

土木工程智能结构体系的研究与发展

欧进萍, 关新春

(哈尔滨建筑大学建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150008)

摘要: 本文概要地综述了感知材料、驱动材料和自修复材料等三大类主要的智能材料在土木工程中应用的概况; 阐述了土木工程结构智能监测、健康诊断、损伤修复和振动控制的发展趋势和近期研究的主要方向以及对智能材料的发展和改性的要求。

主题词: 土木工程; 智能材料; 智能结构

中图分类号: P315.976 **文献标识码:** A

State-of-the-art of smart structural systems in civil engineering

OU Jin-ping, GUAN Xin-chun

(Harbin University of Civil Engineering and Architecture, Harbin 150008)

Abstract: In this paper, the general situation of the sensory materials, active materials and self-repairing materials which are the main kinds of smart materials using in civil engineering is summarized. The direction of developing and studying in the near future of the smart inspecting, health monitoring, damnification repairing and vibration control, as well as the requirement of the developing and improving performance of the smart materials are expounded.

Key words: civil engineering; smart material; smart structure

1 前言

大型土木工程结构和基础设施, 如桥梁、超高层建筑、大跨空间结构、大型水坝、核电站、海洋采油平台以及输油、供水、供气等管网系统, 它们的使用期都长达几十年、甚至上百年。在其服役过程中, 由于环境载荷作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等不利因素的影响, 结构将不可避免地产生损伤积累、抗力衰减、甚至导致突发事件(欧进萍, 1996)。已建成使用的许多结构和设施急需采用有效的手段监测和评定其安全状况、修复和控制损伤; 新建的结构和设施总结以往的经验教训, 也已开始增设长期的“健康”监测系统及振动与损伤控制系统。

美国 80 年代中后期开始在多座桥梁上布设监测传感器, 用以验证设计假定、监视施工质量和服役安全状态, 例如, 佛罗里达州的 Sunshine Skyway Bridge 桥上安装了 500 多个传感器; 英国 80 年代后期开始研制和安装大型桥梁的监测仪器和设备, 并调查和比较了多种长期监测系统的方案(张启伟, 1999); 我国香港的 Lantau Fixed Crossing 大桥、青马大桥以及内陆的虎门桥和江阴长江大桥也都在施工期间装设了传感装置, 用以监测建成后的服役安全状态(Flint *et al.*, 1995;

收稿日期: 1999-03-24

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(59625815)和国家自然科学基金重大资助项目(59895410)

作者简介: 欧进萍, 男, 39 岁, 教授, 哈尔滨建筑大学建筑工程学院。

Chen,1995); 渤海石油公司为了确保海洋采油平台的服役安全, 对海冰条件和平台状态进行了长达 10 余年的监测; 蔡得所(1998)完成了三峡工程古洞口混凝土面板堆石坝的面板裂缝和临时船闸的大体积混凝土裂缝分布式斜交光纤传感监测系统的现场实验。土木工程结构和基础设施体积大、跨度长、分布面积大、使用期限长, 传统的传感设备组成的长期监测系统性能稳定性和耐久性都不能很好地满足工程实际的需要。近年来发展起来的高性能、大规模分布式智能传感元件为土木工程智能监测系统的发展提供了基础。

土木工程结构的振动控制研究和应用已有近 30 年的历史, 大体上可以分为三个方面: 隔震、耗能(阻尼)减振和主动控制(Housner, *et al.*,1997)。隔震桥梁和建筑已在国内外建成了数百栋, 是结构抗地震作用的一种有效途径, 已经受地震的考验。耗能减振是在结构中设置阻尼耗能元件和吸振系统, 耗散结构振动的能量, 从而减轻结构的动力反应, 是结构抗风、抗地震作用的有效途径(欧进萍, 1996)。例如, 美国纽约的世界贸易大楼设置了 10000 个粘弹性耗能元件, 有效地控制了结构的风振反应; 我国近期完成的沈阳市政府大楼、北京饭店和北京火车站的抗震加固分别设置了摩擦型和粘滞型阻尼元件, 有效地提高了结构的抗震能力。直接将能量转变为控制力的主动控制在土木工程中的应用遇到了很大的困难——需要很大的能量转变为控制力, 人们不得不转向 AMD、变刚度和变阻尼等机械调节式半主动控制装置。智能驱动材料的发展为土木工程结构的振动控制开辟了新的天地。例如, 美国 Lord 公司已经研制出能耗 22W、最大出力达 20t 的磁流变减振驱动器, 这种装置固定磁场强度可以用作阻尼减振装置, 调节磁场强度可以用作主动控制的驱动装置。

本文将简要概述已有的智能材料在土木工程中应用的概况, 阐述土木工程结构智能监测、诊断、修复和控制系统的的发展趋势, 以及对智能材料发展和性能改进的要求。

2 智能材料在土木工程中的应用

2.1 感知材料与传感元件

笼统地说, 传统上用于制作传感器的材料大多数都可称为感知材料。从这个意义上讲, 近年来研究开发的具有感知特性的智能材料可以称为高性能感知材料, 主要有:

- 高性能感知材料
- {

光导纤维

电阻应变丝

疲劳寿命丝(箔)

压电材料

碳纤维

半导体材料

用高性能感知材料可以制作性能更好的传感元件, 特别是制作大规模表面附着式或埋入式传感分布阵列, 从而使结构的重要构件或整体具有感知特性, 以便实现其自修复、自调节和自控制的功能。

光纤作为传感元件主要是光纤的局部变形通过光纤中光的传播发生变化反映出来。光导纤维很细, 可传输数据, 反应灵敏; 对埋置材料性能影响小, 对电磁干扰不敏感, 熔点高, 耐腐蚀, 适用于高、低温及有害环境, 可沿单线多路复用, 能实现点测量、线测量和网测量。

电阻应变片是结构表面局部应变测量最常用的传感元件, 性能受基底和胶层的影响, 使用寿命短。电阻应变丝可埋置入结构中, 与基底材料胶合, 性能较稳定, 而且可组成各种形状和面积的阵列, 防电磁干扰, 耐久性较好。电阻应变丝直径很小, 仅 3~ 10 μ m, 不影响埋置材料的性能。

疲劳寿命丝(箔)外形上与电阻应变丝(片)相同, 但合金成分与热处理方式不同。疲劳寿命丝(箔)的电阻值随交应变幅值和循环次数单调增加, 荷载卸除后, 增加的电阻值保持不变。

因此, 疲劳寿命丝(箔)可以用于结构构件和节点的剩余疲劳寿命预报。

压电材料产生机械变形时, 有产生电势的能力, 称为正压电效应; 当施加电压时, 有变形的能

力，称为逆压电效应。利用正压电效应，压电材料可以制作传感元件；利用逆压电效应，压电材料可制作驱动元件，给结构施加控制力。压电材料制作的传感元件很薄，可以附着或埋置于结构中。

在一定条件下将聚合纤维燃烧，可以得到接近于完整分子结构的碳长链，也就是碳纤维。碳纤维通常合成为 $7 \sim 30\mu\text{m}$ 一股，具有导电性、化学稳定性、耐高温及高强度和高弹性模量。由于高强度和高弹模量，碳纤维的接触电阻会随着压力的变化而变化，利用这一特性可以用碳纤维制作压力和应变传感器，原理如图 1 所示。

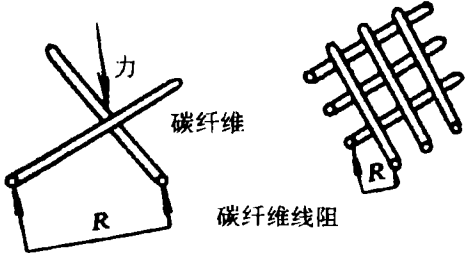


图 1 碳纤维传感器原理图(陶宝祺, 1997)

半导体材料可用于制作与基体材料融合的模块或薄片式传感元件，是智能传感元件发展的一个主要方向。目前已有的气压硅传感器体积小、价格便宜，可以用于测量结构物表面的风压分布。

由于光纤优越的性能，可以附着或埋置于大体积素混凝土或钢筋混凝土构件中，因此是目前土木工程中最有应用前景的传感元件之一(Feng *et al.*, 1995)。

最早提出将光纤传感器应用于混凝土结构监测的是 Mendez 等人(1989) 随后美国、加拿大、日本和欧洲的几个研究小组相继做了一些将光纤传感器埋置或附着在混凝土中的试验，并且建成了一些埋置光纤传感器的试点建筑。特别是 Fuhr 等人(1994) 领导的小组，将光纤传感器埋置在高速公路、普通及铁路桥梁、水坝和一栋 5 层建筑中；Habel 和 Hofmann(1994) 将 F-P 型光纤传感器设置在柏林的一座已经有裂缝的桥梁中，用来监测由于车辆通过时引起的振动及变形状况；蔡得所(1998) 完成了三峡工程古洞口混凝土面板堆石坝的面板裂缝监测和船闸裂缝监测的分布式斜交光纤传感技术现场实验；Fuhr(1992) 和他的同事在一个新建的 65000ft^2 的大学建筑内，埋置了约 2.5 英里的单模和双模光纤传感器，用来测试振动、风压、荷载、徐变以及裂缝扩展、温度等结构健康状况参数。

由于光纤传感器测量的量是光的强度、相位滞后、波长或光的干涉条纹改变等，因此它对土木结构反应过于敏感，测量范围还应适当放宽；光纤传感器记录不同原因造成的结构状态变化的综合，但很难将某一种原因引起的变化分离出来；对于很大应力和应变的结构，光纤的使用还受到限制；埋置在混凝土中的光纤传感器的耐久性还需进一步研究。Feng 等人(1994) 在开发新型的适用于基础建筑结构的光纤传感器方面做了一些工作。

2.2 驱动材料与控制装置

土木工程结构的控制装置总体上可以分为三类：改变结构频率的隔震装置、耗散结构振动能量的阻尼装置、给结构施加控制力的驱动装置。近年来研究开发的可用于制作控制装置的驱动材料主要有：

- 驱动材料 {
- 电/磁流变液体(也称可控流体)
- 形状记忆材料(含合金和聚合物)
- 压电材料(含电致伸缩材料)
- 磁致伸缩材料
- 可收缩膨胀聚合胶体

采用智能驱动材料可以制作电(磁)或温度等调节的被动阻尼减振装置和主动控制的驱动装置，且出力大、能耗小、反应迅速，将成为结构振动控制新一代的减振驱动装置。

2.2.1 电/磁流变流体

电/磁流变流体在外加电场/磁场作用下都可以在毫秒级的瞬间由牛顿流体变成 Bingham 塑性体或粘弹性体的特性。两种可控流体的主要性能参数列入表 1 中。从表中参数可以看出，在相同耗电功率条件下，磁流变体的最大屈服应力是电流变体的 $10 \sim 50$ 倍，且外加电压低、安全性好，是制作土木结构减振驱动装置很有前途的材料。

表 1 电/磁流变体的主要性能参数 (Carlson and Weiss, 1994)

性能	最大场强	最大屈服应力	表观粘度	适用温度	杂质 敏感性	反应时间	密度	耗电功率
电流变体	~ 4	2 ~ 5	0.2 ~ 1.0	10~ 90	敏感	ms 级	1 ~ 2	2~ 50W
	(kV/mm)	(kPa)	(Pa·s)	(℃)			(g/cm ³)	(2000 ~ 5000 V, 1 ~ 10mA)
磁流变体	250	50~ 100	0.2~ 1.0	- 50~ 150	不敏感	ms 级	3 ~ 4	2~ 50W
	(A/mm)	(kPa)	(Pa·s)	(℃)			(g/cm ³)	(2~ 25V, 1~ 2A)

电/磁流变流体已经用于制作多种形式的减振驱动器 (欧进萍、关新春, 1998), 其中适用于大型土木结构的有代表性的减振驱动器有 McMahon 和 Makris (1997) 制作的阻尼系数为 2215kN·s/m 的电流变减振驱动器以及美国 Lord 公司生产的最大阻尼力为 20t 的双推杆磁流变流体减振驱动器 (Housner *et al.*, 1997), 如图 2 所示。这些装置已经用于土木结构的振动控制试验。例如, Dyke 等人 (1996) 试验研究了用磁流变减振驱动器控制一座三层框架地震反应的效果, 如图 3 所示。试验结果表明: 不加磁场和加最大磁场都有控制效果; 半主动限幅最优控制接近理想主动控制的效果, 而且总是稳定的。

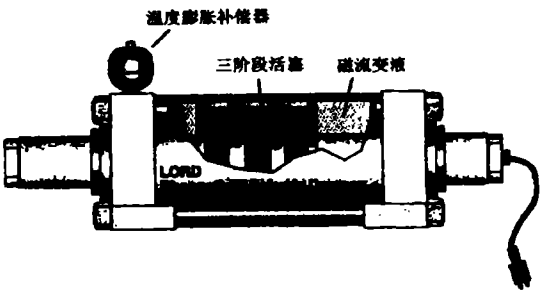


图 2 美国 Lord 公司生产的 20t 磁流变减振驱动器

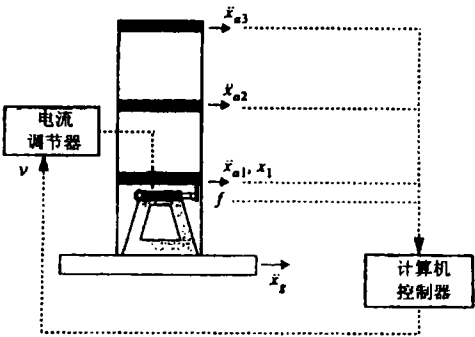


图 3 磁流变驱动器用于三层框架模型地震反应控制

电/磁流变体材料的性能还需改善: 电流变体和磁流变体长期搁放后的固体颗粒沉降及其对流体性能稳定性的影响问题仍然有待进一步研究。此外, 电流变体的温度适用范围还需进一步拓宽, 磁流变体的退磁效应还有待深入研究。电/磁流变体减振驱动器的装置开发和性能研究作为被动耗能减振器和半主动控制驱动器的控制策略、控制效果以及在实际工程中的应用等方面都还有大量深入细致的工作要做, 以期取得满意的效果和效益。

2.2.2 形状记忆材料

形状记忆效应是指材料在高温下定形后冷却至低温 (或室温) 并施加变形使其存在残余变形, 然后加热到一定温度时仍然恢复到变形前原始形状的能力。这种只能记住高温或低温状态形状的效应称为单程形状记忆。如果材料具有重复记住高低温两种状态形状的能力, 则称为双程形状记忆。

迄今为止已经发现具有形状记忆效应的合金有数十种, 其中性能好、有实用价值的是 Ni-Ti 和 Cu-Zn-Al 两大类合金。表 2 列出了 Ni-Ti 合金的主要性能参数。

表 2 Ti-50%Ni 合金的主要性能参数 (陶宝祺, 1997)

硬度 (HV)	拉伸强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	延伸率	断面收缩率
180~ 250	850	180	70~ 80	45%	30%

形状记忆合金变形量大, 加热时能产生很大的回复应力, 可以实现多种变形形式, 易于和基体材料融合, 因此可埋置于结构中。

结构振动控制可以从两个方面利用形状记忆合金的特性。其一是利用其超弹性记忆效应——高应变循环下的滞回曲线, 形状记忆合金丝本身就可以作为阻尼耗能元件。Aiken 等人

(1993)在这方面做了很好的试验，他们将形状记忆合金丝象拉索一样设置在三层钢框架模型的层间，研究了合金丝有无预应力情况下对结构地震反应的控制效果。其二是利用其温度形状记忆效应，将形状记忆合金制作为温度调节的主动控制驱动装置。刘群和何思龙(1998)在这方面对单层结构模型的振动控制作了初步探讨。

形状记忆聚合物具有粘弹性，应变可达 400%，加热可以复原。从聚合物玻璃状态到橡胶状态，弹性模量可变化 500 倍，但是同样变形下形状记忆聚合物的应力相当于形状记忆合金的 120 分之一。

形状记忆材料作为温度调节的驱动材料，目前主要利用材料本身电阻加热，因此调节能耗大、反应速度慢。为了改变这一特性，国外已在研究采用激光加热的形状记忆合金，但还未能达到实用的阶段(陶宝祺,1997)。

2.2.3 压电材料

如前所述，压电材料既可用于传感元件，又可用于驱动元件。常用的压电材料有压电晶体、压电陶瓷以及最近研制的压电聚合物。压电陶瓷与压电单晶体相比，具有容易制备、可制成任意形状和极化方向的产品、耐热、耐湿等许多优点，因此应用更加广泛。压电聚合物与压电陶瓷相比，柔韧、耐冲击性好，能制成大面积薄膜传感材料，因此也是一种非常具有应用前景的压电材料。但目前所有的压电材料中压电陶瓷是应用最广、研究最为活跃的一种。

压电陶瓷在沿材料极化方向的 1MV/m 的电场作用下，可产生 0.1% 的应变，在此应变下的弹性模量为 70GPa 左右，因此压电材料具有很大的储能能力，可以产生很大的外力。由于压电陶瓷应变小，通常采用多层叠加的方式制作压电陶瓷驱动器，如图 4 所示。较早将压电陶瓷驱动器用于框架结构研究的是 Kamada 等人(1997a,b)。他们制作的压电陶瓷叠加驱动器大小为 25×25×36mm，每 100V 电压可产生 30μm 变形，提供 19.6kN 的力，对一个 4 层、3.7m 高、3000kg 的空钢框架的振动进行了主动控制研究。在框架底层四个柱的底端共设置 32 个压电陶瓷驱动器，采用主动控制算法，通过控制弯曲力矩和轴向力达到了预期的将其钢框架的第一、二振型阻尼比提高到 10% 的目的。

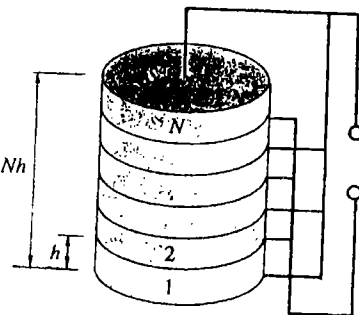


图 4 叠层式压电驱动器

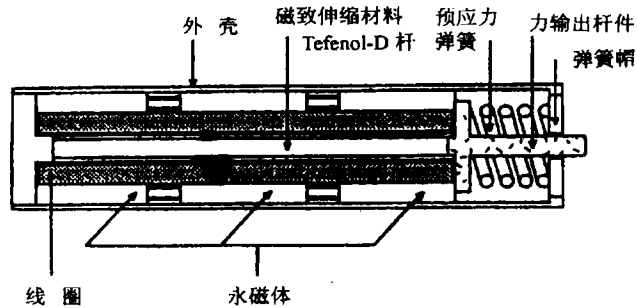


图 5 磁致伸缩驱动器

虽然压电陶瓷已经在很多的领域应用，但它的小应变始终在一定程度上限制其作为驱动器件的应用。最近研制的大应变压电材料 Rainbow(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)在一定程度上解决了这一难题。它的变形能力要较压电陶瓷大得多，其最大位移可以达到自身长度的 35% ~ 50%，弹性模量约为 1×10⁶MPa。Rainbow 的应用方式与应用领域基本和压电陶瓷类似，也可以叠加起来做成压电驱动器(Haertling,1997; Hooker, 1997)。

2.2.4 磁致伸缩材料

因磁化状态的改变而引起的磁性体产生应变的现象称为磁致伸缩现象。磁致伸缩现象在稀土以及稀土-铁化合物中广泛存在，但它们在常温下的磁致伸缩量很小，应用的价值不是很大。直到大磁致伸缩材料 Terfenol-D 研制成功，才开始磁致伸缩材料的应用研究。智能材料中的磁致伸缩材料指的就是大磁致伸缩材料 Terfenol-D，它是由美国海军军械研究室发明的。

与压电陶瓷性能相比, Terfenol-D 具有许多优点: Terfenol-D 在强磁场的作用下变形能够达到 1500 到 2000ppm, 这一数值是普通的压电陶瓷变形能力的 10 到 50 倍; 另外, 用 Terfenol-D 制作的驱动器所需的电压比较低, 因此较压电陶瓷器件更加安全; Terfenol-D 的弹性模量也很大, 最大可以达到 100GPa。由于它的变形大, 弹性模量高, 因此储能也较相同体积的压电陶瓷大, 再加上其频响性好, 因此是制作大能量驱动器的良好材料。对于长度为 20cm、直径为 1cm 的圆柱体可产生几千牛的力。

由于 Terfenol-D 的伸缩率比较大、出力高, 因此 Terfenol-D 主要是用作驱动器。图 5 是用 Terfenol-D 制作的典型驱动器 (Ackerman *et al.*,1996)。

目前的磁致伸缩材料仅用于小型机构的控制, 而研究制作适合于大型土木结构的大位移、大驱动力的驱动元件是非常重要的。

2.2.5 可收缩膨胀聚合胶体

这种胶体在物理或化学等因素的激励下, 产生体积形变、长度变化和作用力的变化。目前主要应用化学激励, 由化学能转变为机械能, 而由电激励方法、由电能转化为机械能的效率低、还很不成熟。

采用改性的聚丙烯腈纤维, 经 220℃ 加热后在浓缩 NaOH 溶液中水解, 可以得到具有两种特征的纤维。这种纤维从碱性到酸性的 pH 值激励, 在无载荷下可以有 70% 量级的收缩比, 时间常数为 2s; 直径 30μm 纤维的等轴力集度可以达到 1MPa(陶宝祺, 1997)。

这种胶体用于制作土木结构控制的驱动器还有待研究。

2.3 自修复材料与损伤应急控制措施

土木工程结构的损伤修复包括局部损伤的自修复与重大损伤的报警与应急控制。

结构局部损伤的自修复功能主要是钢或钢筋混凝土构件、节点的裂缝修复。在钢结构关键构件和节点材料微孔内预埋裂缝扩展时能发生相变的物质或能促进氧化过程的物质。例如在铝钢中分散一些二氧化锆微粒, 当材料内部裂缝扩展时, 二氧化锆粒子发生相变, 从而缓解裂缝尖端的应力集中, 阻止损伤的发展, 相当于对材料进行了补强修复。对于钢筋混凝土结构的关键构件和节点, 可以埋置玻璃纤维和“自愈”聚丙烯纤维迂回穿插于混凝土中, 当混凝土开裂时会撕扯这种“自愈”纤维, 使其释放出能充填裂缝的混合物进行修复; 或预埋能释放出缓蚀剂抑制钢筋的腐蚀(姚康德, 许美萱, 1996)。

结构的损伤也可以通过在结构中预埋感知元件和驱动装置控制损伤发展, 恢复结构的使用功能。但是, 土木工程结构的使用期通常长达几十年、甚至上百年, 利用预埋的驱动装置长期控制损伤, 保持结构的使用功能是不现实的。对于结构的重大损伤, 预埋感知元件发出警报并使驱动装置应急地控制损伤, 然后施行永久性的修复, 是一条可以实现的途径。

3 土木工程智能结构体系的发展趋势

智能材料发展迅速, 已经在土木工程中得到初步的应用。从土木工程结构的特点和智能材料的性能考虑, 以下几个方面是土木工程智能结构体系近期研究和发展的趋势。

3.1 结构的智能监测与诊断系统

结构的智能监测与诊断系统可以表示为图 6 所示的框图形式。

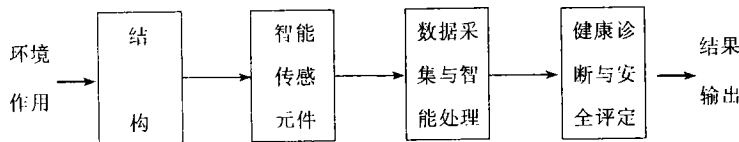


图 6 结构的智能监测与诊断系统

3.1.1 智能传感元件与优化设置

直接影响土木结构的健康与安全的监测量主要包括三个部分：其一是环境要素，包括风、浪、流、冰甚至地震等特征要素，以及有害介质的化学成份和含量等；其二是结构部件的损伤，如局部应力、裂纹扩展、疲劳损伤和地基沉降等；其三是结构整体的性能参数，如动力特性和状态反应等。根据需要的监测量，改善智能材料的性能和研制耐久性好、可埋置或附着、大规模分布式的传感元件是这一部分的主要研究内容。

3.1.2 数据采集与智能处理

这一部分的研究应该包括各种智能传感器的信号转换接口的研制，如光电转换器和电荷放大器等，以及数据的智能处理方法与计算机软件的开发。

3.1.3 健康诊断与安全评定

这一部分的研究包括参数识别、损伤评定与定位、结构建模和模型修正、体系可靠度分析与专家系统等方面的理论、方法与软件。

3.2 结构振动的智能控制系统

土木工程结构的振动控制研究与应用已有近 30 年的历史，智能材料给结构振动控制的发展带来了新的生机。这种生机主要表现在结构状态反馈量的量测传感元件和高性能减振驱动的开发和应用方面。

3.2.1 高性能阻尼耗能器及其控制系统

传统的被动阻尼耗能器主要有粘滞、粘弹、金属屈服和摩擦型四大种类，它们主要是利用结构的相对变形使其自身相对变形来耗散结构振动的能量(欧进萍等, 1996)。高性能阻尼耗能器可以沿着两个方向来研制：其一是以智能驱动材料为主开发适合于土木结构振动控制的阻尼耗能器；其二是以已有的阻尼耗能器为主，将其与智能驱动元件复合，开发可调式阻尼耗能器。这种阻尼耗能器的应用有可能通过简便实用的调节使结构振动被动控制的效果具有主动控制的功能并接近其效果。

3.2.2 高性能驱动器及其控制系统

传统的结构主动控制一直面临着状态反馈量量测、主动控制力能耗大以及时滞与溢出的困难。智能传感元件和驱动元件的开发，为解决这些困难带来了希望。

3.3 结构局部损伤的智能修复系统

3.3.1 结构构件裂缝的自愈合与自修复

3.3.2 结构件重大损伤的报警与应急控制

如前所述，研究结构构件裂缝自愈合与自修复材料的功能，可以较大幅度地提高结构的耐久性和安全性。发展结构重大损伤的报警与应急控制可以有效地避免结构突发事故发生和为永久性修复赢得时间。

4 结论

智能材料发展迅速，各种感知材料、驱动材料和自修复材料的研制、改性与装置开发，将为土木工程的智能结构体系研究与发展奠定基础。

(1) 高性能的感知材料和元器件的研制与开发，将推动结构的智能监测与诊断系统的研究与应用，从而使结构的长期健康监测与安全诊断成为可能。

(2) 智能驱动材料的发展，将为土木结构振动控制的第二代、高性能阻尼耗能器和主动控制驱动器的研制和开发提供基础，从而使结构与振动控制系统的一体化设计成为可能，推动研究近 30 年的结构主动控制在土木工程中应用的进程。

(3) 自修复材料的探索与开发，为结构自修复、自愈合功能的研究和设计提供了基础。结合智能驱动材料和元件的应用与开发，研究结构重大损伤的应急控制系统，将有效地避免重大工程事故的发生，提高结构使用的安全性与耐久性。

参考文献:

- [1] Ackerman A.E., Liang Chen, Rogers C.A., Dynamic transduction characterization of magnetostrictive actuators, 1996, Smart Mater. Struct. Vol.5,115~120,1996.
- [2] Aiken I. D. *et al.*, Testing of passive energy dissipation systems, Earthquake Spectra, Vol. 9, No.3, 335~368.
- [3] Carlson J.D. and Weiss K.D., A growing attraction to magnetic fluids, Machine Des.,Vol.8,61~64,1994.
- [4] Chen J. C. , Intelligent monitoring system for suspension bridge damage detection, Proc. of Bridge into the 21th Century Conference, Hongkong, Oct., 25,1995
- [5] Dyke, S.J.,Spencer B.F. Jr. and Carlson, J. D., Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction, Smart Mater. Struct. Vol.5, 565~575,1996.
- [6] Flint A.R., Mcfadyen A.N., Lau C.K., Wong K.Y., Wind and structure health monitoring system(WASHMS)for Lantau fixed crossing. Part2:Performance requirements for the bridge instrumentation system. Bridge into the 21 Century. Hk, Oct.25,1995.
- [7] Fuhr P.L., Huston, D.R., Kajenski, P.J. and Ambrose, T.P., Performance and health monitoring of the Stanford Medical Building using embedded sensors, Smart Mater. Struct., Vol.1.,63~68,1992.
- [8] Haertling G.H., Rainbow actuators and sensors: a new smart technology, Proc. SPIE 3044, 413~420,1997.
- [9] Habel W. R. and Hofmann D., Determination of structural parameters concerning load capacities based on Fibre-Fabry -Perot[®] Interferometers, Proc. 2nd Eur. Conf. On Smart Structures and Materials (Glasgow, 1994) 176~179.
- [10] Hooker M. W., Properties and Performance of RAINBOWC Piezoelectric actuator stacks, Proc. SPIE 3044, 413~420, 1997.
- [11] Housner G. W., *et al.*, Structure control: past, present, and future, Journal of Engineering mechanics, Vol.123, No9, 1997.
- [12] Kamada T., Fujita T., Hatayama T., *et al.*, Active vibration control of frame structures with smart structures using piezoelectric actuators (Vibration control by control of bending moments of columns), Smart Mater. Struct. Vol.6, 448~456,1997.
- [13] Kamada T., Fujita T., Hatayama T., *et al.*, Active vibration control of frame structures of bending type with smart structure using piezoelectric actuator, Proc. SPIE 3041,75~86,1997.
- [14] McMahon S. and Makris N., Large scale ER damper for seismic protection, Proceeding of the 4th Annual Symposium on Smart Structures and Materials Symposium, Passive Damping and Isolation Conference. (San Diego)140~147,1997.
- [15] Mendez A., *et al.*, Application of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures, SPIE, 1170:60~69,1989.
- [16] 蔡得所. 大坝裂缝光纤监测技术研究及坝基稳定性分析. 哈尔滨建筑大博士后研究报告, 1998.
- [17] 刘群, 何思龙. 形状记忆合金用于结构模型控振模拟研究. 中国结构控制新进展, 第一届全国结构控制会议论文集, 1998.
- [18] Ou, J.P.(欧进萍), Wu Bo(吴波) and Soong, T.T., Recent advances in research on application of passive energy dissipation systems, 地震工程与工程振动, Vol.16, No.3, 72~96, 1996.
- [19] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全度评定. 走向 21 世纪的中国力学——中国科协第 9 次“青年科学家论坛”报告文集, 清华大学出版社, 179~189, 1996.
- [20] 欧进萍, 关新春. 可控流体减振驱动器的研究与应用. 世界地震工程, Vol.14, No.4, 30~41, 1998.
- [21] 陶宝祺. 智能材料与结构, 国防工业出版社, 1997.
- [22] 姚康德, 许美萱. 智能材料——21 世纪的新材料, 天津大学出版社, 1996.
- [23] 张启伟. 桥梁结构模型修正与损伤识别, 同济大学博士论文[指导教师: 范立础, 袁万城], 1999.