



## 分布式布里渊光纤传感器的应用

### 综述

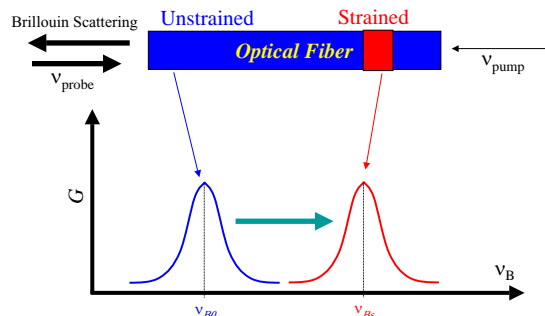
分布式布里渊光纤传感器用来测量长距离范围内的应变和温度状况，是监控大型建筑结构状态的理想工具。这类传感器利用光纤通信的巨大经济规模，在每公里成本上，提供了其他技术无可比拟的高精度大范围监控方法。

### 工作原理

在典型的大型结构监控中，使用OZ光纤传感器系统并不需要对布里渊传感器有详细的了解。当然在选择布里渊传感器解决方案时，对于测量系统的基本理解有益于促进相关性能参数的取舍。

大多数的布里渊传感器利用一种称为受激布里渊散射的现象。测量过程参见下图：

#### 布里渊传感器 — 操作原理



$$v_{BS} = v_{BO} + C_T (T - T_0) + C_\epsilon (\epsilon - \epsilon_0)$$

图1：有应力和无应力拉伸的布里渊谱峰

典型的传感器设置包括两台激光器（一台连续光，一台脉冲光）分别从同一根被测光纤的两端输入。当两台激光器的频率差与光纤的布里渊频率相同时，两个激光束在光纤内部发生强烈的相互作用并产生声子。这个相互作用把布里渊信号放大到经光时域反射型设备可以定位检测。沿光纤测量应变和温度时，需要扫描频差（拍频）绘出布里渊频谱，通过拟合该频谱以获得温度和应变信息。

图1底部的公式说明，光纤上每点的布里渊频率与该处光纤所感知的外界的温度和应变成线性关系。对于色散位移光纤（LEAF），布里渊频谱上实际存在着两个峰，这样有利于同时从一根光纤上获取温度和应变两种信息。

### 布里渊光纤传感器的成本核算

正如我们以前阐明的，布里渊光纤传感器在长距离高精度结构监控中，提供了其他测量技术无可比拟的低成本（每公里）。这直接导致了在关键的结构监控中因使用布里渊传感器而获得快速投资回报机会。下图展示了一个简单的节约成本例子：

| 光纤监测<br>OZ光学公司节约计算表 |                |           |          |          |
|---------------------|----------------|-----------|----------|----------|
| 系统参数                |                |           |          |          |
| 管线长度                | 50公里           |           |          |          |
| 失败费用                | 泄漏费用：\$750,000 |           |          |          |
| 停工费用                | 每小时：\$20,000   |           |          |          |
| 比较                  |                | 监测        | 无监测      | 评论       |
| 失败的可能性              | %/年            | 0.25%     | 1%       | 降低失败的风险  |
| 停工期                 | 小时/年           | 4.8       | 24       | 自动化预防性维护 |
| 维护费用                | 元/年            | \$25,000  | \$50,000 | 自动常规维护   |
| 全年节省                |                | \$414,625 |          | 全年节省     |

图2：上表是50公里管线节约成本估算举例

在一个典型的节约成本估算中，由于自动化的监控，最重要的因素是减少维护和检查成本，减少停工期，减少灾难性事故的可能性。在很多情况下，停工和故障造成的损失比上述例子中的高出很多。

最近发生的几起管道停运事件证明了对适时监控的需求。图 2 所作的经济性估算仅仅是针对中等规模区域性管道分配网络。对于大型的骨干管道系统，其经济性将更加明显。由于系统停止运行，每天所造成的损失很轻易地就会超过上千万。分布式布里渊传感器监测系统的费用可折算成每米 1 - 2 美元。只要能有效地避免哪怕一次被监测系统的故障停机，就远远超过了适时监测系统的所有安装和运行费用。而其它大型结构，如电力传输，大坝，桥梁等同样具有因灾难性故障或停机而造成重大损失的风险。

如果要获得节约费用的数据表，或者根据你的结构监控需要而定制的版本，请和我们联系。

## 用于结构监控的光纤传感技术比较

布里渊光纤传感器在长距离和大面积上胜人一筹。事实上，在任何长于一公里的温度和应变应用上，都应该考虑布里渊传感器。另外一个适用于定点测量的光纤传感器是光纤布拉格光栅传感器。然而，在事前不能预知结构损坏或者管道泄露位置的结构监控中，何处安装布拉格光栅传感器或应变仪是结构监控中必须面对的问题。布拉格光栅传感器或应变仪的安装地点不在结构损坏或者管道泄露位置时，结构监控也就无从谈起。当然在已知特定位置的情况下，布拉格光栅传感器是优秀的测量仪。而布里渊光纤传感器适用于更大范围、更长距离的结构监控，并且能够定位未知的故障点，这是布拉格光栅传感器所无法胜任的。

有两种类型的布里渊光纤传感器。布里渊光时域反射仪 (BOTDR) 基于单一脉冲的布里渊反射求解应变和温度。布里渊光时域分析仪 (BOTDA) 利用一种更复杂的称为受激布里渊反射的现象。

因为通过两个反向传输的光束来增强布里渊散射，BOTDA 技术显然更为强大有力。由于信号强度大，应变和温度的测量更为精确。另外在 LEAF 光纤中产生的两个布里渊峰，有助于同时提供温度和应变信息。

BOTDA 方法要求更多的光学部件和双向光路，造成总的系统成本通常略高（感应光纤必须形成回路或者安装反射镜）。然而，因为适度增加的成本带来了显著的测量精度的提高，BOTDA 还是目前应用最为广泛的实用系统。

表 1 提供了常用的光纤应力和温度传感技术的比较，以及每种类型的典型性能限度。

|         | 布拉格光栅           | 布里渊光时域反射仪        | 布里渊光时域分析仪        |
|---------|-----------------|------------------|------------------|
| 应力解析度   | 1 $\mu\epsilon$ | 3 $\mu\epsilon$  | 6 $\mu\epsilon$  |
| 应力精度    | 1 $\mu\epsilon$ | 30 $\mu\epsilon$ | 20 $\mu\epsilon$ |
| 距离      | 0.1 米           | 1 米              | 0.1 米            |
| 长度范围    | 点传感             | 80 公里            | 80 公里            |
| 采集时间    | 10 秒            | 0-20 分钟          | 0-20 分钟传感点       |
| 光纤类型    | 许多光纤            | 单一光纤             | 环状               |
| 温度准确性   | 0.4 度           | N/A              | 0.5 度            |
| 温度和应力   | 多个光纤            | 多个光纤             | 单一光纤             |
| 分布式     | 否               | 是                | 是                |
| 准分布多模光纤 |                 |                  |                  |

表 1：光纤传感器典型特征

使用色散位移 LEAF 光纤，可以同时测量温度和应变。如同单模光纤 (SMF)，LEAF 光纤在高速光纤通信中广泛使用价格便宜。在结构监控项目中，尽早确定光纤类型非常重要。虽然测试设备可以在后来改动或者升级，但是如果要求同时测量温度和应力，安装正确的光纤类型是最基本的要求。

O Z 光学公司正在与主要的大学研究机构合作把新技术带入市场，通过提高性能和降低成本来拓展布里渊光纤传感器的市场。如果想知道这些技术会给您带来何种好处，请与我们联系。

## 布里渊光纤传感器的主要应用

布里渊光纤传感器已经有为数众多的应用。如前所述，运用布里渊散射机理的传感器系统，在高精度大范围的应用中有着无可比拟的优势。与其他传感器技术不同，布里渊光纤传感器系统直接利用了安装在世界各地的数以百万计的通信光纤的经济规模。如下表 2 所揭示的，布里渊光纤传感器最广泛的应用，确实是在大规模的线性或者空间尺度上。

| 应用                | 应力 | 温度 | 根据 OZ 光学公司的合作者的要求可提供参考资料 |
|-------------------|----|----|--------------------------|
| 桥梁监测              | ■  | ■  | ■                        |
| 管道监测              | ■  | ■  | ■                        |
| 过程控制              | ■  | ■  | ■                        |
| 结构健康监测 (混凝土及复合结构) | ■  |    | ■                        |
| 安全网               | ■  |    |                          |
| 电线                | ■  |    |                          |
| 火灾探测              | ■  | ■  | ■                        |

表 2：布里渊光纤传感器的应用

O Z 光学公司致力于在上述每个市场中提供解决方案。如果列表中没有涵盖你的监控应用，请告知你的要求。要得到与你的应用有关的更详细的信息或者要求参考文献，请点击[这里](#)。

## 参考文献

- X. Zeng, X. Bao, C. Chhoa, T. Bremner, A. Brown, M. DeMerchant, G. Ferrier, A. Kalamkarov, and A. Georgiades**, "Strain measurement in a concrete beam by use of the Brillouin-scattering-based fiber sensor with single-mode fibers embedded in glass fiber reinforced polymer rods and bonded to steel reinforcing bars," *Applied Optics* 41, 5106-5114 (2002).
- L. Zou, X. Bao, F. Ravet, and L. Chen**, "Distributed Brillouin fiber sensor for detecting pipeline buckling in an energy pipe under internal pressure," *Applied Optics* 45, 3372-3377 (2006).
- L. Zou, G. Ferrier, S. Afshar, Q. Yu, L. Chen, and X. Bao**, "Distributed Brillouin scattering sensor for discrimination of wall-thinning defects in steel pipe under internal pressure," *Applied Optics* 43, 1583-1588 (2004).
- M. DeMerchant, A. Brown, X. Bao, and T. Bremner**, "Structural monitoring by use of a Brillouin distributed sensor," *Applied Optics* 38, 2755-2759 (1999).
- J. Smith, A. Brown, M. DeMerchant, and X. Bao**, "Simultaneous distributed strain and temperature measurement," *Applied Optics* 38, 3372-3377 (1999).
- X. Zeng, X. Bao, Q. Yu, G. Ferrier, R. Steffen and M. Bowman**, "Load Test of the Distributed Rollinsford Bridge Using the Distributed Brillouin Sensor," 1st International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, 265-274 (2002).
- X. Bao, J. Bhliwayo, N. Heron, D. Webb, and D. Jackson**, "Experimental and Theoretical Studies on a Distributed Temperature Sensor Based on Brillouin Scattering," *Journal of Lightwave Technology* 13, 1340-1348 (1995).
- X. Bao, M. DeMerchant, A. Brown, and T. Bremner**, "Tensile and Compressive Strain Measurement in the Lab and Field With the Distributed Brillouin Scattering Sensor," *Journal of Lightwave Technology* 19, 1698-1704 (2001).
- X. Bao, C. Huang, X. Zeng, A. Arcand, and P. Sullivan**, "Simultaneous strain and temperature monitoring of the composite cure with a Brillouin-scattering-based distributed sensor," *Optical Engineering* 41, 1496-1501 (2002).
- F. Ravet, L. Zou, X. Bao, L. Chen, R. Huang, and H. Khoo**, "Detection of buckling in steel pipeline and column by the distributed Brillouin sensor," *Optical Fiber Technology* (2006).
- L. Zou, X. Bao, Y. Wan and L. Chen**, "Coherent probe-pump-based Brillouin sensor for centimeter-crack detection," *Optics Letters* 30, 370-372 (2005).
- X. Bao, D. Webb, and D. Jackson**, "Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber", *Optics Letters* 19, 141-143 (1994).
- X. Zeng, Q. Yu, G. Ferrier, X. Bao**, "Strain measurement of the load test on the Rollinsford bridge using distributed Brillouin sensors", 1st International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, September 19-20 (2002), Winnipeg, Canada. page 265-274.
- X. Zeng, Q. Yu, G. Ferrier, X. Bao**, "Strain and temperature monitoring of a concrete structure of nuclear reactor using a distributed Brillouin sensor", 1st International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, September 19-20 (2002), Winnipeg, Canada. pp.207-216.
- G. A. Ferrier, X. Bao, L. Zou, L.Chen, and Z. Liu**, " Distributed Brillouin temperature spectra measurement without frequency scanning for dynamic process monitoring", Smart Structures/NDE Joint Conference, SPIE 2004, Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials and Composites III, San Diego, California USA. V.5393-10.