

# 电涡流TMD应用于登机桥人致振动控制的研究

蒙华昌<sup>1</sup> 杨超<sup>1</sup> 华旭刚<sup>2</sup> 资道铭<sup>1</sup>

(1 柳州东方工程橡胶制品有限公司 广西柳州 545005 2 湖南大学 湖南长沙 410012)

**摘要:**登机桥在高密度人群的步行力作用下,可能产生较大的振动,从而引起行人的不舒适,甚至引发人群恐慌。文章根据南宁吴圩国际机场新航站楼登机桥采用电涡流TMD控制其竖向振动、提高整体结构的阻尼以及降低结构在人群激励下的加速度响应,进行理论分析以及试验研究。

**关键词:**电涡流TMD 电涡流调谐质量阻尼器 登机桥人致振动控制

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2015.01.004

## 1 前言

近年来,结构的振动问题引起工程界和学术界的重视,特别是伦敦千禧桥的振动引起了极大关注。尽管结构的承载力能够满足要求,但结构的振动会引结构、焊缝疲劳损伤甚至断裂等危害,造成安全隐患。

目前国内的大部分登机桥在考虑经济性和美观等情况下,设计的登机桥的长度越来越长,新建机场的部分登机桥跨度接近40m。现有的很多测量及计算结果都表明,登机桥或其他人行天桥的跨度超过30m后,其结构的一阶自振频率就会小于3.0Hz,不满足规范《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[1]</sup>中关于竖向自振频率不得低于3Hz的规定。而行人正常行走时步频大概是2Hz,也就是一秒走两步,在快速走动时步频会接近3Hz,因此竖向步行力荷载的频率在1.6Hz~3.0Hz一个比较宽的范围之内。登机桥的自振频率位于步行力荷载频率范围内,就有可能在竖向发生共振,若竖向加速度超过人体舒适度限值,给登机者造成心理恐慌。同时,在高密度人群流动的状况下容易引起“锁定”<sup>[2]</sup>现象,最终导致动力失稳。

登机桥的减振措施主要有两种:一种频率调整法;另一种是阻尼减振。频率调整法是指通过回避敏感范围内的频率来达到振动舒适性要求,即满足使用要求的桥梁振动允许的指标值。该方法是通过提高结构的整体刚度来实现,然而提高刚度的同时,结构的质量也往往要加大。显然,这样的方法对于结构的设计是不经济的,对于整

体结构也是不满足美观要求的。相对而言,阻尼减振法是抑制结构振动行之有效的办法。目前,在人行桥的减振技术上,绝大部分采用被动消能减振技术,主要表现的产品为粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器、MR磁流变阻尼器、调谐质量阻尼器等,其中最常用的是粘滞阻尼器和调谐质量阻尼器(即TMD)。粘滞阻尼器能够提供多阶模态的阻尼,但阻尼器两端必须有可固定的位置,并且有较大的相对位移;TMD安装简单灵活,能够显著地提高相关模态的阻尼比,一般安装在模态位移最大处。

南宁吴圩国际机场新航站楼登机桥在人群激励时,其表现的振幅较小,采用了TMD作为减振技术方案。

## 2 TMD的技术方案

TMD是由质量块、调谐频率的弹性元件、耗散结构振动能量的阻尼元件组成的振动系统,一般支撑或悬挂在结构上。其吸振原理为:当结构在外激励作用下产生振动时,TMD的质量块会产生与主结构异相的振动,TMD的相对运动所产生的力反作用到结构上,从而减小结构的振动,使其对主结构的振动产生调谐作用,从而达到减小结构振动反应的目的,见图1。

目前已有TMD产品存在的主要问题是阻尼构件与弹性元件易损耗、后期调节难、需要较多的维护等。柳州东方工程橡胶制品有限公司和湖南大学联合推出了一种抗疲劳、长寿命、无需维护的减振器—电涡流TMD<sup>[3]</sup>,其原理如图2所示,具

有以下特点:

- (1) 具有理想的线性粘滞阻尼特性;
- (2) 阻尼系数简单连续可调;
- (3) 材料均为耐久性高的金属;
- (4) 无附加刚度;
- (5) 无工作流体, 不会出现漏液问题;
- (6) 无接触无磨损, 不存在摩擦阻尼;
- (7) 在磁场中工作无需电源;
- (8) 结构简单, 容易制造, 成本较低。

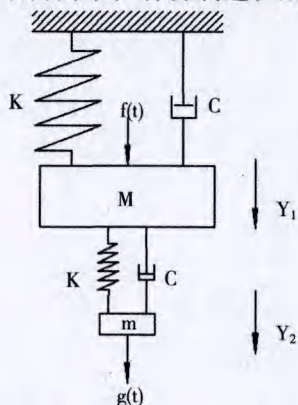


图1 TMD基本原理示意图

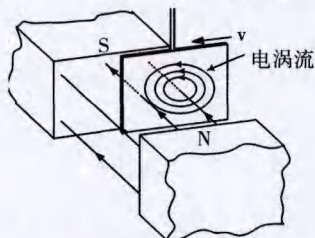


图2 电涡流阻尼原理示意图

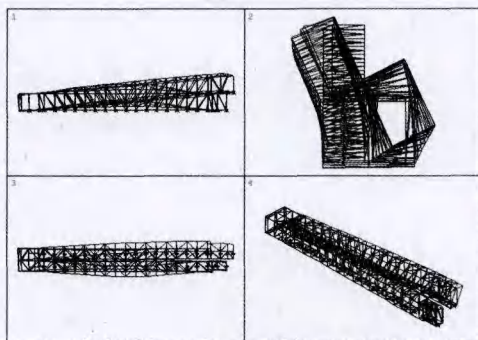
### 3 南宁机场某登机桥自振特性以及人致振动的分析与计算

根据登机桥的设计图和施工平面图, 采用ANSYS有限元分析软件模拟建立实体模型, 并对该桥的模型进行了人致振动分析。

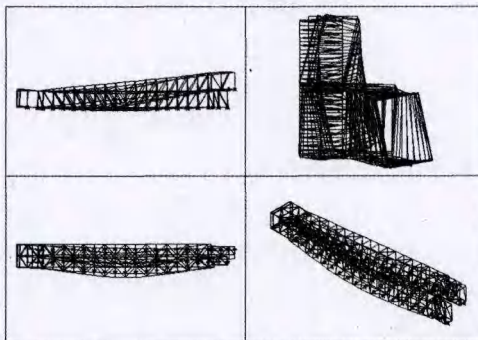
南宁机场登机桥主体结构均采用钢桁架结构, 桥面铺装采用压型钢板混凝土现浇楼板。其中某登机桥为三跨简支结构, 水平段、斜坡段和中间过渡段三部分组成, 其中水平段和斜坡段的水平跨度均为38.25m, 水平段与斜坡段外挑的水平长度分别为4.5m和6.1m, 桥面宽2.3m。采用ANSYS软件建立了登机桥的三维模型并进行了结构自振特性分析。表1给出了该登机桥前三阶模态的固有频率、振型描述及按振型最大值归一化的模态质量。图3为振型。

表1 登机桥的前3阶固有模态

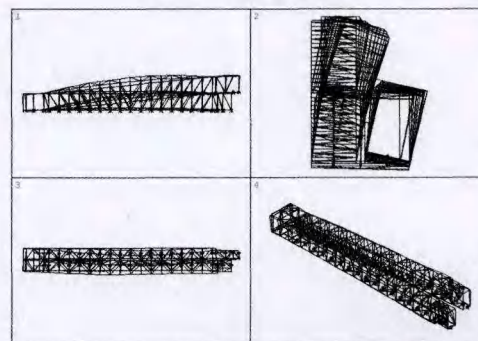
模态阶数	频率 (Hz)	模态描述	模态质量 (吨)
模态1	2.49	水平段廊桥竖弯为主	32.0
模态2	2.80	侧弯振动	56.9
模态3	2.85	斜坡段廊桥竖弯为主	33.0



a. 模态1: 水平段廊桥竖弯为主



b. 模态2: 侧弯振动为主



c. 模态3: 斜坡段廊桥竖弯为主

图3 某登机桥前三阶模态图

对该桥进行了人致振动分析。分析时采用欧洲规范<sup>[4]</sup>, 基本参数如下: 对于最大人群密度为2.0人/m<sup>2</sup>, 大桥计算长度为38.5m (两跨, 总长为77m), 有效计算宽2.0m, 得到总人数n为308人。但考虑到每个航班的最大可能人数一般不会超过200人, 因此总人数取为200人。200行人自由行走时等效的完全同步人群数为26人 (= 1.85 × 2000.5), 单人竖向步行力幅值为280N (0.4 × 70kg = 280N)。计算了等效的26人完全同步时人

行桥的响应,假定步行力频率为2.0Hz~2.8Hz。桁架式钢结构人行桥的模态阻尼比取为2.0%。

假定单人的竖向步行力荷载为:

$$F_s = 280\sin(2\pi f_s t) + 70\sin(4\pi f_s t + \pi/2)$$

式中,  $f_s$  为竖向步行力频率,上式中考虑了步行力的前两次谐波。

图4中给出了安装减振装置前水平跨跨中竖向加速度时程,可以看出,减振前结构的最大加速度为 $3\text{m/s}^2$ ,超过可忍受的加速度值 $2\text{m/s}^2$ 。

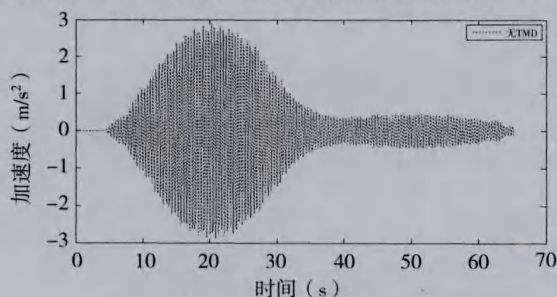


图4 人致振动分析

#### 4 等机桥动力特性测试

为了准确获得结构的固有模态频率,以便根据结构的实际参数调整TMD的参数达到最优值,在跨中位置通过5人跳跃激励的方式,采集结构自由衰减曲线,识别登机桥竖向自振频率。测试分三组进行,测试结果如表2所示:

表2 登机桥固有频率

项目	ANSYS计算值	第一组测量值	第二组测量值	第三组测量值	测量均值	实测值与计算的偏差
水平段频率	2.49 Hz	2.85Hz	2.85Hz	2.84 Hz	2.85 Hz	+14.5%
斜坡段频率	2.85 Hz	3.09 Hz	3.08 Hz	3.09 Hz	3.09 Hz	+8.4%

表3 TMD技术参数

项目	有效质量	阻尼比	频率	质量
水平段TMD	960kg	0.1	2.81Hz	0.03
水平段TMD	990kg	0.1	3.05Hz	0.03

#### 6 基于强迫振动TMD减振效果测试

分别测试了TMD锁定和未锁定状态下的结构的最大共振稳态响应,经对比即可计算得出TMD的减振率。测试时,采用激励器强迫激励结构振动,测取结构的加速度响应。测试结果如表4及图5~图8:

表4 强迫振动测试结果

项目	强迫振动测试结果		减振率
	锁定TMD 实桥 加速度响应 ( $\text{m/s}^2$ )	TMD工作实桥 加速度响应 ( $\text{m/s}^2$ )	
第一组	1.07	0.38	64.5%
第二组	1.05	0.37	64.8%
第三组	1.01	0.38	62.4%

根据以上测试结果可以看出,结构的实测频率与有限元模型计算结果存在一定的偏差。TMD参数的计算与设定应根据结构的实测结构作为依据。

#### 5 TMD参数的确定

TMD主要以控制正弦荷载激励下的加速度响应,其参数确定如下:

①选定TMD质量与减振模态广义质量的比值 $\mu$ ,一般 $0.01 < \mu < 0.05$ ;

②根据外荷载类型(谐波荷载)和减振响应类型(加速度),确定最优频率比和最优阻尼比,并计算TMD的频率 $f_d = a_{opt} \times f_s$ 。其中最优的频率比和最优的阻尼比公式如下:

$$a_{opt} = \sqrt{\frac{1}{1+\mu}} \quad (1)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu/2)}} \quad (2)$$

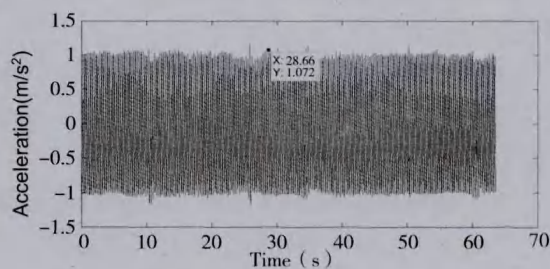
③TMD的物理参数:

$$m_d = \mu \times M_j \quad (3)$$

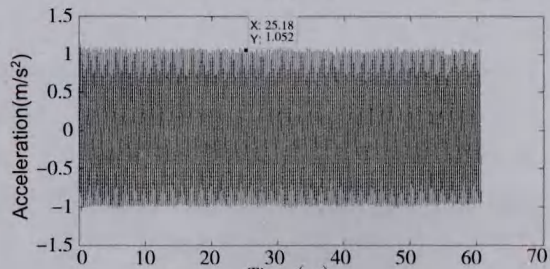
$$k_d = (2\pi f_d)^2 \times m_d \quad (4)$$

$$C_d = 2m_d \times 2\pi f_d \times \xi_{opt} \quad (5)$$

由上述公式,计算得出TMD的参数如表3所示。



a. 第一组



b. 第二组

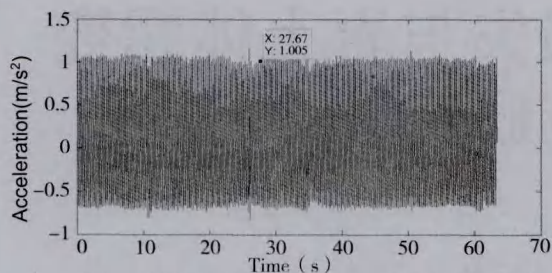
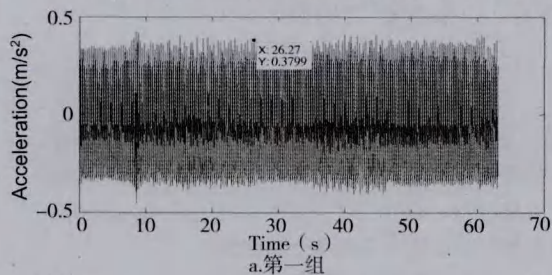
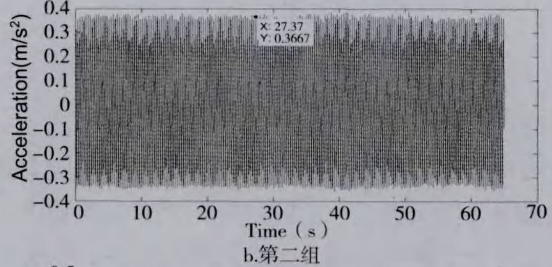


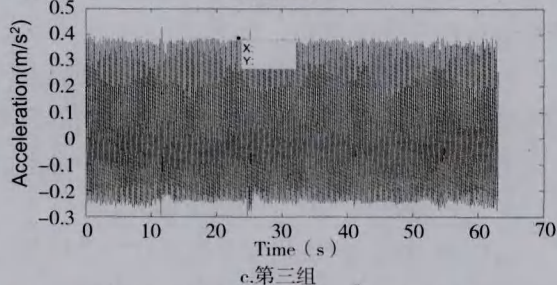
图5 锁定TMD时登机桥加速度响应时程曲线



a.第一组

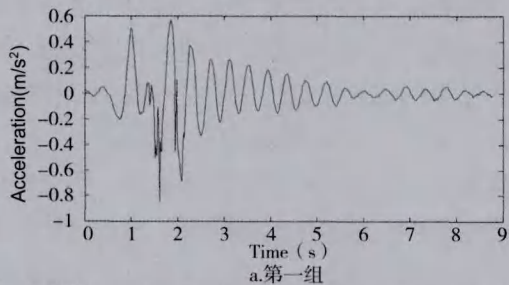


b.第二组

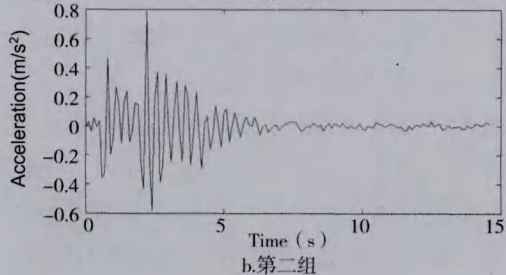


c.第三组

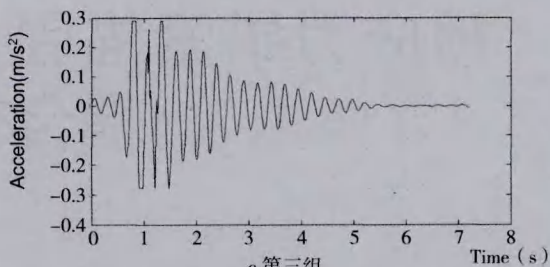
图6 TMD工作时登机桥加速度响应时程曲线



a.第一组

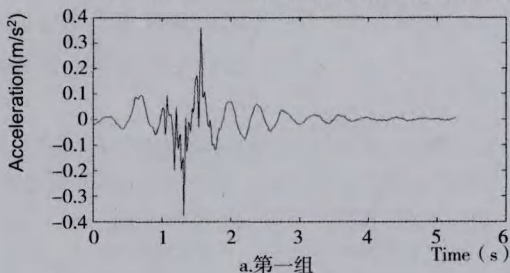


b.第二组

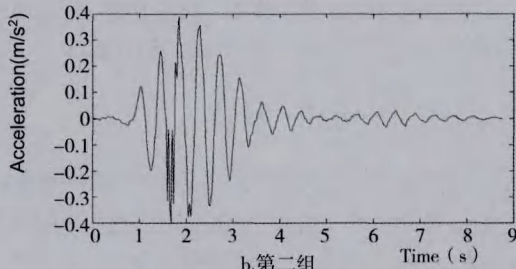


c.第三组

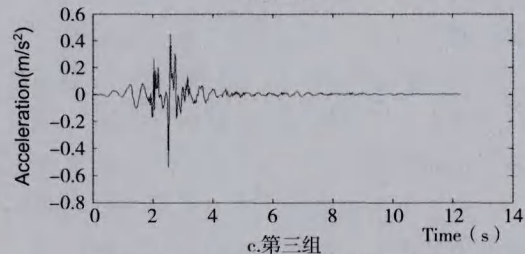
图7 锁定TMD时登机桥自由衰减时程曲线



a.第一组



b.第二组



c.第三组

图8 TMD工作时登机桥自由衰减时程曲线

## 7 结论

(1) 通过安装TMD, 使登机桥阻尼比显著提高。共振减振率约60%~70%, 减振效果良好。

(2) 采用有限元模型计算结构的动力特性与实际结构的动力特性存在一定的误差。这与结构在建立有限元模型计算时, 结构边界条件理想化以及材料力学性能取值与实际存在偏差导致的必然结果。TMD参数的计算与设定应根据结构的实测结果作为依据。

### 参考文献

- [1] CJJ69-95 中华人民共和国行业标准. 城市人行天桥与人行地道技术规范[s].
- [2] 陈政清, 华旭刚. 人行桥的振动与动力设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009
- [3] 汪志昊. 自供电磁流变阻尼器减振系统与永磁式电涡流TMD的研制及应用[D]. 湖南大学博士论文. 2011.05.26
- [4] AISC Design Guide. Floor Vibrations Due to Human Activity. October 2003