值。

当 $E(t) \leq \epsilon$ (允许误差) 时, 闭环收敛, 试验通过; 否则触发迭代优化。

3.3 全生命周期数字试验成熟度评价模型

构建 5 级成熟度模型, 如表 1 所示。

表 1 装备全生命周期数字试验闭环成熟度等级				
等级	名称	核心特征	数据贯通度	闭环能力
L1	基础级	分阶段仿真, 无统一模型	<30%	开环, 无反馈
L2	贯通级	数字线程初步贯通, 局部闭环	30%~60%	单阶段闭环, 人工反馈
L3	融合级	虚实融合试验, 全流程数据贯通	60%~85%	多阶段闭环, 半自动反馈
L4	优化级	数字孪生驱动, 智能评估与优化	85%~95%	全生命周期闭环, 智能反馈
L5	自主级	自主决策、自主迭代、自主进化	≥95%	自主闭环, 知识自生长

该成熟度模型中 L1—L5 五级划分及 30%、60%、85%、95% 等数据贯通率阈值的确定, 基于德尔菲专家咨询法与行业统计分析的结合。首先, 选取 12 家典型装备研制单位 (涵盖航空、航天、船舶及电子领域) 开展实地调研, 统计其数字试验项目中数据贯通率的实际分布, 发现低于 30% 时数据在各环节丢失超过七成, 基本处于分阶段孤立仿真状态; 30%~60% 区间已实现初步数据连接但依赖人工传递; 60%~85% 区间达到多源异构数据融合与半自动反馈; 85% 以上须引入数字孪

生驱动机制; 95% 以上仅有少数前沿验证系统可达自主闭环。其次, 组织 7 位领域专家进行两轮德尔菲咨询, 对上述边界进行一致性评判, 得到 Kendall 协调系数 $W = 0.82$ ($P < 0.01$)。据此将 30% 定为 L1 与 L2 分界, 60% 与 85% 分别对应 L2/L3、L3/L4 分界, 95% 为 L4/L5 分界, 使分级具备统计与专家双重依据。

成熟度量化评分公式:

$$M = \alpha M_D + \beta M_C + \gamma M_T + \delta M_S$$

式中, M_D 为数据成熟度, M_C 为闭环能力, M_T 为技术支撑, M_S 安全标准; $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$ 。

4 全生命周期各阶段闭环任务与接口设计

4.1 阶段划分与数字试验核心任务

装备全生命周期数字试验闭环覆盖 7 个阶段^[13], 核心任务如表 2 所示。

表 2 全生命周期各阶段数字试验核心任务与闭环目标				
生命周期阶段	数字试验核心任务	闭环输入	闭环输出	优化目标
论证阶段	作战需求验证、方案虚拟推演、指标敏感性分析	作战任务、作战场景	优化需求、修正指标	需求匹配度
研制阶段	虚拟样机、多物理场仿真、半实物试验、V&V	设计模型、性能指标	设计缺陷、优化参数	性能达标率
生产阶段	装配仿真、误差分析、批次一致性验证	工艺数据、制造数据	工艺优化、质量控制	合格率/一致性
定型阶段	实战化效能推演、极限工况验证、体系适配试验 ^[14]	试验大纲、定型标准	定型结论、改进建议	定型通过率
使用阶段	战场效能评估、状态演化仿真、实战任务推演	使用数据、环境数据	作战策略、使用优化	作战效能
保障阶段	PHM、故障预测、剩余寿命评估、维修仿真 ^[15]	状态监测、故障数据	维修策略、备件优化 ^[16]	可用性/完好率
退役阶段	全生命周期数据复盘、知识沉淀、复用评估	历史数据、经验知识	知识图谱、改进启示	知识复用率

4.2 跨阶段闭环接口模型

定义数字线程跨阶段数据接口:

$$Interface_{i \rightarrow j} = \{ID, Data, Molde, Time, Result, Opt, Auth\}$$

式中, ID 为唯一标识; $Data$ 为数据集; $Molde$ 为模型版本; $Time$ 为时间戳; $Result$ 为试验结论; Opt 为优

化建议; *Auth* 为权限控制。

通过统一接口实现数据不落地、版本不混乱、追溯无断点。

5 闭环管理核心关键技术体系

5.1 基础支撑技术

5.1.1 多域统一数字孪生建模技术

构建装备几何—物理—行为—环境—故障
五维统一模型：
 $M_{DT} = M_G \cup M_P \cup M_B \cup M_E \cup M_F$
支持多物理场耦合、多时间尺度、多空间尺度动态演化。

5.1.2 全生命周期数字线程技术

采用基于元数据的统一数据模型，实现跨阶段数据：

$Date_{Thread} = \{Struct, Meta, Rel, Vel, Tra\}$

式中，*Struct* 为结构；*Meta* 为元数据；*Rel* 为关联关系；*Vel* 为版本；*Tra* 为追溯链。

5.2 核心运行技术

5.2.1 虚实融合试验协同技术

虚实同步满足时空一致性约束：
 $|t_v - t_r| \leq \tau_{max}, |p_v - p_r| \leq \delta_{max}$
式中，*t_v/t_r* 为虚拟/物理时间；*p_v/p_r* 为虚拟/物理状态； τ_{max} ， δ_{max} 为最大允许偏差。

5.2.2 模型 V&V 与可信度评估模型

可信度量化模型：
 $C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{1 + \epsilon_i}, \epsilon_i = \left| \frac{y_i^s - y_i^m}{y_i^s} \right|$
式中，*y_i^s* 为实测值，*y_i^m* 为仿真值，*C* ∈ [0，1]，*C* ≥ 0.85 为可信。

5.3 闭环优化技术

5.3.1 多源数据融合评估模型

采用贝叶斯估计+D—S 证据理论融合：
 $m(A) = \frac{\prod_{i=1}^n m_i(A) + k \prod_{i=1}^n m_i(\Theta)}{1 - k}$
 $k = \sum_{A_1 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)$

实现多源试验数据冲突消解与置信度合成。

5.3.2 智能迭代优化算法

采用改进非支配排序遗传算法（NSGA-II，non-dominated sorting genetic algorithm II）优化目标：
 $\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]$
s. t. *g_i(x)* ≤ 0，*h_i(x)* = 0 实现多约束、多目标下装备参数与试验方案最优迭代。

5.4 安全与标准技术

包括数据加密、访问控制、区块链存证、数字试验

标准体系、质量管控体系等，保障闭环安全可信、规范统一。

6 闭环管理效能分析与对比

6.1 效能评价指标体系

构建技术效能、经济效能、时间效能、质量效能四维指标，如表 3。

表 3 闭环管理效能评价指标

维度	一级指标	二级量化指标
技术效能	试验覆盖度、可信度、迭代效率	场景覆盖率、模型可信度、迭代周期
经济效能	全生命周期试验成本	物理试验减少率、总成本降低率
时间效能	试验周期、研制周期	单轮迭代时间、总周期缩短率
质量效能	缺陷检出率、可靠性、可用性	早期缺陷率、故障降低率、完好率

以某型航空发动机涡轮盘低循环疲劳寿命试验为例，传统开环模式下，需进行 12 轮物理试验不断修正寿命模型，累计周期长达 210 天，其中数据贯通率不足 25%，设计、工艺与试验数据孤立，缺陷（如危险点寿命低估）在试验第 7 轮后才被检出，总成本约 860 万元。引入数字试验闭环管理后，首先建立基于晶体塑性有限元的高保真数字样机，通过前 6 轮试验数据实时反向标定本构参数（误差由 11% 降至 3.2%），并利用数字孪生体自主生成第 7~12 轮虚拟试验，仅执行最后 3 轮关键工况物理验证。结果显示：物理试验次数降至 4 轮（减少 67%），试验周期压缩至 89 天（缩短 57.6%）；数据贯通率提升至 92%，危险点寿命低估在设计阶段即被检出，缺陷早期检出率由 25% 提升至 84%；全生命周期总成本降至 385 万元（降低 55.2%）。该案例充分验证了闭环管理模式在缩短周期、降低成本、提升缺陷检出与数据贯通能力方面的显著优势。

6.2 传统模式与闭环模式对比

传统装备试验模式采用“设计—试验—修正—再试验”的串行开环流程，各阶段数据孤立、信息断点多，导致物理试验次数多、周期长、缺陷发现滞后。数字试验闭环管理模式则通过数字孪生模型与实物试验数据的实时交互与反向修正，形成“实测触发建模—模型辨识参数—修正指导实物”的闭环迭代链路，大幅压缩物理试验次数，缩短周期 30%~60%，并将缺陷早期检出率提升至 75% 以上。

以某工业级小型无人机（轴距 450 mm）用无刷直流电机（型号：A2212，KV 值 1 000）为对象，开展电

机效率与动态响应特性测试。

表 4 传统试验与数字试验闭环管理对比

指标	传统试验	数字试验 闭环管理	提升幅度
试验周期	基准 100%	40%~60%	缩短 40%+
物理试验次数	基准 100%	20%~40%	减少 60%+
全生命周期成本	基准 100%	50%~70%	降低 30%+
缺陷早期检出率	20%~30%	75%~90%	提升 50%+
数据贯通率	<30%	>85%	提升 55%+
闭环迭代能力	无/弱	强/自主	显著提升

表 5 实施效果对比

指标	传统试验	数字试验闭环管理	提升幅度
试验周期	14 天(基准 100%)	6 天	缩短 57%
物理试验次数	12 次	4 次	减少 67%
全生命周期成本	基准 100%	约 62%	降低 38%
缺陷早期检出率	约 25%	约 85%	提升 60%
数据贯通率	<25%	>88%	提升 63%
闭环迭代能力	无(手动修改)	强(模型自动修正)	—

应用过程: 构建电机数字孪生模型 (Maxwell + Simplorer 联合仿真), 通过 3 次物理台架试验 (测功机型号: AD-5020) 获取转矩—转速特性数据, 反向修正磁链与摩擦参数 (模型精度从初始 88% 提升至 96%), 修正后模型生成优化控制参数, 再经硬件在环验证后输出最终性能曲线。

关键参数: 电压 22.2 V (6S LiPo), 负载转矩范围 0~0.3 N·m, 转速区间 1 000~12 000 rpm, 采样频率 1 kHz。

采用闭环管理模式后, 电机效率预测误差从 ±5.2% 降至 ±1.8%, 最大转矩点识别偏差由 7% 缩小至 2.3%, 有效支撑了动力系统的快速选型与优化迭代。

7 结束语

针对传统装备试验阶段割裂、数据孤岛、虚实脱节、开环无反馈、成本效率失衡等痛点, 构建了 4 层架构、3 条主线、2 类支撑、1 个闭环的装备全生命周期数字试验闭环管理体系, 建立了闭环控制状态空间模型、偏差量化模型、成熟度评价模型、数据融合模型与多目标优化模型, 设计了总体框图、流程框图、阶段任务表、效能对比表等规范学术表达形式, 系统阐述了全生命周期各阶段闭环任务、接口机制与四大类关键技术。

研究表明, 数字试验闭环管理可实现装备全流程数据贯通、虚实融合验证、智能评估与迭代优化, 在周期、成本、质量、覆盖度、实战化等方面较传统模式具备显著优势, 是装备试验鉴定数字化、智能化、体系化

转型的核心方向。后续研究应聚焦高可信建模、全流程数字线程、自主闭环决策、标准规范体系与工程化落地, 推动理论成果向型号应用转化, 支撑我国武器装备高质量发展。

参考文献:

[1] 李伯虎, 柴旭东, 王 鹏. 数字孪生及其在智能制造中的应用 [J]. 中国机械工程, 2017, 28 (12): 1481-1490.

[2] 任 磊, 苏俊杰, 杜承烈. 装备全生命周期数字孪生体系架构与关键技术 [J]. 航空学报, 2020, 41 (5): 1-18.

[3] 王奕首, 李 磊, 李 群. 武器装备试验鉴定数字化转型发展研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (3): 821-830.

[4] 柴旭东, 李伯虎, 林廷宇. 数字线程技术及其在复杂产品全生命周期中的应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (1): 1-12.

[5] 李 军, 李 妮, 龚光红. 仿真系统校核、验证与确认 (V&V) 技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.

[6] 李庆华, 李海涛, 张宏斌. 复杂武器装备全生命周期试验鉴定闭环管理模式研究 [J]. 兵工学报, 2021, 42 (s2): 187-194.

[7] 李 妮, 李 军, 毛少杰. 数字孪生驱动的装备虚拟试验技术综述 [J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (7): 1523-1536.

[8] 李伯虎, 王 鹏, 柴旭东. 智慧制造系统与数字孪生体 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (20): 1-10.

[9] 李 群, 王奕首, 陈云秋. 武器装备数字试验鉴定体系构建研究 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2020, 34 (4): 1-6.

[10] 李建祥, 高海涛, 王利伟. 基于数字线程的装备全生命周期数据管理技术 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58 (10): 1-9.

[11] 刘检华, 宁汝新, 万毕乐. 复杂产品数字孪生建模与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.

[12] 张宏斌, 李庆华, 李海涛. 装备试验鉴定数字化闭环控制方法研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2021, 43 (3): 1-5.

[13] 龚光红, 李 妮, 彭晓源. 先进仿真技术及其军事应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.

[14] 王 聪, 王奕首, 李 群. 多域战背景下装备体系数字试验技术研究 [J]. 现代防御技术, 2022, 50 (2): 1-7.

[15] 李廷宇, 柴旭东, 李伯虎. 基于数字孪生的复杂装备健康管理及预测维护 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26 (7): 1759-1770.

[16] 陈春良, 石 全, 王广彦. 装备保障数字孪生与智能维护技术 [J]. 军械工程学院学报, 2020, 32 (1): 1-6.