

光纤光栅传感综合性教学实验设计

樊松涛, 刘 鑫, 杨 威*

西安电子科技大学光电工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年4月18日; 录用日期: 2025年5月15日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

本文针对光纤光栅传感实验教学中重验证, 轻应用的问题, 设计了光纤光栅传感的综合性教学实验。具体的实验内容包含了光纤光栅光谱特性测量, 光纤光栅温度传感及隧道缩尺模型火灾监测。实验设计结合了光学和计算机技术, 内容由浅到深, 由验证到应用, 难度适中, 易于教学, 学生参与度高。可有效增强学生对光纤光栅传感技术的理论理解和实验操作能力。

关键词

光纤光栅传感, 实验教学, 隧道火灾监测

Integrated Design of Fiber Bragg Grating (FBG) Sensing Pedagogical Experiments

Songtao Fan, Xin Liu, Wei Yang*

School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shanxi

Received: Apr. 18th, 2025; accepted: May 15th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

This work proposes an integrated FBG sensing pedagogical experiment to bridge the gap between verification-based training and real-world applications in current curricula. The three-stage experiment encompasses fundamental FBG spectral analysis, temperature sensing implementation, applied fire detection in tunnel environments. By synergizing photonic principles with computational methods, this progressive framework fosters active learning while developing critical competencies in optical sensing systems.

*通讯作者。

文章引用: 樊松涛, 刘鑫, 杨威. 光纤光栅传感综合性教学实验设计[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 473-479.
DOI: 10.12677/jsta.2025.133047

Keywords

Fiber Bragg Grating Sensing, Experimental Education, Tunnel Fire Monitoring

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光纤光栅传感是一种利用光纤中折射率变化产生的光栅对光波长进行调制, 以实现温度、应变等物理量变化的高精度检测的技术。相较于普通机械、电子类传感器, 光纤光栅传感具有抗电磁干扰强, 电绝缘性能好, 难腐蚀, 体积小、重量轻, 传输损耗小, 可多点分布式测量等优点, 因此, 其已被广泛应用于土木工程, 航空航天, 石油化工, 电力工业, 水利工程等领域[1]-[7]。作为一种重要的传感技术, 国内多所高校也相继开发了相关的教学实验内容。

实验教学对于深化学生对光纤光栅传感相关知识的理解, 增强实验技能具有重要作用。目前国内相关实验教学主要集中于基本原理的讲授, 辅以验证性实验内容, 而对其广泛应用涉及较少。这样, 虽然突出了光纤光栅传感的原理, 但忽视了其在现代技术中的众多应用价值, 脱离了实际, 也使得教学内容单薄枯燥。

本文基于光纤光栅传感原理, 结合现有的教学资源基础, 设计了光纤光栅传感综合实验。实验结合光学和计算机软件技术, 涵盖了温度传感、隧道火灾状态实时监测等多个实验内容, 有效解决了传统光纤光栅传感实验教学中重视理论验证而忽视实际应用的问题。通过实验教学, 学生们不仅加深了对光纤光栅传感技术相关理论的理解, 还在实践中提升了实验操作技能, 进一步拓展了他们的知识视野。

2. 实验原理

光纤光栅可以根据多种不同的标准进行分类。例如, 它们可以基于光栅周期的长度或者纤芯沿轴向的折射率分布来进行区分。在本研究中, 我们将以实验所使用的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)为对象, 详细阐述其传感机制的原理。

2.1. 光纤光栅传感原理

光纤布拉格光栅通过在光纤的特定区域内精心设计折射率的周期性变化, 形成了一种独特的光波选择性反射机制, 其结构如图 1 所示。当一束宽谱光波进入光栅时, 只有满足特定条件的波长会被反射回来, 而其他波长的光则继续透射, 不受干扰。其入射, 透射, 反射光谱分别如图 1 所示。根据光纤耦合模理论, 其反射波长由式(1)确定:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

其中, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期, λ_B 为光纤光栅的中心波长(即反射波长), 也称为布拉格波长。满足该条件的光栅为光纤布拉格光栅。

根据公式(1)可知, 光纤布拉格光栅的中心波长是由光纤纤芯的有效折射率和光栅周期共同决定的。当环境发生变化时(如温度、应变或压力等因素), 这些变化会直接影响到光纤光栅的有效折射率和周期性结构, 进而导致中心波长的相应偏移。通过精确地建立并校准光栅中心波长与待测物理量之间的对应关系, 我们能够通过监测中心波长的微小变化来准确捕捉到温度、应变或压力的细微变化。这种基于波长变化的传感机制, 是光纤光栅传感器的核心原理。

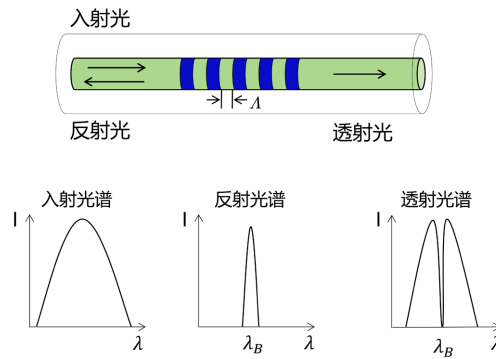


Figure 1. Bragg grating structure and reflection/transmission characteristics

图 1. 布拉格光栅结构及反射透射特性

2.2. 光纤光栅温度传感原理

对(1)式进行全微分:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{eff} + 2n_{eff}\Delta\Lambda \quad (2)$$

在(2)式中, $\Delta\lambda_B$ 表示光纤光栅中心波长的偏移量。当仅考虑温度变化对光纤光栅中心波长的影响时, Δn_{eff} 表示温度引起的热光效应对纤芯有效折射率的影响, $\Delta\Lambda$ 表示温度引起的热膨胀效应对光栅周期的影响。

热光效应引起的纤芯有效折射率 n_{eff} 变化可表示为:

$$\Delta n_{eff} = \xi \cdot n_{eff} \cdot \Delta T \quad (3)$$

在(3)式中, ξ 为光纤材料的热光系数, 它表示有效折射率随温度的变化率。 ΔT 为温度变化。

热膨胀效应引起光栅周期 Λ 的变化可表示为:

$$\Delta\Lambda = \alpha \cdot \Lambda \cdot \Delta T \quad (4)$$

在(4)式中, α 为光纤材料的热膨胀系数, 它表示光栅周期随温度的变化率。

综上, 光栅中心波长的变化量可表示为:

$$\Delta\lambda_B = K_T \Delta T \quad (5)$$

其中, $K_T = \lambda_B (\xi + \alpha)$, 为光纤布拉格光栅的温度系数。(5)式即为光纤布拉格光栅温度传感模型。通过检测光纤光栅中心波长的变化量, 即可以准确测量环境温度的变化。

3. 实验内容

基于上述光纤光栅传感原理, 结合现有软硬件设施, 本文设计了如图 2 所示, 包含 3 个环节的教学实验: 光纤光栅的光谱特性, 光纤光栅温度传感实验, 隧道火灾监测模拟实验。

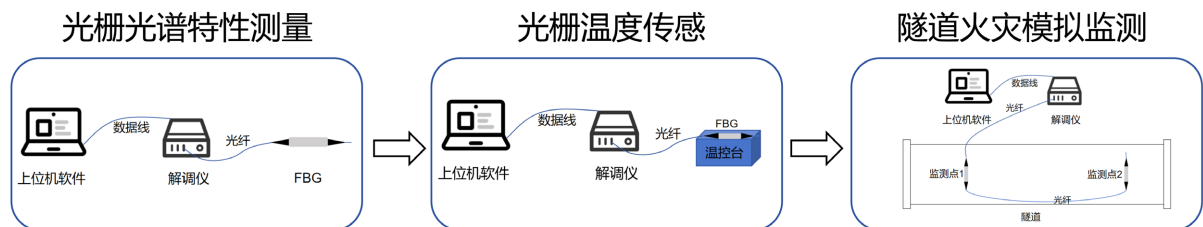


Figure 2. Operational flowchart for FBG sensing integrated pedagogical experiment

图 2. 光纤光栅传感综合实验流程图

3.1. 光纤光栅光谱特性测量

本环节的主要内容是测量光纤光栅的光谱特性,包括其反射光谱的中心波长,反射光谱带宽等信息。实验内容较为简单,旨在认识实验,了解实验过程,为后续实验环节铺垫。实验系统如图 3 所示,包含待测光栅,光纤光栅解调仪,上位机软件等。其中,光纤光栅解调仪(简称解调仪)是用于测量光纤光栅反射波长的微小变化量的设备,配合上位机软件,可实现对反射光谱,及温度、位移、压力等物理量的动态监测。学生搭建好实验系统,将解调仪通过 USB 数据线与电脑连接,将任意一个光纤光栅与解调仪连接,即可依次对其光谱特性进行测量。

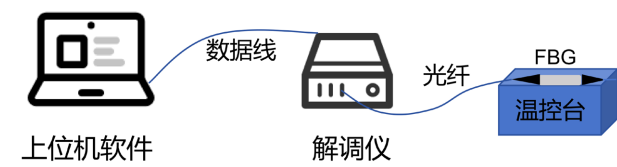


Figure 3. Reflectance spectral characteristics measurement system
图 3. 反射光谱特性测量系统

3.2. 光纤光栅温度传感实验

本环节实验的目的是标定光纤光栅中心波长的变化与温度的关系,得到光纤光栅的温度传感模型,也为后续隧道火灾监测模拟实验环节提供温度测量参考依据。

实验系统如图 4 所示,包含上位机软件,解调仪,温控台及其驱动,光纤光栅。其中,温控台用来提供稳定精确的温度环境,确保光纤温度传感的准确性。解调仪(北京杏林睿光科技有限公司, RLE-RI06)可对光纤光栅反射波长的微小偏移量进行测量。将光纤光栅固定在温控台上,控制温控台温度,从 20℃ 开始,直至 60℃ 为止,每加温 5℃,测量一次中心波长,注意每个温度点停留 5 分钟,等待温度稳定后再进行测量。测得的光纤光栅中心波长与温度场的关系曲线如图 5 所示。

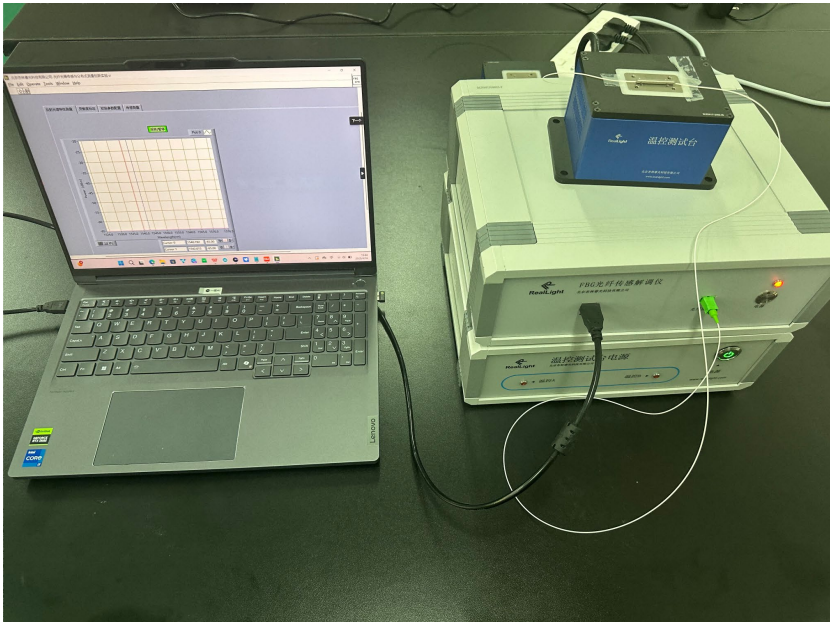


Figure 4. Temperature sensing and measurement experimental setup schematic diagram
图 4. 温度传感测量实验装置图

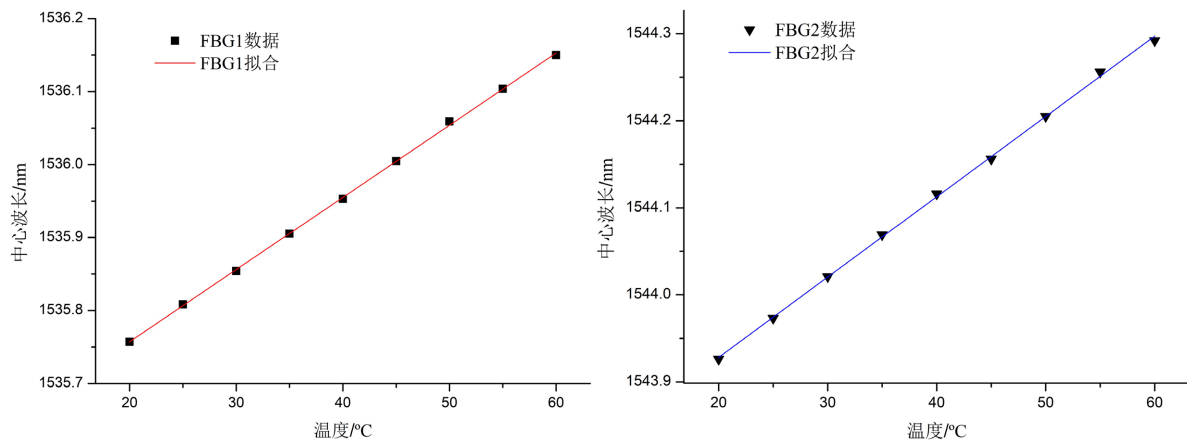


Figure 5. Temperature characteristics of fiber bragg grating
图 5. 光纤光栅温度特性

由图 4 可知，两个光纤光栅传感器 FBG1，FBG2 均具有较好的灵敏度与线性度。FBG1 的温度传感灵敏度为 $k_1 = 9.23 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。FBG2 的温度传感灵敏度为 $k_2 = 9.89 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

3.3. 隧道火灾监测模拟实验

光纤光栅传感技术在公路交通安全中发挥着重要作用，相较于传统的烟雾探测器，温度传感器等，光纤光栅传感在隧道火灾探测中具有探测范围广，抗电磁干扰性强，灵敏度高等优点，因此已被广泛应用于隧道火灾监测中[8]。在实际的火灾监测工程中，监测点和传感器的布置尤为关键，通常是由多个传感器构成一定的传感网络(如线阵，面阵等。)由于实验条件有限，因此本环节实验通过搭建隧道缩尺模型，开展隧道火灾监测模拟实验，实现对火源的快速定位。

为了能较好模拟隧道火灾情境，并且适用于教学，本实验系统结构简单，安全可靠。该实验主要由隧道缩尺模型，火源，光纤温度传感系统(解调仪，光纤光栅，上位机软件)等组成，如图 6 所示。缩尺隧道由防火铝箔板制成，长 100 cm，宽 25 cm，高 40 cm，其断面为矩形。火源采用酒精燃料，燃烧装置为直径 10 cm 的托盘(实验配有灭火器等消防措施，保证实验安全)。将光纤光栅 FBG1，FBG2 分别固定于隧道顶部 30 cm，80 cm 处，作为监测点。光纤光栅温度传感系统对这两点的光纤光栅的反射波长进行监测，如果系统监测到了波长变化，说明该点的温度发生了变化，若温度过高，说明该处发生了火情。

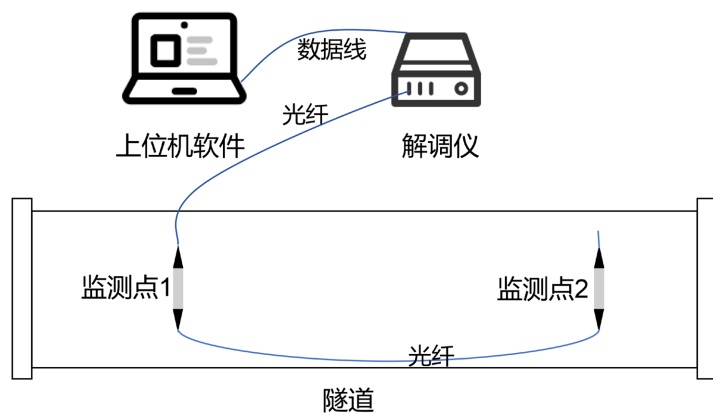


Figure 6. Simulation-Based experimental system for fire monitoring in scaled-down tunnels
图 6. 缩尺隧道火灾监测模拟实验系统

在室温 25 度, 无风状况下进行了点火实验, 通过解调仪测得的反射波长, 计算出温度测量结果。图 7 给出了起火后, 隧道 30 cm 及 80 cm 处监测点在 40 s 内监测的温度场分布曲线, 此时火源放置在隧道 30 cm 处监测点正下方。由图 6 可以看出, 30 cm 处监测点(即起火点)温度迅速上升, 并且, 每隔 10 s, 温度上升速度变快。80 cm 处监测点温度变换较小, 且变换缓慢。

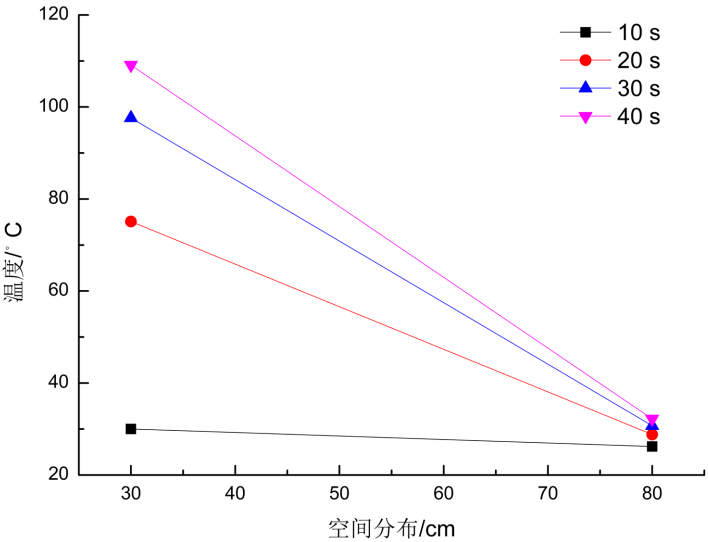


Figure 7. Temperature distribution curve after 40 seconds of tunnel ignition
图 7. 隧道点火 40 秒后, 温度分布曲线

图 8 是依次在 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm, 80 cm 处点火, 记录 40 s 后, 监测点 1 (30 cm 处)、监测点 2 (80 cm 处) 的温度分布。可以看出, 起火点正上方的温度最高。距离起火点越远, 隧道顶部温度越低。当光纤光栅与起火点间的距离在 30 cm 以内时, 温度变换较明显; 距离超过 30 cm, 温度变换放缓, 说明光纤光栅在此隧道内火灾检测的有效范围约为 30 cm。

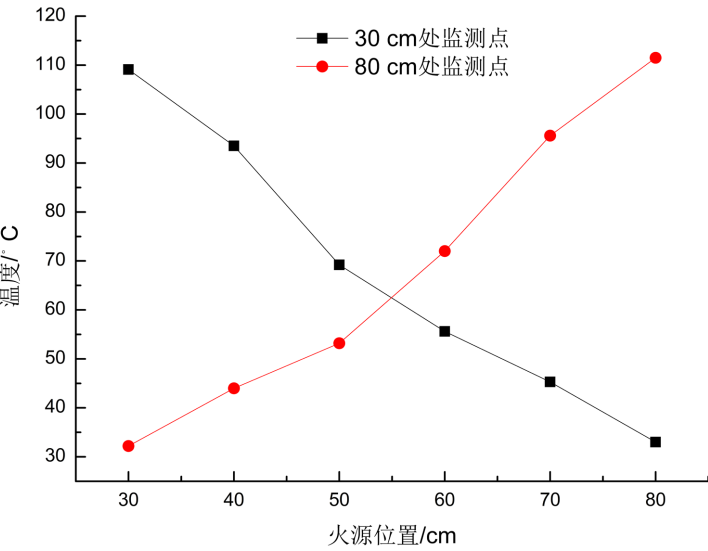


Figure 8. Temperature distribution curves at monitoring points under different ignition locations after 40 seconds of tunnel ignition
图 8. 隧道点火 40 秒后, 不同火源位置下, 监测点的温度分布曲线

4. 结语

本文设计了一套关于光纤光栅传感的综合实验, 对学生的光学实验操作, 数据处理等软硬件能力进行了综合训练。实验设计涵盖了理论验证与实际应用模拟环节, 内容由浅及深, 符合教学逻辑, 有效提升了教学效果, 锻炼了学生的综合素质, 并且, 培养了学生的创新思维, 为科研训练打下基础。后续将不断对本实验设计进行优化, 引入更多应用型实验, 如基于应力的管线安全监测实验, 油罐温度监测试验等。

致 谢

西安电子科技大学新实验开发与新实验设备研制及实验教改项目(SY21028I)对本课题予以支持, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] 巴德欣, 董永康. 分布式光纤传感技术及其在航空航天领域的应用展望[J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 730-738.
- [2] 侯公羽, 谢冰冰, 江玉生, 等. 基于 BOTDR 的光纤应变与顶板沉降变形关系的模型构建与试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1298-1304.
- [3] 陈光富, 蔡德所, 刘健夫, 等. 一种新型铁路路基沉降监测技术探讨[J]. 铁道建筑, 2011, 51(6): 90-92.
- [4] 李世念, 张旭苹, 宋宏, 等. 分布式光纤传感技术在煤矿地质监测中的应用[J]. 应用科学学报, 2020, 38(2): 215-225.
- [5] 周琰, 靳世久, 曾周末, 等. 分布式光纤管道安全检测定位技术研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 922-924.
- [6] 施斌, 顾凯, 魏广庆, 等. 地面沉降钻孔全断面分布式光纤监测技术[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 356-364.
- [7] 李成宾, 杨志, 黄春林. 光纤布里渊传感在输电线路覆冰监测中的应用[J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 37-41.
- [8] 付华, 谢森, 徐耀松, 等. 光纤布拉格光栅传感技术在隧道火灾监测中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 133-137.