

光纤光栅传感技术在桥梁监测中的应用



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

目前，光纤光栅传感器在土木工程中应用较多的领域是桥梁的安全监测。实践表明，对桥梁工程进行客观、准确、及时地监测，是保证在建桥梁工程质量的重要手段，有时甚至是施工中必不可少的步骤之一；同时也是了解成桥(特别是病害桥)的健康状况、查清病害程度与原因的重要手段。为了实现对桥梁结构的健康监测，传感系统应具有如下功能：评定荷载，检查预先的性能设计，标定异常状态或行为和制定维修预案。

大桥监测使用了光纤光栅传感器进行了监测。主要监测了桥梁内部的三种预应力筋：传统钢筋、碳纤维复合筋、绞索筋。这个 3 车道双跨桥有 26 根预应力梁，其中 6 根使用了碳纤维复合筋。光纤光栅传感器安装在这些预应力筋上后埋入了混凝土中。在这个项目中一个重要的目的是监测预应力筋/混凝土长期特性以评价桥梁所采用的新型 CFRP 材料的可靠性。而且，通过光纤光栅应变传感器阵列，可以监测桥梁的交通状况，异常荷载情况以及记录桥梁结构的荷载状况。通过传感器的监测数据，比较设计荷载和实际荷载的差别，有助于评价桥梁设计效果。

光纤光栅传感器安装于碳纤维筋的表面上，通过测量传感器的应变变化可以监测碳纤维筋的长期可靠性。由于碳纤维筋被预拉至 $8000\mu\epsilon$ ，在其服役期间将会出现应力释放的过程，从而使光纤光栅传感器处于压应力状态中。

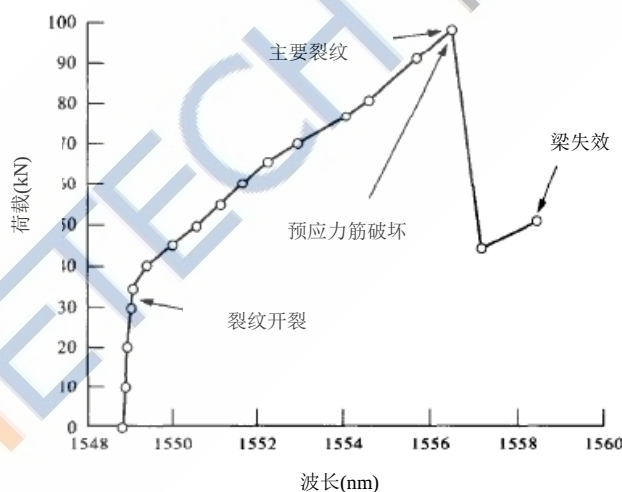


图 8.1 光纤光栅在桥梁模型试验的测量结果

在实际桥梁的安装之前，首先进行了桥大梁的 1: 3.3 比例的模型试验。光纤光栅传感器与电阻应变片平行安装于预应力筋上。对梁模型进行了准静态循环荷载试验。如图 8.1 所示，光纤光栅传感器始终保持良好的工作性能直到梁模型完全破坏。在 320,000 周的循环荷载试验中，传感器始终处于 0 到 $2000\mu\epsilon$ 的应变变化内。通过记录光纤光栅试验前后的反射光谱发现，光纤光栅传感器始终保持着良好的工作性能。

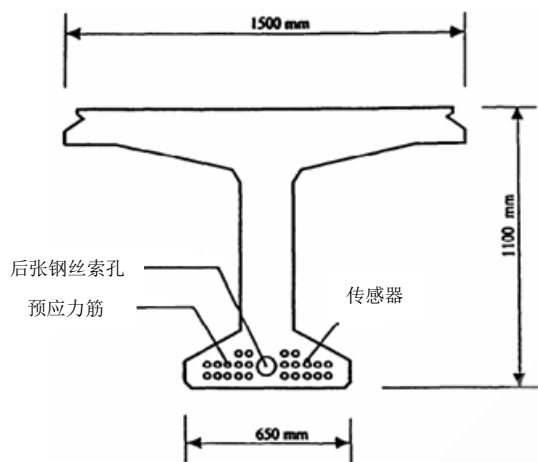


图 8.2 桥的 T 型预制预应力梁的剖面图

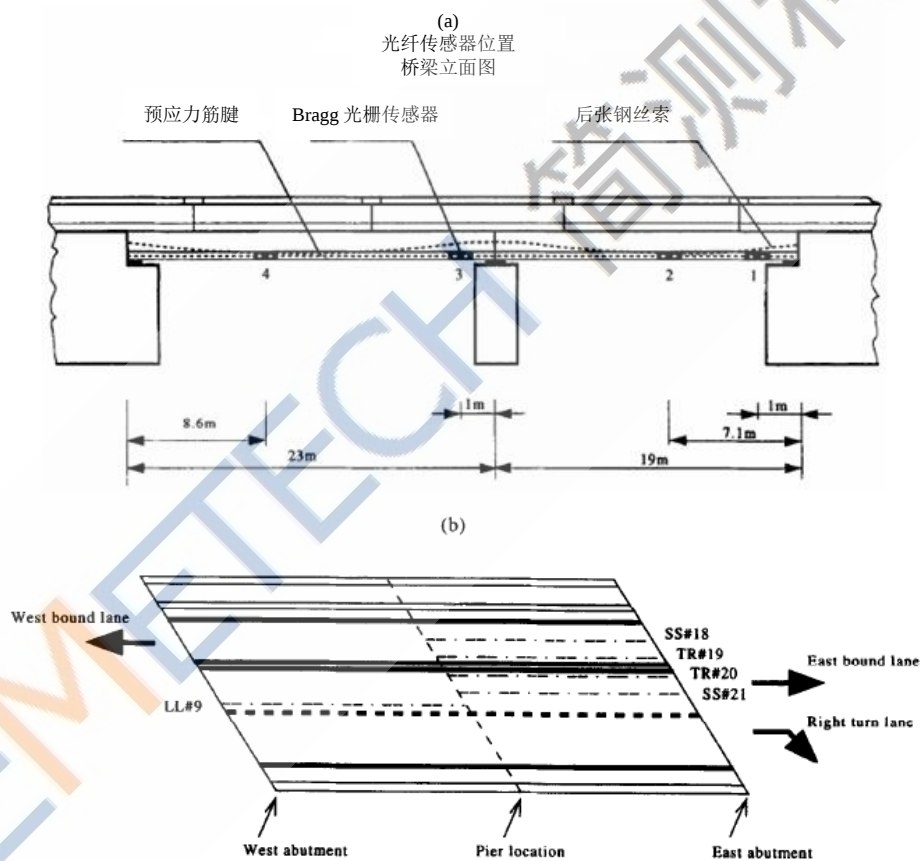


图 8.3 大桥应变静态监测结果：(a)正视图；(b)平面图。

图 8.2 为 T 型预制预应力梁的剖面图。图 8.2 示出了预应力筋、用于应力后张的管道位置以及光纤光栅传感器的安装位置。整个光纤光栅传感阵列有 18 个应变和温度传感器沿各个方向安装在预应力筋表面上。光缆沿着加固钢筋的方向布线，最后进入一个位于顶部桥基的密封连接盒内。如图 8.3 所示，传感器安装在各个梁的 37.5%跨距位置上，这是桥最大荷载的位置。

在距离桥基 1m 的碳纤维筋上也布置了传感器。

应变静态监测结果如图 8.4 所示。传感器的名称按照所测量筋的类型命名。SS 为钢筋，梁的标号(#)和传感器按位置的编号如图 8.3 所示。

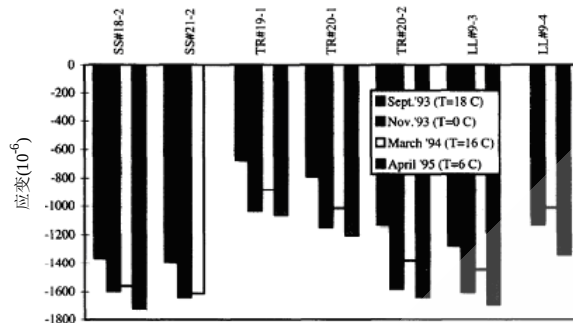


图 8.4 静态应力释放测量结果

图 8.4 所示测量结果显示了预应力筋的应力释放现象。这是由混凝土的收缩和蠕变，桥面板的恒载以及施加的应力后张等多种因素造成的。图 8.4 所列数据是光纤光栅应变传感器在温度补偿后的结果。温度变化带来的应变测量误差，不仅因为应变传感器自身的热膨胀，而且是由被测筋自身热膨胀施加给应变传感器的应变变化。因此，对光纤光栅应变传感器结果的修正，不仅要消除传感器自身的热膨胀影响，而且要消除结构热胀冷缩带来的应变变化。

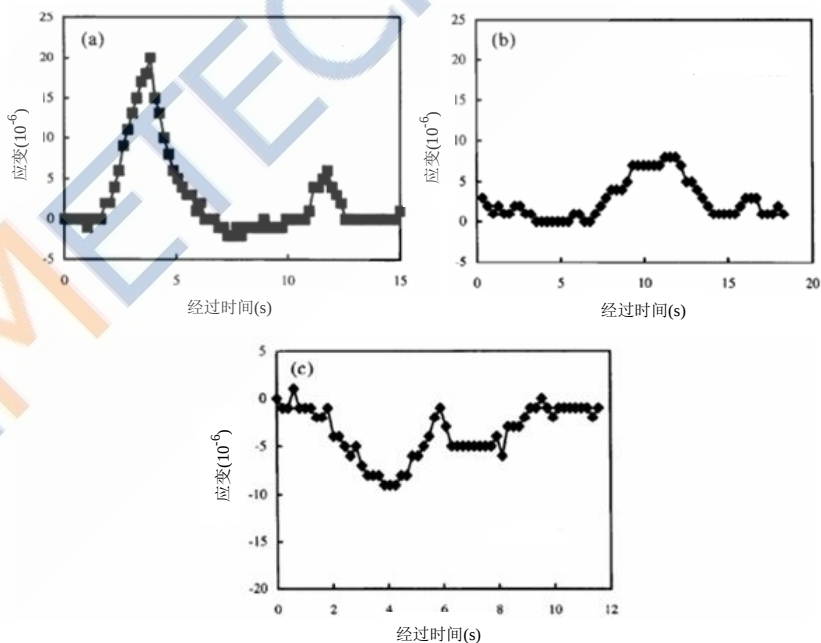


图 8.5 CFRP 筋在车辆荷载下的应变变化

图 8.5 为一辆 25 吨卡车自西向东以较低的速度(10 到 30kph)通过大桥时，CFRP 筋的车辆荷载动态应变监测结果。在传感器点 2 和点 4 监测到的峰值应变为 20-25 $\mu\epsilon$ ，因为车辆直接经

过了铺设该传感器的位置。随即,传感器也监测到了一辆载重较小的车通过大桥时的应变变化,如图 8.5(a)所示。卡车经过的另一边车道内的传感器也监测到了幅度很小的应变变化,如图 8.5(b)所示。在点 3 布置的传感器监测到了大约 $10\mu\epsilon$ 的压应变,如图 8.5(c)所示。

我国滨州黄河公路大桥

发达国家桥梁建设和服役经验表明,在经济腾飞时期建造的桥梁结构的性能退化最快。因此,我国政府、工程技术人员以及科技工作者特别重视目前已经和正在建造的大型桥梁结构的服役安全,积极推动桥梁结构安全保障技术的研究、应用和发展。由于健康监测系统能够记录和分析桥梁结构的荷载及其响应,把握桥梁结构的健康安全状态,现已成为桥梁工程领域研究的热点课题。依托我国大规模基础设施建设的背景,桥梁结构监测系统的研究与应用在我国得到了迅速发展。设计并实现了滨州黄河公路大桥和四方台大桥的离线与在线的光纤光栅桥梁健康监测系統。

山东滨州黄河公路大桥是三塔双索面固接+半漂浮双边箱预应力混凝土梁斜拉桥体系。主桥全长 768 m,桥跨布置方案为:84m(边跨)+300m(主跨)+300m(主跨)+84m(边跨)。索塔为双柱式索塔,中塔和边塔高分别为 123.25m 和 75.78m(塔座以上)。本桥采用 $\Phi 7$ 高强镀锌钢丝斜拉索,全桥共计 100 对斜拉索。



图 8.6 山东滨州黄河公路大桥

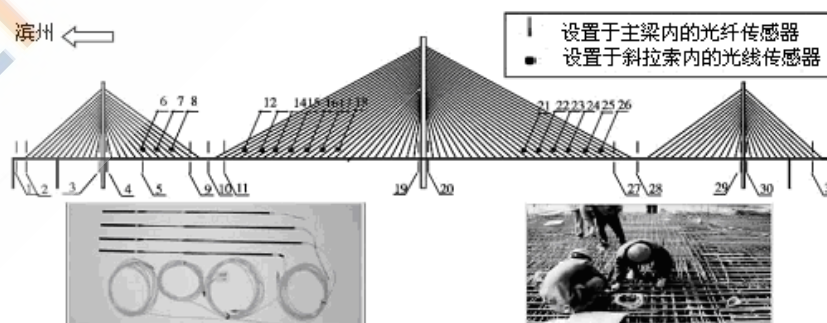


图 8.7 光纤光栅应变传感器及其在主梁和斜拉索上的布置位置

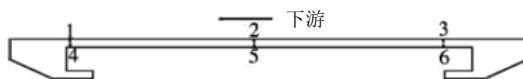


图 8.8 主梁截面上的应变测点

全桥共安装了 138 支光纤光栅应变与温度传感器。监测截面包括两类，第一种是位于主梁的监测截面，每个主梁监测截面分布测点如图 8.8 所示，光纤光栅传感器固定于测点处纵向受力钢筋处。第二种截面位于大桥斜拉索距桥面 1.5m 处位置。将斜拉索外套 PE 塑料部分剥离出 20mm×100mm 区域，将裸光纤光栅粘贴在斜拉索高强镀锌钢丝上用以监测应变，然后按照标准防腐工艺对剥离区域进行防腐处理，以确保斜拉索的耐久性。

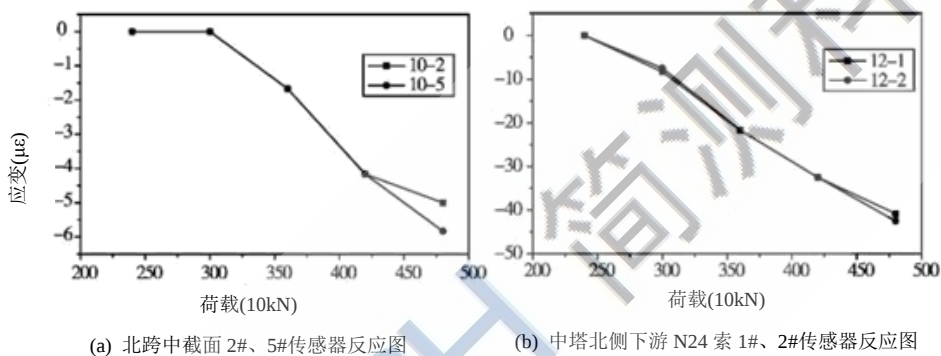


图 8.9 光纤光栅传感器静载试验结果

图 8.9(a)为 16 辆卡车(总重 480 吨)的荷载施加在大桥中塔被测根部附近时，大桥主梁静态应变反应。可以看到光纤光栅传感器监测到各截面在荷载作用下的应变反应基本成线性变化，测点 2、5 应变反应基本一致。图 8.9(b)为斜拉索的局部应变监测结果。

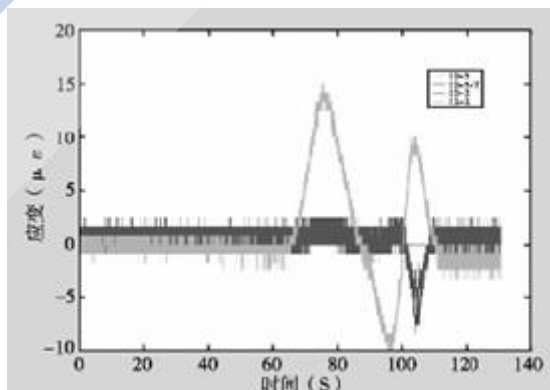


图 8.10 由南向北 50km/h 无障碍行车应变与温度

在无障碍行车试验（在桥面无任何障碍的情况下，用两辆载重分别为 150kN 的汽车以 10

km/h、20 km/h、30 km/h、40 km/h 的速度驶过该桥）下测量桥梁结构在动应变和温度变化，如图 8.10 所示。从上述结果可以看出，光纤光栅传感器可以测试静动态应变，测试精度较高，也可以准确测试桥梁结构的温度（行车时间段内温度基本不变）。

哈尔滨四方台大桥

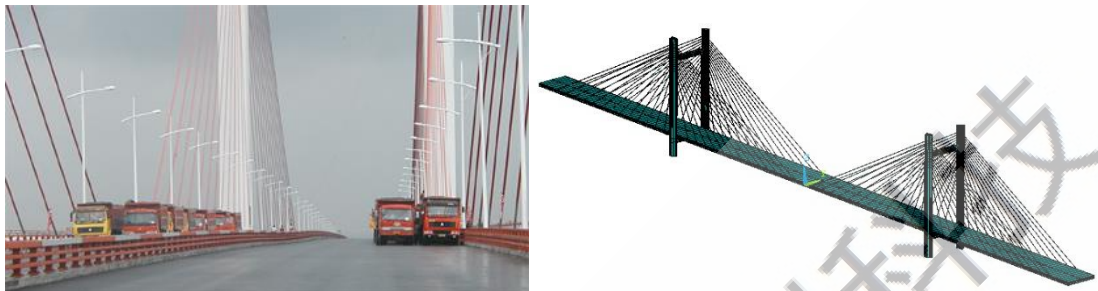


图 8.11 哈尔滨松花江大桥

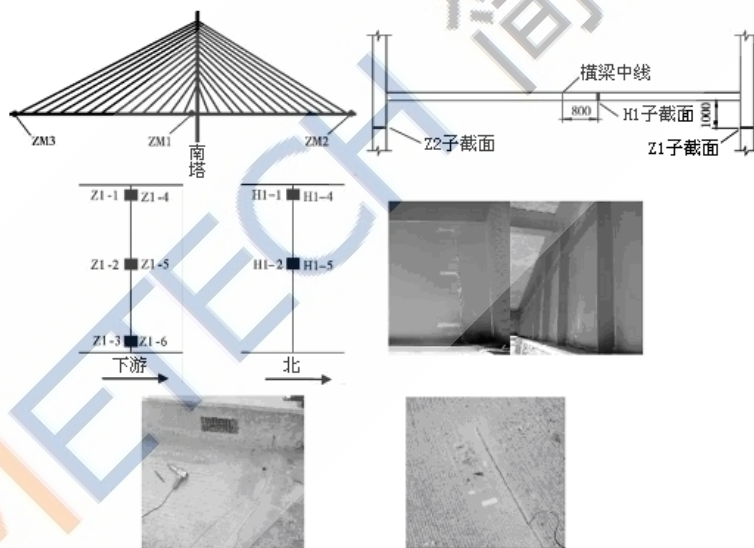


图 8.12 光纤光栅应变和温度传感器的布设

哈尔滨松花江大桥采用双塔双索面半漂浮结合梁斜拉桥体系。桥梁全长 1268.86 m，主桥长 696 m，引桥长 572.86 m。主跨 336 m，主桥全宽 33.2 m，双向共四车道。索塔为门式塔，南塔和北塔高分别为 110.80 m 和 106.10 m (塔座以上)。主梁截面以两道工字边梁肋，横梁及中间小纵梁与混凝土桥面结合形成组合截面。采用热挤聚乙烯 $\Phi 7$ 低松弛预应力镀锌高强钢丝斜拉索，全桥共计 52 对，拉索索面为空间扇形。该桥如图 8.11 所示。

考虑到桥梁结构具有对称性，选择在大桥南部的相应应力控制部位 ZM1、ZM2、ZM3 三

个截面钢梁构件上，布置光纤光栅应变传感器，以获得这些关键点的应变、应力信息。对使加劲梁中跨 $L/2$ 截面(对称满载)弯矩最大的加载(上、下游各 2 车道荷载对称加载)工况下，光纤光栅应变的测试结果如表 8.1 所示。

表 8.1 成桥试验加载工况下各个截面应变试验值和计算值比较 ($\mu\epsilon$)

截面	位置编号 (内侧)	一次 加载	二次 加载	计算值	位置编号 (外侧)	一次 加载	二次 加载	计算值
ZM1 截面	ZM1-Z1-4	-16	-10	-2	ZM1-Z1-1	-16	-10	-2
	ZM1-Z1-5	-13	-4	-19	ZM1-Z1-2	-9	-10	-19
	ZM1-Z1-6	-13	-8	-21	ZM1-Z1-3	-7	-7	-21
	ZM1-Z2-1	-12	-12	4	ZM1-Z2-4	-17	-13	4
	ZM1-Z2-2	-12	-11	2	ZM1-Z2-5	-	-	2
	ZM1-Z2-3	-	-	-1	ZM1-Z2-6	-12	-10	-1
	ZM1-H1-1	-	-	-	ZM1-H1-4	0	5	-2
	ZM1-H1-3	-	-	-	ZM1-H1-6	-7	8	-21
	ZM2-Z1-4	-	-	-28	ZM2-Z1-1	12	14	-28
	ZM2-Z1-5	-	-	240	ZM2-Z1-2	157	156	240
	ZM2-Z1-6	326	331	510	ZM2-Z1-3	334	333	510
	ZM2-Z2-1	12	14	-28	ZM2-Z2-4	-	-	-28
ZM2 截面	ZM2-Z2-2	154	144	240	ZM2-Z2-5	158	151	240
	ZM2-Z2-3	-	-	510	ZM2-Z2-6	388	334	510
	ZM2-H-1	-2	2	2	ZM2-H-4	-	-5	2
	ZM2-H-3	49	51	58	ZM2-H-6	49	53	58

从表 8.1 中的结果可以看出，光纤光栅传感器每次测试结果基本相同，说明在经历了 2 个冬天和夏季的交替后，传感器的性能仍然保持稳定，试验结果合理；计算结果和试验结果有一定的差别，所以，对建立的该桥有限元模型还需要采用模型修正方法进行修正。

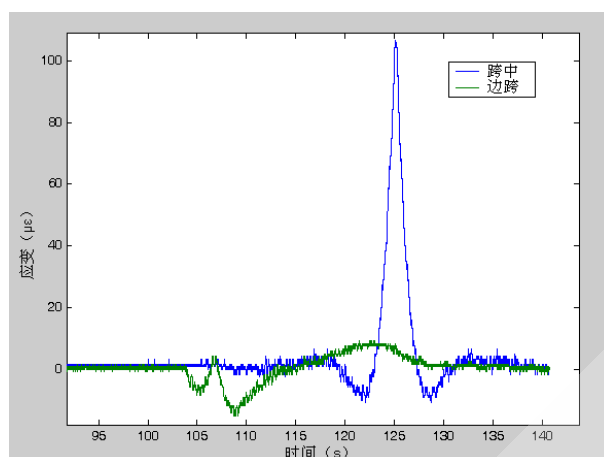


图 8.13 行驶车辆下光纤传感器的测试结果

图 8.13 是成桥试验动载下光纤光栅应变传感器监测的应变时程。反应较大曲线为跨中截面上游纵梁下部传感器的数据；反应较小曲线为南边跨截面纵梁上部传感器的数据。该工况为上游车道两辆 300 kN 货车，自南向北以时速 60.78 km/h 并排行驶。从图中可以明显地看到，车辆先由南边跨进入桥面，这时边跨纵梁上部受压，当车辆行进至跨中时，跨中截面纵梁下部受拉，应变反应呈现出向上最大峰值。