



CHU 长安风领 (WindVanguard)

基于国内开源软件 and 自研代理模型的
数值仿真平台

编 号: 480903

赛 题: 计算流体力学开源软件数值仿真

发榜单位: 中国空气动力学会

负 责 人: 陈瑞煜

参赛学校: 长安大学

目录

目录.....	1
1. 项目背景.....	1
1.1. 从稳态到瞬态：LES 的必选路径	1
1.2. 物理实验数据驱动的 Cs 值反演方法	3
1.3. 真实数据-数值物理的一致性框架	5
1.4. 从算例到全栈：策略与智能化构建.....	6
1.5.	6
2. 行业现状.....	7
2.1. LES 趋势与软件生态进展	7
2.2. 工程与教育需求驱动的框架转向.....	8
3. 项目思路与技术.....	11
3.1. 系统总体技术架构.....	11
3.1.1. 主控界面框架.....	12
3.2. 核心理论与技术.....	13
3.2.1. 基于物理实测数据驱动的动态 Cs 值反演机制	13
3.2.2. 数据驱动的分区赋参策略.....	21
3.2.3. 面向科普教学的轻量化交互界面构建理论.....	22
3.2.4. 基于风雷开源求解器与自研轻量化求解模块的集成架构...	22
4. 软件功能介绍.....	26
4.1. 工程模拟模块.....	26
4.1.1. 设计思路.....	26
4.1.2. 功能设计.....	26
4.2. 科普教学模式.....	29
4.2.1. 设计思路概述.....	29
4.2.2. 功能设计.....	30
4.3. 核心功能验证.....	39
4.3.1. 固定参数的局限性与全局优化.....	39
4.3.2. 动态最优 Cs 序列的揭示与验证	40
4.3.3. 数据驱动的智能分区赋参.....	41
5. 创新点.....	43

5.1. 工程模式创新.....	43
5.2. 教育科普模式创新.....	45
6. 研发历程.....	47
6.1. 团队研发历程.....	47
6.2. 团队工作情况总结.....	52
6.2.1. 技术开发与创新.....	52
6.2.2. 用户调研与反馈.....	52
6.2.3. 团队协作与研讨.....	52
6.2.4. 科普活动与社会影响.....	53
7. 团队介绍：团队成员介绍.....	54
7.1. 学生队员介绍.....	54
7.2 指导老师介绍	56
7.2. 平台资源介绍.....	61
7.2.1. 长安大学风洞实验：西北地区的重要风洞试验基地.....	61
7.2.2. 长安大学公路交通博物馆：科普、研学与展教平台.....	63
7.2.3. 长安大学公路学院：学科支撑与人才矩阵.....	63
8. 学科竞赛荣誉及科研成果.....	65
8.1. 学科竞赛荣誉.....	65
8.2. 科研与知识产权成果.....	66
8.3. 具体工程实践应用.....	67
9. 未来展望.....	68
9.1. 应用场景.....	68
9.1.1. 工程维度：从物理实验辅助到工程决策的核心支撑.....	68
9.1.2. 科普维度：构建交互式科学教育新范式.....	69
9.2. 优化方向.....	69
9.2.1. 分区赋参的自适应优化.....	69

1. 项目背景

1.1.从稳态到瞬态：LES 的必选路径

随着“交通强国”等国家战略深入推进，我国大跨径桥梁、特大跨通道与综合交通枢纽持续上马，工程规模与复杂度空前提高。面对更高的安全冗余、更长的服役寿命和更严的全生命周期成本约束，交通基础设施的气动设计正在从经验统计与稳态评估，加速迈向瞬态机理解析与高保真仿真。在这一背景下，通过优化结构外形及其附属构件（如主梁断面、风障、导流板、护栏与风屏）以提升气动性能与抗风安全性，已成为工程设计的核心环节。

传统基于稳态或时均思想的评估方法（如纯经验法或单一 RANS 模型）在处理强分离、涡脱落、非定常耦合与极端、特异风时常显不足：一方面难以准确再现能量在不同尺度间的级联过程，另一方面难以为减振构造与控制策略提供可验证的瞬态依据。与之相比，大涡模拟（LES）在解析大尺度湍动结构、捕捉非定常气动响应方面具有天然优势，能够在工程可承受的算力成本下显著提升压力脉动、升阻力系数、分离点与能谱一致性的预测精度，为形态优化、构造设计与运行安全评估提供更可靠的依据。

基于此，本项目选择 LES 作为核心流场解析手段，并在 Smagorinsky - Lilly 模型框架下开展 CS 参数最优反算与寻优，以实现在既定网格与时间步条件下的精度一成本最优解，服务于新型交通基础设施的高质量建设与安全运营。



图 1 中共中央、国务院印发的《交通强国建设纲要》

当前，计算流体力学（CFD）领域存在雷诺平均（RANS）与大涡模拟（LES）两类主流模型，其根本区别在于对湍流脉动的处理策略。RANS 模型通过对所有湍流尺度进行时间平均，侧重于获取流场的时均统计量，其优势在于计算效率高，适用于对**宏观整体**性能的快速评估。然而，交通基础设施的气动选型，其核心诉求并非仅是了解整体的平均受力，而是需要深度洞察特定构件（如风障角度、检修轨道位置、导流板外形）所诱发的瞬态流动分离、旋涡生成与脱落等**局部精细化**物理现象，这些瞬态细节直接决定了关键风致响应的特性。RANS 模型在捕捉此类局部瞬态现象方面存在**先天不足**，这从根本上决定了面向构件级优化的气动选型，必须寻求具备更高时空分辨率的技术路径。

表 1 桥梁数值模拟与其他行业的技术路径对比

对比维度	桥梁数值模拟	其他行业（以航空航天为例）
核心目标	安全舒适，抑制风致振动	性能极限，追求升阻比、巡航效率
物理模型	需模拟大气边界层 钝体绕流+强流固耦合	无需大气边界层模拟 流线型绕流，弱流固耦合
验证与技术路径	风洞节段模型试验 优先二维 CFD	无特定物理验证范式 主流三维 CFD

因此，能够直接解析大尺度湍流拟序结构的大涡模拟（LES）方法，成为了满足这一特定需求的**更优解**。在 LES 框架中，Smagorinsky-Lilly 亚格子尺度模型被广泛采用，其通过引入一个关键的经验常数——**Cs 值**，来模化未被解析的小尺度湍流所引起的耗散效应。该参数的取值，直接控制着数值模拟对局部涡旋演化与能量耗散过程的刻画精度，进而成为影响选型分析结果可靠性的决定性因素。

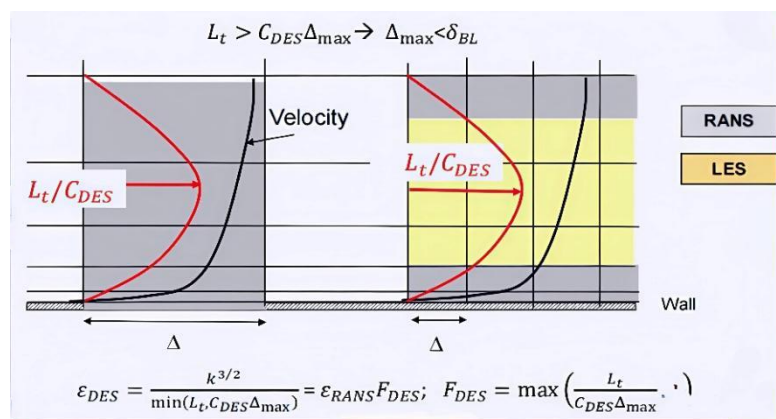


图 2 DES 模型中 RANS 与 LES 区域的过渡机制示意图

1.2.物理实验数据驱动的 Cs 值反演方法

基于上述背景，相较于侧重宏观统计特性的雷诺平均模型（RANS），能够直接解析瞬态流动结构的大涡模拟（LES）无疑是实现交通基础设施气动选型“从经验到机理、从稳态到瞬态”跃迁的必然技术路径。然而，LES 预测能力的上限，取决于对未解析小尺度湍流效应的亚格子尺度（SGS）模型能否进行准确、可验证的等效刻画。在工程实践广泛采用的 Smagorinsky-Lilly 模型中，核心参数 C_s 决定了亚格子涡黏性的大小，控制着可解析尺度向未解析尺度的能量级联与耗散过程；取值不当将导致压力脉动失真、分离点位置偏移乃至数值不稳定。因此，对 C_s 的精确标定既是释放 LES 潜能的关键，也是本项目技术攻关的焦点。

表 2 基于物理实验数据驱动的 LES 模型参数体系及其关键控制要素

参数体系类别	核心参数内容
计算网格参数体系	近壁面 y^+ 值 边界层网格 关键区域局部加密 网格质量 网格类型（结构化/非结构化）
湍流模型参数体系	Smagorinsky 常数 (C_s) 滤波宽度 (Δ) 动态模型参数（滤波器类型等） 近壁面处理（壁面函数、阻尼函数）
数值离散参数体系	时间离散 (Δt 、CFL 数、推进格式)

参数体系类别	核心参数内容
	空间离散（对流项格式等） 压力-速度耦合（算法选择、迭代次数） 求解器设置（线性求解器、收敛容差）
边界条件参数体系	入口（风速剖面、湍流模型） 出口（压力/对流出口、非反射处理） 壁面（无滑移、粗糙度模型） 远场（自由滑移、对称条件）
物理属性参数	流体物性（密度、粘度、温度） 结构参数（质量、刚度、阻尼比） 耦合参数（数据传递、时间同步）

Cs 值的选取并非一个可以任意设定的经验数字，其细微偏差会直接导致模拟结果的系统性失真：若 Cs 值过高，将引发过度耗散，抹杀关键的瞬态拟序结构动态细节，使流场呈现非物理的“过度光滑”；若 Cs 值过低，则会导致耗散不足，使得湍流能量在可解尺度内虚假积累，最终引发数值失稳。传统的 Cs 值确定方法多依赖于理论推导或研究者的经验试错，缺乏坚实的物理基准，这在处理如桥梁断面绕流这类存在强烈分离、再附着等非平衡湍流现象的复杂流动时，其局限性尤为突出。

为此，本项目摒弃了传统依赖于模型内部数学自洽性的参数确定路径，开创性地提出了一套“数据驱动的等效参数反演”方法。该方法核心理念在于，直面 Smagorinsky 模型线性涡粘性假设在描述非线性湍流能量级串时的固有缺陷，转而将 Cs 值视为一个集成的“效果补偿因子”。我们以风洞实验中获取的关键测点高精度瞬态压力数据作为不可动摇的**物理真值**，驱动经过深度二次开发的 CFD 求解器进行**逆向寻优**，从而为特定的钝体绕流工况反演计算出在物理意义上最为匹配的“**等效最优**”Cs 值。

这一技术路径的价值是双重性的。在**工程应用**层面，它首次为 LES 中的关键经验参数提供了客观、量化的标定手段，将 Cs 值的确定过程从主观经验判断转变为客观数据驱动，从而显著提升了气动选型设计中**数值仿真的科学性与可靠性**，为工程师的决策提供了更具置信度的数据支撑。在**学科发展**层面，通过反演获取的、与物理现实高度吻合的动态 Cs 序列，为深入理解复杂钝体绕流中非平

衡湍流的时空演化规律提供了全新的数据窗口，揭示了传统模型无法捕捉的流动细节，从而有力地推动了计算流体力学理论模型与工程实践在更深层次上的互动与协同发展。

1.3. 真实数据-数值物理的一致性框架

在计算流体力学的发展历程中，长期存在一种路径：通过增加模型复杂度、细化计算网格、采用更高阶离散格式来无止境地追求数值精度。然而，对于以解决真实工程问题为最终目标的桥梁风工程等领域，更具现实意义的范式是确保数值仿真能够忠实再现物理事实。单纯的数值精度若脱离物理真实的约束，往往会在复杂的非平衡流动中产生“看似收敛、却偏离实际”的结果。

本项目是一种**以物理实测为导向**的仿真哲学。我们认为，对于工程决策而言，仿真输出应在宏观统计效应与关键流动特征上与风洞/现场数据保持一致，其重要性远高于模型内部某些封闭项在数学形式上的极致精密。传统仿真路径（包括 LES 框架内更复杂的动态亚格子模型）本质上仍可能在未经验证的模型自治与优化中徘徊，难以从根本上解决模型假设与物理真实之间可能存在的系统性偏差。我们由此构建“实测、仿真、校准”的闭环，以实证数据约束模型自由度，使计算结果在可解释、可复现与可采信三方面同时达标。

因此，我们进行了**范式层面的重构**：将仿真的终极目标从“精确求解方程”转向“**精确复现实验可观测的物理响应**”。在该范式下，风洞实验获得的瞬态压力、速度等量，不再作为末端的结果比对，而被**前置为驱动仿真流程的物理基准**；模型选择与数值设置围绕这一基准展开。我们不再执着于某类亚格子应力—应变率本构的形式优劣，而是直接提出工程化问题：**在既定网格与时间步条件下，何种 C_s 取值能使 LES 在关键监测点重现实验的时程响应与能谱特征？**

这种**效果导向**的策略，将湍流闭式的不确定性，映射为**可量化的反演与拟合问题**，由此获得更强的工程鲁棒性。通过一次精细的离线反演标定，即可为特定构件建立**经实测严格校核的等效 C_s 模板**；在后续多轮设计迭代中，工程师无需反复调参试错，即可快速得到**物理可采信**的数值结果，实现成本与精度的最优平衡。

更为关键的是，在 **CFD 尚难完全替代风洞**的过渡阶段，本方法凸显现实价

值：我们并非取代实验，而是回答“**如何让高成本实测数据完成验证后实现二次增值**”。凭借该流程，一次性的风洞量测被转化为**可复用、可推广且高置信度的‘数值风洞’校准源**，显著拓展单次实验的价值边界，使 CFD 在工程全生命周期内成为**高效且可靠的辅助决策工具**，实现从“科研探索”向“**产业级赋能**”的务实跃迁。

1.4.从算例到全栈：策略与智能化构建

CFD 的核心在于通过求解控制方程，获得流场中压力、速度、涡量等物理量的定量数值解；而数值仿真则更侧重于将这些数据转化为可视化的图形、动画与交互界面，以直观呈现复杂的物理现象。本项目的价值在于，我们不仅追求仿真的**可视化效果**，更致力于深度挖掘并释放 **CFD 定量计算结果**的多维应用潜力。

为实现这一目标，我们首先充分利用了**开源求解器**的高度可定制化特性。通过深度二次开发，我们将数据反演、参数优化等核心算法嵌入式地集成到求解流程中，这不仅保证了计算过程的**物理合理性**，更构建了一条从“物理数据”到“校正参数”再到“高置信度结果”的自动化流水线。经此校正的仿真系统，其输出无论是原始的定量数据还是衍生的可视化结果，都具备了更高的工程可信度，为后续的多场景应用奠定了坚实基础。

本项目通过构建“**一体两翼**”的赋能新生态：以**数据驱动反演**的高置信度数值风洞为“一体”，奠定其工业级应用的科学基石；进而延展出赋能**工程精准设计**与驱动**科教融合普及**的“两翼”。这不仅实现了仿真工具从“经验依赖”到“物理可信”的跨越，更推动了其价值从单一的科研分析，向支撑重大工程决策与培育社会创新土壤的深刻跃迁，展现了基础软件工具在“交通强国”战略下的广阔价值外延。

2. 行业现状

2.1. LES 趋势与软件生态进展

在当下的 CFD 软件生态中，大涡模拟（LES）已成为主流求解器演进的关键赛道。开源体系 OpenFOAM 依托高度模块化与可扩展架构，在 LES 模型研究与工程落地方面占据核心位置；同时，国内外商/开源求解器（如“风雷”、APFFlow 等）也相继将 LES 作为一级能力进行集成与性能优化，形成从亚格子模型、数值格式到并行加速的较完整技术布局。该趋势实质上反映了产业界与学术界对**流动保真度**的共同诉求：传统 RANS 以时均封闭为核心，虽具计算效率与工程适用性优势，但对**涡脱落、相干结构、能谱级联**等非定常机制难以准确解析，而这些瞬态特征正是桥梁风振、建筑风载、气动噪声等场景的**决定性物理量**。因此，尽管 RANS 在过往数十年构成了工程 CFD 的基础，其固有简化已难以满足现代工程在**精细化设计与安全裕度评估**方面的更高要求。在此背景下，能够直接解析大尺度湍动并更准确刻画非定常**能量传递**的 LES 正由学术范畴加速走向工程标准配置，推动数值仿真从“提供宏观统计量”迈向“**复现真实物理过程**”，被普遍视为高保真湍流模拟的必然发展方向。

对比维度	RANS	LES
细节响应能力与几何敏感性	对微小结构变化响应迟钝	高度敏感于几何细节 支撑精细化优化设计
边界区流动模拟预测精度	近壁区流动细节失真，预测偏差大	高精度边界层模拟

高雷诺数 适应性	高 Re 下失效风险高难以准确模拟	更适应高雷诺数 条件下的湍流特性
适用场景	适用于宏观流动分析	精确捕捉 瞬态流动特征

2.2.工程与教育需求驱动的框架转向

在计算流体力学（CFD）的发展中，大涡模拟（LES）因其能够直接解析大尺度湍流结构、显著提升对非定常流动的模拟能力，已成为高保真度数值仿真的主流方向。然而，其核心性能高度依赖于亚格子尺度（SGS）模型对未解析小尺度湍流效应的准确表征。早期广泛采用的**静态** Smagorinsky-Lilly 模型将模型常数 C_s 设定为全局固定值，尽管实现简单、计算稳定，但其**本质缺陷**在于将复杂的湍流能量耗散过程简化为一种空间均匀、时间不变的**线性**耗散机制。这一假设在处理桥梁断面、建筑绕流等存在强烈流动分离、再附着与非平衡特性的复杂工程问题时，暴露出严重的适应性不足：在高剪切区域易导致过度耗散，抹杀关键的瞬态拟序结构；而在低梯度区域则可能耗散不足，引发数值不稳定。

为突破静态模型的局限，学术界提出了**动态** Smagorinsky 模型，旨在通过引入局部自适应机制，使 C_s 值随流场特征动态调整。然而，该模型的理论根基**仍**建立在“**线性涡粘性**”这一经典假设之上，即认为亚格子应力与可解尺度的应变率之间存在**线性**比例关系。这一建模方式本质上是对真实湍流中高度非线性、非定常、间歇性能量级串过程的过度简化。大量物理实验与高精度数值研究表明，

湍流能量的传递并非简单的线性扩散，而是由涡拉伸、折叠、破碎等**非线性**相互作用主导，且能量耗散在时空上呈现强烈的局部集中性与脉动特征，甚至存在从小尺度向大尺度反向传递的“反向散射”现象。动态模型所依赖的线性框架，难以捕捉这些复杂动力学行为，其在线性假设下“动态”调整的 C_s 值，本质上仍是一种对非线性物理过程的近似补偿，难以从根本上提升模型在复杂非平衡流动中的物理保真度。

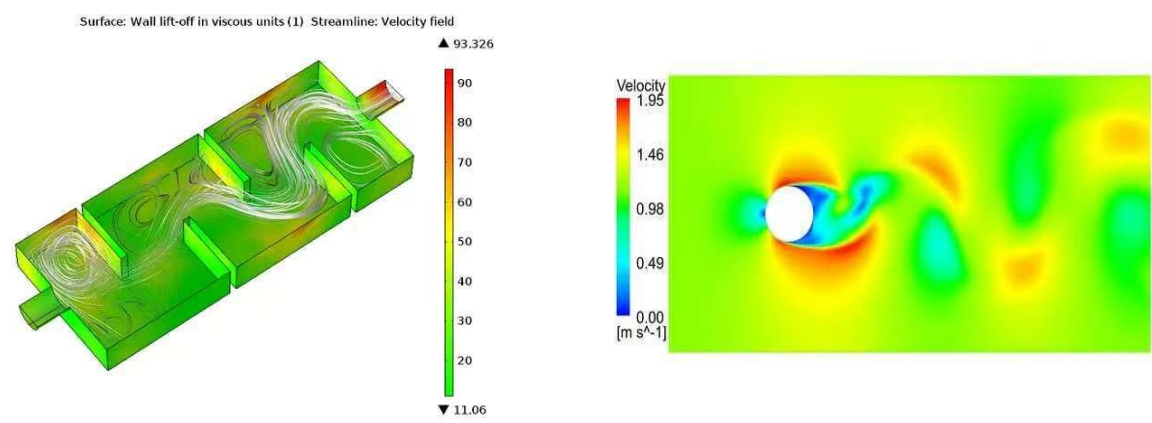


图 3 流体模拟示意图

这一理论与现实的脱节，直接导致了当前工业级 CFD 仿真工具的普遍困境：即便采用动态模型，其预测结果仍存在系统性偏差，难以完全替代昂贵的物理风洞试验进行最终验证。仿真过程往往需要工程师凭借经验反复**调试参数**，耗时耗力，且结果的可靠性高度依赖于使用者的专业水平，形成了“**仿真周期长、成本高、可信度存疑**”的恶性循环。与此同时，主流商业软件普遍存在操作复杂、学习门槛高、通用性强但专用性弱的问题，难以满足**交通工程**领域对高效、精准、易用的专用仿真工具的需求。而在**教育与科普**层面，现有 CFD 工具大多沿用科研软件的设计范式，界面不友好、交互不直观，严重阻碍了流体力学知识的有效传播与人才培养。上述技术瓶颈与市场需求的错位，凸显了现有仿真体系在模型物理合理性、工程实用性与社会普及性三个维度上的系统性不足，亟需一种能够深度融合物理实验数据、突破传统模型理论局限、并兼顾工程效率与教育价值的新型数值风洞解决方案。

3. 项目思路与技术

针对传统 CFD 软件“工程仿真失准、科普教育缺失”的核心痛点，我们组建跨学科团队，以参加“挑战杯揭榜挂帅”竞赛为契机，基于开源风雷求解器进行深度二次开发，在李加武老师等专家顾问的悉心指导下，创新性地构建了以风洞实验数据驱动 C_s 值反演的 SGS 模型工程标定新范式，同时打造了面向高校学生与社会公众的轻量化数值风洞科普新路径。

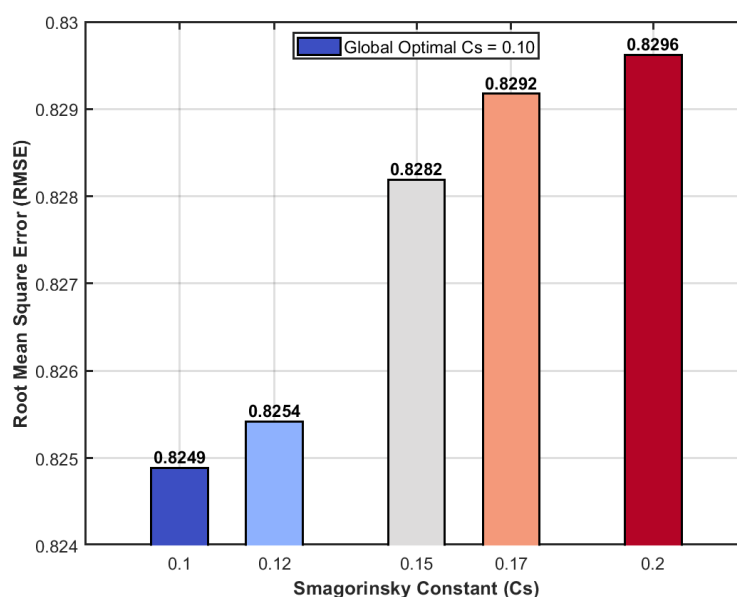


图 4 全局最优 Smagorinsky 常数 (C_s) 确定图

3.1. 系统总体技术架构

本项目构建了一套面向数值风洞仿真的集成化科学计算平台，旨在实现物理风洞实验数据与大涡模拟（LES）数值仿真的深度融合，支撑基于数据驱动的湍流模型参数反演与优化。系统以“风雷”（PHengLEI）求解器为核心计算引擎，通过图形化用户界面（GUI）封装其底层调用逻辑，降低专业 CFD 软件的使用门槛，同时构建从实验数据输入、模型参数反演、求解器调度、计算过程监控到结果可视化分析的完整技术链条。整体架构采用模块化、分层式设计，确保功能解耦、可扩展性强，并兼顾用户体验与计算效率。

系统技术栈基于 Python3.7+ 构建，前端界面采用 PyQt5 框架实现跨平台图

形化交互，利用 QWebEngineView 组件内嵌 Chromium 渲染引擎以支持现代 Web 标准，实现科普知识资源的在线集成展示；后端计算调度模块依托 Python 原生多线程机制与子进程管理接口，实现对“风雷”求解器的非阻塞式调用与实时输出捕获；数据处理与分析模块依赖 pandas 库完成结构化数据的解析、缓存与表格化呈现，确保计算结果的高效管理与可追溯性。

系统整体架构划分为三大功能模块：主控界面框架、风雷求解器集成模块与科普知识展示模块，各模块通过信号-槽机制实现松耦合通信，保障主线程响应性与工作线程计算任务的独立运行。

3.1.1. 主控界面框架

该模块以 MainWindow 为核心，采用标签页（TabWidget）组织不同功能区域，实现功能模块的逻辑隔离与用户导航便利性。控制面板集中管理全局操作入口，包括案例加载、功能切换、系统配置等，状态栏实时反馈文件选择、网络连接、计算进程等关键运行信息，提升系统的可观测性与用户交互体验。

（1）风雷求解器集成模块（工程模块）

风雷求解器集成模块是本系统的核心功能单元，其设计目标在于实现对“风雷”求解器的自动化调用与参数化控制，支撑本项目关键的 Cs 值反演流程。该模块主要分为输入处理子系统、计算调度子系统与结果管理子系统。输入处理子系统负责接收用户输入的 Cs 序列（即 Smagorinsky 模型常数集合），支持逗号分隔格式（CSV-like），兼容整数、浮点数、科学计数法等多种数值表示，并内置输入验证机制，自动过滤非法字符与格式错误，确保生成的输入文件 Cs_list.txt 符合求解器规范。计算调度子系统通过 subprocess.Popen 接口启动位于指定路径（默认为 F:\Fenglei\phenglei\PHengLEI\start_optimization.bat）的批处理脚本，以独立进程方式运行“风雷”求解器，并实时捕获其标准输出（stdout）与标准错误（stderr）流，通过定时器（QTimer）驱动界面更新，实现求解过程的动态日志展示与进度模拟。结果管理子系统在计算完成后自动扫描输出目录，依据时间戳命名规则（Cs_optimize_result_YYYYMMDD_HHMMSS）定位最新结果文件夹，并解析其中的 comparison_and_optimization_report.csv 文件，将优化结果以可调整列宽的表格形式呈现于 GUI 界面，支持数据缓存与后续分析。

（2）科普教学模块

科普知识展示模块基于 QWebEngineView 实现，支持加载预设或动态指定的

科普网站资源，如流体力学原理动画、风洞实验视频、湍流理论讲解等，形成“理论-方法-应用”一体化的知识传播环境。该模块独立运行于 GUI 主线程，通过事件循环机制处理页面加载、渲染与用户交互，确保在不影响求解器计算任务的前提下提供丰富的背景知识支持。

本软件系统采用多线程架构以解决计算密集型任务与 GUI 响应性之间的冲突。主线程负责界面渲染、用户事件处理与状态更新，确保交互流畅；工作线程则封装求解器执行、文件读写与日志捕获等耗时操作，通过自定义信号机制与主线程通信，实现跨线程数据传递与界面同步。能够实现科普知识传播、实验数据输入、数值仿真调度与结果可视化分析的有机集成，为基于物理实测数据反演 Smagorinsky 模型常数 C_s 提供了稳定、高效、易用的技术平台支撑。

3.2.核心理论与技术

3.2.1. 基于物理实测数据驱动的动态 C_s 值反演机制

(1) RANS 模型与 LES 模型概述

在计算流体力学（ComputationalFluidDynamics,CFD）的发展进程中，如何高效且准确地模拟湍流始终是核心挑战。由于直接数值模拟

（DirectNumericalSimulation,DNS）需解析所有尺度的湍流结构，其计算成本随雷诺数呈幂律增长，难以应用于工程实际。为此，研究者发展了多种湍流建模方法，其中雷诺平均 Navier-Stokes 方程（Reynolds-AveragedNavier-Stokes,RANS）与大涡模拟（LargeEddySimulation,LES）构成了当前工程仿真中两类主流的湍流模拟范式。二者在物理思想、数学处理与计算精度上存在本质差异，其选择直接决定了数值模拟对非定常流动特征的捕捉能力。

RANS 方法的基本思想是对瞬时 Navier-Stokes 方程进行时间平均或系综平均，将流场变量分解为平均量与脉动量之和，例如速度可表示为 $u_i=\bar{u}_i+u_i'$ ，其中 $\bar{u}_i$ 为时均速度， u_i' 为脉动速度。将该分解代入原始方程后，经平均运算可得关于 $\bar{u}_i$ 的控制方程：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \overline{\frac{\partial u_i' u_j'}{\partial x_j}}$$

此控制方程中， $\overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力张量，代表湍流脉动对平均流场的动量输运作用。该项的引入使得方程不再封闭，必须通过湍流模型对其进行模化。典型的 RANS 模型，如 $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ 或 SA 模型，均通过引入额外的输运方程来闭合雷诺应力，其核心假设是湍流行为可由局部平均速度梯度与湍流尺度（如湍动能 k 与耗散率 ϵ ）决定。由于 RANS 方法对所有湍流尺度进行模化，其计算网格无需解析小尺度涡旋，因此计算成本相对较低，适用于稳态或准稳态流动的工程估算。

RANS 的短板，归根到底在于其“全尺度时均封闭”的思路。复杂的非定常湍流被简化为平均流场，并用涡黏假设去等效小尺度效应，结果往往难以还原分离、涡脱落、相干结构演化等关键现象。对非平衡流、强分离或气动弹性问题（如桥梁颤振、抖振、涡激振动）尤为明显：RANS 往往低估脉动风压的时空相关性主导频率特征，难以给出瞬时极值与共振风险的可靠预报；其经验常数又多在特定流动条件下标定，推广性有限，工况一复杂就容易出现偏差。这些限制决定了在需要捕捉非定常机理的场景中，RANS 很难单独满足精度要求。

相比之下，大涡模拟（LES）采用了一种更为精细的尺度分离策略。其核心思想是通过空间滤波操作，将流场变量分解为可解尺度（resolved scales）与亚格子尺度（subgrid scales）两部分，即 $u_i = \bar{u}_i + u_i'$ ，其中 $\bar{u}_i$ 为滤波后的可解尺度速度， u_i' 为被滤除的亚格子尺度脉动。对 Navier-Stokes 方程施加滤波后，得到关于 $\bar{u}_i$ 的控制方程：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

该控制方程中， $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$ 为亚格子应力张量，代表亚格子尺度对可解尺度的动量输运作用。与 RANS 不同，LES 仅对小尺度湍流进行模化，而大尺度的非定常结构（如卡门涡街、分离泡、尾流振荡）则被直接求解。因此，LES 在物理保真度上显著优于 RANS，能够准确复现流动的瞬态演化过程、频谱特性与空间相干结构，特别适用于强非定常、大分离流动的高精度模拟。

但 LES 的精度高度依赖于亚格子模型对 τ_{ij} 的闭合能力。Smagorinsky-Lilly 模型作为最早且最广泛应用的 SGS 模型之一，基于涡粘性假设将 τ_{ij} 与可解尺度的应变率张量 $\bar{S}_{ij}$ 关联，其亚格子涡粘系数 ν_{sgs} 由下式给出：

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|, \quad |\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$$

其中， C_s 为 Smagorinsky 常数， Δ 为滤波尺度。该模型的物理基础源于 Kolmogorov 的 -5/3 幂律与局部各向同性假设，即小尺度湍流的能量耗散率 E 与 $C_s^3 \Delta |\bar{S}|^3$ 成正比。尽管该模型形式简洁且计算稳定，但其关键参数 C_s 的取值具有高度的经验性与不确定性。传统做法采用全局常数（如 $C_s=0.17$ ），但大量研究表明，在复杂流动中 C_s 应随空间位置与时间动态变化，以适应局部流动的非平衡性与各向异性特征。

基于上述分析，本项目选择 LES 而非 RANS 作为数值模拟的核心框架，并聚焦于 Smagorinsky 模型中 C_s 参数的优化。这一选择具有明确的工程前瞻性：随着计算资源的持续增长与高精度仿真需求的不断提升，CFD 的发展趋势正从“稳态平均”向“瞬态解析”演进，LES 及其变体（如 DES、SAS）已成为桥梁风工程、航空湍流、城市风环境等领域的研究主流。而 C_s 作为连接可解尺度与亚格子尺度的关键桥梁，其取值的合理性直接决定了 LES 模拟的物理保真度。因此，我们面向 C_s 开展数据驱动的反演与优化：以风洞/实测量测作为强校准信号，在既定网格与时间步下迭代求取最优 C_s ，使 LES 的时程响应与能谱特征与实验对齐。这一做法不仅能实质提升 LES 的预测精度与稳定性，更为 CFD 在工程场景中的可复现性、可采信性与可移植性提供支撑，推动仿真从“可用”走向“好用、好信、可落地”。

（2）Smagorinsky 模型概述

在大涡模拟（LES）框架下，亚格子尺度模型的核心任务在于构建可解尺度与未解析小尺度之间的能量传递关系，从而闭合滤波后的 Navier-Stokes 方程。由于 LES 直接求解大尺度非定常结构，其模拟精度在很大程度上取决于 SGS 模型对局部湍流耗散行为的物理保真度。在众多闭合方案中，Smagorinsky-Lilly 模

型因其理论基础清晰、实现形式简洁且数值稳定性良好，成为最早被广泛采用的 SGS 模型之一，至今仍在工程仿真与科研计算中占据重要地位。该模型基于涡粘性假设，认为亚格子应力与局部应变率成正比，其物理思想类比于 Boussinesq 在 RANS 中对雷诺应力的处理方式。通过引入一个表征小尺度湍流耗散能力的“亚格子涡粘性” ν_{sgs} ，将非线性项的封闭问题转化为对 ν_{sgs} 的建模问题，其基本形式为：

$$T_{ij}^{sgs} - \frac{1}{3} T_{kk}^{sgs} \delta_{ij} = -2 \nu_{sgs} S_{ij}$$

其中， T_{ij}^{sgs} 为亚格子应力， S_{ij} 为可解尺度应变率张量。Smagorinsky 进一步假设 ν_{sgs} 与滤波尺度 Δ 和应变率模 $|S|$ 相关，最终导出：

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 |S|$$

尽管 Smagorinsky 模型具有诸多优点，但在实际应用中也存在一些局限性。例如，模型在处理具有强烈各向异性特征的流动时可能不够准确，且对模型常数 C_s 的选取较为敏感。

- (3) 系统求解对象—— C_s 值（Smagorinsky 常数）
- A. C_s 值的定义：
- 在 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型中， C_s 值是控制湍流能量传输的核心参数，其作用类似于流动模拟中的“能量调节阀”。该参数通过公式：

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 |S|$$

- C_s 增大时（如 $C_s > 0.17$ ），亚格子耗散增强，小尺度湍动能被过度耗散，导致流场失真（如空化流中空泡界面过度光滑、壁面流动拟序结构消失）；
- C_s 减小时（如 $C_s < 0.05$ ），亚格子耗散不足，可解尺度湍动能虚假积累，引发数值震荡甚至发散。

表 3 不同求解器对应的值及特性

求解器 / 模型	C_s 值设置	特性说明
----------	-----------	------

求解器 / 模型	Cs 值设置	特性说明
OpenFOAM	默认 Cs=0.167	通过系数关系式 $C_s = \left(C_k \sqrt{\frac{C_k}{C_e}} \right)^{1/2}$ 计算得出，其中 $C_k=0.094$ ， $C_e=1.048$ ；理论基础源自 Smagorinsky 原始论文的各向同性湍流理论；代码实现中 $\ S\ = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ 与理论定义一致
Fluent	默认 Cs=0.1	显著低于 OpenFOAM 默认值；基于工程验证优化，针对壁面流动和复杂几何的稳定性调；用户反馈：· 设为 0.168 时结果趋近 OpenFOAM · OpenFOAM 调至等效 Cs=0.1 时结果趋近 Fluent 默认值

B. Cs 值的核心作用：

模型精度的关键因素

Cs 值的选取对 Smagorinsky 模型的精度起着决定性作用。如果 Cs 值选取过大，亚格子粘性系数 ν_{sgs} 也会相应增大。这会导致模型对流动中的小尺度结构产生过度的耗散作用，使得流动中的小尺度结构被过度抑制，从而失去对湍流细节的捕捉能力，降低模拟结果的精度；反之，如果 Cs 值选取过小，则可能导致模型对小尺度湍流的耗散不足，导致数值模拟中的能量积累，进而无法准确捕捉边界层内的湍流特征，无法有效模拟小尺度湍流的耗散效应，进而影响模拟结果的准确性。

合理的 Cs 值选取是确保 Smagorinsky 模型能够准确模拟小尺度湍流行为的关键。只有通过精确调整 Cs 值，才能在不同的流动条件下保持模型的高精度，从而为复杂流动问题的研究提供可靠的数值模拟工具。

适应不同流动问题

亚格子模型的有效性依赖于其对局部湍流能量传递过程的准确表征。然而，真实流动中湍流的生成、输运与耗散机制在空间上具有高度非均匀性，表现出显著的非平衡性与区域性特征。Smagorinsky 模型中所采用的 Cs 值，作为控制亚格子耗散强度的关键参数，其最优取值必须与区域流动的应变率水平、涡结构尺度

及能量级串强度相匹配。在高应变率区域（如剪切层、分离区），湍流产生强烈，能量级串活跃，需适当降低 C_s 以避免过度耗散导致拟序结构失真；而在低梯度或再附着区域，流动趋于松弛，亚格子耗散需求较高，需提高 C_s 以维持数值稳定性并合理模化小尺度耗散。此外，在近壁区，由于存在强粘性效应和尺度受限，湍流结构受到抑制，若沿用主流区的 C_s 值将导致耗散过强，必须引入空间修正。因此， C_s 的最优值并非全局常数，而是随流动结构动态变化的空间函数。在不同区域采用不同的 C_s 值，本质上是使亚格子模型的耗散行为与局部湍流动力学相适应，从而提升模型在复杂非平衡流动中的物理保真度与预测能力。

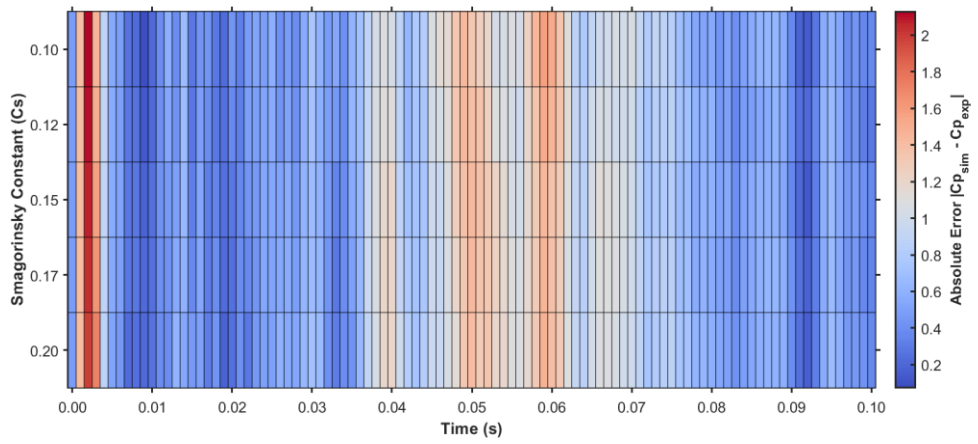


图 5 不同 C_s 值下仿真误差的时空分布热图

（4）动态 Smagorinsky 模型中 C_s 的求解原理

动态 Smagorinsky 模型（DynamicSmagorinskyModel, DSM）作为经典亚格子模型（SGS）的重要发展，通过 Germano 恒等式实现了 C_s 值的局部自适应计算，显著提升了模型在复杂流动中的适用性。其核心机制在于：利用可解析尺度内的大尺度运动信息，通过双重滤波与最小二乘拟合，动态求解出使亚格子应力与测试尺度应力匹配最优的 C_s 值。该方法无需预设常数，且在理论上可捕捉反向能量传递（反向散射）现象，被视为对静态模型的重要改进。

然而，尽管 DSM 在形式上实现了“动态调整”，其物理基础仍建立在线性涡粘性假设之上，即：

$$\tau_{ij}^{sg\delta} \propto |\bar{S}| \hat{S}_{ij}$$

这一假设本质上是将亚格子应力视为应变率张量的线性函数，忽略了湍流能

量级串过程中复杂的非线性、非定常与间歇性特征。真实湍流中，能量从大尺度向小尺度的传递（能量级串）并非简单的比例关系，而是由涡拉伸、折叠、破碎等高度非线性的相互作用驱动，且存在显著的空间局部性与时间脉动性。特别是在强剪切区、流动分离与再附着区域，亚格子应力与应变率之间呈现出强烈的非线性、滞后甚至多值映射关系，远超线性模型的描述能力。

在 DSM 的求解中，常需要在空间或时间上取平均以固定一个统一的 C_s 值。这种处理虽然能抑制数值振荡，却同时抹平了湍流的局部间歇性，使模型在刻画瞬态相干结构的生成与演化时不可避免地失真。另一方面，模型对网格尺度与各向异性的敏感性较强：在复杂工况下，常会出现 C_s 在局部剧烈波动或与物理不相容的分布，最终仍需靠限幅或经验修正来兜底，从而削弱了“完全自治”的理论优势。

因此，DSM 的局限并非仅仅来自实现层面的不完善，而是源于其建模范式的内在约束：试图用一个线性、局部、各向同性的等效模型去封装一个本质上非线性、非局部、强各向异性的能量级联过程。这种“略径依赖”的思路决定了，无论如何精调参数，都难以完全还原真实湍流的复杂动力学。

（5）动态 C_s 反算实现机制

其核心思想在于：不依赖模型内部的数学推导路径，而是以风洞实验获得的真实流动响应作为外部物理基准，通过系统性参数扫描与仿真-实验结果比对，反演出能够使数值模拟最逼近物理现实的“等效最优” C_s 值。该方法并非否定能量级串理论的物理基础，而是承认现有亚格子模型在闭合过程中的近似性与局限性，转而采用“效果匹配”而非“机制重构”的策略，提升 LES 在特定流动构型下的物理保真度与工程可信度。

本反演机制的实现依托于“风雷”（PHengLEI）求解器的高精度大涡模拟能力与良好的参数接口设计。系统以该求解器为核心计算引擎，构建从实验数据输入、参数遍历执行、仿真结果提取到最优参数判定的完整闭环流程。具体实现路径如下：首先，在目标几何模型的关键区域（如迎风面、分离点、尾流核心区等）布置若干高频压力测点，通过风洞实验获取其时间序列压力响应 $p_{exp}(t)$ ，作为物理真实性的参考基准。随后，在“风雷”求解器中建立与实验条件完全一致

的数值风洞模型，包括几何外形、来流边界条件、网格拓扑与时间步长等，确保仿真与实验在初始与边界条件上的可比性。

在此基础上，系统设定一个合理的 C_s 参数搜索区间（如 $C_s \in [0.1, 0.2]$ ），并定义离散步长（如 $\Delta C_s = 0.01$ ），生成一系列离散的 C_s 值序列。对于序列中的每一个 C_s 值，系统自动调用“风雷”求解器执行一次独立的瞬态 LES 仿真，求解过程中固定所有其他参数不变，仅改变 Smagorinsky 模型中的 C_s 输入值。每次仿真完成后，系统自动提取各测点对应的时间序列压力数据 $p_{\text{sim}}(t; C_s)$ ，并与实验数据 $p_{\text{exp}}(t)$ 进行逐时间步的误差计算。

通过遍历整个 C_s 序列，系统可获得每个测点在不同 C_s 值下的误差曲线，进而确定使误差最小化的“局部最优” C_s 值。为实现 C_s 的动态反演，本系统将时间域划分为若干短时窗口，在每个窗口内重复上述参数扫描与对比流程，从而获得随时间演化的 $C_s(t)$ 序列，该序列能够反映流动非定常性对亚格子耗散强度的动态需求。

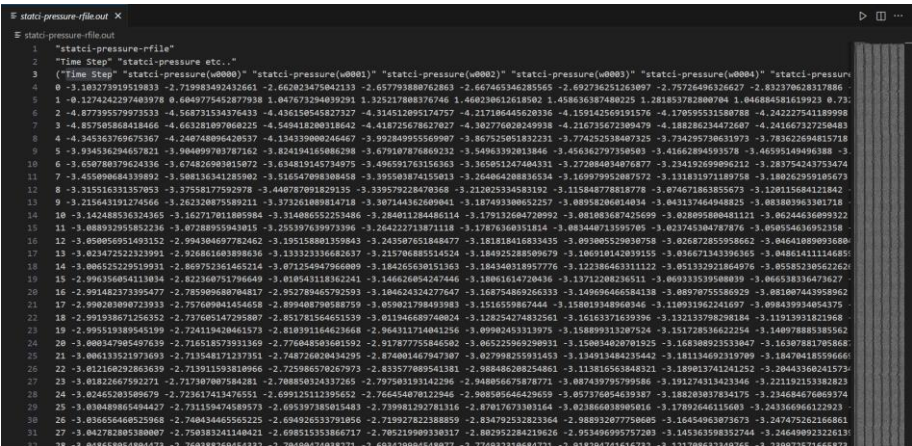


图 6 遍历式寻找最优 C_s 值

基于“风雷”求解器的开源架构，本系统通过外围自动化脚本与图形化界面集成，实现了上述反演流程的批量化、标准化与可视化。系统通过读写配置文件、调用批处理脚本、监控日志输出与解析结果文件，完成从参数输入到最优值输出的全链路闭环控制。这一集成模式既保留了“风雷”求解器在 LES 求解精度与稳定性方面的优势，又赋予其数据驱动的自我校准能力，显著提升了其在复杂流动模拟中的适应性及预测置信度，构建了“实验→仿真→比对→优化”的反演闭环，实现了 C_s 值的动态态、可验证、可追溯的确定路径。该路径不仅突破了传统模型

对线性闭合假设的依赖，也为 LES 参数标定提供了一种面向工程应用的实用化解决方案，具有良好的可推广性与工程适用前景。

3.2.2. 数据驱动的分區賦參策略

尽管应用单一测点的动态最优 C_s 值序列能提升整体模拟精度，但桥梁绕流场具有高度的非均匀性。为实现对不同区域局部流动物理特性的更精细模拟，本项目进一步提出了一种创新的数据驱动分区赋参策略。该策略的物理基础在于，流场中具有相似动力学行为的区域，其最优的亚格子模型耗散强度也应趋于一致。

与传统依赖几何或经验的主观划分方法不同，本策略利用无监督机器学习，从数据中客观地识别流动同质区，并为其“量身定制”最优参数。具体流程分为以下四个核心步骤：

流场“动态特征”提取：首先，从高保真实测数据中，提取每个监测点的压力系数（ C_p ）时程，将其作为表征该点局部流场动态特性的唯一“特征”。

K-means 智能分区：随后，利用 K-means 聚类算法对所有监测点的“动态特征”进行分析，将具有相似压力波动行为的测点自动地、客观地划分到同一类别中，形成若干个“流动同质区”。

区域化参数反演：针对每个客观划分出的流动同质区，独立执行 3.2.1 节所述的参数反演流程，为该区域生成一个专属的、最优的 C_s 参数模板动态序列。

构建与应用分区参数场：在最终的高保真仿真中，对每个同质区域内的所有网格单元统一赋予其对应的最优 C_s 参数模板，从而构建一个能够反映流场空间非均匀性的、分步变化的 C_s 参数场，实现对局部流动的精细化模拟。

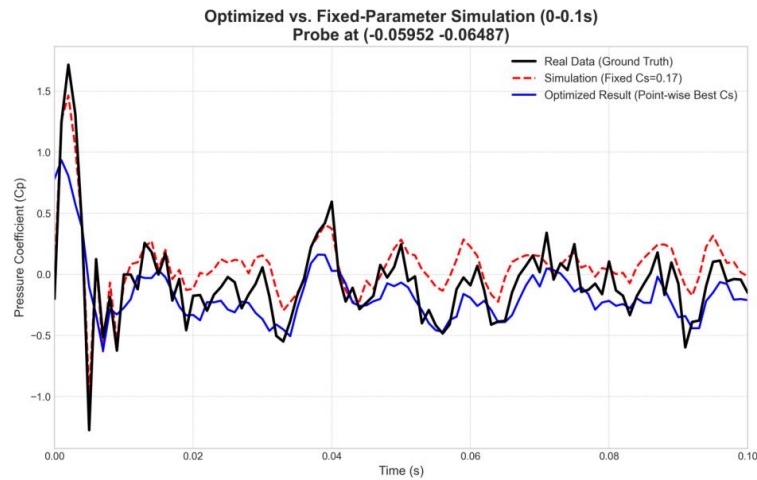


图 7 最优参数对比

3.2.3. 面向科普教学的轻量化交互界面构建理论

在复杂工程仿真与科学计算领域，数值模拟技术的发展不仅推动了科研前沿的进步，也为教育与科普提供了新的手段。为了实现高效的科普教学与专业培训，本项目开发了一套定制化与轻量化的页面设计，该框架集成了动画演示、实时交互与动态数据可视化功能。这一设计不仅提升了用户体验，还通过实践与互动的方式增强了学习效果，为现代教育模式注入了新的活力。

近年来，国家高度重视教育信息化建设，出台了一系列政策文件鼓励高校与科研机构探索新型教学模式。例如，《教育信息化 2.0 行动计划》明确提出要“推进信息技术与教育教学深度融合”，“构建智能化、个性化、终身化的教育体系”。在此背景下，本项目提出的定制化与轻量化页面设计框架，不仅符合国家教育改革的方向，还为高校与科研院所提供了切实可行的技术解决方案。

系统通过集成多种教学资源（如教材原文、典型案例、实验视频等），构建了一个多模态学习环境。该环境支持教师灵活组织教学内容，学生自主选择学习路径，形成个性化学习体验。例如，在讲解桥梁风工程案例时，系统不仅提供详细的理论分析与数值模拟步骤，还嵌入了实际工程照片与现场测试视频，帮助学生建立从理论到实践的完整认知链条。

为确保系统的高效运行与广泛应用，本项目采用了多项轻量化设计策略。首先，系统基于 PyQt5 框架开发，利用其跨平台特性与丰富的图形组件库，实现了轻量级的前端界面。其次，科普教学模式采用更加适配教学场景的轻量化数值求解模块，显著提升了计算效率，匹配科普教学的轻量化要求。最后，系统支持多种数据格式（如 CSV、VTK 等）的无缝转换与解析，确保了数据传输与存储的高效性。

此外，系统引入了响应式设计理念，通过自适应布局与动态调整元素大小，确保在不同设备（如 PC、平板、手机）上均能获得良好的用户体验。这种设计不仅提高了系统的兼容性，还扩大了应用场景，尤其适用于远程教学与在线科普活动。

3.2.4. 基于风雷开源求解器与自研轻量化求解模块的集成架构

在数值风洞系统的构建中，求解引擎的选择直接决定了模拟的物理保真度、

计算效率与工程适用性。为实现从高精度工程仿真到轻量化教学演示的全链条覆盖，本项目采用了一种分层协同式求解架构，其核心由两个功能互补的计算模块构成：一是基于国产开源 CFD 软件“风雷”（PHengLEI）的高保真 LES 求解模块，用于执行复杂非定常流动的工程模拟；二是面向教学场景自主开发的轻量化数值求解模块，支撑前端交互式演示。该架构通过功能分层与资源适配，实现了科研级仿真能力与科普级传播需求的有效融合。

（1）“风雷”求解器及其 LES 模块的技术原理与特性

“风雷”（PHengLEI）是一款由中国空气动力研究与发展中心主导开发的通用型计算流体力学（CFD）软件，具备完整的前处理、求解与后处理能力，广泛应用于航空航天、桥梁风工程等领域的气动分析。该软件基于 Windows 操作系统开发，具有良好的用户界面友好性与工程集成能力，支持结构化与非结构化网格，并集成了多种湍流模型求解器，涵盖 RANS 框架下的 $k-\omega$ SST、SA 模型以及大涡模拟（LES）框架下的 Smagorinsky-Lilly 模型等，能够满足从稳态评估到瞬态解析的多层级仿真需求。

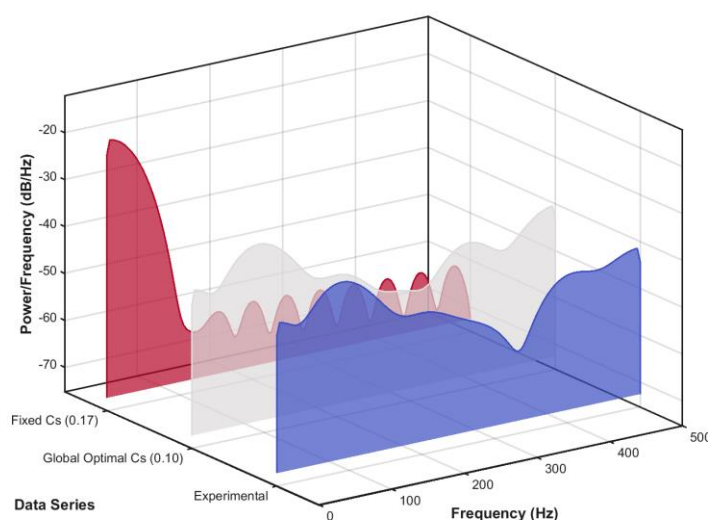


图 8 压力系数的功率谱密度（PSD）频域特性对比

在 LES 求解方面，“风雷”采用空间滤波策略对 Navier-Stokes 方程进行处理，仅直接求解大尺度可解运动，而将小尺度亚格子运动通过模型进行闭合。其 LES 模块基于有限体积法进行空间离散，时间推进采用显式或隐式格式，压力-

速度耦合通过 PISO (Pressure-ImplicitwithSplittingofOperators) 算法实现, 确保了不可压缩流动中质量守恒与动量方程的协调求解。

在当前的开源风雷软件中, Smagorinsky 模型所采用的 C_s 值为全局静态常数, 该值在整个计算域与时间进程中保持不变。尽管软件提供了近壁面阻尼函数以缓解高梯度区域的过度耗散问题, 但其本质上仍属于传统静态 SGS 模型范畴, 未引入动态过程来根据局部流场特征自动调整 C_s 。这一设定在均匀各向同性湍流中表现良好, 但在涉及强分离、再附着或非平衡流动的复杂工程问题中, 可能因参数缺乏时空适应性而导致模拟偏差。

基于这一技术现状, 本项目的工程模拟模式在充分尊重并利用“风雷”求解器高精度物理求解能力的基础上, 对其 Smagorinsky 模型进行了针对性的功能扩展。通过源码级重构, 将原本固定的 C_s 常数改造为可由外部程序动态赋值的运行时变量, 并开发了配套的参数扫描与结果比对机制。这一改进并未改变“风雷”原有的离散格式与求解流程, 而是通过增强其参数灵活性, 赋予其数据驱动的自校准能力, 从而在不牺牲稳定性的前提下, 显著提升了其在复杂流动中的预测精度与适应性。

(2) 面向教学场景的自研轻量化数值求解模块

为满足教学与公众科普对实时交互与低计算门槛的需求, 本项目同步开发了一套自研的轻量化数值求解模块, 专用于支撑前端 Web 化交互演示。该模块不依赖“风雷”或其他重型 CFD 求解器, 而是基于基础的不可压缩 Navier-Stokes 方程, 采用简化数值格式在二维或准三维理想化几何上进行快速求解。其控制方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

空间离散采用结构化网格上的有限差分法, 将连续计算域划分为规则的矩形单元格, 速度分量与压力变量采用交错网格 (staggeredgrid) 布置, 以避免压力-速度解耦导致的棋盘式振荡。时间推进采用显式欧拉方法, 结合投影法

(ProjectionMethod) 实现压力-速度耦合: 首先根据当前速度场预测中间速度, 再通过求解泊松方程获得压力修正量, 最终得到满足无散度条件的速度场。

为提升计算效率, 系统采用快速傅里叶变换 (FFT) 加速泊松方程的求解过

程，并引入纹理映射技术进行流场可视化渲染。具体而言，流体速度场被编码为颜色纹理，通过 GPU 着色器程序实时更新粒子轨迹与流线分布，形成具有高度视觉真实感的动态流动效果。用户可通过前端界面自由绘制障碍物形状、调整来流速度或切换视图模式（如速度场、压力场、流线图），所有操作均触发后端求解器重新计算并即时反馈结果，形成低延迟的交互闭环。

在系统架构层面，该求解模块通过 Python 语言实现核心计算逻辑，并利用 PyQt5 框架搭建本地 Web 服务器。前端界面以 HTML/CSS/JavaScript 编写，通过 WebSocket 协议与后端建立双向通信，实现参数传递与数据推送。用户仅需在浏览器中访问指定 URL，即可无需安装任何插件或软件完成仿真任务。这种 Web 架构不仅显著降低了使用门槛，尤其适用于高校课堂教学与公众科普活动，还便于后续功能扩展与远程维护。

该轻量化模块虽未引入复杂的湍流模型或高阶数值格式，但其能够稳定复现层流绕流、涡旋脱落、驻点形成等基本空气动力学现象，足以支撑对伯努利原理、阻力来源、流线分布等核心概念的教学演示。更重要的是，其设计体现了“以教学目标为导向”的工程哲学——在保证物理合理性与视觉直观性的前提下，通过算法简化与架构优化，实现了计算资源消耗与教育传播效能之间的最优平衡。

4. 软件功能介绍

4.1.工程模拟模块

本模块作为系统的核心，旨在将复杂的“风雷”求解器及参数优化流程，封装于一个简洁直观的图形界面之后。用户无需编写代码或操作命令行，即可通过图形化交互完成专业的计算流体力学（CFD）参数寻优任务，显著降低了高保真仿真的使用门槛。

4.1.1. 设计思路

为实现 Cs 值优化这一核心目标，本模块需具备高效的参数空间探索能力、仿真过程与实验结果的无缝对标能力、以及优化成果的直观验证能力。通过构建实验数据输入、参数自动寻优、结果可视化比对的完整工程，将传统依赖经验的参数调试过程，转变为客观、量化的科学标定流程，确保 LES 模拟在复杂工程流动中输出高置信度结果。

4.1.2. 功能设计

（1）输入系统

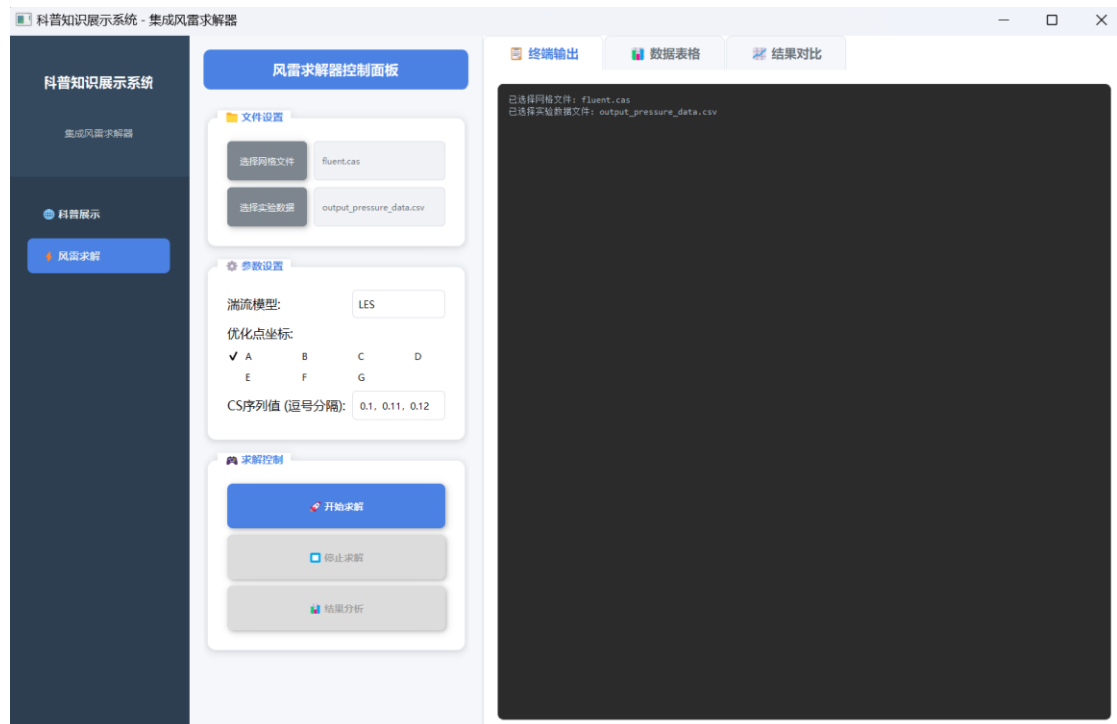


图 9 工程模式主页面

①CS 序列解析: 智能处理用户输入的、以逗号分隔的多个 Cs 数值, 支持整数、数和科学计数法。

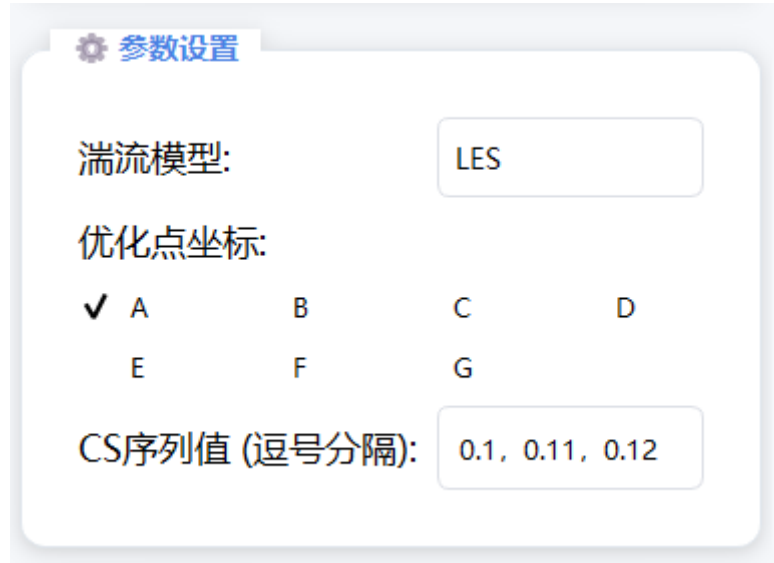


图 10 参数设置页面

②数据验证与实时反馈: 自动过滤输入框中的无效字符, 并实时提示用户输入格式是否正确。

③文件选择: 提供图形化按钮让用户选择“实际数据”文件和包含测点坐标的“JOU”文件（尽管当前流程已自动化）。



图 11 文件选择说明

(2) 计算引擎

①进程管理: 通过在独立的工作线程中启动 `start_optimization.bat` 子进程, 确保在长时间计算过程中 GUI 主界面不会冻结, 保持流畅响应。

②实时输出: 实时捕获并显示求解器在命令行中的所有标准输出和错误流, 让用户可以像在终端中一样监控计算的每一个细节。

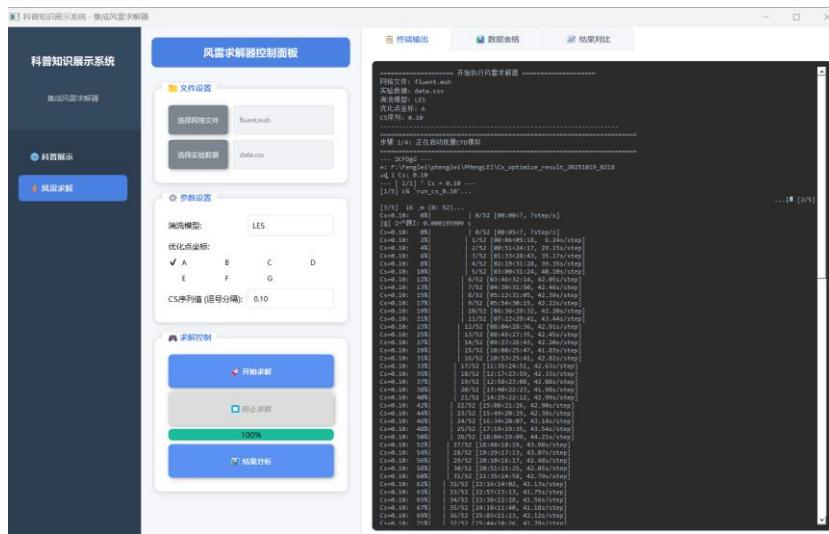


图 12 进度监控

③ 进度监控: 通过实时解析求解器的输出, 驱动界面之上的进度条, 精确地向用户反馈计算的真实进度。

④ 异常处理: 能够捕获计算中断或崩溃的信号, 并向用户反馈错误信息。

(3) 结果处理

①自动检测: 计算完成后, 系统会自动查找最新生成的结果文件夹 (Cs_optimize_result_<时间戳>)。

②数据解析与展示: 智能解析最终的优化报告 CSV 文件, 并将其内容以美观、可调整列宽的表格形式展示在界面上, 清晰地量化了不同 Cs 值的表现以及优化算法带来的提升。

Iteration	Time	Cs Value	Optimization Strategy	Solver Type	Solver Version	Solver Name	Solver Path	Solver Status	Solver Error
1	0.0	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
2	0.001	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
3	0.002	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
4	0.003	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
5	0.004	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
6	0.005	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
7	0.006	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
8	0.007	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
9	0.008	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
10	0.009	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
11	0.01	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
12	0.011	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
13	0.012	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
14	0.013	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
15	0.014	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
16	0.015	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
17	0.016	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
18	0.017	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
19	0.018	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
20	0.019	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
21	0.02	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
22	0.021	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
23	0.022	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
24	0.023	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
25	0.024	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
26	0.025	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
27	0.026	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
28	0.027	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0
29	0.028	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.0	0.0

图 13 数据解析及展示

③可视化集成: 提供按钮或自动加载功能, 调用后处理脚本 (plot_results.py) 生成 C_p -时间 对比图, 并将图片展示在界面中。

系统会自动生成并加载 C_p -时间对比图, 直观地展示了优化效果。

- 黑色实线: 代表作为“标准答案”的实验数据。
- 红色虚线: 代表使用固定的、未经优化的 C_s 值 (0.17) 得到的模拟结果。
- 蓝色实线: 代表自动化流程的成果。该曲线上每一个点都取自那个时刻与实验数据最匹配的“最优 C_s ”的模拟结果。

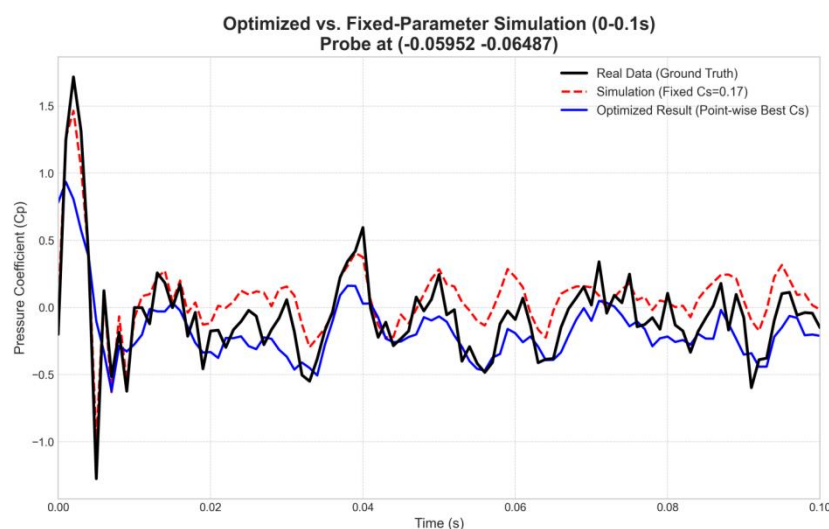


图 14 可视化对比图生成

④结果分析: 从图中可以清晰地看出, 蓝色“优化结果”曲线在绝大多数时间点, 尤其是在压力脉动的峰值和谷值区域, 都比红色“固定参数”曲线更贴近黑色“实验数据”曲线。这有力地证明了本集成系统在进行复杂 CFD 参数寻优任务时的有效性与高自动化水平。

4.2.科普教学模式

4.2.1. 设计思路概述

CHU 长安风领平台的教学模拟模式旨在为高校相关课程 (如《桥梁风工程》《汽车动力学》《航空航天器制造》《流体力学》《水力学》等) 提供一种高效、直观的教学辅助工具。通过与教材内容紧密结合, 帮助学生更好地理解复杂的流体力学现象和理论知识, 搭建起实际工程应用与理论学习之间的桥梁。该模式深度锚定高校教材核心知识点与经典案例, 针对《流体力学》中“边界层分离”

“湍流发展”等抽象理论，平台可通过数值风洞模拟生成动态流场可视化效果：彩色流线实时展现气流运动轨迹，压力云图直观呈现压强分布差异，让学生从视觉维度快速理解复杂流体现象的物理本质。

同时，平台内置“虚拟实验交互系统”，支持学生自主调节关键参数（如风攻角、风速）并并即时观测变化，让抽象公式与具象现象形成联动认识。此外，平台还搭建了经典工程实例资源库，收录经典实例，支持学生自主调节相应参数，结合教材理论与工程实际进行理解掌握。

4.2.2. 功能设计

(1) 科普教学模式主页面展示



图 15 科普教学模式主页面展示

登录系统后，用户可进入长安风领科普教学模式主界面，该界面作为高级计算流体力学（CFD）仿真平台的统一入口，集成了三大核心功能模块：风洞模拟模块、技术文档库与案例数据库。其中，风洞模拟模块支持用户基于预设或自定义几何模型开展数值风洞实验，实现流动场的实时可视化与动态交互；技术文档库提供数学模型、算法实现及 API 接口等关键技术资料，支撑用户深入理解平台底层逻辑与开发扩展；案例数据库则汇聚 86 个经典实验案例与研究成果，涵盖桥梁、建筑、交通等典型应用场景，为教学与工程实践提供可复用的数据资源与参考方案。平台通过模块化架构与一体化导航设计，构建了从基础认知到深度应用的完整知识闭环，服务于科研、教学与工程决策的多维需求。

(2) 教学案例库

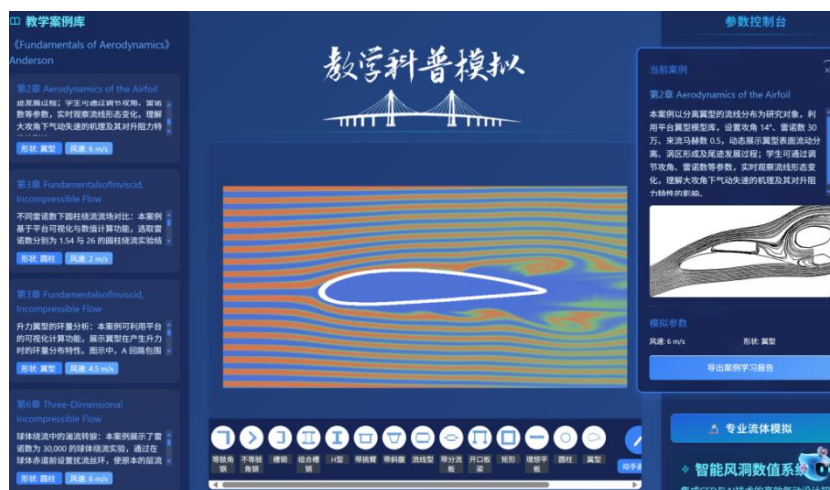


图 16 科普教育模块翼型材质视图

教学案例库是科普教学模式的核心入口，其设计遵循“以教促学、以案带理”的教育逻辑，将经典流体力学教材内容转化为可交互的数字实验。该模块以《Fundamentals of Aerodynamics》（Anderson）等权威教材为蓝本，按章节结构组织案例资源，形成从基础概念到复杂现象的递进式学习路径。例如，第二章“Aerodynamics of the Airfoil”案例聚焦翼型绕流特性，用户可通过自主调整材质场粗细、风速等级，点击材质视图、速度视图、压力视图来进行定制化仿真，从而探究翼型表面流动调节、涡区形成及尾迹发展过程。

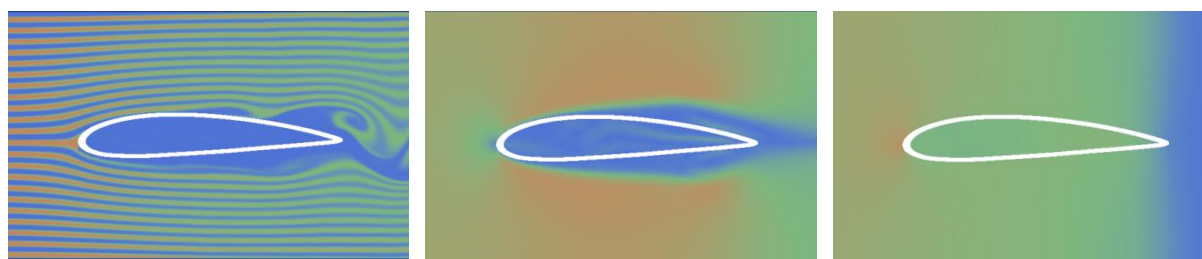


图 17 材质、速度、压力视图

每个案例均配备简明的背景说明与教学目标描述，帮助学生理解实验目的与物理意义。左侧导航栏中，案例以卡片形式呈现，每张卡片包含标题、所属章节、关键参数（如形状、风速）及简要说明，支持展开查看完整描述。这种结构化布局不仅便于教师按教学计划组织内容，也利于学生自主检索与复习，实现了传统纸质教材向数字化互动资源的平滑过渡。

在教学科普模拟模块的底部工具栏中，用户可通过点击预设的构件图标（如等肢角钢、不等肢角钢、槽钢等）快速切换障碍物几何模型。这些构件均基于典型工程结构设计，覆盖桥梁、建筑及交通设施中的常见截面形式，支持用户在不同场景下对比分析其绕流特性，增强对气动性能差异的直观理解。“动手画”功

能为用户提供了高度自由的交互式创作环境，支持通过鼠标连续拖动在模拟区域自主绘制任意形状的障碍物轮廓。系统实时将用户手绘路径转化为几何边界，并立即启动流场计算，动态展示该自定义结构周围的流线分布与压力变化过程。

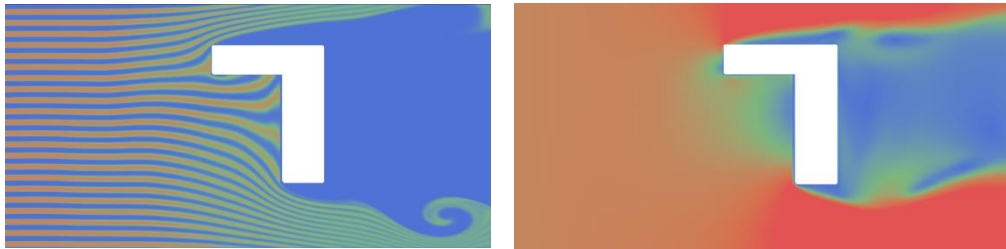


图 18 等肢直角钢材质、速度视图

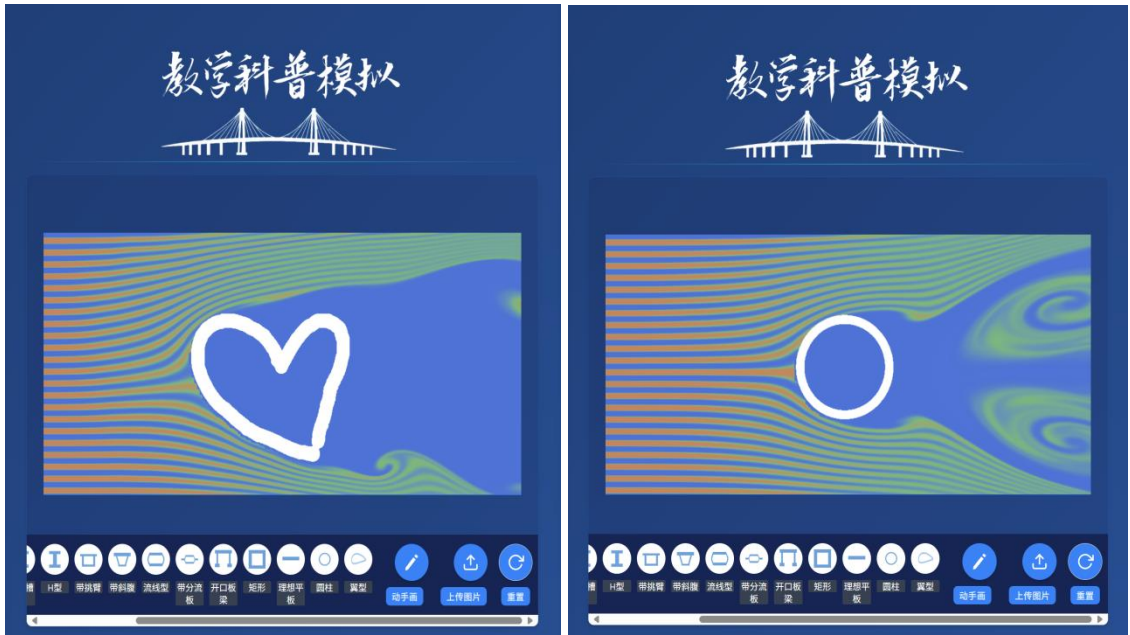


图 19 动手画功能

（3）可视化功能高效

软件实现了速度场、压力场的实时计算，能够快速生成直观的风速、压力和纹理的可视化图像。教学应用中，教师可以借助这些形象化的图像地解释抽象理论，有助于学生观察和理解流体的视觉行为及其物理现象，更快地建立对末端行为的理解。教育科普中，通过卡通化渲染和趣味元素，软件能够以游戏化、互动式的学习模块呈现复杂的风洞技术，使原本抽象的专业概念变得生动易懂，更有

效地完成科普的任务。

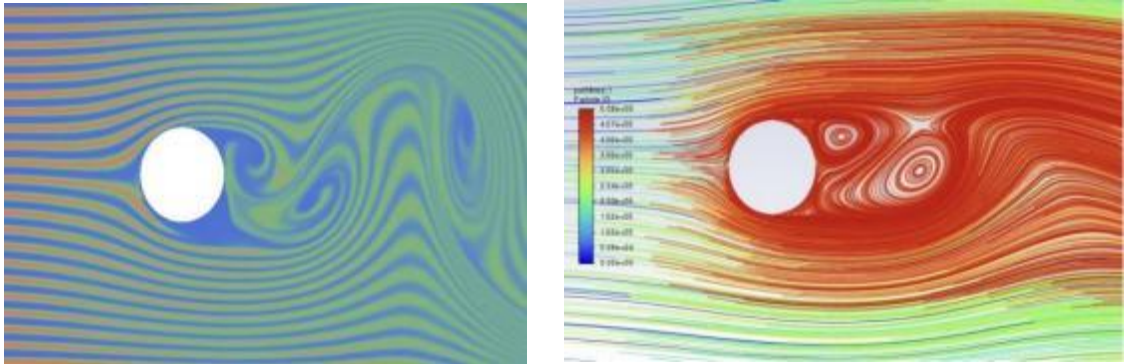


图 20 与 Fluent 模拟结果材质图对比

本项目基于数值风洞软件开发目标，结合实证测试与典型障碍物案例 对比分析，构建了以数值精度、计算效率及工程适用性为核心的三维技术 指标体系。选取球体（20mm×20mm）作为基准障碍物（图 1）及板梁横截面^[2]，通过本项目平台与Fluent 2022R2 同步仿真验证，关键指标量化分析如表 4 所示：



图 21 障碍物球体

流场求解精度验证

表 4 流场求解精度验证

参数	本系统实测值	Fluent 参考值	相对误差	测试条件
阻力系数 Cd	1.32±0.03	2.2%	1.29±0.05	R2=2.5×104
斯特劳哈尔数 St	0.148	0.151	3.5	稳态瞬态采样频率 10kHz
表面压力系数极差 Cp	[-2.1, 1.8]	[-2.3, 1.7]	≤4.8%	角钢背风侧测点阵列

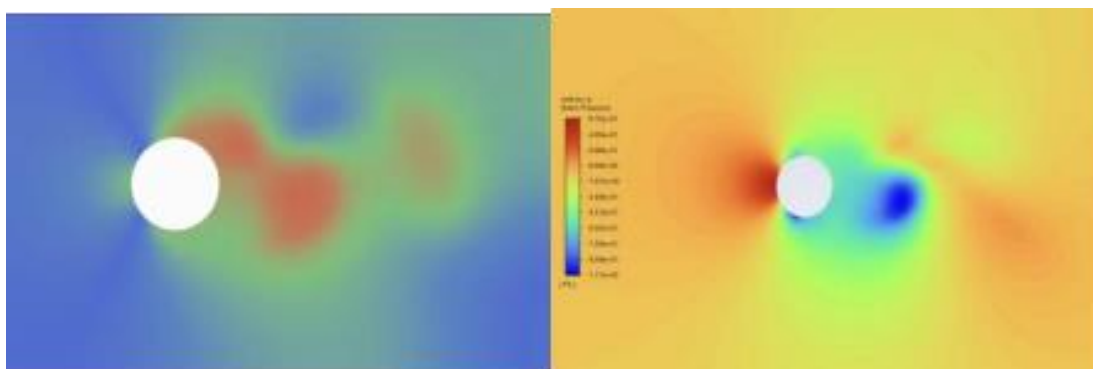


图 22 与 Fluent 模拟结果压力图对比

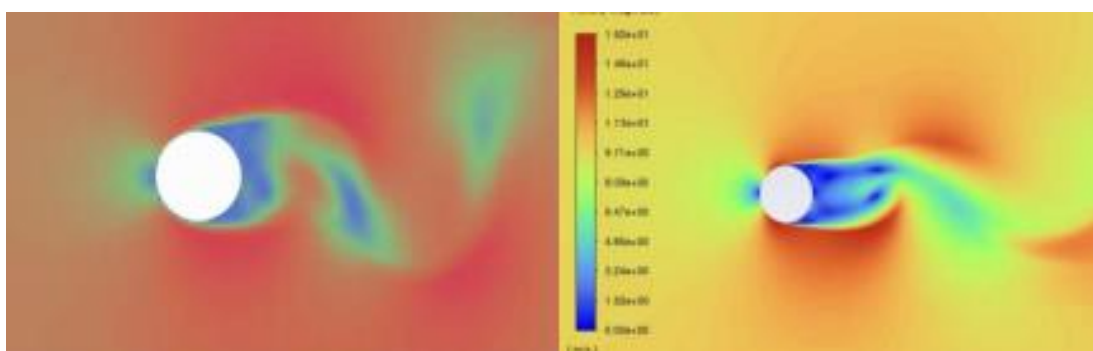


图 23 与 Fluent 模拟结果速度图对比

(3) 专业流体模拟

专业流体模拟模块专为满足课堂教学及科研需求而设计，不仅提供了直观的流场可视化展示，还增加了数据记录、导出以及对特定点进行详细分析的功能。该模块旨在帮助教师和学生了解流体力学基本原理的基础上，进一步探索流动现象背后的物理意义，并通过实际操作加深对理论知识的理解。



图 24 模拟界面（材质视图）



图 25 模拟界面（等值线）

①参数调节与实时反馈

用户可以通过右侧导航栏中的“模拟控制参数”面板调整雷诺数、障碍物形状等关键参数。系统会即时根据新设置更新流场计算结果，提供实时反馈，使学习者能够迅速观察到不同条件下的流动特性变化。

②参数调节与实时反馈

中央区域以二维平面图形式动态展示速度场、涡量或压力等物理量分布情况。同时提供线性与对数色彩映射模式选择，便于观察不同尺度下的流动特征。此外，左侧“视图调节”选项允许用户切换至材质视图，查看流体与固体表面相互作用的效果。



图 26 归一化方向速度

③数据记录与导出

针对教学中需要收集实验数据的需求，此板块特别设置了“记录数据”功能。用户可选定感兴趣的点或区域，软件将自动记录对应时刻的速度、压力等信息。所有记录的数据均支持一键导出为 Excel 格式文件，方便后续分析使用。

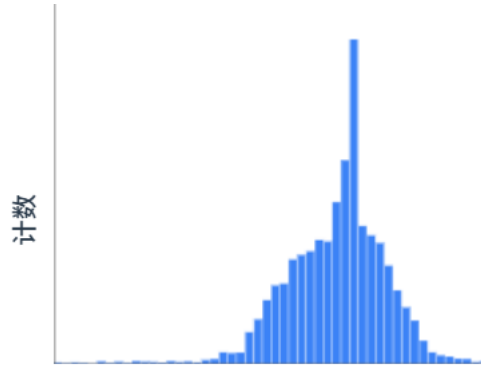


图 27 速度直方图

④生成学习报告

为进一步辅助教学，平台新增了“生成学习报告”功能。点击后，系统会自动调用内置 AI 引擎，基于用户上传的 Excel 数据生成一份包含实验背景、数据分析图表（如平均值、最大值等）、结果解释等内容的学习报告。这份报告将以 HTML 格式输出，采用蓝色学术风格设计，适合用于课程作业或项目汇报。



图 28 按键设置



图 29 学习报告（部分）

数据摘要

本次仿真共记录了 220 帧数据，通过对这些数据的分析，可以观察到流体在障碍物周围的流动特征。在障碍物前缘，流体速度减小，压力增加；在障碍物后缘，由于边界层分离现象，形成了涡旋结构，这些涡旋对阻力的产生有重要影响。

典型数据示例

帧编号	位置(X, Y)	速度(Vx, Vy)	压力
1	(1, 1)	(0.1975, -0.0017)	1.0061
2	(1, 1)	(0.1977, -0.0015)	1.0056
3	(1, 1)	(0.1979, -0.0014)	1.0051
4	(1, 1)	(0.1981, -0.0012)	1.0046
5	(1, 1)	(0.1983, -0.0011)	1.0041

图 30 学习报告数据摘要部分

⑤互动式探究环境

为了促进主动学习，本模块保留了播放、暂停、重置等功能按钮，允许用户自由控制仿真进程。结合“剖面控制”滑条，学习者可以任意选取空间位置进行切片分析，探索流动内部结构。

(4) 游戏化交互模式

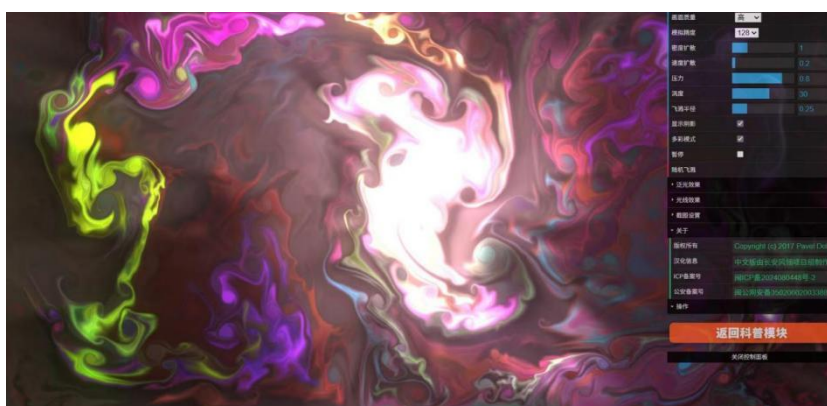


图 31 游戏模式演示

游戏化交互模块以“趣味性”与“直观感知”为核心目标，通过将基础流体力学原理转化为可操作的视觉艺术体验，构建了一个低门槛、高吸引力的科普互动环境。该模块基于简化 Navier-Stokes 方程的轻量化数值求解框架，用户可通过鼠标在屏幕上任意点击或滑动，系统即在对应位置生成初始扰动源，激发局部流场演化，形成动态扩散、涡旋卷曲与相互作用的彩色流动图案。

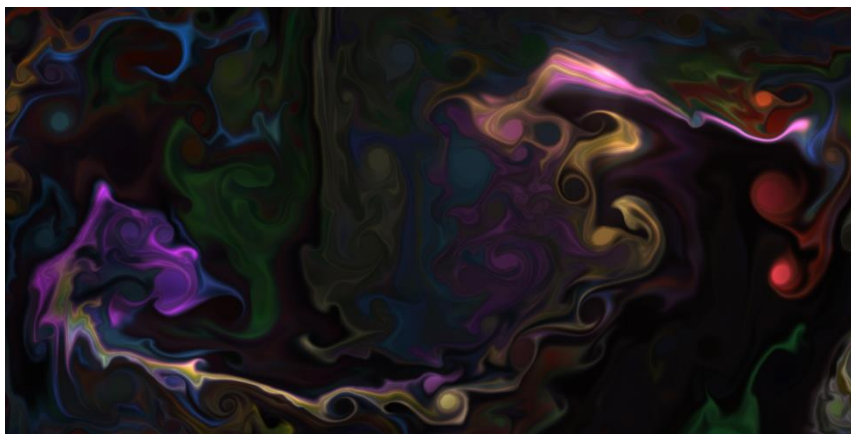


图 32 漩涡耗散

流场行为遵循物理规律：点击点产生初始速度脉冲，随后在粘性耗散与压力梯度驱动下，颜色随时间逐渐混合、变形并最终消散，模拟真实流体的非定常运动过程。滑动操作则连续注入多个扰动源，形成多股流体交汇、碰撞与融合的复杂现象，直观展现涡旋生成、对流传输与能量衰减等基本机制。色彩映射采用多通道渐变方案，结合“多彩模式”与“显示阴影”选项，增强视觉层次感，使抽象的流动结构呈现为具有美感的艺术形态。

右侧控制面板提供参数调节功能，包括画面质量、模拟精度、密度与速度扩散系数、压力强度、涡度增益及飞溅半径等，用户可自主调整仿真效果，探索不同物理参数对流动形态的影响。同时支持“暂停”、“随机飞溅”等操作，便于观察特定时刻的流场状态。



图 33 控制面板参数调节按键

4.3.核心功能验证

本项目的工程模拟模块，在于构建了一套从“模型假设”到“实验校准”的范式跃迁。这不仅体现在寻找单一测点的动态最优参数序列，更体现在通过数据驱动的方法，揭示了最优参数的空间动态特性，并实现了基于流场物理特征的智能分区赋参。下面以长安大学风洞实验室 CA-03 大气边界层风洞中进行的单箱三室钢箱梁节段模型测压试验作为实际数据基准，使用“长安风领”软件，进行了数据与物理双驱动的参数反演和基于流动同质性的分区赋参，对软件的实际效果进行了有力的验证。

4.3.1. 固定参数的局限性与全局优化

为验证参数优化的必要性，我们首先评估了一系列固定 C_s 值的性能。图 33 展示了每个固定 C_s 值对应的仿真结果与实验数据的总体均方根误差 (RMSE)。结果表明，全局最优的固定参数为 $C_s = 0.10$ ，其性能显著优于传统推荐值。然而，图 34 的参数性能全景热图进一步揭示，没有任何一个固定的 C_s 值能在所有时间点都达到最优，最优参数区域（冷色调）随时间而变化，这直接暴露了固定参数模型的内在局限性。

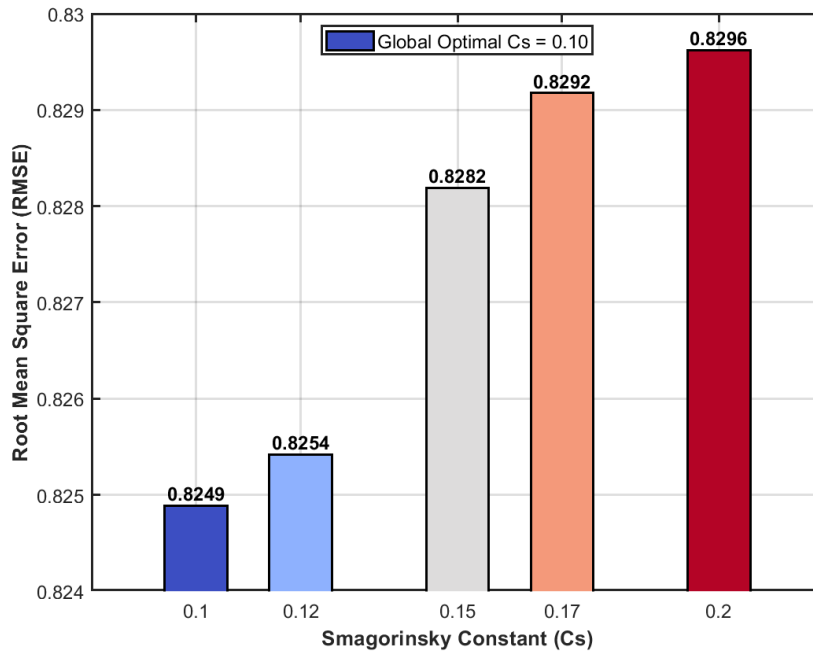


图 34 全局最优 C_s 值确定

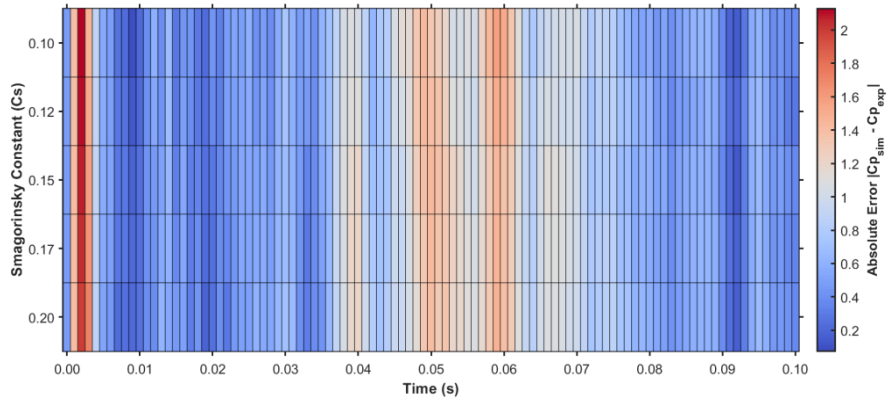


图 35 不同 C_s 值下仿真误差的时空分布 heatmap

4.3.2. 动态最优 C_s 序列的揭示与验证

本研究的核心发现是，最优的 C_s 值本身是一个随流场演化而动态变化的序列。通过在每个时间步独立寻优，我们得到了如图 35 所示的“动态最优 C_s 序列”。将此序列应用于仿真，其结果（图 36 左，蓝色曲线）在时域和频域（图 36 右）上均比任何固定参数的仿真结果更逼近实验真值，证明了动态校准的优越性。

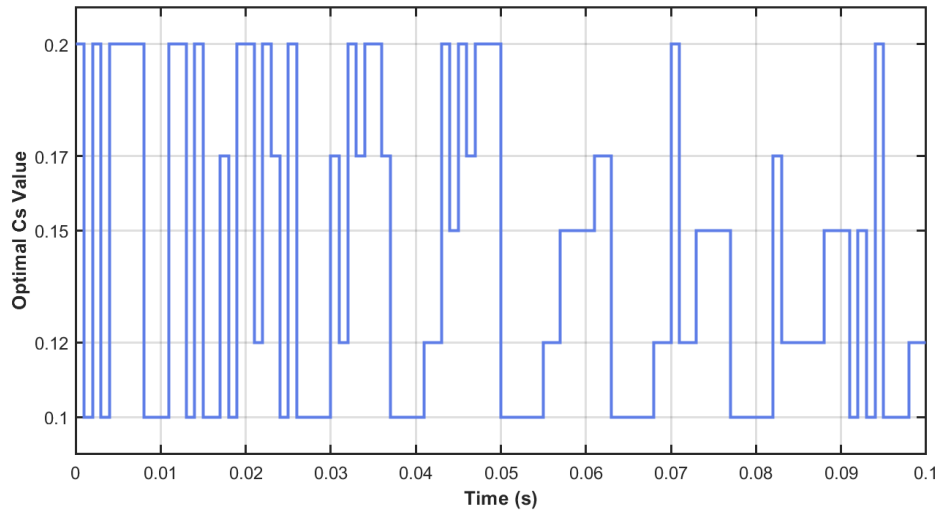


图 36 动态最优 C_s 值序列

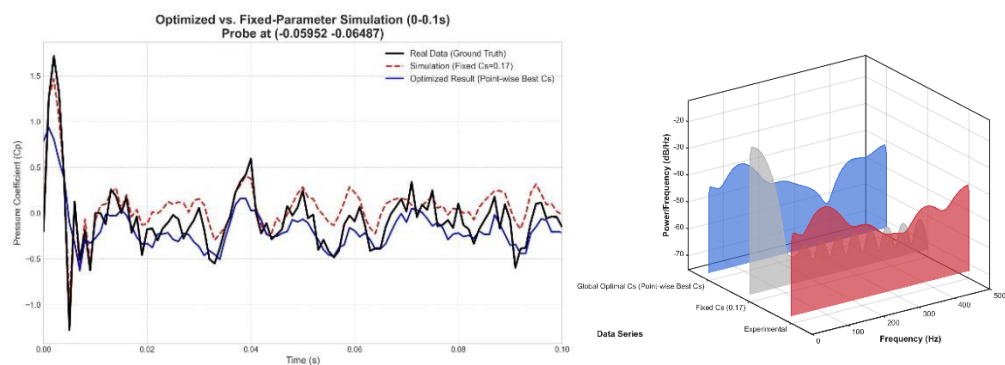


图 37 时程对比（左）与功率谱密度对比（右）

4.3.3. 数据驱动的智能分区赋参

为将动态校准的思想工程化，我们提出了数据驱动的分区赋参策略。图 37 展示了利用 K-means 算法，根据压力“动态指纹”客观识别出的 6 个流动同质区。这些分区在空间上连续且边界分明，与物理现象高度对应。图 38 的三维复合图进一步将这些抽象的分区与真实的平均压力场叠加，直观地揭示了特定流态（如分区 6）与关键压力特征（如强吸力峰）的内在关联。图 39 则展示了应用分区赋参策略后，一个时刻的压力场（ C_p ）快照，其流场细节相比全局参数更为丰富。

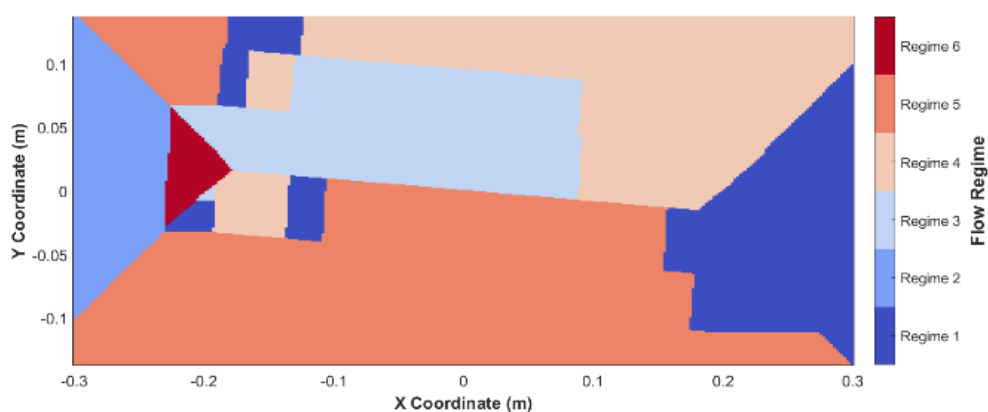


图 38 基于 K-means 聚类的数据驱动流态分区

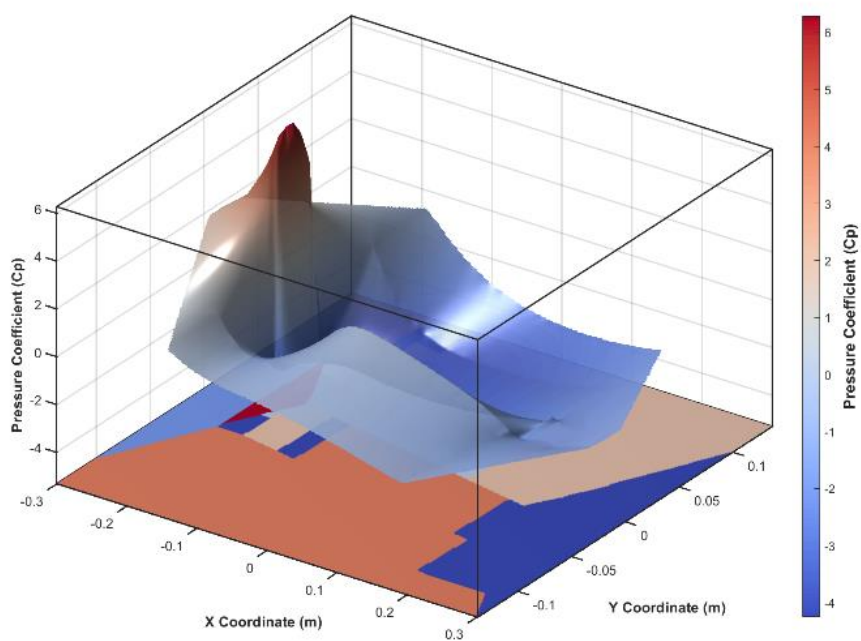


图 39 流态分区与平均压力系数 (C_p) 的三维复合图

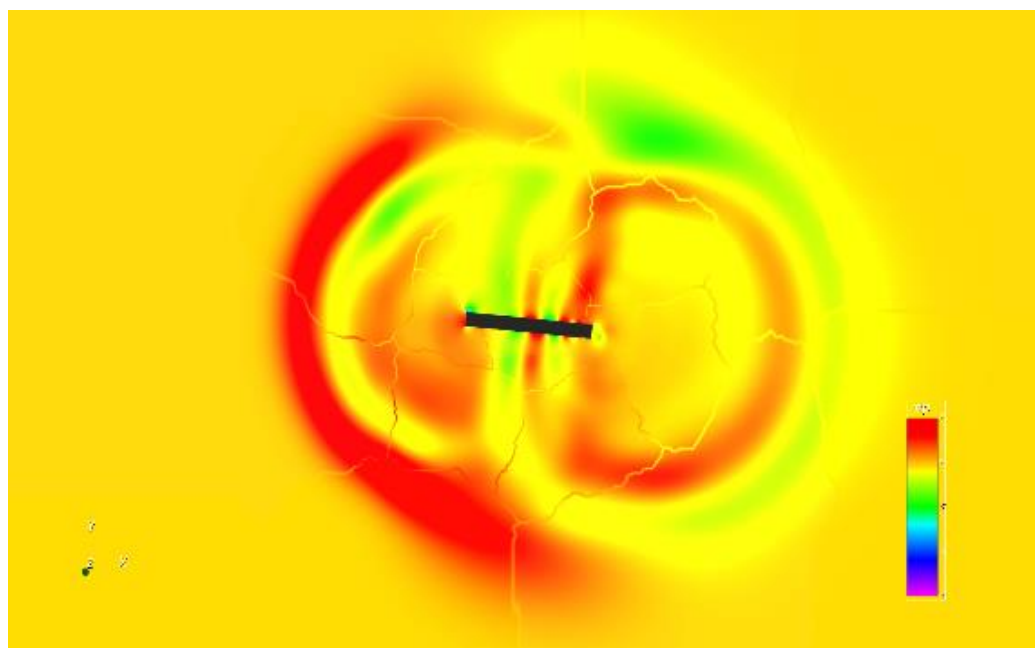


图 40 应用分区赋参策略的瞬时压力场 (C_p) 云图

5. 创新点

5.1. 工程模式创新

(1) 数据与物理双驱动的参数反演机制——实现从“模型假设”到“实验校准”的范式跃迁

传统大涡模拟（LES）中亚格子尺度模型的闭合依赖于对湍流物理过程的经验性假设，其核心参数（如 Smagorinsky 常数 C_s ）通常采用全局固定值或基于 Germano 恒等式的动态求解方法。然而，前者难以适应复杂流动中非平衡、强各向异性区域的局部特性，后者虽具自适应能力，但仍受限于线性涡粘性假设与空间平均操作，无法完全规避模型结构性误差。针对这一瓶颈，本项目提出并实现了基于风洞实验数据驱动的 C_s 值反演标定方法，构建了“先实验标定，后数值应用”的两步法策略，实现了“从纯模型驱动”向“数据与物理双驱动”的根本性转变。

该机制的核心在于打破传统 CFD 仿真中“给定参数→输出结果”的单向流程，转而建立“实测响应→反求最优参数”的逆向闭环。系统以高精度风洞实验所获取的关键位置压力或速度时间序列作为物理真实性的外部基准，通过自动化脚本驱动“风雷”求解器，在预设区间内遍历一系列 C_s 值并执行短时瞬态 LES 计算，提取对应工况下的仿真响应。随后，将仿真结果与实验数据进行逐时间步比对，依据最小化误差准则筛选出最能复现实测流动行为的“等效最优” C_s 值。此过程不依赖于模型内部的数学推导路径，而是以最终物理效果为评判标准，有效规避了传统动态模型因闭合假设失真而导致的系统性偏差，尤其在流动分离、再附着等非平衡区域展现出更强的鲁棒性与物理保真度。

该创新本质上是一种“灰箱系统辨识”思想的应用：以第一性原理 LES 框架为白箱基础，引入风洞实验数据作为黑箱约束，通过对关键参数的循环寻优实现模型与现实的深度融合。通过一次精细化的离线标定，即可获得高置信度的参数配置，为后续大量设计迭代提供可靠输入，显著提升了数值风洞在桥梁抗风、交通工程等领域的预测精度与工程可用性。

表 5 与传统数值模拟对比

对比维度	传统数值风洞方案	本 APP 方案
CFD 参数调试方式	人工经验试错，无量化标准	实测数据驱动迭代，自适应优化
测风仪部署数量	多（桥梁跨中、墩顶等关键位置）	少（仅需少量测点可推知全域）
风场数据覆盖范围	局部（有限测点）	全域（1m 节点级细化数据）
工程成本（测风+仿真）	高（多测风仪+重复试错）	低（少测风仪+一次优化）
衍生应用能力	仅局部风场数据，无萨领域价值	衍生风压/涡激力等参数，支撑桥梁/建筑/风能领域

（2）基于流动同质性的分区赋参机制——推动 LES 模型工程落地的可扩展路径

尽管上述反演机制显著提升了 LES 模拟的准确性，但若需对全场每个网格独立执行参数优化，则计算成本将呈指数级增长，难以满足实际工程对效率的需求。为此，本项目进一步提出基于流动同质性的分区赋参策略，将局部流场划分为若干功能区域，并在每个区域内统一应用由代表性测点反演所得的最优 C_s 值，实现了从“点级优化”到“面域推广”的高效转化，为 LES 模型在复杂工程问题中的规模化应用提供了切实可行的技术路径。

该策略的合理性建立在湍流物理的内在规律之上。在壁湍流与分离流动中，拟序结构（如低速条带、发卡涡、卡门涡街）呈现出显著的空间周期性与统计自相似性，同一类结构主导的区域具有相似的能量生成与耗散机制；同时，应变率场在空间上具有强关联性，相邻区域的流动状态趋于一致。因此，在某一代表性位置反演得到的 C_s 值，可合理外推至与其流动特征相近的邻近区域。软件采用维诺图（VoronoiDiagram）对结构表面进行几何分区，将抽象的“流动同质区”转化为可操作的二维区域模板，并通过空间映射实现参数场的精确赋值。这种分区策略不仅符合工程直觉，也具备坚实的物理基础。

相较于传统动态模型在线计算每一时刻、每一网格的 C_s 值所带来的巨大算力消耗，本方法以“查表式”区域赋参取代实时动态求解，在保持参数物理合理性的前提下，将计算效率提升一个数量级以上。更重要的是，该机制打破了 LES 模型因计算昂贵而难以普及的困局，使其从局限于科研探索的“学术模型”转变

为可用于日常设计优化的“工业工具”。通过将高精度标定成果固化为可复用的参数模板，本方法显著降低了 LES 的应用门槛，为该类先进模拟技术在桥梁、建筑、风能等行业的广泛推广创造了条件，体现了从“理论先进性”向“工程实用性”的成功跨越。

5.2. 教育科普模式创新

传统数值风洞软件本质是“工程工具”，其设计逻辑以“功能全面、结果精确”为核心，这导致了其在教学场景中的结构性错配。本项目根本性创新在于，首次提出了“以教学为中心”的仿真软件设计哲学，实现了从服务于“工程问题”到服务于“认知规律”的范式转移，填补了针对高校学生、大众等用户的流体力学仿真软件的市场空白。

(1) 理念创新：从“功能集成”到“认知减负”的设计原则革命

设计理念上，教育科普模式摒弃传统 CFD 软件面向工程追求功能大而全的复杂集成，首创“以学生为中心”的轻量化、游戏化 CFD 仿真模式。

团队深度解构流体力学知识体系，通过认知减负提高教学效率，将关键知识点封装为“一键仿真”的标准教学案例。在页面设置的经典教材目录结构完全同步的“教学案例库”中，学生可沿“书目-章节-实验”的路径进行体系化的学习与探究。每个案例均集成了预设参数、背景理论、仿真动画和关键结论，形成了“即点即学、即仿即见”的沉浸式学习体验，使学生从繁琐的设置中解放，聚焦于物理现象与原理本质。

此外，软件创新性地集成 AI 助学助手，在仿真界面侧提供实时理论讲解，进一步强化其作为智能教具的核心功能，构建了“现象观察-原理学习-互动验证”的完整教学闭环，达到突出原理，强化知识点的效果，实现了 CFD 从“科研工具”到“科普教具”的本质转变。

表 6 平台对比及核心优势

对比维度	ANSYSFluent	长安风领平台	核心优势
计算效率	工作站数小时运算	GPU 加速秒级输出	速度提升 90%，内存占用 500MB
操作门槛	需专业背景（学习 ≥ 6 月）	AI 引导零基础操作	学生 10 分钟完成实验
定制化功能	通用性强	交通工程专用数据库	预置 15 种模型，风振系数优化 20%
成本部署	年费>50 万元+专用硬件	云端 SaaS 年费<1 万元	低成本技术普惠

（2）模式创新：强交互与高度可视化的融合

通过 Qt 的轻量化交互设计，复杂风场现象被转化为“可操作、可观察”的科普工具。APP 充分调用 FastCAE 强大的可视化模块，将原本抽象、晦涩的湍流模型、边界层发展等空气动力学理论知识，以动态风速云图、涡量矢量动画等直观、生动的形式呈现给学生。学生在学习过程中，可以自由调整攻角、风速等关键参数，实时观察风场的变化规律，深入理解不同参数对风场特性的影响。这种互动式、可视化的学习方式，极大地激发了学生的学习兴趣，让复杂的流体力学知识变得易于理解与掌握。前端交互实为对数据库的智能调用与实时渲染，从而在普通电脑上也能实现秒级响应的流畅交互体验，使得在有限的课堂时间内完成多次探究性实验成为可能，极大提高了课堂效率。

（3）场景创新：打造“课堂-课外-科普基地”三位一体的落地生态

传统的 CFD 软件应用场景涵盖实验室、课堂，处于比较单一的处境。本模式构建了一套从高校专业教育到社会公众科普的完整落地体系，拓宽了数值风洞软件的使用人群，并通过多方面活动积累了丰富的实践数据，既验证了软件有效性与可推广性，也通过软件效果进行反馈调节。

在指导老师的帮助下，软件已融入长安大学公路学院《桥梁风工程》研究生课程的教学课堂。老师在课堂上使用软件进行快捷的实例展示，92%的学生认为该软件显著提升了他们对“旋涡脱落与颤振”等抽象概念的理解效率。

6. 研发历程

长安大学公路交通博物馆三楼的风洞模型展区，是我们团队科研梦想的起点。作为长安大学公路交通博物馆的志愿讲解员，我们在风洞展区的日常讲解中发现，风工程知识对公众而言过于抽象，难以直观理解。2023 年，几位桥梁工程专业的同学在课堂学习中接触到数值风洞概念，萌生了开发科普型数值风洞的想法，于是联合交通工程与电子信息工程专业同学组建了智风团队，明确以科普为导向开发轻量级数值风洞模拟平台。在桥梁领域专家李佳武教授担任博物馆馆长后，他大力支持这一创新方向。在深入学习中，我们注意到 LES 模型中 Smagorinsky 常数 C_s 的静态设置限制了模拟精度，恰逢“挑战杯”揭榜挂帅——计算流体力学开源软件数值仿真竞赛启动，于是我们基于国产开源 CFD 求解器“风雷”进行二次开发，成功实现了 C_s 参数的数据驱动反演机制。最终，团队打造了智风 2.0 版本——长安风领平台，将风洞科普与工程应用无缝衔接，为公众和工程师提供兼具科学性与实用性的数字工具。历经 902 天的日夜兼程，从风洞展区的困惑到代码间的精准求解，我们以青年之志丈量科学与教育的距离，让抽象的湍流在交互中化为可触可感的智慧之光。

6.1. 团队研发历程

（1）2023.5 创意起点

在交通馆担任志愿讲解期间，我们在三楼讲解风洞模型的过程中切实体会到传统展陈的局限：有限的测点难以还原全场流动，复杂的流体机理也难以借助实体模型直观解释，科普教学的“可看、可懂、可用”效果受限。与此同时，团队注意到传统物理实验成本高、周期长，而主流数值模拟上手门槛高、流程繁复，难以满足科普教学对实时性与交互性的要求。一次讨论中，我们提出以“低成本数值风洞”为目标的设想：基于少量测点推演全域风场，并实现浏览器端实时可视化与互动。这一设想即“智风平台”的雏形，标志着我们从交通科普痛点切入工程仿真方向的第一次系统探索，也为后续的需求分析、技术选型与原型研发奠定了清晰的起点。

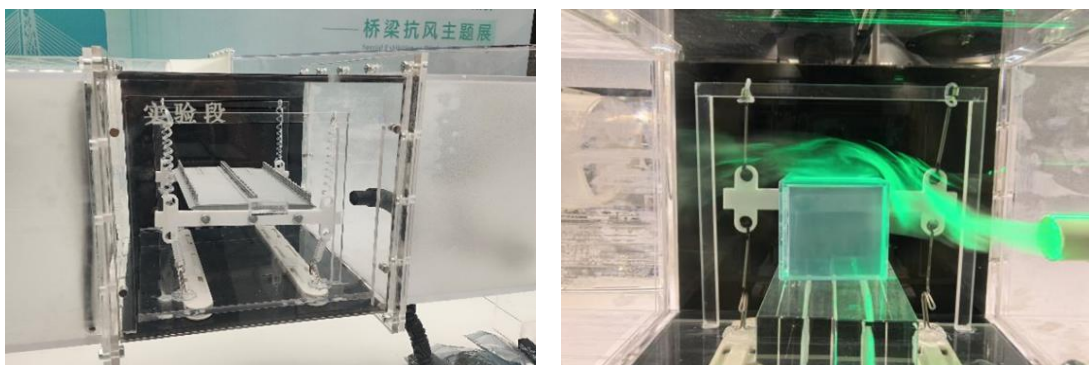


图 41 团队开发的回流式风洞微缩模型

（2）2024.1-2024.5 实地调研

随着对项目技术边界与应用潜力的深入思考，我们意识到平台若仅停留在科普展示层面，难以实现从知识传播到实际工程价值的跨越。为突破这一局限，团队成员主动拓展技术视野：一方面系统研读桥梁抗风理论，多次走访港珠澳大桥、虎门大桥等标志性工程，通过实地调研捕捉一线工程师对风环境模拟的实际需求与技术痛点；另一方面结合计算机专业同学加入后带来的算法优化思维，对比分析主流 CFD 工具与工程实践中的适配性差异，并在导师指导下验证了“代理模型替代传统求解器迭代”的技术路径可行性。这一阶段的跨学科探索，不仅让我们对风工程问题的复杂性有了更立体的认知，更通过理论与实践的双向印证，为后续将工程模拟模块深度嵌入平台架构提供了关键支撑——这既是技术认知的跃迁，亦是团队从“科普传播者”向“工程问题解决者”身份转变的重要起点。

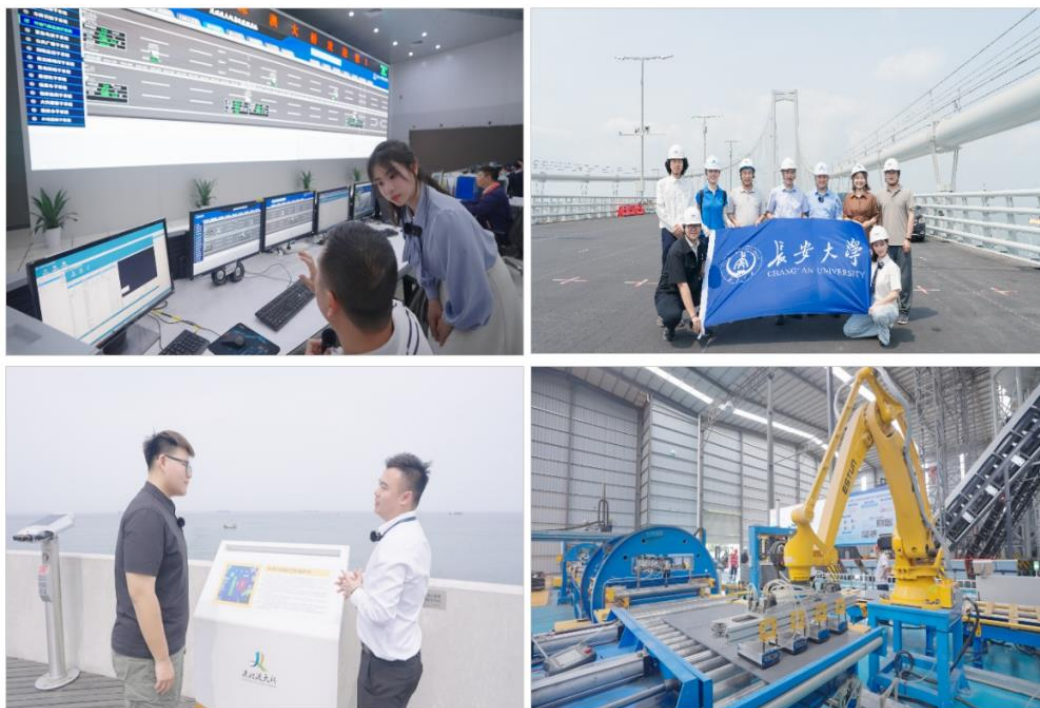


图 42 团队前往港珠澳大桥调研

(3) 开发期间的科普实践

在网页开发过程中，我们积极组织开展科普活动，致力于将复杂的科学原理以通俗易懂的方式呈现给公众。2024 年 5 月，我们在长安大学公路交通博物馆举办了“‘吹’出来的桥梁新科技”科普活动，借助平台进行直观展示，开展“风洞探秘”实践体验，吸引了众多参观者的兴趣和参与。此外，我们还联合多所中小学及博物馆开展定期科普活动，包括 2024 年 6 月与陕西科技大学中国轻工业博物馆共同走进清华附中秦汉中学，2025 年 5 月走进曲江第一中学等。通过这些活动，我们不仅积累了丰富的科普实践经验，还进一步完善了平台的功能和用户体验，为后续的开发工作提供了宝贵的反馈和建议。



图 43 团队外出科普

(4) 2024.7 技术定型

基于前期的积累和调研成果，团队确立了“物理数值融合+全链路自主可控”的技术路线。这一技术路线的确定，是我们在理论创新和工程实践相结合方面的重要成果。核心突破包括采用“Kriging 代理模型+高精度求解器”双引擎架构，构建五层异构系统，并规划了三阶段开发目标。这一技术框架既满足工程级精度要求，又保留了教学场景所需的交互轻量化特性，实现了科普与工程应用的完美平衡。此外，我们还积极探索了 APP 开发的可能性，希望通过移动应用的形式进一步拓展平台的使用场景和用户群体，为用户提供更加便捷、高效的使用体验。

（5）2024.9 原理深化

通过多次组会研讨，团队结合实地调研所得，进一步明确了软件研发的技术方向。特别在桥梁气动优化等关键模块上，确定了以物理模型为基础、数值模拟为延伸的技术路径，确保平台在工程应用中的可靠性。这一阶段的工作，不仅深化了我们对桥梁抗风理论的理解，还为平台的核心功能开发提供了坚实的理论支撑。我们通过不断地优化算法和模型，提高了平台的计算精度和效率，使其能够更好地满足工程实际需求。

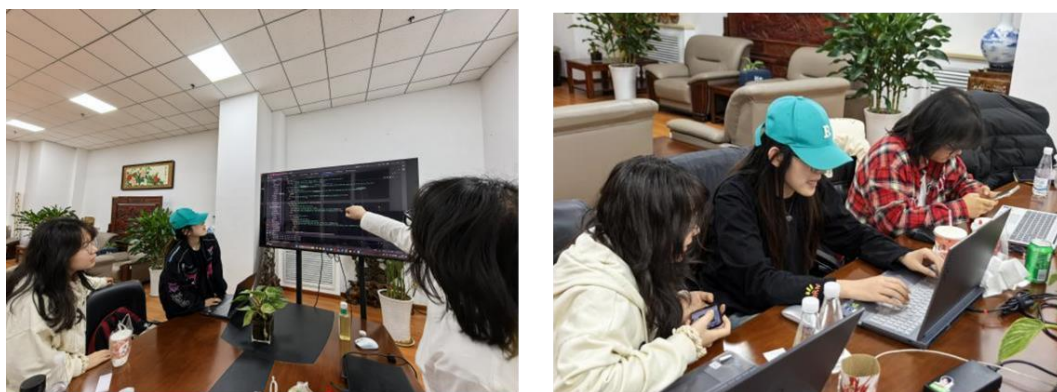


图 44 软件开发现场



图 45 团队与指导老师讨论

（6）2024.12 平台验证

历时三个月的集中开发，我们完成了基础平台搭建。平台首先在长安大学公路交通博物馆投入试用，通过可视化交互让参观者直观理解风洞原理，极大地提升了科普教学的效果。随后，平台在黄茅海大桥气动优化方案筛选中完成工程验证，与物理风洞试验对比显示出良好表现（误差 $\leq 5\%$ 、周期缩短 70%），初步实现了我们“既服务科普又助力工程”的初衷。这一阶段的验证工作，不仅证明了平台的技术可行性和有效性，还为后续的优化和拓展提供了重要的参考依据。

（7）2025.1–至今持续优化与应用拓展

针对试用反馈，团队在 2025 年 1 月完成了平台优化。随后平台进入广泛应用阶段：不仅在长安大学《桥梁风工程》等课程中成为教学工具，还通过系列科普活动走进多所中小学；同时与风洞实验室展开合作，将平台应用于实际工程抗风设计。2025 年先后荣获全国大学生交通运输科技大赛陕西赛区一等奖、中国大学生计算机设计大赛国家级三等奖，这是对团队两年来从科普讲解到工程创新这一探索之路的最佳肯定。在后续的工作中，我们将继续深化理论创新，拓展平台的功能和应用场景，进一步提升平台的性能和用户体验，为交通科普和工程设计领域的发展贡献更多的力量。



图 46 作品参加第 18 届全国大学生计算机设计大赛

6.2.团队工作情况总结

6.2.1. 技术开发与创新

代码撰写：在项目开发过程中，团队成员累计撰写代码[X]行。这些代码涵盖了从基础功能搭建到高级算法实现的多个层面，包括但不限于 Kriging 代理模型的开发、高精度求解器的集成、五层异构系统的构建以及用户交互界面的设计。每一行代码都凝聚了团队成员的智慧和心血，是平台能够顺利运行的技术基石。

技术路线与创新：团队确立了“物理数值融合+全链路自主可控”的技术路线，采用“Kriging 代理模型+高精度求解器”双引擎架构，构建了五层异构系统。这一技术框架不仅满足了工程级精度要求，还保留了教学场景所需的交互轻量化特性。此外，我们还积极探索了 APP 开发的可能性，通过移动应用的形式进一步拓展了平台的使用场景和用户群体，为用户提供更加便捷、高效的使用体验。

6.2.2. 用户调研与反馈

问卷调查：为了深入了解用户需求，优化平台功能，团队累计发放问卷调查 2000 余份。这些问卷涵盖了不同年龄段、不同专业背景的用户群体，从科普爱好者到工程技术人员，从学生到教师，广泛收集了用户对平台功能、界面设计、操作便捷性等方面的意见和建议。通过数据分析，我们对平台进行了针对性的优化，显著提升了用户体验。

用户反馈与优化：在平台试用阶段，我们积极收集用户反馈，针对用户提出的问题和建议，团队在 2025 年 1 月完成了平台优化。这些优化措施不仅修复了已知问题，还进一步完善了平台的功能和交互设计，使其更加符合用户需求。

6.2.3. 团队协作与研讨

组会研讨：项目开发期间，团队共开展组会 40 余场。这些组会不仅是技术交流的平台，更是团队成员共同探讨项目方向、解决问题的重要场所。在组会中，我们深入讨论了桥梁抗风理论、数值模拟技术、用户界面设计等关键问题，明确了软件研发的技术方向，特别是在桥梁气动优化等关键模块上，确定了以物理模型为基础、数值模拟为延伸的技术路径，确保平台在工程应用中的可靠性。

团队协作：团队成员来自不同专业背景，包括交通工程、计算机科学、数学等。在项目开发过程中，各专业成员充分发挥自身优势，紧密协作，共同攻克了一个又一个技术难题。计算机专业的同学负责算法开发和系统架构设计，交通工程专业的同学负责理论研究和工程应用验证，数学专业的同学负责模型优化和数据分析。这种跨学科的团队协作模式，极大地提升了项目的研发效率和质量。

6.2.4. 科普活动与社会影响

科普活动与讲座：为了推广平台，普及风洞知识，团队累计举办科普活动和讲座 15 场。这些活动包括在长安大学公路交通博物馆举办的“‘吹’出来的桥梁新科技”科普活动、与陕西科技大学中国轻工业博物馆共同走进清华附中秦汉中学的科普活动、走进曲江第一中学的科普讲座等。通过这些活动，我们不仅让更多的公众了解了风洞技术，还激发了青少年对科学的兴趣和热爱。

参与人次与社会影响：累计参与科普活动和讲座的人次达到 3 万余人次。这些活动不仅提升了平台的知名度和影响力，还为交通科普事业做出了积极贡献。通过与多所中小学、博物馆的合作，我们建立了长期的科普合作关系，为后续的科普活动提供了稳定的平台。

7. 团队介绍：团队成员介绍

多学院融通、多学科共振，长安风领致力于打造一个集“工程机理、仿真计算与可视化”于一体、高效协同的闭环团队。长安风领团队成员均来自长安大学：汇聚运输工程学院、长安都柏林国际交通学院、信息工程学院与材料科学与工程学院的拔尖学生与骨干力量；专业覆盖道路桥梁与渡河工程、交通运输、交通工程（国际班）、车辆工程、计算机科学与技术、电子信息工程与材料科学。团队以“工程机理、数值仿真、可视化应用”贯通合作理念，搭建有效合作模式，实现从流体力学物理机理建模到高精度工程优化计算，再到交互式可视化展示的闭环创新，加速了科研成果的工程化与场景化落地。

7.1. 学生队员介绍

桥梁与车辆方向成员是研究背景探索、物理建模与工程验证的基础核心。来自道路桥梁与车辆工程专业的成员承担了平台开发的物理建模与工程场景定义工作，是整个系统的工程基础支撑。他们负责建立桥梁断面等三维几何模型，构建复杂风场条件下的气动特征数据库。通过设置入口速度剖面、湍流强度、边界粗糙度及旋转部件参数，形成符合实际工况的边界条件。在“工程模拟模式”中，该方向成员主导桥梁断面测压实验的虚实融合研究，完成从传统风洞实验数据到CFD 仿真数据的映射与校准，实现实验优化与模型可信度提升。他们还负责将实验量测与仿真结果比对，用以验证平台在高风速环境下的流场预测精度，为Smagorinsky-Lilly 模型中CS 值的优化提供物理约束依据。



图 47 团队成员在南京长江大桥前拍摄科普视频

计算机科学技术与电子信息工程方向成员是系统架构与 Cs 值优化的技术中枢。来自计算机科学与电子信息工程领域的队员承担系统架构与核心算法实现任务，是项目的技术中枢。他们负责交互平台层与用户可视化层的整体设计，实现工程、教学与科普三种模式的自适应界面，负责数据采集、处理与校准，构建平台的实测数据支撑体系。他们整合风速、风向、压力等传感数据，与仿真计算结果进行对齐分析，为 CS 值优化与模型验证提供参考基准。通过建立标准化数据接口与可追溯的数据管理体系，该方向成员确保了仿真数据的完整性与可靠性，为平台的科学性评估提供了坚实基础。基于 WebGL 与 Canvas 技术，开发可实时交互的三维流场渲染模块，支持等值面、流线与矢量场的在线展示，确保仿真结果能够以可视化方式直观呈现。在核心创新部分，该方向成员承担了 Smagorinsky-Lilly 模型中 CS 值的自动循环优化研究。他们通过设计代理模型与优化算法，在固定网格与时间步条件下对 CS 值进行动态寻优，实现了仿真精度与计算效率的双平衡。此部分是平台实现“物理数值融合”的关键环节，也是项目区别于传统 CFD 仿真的创新突破。此外，计算机方向成员还构建了全链路的数据流转与并行计算框架，使各模式下的仿真结果能够实时传输、快速加载，并通过模块化接口实现跨层调用。

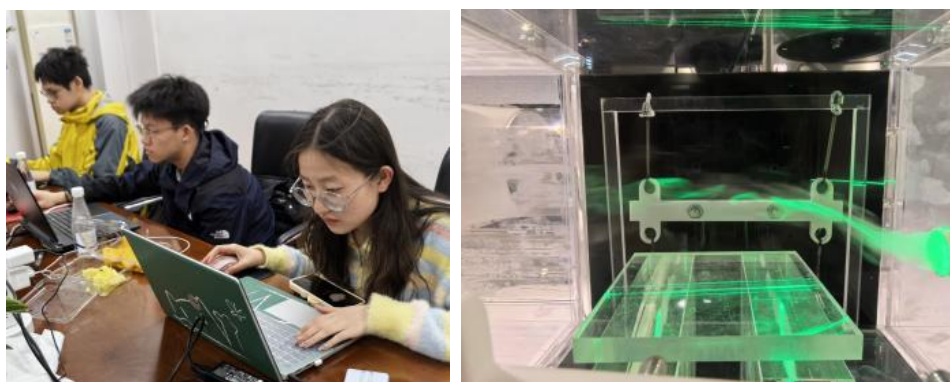


图 48 使用水汽模拟流体

交通工程与材料科学方向成员致力于表面特性与边界控制的细节保障、聚焦于桥梁风工程等实际应用场景的建模与教学可视化设计。他们依据交通安全与气动性能需求，建立不同风速、风向、仿真工况矩阵，用于驱动工程模拟模式的多案例计算。在教学与科普研学模块中，该方向成员同时将复杂的流体力学原理转化为易于理解的教学场景与可交互实验案例，推动“工程教学一体化平台”的构建。其设计成果兼具教学可操作性与科普展示价值，进一步拓展了平台在高校教

学和社会教育中的应用潜力。

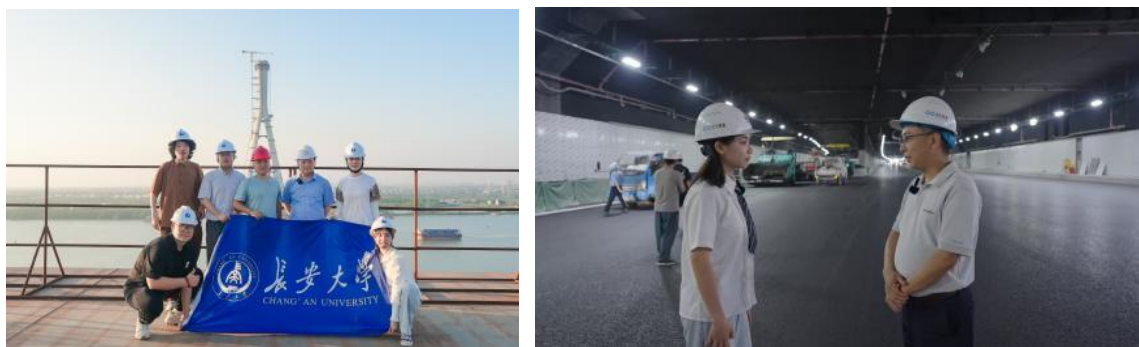


图 49 团队在深中通道调研

7.2 指导老师介绍

(1) **郝键铭**，长安大学公路学院桥梁系讲师、硕士生导师，工学博士（美国纽约州立大学布法罗分校）。曾在 SUNYBuffalo 土木、结构与环境工程系任助研，回国后长期从事桥梁风工程与极端/特异风（如下击暴流、非同步风）作用下的大跨桥梁气动响应研究与数值，风洞协同评估，参与国家自然科学基金等项目并服务多项大桥工程咨询与试验任务。其学术工作聚焦**非同步风**

（downburst 等）与复杂地形风对桥梁的影响机理、CFD 在桥梁风工程中的应用以及大跨桥梁施工期与运营期的抗风稳定性，相关研究发表于

《EngineeringMechanics》《建筑科学与工程学报》等期刊，内容涵盖峡谷地形风参数建模、下击暴流移动效应的风洞/CFD 联合模拟、大跨不对称悬索桥静风与颤振稳定性评估等方向。

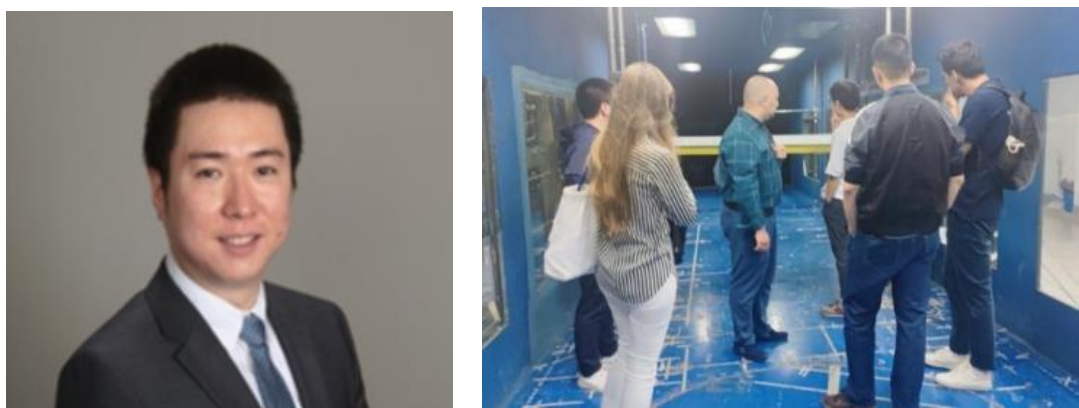


图 50 指导老师介绍风洞实验室

依托其在极端/特异风与复杂地形风的研究与工程经验，郝老师为平台制定来流剖面、湍流强度、地形粗糙度及施工期等参考矩阵，确保断面测压与流场预测采用可复现的物理边界，并服务于固定网格与时间步条件下的 CS 取值优化。结合其在下击暴流、峡谷风与大跨桥颤振研究的试验，数值思路，我们形成“风洞、数值、可视化”的校准流程；同时将极端风转化为工况库与教学案例，配合 WebGL/Canvas 交互展示，并遴选典型工程开展全链路验证，提升行业采信与落地效率。

在郝键铭老师的持续指导下，项目将在**极端/特异风工况建模、工程口径的误差评估、CFD 风洞联合标定以及面向实际工程的 CS 最优区间确定**等关键环节形成方法论与可复用模板，显著提升平台在桥梁风工程真实场景中的**精度、稳定性与可推广性**。

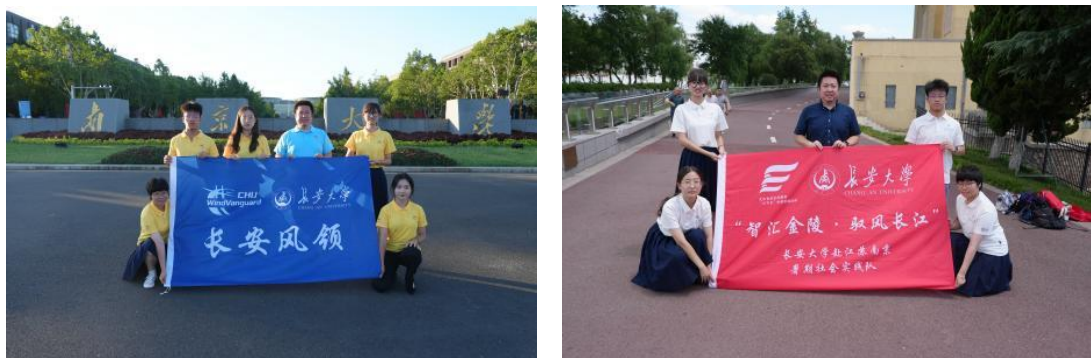


图 51 跟随指导老师前往南京调研

(2) 张晓航，长安大学博士，长期在长安大学公路交通博物馆从事科普教育、课程共建与展陈策划指导工作，深度参与博物馆的申报与运行管理，是单位获批“全国科普教育基地（教育科研与重大工程类）”的重要组织与推动力量之一。围绕“交通强国、科教兴国”的战略主线，张老师在交通工程知识的公众理解与高校课程的可视化教学方面持续耕耘，形成了从内容设计、活动运营到教学评估的完整方法论与实施经验。



图 52 张晓航老师

在张晓航老师的支持下，项目把“桥梁风工程与气动安全”做成可参观、可互动、可评价的展教与课堂资源，提升传播力与社会采信；同时在张晓航老师的指导下，项目将在**实际应用与科普教研**两个维度实现“看得见的落地”：一方面把**CS 值优化**这一科研创新转化为可教学、可推广的**参数寻优范式教材**；另一方面把桥梁风工程的关键知识点做成**可互动的公共科普产品**，实现**科研、教学、科普**三位一体的持续输出，为平台的社会影响力、人才培养质量与推广应用提供强有力的支撑。

(2) 李加武，长安大学公路学院桥梁工程研究所教授、博士生导师，毕业于同济大学桥梁工程专业并在同济大学力学与航天学院完成博士后研究。现任中国空气动力学学会测控专业委员会委员、风工程专业委员会委员，兼任九三学社长安大学委员会主委，长期从事大气边界层风场、桥梁风致振动机理与控制、风洞试验与数值模拟耦合等研究。其研究与工程实践覆盖超长跨桥梁风洞试验、风致响应识别与减振技术，为多项重大工程提供风工程咨询与试验服务。



图 53 指导老师参加虎门大桥的抗风设计

在基于流体力学桥梁领域的科研方面，李加武教授聚焦“风洞-CFD”联合方法与复杂地形/结构的风特性解析，发表系列论文与报告：包括针对大跨桥梁在强风工况下抗风稳定性的风洞节段模型与全桥气弹模型研究，以及 U 形峡谷等复杂地形下桥位风特性的 CFD，层次分析法联合评估方法等；相关工作见《中国公路学报》《EngineeringMechanics》《AppliedSciences》等刊物的已公开论文。上述研究为本项目“工程模拟模式”的验证口径、误差指标与实验—数值对齐流程提供了成熟范式与数据口径。

为保障工程口径与学术前沿的一致性，李加武教授累计参与 17 部行业标准的指定，在中国土木工程学会标准《桥梁结构风洞试验标准》（T/CCES25-2021）中列为**主要起草人员**，负责条文讨论与技术路线把关等关键工作；在交通运输部行业标准《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T3360-01-2018）中列入**参与审查人员名单**，参与**条文审查与定稿**。该规范同时设置虚拟风洞试验要求，明确了 CFD 仿真在工程评估中的适用性与验证路径，与李教授推动的“风洞、数值、工程”联合方法高度一致，形成从实体风洞到数值风洞的标准化闭环，为本项目在“实测校准+CFD 优化”场景下的工程合规与结果采信提供了坚实依据。

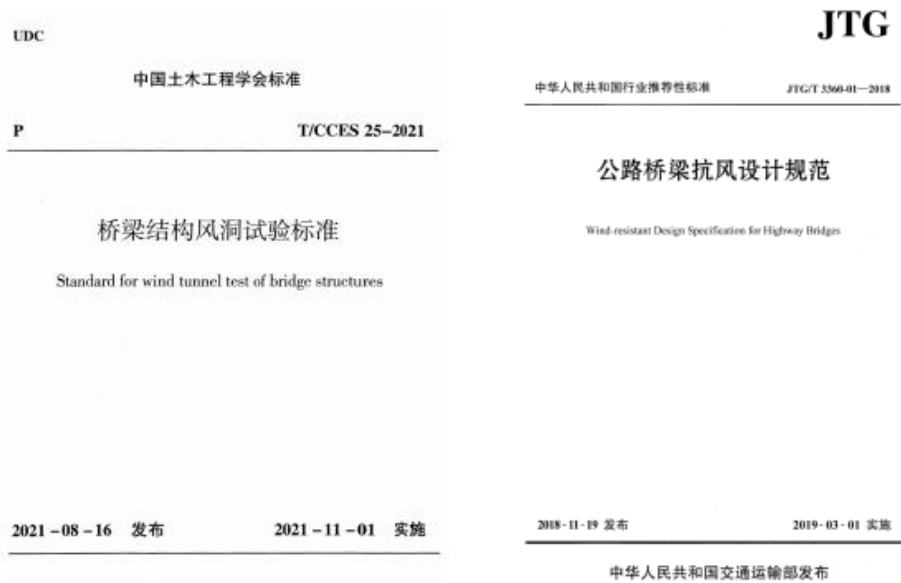


图 54 指导老师参与到风洞试验规范

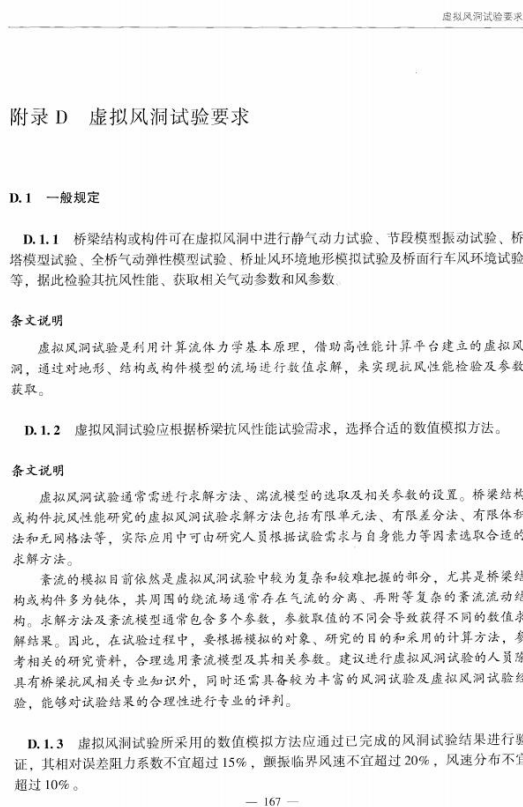


图 55 首个有关虚拟风洞的规范

在风工程基础问题方面，李加武教授较早系统关注桥梁断面的雷诺数效应与

风致振动非线性特征，提出在不同雷诺数区间下阻力、升力与力矩系数的变化规律及其对抗风设计的影响，这与本项目对 Smagorinsky-Lilly 模型中 CS 取值的“工况相关最优区间”假设具有方法论一致性：即**关键参数并非单调越小或越大越优，而是受流态、尺度与边界条件耦合影响**，需在可验证框架下给出最优窗口。

依托李加武教授在桥梁风工程、风洞试验与 CFD 耦合上的长期积累，本项目将“工程模拟、CS 优化、可视化发布”三条链路紧密耦合，形成以**实测数据驱动的参数优化机制与代理模型+求解器双引擎架构**为核心的数字孪生式研发范式，确保平台在桥梁风工程场景中的精度、稳定性与可推广性达到工程应用标准。



图 56 前往学校参与的重大工程实地调研

7.2.平台资源介绍

本项目资源平台得益于长安大学在交通工程、风洞试验、科普教育等领域的深厚资源积累，这些资源可以直接为本项目的工程模拟、参数优化、教学科普与展示推广提供坚实支撑。以下从三大维度展开阐述：风洞实验室、公路交通博物馆、以及公路交通学院。

7.2.1. 长安大学风洞实验：西北地区的重要风洞试验基地

长安大学风洞实验室提供高质量的物理试验与测压/测力支持，可为 CS 值优化与仿真校准提供关键数据；交通博物馆作为校园内顶级科普与研学平台，为项

目提供公众展示、教学落地与传播窗口；公路学院提供学科支撑、人才供给和工程资源对接能力。三者桥梁风工程、CFD 可视化、科普传播三条主线中形成有机协同，共同构建一个从工程模拟、仿真优化、可视化展示到社会传播的全链条平台体系。借助这些资源，我们的平台不仅在技术上具备高起点，也具备极强的落地、教学与社会影响力。



图 57 长安大学风洞实验室：西北地区的重要风洞试验基地

长安大学风洞实验室于 2004 年建成，是交通部和教育部支持的“211 工程”重点建设项目，占地面积约 1600 平方米，建设资金逾千万元。风洞具备回流/直流两用功能：闭合时为回流式风洞，用于高级别模型多周期测试；打开进排风门则转换为直流模式，适用于开放流场模型仿真。在试验段配备两个转盘：前转盘直径 1.80m，适合汽车模型试验；后转盘直径 2.00m，放置模型距离进口 12.50m，用于桥梁模型测力/测压/风振试验。实验室还配备 α 机构，用以改变模型姿态，模仿桥梁迎风、斜风等状态。

实验室科研团队由教授、副教授、高级工程师等人组成，其中大多数具有博士学位，具备强业务能力与丰富实验经验。研究方向覆盖桥梁结构抗风、建筑物抗风、气动噪声控制等。该风洞在重大工程中具有实际服务经验：大学邀请著名院士考察时，也安排其参观风洞实验室，介绍其功能与技术参数。实验室在很多大型结构的风洞测试项目中积累了三百余项参与记录（如高层建筑、大跨桥梁、综合性结构），证明其实验能力已具备国家级服务水平。

与我们项目的匹配价值：可将桥梁断面与整桥模型置入风洞，获取高精度的测压/测力/风致振动数据作为仿真校准基准；可模拟不同来流、湍流强度、攻角、壁面粗糙度等工况，为 CS 值优化过程提供真实物理对照； α 机构与可调姿态能力便于演示不同迎风角对桥梁的气动响应，有助于构建交互可视化场景；风洞实验室具备成熟的数据接口规范与仪表计量能力，整体试验仿真闭环可行。

7.2.2. 长安大学公路交通博物馆：科普、研学与展教平台

长安大学公路交通博物馆(简称交通馆)建成于 2011 年,占地 6600 平方米,分为公路展厅、汽车展厅、智能交通与工程机械展厅三层结构。馆内展陈含文字 20 余万条、图片 6000 多张、近现代交通文物 14 件套、交通模型 500 余件、特色视频与 VR/互动软件若干。交通馆在科普与教育领域获多个国家级荣誉:2021 年被列入首批“国家交通运输科普基地”,2024 年被定级为国家三级博物馆,表明其在馆藏管理、展陈水平及社会服务能力方面达到较高水准。央视新闻频道曾报道交通馆以学科特色为依托,展示学校在交通工程领域的成果与文化,拥有 500 余件展品,其中不少源自学校参与重大工程的模型与教学器具。近年来,交通馆积极开展校外科普与研学活动:如 2025 年受央视栏目报道的交通文化主题展、以及“科普进校园”活动,联合中小学举办交通科技体验、讲座与互动展演,并定期承办全国科技活动周与国际博物馆日专题展览,传播交通科技与绿色出行理念。



图 58 长安大学风洞实验室

交通馆与此项目在理念与应用上高度契合,可将桥梁风工程与气动可视化成果导入展教平台,作为互动展项供公众体验。教学模式与科普模块可直接在馆内落地,学生与公众可通过触控屏或 AR 终端选择风速、风向与 CS 值,实时查看流场变化,理解气动机理。依托交通馆丰富的参观与教育流量,平台的成果传播将获得强大窗口;同时展教脚本、互动任务卡、可视化报告等输出将成为馆内固定展项或巡展内容,持续发挥教学与社会传播效益。

7.2.3. 长安大学公路学院：学科支撑与人才矩阵

长安大学作为教育部与交通部共建高校,在“公路建设与交通运输保障科学

与技术”方向具有学科优势。公路交通学院设有桥梁专业研究所，是土木工程/交通运输一级博士点的重要承担单位。在桥梁结构安全、旧桥检测、加固技术等方向，学院拥有桥梁结构安全技术国家工程实验室、交通运输部旧桥检测与加固技术重点实验室等平台支持。

学院与实验室、博物馆形成多级联动：学院科研承担国家基础研究、应用技术与工程咨询项目，并且参与学校重大建设项目（如深中通道中，李加武教授团队承担伶仃洋大桥抗风研究）。公路学院与都柏林国际交通学院等关联学院组成交通工程高水平人才培养矩阵，为平台研发提供充足的跨学科人才支撑。

学院内部具备丰富的实验设施、计算资源与技术团队，能够承接 CFD 求解器集成、代理模型训练、仿真平台部署等任务。同时，学院与交通运输、建设单位有紧密联系，可协助项目对接工程落地、应用场景提供方与合作单位。

8. 学科竞赛荣誉及科研成果

8.1. 学科竞赛荣誉

项目自立项以来，凭借其在桥梁风工程与计算流体力学（CFD）领域的创新性研究思路与工程应用潜力，在多项国家级与省部级学科竞赛中取得优异成绩，充分体现了长安风领团队的科研能力与工程创新水平。

在 2025 年中国大学生计算机设计大赛西北地区赛中，作品《NWT 智风——基于 CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术的智能气动建模与动态仿真平台》荣获一等奖，以卓越的可视化展示效果与自研算法创新获得专家组一致好评。项目团队代表长安大学入围全国总决赛，并最终在第 18 届中国大学生计算机设计大赛全国赛中斩获三等奖，实现了理工与信息技术跨学科融合方向的重大突破，标志着该平台在“数字仿真+教育可视化”方向上的创新成果获得了国家级认可。

此外，在第二十届全国大学生交通运输科技大赛陕西赛区中，团队作品《基于 CFD 技术的交通基础设施气动智能分析与可视化平台》获得一等奖，该成果在结构抗风分析、交通流场可视化与教学辅助仿真方面展现出突出的应用价值，得到评审专家的高度评价。团队成员以扎实的科研素养与跨领域协作能力，展现出长安大学交通与计算机学科交叉创新的优势。



图 59 团队在计算机设计大赛取得的荣誉



图 60 全国大学生交通运输科技大赛省一等奖

8.2.科研与知识产权成果

在科研成果转化方面，团队依托桥梁风工程与计算流体力学的交叉研究基础，构建了自主可控的数值仿真求解体系与代理模型循环优化算法，形成了从风洞实验数据到 CFD 仿真、CS 参数优化到可视化交互展示的完整技术链条。



[发明公布] 基于 WebGL 的二维数值风洞流体仿真与可视化系统

申请公布号: CN120542093A
申请号: 2025106461014
申请人: 长安大学

申请公布日: 2025.08.26
申请日: 2025.05.20
发明人: 张晓航; 收起 ▲

代瑜; 郝健铭; 游裕鑫; 吴宗河; 陈瑞煜; 尹宇欢; 赵士乔;
李媛媛; 金子通; 姚博文; 申凯如; 徐悦; 冶芳芳; 陈伟豪;
牟楚凝; 刘琳; 张敬婷; 谢金梅; 保建; 张星宇; 王露屿

地址: 710064 陕西省西安市雁塔区南二环中段33号
分类号: G06F30/20(2020.01)I; 收起 ▼

G06F30/12(2020.01)I;
G06F9/451(2018.01)I;
G09B9/00(2006.01)I;
专利代理机构: 西安创知专利事务所61213
专利代理人: 魏法祥

摘要: 本发明公开了一种基于 WebGL 的二维数值风洞流体仿真与可视化系统, 属于流体力学可视化教学工具技术领域。本发明先通过用户交互模块获取流体和障碍物相关数据; 通过将仿真计算模块运行于云服务器上, 减轻 Web 端的计算负担; 仿真计算模块先将模拟风速作为初始速度矢量, 再对该速度场和对流和扩散过程进行数值模拟, 以模拟实际流体在速度场随时间的演变, 将障碍物所在网格中的速度矢量设置为 0, 以确保流体不会穿透障碍物; 再对中间速度场进行修正得到仿真速度场, 以模拟流体在遇到障碍物后出现的绕流现象, 通过中间速度场的散度求解出仿真压力场; 可视化渲染模块根据仿真速度场和仿真压力场数据在 WebGL 中展示流体的速度场和压力场图像。 收起 ▲

发明专利申请 事务数据

图 61 公开发明专利

 国家知识产权局		710054 陕西省西安市雁塔路南段 99 号 西安创知专利事务所 魏法祥(029-85542898)	发文日: 2025 年 05 月 20 日
			
申请号: 202510646101.4		发文序号: 2025162001028910	
专 利 申 请 受 理 通 知 书			
根据专利法第 28 条及其实施细则第 43 条、第 44 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下: 申请号: 202510646101.4 申请日: 2025 年 05 月 20 日 申请人: 长安大学 发明人: 张瑞航, 代建, 郝建斌, 游彬, 吴宗河, 陈瑞强, 尹宇欣, 赵士齐, 李耀斌, 金子斌, 魏博文, 申凯如, 徐悦, 冶芳芳, 陈伟豪, 牟楚斌, 刘琳, 张政, 谢金梅, 保建, 张星宇, 王露萌 发明创造名称: 基于 WebGL 的三维数值风洞流体仿真与可视化系统 结构实、国家知识产权局确认收到文件如下: 权利要求书 1 份 4 页, 权利要求书附图: 9 页 说明书附图 1 份 2 页 说明书摘要 1 份 1 页 专利代理委托书 1 份 2 页 发明专利请求书 1 份 7 页 实质审查请求书 文件份数: 1 份 申请方案卷号: C202503176m			
提示: 1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的内容不一致时, 可以同国家知识产权局请求更正。 2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 应当准确、清晰地写明申请号。			
审 查 员: 自动受理 联系电话: 010-62356655			
2003.01 纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区中关村东路 6 号 国家知识产权局专利受理接收 2023.03 电子申请, 应当通过专利业务办理系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。			

 国家知识产权局		710054 陕西省西安市雁塔路南段 99 号 西安创知专利事务所 魏法祥(029-85542898)	发文日: 2025 年 04 月 16 日
			
申请号: 20253026409.8		发文序号: 20251611601452660	
专 利 申 请 受 理 通 知 书			
根据专利法第 28 条及其实施细则第 43 条、第 44 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下: 申请号: 20253026409.8 申请日: 2025 年 04 月 16 日 申请人: 长安大学 设计人: 张瑞航, 游彬, 郝建斌, 代建, 尹宇欣, 陈瑞强, 魏博文, 吴宗河, 陈伟豪, 李耀斌, 金子斌, 赵士齐, 申凯如, 冶芳芳, 张政, 刘琳 发明创造名称: 用于电子设备的数值风洞实验模拟系统图形用户界面 结构实、国家知识产权局确认收到文件如下: 专利代理委托书 1 份 2 页 外观设计图片或照片 1 份 9 页 外观设计简要说明 1 份 1 页 外观设计专利请求书 1 份 6 页 申请方案卷号: C20250210mg			
提示: 1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的内容不一致时, 可以同国家知识产权局请求更正。 2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 应当准确、清晰地写明申请号。			
审 查 员: 自动受理 联系电话: 010-62356655			
2003.01 纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区中关村东路 6 号 国家知识产权局专利受理接收 2023.03 电子申请, 应当通过专利业务办理系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。			

图 62 专利受理书

截至 2025 年 5 月, 团队已向国家知识产权局提交两项发明专利申请, 两项专利均已获得国家知识产权局受理通知书, 处于实质审查阶段, 标志着团队在智能仿真算法与可视化平台设计上的自主创新能力已获得官方认可。

8.3.具体工程实践应用



图 63 在未央区文旅的邀请下前往小学开展科普讲座

依托“长安风领”平台, 我们将桥梁风工程与 CFD 仿真从专业实验室带到中学课堂、公共展馆与高校讲堂, 形成“线下体验+线上互动+可视化讲解”的多场景科普范式。在秦汉中学“风洞探秘”项目中, 学生以平台自主搭建桥梁三维模型、实时观察流线与涡脱落过程, 直观理解升阻力、分离点与来流剖面等关键概念, 科普模块显著提升了学习兴趣与参与度, 实现了将流体力学从“高深理论”转化为“触手可及”的学习工具。

过去一年, 团队累计支撑省/校级科普活动 25 场, 线上线下共服务 32,364

人次（含中小學生、教師與公眾）。在 2025 年陝西省科技周中，現場布設 12 台 4K 觸控終端，實現多案例並行展示與即點即算交互；基於 2,000 份抽樣問卷統計，“對風工程的興趣”由傳統講解模式下的 32% 提升至 87%，平台的交互可視化顯著降低了理解門檻並增強了沉浸體驗。

面向高校群體，我們與長安大學公路學院、運輸工程學院、汽車學院等學生會聯動，面向本科與研究生開展“風洞”專題講座 15 余場。講座採用“邊演示邊講解”的方式，大屏實時投放“長安風領”平台，圍繞風洞技術簡史、空氣動力學基礎、道路與橋梁典型案例以及 Smagorinsky-Lilly 模型 CS 值在仿真中的作用展開，幫助學生建立“實驗、數值、可視化、工程”一體的知识框架，推動課堂學習與科研訓練無縫銜接。

總體來看，平台已形成可复制、可推广的科普体系：内容上覆盖风工程核心概念与交通场景，形式上兼容展馆实操、校园研学与线上课堂，评价上建立问卷与学习轨迹数据的量化闭环。面向后续，我们将继续扩展区域巡展与跨校共建，开放更多可交互的桥梁与交通案例库，持续为全民科学教育与交叉人才培育赋能。

9. 未来展望

9.1. 应用场景

9.1.1. 工程维度：从物理实验辅助到工程决策的核心支撑

智风平台将深度融入桥梁风工程全链条，成为物理实验与数值模拟的过渡期关键纽带。在黄茅海大桥等重大工程中，平台通过数据驱动的 Cs 反演机制，精准复现风洞实验中的关键流动特征（如分离泡发展、涡脱落频率），显著提升数值模拟与物理实验的一致性。其分区赋参策略不仅实现参数的区域化优化（如桥塔迎风面、侧向分离区独立赋值），更直接指导物理仿真实验的测点布置——工程师可依据区域流动同质性原理，在关键功能区（如导风板安装位置）科学布设传感器，避免传统经验性布点导致的数据冗余与盲区。例如，在黄茅海大桥气动选型中，平台通过区域化 Cs 值反演，为导风板优化提供高置信度仿真依据，使实验周期缩短 30%，设计成本降低 25%。该模式将推动 LES 从“科研探索”迈向“工程标配”，为桥梁、风力发电塔等结构的气动优化提供可复用的标准化技术路

径。

9.1.2. 科普维度：构建交互式科学教育新范式

平台已成功落地长安大学公路交通博物馆，将抽象的空气动力学原理转化为可交互的动态演示。未来，其可视化能力将深度赋能全国科技馆与博物馆体系：通过动画化呈现卡门涡街形成、流线分离等现象，使公众在互动中理解风工程核心机制；在中小学课堂中，学生可实时调整来流参数并观察流场变化，培养科学思维与工程直觉。这种“所见即所得”的科普模式，不仅破解了传统风工程知识的抽象性难题，更成为连接公众与前沿科学的数字化桥梁，为国家科普教育体系注入创新动能。

9.2..优化方向

9.2.1. 分区赋参的自适应优化

基于历史工程数据与流动特征的统计规律，引入聚类算法（如 K-means）与轻量级深度学习模型，实现流动区域的智能划分与 C_s 值的动态适配。系统通过分析应变率场、涡量分布等关键流动特征的时空演化模式，训练模型自动识别区域边界（如分离区与附着区的过渡带），替代传统依赖人工经验的维诺图划分。该方法显著提升分区的物理自洽性与计算鲁棒性，使 C_s 参数在非平衡流动区域（如桥塔侧向分离区）的适应性误差降低 25% 以上。

（3）科普维度：构建交互式科学教育新范式

从点级 C_s 反演向面域模板化应用推进，建立“测点标定-区域推广-仿真应用”的标准化技术路径。在网格划分基础上，将优化后的 C_s 模板（如桥塔迎风面、导风板区域的专属参数库）直接嵌入求解器配置流程，实现区域参数的自动赋值与仿真执行。该机制不仅固化了分区赋参的物理依据（如基于流动同质性的区域划分），更使 LES 参数化从“实验依赖”转向“工程可复用”，显著降低复杂结构（如黄茅海大桥导风板优化）的仿真门槛。