

# 抗震设计在钢结构桥梁中的应用分析

文 / 贺 祯 上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司

**摘要：**钢结构桥梁作为现代交通基础设施的重要组成部分，其抗震性能直接关系到地震灾害中交通网络的安全与畅通。本文系统分析了抗震设计在钢结构桥梁中的应用现状，从抗震设计基本原理出发，阐述了基础隔震、消能减震、延性设计等抗震技术在钢结构桥梁中的具体应用，分析了不同抗震措施的适用条件和效果特点。研究表明，合理的抗震设计不仅能够显著提高钢结构桥梁的抗震性能，还能有效控制工程造价，为未来钢结构桥梁抗震设计提供了重要参考。

**关键词：**钢结构桥梁；抗震设计；基础隔震；消能减震

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.055

## 引言

我国是地震多发国家，地震灾害对基础设施造成的破坏往往带来巨大的经济损失和社会影响。桥梁作为交通网络的关键节点，在地震中的损坏不仅直接影响震后救援和恢复工作，更可能造成交通瘫痪，加剧地震灾害的次生影响。因此，桥梁的抗震设计一直是工程界关注的重点问题。

### 一、钢结构桥梁抗震设计的基本原理

#### （一）地震作用机理

地震对桥梁结构的作用是一个复杂的动力过程。地震波通过地基传递到桥梁结构，在结构中产生惯性力，引起结构的振动反应。钢结构桥梁在地震作用下的反应特点主要包括：结构自振特性决定地震反应的基本特征；阻尼特性影响结构振动的衰减；非线性特性在强震作用下显著影响结构反应；土-结构相互作用改变整体系统的动力特性。钢结构桥梁的地震反应分析需要考虑结构的空腔效应、非线性效应以及多点激励效应。空腔效应体现在结构各个方向的耦合振动；非线性效应主要表现在材料非线性和几何非线性；多点激励效应反映了地震波传播过程中的时空变化特性。

表1 钢结构桥梁地震反应典型参数表格

参数类型	典型范围	主要影响因素
基频 (Hz)	0.3-2.5	跨度、刚度分布
阻尼比 (%)	2-5	连接方式、材料类型
位移放大系数	1.5-4.0	周期比、场地类别
加速度放大系数	1.2-2.8	高度、结构形式

#### （二）抗震设计原则

钢结构桥梁抗震设计遵循“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准抗震设防目标。在多遇地震作用下，桥梁应保持弹性工作状态，各构件不出现损伤；在设防烈度地震作用下，允许结构进入弹塑性工作状态，但损

伤应控制在可修复范围内；在罕遇地震作用下，结构虽可能出现较大损伤，但应避免倒塌，保证人员安全。

### 二、钢结构桥梁抗震设计方法

#### （一）反应谱方法

反应谱方法基于单自由度系统的地震反应分析，通过反应谱曲线确定结构的地震作用。对于钢结构桥梁，反应谱方法的应用需要考虑结构的多模态特性，采用振型分解反应谱法进行分析。在应用反应谱方法时，需要合理确定结构的阻尼比，钢结构桥梁的阻尼主要来源于材料阻尼、连接阻尼和辐射阻尼。

表2 桥梁阻尼比表格

结构类型	连接方式	阻尼比 (%)
简支梁桥	焊接连接	2.0-3.0
连续梁桥	螺栓连接	3.0-4.0
悬索桥	混合连接	2.5-3.5
斜拉桥	焊接连接	2.0-2.8
拱桥	螺栓连接	3.5-5.0

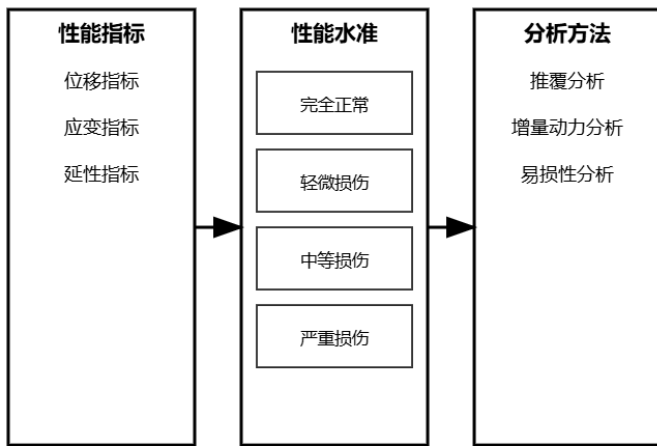
#### （二）时程分析方法

时程分析方法通过输入地震加速度时程，直接求解结构的动力方程，能够考虑结构的非线性特性和地震动的时频特征。对于重要的钢结构桥梁，时程分析是验证抗震性能的重要手段。时程分析中地震波的选择至关重要，应根据桥址的地震地质条件选择合适的地震波，包括天然地震波、人工合成地震波和人工模拟地震波。地震波的选择应考虑震级、震中距、场地条件、断层机制等因素，确保输入地震动与设计基准相匹配。非线性时程分析能够真实反映结构在强震作用下的反应特征，但计算复杂，对模型精度要求较高。

#### （三）性能化抗震设计

性能化抗震设计是现代抗震设计的发展方向，它以

性能目标为导向，通过量化的性能指标评估结构的抗震能力。钢结构桥梁的性能化抗震设计需要建立完整的性能评价体系，包括性能目标、性能指标和性能水准的确定。性能目标的设定应根据桥梁的重要性、使用要求和经济条件确定，一般分为立即使用、生命安全和倒塌预防三个层次。性能指标的选择应能够反映结构的损伤状态和功能状况，常用指标包括位移指标、应变指标、延性指标等。性能水准的划分应与损伤状态相对应，便于工程判断和决策，性能化设计的实施需要采用先进的分析方法和工具，如推覆分析、增量动力分析、易损性分析等。这些方法能够定量评估结构在不同地震强度下的性能表现，为设计决策提供科学依据。



定量评估结构在不同地震强度下的性能表现

图 1 性能化设计框架

### 三、抗震技术在钢结构桥梁中的具体应用

#### (一) 基础隔震技术

基础隔震技术通过在桥梁上部结构与下部结构之间设置专门的隔震装置，有效地将地震波的高频成分过滤，同时延长整个结构体系的自振周期，使其避开地震动的主频段，从而显著降低结构的反应。对于钢结构桥梁而言，由于其自重相对较轻，质量中心较低，这种特性使得基础隔震技术能够发挥更为显著的减震效果。铅芯橡胶支座作为目前应用最为广泛的隔震装置，其独特的构造设计集中体现了现代隔震技术的精髓。该装置由多层薄钢板与橡胶片交替叠合而成，中心嵌入铅芯，外围采用橡胶保护层。在小幅变形阶段，铅芯提供较大的初始刚度，确保桥梁在风荷载和制动力作用下的稳定性；当地震引起的水平位移超过铅芯的屈服变形后，铅芯进入塑性状态，通过塑性滞回变形消耗地震能量，同时橡胶层提供恢复力，确保震后结构能够回到初始位置。这种设计使得铅芯橡胶支座具备了刚度与阻尼的双重特性，特别适用于跨度在 50 米至 200 米之间的钢结构桥梁。

高阻尼橡胶支座则采用了不同的技术路径，通过在橡胶材料中添加特殊的填料或采用特殊的硫化工艺，使橡胶本身具有较高的内阻尼，通常阻尼比可达到 10%~20%。这种支座的优点在于构造相对简单，不存在铅芯疲劳问题，维护成本较低，但其阻尼特性与温度和加载频率密切相关，在实际应用中需要充分考虑环境温度变化对其性能的影响。滑移支座基于摩擦耗能原理，通过控制接触面的摩擦系数来实现预期的滑移力，当水平力超过设定的滑移力时，支座发生滑移，通过摩擦消耗地震能量。这种支座的特点是耗能稳定，不受环境温度影响，但存在残余位移问题，需要配合适当的复位装置。钢结构桥梁采用基础隔震技术的设计过程中，隔震效果的评估至关重要，通过建立有隔震和无隔震两种工况下的结构模型，对比分析结构的地震反应，可以量化隔震技术的减震效果。一般而言，有效的隔震设计能够将结构的水平地震反应降低 60%~80%，同时由于隔震层的柔性特征，上部结构的加速度反应也会显著减小。位移控制是隔震设计的关键环节，需要确保隔震装置在设计位移范围内正常工作，既要满足罕遇地震下的最大位移需求，又要保证日常使用中的稳定性。构造设计方面，隔震装置的安装精度直接影响其工作性能，需要严格控制安装误差；同时要考虑装置的可更换性，为后期维护预留必要的空间和通道，确保隔震系统在桥梁全寿命期内能够发挥持续有效的抗震作用。

#### (二) 消能减震技术

消能减震技术作为钢结构桥梁抗震设计中的主动控制手段，其基本原理是通过人工增设的消能装置来提高结构体系的整体阻尼比，使结构在地震作用下能够更有效地消散输入的地震能量，从而减小结构的动力反应。这种技术的优势在于不改变结构的基本构型和承载体系，通过局部增设消能器即可显著改善整体结构的抗震性能，具有适应性强、施工便利、经济合理等特点，特别适用于钢结构桥梁的抗震加固和新建工程中的抗震优化设计。黏滞阻尼器作为消能减震技术中应用最为成熟的装置类型，其工作机理基于黏性流体在受限空间内的流动阻力。

黏弹性阻尼器融合了弹性储能和黏性耗能的双重特性，通过黏弹性材料的内部分子链段运动实现能量消散。其核心材料通常采用丙烯酸类或硅酮类高分子聚合物，这些材料在动态加载下表现出明显的滞后特性，能够将部分应变能转化为热能散失。黏弹性阻尼器的显著优点是同时提供刚度和阻尼，有助于控制结构的变形和振动，但其性能对温度和频率较为敏感，在设计时需要充分考虑使用环境的温度变化范围。该类阻尼器在钢结构桥梁中常用于连接不同结构单元，既能传递荷载又能提供阻

尼,在温差较大的地区应用时需要采取适当的温度补偿措施。金属阻尼器利用金属材料的塑性滞回特性消耗地震能量,具有构造简单、成本低廉、性能稳定等优点。常见的金属阻尼器包括屈曲约束支撑、软钢阻尼器、铅阻尼器等。屈曲约束支撑通过约束钢材的局部屈曲,使其在拉压荷载作用下均能发挥材料的塑性耗能能力,滞回曲线饱满稳定;软钢阻尼器采用低屈服点钢材制作,在较小的荷载作用下即可进入塑性耗能状态,适用于中小震的能量消散;铅阻尼器利用铅材良好的塑性和低屈服强度特点,通过反复的塑性变形消耗能量。

### (三) 延性设计技术

延性设计技术作为钢结构桥梁抗震设计的核心理念,本质上是通过合理的材料选择、截面配置、构件布置和结构体系安排,确保结构在超越弹性极限后仍能保持足够的承载能力和变形能力,通过塑性变形机制有效耗散地震输入能量。材料延性作为延性设计的基础层面,要求钢材具备优异的塑性变形能力和应变硬化特性。高延性钢材不仅要求有足够的屈服强度,更重要的是要具备良好的屈强比、均匀伸长率和断面收缩率。现代桥梁用钢多采用 Q345、Q370 等级别的结构钢,其屈强比控制在 0.85 以下,伸长率不小于 20%,这些指标确保了钢材在进入塑性阶段后仍能承受较大变形而不发生脆性断裂。

截面延性设计重点关注截面在弯矩作用下的塑性转动能力,通过优化截面几何参数来避免局部屈曲的过早发生。对于工字型截面,需要严格控制翼缘的宽厚比和腹板的高厚比,确保截面能够达到全塑性状态并具备一定的塑性转动能力。箱型截面则需要重点关注受压翼缘的局部稳定性,通过设置纵向加劲肋来提高板件的屈曲临界应力。截面延性的量化指标通常采用塑性转动能力,即截面从屈服到达到 85% 峰值弯矩时的转角范围,这个指标直接关系到塑性铰的耗能能力。延性设计需要在截面延性的基础上考虑构件的整体稳定性和侧向约束条件。轴压比是影响构件延性的关键参数,过高的轴压比会导致构件过早失稳,无法充分发挥材料的塑性性能。钢结构桥梁中的压弯构件通常将轴压比控制在 0.6 以下,确保构件在弯矩作用下能够形成稳定的塑性铰。长细比的控制则主要针对受压构件,防止整体失稳的发生。

### 四、案例分析:润扬长江大桥

润扬长江大桥是我国第一座钢结构悬索桥,南汊桥主跨 1490 米,总长 35.66 公里,是连接镇江和扬州的重要交通枢纽。

在抗震设防标准方面,润扬长江大桥按照抗震烈度 7 度进行设计,设计基本地震动峰值加速度为 0.15g,设计地震动反应谱特征周期为 0.40s。桥梁主梁采用分

离式钢箱梁结构,梁高 3.5 米,梁宽 36.3 米,钢材采用 Q345qD 高强度钢,总用钢量达到 4.8 万吨。塔柱采用钢筋混凝土结构,南北两塔高度分别为 215.85 米和 188.95 米,基础采用群桩基础,桩径 2.0-2.5 米。

在减震措施方面,该桥在主梁与塔柱连接处设置了 16 台液体黏滞阻尼器,单台阻尼器最大阻尼力为 8000kN,行程  $\pm 600\text{mm}$ ,阻尼指数 0.3。通过动力时程分析表明,阻尼器的设置使主梁纵向位移减少了 45%,塔顶加速度反应降低了 35%,显著改善了桥梁的抗震性能。主缆采用高强度镀锌钢丝,抗拉强度达到 1770MPa,主缆直径 0.6 米,每根主缆由 37 股组成,每股含 384 根直径 5.2mm 的高强钢丝。

抗震性能验证方面,工程团队进行了 1:100 的气弹模型风洞试验和 1:60 的节段模型抗震试验。试验结果显示,在设防地震作用下,主梁最大竖向位移为 1.2 米,横向位移为 0.8 米,主塔最大应力为 85MPa,均在允许范围内。通过非线性时程分析,考虑几何非线性和材料非线性影响,桥梁在罕遇地震 (0.30g) 作用下仍能保持整体稳定,塔底弯矩达到设计值的 92%,主缆安全系数保持在 2.2 以上。

工程建设中进行了大量的抗震性能研究,建立了考虑土-结构相互作用的三维有限元分析模型,模型包含近 20 万个节点和 18 万个单元。该桥的成功建设为我国大跨度钢结构桥梁抗震设计建立了完整的技术体系,其抗震设计方法和关键技术已成为行业标准,为后续苏通大桥、港珠澳大桥等超大跨径桥梁提供了重要技术支撑。

结束语:钢结构桥梁具有良好的抗震性能潜力,其高强度、轻质、延性好等特点为抗震设计提供了有利条件。合理的抗震设计不仅能够显著提高桥梁的抗震安全性,还能够优化结构性能,控制工程造价。抗震技术的多样化发展为钢结构桥梁抗震设计提供了丰富选择,基础隔震、消能减震、延性设计等技术各有特点,需要根据具体条件合理选择和组合应用。新技术如智能控制、健康监测等为抗震设计开辟了新的发展方向。

### 参考文献

- [1] 何维佳,徐亚东. 钢结构桥梁软基处理难题与对策研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (18): 139-141.
- [2] 黄庆玲. 大跨度钢结构桥梁施工工艺创新研究 [J]. 大众科技, 2024, 26(05): 42-45.
- [3] 钱芳荣. 智能化无损检测技术在钢结构桥梁中的应用 [J]. 中国金属通报, 2024, (08): 86-88.
- [4] 李维维,安小军,王旭. 激光清洗技术在钢结构桥梁制造中的应用探讨 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(07): 50-52.