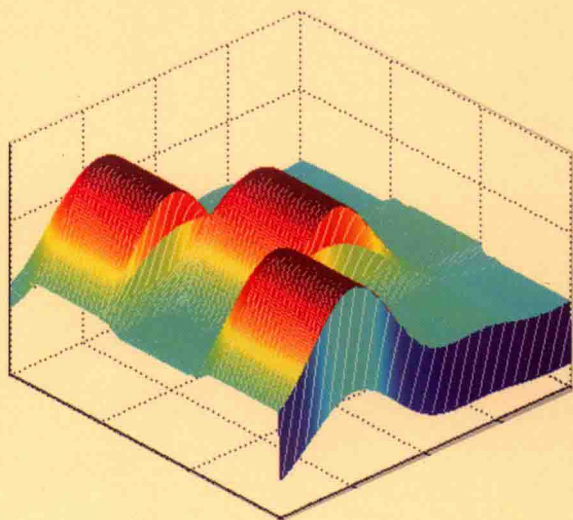


基于分布式光纤传感的 自传感FRP材料与智能结构

唐永圣 著



科学出版社

基于分布式光纤传感的 自传感 FRP 材料与智能结构

唐永圣 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

在土木工程领域内, 结构性能长期监测和保障的关键技术存在不足。针对此情况, 本书提出将先进的分布式传感光纤与高性能纤维复合材料 (FRP) 高效复合, 形成具有自传感功能的新型材料——自传感 FRP, 它的应用可实现对工程结构服役状况长期有效的监测和结构性能的提升, 使工程结构具有智能特性。本书首先从智能材料与结构的概念出发, 介绍分布式光纤传感的基本原理及其传感特点, 重点论述自传感 FRP 材料的设计方法、制备工艺和性能; 然后创新性地提出一系列结构评估理论和方法, 建立智能钢筋混凝土梁、柱结构体系; 最后通过典型工程应用案例分析实际效果。全书以分布式光纤传感技术为基础, 以自传感 FRP 材料为手段, 以结构健康监测和智能化为目标, 从理念、方法、理论和技术等方面详细展开阐述。

本书可作为土建、交通、水利等相关领域科研与工程技术人员追踪智能材料与结构、结构健康监测领域的研究热点和先进技术的参考用书, 也可供高等院校相关专业高年级本科生、研究生和教师阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于分布式光纤传感的自传感 FRP 材料与智能结构/唐永圣著. —北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-058466-3

I. ①基… II. ①唐… III. ①光纤传感器-智能材料-结构-研究
IV. ①TP212.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 178456 号

责任编辑: 王 钰 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 东方人华平面设计部

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>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 336 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62130750



版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

经过近几十年的发展，我国的桥梁、隧道、建筑等基础设施存有量名列世界前茅，且目前每年的新建量占了全球总量的 30%。根据发达国家的经验，工程结构的维护管理成本会随着其服役期的增长呈现暴涨的趋势，给国家发展带来巨大的压力。如何降低工程结构运营成本、提高安全运营效率，是工程界和学术界的重要议题之一。

结构健康监测（SHM）指在保证人力成本最低的前提下，对新建和已建的结构物进行测量、探伤和评估，其中理想的方案之一是借助智能传感技术对结构进行实时检查和损伤探测，从而避免意外修补和翻新，节约结构寿命周期内的成本。SHM 的概念受到了工程界和学术界的热烈欢迎，经过 20 多年的发展，获得了大量的研究成果和应用案例；但是以加速度计、电阻应变计等传统点式传感手段为基础构建的 SHM 体系遇到巨大的挑战，传感器的耐久性无法满足长期监测的需求，测量的结构参量无法满足结构全面评估的需求。

分布式光纤传感技术的提出和发展，为实现工程结构长期有效监测带来了新的希望。通过应用分布式光纤传感技术，可获得工程结构的沿线应变和温度分布，进而对结构进行局部损伤和整体性能的评估。同时，相比于电磁传感，光纤传感具有信号长期稳定性好、信号传输与传感一体化强、系统集成性好等优点，非常适合工程结构长期监测。分布式光纤传感技术在航空领域获得了较早的关注和应用，除了因其优良的传感性能外，还因其物理尺寸小，与航空常用纤维复合材料（FRP）具有天然的兼容性。除了在航空领域外，FRP 材料因其强度高、耐腐蚀性好、可设计性强等优势，是目前实现工程结构高性能化和高耐久性的重要手段，尤其在提升既有工程结构性能方面优势更为显著。但是，对于工程结构，光纤细小、易脆断的物理特性难以直接应用于粗放的施工环境，因此，高效的光纤封装技术成为分布式光纤传感技术能否成功应用于工程结构的关键。

本书紧扣 SHM 和结构智能化的宗旨，从材料、结构、理念、方法、理论和技术的多方面详细展开阐述。全书共 6 章，各章的主要内容：第 1 章，介绍智能材料与结构的概念及其发展现状；第 2 章，介绍分布式光纤传感的基本原理及其传感特点，重点论述自传感 FRP 材料的设计方法和制备工艺，并通过试验验证其应变、温度传感性能和力学性能；第 3 章，介绍基于分布式应变传感的结构自监测理论；第 4 章和第 5 章，依次建立智能钢筋混凝土（RC）梁、柱结构体系（传感系统和评估系统），并通过数值模拟和室内试验验证了其性能；第 6 章，将自传感 FRP 分别应用于混凝土路面、桥梁工程，在实际工程环境中进一步检验其性能。

感谢国家自然科学基金青年项目（项目编号：51508364）“嵌入自传感 FRP 筋和外包 FRP 组合加固 RC 柱的震后损伤控制和评估研究”对本书研究工作的资助！

本书的研究成果，是本人在东南大学吴智深教授和吴刚教授的指导下完成的，在此表示最真挚的感谢！同时，对为本书内容做出无私贡献的各位同门师兄弟、同学、朋友，表示最真诚的感谢！

期待本书能对高等院校相关专业的高年级本科生和研究生，从事工程结构科研、设计、施工和运营工作的相关人员有所帮助。由于本人水平有限，书中仍有许多不足之处，恳请读者与专家同仁不吝赐教、批评指正。

唐永圣

2018 年 6 月于河海大学

目 录

第 1 章 智能材料与结构概述	1
1.1 引言	1
1.2 智能材料与结构的基本概念和特点	5
1.2.1 智能材料与结构的基本概念	5
1.2.2 智能材料与结构的特点	7
1.3 智能材料与结构的研究和发展	7
1.3.1 智能应变传感元件的发展概况	7
1.3.2 分布式光纤传感技术的研究和应用现状	16
1.3.3 基于分布式光纤传感的自传感 FRP 的研究和应用现状	18
1.4 本章小结	21
第 2 章 分布式光纤传感和自传感 FRP	23
2.1 分布式光纤传感技术	23
2.1.1 布拉格光纤光栅	23
2.1.2 布里渊时域解调技术 BOTDA	28
2.2 光纤传感器和自传感 FRP	38
2.2.1 光纤传感器和自传感 FRP 的设计	38
2.2.2 封装材料	40
2.2.3 光纤传感器和自传感 FRP 的制备	42
2.3 光纤传感器和自传感 FRP 的性能	43
2.3.1 应变传感性能	44
2.3.2 温度传感性能	61
2.3.3 力学性能	66
2.4 本章小结	72
第 3 章 基于分布式应变传感的结构自监测理论	74
3.1 结构智能诊断方法综述	74
3.1.1 静态方法	74
3.1.2 动态方法	75

3.2	基于分布式应变传感的结构自监测理论	77
3.2.1	应变模态理论	77
3.2.2	中和轴	89
3.2.3	结构位移	99
3.2.4	抗弯刚度	110
3.2.5	裂缝宽度	121
3.3	本章小结	124
第 4 章	智能 RC 梁结构	125
4.1	RC 梁的智能结构体系	125
4.1.1	RC 梁的典型病害	125
4.1.2	智能 RC 梁结构的自监测体系	126
4.2	智能 RC 梁结构的传感系统	127
4.3	智能 RC 梁结构的智能诊断系统	129
4.3.1	基于纤维模型的理论和方法	129
4.3.2	基于动态解析的理论和方法	133
4.4	智能 RC 梁结构的数值模拟研究	135
4.4.1	模型概况	135
4.4.2	静态传感性能	136
4.4.3	动态传感性能	140
4.5	智能 RC 梁结构的试验研究	146
4.5.1	分布式光纤传感器外贴 RC 梁	146
4.5.2	自传感 FRP 筋现浇复合 RC 梁	157
4.5.3	自传感 FRP 筋嵌入式加固 RC 梁	177
4.6	本章小结	197
第 5 章	智能 RC 柱结构	198
5.1	RC 柱的智能结构体系	198
5.1.1	RC 柱的典型震害	198
5.1.2	智能 RC 柱结构的自监测体系	199
5.2	智能 RC 柱结构的传感系统	200
5.3	智能 RC 柱结构的智能诊断系统	201
5.3.1	基于纤维模型的理论和方法	201
5.3.2	基于动态解析的理论和方法	207

5.4 智能 RC 柱结构的数值模拟研究	208
5.4.1 模型概况	208
5.4.2 静态传感性能	209
5.4.3 动态传感性能	213
5.5 智能 RC 柱结构的试验研究	215
5.5.1 自传感 FRP 筋现浇复合 RC 柱	215
5.5.2 自传感 FRP 筋嵌入式加固 RC 柱	231
5.6 本章小结	241
第 6 章 工程应用案例	242
6.1 自传感 FRP 筋在混凝土机场跑道中的应用	242
6.1.1 项目简介	242
6.1.2 自传感 BFRP 筋的布设	242
6.1.3 监测试验及性能研究	243
6.2 长标距 FBG 在钢-混凝土组合梁桥中的应用	246
6.2.1 项目简介	246
6.2.2 传感系统的布设	248
6.2.3 监测试验及性能研究	250
6.3 本章小结	257
参考文献	258

第 1 章 智能材料与结构概述

1.1 引 言

自 20 世纪 80 年代以来,我国的经济进入一个飞速发展的阶段,国内生产总值 (gross domestic product, GDP) 的世界排名从 1980 年的 11 位上升至 2010 年的第 2 位。伴随经济高速发展的同时,国家基础设施的建设速度也引人注目。据统计,这期间我国的基础设施建设占世界基础设施建设总量的 30%~40%,其中以各类大跨度的桥梁尤为突出。据不完全统计,目前总长 6300km 的长江上已有 110 余座大桥。依据一些规划预测,到 2020 年左右,在长江干流上将建有各类桥梁或隧道合计 124 座,到 2030 年各类通道将达到 185 座,即平均每 40km 就将拥有一座过江通道。

基础设施的高速发展得益于我国经济的快速增长,同时各类基础设施又是国家经济发展的保障。人们惊讶于中国打破一个又一个桥梁、隧道的世界纪录的同时,也广泛关注着这些基础设施的安全性能。在实际工程中,结构的安全受到各种因素的影响,如混凝土的碳化、钢材的锈蚀等^[1~3]导致的结构性能退化,严重影响工程结构的长期安全运营。结构的抗疲劳性能、抗冲击性能等也存在一些缺陷,使得工程结构在地震、台风、爆炸等^[4~6]突变荷载的冲击下,会产生结构的失效、崩溃。还有,施工质量控制的离散性比较大,往往会形成一些如“豆腐渣”的缺陷,留下了安全隐患。以上种种原因引起的灾难频繁见诸于国内外的各类报道中。例如,2004 年辽宁境内的田庄台大桥倒塌事故,导致 3 辆汽车落进水里 [图 1.1 (a)]。2007 年 8 月,美国明尼苏达州一座跨越密西西比河的钢筋混凝土大桥发生坍塌,事故造成 6 人死亡 [图 1.1 (b)]。美国运输部 2005 年曾审查明尼苏达州提供的该桥安全检验报告数据,评估后发现这座桥梁存在某些“结构性缺陷”;2005 年和 2006 年,明尼苏达州政府对该桥进行了检查,检查人员在有关报告中称,该桥梁的确存在一些老化问题,但并未达到需要立即更换的程度,可使用至 2020 年。

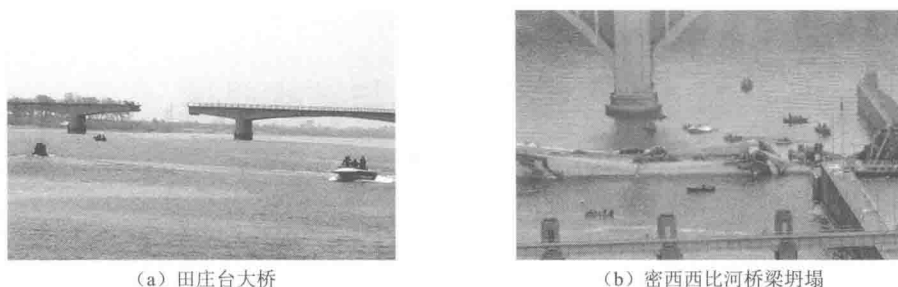


图 1.1 典型基础设施事故

因服役环境恶劣、结构形式复杂、社会影响大，基础设施的安全、耐久性问题成为各界关注和研究的焦点。如何保证这些基础设施安全运营是工程界的一大难题。除此之外，土木结构还存在着长期监测的各种需求。综合各种工程实际情况，存在健康监测需求（图 1.2）的情况主要分为：①大型复杂结构在一些未知因素下，其结构性能需要进行检验，并保障安全运营；②目前的结构管养中以人工检测为主，效率低，费用高，评估的准确性受经验因素影响大，容易误判，有自动化和信息化需求；③在接近结构设计使用期限后，很多结构需要继续使用，必须对结构现有健康状况进行准确评估，并对其未来使用性能进行预测；④地震等灾害发生时需要实时获取结构响应，灾后需要对结构实施快速评估。根据上述需求，结构健康监测（structural health monitoring, SHM）的概念被提出并广泛实践。



图 1.2 健康监测需求

SHM 的定义目前尚无统一的标准,一般来说,是指利用现场的无损传感技术,通过对包括结构响应在内的结构系统特性分析,达到检测结构损伤或退化的目的^[7]。Doebling 等^[8]认为理想的健康监测与损伤识别技术应能在结构损伤出现的较早时期发现损伤,在传感精度允许的情况下确定损伤的位置,评估损伤的程度,并预测出结构的剩余寿命。吴智深^[9]认为 SHM 应在保证人力成本最低的前提下,对新建和已建的结构物进行检测、探伤和评估;其中,理想的方案之一是能够借助一些智能仪器对结构进行实时的检查和损伤探测。SHM 能对潜在的结构缺陷进行及时预警,从而避免意外修补和翻新,节约结构寿命周期内的成本。吴智深认为,一个可靠的 SHM 系统需要不同的传感仪器和附属系统进行有机结合,包括传感系统、数据采集系统、数据处理和存储系统、通信系统、损伤探测和建模系统及决策系统(包括健康诊断和安全评估)。

尽管概念不统一,但 SHM 是建立在各种传感技术基础上的。全球定位系统(global positioning system, GPS)、光学测距仪等被用来测量结构的位移变化^[10, 11];电阻式、钢弦式的应力应变计用来监测结构的应力、应变^[12, 13];应用各种测力计监测预应力筋、预应力索的拉力变化^[14, 15];利用加速度计监测结构的动态参数(如频率、振型等)^[16, 17]……这些传统的测试技术在工程应用中取得了显著的进展,但是还存在以下缺陷:大部分以电测为主,易受到电磁场的影响,从而不能保证长期的测试精度;均为点式测量,测量结果容易受制于局部信息,而结构的损伤往往带有随机性,导致监测失效;加速度计、GPS 等测试参量带有很强的全局性,对结构的局部损伤不敏感;传感元件和系统的耐久性、稳定性无法保障,无法保证长期监测的有效进行。如 Farrar 等^[18]对桥 I-40 进行了实桥的损伤识别试验,然而结果却令人惊讶不已:随着损伤的增加,居然出现了结构固有频率不降反升的现象。

除了上述缺陷外,外部的传感设施也不能有效地反映结构的关键骨架信息。以电阻应变片为例,电阻应变片粘贴在钢筋混凝土表面,由于混凝土碳化等影响,其测试的应变往往不能真实反映结构在荷载下的响应。如何保证在结构全寿命周期内有效实施长期监测成为结构工程领域内的另一重要课题。随着材料、结构、传感等学科的发展,“智能结构”的概念从机械、航空等领域被引进土木工程领域,并开始了系列研究。所谓智能结构,一般认为是将具有智能传感特性的材料粘贴在结构表面或埋入结构,使结构本身具有自传感、自监测的特性,从而可实现结构的长期在线健康监测。

智能结构源于仿生学,即模仿神经系统。以人的神经系统为例,如图 1.3 所示,主要分为中枢神经系统和周围神经系统,周围神经系统负责感受和传递各种内、外部信息,而中枢神经系统负责联系各种周围神经系统并处理各种信息,其中神经元是信息传感的基本组成。据统计,仅人体大脑中的神经元就达到 1000 亿,考虑到全身的神经元,将是一个极为庞大的数目。正是由于拥有如此之多的传感

元件，生物体才具有智能化的特性。对于智能结构而言，传感元件的数量不可能达到真正生物体的量级，如何充分利用有限的传感器监测结构的最关键信息以有效评估结构性能，是结构智能化研究的一项重要任务。进一步考察发现，人体结构虽然复杂，但主要器官有大脑、心脏、肝脏等，这些重要器官的健康状况直接关系到人的生命安全和各项功能的实现。类似于人体结构，工程结构也存在关键构件和关键区域，在这些区域重点布设传感器，重点监测，保证其健康，就能保证结构的健康和各种性能的实现，这就是东南大学吴智深教授提出的“结构区域传感”的概念。

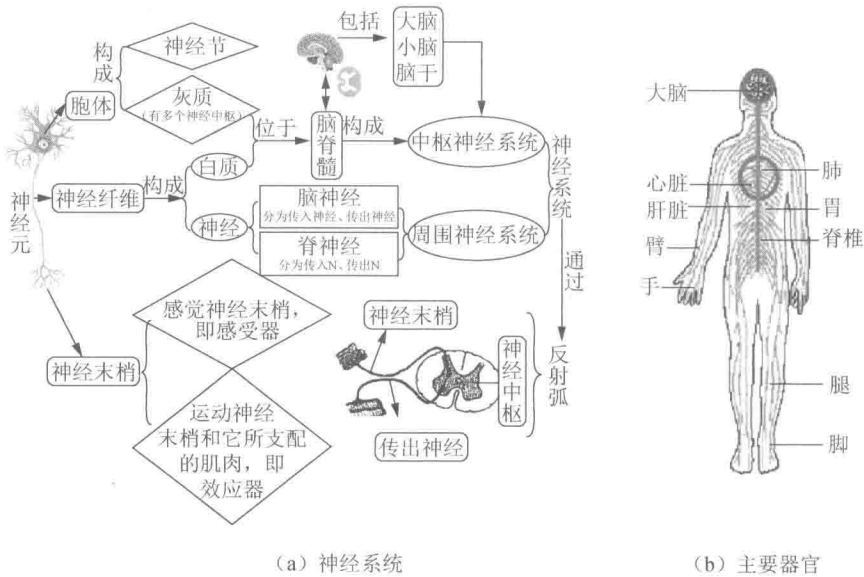


图 1.3 人的神经系统

在各个关键区域，期望可以实现分布式测量，确保这些区域内发生损伤时能够被及时、有效捕捉。传统的测量方式无法满足这样的需求，然而光纤分布式传感技术的发展提供了有效途径。Horiguchi 等^[19]在 1989 年研究了光纤应变与布里渊中心频率变化的关系，并由此开创了分布式测量的概念和方法。分布式测量，指所测量区域内的每个点的信息都能够测量到。但是由于技术的限制，只能在一定空间分辨率内实现分布式测量。随着分布式光纤传感技术的发展，分布式监测的概念逐渐可以在土木工程中实现，大大提高了捕捉随机损伤的能力。因此，分布式光纤传感技术对智能结构的发展具有革命性意义。目前，分布式光纤传感技术主要有自发布里渊散射 (Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR) 和受激布里渊散射 (Brillouin optical time domain analysis, BOTDA) 等，布拉格光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 可实现准分布式测量。

分布式光纤传感技术的出现和发展，为提高结构智能化水平提供了技术基础。

将分布式光纤传感器粘贴在结构表面或埋入结构内部, 可对结构的关键区域实施分布式全面监测, 使结构在某种程度上具有自监测、自诊断的智能特性。土木工程结构服役环境恶劣, 施工粗放, 因此, 光纤需要做适当的封装保护, 才能在结构中中长期有效应用。

纤维复合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 是由纤维材料与基体材料按一定的比例混合, 经过一定工艺复合形成的高性能新型材料。目前工程结构中常用的 FRP 材料主要有碳纤维复合材料 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP)、玻璃纤维复合材料 (glass fiber reinforced polymer, GFRP)、芳纶纤维复合材料 (aramid fiber reinforced polymer, AFRP)、玄武岩纤维复合材料 (basalt fiber reinforced polymer, BFRP) 等。作为一种新材料, FRP 材料因其高强度、高耐环境腐蚀性、密度小等优点, 成为学术界和工程界的关注焦点^[20, 21]。与传统钢材相比, FRP 材料具有以下显著特点: ①单一单向纤维的 FRP 制品是一种典型的线弹性材料; ②强度高, 可达到钢材的 9 倍以上; ③耐环境腐蚀及酸、碱、盐侵蚀的性能好; ④可设计性强, FRP 是一种典型的人工复合材料, 通过设置不同的纤维材料、纤维含量和铺层方向可以获得不同性能的材料。因此, FRP 是一种优良的工程材料, 具有广泛的应用前景。

光纤本质上也是一种纤维, 因此与 FRP 之间存在天然的匹配特性。利用 FRP 封装光纤, 可以有效保护光纤, 保证其在结构中的耐久使用; 同时, 埋入光纤的自传感 FRP 制品是制备智能结构的智能元件。例如, 自传感 FRP 筋可以和普通钢筋一样绑扎、浇筑进混凝土, 利用自传感 FRP 筋监测结构的骨架信息, 可以更加准确、有效地掌握结构的性能。

正是基于上述背景, 本书提出用 FRP 封装光纤制备高精度的传感器, 同时在生产 FRP 时将分布式光纤传感器与 FRP 复合成自传感 FRP, 利用这些智能元件, 展开结构的智能化研究。

1.2 智能材料与结构的基本概念和特点

1.2.1 智能材料与结构的基本概念

目前国内外关于智能材料 (intelligent material 或 smart material) 还没有形成统一的定义, 其全部的构思源于仿生学, 目标是要获得类似人各种功能的“活”的材料, 主要方法就是将传感、信息科学与控制理念融合于材料的物性与功能^[22, 23]。

智能材料一般是指以最佳条件响应外界环境的变化, 并针对这种变化做出瞬时的主动响应, 具有自诊断、自适应、自修复或寿命预报等功能, 以及靠自身驱动完成特定功能。智能材料和结构密切相关, 互为体, 因此确切的说法应为智能材料系统和结构 (简称智能材料)。

尽管概念不统一, 但智能材料通常具有以下一些特点^[24~29]: 具有感知功能,

能检测并识别周围环境的变化,如应力、应变、热、光、电、磁及核辐射等;具有驱动特性及响应环境变化功能;能以设定的方式选择和控制响应;反应灵敏恰当;在刺激消除后能迅速恢复到原始状态。智能材料由传感、控制和执行 3 个基本要素构成。通常单一材料很难具有多种功能,需要两种或多种材料构成复合智能材料体系。一般情况下,智能材料由基体材料、敏感材料、驱动材料和信息处理器 4 部分构成^[30~33]。

1) 基体材料。基体材料担负着承载的作用,一般宜选用轻质材料。基体材料首选高分子材料,因为其质量小、耐腐蚀,尤其具有黏弹性的非线性特征;其次也可选用金属材料,以轻质有色合金为主。

2) 敏感材料。敏感材料担负着传感的任务,其主要作用是感知环境变化(包括压力、应力、温度、电磁场、pH 等)。常用的敏感材料有形状记忆材料、压电材料、光纤材料、磁致伸缩材料、电致变色材料、电流变体、磁流变体和液晶材料等。

3) 驱动材料。因为在一定条件下驱动材料可以产生较大的应变和应力,所以它担负着响应和控制的任務。常用的驱动材料有形状记忆材料、压电材料、电流变体和磁致伸缩材料等。可以看出,这些材料既是驱动材料又是敏感材料,起到了双重作用,这也是智能材料设计时可采用的一种思路。

4) 信息处理器。信息处理器是在敏感材料和驱动材料间传递信息的部件,是敏感材料和驱动材料二者联系的桥梁。

南京航空航天大学的陶宝祺教授^[34, 35]将智能结构定义为: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(结构)具有人们期望的智能功能,这种结构称为智能结构。

智能结构系统的构想来源于仿生,精髓是集成,即知识集成、技术集成、结构集成、系统集成。其主要特点^[36, 37]如下:①智能材料的应用,即把具有感知与驱动属性的材料进行多功能复合及仿生设计,直接成为传感器与执行器;②结构集成,即把传感器、执行器及控制器集成在结构材料之中,因而更接近生物体结构;③高度分布的传感与执行信息,特别是仿人智能控制的发展,为将力学意义上的“死”结构转变为具有某些智能功能与生命特征的“活”结构创造了条件。由于上述这些特征,把目前广泛采用的离线、静态、被动检查,转变为在线、动态、实时健康监测与主动或半主动或复合控制,将使工程结构安全监控与性能改善的思路产生质的飞跃,是结构设计思想的一场革命。

在原结构材料中集成传感元件后,使结构能感受自身状态或特性,从而构成自传感结构(sensory structure),或称自监测结构(self-sensing structure),这是智能结构的初级形态;在结构材料中集成致动元件,使之能改变自身的状态或特性,便构成了致动,或称自适应结构,这是智能结构的较高级形态;将致动与传感材料同时集成在原结构中,通过反馈控制结构形状或动态特性,则构成了主动结构,

或称机敏结构，这是智能结构中更高级的形态。

1.2.2 智能材料与结构的特点

相比于其他结构类型，土木工程结构特点明显，主要有以下几点：①体量大，结构形式复杂，高层建筑可超过 500m（如广州塔，600m），大跨桥梁可达到 1000m（如苏通大桥，主跨 1088m）；②服役环境复杂、恶劣，荷载随机性强，如地震、台风等自然灾害；③材料不均匀性强，混凝土是我国基础设施结构的主要组成材料，而混凝土是一种非均匀性材料；④使用年限长，一般的建筑设计寿命为 50 年，重要桥梁的设计寿命为 100 年，根据国内外的经验，这些设施实际使用寿命很可能会大于设计寿命。

针对上述特点，应用于土木工程中的智能材料需要具备以下特征：①传感覆盖领域广，一般需要覆盖结构的大部分关键区域，同时具有较高的传感灵敏度，能准确识别出结构离散的损伤；②环境适用性能强，一方面在温度、湿度、盐碱等腐蚀环境下应该保证良好、稳定的传感性能，另一方面应具有足够的力学强度，以适应土木工程结构粗放式及复杂荷载下的服役过程；③与工程结构材料应具有较好的匹配性能，智能材料的加入不应该降低结构的强度、耐久性等性能；④智能材料至少需要和所监测结构具有相同的寿命；⑤智能材料需要提供非常大的驱动力，以达到控制结构形态的目标。

由于智能材料与结构的概念最先是由航空研究领域的专家提出的，其概念的内涵在航空结构上相对更容易实现。对于土木工程结构，完全达到上述特征的智能材料目前很难找到，因为一般具有传感特性的智能材料只能提供被动力，而提供主动力的一些智能材料 [如形状记忆合金 (shape memory alloy, SMA)] 很难实现驱动一座大跨桥梁或一座摩天大楼。因此，目前将智能化的土木工程结构理解为具有自监测、自诊断功能的结构更有实际意义，属于智能结构的初级形态。相应地，适合土木工程结构的智能材料应具备上述特征中的前四点。

1.3 智能材料与结构的研究和发展

1.3.1 智能应变传感元件的发展概况

1.3.1.1 电阻应变丝

金属丝的电阻值与长度、横截面积有关，当金属丝受力变形时，长度和横截面积一起变化，导致电阻发生变化，由此可建立应变与电阻之间的关系。目前常用的电阻应变丝为康铜丝或镍铬丝。

电阻应变丝最早被埋入 FRP 材料是为了测量 FRP 固化成型后的层间残余应力^[38, 39]，后来作为 FRP 材料智能化的传感元件，对 FRP 材料的损伤自诊断、自

评估^[40~43]。电阻应变丝作为传感材料具有以下优点^[44]：①短期内性能相对稳定，测量速度快，灵敏度高，测量结果可靠；②加工工艺简单，易制成适于结构的丝材，埋入结构中对结构不造成影响；③相配合的仪器成熟，易与计算机及其他设备兼容；④易于进行各种补偿等。电阻应变丝的缺点如下：①输出信号小，易受干扰；②存在放热问题，测量值需要修正；③固化时电阻应变丝与基体材料存在内应力导致零点漂移问题等。

1.3.1.2 形状记忆合金

形状记忆合金是一种具有感知和驱动功能的新型智能材料。SMA 的形状被改变后，一旦加热到一定的跃变温度，就可以恢复到变形前的形状，其基本原理是热弹性马氏体相变，即冷却时母相（奥氏体）转变为马氏体，加热时马氏体又转变为母相。目前各类已发现的 SMA 有上百种，应用最广泛的是 NiTi 基合金。

在 SMA 作为驱动材料而变形的同时，其电阻变化可用来进行传感。SMA 的应变传感原理与普通金属丝的原理类似，除了长度和截面变化引起电阻变化外，电阻率的变化将进一步影响 SMA 的电阻变化。因此，SMA 具有较大的应变-电阻变化率。同时，其测试的最大应变可达到 8%^[45, 46]，比一般应变传感器大，并且在 5% 的应变以内电阻变化与应变之间具有线性关系。将 SMA 丝作为传感器埋设进 FRP 材料形成传感网络，用来监测 FRP 的应变，从而得到自传感智能 FRP 材料^[47, 48]。

除了上述优点，SMA 还具有耐腐蚀和抗疲劳等优点。但是，目前的研究表明 SMA 的缺点也很显著：成熟的 NiTi 基 SMA 较昂贵，而其他的 Cu 基、Fe 基等 SMA 的性能不够稳定；温度对 SMA 丝的应变传感特性有明显影响^[49]；在 R 相变阶段，电阻与应变的关系呈非线性，给信号传感、分析带来困难^[50, 51]。

1.3.1.3 碳纤维

碳纤维是含碳量高于 90% 的无机高分子纤维，是在一定条件下燃烧聚合纤维得到的具有接近完整分子结构的碳长链结构。研究表明，碳纤维具有良好的导电性和压阻效应^[52~54]。在小应变范围内，即碳纤维出现微观和宏观断裂之前，电阻随着应力的增加大致呈线性增加，称为压阻效应。压阻效应在使 CFRP 材料本身作为结构材料的同时，也具有潜在的自传感功能。

欧美及日本等一些学者最早对碳纤维的传感机理和应用进行了研究。1989 年，Schulte^[55]较早地验证了单向 CFRP 的压阻性能，并提出 CFRP 的电阻可作为一种无损评估手段来评估 CFRP 的损伤情况。Muto 等^[56]设计了一种新型的混杂 FRP，即 CF/GFRP，其中玻璃纤维作为结构增强材料，而碳纤维作为增强、传感多用途材料。试验表明，混杂 FRP 的电阻随着应变不断增加，其中碳纤维断裂时电阻增幅急剧变大。Bakis 等^[57]用高弹模的碳纤维、高延性的玻璃纤维和芳纶纤

维进行混杂,开发了用于土木工程智能混杂 FRP 筋,且通过测量,其中碳纤维的电阻变化可定性地反映混杂复合材料的应变和损伤状况。近年来,我国在碳纤维自传感方面的研究和应用也有进展。武汉理工大学的李卓球研究团队^[54, 58~60]研究了连续碳纤维丝和短切碳纤维毡的压阻效应,试验考察了 CFRP 的静态、动态特性,并应用到结构中测试结构的应变模态。哈尔滨工业大学的欧进萍研究团队^[61~63]重点研究了 CFRP 筋的自感知性能,并将 CFRP 筋埋进混凝土梁监测结构的应变情况。东南大学的吴智深、杨才干研究团队^[64~67]在原有研究基础上,开发了多种碳纤维混杂的智能 HCFRP (hybrid CFRP),改善了单一碳纤维的电阻-应变变化性能,拓宽了应变测试范围。国内外对碳纤维的研究基本集中在试验室及相关的理论研究领域,实际应用还比较少。

碳纤维作为智能传感材料具有明显的优势:①利用了材料自身的物理特性,不需要额外埋设传感器件,成本低廉;②所使用的监测仪器设备成熟、简单,测量结果直观,容易分析;③材料力学性质稳定,抗疲劳性能好,适合长期监测。

但是当前的研究表明碳纤维也存在一些不足:①对于单种碳纤维,在碳纤维出现断裂前电阻变化率比较小,而且在这个阶段电阻的变化受外界偶然因素的影响比较大,从而降低了电阻测量法所能够测量的应变范围、灵敏度和准确度;②受电极、材料分布等影响,制品的应变传感的稳定性较差;③动态测试时,噪声显著。

1.3.1.4 光纤

光纤是一种利用光在玻璃或塑料制成的纤维中的全反射原理而制成的光传导工具。1966年,英籍华裔科学家高锟^[68]从理论上最早证明了用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性,并预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性。1970年,美国康宁公司用改进型化学相沉积法成功研制出传输损耗只有 20dB/km 的低损耗石英光纤。由此,世界范围内开始了光纤在通信领域的大规模研究和应用。1973年,我国最早由武汉邮电学院开始研究光纤通信。伴随着光纤通信的快速发展,各种光纤传感技术也应势而出。光纤传感技术,就是以光波为载体,光纤为媒质,感知和传输外界被测量信号的新型传感技术。

1. 光纤的结构

光纤的基本结构如图 1.4 所示,一般由纤芯、包层、涂覆层、护套 4 部分组成,是一个多层介质结构的对称圆柱体。

纤芯的直径比较小,一般单模纤芯为 9 μm 或 10 μm ,多模纤芯为 50 μm 或 62.5 μm ,材料以 SiO_2 为主,掺杂极微量的其他材料(如 GeO_2 、 P_2O_5 等)以提高纤芯的折射率。纤芯的主要作用是在不受外界干扰的条件下,低损耗、小失真地传送光信号。