

滚球阻尼器在风力发电塔架中的振动控制

陈俊岭, 阳荣昌

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 基于调谐质量阻尼器(TMD)原理, 设计了适用于风力发电结构的滚球阻尼器, 通过振动台模型试验, 研究了该阻尼器的减振效果. 试验表明, 这种新型的滚球阻尼器的质量仅为第一阶模态质量的 1.5%~2.5%, 可有效提高结构阻尼, 在不同的工况下均具有较好的控制效果, 可使试验模型的底部弯矩和塔顶位移的标准差减小 20%~46%. 这种阻尼器施工工艺相对简单, 因此具有良好的经济性和实用价值, 值得在实际工程中推广.

关键词: 风力发电塔; 振动控制; 调谐滚球阻尼器; 振动台; 风荷载

中图分类号: TK83; TU359

文献标志码: A

Vibration Control of Tuned Rolling-ball Damper in Wind Turbines

CHEN Junling, YANG Rongchang

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This study investigated the use of a kind of rolling-balls tuned mass dampers as an effective method to reduce the wind-induced vibration of wind turbines. The novel damper was characterized by single or multiple steel balls rolling in a spherical bowl and its mass was designed to be 1.5%~2.5% of the first modal mass. A 1/20 scaled experimental model was designed to investigate the performance of the damper through shaking table tests. The equivalent ground acceleration was input to obtain the equivalent dynamic response under different wind load cases. A series of forced vibration experiments were performed on the shaking table. The results indicate that the damper can effectively improve the damping capacity of the model. The standard deviations of the base moment and the top displacement were reduced by 20%~46%. The damper is very simple in the construction and has a good economic performance, so it is a feasible means to suppress the wind-induced vibration of wind turbines.

Key words: wind turbine tower; vibration control; tuned rolling-ball damper; shaking table; wind load

随着自然资源消耗的不断增长, 煤炭、石油、天然气等不可再生能源的大量开采对能源的持续供给形成了很大的压力. 能源问题已经成为世界各国共同面对的一个巨大挑战. 而海上有丰富的风能资源和广阔平坦的区域, 使得近海风电技术成为近年来研究和应用的热点. 为获得更大的电力生产能力, 海上风机单机功率不断增大, 风机的尺寸和重量都大幅度增加, 为把机舱和叶轮等部件举到设计高度处运行, 需要采用更高的支撑塔架. 然而相对于陆上风力发电而言, 海上风力发电塔架既要承受很强的风荷载, 还会受到包括浪、流以及地震区的地面运动和北方海域的冰振等作用. 塔架作为细长的高耸结构, 在风荷载和海浪作用下发生振动, 塔筒振动的最大危害就是使塔筒连接部位和其上的某些机舱构件产生疲劳, 塔架材料的强度大大降低, 缩短塔架使用寿命. 如何在这种特殊的环境下高效、经济地降低结构的振动, 成为风力发电技术中的一个重要问题. 若采用增加结构自身刚度的方法, 利用自身的能力来耗散振动能量, 如加大构件的截面尺寸或提高材料的强度等级等, 这种方法既不经济, 又存在较大问题, 而结构振动控制是解决这一问题的有效方法.

调谐质量阻尼器(tuned mass dampers, TMD)是塔式结构振动控制中应用最为广泛的一种控制装置, 因其造价低、构造简单、易安装、维护方便、可靠性高等优点在高耸结构领域获得普遍应用. TMD 中质量可为固体或液体质量, 一般安装在高耸结构顶部, 当结构在外部激励下产生振动时, 会带动 TMD 一起运动, 而 TMD 振动时产生的惯性力又反馈回来作用于结构上, 从而起到抑制结构振动的作用. 已有的大量试验和数值分析研究表明, 对第一振型为主的高耸结构, TMD 控制装置对风荷载和地震引起的振动都有明显的减振效果, 且控制器的位置越高, 控制效果越好^[1-3]. 鲁正等^[4]通过振动台试验, 研究了立方体铁盒内放置 64 颗钢球为颗粒阻尼器对三

层钢框架结构的减震控制效果,该阻尼器通过在密闭容器内微小颗粒间的摩擦耗能实现减振的目的.本文提出一种安装在机舱上部的调谐滚球阻尼器(tuned rolling-ball damper, TRBD),该阻尼器由球面容器(一层或两层)和滚动钢球组成,通过对容器半径、滚球半径和数量的合理设计,使滚球的滚动频率和结构的振动频率调谐实现减振,该装置具有构造简单、成本低廉、反应灵敏和各振动方向性能相同的优点,主要通过滚球在容器内的滚动并且使得滚球滚动的频率和结构的基频调谐,从而实现减振的目的.

1 试验模型

1.1 塔架原型

沿高度方向变截面、变厚度的风力发电塔架实际为无限自由度体系,但其在风荷载作用下弯曲变形形式单一,振动位移沿塔高的分布基本符合一阶振型,文献[5]通过原型试验亦验证了风力发电塔结构的动力响应以一阶振型起主要控制作用这一事实,并指出在不关注叶片响应的前提下,将顶部叶片和机舱视为集中质量点,对于整体结构的一阶自振特性几乎没有影响.国外学者在进行风力发电塔架结构设计分析时亦采用简化模型[6],并指出在计算整体结构的自振特性和动力响应时,采用简化模型已经足够.因此本文将风力发电塔架的无限自由度体系简化为广义单自由度体系,滚球阻尼器振动频率调至塔架的一阶自振频率附近,实现对风力发电塔架的振动控制.

以某3 MW风力发电机为例研究滚球在球形容器滚动作为阻尼器的控制效果,该塔架高度102.4 m,塔身钢结构重量为371.0 t,塔筒内部配件重量33 t,塔顶集中质量120 t(包括机舱、叶片等设备重)(图1a).图中塔筒底部直径为4.15 m,塔顶直径为2.3 m,从塔底到塔顶共分为25段,直径和厚度沿高度变化, $EI(x)$ 为截面的抗弯刚度, $m(x)$ 为质量沿高度 x 的分布函数,塔筒材料为Q345B,弹性模量为 $E=2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比取0.3.采用通用有限元Ansys软件建立有限元模型,叶片、机舱、尾杆、尾舵等重量通过集结于塔顶的质量块模拟,塔架底部约束假定为完全刚性约束,根据几何参数不同分段采用Beam23单元模拟塔身.通过模态分析求得对应的一阶振型模态质量为 m^* 为168.8 t,一阶频率为0.227 Hz,广义刚度 \bar{k}^* 为 3.433×10^5 kN·m(图

1b).

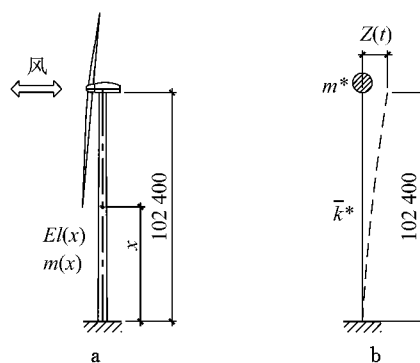


图1 风力发电塔(单位:mm)

Fig.1 Wind turbine tower(unit:mm)

1.2 试验装置

试验利用丹麦科技大学实验室电液式模拟地震振动台完成(图2),最大推力为100 kN,最大模型重量30 kN,频率范围为0~100 Hz,最大振动加速度 $1.0g$ (满负荷,其中 g 为重力加速度),最大振幅 ± 250 mm,可输入任意基底加速度时程或基底位移时程,振动台台面尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$. R 为球面容器的半径.

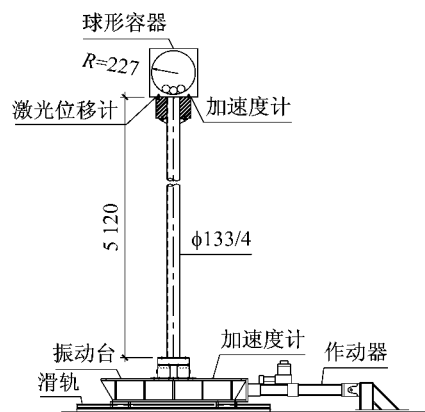


图2 振动台试验装置(单位:mm)

Fig.2 Shaking table test setup(unit:mm)

试验模型底部安装两个六轴力传感器,力传感器可以测得安装位置的轴力和剪力,轴力乘以两传感器间距可计算得到底部弯矩,剪力叠加即可得到底部剪力.两个加速度计分别安装在试验模型顶部和振动台上,激光位移计用于测量塔顶的位移.振动控制试验中,阻尼器对结构的作用力与质点加速度有关,因此为获得阻尼器的控制效果,缩尺试验模型和原型的加速度相似比应取为1.受试验室空间所限,试验模型和原型高度相似比为1/20,其他物理量相似关系见表1.为便于加工制作,采用材质为Q345B的等截面 $\phi 133/4$ 钢管模拟原型变截面塔筒,

在满足广义刚度相似的条件下,塔顶机舱、叶片等用 330 kg 的集中质量块模拟,使得试验模型和原型的一阶频率比为 $\sqrt{20}$ 。经计算,该模型的自振频率为 1.049 Hz,第一振型模态质量为 $m^* = 345.5$ kg。

表 1 相似关系

Tab.1 Similarity criteria

物理量	塔高	时间	质量	频率	刚度	加速度
相似比	1/20	$1/\sqrt{20}$	720	$\sqrt{20}$	36	1

1.3 TRBD 自振频率和细部构造

(1) 自振频率

引起风力发电塔架结构振动的主要因素有:风荷载和海浪的随机性、风轮质量偏心、剪切风速、启停机、地震作用等。当外界风速过高、过低或故障时,叶片调整到顺桨位置,叶轮几乎不动,虽然发电机均处于停机状态,但是塔架的动力响应不尽相同;当外界风速处于工作风速范围时,风力机进入正常状态,叶轮处于运转状态,塔架的振动由脉动风荷载和叶片转动引起;当风向变化时,叶轮在偏航系统的作用下跟踪风向,对风后,偏航刹车启动,机舱锁定在对风的位置。由此可见,风力发电机在启动、正常工作和停机等不同工况下所受荷载有很大差异,导致塔架在不同工况下的振动方向发生变化。因此减振 TRBD 的设计需要适应不同的荷载工况,为最大限度提高 TRBD 效率,质量块的运动方向应便于调整,及时与塔架的振动方向保持一致。

半径为 r 的圆球在半径为 R 的球面容器内运动时的受力状态见图 3,图中 m_T 、 I_T 分别为钢球质量和转动惯量, a 、 ϵ 分别为钢球质心加速度和滚动加速度, N 为钢球对容器的压力, T 为钢球和容器间的摩擦力, θ 和 β 分别为钢球相对于容器圆心和自身圆心的滚动角度。

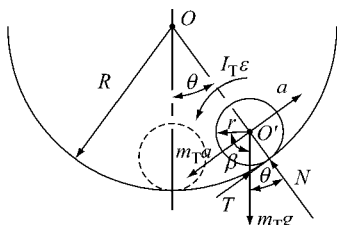


图 3 圆球在球面容器中的受力状态

Fig.3 Forces of a rolling ball on a spherical container

力的平衡关系为

$$T - m_T a - m_T g \sin \theta = 0 \quad (1)$$

$$N - m_T g \cos \theta = 0 \quad (2)$$

$$Tr - I_T \epsilon = 0 \quad (3)$$

圆球在球面容器中滚动的弧长满足下列关系:

$$R\theta = r(\beta + \theta) \quad (4)$$

则圆球滚动的角加速度为

$$\epsilon = \ddot{\beta} = (R - r)\ddot{\theta} \quad (5)$$

圆球质心 O' 的线加速度为

$$a = \ddot{\theta}(R - r) \quad (6)$$

当 θ 较小时, $\sin \theta \approx \theta$, 将式(4)~(6)代入式(1), 与式(3)联立求解得, 圆球的滚动频率为

$$f = 0.1345 \sqrt{\frac{g}{(R - r)}} \quad (7)$$

(2) TRBD 构造

TRBD 减振效果受频率限制较大,当激励为窄带激励或结构的响应以基频控制,即 TMD 系统的自振频率与结构的自振频率几乎完全一致时,控制效果较好。根据原型和试验模型刚度相似、外形相似以及响应相似等原则结合起来统一模拟,塔架原型的一阶自振频率为 0.227 Hz,试验模型和原型的频率相似比为 $\sqrt{20}$,则 TRBD 的设计频率应为 1.015 Hz 左右。

根据式(7),本试验中滚球阻尼器的滚动频率与球形容器和滚球的半径有关,球形容器底面半径设计为 $R = 227$ mm,不同数量和质量的钢球放置在容器中作为 TRBD 的质量(表 2)。容器材质为聚氨酯塑料,固定支架为木材,整个 TRBD 装置除钢球外总重不超过 1 kg。一般而言,TMD 的质量及其行程越大,其控制效果越好。但是在实际工程中,由于结构的总质量很大、空间有限,要达到良好的控制效果,附加惯性质量和所需空间很大,因此实际应用时,TMD 的质量和行程往往受到限制。文中所研究的 TRBD 构造(图 4)非常简单,可安装于风力发电塔机舱顶部;其质量仅为一阶模态质量的 1.5%~2.5%;虽然风力发电塔架在风荷载作用下受力复杂,但滚球的振动方向可根据塔架振动方向随时调整。为减小钢球和容器的摩擦,容器底部均匀涂抹一层润滑油。

表 2 TRBD 设计参数

Tab.2 Parameters of TRBD

编号	层数	半径/mm	数量	质量/kg	频率计算值/Hz
TRBD1	1	49.6	1	4.1	1.000
TRBD2	2	27.8	6	4.3	0.943
TRBD3	2	27.8	8	5.7	0.943
TRBD4	2	27.8	10	7.2	0.943
TRBD5	2	27.8	12	8.6	0.943

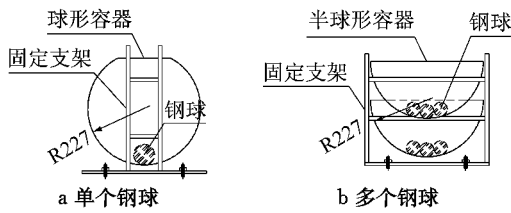


图4 TRBD构造

Fig.4 Construction of TRBDs

2 试验结果

2.1 风荷载与地面加速度等效^[7]

图5为一典型单自由度体系在顶端荷载和地面运动作用下的示意图. 图中悬臂柱高度为 h , 抗弯刚度为 k , 顶端作用有集中质量 m , 假设在顶端风荷载 $p(t)$ 作用下, 柱顶的水平位移为 $u(t)$, 若使悬臂柱在风荷载作用下基底弯矩和基底输入 $\ddot{u}_g(t)$ 的加速度产生的基底弯矩 $M(t)$ 等效, 则风荷载和加速度之间

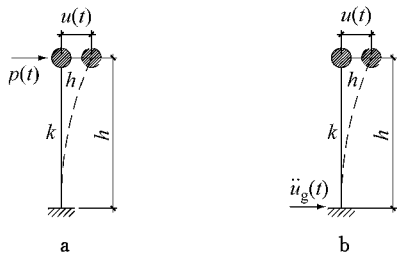


图5 单自由度体系示意

Fig.5 Single degree of freedom system

需满足式(8)所示关系:

$$p(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (8)$$

将式(1)代入地面运动下单自由度体系的运动方程, 变换后得到基底等效加速度

$$\ddot{u}_g(t) = -(\ddot{u}(t) + 2\omega\zeta\dot{u}(t) + \omega^2 u(t)) \quad (9)$$

式中: ζ 为结构体系的阻尼; ω 为固有圆频率.

因此求等效基底加速度输入就变为质点加速度 $\ddot{u}(t)$ 、位移响应乘以结构圆频率的平方 $\omega^2 u(t)$ 与速度响应乘以阻尼比 $2\omega\zeta\dot{u}(t)$ 三项的叠加, 其中 $u(t) = M(t)/kh$, 而加速度响应 $\ddot{u}(t)$ 和速度响应 $\dot{u}(t)$ 可通过对位移响应分别求两阶和一阶导数得到.

2.2 试验输入

文献[7]中详细论证了对于以一阶振型为主的风力发电塔架在风荷载激励和等效基底加速度之间的关系. 通过对风力发电塔的模式分析, 得到广义单自由体系的广义质量和广义刚度, 求得风力发电塔塔顶位移的时程曲线, 采用 Savitzky-Golay 平滑算法和差分法求得顶点的加速度和速度时程, 以此求得合成后的等效加速度. 对直接合成后的等效加速度进行傅里叶变换, 采用低通滤波器剔除高频分量, 进行傅里叶逆变化后得到最终等效加速度. 通过有限元分析计算, 验证了在此等效加速度下的结构响应和已知的实测响应吻合一致, 本试验中的基底加速度即根据丹麦 HAWC2 软件拟合的基底弯矩曲线, 经过上述处理后得到. 试验共考虑三种工况, 即: 超速、阵风和叶片颤动, 相应的加速度输入见图6.

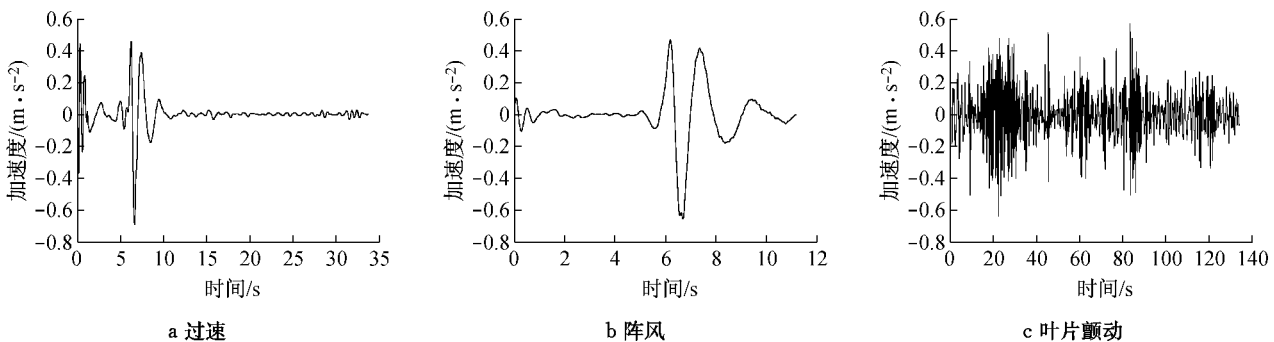


图6 不同荷载工况下的等效加速度

Fig.6 Equivalent acceleration of different load cases

2.3 试验结果

试验内容主要包括无、有 TRBD 试验模型自振频率的测定, 超速、阵风以及叶片颤动三种不同工况下输入等效基底加速度激励时结构体系的动力响应. 通过输入三种不同工况下的等效加速度, 对比模型在无、有 TRBD 状态下底部弯矩和顶部位移的响

应对比, 了解不同 TRBD 对试验模型的减振效率. 通过自由振动试验, 测得未安装 TRBD 时试验模型自振频率为 0.977 Hz, 安装 TRBD 后试验模型的自振频率为 0.952 Hz, 由于 TRBD 质量相对于一阶模态质量很小, 安装不同 TRBD 后模型一阶自振频率几乎没有变化. 根据无、有阻尼器的自由振动试验曲

线,采用时域对数衰减率法识别得到结构体系的阻尼比,见表 3。

表 3 不同 TRBD 减振效果
Tab.3 Effectiveness of different TRBDs

工况	编号	阻尼比/%	顶部位移				底部弯矩			
			峰值/mm	标准差/mm	R_m	R_σ	峰值/(N·m)	标准差/(N·m)	R_m	R_σ
过速	无阻尼	0.88	9.44	2.66			3 445.6	1 264.6		
	TRBD1	2.1	9.76	1.91	1.03	0.28	3 585.2	933.8	1.04	0.262
	TRBD2	3.1	9.57	1.50	1.01	0.44	3 527.6	730.7	1.02	0.422
	TRBD3	3.4	9.66	1.45	1.02	0.45	3 554.7	706.9	1.03	0.442
	TRBD4	3.7	9.72	1.45	1.03	0.45	3 576.6	709.3	1.04	0.440
	TRBD5	3.5	9.73	1.40	1.03	0.47	3 584.5	681.7	1.04	0.461
阵风	无阻尼	0.88	10.69	2.88			3 882.5	1061.5		
	TRBD1	2.1	10.59	2.20	0.99	0.24	3 834.5	814.3	0.99	0.233
	TRBD2	3.1	10.75	1.81	1.01	0.37	3 862.0	671.6	0.99	0.367
	TRBD3	3.4	10.72	1.70	1.00	0.41	3 866.3	631.4	1.00	0.405
	TRBD4	3.7	10.81	1.69	1.01	0.41	3 875.1	628.1	1.00	0.408
	TRBD5	3.5	10.79	1.61	1.01	0.44	3 875.9	596.5	1.00	0.438
叶片颤动	无阻尼	0.88	6.89	2.73			2 549.0	1 017.2		
	TRBD1	2.1	6.98	2.16	1.01	0.21	2 596.7	809.9	1.02	0.204
	TRBD2	3.1	5.45	1.74	0.79	0.36	2 045.4	656.4	0.80	0.355
	TRBD3	3.4	5.15	1.91	0.75	0.30	1 944.7	719.6	0.76	0.293
	TRBD4	3.7	5.58	2.11	0.81	0.23	2 098.7	795.2	0.82	0.218
	TRBD5	3.5	5.71	2.12	0.83	0.22	2 142.6	799.7	0.84	0.214

为评估 TRBD 对抑制结构动力响应的有效性,文中定义量纲一变量

$$R_m = \frac{\max |X_i|_{\text{TRBD}}}{\max |X_i|_{\text{NOTTRBD}}} \quad (10)$$

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\text{NOTTRBD}} - \sigma_{\text{TRBD}}}{\sigma_{\text{NOTTRBD}}} \quad (11)$$

式中: $\max |X_i|_{\text{NOTTRBD}}$ 、 $\max |X_i|_{\text{TRBD}}$ 分别为无 TRBD 控制和有 TRBD 控制时结构在同一等效地震波作用下塔顶位移(或底部弯矩)响应的峰值; σ_{NOTTRBD} 和 σ_{TRBD} 分别为无 TRBD 控制和有 TRBD 控制时结构在同一等效地震波作用下塔顶位移(或底部弯矩)响应的标准差。当 TRBD 装置起控制作用时, R_m 是小于 1 的正数;当 R_m 大于 1 时,表明 TRBD 不仅没起到抑制结构上响应的作用,反而使结构上的响应比没安装 TRBD 装置时大,即 TRBD 起到了负面作用。 R_σ 则反映了设置不同参数阻尼器后结构响应的变化程度, R_σ 越大,表明 TRBD 的减振效果越好。

由表 3 可以看出,在过速和阵风工况下, R_m 值在 1.0 左右, R_σ 则介于 0.26~0.46 之间,也就是说,相对于无 TRBD 试验模型,虽然设置滚球 TRBD 后未能实现减小试验模型的底部弯矩峰值,模型底部弯矩和顶部位移响应的标准差得到不同程度的减小,这表明 TRBD 有效地提高了结构的阻尼,使得结构在各种工况下的动力响应均迅速衰减,有利于提

高结构的疲劳寿命。

由表 2 可以看出,TRBD1 为单个球形容器内放置质量为 4.1 kg 重的一个钢球(图 4a),TRBD2 为两个同直径半球容器内各放置 3 个钢球,总共 6 个钢球的质量为 4.3 kg(图 4b),两个阻尼器之间除钢球的数量差异显著,质量几乎相同。但由表 2 的试验结果和图 7 的对比曲线可以看出,TRBD1 的减振效果在 20% 左右,TRBD2 的减振效果在 40% 左右,TRBD2 的减振效果远远高于 TRBD1,这表明多个钢球作为滚球阻尼器的质量块相比单个钢球效果更好。但是,从 TRBD3~TRBD5 的试验结果可以看出,随着钢球数量的增多,减振效果并没有明显的改善趋势。从试验现象上观察,对 TRBD1 进行测试时,钢球的运动方式表现为在球形容器内滚动;对 TRBD2 进行测试时,钢球的运动形式为滚动和滑动的复合运动;当对 TRBD3~TRBD5 进行测试时,钢球在容器内整体表现为晃动。这主要是因为当钢球的数量较少时,钢球在容器内的运动主要为滚动;随着钢球数量的增多,各钢球在容器内相互碰撞、相互挤压,相对位置同时发生变化,钢球之间的挤压和摩擦力增大,其运动形式由滚动变为晃动,因此效率降低。由此可见,采用此类滚球 TRBD 阻尼器,多个钢球的减振效果要好于单个钢球,但每层容器内钢球的数量不宜超过 3~4 个。

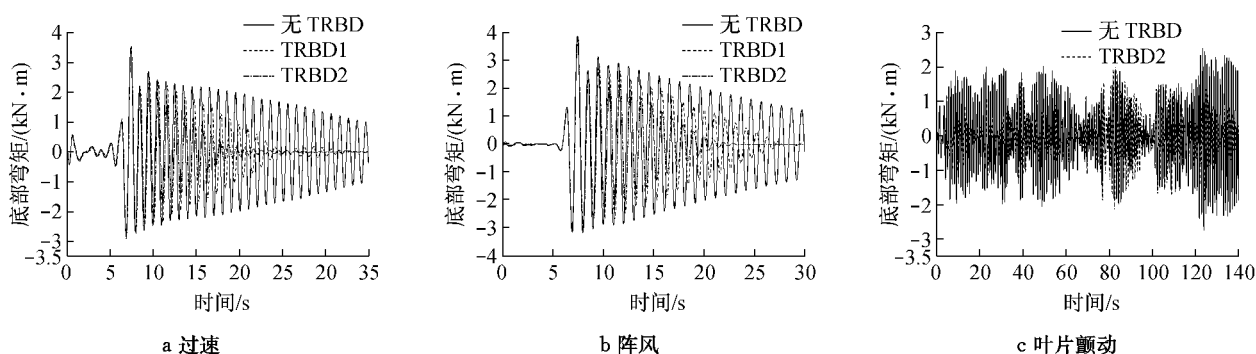


图7 设置 TRBD1 和 TRBD2 后底部弯矩时程曲线

Fig.7 Time history of base moments with TRBD1 or TRBD2

3 结论

本文通过在振动台上输入和风荷载响应等效的基底加速度,对无、有 TRBD 的风力发电塔缩尺模型在过速、阵风和叶片颤动三种工况下的动力性能进行振动台试验研究. 试验中考虑不同设计参数的滚球 TRBD 阻尼器,研究单个和多个钢球在单层或两层球形容器内滚动时的控制效果,得到以下现象和结论:

(1)在叶片颤动的工况下,该阻尼器可以有效的降低振动的幅值和标准差;过速和阵风两种工况和一般建筑结构在风荷载和地震作用下振动特征不同,动力效应的峰值是由于风荷载突然变化导致风机工作状态发生变化引起,一般的阻尼装置在这种工况下均来不及发挥作用峰值点即已过去. 对于这种工况,从理论上讲,可能通过采用碰撞原理设计的阻尼器方可发挥作用.

(2)滚球质量为一阶模态质量 1.5%~2.5%时具有良好的控制效果,不同设计的参数的 TRBD 具有不同的控制效果,文中设计的 5 种 TRBD 可使试验模型的底部弯矩和塔顶位移的标准差减小 20%~46%.

(3)相同质量下,多个钢球的控制效果远远高于单个钢球,6 个钢球分别放置于上下两层容器中的控制效果比单个同质量钢球放置于一个容器中的控制效果高出 60%左右.

(4)滚球 TRBD 中的滚球可在球形容器底部沿任意方向滚动,对于风力发电塔的过速、阵风和运行工况,均能起到较好的减振效果.

(5)滚球 TRBD 的设置大大提高了塔筒的结构阻尼,使得塔筒在动力荷载下的响应迅速衰减,可有效提高塔筒的疲劳寿命.

致谢 本文中实验方案的制定和实验数据的测

量记录工作是在丹麦科技大学 (Technical University of Denmark) 土木工程系试验室完成,得到 C T Georgakis 教授的大力支持,在此向他表示衷心的感谢.

参考文献:

- [1] Xu Y L, Kwok K C S, Samali B. Control of wind-induced tall building vibration by tuned mass dampers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 40(1): 1.
- [2] 蔡丹绎, 徐幼麟, 李爱群, 等. 合肥电视塔 TMD 风振控制的响应分析[J]. *工程力学*, 2001, 18(3): 53.
CAI Danyi, XU Youlin, LI Aiqun, et al. Vibration mitigation of wind-induced response of Hefei TV tower with tuned mass damper[J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(3): 53.
- [3] 刘玉, 徐旭, 周晓娟. 台风作用下高耸结构动力响应及风振控制分析[J]. *噪声与振动控制*, 2009, 29(2): 30.
LIU Yu, XU Xu, ZHOU Xiaojuan. Analysis of dynamic response and wind-induced vibration control of high-rising structure under typhoon[J]. *Noise and Vibration Control*, 2009, 29(2): 30.
- [4] 鲁正, 吕西林, 阎维明. 颗粒阻尼器减震控制的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(增 1): 243.
LU Zheng, LU Xilin, YAN Weiming. Experimental investigation into the vibration control effects of particle dampers[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45 (Supplement 1): 243.
- [5] Prowell I, Veletzos M, Elgamal A, et al. Experimental and numerical seismic response of a 65 kW wind turbine [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2009, 13(8): 1172.
- [6] Bazeos N, Hatzigeorgiou G D, Hondros I D, et al. Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(8): 1015.
- [7] 冯又全, 陈俊岭. 采用加速度输入等效风力发电机组塔筒实测响应方法研究[J]. *石家庄铁道大学学报: 自然科学版*, 2011, 24(1): 21.
FENG Youquan, CHEN Junling. Study on response equivalence between base acceleration and wind loads in wind turbine tests [J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science*, 2011, 24(1): 21.