

# 光纤传感器在桥梁工程中的应用现状

王丹生, 朱宏平

(华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 概述了光纤传感器的组成、原理、类型及特点。介绍了目前光纤传感器在国内、外桥梁工程中的研究及应用情况。指出了光纤传感器在桥梁结构健康监测应用中的发展方向。

**关键词:** 桥梁; 光纤传感器; 桥梁监测; 监测技术

中图分类号: U446.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-7767(2002)03-0049-03

光纤传感技术是 70 年代中期发展起来的一门新技术, 它是伴随着光纤及光通信技术的发展而逐步形成的。光纤传感器是把光纤传感技术应用于测量领域的一种传感器件, 它传统的传感器相比具有一系列的优点: 如灵敏度高、耐腐蚀、电绝缘、防爆性好、抗电磁干扰、光路可挠曲、易于与计算机连接、便于遥测等, 而且, 结构简单、尺寸小、质量轻、频带宽, 可进行温度、应变、压力等多种参数的分布式测量。近年来, 光纤传感器由于其独特的优点而受到了广大土木工程师的重视, 并在土木工程领域得到了广泛的研究与应用, 成为土木工程领域特别是桥梁结构健康监测首选的传感器形式。

## 1 光纤传感器的组成及原理

光纤传感器主要由光源、光纤与探测器 3 部分组成。光源发出的光耦合进光纤, 经光纤进入调制区, 在调制区内, 外界被测参数作用于进入调制区内的光信号, 使其光学性质如光的强度、相位、频率、偏振态、波长等发生变化成为被调制的信号光, 再经过光纤送入光探测器而获得被测参数<sup>[1]~[3]</sup>。光纤传感器中的光纤通常由纤芯、包层、树脂涂层和塑料护套组成。纤芯和包层具有不同的折射率, 树脂涂层对光纤起保护作用。光纤按材料组分为玻璃光纤和塑料光纤; 按光纤纤芯和包层折射率的分布可分为阶跃折射率型光纤和梯度折射率型光纤两种。光纤能够约束并引导光波在其内部或表面附近沿轴线方向向前传播, 具有感测和传输的双重功能, 是一种非常重要的智能材料。如图 1 所示, 光纤是基于光的全反射原理而工作的。

设空气折射率为  $n_0$ , 纤芯折射率为  $n_1$ , 包层的折射率为  $n_2$ 。当波长为  $\lambda$  的入射光以  $\theta_0$  入射到圆柱光纤的端面时, 由折射定律知:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \cos \varphi_1 \quad (1)$$

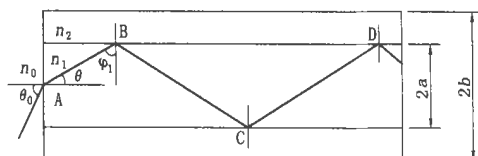


图 1 阶跃折射率光纤的传输原理

当  $n_1 > n_2$ , 光线由纤芯射向包层时发生全反射的临界角  $\varphi_c$  由下式决定:

$$\sin \varphi_c = n_2 / n_1 \quad (2)$$

因此, 光在纤芯和包层界面上发生全反射时, 要求:

$$\sin \varphi_1 > \sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1} \text{ 或 } \cos \varphi_1 < \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (3)$$

把(3)式代入(1)式得:

$$\sin \theta_0 < \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

由于空气的折射率  $n_0$  近似为 1, 则有

$$\theta_0 < \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \theta_m \quad (5)$$

式(5)确定了能够产生全反射的光在端面的入射角的范围为  $2\theta_m$ , 当入射角  $\theta_0$  在此范围内时, 光在界面产生全反射, 并在光纤内部以同样的角度反复逐次反射, 直到传播到光纤的另一端面。如果工作需要光纤微弯曲, 只要仍满足全反射定律, 则光仍然可以继续前进。如果入射角  $\theta_0$  超出上述范围, 则进入光纤的光线便会在界面上发生折射, 并透入包层。

## 2 光纤传感器的类型及特点

光纤传感器的种类很多, 按光纤传感器中光纤的作用可分为传感型和传光型两种类型。传感型光纤传感器又称功能型光纤传感器, 主要使用单模光纤, 光纤不仅起传光作用, 同时又是敏感元件, 它利用光纤本身的传输特性经被测物理量作用而发生变化的特点, 使光波

导的属性(光强、相位、偏振态、波长等)被调制。因此,这一类光纤传感器又分为光强调制型、相位调制型、偏振态调制型和波长调制型等几种。对于传感型光纤传感器,由于光纤本身是敏感元件,因此加长光纤的长度可以得到很高的灵敏度。传光型光纤传感器又称非功能型光纤传感器,它是将经过被测对象所调制的光信号输入光纤后,通过在输出端进行光信号处理而进行测量的。在这类传感器中,光纤仅作为传光元件,必须附加能够对光纤所传递的光进行调制的敏感元件才能组成传感元件。

光纤传感器根据其测量范围还可分为点式光纤传感器、积分式光纤传感器、分布式光纤传感器 3 种。其中,分布式光纤传感器是理想的结构应变分布的监测器,它能在对结构无损伤的情况下,迅速测定物理量的大小、扰动及其位置。一般来说,分布式光纤传感器是靠检测散射回来的能量来提供沿光纤分布的参数变化量,这样就需要利用光纤的时域反射技术(OTDR)、相干光频域反射技术(COFDR)及非相干光频域反射技术(OFDR)等。目前用于土木工程中的光纤传感器类型主要有 Math-Zender 干涉型光纤传感器、Fabry-Pérot 腔式光纤传感器、光纤布喇格光栅传感器等几种。

### 3 光纤传感器在桥梁结构健康监测中的应用

桥梁工程是土木基础设施工程的重要组成部分,它关系到一个国家的交通、经济发展、军事乃至人民生命财产安全。桥梁工程具有投资大、设计周期长、使用环境恶劣,易受周围大气、温度、湿度及天气的影响而发生劣化以及长期承受动荷载等特点,因而对桥梁结构进行施工监控和长期监测尤显必要。而采用一般的传感器系统进行监测都需要采用电缆来传递电源和输出信号,通常对应一个传感器需要 5 根引出线(其中 2 根提供电源,2 根用于信号输出,1 根用于屏蔽),5 根引出线再加上 1 层外套组成 1 根电缆。因而整个系统所需的电缆数目很大,重量也重,这对系统很不利<sup>[4]</sup>。而采用光纤传感器,其一条线路既可传递光源又可传递测量信号,还可多路复用,则可以避免上述问题。另外由于光纤传感器具有抗电磁干扰能力和耐腐蚀性,因而极适合用作桥梁等处于露天、恶劣环境下的大型土木工程结构的长期监测。

#### 3.1 国外应用概况

美国在 80 年代中后期就开始在多座桥梁中布设光纤传感器,用来验证设计假定、监视施工质量和服役安全状态。美国佛蒙特(Vermont)大学自 20 世纪 90 年代初已在光纤传感器的智能化钢筋混凝土结构健康诊断

以及振动监测方面进行了一系列实用性探索。1989 年在一座横跨威努斯基(Winooski)河的高速公路桥桥面上埋置了光纤传感器,对桥面在气锤冲击、卡车行驶时的振动情况进行了监测,同时与采用传统传感器的监测结果相比较,两者吻合较好。1992 年, Fuhr 和 Huston 等人在佛蒙特大学附近的一座铁路桥中埋入和粘贴了单模光纤以及部分光纤束和光缆,以检测铁路桥在火车经过时的振动情况,从而根据收集到的振动信息来确定所通过列车的类型,达到控制火车流量的目的。1995 年, Fuhr 和 Huston 等人还利用基于铁锈测量的光纤腐蚀传感技术在桥梁结构的钢筋上安装了光纤腐蚀传感器,以检测钢筋的锈蚀情况。

1993 年,在加拿大卡尔加里建了一座名为贝丁顿特雷尔的两跨公路桥,首次采用了碳纤维复合材料替代混凝土中的钢筋,以解决钢筋的易腐蚀问题,并在桥梁的 26 根梁中,有 5 根埋设了光纤布喇格光栅传感器,用来监测使用过程中碳纤维复合材料代替钢筋的效果及桥梁的内部应变状态。位于加拿大马尼托巴,横跨在温尼伯西边阿西尼博因河上的泰勒大桥上安装了由加拿大电—光设备公司和多伦多大学光纤传感器技术实验室人员研制的光纤传感器及其监测系统,用来测量横梁的应变、荷载和温度并长期监测这些新材料的老化过程。1998 年加拿大的圣埃梅利、德黑兰、若夫尔等大桥采用了埋入式、点焊式光纤传感器进行测量;1999 年加拿大的惠灵顿大桥采用了粘贴式光纤传感器进行测量。

位于德国柏林的马林费尔德大桥是一个两跨、双 T 形预应力梁桥,它首次实现了对桥梁结构的完全监控。在这座桥中,除了把传感器与预应力筋结合在一起之外,还把一个完整系列的光纤传感器直接埋入混凝土中。在 1989 年 11 月,用 250 块混凝土(每块板重 10 kN)的荷载对该桥进行荷载试验,埋入桥中的光纤传感器很好地记录下了桥梁在试验时的动力行为。1992 年, Woff 等人在德国莱沃库森的希斯贝格街道桥上,将光纤埋入收缩量很小的合成树脂砂浆中,组成预应力筋,每根预应力筋中安装两只光纤传感器,整座桥使用了 27 根光纤预应力筋,用于检测桥面的内部损伤情况,另外在桥面的上下面也各装了 4 只光纤传感器来监测裂缝,从而实现了对大桥的长期监测。1994 年,德国结构维护及现代化研究所(IEMB)的 Habel 和 Huffman 等人在德国柏林市区一座桥的钢筋上粘贴了光纤应变传感器,用来测量钢筋在车辆经过时的变形和振动。

位于瑞士洛桑的韦诺日河高速公路桥是一座 4 跨、其混凝土桥面板由 2 个平行刚架支撑的高架桥。为了监测混凝土收缩的影响,特别是混凝土在刚浇筑后头几

个小时收缩的影响,在其桥面板中埋入了光纤传感器进行监测,验证在已知静荷载下桥梁的变形。瑞士的吕利高速公路桥(1995)是一座复合材料大桥,在这座桥的混凝土路面中安装了11根1 m长的由瑞士联邦工学院应力实验室开发的基于二次Michelson干涉的SOFO传感器去监测混凝土的收缩、混凝土与刚排架的相互作用以及由预应力引起的变形。位于瑞士提契诺州的比索内公路桥则是一座有30多年历史的老桥,由于使用时间长,混凝土损坏较严重,1996年对它进行了整修,除去了已坏的旧混凝土,重新浇筑了一层新混凝土。为了评估新老混凝土之间的粘着力采用了2根1.5 m长的SOFO传感器,其中1根安放在靠近新老混凝土界面的地方,另1根装设在新混凝土的表面。

### 3.2 国内应用概况

在我国,光纤传感器用于土木工程结构健康监测和诊断的系统研究和应用才刚刚开始,其用于桥梁结构健康监测更是只处于理论和实验研究阶段,这种现状一方面与我国的研究机构和研究人员在该领域的研究深度有关,另一方面也与我国目前的社会经济发展水平有关。在这一研究领域,重庆大学国家教育部光电技术及系统开放实验室的研究人员开展了一系列的工作<sup>[5]</sup>。他们发展了一种新颖的多模光纤模域光纤振动传感系统,并构建了一种机敏桥面铺装结构。他们还和重庆公路科学研究所的工程技术人员一起,将多模光纤模域光纤振动传感系统应用于虎门大桥桥面铺装结构的模型实验中,用来监测5种桥面铺装结构经过几十万次重复加载过程中的变形、裂缝生成和扩展等情况。哈尔滨工程大学的章立滨等人<sup>[6]</sup>将光纤传感器胶合在桥梁模型

的钢索上,对桥梁在受载情况下钢索的应变变化进行了实验研究。

## 4 结 论

从20世纪70年代中期至今,光纤传感技术经过短短20多年时间的快速发展已取得了长足的进步,测量各种参数的光纤传感器也应运而生。其涉及的领域包括国防军事、航天航空、土木工程、电力、能源、环保、医学等。随着更多稳定性好,可靠、耐久、经济、更适合桥梁结构特点的光纤传感器的研制成功,光纤传感器在桥梁工程领域内将会得到更加广泛的应用。其应用范围将会覆盖以下3个方面:桥梁结构的施工监测;既有桥梁结构的工作性状监测;服役时间较长的桥梁结构的损伤检测。

## 参 考 文 献:

- [1] Keiser G. Optical fiber communications[M]. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [2] Buckman A. Guided wave photonics[M]. New York: Saunders, 1992.
- [3] 武湛君, 张博民, 王殿富等. 光纤传感器在民用建筑结构中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(4): 469~474.
- [4] 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [5] 赵廷超, 黄尚廉, 陈伟民. 机敏土建结构中光纤传感技术的研究综述[J]. 重庆大学学报, 1997, 20(5): 104~109.
- [6] 章立滨, 杨 军, 刘志海等. 单索面斜拉桥模型钢索载荷应变的光纤传感测量方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(3): 86~89.

(上接第46页)

挖,其土方可以大大地降低。一方面降低了施工费用;另一方面少动原状土,使环境得到保护。

(4) 变更之后的无桥台斜腿刚架桥,根据施工期桥下交通状况,分别采用整体现浇不带挂孔方案和带挂孔无桥台斜腿刚架桥两种方案,前者适用于施工期间桥下无交通的地段,后者适用于施工期间不能阻断桥下交通的路段。不管是否带有挂孔的无桥台斜腿刚架桥,其施工工艺均比原设计桥型来得简单,施工工期可以缩短,整体现浇的无桥台斜腿刚架桥,待基础施工完之后,即可搭支架施工斜腿、边斜杆和上构主梁,由于大部分主梁采用T形截面,因而其施工工艺和工期均比原设计的组合截面或箱形截面要好得多。设挂孔的无桥台斜腿

刚架桥,其V形刚架部分和挂孔可以同时施工,待V形刚架施工完后,吊装空心板,现浇接头混凝土即可进入桥面系施工。

## 5 结 语

无桥台斜腿刚架桥是一种新桥型,其桥型美观、造价低廉,而且施工方便、工期短。此次在绕城公路上的使用,是对该桥型的又一次重要的推广。在当今既要保证桥梁安全,又要求造价低、美观的前提下,推广应用像无桥台斜腿刚架桥一样的新桥型,是广大桥梁工作者努力的方向。