

高层建筑结构抗震设计：选型、性能与经济性的综合考量

陈加平

天津美新建筑设计有限公司广州分公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110016

摘要：高层建筑结构抗震设计需综合考量选型、性能与经济性。不同结构体系传力路径与耗能机制不同，结构性能目标具多维度特性。不规则结构要准确分类与分析，通过模拟技术分析非对称结构动力响应。此外，还可利用遗传算法优化构件尺寸、构建关联模型等，某超高层实践提供经验，多种技术助力实现可持续发展。

关键词：高层建筑；结构抗震设计；多目标优化

Seismic Design of High-Rise Building Structures: Comprehensive Consideration of Selection, Performance, and Economy

Chen Jiaping

Tianjin Meixin Architectural Design Co., Ltd. Guangzhou Branch, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The seismic design of high-rise building structures requires comprehensive consideration of selection, performance, and economy. The transmission paths and energy dissipation mechanisms of different structural systems are different, and the structural performance objectives have multidimensional characteristics. Irregular structures should be accurately classified and analyzed, and the dynamic response of asymmetric structures should be analyzed through simulation techniques. In addition, genetic algorithms can be used to optimize component dimensions, construct correlation models, etc., providing experience for a certain super high-rise practice, and various technologies can help achieve sustainable development.

Keywords : high-rise buildings; structural seismic design; multi-objective optimization

引言

《建设工程抗震管理条例》于2021年9月1日起施行，旨在加强建设工程抗震管理，提高建设工程抗震防灾能力。在此政策背景下，高层建筑结构抗震设计备受关注。其结构体系多样，不同体系传力路径与耗能机制各异，抗震概念设计需注重规则性等原则。结构性能目标具多维度特性，不规则结构需准确分类并明晰影响。非对称结构动力响应分析、构件尺寸优化、抗震性能与经济性关联等方面研究不断推进，还有基于可持续发展的技术应用与多学科交叉探索，共同助力实现高层建筑选型、性能与经济性的综合考量。

一、结构选型与性能目标的综合考量

(一) 结构体系分类及其抗震机理

高层建筑结构体系多样，不同体系的传力路径与耗能机制各异。框架-核心筒体系中，水平力由框架与核心筒共同承担，核心筒作为主要抗侧力构件，传力直接，框架则协同工作，二者通过楼板连接形成整体，在地震作用下，框架梁端、核心筒连梁等部位可产生塑性铰耗能^[1]。巨型结构通常由巨型框架或巨型桁架等构成主结构，承载主要竖向与水平荷载，传力路径简洁高效，通过巨型构件的合理布置及次结构协同，可在地震中耗散能量。支撑筒体体系，利用筒体周边布置的支撑来增强结构抗侧刚度，

地震力经支撑传递至基础，支撑的屈曲或屈服能有效耗能。在超高层项目中，基于这些结构体系的特点，抗震概念设计注重规则性、均匀性等原则，以提升结构整体抗震性能，确保在地震灾害下结构安全可靠。

(二) 结构性能目标的多维度分析

在高层建筑结构抗震设计中，结构性能目标具有多维度特性。从安全储备系数来看，它反映结构抵御地震作用的冗余能力，较高的安全储备系数意味着结构在强震下有更大几率保持稳定，但可能会增加建设成本。损伤控制指标关乎结构在不同地震水准下的损伤程度，确保建筑功能的正常发挥。比如轻微损伤下结构仍能正常使用，中度损伤时经过修复可继续使用。基于地震

重现期的分水准设计标准则进一步细化了性能目标，不同重现期对应不同地震水准，如小震、中震、大震，根据建筑功能需求匹配相应设计标准。例如，医院、学校等重要建筑对地震下的功能延续要求高，应采用更严格性能标准^[2]。通过多维度分析，能更全面、精准地确定结构性能目标，实现结构选型与性能的合理匹配。

二、不规则结构抗震分析关键技术

（一）不规则结构分类及工程影响

不规则结构在高层建筑中较为常见，对其进行准确分类并明晰工程影响至关重要。不规则结构主要包括平面不规则与立面不规则两类。平面不规则如扭转不规则，当楼层最大弹性水平位移（或层间位移）大于该楼层两端弹性水平位移（或层间位移）平均值的1.2倍时，即判定为扭转不规则，这会导致结构在地震作用下扭转效应显著增大，增加结构破坏风险^[3]。立面不规则中的刚度突变，若某层侧向刚度小于相邻上一层的70%，或小于其上相邻三层侧向刚度平均值的80%，便属于刚度突变，这将使该楼层成为薄弱层，地震时易出现较大变形甚至破坏。通过某超限高层案例可发现，不规则度的增加会致使基底剪力增大，进一步影响结构的抗震性能与安全性，在设计时需针对这些不规则特征采取相应加强措施。

（二）非对称结构动力响应分析方法

非对称结构动力响应分析是不规则结构抗震分析的关键环节。在高层建筑结构中，非对称结构因质量与刚度分布不均，地震作用下会产生复杂的扭转效应。融合BIM参数化建模与非线性时程分析技术，能精准模拟此类结构的动力响应。BIM参数化建模可快速构建复杂非对称结构模型，详细呈现结构几何与物理特性，为后续分析提供精确基础。非线性时程分析则考虑材料非线性与结构几何非线性，结合地震波输入，动态模拟结构在地震过程中的响应。同时，考虑P-Δ效应的三维弹塑性分析流程，能进一步精确模拟竖向荷载与水平位移相互作用对结构响应的影响。通过这一系列技术手段，可全面、准确分析非对称结构动力响应，为高层建筑结构抗震设计提供关键依据^[4]。

三、结构优化与经济效益协同机制

（一）多目标优化设计方法

1. 基于遗传算法的构件尺寸优化

在高层建筑结构抗震设计中，基于遗传算法的构件尺寸优化是实现结构优化与经济效益协同的关键环节。建立包含材料用量、层间位移角、建造成本的多目标函数后，遗传算法通过模拟自然选择和遗传机制，对构件尺寸进行搜索与优化。它将构件尺寸作为基因，种群为不同尺寸组合，经选择、交叉和变异操作，使种群不断进化，逐步趋近最优解。在进化过程中，算法权衡材料用量、层间位移角和建造成本，找到满足抗震性能要求且经济效益最佳的构件尺寸组合，从而实现500米级超高层结构体系的优化，在保证结构安全可靠的同时，降低成本、提高经济效益^[5]。

2. 抗震性能与经济性关联模型

在高层建筑结构抗震设计中，抗震性能与经济性关联模型的构建至关重要。通过提出地震损失期望值与结构刚度参数的数学表达，可精准量化两者之间的关系。地震损失期望值涵盖因地震导致的结构损伤修复、人员伤亡等一系列损失，而结构刚度参数直接影响结构的抗震能力。在此基础上，进一步构建投资-效益平衡曲线，该曲线以结构投资为横坐标，以预期的效益（如减少的地震损失等）为纵坐标，直观展示不同结构设计方案下投资与效益的平衡状态，为设计人员提供清晰的决策依据，助力实现结构优化与经济效益的协同，有效兼顾高层建筑的抗震性能与经济性^[6]。

（二）全生命周期成本评估体系

1. 初始建造成本与维护成本耦合分析

在高层建筑结构抗震设计中，初始建造成本与维护成本的耦合分析至关重要。初始建造成本涵盖建筑材料、施工工艺等方面，不同的结构选型和抗震设计标准会使初始成本产生较大差异。而维护成本则与建筑在使用过程中的老化、地震损伤修复等密切相关。这两者相互影响，例如，提高初始建造成本采用更优质材料和先进结构体系，虽可能增加前期投入，但可降低后期维护成本^[7]。通过建立含抗震加固费用的动态成本模型，能够有效分析这种耦合关系。对比不同设防标准下40年运营成本，可知过高的设防标准虽提升抗震性能，却大幅增加初始成本，若后期维护需求少，总成本或许可接受；反之，过低设防标准虽初始成本低，但地震风险下维护成本可能剧增，通过综合考量两者耦合，实现结构优化与经济效益协同。

2. 社会经济效益量化评估

在高层建筑结构抗震设计中，社会经济效益量化评估至关重要。引入震后功能恢复时间指标，能有效反映建筑震后对社会正常运转的影响程度。通过构建包含GDP损失的社会成本计量体系，可精确衡量地震对区域经济的冲击^[8]。一方面，震后功能恢复时间越长，意味着该建筑相关的经济活动停滞越久，其带来的潜在经济损失就越大。另一方面，GDP损失不仅涵盖直接的建筑损坏修复成本，还涉及因建筑无法正常使用导致的上下游产业经济活动受阻的损失。将这些因素纳入社会经济效益量化评估，能更全面、科学地考量高层建筑结构抗震设计方案，为实现结构优化与经济效益的协同提供精准的数据支持，助力做出兼顾抗震性能与经济合理性的最优决策。

四、工程实践与可持续发展策略

（一）典型工程案例分析

1. 某150米级超高层抗震优化实践

在某150米级超高层抗震优化实践中，首要工作是对结构体系进行严谨比选。经过多轮模拟分析与综合评估，从多种可选方案里确定出最适配该超高层的结构体系，为抗震性能奠定基础。随后，基于性能的构件优化方案得以展开，通过精确计算与优化设计，对各构件的尺寸、配筋等进行调整。在满足抗震性能的前提下，实现了钢材用量的有效降低，成功节约15%的钢材用量，

显著提升了经济性。这种实践既保证了超高层建筑在地震作用下的安全性与稳定性,又体现了可持续发展理念,为同类超高层建筑的抗震设计提供了宝贵经验与借鉴范例^[9]。

2. 不规则结构抗震性能提升对策

以某L形平面超高层这一不规则结构为例,为提升其抗震性能,采用BRB耗能装置。该装置对扭转效应有显著控制效果,在地震作用下,结构的扭转位移和扭转角明显减小,降低了扭转破坏的风险。BRB耗能装置利用其良好的耗能特性,将地震输入能量转化为热能等其他形式能量耗散,从而有效保护主体结构。同时,从可持续发展角度,该装置可重复使用,在地震后若未损坏无需更换,减少资源浪费。这种应用在提升不规则结构抗震性能的同时,兼顾了可持续发展理念,为类似不规则高层建筑结构抗震设计提供了有效参考^[10]。

(二) 绿色抗震技术集成应用

1. 可更换耗能构件技术

在高层建筑结构抗震设计的工程实践与可持续发展策略中,可更换耗能构件技术是绿色抗震技术集成应用的关键一环。研发的模块化金属阻尼器系统具有显著优势。该系统采用标准化设计与制造,可在工厂预制,现场快速组装,极大缩短施工周期。在地震发生时,模块化金属阻尼器能够率先耗散地震能量,有效保护主体结构安全。震后,若阻尼器出现损伤,因其模块化设计,可快速进行更换,实现震后快速修复,使建筑功能得以延续,避免因结构修复导致建筑长时间无法使用。从可持续发展角度看,此技术减少了建筑全生命周期内因地震破坏带来的资源浪费与环境影响,在提升建筑抗震性能的同时,兼顾了选型、性能与经济性的综合考量。

2. 基于碳足迹的抗震设计

在高层建筑结构抗震设计的工程实践中,建立结构碳排量与抗震性能的关联模型并遵循低碳抗震设计原则意义重大。通过分析建筑材料生产、运输、施工及拆除阶段的碳排放数据,结合结构在不同地震作用下的响应,构建起能精准反映二者关系的模型。依据该模型,提出低碳抗震设计原则,优先选用低碳排放且抗震性能良好的建筑材料,如新型绿色钢材、再生混凝土等;优化结构体系,在满足抗震性能前提下,减少材料用量,降低碳排放;采用高效施工工艺,缩短施工周期,进一步削减碳足迹。如此,实现高层建筑结构抗震设计在选型、性能与经济性上的综合考量,达成可持续发展目标。

参考文献

- [1]利明东.某复杂高层建筑结构基于性能的抗震设计与分析[D].西安建筑科技大学,2021.
- [2]刘中欢.带弱连接楼盖的平面凹凸不规则高层建筑结构抗震性能研究[D].华南理工大学,2021.
- [3]朱潇.某超限高层建筑结构抗震设计与性能分析[D].湘潭大学,2022.
- [4]谢行思.自复位阻尼耗能支撑—高层韧性钢结构抗震性能与设计方法[D].北京交通大学,2021.
- [5]俞锋.裙房结构对高层建筑抗震性能的影响研究[D].南华大学,2023.
- [6]高利亚,叶秀斌.高层建筑结构抗震设计优化措施[J].砖瓦世界,2023(23):80-82.
- [7]刘钊.高层建筑结构抗震设计优化措施[J].建筑与装饰,2023(9):34-36.
- [8]朱兴永.高层建筑结构抗震设计探究[J].中国建筑金属结构,2021(9):74-75.
- [9]徐志鹏.高层建筑结构抗震设计研究[J].智能建筑与工程机械,2021,3(2):52-54.
- [10]马秀娟.高层建筑结构抗震设计研究[J].化肥设计,2023,61(2):19-21.

(三) 智能设计技术发展前瞻

1. 机器学习驱动的参数优化

在高层建筑结构抗震设计的工程实践中,应用深度神经网络预测结构响应以实现设计参数智能寻优,是极具发展潜力的方向。通过大量的结构数据训练深度神经网络,该网络能精准模拟结构在不同地震作用下的响应。基于此,可建立以选型、性能与经济性为目标的多目标优化模型。机器学习算法能够在复杂的参数空间中快速搜索,找到满足综合要求的最优设计参数组合。这不仅提升结构的抗震性能,还兼顾经济性,符合可持续发展策略。长远来看,随着数据的不断丰富和算法的持续优化,机器学习驱动的参数优化将在高层建筑结构抗震设计中发挥更大作用,助力实现更安全、经济且环保的建筑目标。

2. 数字孪生技术在抗震管理中的应用

在高层建筑抗震管理中,数字孪生技术正发挥着日益重要的作用。通过构建与实体建筑相对应的虚拟数字模型,数字孪生技术能够对高层建筑的结构性能进行实时、精准模拟。它整合建筑的各类数据,如材料特性、结构应力分布等,在虚拟环境中预演不同地震场景下建筑的响应。借助这一技术,工程师可提前发现潜在的抗震薄弱环节,及时优化设计方案。在建筑运营阶段,数字孪生模型与实时监测系统相连,能根据传感器收集的数据动态更新,实时反映建筑结构状态,为维护决策提供依据,确保建筑在全生命周期内具备良好抗震性能,同时也为高层建筑抗震管理提供了一种可持续的、智能化的发展路径。

五、总结

高层建筑结构抗震设计需综合考量选型、性能与经济性。基于多目标优化的抗震设计理论框架,为设计提供了全面且科学的指引。而考虑全生命周期成本的设计评估体系,更使得经济性在设计过程中得以量化考量。数字孪生技术与低碳抗震材料的结合,不仅体现了技术与材料的创新融合,还指明了未来发展方向。跨学科研究,特别是结构工程与环境科学的交叉,有助于拓展抗震设计的视野,从更宏观角度综合提升高层建筑的抗震性能,兼顾环境效益。通过这些理论与技术的不断探索,在确保高层建筑结构安全的同时,实现选型的合理性、性能的可靠性与经济性的平衡,为城市建设提供稳固且可持续的建筑解决方案。