

法布里－珀罗光纤传感器在桥梁健康监测中的应用

吴文江^{1 2} 副教授 杜彦良² 教授 丁万斌³ 助理工程师
(1 北京交通大学机械与电子工程学院 2 石家庄铁道学院
3 中铁第十八局集团第五工程有限公司)

学科分类与代码 620.5040

【摘要】 对桥梁实施监测,是诊断桥梁健康状况的主要手段,现代传感技术和计算机技术的发展,使桥梁健康状态的实时监测变为可能。笔者分析了法布里－珀罗光纤传感器的基本原理和特性,设计了一种法布里－珀罗应变测试系统,并在预应力混凝土连续桥梁上与电阻式应变传感器进行了应变对比测试试验。试验结果表明,法布里－珀罗光纤传感器对环境温度不敏感,易与钢筋、混凝土复合,适用于桥梁结构的应变测试,可用于桥梁健康状态的在线监测。

【关键词】 光纤应变传感器 桥梁测试 健康监测

Application of Fabry-Perot Optical Fiber Sensor in Monitoring the Normality of Bridge

Wu Wenjiang^{1 2}, Assoc. Prof. Du Yanliang², Prof. Ding Wanbin³, Assistant Engineer

(1 Department of Mechanical & Electric Engineering, Beijing Jiaotong University
2 Shijiazhuang Railway Institute 3 The 5th Engineering Co. Ltd., The 18th China Railway Bureau)

Abstract: Bridge monitoring is a main measure to diagnose the normality of the bridge. The development of sensor and computer technology enables the real-time monitoring of the normality of the bridge. Based on the analysis of the principle and characteristics of FFPI optical fiber sensor, a FFPI strain testing system is designed and developed, which has been used in testing the strain of the bridge. Electrical strain gauges are collocated with FFPI optical fiber strain sensor to verify the strain data. The test results prove that FFPI is not sensitive to temperature and easy to be incorporated with tendon and concrete. FFPI is suitable for testing the bridge strain and could be used in monitoring the real-time mechanical normality of the bridge.

Key words: Optical fiber strain sensor Bridge testing Normality monitoring

1 引言

近年来,国内外不断发生的桥梁失效和坍塌事故,给人民的生命和财产造成了巨大损失。例如,2003年3月4日深夜发生在葡萄牙的桥梁坍塌事故,造成3辆汽车坠河、70人丧生的悲剧。如何及时、准确地评价桥梁的健康状况,越来越引起人们的关注。桥梁结构的应变状况是评价桥梁健康状况的主要性能指标。对桥梁实施监测,是诊断桥梁健康状况的主要手段,传统的桥梁检查方法是采用周期性的人工检查。这种方法既不能及时发现桥梁的某些缺陷,也不能实时

跟踪缺陷的发展,而这些缺陷的进一步扩展,就有可能导致桥梁的坍塌,因此,必须对桥梁进行实时监测^[1]。现代传感技术和计算机技术的发展,使桥梁健康状态的实时监测变为现实,有效的实时监测可以大大减少桥梁的保养维修费用,延长桥梁的使用寿命,确保桥梁的安全通行,避免重大事故的发生^[2]。

传统的桥梁应变监测仪器有电阻应变仪、压电式应变仪和钢弦应变计。虽然电阻式应变传感器及测试仪器可用于桥梁应变的监测,但并不适用于实时监测,其主要是因为电阻式传感器的传感信号为电信号,易受电磁干扰,从传感器

到监测点的距离一般不超过100 m,不能进行远距离传输。此外,对于混凝土连续梁应变的测试,需要在施工时将传感器埋入箱梁,由于刚浇注的混凝土具有高湿度、强腐蚀等特点,电阻应变传感器难以适应如此恶劣的工作环境。

光纤传感技术是20世纪70年代发展起来的一种新型传感技术,与普通的应变传感器相比,光纤传感器具有体积小、重量轻、柔韧性好、抗高温、耐腐蚀、使用寿命长,且抗电磁干扰能力强,易实现信号的远距离传输等优点,是一种极有发展前途的传感器^[3]。而其中法布里-珀罗传感器(Fiber Fabry-Perot Interference—FFPI)具有体积更小、不需要参考臂的优点,十分适用于桥梁应变的实时监测。混凝土连续梁具有变形小、结构刚度大、行车平顺、伸缩缝小、养护简单、抗震能力强等优点,是除简支梁外应用最广的一类桥梁,应变是反映混凝土连续梁桥梁健康状况的一个重要性能指标,对混凝土连续梁进行应变监测,可为判断桥梁的施工质量、健康状况、剩余寿命评估等提供依据。因此,笔者选用FFPI传感器并应用于预应力混凝土连续梁应变监测中,通过在施工现场对桥梁应变连续跟踪测试,证实了所提出测试方法的可行性,其试验结果为桥梁健康监测系统的进一步研究打下了基础。

2 光纤传感器与监测系统

2.1 FFPI传感器检测应变的原理

笔者所讨论的FFPI传感器的核心是本征型光纤法布里-珀罗干涉腔,其原理如图1所示,它是将一段单模传感光纤的两个端面抛光,并镀以介质TiO₂形成两个反射镜面,两反射镜面与传感光纤芯构成光纤谐振腔体,光纤谐振腔体是传感器的核心。来自于激光光源的光束注入谐振腔后,由两镜面反射的光束发生干涉,相邻相干光的相位差与传感光纤的折射率和长度有关,它们之间存在如下关系^[4]:

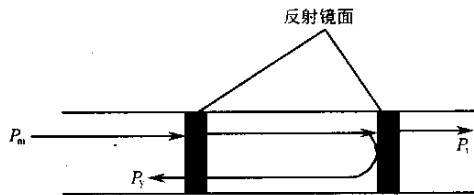


图1 FFPI光纤传感器原理图

$$\Phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} = \frac{4\pi\nu nL}{c} \quad (1)$$

式中, Φ ——相干光的相位差;

n ——传感光纤的折射率;

λ ——光波波长;

L ——传感光纤长度;

ν ——光频率;

c ——真空中的光速。

相干光的相位差受到单模传感光纤的应变和光源频率及环境温度变化的影响,存在如下关系:

$$\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi_L + \Delta\Phi_\nu + \Delta\Phi_T \quad (2)$$

$$\Delta\Phi_L = \frac{4\pi\nu n}{c} \Delta L = \frac{4\pi n}{\lambda} \Delta L \quad (3)$$

$$\Delta\Phi_\nu = \frac{4\pi L}{c} \left(n + \nu \frac{dn}{d\nu} \right) \Delta\nu \quad (4)$$

$$\Delta\Phi_T = \frac{4\pi L}{c} \left(L \frac{dn}{dT} + n \frac{dL}{dT} \right) \Delta T \quad (5)$$

式中, Φ_0 ——初始相位差;

$\Delta\Phi_L$ ——传感光纤应变引起的相干光相位差;

$\Delta\Phi_\nu$ ——光频率变化引起的相干光相位差;

$\Delta\Phi_T$ ——环境温度变化引起的相干光相位差。

假定环境温度对相干光相位差的影响可以忽略,光源光频率保持不变,则式(2)简化为

$$\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi_L = \frac{4\pi n}{\lambda} L_0 + \frac{4\pi n\varepsilon}{\lambda} L_0 \quad (6)$$

式中, ε ——传感光纤的应变;

L_0 ——传感光纤的初始长度。

若传感器反射镜面反射率为 R ,FFPI入射光强 P_{in} 和反射光强 P_r 之间存在以下关系:

$$P_r = 2RP_{in}(1 + \cos\Phi) \quad (7)$$

根据式(6)、式(7),通过探测反射光光强的变化,解调出相干光相位移,就可直接计算出传感光纤所发生的应变。

2.2 测试系统

FFPI传感器测试系统的结构如图2所示。施工时,将FFPI传感器与桥梁纵向钢筋复合埋入混凝土中,光纤传感器测试仪(型号FIZ-10)提供光源并探测光相变,计算机和光纤测试仪之间通过RS-232接口实现参量的定时提取、计算。为验证光纤测试系统测试结果的准确性,将差动电阻式传感器和光纤传感器埋入同一位置,用数字电桥(型号SQ-2)测量传感器的电阻值、电阻比。数字电桥通过其SIO接口与计算机的COM1接口连接实现数据通讯,利用软件计算出测点的温度和温度补偿后的应变值。

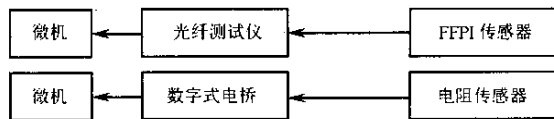


图2 测试系统示意图

3 测试及结果分析

某大型混凝土连续梁为箱形截面,在施工时,将FFPI传感器和电阻式应变传感器与钢筋复合埋入混凝土中,传感器的布置如图3所示,每个位置埋入一只FFPI传感器和一只电阻式应变传感器。利用所设计的测试系统对桥梁的施工进程进行跟踪监测,通过测试每个施工节段和体系转换后的应力变化情况,掌握施工质量和施工安全状况。由于混凝土浇注是在晚上进行,浇注前后的应变的变化情况,可以真实反映每个施工节段和体系在转换后的应力变化情况,所以

仅提取了每日上午 8 点和下午 4 点的测试数据,对施工进度连续监测 3 个月。图 4 为 FFPI 传感器和电阻式应变传感器所测试的箱型梁底板右侧位置的应变变化曲线,其中点线为电阻式应变传感器的测量值,实线为 FFPI 传感器的测试值。从图 4 中可以看出两传感器所测试的结果基本一致,测试数据的变化反映了施工中箱梁底板压应变的变化规律。由于两传感器安装位置不可能完全一致,所以承受的应变也不完全一致,因此,造成两传感器的测试结果略有差异。

由于采用悬臂施工法,在梁体自重和施工载荷的作用下,测点的压应变随施工进度而逐渐增加,应力曲线中的峰值和波谷值是由于浇注混凝土、张拉预应力筋和移挂篮引起的,发生的时间和施工记录相吻合。测试过程开始时传感器的环境温度为 34.5℃,结束时传感器的环境温度为 19.2℃,环境温度发生了较大的变化。

本研究由于假定温度对 FFPI 传感器的影响可以忽略,所以没有对 FFPI 传感器的测试结果进行补偿,而对电阻传感器的测试结果进行温度补偿。从测试结果的对比来看,两种传感器测试的应变结果基本一致,这说明环境温度引起的 FFPI 传感器相干光相位移与传感光纤应变引起的相干光相位移相比,可以忽略不计,因此,在桥梁的检测中,可以不考虑环境温度对 FFPI 传感器测试结果的影响。

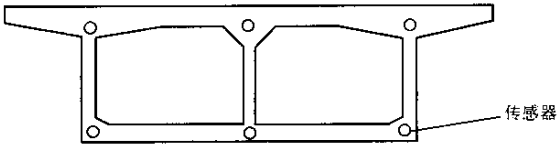


图 3 光纤传感器安装位置

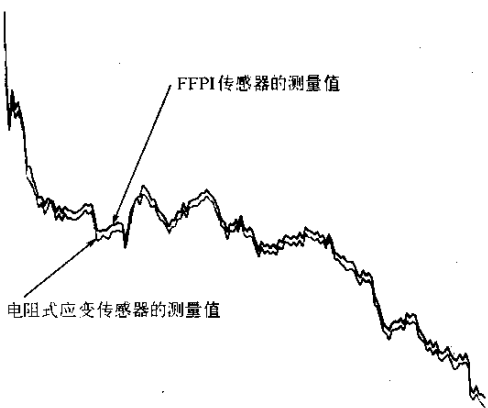


图 4 箱型梁底板右侧位置的应变变化曲线

4 结 论

通过对 FFPI 传感器工作原理进行分析和桥梁应变的测试试验,可以得到以下结论:

- (1) 测试试验结果表明,FFPI 光纤传感器具有结构简单,对环境温度不敏感,体积小,易与钢筋、混凝土复合的特点,测试精度较高,非常适合于在建桥梁应变的在线监测。
- (2) 桥梁完工后,光纤传感器应变测试系统还可以长期对桥梁的动态应变进行实时监测,以便及时掌握桥梁结构的健康状况。
- (3) 若将多个法布里-珀罗传感器埋入桥梁内部关键部位组成分布式测量网络,就可以对桥梁结构内部应变分布状况进行在线监测^[5],实现桥梁健康状况的实时监测,这对保证桥梁的安全施工和在用桥梁健康状况的诊断具有重要意义。

(收稿:2003 年 3 月;作者地址:河北省石家庄市北环东路 15 号;石家庄铁道学院机械工程分院车辆工程系;邮编:050043)

参 考 文 献

1 韩大建,谢峻.大跨度桥梁健康监测技术的近期研究进展.桥梁建设,2002,14(6):69~72
2 刘西拉,杨国兴.桥梁健康监测系统的发展与趋势.工程力学,1996(增刊)
3 孙圣和,王廷云.光纤测量与传感技术.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000
4 Wanku Lee, Jongseo Lee, Craig Henderson, Henry F. Railroad bridge instrumentation with fiber-optic sensors. Applied Optics, 1999, 38(7):1110~1114
5 封君,朱永,李晓宇,石荣,陈伟民,黄尚廉.光纤法-珀传感器监测混凝土固化期收缩应变的实验研究.电子学报,2000,29(10)