

# 现代高层建筑设计优化与抗震性能分析

张泳鑫

安徽建工（马鞍山）建设投资有限公司 安徽 马鞍山 243000

**摘要：**高层建筑是现代城市空间集约化发展的关键，其结构安全性与经济性取决于科学设计方法。本文聚焦“结构设计优化”与“抗震性能提升”两大议题。结构优化上，不泛泛而谈，着重阐述四大可工程实施的策略，包括基于刚度-重量平衡的构件尺寸分级优化、面向动力性能调控的几何形态优化、以传力路径高效化为目标的拓扑优化及多目标协同优化。抗震性能方面，先剖析高层建筑在地震下的典型破坏机理、关键性能指标和非线性响应特征，再针对性提出三大提升策略：靠精细化设计与构造强化自身抗震能力、用被动控制技术主动耗散地震能量、借智能材料与健康监测构建韧性防御体系。研究表明，精准优化与系统抗震提升结合，是实现高层建筑一体化设计的关键。

**关键词：**高层建筑；结构优化策略；抗震性能分析；消能减震；韧性设计

## 引言

全球城市化进程中，高层及超高层建筑成为都市标志，但其“高耸”特性带来结构设计难题，巨大的重力荷载、复杂风致效应和关键地震作用，对结构安全性等提出严苛要求。传统“试错式”设计方法难以满足现代高层建筑复杂需求。因此，运用科学系统优化策略，在兼顾建筑美学与功能的同时，实现结构经济高效，并通过深入抗震性能分析制定提升策略，保障其在罕遇地震下的生命安全，成为结构工程领域核心课题。本文提供清晰实用技术路线，分为两大主体部分：第一部分详细阐述现代高层建筑设计可具体实施的四大类优化策略；第二部分系统分析高层建筑抗震性能，揭示内在规律与薄弱环节，提出针对性、多层次抗震性能提升策略，为工程实践提供理论与技术支持。

## 1 现代高层建筑设计的具体优化策略

结构优化并非抽象的理论，而是贯穿于方案、初设到施工图全过程的、一系列可量化、可执行的技术手段。针对高层建筑的特点，本文提炼出以下四类核心优化策略。

### 1.1 构件尺寸分级优化：刚度-重量的精细平衡

这是最基础、应用最广泛的优化策略，其核心在于避免“一刀切”式的构件设计，而是根据构件在结构体系中的受力重要性进行差异化、精细化的尺寸设计。

#### 1.1.1 坚向构件分级

对于框架-核心筒或巨型结构体系中的外框柱或巨型柱，可依据其承受的轴力大小进行分级。底部楼层轴力最大，采用高强混凝土（如C60-C80）和较大截面；随着高度增加，轴力递减，可逐级减小截面尺寸并降低混凝土强度等级（如C50-C40）。这种“上小下大”的分级设

计，既能保证底部关键区域的承载力与延性，又能有效减轻上部结构自重，从而降低整体地震作用。

#### 1.1.2 水平构件分级

核心筒的连梁是关键的耗能构件。可采用“强墙弱梁”的设计原则，将连梁设计为在中震下即进入塑性耗能状态。通过精确计算，可优化连梁的截面高度和配筋，使其具有足够的延性和转动能力，同时避免因截面过大而导致剪力墙过早开裂<sup>[1]</sup>。对于楼盖梁板，可采用预应力技术或优化板厚，在满足刚度（控制挠度）和舒适度（控制振动频率）的前提下，最大限度地减轻自重。

#### 1.1.3 剪力墙厚度优化

核心筒剪力墙的厚度并非越厚越好。过厚的墙体不仅增加自重，还会因刚度过大而吸引过多的地震剪力，可能导致底部墙体发生脆性剪切破坏。应通过多方案比选，找到既能满足层间位移角限值，又能使墙体在大震下以弯曲破坏为主（具有更好延性）的最优墙厚。

#### 1.2 几何形态优化：调控动力性能与风荷载

高层建筑的几何形态直接影响其动力特性和风荷载分布，是优化设计的重要切入点。

#### 1.2.1 立面收进与锥度设计

有意识地设计建筑立面的收进（Setback）或锥度（Taper），可以有效改变结构的质量和刚度分布，从而调整其自振周期，避开场地的卓越周期，减小地震共振效应。同时，这种形态能显著削弱风致涡激振动和横风向共振，降低风荷载。

#### 1.2.2 伸臂桁架与环带桁架的精准定位

伸臂桁架是提升结构整体刚度的有效手段，但其位置至关重要。通过参数化分析，可以找到使结构顶点位移和层间位移角最小的最优布置高度。通常，将伸臂桁

架布置在结构高度的1/2至2/3处效果最佳。此外，环带桁架的设置不仅能协同伸臂桁架工作，还能有效减小外框柱的内力差，优化其受力状态。

### 1.2.3 平面形状优化

对于非矩形平面（如圆形、三角形、Y形等），应通过风洞试验和数值模拟，优化其转角、切角或开洞形式，以减小风阻系数和风致扭矩，从而降低对结构抗扭刚度的要求。

### 1.3 拓扑优化：构建高效传力路径

拓扑优化旨在回答“材料应该放在哪里”的根本问题，为概念设计阶段提供最优的结构布局方案。

#### 1.3.1 巨型支撑布局优化

在巨型框架-核心筒体系中，巨型斜撑是关键的抗侧力构件。通过拓扑优化（如SIMP法），可以在设计域内生成材料密度云图，清晰地指示出最高效的巨型斜撑布置路径。这不仅能最大化结构刚度，还能避免不必要的材料浪费。

#### 1.3.2 核心筒开洞优化

电梯井、管道井等在核心筒上形成开洞，会削弱其整体性。拓扑优化可以帮助确定在满足建筑功能的前提下，开洞的最佳位置和尺寸，以最小化对核心筒抗弯和抗扭刚度的不利影响<sup>[2]</sup>。

#### 1.3.3 楼盖结构体系选型

对于大跨度或复杂平面的楼盖，可通过拓扑优化比较不同结构体系（如密肋楼盖、空腹桁架、空间网架等）的传力效率，选择最优方案。

### 1.4 多目标协同优化：集成化设计决策

现代高层建筑的设计是多目标、多约束的复杂决策过程。单一目标（如重量最轻）的优化可能牺牲其他性能（如舒适度或造价）。因此，必须采用多目标协同优化策略。

#### 1.4.1 目标函数构建

将结构总造价（与混凝土、钢筋、模板等工程量相关）、基底剪力（与地震作用相关）、顶点加速度（与风振舒适度相关）等多个指标，通过加权或Pareto前沿法，构建综合目标函数。

#### 1.4.2 智能算法求解

利用遗传算法（GA）或粒子群算法（PSO）等智能优化算法，在庞大的设计变量空间（如各层墙厚、柱截面、伸臂位置等）中进行全局搜索，寻找满足所有规范约束（强度、稳定、位移等）的Pareto最优解集。

#### 1.4.3 BIM平台集成

将优化算法与建筑信息模型（BIM）平台集成，实

现设计-分析-优化的闭环。设计师可以在BIM环境中直观地查看不同优化方案的三维模型、工程量清单及性能指标，从而做出更科学的最终决策。

## 2 高层建筑抗震性能分析

在实施优化设计后，必须对其抗震性能进行深入、准确的评估，这是确保结构安全的最后一道防线。

### 2.1 地震作用下的典型破坏机理

高层建筑在强震下的破坏并非单一模式，而是多种机理的耦合。

#### 2.1.1 P-Δ效应失稳

巨大的重力荷载在侧向位移下会产生附加弯矩（P-Δ效应）。当层间位移角过大时，附加弯矩可能超过结构的抗弯承载力，导致结构整体失稳倒塌。这是高层建筑特有的、最危险的破坏模式。

#### 2.1.2 薄弱层/薄弱部位集中破坏

由于刚度或承载力突变（如底层架空、设备层刚度突变、伸臂层上下刚度差异），地震能量会在这些薄弱部位集中释放，导致该层或该部位的构件（如连梁、剪力墙、柱）发生严重损伤甚至失效。

#### 2.1.3 扭转耦联破坏

当建筑平面不规则，质量中心与刚度中心严重偏心时，地震作用会引发强烈的平扭耦联振动。这会导致结构角部的竖向构件承受远超预期的内力，极易发生剪切或压弯破坏。

#### 2.1.4 节点核心区失效

梁柱节点或伸臂桁架与核心筒/巨柱的连接节点是力流交汇的关键区域，受力极为复杂。若节点核心区抗剪承载力不足或构造措施不当，极易发生脆性剪切破坏，导致结构整体性丧失。

### 2.2 关键抗震性能指标

评估高层建筑的抗震性能，需依赖一系列定量指标。

#### 2.2.1 层间位移角（θ）

这是规范控制的首要指标，直接关系到非结构构件的完好性和P-Δ效应的大小。《建筑抗震设计规范》对不同结构体系在多遇和罕遇地震下的θ限值有明确规定。

#### 2.2.2 基底剪重比

用于检验结构的最小地震作用是否满足要求，防止因结构过柔而导致设计地震力过小。

#### 2.2.3 塑性耗能分布

通过非线性分析，观察塑性铰在结构中的形成顺序和分布。理想的状态是塑性铰首先出现在延性好的构件（如连梁、框架梁）上，形成耗能机构，而关键竖向构件（如底部剪力墙、巨柱）应保持弹性或仅有轻微损伤。

#### 2.2.4 动力特性参数

包括结构的基本自振周期T1、振型参与质量系数、扭转周期与平动周期之比( $T_t/T_1$ )等。T1过长可能导致位移过大,  $T_t/T_1 > 0.9$ 则表明结构抗扭能力不足。

### 3 提升高层建筑抗震性能的策略

#### 3.1 强化结构自身抗震能力: 精细化设计与构造

这是最根本、最经济的策略, 强调“强身健体”。

##### 3.1.1 贯彻“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”原则

通过精确的内力调整和配筋设计, 确保塑性铰优先在梁端等延性好的部位形成, 而柱、墙、节点等关键部位保持足够的承载力储备。

##### 3.1.2 加强底部加强区设计

高层建筑底部区域承受最大的弯矩和剪力, 是抗震设计的重点。应提高底部几层剪力墙和框架柱的混凝土强度等级、增加箍筋加密区的范围和配箍率, 以提高其延性和抗剪能力。

##### 3.1.3 优化关键连接节点

对于伸臂桁架、环带桁架等与核心筒或巨柱的连接节点, 应采用三维实体有限元进行精细化分析, 明确其复杂的应力状态, 并通过设置型钢暗柱、加强环板、穿筋等构造措施, 确保节点的传力可靠和延性充足<sup>[3]</sup>。

##### 3.1.4 控制结构规则性

在方案阶段就应尽量避免平面和竖向的严重不规则, 如扭转不规则、楼板局部不连续、侧向刚度突变等, 从源头上消除薄弱环节。

#### 3.2 采用被动控制技术: 主动耗散地震能量

当结构自身能力难以满足高烈度区或超高层建筑的抗震要求时, 可引入外部耗能装置。

##### 3.2.1 消能减震技术

(1) 金属屈服阻尼器: 利用软钢在往复变形下的塑性滞回耗能。可将其作为斜撑布置在结构的设备层或伸臂层, 形成“消能桁架”, 在小震下提供附加刚度, 在大震下大量耗能, 保护主体结构。其优势在于性能稳定、成本较低、易于更换。(2) 粘滞阻尼器: 利用高粘度硅油通过小孔产生的阻尼力耗能。其出力与速度相关, 对风振和地震均有良好的控制效果, 且在小震下基本不产生附加刚度, 不影响建筑正常使用。上海中心大厦的TMD即结合了粘滞阻尼器。

##### 3.2.2 基础隔震技术

虽然在超高层中应用受限, 但对于200米以下的高层建筑, 特别是位于高烈度区的重要公共建筑(如医院、应急指挥中心), 基础隔震是一种革命性的技术。通过

在基础设置橡胶隔震支座, 将结构的自振周期延长至2-4秒, 远离地震的主要能量频段(0.1-1秒), 可将上部结构的地震响应降低60%-80%, 实现“以柔克刚”。

### 3.3 构建韧性防御体系: 面向未来的智能与可恢复性

未来的抗震设计将超越“生命安全”, 追求“震后可快速恢复功能”的韧性目标。(1) 应用高性能与智能材料: 一是高韧性混凝土: 如掺加聚丙烯纤维或钢纤维的混凝土, 能显著提高构件的抗裂性和延性<sup>[4]</sup>。二是形状记忆合金(SMA): SMA具有超弹性与形状记忆效应, 用其制成的阻尼器或连接件, 在地震后能自动恢复原状, 实现结构的“自复位”, 极大减少震后修复工作量。(2) 部署结构健康监测(SHM)系统: 在建筑关键部位安装传感器网络, 实时监测其在地震等灾害下的响应。震后, 通过分析数据可快速评估结构损伤状态, 为应急决策和修复方案提供精准依据, 缩短建筑功能中断时间。(3) 推行可更换构件设计理念: 将结构中预期会严重损伤的耗能构件(如连梁、阻尼器、特定梁段)设计成螺栓连接的模块化单元。震后, 只需更换这些“保险丝”式的构件, 即可快速恢复结构功能, 大幅降低修复成本和时间。

### 4 结语

本文围绕现代高层建筑结构设计展开, 阐述了结构优化策略与抗震性能提升路径。研究指出, 结构优化要具体精细, 借助构件尺寸分级、几何形态调控等四大策略, 能在保障安全的同时兼顾经济与高效; 抗震性能评估是优化设计的验证与深化, 需理解高层建筑破坏机理, 用非线性分析手段精准量化; 抗震性能提升是多层次系统工程, 先靠精细化设计强化“内功”, 不足时用消能减震等“外功”技术, 未来要融合智能材料等理念构建韧性建筑。总之, 将精准优化策略与系统抗震分析及提升路径结合, 是实现高层建筑安全、经济、绿色、韧性一体化设计的必经之路, 对全球高层建筑技术可持续发展意义重大。

### 参考文献

- [1]刘威.论现代高层建筑结构设计的优化[J].建材与装饰,2020,(14):110-111.
- [2]陈孟乐.高层建筑结构设计中抗震性能优化分析[J].新城建科技,2025,34(06):65-67.
- [3]冷玉霞.现代高层建筑结构设计中的风荷载分析与优化设计研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(11):31-33.
- [4]洪艳.基于性能化设计的高层建筑结构抗震优化策略[J].工程建设与设计,2025,(18):1-3.