

中国桥梁智能化的发展

罗富元 余庭嘉

(广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院 广西南宁 530012)

摘要:桥梁是交通工程的关键节点和枢纽工程,也是一个国家或地区经济实力、科学技术、生产力发展等综合国力的体现。桥梁智能化是知识经济时代下桥梁的发展趋势,也是我国由桥梁大国迈向桥梁强国过程中关键性的一步。通过围绕桥梁高性能智能材料、桥梁智能建造技术与装备、桥梁智能监测检测技术及装备以及基于信息技术的桥梁智能养护管理4个方面,论述了我国桥梁智能化的发展概况。

关键词:桥梁智能化 智能材料 智能建造 智能监测检测 智能养护管理

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.05.003

引言

桥梁是跨越江河湖海、深沟峡谷等障碍的人工构筑物,是交通工程的关键节点和枢纽工程,也是一个国家或地区经济实力、科学技术、生产力发展等综合国力的体现。我国桥梁正处于创新与超越的发展阶段,在接下来的10年时间,以重点专项“智能桥梁”为主题的“中国桥梁2025”科技计划将作为中国桥梁的顶层科技发展规划。按照加强顶层设计、注重全产业链一体化实施的原则,该重点专项确立了“桥梁智能设计建造技术及装备”、“桥梁智能管养技术及装备”及“桥梁智能建养一体化技术及平台”3个项目群,并按照基础前沿、共性关键技术及产业化示范布局16个项目,针对桥梁设计、施工、管养、材料、装备、软件等全产业链,实现互联网、物联网、大数据与云计算等新一代信息技术和桥梁建养技术深度融合,打造以工业化、信息化、智能化和绿色建造为特征的桥梁全产业链创新体系,提升桥梁建养技术水平和产业化能力^[1]。本文将围绕桥梁高性能智能材料、桥梁智能建造技术与装备、桥梁智能监测检测技术及装备以及基于信息技术的桥梁智能养护管理4个方面,论述我国桥梁智能化的发展现状。

1 桥梁高性能智能材料

智能材料(Intelligent material)目前还没有统一的定义。不过,对其多种定义大同小异,大体来说,智能材料就是指具有感知环境(包括内

环境和外环境)刺激,对之进行分析、处理、判断,并采取一定的措施进行适度响应的材料^[2]。

目前对于桥梁智能材料的应用研究主要在3个方面:(1)结构的健康监测;(2)结构的自增强、自适应;(3)结构的减振控制^[3]。

1.1 智能材料与桥梁的健康监测

目前应用于桥梁健康监测的智能材料主要包括:光导纤维、形状记忆合金、压电材料以及碳纤维混凝土等。通过将智能材料应用于桥梁工程的健康监测中,可以实现结构应力、应变监测、裂缝探测、混凝土收缩应变监测、振动监测、腐蚀监测及疲劳监测^[3]。

将光纤埋入结构中,当结构因受力和温度变化产生变形或裂缝时,会引起光纤变形,而导致其光学信号的改变(如光强、相位、波长或偏振等的变化),依此获得光纤周围材料的应力、变形、温度、裂缝等因素的变化信息,实现结构的实时在线监测。

形状记忆合金是一种兼有感知和驱动功能的金属材料,具有一般金属材料所没有的许多特殊物理力学性能,主要有形状记忆效应、超弹性效应、阻尼效应、电阻特性等。在桥梁工程健康监测中主要是利用形状记忆合金的电阻特性,利用形状记忆合金的感知功能,可实现对桥梁工程结构的健康监测,利用形状记忆合金的驱动功能可实现对桥梁工程结构的变形、损伤、振动控制。目前已发现的形状记忆合金有上百种,其中得到

广泛研究的主要是NiTi合金、Cu基合金和Fe基合金。形状记忆合金中性能较为稳定的NiTi合金电阻率及回复应力较大、对应变敏感，因而研究应用最广。

压电材料的压电效应使其兼具传感和驱动功能。压电效应是指，若对材料施加作用力而产生变形，则在它的2个电极上感应产生等量异号电荷，且电荷密度与所受外力成比例（正压电效应）；反之，当施加外加电压作用时，又会产生变形（逆压电效应）。利用正压电效应可将压电材料制成传感元件，通过监测压电元件上电荷的变化，确定压电元件埋入处结构的变形。

在混凝土中加入碳纤维可使其具备本征自感应和驱动功能。在桥梁结构中应用碳纤维，主要是利用了其压敏性和温敏性。应用中，可以通过将碳纤维制成传感器，并以电信号输出的形式反映其自身受力状况及内部损伤程度，以此来测量结构中的应力、应变和温度等^[4]。

1.2 智能材料与结构的自适应

自适应结构既具有承受荷载和传递运动的能力，同时还兼有检测、动作和改变结构特性等诸多智能功能。自修复混凝土是在混凝土传统组分中复合特性组分，从而在混凝土内部形成智能型仿生自愈合神经网络系统，以模仿动物的骨组织结构及受创伤后的再生、恢复机理。目前，实现裂缝自愈合的有以下3种方法：内置液芯胶囊法、多孔纤维网修复法、内掺有机化合物法^[5]。基于上述方法，可使复合材料在遭到损伤或破坏后，具有自行愈合和再生的功能，从而达到恢复甚至提高材料性能的目的。此外，也可以把碳纤维智能混凝土与计算机相连构成自诊断、自适应结构。

1.3 智能材料与结构的减振控制

结构的减振控制包括结构的抗震、抗风以及降噪的自适应控制。目前研究用于结构振动控制的智能材料有压电智能材料、形状记忆合金等。压电材料的应用主要有压电智能阻尼材料和压电式传感/作动器两种。其工作原理是：将压电材

料、导电材料复合于基体材料中，并构成导电回路；当振动作用于该材料时，其中的压电材料感知外界的振动，产生相应的极化电荷（电场），在导电回路中产生电流并以热的形式输出；振动越强，产生的电场越强，发热也越多。通过上述能量的传递与转换，从而达到了智能阻尼的效果。压电传感器是利用压电材料的压电效应研制的能测量弹性体全部振动模态的分布观测器；压电作动器是利用压电材料的反压电效应将电能转换成机械能的分布执行器。常用的压电材料有：压电陶瓷和压电高分子材料等^[5]。

2 桥梁智能建造技术与装备

在桥梁智能建造技术方面，基于网络的桥梁智能化施工控制技术正成为研究热点。所谓基于网络的桥梁智能化信息化施工控制，就是总结传统桥梁施工控制过程中获得的理论与实践经验，综合运用桥梁工程、工程控制理论、网络技术、智能技术和数据融合技术等多种新技术，把分布在不同地方的多座桥梁的施工控制所需信息，包括桥梁荷载信息、几何信息、应力信息等，以Internet网络或通信网络为媒介，通过网络信息的双向传递、查询，实时汇总于桥梁施工控制中心，经过智能化的计算分析与智能化、实时化的控制决策，向各座桥梁发出网络施工控制指令，从而实现桥梁施工控制的高精度、高智能与高效率。基于网络的桥梁智能化施工控制系统由3个分系统组成：数据高速采集系统、数据双向传输网络系统、计算分析与控制决策系统。各分系统之间的流程图如图1所示。该系统在江苏省昆山玉峰大桥的监控过程中试验成功，监控结果实现了线形与应力双控的目标^[6]。

此外，基于BIM的虚拟施工技术以及基于3D打印技术的智能化施工，在桥梁工程具有十分丰富的研究及应用前景^[8-9]。

3 桥梁智能监测检测技术及装备

结构健康监测是通过一系列传感器从运营状态的结构系统中实时、周期性采样以获取数据，抽取对损伤敏感的特征因子并对这些特征因子进

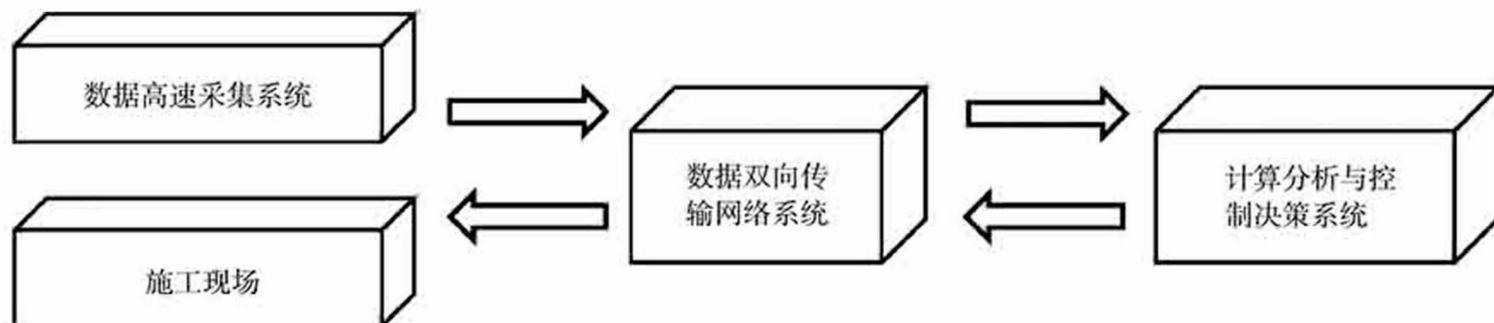


图1 各分系统的流程图

行统计分析,从而评估结构当前的健康状况。结构健康监测与传统检测方法的差别在于系统的自动化、实时化、网络化和智能化。结构健康监测系统(SHMS)一般由传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据处理与管理子系统、结构预警与评估子系统组成,其主要实施环节包括结构健康监测系统的设计、数据获取、数据管理、数据分析、结构评估、安全预警、结果可视化显示、维修养护决策等^[10]。其中,数据获取主要依靠传感技术与传输技术。随着智能感知材料的发展,高性能传感器及其测试技术为桥梁结构智能健康监测系统的获取提供了崭新的途径。前文已经论述了桥梁健康监测中主要应用到的一些智能材料,通过应用智能材料,目前已经形成了许多智能传感器,包括:光纤Bragg光栅传感器、纤维增强聚合物-光纤光栅(FRP-OFBG)筋及其应变传感器、压电薄膜传感器、形状记忆合金传感器^[11]。伴随着传感器阵列化、集成化、智能化的发展趋势,基于微电子机械系统的传感器将会在桥梁结构健康监测中得到更多的研究和应用。至于传输技术,目前无线传感网络技术由于具有可降低成本、提高布设速度、灵活增减测点、进行分布式计算等一系列优点,得到了很好的发展与应用^[9]。此外,厘米级实时动态差分式全球定位系统、全系列光纤光栅计等一系列传感器和监测产品得到广泛应用,研发了微秒级时钟同步振动信号调理器、百赫兹级高速扫描光纤解调仪等一系列信号采集设备,形成了基于双环冗余光纤环网和工业以太网的分布式监测等技术,建成了不少长大桥梁健康监测系统,系统集成技术日臻成熟^[1]。

在检测技术方面,研发了桥梁混凝土无损检测、钢结构桥梁疲劳裂纹探测、水下桩基础检测、高清摄像损伤识别、桥梁动静载试验检测等技术及缆索检查机器人、桥梁检查车等一系列检测装备,桥梁检测手段不断丰富,检测精度和效率得到有效提高。

以上关于桥梁监测检测技术和装备的发展与应用,都在推动着我国桥梁在监测检测方面的智能化发展。

4 基于信息技术的桥梁智能养护管理

所谓信息技术,主要指以数据库技术,电子通讯技术、网络技术、多媒体技术等为代表的现代信息处理技术,主要包括信息的收集、存储、创造、分析、管理、交换与应用等。应用现代信息技术,有利于实现桥梁养护管理的技术升级、有利于提高桥梁养护管理的效率与能力、有利于为桥梁的日常检查、工程养护和计划性维护等提供决策参考。

4.1 基于大数据的桥梁智能养护管理

从信息的角度出发,桥梁养护工作可描述成一个数据采集至数据应用的过程。这些数据应该包括一切与桥梁相关的数据,包括桥梁健康及环境监测数据、规范设定及参数量化数据、数值模型及模拟计算数据、人工采集及性能评价数据、桥梁档案及施工控制数据等等^[12]。面对如此数量庞大、种类多样、实时性强的数据,基于大数据的桥梁智能养护应运而生。集成了数据库技术、多媒体技术、虚拟现实技术、网络技术的桥梁数字智能化养护管理平台将有力地促进桥梁管养系统标准化、智能化、时效化、便捷化、信息化、一体化的实现。

大数据下的桥梁养护管理技术,可以通过桥梁结构响应检测、车辆荷载分布、行车安全及智能提示、结构性能评估及对策、极端作用下风险评估及预控、桥梁档案查询及维护、电子化巡检及日历提醒、人机交互专家帮助系统、管养计划生成及桥梁快速修复等多个方面实现对桥梁管养的大数据进行挖掘与应用。目前,已有学者提出了以硬件网络层、系统支撑层、应用支持层、应用层及用户访问层组成的桥梁智能化管养数字平台总体构架及按功能模块划分的各子系统设计^[12]。

在实际应用方面,借助于网络数据库技术,传感器技术、多媒体技术等现代信息技术,集地理信息GIS系统、结构健康监测HMS系统、桥型全球定位GPS系统人工智能决策、专家知识于一体,通过对江阴大桥主桥、引桥、路面、养护文档等的有效管理和上部结构健康状况的实时监测,初步构建并实现了江阴大桥基于信息技术的智能化养护管理^[13]。

4.2 基于BIM技术的桥梁智能养护管理

建筑信息建模 (Building Information Modeling, BIM) 作为一种创新的工具与生产方式,是信息化技术在建筑业的直接应用。目前, BIM 技术在我国桥梁领域的应用处于起步阶段,远低于国外的研究和应用水平,尚未搭建起桥梁 BIM 标准体系,主要以试点工程的局部应用为主,且侧重于方案设计、施工模拟等个别阶段,尚未应用于覆盖桥梁规划设计、建造和运营养护管理的全寿命周期,未充分实现 BIM 技术所具有的信息共享、减少能耗、降低成本、缩短工期和实现建养一体化的价值^[1]。但是,随着 BIM 技术在房屋建筑中的广泛应用,桥梁工程中 BIM 的研究与应用也越来越受到重视。交通运输部在“十三五”发展规划中将综合交通信息化作为未来研发重点,完成了《BIM技术在桥梁工程中的开发及应用调研》,正在积极开展 BIM 技术在桥梁工程的试点工作。因此,以 BIM 技术作为提高桥梁信息化水平的有效手段,以桥梁信息化水平的提升作为促进国家级桥梁建养一体化平台建立的

动力,将最终实现基于 BIM 技术的桥梁智能养护管理。

5 结语

随着高性能智能材料的不断发展,以及信息化技术的不断革新,我国桥梁智能化的构建正在稳步向前。桥梁智能化的发展是一个综合的发展过程,包括基于智能材料的结构本身自适应、桥梁施工技术及装备的智能化、桥梁监测检测技术及装备的智能化以及基于大数据和 BIM 技术的桥梁智能化管养等等。同时,也因为桥梁智能化涉及材料科学、信息技术,测量技术,通讯技术,机械装备等多个领域,目前取得的成就更多的是处于探索阶段,还需广大桥梁工作者及相关人员不断探索,以实现我国真正意义上智能化桥梁。

参考文献

- [1] 张喜刚,刘高,马军海等.中国桥梁技术的现状与展望[J].科学通报,2016(z1):415-425.
- [2] 阎平.智能材料在土木工程中的应用[J].新建设:现代物业,2011(11):129-129.
- [3] 张卫东,徐学燕.智能材料在土木工程健康监测中的应用[J].石油工程建设,2004,30(2):9-14.
- [4] 李瑞军,牛超然.智能材料在桥梁工程中的应用[J].市政技术,2010,28(4):145-147.
- [5] 郑智能,张永兴,董强.智能材料及其在土木工程中的应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2005,24(6):91-94.
- [6] 袁帅华.基于网络的桥梁智能化施工控制系统研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(6):734-738.
- [7] 杨珊珊.网络环境下智能化桥梁施工控制系统探讨[J].科技致富向导,2011(24):250-250.
- [8] 柳娟花.基于BIM的虚拟施工技术应用研究[J].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [9] 陶雨濛,张云峰,陈以一等.3D打印技术在土木工程中的应用展望[J].钢结构,2014,29(8):1-8.
- [10] 马建,孙守增,杨琦等.中国桥梁工程学术研究综述·2014[J].中国公路学报,2014,27(5):1-96.
- [11] 欧进萍.土木工程结构用智能感知材料、传感器与健康监测系统的研发现状[J].功能材料信息,2005(5):12-22.
- [12] 陈艾荣,潘玥,王达磊等.大数据时代的桥梁维护与安全[J].上海公路,2014(1):17-23.
- [13] 樊叶华,陈雄飞.基于现代信息技术的江阴大桥智能养护管理系统研究[J].现代交通技术,2010(S2):296-300.
- [14] 何清华,钱丽丽,段运峰等.BIM在国内外应用的现状及障碍研究[J].工程管理学报,2012,26(1):12-16.