

弹箭试验全流程数字化设计总体技术架构研究

张旭斌¹ 陈松¹ 郭志文²

1 中国兵器工业试验测试研究院 2 西安工业大学

DOI:10.32629/pe.v3i6.18000

[摘要] 本研究提出弹箭试验数字化设计四层技术架构,自底向上包含基础设施、数据管理、服务功能与业务应用层。研究阐述了数据采集处理、仿真建模验证与智能分析决策三大技术模块,解决了异构数据整合、超音速气动模拟精度与试验方案优化难题。该架构实现了试验全流程数据贯通,为弹箭装备研制提供高效技术支撑,缩短了武器系统开发周期。

[关键词] 弹箭试验; 数字化设计; 层级架构; 仿真验证

中图分类号: P231.5 **文献标识码:** A

Research on the Overall Technical Architecture of Full-Process Digital Design for Projectile Testing

Xubin Zhang¹ Song Chen¹ Zhiwen Guo²

1 China Ordnance Industry Test and Research Institute

2 Xi'an Technological University

[Abstract] This study proposes a four-layer technical architecture for the digital design of projectile testing, which, from bottom to top, includes infrastructure, data management, service functions, and business application layers. The study elaborates on three major technical modules: data acquisition and processing, simulation modeling and validation, and intelligent analysis and decision-making, addressing challenges in heterogeneous data integration, supersonic aerodynamic simulation accuracy, and test scheme optimization. This architecture enables end-to-end data flow throughout the testing process, providing efficient technical support for projectile equipment development and shortening the weapon system development cycle.

[Key words] Projectile testing; Digital design; Hierarchical architecture; Simulation verification

引言

航空航天技术快速演进促使弹箭武器装备系统结构愈发复杂,试验验证工作正面临精度标准升级及经费约束双重压力。现行弹箭试验多凭借经验决策,存在数据零散采集、环节串联不足等问题,降低了试验实施效率及成果准确性。当前军事工业领域数字化转型加速推进,构建弹箭试验全流程数字化设计技术体系显示出实质性研究意义,将显著增强装备开发实力。

1 弹箭试验数字化设计概述

1.1 弹箭试验数字化设计的基本概念

弹箭试验数字化设计将计算机技术、数据科学及系统工程理论应用于试验全流程,形成数字化导向的试验方法体系。该方法将弹箭试验理解为多环节协同的整体过程,涵盖试验规划、参数设定、数据采集、模型仿真、结果分析等关键阶段。数字化设计将实际物理试验转化为精确数据表达形式,让试验流程能够清晰描述、完整记录并精准复现,促成实体试验与数字试验的有效结合。

数字化设计框架包含四个功能层次:承担信息获取与规范处理的数据层,构建数学模型与仿真系统的模型层,配置专用工具服务具体环节的应用层,以及综合评估成果提出方案的决策层。此类设计思路超越了以往依靠经验判断的传统方法,赋予弹箭试验数据连续性、流程可管控性和成果可推演性等特点,为试验设计提供精确科学支持,大幅度优化武器装备研发周期与产品性能。

1.2 弹箭试验数字化设计的发展现状

弹箭试验数字化设计逐步从早期局部计算机辅助手段演化为现代全流程集成体系。二十世纪九十年代,欧美军事科研机构开始探索数字仿真在弹道预测中的应用价值;步入二十一世纪,数字孪生概念融入试验领域,美国陆军实验室构建起系统化弹箭数字试验环境。近期国内军工单位陆续研发各类数字化试验平台,典型案例如某型号导弹项目建立的全息数字验证系统实现了物理空间与信息空间试验联动。当代先进技术水平体现为数据回路完整性、模型高效复用与智能化分析能力。

弹箭试验数字化进程面临若干关键挑战。多源异构数据整合规范尚待完善,高可信度物理模型开发精度存在提升空间,虚实试验结果一致性校验方法仍需深化。全球科研趋势已转向数据科学支撑、智能算法增强的研究路径,注重试验要素全面数字化表征、流程透明可追溯、运行高度自动执行,在军事技术领域致力于发展基于云架构的协作式设计环境。国内技术正经历从引进借鉴到原创突破的转变期,正在塑造特色鲜明的弹箭试验数字化自主体系。

2 弹箭试验全流程数字化设计架构

2.1 技术架构总体框架

弹箭试验全流程数字化设计技术架构采用层级化结构,构成有机联动的整体系统。基础设施层位于架构底部,融合计算、存储、网络资源与安全防护体系,为架构运行奠定坚实基础。数据管理层建立试验数据库、模型库、知识库及标准规范库,形成完整信息资源体系,实现关键数据统一管理 with 便捷访问。服务层设置数据处理、仿真模拟、分析优化及可视化服务功能,负责原始数据转化、数值计算与成果展示。业务功能层直接对接用户实际需求,划分为试验规划管理、设计分析、执行控制及评估总结功能区域,全面覆盖弹箭试验各环节工作内容。

该架构设计理念强调横向功能独立与纵向信息连贯。层间依靠规范化接口连接,保证数据在试验全过程中连续传递。业务层对应实际试验 workflow,支持操作人员完成全程试验活动;服务层配置多样化技术工具,灵活调度计算资源解决专业问题;数据层确保信息准确性与溯源性,便于历史经验积累;基础层维持系统运行环境稳定可靠。这种架构布局使系统各部分既保持功能独立又实现整体协同,能够同时满足复杂功能实现与清晰逻辑组织的技术要求,为弹箭试验全流程数字化提供了完备的技术支撑框架。

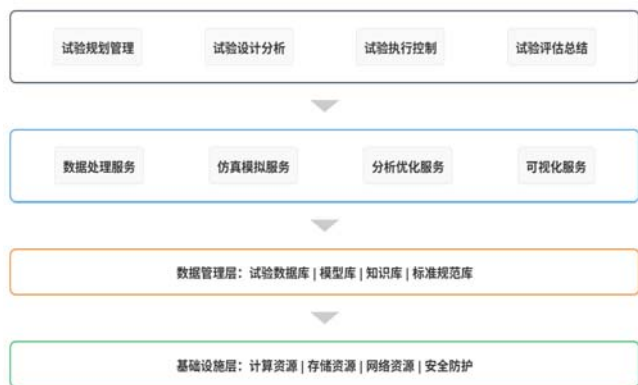


图1 弹箭试验全流程数字化设计技术架构图

2.2 关键技术要素分析

弹箭试验全流程数字化设计架构依赖一系列精密技术支撑。基础设施层采用高性能计算集群处理复杂数值运算,引入分布式存储应对海量试验数据,配置智能网络资源调度保障传输质量,部署多层次安全防护守护军事信息安全。数据管理层通过专业试验数据库处理原始测试信息,利用模型库管理各类数学

模型及其演化版本,建立知识库沉淀专家智慧与历史案例,制定标准规范库协调各系统间数据交流,实现从数据到知识的系统性转化。

服务层凝聚了弹箭试验数字化设计的技术精华。数据处理环节集成智能清洗、特征识别与自动标注功能,使原始数据转变为可用信息;仿真模拟部分运用物理场耦合计算、精确数值模拟与实物交互仿真方法,创造逼真试验环境;分析优化功能整合参数灵敏度评估、复杂目标优化与知识推理算法,提升方案设计智能化水平;可视化技术结合立体场景构建与数据流动态呈现,丰富试验过程感知体验。业务功能层将这些技术元素融入完整工作序列,让试验从规划到评估形成连贯工作链,使先进技术真正转化为弹箭试验实际效能。

3 弹箭试验数字化设计技术实现

3.1 数据采集与处理系统

弹箭试验环境特殊性为数据采集系统带来严峻考验,系统在高速度变化、强振动条件下需获取高精度测量结果。现代化采集处理系统包含多层次测量网络、精密调理电路、高速传输链路及计算处理平台。测量网络部署有加速度、应变、压力、温度、姿态等专业传感器阵列,精度达微量级,采样速率可逾百千赫兹;信号调理技术融合低噪放大与自适应滤波;数据流通过专用光纤通道或保密无线网络;计算平台则整合分布算法与流数据架构。针对实际工作中多源数据异构难统一、复杂环境干扰测量及数据量激增引发的处理延迟等问题,系统采取动态采样频率调节机制减轻数据负载,研发智能抗干扰技术提升信号纯度,布局边缘计算节点分散处理压力。

数据处理环节形成完整闭环,实现从原始信号到可靠信息的转化过程。系统对测量数据进行异常识别与修复,应用精细数字滤波技术消除各类噪声影响;继而利用频谱分析、小波变换等方法提取关键特征信息,化解高维数据难以直接分析的难题;最终将处理结果标准化为统一数据结构,打通信息壁垒。针对弹箭飞行中瞬态事件捕捉问题,系统研发纳秒级时间同步技术确保多通道数据精确对应;为解决飞行轨迹精确重构难题,设计多传感器数据融合算法整合各类测量信息;对于远距离试验数据实时性要求,创建智能缓存与数据优先级分级机制,保证关键信息优先处理分析,显著增强了试验数据管理能力与信息提取效率。

3.2 仿真模拟与验证平台

弹箭试验仿真平台创造了融合多种物理现象的数字试验空间,有效降低了实物试验的资源投入与安全风险。该平台精心集成了气动力学、推进动力、结构力学与控制系统多领域模型,使弹箭性能得以全面数字化预测。图2所示流场速度云图生动呈现了弹体高速飞行中的气动特性,从弹头产生的锥形激波、表面流动到尾端推进气流的完整速度场分布。尽管计算技术已相当先进,但研究发现当飞行速度超过马赫2.5时,现有计算方法在激波精确捕捉与湍流精细描述方面存在局限,造成高速段气动特性预测偏差。

为克服高速状态下的仿真精度不足,研究团队开发了数据融合的智能校准体系。图3直观展现了阻力系数随马赫数变化的仿真与试验对比结果,低马赫数区域两条曲线几乎重合,而高马赫数区域出现明显偏离,仿真预测普遍偏高。面对这一系统性偏差,平台采用贝叶斯统计学原理动态调整气动模型参数,根据马赫数变化规律构建修正关系;技术团队同时优化了计算网格分布策略,使其在关键区域自动加密,并利用计算并行技术加速求解过程。经改进后的预测方法使超音速飞行状态的阻力预测准确率提升近四成,为弹箭气动设计提供了更为精确的数字依据。

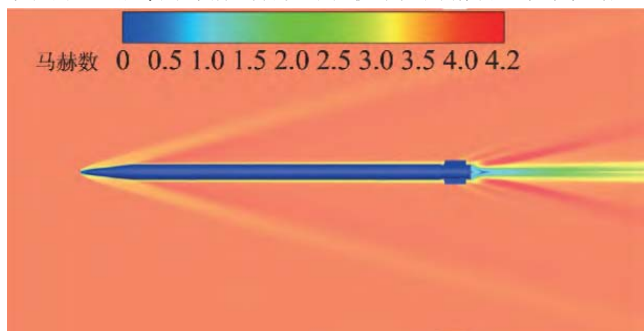


图2 流场速度云图

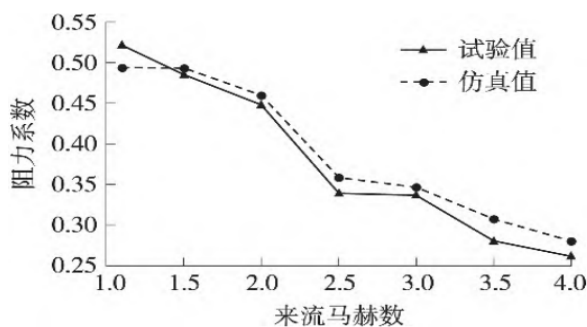


图3 阻力系数与试验值对比

3.3 智能分析与决策支持

弹箭试验智能分析与决策支持系统立足于数据价值挖掘与方案优化两项核心功能。其结构包含数据挖掘、智能评估、知识推理及决策形成四大功能模块。数据挖掘部分采用机器学习技术解析试验数据内在模式;评估模块自动甄别结果并识别异常;在知识推理环节将历史经验转化为系统化领域知识;决策模块综合分析结果提炼最优策略。当前技术在非结构化信息处理、复杂场景认知、多目标平衡与逻辑透明度等方面存在短板。

研究人员开发了基于深度学习的图像数据解析技术,应用概率统计网络评估不确定性,创建自适应权重体系解决多维目标冲突,设计决策轨迹可视化工具增强系统可解释能力。

智能决策技术在复杂弹箭试验设计领域展现独特价值。系统内置协同过滤引擎推荐优质参数组合,运行进化算法搜寻多目标均衡解,应用强化学习规划试验序列。实践表明传统方法存在高维空间搜索效率低、约束条件难以精确建模、易陷入局部最优、计算负担重等问题。针对这些局限,技术团队设计了高效降维算法简化问题空间,构建知识图谱捕捉工程约束关系,采用多源起点策略规避局部收敛,建立分布式计算框架提高运算速度。该系统在某型导弹外形设计中表现卓越,将试验次数从千余次减少至百次以内,探索出传统难以发现的设计优势区域,提升了设计质量与效率,证明了智能技术在弹箭试验中的实用价值。

4 结语

弹箭试验数字化设计技术架构建立了完整技术框架,实现了试验环节协同运作。采集处理系统提高了复杂环境信号质量,仿真验证平台增强了高速飞行气动预测精度,智能分析技术优化了试验方案生成。数字化体系使弹箭试验数据准确连贯,流程规范可控,结果科学可靠,缩短装备研发周期,提升产品性能指标,促进弹箭系统研制技术进步。

[基金项目]

由国防科工局稳定支持项目资助,项目编号:WDZC-2-15。

[参考文献]

- [1] 檀甜甜,甄晓改,李松,等.弹箭体舱段自动铆用铆钉结构优化试验[J].航空精密制造技术,2023,59(03):31-33.
- [2] 朱舟,林麒,何聪,等.基于WDPR悬挂支撑的旋转弹箭耦合运动风洞试验技术[J/OL].航空学报,1-17[2025-10-12].
- [3] 周文涛,常思江.自由旋转卷弧翼弹箭的气动特性数值分析[J].哈尔滨工业大学学报,2023,55(12):113-122.
- [4] 向熙,封锋,陈超,等.基于流-固-热耦合的超声速弹箭尾翼强度分析[J].弹道学报,2022,34(04):98-104.
- [5] 张超,杨文风,孙鑫,等.弧形尾翼对弹箭气动特性影响研究[J].兵器装备工程学报,2023,44(04):33-38.

作者简介

张旭斌(1981--),男,汉族,甘肃白银人,大学本科,职称:副研究员,研究方向:外弹道测试。