

# 大跨桥梁的颤振及抖振控制

顾明 项海帆

(同济大学,上海 200092)

**[摘要]** 大跨桥梁发展的趋势是更长大、更轻柔化。随着桥梁跨度的增大,结构风致振动问题将愈加突出,因而风振控制的重要性也愈加显现。本文在简要回顾国内外关于桥梁两种主要风振——颤振及抖振控制研究的基础上,对作者在这一方向中的研究成果作了介绍。

**[关键词]** 大跨桥梁,颤振,抖振,风振控制,空气动力学措施,机械阻尼装置,调质阻尼器

## 前言

由于基础科学及相关学科的成就,20世纪中大跨桥梁的建造得到长足的发展。日本 Akashi 悬索桥及法国 Normandy 斜拉桥的主跨已分别达 1 990 m 及 856 m。我国在近十多年中,已建造了数十座大跨斜拉桥和悬索桥,最具代表性的上海杨浦大桥和江阴长江公路大桥的主跨分别达 602 m 及 1 385 m。建成时分别为世界第一长斜拉桥和第 4 长悬索桥。

一般而言,由于其轻柔,大跨桥梁的风致振动是结构设计的控制因素。自 1940 年美国 Tacoma Narrows 桥风毁以后,经数十年的努力,人们已知桥梁风致振动主要包括颤振、抖振、涡激振动及驰振等,并已对各种风致振动建立了研究方法。在以上几种风致振动中,以对桥梁具有摧毁性作用的颤振和最常发生的抖振最受研究人员和设计人员的关注。桥梁抗风设计的目的是使其自激振动(颤振和驰振)的临界风速高于设计风速,而限幅振动(抖振及涡激振动)的幅值小于设计值。若此目的不能满足,则需采取控制措施,直至达到设计目的。

## 1 颤振控制

桥梁颤振是一种自激振动,主要表现为主梁的大幅扭转振动,可使桥梁在短时间内被摧毁。著名的美国 Tacoma Narrows 大桥正是由于颤振而倒塌。

大跨桥梁的颤振临界风速是描述颤振性能的参

数,它决于主梁横断面外形及结构的动力特性。因此,控制桥梁颤振,也即提高桥梁临界风速的措施主要有 2 种:空气动力学措施及外加机械阻尼装置措施。前者通过改变主梁断面外形来改善其气动稳定性;而后者通过外加机械阻尼装置来提高结构的等效阻尼比,从而提高结构的颤振临界风速。

### 1.1 空气动力学措施

就目前的应用来说,空气动力学措施在桥梁颤振控制中的应用最为广泛。Warlaw 曾对这一措施的具体实施方案作过一很好的综述,提出了原则性建议。文献[1]结合作者的成果对此研究也进行了综述。近年来,针对更大跨悬索桥方案,如 3 300 米的 Messina 桥,人们提出了一些新的、更有效的颤振控制气动措施的方案。如在主梁中轴线位置处开槽、仿锥形主梁、双箱主梁等。

### 1.2 机械阻尼装置措施

虽然目前大跨桥梁的颤振控制以空气动力学措施为主,机械阻尼器作为一种有效的装置亦具有潜在的应用前景。单独应用或和气动措施组合应用,可进一步提高桥梁的颤振临界风速。

日本东京大学的 J. Nobuto 等人首先研究了调质阻尼器(TMD)对桥梁的颤振控制,通过数值方法和简单的试验证明了 TMD 提高桥梁颤振临界风速的有效性。作者近期对这一问题进行了更深入细致的研究<sup>[2,3]</sup>。

在主梁上一阶扭转振型最大的横断处对称安装

一对 TMD, 当主梁发生扭转颤振时, 这一对 TMD 产生和主梁扭转运动反向的力矩, 从而控制颤振。根据 TMD 的基本原理和 Scanlan 颤振分析理论导出主梁弯扭耦合颤振及 TMD 运动方程, 进一步导出了系统的特征方程, 并应用霍维茨法则给出了颤振临界风速的求解方法。

为了检验以上方法的正确性及考察各参数对控制效率的影响, 在广东虎门大桥节段模型上进行了详细的变参数试验。通过理论分析和试验研究, 得到如下新的主要结论:

- (1) TMD 能有效地提高桥梁的颤振临界风速;
- (2) TMD 对具有较钝断面主梁的桥梁的控制效果优于对较好流线形主梁的桥梁的控制效果;
- (3) TMD 对低结构阻尼桥梁的控制效果优于高结构阻尼桥梁;
- (4) TMD 的频率设置对控制效果影响较大, 相对而言, TMD 的阻尼对控制效果的影响较小。

## 2 抖振控制

抖振是由来流中的脉动成份所引起的一种强迫振动, 其幅值随风速增加而增大, 并在桥梁的整个使用期一直出现。50 年代在美国金门大桥上进行过一次实测, 风速为 19—26 m/s 时, 主梁最大幅值振幅达 1.7 m。如此大的振动对桥梁结构将可能产生疲劳破坏, 并引起行人或车辆驾驶人员的不安全感或不舒适感。

抖振控制同样有空气动力学措施及机械阻尼器措施。空气动力学措施包括 2 个内容: 一是在大跨桥梁的初步设计阶段通过“抖振选型”来选择主梁基本断面; 一是在通过在主梁上增设风嘴等措施来改善其抖振性能。而机械阻尼器目前主要是调质阻尼器。

### 2.1 空气动力学措施——抖振选型

在大跨桥梁的初步设计阶段, 通过“气动选型”可以选择一个具有较好气动性能的主梁的基本断面。过去的“气动选型”主要依据颤振性能进行主梁断面选择。但实际情况是, 提供选型的数种断面常都能满足该桥的颤振设计要求。根据这一情况, 作者提出在这些满足颤振性能要求的断面中进一步依据抖振性能再作断面选择的设想, 这就是“抖振选型”的概念<sup>[4]</sup>。依据这一概念, 在初步设计阶段尚无该桥动力特性分析结果的条件建立了“抖振选型”的方法<sup>[5,6]</sup>。这一方法已用于广东虎门大桥和江阴长江公路大桥这 2 座大跨悬索桥的气动选型研究。

### 2.2 机械阻尼装置措施——调质质量阻尼器

用调质阻尼器 (TMD) 来控制桥梁抖振, 国外已有数个工程实例。但从有关文献来看, TMD 的设计主要还是基于其基本原理, 而没有针对大跨桥梁抖振控制的特点进行 TMD 的分析和设计。作者在这方面进行了以下工作:

#### (1) TMD 对弯扭耦合抖振的控制<sup>[7,8]</sup>

对多数大跨桥梁来说, 成桥阶段的抖振主要表现为单向弯曲 (竖弯或侧弯), 但亦有部分桥梁表现为弯扭耦合振动。对上海南浦大桥的分析表明, 竖向弯曲和扭转抖振具有相同的量级。

一对 TMD 安装在主梁上, 如同前述的控制桥梁颤振。基于 Scanlan 弯扭耦合抖振理论和 TMD 的基本原理, 导出了主梁弯扭耦合抖振及 TMD 振动位移的计算公式, 定义主梁横断面边缘处的线位移均方值为优化目标函数, 并根据工程约束条件, 在理论上建立了约束函数, 并由此建立了 TMD 控制桥梁弯扭耦合抖振的基本方法。用此方法分析了上海南浦大桥的弯扭耦合抖振控制。

#### (2) TMD 对单向弯曲 (或竖向弯曲、或侧向弯曲) 或扭转抖振的控制<sup>[9]</sup>

分析模型为一个 TMD 控制单自由度结构振动的常见模型。据此可建立起系统运动方程, 并可求得桥面某点  $x_0$  处的均方根抖振位移值  $\sigma_y$  和 TMD 均方根位移值  $\sigma_t$ 。进一步用最小二乘法对计算结果进行了拟合, 得到 TMD 最优参数估算的几个新公式:

$$(\zeta_t)_o = 0.5\mu^{0.5} \quad (1)$$

$$\frac{(\omega_t)_o}{\omega_1} = \frac{1}{1+\mu} + 3\mu^2 - 0.2\zeta_T^2 \quad (2)$$

$$\eta_o = \frac{0.0158}{0.1277 + \zeta_T} \ln(\mu) + \frac{0.0496}{0.0405 + \zeta_T} \quad (3)$$

$$\mu = \exp \left[ \left( \mu_o - \frac{0.0496}{0.0405 + \zeta_T} \right) \frac{0.1277 + \zeta_T}{0.0158} \right] \quad (4)$$

式中  $\mu$  为 TMD 对结构的广义质量比;  $\zeta_T$  为系统表观阻尼比, 是结构阻尼比与空气动力阻尼比之和;  $\zeta_t$  和  $\omega_t$  分别为 TMD 的阻尼比及频率;  $\eta$  是控制效率;  $(\cdot)_o$  表示最优值。

式 (1) 为 TMD 控制结构振动的经典公式。式 (2) 在经典公式中增加了和系统表观阻尼比有关的项, 主要是因为风速的增加可能导致表观阻尼比远远大于无风速时结构的初始阻尼而使其不能被忽视。式 (3) 描述最优控制效率和系统表观阻尼比

以及广义质量比之关系,而式(4)是据式(3)导出的用系统表观阻尼比和最优控制效率表示的广义质量比的表达式。实际应用时,首先据系统表观阻尼比和所需要的(最优)控制效率确定出广义质量比,因而确定出 TMD 的质量,然后再据式(1)、(2)确定出 TMD 的最优频率及阻尼比。

(3) TMD 用于控制桥梁抖振的特点<sup>[9]</sup>

据 Scanlan 抖振理论,系统振动的表观阻尼为结构阻尼和气动阻尼之和,而气动阻尼是风速的函数,因而由式(1)~(4)可见,TMD 的最优圆频率( $\omega_l$ )<sub>o</sub>、控制效率  $\eta_o$  及对应的广义质量比  $\mu$  (即 TMD 质量)均是风速的函数。

杨浦大桥为主跨 602 m 的迭合梁斜拉桥,施工阶段最长悬臂状态时控制抖振的 TMD 总质量设取 40 t。计算结果表明,风速为 15 m/s 及 50 m/s 时, $\eta_o$  分别约为 45% 和 23%。由于 TMD 用于桥梁风振控制时的这一特点,文献[9]提出:根据桥址处的风速特性及桥梁设计要求,选定一合理的风速,在这一风速下进行 TMD 的设计。这就是“TMD 设计风速”的概念。

(4) MTMD 对桥梁抖振控制的研究<sup>[10]</sup>

众所周知,TMD 的控制效果和 TMD-主结构的频率比以及主结构的阻尼比有关,而对前者更敏感。对大跨桥梁而言,由于气动刚度及车辆荷载的作用,结构振动频率会在主频率附近产生一定程度的漂移;而风-结构振动的表观阻尼比也随风速变化。据式(2)~(4),TMD 不能在结构振动频率和阻尼的变化情况下保持最优。偏离最优频率到一定量值时,控制效率大大下降。

自 T. Igusa 等提出 MTMD 来控制频率飘移系统的振动的概念以来,许多研究人员对其基本方法进行了理论分析。但直至作者的工作之前,尚未见对桥梁风振控制的研究。文献[10]以杨浦大桥为工程背景,首先根据风洞试验测到的气动导数及对车辆荷载的分析确定了结构抖振主要频率的变化范围,然后在这一范围中以主梁最大位移根方差为目标函数,建立了分析了 MTMD 系统的中心频率比、频率带宽比以及系统中各 TMD 的质量分布、阻尼比的最优取值的方法。

### 3 杠杆式 TMD

在研究上海杨浦大桥的风振控制,并进行 TMD 的具体设计时,为了克服工程约束问题,作者提出了一种新的 TMD——杠杆式 TMD<sup>[10]</sup>。

杨浦大桥箱梁内需要有足够的空间高度来安装 TMD,以满足其静力伸长及振动位移的要求。而杨浦大桥箱梁内的净空高度为 2.7 m。杨浦大桥被控的一阶竖向弯曲频率为 0.286 Hz,根据简单的分析可知,控制这一频率振动的传统悬吊式 TMD 在自重作用下的静伸长约为 3 m。这样大的伸长量将导致弹簧产生非线性,甚至破坏,而且安装空间也不能满足要求。作者提出的杠杆式 TMD 见图 1。根据简单的振动原理分析,可知这种 TMD 的弹簧的伸长量是传统的悬吊式 TMD 的  $l'/l$  倍。杠杆式 TMD 解决了传统的悬吊式 TMD 的所有的工程约束问题——安装时的空间约束及弹簧的强度和寿命问题。

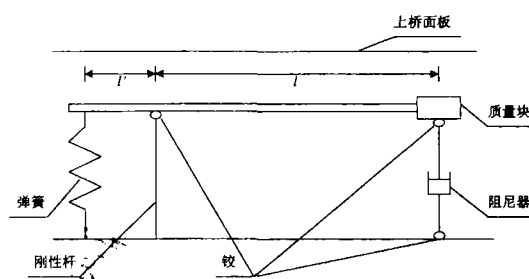


图 1 杠杆式 TMD 构造图

### 参 考 文 献

- [1] 顾明. 大跨桥梁风振控制的气动及机械措施. 结构工程学的研究现状和趋势. 上海: 同济大学出版社, 1995, 102—108.
- [2] 顾明, 吴炜, 项海帆. 大跨桥梁颤振控制的试验研究. 同济大学学报, 1996, 24(1): 124—129.
- [3] Gu M, Chang C C, Wu W et al. Increase of flutter critical wind speed using tuned mass dampers of long-span bridges. J. of Wind Eng. & Indust. Aerodyn., 1998, 73: 111—123.
- [4] Gu M, Xiang H F. Buffeting-based selection of long-span bridges. Selected Papers of Tongji University, 1994, 102—108.
- [5] 顾明, 项海帆. 大跨悬吊桥梁抖振选型的一个实用方法. 同济大学学报(结构、桥梁版), 1994, 11—16.
- [6] Gu M, Xiang H F, Lin Z X. Flutter- and buffeting-based selection for long-span bridges. J. Wind Eng. & Indust. Aerodyn., 1988.
- [7] Gu M, Xiang H F. Optimization of TMD for suppressing buffeting response of long-span bridges. J. of Wind Eng. & Indust. Aerodyn., 1992, 42: 1383—1392.
- [8] 顾明, 项海帆. 被动 TMD 对大跨斜拉桥风致抖振的控制. 土木工程学报, 1993, 26(2): 64—69.
- [9] Gu M, Xiang H F, Chen A R. A practical method of TMD for suppressing vertical buffeting of long-span bridges and its application. J. of Wind Eng. & Indust. Aerodyn., 1994, 51: 203—213.
- [10] 顾明, 陈苏人, 项海帆. 用于杨浦大桥抖振控制的 MTMD 的研究. 振动工程学报, 1998, 11(1): 1—9.

## FLUTTER AND BUFFETING CONTROL OF LONG-SPAN BRIDGES

Gu Ming Xiang Haifan

(Tongji University, Shanghai, 200092)

**Abstract** Long-span bridges are tending towards longer and more flexible. With the increase of bridge spans, study on wind-induced vibrations of these bridges has been a problem of great concern. In this paper, the achievements of study on wind-induced vibration, especially on flutter and buffeting, of long-span bridges gained by the authors are introduced based on a brief review of the recent research situation in this field.

**Key words** long-span bridges, flutter, buffeting, wind-induced vibration control, aerodynamic countermeasure, mechanical dampers, tuned mass dampers

·封面说明·

### 雅鲁藏布大峡谷

雅鲁藏布大峡谷地区包括西藏林芝地区的墨脱、米林、林芝和波密县的范围。其最直观醒目的特点是围绕着南迦巴瓦峰作了个奇特的马蹄形大拐弯。在南迦巴瓦峰(海拔 7 787 m)和加拉白垒峰(海拔 7 257 m)之间,大峡谷的深度为 4 817 m,离开南迦巴瓦峰以后继续以峡谷形式切割在青藏高原的东南坡面上,总长度达到 504 km,其规模远大于美国的科罗拉多峡(长 440 km,深 2 133 m)和秘鲁的科尔卡峡(深 3 200 m)。

1998年10—12月,中国科学考察人员首次全程徒步穿越大峡谷,同时测定了大峡谷作为世界之最新的全新数据,并证实和发现大峡谷核心无人区河段有4大瀑布群,在地学和生物学的环境和资源考察上也取得了不少新的发现。

大峡谷切开了喜马拉雅山和青藏高原的巨大地形屏障,使南部的印度洋暖湿气流得以进入高原内部,从而成为青藏高原上最大的水汽通道。充足的水分和热量使藏东南地区成为高寒荒漠中一处以绿色为基底的高原“绿洲”,被誉为西藏的江南。

大峡谷地区的高山峡谷地形造就了从高山冰雪带到低河谷热带季雨林带,垂直方向上出现9个自然带,蕴含的生物资源极为丰富。据统计,大峡谷地区集中分布着青藏高原60%—70%的物种种类,如维管束植物有3 600余种、昆虫有2 000余种、大型

真菌有400余种、绣菌有200余种。此外,大峡谷下段热带、亚热带低山河谷环境下的物种更是雪域高原的优势资源,被视为是高原上的“西双版纳”、“植物类型的天然植物馆”。众多物种在这里云集,起源和分化,因此,大峡谷地区也被称作是“物种的基因库”。

以南迦巴瓦峰为中心的大拐弯峡谷地区出露的是一套中、深程度的变质岩系,所测的同位素地质年龄为7.4 Ma,与其南侧印度地台的地质年龄相仿。该区以强烈的地震活动和众多的高温热泉为特点的地貌表明该区的现代地壳运动十分强烈,据测南迦巴瓦峰地区的平均隆升速率达3 cm/y。

雅鲁藏布大峡谷中还集中分布着雅鲁藏布江2/3以上的水力资源。从西兴拉到帕隆藏布汇入口之间约20 km的河段,有4处大的河床瀑布群,其中藏布巴东瀑布群和绒扎瀑布群中的单体瀑布落差均高达30—35 m,这里单位河段水能蕴藏量平均达到13.86 kw/km,为世界同类大河之最。计算的整个大峡谷天然水能蕴藏量竟高达6 880余万千瓦,外加峡谷、拐弯等有利的工程地貌条件,使得峡谷区丰富的水力资源具美好的开发前景。

(杨逸畴 供稿)