

机器学习在建筑结构抗震防灾中的应用研究

魏宇博

长安大学, 中国·陕西 西安 710000

摘要: 地震灾害是自然灾害中最具破坏力的类型之一, 随着地震频率和结构复杂度的增加, 传统抗震设计方法逐渐暴露出不足之处, 而机器学习技术凭借其精度高、反馈快等优点在建筑结构抗震领域得到广泛运用。论文探讨了机器学习在建筑结构抗震防灾中的应用, 重点回顾其在抗震结构优化、抗震性能评估、地震响应预测及结构健康监测等领域的研究, 指出了机器学习在处理大数据和非线性模型中的优势。论文将不同算法进行对比, 阐述其在应用中的优势与局限性, 同时分析了面临的数据瓶颈等挑战。研究表明, 采用多源数据的混合驱动方法, 有助于解决机器学习现有瓶颈问题并提高准确性, 推动建筑抗震防灾体系智能化发展。

关键词: 机器学习; 抗震防灾; 结构监测; 地震响应预测; 智能优化设计

Application Research of Machine Learning in Seismic Disaster Prevention of Building Structures

Yubo Wei

Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract: Earthquake disasters are one of the most destructive types of natural disasters. With the increase in the frequency of earthquakes and the complexity of structures, traditional seismic design methods gradually reveal their deficiencies. Machine learning technology, however, has been widely applied in the field of seismic resistance of building structures due to its advantages such as high precision and rapid feedback. This paper explores the application of machine learning in seismic disaster prevention of building structures, focusing on reviewing its research in the fields of seismic structure optimization, seismic performance evaluation, earthquake response prediction, and structural health monitoring. It points out the advantages of machine learning in dealing with big data and nonlinear models. This paper compares different algorithms, elaborates their advantages and limitations in application, and analyzes the challenges they face, such as data bottlenecks. The research shows that the hybrid-driven method using multi-source data helps to solve the existing bottleneck problems of machine learning, improve its accuracy, and promote the intelligent development of the seismic disaster prevention system for buildings.

Keywords: machine learning; seismic disaster prevention; structural monitoring; earthquake response prediction; intelligent optimal design

0 前言

近年来, 地震灾害的频率和破坏力持续增加, 造成人员伤亡和财产损失不断加剧。例如, 2008 年汶川地震 (见图 1) 和 2023 年土耳其地震 (见图 2) 都造成了严重的人员伤亡和财产损失。这些灾难突显了建筑结构在地震中的脆弱

性。因此, 提升建筑物抗震能力成为保障公共安全的重要课题^[1]。

传统的抗震设计方法多依赖于经验法则和简化的物理模型, 这些方法在面对复杂或非线性的地震响应时, 存在一定的局限性。传统的有限元分析和推覆分析方法难以准确捕捉到建筑物在极端地震条件下的动态行为。



图 1 2008 年汶川地震



图 2 2023 年土耳其地震

而机器学习作为一种数据驱动的方法，能够从大量的数据中提取潜在的规律，解决传统方法存在的问题。例如，Al Khazaleh 等^[2]利用人工神经网络（ANN）优化地震动参数预测，显著降低模型误差。与传统的抗震分析方法相比，机器学习能为结构健康监测和灾害预警提供更加智能化的解决方案。因此，有必要探讨机器学习在建筑结构抗震防灾中的具体应用，分析其在抗震防灾方面的优势与挑战，以促进机器学习的进一步发展（见图 3、图 4）。

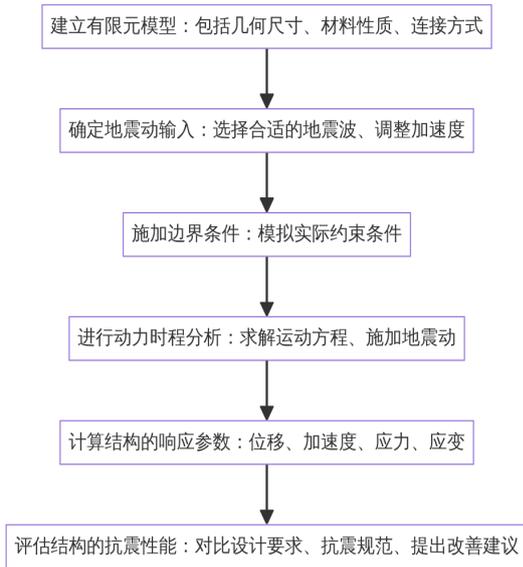


图 3 传统设计方法分析过程示例

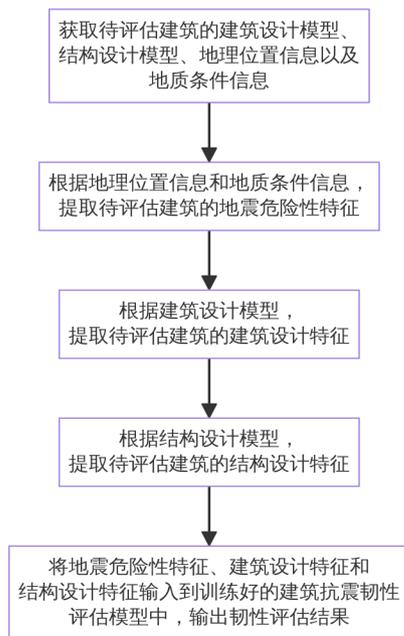


图 4 机器学习方法分析过程

1 机器学习在建筑结构抗震防灾中的应用

1.1 抗震结构优化与加固

抗震结构优化是建筑抗震防灾中的一个重要方面，抗

震结构的合理与否直接决定建筑物抗震能力的强弱。而通过试错法和经验法则的传统设计优化方法既费时又难以达到最佳效果。

机器学习技术，特别是遗传算法（GA）等方式能够在多目标优化中提供更加高效的解决方案。例如，郭海丁等^[3]提出了一种基于遗传算法的结构优化方法，能够在考虑多重目标函数的情况下优化结构抗震设计。数字孪生技术与机器学习的结合也为建筑结构提供了实时优化解决方案，许多研究表明，数字孪生技术能够通过反馈机制不断优化抗震性能。

在实际应用中，如何平衡优化设计中的安全性与经济性、如何解决多目标优化中的冲突等问题，仍然是当前的研究热点。

1.2 抗震性能评估与可靠性分析

建筑物的抗震性能评估是结构设计的核心内容，尤其是在复杂地震场景下，如何准确评估建筑物的抗震能力，关系到设计是否能够满足安全性要求。传统的抗震性能评估方法，如 Pushover 分析和推覆法，虽然能够提供一定的非线性分析，但其计算量大且无法实现实时预测。

近年来，机器学习方法逐渐成为替代传统方法的有效工具。例如，汤皓等^[4]提出了一种基于神经网络的抗震性能评估模型，能够快速评估结构的抗震响应。强化学习也被广泛用于优化建筑结构的抗震设计，Kakooee R 等^[5]使用强化学习优化了结构的布局设计，提高了抗震性能。

然而，如何将机器学习算法与物理机理相结合，使得模型能够更好地模拟建筑物的实际行为，仍然是一个亟待解决的难题。

1.3 地震响应预测与灾害预警

地震响应预测是抗震设计的关键环节，特别是对于大型建筑和复杂结构而言，如何准确预测其在地震中的响应，直接关系到结构设计的可靠性。传统的地震响应预测方法主要依赖于有限元模拟（FEM）和经验公式，其主要的计算效率和模型精度之间存在显著矛盾。

而机器学习算法，尤其是时序数据分析方法，如 LSTM 等方法能够通过历史数据训练模型，捕捉结构的动态特征，能够精准预测建筑物在地震中的动态响应。于海英等^[6]就利用 LSTM 网络对建筑物的地震响应进行了预测，并取得了较好的效果。

虽然机器学习在地震响应预测中展现了巨大的潜力，但非线性动力学建模、实时预测延迟以及数据质量问题仍然是需要解决的难题。

1.4 结构健康监测与损伤识别

结构健康监测（SHM）在抗震防灾中具有重要作用，特别是地震前后对建筑结构的实时监测和损伤评估。传统检测方法主要根据传感器振动信号，通过频谱分析来评估建筑物的健康状态。在面对复杂的非线性损伤或未知损伤时，传

统方法难以提供精确的识别结果。

然而，利用监督学习算法对振动信号进行分类，机器学习能够高效地识别出裂缝、裂纹或其他结构损伤。陆秋海等^[7]介绍了基于模态分析的结构损伤识别方法，并展示了其在地震后结构监测中的应用。而深度学习技术，特别是卷积神经网络（CNN）和长短时记忆网络（LSTM），能够有效处理时序数据，分析建筑物在地震波作用下的动态响应，实现精确的损伤识别。

尽管机器学习方法在损伤识别上有较好的表现，但噪声数据的影响、实时性和计算效率等问题仍然需要进一步优化。

2 机器学习在建筑抗震防灾中的应用与未来

2.1 机器学习算法的局限

在建筑抗震防灾中，机器学习的应用涵盖了多种算法，每种算法都有其优势与局限性。

深度学习算法在处理高维数据和非线性建模方面表现出色，能够高精度地预测建筑物的响应。然而，其训练需要大量的标注数据和高计算资源，且模型通常缺乏可解释性。随机森林算法具有较强的抗过拟合能力，在建筑结构健康监测中，能够有效地识别损伤类型，但在处理高维数据时，效率有所下降。贝叶斯网络则适用于量化不确定性，特别是在复杂系统中，可以评估建筑结构在不同地震场景下的失效概率，但构建模型时需要大量的先验知识，且计算复杂度较高。强化学习具有较强的动态优化能力，特别适用于实时反馈设计，如优化建筑结构的抗震参数，但其训练过程较为不稳定，且在训练过程中需要大量的样本数据（见表 1）。

表 1 几种常见的机器学习算法对比

算法类型	优势	局限性
深度学习	高精度，适用于大规模数据处理，自动特征提取，非线性建模能力强	需要大量数据与计算资源，黑箱特性，缺乏可解释性
随机森林	强抗过拟合能力，较强的可解释性适应性强，适用于分类和回归问题	高维数据处理效率低，内存消耗大，模型复杂度高
贝叶斯网络	能量化不确定性，模型解释性较强，适应缺失数据和不确定信息	建模复杂，需要领域专家，计算量大，训练速度慢
强化学习	动态优化能力强，适用于复杂系统，可用于探索未知解进行优化	训练过程不稳定，样本效率差，训练需大量样本

2.2 机器学习面临的关键问题

尽管机器学习在建筑抗震防灾中表现出了显著的优势，但在实际应用中仍面临一些关键问题。首先是数据瓶颈问题，地震等小概率事件的标注数据获取难度较大，这使得训练模型时数据样本数量有限，影响了模型的泛化能力。尤其是对于一些特定地区或新建建筑，相关数据的稀缺性使得模型难以提供准确的预测。

另外，机器学习模型的可解释性也是一个重要问题。深度学习存在“黑箱”问题，在工程实践中难以为决策者提供透明的决策依据，这限制了其在实际抗震防灾中的广泛应用。工程师和决策者通常需要理解模型的推理过程，以便根据其预测结果做出合理的决策。因此，如何提高模型的可解释性，发展“白盒”模型成为当前研究的新方向。

3 发展与展望

随着科技的进步和建筑抗震领域的不断发展，机器学习技术在建筑结构抗震防灾中的应用前景广阔，尤其是在面对多源数据、智能化系统以及城市抗震等挑战时，机器学习能够为未来的抗震防灾提供创新的解决方案。

3.1 多源数据融合与智能化系统

未来，随着传感器技术、遥感技术以及社交媒体等多模态数据的不断发展，如何有效地将这些多源数据进行融合，提升数据的质量并增强预测模型的鲁棒性，成为提升灾害预警系统精度的关键。此外，随着边缘计算技术的发展，将机器学习算法部署到建筑物终端设备中，能够实时监测建筑结构的健康状态并进行动态反馈。这种智能化的抗震防灾系统能够通过及时的响应有效减少地震带来的损失。

3.2 知识与数据驱动的混合方法

结合传统的力学知识和数据驱动的机器学习模型，将是未来建筑抗震防灾研究的一个重要方向。当前，尽管机器学习在抗震防灾中展现出强大的数据分析能力，由于其“黑箱”特性，仍难以解释其决策过程。在未来，嵌入抗震规范和力学先验知识，能够提高模型的可解释性和泛化能力，从而更好地理解模型的预测结果^[8]。通过将力学原理与机器学习算法融合，形成“知识—数据混合驱动”的方法，不仅能够提高模型的预测精度，还能使其更加符合工程实际需求，推动建筑抗震防灾体系的智能化发展。

4 结论

论文从机器学习在建筑结构抗震防灾领域的应用环节着手，基于国内外研究，介绍了机器学习技术在抗震防灾中的优势与局限性，对于进一步推动机器学习算法在建筑抗震领域的发展与应用，论文形成以下认识和建议：

①由于建筑结构在地震过程中存在显著的非线性动力学特征，传统抗震设计、难以及时、准确地捕捉复杂建筑在强烈地震波作用下的动态响应；而机器学习算法能利用多源数据，实时提取建筑物的振动特征，并进行迅速预警与识别，在高层建筑、大跨结构中更具优势。

②建筑结构抗震涉及地震动特性、材料性能等多重因素，且不同地区的地震环境差异较大。目前地震与建筑健康监测数据总体不足且分散，在小样本场景下模型的泛化能力难以保证，需要结合迁移学习、增强学习等方法，并将力学原理与模型训练相融合，以在多场景中保持稳定性。

③建议未来重点发展具备可解释性与机理融合的算法，

并结合数字孪生技术形成“数据+力学+智能”的抗震防灾新框架。随着边缘计算技术成熟,可将算法部署于传感器端或边缘服务器,实现对建筑状态的实时分析与灾害预警,从而有效减少地震带来的人员伤亡和经济损失。

综上所述,机器学习在建筑结构抗震防灾中具有广阔的应用前景。要真正发挥其价值,需要推动算法与工程实践紧密结合,强化可解释性、边缘部署与数字孪生技术的应用,从而全面提升建筑抗震防灾水平。

参考文献:

- [1] 林楷奇,吴苏静,郑俊浩,等.地震灾害和意外事件下建筑结构抗倒塌研究:进展和展望[J/OL].工程力学,1-24[2025-03-05].
- [2] Al Yamani W H, Bisharah M, Alumany H H, et al. Machine learning in seismic structural design: an exploration of ann and tabu-search optimization[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2024,25(3):2367-2377.
- [3] 郭海丁,路志峰.基于BP神经网络和遗传算法的结构优化设计[J].航空动力学报,2003,18(2):216-220.
- [4] 汤皓,陈国兴.基于灰关联与神经网络综合评价模型的多层砖房震害预测[J].世界地震工程,2006,22(4):133-139.
- [5] Kakooee R, Dillenburger B. Reimagining space layout design through deep reinforcement learning[J]. Journal of Computational Design and Engineering,2024,11(3):43-55.
- [6] 于海英,王文斌,解全才,等.基于长短期记忆模型LSTM的近断层强震动记录零基线校正方法[J].地震工程与工程振动,2022,42(4):35-42.
- [7] 陆秋海,李德葆,张维.利用模态试验参数识别结构损伤的神经网络法[J].工程力学,1999,16(1): 35-42.
- [8] Afshar A, Nouri G, Ghazvineh S, et al. Machine-Learning Applications in Structural Response Prediction: A Review[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction,2024,29(3):3124002.