

智能材料结构 在航空领域中的应用

Application of Smart Materials and Structures in Aviation Industry

南京航空航天大学智能材料与结构研究所 裘进浩 边义祥 季宏丽 朱孔军



裘进浩

南京航空航天大学长江学者特聘教授, 博士生导师, 智能材料与结构航空科技重点实验室主任。曾任日本东北大学教授。长期从事智能材料与结构的研究, 包括高性能压电材料与器件的开发、压电器件的精密传感与驱动技术、振动与噪声控制、流场控制等。在国际学术期刊上发表论文 140 余篇, 其中 SCI 收录 80 篇, 参编有关智能材料结构的著作 3 部, 获日本各类研究奖 5 项, 申请发明专利 13 项, 已获授权 5 项(日本)。并于 2006 年起担任智能材料与结构研究领域的国际权威杂志 *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 的副主编, 并担任 *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, *Frontiers of Mechanical Engineering in China* 等期刊编委。

最早开展智能材料结构研究的就是航空领域。随着航空科学技术的飞速发展, 对飞行器的结构提出了轻质、高可靠性、高维护性、高生存能力的要求, 为了适应这些要求, 必须增加材料的智能性, 使用智能材料结构。智能材料结构在航空飞行器上的应用主要有智能蒙皮、自适应机翼、振动噪声控制和结构健康监测等。

将具有仿生命功能的材料融合于基体材料中, 使制成的构件具有人们期望的智能功能, 这种结构称为智能材料结构。智能材料结构的核心思想是将传感元件和驱动元件、微电子处理控制芯片与主体结构材料集成为一个整体, 通过机械、热、光、化学、电、磁等作用, 提取结构信息, 经过处理后形成控制激励, 改变结构的形状、运动状态、受力状态等。这使得结构不仅具有承受载荷的能力, 还具有识别、分析、处理及控制等多种功能, 并能进行数据的传输和多种参数的检测, 包括应变、损伤、温度、压力、声音、光波等; 而且具有主动改变材料中的应力分布、强度、刚度、形状、电磁场、光学性能等多种功能, 从而使结构材料本身具有自诊断、自适应、自学习、自修复、自增殖、自衰减等能力。

智能材料结构在航空领域获得了广泛的应用和发展, 智能蒙皮、自适应机翼、振动噪声控制和结构健康监测是智能材料结构在飞行器上的典型应用。

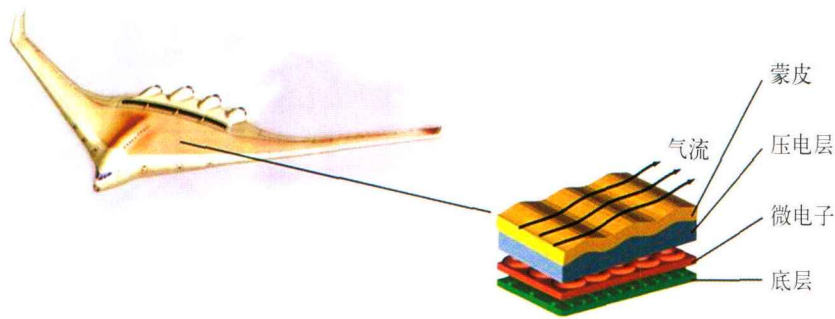
功能材料与器件

在智能材料结构中, 功能材料(器件)占有非常重要的地位, 是智能材料结构的基础。功能材料(器件)主要包括传感材料(器件)和驱动材料(器件) 2 部分。

1 传感材料(器件)

用作传感材料(器件)的主要有光纤、压电材料、电阻应变丝、碳纤维等。

光纤传感器的基本原理是将光源的光输入光纤, 并经光纤传输至调制区, 在调制区内, 外界被测参数(如温度、应力等)与进入调制区的光相



飞行器智能蒙皮系统

相互作用,使光的光学性质,如强度、波长、频率、相位等参数发生变化,形成被调制的信号光,再经光纤送入光探测器、解调器从而获得被测参数。使用光纤传感器,可以实时地测量机体结构的应力、应变、温度等物理量。光纤传感器体积小,易于和基体结构集成,抗电磁干扰性强、测量精度高、频率响应高,是智能材料结构较早采用的传感元件之一。但是光纤传感器抗剪能力差,设备体积大,成本高。

压电材料具有直接的机电转换性能,既可以用作传感元件,也可以用作驱动元件,在智能材料结构领域获得了广泛的应用。压电传感元件主要有压电陶瓷和PVDF压电薄膜。(1)压电陶瓷传感器响应速度快、结构简单、频响范围宽、所需能量小,但是脆性大、不耐冲击,容易影响基体材料性能,因此,压电陶瓷的使用受到了一定的限制。(2)PVDF薄膜是一种具有压电效应的高分子聚合物薄膜,柔韧性极好、耐腐蚀,最小厚度只有几微米,可以做成任意形状,与基体结构容易结合。但是,PVDF薄膜使用温度范围小,和基体材料的结合强度也小。

最近几年刚发展起来的含金属芯压电陶瓷纤维有效地克服了传统压电陶瓷传感元件的缺点,有望在智能材料结构中获得很好的应用。含金属芯压电陶瓷纤维的结构呈圆柱形,金属芯位于纤维的中心位置,外面包裹着一层压电陶瓷,在纤维的表面喷镀金属层。金属芯既能改善陶瓷的脆

性,增加陶瓷的强度,又能用作一个电极,纤维表面的金属层可以用作另一个电极,这样,单根含金属芯压电陶瓷纤维就可用作传感器或驱动器。含金属芯压电陶瓷纤维的直径只有 $200 \sim 400 \mu\text{m}$,长度根据需要可以制作成 $10 \sim 50\text{mm}$,由于结构尺寸细小,可以很方便地植入基体结构中,对基体结构的性能影响很小。

此外,智能材料结构采用的传感元件还包括电阻应变丝、碳纤维、疲劳寿命丝和半导体传感元件等,但是对它们的研究和应用较少。

2 驱动材料(器件)

在智能材料结构中用作驱动元件的功能材料(器件)主要有压电材料、形状记忆合金、磁流变材料、电流变材料等。

在压电元件上施加电压时,由于逆压电效应,压电元件在电场作用下产生变形,驱动基体结构产生变形或使应力状态发生变化。压电驱动器的主要特点是响应速度快、所需能量小、使用方便,主要缺点是应变小。为了解决这一问题,近年来发展了压电纤维复合材料,包括AFC(Active Fiber Composites)和MFC(Macro-Fiber Composites)。与传统的压电陶瓷相比,压电纤维复合材料的应变要大很多,还可以用于曲面,扩大了压电元件的使用范围。

形状记忆合金是智能材料结构中最先应用的一种驱动元件,它的特点是具有形状记忆效应:首先将形状记忆合金在高温下定形后冷却至

低温,然后对材料加载至发生塑性变形后卸载,使它存在残存应变,如果再加热到一定温度以上,材料又将恢复到未变形前的形状。利用这个效应,将形状记忆合金埋入基体结构,通过激励形状记忆合金,就可以使结构具有智能性。形状记忆合金驱动器的特点是变形量大、驱动力大、易于和基体结构结合、可以产生多种形式的变形,缺点是激励时需要较大的能量、响应速度慢。

磁流变材料和电流变材料分别是利用磁场和电场的变化,使材料流动特性发生变化,是2种重要的功能流体,已经在结构的减振中得到了应用。缺点是需要高磁场和高电场,性能不稳定,所需设备体积较大。

智能材料结构在航空领域的典型功能实现

最早开展智能材料结构研究的就是航空领域。随着航空科学技术的飞速发展,对飞行器的结构提出了轻质、高可靠性、高维护性、高生存能力的要求,为了适应这些要求,必须增加材料的智能性,使用智能材料结构。智能材料结构在航空飞行器上的应用主要有智能蒙皮、自适应机翼、振动噪声控制和结构健康监测等。

1 智能蒙皮

智能蒙皮是在飞行器蒙皮中植入传感元件、驱动元件和微处理控制系统,它的功能包括:流体边界层控制、结构健康检测、振动与噪声控制、多功能保型天线等。可以实时监测或监控蒙皮损伤,并可使蒙皮产生需要的变形,使结构不仅具有承载功能,还能感知和处理内外部环境信息,并通过改变结构的物理性质使结构形变,对环境做出响应,实现自诊断、自适应、自修复等多种功能。其中利用智能蒙皮进行边界层控制是通过把边界层维持层流状态,或者对湍流进行控制,大大减小了飞行器飞

行中的阻力,延迟在机翼中的空气流动分离,从而提高飞行器性能,减少燃料的消耗。由于飞行器的蒙皮一般都很薄,要求埋入的传感器体积小,对基体结构的损伤要小,符合条件的传感器有光纤、含金属芯压电陶瓷纤维、PVDF等。

智能蒙皮的研究始于20世纪

技术,实现延缓分离。

另一种方式,直接采用向主流场吹吸微射流的方式实现对主流场的控制。其中合成射流技术是当前研究的重点。Maryland大学将PZT-黄铜隔膜的SJA阵列集成于无人飞行器缩比模型的机翼中,通过理论分析获得SJA的最佳激励参数,然后

度:一是小尺度变形,即改变机翼的局部形状来控制局部气流;二是中等尺度变形,即产生翼弦量级的变形,如改变机翼弯度、厚度、扭转角或剖面形状;三是大尺度变形,即改变机翼面积、后掠角等。在MAS计划实施之前的研究主要针对中等尺度变形(如改变机翼弯度和扭转角)和小尺度变形(如产生局部鼓包和振荡表面延迟气流分离),MAS计划则主要研究大尺度变形(如改变机翼面积、平面形状)。

无论机翼变形尺度的大小是多少,机翼的自适应变形无一例外都是通过以下2种技术途径来实现的:第一种途径是通过智能材料的诱导应变来驱动结构产生所需要的形变。其中,压电材料、形状记忆合金以及磁致伸缩材料最具作为自适应机翼变形作动器的潜力。另一种途径是采用目前的常规材料结构结合成熟的控制和驱动技术,融入自适应机翼的概念,采用特殊的一体化结构/机构形式来实现机翼结构可控的自适应变形。

例如,DARPA开展了关于智能机翼(Smart Wing Program)的一系列研究,其目的是验证将智能材料与结构用于自适应机翼结构,实现无缝无铰链的连续机翼变形,改善飞机的气动和气弹特性。2004~2006年,在由DARPA资助的称为N-MAS(Next Generation Morphing Aircraft Structures)的研究计划中,NextGen航空技术公司研制了重100磅(45.4kg)的可变翼飞行器MFX-1,在跨音速风洞内完成了全尺寸飞机的风洞试验,模拟了风速达到了马赫数0.92、高度在50000英尺(15240m)时的飞行状况,柔性变体机翼承受住了气动升力、阻力、弯矩和扭矩的各种载荷。波音公司研发的“任务自适应机翼”(MAW)技术,可以使翼型随飞行速度自动改变,从而改善机翼的飞行性能及气动



飞行测试中的AFTI/F-111任务自适应机翼

70年代末,研究目的主要是军事应用,特别是美国军方和宇航部门一直对其持积极态度,以开发未来的航空飞行器。从70年代末到80年代中期,主要工作是智能蒙皮的基础探索,进行了传感器和复合材料之间的相容性、埋置特性和埋置结构等探索研究,从80年代后期开始进入广泛的基础研究和试验阶段。利用智能蒙皮产生局部微流场从而实现对主流场进行控制的技术,概括起来有2种方式。

第一种方式,当智能蒙皮处在特定状态的流场中,压电或形状记忆合金驱动器产生作用,使智能蒙皮发生局部变形或振动,对主流场产生一个微流场扰动,达到延缓分离的目的。Kentucky大学的研究组,利用THUNDER压电驱动器产生翼面振动控制流场分离。通过对NACA 4415翼型的理论与试验证明了这种控制方式在低雷诺数下可以很好地控制低速流场的分离。空客公司在A340机翼上运用了自适应翼面鼓包

通过风洞试验验证了合成射流可以有效地提高升阻比,升阻比提高了16%。NASA Langley研究中心在研究底部板式隔膜和腔内悬臂式振动膜驱动性能的同时,还对合成射流的测试与评价试验系统进行研究。

2 自适应机翼

为了满足高性能飞行器研制需求,自适应机翼技术作为一项关键技术将发挥其在改善飞机飞行性能方面的重要作用。自适应机翼具有翼型自适应能力,根据不同的飞行条件改变机翼形状参数,如机翼的弦高、翼展方向的弯曲和机翼厚度,采用最优方式,使机翼能得到空气动力学方面的好处:它可以有效改善翼面流场、延缓气流分离、增加升力和减少阻力,从而提高飞行器的机动性和载荷能力,抑制气动噪声与振动,并能改善雷达探测的散射截面从而有利于飞行器的隐身。常规的刚性机翼表面导致空气较早的分离,使阻力增加、升力减小。

机翼形状的变化范围有3种尺

弹性特性。对 F-111 战斗机基于智能结构技术进行改装,使得该战斗机具有“任务自适应机翼”功能,该机翼取消了传统的控制面,采用柔性复合材料表层,数字飞行控制系统和液压驱动器,可自适应地调节前后缘曲度,通过改变翼剖面形状,改善飞机机动、巡航、荷载以及起降性能,以达到最佳的气动弹性控制和气动性能与操纵性能。戴姆列·奔驰宇航公司与德国宇航研究院(DLR)提出了一种可变翼肋自适应机翼的构型。这种机翼的后缘能够平滑地连续变形,研究表明,该机翼的升阻比较常规机翼的升阻比提高约 17%。并使得飞机阻力降低 1 个百分点,从而可相应降低油耗。

3 振动噪声控制

飞行器的振动会使结构产生疲劳裂纹,使结构破坏,甚至酿成重大事故;噪声会对机组人员和乘客的身心健康造成较大的伤害。随着飞行器日益向轻质化、高速化发展的同时,人们对其舒适性和安全性等方面提出了越来越高的要求,这就要求必须对飞行器进行振动和噪声控制。传统的飞行器减振降噪方法主要是被动控制技术,例如附加约束阻尼层、安装动力吸声器等方法,虽然在飞机结构的振动噪声控制中得到了较好应用,但是这些被动方法的主要缺点在于:一是有效适用的频带较窄,二是往往带来基体结构重量的过度增加而影响飞机的机动性能。因此不符合未来飞行器发展的需求。

将智能结构技术应用于飞机的振动噪声控制研究,是现代飞机设计中减振降噪技术应用与发展的一个趋势。尤其是压电材料,由于其具有良好的宽频可控特性及机电耦合特性,使其在飞机智能结构减振降噪研究中成为首选的智能材料。

从 2002 年起,波音公司联合 NASA、General Electric、Goodrich Corporation 和日本航空

公司开展飞行器降噪研究计划,针对飞行器的机身、发动机和起落架等的噪声源进行了综合、系统的研究,这些研究都表明了基于智能自适应结构的振动与噪声主动控制技术的有效性。研究涉及的机型包括波音 777、787 和 747 等多种型号的飞机。空客公司推出的大型飞机 A380,虽然它体积庞大,起飞重量高达 560t,但通过改进飞机的气动性能,使用更为先进的发动机、机翼、起落架,对噪声进行主动控制,它比目前世界上的其他客机还要安静,A380 发出的噪声比噪声控制标准 FAR36 低 18 ~ 20dB。加拿大国家研究院航空航天研究所与 Bombardier 飞机公司联合开展了 DASH-8-100 机舱噪声主动控制试验。采用 199 只压电驱动器粘贴在受螺桨气动载荷激励的 3 个机身隔框内壁进行噪声主动控制。结果表明:整个座舱噪声场得到有效抑制,螺桨噪声抑制达到 16dB。

4 结构健康监测

采用智能结构的健康监测技术可以在线实时地对结构状态进行监测,进而保证飞机的安全性和可靠性、降低维护费用、延长使用寿命。对飞行器机体结构进行健康监测的主要方法是把传感元件和传感网络



粘贴在机体结构表面或埋入机体结构中,实时监测飞行器的应力、应变、温度、损伤等结构健康状态。常用的传感器主要有光纤和压电传感器。也可以把传感器和传感网络植入飞行器蒙皮中,实时监测飞行器表面的应力、应变、温度、损伤等结构健康状态,并能感受到冲击载荷。

波音公司在新型飞机 7E7 上探

索采用了结构健康监测技术探测结构微裂纹;空客也积极开展了这一领域的研究,探索了多个机型的健康监测的实现,包括 A320、A340-600、A380 等。美国诺斯罗普-格鲁门公司利用压电传感器及光纤传感器,监测具有隔段的 F-18 机翼结构的损伤及应变;欧洲联合研制的 Eurofight 2000 新型战机也采用了先进的结构健康监测技术进行了飞行载荷的监测。针对直升机的结构健康监测研究,目前的主要监测对象是旋翼结构的振动、旋翼桨叶结构的损伤、信号传输系统的失效及发动机齿轮箱中的故障。美国国防部的直升机健康监测项目 VMEP (Vibration Management Enhancement Program) 主要采用结构振动监测方法,实现状态评估,此项研究针对的主要机型是 Apache (AH-64)、Blackhawk (UH-60) 及 Kiowa Warrior (OH-58D)。2006 年,美国国防科技局报道了他们对 UH-60A 行星齿轮架裂纹的成功监测。波音公司目前正在实施 ADI (Active Damage Interrogation) 项目,该项目主要采用压电元件研究直升机旋翼叶片的疲劳裂纹监测。

结束语

智能材料结构技术是集材料、机械、电子、自动控制和计算机技术于一体的多学科综合的新技术,目前的研究尚处于起步阶段。今后的主要研究方向:(1) 研制稳定性高、成本低、易于和基体材料结合的传感器和传感网络;(2) 研制所需能量小、变形量大、反应速度快的驱动元件;(3) 对各种传感器的信号处理方法、各种驱动器的控制方法及其集成的研究。

随着智能材料结构技术的不断发展和在飞行器上的更多应用,必将在未来飞行器中发挥更重要的作用。

(贞编 依然)