

数据驱动的结构分析与设计专题序

郭旭^{*,1)} 廉艳平^{†,2)}^{*} (大连理工大学工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验, 辽宁大连 116024)[†] (北京理工大学先进结构技术研究院, 北京 100081)

人工智能是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量, 数据驱动计算力学在此背景下应运而生并已成为新时代力学领域的重要研究方向之一。近年来, 该新兴领域研究在我国呈现出了快速发展的喜人态势, 从事相关研究的学者人数快速增加。国家相关部委先后设立了各个层面的研究计划, 以大力支持这一新兴方向研究并培育高水平的研究队伍。事实上, 数据驱动计算力学作为数据科学、人工智能与力学学科交叉的重要方向, 不仅蕴含众多极具牵引性的基础科学问题, 而且有望催生出一系列能够在航空航天、机械制造、先进材料、生物医疗等领域发挥重要作用且具有颠覆性的关键技术, 以支撑国家重点工程建设和重大装备研制。

2023 年 5 月, 由国家自然科学基金委数理科学部、中国力学学会计算力学和固体力学专委会联合主办, 大连理工大学和北京理工大学联合承办的“第一届全国数据驱动计算力学研讨会”在大连成功召开。本次会议得到了学术界与产业界的高度关注和大力支持, 吸引了来自 115 家高等院校、科研院所及企业的 700 余名代表参会。会议提出了发展新的计算力学理论、新的数值模拟方法以及新的 CAE 软件架构等倡议, 对深化这一领域的科学内涵、明确研究方向、稳定研究队伍起到了重要的推动作用。我们依托该学术会议组织了这期《数据驱动的结构分析与设计》专题, 包括 1 篇综述和 8 篇研究论文, 旨在展现我国力学学者在该重要研究方向的部分最新研究成果, 供相关学者和技术人员参考。

无论是基于梯度或是种群类的结构优化算法, 往往需要成百乃至上千的迭代次数以获得最终收敛结果, 这不可避免地要在结构分析、灵敏度计算中面临大规模计算的挑战。因此, 如何基于机器学习发展高效的结构优化方法是目前的前沿研究热点。在该方面, 专题组织了 3 篇研究论文, 涵盖正向和逆向设计。其中, 徐志昂、杜宗亮和郭旭等针对波控装备中光子/声子系统中的连续型高阶拓扑绝缘体快速逆向设计难题, 提出了一种结合去噪扩散概率模型和移动可变形孔洞法的实时设计框架, 其中采用的去噪扩散概率模型避免了常见数据驱动设计框架中的训练不稳定和保真度低的问题, 实现了计算效率较基于有限元法和遗传算法的传统逆向设计方法提升 6~7 个数量级且保证了设计结构的多样性, 为多场拓扑材料及超材料逆向设计提供了有力的理论工具。针对复合材料结构优化设计问题, 段尊义和阎军等建立了基于机器学习的变刚度纤维增强复合材料结构优化设计方法, 其中采用了考虑载荷大小和方向随机性的反向传播神经网络模型, 避免了传统离散材料插值格式在结构优化设计中面临的设计变量多、优化求解耗时问题, 开展了含圆孔 MBB 梁与悬臂 C 型梁结构变刚度优化设计, 验证了方法的高效性和有效性, 为航空航天、运载机械等领域变刚度纤维增强复合材料结构优化设计提供了一种高效的拓扑优化方法。针对涉及极端载荷下材料特大变形的抗冲击结构优化设计问题, 王春彭和廉艳平等采用支持向量机构建了分类判断代理模型, 给出了基于该代理模型的

2024-07-01 收稿, 2024-07-15 录用, 2024-07-15 网络版发表。

1) 郭旭, 教授, 中国科学院院士, 主要研究方向为结构优化、计算力学、固体力学等。E-mail: guoxu@dlut.edu.cn

2) 廉艳平, 教授, 主要研究方向为极端多场计算力学。E-mail: yanping.lian@bit.edu.cn

引用格式: 郭旭, 廉艳平. 数据驱动的结构分析与设计专题序. 力学学报, 2024, 56(7): 1838-1839

Guo Xu, Lian Yanping. Preface of theme articles on data-driven structure analysis and design. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(7): 1838-1839

结构优化列式, 提出了基于遗传算法的自训练分类判断优化设计方法, 实现了回归问题向分类问题的转化以降低代理模型的构建成本并提高遗传算法的优化效率, 通过波纹夹芯结构抗爆性能和聚脲/陶瓷复合板抗侵彻性能优化设计算例验证了算法的有效性和高效性, 为装备结构抗冲击性能设计提供了一种新的高效优化设计方法。

目前, 计算科学范式下的传统数值模拟方法在求解非均质材料与结构多尺度问题时面临着本构建模/参数反演复杂和计算耗时的挑战, 一定程度上制约了高端装备结构的研发效率。因此, 如何在数据科学范式下, 发展复杂材料性能与结构力学响应分析的数据驱动高效算法则是目前的研究热点。在该方面, 专题组织了 1 篇综述和 5 篇研究论文, 涵盖了固体力学、流体力学、生物力学以及增材制造工艺力学等内容。在生物力学方面, 严子铭、柳占立和庄茁等针对当前骨组织微观结构临床医学影像分辨率低及其生物力学性能多尺度表征难等挑战, 建立了基于数据驱动与力学模型融合的建模方法, 实现了基于临床 CT 影像的非均匀骨组织形态学参数的精确预测, 进一步发展了基于贝叶斯的多参数反演识别框架, 实现了临床 CT 影像下松质骨各向异性力学性能的多参数反演辨识, 形成了系统的数据驱动与力学建模相融合的理论、计算和实验方法, 为个性化骨缺损快速精准诊疗奠定了关键技术基础。陶雅萍、桑建兵和孙丽芳等针对生物软组织复杂本构模型参数反演问题, 发展了一种数据驱动的人体面部皮肤粘弹性本构参数反演方法, 其中采用了随机森林模型和支持向量机回归模型, 分析了两种不同模型的计算精度并通过实验结果验证了方法的有效性, 为人体皮肤力学性能表征分析研究提供了重要算法支撑。在复杂结构成形的增材制造工艺力学方面, 胡雅楠、吴圣川和康国政等围绕金属增材制造材料及结构基本力学性能与疲劳断裂性能预测方面所面临的效率低、精度差等挑战, 从基于机器学习的材料及构件力学性能分析算法层面梳理了国内外研究进展, 概述了增材制造各向异性组织、广域内部缺陷、残余应力和粗糙度的形成原因与机器学习在这些特征预测中的应用现状, 重点阐述了机器学习在拉伸性能和疲劳断裂性能预测方面的研究成果, 探讨了当前机器学习在力学性能预测中的局限性并展望了未来研究方向。针对金属增材制造成形微观组织和冶金缺陷所决定的材料基本力学性能的预测问题, 于飞和廉艳平等发展了一种数据驱动的晶体塑性有限元自洽聚类分析方法, 其中线下计算采用有限元法避免了含复杂内部孔隙微观体元弹性计算的网格划分难题并采用 K-Means 聚类算法对材料域离散, 进而实现了其线上基于 Lippmann-Schwinger 积分方程的自洽计算, 实现了计算效率较传统晶体塑性有限元法的数量级提升, 通过含不规则孔隙的多晶材料力学性能分析算例验证了算法的有效性, 揭示了增材制造工艺参数对成形材料力学性能的影响趋势, 为金属增材制造成形材料力学性能快速预测提供了一种高效高精度计算方法。在复合材料结构多尺度分析问题方面, 白晓伟、阳杰和胡衡等针对基于能量泛函和距离泛函的两类数据驱动计算均匀化方法开展了系统的对比分析研究, 以纤维增强复合材料结构为例探讨了两者在求解多尺度问题时的优缺点, 展望了非均质材料与结构数据驱动计算方法的研究方向。作为一种将传统神经网络与先验物理知识(控制方程)相融合的方法, 物理信息神经网络(PINNs)受到了广泛关注。潘小果、王凯和邓维鑫针对 PINNs 存在的计算效率低、收敛缓慢的难题, 给出了基于神经正切核理论的快速收敛条件, 进而提出了一种动态傅里叶特征嵌入时间因果算法, 采用多种数值算例验证了其在提升 PINNs 收敛速度方面的有效性, 为流体、固体力学问题控制方程以及反问题求解等提供了一种高效的 PINN 方法。

目前, 数据驱动计算力学所涉及的研究内容颇为广泛。由于篇幅所限, 本专题未涉及面向多尺度/多功能结构优化设计、结构数字孪生及健康检测等方面的研究内容。实际上对于许多力学科学和工程问题, 现有的数据驱动计算技术仍不具备完善的求解能力, 一方面纯数据驱动的机器学习缺乏可解释性且其外推泛化能力不具备理论依据, 另一方面大量存在的数据如何关联和物理先验知识如何合理利用仍缺乏系统的基础理论指导。因此, 本专题期望以此为契机, 促进该领域新计算理论、新计算方法以及新一代 CAE 软件的深入系统研究, 从而为新科技革命和产业变革时代下的高端工业装备结构迭代升级奠定坚实理论基础并提供关键技术支撑。