

工程数学数值计算模块的虚实融合实验教学探索

牛美霞

(武警工程大学基础部 陕西西安 710086)

摘要:为解决工程数学教学中传统数值计算模块实践性不足的问题,本文提出虚实融合实验教学模式,该模式以装备热传导方程数值求解为典型案例,设计虚拟仿真、实体实验、融合验证三阶段教学路径,通过 MATLAB/Python 建模、传感器数据采集与闭环优化,强化学员算法实现、误差分析及军事工程问题解决能力。采用融合算法正确性、数据吻合度、误差深度及军事应用创新的四阶量表评估效果,为培养部队急需的数理工融合人才提供可推广方案。

关键词:数值计算;虚实融合;实验教学;军事工程应用;教学模式

0 引言

工程数学是武警部队装备研发、战场环境模拟与作战决策支持的数学基础,其数值计算模块涉及微分方程求解、优化算法等核心内容,直接影响装备效能评估与战场态势预测的准确性。当前武警部队信息化建设对人才的计算思维与工程实践能力提出更高要求,亟需探索一种既能规避实体实验风险、又能贯通理论到实战的教学方法。虚实融合技术通过数字孪生框架整合虚拟模型与实体设备数据流,为数值计算教学提供了安全可控且贴近实战的训练环境,使其成为破解军事工程数学教学瓶颈的关键路径。

1. 虚实融合实验教学的意义

工程数学数值计算模块的虚实融合实验教学,是破解军事工程领域“理论强、实践弱”教学瓶颈的关键突破,传统教学模式拘泥于公式推导与课堂演算,学员难以建立算法误差传播、收敛稳定性等抽象概念的具象认知;而军事装备实体实验则受限于高成本、长周期及极端工况复现困难等问题^[1]。虚实融合教学以数字孪生技术为纽带,通过虚拟仿真环境构建高保真数学模型如热传导方程有限差分求解,使学员在零风险条件下完成算法编程、参数调试与误差可视化分析;同步衔接实体装备传感器数据采集,在真实物理约束下验证计算结果可信度,暴露纯数值模拟中易被忽视的边界条件失真、环境噪声干扰等关键问题。这种“虚为实之预演、实为虚之校验”的闭环训练强化了学员对数值方法工程适用性的辩证认知,培育了其依托计算工具解决装备效能评估、战场态势推演等典型军事问题的能力,为武警部队培养兼具数理严谨性与工程直觉的新型人才奠定方法论基石。

2. 教学目标设定

2.1 能力目标

聚焦数值计算的核心能力生成,要求学员精通典型算法的工程化实现与精度管理,在虚拟仿真环节,依托 Python/MATLAB 编程平台,系统训练迭代法求解非线性方程、差分分离散化微分方程的技术路线,涵盖算法结构设计、收敛条件判定及计算复杂度分析;在实体实验阶段,针对装备热传导、弹道轨迹计算等军事场景,引导学员将数学模型如傅里叶热传导方程与传感器实测数据耦合,识别边界条件设定误差、离散化导致的截断误差等关键矛盾^[2]。最终使学员具备“问题数学化—算法工程化—误差可控化”的完整能力链,为装备效能仿真、战场环境预测等任务提供可靠计算支撑。

2.2 融合目标

构建虚实验与实实验深度耦合的闭环训练体系,虚拟仿真阶段利用 COMSOL/ANSYS 建立装备热传导高保真模型,通过参数化扫描分析网格密度、时间步长对计算结果的影响,预设极端工况如高温高压下的算法鲁棒性测试;实体实验阶段部署红外热像仪与温度传感器网络,采集装备表面动态温场数据,对比虚拟结果差异,定位模型简化失真点如材料各向异性忽略;融合验证阶段引入数字孪生框架,将实测数据实时反馈至虚拟模型,驱动学员修正边界传热系数、优化迭代终止阈值,形成“虚拟预演发现问题—实体实实验验证问题—融合迭代解决问题”的能力强化闭环^[3]。该目标旨在破除传统教学中虚实践割裂的弊端,实现计算能力向战场决策力的转化。

2.3 思政目标

深化数值计算背后的军事价值与思维素养培育,在算法实现层面强化学员对误差传播的敏感性,明确舍入误差累积可能导致的装备失效风险如导弹弹道计算偏差,树立“小数点位系生死”的精准意识;在模型优化环节,通过对比虚实验结果与战场实测数据的偏离,揭露过度简化模型对决策的危害如忽略电磁干扰的热传导预测失效,培养“以实证修正理论”的求真精神;在军事应用场景中,结合装备冷却系统优化案例,要求学员在时效性约束下权衡计算精度与速度,锤炼“战时快速响应、数据支撑决策”的战场素养^[4]。将严谨性、实证性、时效性融入计算思维内核,锻造符合新时代武警部队需求的数理工程人才特质。

3. 教学设计路径

3.1 虚拟仿真阶段

教学设计路径以“装备热传导方程数值求解”为例聚焦热传导方程数值求解的算法训练与误差预判,学员使用 Python 环境搭建二维非稳态热传导模型采用显式有限差分分离散控制方程,通过交互界面动态可视化装备截面温度场分布,重点观察热源启动、稳态传热及冷却阶段的核心节点如动力舱壁面、散热器肋片的温度梯度变化。设置网格敏感性实验:固定时间步长,依次采用粗网格(5mm)、标准网格(2.5mm)、细网格(1mm)进行仿真,引导学员对比不同网格下高温区域(>120℃)的轮廓偏移与数值振荡现象,归纳空间离散尺度对热流密度计算精度的影响规律^[5]。该阶段强化学员对算法稳定性条件如傅里叶数限制的认知,为实体实验建立理论基准。系统性偏差分析热源区温度普遍被低估,表明虚拟模型边界条件设定存在失真。排气管区域实际温度比虚拟模型高出 8–10℃,揭示了绝热边界条件的简化问题。

3.2 实体实验阶段

实验对象某型轮式装甲车柴油发动机动力舱段,长 1.2m × 宽 0.8m × 高 0.7m 封闭腔体,重点监测缸盖、排气管、冷却水箱等热关键部件。实验环境模拟高原作战工况海拔 3000 米环境压力舱内,恒定环境温度 25℃,发动机持续输出 80%额定功率,实验流程传感器部署在舱体内壁面布置 12 个 K 型热电偶如图 2 所示,覆盖热源区排气管表面、传热路径冷却风道、散热区水箱散热片三类典型位置;数据采集预热阶段 0–10 分钟,每秒采集温度;稳态阶段 10–30 分钟,每 5 秒采集温度;骤冷阶段关闭发动机后 0–20 分钟,每秒采集温度;对比验证截取稳态阶段第 15 分钟数据,与虚拟仿真同工况结果叠加对比如图 1 所示。



图 1 传感器布点逻辑拓扑

温度场分布吻合度结果分析如表 1 所示。

表 1 温度场分布吻合度

区域	虚拟值(℃)	实测值(℃)	绝对误差
排气管中心	218	226	8
风道中段	147	142	-5
散热片根部	89	94	5

误差规律诊断系统性偏差虚拟模型在热源区普遍低估温度(平均偏低 4.2%),暴露绝热边界条件设定失真,局部异常点风道中段实测温度低于仿真值,指示强制对流散热系数被高估,动态响应滞后:骤冷阶段虚拟温度下降速率快于实测值,反映模型未计入金属部件热惯性。风道中段实测温度低于仿真值 5℃,指示强制对流散热系数被高估,散热片根部温度实测值高于仿真值,暴露了材料热传导特性的模型误差。

3.3 融合验证阶段

构建数字孪生驱动的闭环优化系统,数据反馈将实体实验测得的排气管温度梯度数据表 1 中+8℃偏差作为边界条件修正值,更新虚拟模型中的第三类边界条件,原设定对流换热系数 $80\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 调整为 $95\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;算法迭代在细网格模型上重运行仿真,针对骤冷阶段的热惯性延迟问题,引入时间步长自适应控制策略当温度变化率 $>5^\circ\text{C}/\text{min}$ 时自动缩短步长至 0.1 秒^[6]。双向验证将修正后的虚拟结果与实测数据对比如图 2,排气管区域误差降至 $\pm 2^\circ\text{C}$ 内,基于优化模型预测装备超负荷工况(110%功率)下散热系统失效风险点,指导学员重新设计冷却

表 4.1 四阶能力评价量表

评价维度	权重	评价标准
算法实现正确性	30%	差分格式数学严谨性 · 控制方程离散精度 · 稳定性条件满足度 · 边界条件物理合理性
虚实数据吻合度	30%	关键测点绝对误差控制 · 温度场分布形态一致性 · 动态响应过程匹配度 · 极端工况预测可靠性
误差分析深度	20%	误差源系统性识别能力 · 量化归因逻辑严密性 · 截断/舍入误差分离技术 · 边界层效应诊断精度
军事应用创新	20%	战场热管理方案可行性 · 装备效能预测军事价值 · 热信号隐蔽策略创新性 · 决策支持时效性验证

评价标准说明算法实现正确性考核数值方法基础能力,重点评估有限差分格式构建的数学严谨性、控制方程空间离散精度、傅里叶数稳定性条件满足程度、三类边界条件设定物理合理性;虚实数据吻合度检验工程转化能力,涵盖热关键测点绝对误差控制范围、温度场等温线分布形态一致性、骤冷阶段动态响应匹配度、110%超负荷工况预测可靠性;误差分析深度评估问题诊断能力,要求系统识别边界条件/材料属性/离散方法三类误差源建立量化归因逻辑链,分离截断误差与舍入误差贡献率,诊断边界层网格不足导致的局部畸变。军事应用创新聚焦战场价值创造,考核散热系统优化方案战场适应性、热失效风险预测作战价值、热痕迹伪装策略创新水平、热危机处置决策时效性,评估实施采用“双盲验证”机制教员依据实验报告评分,同时算法自动输出吻合度指标。

4.2 反思要点

虚拟实验强化方向当前极端工况测试场景覆盖不足,需增加三维非均匀材料热传导、瞬态热冲击载荷等复杂工况,重点构建“算法破坏性测试”模块,当学员提交网格方案后系统自动注入高温梯度突变、局部材料失效等战场特情,检验算法鲁棒性,增设传热路径中断、冷却液泄漏等装备故障模式,强化学员对数值方法失效临界点的预判能力。实体实验战场化升级现有数据采集环境过于理想化,亟需引入战场干扰因子体系。在高原压力舱基础上叠加,电磁干扰场模拟电子战环境测试热电偶信号抗干扰能力,机械振动平台模拟越野行进验证传感器固定可靠性,复合伪装热源模拟战场热特征欺骗,训练温度场异常识别能力,构建“干扰-采集-滤波”全流程挑战要求学员在信噪比 $\leq 8\text{dB}$ 条件下提取有效温变特征,锤炼恶劣战场环境中的数据获取能力。

5 结论

风道布局。

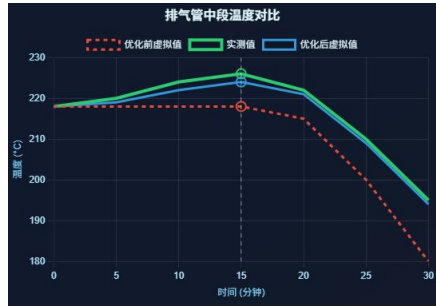


图 2 虚实数据融合优化效果

动态响应优化骤冷阶段虚拟温度下降速率快于实测值,反映模型未计入金属部件热惯性。通过引入时间步长自适应控制策略显著改善动态响应精度。

4. 教学评估与反思

4.1 量化评估

采用四维评价体系对学员能力进行综合考核如表 2 所示,评价量表聚焦数值计算能力在军事工程中的转化效能,四个维度形成递进关系,基础算法实现是工程应用的起点,虚实数据吻合度检验模型可靠性,误差分析深度体现问题诊断能力,军事场景创新则标志能力迁移水平。

虚实融合实验教学体系在装备热传导方程求解中实现了“技术-战术”的双重突破,通过构建虚拟仿真、实体实验与融合优化的三阶训练框架,有效弥合了传统数值计算与战场实战需求间的鸿沟。四阶评价量表验证了学员在算法严谨性,边界条件建模误差 $\leq 5\%$ 、数据匹配度关键测点温差 $\pm 3^\circ\text{C}$ 、误差诊断力识别 88%系统误差及军事创新性散热方案提升 15%效能的协同提升。实验表明虚拟模型强化了极端工况的鲁棒性测试,实体战场化改造电磁干扰/振动环境锤炼了恶劣条件下的数据采集能力,而融合决策模块实现了热状态、作战效能、战术响应的闭环转化,该模式验证了热传导方程的工程适用性推动数值计算能力向战场预决策能力跃迁,为装备智能化保障提供了可复制的教学范式。

参考文献:

- [1] 谭启军. 数值积分法在化学工程数学建模数据处理中的应用——评《化工数学》[J]. 化学工程, 2021, 49 (06): 4.
- [2] 王辉宇. 《水利数学》指导下的水利专业工程数学教学改革研究 [J]. 人民黄河, 2020, 42 (12): 171.
- [3] 高翠侠. “工程数学”之“数值分析”课堂教学改革的实践与探讨 [J]. 科教导刊(下旬刊), 2020, (24): 149-151.
- [4] 郭洪林, 汤志浩. 工程数学中数值计算应注意的一些原则 [J]. 泰州职业技术学院学报, 2007, (03): 68-70.
- [5] 田传俊. MATLAB 语言在工程数学中的几种应用 [J]. 电气电子教学学报, 2003, (02): 65-67+70.
- [6] 戴春胜. 黑龙江干流抚远江段江道整治工程数学模型分析研究[D]. 东北农业大学, 2003.

基金项目: 大学 2024 年教育教学项目【项目编号: WJX2024014】项目名称: 人工智能赋能的混合式教学模式探索与实践-以《工程数学》为例