

文章编号:1671-1637(2013)03-0033-07

悬索桥线性液体黏滞阻尼器阻尼系数优化

赵国辉¹, 高建华², 刘健新¹, 李宇¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 河南交通职业技术学院道路与桥梁工程系, 河南郑州 450005)

摘要:将悬索桥加劲梁纵向运动简化为若干相互独立的单自由度振动系统, 采用随机振动理论, 利用将地震激励简化为平稳白噪声激励的方法推导了加劲梁纵向运动绝对加速度均方的解析表达式。利用导数求极值的原理, 求出了加劲梁纵向运动绝对加速度均方的最小值及其对应的系统最优阻尼比, 得到了悬索桥线性液体黏滞阻尼器最优阻尼系数的解析表达式, 并以某悬索桥为例, 采用动力时程法进行了参数敏感性分析, 验证了解析表达式的有效性。分析结果表明: 悬索桥线性液体黏滞阻尼器存在理论上的最优阻尼比 0.5, 其对应的最优阻尼系数使阻尼器的减震效率达到最大值; 当阻尼比为 0.3 时, 阻尼器的减震效率达到最优阻尼比的 90%; 当阻尼比在 0.4~0.6 之间时, 阻尼器的减震效率基本保持在最优阻尼比的 99%。综合考虑地震动强度、阻尼器冲程及造价等因素, 线性液体黏滞阻尼器的最优阻尼系数可在阻尼比为 0.4~0.6 对应的范围内适当调整。

关键词:悬索桥; 液体黏滞阻尼器; 最优阻尼系数; 随机振动理论; 参数敏感性分析

中图分类号: U448.25 **文献标志码:** A

Damping coefficient optimization of linear fluid viscous damper for suspension bridge

ZHAO Guo-hui¹, GAO Jian-hua², LIU Jian-xin¹, LI Yu¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Road and Bridge Engineering, Henan Vocational and Technical College of Communications, Zhengzhou 450005, Henan, China)

Abstract: The longitudinal vibration of suspension bridge stiffening girder was simplified as some independent single degree of freedom vibration systems. Stochastic vibration theory was used, and earthquake excitation was simplified as stationary white-noise excitation, the analytical expression of absolute acceleration mean square for stiffening girder longitudinal vibration was deduced. According to the principle of derivative extremum, the minimum absolute acceleration mean square and the corresponding system optimum damping ratio were derived, and the analytical expression of optimum damping coefficient for suspension bridge linear fluid viscous damper was got. A suspension bridge was selected as example, parametric sensitivity study was carried out based on dynamic time-historical method, and the reliability of the analytical expression was verified. Analysis result shows that the theoretical optimum damping ratio of suspension bridge linear fluid viscous damper is 0.5, and the efficiency of damper reaches its maximum with the corresponding optimum damping coefficient. When damping ratio is 0.3, damper efficiency is about 90% of optimum damping ratio. When damping ratio is 0.4-0.6, damper efficiency is 99% of optimum damping ratio, so the optimum damping coefficient of linear fluid viscous damper can be adjusted properly in the range according to earthquake intensity,

收稿日期: 2012-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908014); 广东省交通科技项目(201102038)

作者简介: 赵国辉(1978-), 男, 河北邯郸人, 长安大学讲师, 工学博士, 从事桥梁抗震及抗风研究。

damper stroke and cost. 4 tabs, 12 figs, 13 refs.

Key words: suspension bridge; fluid viscous damper; optimum damping coefficient; stochastic vibration theory; parametric sensitivity study

Author resume: ZHAO Guo-hui(1978-), male, lecturer, PhD, +86-29-82334835, zgh@gl.chd.edu.cn

0 引 言

大跨径悬索桥自振周期长,强震激励下加劲梁纵向位移响应大,不但会危及伸缩缝和梁端支座的安全,甚至会撞落引桥导致整个桥梁及线路在震后丧失应急通行能力,加重地震次生灾害的程度及抗震救灾的难度。目前主要采用两类措施控制悬索桥加劲梁纵向地震位移响应:附加阻尼,如液体黏滞阻尼器;附加刚度及限位的弹性连接装置,如大型橡胶支座、高强钢丝成品拉索等^[1]。

近年来,中国先后在鹅公岩长江大桥、江阴长江大桥、西堠门大桥等多座大跨度悬索桥上安装了液体黏滞阻尼器。国内外许多学者在液体黏滞阻尼器力学分析模型和阻尼参数选取与优化方面进行了较为深入的研究。李爱群等以润扬长江大桥南汉悬索桥为例,采用改进层次分析法建立了悬索桥地震响应最优控制效果评估模型,并采用参数敏感性分析方法研究了液体黏滞阻尼器的减震效果,在阻尼器参数优化时以加劲梁梁端位移、桥塔内力、阻尼器阻尼力和变位为控制参数,研究发现采用线性液体黏滞阻尼器时可获得良好的减震效果^[2];卢桂臣等以西堠门大桥为例,进行液体黏滞阻尼器设计参数及减震效果分析,通过桥塔内力及位移、加劲梁梁端位移及阻尼力为控制目标的 50 组参数敏感性分析,最终选定了阻尼系数为 $10\ 000\ \text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 的线性液体黏滞阻尼器^[3];聂利英等研究了在任意荷载下液体黏滞阻尼器的减震效果,详细分析了液体黏滞阻尼器阻尼力与结构地震内力响应的不同步现象,发现受阻尼参数影响,设置阻尼器并不总是对所有结构构件有利,仅当阻尼器参数选取适当时,才能同时达到减小地震位移而不明显增加结构受力的效果^[4];Liu 等研究了液体黏滞阻尼器的参数优化及减震效果^[5-9]。上述研究在确定液体黏滞阻尼器最优参数时均采用基于参数敏感性分析的试算及搜索法,即在一定的阻尼系数和阻尼指数范围内,通过十几组甚至几十组参数组合逐一的非线性时程分析,根据加劲梁位移、结构内力响应结果综合选取最适宜的阻尼系数和阻尼指数,该方法计算量大,耗时长,效率低,而且阻尼参数特别是阻尼系数的选取范

围不易确定。

针对悬索桥线性液体黏滞阻尼器最优阻尼系数计算方法,本文采用随机振动理论,推导单自由度振动系统最优阻尼比及对应的最优阻尼系数计算公式,并以某悬索桥为例,通过阻尼系数的参数敏感性分析来验证该理论公式的可靠性。

1 液体黏滞阻尼器的特点

液体黏滞阻尼器一般由密封缸体、带阻尼孔的活塞及高分子黏性液体组成,其工作机理是:当活塞与缸体之间产生相对运动时,由于活塞前后的压力差,使黏性液体以高速射流方式从活塞上的活塞孔中通过,高速射流进入腔室后与周围黏性液体产生剧烈摩擦,并以此方式向结构提供附加阻尼,使结构振动的部分能量通过黏性阻尼材料转化为热能,进而达到减少结构动力反应的目的(图 1)。

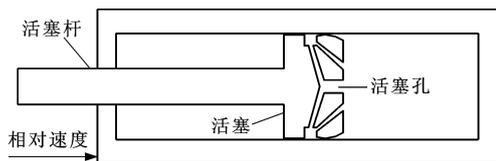


图 1 液体黏滞阻尼器

Fig. 1 Fluid viscous damper

液体黏滞阻尼器的阻尼力与阻尼器两端相对运动速度的关系为^[10-11]

$$F = C \dot{u}^\alpha \quad (1)$$

式中: F 为液体黏滞阻尼器的阻尼力(kN); C 为阻尼器的阻尼系数($\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); \dot{u} 为运动速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); α 为阻尼器的阻尼指数。

图 2 为不同的阻尼指数时液体黏滞阻尼器的滞回性能,当 α 为 1.0 时,液体黏滞阻尼器的阻尼力与运动速度成线性关系,因此,也称之为线性阻尼器,其阻尼力-位移的滞回曲线形状为椭圆。当结构变形最大时,阻尼力为 0,当结构变形为 0 时,阻尼力达到最大值,即线性阻尼器阻尼力与结构变位之间存在反拍效应,而当 $\alpha < 1.0$ 时,称之为非线性液体黏滞阻尼器。非线性阻尼器的阻尼力-位移滞回曲线随 α 的减小而逐渐趋近于矩形。当结构变形速率很小时,阻尼器就产生较大的阻尼力,阻尼力与结构

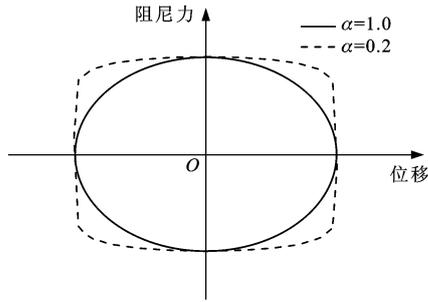


图 2 滞回曲线形状

Fig. 2 Shapes of hysteresis curves

内力之间的反拍效应逐渐弱化,即安装非线性液体黏滞阻尼器可能会导致结构内力响应的增大。

2 液体黏滞阻尼器的优化

对在建筑结构中安装的液体黏滞阻尼器,由于结构振型密集且多方向互相偶联,为确保经济性并防止过大的阻尼比影响结构高阶振型的地震响应^[10-11],其附加阻尼比一般不超过 0.3,阻尼器的优化主要针对安装数量及布设方向和位置,优化算法多采用遗传算法、模糊控制理论及最优控制理论等。

悬索桥在塔梁间安装的液体黏滞阻尼器主要用于控制加劲梁与桥塔之间的相对位移,阻尼器控制的振型数量少且都是低阶振型,安装的位置也基本固定。同时,液体黏滞阻尼器施加的阻尼力方向单一,附加阻尼比影响的振型也相对较少,不会干扰主塔等结构的高阶振型的地震响应^[12-13],因此,桥梁结构中液体黏滞阻尼器的优化应重点放在附加阻尼比的优化上,而不应照搬建筑结构中的经验直接取附加阻尼比上限为 0.3。阻尼器的最优阻尼比主要通过调整阻尼系数和阻尼指数来实现。

目前国内外基本上采用参数敏感性分析方法对桥梁用液体黏滞阻尼器的阻尼系数和阻尼指数进行优化。该方法根据同类工程经验拟定液体黏滞阻尼器的阻尼系数和阻尼指数的取值范围,在该范围内将阻尼系数和阻尼指数两两组合,逐一进行动力时程分析,并根据阻尼力、梁端位移及结构的内力响应等因素综合选定减震效果最好的一组或几组阻尼系数和阻尼指数组合作为液体黏滞阻尼器的推荐设计参数。该方法的不足之处主要有:阻尼系数和阻尼指数的取值范围尤其是阻尼系数的取值范围和间隔步长不易确定,需要根据同类工程经验和试算的结果反复调整;需要对几十组的阻尼系数和阻尼指数组合逐一进行地震动响应时程分析,对大跨径桥梁结构而言,该方法不仅计算及数据处理工作量大,耗

时长,效率低,而且会因为阻尼系数的取值范围设置不合理而导致返工。

3 最优阻尼参数的理论分析

当仅考虑悬索桥加劲梁纵向振动时,可近似地将梁端纵向阻尼器的加劲梁(图 3)视为一个或几个相互独立的单自由度振动系统(图 4),在地震动激励 $\ddot{u}_g(t)$ 作用下,其单自由度振动体系运动方程为

$$m_s \ddot{u}_s(t) + c_s \dot{u}_s(t) + k_s u_s(t) = -m_s \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

式中: $u_s(t)$ 、 $\dot{u}_s(t)$ 、 $\ddot{u}_s(t)$ 分别为加劲梁相对于地面的纵向位移、速度和加速度; m_s 、 c_s 、 k_s 分别为加劲梁的质量、阻尼系数和纵向刚度。

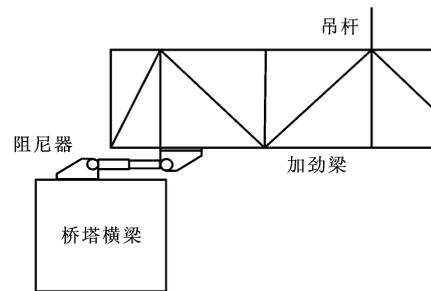


图 3 阻尼器安装

Fig. 3 Damper installation

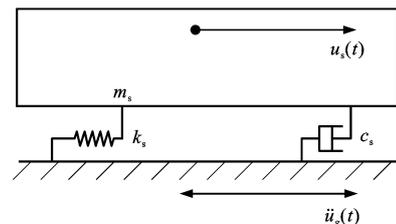


图 4 加劲梁单自由度体系

Fig. 4 SDOF system of stiffening girder

令加劲梁纵向振动的圆频率和阻尼比分别为

$$\omega_s = \sqrt{k_s/m_s}$$

$$\xi_s = c_s/2m_s\omega_s$$

式(2)可变为

$$\ddot{u}_s(t) + 2\omega_s\xi_s\dot{u}_s(t) + \omega_s^2 u_s(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

对式(3)进行 Fourier 变换并整理可得

$$(-\omega^2 + 2i\omega\omega_s\xi_s + \omega_s^2)F[u_s(t)] = -F[\ddot{u}_g(t)] \quad (4)$$

式中: ω 为地面加速度的圆频率; $F[u_s(t)]$ 、 $F[\ddot{u}_g(t)]$ 分别为 $u_s(t)$ 、 $\ddot{u}_g(t)$ 的 Fourier 变换。

加劲梁相对于地面的纵向加速度与地面加速度激励在频域范围内存在的关系为

$$F[\ddot{u}_s(t)] = \frac{\omega^2 F[\ddot{u}_g(t)]}{-\omega^2 + 2i\omega\omega_s\xi_s + \omega_s^2} \quad (5)$$

令加劲梁相对于地面的纵向加速度频率传递函

数为

$$H_1(\omega) = \frac{\omega^2}{-\omega^2 + 2i\alpha\omega_s\xi_s + \omega_s^2}$$

加劲梁纵向运动绝对加速度的频率传递函数为

$$H(\omega) = 1 + H_1(\omega) = \frac{2i\alpha\omega_s\xi_s + \omega_s^2}{-\omega^2 + 2i\alpha\omega_s\xi_s + \omega_s^2} \quad (6)$$

令 $\rho = \omega/\omega_s$, 则式(6)可改写为

$$H(\rho) = \frac{2i\xi_s\rho + 1}{-\rho^2 + 2i\xi_s\rho + 1} \quad (7)$$

假设地面加速度输入为平稳白噪声过程, 其自功率谱密度为常数 S_0 , 则加劲梁纵向运动绝对加速度的自功率谱密度为

$$S(\omega) = |H(\omega)|^2 S_0 \quad (8)$$

加劲梁纵向运动绝对加速度的均方为

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega \quad (9)$$

将式(9)换元并将式(8)代入式(9)可得

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\omega)|^2 S_0 d\omega = \omega_s S_0 \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\rho)|^2 d\rho \quad (10)$$

式(10)积分后得

$$E = 2\pi S_0 \omega_s \left(\frac{1}{4\xi_s} + \xi_s \right) \quad (11)$$

由式(11)可知, 对于既定的加劲梁振动圆频率值 ω_s , 绝对加速度均方是阻尼比 ξ_s 的函数, 使加劲梁绝对加速度均方最小的系统最优阻尼比 ξ_s^{opt} 可以通过对式(11)求导并使其等于 0 来求得, 即

$$\frac{dE}{d\xi_s} = 2\pi S_0 \omega_s \left(-\frac{1}{4\xi_s^2} + 1 \right) = 0 \quad (12)$$

$$\xi_s^{opt} = 0.5$$

当阻尼比为 0.4~0.6 时, 绝对加速度均方的变化十分平缓, 基本与最优阻尼比 0.5 对应的绝对加速度均方值相当, 因此, 单自由度振动体系的最优阻尼比取值范围建议设定为 0.4~0.6。

考虑到钢结构加劲梁自身的阻尼比为 0.02, 则液体黏滞阻尼器对该阶振动应提供的最优阻尼系数 C_d^{opt} 为

$$C_d^{opt} = 2m_s \omega_s (\xi_s^{opt} - 0.02) = 1.92\pi m_s f_s \quad (13)$$

式中: f_s 为加劲梁纵向振动频率。

当悬索桥加劲梁纵向运动由多个振型叠加而成时, 根据振型的正交性和独立性, 式(13)可变为

$$C_d^{opt} = \sum 1.92\pi m_{si} f_{si} \quad (14)$$

式中: m_{si} 、 f_{si} 分别为加劲梁第 i 阶的 m_s 、 f_s 。

由式(13)、(14)可知: 线性液体黏滞阻尼器最优阻尼系数只与悬索桥加劲梁的纵向振型参与质量及振动频率有关, 且与两者成正比。根据上述公式可

以直接确定悬索桥线性液体黏滞阻尼器的最优阻尼系数, 从而避免了大量的时程分析运算。非线性液体黏滞阻尼器的最优阻尼系数可以根据线性阻尼器的分析结果利用能量等效的原则进行折算, 限于篇幅, 其计算公式和验证在此不做讨论。本文以某悬索桥为例, 通过与阻尼系数敏感性分析结果进行对比来验证上述公式的可靠性。

4 算例分析

4.1 工程概况

以某主跨为 620 m 的钢桁架悬索桥为例进行线性液体黏滞阻尼器最优阻尼系数分析, 该悬索桥钢桁架加劲梁高为 5 m, 宽为 20 m。在钢桁架加劲梁梁端与桥塔下横梁间设置 4 个线性液体黏滞阻尼器, 布置方式见图 3, 结构总体布置见图 5。计算分析采用的激励为工程场地地震安全性评价中提供的 3 条未来 50 年超越概率为 2% 的人工地震波, 其地震动参数见表 1。

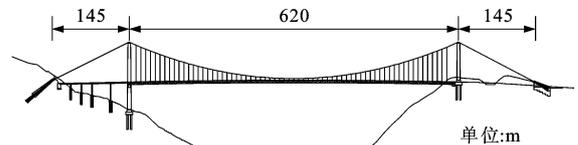


图 5 总体布置

Fig. 5 General arrangement

表 1 地震动参数

Tab. 1 Parameters of ground motion

参数	峰值加速度/g	地震持时/s	特征周期/s
取值	0.291	55	0.38

4.2 有限元模型

采用大型通用结构有限元程序 ANSYS 对该算例悬索桥进行三维有限元建模。建模过程中采用三维空间梁单元模拟悬索桥的钢筋混凝土桥塔、横梁以及钢桁架加劲梁。由于悬索桥主缆、吊杆为柔性索结构, 索内仅能承受拉力而不能承受弯矩, 因此, 采用仅承受拉力而不能承受弯矩的空间杆单元模拟, 建模过程中利用单元初始应变及应力刚化方式考虑主缆和吊杆由于重力产生的初始应变对全桥整体刚度矩阵的影响。混凝土桥面板及桥面铺装、栏杆等结构二期恒载采用空间节点质量单元模拟, 分别计入三向平动质量及绕桥轴向转动的质量惯矩。模型边界条件主要为塔底及主缆锚固端固结, 不考虑桩基础及桩-土效应对结构的影响。梁端与桥塔横梁间的 4 个液体黏滞阻尼器采用 Kelvin 并联式

弹簧-阻尼单元 combin14 模拟。与文献[13]相同,全桥共采用 4 964 个三维梁单元,377 个只受拉杆单元以及 4 个 Kelvin 并联式弹簧-阻尼单元,结构有限元模型见图 6。

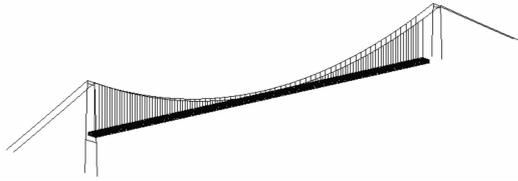


图 6 有限元模型

Fig. 6 FE model

4.3 最优阻尼系数

对未安装液体黏滞阻尼器的全桥有限元进行模态分析和顺桥向地震激励下的时程分析,结果表明,全桥第 2、4、6 阶振型对加劲梁纵向振动有贡献(图 7),根据式(14)可以计算出线性液体黏滞阻尼器的最优阻尼系数,结果见表 2。

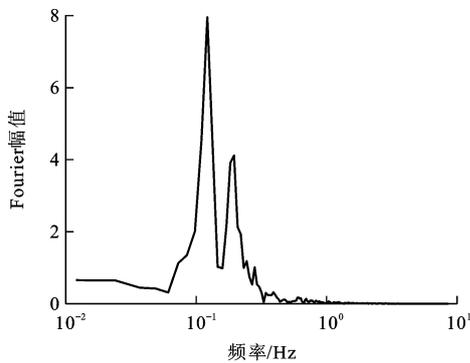


图 7 梁端位移响应 Fourier 谱

Fig. 7 Fourier spectrum of beam-end displacement response

表 2 最优阻尼系数

Tab. 2 Optimum damping coefficient

模态阶次	频率/Hz	振型参与质量/ 10^3 kg	最优阻尼系数/ $(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
2	0.122	5 503	4 050
4	0.195	3 398	3 997
6	0.293	2	4
合计			8 051

4.4 阻尼比验证

为验证最优阻尼系数计算公式的可靠性,首先验证阻尼系数的正确性,即通过式(13)、(14)计算的阻尼系数是否使相应阶次的模态阻尼比达到最优阻尼比 0.5。采用两种工况分析加劲梁的地震位移响应。工况 1 中考虑液体黏滞阻尼器(阻尼系数为 $8\ 051 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)的作用,加劲梁纵向振动模态的阻尼比取 0.02;工况 2 中不考虑液体黏滞阻尼器,

加劲梁纵向振动模态的阻尼比通过瑞利阻尼调整为 0.5。在纵向地震激励下,加劲梁梁端纵向位移响应计算结果对比见表 3。

表 3 梁端位移响应对比

Tab. 3 Contrast of beam-end displacement responses

计算值	梁端位移/mm		误差/%
	工况 1	工况 2	
最小值	-279.1	-287.2	2.8
最大值	167.2	167.9	0.4

由表 3 可知,工况 1、2 的结构位移响应误差很小,可以认定表 2 中计算的阻尼系数使加劲梁相应的纵向振动振型阻尼比达到了 0.5,同时也间接证明了多阶纵向振型在线性液体黏滞阻尼器作用下的线性可叠加性。

4.5 最优阻尼系数验证

采用阻尼系数敏感性分析验证线性液体黏滞阻尼器在不同阻尼比对应的阻尼系数条件下的控制效果,阻尼系数的取值根据纵向振型的模态阻尼比 0.3~0.7、步长 0.1 对应取值,计算工况见表 4,参数敏感性分析结果见图 8~11,由图 8~11 可得如下结论。

表 4 计算工况

Tab. 4 Calculation conditions

工况	振型阻尼比	阻尼系数/ $(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
1	0.3	4 696
2	0.4	6 374
3	0.5	8 051
4	0.6	9 728
5	0.7	11 406

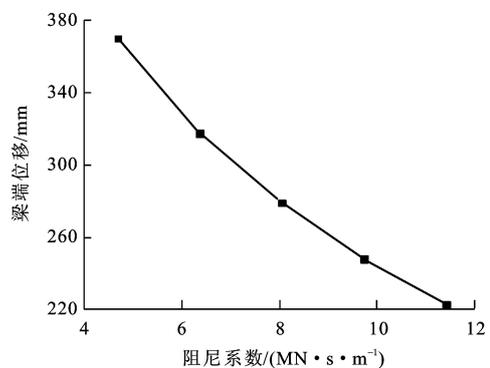


图 8 阻尼系数对梁端位移的影响

Fig. 8 Effect of damping coefficient on beam-end displacement

(1)在关键振型阻尼比 0.3~0.7 对应的阻尼系数范围内,加劲梁梁端纵向位移响应值随阻尼系数的增大而减小,当阻尼系数超过 $8\ 051 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ (加劲梁纵向振动的模态阻尼比为 0.5)时,梁端位移减小的速率降低。

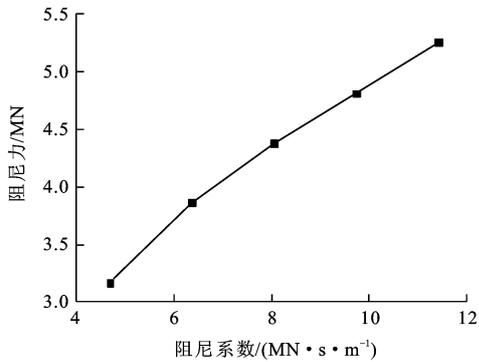


图 9 阻尼系数对阻尼力的影响

Fig. 9 Effect of damping coefficient on damping force

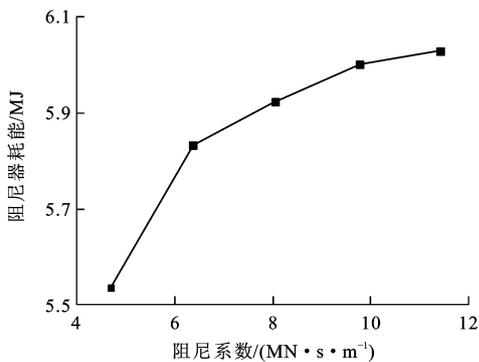


图 10 阻尼系数对耗能的影响

Fig. 10 Effect of damping coefficient on energy consumption

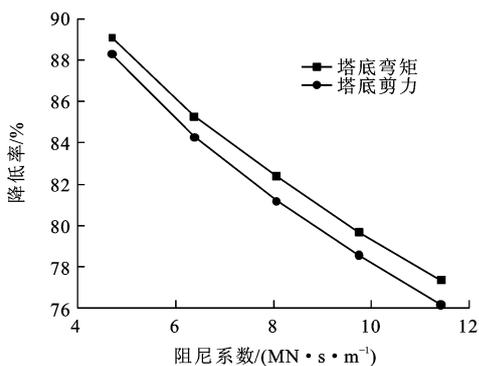


图 11 阻尼系数对桥塔内力的影响

Fig. 11 Effect of damping coefficient on bridge tower forces

(2) 阻尼力及阻尼器的耗能与阻尼系数成正比, 即随阻尼系数的增大而增大, 当阻尼系数超过 $8.051 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 随着阻尼系数的继续增加, 阻尼器耗能的增速降低。

(3) 由于阻尼器限制了加劲梁的纵向运动, 其通过吊索及主缆传递给桥塔的惯性力也随之降低, 因此, 塔底的内力响应随阻尼系数的增大而减小。

在液体黏滞阻尼器优化设计中, 为了尽量减小阻尼力对结构内力的影响, 优化目标一般定义为用最小的阻尼力获得最大的位移控制效果。阻尼器优化的目标函数一般为阻尼力与位移乘积的形式, 也

有研究者在控制目标函数中引入了结构内力响应^[2,4]。悬索桥上安装液体黏滞阻尼器主要目的是控制加劲梁梁端地震位移响应, 而不是控制结构的内力响应。当采用线性阻尼器时, 桥塔等结构内力响应的降低只是加劲梁运动受到抑制后惯性力减小而产生的副作用, 而且这一效果在非线形阻尼器中会减弱甚至导致内力的增加, 因此, 对于悬索桥而言, 优化目标函数中不应包含结构内力项。为进一步体现阻尼器的耗能性能, 提出了一种新的目标函数并引入了阻尼器减震效率函数, 即

$$f(\xi) = F(\xi)D(\xi)J(\xi) \quad (15)$$

$$E(\xi) = f(\xi)/f(0.5) \quad (16)$$

式中: $f(\xi)$ 为阻尼器优化的目标函数; $E(\xi)$ 为阻尼器减震效率函数; $F(\xi)$ 、 $D(\xi)$ 、 $J(\xi)$ 分别为阻尼比为 ξ 时的阻尼力、位移和阻尼器耗能。阻尼器的效率随阻尼系数的变化见图 12, 由图 12 可得如下结论。

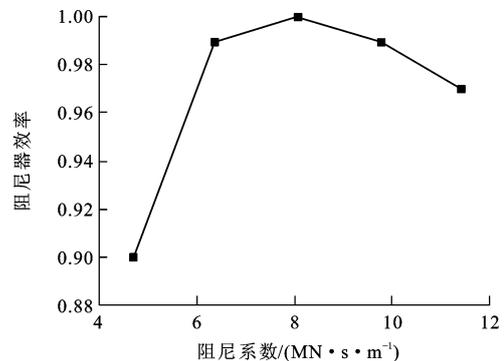


图 12 阻尼系数对阻尼器效率的影响

Fig. 12 Effect of damping coefficient on damper efficiency

(1) 当加劲梁纵向振动的模态阻尼比超过 0.3 后, 阻尼器的减震效率可以达到最大减震效率的 90% 以上, 此时梁端位移响应才有显著降低, 因此, 对于桥梁结构用液体黏滞阻尼器, 关键振型的附加阻尼比不应限制在 0.3 以内。

(2) 通过阻尼器减震效率随阻尼系数的变化可知, 当阻尼系数为 $8.051 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 线性液体黏滞阻尼器的减震效率最高, 表明该桥纵向振动关键振型的最优阻尼比为 0.5。

(3) 当阻尼比在 0.4~0.6 之间时, 液体黏滞阻尼器的减震效率均保持在最大减震效率的 99% 以上, 与最优阻尼比条件下的减震效率基本相当。考虑到地震动强度、梁端允许变位、阻尼器冲程、造价等因素, 液体黏滞阻尼器最优阻尼系数可以在阻尼比为 0.4~0.6 对应的阻尼系数之间适当调整。

4.6 计算效果对比

文献[13]曾对本文算例桥进行了 16 个工况的

参数敏感性分析来选取液体黏滞阻尼器的阻尼参数。与参数敏感性分析方法相比,本文推导的液体黏滞阻尼器阻尼系数理论公式具有以下优点。

(1)建立了振型阻尼比与线性液体黏滞阻尼器阻尼系数的数学对应关系,可以利用调整振型阻尼比来对应调整阻尼系数,避免了阻尼系数选取时的随意性和盲目性。

(2)采用简单的模态分析和单一工况的时程分析就可以确定线性液体黏滞阻尼器的理论最优阻尼系数及其合理的分布范围,而文献[13]中则需要16个工况的全桥时程分析,计算效率低。

(3)对于大跨径悬索桥,研究表明线性液体黏滞阻尼器的控制效果较好^[1-3,13],因此,在计算此类桥梁结构液体黏滞阻尼器时,可不考虑阻尼指数的变化。但对于斜拉桥或其他中小跨径梁桥,非线性液体黏滞阻尼器的减震效果要明显优于线性液体黏滞阻尼器。对于非线性液体黏滞阻尼器的参数优化可以利用等效线性化的方法将线性阻尼最优阻尼系数等效为不同阻尼指数条件下的非线性阻尼参数。

5 结 语

(1)悬索桥线性液体黏滞阻尼器存在最优阻尼比及其对应的最优阻尼系数,使加劲梁绝对加速度均方达到最小值,并使阻尼器的优化目标函数和效率函数达到最大值。最优阻尼系数仅与加劲梁纵向振动振型参与质量和频率有关,且与两者成正比。

(2)当悬索桥加劲梁纵向振动包含多阶模态时,可以将所有参与振动的模态视为独立的单自由度振动体系求出各阶模态对应的最优阻尼系数,系统的最优阻尼系数为各阶模态最优阻尼系数之和。

(3)当阻尼比在0.4~0.6之间时,液体黏滞阻尼器的减震效率与最优阻尼比基本相当,综合考虑到地震动强度、梁端允许变位、阻尼器冲程、造价等因素,液体黏滞阻尼器最优阻尼系数可以在该阻尼比对应的阻尼系数范围内适当调整。

参 考 文 献 :

References :

[1] 王浩,李爱群,郭彤. 超大跨悬索桥地震响应的综合最优控制研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2006,33(3):6-10.
WANG Hao, LI Ai-qun, GUO Tong. Composite optimal control of the seismic response for super-long-span suspension bridges[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(3): 6-10. (in Chinese)

[2] 李爱群,王浩. 大跨悬索桥地震响应控制的阻尼器最优布置

方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2009,39(2):315-319.

- LI Ai-qun, WANG Hao. Optimal placement method of dampers for seismic control of long-span suspension bridges[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(2): 315-319. (in Chinese)
- [3] 卢桂臣,胡雷挺. 西堠门大桥液体粘滞阻尼器参数分析[J]. 世界桥梁,2005(2):43-45.
LU Gui-chen, HU Lei-ting. Analysis of parametric sensitivity of fluid viscous dampers for Xihoumen Bridge[J]. World Bridges, 2005(2): 43-45. (in Chinese)
- [4] 聂利英,李建中,胡世德,等. 任意荷载作用下液体粘滞阻尼器在桥梁工程中减震作用探讨[J]. 计算力学学报,2007,24(2):197-202.
NIE Li-ying, LI Jian-zhong, HU Shi-de, et al. Investigation of decreasing vibration effects of fluid viscous damper in bridge engineering under random loads[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(2): 197-202. (in Chinese)
- [5] LIU Wei, TONG Mai, LEE G C. Optimization methodology for damper configuration based on building performance indices[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(11): 1746-1756.
- [6] PEKCAN G, MANDER J B, CHEN S S. Fundamental considerations for the design of non-linear viscous dampers[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(11): 1405-1425.
- [7] LIN W H, CHOPRA A K. Earthquake response of elastic single-degree-of-freedom systems with nonlinear viscoelastic dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(6): 597-606.
- [8] MARTINEZ-RODRIGO M, ROMERO M L. An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications[J]. Engineering Structures, 2003, 25(7): 913-925.
- [9] MIRANDA E, BERTERO V V. Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design[J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(2): 357-379.
- [10] LEE D, TAYLOR D P. Viscous damper development and future trends[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2001, 10(5): 311-320.
- [11] MCNAMARA R J, TAYLOR D P. Fluid viscous dampers for high-rise buildings[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2003, 12(2): 145-154.
- [12] 梁鹏,吴向男,李万恒,等. 三塔悬索桥纵向约束体系优化[J]. 中国公路学报,2011,24(1):59-67.
LIANG Peng, WU Xiang-nan, LI Wan-heng, et al. Longitudinal constraint system optimization for three-tower suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 59-67. (in Chinese)
- [13] 赵国辉,李宇,刘健新. 大跨径悬索桥液体黏滞阻尼器参数敏感性研究[J]. 中国安全科学学报,2011,21(11):35-40.
ZHAO Guo-hui, LI Yu, LIU Jian-xin. Parametric sensitivity study on fluid viscous damper of long span suspension bridge[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(11): 35-40. (in Chinese)