

## 用钢丝绳减振器控制结构振动\*

田千里

高赞明

倪一清

(中国科学院力学研究所) (香港理工学院土木系) (杭州建筑与土木工程研究所)

**摘要** 用弹塑性或干摩擦元件控制结构振动,可以保证在小激励下结构保持正常的刚度与稳定,而在大激励时,由于塑性变形或滑动,限制构件受力过载,避免损害,故在近年来的抗震结构设计中颇多应用。缺点是弹塑性变形与干摩擦均难控制,变形后也难以复原。本文探讨用钢丝绳减振器取代弹塑性或干摩擦减振元件,通过实验研究,证明了钢丝绳减振器具有与弹塑性或干摩擦元件相似的动态特征,可以用来减小结构振动。对钢丝绳减振器之性能识别与描述进行了研究。

**关键词** 非线性振动 结构减振

### (一) 引言

现代工程结构往往要在恶劣的动力环境下工作,而激励又多是随机性的,其减振设计很不容易。引入人工阻尼及振动控制元件是达到减振之主要手段,早期的元件多半是线性的,近年来发展了弹塑性<sup>[1]</sup>、干摩擦<sup>[2]</sup>、限位器<sup>[3]</sup>等非线性振动控制元件与技术,其优点是能保证在一般激励如微弱地震或风载作用下,结构有较大的刚度与稳定性。而当发生意外激励如强烈地震或冲击时,元件之刚度软化,使结构之自然频率改变,因而共振难以建立,同时大变形及大阻尼耗散能量、增大结构阻尼,故可降低振动响应。在抗震结构中,这种非线性元件已广泛应用,如弹塑性耗能器<sup>[4]</sup>、摩擦闸<sup>[5]</sup>、铅蕊橡胶减震器<sup>[6]</sup>等。其缺点是弹塑性变形难以控制,变形后难以恢复原状。钢丝绳减振器<sup>[7]</sup>的主要优点是能够承受大变形、吸收足够的冲击能,又具有高阻尼,能保证在较宽的频带内隔振。与橡胶类减振器相比,它具有抗油、抗腐蚀、抗温差、湿度、耐老化等显著优点,与弹

塑性或干摩擦耗能元件相似,它具有软化刚度、滞迴阻尼的动特性,在一般激励下具有高刚度高稳定性,在意外的大激励下元件的刚度软化,使结构的自然频率改变,其振难以建立。可用作机械保险丝,保护结构免遭意外的激励损伤。它还具有能自动恢复原状的能力,比任何滞迴元件更易维护,而且是工厂生产、性能稳定、规格齐全,小至零点几公斤大至上千公斤,可用作仪器、机器乃至建筑物之隔振器,广泛用于航空、航天、机械、船舶、交通运输等各工程领域。但以往的应用多将它作为一般的减振器,产品目录上一般只给出它的静态特性曲线与隔振频率,对它的动特性,尤其是稳态振动时的滞迴性能则很少研究。本文试图用它作为多自由度体结构的一般减振元件,对它的减振效果、动态特性等进行了初步研究,提出了一个识别并描述其动态特性的简单方法。

### (二) 减振实验

经典的减振器是用来隔离单谐激励的,只要隔振系统频率低于激励频率 $\sqrt{2}$ 倍就可以有效

\* 本文得到国家自然科学基金与香港U.P.G.C.基金的资助。

的减振。但现代工程结构往往承受宽频带激励，有时会避不开共振峰，此时使用非线性隔振器比线性隔振器会有更好的减振效果。为研究钢丝绳减振器的减振效果，我们做了两组实验，一组用它作为钢框架的基础隔振器，另一组将它加在钢框架的固定点上，其示意图如图1、2，框架均用5公分宽的钢板焊成。

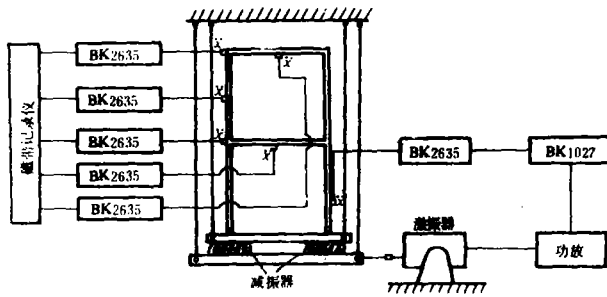


图1 框架基础隔振示意图

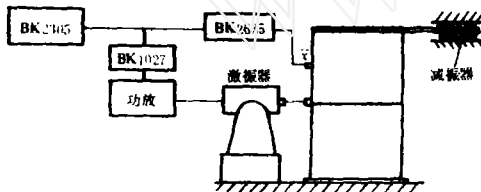


图2 框架结点减振示意图

第一组基础隔振试验时，框架底部固定在一块厚钢板上，该钢板通过钢丝绳减振器与另一块厚钢板相连，下面的厚钢板再与激励器相连，承受加速度激励，模拟基础运动。为保证上下二块钢板平行地作水平运动，该二钢板用四根钢杆通过滚珠轴悬挂在刚性架上，形成单摆系统。钢板侧面也用滚珠轴承导向，构成一副简单的水平滑台。由BK1027正弦随机讯号发生器产生正弦信号，通过功放对下钢板扫频激励，激励点的加速度讯号通过前置放大器回到BK1027形成伺服遮路，保持5~50 Hz范围内激励为常水平。对第一组试件在有基础隔振及无基础隔振两种情况下进行了扫频试验，其加速度频响曲线见图3。

图3中横坐标为对数扫频刻度，纵坐标为不同点的加速度响应。显然，加基础隔振器后共振响应被大大压缩了。曲线2有四个峰值响

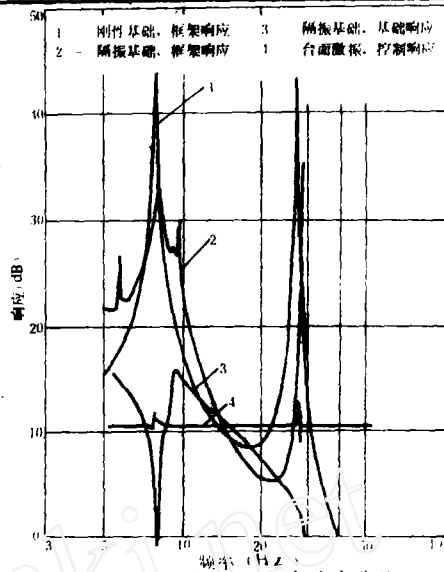


图3 基础隔振框架频率响应曲线

应。第一个发生在5.6Hz附近，是由于引进隔振器后系统增加了一个自由度，即隔振器的基频共振，在这个模态框架反应为准刚体，变形集中在减振器上，减振器变形大、阻尼也高，故此峰值不高。曲线2的第2个峰对应于框架本身一阶共振，此时框架底部为一节点，故曲线3有一低谷，基础减振器变形很小，阻尼也低，但框架运动已落入减振器的隔振频带，故此峰值较无隔振器的框架响应峰要低很多，也就是说引进隔振器后使框架共振响应降低了。曲线2的第三个峰发生在 $f_2/3$ 附近， $f_2=29\text{Hz}$ 为框架的二阶共振频率，说明这个峰是非线性引起的次谐波。在框架上加约束阻尼层处理后，这个峰值便被压缩了（为节省篇幅此试验及其响应曲线从略）。以上是第一组基础隔振试验，第二组试验的结果见图4。

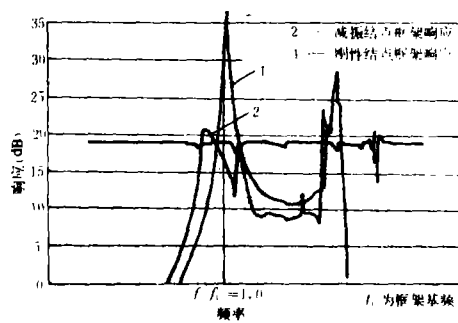


图4 减振结点框架试验频响曲线

试件右上端结点分两种固定方式，一是通过减振器与刚性壁相连，另一是直接与刚性壁相连。图4中曲线1对应于框架右上端直接与刚性壁相连的频响曲线， $f_1$ 为框架的基频，其峰值达37dB，曲线2为框架通过减振器与刚性壁相连时的频响曲线，在 $f/f_1 = 0.9$ 处响应峰为21dB，较曲线1的峰值降低了16dB。由此响应曲线可以看出减振结点与摩擦结点很相似，当 $f/f_1 < 1.0$ ，即激励频率小于基频时，曲线2与1基本上是平行的，说明在此频段内减振器的刚度很大，近似于刚性固定，当然此时减振器的刚度毕竟是有限的，故曲线2比曲线1向左频移。当 $f/f_1$ 达到0.9响应超过一门槛值，减振器刚度急剧下降，因而改变了框架的自然频率，使共振难以建立，这与摩擦滑动限制结构共振的情况是很相似的。下一节由测定的钢丝绳减振器的等效刚度——振幅曲线图7可以看出它确实具有与滑动摩擦相似的、随振幅急剧变化的刚度曲线。这一点在应用它来控制结构振动方面是很重要的，如果将钢丝绳减振器安置在结构的某些应力集中——易于损伤的部位，它就能作为“机械保险”装置。在一般激励下保持正常刚度，而在意外的强激励下急剧软化，改变结构受力状态，使共振放大难以建立。

(三) 试别减振器的等效刚度与阻尼

减振器由多股不锈钢丝绕成，当振幅很小时，钢丝绳股间靠摩擦力紧固，相互不发生滑移；当振幅足够大时，钢丝绳股间发生相对滑移，因此在简谐激励下产生滞回现象，如图5，其力—位移曲线具有双值性。当 $dy/d\theta > 0$ 时， $F = n_1(y)$ ，当 $dy/d\theta < 0$ 时 $F = n_2(y)$ 。 $\theta = \omega t$ 。如果用稳态位移激励，即 $y = a \cos \theta$  则有<sup>8</sup>

$$K_{eq} = \frac{1}{na} \int_{-\pi}^{\pi} n(y) \cos \theta d\theta$$

$$= \frac{2}{\pi a} \int_0^{\pi} g(y) \cos \theta d\theta \quad (1)$$

$$g(y) = \frac{1}{2} [n_1(y) + n_2(y)] \quad (2)$$

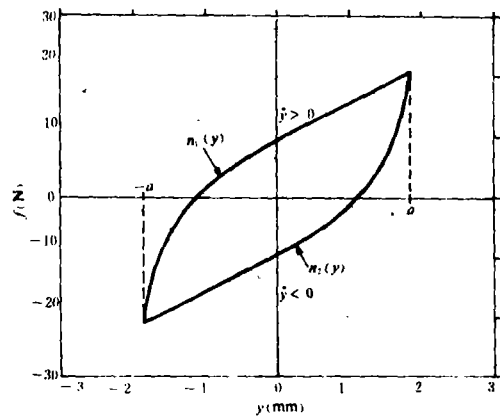


图5 钢丝绳减振器  $f - y$  本构曲线

$$C_{eq} = \frac{1}{\omega n a} \int_{-\pi}^{\pi} n(y) \sin \theta d\theta \quad (3)$$

$$= \frac{2}{\omega \pi a} \int_0^{\pi} h(y) \sin \theta d\theta$$

$$= \frac{2}{\omega \pi a} \int_{-a}^a h(y) dy \quad (4)$$

$$h(g) = \frac{1}{2} [n_1(y) - n_2(y)] \quad (5)$$

由此可知，只要能给出滞回曲线 $n_1(y)$ 、 $n_2(y)$ 或 $g(y)$ 、 $h(y)$ 的表达式，便可以得到等效线性刚度及阻尼。严格说来，这些曲线既是频率也是振幅的函数，为此，我们在5~30Hz范围内用不同频率、不同幅度的稳态正弦力对剪切式减振器进行了激励，测得减振器的变形加速度 $\ddot{y}$ 与力 $F$ 。将它们同步记入磁带记录仪，回放后经A/D变换、数字采样、滤波，并将 $\ddot{y}$ 数值积分为 $y(t_k)$ ， $k = 1, \dots, N$ ，将对应的 $y(t_k)$ 与 $F(t_k)$ 输入微机，用曲线多项式拟合实验数据，得到 $F - y$ 曲线如图6。图6是激励频率为6Hz，不同振幅的 $f - y$ 曲线，分别对9, 12, 15, 20, 25, 30Hz用不同振幅激励，得到的曲线基本上与图6相同，因此得到一个结论，这种钢丝绳减振器的力—位移曲线只与振幅有关，在30Hz以内与频率几乎没有关系，这个结论在其它摩擦型减振器测试时也曾有过。它对曲线的描述与分析提供了很大方便，即多项式系数只是幅度函数，与频率无关，用五次多项式对实验数据进行拟合的结果，得到：

$$g(y) = k_1(a)y + k_3(a)y^3 + k_5(a)y^5 \quad (6)$$

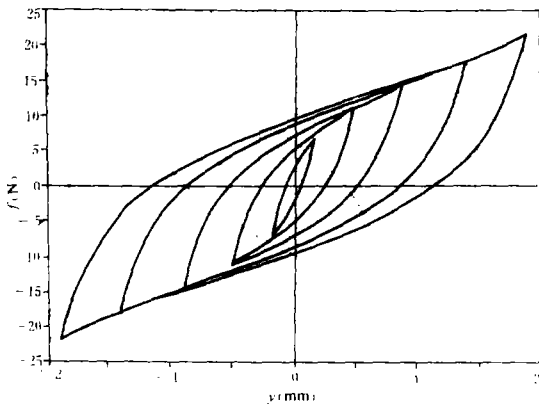


图 6  $f-y$  拟合曲线

$$h(y) = k_0(a) + k_1(a)y^2 + k_3(a)y^4 \quad (7)$$

将 (6) 式代入 (1) 式得:

$$K_{eq} = [k_1(a) + \frac{3}{4}k_3(a)a^2 + \frac{5}{8}k_5(a)a^4] / \pi \quad (8)$$

根据实验数据曲线拟合得到的  $K_{eq}-a$  曲线如图 7:

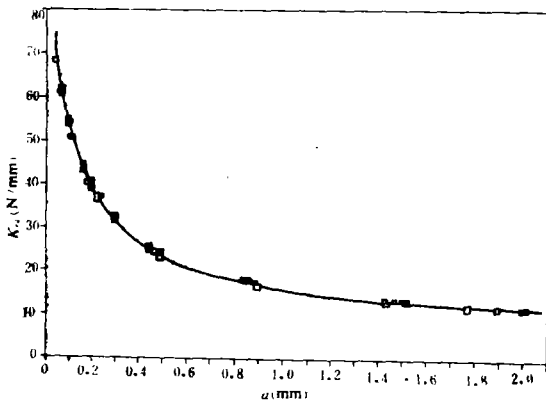


图 7  $K_{eq}-a$  实验数据拟合曲线

可见在小振幅下钢丝绳减振器具有很大刚度, 振幅增大后它的刚度急剧锐减, 至一定幅度后刚度趋于一个低值常数。将 (7) 代入 (4) 式便可得  $C_{eq}(a)$ , 令  $S = C_{eq}\omega a^2$ , 由实验数据拟

参 考

- 1 Chang C.S., Tian Q.L.: An Experimental Study of the Non-linear Behavior of a Stranded Cable and Dry Friction Damper *Shock and Vibration Bull.* 1982 (52)
- 2 Pall Avtar S., Marsh Cedric, Fazio Paul: Friction Joints for Seismic (下转第20页)

合得到的  $S-a$  曲线如图 8。

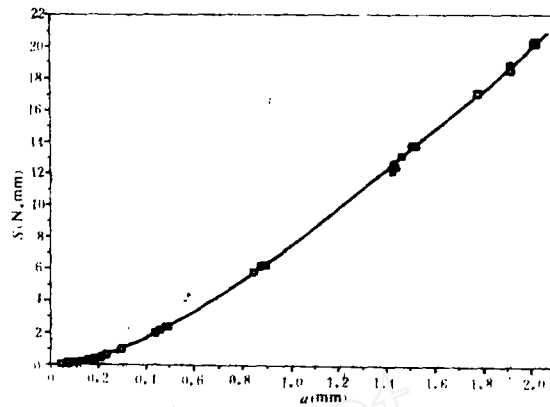


图 8  $S-a$  实验数据拟合曲线

由图 7 可以看出  $S$  随振幅增大至一定程度后呈线性关系, 这一点及图 6 的大振幅时刚度趋于常数两个特征与双线性干摩擦系统的特征是吻合的, 即当振幅很大时, 双线性滞迟模型的等效刚度从  $(K_a + K_b)$  降为  $K_a$ , 而它的等效粘性阻尼力则上升为  $\frac{4}{\pi}F_f$ , 力一位移滞迟迴

线面积为  $F_f \frac{a}{\pi}$ , 与振幅为线性关系。由此可见可用钢丝绳减振器代替干摩擦减振元件, 用以控制结构振动。

(四) 结 论

本文通过实验研究, 证明钢丝绳减振器具有与干摩擦系统相似的动力性能, 可以用作非线性减振元件以改变结构的动态特性, 保护其在意外过激情况下免遭损坏。对钢丝绳性能的认识与描述进行了研究, 给出了其等效线性刚度与阻尼随幅度变化的曲线, 应用这些曲线可用等效线性化法分析减振系统。本文的实验研究是在香港理工学院进行的, 得到了香港 U.P.G.C. 基金资助与国家自然科学基金资助, 在此一并致谢。计算与分析将另文处理。

文 献

- 3 G. Hartmann: Use of Tungsten Carbide Rolling Rings in a Wire Rod Mill. *Wire World International*, 1977. 4-5
- 4 The Second of a Series of Articles by Sandvik, Composite Roll Design and Applications — Roll Design and Mounting. *Wire Industry*, 1973(3)
- 5 W. H. Rackoff: A New Concept for Bar Mill Rolls. *Iron and Steel Engineer*, 1978(9)
- 6 Ing. Rvdof Kodrna: Bandážované Hutní Valce Spojené Průmyslově, *Hutník*, 1981(1)
- 7 王步瀛编, 机械零件强度计算的理论和方法. 高等教育出版社, 1986. 2
- 8 Kil. Mittal: *Adhesive Joints*. A Division of Plenum Publishing Corp., 1984
- 9 H. A. 比尔格等著, 姚兆译: 机械零件强度计算手册, 机械工业出版社, 1987. 3
- 10 高再荣译: 用作轧辊材料的硬质合金性能, 硬质合金, 1985(4)
- 11 Kurt G. Edsmtar: Experience with Carbide Rolls for Wire and Rod Mills, *Iron and Steel Engineer*, 1976 (11)
- 12 孙道恒: 高速线材轧机辊环强度的研究. 东北工学院硕士研究生论文, 1989. 12

## ANALYSIS OF THE ROLL-RING'S ASSEMBLED-STRESS IN HIGH-SPEED WIRE ROLLING MILL

Sun Daoheng Cui Guangchun

(Northeast University of Technology)

(上接第10页) Control of Large Panel Structures, *Jour. Prestressed Concrete Institute*, 1980, 25(6)

- 3 Pall A. S., Marsh C.: Optimum Seismic Resistance of Large Panel Structures Using Limited Slip Bolted Joints, *Proc., 7th World Conf. on Earthquake Engng.*, Turkey, 1980, 4
- 4 Kelly J. M.: Aseismic Base Isolation, *The Shock and Vibration Digest*, 1982, 14(5)
- 5 Pall A. S., Verganlakis V.: Friction Dampers for Seismic Control of Concordia University Library Building, *Proc. 5th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ottawa, Canada, 1987
- 6 Robinson W. H. and Tucker A. G.: A Lead-Rubber Shear Damper, *Bull. New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1977, 10(3)
- 7 Lekuch H.: Shock and Vibration Isolation in Severe Environments, *Noise and Vibration Control Worldwide*, Sept. 1986
- 8 Atherton D. P.: *Nonlinear Control Engineering*, Van Nostrand Reinhold London, 1982
- 10 张强星, Sainsbury M. G.: 干摩擦系统的简化, 振动与冲击, 1987(1)

## STRUCTURAL VIBRATION CONTROL BY USING THE WIRE-ROPE ISOLATOR

Tian Qianli (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Gao Zanming (Hong Kong Polytechnic)

Ni Yiqing (Hangzhou Architectural and Civil Engineering Institute)