

# 智能结构设计与控制中的若干核心技术问题\*

董 联

清华大学, 北京 100084

夏人伟

北京航空航天大学, 北京 100083

**摘要** 对传感结构、可控结构和智能结构进行了定义, 并从技术集成的角度, 对大型非线性智能结构设计与控制中的若干核心技术进行了系统的分析和论述。从感知、辨识、寻优和控制 4 个基本方面, 分析了当前的技术状态和技术水平, 并提出当前研究中应重点注意的几个方面。从技术发展的角度, 预测了今后10年需重点研究的几项相关关键技术。

**关键词** 智能结构; 辨识; 寻优; 控制

## 1 引言

智能结构的出现是材料科学, 微电子学, 现代控制理论, 计算机科学, 人工智能与人工神经网络等一系列高新技术综合集成的结果<sup>[1-60]</sup>。从历史上看, 至少有以下5个领域的技术进步与发展趋势对智能结构的产生与应用起了推波助澜的作用:

①材料耦合特性的开发与利用 材料完整的本构关系应当包括它的力学, 光学, 化学, 物理, 热及电磁特性等。早期的研究与应用工作往往只注意利用材料的某一种特性, 而忽略了其交叉耦合关系的利用。作为智能结构主要组成单元的传感元件(sensor)和执行元件(actuator), 通常就是利用了材料的某种或某几种交叉耦合关系。其中, 机电耦合是智能结构中最常利用的耦合现象。

②叠层材料的分析、设计与制造技术 在过去30年里, 叠层材料的使用日趋普遍, 叠层材料的优点在于其功能的可复合性与材料特性的可设计性。正是由于叠层材料的分析、设计与制造技术的进步, 才使得传感元件、执行元件和微处理器等能以分布的方式埋入主体结构, 从而使复合后的结构能同时实现承载、探测、辨识和自主控制等组合功能。

③自适应控制、鲁棒控制、容错控制与智能控制技术 70年代以来, 受宇航技术, 机器人技术和核电站技术发展潮流的驱动, 现代控制理论的框架结构发生了很大的变化, 鲁棒控制、容错控制、自适应控制和智能控制等一系列新的控制理论与控制策略相继问世。一方面, 新的控制思想和控制技术的出现对智能结构思想的产生起了推动作用; 另一方面, 智能

\* 863 计划资助项目

结构的应用和发展又对控制理论的更新与完善提出了严峻的挑战。智能结构的发展对现代控制理论与控制技术的挑战集中体现在以下几个方面：(A)被控对象的有关参数不确定。由于受材料性能波动、结构制造工艺、模型简化和实验条件偏差等因素的综合作用，被控对象个体的有关品质参数虽然是确定的，但通常不可预先精确地知道。在大多数情况下，我们只知道被控对象有关参数的可能取值范围，这一特点决定了智能结构中采用的控制算法或控制器应当具有一定的鲁棒性。(B)被控对象的有关参数和拓扑结构是时变的。蠕变和疲劳累积损伤等因素的作用，使得智能结构(被控对象)的有关参数通常是时变的，冲击损伤和疲劳断裂甚至会使被控对象的拓扑结构和性能参数发生突变，且其变化规律通常是随机的。这些特性决定了智能结构中采用的控制算法或控制器必须具有一定的容错能力和在线自适应学习功能。(C)局部控制和中央控制的功能分配与协调。在智能结构中，大量传感元件和执行元件以分布的方式埋入主体结构。由于受中央处理器(CPU)信息处理速度和互连网络数据传输与合成速度的限制，对于快速实时控制(如直升机旋翼的颤振控制)问题，完全的中央处理器控制方式是行不通的，必须由分布式的微处理器对局部信息进行预处理，然后交由中央处理器进行协调控制。因此，各微处理器之间及各微处理器和中央处理器之间的界面划分与功能分配是智能结构设计必须解决的关键问题。

④计算机和微电子技术 计算机科学的进步使得用有限元和边界元等数值计算方法分析大型工程结构的静态、动态及疲劳断裂问题的愿望成为现实。微电子技术的完善使得微型传感元件和执行元件的制造得以实现。前者解决了含有埋入式分布传感元件和执行元件的叠层结构的力学性能分析问题，后者使得传感元件和执行元件能以分布的方式埋入主体结构，并使对主体结构基本性能的伤害降至最低限度的要求成为可能。计算机科学的发展对控制理论与控制技术进步的影响是显而易见的。离开了计算机的支持，自适应控制和智能控制便无法实现。

⑤大型空间站和轨道平台技术 80年代以来，空间技术获得了长足的进步。1986年，具有6个对接口的俄罗斯第3代空间站“和平”1号发射成功，从此拉开了长寿命、大挠度、高可靠性空间站工程的序幕。

空间站的主要载荷形式是冲击载荷，其来源主要有2个：(A)微流星和空间垃圾；(B)轨道修正、轨道机动、舱体对接与分离。随着空间站规模的增大，轨道飞行时间的增加，空间站遭遇微流星和空间垃圾撞击的几率大大增加。由微流星和空间垃圾引起的冲击载荷和冲击疲劳载荷，其特点是局域性强，危害面广，但振动问题不很突出。但由于受载最严重的部位不仅是时变的，而且是随机的，因此给损伤探测与监控，尤其是损伤的人工探测与监控带来了很大的困难。为解决这些问题，80年代后期以来，受“自由号”国际空间站计划的驱动，以美国为主要代表的世界各航天大国均加紧了航天结构的在轨自主实时损伤检测、监控、故障隔离与控制的研究工作。对于微流星和小的轨道碎片，目前多采用多层防护屏加以防护，但对于流星雨和大的轨道碎片，则以通过轨道机动的方式加以规避为宜。轨道修正、轨道机动、舱体对接与分离等引起的冲击载荷是非局域的，其振动的响应与抑制是一个必须面对的棘手问题。空间站结构的柔性大，内阻低，而太空环境又几乎没有外阻，因此为降低结构响应的峰值应力和减少振动循环周次，以使由振动响应引起的疲劳损伤降至最低限度，空间站结构的振动主动控制变得十分必要，无论是结构损伤的自主探测，故障隔离，还

是结构振动的主动控制,都必须首先解决广义的系统辨识问题。目前采用的系统辨识方法主要是参数辨识,它是与被控对象精确的数学模型为基础的。对于空间站结构,由于结构组成的复杂性和大变形非线性效应的存在,建立其精确的解析数学模型是不可能的,只可能借助于数值手段(如有限元法或边界元法)和/或地面试验进行近似分析和重构。模型误差和地面模拟环境与空间真实环境的差异,以及空间挠性结构在轨运行期间的物理特性(如关节摩擦,结构损伤,控制元件老化等)和载荷特性的渐变等除如上述已经指出的那样会对控制器的设计提出鲁棒性的要求之外,另外一个常常被人忽略的更本质的问题是:模型简化和重构不仅会带来误差,而且在泛化的过程中有可能出现定性的差异,加之鲁棒控制器的鲁棒性不可避免地存在一个适用范围,因此控制器的在线学习问题必须予以妥善解决。由于智能结构具有感知、辨识、寻优和控制4种基本功能,因此比较适合完成此类任务。与空间站相同,空间平台和太空机器人(机械臂)也遇到了相类似的振动控制问题,这也是近年来世界各发达国家的智能结构研究主要以航天工程应用为牵引的原因所在。很明显,智能结构在航空、船舶与土木工程等领域的应用前景也十分广阔。

由于人工神经网络采用分布式的信息处理方式和无模型(free model)的特点,并且具有容错性、鲁棒性和自适应在线学习等功能,因此作为一种信息处理手段,人工神经网络在智能结构的设计与控制中受到广泛的重视。智能结构是一系列高新技术综合集成的结果,阐明各相关技术的性质、特点、集成方式和对智能结构总体品质的影响是本文讨论的核心。除此之外,本文还将根据目前的研究进展和积累的经验,对智能结构未来的发展趋势和需要重点解决的关键问题及可能的解决途径提出若干意见和建议,以期对该领域研究工作的展开与深入有所帮助。

## 2 智能结构的组成与特性

**定义 1** 具有感知外界和/或内部状态与特性变化的一类结构称之为**传感结构**(sensory structure)。如含有埋入式的或共形的FR天线的结构和含有用于损伤探测的光纤阵列的结构都是典型的传感结构。

**定义 2** 具有感知外界和/或内部状态与特性变化,并能对这些变化按照预先固定的程序作出反应的一类结构称之为**可控结构**(controlled structure)。如将在居里点之下经过预拉伸变形的形状记忆合金丝和碳纤维一起混编成丝物,使形状记忆合金丝在织物中构成封闭的网格,然后将织物制成的结构的特定部位加热至居里点之上后冷却,由此得到的结构便具有载荷的定向转移(重新分配)和裂纹的定点定向遏制之功能。这类结构就是典型的可控结构。

**定义 3** 具有感知外界和/或内部状态与特性变化,并能根据变化的具体特征对引起变化的原因进行辨识,从而采取相应的最优或近优控制策略以作出合理响应的一类结构称之为**智能结构**(intelligent structure)。

从智能结构的定义可以看出,智能结构具有感知、辨识、寻优和控制4种基本功能。为实现这些功能,智能结构至少应包含传感元件,执行元件和信息处理元件等基本组元。

### 2.1 传感元件(sensor)

传感元件是一种测量装置,它能感受或响应规定的被测量,并按照一定规律转换成可用

输出信号,以满足信息的传输、处理、存储、记录、显示和控制等要求。传感元件通常由直接响应于被测量量的敏感元件和产生可用输出信号的转换元件以及相应的电子线路所组成。从控制的角度讲,传感元件也常被称之为观测器。

传感元件的使用已有很长的历史,早期的传感元件都是结构型的,它们利用机械结构的位移或变形来完成非电量到电量的变换。随着各种半导体材料和功能材料的发展,利用材料的压敏、光敏、热敏、气敏和磁敏等效应,可以把压力、光强、温度、气体成份和磁场强度等物理量变换成电量,由此研制成的传感元件称之为物性传感元件。在智能结构中采用的传感元件目前主要为物性传感元件,这类传感元件的灵敏度比较高,且易于以分布的方式贴在结构表面或埋入结构内部。

理想的传感元件应能将结构内部的状态变化(应变或应变速率等)直接以电信号的形式输出。用于衡量智能结构传感元件品质优劣的主要技术指标是灵敏度(sensitivity)、空间分辨率(spatial resolution)和频带宽(bandwidth)。其它技术指标还有温度敏感性(temperature sensitivity)、电磁相容性(electromagnetic compatibility)、尺寸大小(size)、线性程度(linearity)和迟滞特性(hysteresis)等。对于长寿命的智能结构(如空间站中采用的智能结构)来讲,传感元件的性能稳定性是一个需要重点考虑的指标,原因是它对系统辨识结果的准确性和正确性具有至关重要的影响,这一点应当引起应有的重视。

### 2.1.1 传感机理(sensing mechanisms)

在智能结构中,通常采用两类传感元件:一类是加速度传感器,另一类是应变传感器。这两类传感器的共同特点是不需要外部参照系。加速度传感器用的是惯性参照系,目前最有竞争力的是半导体加速度传感器,其测量机理是,在硅片上腐蚀出一个悬臂梁,利用压致电容变化完成对特定点和特定方向的加速度测量。另外一种有希望的测量机理可能是电子隧道效应(electron tunneling)。由于辅助设备复杂而庞大,光纤加速度传感器目前在航空航天类智能结构中的使用受到一定的限制。随着光学人工神经网络和光学计算机的出现,这一状态有可能得到根本改变。从大量的事例中人们领悟到,相关技术间的相互制约与协同为总体设计技术的发展提供了契机与挑战。这是大型工程项目的研究与实施中经常会遇到的一个非常复杂的方面,需要采用系统工程的方法予以妥善解决。

半导体加速度传感器的频带宽,尺寸小,十分有利于以分布的方式贴在结构表面或埋入结构内部。对加速度传感器的输出结果进行一次和二次积分,可获得特定点和特定方向的速度及位移的近似估计。由于受电容漏电的影响,电容型加速度传感器不适于对静态量或准静态量进行测量。

应变传感器的种类很多,主要传感机理分别为应变-电阻率之间的单调关系(电阻应变片和半导体应变仪)、压电效应(压电应变仪)、机/光耦合效应(光纤应变仪)等。其中,压电型应变传感器是目前研究的重点。某些电介质材料,经过极化处理之后,在沿一定方向对其施加压力或拉力使之变形时,在它们的表面上会产生电荷。当将外力去掉时,它们又重新回到不带电状态,这种现象称为压电效应。具有这种压电效应的物体称为压电材料或压电元件。常见的压电材料有石英晶体,钛酸钡、锆钛酸铅等。压电效应分为纵向压电效应和横向压电效应。在智能结构设计中,两种压电效应的利用都很普遍。应变测量可分为点应变测量和平均应变测量两种。平均应变测量是目前研究的热点,它涉及应变传感器阵列的最优布

置、权函数的选择和系统辨识结果的正确性和准确性等复杂问题。

### 2.1.2 商业上可提供的应变传感元件

表 1 给出了目前商业上可提供的应变传感元件的种类和有关品质特性。这些传感元件均可以分布的方式贴在结构表面或埋入主体结构的内部。表 1 给出的传感元件包括传统的电阻应变片、半导体应变仪和近年来开始流行的埋入式光纤应变仪、压电薄膜和压电陶瓷应变仪等。衡量智能结构用传感元件品质优劣的主要技术指标可分为 3 类。第 1 类是可能性指标，它包括灵敏度 (sensitivity) 和频带宽 (bandwidth)；第 2 类是可行性指标，它包括可埋入性 (embedability)、引入权函数的能力 (ability to introduce weighting function)、电磁相容性 (electromagnetic compatibility)、性能稳定性 (long-term stability) 和最小可测标距 (localization)；第 3 类是有效性指标，它包括传感器的尺寸、重量和使用功率等。

表 1 应变传感元件性能比较

类型	电阻应变片	半导体应变仪	光纤应变仪	压电薄膜	压电陶瓷
特性					
灵敏度	30V/e	1000V/e	$10^6 \text{ V/e}$	$10^4 \text{ V/e}$	$2 \times 10^4 \text{ V/e}$
频带宽	0Hz—10 <sup>4</sup> Hz	0Hz—10 <sup>4</sup> Hz	~0Hz—10 <sup>4</sup> Hz	0.1Hz—GHz	0.1Hz—GHz
测量标距(in)	0.008	0.03	~0.04	<0.04	<0.04
性能稳定性	中	中	优	低	中
电磁相容性	低	中	优	中	中
尺寸、重量	小	小	小	小	小
辅助设备	—	—	复杂	—	—

从表 1 可以看出，仅就第 1 类技术指标而言，除电阻应变片之外，各种应变传感器的性能十分接近，均可满足一般的使用要求。因此，为智能结构选定传感器类型时，应主要考虑它的第 2 类和第 3 类技术指标。光纤应变仪的主要缺点是辅助设备比较庞大，信号处理过程相当复杂，即使对简单问题也是如此。对各类技术指标综合权衡后得出结论，智能结构用传感器，尤其是航空航天类智能结构用传感器，目前以选用压电陶瓷型或半导体型为宜。

### 2.2 执行元件 (actuator)

执行元件是一种致动装置，其功能是执行信息处理单元发出的控制指令，并按照规定的方式对外界和/或内部状态与特性变化作出合理的反应。理想的力学执行元件应能直接将电信号转换为母体材料中的应变或位移。衡量执行元件性能品质的第 1 类技术指标是最大可用冲程或应变、弹性模量和频带宽；第 2 类技术指标是迟滞特性、线性范围、拉压强度、疲劳断裂寿命、温度敏感性、可埋入性和性能稳定性；第 3 类技术指标是尺寸大小、重量和使用功率等。应变执行元件的主要工作机理是致动应变，它是一种非应力引起的可控应变。目前主要有 4 种引起致动应变的方式：逆压电效应、电致伸缩、磁致伸缩和形状记忆效应。前 3 种方式可将电信号直接转换为致动应变，第 4 种方式利用的是温控相变。

### 2.2.1 致动应变模型

致动应变进入材料本构关系的方式和热应变是一样的。执行元件中的总应变等于由应力等因素引起的应变加上可控的致动应变。作用于执行元件上的外部应力场由平衡条件和变形协调条件共同决定。不同的局部应变-位移场假设可以导出不同的复合本构模型，而模型的精确程度将对控制算法与控制器设计产生重要影响。

对于上下表面安置有智能型执行元件的复合梁来说，最简单的变形假设可能是：在母体材料内部，应变按线性规律变化；在执行元件内部，应变服从均匀分布。这种模型对于母体材料工作在线弹性范围内，且执行元件很薄的复合梁结构是比较合理的。

对于局部位移-应变场，目前用的比较多的是 Bernoulli-Euler-Kirchhoff 假设：不论执行元件是贴在母体材料的表面或埋入其内部，均假设应变在母体材料和执行元件内部按线性规律连续变化。BEK 假设成立的基本条件是执行元件和母体材料均工作在线弹性范围内。大量的研究工作显示，BEK 假设对于梁元、板元和壳元的有限元分析是比较合理的。

由于执行元件以离散的方式贴在母体材料表面或埋在母体材料内部，因此执行元件的边界效应和执行元件与母体材料之间的界面效应应当予以应有的重视。对于静态分析，边界效应和界面效应将影响分析结果的准确性；对于动态分析，边界效应，尤其是界面效应的影响通常是显著的。对于振动和噪声抑制问题，界面粘结层的厚度与特性对诱导应变的动态延迟会产生重要影响。模型的近似性、制造工艺的随机性、地面实验环境和轨道真实环境的差异都要求控制器具有在线自适应学习功能。界面层遇到的另外一个问题是它自身的粘结强度和可靠性是否有保障。影响粘结强度的主要因素有 3 个：粘结剂的性能，智能元件的表面处理工艺和叠层结构的细节设计。在循环载荷作用下，由于界面处的应力和应变梯度通常都比较大，因此很容易诱发疲劳源。疲劳现象是一种局部现象，具有明显的随机特征，因此精确的局部应力应变分析和概率预测无论对确定疲劳源还是进行结构疲劳断裂寿命控制都是十分必要的。

精确的力学模型分析是有效的系统辨识和系统控制赖以建立的基础，这一点应当引起人们应有的重视。

### 2.2.2 执行元件的种类与特性

目前商业上可提供的应变作动材料有 4 种类型：压电材料，电致伸缩材料，磁致伸缩材料和形状记忆合金。它们的基本性能的典型取值范围如表 2 所列。

压电材料通常包括压电晶体、压电陶瓷和压电薄膜。压电型执行元件利用的实际上是逆压电效应：由外加电场在材料内部诱发应变。逆压电现象可以设想为外电场和材料内部受约束的电单极子之间相互作用的结果。在外电场作用下，按能量极小原理，材料中的电单极子将向内能极小化的方向运动。由于受周围介质的约束，自由运动被阻止，并在材料内部诱发应变。早期的研究工作指出，在一阶近似条件下，应变  $\varepsilon$  和电场强度  $E$  之间的关系  $\varepsilon$ - $E$  近似成线性。更进一步的研究工作显示， $\varepsilon$ - $E$  图通常是蝶形的，线性段仅在弱电场的条件下近似存在。换句话说，非线性现象和迟滞效应是逆压电效应材料的本征属性。这一结果无疑将对智能结构的控制策略和控制难度产生重要影响，这一点应引起国内外学者的重视。电致伸缩现象可以设想为外加电场和材料中电偶极子之间相互作用的结果；磁致伸缩现象可以设想为外加磁场和材料中磁偶极子之间相互作用的结果。已有的研究工作显示，电致伸缩和

磁致伸缩材料的耦合本构关系是非线性的（近似为二次函数），迟滞现象不同程度地存在。与逆压电效应不同，电致伸缩和磁致伸缩材料的应变方式（拉或压）不随外加电磁场方向的改变而改变。形状记忆合金中的作动应变主要是相变过程产生的。如富含Ni的Ti合金（Nitinol）中的作动应变就是通过马氏体和奥氏体之间的相变诱发的。

表 2 应变作动材料典型性能指标

类型(牌号)	压电陶瓷	压电薄膜	电致伸缩材料	磁致伸缩材料	形状记忆合金
特性	PZTG-1195	PVDF	PMN	Terfenol DZ	Nitinol
最大应变冲程 ( $\mu$ )	1000	700	1000	2000	20,000
弹性模量 $10^4$ psi	9	0.3	17	7	$4^{(M)}$ $13^{(A)}$
合成应变 <sup>3)</sup> ( $\mu$ )	350	10	500	580	8500 ( $A^2$ )
频带宽	宽	宽	宽	中	窄
可埋入性	好	好	好	好	好
性能稳定性	好	中	好	好	好
供应形式	薄带	薄膜	薄带, 线	薄带, 线	薄带, 线
限制条件	—	低温, 低压	强电场	强磁场	低频

1) M 指马氏体

2) A 指奥氏体

3) 指铝梁上下表面贴应变作动材料，其厚度比为 10 : 1 时的合成应变。

PZT (Lead Zirconate Titanate) 是最常见的压电陶瓷。它的最大应变冲程可达1000 $\mu$ 应变的量级。新近研究的一些压电陶瓷的最大应变冲程已达 9000 $\mu$ 应变的量级。压电陶瓷的最大应变冲程不仅和其类型有关，也严重地依赖于其化学组份和生产工艺。压电陶瓷材料性能的稳定性不仅对智能结构的力学设计具有重要影响，而且直接影响到其控制器可采用的设计方法。PVDF (polyvinylidene fluoride) 是一种常见的压电薄膜，它的最大应变冲程可达 700 $\mu$ 应变的量级。电致伸缩材料（如 Lead Magnesium Niobate, PMN）也产生大约 1000 $\mu$ 应变的应变冲程，而磁致伸缩材料（如 Terfenol）的最大应变冲程要稍大一些，可达 2000 $\mu$ 应变左右。就材料的延性而言，形状记忆合金的通常最好，如 Ni Ti 形状记忆合金的延性通常可达 20000 $\mu$ 应变左右，极限状态甚至可达 80000 $\mu$ 应变左右。智能材料的最大应变冲程并不一定是越大越好，它的有效应变冲程通常只需比相邻母体材料的实际工作应变冲程稍大一些即可。对应变致动智能材料而言，它的两个更重要的性能参数应当是它的模量大小和迟滞特性。对于迟滞特性，目前似乎没有引起应有的重视。其实，它是智能结构的控制器设计必须正视的一个相当棘手的问题。

智能材料的模量大小将直接影响母体中诱导应变的大小。设想将拉至最大应变的智能材料粘在10倍于其厚度的铝合金梁的上下表面，然后撤去外部作用（电场，磁场或温度场等），设智能材料中的应变分布是均匀的，则合成应变的结果如表 2 中第 3 行所列。合成应变是智能材料的最大应变冲程和弹性模量的函数。

对智能结构的动态控制来讲,除迟滞特性之外,频带宽是材料选择必需考虑的另一个重要因素。对于快过程而言,采用形状记忆合金作为执行元件是不可行的,原因是它的响应速率太低。在选择智能材料时,应根据问题的性质在最大应变冲程、弹性模量、迟滞特性和频带宽之间进行权衡,单纯地说哪一种性质更重要是不全面的。

### 2.3 自感执行元件 (self-sensing actuator)

传感元件和执行元件既可以独立工作,也可以集合为一体。自感型执行元件就是让同一元件同时充当传感和执行双重角色。用作自感型执行元件的智能材料,其机/电或其它类型的耦合关系必须是可逆的。压电现象和某些相变过程满足上述要求。由于压电现象和相变过程均存在迟滞现象,由迟滞诱发出的双稳态特性对材料状态和特性的辨识与控制均产生不利的影响;材料的状态不仅取决于当时的外部环境,而且依赖于它的变化历程,这一点很象材料学中的 Bauschinger 效应。

由于传感元件和执行元件集合为一体,因此自感型执行元件对结构的主动控制是有利的。它一方面简化了结构的控制程序和控制算法,当采用局部控制 (local control) 策略时显得十分突出,另一方面简化了通讯网络的布线程序,从而提高了智能结构整体的生存能力和可靠性。

选择合适的传感元件类型(如加速度传感器,应变传感器等)和执行元件类型(如力型执行元件,分布式应变执行元件等)对简化控制器的设计和增强控制算法的泛化能力具有重要的影响。控制算法的泛化能力通常是借助于权函数的方式实现的,只有当输入数据呈现某种明显的规律性时,权函数才可能成为完成泛化的一种有效方式。

### 2.4 控制策略与算法 (control methodology and algorithm)

结构之所以具有智能源于它的自主辨识和分布式控制功能。智能结构的控制分为 3 个层次:局部控制 (local control),全局算法控制 (global algorithm control) 和智能控制 (intelligent control)。局部控制的目标是增大阻尼和/或吸收能量并减小残留位移或应变;全局算法控制的目标是镇定结构,控制形状和抑制扰动。前两种控制问题是目前的技术水平可以实现的。智能控制是未来应重点研究的领域,它通常应具备以下功能:系统辨识,故障诊断和定位,故障元件的自主隔离、修复或功能重构,在线自适应学习等。

#### 2.4.1 局部控制

采用局部控制的原因主要有 3 个:①简化总线结构,放松对中央处理器的运算速度要求;②加快实时控制速度;③提高控制系统的生存能力和可靠性。实现局部控制的方法很多,最常用的方法就是模拟匹配中止条件。如采用压电类自感型执行元件实现结构的振动主动控制,就可通过机/电耦合将振动能量转换为电输出,通过移相和功率放大,将处理过的电信号重新输入执行元件,利用电/机耦合现象和移位叠加对振动实行抑制。局部控制的核心思想是头痛医头,脚痛医脚,因此其控制策略从总体上讲未必是最优的。另外,在移相操作中具体应将相位移动多大才合适也是一个需要认真研究的问题。对于准静态过程和周期过程,确定合理的相位移动量并不十分困难。困难在于对于快速随机振动,应如何确定相位移动量并实现有效的实时振动抑制。另外一个重要问题是对于多自由度的多输入与多输出系统,传递函数的权函数应如何选择。很明显,后一问题将直接影响控制方法的泛化能力。尽管局部控制存在一些问题,但从技术的角度讲,一定范围的局部控制有时是必须的。

## 2.4.2 全局算法控制

尽管局部控制很有用,但对一些涉及结构整体状态与特性的控制问题,如结构整体的镇定、形状控制与扰动抑制,由于整体的各部份之间存在关联耦合,因而必须采用全局控制策略。全局控制除了需要处理一些在局部控制中也会出现的问题,如为使控制系统的性能具有鲁棒性,应考虑设计相应的补偿器之外,对智能结构的控制而言,还必需处理一些新的问题,即控制任务如何按层次结构进行分配。存在两种极限情况:①完全中央控制。在这种控制模式中,来自各分布式传感器的所有信息被直接输送给中央处理器,由中央处理器统一对这些信息进行分类、判断和解释,形成控制指令并传输给分布式执行元件。②完全分散控制。这种控制模式实际上就是局部控制。中央控制的优点是有可能实现全局最优控制,缺点是计算效率很低。单一中央处理器的信息处理速率(采样与合成速度)应不低于所控对象峰值模态的信息处理速率。对智能结构的振动抑制而言,这一速率的典型值为 $100 \times 100 \times 1000\text{Hz}$ 到 $1000 \times 1000 \times 1000\text{Hz}$ 甚至更高,即使采用专用的实时控制计算机,这一速率要求也是目前的技术水平难以达到的(目前的技术水平可达到的信息处理速率大致为 $30 \times 30 \times 1000\text{Hz}$ ,这也是我国航空“九五”规划预期奋斗的目标)。分散控制缺乏中央控制所具有的一些优良品质——如全局最优控制,但在计算上是目前的技术水平可以实现的。

将中央控制和分散控制的优点相结合,从而取长补短,这就是分层控制的思想核心。分层控制中最典型的是二级分层控制:由分布式控制器完成局部控制,由中央控制器对分布式控制器进行协调,从而共同完成全局控制。分层控制的主要问题是如何进行任务划分,以及如何协调各分布式控制器之间及分布式控制器和中央控制器之间的相互关系。从信息处理的角度讲,同时具备离线监督学习和在线自组织学习功能的人工神经网络控制器比较适合完成此类任务。

## 2.4.3 控制器的结构与环境

分布式的传感元件,执行元件和控制功能要求,意味着需要有一个与其相适应的分布式的计算结构。这一结构主要包括数据总线,连接网络布置和分布式信息处理单元。总线结构的设计应适合于大量数据的高速传输;连接网络的布置应适合于大量传感元件、执行元件和分布式处理单元的互联,并应考虑将对结构完整性的损害降至最低限度;信息处理器应具有分布式和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和在线学习功能。

## 2.4.4 控制器的设计与评价

控制器的设计依赖于受控对象的类型与特征。在通常情况下,设计人员应重点考虑以下几个因素的影响:A)受控对象的规模;B)需要的控制动作速率;C)控制精度;D)受控对象的线性程度与变化规律;E)外部激励的特点及在线辨识的难易。很明显,以上5个方面是相互关联的,这就要求设计人员根据具体对象和问题进行权衡和折衷。全局算法控制主要用于一些准静态和慢过程的控制问题,如空间站中大型挠性太阳能帆板的姿态与位形控制,太空望远镜的姿态定位与校正等。对于这类问题,控制器执行机构的动作速率通常没有特别的要求,优先考虑的设计目标是系统的整体特性与控制精度。大家知道,全局算法控制需以精确的系统模型或系统辨识结果为基础,并通过执行机构的有效动作来实现。在实际问题中,受控结构的自由度通常成千上万,具有十几万个自由度的大型空间挠性结构也并非罕见,且不

说各类有关结构自由度的缩聚方法是否会带来不可控的系统误差,即使缩聚是有效的,在智能结构中实际使用的传感元件和执行元件的数量也会比缩聚后的结构自由度少得多。因此,为确保系统辨识结果和执行元件作动结果的正确性和准确性,传感元件和执行元件的最优数目选择和定位(布置)是一个必须重点研究的关键问题,这一问题在一定意义上是求解一个可行域非连通的带约束的拓扑优化问题。局部控制主要用于一些精确的数学模型难以建立或难以辨识,及各部分之间的耦合关系较弱且控制精度要求不太高的系统快过程的控制问题,如直升机旋翼的颤振控制,战斗机驾驶舱的噪声控制等。局部控制多采用被动式的分散控制方案,自感型智能执行元件很适合完成这类控制问题。如果控制过程很复杂而受控对象的规模又很庞大的话,则必须采用分层递阶控制方案。分层控制中的任务划分与界面协调宜通过学习的方式加以解决,因此智能化是一个需要重点研究的方向。从信息处理的角度讲,多层前向人工神经网络采用的实际上就是一种分层信息处理方式。因此,通过引入一定的局部反馈环节和在线自适应学习功能,以人工神经网络模型为基础来实现分层控制的智能化看来很有发展潜力。

### 3 当前的研究状况及若干应用

自智能结构的思想提出以来,以美、日、德、英为代表的发达国家迅速投入了大量的人力、物力和财力用于该领域的研究与探索。美国空军首先以基金的形式用来支持智能结构的概念研究。由于概念研究取得了令人鼓舞的进展,美国空军、海军、美国能源部和NASA的Landley研究中心与Marshall研究中心随后即以技术合同的形式投入了大量的资金用于智能结构的应用与发展研究。从当前的研究状况看,智能结构的应用和潜在应用领域集中在以下几个方面:1 空间结构的精确定位、校正和拓扑保形;2 结构损伤的自主探测、健康监控和主动控制;3 结构振动的自主探测、抑制和隔离;4 舱内噪声的有源和无源控制;5 结构外形的自适应调节和拓扑变换。第1和第2领域涉及的是静态或准静态问题,对于这类问题,实时性并不十分重要。在传感元件的选择上,可选用形状记忆陶瓷或形状记忆合金;在控制算法和控制策略上,宜采用中央控制方式。第3至第5领域涉及的是动态问题,对于这类问题,实时性十分重要。在传感元件的选择上,可选用半导体或压电陶瓷传感元件;在执行元件的选择上,可选用迟滞现象较弱的压电陶瓷或形状记忆陶瓷;在控制算法和控制策略的选择上,应根据问题的规模和局部特性选择合适的局部控制或分层控制方案。

### 4 未来的研究与发展方向

从当前的研究与应用状态看,以下研究工作会引起人们的广泛兴趣:

- 1 高模量、高疲劳寿命、大应变冲程的智能材料;
- 2 传感元件和执行元件阵列的最优数量选择与布置;
- 3 强鲁棒性的分层最优智能控制算法;
- 4 具有容错能力和局部反馈回路的分布式控制器的在线自适应学习算法;
- 5 强化人工神经网络的容错性和泛化能力的一般方法;
- 6 以离线监督学习为基础,同时具有在线自适应学习功能的混合神经网络模型;
- 7 神经网络的最小拓扑结构构造规则与学习算法;

- 8 智能材料的表面处理工艺和自动埋入方法;
- 9 宽频带、低迟滞的形状记忆材料;
- 10 结构损伤的自主探测、健康监控和主动控制的方法与技术;
- 11 含有智能材料结构的静强度、动强度及疲劳断裂寿命数值分析与数值模拟方法;
- 12 智能结构的在轨修复、功能重构和可维修性评估技术;
- 13 智能元件的性能稳定性及其对控制算法的影响;
- 14 振动和噪声的有源控制机理与技术;
- 15 多约束条件下的智能结构拓扑优化技术.

### 参 考 文 献

- 1 Akishita S, Mitani Y I, Miyaguchi H. Sound transmission control through rectangular plate by using piezoelectric ceramics as actuators and sensors. Proc. of The Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structure, Nagoya, Japan (1991) : 445—461
- 2 Anderson E H, Hagood N W, Goodliffe J M. Self-sensing piezoelectric actuation; analysis and application to controlled structures. Proc. of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASE 33rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 92—2645, 2141—2156
- 3 Anderson M S, Crawley E F. Discrete shaped strain sensors for intelligent structure Proc. of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASE 33rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 92—2406, 566—577
- 4 Collins S A, Padilla C E, Notestine R J, et al. Design, manufacture, and application to space robotics of distributed piezoelectric film sensors. *J. Guidance, Control, and Dynamics*, **15**, 2 (1992) : 396—403
- 5 Crawley E F, de Luis J. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures. *AIAA Journal*, **25**, 10 (1987) : 1373—1385
- 6 Crawley E F, Anderson E H. Detailed models of piezoceramic actuation of beam. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, **1**, 1 (1990) : 4—25
- 7 Crawley E F, Lazarus K B. Induced strain actuation of isotropic and anisotropic plates. *AIAA Journal*, **29**, 6 (1991) : 944—951
- 8 Cross L E. Polarization controlled ferroelectric high strain actuators. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, **2**, 3 (1991) : 241—260
- 9 Cross L E. Fatigue effects in high strain actuators. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, **3**, 4 (1992) : 558—571
- 10 Dosch J I, Inman D I, Garcia E. A self-sensing piezoelectric actuator for collocated control. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, **3**, 1 (1992) : 166—185
- 11 Edberg D L, Bicos A S, Fuller C M, et al. Theoretical and experimental studies of a truss incorporating active members. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, **3**, 3(1992): 333—347
- 12 Ehlers S M, Weisshaar T A. Static aeroelastic behavior of an adaptive laminated piezoelectric composite wing. Proc. of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 33rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 92—2526, 914—925
- 13 Fanson J L, Anderson E H, Rapp D. Active structures for use in precision control of large optical systems. *Optical Engineering*, **29**, 11 (1990) : 1320—1327
- 14 Fanson J L, Chu C, Lurie B J, Smith R S. Damping and structural control of the JPL phase 0 testbed structure. *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, **2**, 3 (1991) : 281—300
- 15 Fuller C R, Gibbs G P, Silcox R J. Simultaneous active control of flexural and extensional waves in beams. *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, **1**, 2 (1990) : 235—247
- 16 Goodfriend M J, Shoop K M. Adaptive characteristics of the magnetostrictive alloy, terfenol-d, for active vibration control. *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, **3**, 2 (1992) : 245—254
- 17 Hagood N W, Von Flotow A. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. *J. Sound and Vibration*, **146**, 2 (1991) : 243—268
- 18 Heeg J. Analytical and experimental investigation of flutter suppression via piezoelectric actuation.

Proc. AIAA Dynamics Specialists Conference, AIAA Paper 92-2106, 237-248

- 19 Kashiwase T, Tabata M, Tsuchiya K, et al. Shape control of flexible structures. *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, **2**, 1 (1991) : 110-125
- 20 Lazarus K B, Crawley E F, Bohlmann J D. Static aeroelastic control using strain actuated adaptive structure. *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, **2**, 3 (1991) : 386-410
- 21 Lee C K. Theory of laminated piezoelectric plates for the design of distributed sensors/actuators: part I. governing equations and reciprocal relationships. *J. Acoustical Society of America*, **87**, 3 (1990) : 1144-1158
- 22 Liang D, Rogers C A. One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials. *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, **1**, 2 (1990) : 207-234
- 23 Librescu L, Rogers C A, Song O. Static aeroelasticity and free vibration behavior of adaptive aircraft wing structures modelled as composite thin-walled beams. Proc. the 2nd Joint Japan/U. S. Conf. on Adaptive Structures, Nagoya, Japan, Technomic Publishing, Lancaster, PA (1991) : 461-479
- 24 MacMartin D G, Hall S R. Control of uncertain structures using an Ho power flow approach. *J. Guidance, Control, and Dynamics*, **14**, 3 (1991) : 521-530
- 25 Nishimura I, Abdel A M, Masfri S F, et al. An experimental study of the active control of a building model. *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, **3**, 1 (1992) : 134-165
- 26 Roylance L M, Angell J B. A batch-fabricated silicon accelerometer. *IEEE Trans. on Electron Devices*, **26**, 12 (1979) : 1911-1917
- 27 Sirkis J S, Haslach H W. Complete phase-strain model for structurally embedded interferometric optical fiber sensors. *J. Intelligent Material Systems and Structures*, **2**, 1 (1991) : 3-24
- 28 Tzou H S, Gadre M. Theoretical analysis of a multi-layered thin shell coupled with piezoelectric shell actuators for distributed vibration controls. *J. Sound and Vibration*, **132**, 3 (1989) : 433-450
- 29 Ray M C, Bhattacharya R, Samanta B. Exact solutions for static analysis of intelligent structures. *AIAA Journal*, **31**, 9 (1993) : 1684-1691
- 30 Manning R A. Structural damage detection using active members and neural networks. *AIAA Journal*, **32**, 6 (1994) : 1331-1333
- 31 Kammer D, Brillhart R. Optimal sensor placement for modal identification using system-realization methods. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1730-CP, 1-13
- 32 Hinkle J, Peterson L. Experiment dynamic characterization of a reconfigurable adaptive precision truss. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1734-CP, 35-41
- 33 Tzou H, Holkamp J. Collocated independent modal control with self-sensing orthogonal piezoelectric actuator (theory and equipment). AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1737-CP, 57-64
- 34 Rosetti D, Norris M. A comparison of actuation techniques for aircraft cabin noise control. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1738-CP, 65-72
- 35 Nam C, Kim W, Oh S. Active flutter suppression of composite plate with piezoelectric actuator. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1745-CP, 127-134
- 36 Manning R. Damage detection in adaptive structures using neural networks. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1752-CP, 160-172
- 37 Saravanos D, Birman V, Hopkins D. Detection delaminations in composite beams using piezoelectric sensors. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1754-CP, 181-191
- 38 Ghandi K, Hagood N. Shape memory ceramic actuation of adaptive structures. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1758-CP, 221-231
- 39 Fenn R, Gerver M. Structural damping and self-sensing actuation in terfenol-d magnetostrictive materials. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1759-CP, 232-240
- 40 Giurgiutiu V, Chaundry Z, Rogers C. Active control of helicopter rotor blades with induced strain actuators. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1765-CP, 288-297
- 41 Waltz C, Chopra I. Design and testing of a helicopter rotor model with smart trailing edge flaps. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1767-CP, 309-319
- 42 Onoda J, Minesugi K. Semi-active vibration suppression by variable-damping members. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1770-CP, 340-347
- 43 Salama M, Kuo C, Garba I, et al. On-orbit shape correction of inflatable structures. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1771-CP, 348-355
- 44 Seeley C, Chattopadhyay A. Development of intelligent structures using multiobjective optimization

- and simulated annealing. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1777-CP, 411-421
- 45 Detwiler D, Shen M, Venkaya V. Two-dimensional finite element analysis of laminated composite plates containing distributed piezoelectric actuators and sensors. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1782-CP, 451-460
- 46 Huang S, Natori M, Miura K, et al. An object oriented approach to the motion control of a free-floating variable geometry truss. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, AIAA-94-1784-CP, 465-473
- 47 武际燕, 刘振东, 杨润生, 李洪儒 (编著). 现代控制元件: 结构·原理·应用. 电子工业出版社, 北京 (1995)
- 48 史忠植. 神经计算. 电子工业出版社, 北京 (1993)
- 49 胡守仁 (主编). 神经网络应用技术. 国防科技大学出版社, 长沙 (1993)
- 50 宛德福, 马光隆 (编著). 磁性物理学. 电子科技大学出版社, 成都 (1994)
- 51 王晓明, 沈亚鹏, 尹林. 机敏材料和机敏结构的力学分析. 力学进展, 25, 2 (1995): 209-222
- 52 赵占朝, 刘浩吾, 蔡德所. 光纤传感无损检测混凝土结构研究评述. 力学进展, 25, 2 (1995): 223-231
- 53 梁恺, 周训文. “九五”航空科技发展计划情报研究系列报道之十三——航空通用测控技术发展展望. 航空情报, 1083 (1994年10月)
- 54 董聪, 杨庆雄. 细观损伤力学新进展. 强度与环境, 4 (1993): 1-9
- 55 董聪, 夏人伟. 疲劳裂纹扩展寿命预测概率模型. 强度与环境, 4 (1994): 13-18
- 56 董聪, 何庆芝. 随机疲劳累积损伤可靠性分析模型. 北京航空航天大学学报, 2 (1995)
- 57 董聪, 夏人伟. 空间站结构损伤容限设计技术. 863 航天技术通讯, 4 (1995): 10-18
- 58 董聪, 夏人伟. 微流星对空间站的危害与防护. 863 航天技术通讯, 9 (1995)
- 59 董聪, 酆正能, 夏人伟, 何庆芝. 多层前向网络研究进展及若干问题. 力学进展, 25, 2 (1995): 186-196
- 60 董聪. 人工神经网络研究进展. 北京航空航天大学博士后研究工作报告, 北京 (1995)

## SOME KEY TECHNOLOGIES IN THE DESIGN AND CONTROL OF INTELLIGENT STRUCTURES

Dong Cong

Tsinghua University, Beijing 100084

Xia Renwei

Beijing University of  
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083

**Abstract** Sensory structure, controlled structure and intelligent structure are defined respectively according to their exact nature. In a sense of technology integration, some key technologies in design and control of large nonlinear intelligent structures are analyzed and reviewed, covering such areas as sensor, identification, optimization and adaptive control, the current state of the technique and the level of the intelligent structure. Some important problems are pointed out from the view point of the technology evolution, together with some important key technologies in the field that will be needed in the future developments.

**Keywords** *intelligent structure, identification, optimization, control*