



OZ Optics

shop.ozoptics.com
www.ozoptics.com

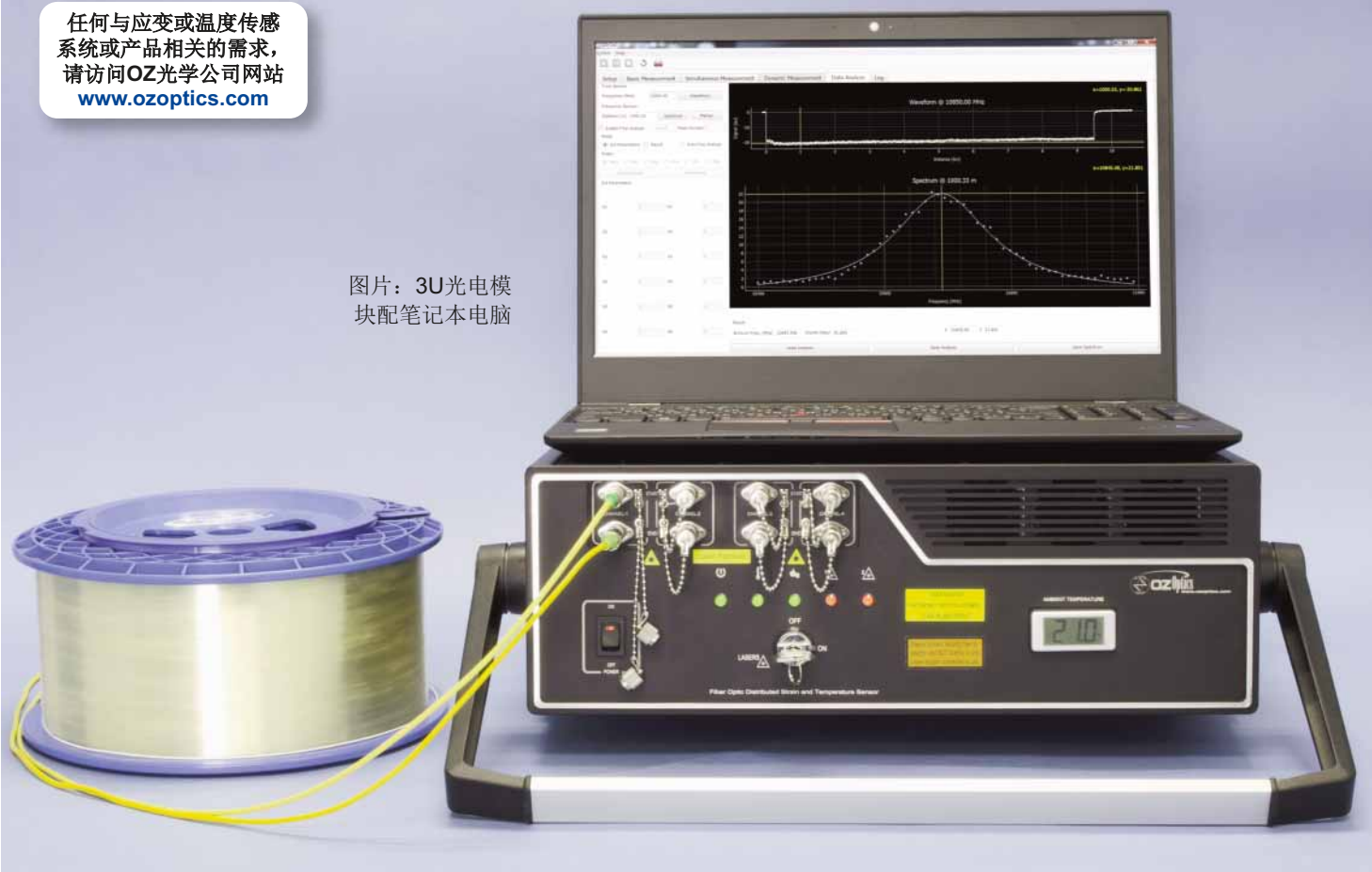
219 Westbrook Road
Ottawa, ON, Canada, K0A 1L0

Toll free: 1-800-361-5415
Telephone: 1-613-831-0981
Fax: 1-613-836-5089
sales@ozoptics.com

光纤分布式应变和温度传感器 (DSTS) BOTDA机型

任何与应变或温度传感系统或产品相关的需求，请访问OZ光学公司网站
www.ozoptics.com

图片：3U光电模块配笔记本电脑



特性

- 使用标准通信单模光纤，可同时测量应变和/或温度
- 实时监测应变和/或温度
- 高空间分辨率和极高的应变以及温度分辨率和精度
- 提供动态链接库(DLL)支持二次开发

性能表现

- 最佳0.1米空间分辨率
- 最大100公里传感长度，最大160公里光纤长度

产品介绍

运用光纤中的布里渊散射现象，OZ光学公司提供了精湛的ForeSight™系列分布式传感器系统用于测量光纤的应变和温度变化。安装含有标准通信单模光纤的传感光缆后，用户可以发现何时、何地待测物体的应变或温度发生了改变，并能够在故障发生前及时应对。

DSTS提供独有的功能，可实现同时测量应变和温度变化，或单独测量应变或温度。

石化行业应用



油气管线泄漏监测

- 管道泄漏监测
- 单通道最大100公里监测长度
- 高空间分辨率实现了对超长距离监测对象的分布式（局部）监测
- 较短的响应时间



油气井监测

- 油气井完整性监测
- 当使用恰当的传感光缆并安装后，实现油气井温度、应变和压力监测
- 对高浓度氢造成的光纤衰减变化不敏感



反应塔生产效率监测

- 利用分布式温度数据提高反应塔生产效率
- 在保证安全等级前提下缩短停产时间
- 可使用通用的通信单模光纤（缆）

土木工程应用



大坝监测

- 大坝等水工建筑内部温度监测
- 可用于裂缝、沉降、变形和渗流监测
- 单通道最大100公里监测长度



结构健康监测

- 沉降监测
- 应变和裂缝监测
- 单通道最大100公里监测长度
- 高空间分辨率实现了对超长距离监测对象的分布式（局部）监测

土木工程应用（续）



地质灾害监测

- 监测滑坡，堤坝、地表和高速公路的沉降和变形
- 可以监测地表移动趋势
- 单通道最大100公里监测长度



高速公路安全监测

- 当使用恰当的传感光缆并安装后，实现高速公路内部温度、应变监测
- 高速公路沉降监测
- 单通道最大100公里监测长度

电力行业应用



电力架空线监测

- 雷击监测、覆冰监测和断股监测
- 单通道最大100公里监测长度
- 光纤线路上无需额外器件
- 安装简单



海底电缆监测

- 缆线寿命范围内长期质量、状态监测
- 光纤线路上无需额外器件



光缆质量检测

- 比OTDR对应变更加敏感
- 先进技术提供更好的品管
- 可用于检测电缆、OPGW等具有光纤单元的缆线质量



周界安全监测

- 快速、动态测量
- 高精度事件点定位
- 可与视频监测系统联动



超低温温度传感

- 可监测温度最低达25K（取决于光纤光缆材质）
- 可使用通用的通信单模光纤（缆）
- 单通道最大100公里监测长度
- 高空间分辨率下实现高精度和精度



建筑物火灾报警

- 高速、动态和精确的温度监测
- 单通道最大100公里监测长度
- 可使用通用的通信单模光纤（缆）

技术参数

参数		技术指标			
空间分辨率		1米到50米	0.5米到50米	0.1米到50米	
动态范围		30 dB	30 dB	25 dB	
通道数		2~25 ¹			
配置		标准配置为BOTDA回路系统, BOTDA/BOTDR combo系统可选			
最大可连接光纤长度		160公里			
监测范围		100公里			
空间定位精度		低至5厘米			
采样点间隔		低至5厘米			
温度监测范围		-270°C到+2100°C (取决于传感光纤光缆材质)			
应变监测范围		-3% (压缩) 到+4% (拉伸) (取决于传感光纤光缆材质)			
性能表现	温度分辨率	0.005°C ²			
	温度测量精度 (2σ)	±0.1°C (在BOTDA完整传感长度内有效)			
	应变分辨率	0.1με ²			
	应变测量精度 (2σ)	±2με (在BOTDA完整传感长度内有效)			
	测量时间 (全扫描)	低至1秒			
	平均次数	1到60,000次扫描			
	故障点监测	测量时间	1毫秒		
		测量范围 (回路)	100公里		
	同时测量应变和温度 (采样专利光缆设计)	温度分辨率	0.005°C ²		
		温度测量精度 (2σ)	±0.1°C (在 BOTDA 完整传感长度内有效)		
		应变分辨率	0.1με ²		
		应变测量精度 (2σ)	±2με (在 BOTDA 完整传感长度内有效)		
	监测范围	50公里			
测量参数	应变和/或温度, 布里渊频谱				
通用规格	通信接口	以太网、USB			
	输出信号	可通过 TCP/IP、SPST、SSR 继电器 (选项) 实现软件报警			
	数据存储	内置硬盘 (128GB 或更大)			
	数据格式	数据库, 文本文件, MS 制表和位图			
	光纤连接	FC/APC ³			
	工作波长	1550 纳米波段			
	工作温度	0°C 到 40°C, 湿度小于 85%, 无凝霜			
	电源	115或230VAC; 50-60Hz; 最大300W			
	尺寸 (长×宽×高)	3U光电模块	390×344×133mm (不包括计算机部分) ⁴		
重量	3U光电模块	< 12公斤 (不包括计算机部分)			
测量功能	测量模式	现场或远程, 手动或自动测量			
	数据分析	测量分析, 可选基线进行多种比较, 测量趋势, 图形			
	预警	自动触发报警, 可自行配置报警 (阈值、梯度等)			
	远程操作	可通过TCP/IP远程控制, 配置和维护			
	实时监测	通过自动恢复和连续自检保证24小时×7天连续运转			

¹ 内置2通道或4通道。额外通道通过外置光开关实现。

² 此值是根据激光差频不确定度5kHz以及光纤的温度和应变系数估算而得。

³ 法兰与跳线类型可更换以适应不同光纤接口。

⁴ 外观尺寸不包括可携把手。通气口外部必须敞开不被遮挡。

相关产品

光纤传感器探头、组件、封装和培训

OZ光学公司提供完整的光纤传感器探头、组件、封装和培训服务。自从1985年以来，OZ光学公司的标准光纤产品已被广泛地应用于高性能传感器和通信产品中。OZ光学公司也提供特殊的光纤传感器探头，客户也可定制在高温和其它恶劣及腐蚀环境下使用的光纤光缆。在结构和油气管道监测方面有经验的系统集成商将会发现OZ光学公司提供了一整套安装和维护光纤系统的极佳产品和服务。如果你正在筹划油气管线或结构监测项目，请接洽OZ光学公司以便了解更多的光纤解决方案。

任何与应变或温度传感系统或产品相关的需求，请访问OZ光学公司网站 www.ozoptics.com。

订货信息

产品型号：

DSTS-CT CO I-SR-MSR-AS-BOTDA-X-CH

CT = DSTS光电模块机箱类型
3U = 3U机箱

CO = 电脑类型
L = 笔记本 (必须配合3U光电模块)
R1U = 1U电脑
X = 用户提供电脑

I = 数据采集卡和电脑接口
T = 雷电 (Thunderbolt)
(必须配合3U光电模块)
S = 标准接口

SR = 空间分辨率 (米)¹
0.1/10
0.1/50
0.5/10
0.5/50
1/10
1/50

CH = 内置通道数
2CH = 内置2通道
4CH = 内置4通道

X = 光纤接口
3A = FC/APC

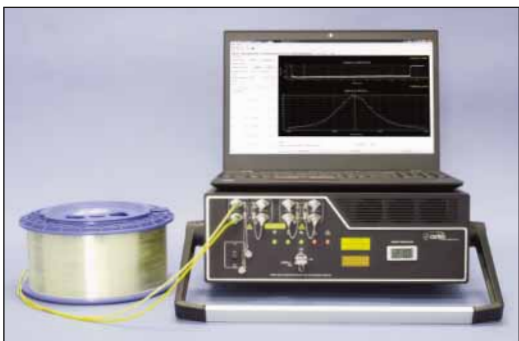
AS = 采集速度³
N = 标准
H = 高速

MSR = 最大传感距离(km)^{1,2}
60
1/60
5/60
100
1/100
5/100

如果选用野外机型，可以使用F代替光电模块机箱、电脑类型和接口类型。野外机型包括了内置电脑、显示器、键盘和鼠标。

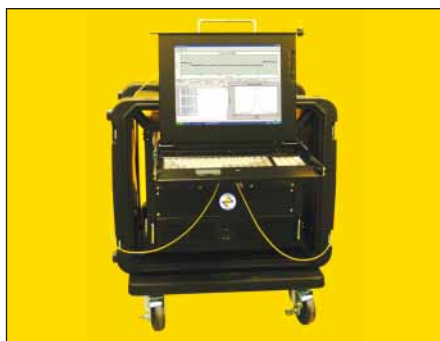
注意：

1. 每台DSTS都可以设定进行短距离测量、长距离测量或两者兼顾。在采购时，请明确该项要求。空间分辨率指在最高分辨率情况下的最大光纤长度。如果DSTS配置可以同时进行长距离和短距离测量，空间分辨率和最大传感距离数值分别对应最佳空间分辨率条件下最大光纤长度以及最大传感距离条件下最好空间分辨率。比如，如果要求DSTS在0.1米空间分辨率下测量1km光纤，并可以使用50m空间分辨率实现100km光纤监测。那么这款产品的空间分辨率项编码为0.1/50，在最大测量距离项编码为1/100。
2. 对长距离测量要求，最大测量距离设定为60km或100km。如果选择0.1m空间分辨率，那么相应的最大测量距离选择1km（短距离测量）。最大传感距离选项为60、1/60、5/60、100、1/100和5/100。
3. 采集速度选项为标准速度和高速。N和H分别对应标准速度和高速。高速设备的典型数据采样时间约比标准速度设备快两倍。



3U光电模块配笔记本电脑

3U机型标配可拆卸把手，可选配19英寸机架固定件，方便安装在标准机架上。



野外机型

客户可选野外机型。请与OZ联系获取更多相关信息。

可选配件

编码	产品型号	产品描述
48298	DSTS-TRAVEL-CASE-1U/3U	DSTS金属携带箱。包括滑轮和拉杆。可以通过机场安检。外观尺寸约603×572×381mm)。
48979	CI-1100-A2	手持式光纤端面视频检测仪。包括3.5寸液晶显示屏和摄像探头、稳压电源和可充电电池组。还包括一个SC/FC-PC母连接器，一个LC/PC母连接器，一个混合型2.5mmFC/PC公连接器和一个混合型1.25mmFC/PC公连接器。
48980	CI-1100-A2-PT2-FS/APC/F	配合CI-1100-A2使用的针对SC和FC APC母连接器的端头。
48981	CI-1100-A2-PT2-E2K/APC/F	配合CI-1100-A2使用的E2000 APC母连接器。
36939	HUXCLEANER-2.5	FC、SC和ST类型接口的光纤清洁工具。
5336	Fiber-Connector-Cleaner-SA	抛弃式光纤端面清洁工具。
8122	SMJ-3A3A-1300/1550-9/125-3-1	1米长光纤跳线。3mm外径、工作波长1300/1550nm，内径9/125 μm，康宁SMF 28e光纤，两端为FC/APC接头。
40536	SMJ-3AEA-1300/1550-9/125-3-1	1米长光纤跳线。3mmPVC护套、工作波长1300/1550nm，内径9/125 μm，康宁SMF 28e光纤，一端为FC/APC接头，另一端为E2000接头。
11	PMP-03	FC/APC光纤保偏适配器。
19711	AA-200-11-9/125-3A3A	混合连接器。一端为FC/APC公端头，另一端为FC/APC母端头。适合单模9/125光纤。
58975	DSTS-3U-19IN-RACK-MOUNT-KIT	用于3U光电模块的19英寸机架固定件。

软件界面

如果需要自行开发基于DSTS的应变和/或温度监测系统，OZ提供动态链接库（DLL）实现对DSTS的完全控制。请接洽OZ光学公司以了解更多信息。

光纤连接

当将端面磨损的光纤与传感器连接后，客户将会遇上麻烦。与之连接的端面将可能损坏，并造成系统性能劣化。这将需要额外的维护支出。为此，在传感光纤和DSTS之间请始终使用一根缓冲跳线进行连接。所有传感光纤都与这根跳线连接，而不是与设备直接连接。并尽可能不要断开这根跳线与设备之间的连接。仅仅在这根跳线已经损坏或必须脱开的情况下，才将这根跳线与DSTS断开。坚持这个做法可以帮助客户避免客户绝大部分的麻烦。

此外，连接器等在使用前都必须清洁。请注意如果DSTS前面板上的连接器表面磨损，是不包含的保修条款中的。每台DSTS都配有缓冲跳线或连接器。额外的跳线或连接器需要单独采购。OZ提供与任何光纤接口类型适配的光纤跳线。请与OZ Optics联系。

问卷调查

1. 请简要描述您的应用
2. 需要BOTDA (光纤两端均需与设备连接) 或BOTDR (仅需要光端与设备连接) 或一台同时具有BOTDA和BOTDR功能的COMBO设备?
3. 对温度测量的分辨率和精度要求是多少?
分辨率
精度
4. 您的应用中，温度最高和最低预期会达到什么值?
5. 对应变测量的分辨率和精度要求是多少?
分辨率
精度
6. 您的应用中，应变最大和最小预期会达到什么值?
7. 您的应用中，被测物体或光纤估计有多长?
8. 理想的空间分辨率是多少?
9. 仅仅需要测量温度或应变，还是需要同时测量?
10. 理想的单次采样时间是多少?
11. 是否需要光纤（光缆）定标服务、系统设计或其他项目咨询服务?
12. 设备安装环境是什么?
13. 其他相关内容

请将您的需求发邮件到sales@ozoptics.com，我们将根据您的介绍推荐匹配的机型。

光纤分布式应变和温度传感的应用

综述

光纤分布式应变和温度传感技术可测量长距离的应变和温度分布，是监测各类大型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长范围监控方法。在油气管线、桥梁、大坝、电力线的监测、以及边境安全监控等诸多应用方面。分布式应变和温度传感技术提供了清晰的成本和技术优势，它同时也是大型结构中侵蚀监测的理想工具。

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以及传感器系统的选择。

OZ光学公司的光纤分布式应变和温度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：

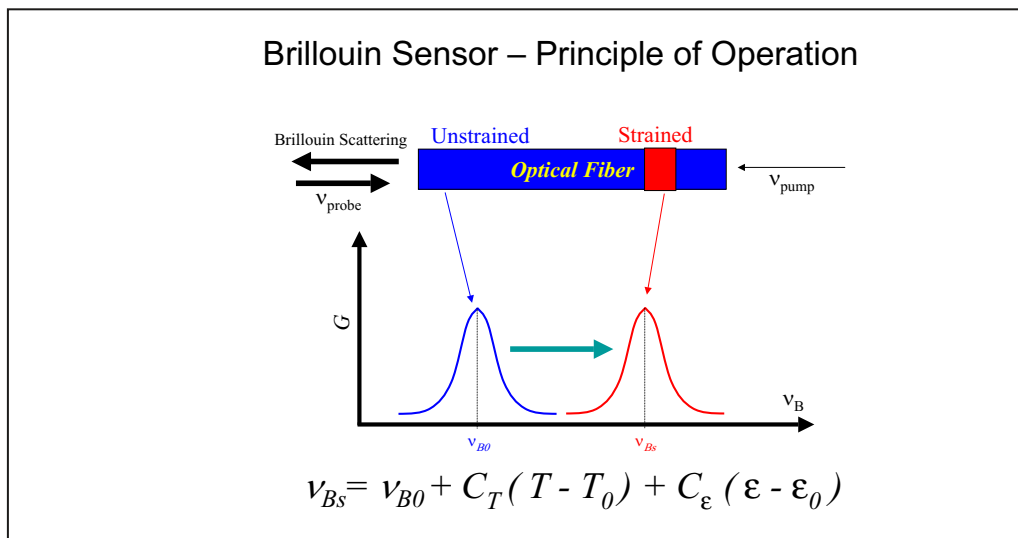


图1：有应变和无应变布里渊频谱

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，两束激光在光纤内部发生强相互作用并增强光纤中已产生的声波（声子），使得布里渊信号容易定位检测。沿光纤测量应变和温度时，通常需要扫描频差（拍频）绘出布里渊频谱，通过分析该频谱以获得应变和温度信息。

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，布里渊频谱中存在着两个峰，这样有可能从一根光纤上同时获取应变和温度两种信息。如果使用本公司的传感器系统以及专利申请中的传感光纤，则易于同时精准测量应变和温度，该光纤也同时可用于通信

用于结构健康监测的光纤传感技术比较

布里渊传感器在长距离和大范围监测项目上有天然的优势。事实上，只要监测长度超过10米的应变或温度传感应用就应认真考虑采用布里渊传感技术。

布拉格光纤光栅（FBG）传感器是目前光纤传感市场上比较多应用的技术，它非常适合各类点式测量。然而，针对结构健康监测，当前在的破坏或劣化位置未知的情况下，预先安装FBG或其他点式传感器就显得相当困难。FBG适合与那些已知薄弱点的点式测量。而分布式布里渊传感器则是和更大距离和范围下事件点未知下的监测应用。

布里渊光纤传感器一般分为两种类型：布里渊光时域反射仪（BOTDR）和布里渊光时域分析仪（BOTDA）。前者是基于单一脉冲的布里渊散射而获取应变或者温度信息；后者是利用一种更为复杂的称为受激布里渊散射现象而求解应变或者温度或者同时求解二者。

对于斯托克斯散射（包括布里渊散射和拉曼散射）由于只有非常微弱的一部分光子（约为1/10³）发生散射，并散射频率低于入射光频率。这样单一脉冲的布里渊散射光能量至多达到入射光的1/10³。对于布里渊传感器而言，这个反射光是非常微弱的。再考虑到光纤衰减，比如0.22dB/km，BOTDR的测量距离受到极大限制，信噪比也要较BOTDA差很多。BOTDR唯一的优势在于它是单端监测模式。

由于布里渊光时域分析仪（BOTDA）采用两个反向传输的光束来增强布里渊散射，因而它的信号强度大，应变和温度的测量更为精确，测量范围更大。此外，我们持有的专利技术还提供了同时实现应变和温度测量的方法。

当然，BOTDA技术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。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。

OZ Optics的Foresight™系列DSTS提供BOTDA、BOTDR和BOTDA/BOTDR三种不同设备类型客户可以根据不同项目需求选择合适的设备类型。表1提供了常用的光纤应变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	Foresight™系列传感器系统
应变测量精度	±1με	±30με	±2με
空间分辨率	0.1米	1米	0.1米
长度范围	点式传感器	30公里	100公里
采集时间	10秒	3~20分钟	低至1秒
光纤类型	许多光纤	单路光纤	环路
温度测量精度	±0.4度	N/A	±0.1度
温度和应变同时测量	多根光纤	多路光纤	单路或回路光纤
分布式	否	是	是
*准分布式光纤传感技术			

表1：分布式和准分布式光纤传感设备典型性能对比

使用我们专利技术，可以实现对应变和温度的同时测量。大量使用的标准通信单模光纤价格低廉。在结构健康监测项目中，对于正确的光纤光缆设计和选型是非常重要的环节。虽然调制设备可以替换或升级，但如果需要同时进行应变和温度测量，必须认真考虑选择正确的光纤光缆以及合适的进行安装。

光纤分布式应变和温度传感器的主要应用

光纤分布式应变和温度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，光纤分布式应变和温度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，光纤分布式应变和温度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	应变	温度	可提供参考资料
管道泄漏监测	√	√	√
电力线监测	√	√	√
过程控制	√	√	√
结构健康监测（混凝土及复合结构）	√		√
桥梁监测	√	√	√
火灾报警	√	√	√
裂纹监测	√		√
周界报警	√		

表2：光纤分布式应变和温度传感器的应用

OZ Optics可以向客户提供如上表指出的各行业的解决方案。如果客户特殊的应用需求没有被罗列，请与我们联系并详细介绍你的需求。如果需要详细信息，请与我们联系。

传感光缆可以在多种工况下铺设，覆盖很大的范围和很长的距离。比如：一条采矿输送带可能有十几公里长，将矿石送达去除残渣车间。设备和物品价值都不高。采用传统监测手段则很难对整个输送带进行温度监测。但由于工作时可能的异物造成的摩擦生热，进而可能导致火灾。DSTS和传感光缆可以简单的安装铺设实现温度监测。这样做最大化减小了火灾的直接损失，也避免了由此带来关闭矿厂造成的巨大损失。

典型性能列表

分布式布里渊传感有四个量化参数设置：测量准确度、应变或温度漂移、空间分辨率和光纤长度。这四个参数共同确定了测量时间。反过来说，如果测量时间被限定，这几个参数也受到限制。

下面，将提供基于布里渊原理的ForeSight™ DSTS对这四个参数更多的介绍和参考数据。比如，混凝土裂缝监测可能需要较高的空间分辨率和精度，那么可以相应的预计需要的测量时间和可用的最大测量光纤长度。

DSTS测量时间从1秒到10分钟不等，取决于应用需求。下面的表格提供了部分在常用精度要求：优于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 和 $\pm 10\mu\epsilon$ 下的数据指标。所有测量时间均小于1分40秒。

这个表格并不能完全反映设备可以达到的优异性能。四个参数进行微调可以得到更好的结果。比如，对50km长度光纤的温度/应变测量，2米空间分辨率下，可以实现精度 $0.2^\circ\text{C}/4\mu\epsilon$ ，但是需要延长测量时间到3分45秒。另外一个例子是：对100km长光纤，6米空间分辨率可以达到 $0.4^\circ\text{C}/8\mu\epsilon$ ，但是需要延长测量时间到4分38秒，而同样的100km光纤，精度达到 $0.1^\circ\text{C}/2\mu\epsilon$ ，可以通过增加空间分辨率到50m，而时间则可以缩短到3分48秒。

	10 cm	50 cm	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	10 m	20 m	50 m
<=1 km	0.3 °C/6 με	0.2 °C/4 με								
<=2 km		0.3 °C/6 με	0.1 °C/2 με							
<=4 km		0.4 °C/8 με	0.3 °C/6 με							
<=10 km			0.3 °C/6 με							
<=20 km			0.4 °C/8 με	0.06 °C/1.2 με						
<=30 km				0.2 °C/4 με						
<=40 km				0.3 °C/6 με	0.1 °C/2 με	0.2 °C/4 με				
<=50 km					0.2 °C/4 με	0.3 °C/6 με	0.2 °C/4 με	0.1 °C/2 με		
<=60 km								0.2 °C/4 με		
<=70 km								0.3 °C/6 με		
<=80 km									0.2 °C/4 με	
<=90 km									0.4 °C/8 με	
<=100 km									0.4 °C/8 με	0.2 °C/4 με

表3：不同光纤长度和空间分辨率下典型测量精度（所有采样时间小于100秒）

火灾报警模式

DSTS可以用于火灾报警系统。分布式的温度传感对火灾报警有极佳的适应性。传感光缆本质安全，不会有爆炸或电击危险。如果光缆设计合理，还可以应用于高辐射环境下。空间分辨率则取决于光纤长度。对20km光纤长度，可以达到1m的空间分辨率。更短的光纤长度则可以使用更小的空间分辨率。同样的，增加光纤长度则需要增大空间分辨率。在火灾报警模式下，DSTS可以达到或超过如下表显示的性能。

起始温度 (°C)	系统目标温度 (°C)	加热炉设定温度 (°C)	测量时间 (秒)	测量精度 (°C)
24	30	30	9	28-32
24	40	40	11	38-42
24	50	50	13	48-52
24	60	60	14	58-62
24	70	70	16	68-72
24	80	80	18	78-82

表4：火灾报警模式典型温度测量性能

上表测量结果基于如下参数设定：

- 光纤总长60km
- 空间分辨率：6m
- 在温度上升前，在环境温度24°C下采集基准数据
- 测量时间不包括光缆的响应时间（温度传导时间）
- 所有光纤均为同一类型光纤。光缆均为松套管

光纤分布式应变和温度传感器的成本核算

正如我们以前阐明的，光纤分布式应变和温度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
OZ光学公司费用节省计算表

系统参数				
管线长度		50公里		
故障直接损失		\$750,000	泄漏费用	
停工期间费用		\$20,000	每小时	

比较		有监测	无监测	评论
失败概率	%/年	0.25%	1%	降低失败的风险
停工期间	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

表5：费用节省案例

最近发生的几起管道停运事件证明了对适时监控的需求。表5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。只要能有效地避免那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，如电力输电网，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。

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，减少停工期间，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。

参考文献

油气管道腐蚀检测：

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).

油气管道屈曲检测：

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).

电力线监测

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).

裂纹检测：

L. Zou and Maria Q. Feng, "Detection of micrometer crack by Brillouin-scattering-based distributed strain and temperature sensor," 9th International Conference on Optical Fiber Sensors, Perth (Australia, 14–18 April 2008).

BOTDA技术精度：

L. Zou, X. Bao, S. Yang, L. Chen, and F. Ravet, "Effect of Brillouin slow light on distributed Brillouin fiber sensors", *Optics Letters* 31, 2698–2700 (2006).

应变和温度同时测量：

L. Zou, X. Bao, S. Afshar V., and L. Chen, "Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber", *Optics Letters* 29, 1485–1487 (2004).