

## 干摩擦控制振动的应用

张强星 田千里

(中国科学院力学研究所)

**主题词** 干摩擦; 振动控制; 阻尼振动; 隔振器; 隔震系统

干摩擦能衰减机械振动的现象早为人们所熟悉。但是很长一段时期,干摩擦应用到控制振动上的例子不多见。这是由于干摩擦的性能不好掌握和干摩擦会使系统变为非线性,设计、计算就很复杂。

干摩擦振动系统是非线性系统。以振动系统中的一个干摩擦接头来说明。当接头上的力小于接头的干摩擦力时,干摩擦接头不发生滑动,振动系统为线性。一旦接头上的力超过了接头的干摩擦力,接头就要滑动。干摩擦力总是阻碍运动。例如在正弦力作用下,干摩擦接头有时不滑动,有时滑动,外力作用一周期,干摩擦力和滑动量就形成一个迟滞回线,显示出刚度的非线性和阻尼的非线性。

早在1930年Den Hartog<sup>[1]</sup>对理想的干摩擦振动系统作了分析,求得精确解。他正确地总结出干摩擦控制振动的范围是很有限的,因为在共振区,如果外力等于或超过干摩擦力的 $4/\pi$ 倍时系统的响应就为无穷大。也许这就是为什么以前很少有人利用干摩擦来控制振动的道理。当时有许多人研究金属内耗<sup>[2]</sup>,希望以此增加阻尼来控制振动,但成效不大。

60年代随着宇航和潜艇的发展,研制出大阻尼的粘弹性材料和提出约束阻尼减振技术<sup>[3]</sup>,成功地抑制了振动结构上的多个共振峰,使共振放大倍数从几十倍下降到3—5倍。粘弹性阻尼减振技术已从军用推广到民用工业,广泛地应用到各个领域<sup>[4]</sup>。但是粘弹性材料是一种高分子材料,对温度敏感,在环境温度变化大于60℃的地方,减振效果就不理想。因此干摩擦阻尼又开始受到注意。现代交通工具的隔振和缓和冲击,需要具有软化刚度、大阻尼的非线性隔振器,这也促进了干摩擦隔振器的研究。近年来,抗地震的隔振系统的研究又将干摩擦研究推向一个高潮。现在分干摩擦阻尼、干摩擦隔振和干摩擦抗震三个方面介绍应用情况。

**1. 干摩擦阻尼** 在机械振动中,最令人注意的和担忧的是共振现象。有些振源如火箭、喷气机、地震、海浪等的激振频带宽,无法通过机械设计避开共振现象。共振峰的高低与结构阻尼密切相关<sup>[1]</sup>。本文只限于介绍干摩擦阻尼的应用情况。

凡是铆、螺接的地方就存在着干摩擦阻尼。实际结构的阻尼中,90%来自接头中的干摩擦阻尼<sup>[5]</sup>。一般螺接结构的共振放大倍数为几十倍。机床螺接交接面的阻尼也属于这一类

型<sup>[6]</sup>。近年来干摩擦研究的成果已应用到衰减结构的振动。例如:

- 在 20 层楼的预制板结构的接头中,加入汽车垫片后,楼顶挠度下降一半左右<sup>[7]</sup>。
- 核电站管道系统增加了干摩擦阻尼<sup>[8]</sup>。
- 悬臂结构顶部安装干摩擦吸振器,顶部加速度从 80g 下降到 15g<sup>[9]</sup>。
- 用于摩擦阻尼控制燃气轮机的叶片振动<sup>[10,11]</sup>。Jones<sup>[12]</sup> 是著名的阻尼控振专家,70 年代他曾研究用陶瓷涂层来增加高温叶片的阻尼,但近年来,他的研究也转到了干摩擦阻尼上。

**2. 干摩擦隔振系统** 为了减少动力装置的振动传到结构上去,或是为了使结构的振动不影响仪器的正常工作,通常都要采用隔振器。近年来发展的粘弹性大阻尼材料,已用于研制成大阻尼隔振系统或隔振器,但还不适用于某些恶劣的环境,因此需研制出特殊的隔振系统,其中利用干摩擦原理的有:

- 宇航真空环境隔振仪器板是用螺旋毛毡板组成,它不会挥发物质而污染仪器,仪器板的共振放大倍数约为 3 倍<sup>[13]</sup>。
- 高速飞行器惯性导航平台隔振支架由点焊钢丝束组成,钢丝之间的干摩擦提供的阻尼共振放大倍数可低到 2.8 倍<sup>[14]</sup>。
- 用途广泛的钢丝绳隔振器<sup>[15,16]</sup>,它象橡胶隔振器一样使用方便,且具有以下优点:①钢丝绳之间的干摩擦使损耗因子高达 0.34;②软化刚度,能储存冲击能量缓和冲击力,隔振系统的共振频率随激振水平的加大而下降,进一步改善隔振效果;③为三向隔振器;④可在腐蚀、真空、高温、低温环境中使用;⑤隔振器高度小;⑥隔振系统的共振频率低。

**3. 干摩擦隔震器的抗震设计** 传统的抗震设计是从加强结构强度的角度着手。地震强度越大,抗震设计的费用就越昂贵。何况至今估计地震强度也没有十分把握。从技术上讲,地震强度太大时,就不可能从这个角度设计出安全可靠的抗震结构<sup>[17]</sup>。

近 10 年来,欧美各国已从隔震角度来设计抗震结构<sup>[18,19]</sup>。这是一种革命性的抗震设计思想。1985 年《核工程和设计》杂志出版的专辑“核电站的隔震设计”<sup>[20]</sup>,介绍了当前各种隔震系统,其优点可归纳如下:①隔震器大大降低了结构的设计输入载荷,一般可降低一半到 2/3<sup>[19]</sup>,节省抗震设计的投资。②隔震器之上的抗震结构近似于刚体运动<sup>[21,22]</sup>,大大简化了管道系统、控制设备等等的抗震设计。

有关干摩擦隔震系统的报道可从近 3 年的《地震工程和结构动力学》杂志看到<sup>[23-27]</sup>。

本文着重介绍法国核电站的干摩擦隔震系统<sup>[22]</sup>。传统的橡胶隔震器由多层橡胶和多层钢片硫化而成。地震时橡胶隔震器下部随地面运动,而其上部及建筑物则保持“不动”。这样就减小了结构的地震应力。结构的矛盾转化成为隔震器的大变形。在特大地震时,有可能撕裂隔震器的橡胶而使建筑物倾倒。针对这个缺点,法国研制成干摩擦隔震器。在橡胶隔震器之上和建筑物底部之间插入干摩擦垫片,垫片为青铜片和不锈钢片,它们的摩擦系数约为 0.2。南非 Koeberg 核电站作为整体安放在 1600 个干摩擦隔震器之上。在中、小地震时,干摩擦片起不了作用,由橡胶隔震器隔震;而在大地震时,当橡胶隔震器达到临界变形量时,传到橡胶隔震器的力超过了垫片之间的干摩擦力,橡胶隔震器随着地面运动而又相对于建筑物底部滑动,从而保护了橡胶隔震器,也大大降低了建筑物的输入载荷。

干摩擦隔震器的抗震设计比传统的抗震设计有以下优点:①传递到核电站的载荷不再是

不可知的地震力,而限为垫片之间的干摩擦力。②核电站隔震系统的频率在1Hz左右,可隔去地震波的高频成分,所以整个核电站在干摩擦隔震器之上就象刚体一样运动,而不需考虑核电站本身结构特性。这就简化或省去了管道系统和电站设备的抗震设计。③干摩擦隔震器的抗震结构具有软化刚度和大阻尼的非线性特性,共振频率随激振水平的加大而变小,有利于隔震和缓冲<sup>[28]</sup>。④核电站的设计可以标准化。法国在70年代有34台90万千瓦核电站采用标准化设计,大大节约了设计费用。他们在80年代又提出130万千瓦核电站按标准化干摩擦隔震器的抗震设计,已有14台130万千瓦核电站的订单<sup>[19]</sup>。

苏联有一座九层建筑物采用干摩擦隔震器,经受了一次烈度为7级的地震,传到建筑物上的力仅为地震力的1/4—1/5。

国内也开始注意到了干摩擦控制振动的应用基础研究<sup>[9,13,14,16,28-36]</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 Den Hartog J. P., *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill (1956).
- 2 Lazan B. J., *Damping of Materials and Members in Structural Mechanics*, Pergamon Press (1968).
- 3 Torvik P. J., *Damping application for vibration control*, ASME ADM No.38 (1980).
- 4 王曼霞,张强星,黄作义,冯纪生,美国阻尼减振技术,航天部出国考察报告,81—9 (1981).
- 5 Beards C. F., Woowat A., *Trans. ASME, J. Vib., Acous., Sound and Reliab. in Design*, 106 (1985): 26.
- 6 Ito Y., Masako M., *Bul. Jap. Soc. Mech. Eng.*, 18 (1975): 117.
- 7 Pall A. S., Marsh C., Fazio P., *J. Prestressed Concrete Institute*, 25, 6 (1980): 38.
- 8 Stott S. J., Masri S. F., Rept. No. CE 78—09, Univ. South California (1978).
- 9 张强星,田千里, *Shock and Vib. Bul.*, 52, 4 (1982): 155.
- 10 Ramamurti V., et al, *Shock and Vib. Dig.*, 16, 8 (1984): 13.
- 11 Muszynska A., Jones D. I. G., *J. Sound and Vib.*, 86, 1 (1983): 107.
- 12 Jones D. I. G., Cannon C. M., *AIAA J. Aircraft*, 12 (1975): 226.
- 13 申仲翰, *Trans. ASME J. Vib., Acous., Stress and Rel. in Design*, 107 (1985): 375.
- 14 上海仪表厂,高速飞行器金属平台减振器 (1982).
- 15 Gilbert C., Lekuch H., *Mechanical Engineering Coct.* (1982): 58.
- 16 张强星,许滨, *噪声与振动控制*, 2 (1985): 8.
- 17 Ikononou A. S., *Nuclear Eng. and Design*, 85 (1985): 201.
- 18 Kelly J.M., 2nd U.S. Nat. Conf. on Earthquake Eng. (1979): 823.
- 19 Eidinger J. M., Kelly J. M., *Nuclear Eng. and Design*, 48 (1985): 383.
- 20 Hadjian A. H., *ibid*, 84, 3 (1985).
- 21 Derham C. J., Kelly J. M., Thomas A. G., *ibid*, 84 (1985): 417.
- 22 Gueraud R., et al, *ibid*, 84 (1985): 363.
- 23 Kelly J. M., Beucke K. E., *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, 11 (1983): 33.
- 24 Constantindu M. C., Tadjbaksh I. G., *E. E. S. C.*, 12 (1984): 293.
- 25 Westermo B., Unwadia F., *ibid*, 11 (1983): 135.
- 26 Mostaghel N., et al, *ibid*, 11 (1983): 355.
- 27 Wolf J. P., et al, *ibid*, 11 (1983): 483.
- 28 张强星,董智法,重大工程抗震问题学术会议论文集(哈尔滨)(1985).
- 29 田千里, *噪声与振动控制*, 4 (1984).
- 30 —, *核电站的抗震*. (待发表)
- 31 —, *李盛章, 振动与冲击*, 4 (1982): 28.
- 32 —, *Shock and Vib. Bull.*, 54, 4 (1984).
- 33 廖德章,田千里,张佑启, *Proc. Instn. Civ. Engrs.* (Mar., 1986).
- 34 张强星, *噪声与振动控制*, 5 (1984): 1.
- 35 —, Sainsbury M.G., 第2届全国振动学术会议(西安)(1984).
- 36 —, McLachlan K.E., Popplewell N., *振动与冲击*, 3 (1984).

# THE APPLICATIONS OF DRY FRICTION IN VIBRATION CONTROL

Zhang Qiang-xing Tian Qian-li  
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

## Abstract

The applications of dry friction in vibration control are reviewed under three categories; 1. Dry friction as a means to damp resonant vibrations. 2. Non-linear isolator with dry friction to absorb impact energy and to damp resonant vibrations. 3. Dry friction aseismic isolation system to protect the building from earthquake by restricting the transmitted force to dry-frictional force level.

**Keywords** *dry friction; vibration control; damping resonant vibration; isolator; aseismic isolation system.*

---

## 中美（国际）多相流动学术会议（1987年8月，杭州）征文

为促进中国、美国及其他国家和地区多相流动研究的学术交流，在中国力学学会的支持下，由浙江大学负责于1987年8月3—5日在杭州召开中美（国际）多相流动学术会议。现开始国内征文。征文范围为流化床，燃烧，浆体流动，气力输送，分离系统及气体净化技术，实验方法及测量技术，以及粉尘流动七个方面在理论、实验、数值模拟和工程应用等所取得的最新成果。论文必须未在国内外刊物上公开发表过。现已组成会议组织委员会。会议主席中方为浙江大学力学系范正翘教授，美方为美国机械工程师协会（ASME）多相流分会主席、华盛顿州立大学机械系 C.T.Crowe 教授；秘书长为浙江大学力学系副主任陈越南副教授。

论文摘要截止日期 1986, 9, 1; 论文摘要录取通知 1986, 11, 1; 论文全文截止日期 1987, 1, 1; 论文录取通知日期 1987, 4, 1; 最后提交论文日期 1987, 6, 1。以上均以邮戳日期为准。要求送中文和英文稿各两份。来稿概不退还。来稿请寄：杭州市浙江大学力学系陈越南或许学咨。来稿由作者单位负责保密审查。会议将出正式会议论文集。

陈越南 许学咨