

智能材料在结构振动控制中的应用研究

殷青英, 翁光远

陕西交通职业技术学院公路工程系, 西安 710018

摘要 半主动振动控制系统能较好地克服被动控制和主动控制的缺点, 利用智能材料作为结构振动控制的驱动器是土木工程结构振动控制研究的热点问题。应用智能材料对结构振动进行半主动控制可以有效地减少控制过程中所需的外部能量, 通过有效地布置半主动控制的驱动元件和合理地确定振动控制算法, 能更好地实现对结构振动的有效控制, 从而减少地震、强风等自然灾害对建筑物的损害。同时, 半主动控制技术的研究也能更好地促使新型智能材料得到广泛的应用。从智能材料的主要物理力学性能、恢复力、外界影响因素等出发, 分别综述了电/磁流变流体、磁致伸缩材料、压电材料、形状记忆合金材料、磁控形状记忆材料的应用研究进展, 分析了目前存在的主要问题。

关键词 结构振动; 智能材料; 驱动器

中图分类号 TU311.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)12-0093-05

Applications of Intelligent Materials in Structural Vibration

YIN Qingying, WENG Guangyuan

Department of Highway Engineering, Shaanxi College of
Communication Technology, Xi'an 710018, China

Abstract Semi-active control of structural vibration can effectively overcome the shortcomings of an active control system or a passive control system, when the actuator is made of intelligent materials. Semi-active control using intelligent materials can effectively reduce external energy. Through effective arrangement of semi-active control driving components and reasonable choice of the vibration control algorithm, structural vibration control can be more effective, so, damage of buildings caused by earthquake, strong winds can be effectively avoided. The semi-active control technology also can better promote a wide application of new intelligent materials. This paper analyzes the main physical and mechanical features, resilience, external influencing factors of intelligent materials, and the research progress in application fields, such as electrical/magnetorheological fluid, magnetostrictive materials, piezoelectric materials, shape memory alloy material, magnetic shape memory alloy materials.

Keywords structural vibration; intelligent material; actuator

0 引言

科学建造土木工程结构, 提高其抗震、抗风能力, 对于减轻灾害损失具有重大的意义。结构振动控制是在结构的某些部位设置一些控制装置, 在结构振动时施加一组控制力或调整结构的动力特性, 从而减小振动响应, 以使之满足更高的安全和功能要求。经过 30 年的理论研究和工程实践, 结构振动控制技术^[1]已形成包括被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制的新兴学科。

智能材料的出现和发展为结构振动控制提供了一条崭新的实现途径, 应用智能材料^[2]的结构控制已成为振动控制研究的前沿领域。由智能材料制成的控制器具有构造简单、调节驱动容易、能耗小、反应迅速、无时滞等优点, 在结构半主动控制中具有广阔的应用前景。

1 结构振动控制

被动控制中隔震减震的概念由来已久, 目前中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001) 中已经增加了有关隔震和减震的内容^[3], 工程结构应用橡胶支座的推荐性设计标准亦已获批准。但结构被动控制有一定的局限性: 对于隔震技术, 在 IV 类场地土上采用隔震体系是不安全的, 长周期的震动会对隔震建筑带来不利影响; 对于消能减振技术, 消能元件往往是主体结构的一个组成部分, 并不能完全避免主体结构出现塑性变形, 因而无法克服“延性结构”设计的缺陷。结构振动主动控制^[4]对于提高建筑物抵抗不确定性地面运动、直接减少输入干扰力以及在地震发生时连续自动调整结构动力特性等方面均优于被动控制。但该技术在实际应用时存在一个

收稿日期: 2008-12-29

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(90715003); 教育部高等学校博士点基金项目(20050703004); 陕西省自然科学基金项目(2007E205); 陕西工业攻关项目(2008K07-31)

作者简介: 殷青英, 副教授, 研究方向为结构振动控制及健康监测, 电子信箱: weng_guangyuan@163.com



2.2 磁致伸缩

目前稀土大磁致伸缩材料在频率响应方面取得重大突破。以(Tb, Dy)Fe₂为基的三元合金 Tb_xDy_{1-x}Fe_{2-y} (0.27<x<0.3, 0<y<0.5) 在室温附近有最大的磁致伸缩与磁各向异性之比,被称为 Terfenol-D。此类合金已经商品化,目前市场上的稀土超磁致伸缩材料主要指的就是这一类合金^[6,8]。磁致伸缩材料无论在功率转换效率、响应频率、低压效果及可靠性方面都有着优良的性能。例如,使用磁致伸缩材料制成的执行器(Actuator)来进行有源消振,可使飞机客舱内的噪声降低20 dB,普通轿车内的振动减弱 30 dB。在超声技术上,使用磁致伸缩材料能制造出功率、变幅杆位移更大的超声换能器;制成的超声外科手术刀,其尺寸比压电陶瓷超声手术刀小而效率更高。由于这种磁控型的超磁致伸缩材料具有较高的频率响应速度,且易于控制,非常适合于微位移执行器。同样,在位移控制系统、传感器技术、自动化与通信技术、阀门和流量控制方面也具有广阔的应用前景,其应用的新领域也在不断探索开发中。目前国内外将超磁致伸缩材料应用于超精密加工中的微位移驱动器的例子也很多,如西北工业大学^[6]研制的微位移驱动器可实现位移分辨率达 0.5 nm,行程范围达 40 μm。但当位置控制执行器所需行程较大时,其变形量仍然过小,不能很好地满足要求。

尽管如此,磁致伸缩材料仍有诸多难以克服的缺点和局限。以 Terfenol-D 材料为例,其在实验中得到的最大磁致伸缩值已接近其理论最大值,但其理论最大磁致伸缩值也只有 2.45×10⁻³,且这类材料还普遍具有易脆性,这使得机械加工非常困难;此外,稀土金属的价格较为昂贵,高频下涡流损耗也较大,从而使得磁致伸缩材料的实际应用受到很大限制。

2.3 压电材料

压电陶瓷材料在外加电场作用下会产生伸缩变形,这就是逆压电效应,压电智能驱动器就是应用了压电材料的逆压电效应。压电陶瓷应用于作动器中时,具有励磁功率小和响应速度快的优点。早在 1922 年, Langevin 就建议将压电晶体

材料制成驱动器。目前已知的压电材料已有近千种,其中压电陶瓷是研究智能工程结构驱动装置时较为常用的一种。压电陶瓷驱动器主要有薄片式和叠堆式两种。薄片式压电陶瓷驱动器所能提供的驱动力小,因而在轻质的桁架、梁、板等柔性结构中应用较多,不适用于复杂的土木工程结构减振系统当中。压电陶瓷叠堆式驱动器,是由十几至几百个压电陶瓷薄片以力学上串联、电学上并联的形式,用导电聚合物黏结在一起制成的,这样不但可使压电陶瓷片做得很薄,而且可降低驱动电压,增加驱动器的位移。但压电驱动器的极限应变普遍较小,目前市场上压电材料的极限应变一般在 0.1%左右,部分极限应变变量可达 0.2%,最新的压电单晶陶瓷材料的极限应变变量也只有 0.5%^[9]。显然,一般情况下压电驱动器不能承受实际建筑、桥梁等土建结构在地震动或强风作用下的变位,这已成为制约其在土木工程结构控制中得到实际应用的因素之一。

随着对压电传感器与驱动器研究的深入,自感知压电驱动技术^[10]已被实现,其关键技术在于如何区分出加在压电元件上的驱动信号和由于结构变形而产生的电荷信号。其中有两种方法:①在压电元件两端并联一个参考电容,再通过适当的调电路得到压电元件的应变信号;②利用电桥平衡从压电元件两端提取感应电荷。自感知压电驱动技术还不成熟,将其应用于土木工程结构控制仍有很大难度。但是,若能够在智能土木结构中实现此种方法,不但可以大幅度减少在土木工程结构中的布线,而且系统的集成化程度能有大幅度的提高。

2.4 形状记忆合金(SMA)

SMA 作为驱动元件的原理是由于 SMA 能“记住”其在母相的形状。当形状恢复受到限制时,合金会产生很大的回复力,从而对约束体产生作用。Huang^[11]对以 Ni-Ti、Cu-Zn-Al 和 Cu-Al-Ni 3 种 SMA 材料为驱动器的性能进行了系统的比较。结果显示, Ni-Ti SMA 除了价格较高外,大多数性能都优于其他两种合金;对于不同智能材料的驱动器^[12](表 2), Ni-Ti

表 2 智能材料驱动器的性能指标比较
Table 2 Performance comparison of actuators made of different smart material

性能	薄片式压电材料	叠堆式压电材料	磁致材料	磁控形状记忆合金
控制场	电场	电场	磁场	磁场
最大应变 $\varepsilon/(\mu\text{m}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.3	1.25	1.6	100
输出量 $\sigma_{bl}\times\varepsilon/(\text{MPa}\cdot\mu\text{m}\cdot\text{mm}^{-1})$	6	25	112	300
弹性模量/GPa	48~74	45~62	25~35	7.7
抗拉强度/MPa	5~50	5~30	28	—
抗压强度/MPa	60	50	700	700
居里温度/°C	200~350	200~350	380	103
最大可控温度/°C	100	100	150	70
电阻系数/ $(\Omega\cdot\text{m})$	10 ¹⁰	10 ¹⁰	58×10 ⁻⁸	80×10 ⁻⁵
相对电容率	800~2 400	800~2 400	—	—
相对磁导率	1	1	3~10	1.5~40
耦合因子/%	75	70	75	75
最大能量密度/(kJ·m ⁻³)	2	18.5	27	90
最大拉力场强度/(MV·m ⁻¹)	2	2	240	400

SMA 除了响应频率较低以外,其他性能也都很好,因此它应是土木工程中首选的驱动器材料之一。但是,目前 SMA 作为驱动器在航空、航天等领域研究和应用的比较多,在土木工程中还不多见。

王征等^[13]将 SMA 作为分散驱动器埋入或粘贴在玻璃钢悬臂梁上,利用它的形状记忆效应进行结构的振动主动控制,对梁的一、二阶共振状态进行了试验研究。结果表明,SMA 触发后,梁的共振频率均减小,自由端振幅减小显著,最多减小了 54.7%。Shu 等^[14]指出了 SMA 外部驱动器的优点:其对悬臂梁的弹性刚度的增加可以忽略不计;同样驱动力作用下,其产生的驱动力矩比内部埋入 SMA 产生的大;有利于 SMA 的快速冷却,这对于驱动器在高频情况下进行结构形状控制非常重要。Lagoudas 等^[15]设计了一种薄带 SMA 驱动器,这种驱动器在峰值应力为 145 MPa 的情况下,驱动频率可达 30 Hz。

尽管 SMA 驱动器大多是利用它的形状记忆效应,但 SMA 的应力诱发马氏体相变明显地受到温度变化的影响,在振动过程中系统的阻尼与刚度都可能随着温度的变化而改变。王社良和苏三庆^[16-17]利用这一性质研究了超弹性 SMA 弹簧质量振子的动力响应,并通过动力反应分析检验了其减振机理和效果,通过调节温度实现了对结构的振动控制。

2.5 磁控形状记忆合金 (MSMA)

MSMA 驱动器是通过外加磁场使 MSMA 发生形变而产生机械运动的,通常由 MSMA 材料、铁心和线圈^[18]组成。常见的 MSMA 驱动器的基本结构见图 3。磁场由电磁铁产生,磁场大小与方向可通过调节电磁铁励磁绕组的电流控制。为使较小的磁场产生较大的变形运动,外加磁场方向应与 MSMA 材料产生变形的方向横向垂直。当 MSMA 元件中的磁场达一定值时,元件发生变形;当外加应力和磁场消失时,MSMA 材料保持变形后的值不变,材料本身不能恢复变形,需外加压力,这种恢复力由弹簧实现,磁场去掉以后,加在 MSMA 元件上的弹簧压力使其恢复变形。

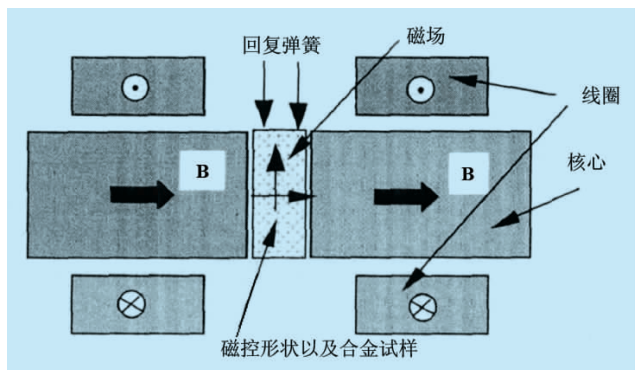


图 3 磁控形状记忆合金驱动器原理

Fig. 3 Principle of actuator made by MSMA

通过以上对 MSMA 磁控特性的分析可知,对于一个高性能的 MSMA 执行器的设计,需要解决以下 3 个技术关键问

题:① 由于 MSMA 材料的磁导率很小,产生控制 MSMA 材料变形所需的励磁功率较大,而这是所不希望的;② MSMA 材料对温度变化比较敏感,这将影响执行器的运行稳定性和控制精度;③ MSMA 的变形率与施加的预压力有较大的关系,而恢复弹簧所产生的预压力难以准确调整和动态控制,这就为 MSMA 执行器的准确控制造成了困难。

3 结论

建筑结构振动控制的半主动控制体系能够克服被动控制和主动控制的诸多缺点,是一种效果比较好的控制体系。随着智能材料研究的不断深入,半主动控制的智能驱动器也必将有着广阔的应用前景。在众多的智能材料当中,压电材料、形状记忆合金材料、磁控形状记忆合金材料、磁致伸缩材料、电磁流变体等都有着适合用于土木工程结构振动控制驱动器元件的潜能,但是目前这些材料本身的力学性能和控制

参考文献 (References)

- [1] Li Q S, Liu D K, Leung A Y T, et al. Modelling of structural response and optimization of structural control system using neural network and genetic algorithm [J]. *Structural Design of Tall Buildings*, 2000, 9(4): 279-293.
- [2] Chung L L, Reinhorn A M, Soong T T. Experiments on active control of seismic structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1988, 114(2): 241-256.
- [3] 何玉敖, 程抒星. 基于 H_{∞} 控制理论的结构半主动控制研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2000, 33(6): 769-771.
He Yuao, Cheng Shuxing. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2000, 33(6): 769-771.
- [4] 李江, 何玉敖. 隔震和半主动控制组成的结构振动混合控制系统分析 [J]. 工程力学, 2001, 3: 13-17.
Li Jiang, He Yuao. *Engineering Mechanics*, 2001, 3: 13-17.
- [5] 杨恒, 倪立峰, 李爱群. 工程结构的形状记忆合金超弹性阻尼减振技术研究进展[J]. 世界地震工程, 2004, 20(2): 86-90.
Yang Heng, Ni Lifeng, Li Aiqun. *The World Earthquake Engineering*, 2004, 20(2): 86-90.
- [6] 李扩社, 徐静, 杨红川, 等. 稀土超磁致伸缩材料发展概况 [J]. 稀土, 2004, 25(4): 51-56.
Li Kuoshe, Xu Jing, Yang Hongchuang, et al. *Rare Earth*, 2004, 25(4): 51-56.
- [7] Aldawod M, Samali B, Naghdy F, et al. Active control of along wind response of all building using a fuzzy controller [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(11): 1512-1522.
- [8] 余声明. 智能磁性材料及其应用[J]. 磁性材料及器件, 2004, 35(5): 1-4.
Yu Shengming. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2004, 35(5): 1-4.
- [9] Straub F K, Ngo H T, Anand V, et al. Development of a piezoelectric actuator for trailing edge flap control of full scale rotor blades [J]. *Smart Material and Structure*, 2001, 10(1): 25-34.

- [10] 李传兵, 廖昌荣, 张玉, 等. 压电智能结构的研究进展[J]. 压电与声光, 2002, 24(1): 42-46.
Li Chuanbing, Liao Changrong, Zhang Yu, et al. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2002, 24(1): 42-46.
- [11] Huang W. On the selection of shape memory alloys for actuators[J]. *Materials and Design*, 2002, 23(1): 11-19.
- [12] 任勇生, 王世文, 李俊宝, 等. 形状记忆合金在结构主被动振动控制中的应用[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 19-33.
Ren Yongsheng, Wang Shiwen, Li Junbao, et al. *Advances in Mechanics*, 1999, 29(1): 19-33.
- [13] 王征, 陶宝祺. 智能材料结构的振动控制[J]. 振动、测试与诊断, 1995, 15(1): 47-50.
Wang Zheng, Tao Baoqi. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 1995, 15(1): 47-50.
- [14] Shu S G, Lagoudas D C, Hughes D, et al. Modeling of a flexible beam actuated by shape memory alloy wires[J]. *Smart Mater Struct*, 1997, 6(3):

265-277.

- [15] Lagoudas D C, Bhattacharyya A. Modeling of thin layer extensional thermoelectric SMA actuators [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(3-4): 331-362.
- [16] 王社良, 苏三庆. 形状记忆合金的超弹性恢复力模型及其结构抗震控制[J]. 工业建筑, 1999, 29(3): 49-52.
Wang Sheliang, Su Sanqing. *Industrial Construction*, 1999, 29(3): 49-52.
- [17] 王社良, 巨生国, 苏三庆. 形状记忆合金的动力响应特性及振动控制[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1999, 31(1): 16-19.
Wang Sheliang, Ju Shengguo, Su Sanqing. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition*, 1999, 31(1): 16-19.
- [18] L'vov V A, Gomonaj E V, Chernenko V A. A phenomenological model of ferromagnetic martensite [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1998, 10(21): 4587-4596.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“2009 年国际基因组学大会”征文

目前基因组学的发展正面临着从“以大规模测序为目的”到“以大规模测序为手段解决科学问题”的一个转型。测序技术的发展使基因组学面临的挑战是如何提高测序通量转变为如何利用新的测序技术解决重大科学问题。藉此,中国科学院北京基因组研究所联合中国遗传学会于 2009 年 10 月 21-23 日在北京市举办“2009 年国际基因组学大会”,邀请国内外同行共同探讨基因组学发展方向。

此次会议将编印论文集,文字为英文,并择优推荐到《基因组蛋白质组与生物信息学报》(Genomics Proteomics & Bioinformatics)。征文范围包括基因组学及相关领域近年来的研究学术成果,分 4 个专题:Genome Stability and Epigenetics, Bioinformatics and Computational Biology, Genomics and Cellular Evolution, Outstanding Unanswered Questions in the Age of Genomics。投稿邮箱:icg_2009@big.ac.cn, 论文摘要截稿日期:2009 年 7 月 31 日。详见会议网站:<http://icg.big.ac.cn>

联系方式:北京市朝阳区北土城西路 7 号中国科学院北京基因组研究所科技处(100029)王爱菊;电话:010-82995375, 传真:010-82995373

·学术动态·



“中国畜牧兽医学会 2009 年学术年会”征文

近年来, SARS、高致病性禽流感、疯牛病、莱姆病等新的人畜共患病不断出现, 狂犬病、结核病、血吸虫病、日本乙型脑炎等人畜共患“旧病”又卷土重来, 使人们不禁重新思考人畜共患病问题的严重性; 而二恶英、瘦肉精、苏丹红、大肠杆菌 O157、氯霉素、三聚氰胺等食品安全事件频频发生, 动物源性食品安全问题成为人们高度关注的焦点。针对这些不断出现的动物源性食品安全问题, 2009 年 10 月中下旬举行的中国畜牧兽医学会 2009 年学术年会将以“动物源性食品安全: 畜牧兽医科技工作者面临的新挑战”为主题进行广泛深入的交流研讨, 力求从养殖生产、屠宰、畜产品加工、运输流通等环节联手把好质量关, 切实保证动物源性食品安全和人类健康。并从科学技术层面形成专家建议。

本届年会仍将评选优秀论文, 颁发中国畜牧兽医学术界的最高荣誉——“中国畜牧兽医学会奖”。

此次会议围绕动物源性食品安全问题, 从畜禽饲料、兽药、环境生态、食品卫生及检验检疫、人畜共患病与兽医公共卫生等五大方面征稿。征文截止时间: 2009 年 8 月 15 日。

联系方式: 北京朝阳区农展馆南路 9 号博雅园 1 座 106 室中国畜牧兽医学会(100125)石娟、申凌; 电话: 010-85959006; 传真: 010-85959010, 电子信箱: caav2007@163.com