文章编号:1000-1301(2012)03-0157-08

# 高速铁路客站房桥合一结构层间隔震 优化策略研究

#### 国 巍 余志武

(中南大学 土木工程学院,高速铁路建造技术国家工程实验室,湖南 长沙 410075)

摘要:作为当前高速铁路建造中出现的一种新型客站形式——房桥合一结构体系已经开始应用于 实际工程,其抗震设防研究有着迫切需求和重要意义。基于此,本文对房桥合一结构中设置层间隔 震来实现减震控制开展研究工作,并重点探讨此类控制方法的参数优化策略。首先建立了房桥合一 结构数值模型,通过引入虚拟激励法推导了高效准确的随机计算式,继而指出采用参数域方法进行 优化更为合理,它可实现隔震层参数有效配置。最后,通过数值研究对随机地震激励下房桥合一结 构层间隔震优化策略进行了验证分析,分别基于单桥模型和多桥模型研究了其减震机理和减震效 果,提出可提高减震效果的参数优化策略。本文研究结果表明:设置经过参数合理优化的层间隔震 装置对房桥合一结构减震是可行且有效的。

中图分类号: TU311.3; P315.92 文献标志码: A

## Research on optimization strategy of storey isolation in the integrated building-bridge structure of high-speed railway station

GUO Wei, YU Zhiwu

(National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction , School of Civil Engineering , Central South University , Changsha 410075 , China)

**Abstract**: As a new type of structural system appearing in Chinese high speed railway construction , the seismic design research of integrated building-bridge structure has great significance. Based on this point , the application of storey isolation technique to the vibration control of integrated building-bridge structure is studied in this paper , and the research focuses on the effective parameter optimization strategy. Firstly , a numerical model of the integrated building-bridge structure is established , and by introducing the pseudo-excitation method an efficient and accurate random formula is derived. Then , as the parameter field optimization method can achieve the effective setting , it is more reasonable and adopted in this paper. Finally , by numerical work , the optimization strategy of storey isolation in the integrated building-bridge structure subjected to random excitation is also studied , and the single-bridge model and multiple-bridge model are respectively adopted to investigate their effect and corresponding parameter's setting. The results show that the reasonable optimized storey isolation is feasible and effective in the seismic response reducing of the integrated building-bridge structure.

Key words: integrated building-bridge structure; storey isolation; pseudo-excitation method; parameter field; opti-

收稿日期: 2011-10-21; 修订日期: 2011-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50938008 51108466); 中国博士后基金(20110491277); 中南大学自由探索项目; 中南大学博士后基金; 中南大学引进人才科研基金

作者简介: 国 巍(1982 -) , 男, 讲师, 博士, 主要从事复杂结构体系抗震设防研究. E-mail: wei. guo. 86@ gmail. com

mization strategy

# 引言

根据我国铁路建设中长期发展规划,作为现代化铁路重要标志的高速铁路将会在当前及未来一段时期 内得以飞速发展 2020 年前将建设省会城市及大中城市间的快速客运通道,形成"四纵四横"铁路快速客运 网络和三个城际快速客运系统,其中包括6个路网性客运中心与10个区域性客运中心。在此形势下,为适 应高速铁路建造需求,一种新型结构形式——房桥合一结构应运而生,它由客站建筑与铁路桥梁组合而成, 在已建和在建高铁客站中均有采用,如武广高铁的武昌站和广州东站、京沪高铁的北京南站、天津西站等。 相比传统客站建筑,房桥合一结构体系具有不可比拟的优势,它可以满足客站的换乘功能、多模式交通转换 和交通流线的立体化,并有足够的转换空间与综合交通体系中的多种交通方式相衔接,体现了高速铁路建造 的"功能性、系统性、先进性、文化性、经济性"要求。然而,房桥合一结构作为一种新型结构形式,并无相应 设计指导规范,基于传统建筑规范或桥梁规范必然会产生一定设计偏差,针对此类结构形式的相关理论方法 仍有待进一步完善,房桥合一结构作为一种重要公共建筑,其抗震设防研究更具有重要意义。

结构振动控制技术按照动力源可区分为被动控制、主动控制和半主动控制。鉴于主动控制和半主动控 制均需动力信息反馈,技术要求和造价均较高。被动控制作为一种无需外部能源、安装简易且造价低廉的减 震方案备受关注,其中隔震设计已被证明在中低层客站建筑中是非常有效的<sup>[1-5]</sup>,并已写入多国规范或规 程。将此技术引入并应用于房桥合一结构中,研究其可行性与有效性对于当前高铁建设具有重要意义。国 内叶献国等<sup>[6]</sup>研究了地震导致的侧向碰撞对基础隔震结构的影响。刘文光等<sup>[7,8]</sup>对客站建筑与桥梁结构的 隔震控制进行过一定的研究工作,指出可在桥梁部件底部设置橡胶隔震元件以实现协同减震,并基于平动单 自由度的时程分析模型给出了优化参数。蓝宗建、房良等<sup>[9]</sup>在巨型框架结构附属子框架结构进行过类似隔 震研究,并引入了参数域的优化方法。

在前人研究的基础上,本文基于地震地面运动实际上为一个随机过程的事实,依据虚拟激励法<sup>[10]</sup>推导 了随机分析的高效计算表达式,同时考虑到房桥合一结构层间隔震参数优化属于多目标问题,引入参数域方 法以优化配置,它可明确确定减震效果与对应参数。文中最后通过数值研究验证分析了层间隔震的减震机 理和减震效果,并分别研究了两种参数优化策略:单桥模型与多桥模型,指明多桥模型可进一步提升层间隔 震的减震效果,本文研究指明层间隔震在房桥合一结构减震中是可行且有效的。

### 1 层间隔震模型

房桥合一结构体系是一种新型结构体系,同时具备客站建筑和桥梁结构的特征,其抗震减震也不同于一般结构。图1是在房桥合一结构中设置层间隔震装置的示意图,隔震设置在客站建筑与桥梁结构的连接处。 鉴于多自由度非线性随机分析目前尚存在一定困难,难以在工程中广泛应用,传统手段一般是对非线性结构 进行等效线性化处理,继而进行线性随机分析。因此,基于线性假定,可建立层间隔震设置下房桥合一结构 体系的数值模型:

$$\boldsymbol{M}_{s}\boldsymbol{U}_{s} + \boldsymbol{C}_{s}\boldsymbol{U}_{s} + \boldsymbol{K}_{s}\boldsymbol{U}_{s} = -\boldsymbol{M}_{s}\boldsymbol{E}_{s}\boldsymbol{\ddot{u}}_{g} + \boldsymbol{E}_{bs} + \boldsymbol{F}_{b}$$
(1a)

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{b}} + \boldsymbol{F}_{\mathrm{b}} = -\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{\ddot{u}}_{\mathrm{g}} \tag{1b}$$

其中  $M_s \, C_s \, n \, K_s \, O$ 别为  $n \, O$ 自由度客站建筑的质量、阻尼和刚度矩阵;  $U_s = [u_{s1} \, \mu_{s2} \, \cdots \, \mu_{sn}]^T$  为客站建筑 相对于地面的位移响应向量;  $M_b = \text{diag}(m_{b1} \, \cdots \, m_{bn})$  为  $m \, O$ 桥梁结构的质量矩阵;  $u_b = [u_{b1} \, \cdots \, \mu_{bm}]^T$  为桥 梁结构相对于地面的位移响应向量;  $\ddot{u}_g$  为地面运动加速度;  $E_s \, n \, E_b \, O$ 别为客站建筑和桥梁结构的地震荷载 作用位置向量;  $E_{bs}$ 为桥梁结构作用于客站建筑的力作用位置矩阵;  $F_b \, D$ 桥梁结构作用于客站建筑的外力向 量;  $-F_b \, D$ 客站建筑作用于桥梁结构的外力向量, 它与  $F_b \, D$ 相为反作用力,因此可知  $F_b = F_b = [c_{b1} \dot{u}_{b1} + k_{b1} u_{b1} \, \cdots \, c_{bm} \dot{u}_{bm} + k_{bm} u_{bm}]^T$ ;  $u_{bi} n \, k_{bi} \, O$ 别为第  $i \, O$ 桥梁结构隔震层的阻尼系数和刚度系数。基于式(1), 可建立 房桥合一结构体系的动力平衡方程式:

$$MU + C\dot{U} + KU = -ME\ddot{u}_{a} \tag{2}$$

其中 
$$M = \begin{bmatrix} M_{s} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times m} & M_{b} \end{bmatrix}$$
、 $C = \begin{bmatrix} C_{s} + C_{s}^{(b)} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{b} \end{bmatrix}$ 和  $K = \begin{bmatrix} K_{s} + K_{s}^{(b)} \\ K_{bs} \end{bmatrix}$ 

尼和刚度矩阵,结构体系的总自由度数为n + m;  $C_s \, K_s$ 、  $C_b \, K_b$ 在上文中均已有定义;  $C_{sb} \, C_{bs} \, K_{sb} \, K_{bs}$ 分别为客站 建筑与桥梁结构的阻尼和刚度交叉项,主要体现隔震支 座的阻尼和刚度特性;  $C_s^{(b)} \, \pi \, K_s^{(b)}$ 为客站建筑与桥梁结 构动力耦合作用在客站建筑上阻尼和刚度部分的体现;  $U = [U_s^T, U_b^T]^T$ 为该结构体系相对于地面的位移向量;  $E = [E_s^T, E_b^T]^T$ 为荷载作用位置向量。基于以上阐述,本文建 立了设置层间隔震装置的房桥合一结构体系的统一数值 模型,即式(2)。显而易见,由于桥梁结构底部设置隔震 层,导致结构体系的非比例阻尼特性,实模态分解方法不 再可行,下文将阐述在此类体系随机分析中可采用的计 算方法。





### 2 高效随机分析

近年来开展了一系列随机地震下结构响应的研究工作。学者们将地震简化为随机过程,提出了相应地 震随机模型,如 Clough-Penzien 模型、Kanai-Tajimi 模型等,并根据规范给出了模型参数取值。然而,传统随机 分析方法效率很低,限制了其工程应用,为解决此问题,林家浩提出了虚拟激励法<sup>[10]</sup>,将地震输入转化为弦 波形式,简化了理论推导,同时大大提高了随机计算效率,因此本文采用虚拟激励法对房桥合一结构体系进 行随机推导。首先将地震动转化为弦波输入:

$$\ddot{u}_{g}(t) = \sqrt{S_{\ddot{u}_{g}}(\omega)} e^{t\omega t} r = \sqrt{-1}$$
(3)

其中 *S<sub>ü<sub>g</sub></sub>(ω*)为地震功率谱密度函数。综合来说,对于本文所建立房桥合一结构体系而言,基于虚拟激励法的随机分析有两种思路可以采用,一种是直接矩阵求逆运算,一种则是利用复模态解耦运算。

2.1 直接矩阵运算

基于正弦输入,可定义响应 $U = U_{\omega} e^{i\omega t}$ ,并根据式(2)可知:

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{U}_{\omega} e^{\boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{H} \boldsymbol{M} \boldsymbol{E}_{\sqrt{S_{\vec{u}_{\alpha}}}(\boldsymbol{\omega})} e^{\boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\omega}}$$
(4)

其中  $H = -(K - \omega^2 M + r\omega C)^{-1}$ 。可知响应 U 的功率谱密度函数矩阵:

$$S_{U} = \boldsymbol{U}^{*} \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}$$

通过对式(5)得到的功率谱矩阵积分可以容易得到响应均方值。该矩阵运算方法形式简洁可行,且因推导 并无任何前提假定,具有广适性,对于线性和非线性分析均适用。然而,由于需要进行矩阵求逆运算以得到 *H* 病态矩阵情况下可能会出现计算问题,大自由度结构矩阵运算也会带来巨大计算量。基于此,林家浩还 提出了一种基于实模态矩阵的处理方法<sup>[10]</sup>,可有效避免病态矩阵运算,并且某种程度上可减小运算量。 2.2 复模态解耦运算

对于非比例阻尼结构而言,可以通过构造状态方程来实现解耦运算,通过状态方程求解复数特征值 $\eta_i$ 和特征向量 $\boldsymbol{\Phi}_i$ ,进行复模态解耦。定义 $q_i$ 为下列方程式所描述模型的响应:

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\ddot{u}_g \tag{6}$$

根据参考文献 [11],通过复模态正交性和矩阵变换,可以容易得到结构响应表达:

$$U = \sum_{i=1}^{n+m} [X_i q_i + Y_i \dot{q}_i]$$
(7)

$$\begin{split} E \Phi \ X_{i} &= \frac{2}{a_{i}^{2} + b_{i}^{2}} \left[ \left( \xi_{i} p_{i} + \sqrt{1 - \xi_{i}^{2}} w_{i} \right) \varphi_{iR} + \left( \xi_{i} w_{i} - \sqrt{1 - \xi_{i}^{2}} p_{i} \right) \varphi_{i1} \right] \omega_{i} \ Y_{i} &= \frac{2}{a_{i}^{2} + b_{i}^{2}} \left( p_{i} \varphi_{iR} + w_{i} \varphi_{i1} \right) \\ a_{i} &= -2 \eta_{iR} \left( \varphi_{iR}^{T} M \varphi_{iR} - \varphi_{iI}^{T} M \varphi_{iI} \right) - 4 \eta_{i1} \varphi_{iR}^{T} M \varphi_{iI} + \varphi_{iR}^{T} C \varphi_{iR} - \varphi_{iI}^{T} C \varphi_{iI} \\ b_{i} &= 2 \eta_{iI} \left( \varphi_{iR}^{T} M \varphi_{iR} - \varphi_{iI}^{T} M \varphi_{iI} \right) - 4 \eta_{iR} \varphi_{iR}^{T} M \varphi_{iI} + \varphi_{iR}^{T} C \varphi_{iI} \\ p_{i} &= a_{i} c_{i} + b_{i} d_{i} \ w_{i} &= b_{i} c_{i} - a_{i} d_{i} \ c_{i} &= \varphi_{iR}^{T} M E \ d_{i} = \varphi_{iI}^{T} M E \ d_{i} = \left[ \frac{\eta_{i} \varphi_{i}}{\varphi_{i}} \right] \phi_{i} = \varphi_{iR} + r \varphi_{iI} \end{split}$$

 $\eta_i = -\eta_{iR} + r\eta_{iI} = -\xi_i \omega_i + r\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}$   $r = \sqrt{-1}$   $i = 1 \sim n + m$ 。因此,可知式(6) 描述模型的虚拟响应可写为:

$$q_i = H_i \ddot{u}_g(t) = H_i \sqrt{S_{\ddot{u}_g}(\omega)} e^{i\omega t}$$
(8)

其中  $H_i = -\frac{1}{\omega_i^2 - \omega^2 + 2r\xi_i\omega_i\omega}$   $i = 1 \sim n + m$ 。将此式代入方程(7) ,可得虚拟响应为:

$$\boldsymbol{U} = \sum_{i=1}^{n+m} \left( \boldsymbol{X}_{i} \boldsymbol{q}_{i} + \boldsymbol{Y}_{i} \dot{\boldsymbol{q}}_{i} \right) = \left[ \sum_{i=1}^{n+m} \left( \boldsymbol{X}_{i} + r\boldsymbol{\omega} \boldsymbol{Y}_{i} \right) \boldsymbol{H}_{i} \right] \sqrt{S_{\boldsymbol{u}_{g}}(\boldsymbol{\omega})} e^{r\boldsymbol{\omega} t}$$
(9)

如我们仅关注客站建筑第层的响应(往往是建筑物顶层相对地面的位移) 提取第层的虚拟响应 如下:

$$u_{sl} = \sum_{i=1}^{n+m} \left( X_{il} q_i + Y_{il} \dot{q}_i \right) = \left[ \sum_{i=1}^{n+m} \left( X_{il} + r \omega Y_{il} \right) H_i \right] \sqrt{S_{\ddot{u}_g}(\omega)} e^{i\omega t}$$
(10)

其中  $X_{i,l}$ 为向量  $X_i$  的第l 个元素  $Y_{i,l}$ 为向量  $Y_i$  的第l 个元素。同时为避免隔震支座破坏 ,还需关注桥梁结构相对于客站建筑的位移响应(有时也关注绝对加速度响应 ,可类似推导) ,此位移不可过大 ,假设第 a 个桥 梁结构支撑于客站建筑的第层 ,则相对位移虚拟响应为:

$$u_{ba'} = u_{ba} - u_{sl} \tag{11}$$

其中 μ<sub>ba</sub>为桥梁结构的虚拟响应 其计算类似式(10)。如前文所述 ,进一步可根据式(5) 得到结构响应的功 率谱密度函数 ,通过对式(5) 功率谱矩阵积分可以容易得到响应均方值。需要说明的是 ,该方法是基于复模 态解耦方法的推导 ,并不适用于非线性分析。

## 3 参数优化方法

房桥合一结构体系的隔震设计是在客站建筑与桥梁结构的连接处设置隔震层,对于桥梁结构来说,隔震 层的目的在于隔离客站建筑传来的地震能量,以减小桥梁响应,对于客站建筑来说,桥梁结构相当于一个大 质量调谐质量阻尼器(TMD)放置其上,前人研究<sup>[9]</sup>已证明合理设置大质量 TMD 的参数可有效减小建筑物 响应,但它不再依赖调谐减震,调谐质量阻尼器的称呼也需改正,本文为易懂起见,仍暂称为 TMD 装置。借 鉴前人工作和房桥合一结构体系形式,一般有两类优化目标:减小客站建筑相对于地面的响应;减小桥梁结 构相对于客站建筑的响应,因此它属于多目标优化问题。众所周知,多目标优化常采用加权系数法和范数法 进行处理,从而将优化目标简化为单目标,这些方法形式上简单可行,然而也存在重大缺陷,比如加权系数不 易确定,简化为单目标后,多个优化目标各自变化和取值情况无从得知,即在实现简单化的同时构造了一个 黑匣子,操作者难以获知准确且可靠的信息,此外,对参数变化敏感的优化目标更难以保证较大的安全度。 基于此,一些学者提出了参数域的优化策略<sup>[8]</sup>,并已应用于巨型框架结构中,本文将其引入房桥合一结构体 系的参数优化中,借以实现隔震装置的合理设置,参数域优化策略可表述如下:

 $\Omega = \{(c_{b1}, k_{b1}, \dots, c_{bm}, k_{bm}) \mid R^{1}/[R^{1}] \leq 1, \dots, R^{s}/[R^{s}] \leq 1, R^{s+1}/[R^{s+1}] \leq 1\}$  (12) 其中  $\Omega$  为参数域;  $(c_{b1}, k_{b1}, \dots, c_{bm})$  为需要优化的隔震层参数;  $R^{1}, \dots, R^{s+1}$  为客站建筑和桥梁结构需要控制 的各个响应指标,  $[R^{1}], \dots, [R^{s+1}]$  为各个响应指标的相应容许值。通过在巨型框架中的类似研究<sup>[16]</sup>可知, 对于隔震层来说, 阻尼比取上限值即可, 因此可简化为单参数多目标优化, 优化参数取为刚度特征( $k_{b1}, \dots, k_{bm}$ )。为表述直观, 刚度特征可用相应圆频率( $\omega_{b1}, \dots, \omega_{bm}$ ) 来取代, 继而对单个目标进行优化, 取多个参数 域的交集即可。对于式(12) 的优化而言, 客站建筑响应往往是主要控制目标, 期望通过隔震设计尽量减小 其响应值, 此时存在一个最优值或最优区域, 而桥梁结构对于客站建筑的相对位移则是次要控制目标, 一般 保证其响应在一定范围内即可, 可保证隔震装置的完好, 同时也避免梁体 – 梁体或梁体 – 建筑的地震导致的 碰撞。为研究此层间隔震的参数布设, 下文将对隔震层的优化策略进行数值研究。

#### 4 数值研究

本部分将通过数值模型对前文所述随机方法和层间隔震优化策略进行研究。如图 1 所示, 一 3 层客站 建筑,其参数设置为:  $m_{s1} = m_{s2} = m_{s3} = 4 \times 10^5 \text{kg} k_{s1} = k_{s2} = k_{s3} = 1 \times 10^9 \text{ N/m}$ 。客站建筑阻尼假定为 Rayleigh 阻尼,令其前两阶模态阻尼比为 $\xi_{s1} = \xi_{s2} = 0.05$ ,从而可构造阻尼矩阵。客站建筑第 1 层上支撑有 3 个桥梁 结构,其质量参数为:  $m_{b1} = m_{b3} = m_{s1}/2$ ,以体现大质量特征。地震动为随机输入,随机模型采用 Kanai – Tajimi 模型,可描述如下:

$$S_{\tilde{u}_{g}} = \frac{\omega_{g}^{4} + (2\xi_{g}\omega_{g}\omega)^{2}}{(\omega_{g}^{2} - \omega^{2})^{2} + (2\zeta_{g}\omega_{g}\omega)^{2}}S_{0}$$
(13)

其中  $\omega_g$ 为场地土频率  $\xi_g$ 为场地土阻尼比 对应规范 GB50011 – 2001 中的一类场地和第三场地分组可知,  $\omega_g = 13.96 \text{ rad/s} \xi_g = 0.72$ 。本文取强度因子  $S_0 = 0.000.6 \text{ m/s}$ 。

通常关注的优化目标为结构顶层相对位移响应  $u_{s3}$ 和桥梁结构相对于客站建筑的响应  $[u_{b1}, \cdots, u_{bm}]$ ,同 时采用层间隔震,有可能加大隔震层下部结构响应,优化时还需考虑隔震层下层结构位移响应,即  $u_{s1}$ 。首先 以未设置隔震装置下房桥合一结构体系的响应为初始响应,定义此时客站建筑响应为  $u_{s1,p}, u_{s3,p}$ ,桥梁结构 响应为  $[u_{b1,p}, \cdots, u_{bm,p}]$ ,以此初始响应对优化目标进行归一化处理。如前文所述,通过设置隔震层一方面减 小客站建筑响应,是调整隔震层刚度来实现的,另一方面还需控制桥梁结构响应,则是通过提高隔震层阻尼 来实现的。基于此,首先对隔震层参数优化以减小客站建筑响应,隔震层阻尼比取最大值即可,本文取为阻 尼比  $\xi_b = 0.2$ 。

4.1 单桥模型

铁路轨道梁体结果通常为同一尺寸,具备相同质量,因此本文首先采用单桥模型来对隔震层参数优化, 所谓单桥模型即假定所有桥梁下隔震层的刚度和阻尼特征一致,各桥梁呈现为同步振动。鉴于阻尼特征往 往无需优化,可设置 $\xi_{\rm b1} = \xi_{\rm b2} = \xi_{\rm b3} = 0.2$ ,刚度特征以圆频率来表征,可设置 $k_{\rm b1} = k_{\rm b2} = k_{\rm b3}$ 。单桥模型下,各桥 梁结构和隔震层简化为单个梁体的振动: $m_{\rm b} = 3m_{\rm b1}$ , $\omega_{\rm b} = \omega_{\rm b1}$ , $\xi_{\rm b} = 0.02$ 。



图 2 隔震层刚度特性改变对客站建筑响应的影响(单桥模型)

Fig. 2 Effect of stiffness characteristic of isolation devices on the relative displacemnet of building (single-bridge model)

图 2 给出了隔震层刚度特征和阻尼比变化下客站建筑相对位移的变化情况,可见为减小客站建筑响应 需合理设置隔震层的刚度特征 ω<sub>b</sub>,使之小于客站建筑的第一阶频率,但不可过柔,它存在一个最优值,也存 在一个最优区域,可选取此区域中参数值,而层间隔震装置阻尼比的增大对客站建筑减震是有利的,但增大 一定程度后对减震效果影响很小,阻尼比的改变则对有效减震区域影响不大,图中可以看到各阻尼比对应曲 线最优减震范围区别较小。从图 2 可知最优减震区域位于 ω<sub>b</sub>/ω<sub>s1</sub> = 0.5 ~ 0.8 ,对第1 层和第3 层来说此减 震区域都较为平缓,相对于小质量 TMD 的减震而言,大质量 TMD 减震范围和鲁棒性更好。图3 给出了桥梁 结构响应随着隔震层刚度和阻尼改变的情况,可见阻尼特征不变的情况下,随着隔震层刚度的降低,桥梁结 构相对于客站建筑的位移会增大,这与我们的直观认知是相符合的。同时还可看到,通过增大隔震层阻尼可 有效减小桥梁结构相对于客站建筑的位移。正如前文所说,客站建筑优化无需关注阻尼特征,只给出最大阻 尼即可,而桥梁结构同样需要增大隔震层阻尼来控制其响应,此时二者相一致,增大阻尼比对客站建筑和桥 梁结构减震都是有益的。



#### 图 3 隔震层刚度和阻尼特性改变对桥梁结构响应的影响(单桥模型)



#### 4.2 多桥模型

本部分研究隔震层多桥模型的减震效果,所谓多桥模型指的是各桥梁结构下隔震层参数设置不同,导致 各桥并不一致振动,不可简化为单一桥梁来进行分析。由于阻尼特征无需优化,取各隔震层阻尼比仍为0.2, 对上文采用单桥模型优化的刚度参数进行适当变化,以体现多桥特征。此处采用一种规则分布,令各桥梁隔 震层刚度成比例分布于最优值  $\omega_{\rm b}/\omega_{\rm sl} = 0.6$  附近,即令  $\omega_{\rm bl} = (1 - \mu) \omega_{\rm b2} \omega_{\rm b3} = (1 + \mu) \omega_{\rm b2}$ ,其中  $\mu(0 \le \mu < 1)$ 为各桥梁隔震层刚度变化百分比。



#### 图 4 隔震层刚度特性改变对客站建筑响应的影响(多桥模型)

Fig. 4 Effect of stiffness characteristic of isolation devices on the relative displacemnet of building( multiple-bridge model)

图4给出了隔震层多桥模型设置下隔震层刚度变化对建筑结构响应的影响,可看到多桥模型的减震效 果与单桥模型有所区别,通过合理设置多桥模型的频率分布可增强减震效果,并使减震曲线更为平缓,有利 于隔震层对客站建筑的减震控制。为进一步研究多桥模型的参数配置对减震效果的影响,图5给出了随着 频率变化百分比改变隔震层对客站建筑的减震效果。从图中可以看到,随着的变化减震效果发生一定改变, 存在一个最优的取值,此时可增强层间隔震装置减震效果,需要进行优化设置。此外需要注意的是,由于多 桥模型存在多个桥梁结构不一致振动,存在碰撞隐患,尤其是进行多桥模型频率分布的优化时同样需考虑此 点,因此时某些桥梁可能存在较大侧向位移,需要进行验证计算加以避免。



图 5 不同的多桥模型配置对客站建筑响应的影响

根据本文研究工作可知,当采用单桥模型隔震层时,如以减小客站建筑响应为优化目标,需要关注隔震 层的刚度特征,通过优化隔震层刚度来实现客站建筑减震,此时阻尼特征可直接给定最大值,无需进行优化, 如以减小桥梁结构响应为优化目标,客观上需增大隔震层刚度,这可能与客站建筑刚度优化相冲突,一般采 用增大隔震阻尼比的方法来实现桥梁结构响应控制。当采用多桥模型隔震层时,其减震效果不同于单桥模 型,经过频率分布合理设置的多桥模型优于单桥模型,但其存在可能碰撞和过大侧移的隐患,需加以验算避 免。综上所述,本文给出房桥结构体系中隔震层的优化设计步骤:

(1) 指定隔震层可提供的阻尼比 按照单桥模型优化隔震层刚度特征 实现客站建筑最优减震效果。

(2) 验证桥梁结构响应是否满足容许值,如满足则停止运算,所得参数即为寻求单桥模型隔震下的优化 值;如不满足,则修正阻尼比,重复(1)步骤。

(3)调整各桥梁结构的频率分布 类似文中算例 ,优化频率改变百分比 μ ,实现多桥模型的最优减震效 果和对应参数。至此完成隔震层的参数优化设计。

## 5 结论

文中对房桥合一结构体系中层间隔震的参数优化策略进行了研究,首先建立多自由度数值分析模型,继 而基于虚拟激励法推导了相应高效随机表达式,引入参数域方法来进行层间隔震参数合理设置,提出并研究 了单桥模型和多桥模型下隔震装置的参数优化策略。通过本文研究工作可知:

(1)由于目前多自由度非线性随机分析理论尚不成熟,难以应用于实际工程,本文基于线性假定进行线性随机分析,对于各类非线性情况均可通过等效线性化来处理。同时,通过引入虚拟激励法提高随机计算效率,适于工程应用。

(2)鉴于桥梁结构质量较大, 阻尼系数的变化对客站建筑的减震效果影响不大, 因此隔震层阻尼特征无需优化, 取阻尼上限值即可, 同时可以用来控制桥梁结构相对于客站建筑的位移。

(3) 本文提出了层间隔震装置的单桥模型和多桥模型优化策略,并给出了隔震层设计步骤,可实现房桥 合一结构体系的协同减震控制。相对于单桥模型,多桥模型可以提高隔震层对客站建筑的减震效果,但是存 在碰撞和较大隔震层侧向位移的隐患,需加以计算避免。同时,不同于小质量 TMD 在房桥合一结构体系中 的单桥和多桥模型的层间隔震装置均具有较高的减震鲁棒性。

#### 参考文献:

[1] 周福霖. 工程结构减震控制[M].北京:地震出版社,1997.

ZHOU Fulin. Seismic control of engineering structure [M]. Beijing: Earthquake Press ,1997. (in Chinese)
[2] 刘文光. 橡胶隔震支座力学性能及隔震结构地震反应分析研究 [D]. 北京: 北京工业大学 2004.

LIU Wenguang. Mechanics properties of rubber bearings and earthquake response analysis of isolated structure [D]. Beijing University of Technology 2004. (in Chinese)

Fig. 5 Effect of different multiple bridge model configurations on the relative displacement of building

- [3] Skinner R L ,Robinson W H. An introduction to seismic isolation [M]. John Wiley & Sons Inc , UK , 1993.
- [4] Kelly J M. Earthquake resistant design with rubber [M]. Second Edition Springer Verlag London Limited , 1997.
- [5] Naeim F , Kelly J M. Design of seismic isolated structures [M]. John Wiley & Sons Inc , UK , 1999.
- [6] 叶献国,谢一可,李康宁.基础隔震结构在侧向碰撞下的地震反应分析 [J].地震工程与工程振动,2008,28(4):161-167.
- YE Xianguo ,XIE Yike ,LI Kangning. Earthquake response analysis of base-isolated structure considering side impact [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Wibration 2008 28(4): 161 – 167. (in Chinese)
- [7] FENG Demin ,HE Wenfu , YANG Qiaorong , et al. Numerical response analysis and shaking table tests for bridge and building complex structural system (Part I: complex structure dynamic test research) [C]//14th WCEE ,Beijing: 2008.
- [8] LIU Wenguang ,YANG Qiaorong , HUA Lei , etc. Numerical response analysis and shaking table tests for bridge and building complex structural system (Part II: parameter optimum and earthquake response analysis) [C]//14th WCEE ,Beijing: 2008.
- [9] 房 良. 巨型框架多功能减振结构体系地震作用下减振理论及其试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
   FANG Liang. Vibration control mechanism and experimental research of multifunctional vibration-absorption megaframe structure under earthquake
   [D]. Naijing: Southeast University 2004. (in Chinese)
- [10] 林家浩,张亚辉.随机振动的虚拟激励法[M].北京:科学出版社,2004.
   LIN Jiahao ZHANG Yahui. Pseudo-excitation method of random vibration[M]. Beijing: Science Press 2004. (in Chinese)
- [11] 俞瑞芳,周锡元.非比例阻尼线性体系基于规范反应谱的 CCQC 法[J]. 工程力学,2006,23(2): 10-17. YU Ruifang ZHOU Xiyuan. CCQC method for seismic response of non-classically damped linear system based on code response spectra[J]. Engineering Mechanics 2006 23(2): 10-17. (in Chinese)