

文章编号: 1002-0268 (2004) 02-0057-05

光纤光栅传感器在桥梁工程中的应用与研究现状

王丹生¹, 吴宁², 朱宏平¹

(1. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2. 上海市政工程设计研究院, 上海 200092)

摘要: 概述了光纤 Bragg 光栅传感器的基本原理及特点。介绍了目前光纤 Bragg 光栅传感器在国外、国内桥梁结构健康监测中的研究及应用情况; 探讨了光纤 Bragg 光栅传感器在研究和应用过程中存在的问题及解决办法; 展望了光纤光栅传感器技术在桥梁结构健康监测领域的应用前景。

关键词: 光纤 Bragg 光栅传感器; 桥梁工程; 健康监测

中图分类号: TM45: U44

文献标识码: A

Study and Application of Fiber Bragg Grating Sensor in Bridge Engineering

WANG Dan-sheng¹, WU Ning², ZHU Hong-ping¹

(1. Huazhong University of Science & Technology, Hubei Wuhan 430074, China;

2. Shanghai Municipal Engineering Design & research institute, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the principles and characteristics of fiber Bragg grating sensor are presented. The research and applications of fiber Bragg grating sensor for bridge structure health monitoring at home and abroad are introduced, and some problems in the applications to be solved are discussed; finally, the prospect of fiber Bragg grating sensor in the field of bridge structure health monitoring is set forth.

Key words: Fiber Bragg grating sensor; Bridge engineering; Health monitoring

0 前言

随着经济建设的发展, 国家对桥梁、大坝、高速公路等大型基础设施的投资力度逐渐加大, 特别是近几年来, 姿态各异的城市立交桥、气势宏阔的跨江大桥逐渐增多, 连绵逶迤的跨海大桥工程也正蓄势待发。然而, 目前工程质量下降, 隐患很多, 事故频频发生。加之桥梁结构设计周期长、使用环境恶劣, 在其使用过程中, 由于环境荷载作用、疲劳效应以及腐蚀和材料老化等不利因素的影响, 结构也将不可避免地产生损伤积累和抗力衰减, 甚至因此而导致像重庆虹桥坍塌等灾难性突发事件的发生。因而, 对桥梁结构进行健康监测就显得尤其重要。传统的无损检测技术^[1]如射线检测法、核子激活法、电阻计、离子渗

透、超声波、检测温度法、谐振频率法以及在混凝土中埋入铁质颗粒的电磁辐射仿真法等都存在不同程度的缺陷, 不能实现对桥梁结构的健康监测。

新近发展起来的光纤光栅传感技术通过栅格反射波长的移动来感应外界物理量的微小变化, 具有线性程度高、重复性好, 可对结构的应力、应变高精度地进行绝对、准分布式数字测量的优点; 同时也可集成阵列式分布传感系统, 通过波分和时分复用技术来测量外界应力场作用下大量待测目标的空间与时间特征。此外, 光纤光栅传感器还具有抗电磁干扰能力强、耐高温、体积小、接线简单、可实现数据远距离传输等优点。光纤光栅传感技术由于具有很多传统检测技术所不具备的优点而被认为是未来桥梁结构健康监测首选的传感形式。

收稿日期: 2002-10-21

基金项目: 教育部优秀青年教师计划资助项目 (2002 年度)

作者简介: 王丹生 (1973-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土木工程结构损伤诊断与健康监测方面的研究。

1 光纤 Bragg 光栅传感器的工作原理

光纤 Bragg 光栅传感器的基本原理 (如图 1 所示) 是: 当光栅周围的温度、应变、应力或其它待测物理量发生变化时, 将导致光栅周期或纤芯折射率发生变化, 从而产生光栅 Bragg 信号的波长位移, 通过监测 Bragg 波长位移情况, 即可获得待测物理量的变化情况。光栅的 Bragg 波长 λ_B 由下式决定^[2]

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中, λ_B 为 Bragg 波长; n 为纤芯的有效折射率; Λ 为光栅间隔或调制周期。一般 λ_B 和 Λ 为微米量级。当光纤发生应变 ϵ 时, 光栅间距 Λ 变为 Λ' , 即有

$$\Lambda' = \Lambda(1 + \epsilon) \quad (2)$$

此时 Bragg 波长由式(1)的 λ_B 变为 λ_B' 。由光弹理论可以导出 Bragg 波长的变化。 $\Delta\lambda_B = \lambda_B - \lambda_B'$ 满足如下关系

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P)\epsilon \quad (3)$$

式中, P 为有效光弹系数。它的值为

$$P = \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \quad (4)$$

式中, P_{11} , P_{12} 为光弹性系数, ν 为泊松比。

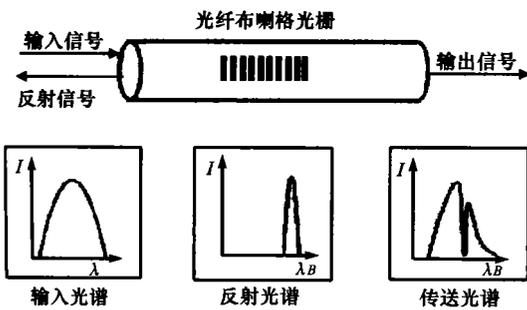


图1 光纤布喇格光栅传感器工作原理

温度变化也会引起光纤折射率的变化, 同时热膨胀还会引起光栅间距的变化。温度变化 ΔT 引起 Bragg 波长 λ_B 的移动 $\Delta\lambda_B$ 可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (a + \zeta) \Delta T \quad (5)$$

式中, a 为光纤的热膨胀系数; ζ 为掺锗光纤的光热系数。

由上述特性表明, 由于应变、温度变化对光纤光栅产生的扰动将导致 Bragg 波长的移动, Bragg 波长随应变和温度的位移可近似表示为

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left\{ \left[1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right] \epsilon + (a + \zeta) \Delta T \right\} \quad (6)$$

因此, 通过测量 Bragg 波长位移即可测出外界应力和温度的变化。

2 光纤光栅传感器在桥梁工程中的应用

自光纤光栅传感器于 1990 年首次埋入环氧纤维复合材料中以及 1992 年首次埋入混凝土梁中以来, 大量在桥梁、水坝、管线、隧道、矿厂、核存储容器、天然气压力罐、建筑物以及道路等基础结构的力学参数测量、状态监测中得到应用。其中, 应用光纤光栅传感器最多的领域之一当数桥梁结构的健康监测。

1993 年, 加拿大卡尔加里的 Beddington trail 大桥首先使用了光纤光栅进行应力测量并用此方法长期监测桥梁结构^[3]。该桥是一座两跨三车道的铁路桥, 这座桥使用了 26 片预制的预应力混凝土梁, 其中 6 片使用了两种 CFRP 材料, 一种是日本东京一家缆索制造有限公司生产的碳纤维复合材料筋, 简称为 CFCC; 一种是日本的 Mitsubishi 化学制品公司生产的碳纤维增强导杆, 简称为 CFLR。其他的预应力筋采用普通钢绞线。如图 2 所示, 18 个光纤光栅传感器被安装在这 3 种不同类型的预应力筋的各个部位上。在安装光纤光栅传感器的时候, 研究人员遇到了一个非常棘手的问题, 那就是如何在混凝土浇筑和振捣时不破坏

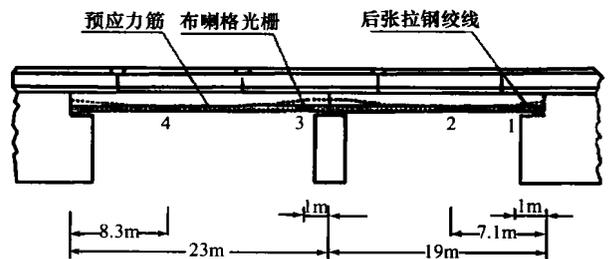


图2 光纤光栅传感器在 Beddington trail 大桥上的位置

传感器和光缆。此外, 为了防止光纤受潮气和碱性环境的腐蚀, 还必须使用特殊的套索, 这样还可以减少收缩与微弯作用, 这两种作用都会影响光纤的整体性, 还会导致光信号强度的减弱。浇筑混凝土时, 必须用振捣棒不停地振捣混凝土, 使混凝土在密集的钢筋笼中均匀分布, 同时必须合理选择光缆的布置路线, 避免光缆在振捣过程中被损坏。光缆沿着钢筋被引入一个接线盒内, 这个接线盒被螺栓固定在模板内侧。在混凝土蒸气养护之前, 接线盒一定要密封, 以避免光缆变脆, 这一点非常重要。如图 3 所示, 安装在该桥中的光纤光栅传感器不仅实现了对 3 种预应力筋性能的监测和比较, 对混凝土的状态和性能的长期评估, 还实现了对交通中的极限荷载以及桥梁荷载历史的监测。

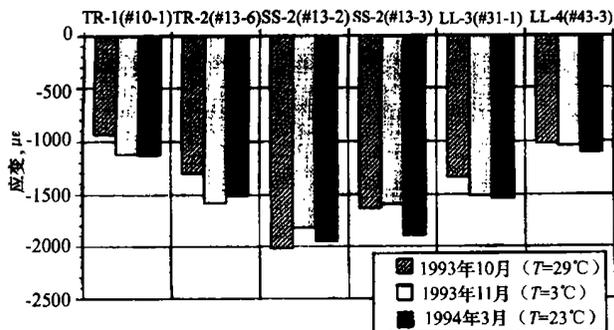


图3 在不同时段和不同温度条件下, 光纤光栅传感器测得的静态应变

加拿大 Winnipeg 的 Taylor 大桥是目前记录的使用 CFRP 作为预应力筋的最大跨度的桥梁^[4]。它的 4 片梁和一部分混凝土桥板采用了这种新型材料。该桥总共有 5 跨, 总长 165m, 宽 9.6m, 每跨有 8 片 33m 长的工字形预应力混凝土预制梁。该桥于 1997 年 10 月 28 日开放通车, 是第一座智能桥。这座大桥上装备了一系列光纤布喇格光栅应变传感器 (FOS) 和一些普通的应变仪。66 个 FBG 传感器分布在桥梁中的各个位置用来测量纵向的钢筋和预应力 CFRP 筋、横向钢筋和 CFRP 筋、CFCC 筋、混凝土板、混凝土挡土墙的应变。图 4 显示的是粘贴在 CFCC 预应力筋上的 FOS33 和 IC33 传感器测得的应变和温度随时间变化的曲线。从图中可以看出, 当温度降低时, CFCC 筋的相对应变增加, 反之亦然。表 1 总结了传感器于 1998 年 1 月 30 日、2 月 27 日、3 月 27 日以及 4 月 17 日所在的 4 个工作周记录下的预应力筋最小相对应变。如表 1 所示, 在 1 月 30 日到 4 月 17 日两个工作

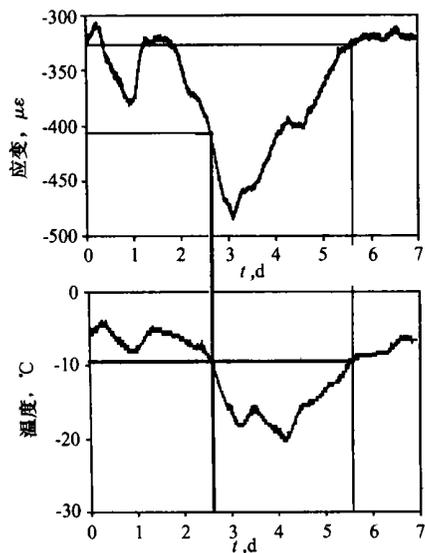


图4 FOS33 和 IC33 传感器记录的应变和温度随时间变化的数据

周之间, 传感器记录的应变不断增加, 很显然应变增量的一部分是由温度增加而引起的。图 5 则显示了在 1~4 月间应变测量值和温度测量值的对应关系。在该桥的监测过程中, 现场解调系统和计算机从光纤光栅传感器上获得并存储信息, 并通过电缆线与遥远的中央监测站相连, 从而实现了对该桥的长期实时健康监测。

不同时段、不同温度条件下的预应力筋

最小相对应变测量值^[4] 表 1

传感器 ID	最小相对应变 / $\mu\epsilon$			
	26-30/01/98	23-27/02/98	23-27/03/98	13-17/04/98
温度 (°C)	-20	-10	2	2
FOS1	-1150	-950	-480	-220
FOS57	-720	-580	-280	-120
FOS73	-1525	-1400	-1085	-920
FOS33	-480	-320	-20	140
FOS34	-650	-660	-300	-90
FOS37	-820	-700	-400	-265

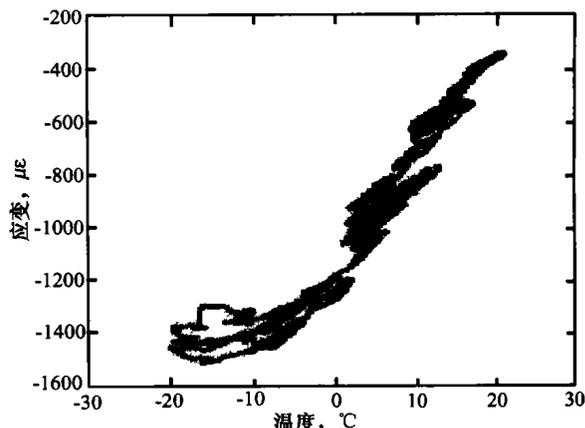


图5 FOS73 记录的应变和温度数据 (1998 年 1~4 月)

加拿大的 Confederation 大桥是世界上跨在被冰覆盖的海洋上的最长的桥梁, 它的跨度为 12.9km, 箱梁设计为中空, 以便于作为电讯设施的有用通道。该桥部分混凝土箱梁高达 14m, 一辆双层公共汽车可以从其中通过。这座大桥中安装了一系列光纤布喇格光栅传感器对桥梁进行了健康监测。俄勒冈哥伦比亚河谷上的 Horsetail fall 桥是一座古老的桥梁, 它于 1914 年建成, 原为混凝土结构, 当初的设计不能满足现今的交通要求, 后来采用纤维增强塑料复合材料对桥梁进行了加固, 为了监视加固后的结构情况, 把 28 个光纤光栅传感器安装在两片复合材料加固的混凝土梁上, 从 1998 年开始至今, 每个月用便携式光谱仪测量一次数据。佛蒙特大学的 Fuhr 和 Huston 领导的研究小组用光纤光栅传感器远距离监测沃特伯里佛蒙特

刚架桥,将测量数据传输到监测中心计算机上进行分析并发布到万维网上。

瑞士温特图力的Storck's桥不仅是世界上第一次使用CFRP拉索替代钢索的斜拉桥,也是最早使用光纤光栅传感器的桥梁之一。该桥长120m,横跨18根铁轨。该桥有2根长为35m的拉索用CFRP材料替代了钢筋,每根CFRP拉索由7个FBG传感器组成的传感阵列进行监测,从而实现了桥梁的长期监测,并且监测结果与同时使用的箔式电阻应变仪测得的结果十分吻合^[5]。瑞士应力分析实验室和美国海军研究实验室在瑞士洛桑附近的Vaux箱梁高架桥的建造过程中,使用了32个光纤光栅传感器对箱梁受到拉压时的准静态应变进行了监测。

1997年,在美国俄亥俄州的巴特勒县建造了一座全复合材料大桥,复合材料在制作过程中埋入了光纤光栅传感器,通过互联网可以有规律地监视桥梁的荷载响应和跟踪连接绳索的长期性能。美国新墨西哥Las Cruces的I-10桥梁建成于1970年,是一座钢结构桥,已经出现了许多的疲劳裂纹。为了对该桥的形变应变进行监测,1999年夏天,在该桥上安装了120个光纤光栅传感器。创造了当时在一座桥梁上使用光纤光栅传感器最多的记录。

德国的Klink T.等人将4个光纤布喇格光栅传感器埋入德勒斯顿附近A4高速公路上的一座跨度为72m的预应力混凝土大桥中^[6],其主要目的是想获得光纤布喇格光栅传感器在桥梁结构监测应用的经验。传感器被埋在桥梁跨中截面,其方向与预应力钢筋平行。为了光纤接入桥梁不受到限制,在桥梁一个支撑的附近安装了一个连接盒,盒内装有一套询问光纤光栅传感器的数据采集装置。通过使用一个移动的光谱分析仪来获取不同时间间隔下的应变测量值。对测量值分析发现,在对钢筋施加预应力后,混凝土的应变发生了显著的改变,一根预应变为 $3000\mu\text{m}/\text{m}$ 的钢筋将引起该桥梁结构混凝土产生大约 $300\mu\text{m}/\text{m}$ 的压应变。考虑同时发生的温度减少,测量值与期望值相符。

在挪威南部,有一个重要的改建工程,那就是把一座跨径为16.3m的双车道独板桥——Smedstua桥迁走,挪威国家公路局和它的两个机构决定在该桥上安装不同类型的光纤传感器和传统的监测系统,然后对桥加载,使之破坏。在该桥桥面板中的受拉、受压钢筋以及一个桥墩上安装了40个传统的应变计,3个FBG传感器粘贴在钢筋棒上,在FBG传感器的附近有3个传统的应变计与它们一起共同工作。通过汽

车加载实验,对FBG传感器和传统的应变计的测量结果进行了比较^[7]。

在国内,也有一些机构如清华大学、重庆大学、哈尔滨工业大学、武汉理工大学一直在相关领域开展了一系列的理论和实验研究。在实际工程中也得到了初步应用,如香港青马大桥和海口的世纪大桥均采用了光纤监测系统。但由于我国目前的社会、经济以及技术等原因,光纤光栅传感技术在桥梁结构健康监测方面的应用研究才刚刚开始,要实现实用化还有很长的一段路要走。

3 存在的问题及对策

3.1 应变与温度交叉敏感问题

光纤光栅的中心波长不仅与加在光纤上的应变有关,而且还受温度的影响,二者引起的波长变化是线性的。当温度在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围变化时,光栅中心反射波长变化约1nm,严重影响了其在应变测量方面的应用。为了克服这种交叉敏感效应,人们提出了一些解决方案。其中大部分方案是采用两个或两个以上的光纤光栅组合来克服交叉敏感问题^[8-9],也有方案采用光纤光栅FP腔来实现温度与应变的同时测量,还有其它的一些方案,如利用负温度膨胀系数材料,对光纤光栅进行温度补偿封装来解决光栅的温度漂移问题。这些方案有的需要两个解调光源,增大了系统的复杂性,也增大了成本。有的方案则失去了光纤光栅传感器所特有的波长编码特性的优点。因而到目前为止还没有很好的、实用的方案可以解决这一问题,还需要进一步的研究。

3.2 光纤光栅传感器的安装问题

光纤光栅传感器在土木工程结构中的安装也是一个值得进一步研究的问题。在土木工程中,其主要的结构形式有钢筋混凝土结构和钢结构等。在对钢结构的监测中,一种方法是将光纤光栅直接粘贴在结构的表面来感受结构物的应变变化,这种方法的关键在于选择性能优良的粘结剂,以确保传感器不会从基体材料上脱落,并且要保证两者之间良好的应变传递。另一种方法是将光纤光栅附着在一根中心金属传感棒上,传感棒固定在建筑物上进行测量。在这种方法中,光纤光栅是通过传递物感应应变,而不是直接固定在结构表面。对于混凝土结构的监测,除了可以用上述两种安装方法之外,还可以在施工过程中将光纤光栅直接埋入到混凝土结构当中。对于这一安装方法人们提出了很多的埋设技术,这些技术的共同目的都是想办法尽量避免光纤光栅在埋入的过程中受到损

伤, 并且保证其和混凝土结合良好。目前的埋设工艺主要由人工完成, 传感器定位准确度不高, 并且容易对传感器造成损害, 今后需要研发新的更加可靠的埋设技术, 如光纤光栅传感器自动埋设技术等。

3.3 光纤光栅的稳定性和耐久性问题

大型土木工程结构的设计使用寿命一般为几十年甚至上百年, 所以光纤光栅的长期稳定性和耐久性直接影响到光纤光栅传感器在土木工程结构长期健康监测的应用。影响光纤光栅稳定性和耐久性的因素很多, 如环境温度、湿度、化学腐蚀等。人们发现光纤光栅的中心波长、折射率、反射率会随着时间和温度的变化而变化, 虽然变化量很小, 但也影响到了传感器的长期稳定性。而利用预先将光纤光栅高温加热的方法, 则可以有效地减少上述的影响, 大大提高了光纤光栅的稳定性。对于疲劳、湿度的影响, 也有学者做了相应的实验, 实验结果表明, 经过紫外线适当照射以及适当高温加热的光纤光栅具有良好的稳定性, 在温度不超过 400 °C 的环境下, 具有良好的传感性能。光纤的主要成分是石英, 在水泥的强碱性环境下容易受到腐蚀, 因此必须提高光纤保护层的抗腐蚀能力以确保传感器的耐久性。Escobar 等人经过 5 年的观察实验证明, 采用高分子材料如聚四氟乙烯涂层的光纤光栅传感器能很好的提高耐化学腐蚀的能力。今后还需进一步研究涂层的材料特性和厚度, 达到既保护光纤光栅的耐久性, 又能准确地传感外界施加的应变的目的。

3.4 光纤光栅解调技术的研究

目前限制光纤光栅传感器大量实际应用的最主要障碍就是传感信号的解调。正在研究的光纤光栅传感解调方法很多, 但是能实际应用的解调产品并不多, 而且价格昂贵。如 BlueRoad Research 推出的一种解调系统, 只能解调一个光纤光栅, 而且分辨率和精度都不高, 但它的价格就约 5 000 \$。因此要想让光纤光栅传感器走向实用化, 就必须加大力度对光纤光栅解调方法的软硬件研究, 提高精度, 降低造价。

3.5 光纤光栅复用技术的研究

光纤光栅的一个重要优点就是能够进行多路复用, 其复用技术包括波分复用、时分复用、空分复用以及这些复用技术的相互组合。只有提高光纤光栅传感器的复用能力才能真正实现对结构更大面积的准分布式监测。目前, 美国的 Micron Optics 公司新推出了可以同时四路光纤多达 256 个布拉格光栅进行质询

的解调系统, 这表明对需要成百上千个传感器的土木工程结构进行大面积的健康监测已逐步成为可能。

4 结语

桥梁在施工过程中的施工监测, 成桥后的结构状态监测和识别, 以及桥梁在长时间运营后的损伤检测、剩余寿命预测有助于从根本上消除隐患及避免灾难性事故的发生。而要实现这一目标, 必须解决的关键问题之一就是如何选择精度高、耐久性好、可进行大范围分布测量的桥梁结构状态参数测量手段。光纤光栅传感技术由于具有上述优点, 已经成为了桥梁结构健康监测的重要测试手段, 这在国内外桥梁的一些监测实例中已得到了很好的印证。随着我国经济实力的不断增强、技术的不断进步, 随着桥梁工程中新材料、新桥型、新施工工艺的逐步应用, 以光纤光栅传感技术为核心的桥梁结构健康监测系统的开发和应用将会很快在我国变成现实。

参考文献:

- [1] 张俊哲. 无损检测技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] P Friebele, et al Fiber Bragg Grating Strain Sensor: Present and Future Applications in Smart Structures [J]. Optics and Photonics News, 1998, 9: 33-37.
- [3] P M Nellen, et al Application of Fiber Optical and Resistance Strain Gauges for Long-term Surveillance of Civil Engineering Structures [C]. 1997, SPIE 3043: 77-86.
- [4] Mohamed Maalej, Anestis Karasaidis, Stavroula Pantazopoulou, et al Structural Health Monitoring of Smart Structures [J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11: 581-589.
- [5] J Meissner, et al Strain Monitoring at a Prestressed Concrete Bridge [C]. Proceeding of OSA, 12th int Conf on Optical Fiber Sensors, Williamsburg, 1997: 408-411.
- [6] S T Vohra, et al Quasi-Static Strain Monitoring During the push Phase of a Box-girder Bridge Using Bragg Grating Sensors [C]. Proceeding of European Workshop on Optical Fiber Sensors Scotland, UK, 1998.
- [7] H Storoy, J Saether. Fiber Optic Condition Monitoring During a Full Scale Destructive Bridge Test [D]. Doctoral thesis of H Storoy, Published by Norwegian University of Science and Technology.
- [8] Xu M G, Archambault J L, Reekie L, et al Discrimination between Strain and Temperature Effects Using Dual-wavelength Fiber Grating Sensors [J]. Electron Lett, 1994, 30 (13): 1085-1087.
- [9] Jans S W, Dockney M L, Tatam R P. Simultaneous Independent Temperature and Strain Measurement Using in-fiber Bragg Grating Sensors [J]. Electron Lett., 1996, 32 (12): 1133-1134.