

基于时空域完备设计空间优化方法及软件开发

王琥 文子铭 李玉

wanghu@hnu.edu.cn

汽车车身先进设计制造国家重点实验室，迈曦软件

目录

01

基于时序的优化与设计

02

完备时空域的建模与设计

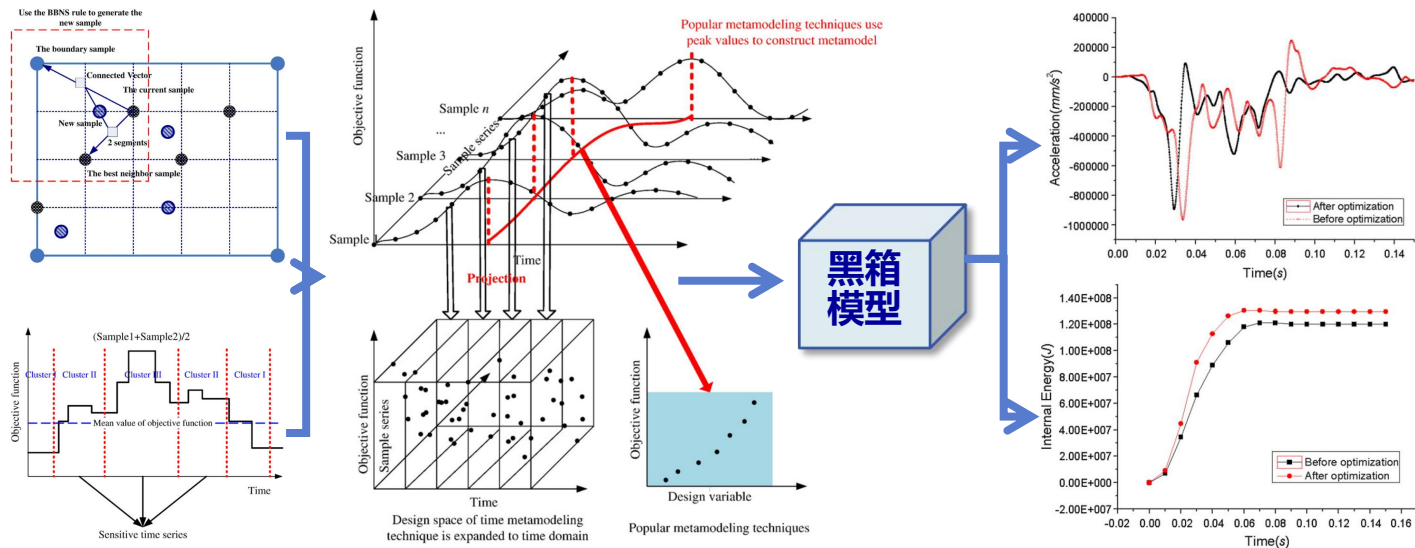
03

基于深度算子网络的实时预测

04

设计平台的流程自动化

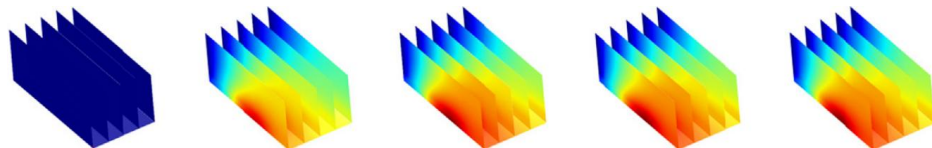
基于时序相关问题的代理建模—优化方法



传统优化方法在时序相关问题中的局限

- 目标函数的定义依赖工程经验或实验归纳，目前主要考虑单目标或者多点衡量产品在动态过程中的性能，其实质是将时序问题多目标化；

- 考虑到时序相关问题（传热、接触碰撞等）的物理场在空间和时间域内的非线性，目前的方法，使多目标问题难以表征非线性域内的复杂特征，进而可能导致优化目标失效。

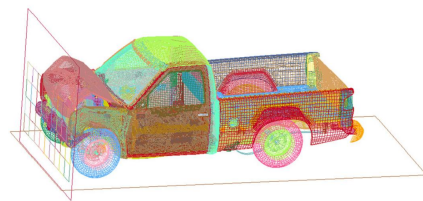


Li Y, Wang H, Deng X. Image-based reconstruction for a 3D-PFHS heat transfer problem by ReConNN[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134: 656-667.

US NCAP: 1999 CHEVROLET S10 PICKUP
Time = 0



US NCAP: 1999 CHEVROLET S10 PICKUP
Time = 0.15



Wang H, Li G Y, Li E. Time-based metamodeling technique for vehicle crashworthiness optimization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(37-40): 2497-2509.

目录

01

基于时序的优化与设计

02

完备时空域的建模与设计

03

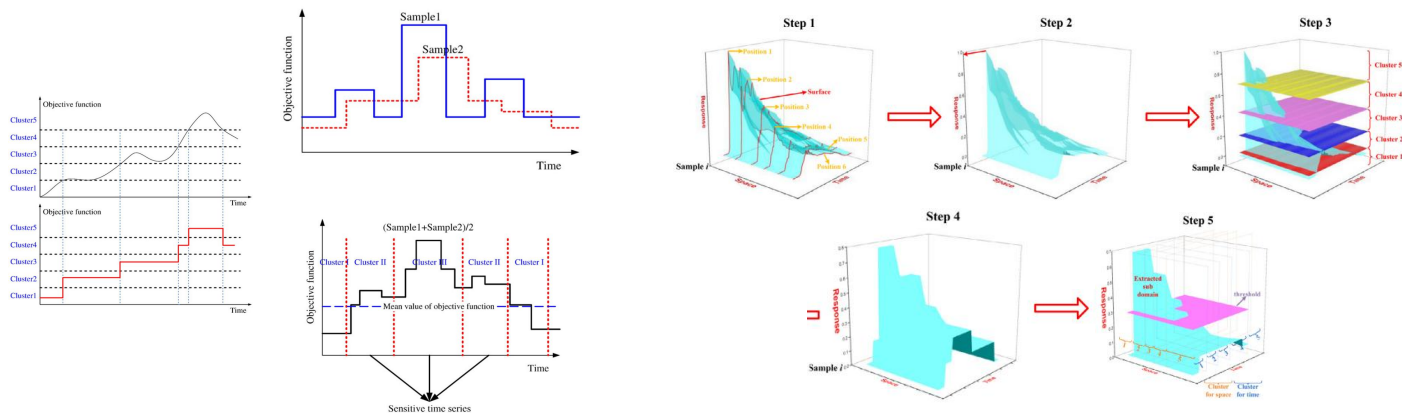
基于深度算子网络的实时预测

04

设计平台的流程自动化

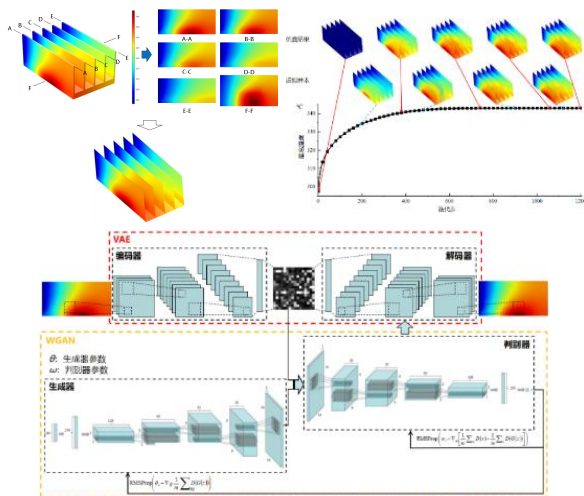
完备时空域：传统代理建模方法的瓶颈和挑战

- 需要通过一系列繁杂的处理构建基于时空的目标函数；
- 所提取的离散时间—空间域维数较低，难以全面描述动态过程。例如，碰撞过程仅提取35个子时间段、12个子空间域，缺乏完备特征；
- 根本原因在于：传统代理模型难以处理较高时空分辨率（高保真）的响应数据，人工处理数据更多地是对建模能力不足的妥协。

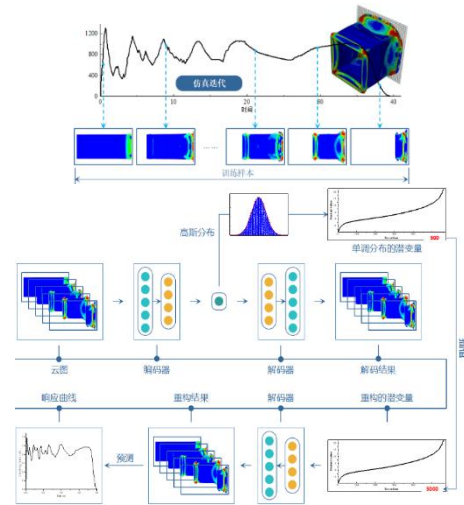


图像驱动的动态问题重构方法

- 动态问题仿真优化过程中，求解器需要进行数十万次的迭代计算。理论上，求解器输出结果的时间越多，设计方案结果的评估更精确；
- 考虑到昂贵的存储和I/O（Input/output）耗费，通常只能输出有限的、主观选定的某些迭代步的计算结果作为评估依据



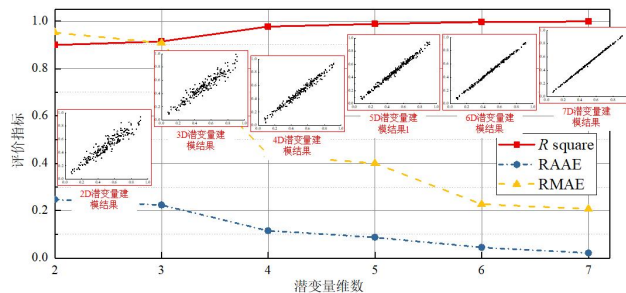
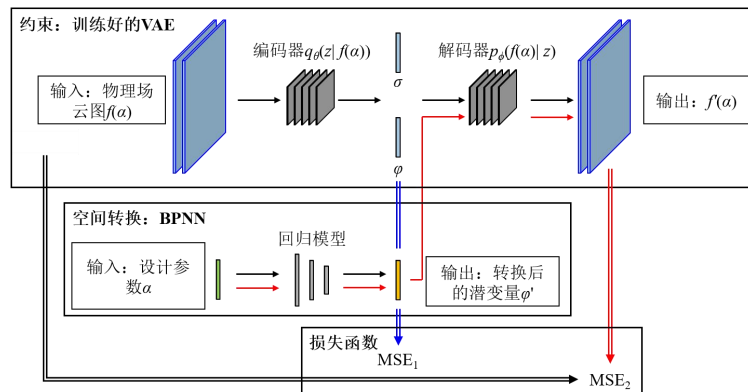
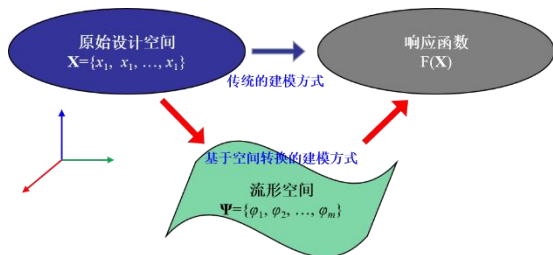
Li Y, Wang H, Deng X. Image-based reconstruction for a 3D-PFHS heat transfer problem by ReConNN[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134: 656-667.



Li Y, Wang H, Zhang H, et al. A reconstructive method-based sequential modeling approach for crashworthiness design of the combined five-cell structure. Thin-Walled structures, 2022(Jan.):170.

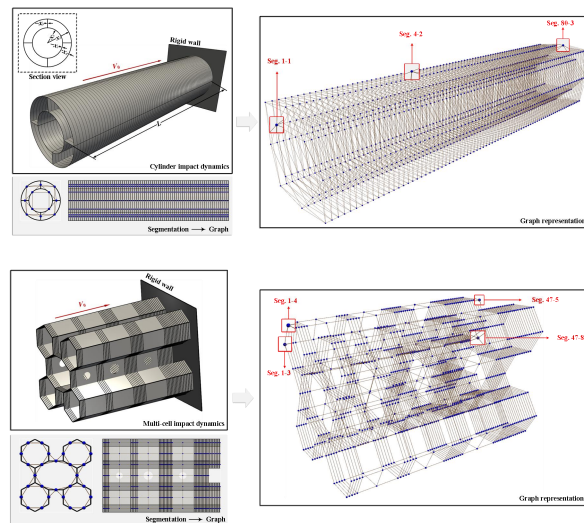
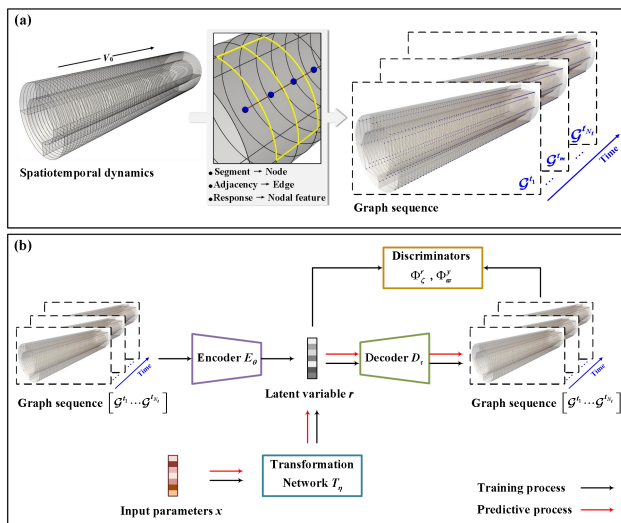
基于“空间转换”的建模方法

- 对于时序相关问题，传统代理模型技术的建模精度可能无法满足设计需求。这可能是因为原始的设计空间不适合求解该预测问题；
- 将代理模型构建空间从原始的对目标函数不够敏感的设计空间转换至对目标函数更为敏感的流形空间中，从而提高建模精度。



不规则结构动态的时空域建模方法

- 基于时序图神经网络的架构，提供了针对一般化结构动态过程建模的途径；
- 同时对于原始空间和隐变量空间的条件概率分布估计算法，保障了对于高时空分辨率数据回归的预测精度。



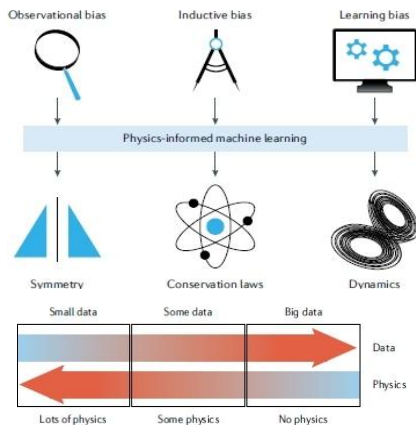
Ziming Wen, Hu Wang, et.al. Data-driven spatiotemporal modeling for structural dynamics on irregular domains by stochastic dependency neural estimation, CMAME, Underview

不规则结构动态的时空域建模方法

- 通常意义上的代理建模是针对函数的拟合，而DeepONet将“建模”的概念拓展至任意非线性算子的拟合，并给出了奠基性的算子泛逼近定理（Universal Approximation Theorem for Operator）；

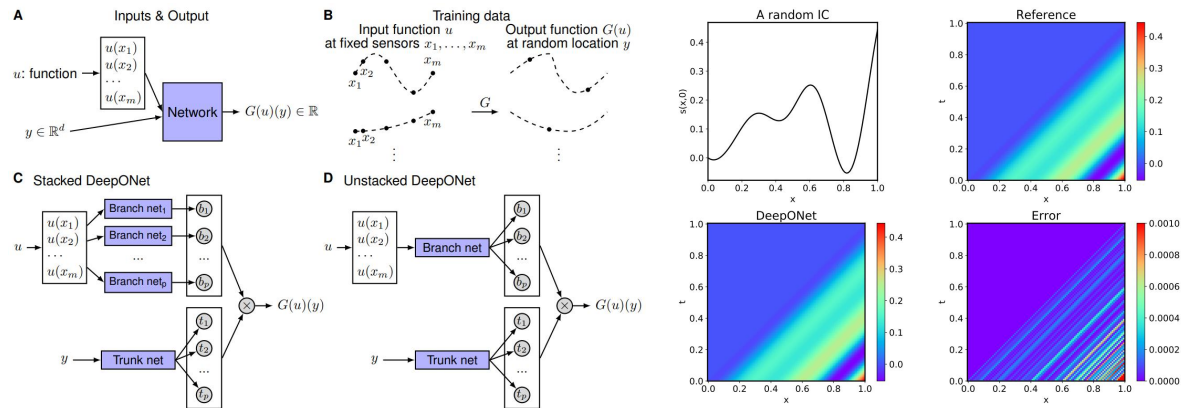
Chen T, Chen H. Universal approximation to nonlinear operators by neural networks with arbitrary activation functions and its application to dynamical systems. IEEE Transactions on Neural Networks, 1995, 6(4): 911-917.

- 实际上，对于某些优化问题中参数（或其他数据形式）的代理建模，究其本质是简化（缩减至有穷维，即函数拟合）的算子拟合问题。



Physics-informed machine learning

George Em Karniadakis^{1,2,3}, Ioannis G. Kevrekidis^{4,5}, Lu Lu⁶, Paris Perdikaris⁷, Sitan Wang⁸ and Liu Yang⁹



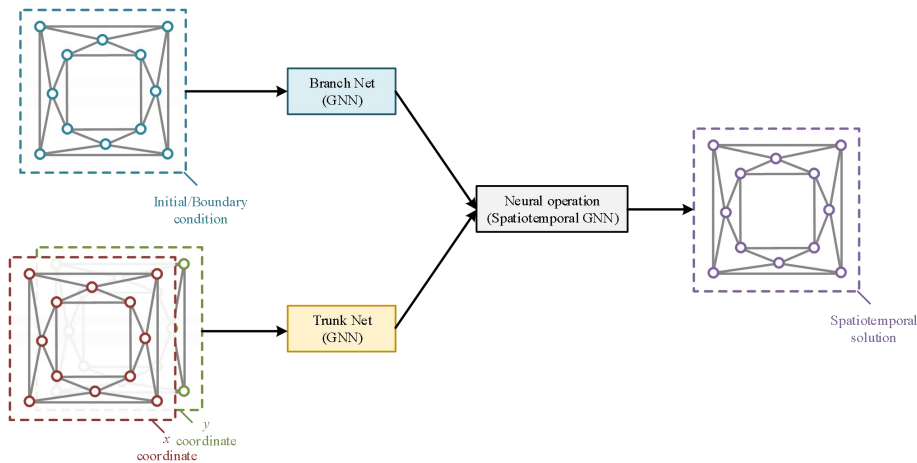
Lu L, Jin P, Pang G, et al. Learning nonlinear operators via DeepONet based on the universal approximation theorem of operators[J]. Nature Machine Intelligence, 2021, 3(3): 218-229.

不规则结构动态的时空域建模方法

- 传统数值方法难以在保证精度的前提下，实时地给出非线性动态过程的预测。
- 该问题可以归结为边值条件函数到解函数的算子拟合问题：

$$\mathcal{N} := g(\mathbf{x}, t) \mapsto f(\mathbf{x}, t)$$

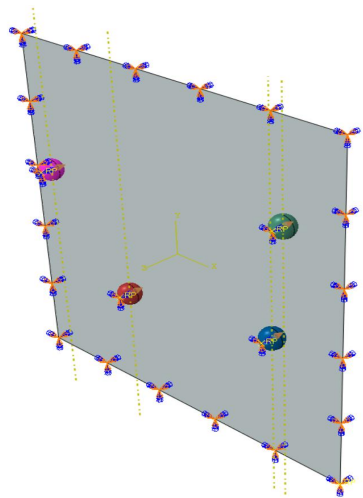
- 基于时空图神经网络，考虑DeepONet的思想，给出离散的算子拟合解是目前比较可行的一种方案。



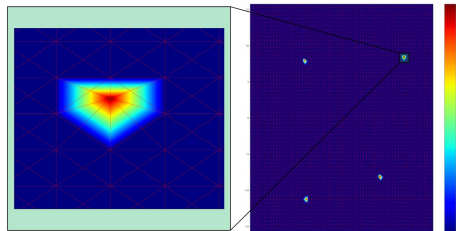
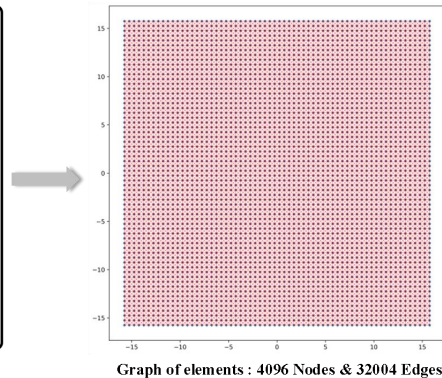
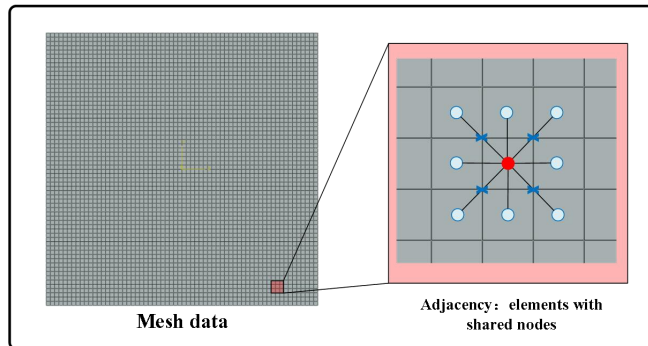
基于时空图神经网络的物理场快速预测

变量空间：小球撞击位置、小球撞击初速度

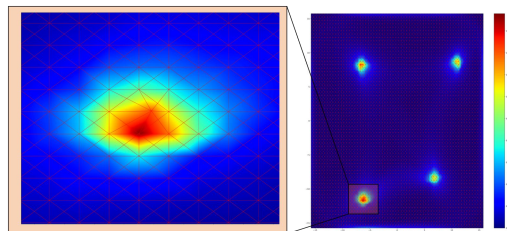
将四个小球相对薄板撞击的初速度视作一个场, 利用深度神经网络拟合该场映射至位移、应变、应力等物理量场的算子（离散形式）



构建图结构数据：位置信息、初值信息、等效塑性应变场（PEEQ）



Initial field

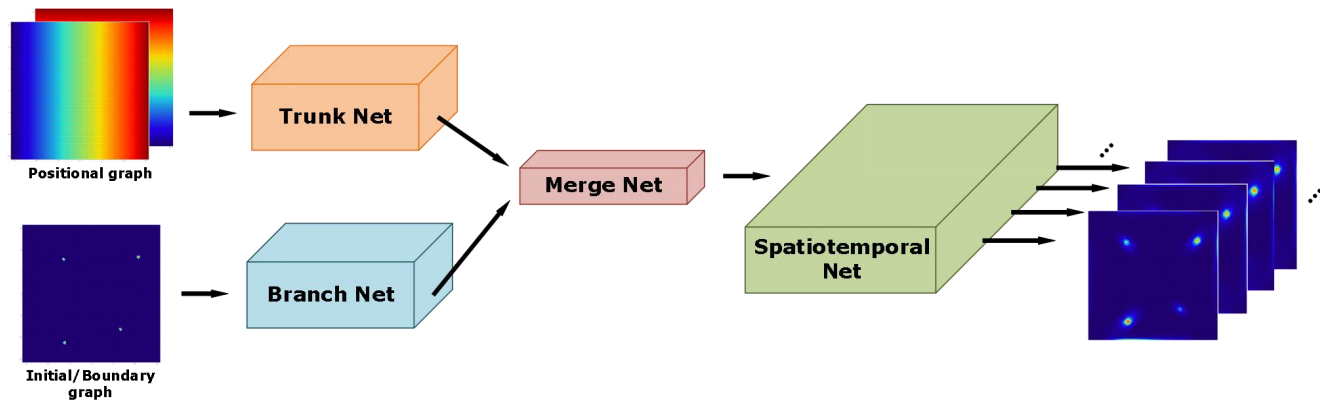


PEEQ field

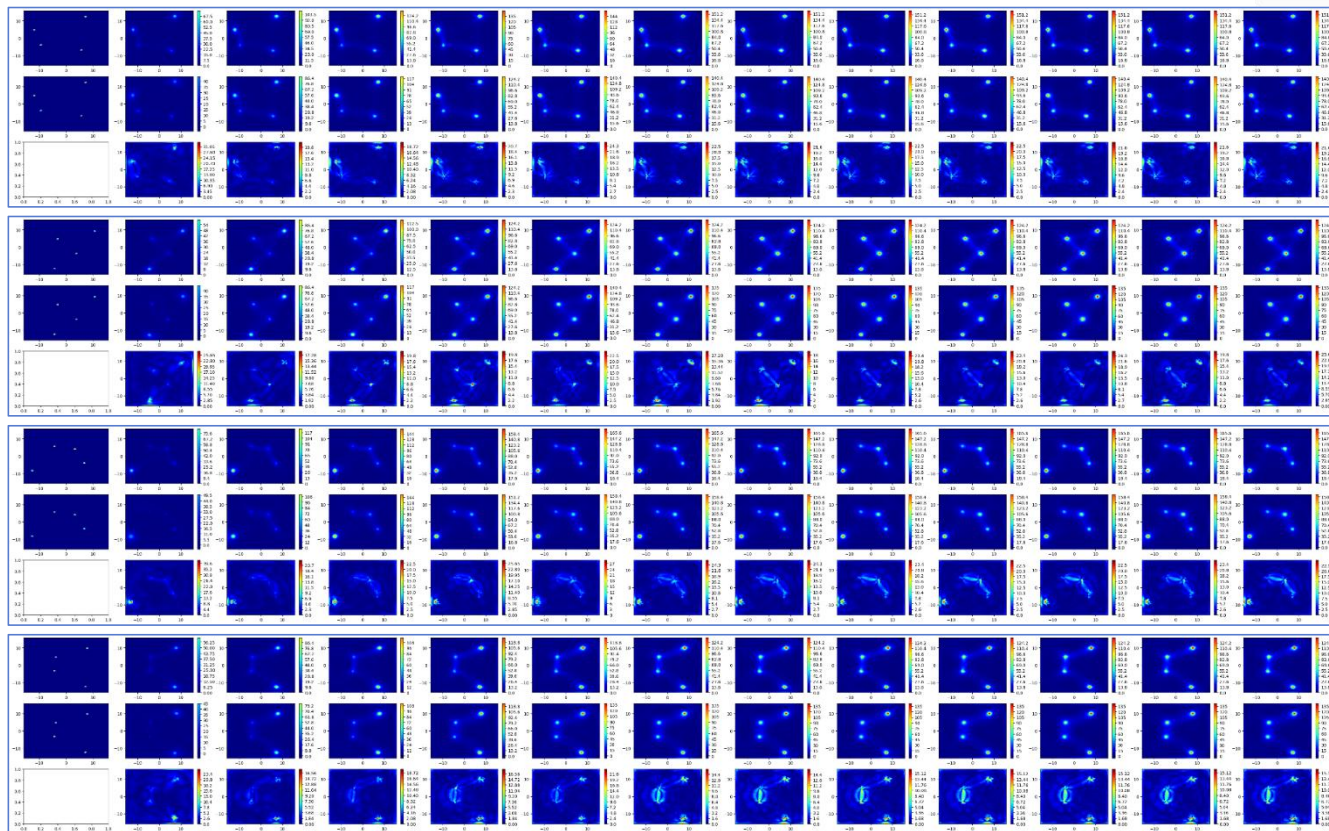
不规则结构动态的时空域建模方法

流程框架：

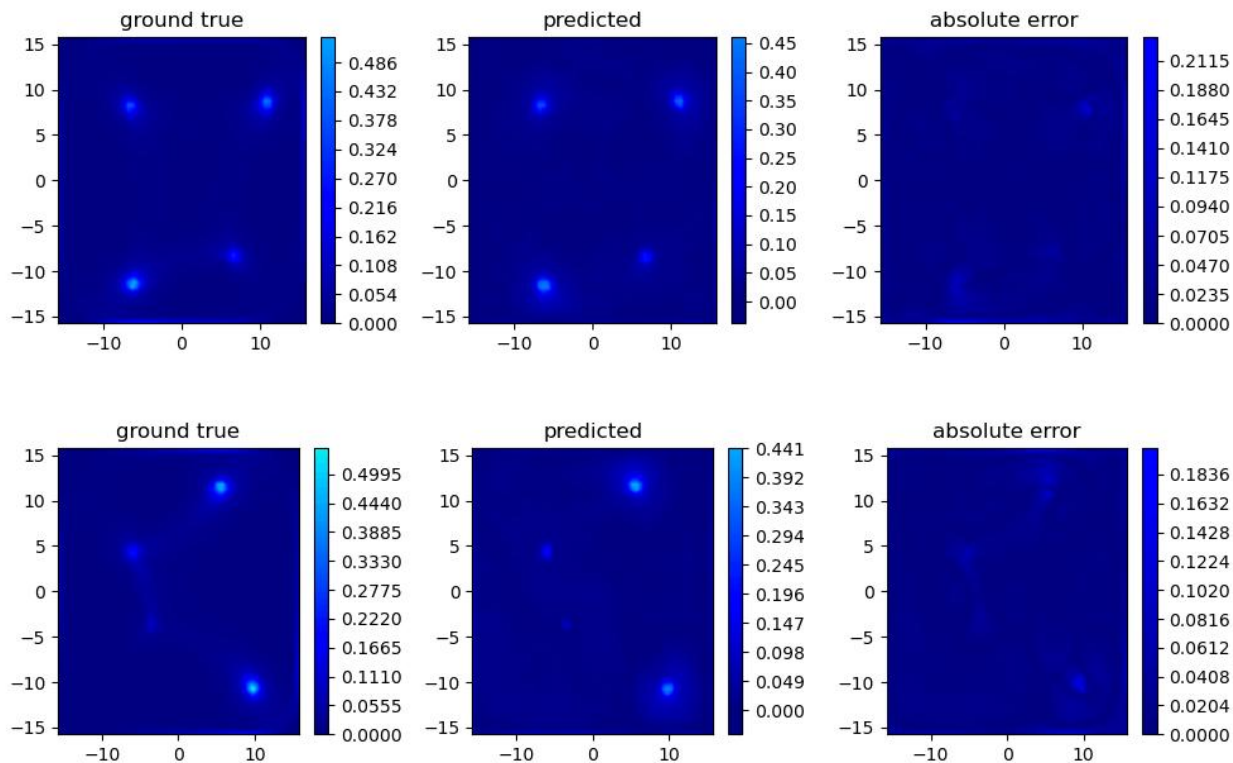
- 由于采用离散形式，TrunkNet变为GNNs构成的网络，可能提高预测精度，并且便于和CAD/CAE对接；
- 离散形式的序列解由MergeNet和SpatiotemporalNet给出，而不是DeepONet中的相加操作。



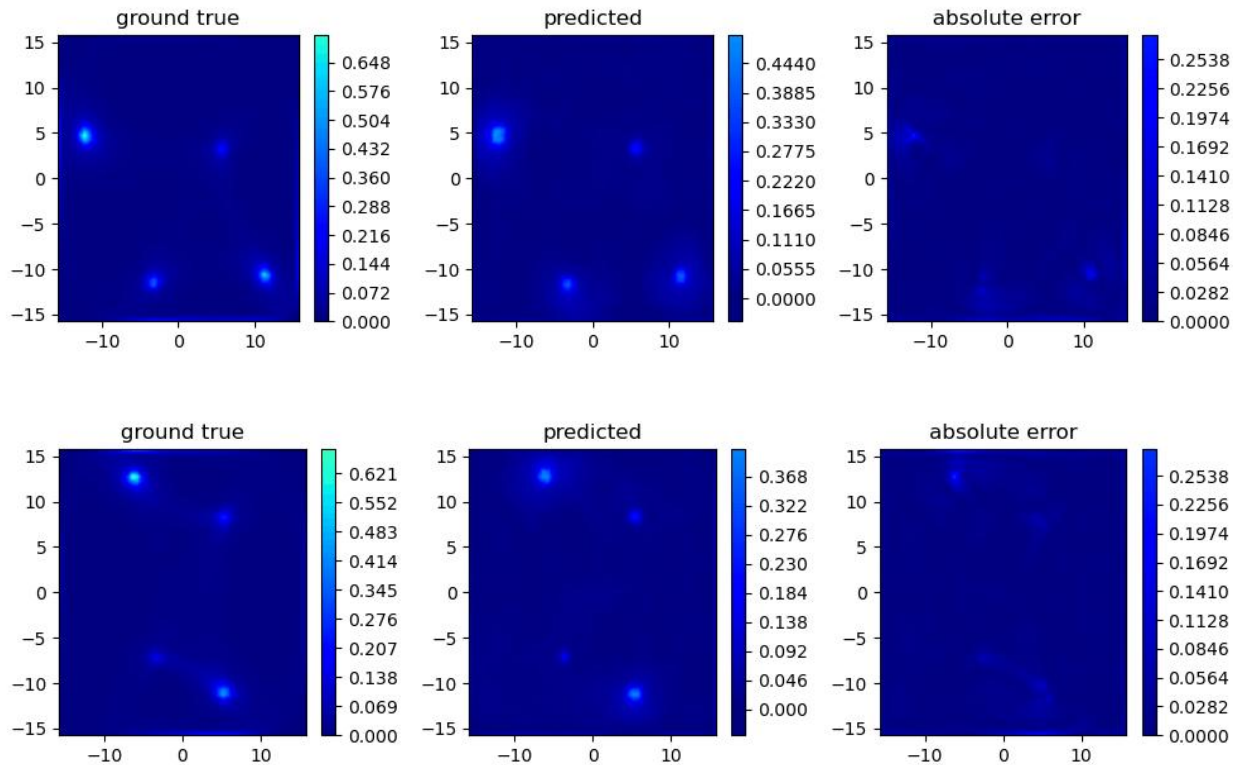
基于时空图神经网络的物理场快速预测



基于时空图神经网络的物理场快速预测



基于时空图神经网络的物理场快速预测



目录

01

基于时序的优化与设计

02

完备时空域的建模与设计

03

基于深度算子网络的实时预测

04

设计平台的流程自动化

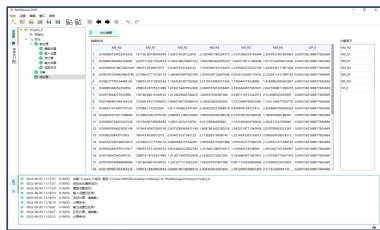
设计平台的流程自动化



MxDesign.Wizard 多学科设计



产品首页



设计结果分析

完善的设计体系

- 支持离散的、连续的试验设计方法分析设计任务
- 支持20余种代理模型技术拟合复杂的任务
- 支持单/多目标、单/多约束的离散/连续/混合优化方法
- 支持单/多目标、单/多约束的随机性分析方法



覆盖行业主流设计软件
HyperStudy和ISight 90%
以上的功能

自主研发的智能设计算法

- 支持智能的试验设计方法获得科学的采样分布
- 支持基于深度学习多源数据建模方法
- 支持智能高效全局优化算法
- 支持单/多目标、单/多约束的智能随机性分析方法
- 基于多源数据融合计算的多元空间耦合建模模块，首次实现了针对动态非线性复杂设计问题的全时空优化



自主开发的多源数据融和设
计方法打破空间度量桎梏

丰富的第三方软件接口

- 支持多种求解器接口
- 支持材料参数和厚度的优化设计
- 支持模型响应定制



能够轻松融入用户现有CAE
软件使用生态

强大的企业助力力

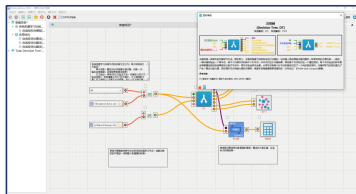
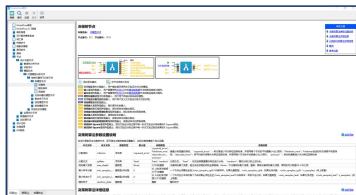
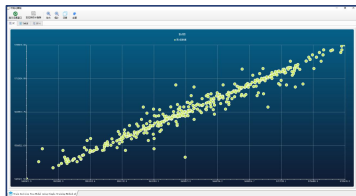
- 提高产品性能
- 提高生产率和投资回报率
- 提升竞争力



全面减轻工程师操作负担，
推进企业设计流程规范化

设计平台的流程自动化

MxDesign.NodeFlow 多学科设计



图形化的设计分析软件

- 使用图标代替命令行，创建设计任务
- 拥有设计逻辑为驱动，工作流为导向的设计方式
- 以贝叶斯框架为主体，以图像为切入点，开发基于图像的参数反求模块

充足的交叉学科工具

- 支持离散数据、连续数据、图像数据、序列数据等的拆分、重构、离散化、归一化等预处理方法
- 支持多种特征提取和特征选择方法
- 支持回归任务、生成任务、分了任务等后处理功能

开放的设计体系

- 支持Python语言接口自定义设计功能
- 支持自定义工作流模板
- 支持自定义NodeFlow终端语言

完备的帮助系统

- 闭环的帮助体系
- 精准的帮助定位
- 丰富的帮助内容
- 数百个帮助测试用例

设计师更专注于项目设计，而非如何分析处理数据，极高的自由度带来更多的成就感

搭建灵活的、多样的设计任务，满足不同类型的设计需求

满足不同用户的多样需求，面向更广的客户群体

帮助用户高效地从入门到精通

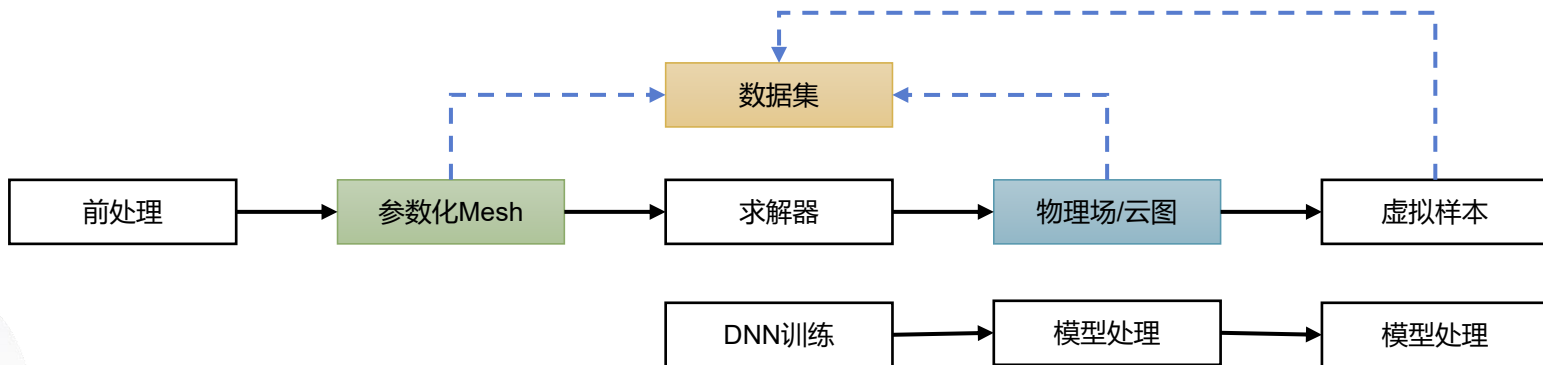
设计平台的流程自动化

历史版本的不足：

- 与CAD/CAE平台对接的自动化程度较低，依赖手动操作数据，即使是脚本也需要大量的人工步骤。
- 深度网络的训练、验证等过程几乎完全定制化，适用范围受限。

解决方案：

- 完善读取仿真结果（图像，节点/单元信息）的脚本，实现一类问题的自动化（仅需手动设置一些参数）
- 完善深度网络模型的验证、可视化等后处理
- 针对具体使用场景（系统环境等），实现网络模型的部署



THANKS

