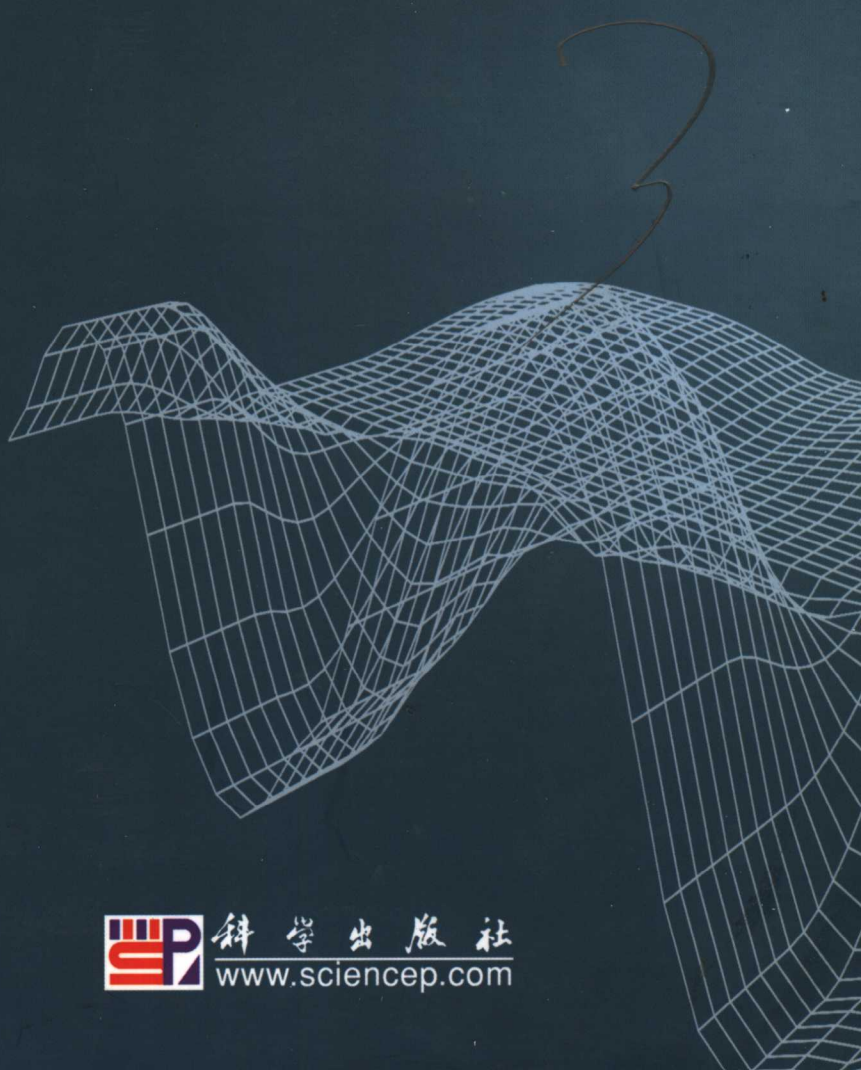


1

智能结构力学

■ 秦 荣 著



科学出版社

www.sciencep.com

智能结构力学

秦 荣 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在科研的基础上阐述了智能结构分析的新理论、新方法。全书共16章,内容包括:智能结构的本构关系、变分原理及广义变分原理;智能结构的静力分析、动力分析、非线性分析及稳定性分析的新理论、新方法;智能结构振动主动控制分析的新算法及其应用。本书内容新颖,富有创造性,不仅有理论价值,而且有广泛的应用前景。

本书可供航空航天、土木工程、水利工程、防灾减灾工程、国防工程及工程力学等专业的科技人员、高校师生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能结构力学/秦荣著. —北京:科学出版社,2005
ISBN 7-03-014703-0

I. 智… II. 秦… III. 结构力学 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 127880 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:包志虹
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者工作设计室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2005年1月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—2 500 字数:355 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

智能结构体系是一种仿生结构体系,它集主结构、传感器、控制器及驱动器于一体,具有结构健康自诊断、自监控,环境自适应,损伤自愈合、自修复的生命特征及智能功能,在危险发生时能自己保护自己。由此可知,智能结构具有生命及智能,能增强结构安全、减轻质量、降低能耗,突破了传统结构体系。

智能结构已在军用航空航天、民用航空航天、汽车、船舶、土木工程及水利工程方面展现了广泛的应用前景,属于减灾防灾的前沿课题,是对各类工程结构的重大挑战,引起世界发达国家的极大重视。近十几年来,美国、日本、德国、英国投入大量的人力、物力及财力用于智能结构的研究及探索,使智能结构得到迅速发展,但其研究主要集中在智能材料及智能结构振动控制简单模型的研究及实验研究,理论研究很少,还没有系统地建立智能结构分析与设计的新理论、新方法。

智能结构分析的新理论、新方法是重要的研究方向,是推动智能结构发展的重要理论基础,它是结构健康诊断与监测智能体系、结构振动与灾害响应智能控制体系及结构局部损伤智能修复体系研究的重要理论基础。目前,国内对智能结构分析的方法主要采用有限元法。智能结构有限元法与传统结构有限元法不同,智能结构必须建立包含智能材料本构关系的有限元模型。有限元法对传统结构分析是一种有力工具,但分析复杂的传统结构往往存在巨大的困难及缺陷,分析复杂的智能结构比分析传统结构所存在的困难及缺陷就更大了。另外,国内外对智能结构分析目前主要考虑智能结构的线弹性问题,考虑智能结构非线性(几何非线性,材料非线性,双重非线性)问题的文献少见,对智能结构动力问题有所研究,对智能结构稳定性分析的研究少见。但在大跨度桥梁、大跨度空间结构、高层与超高层建筑结构及高拱坝的分析及设计中必须进行双重非线性分析才能保证它们的经济合理及安全可靠。由此可见,对智能结构进行分析及设计需要创立一些经济有效的新理论、新方法。

近几年来,作者针对上述存在问题,致力于研究智能结构分析的新理论、新方法,获得一些新成果:①在理论上,对智能结构分析时不仅考虑线弹性问题,而且还考虑非线性问题,创立了智能结构新的智能本构关系、智能变分原理及智能广义变分原理;②在方法上,对智能结构分析不用有限元法,而采用样条函数方法,创立了智能结构分析的智能样条有限点法、智能样条子域法、智能 OR 法、智能样条加权残数法、智能样条边界元法及智能样条无网格法。这些新理论、新方法应用很广,不仅可以分析智能结构的静力问题、动力问题、振动主动控制问题及稳定性问题,而

且可以分析智能结构的线弹性及非线性问题,不仅计算简便,而且精度高,为智能结构分析及设计开拓一条新途径;③在算法上创立了智能结构振动控制及动力响应的算法;④建立了不确定性智能结构理论及分析方法。

本书是在上述基础上撰写而成的,是作者科研成果的总结,是一部科研成果专著。全书共十六章,内容包括智能材料性质、智能本构关系、智能变分原理、智能结构分析的新方法、智能结构非线性分析的新方法、智能结构振动控制理论及算法、智能结构稳定性及其在智能高层与超高层结构及智能桥梁结构中的应用。本书内容丰富、新颖、富有创造性,突破了传统方法,既有理论,又有应用,不仅可用于航空航天、船舶、机械、汽车、化工及国防工程,而且也适用土木工程、建筑工程及水利工程,适用范围很广,通用性较强。

21 世纪是智能结构时代。长期以来,人们梦想结构是一个仿生体系,具有生命,具有智能,现在看来,这种想法是可以实现的。过不了多久,智能飞机的机翼可以像鸟的翅膀一样灵活;智能结构像人一样,在快要断裂时可以发出警报信号,然后自动加固自身构造。智能结构是多学科交叉与综合集成的成果,要多学科的专家联合研究,才能够取得重大进展和成就,因此本书的出版对促进智能结构科学的发展有重要意义。

作者致力于研究智能结构力学这一科研项目时已超过 60 岁,所需经费全靠作者带领的一批博士生及硕士生搞生产项目来支持;另外我的夫人对这一科研项目也从经济上和精神上给予了大力支持。现借此机会向他们表示衷心的感谢!

在本书的写作过程中,得到国内许多同行的热情关怀和大力支持,我的许多研究生做过不少工作,特此表示感谢!

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬请批评指正。

目 录

前言

第一章 基本概念	1
1.1 智能材料	1
1.2 智能结构	6
1.3 应用前景	8
1.4 展望	11
参考文献	12
第二章 智能本构关系	13
2.1 智能结构工作机理	13
2.2 线弹性-压电本构关系	14
2.3 形状记忆合金本构关系	15
2.4 热弹塑性-相变本构关系	21
2.5 热弹粘塑性-相变本构关系	24
2.6 弹塑性-压电本构关系	27
参考文献	32
第三章 智能变分原理	34
3.1 加权残数法	34
3.2 智能瞬时虚功原理	35
3.3 智能瞬时最小势能原理	37
3.4 智能瞬时广义变分原理	41
3.5 智能 Hamilton 原理	43
3.6 瞬时变分原理与 Hamilton 原理的内在联系	44
3.7 变分法	46
参考文献	50
第四章 智能梁分析的新方法	51
4.1 智能梁理论	51
4.2 智能样条有限点法	53
4.3 智能样条子域法	56
4.4 智能梁振动主动控制	59
4.5 计算例题	61
4.6 附录:样条函数	65
参考文献	74
第五章 智能拱分析的新方法	75

5.1 智能拱理论	75
5.2 智能样条有限点法	77
5.3 智能样条子域法	79
参考文献	81
第六章 智能板壳分析的新方法	82
6.1 智能板壳理论	82
6.2 智能样条有限点法	85
6.3 智能样条子域法	94
6.4 计算例题	103
6.5 附录	110
参考文献	119
第七章 智能 QR 法	121
7.1 基本原理	121
7.2 智能板壳分析的 QR 法	123
7.3 智能板壳振动控制	128
7.4 计算例题	129
7.5 附录	132
参考文献	140
第八章 智能样条边界元法	141
8.1 基本原理	141
8.2 智能弹性体分析方法	143
8.3 智能动态问题分析方法	153
8.4 计算例题	163
8.5 附录:基本解	164
参考文献	169
第九章 智能样条无网格法	170
9.1 基本原理	170
9.2 智能弹性体问题	178
9.3 智能板壳问题	182
9.4 计算例题	187
参考文献	190
第十章 智能结构几何非线性问题	191
10.1 智能非线性变分原理	191
10.2 智能梁几何非线性问题	193
10.3 智能板壳几何非线性问题	205
10.4 计算例题	212
参考文献	220
第十一章 智能结构材料非线性问题	221

11.1	压电智能梁材料非线性问题	221
11.2	压电智能板壳材料非线性问题	225
11.3	压电陶瓷非线性断裂问题	228
11.4	SMA 智能结构材料非线性问题	231
	参考文献	237
第十二章	智能结构双重非线性问题	238
12.1	压电智能结构双重非线性问题	238
12.2	SMA 智能结构双重非线性问题	243
12.3	计算例题	246
	参考文献	248
第十三章	智能结构稳定性	249
13.1	非线性几何方程	249
13.2	非线性本构关系	249
13.3	智能结构稳定性	249
13.4	计算例题	251
	参考文献	253
第十四章	智能结构振动控制算法	254
14.1	基本概念	254
14.2	智能结构振动主动控制原理	255
14.3	结构振动主动控制算法	256
14.4	样条加权残数法	261
	参考文献	265
第十五章	智能高层与超高层结构分析的新方法	266
15.1	智能高层结构分析的新方法	266
15.2	智能结构双重非线性分析的新方法	269
15.3	智能高层结构稳定性分析的新方法	272
15.4	智能高层结构振动主动控制	272
15.5	附录	273
	参考文献	277
第十六章	智能桥梁结构分析的新方法	278
16.1	智能桥梁结构分析的新方法	278
16.2	智能桥梁结构非线性分析的新方法	280
16.3	智能桁架拱稳定性分析的新方法	280
16.4	智能桥梁结构振动主动控制	280
	参考文献	280

第一章 基本概念

智能结构是一种仿生结构体系,它集主结构、传感器、驱动器及信息处理于一体,具有生命,具有智能。智能结构由主结构及智能材料组成,智能材料分别代表传感器及驱动器。由此可知,智能结构与智能材料有密切关系,智能结构的实现离不开智能材料的研究及开发。本章主要介绍智能材料及智能结构的一些基本概念。

1.1 智能材料

20 世纪 80 年代中期,人们提出了智能材料的概念。智能材料是一种仿生材料,它集传感、驱动及信息处理于一体,具有生命,具有智能,具有自感知、自诊断、自适应、自修复等功能^[1]。

近年来,智能材料有很大的发展,已研制开发下列几类智能材料:压电材料,形状记忆材料,电(磁)流变体材料,光导纤维,电(磁)致伸缩材料,智能高分子材料^[1]。

1.1.1 压电材料

当在某些材料上施加机械力时,材料的表面会出现与应力成正比的束缚电荷(图 1.1),这种现象称为正压电效应。如果将电场加到某些材料上,则材料在电场作用下产生应变,这种现象称为逆压电效应。上述正逆压电现象称为压电效应。这种具有压电效应的材料称为压电材料。图 1.1 为力-电转换效应:图(a)为纵向效应——力的方向与电场方向一致,图(b)为横向效应——力的方向与电场方向垂直,图(c)为剪切效应——力的方向与电场方向垂直。

材料的压电效应是 Pier Curie 及 Jacques Curie 兄弟于 1880 年首先在 α -石英晶体中发现的。压电材料包括压电晶体、压电陶瓷及压电聚合物。

压电陶瓷有 BaTiO_3 (钛酸钡)、PZT(锆钛酸铅)、PLZT(掺镧锆钛酸铅)……其中 PZT 及 PLZT 因有高的机电耦合系数以及其他优点而成为智能材料应用最受关注的压电陶瓷,但极限应变小,比较脆。目前,国外正在积极研制开发增韧(大应变)、低能耗、高驱动能力、高耐久性的压电陶瓷。

压电聚合物是一种高分子压电材料,如 PVDF(聚偏氟乙烯, PVF_2)、聚氟乙烯、聚碳酸酯、聚氯乙烯等,其中 PVDF 压电性虽然比 BaTiO_3 及 PZT 低,但也有优点,即频响宽,声阻抗容易匹配,机械强度高,柔韧性好,质量轻,耐冲击,易制成非常薄的薄膜,价格低廉,故 1969 年以来很快得到应用。

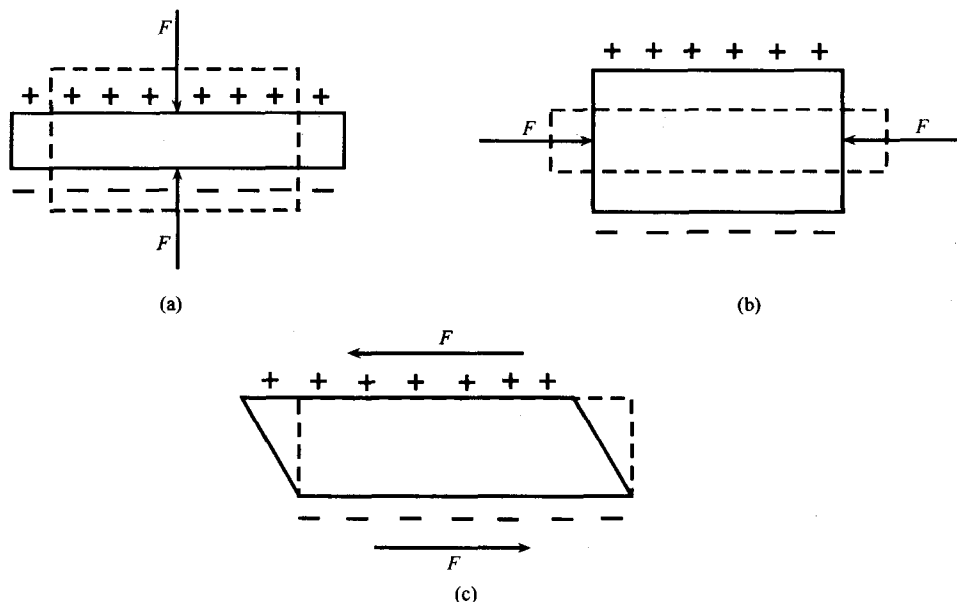


图 1.1 力-电转换效应

压电材料之所以能用来作为传感器及驱动器是由于存在压电效应。当力作用于压电元件时,压电材料本身会产生感应电荷或电压,引起正压电效应。如果在压电材料上施加电场,则压电材料就会产生应力或应变,引起逆压电效应。由此可知,提高压电材料传感特性及驱动特性是一个重要的研究课题。

提高传感特性及驱动特性有两种途径:①提高压电材料性能;②改进压电驱动器及压电传感器结构。提高压电材料性能方面的研究包括:①对现有压电材料改性进行研究,改善压电材料工作性能。②研制压电复合材料。由于压电陶瓷与压电聚合物在力学性能及介电性能方面有很大差异,PZT 的柔度系数 $s_{11} = 2 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$,压电聚合物的 $s_{11} = 30 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$;PZT 的相对介电常数为 3000,压电聚合物的相对介电常数仅为 12,故二者复合可以出优势。③大力研制大应变压电材料。1997 年 3 月美国宾州大学及 TRS 公司的 Park 及 Shrout 研制的 PMN-PT 及 PZN-PT 单晶性能,具有很高的压电常数,例如, $d_{33} > 2200 \text{ pC/N}$,滞后很小,而且具有 0.5%~1.7% 左右的大应变能力。我国上海硅酸盐研究所的许桂生等人(1999)研制的 PMNT67/33 单晶,压电常数 d_{33} 达到 3000 pC/N,应变可达到 5300 $\mu\epsilon$,机电耦合系数 k_{33} 达到 0.93。

20 世纪 90 年代末以来,随着大应变、高强度的压电材料的研制,压电材料的应用领域已从航空航天领域拓宽到土木工程领域。

目前,压电材料已成为智能材料及智能结构的重要分支,研制高压电性、大应

变、高强度、高驱动能力、高耐久性、低能耗的压电材料是一项重要的研究任务。

该部分的详细内容请见参考文献[1]的第6章。

1.1.2 形状记忆材料

1. 形状记忆效应

材料在外力作用下发生残余变形后,在温度作用下又会发生逆变形,使材料恢复原状。冷却后再发生残余变形,再加热,结果还能恢复原状。这种现象称为形状记忆效应(Shape Memory Effect)。这种具有形状记忆效应(SME)的材料称为形状记忆材料,它包括形状记忆合金、记忆陶瓷及形状记忆聚合物。

材料的形状记忆效应是美国 Olander(1932)在研究 Au-Ca 合金时首先发现的。1938 年美国哈佛大学的 Greningerh 及 Moordjumol 在研究 Cu-Zn 合金中也发现形状记忆效应。直到 1962 年,美国海军军械研究所的 Buehler 发现了 NiTi 合金中的形状记忆效应,才开创了形状记忆合金研究及应用的新阶段。此后,国内外对形状记忆合金做了许多研究。近几年来,国内外对形状记忆合金(Shape Memory Alloy)的研究有很大的进展。形状记忆合金(SMA)的形状记忆效应与马氏体相变有关。

2. 马氏体相变

在许多形状记忆合金中存在两种不同的结构状态,高温时为奥氏体相,低温时为马氏体相。图 1.2 为 SMA 的相变温度与电阻的关系。图中 M_s 为母相(奥氏体相)开始转变为马氏体的温度, M_f 为马氏体相变完成的温度; A_s 为马氏体经加热时开始逆相变为母相(奥氏体相)的温度, A_f 为马氏体向母相(奥氏体相)逆转变完成的温度。由此可知,冷却时由母相(A)转变为马氏体相(M),这是马氏体正相变(A

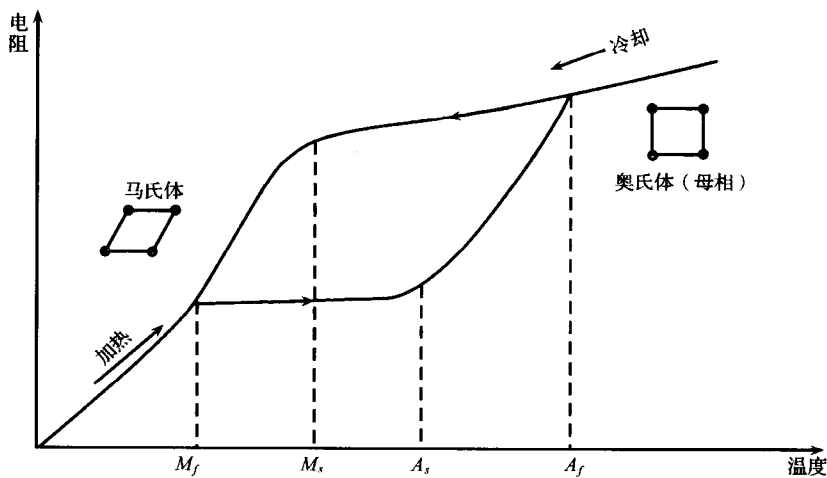


图 1.2 SMA 相变温度与电阻的关系

→M);加热时马氏体相(M)又逆向转变为母相(A),这是马氏体逆相变(M→A)。

SMA 的形状记忆效应是由马氏体相变造成的。SMA 在奥氏体相(母相)状态下定型,冷却至低温,SMA 中的奥氏体发生相变转变为马氏体。如果再对处于马氏体相下的 SMA 弯曲发生残余变形,然后对 SMA 加热到 A_f ,则马氏体就会转变为奥氏体(母相),SMA 的残余变形消失,恢复到原来的形状。马氏体变形后经过逆相变,能恢复母相形状的现象称为单程形状记忆效应。有的材料经过训练后,不仅对母相形状具有记忆能力,而且在再次冷却时能恢复马氏体变形后的形状,这种现象称为双程形状记忆效应。

如果在 SMA 恢复过程中,对 SMA 施加约束,则 SMA 将会产生很大的回复应力,可达 700MPa。

3. 超弹性效应

如果 SMA 在温度 A_f 以上进行恒温拉伸,则它的应力-应变曲线如图 1.3 所示。由图 1.3 可知,在拉伸过程中,首先由奥氏体相(母相)的弹性变形引起弹性应变,对应于 oa 段。当 SMA 应力达到一定极限时,SMA 内稳定的奥氏体相在应力作用下引发奥氏体相向马氏体相转变,在转变过程中,SMA 的弹性模量降低很多,随着奥氏体相不断向马氏体相转变,应力-应变曲线出现一个应力平台,好像发生了塑性屈服,对应于 ab 段。当奥氏体相完全转变马氏体相时,继续加载,SMA 的应力-应变曲线呈线弹性关系,对应于 bc 段。在卸载过程中,SMA 会发生马氏逆相变。在开始卸载时,马氏体相弹性恢复到 d 点,然后通过马氏体逆相变恢复到 e 点。完全卸载后,SMA 恢复原状,残余应变为零。由上述可知,SMA 整个相变过程中的应力-应变曲线是一个完整的滞回环,残余变形为零,表明 SMA 可以提供优越的耗能效果。

由图 1.3 可知,当 SMA 在温度 A_f 以上进行恒温拉伸产生变形后,如果全部

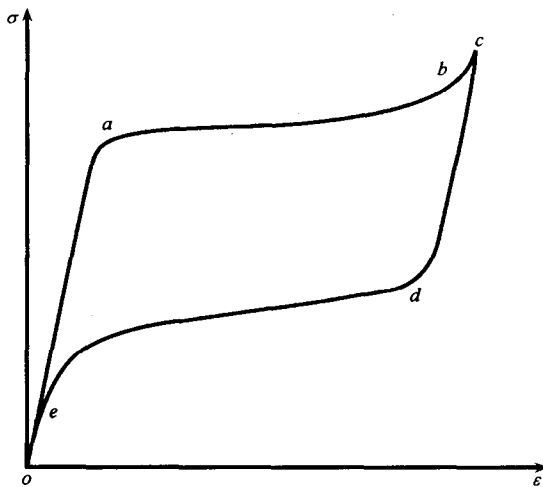


图 1.3 SMA 超弹性

卸载,则变形完全消失,SMA 恢复到母相原来的形状。这种现象称为相变超弹性或伪弹性。

SMA 具有形状记忆效应及超弹性两个特殊的功能特性,它们都是由马氏体相变引起的。SMA 的形状记忆效应是通过加热产生马氏体逆相变恢复到母相原状,而相变超弹性是卸载后产生马氏体逆相变恢复到母相原状。由此可知,SME 取决于温度,而超弹性不取决于温度只取决于外加应力,但它们在本质上是同一现象。超弹性也是一种形状记忆效应。

由图 1.3 可知,当应力达到一定极限时,SMA 内稳定的奥氏体相在应力作用下引发奥氏体相向马氏体相转变,这就是应力引发马氏体产生。马氏体相只有在应力作用下才能保持稳定状态。如果卸去应力,则马氏体相处于不稳定状态,就会发生马氏体逆相变,恢复到奥氏体相。因此,加载时奥氏体相向马氏体相转变,引发马氏体相产生,卸载时马氏体发生逆相变,恢复到奥氏体相。

4. SMA 材料

目前已发现很多种 SMA,其中只有 TiNi、Cu-Zn 及 Cu-Al-Ni 合金具有实用价值,它们兼有感知及驱动功能,受到广泛重视^[1]。

该部分详细内容见参考文献[1]的第 4 章。

1.1.3 电(磁)流变体材料

1. 电流变体(ERF)

电流变体是高介电常数的固体微粒分散在低介电常数的绝缘油液中的悬浮体。当无电场作用时,ER 流体是一种牛顿流体,在电场作用下,ER 流体中的悬浮颗粒产生电极化,增大了对流动的抵抗,使液体成为具有一定屈服应力的类似固体的性质,这种性质称为电流变效应(ERE)。

2. 磁流变体(MRF)

磁流变体是由微小的磁性颗粒分散在基液中形成。在磁场作用下,MR 流体的有效黏度、塑性黏度及弹性性能快速可逆变化,变为具有一定屈服应力的粘塑性体,这种性质称为磁流变效应(MRE)。

3. ERF/MRF 的特性

(1) 连续性。随着场强变化,ERF/MRF 的黏度及屈服应力可连续变化。

(2) 可逆性。ERF/MRF 的黏度随场强增加而增大,随场强减小而减小。也就是说,ERF/MRF 随场强增大而变硬,随场强减小而变软。

(3) 频响时间短,变化速度快。随着场强的变化,ERE/MRE 的屈服应力及黏度正逆向变化所需时间在 10^{-3} s 数量级的极短时间内。

4. ERF/MRE 研究及应用

人类对电流变体(ERF)的研究始于 1896 年。Daff 在研究电场对某些绝缘油的机械特性影响时,发现电黏效应,即发现这些物质的表观黏度在电场下略有增

加。20 世纪 30 年代, Bjornstahl 和 Alok 曾把电场施加在液晶及某些极性、非极性流体上, 发现液晶及极性流体的表观黏度上升, 而非极性流体的表观黏度无变化。1939 年, 美国 Winslow 进行了某些悬浮体在电场作用下黏度增大的实验。他把一些半导体型的固体颗粒分散在低黏、绝缘的油中, 在 3kV/mm 的电场下, 能产生每平方厘米达几百克的剪切阻力, 这比各种增黏效应大得多。1947 年, Winslow 又报道了他的研究成果, 当施加电场后能使悬浮体的表观黏度增大几个数量级, 撤去电场后悬浮体又迅速恢复原来的低黏度状态, 提出了 Winslow 效应。这一工作标志着电流变学的诞生。尽管电流变效应发现很早, 但直到 20 世纪 80 年代电流变学的研究才在全世界掀起高潮。从 1987 年起, 国际上每两年召开一次国际电磁流变液及其应用学术会议。我国从 20 世纪 80 年代末开展电变技术的研究, 近年来获得不少新成果, 整体研究已接近发达国家的水平。

磁流变体(MRF)是美国国家标准局 1948 年首先提出来的。Winslon 在提出电流变体(ERF)的同时也提出磁流变效应及电磁流变效应。但在 20 世纪 50~80 年年代发展很慢, 进入 90 年代才有新的发展。近几年来, 国内外对磁流变体的研究及应用有很大进展, 获得了一些新成果。

电流变体(Electro-Rheological Fluids)及磁流变体(Magneto-Rheological Fluids)都是智能结构及智能机构中驱动器的主选材料。例如, 电(磁)流变体阻尼器是利用电(磁)流变体在电(磁)场作用下流体阻力大小可发生变化的特性制成的主动控制器件。它具有响应速度快、阻尼力大、耗能小等优点, 特别是 MRF 具有强度高、黏度低、能量需求小、温度稳定性好、对杂质不敏感等特点, 由此制成的阻尼器有下列优点: 机构简单, 响应快, 动态范围大, 耐久性好, 在控制系统失效的情况下可充当被动控制器件, 具有很强的可靠性。MR 阻尼器在结构振动控制中已表现出巨大潜能^[6]。

该部分的详细内容见文献[1]的第七章。

1.2 智能结构

1.2.1 智能结构仿生学模型

图 1.4 是一个智能结构模型, 由三部分组成, 上下两层为智能材料, 分别充当驱动器及传感器, 中间部分是梁, 常称主结构, 材料为弹性体或弹塑性体。当梁因振动发生变形时, 传感器因变形在表面产生一定的电势(或电压)。在适当的控制规律作用下, 传感器产生的电势(或电压)被反馈到上面的驱动器。在外电压作用下, 驱动器发生变形, 这种变形会消减梁原来的变形。这就是智能结构的工作机理。

智能结构是一种仿生结构体系, 集主结构、传感器、驱动器及控制器于一体, 它的思想来源于仿生学(图 1.5), 其中对应关系为骨骼-结构、肌肉-驱动器、神经-传

感器、大脑-控制器。这就是智能结构的仿生学模型^[10]。

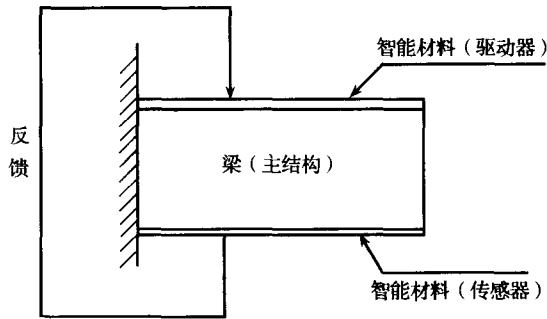


图 1.4 智能结构模型

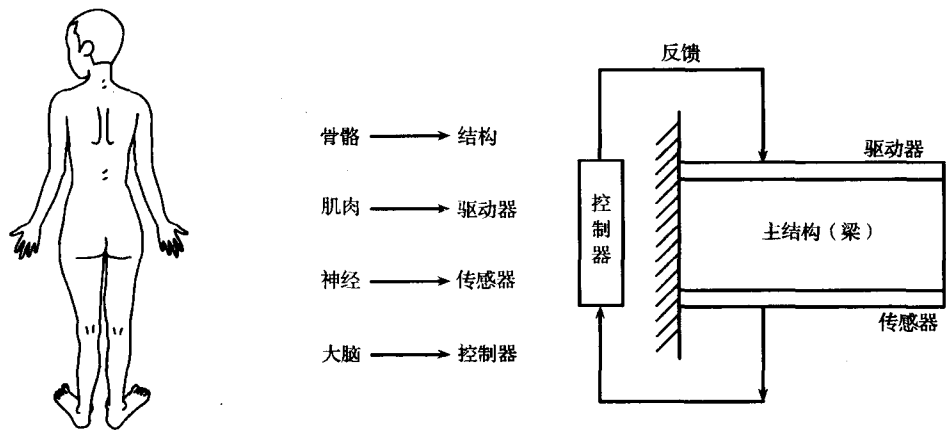


图 1.5 智能结构仿生学模型

1. 2. 2 智能结构的关键技术

智能结构的关键技术包括传感器、驱动器、控制器及其集成^[1]。

1. 智能传感器

智能结构中的传感器,从仿生学来讲,相当于智能结构的神经元,担负着感知外界环境变化,收集外界信息的任务。衡量智能传感材料的主要指标有灵敏度、分辨率、频带宽、电磁相容性、温度敏感性、迟滞特性、线性程度、尺寸大小等。对于长寿命的智能结构,感知材料的性能稳定性是一个需要重点考虑的指标。有关技术见文献[1]的表 10.1。

压电材料是在智能结构中广泛采用感知材料。目前,比较适合于智能结构传感器件的压电材料有压电陶瓷及偏聚二氟乙烯(PVDF)压电薄膜。由于压电陶瓷性脆,故压电聚合物(如 PVDF)常作为传感器。为了克服压电陶瓷及压电聚合物各自

的缺点,近年来研制出两者复合的压电复合材料,这是一种柔性压电复合材料。对各类材料技术指标综合权衡得出结论:智能结构传感器尤其是航空航天类智能结构传感器,目前以选用压电陶瓷型为宜。

2. 智能驱动器

智能结构中的驱动器从仿生学来讲相当于智能结构中的肌肉,它的任务是使智能结构自适应动作,故必须具有较大的肌肉力量,应有较小的滞后效应。目前,常采用形状记忆合金、压电材料、电(磁)流变材料及伸缩材料作为驱动器^[1,6]。目前,衡量驱动材料优劣的指标见文献[1]的表 10.2。

SMA 驱动器的优点是可实现多种形式,变形量大,加热驱动时驱动力较大,应变灵敏度。缺点是响应速度慢,驱动频率带宽一般小于 0.1Hz,难以用于动态控制。应注意的问题是疲劳失效、反应速度、循环周期及使用 SMA 的环境温度。近年来,国外已研制成形状记忆塑料,这将成为智能结构中新的驱动器。

压电驱动器的优点是响应速度快,频带很宽,对温度不敏感,耗能低。目前常用压电陶瓷做压电驱动器,存在问题是应变小,驱动动作小,驱动力不大。为达到足够的驱动能力,应提高应变灵敏度。压电聚合物(PVDF)也可用于驱动器。进入 20 世纪 90 年代,随着大应变高强度的压电材料的研究开发,压电材料的应用领域已逐步由航空航天领域拓展到土木工程领域。

电(磁)流变驱动器的主要优点是响应速度快,存在问题是转换电压太高。

3. 智能控制器

智能结构中的控制器,从仿生学来讲,相当于智能结构的神经中枢(大脑),控制对象为结构本身。由于智能结构本身是分布式强耦合的非线性系统,且所处环境具有不确定性及时变性,因此控制器应具有分布式及中央处理方式相协调的特点。对于复杂的时变系统,还应具有一定的鲁棒性及在线学习功能。控制器还依赖于控制策略及算法。智能结构的控制分为三个层次:①局部控制,用加入阻尼或吸收能量来抵消外来干扰;②整体控制,如结构整体稳定性控制、形状确定性控制及扰动抑制等;③智能控制,结构可以实现自诊断、自修复、自适应、自学习等功能。

4. 智能结构集成与设计

智能结构的集成及设计是智能结构的又一关键问题,不仅产生出许多新的数学及力学问题,而且产生出一些新的工程技术问题^[1]。

1.3 应用前景

对智能材料及智能结构的未来及应用前景,国内外许多科学家做过综述、评论及预测。美国《华盛顿邮报》1997 年 1 月 6 日发表一篇文章,称“智能材料可能产生奇迹”,描述了智能材料及智能结构的未来。文章评论:过不了多久,智能飞机的机翼可以像鸟的翅膀一样弯曲,自动改变形状,从而提高升力及减小阻力;桥梁及电

线杆在快要断裂时可以发出报警信号,然后自动加固自身的构造;空调机可以抑制振动而寂静工作;手枪只有在主人使用时才能开火;轮胎需要充气时会礼貌地通知司机;反应灵敏的人工肌肉可以使机器人以假充真。本节对智能材料及智能结构的未来及应用前景做一些简介。智能结构及智能材料有广泛的应用前景,这里只介绍三个方面。

1.3.1 智能结构在航空航天工程中的应用

智能结构及智能材料对航空航天领域的发展会产生重要影响,有广泛的应用前景。

1. 威胁预警

在航空航天飞行器蒙皮中植入能探测射频、激光、核辐射等多种传感器的智能蒙皮,可用于敌方威胁的监视及预警。

2. 结构健康监测

航空航天飞行器具有自诊断及自适应等功能的结构健康监测系统对飞行器的安全监测具有重要意义。这种监控系统可以实时测量结构内的应力、应变、温度、裂缝及裂纹,探测疲劳损伤及攻击损伤,能自动地进行结构健康诊断、评估及预测寿命。

3. 结构振动控制

随着飞行器性能不断提高,振动及颤振问题更加复杂及突出。振动的危害不能轻视。在飞机因工作应力引起的破坏中,振动引起的问题占 27%。航空发动机使用中故障的 40% 以上与振动有关,导弹飞行中的故障和破坏有一半是振动造成的。由此可知,对飞机的振动必须进行控制。智能材料及智能结构可为结构振动控制及结构减振开拓了一条新途径。

4. 智能表层

飞机的智能表层是将多系统所需的感知元件及驱动元件、信号处理单元及识别单元融合在飞机表层材料中,使飞机表层具有通讯、隐身、敌我识别、预警、电子对抗、干扰、火控飞控、电子保障系统、综合导航、环境监测及自适应系统等功能。智能表层功能的强弱是衡量未来飞机先进性的重要标志之一。为此,研究飞机智能表层是一个十分重要的问题。

5. 智能机翼

利用可自适应改变形状的智能结构与空气动力学控制相结合来制造自适应机翼,这种机翼像鸟的翅膀一样,可根据飞行条件及要求,自动改变形状,从而提高升力及减小阻力。

6. 噪声控制

利用智能材料及智能结构来降噪是一条新途径。