

文章编号:1671-6833(2008)04-0112-04

## 超大跨度斜拉桥纵向减震耗能塔、梁连接装置研究

王 蒂, 黄平明

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 在苏通大桥的塔、梁连接处分别设置弹性连接装置和阻尼器, 并选择恰当的弹性连接装置的弹性刚度以及阻尼器参数, 利用 Maxwell 阻尼模型模拟黏滞阻尼器的滞回耗能特性, 通过结构非线性地震分析的方法, 对比了弹性连接装置与黏滞阻尼器的减震效果, 分析表明弹性连接装置和阻尼器均能有效地减小梁端的地震位移, 但阻尼器的效果更为理想。

**关键词:** 超大跨度斜拉桥; 弹性连接装置; 黏滞阻尼器; 耗能

**中图分类号:** U 448.2 **文献标识码:** A

### 0 引言

对于柔塔柔梁的超大跨度斜拉桥而言, 选择合适的结构体系和支承方式直接关系到桥梁的静力状态和动力性能。超大跨径斜拉桥不同于常规跨径斜拉桥, 对于每一种结构体系都需要有恰当的主梁约束方式相配合, 以控制柔塔柔梁结构的变形、调节结构静力和动力反应, 保证结构正常使用和抗震、抗风的安全性。因此, 根据地质情况、航道要求、气候和地震等建桥的自然条件, 选择合适的塔、梁连接方式是至关重要的。从抗震的角度看, 目前国内外大跨度桥梁的塔、梁连接装置可大致分成两类, 即弹性连接装置和阻尼器。弹性连接装置的主要作用是提供弹性刚度, 而不是耗能。弹性连接装置主要有大型橡胶支座、钢绞线拉索等。大型橡胶支座、钢绞线拉索等弹性连接装置对所有的荷载均提供弹性刚度。例如: 日本多多罗桥(主跨 890 m 混合式斜拉桥)在塔梁之间设置了刚度为  $3.92 \times 10^4$  kN/m 的减切型橡胶支座作为弹性连接装置。广东汕头海湾二桥(主跨 518 m 混合梁斜拉桥)也采用了塔、梁弹性连接装置, 在主塔两侧各设置一根长 54 m 的  $55 \times 75$  的钢绞线, 钢绞线一端锚固在主塔下横梁上, 另一端锚固在主梁上。阻尼器的种类较多, 有铅挤压阻尼器、钢阻尼器、摩擦阻尼器以及液体黏滞阻尼器等。目前, 较为成熟且适用于大跨度桥梁的是液体黏滞阻尼器。

### 1 液体黏滞阻尼器的力学特性

液体黏滞阻尼器一般由缸体、活塞和流体组成, 缸内充满硅油或其它黏滞流体, 活塞在缸体内可做往复运动, 活塞上有适量小孔。图 1 为美国 Taylor 公司生产的一典型的黏滞阻尼器<sup>[1-4]</sup>。

液体黏滞阻尼器属速度相关型阻尼器, 它产生的阻尼力与速度有关, 当阻尼器被快速拉伸或压缩时, 产生较大的作用力; 而缓慢拉压时, 所需的作用力很小。阻尼器产生阻尼力的计算表达式如下

$$f = \text{sign}(\dot{e}) \cdot (\dot{e})^\alpha \cdot c \quad (1)$$

式中:  $f$  为阻尼力;  $\alpha, c$  分别为阻尼指数和阻尼系数;  $\dot{e}$  为阻尼器变形速率;  $\text{sign}()$  为符号函数。液体黏滞阻尼器的工作特点是: 位移最大时, 速度为零, 阻尼力为零; 位移为零时, 速度最大, 阻尼力也最大。

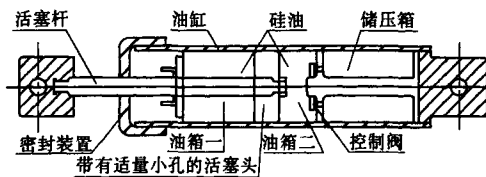


图 1 黏滞阻尼器构造图

Fig. 1 Viscous damper constructor

液体黏滞阻尼器的力-速度关系曲线见图 2。当  $\alpha = 1$  时称为线阻尼;  $\alpha < 1$  时称为非线性阻尼, 速度较小时阻尼器就可以产生较大的阻尼力, 而当速度较大时, 阻尼力增大很小;  $\alpha > 1$  时称为

收稿日期: 2008-07-12; 修订日期: 2008-08-20

作者简介: 王 蒂(1974-), 女, 陕西西安人, 长安大学公路学院讲师, 博士研究生。

锁阻尼,情况与 $\alpha < 1$ 时的情况相反,速度较小时阻尼器的阻尼力很小,而当速度较大时,阻尼力增加很快。

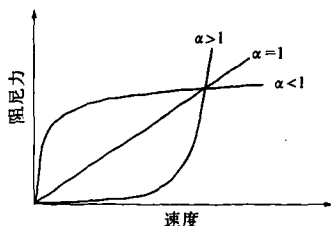


图2 黏滞阻尼器的力-速度曲线图

Fig.2 Viscous damper force-speed curve

正弦荷载作用下,阻尼器的力-速度关系曲线见图3。阻尼指数 $\alpha$ 的取值直接决定阻尼器力-速度曲线的形状。 $\alpha$ 的取值范围一般在0.2至2之间, $\alpha$ 取值越小,力-速度曲线的形状越接近于矩形,当 $\alpha = 0$ 时,力-速度曲线即为矩形。

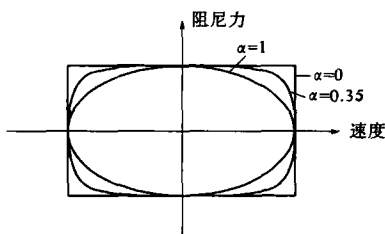


图3 正弦荷载作用下黏滞阻尼器的力-速度曲线图

Fig.3 Viscous damper under sine loads force-speed curve

## 2 斜拉桥减震耗能体系纵向地震反应分析

笔者重点研究斜拉桥减震、耗能体系,分析中主要考虑以下几种非线性因素:①黏滞阻尼器和滑动支座的非线性影响;②用非线性接触单元模拟桩土相互作用;③采用几何刚度矩阵考虑结构的几何非线性;④采用折减弹性模量的方法考虑索垂度引起的非线性;⑤用屈服球模型模拟弹塑性梁柱单元<sup>[5]</sup>。

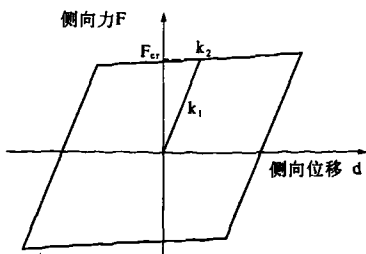


图4 支座单元水平恢复力图

Fig.4 Bearing cell level recovery force

滑动支座的模拟采用各向同性的空间滑动支座单元。水平方向的恢复力模型采用图4的计算简图。图4的水平恢复力模型中,侧向力 $F$ 为支座在某一时刻所受到的水平方向的合力,侧向位移 $d$ 为支座在某一时刻水平方向与侧向力 $F$ 对应的支座水平位移。 $F_{cr}$ 为滑动支座水平方向的滑动临界力,可按式计算:

$$F_{cr} = \mu N \quad (2)$$

式中: $N$ 为支座单元在某一时刻所受到的竖向动反力和恒载反力之和; $\mu$ 为支座接触面的滑动摩擦系数。

阻尼模型采用 Maxwell 阻尼模型<sup>[3]</sup>,其非线性力-位移关系为:

$$f_i^{(i)} = k_i \cdot (d_i^{(i)} - e_i^{(i)}) = \text{sign}(\dot{e}_i^{(i)}) \cdot (\dot{e}_i^{(i)})^\alpha \cdot c \quad (3)$$

式中: $f_i^{(i)}$ 为第 $i$ 迭代步阻尼器单元的恢复力; $k_i$ 为阻尼器单元中“弹簧”部分的刚度; $d_i^{(i)}$ 为 $t$ 时刻第 $i$ 迭代步阻尼器单元的变形,其数值等于阻尼器单元中“弹簧”部分的变形与“阻尼”部分的变形之和; $e_i^{(i)}$ 为 $t$ 时刻第 $i$ 迭代步阻尼器单元中“阻尼”部分的变形; $\dot{e}_i^{(i)}$ 为 $t$ 时刻第 $i$ 迭代步阻尼器单元中“阻尼”部分的变形速度。

阻尼器单元中“阻尼”部分的变形 $e_i^{(i)}$ 在每一时刻每一迭代步中都要精确计算出来。式(4)为其在 $t$ 时刻的计算公式:

$$e_i^{(i)} = e_{i-\Delta t} + \int_{i-\Delta t}^i \dot{e}_{\tau}^{(i)} d\tau = e_{i-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (\dot{e}_{i-\Delta t}^{(i)} + \dot{e}_i^{(i)}) \quad (4)$$

阻尼器单元滞回特性的迭代算法如下<sup>[4-5]</sup>:

(1) 计算上一迭代步阻尼器单元的恢复力

$$f_i^{(i)} = k_i (d_i^{(i)} - e_i^{(i-1)}) \quad (5)$$

(2) 计算阻尼器单元中“阻尼”部分的变形速度

$$\dot{e}_i^{(i)} = \left( \frac{f_i^{(i)}}{c} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \text{sign}(f_i^{(i)}) \quad (6)$$

(3) 计算阻尼器单元中“阻尼”部分的变形

$$e_i^{(i)} = e_{i-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (\dot{e}_{i-\Delta t}^{(i)} + \dot{e}_i^{(i)}) \quad (7)$$

(4) 计算本迭代步阻尼器单元的恢复力

$$f_i^{(i)} = k_i (d_i^{(i)} - e_i^{(i)}) \quad (8)$$

(5) 计算本迭代步阻尼器单元的切线刚度

$$k' = \frac{f_i^{(i)} - f_i^{(i-1)}}{e_i^{(i)} - e_i^{(i-1)}} \quad (9)$$

由于阻尼器为串联的,则

$$k_i \cdot d_i = k' \cdot d' \quad (10a)$$

$$k_m \cdot (d_i + d') = k_i \cdot d_i \quad (10b)$$

由(10a)得  $d' = \frac{k_i \cdot d_i}{k'}$ , 代入(10b), 可以得

$$k_m = \frac{k_i \cdot k'}{k_i + k'} \quad (m = x, y, z, xx, yy, zz) \quad (11)$$

式中:  $k_m$  为阻尼器单元沿  $x, y, z$  方向的平动刚度以及绕  $x, y, z$  方向的转动刚度。

由式(11)就可以推导出阻尼器单元的切线刚度矩阵  $[K_r^{BE}]$ , 对于时间步长  $\Delta t$ , 单元力增量  $\{\Delta F\}$  与位移增量  $\{\Delta y\}$  的关系可近似写为:

$$\{\Delta F\} = [K_r^{BE}] \{\Delta y\} \quad (12)$$

对于非线性体系的动力分析, 最有效的方法是数值的逐步积分法。在时间  $t$  至  $\tau(t + \Delta t)$  的时间间隔内,  $N$  个自由度体系结构运动增量方程为

$$M\Delta\ddot{y}(t) + C(t)\Delta\dot{y}(t) + K(t)\Delta y(t) = \Delta P(t) \quad (13)$$

式中:  $M$  为系统的质量矩阵;  $C(t)$  为  $t$  时刻的阻尼矩阵;  $K(t)$  为  $t$  时刻的刚度矩阵, 由阻尼器单元切线刚度矩阵、滑动支座切线刚度矩阵和梁单元刚度矩阵集合而成;  $\Delta\ddot{y}(t)$ 、 $\Delta\dot{y}(t)$ 、 $\Delta y(t)$  分别为  $t$  至  $\tau(t + \Delta t)$  时刻的相对加速度、速度和位移的增量;  $\Delta P(t)$  为  $t$  至  $\tau(t + \Delta t)$  时刻的地震荷载增量。

对于方程(13), 可以采用 Wilson -  $\theta$ , Newmark -  $\beta$  等方法进行求解, 作者采用 Newmark -  $\beta$  法, 计算中取  $\gamma = 0.5$ ,  $\beta = 0.25$ , 积分时间步长为  $0.01$  s。对于黏滞阻尼器, 滑动支座的非线性, 采用改进的 Newton - Rapson 进行求解。

### 3 工程算例

#### 3.1 计算模型

苏通大桥是一座现代化桥梁, 是世界上最大跨度的斜拉桥。大桥采用倒 Y 型桥塔、斜索面和闭口钢箱梁主梁断面, 其跨径组成  $100.00 + 100.00 + 300.00 + 1088.00 + 300.00 + 100.00 + 100.00$  m, 主梁高  $4.00$  m, 宽  $41.00$  m, 倒 Y 型桥塔高  $300.40$  m, 利用大型通用计算软件 ANSYS 建立的苏通大桥有限元模型见图 5。

#### 3.2 抗震设防标准及地震输入确定

##### 3.2.1 抗震设防标准

根据桥梁的重要性以及地震破坏后桥梁结构的修复(抢修)的难易程度, 对苏通大桥的主航道桥采用两种不同的设防标准进行抗震研究, 即偶遇地震和罕遇地震的概率水准分别为采用 100 年超越概率 10% (相当于重现期 950 年) 和 100 年超越概率 2% (相当于重现期 5 000 年)<sup>[6]</sup>。



图 5 苏通大桥有限元模型

Fig. 5 Finite element model of Sutong bridge

主航道桥 P1 设防标准: 100 年 10% (重现期: 950 年) 结构性能要求: 主结构完好无损, 边墩接近或刚进入屈服; 结构校核目标: 主塔校核应力, 边墩校核承载能力极限状态; P2: 100 年 2% (重现期: 5 000 年) 结构性能要求: 主塔可出现微小裂缝, 边墩可利用延性抗震; 结构校核目标: 主塔校核承载能力极限状态, 边墩根据强度折减系数和延性校核承载能力极限状态。

##### 3.2.2 地震输入

采用上述 P2 概率水平地震加速度时程进行了地震反应分析。地震输入方式为: 纵向 + 竖向, 时程分析中, 考虑了滑动支座的摩擦耗能作用。

为了对比黏滞阻尼器、弹性连接装置对斜拉桥的纵向地震反应的影响, 分别采取以下三种情况进行分析:

(1) 漂浮体系;

(2) 主梁与每个桥塔纵向设置两个黏滞阻尼器, 阻尼器参数  $C = 3\,750$  kN · s/mm,  $\alpha = 0.5$ ;

(3) 主梁与每个桥塔纵向设置滑动橡胶支座作为弹性连接装置, 滑动橡胶支座的弹性连接刚度为  $1.0 \times 10^5$  kN/m。

#### 3.3 计算结果

苏通大桥的分析计算结果见表 1, 图 6, 图 7, 图 8。

表 1 塔、梁连接方式对苏通大桥纵向地震响应影响

Tab. 1 The effect of deck - tower connection to Longitudinal Seismic Response of Sutong bridge

联结类型	漂浮体系	设置弹性连接装置	设置阻尼器
塔顶位移/m	0.39	0.33	0.27
梁端位移/m	0.33	0.26	0.21
塔根弯矩/(kN · m)	$1.49 \times 10^6$	$1.56 \times 10^6$	$1.37 \times 10^6$
横梁弯矩/(kN · m)	$3.0 \times 10^4$	$4.2 \times 10^4$	$1.93 \times 10^4$
弹性(阻尼)力/kN	—	$2.29 \times 10^4$	$6.0 \times 10^3$
连接装置变形/m	—	0.23	0.19

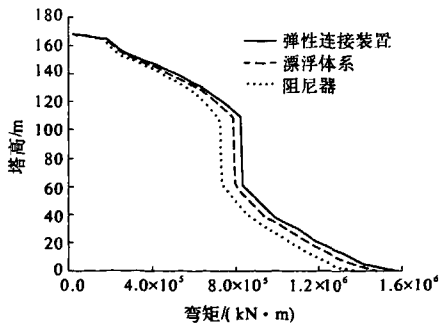


图6 塔、梁连接方式对塔身纵向弯矩影响

Fig. 6 The effect of deck - tower connection to Longitudinal moment of tower

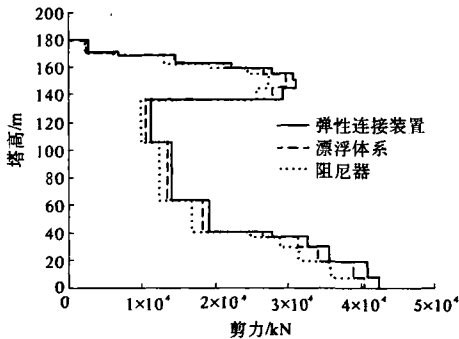


图7 塔、梁连接方式对塔身纵向剪力影响

Fig. 7 The effect of deck - tower connection to Longitudinal shear force of tower

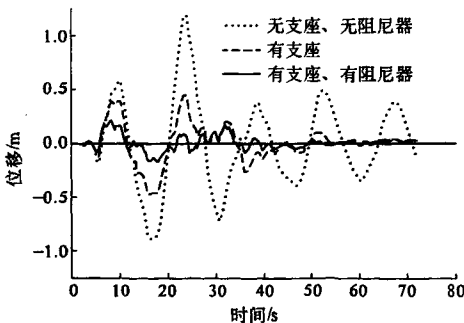


图8 梁端位移时程比较

Fig. 8 The time - history analysis of tower displacement

通过表1可以发现,塔、梁连接处采用黏滞阻尼器联结时,塔顶水平位移比漂浮体系时减小了32.16%,梁端位移减少了36.36%,塔根弯矩减小了8.50%;采用弹性连接装置联结时,塔顶水

平位移比漂浮体系时减小了15.38%,梁端位移减少了21.21%,而塔根弯矩增大了4.69%。通过对比塔、梁连接处设置阻尼器和弹性连接装置的地震响应可发现,采用阻尼器时,梁端位移较小,而付出的力的代价要小得多。因此,阻尼器的减震效果比弹性连接装置好,主要原因是阻尼器有较好的耗能作用。

图8是不考虑滑动支座摩擦耗能(无支座、无阻尼器)、考虑滑动支座摩擦耗能(有支座)、以及考虑滑动支座摩擦耗能并设置阻尼器(有支座、有阻尼器)三种情况下的梁端位移时程曲线比较。由对比可知,设置黏滞阻尼器是一种非常有效的减震方法。

#### 4 结论

采用结构非线性地震反应时程分析方法,通过苏通大桥的算例分析,对超大跨度斜拉桥纵向减震耗能塔、梁连接装置进行了研究,得到以下结论:

(1)在大跨度斜拉桥的塔、梁连接处设置弹性连接装置和阻尼器均为控制塔、梁相对位移的合理有效的减震措施。

(2)与设置弹性连接装置相比,设置黏滞阻尼器不仅能够有效地控制塔、梁相对位移,还可以适当地减小塔底控制断面的受力,因此,阻尼器的减震效果更为理想。

#### 参考文献:

- [1] 叶正强. 工程结构黏滞流体阻尼器的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2000.
- [2] 欧进萍, 丁建华. 油缸间隙式阻尼器理论与试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 82-89.
- [3] MAKRI S N. Fractional - derivative Maxwell model for viscous dampers[J]. Journal of Structural Engineering 1991, 117(9): 2708-2724.
- [4] 殷海军. 黏滞阻尼器的计算机程序实现[D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2004.
- [5] 韩万水, 黄平明, 兰 燕. 斜拉桥纵向设置黏滞阻尼器参数分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 146-151.
- [6] 苏通长江公路大桥结构抗震性能研究[R]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2004.

(下转第144页)

- 37.

[4] 吴 斐,孙晓东,胡劲松. 机场货物吞吐量的灰色预测方法研究[J]. 物流技术,2005,7:60-63.

[5] 任承彝. 四川省三个民用支线机场的亏损原因及对策建议[J]. 经济体制改革,2003,1:82-85.

[6] 李国彦,张 斌,李 南,等. 民用机场货运吞吐量预测方法[J]. 江南大学学报:自然科学版,2005,4(2):205-208.

[7] 姜秀娟,高静娟. 熵权法在城市投资环境综合评价中的应用[J]. 市场论坛,2006,9:22-23.

## Entropy Based Analogy Forecasting of New Airport Cargo Throughput

WANG Zhe, XIA Hong-shan

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** According to the fact that new airports lack historical data, entropy based analogy forecasting method was introduced. Firstly, weights of economic indicators were determined by entropy method. Then comprehensive evaluation index of each analog airport was calculated according to the weights. Cargo throughput of the first year and future growth rate of the new airport were calculated based on the indices finally, and thus future cargo throughput can be predicted. Jiuzhaigou Huanglong airport was taken as an example to conduct an empirical analysis research.

**Key words:** Entropy method; New airport; Cargo throughput; Analogy forecasting

(上接第 115 页)

## Research on Deck-tower Connection of Super Long-span Cable-stayed Bridge

WANG Di, HUANG Ping-ming

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The elastic restraint and viscous dampers are applied to deck-tower connection of Sutong bridge and proper elastic stiffness constant of elastic restraint and viscous damper parameters are chosen. The Maxwell model is used for describing the hysteretic behavior of viscous damper. The nonlinear seismic analysis method is utilized for investigating the effects of elastic restraint and viscous damper to reduce the seismic response and the viscous damper is more ideal.

**Key words:** super long-span cable-stayed bridge; elastic restraint; viscous damper; energy dissipation