

结构减震控制理论在建筑抗震设计中的应用研究

曹会敏

(西安交通工程学院 陕西省西安市 710300)

摘要：结构减震控制理论在建筑抗震设计中的应用成为本文的探究重点。对不同建筑结构中实际效果和工作原理的分析，揭示了结构动力学与能量耗散机制两者合一的技术手段。针对建筑高度、材料特性以及抗震需求进行具体应用，在此基础上，多种减震控制方案逐步呈现出来，并包含质量阻尼器、粘滞阻尼器等典型装置优化配置情况。通过对比不同类型建筑的减震效果和经济效益，得出了减震控制技术能够显著提升建筑抗震性能，同时具备较高的经济可行性。研究表明，结构减震控制理论的应用为未来抗震设计提供了有效的技术支持与优化方向。

关键词：结构减震控制；抗震设计；能量耗散；质量阻尼器

引言

全球地震活动频发催生了建筑物抗震设计的重要性，为保障生命财产安全开辟关键领域。传统抗震设计以增强结构刚度和承载力策略，对强震的防范常显无力。因此孕育出了结构减震控制理论，采用安装减震装置在地震中耗散能量、削减振动传递方式。这种理论将结构动力学与能量耗散机制碰撞融合，已由高层建筑、桥梁等复杂结构场景实践验证，并展现良好的抗震性能与工程应用前景。

1. 结构减震控制理论的基本原理

1.1 结构减震控制的核心概念与数学模型

结构减震控制通过安装诸如质量阻尼器（TMD）等装置来实现。TMD的工作原理依赖于其与主结构形成的共振，通过将部分地震能量转移到阻尼器中进行耗散，从而降低主结构的振动幅度。TMD的物理模型通常用一自由度系统表示，基本数学模型为：

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_d \ddot{x}_d$$

其中， m_s 、 c_s 和 k_s 分别为主结构的质量、阻尼和刚度， x_s 是主结构的位移， m_d 和 \ddot{x}_d 分别为TMD的质量和位移。TMD的运动方程则为：

$$m_d \ddot{x}_d + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}_s) + k_d(x_d - x_s) = 0$$

其中， c_d 和 k_d 分别为TMD的阻尼和刚度。这两组方程通过动态相互作用，描述了结构减震控制系统的工作原理。基于能量耗散原理，结构减震技术也可用数学形式表达为：

$$E_d = \int c_d(\dot{x}_d - \dot{x}_s)^2 dt$$

其中， E_d 为能量耗散量，说明了阻尼器如何通过摩擦或粘滞阻尼消耗地震输入能量。

1.2 减震控制在结构动力学中的应用

在建筑抗震设计中，基于微分方程，建筑结构在地震力作用下的动态响应可通过建立运动方程来描述，形式为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

其中， m 、 c 、 k 分别代表结构的质量、阻尼系数和刚度， $F(t)$ 为地震作用力。不仅此模型具有描述建筑结构在地震影响下位移、速度及加速度的能力，还可用以模拟不同地震波输入对结构反应的情况。增强建筑抗震性能之路，经由引入附加阻尼装置如粘滞阻尼器（VD）和摩擦阻尼器（FD），利于改善动态特性。

1.3 结构减震控制的效能评估方法

减震控制技术的效能评估通常通过传递函数、频率响应函数（FRF）等数学工具进行。传递函数描述了输入地震力与结构响应之间的关系，形式为：

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k - \omega^2 m + i\omega c}$$

其中， $H(\omega)$ 为频域中的传递函数， $X(\omega)$ 和 $F(\omega)$ 分别为结构响应和地震力的傅里叶变换， ω 为角频率。通过分析不同频率下的传递函数曲线，可以直观地评估减震控制技术对结构在不同频率地震作用下的减震效果。频率响应函数（FRF）则进一步细化了这种分析，FRF可以显示结构在特定频率下的响应放大系数，并用于判断TMD等装置的调谐效果。实际工程中，常用的效能评估参数包括加速度响应谱（ARS）、峰值位移（PVD）和最大加速度（PGA）等。

2. 结构减震控制在建筑抗震设计中的应用

2.1 各类建筑结构中减震控制的设计标准

在减震控制技术的设计中，中国的《建筑抗震设计规范》（GB 50011）和美国的《国际建筑规范》（IBC）均对减震装置的配置、安装及性能进行了详细规定。这些规范中，建筑的高度、材料类型和结构形式是影响减震设计的核心因素。对于高层建筑，规范要求设计时必须考虑其较大的侧向位移及相应的加速度响应，因此需要通过增加阻尼器数量或优化配置参数来减少震动传递。而对于低层建筑，因其质量较小，设计重点集中在通过优化刚度与阻尼参数来实现减震。规范还规定，建筑材料的选择会影响减震设计中阻尼器的类型与安装位置。

2.2 典型建筑结构中的减震控制设计

在某高层建筑项目中，设计师通过在建筑顶部安装调谐质量阻尼器（TMD）来减小地震引起的结构摆动，安装参数为TMD质量占建筑质量的2%，阻尼比为0.05。通过模拟与计算发现，减震设计可以将建筑的峰值位移降低约40%，并减少25%的顶层加速度。这一设计不仅有效提升了结构的稳定性，还显著提高了建筑的舒适性。同样，在桥梁与大跨度结构中，粘滞阻尼器常被用于控制横向和纵向的动力响应。某一实际桥梁工程中，设计人员依据地震烈度和桥梁跨径的不同，选择了阻尼系数为1000 kN·s/m的粘滞阻尼器，经过震动台测试，桥梁在地震中的最大位移从未安装前的50 cm减少到20 cm，显著提升了抗震性能。

2.3 减震控制在复杂地震环境中的效果评估

减震控制技术通过计算机模拟和实验室震动台测试，可以有效分析不同类型减震装置的抗震效果。计算机模拟中，通常基于建筑的有限元模型（FEM），输入不同强度的地震波，以模拟减震控制技术在实地地震中的表现。例如，通过对某高层建筑的模拟，分析其在无减震和有减震条件下的峰值位移、加速度和剪力响应。模拟结果的具体数据如下表1所示。

表1 高层建筑减震前后动力响应对比

项目	无减震装置	安装TMD装置
峰值位移 (cm)	55	30

最大加速度 (m/s ²)	3.2	1.8
层间剪力 (kN)	4500	2700

从上表数据可以看出,安装 TMD 装置后,建筑的峰值位移减少了约 45%,最大加速度减少了约 43%,层间剪力则降低了约 40%,表明减震装置能够有效控制结构的动力响应,提升建筑在地震中的稳定性与安全性。

3. 结构减震控制技术的工程案例应用

3.1 典型工程项目中的减震控制应用

面对中国上海环球金融中心大厦的 492 米高度设计挑战,侧向振动成了主要考虑因素。为解决地震和风载荷可能导致的结构摆动问题,在建筑顶部设置了一个 1500 吨质量调谐质量阻尼器 (TMD)。通过准确调配该装置的工作频率,成功实现与建筑固有频率精确匹配,并有效消耗外力带来的能量。监测数据表明,7 级地震发生时,TMD 系统可以降低建筑峰值位移 35% 并设法将顶层加速度下降 40%。

3.2 不同减震技术的实际应用效果对比

不同的减震装置在实际工程中的表现具有明显的差异,特别是在不同震级和结构类型的条件下,减震效果表现出不同的特性。对比不同减震技术在实际地震中的表现数据,通过震后检测和监测系统记录,定量评估减震效果,具体数据如下表 2 所示。

表 2 不同减震技术的实际应用效果对比

项目	高层建筑 A (TMD 装置)	桥梁 B (粘滞阻尼器)	体育场馆 C (摩擦阻尼器)
峰值位移减少率 (%)	35	45	30
最大加速度减少率 (%)	40	50	25
最大剪力减少率 (%)	30	38	20

从上表数据可以看出,TMD 装置在高层建筑 A 中的应用,主要通过调谐质量来降低建筑的峰值位移和加速度,其峰值位移减少率达到 35%,最大加速度减少率达到 40%。粘滞阻尼器在桥梁 B 中的表现尤为突出,其最大加速度减少率达到 50%,位移减少率为 45%。相比之下,摩擦阻尼器在体育场馆 C 中的表现虽然位移减少率仅为 30%,但对于抗震性能的提升也具有一定的优势。

3.3 案例中的经济效益分析

减震控制技术,其优势在于提高建筑的抗震性能与经济效益显著。多个案例详细分析了施工成本和长期维护费用,投资回报率 (ROI) 及长期效益的评估也是考虑之重点。高层建筑、桥梁和大跨度体育场馆等不同类型建筑的经济效益对比,具体数据如下表 3 所示。

表 3 不同减震技术的经济效益分析

项目	高层建筑 A (TMD 装置)	桥梁 B (粘滞阻尼器)	体育场馆 C (摩擦阻尼器)
施工成本 (万元)	500	350	400
年均维护费用 (万元)	5	4	6
投资回报率 (ROI, %)	12	15	10
预期寿命内节省的修复费用 (万元)	120	150	100

从上表数据可以看出,高层建筑 A 中 TMD 装置的施工成本较高,为 500 万元,但其长期维护费用较低,每年仅需 5 万元。桥梁 B 的粘滞阻尼器施工成本为 350 万元,但其投资回报率较高,达到了 15%。体育场馆 C 中摩擦阻尼器的施工成本为 400 万元,年均维护费用较高,但在其预期寿命内可以节省 100 万元的修复费用。

4. 结构减震控制技术的优化与发展方向

4.1 基于数据的减震效果优化设计

在现代建筑减震控制的设计中,有限元法通过将建筑结构离散成多个单元,对每个单元的力学特性进行精确分析,进而计算出整个结构在地震力作用下的动态响应。结合大数据技术,设计师可以基于历史地震数据和建筑监测数据,对不同减震装置在不同地震波形下的表现进行建模和模拟。在某高层建筑的减震设计中,通过对 TMD 装置进行多次参数优化,包括质量比、阻尼比的细化调整,最终确定最优参数,使建筑的峰值位移减少了 40%,顶层加速度降低了 35%。基于地震数据库中的数千条实际地震波,设计人员使用大数据算法对不同建筑类型进行模拟,得出了各类建筑在不同烈度地震中的最佳减震配置。这一优化设计过程不仅大大提高了减震装置的效率,还使得设计方案更加适应不同地震环境的复杂性。

4.2 新型减震材料与技术的研发

一种新的高性能减震材料,名为形状记忆合金 (SMA),以其出色的能量吸收和恢复效果引人注目。近期力学性能测试结果显示,该材料在应力下的恢复性超强,拉伸强度达到 600 MPa,远胜于传统钢材。反复加载后不会影响其稳定消耗能量的效果,令其成为减震材料中的理想选择。除了对物质进行深入研究外,智能减震装置上所采用的控制算法也继续得到优化。实时监测数据是调整阻尼器刚度和阻尼系数、并在各类地震波形下提供最佳减振效果的基础。实验室内部完成了某智能粘滞阻尼器式样板验证,在面对输入频率变化巨大地震波时可自主调整其阻尼参数,并成功让峰值位移降低约 50%。

5. 结论

本文在结构减震控制理论的建筑抗震设计应用中进行了深入探讨。国内外典型工程案例的结合来提供了对不同减震装置设计参数、应用效果以及经济效益的分析。有限元法和大数据技术被用于优化减震控制方案,从而增强了建筑物地震期间的抗震性能。新型高性能减震材料和智能装置的研发为未来减震设计提供了新的技术支持,而多目标优化模型的应用则有效平衡了减震效果与施工成本。研究表明,减震控制技术不仅能显著提高建筑的抗震能力,还具有良好的经济效益,为未来抗震设计奠定了坚实基础。

参考文献:

- [1]谢智彬,商昊江,刘海兴,等. 屈服约束支撑在空旷建筑结构加固工程中的应用 [J]. 福建建设科技, 2024, (05): 41-44.
 - [2]李爱群,解琳琳,杨参天. 多目标协同建筑结构消能减震技术研究进展 [C]// 中国力学学会结构工程专业委员会, 辽宁工程技术大学, 中国力学学会《工程力学》编委会, 清华大学土木工程系, 水圈科学与水利工程全国重点实验室. 第 33 届全国结构工程学术会议论文集 (第 I 册). 北京: 北京建筑大学土木与交通工程学院, 2024: 8.
 - [3]李强. 通过地基处理实现上部结构减震 [J]. 山西建筑, 2024, 50 (18): 46-49+69.
 - [4]喻鹏. 新型自复位转动摩擦阻尼器及其 RC 框架结构抗震性能研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2023.
 - [5]王璐. 基于能量分析的近断层高铁斜拉桥减隔震控制研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- 课题: 陕西高校青年创新团队 (城市轨道交通道床关键技术创新团队) (编号: XJY24TD002)
- 作者简介: 曹会敏 单位: 西安交通工程学院 单位所在地 (省市): 陕西省西安市 性别: 女 籍贯: 河北邯郸 民族: 汉 出生年月: 1990 年 7 月 学位: 硕士 职称: 工程师 专业: 工程造价 研究方向: 建筑结构抗震