

## 在架空输电线环境荷载监测中的应用



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

架空输电线的荷载主要来自于当地的环境荷载。这种荷载主要基于统计分析，与地理位置和地形状况有关。冰荷载和温度对架空输电线的影 响主要发生在极地和 高纬度地区。这些荷载可被视为静荷载。另外，输电线上会出现几种带来潜在危险的振动。主要为：

1. 风振动。主要由微风引起的蜗旋脱落造成。这个现象几乎在每条输电线上都存在。这种垂直振荡特征是幅度小(相对输电线)，频率范围大(3-120Hz)，主要与风速、输电线直径以及输电塔跨距相关。这种振动可能导致悬垂线夹的脱落以及损伤附着在输电线上的航空器警告球。
2. 输电线舞动。在中等强度的风作用下，凝结在输电线上的冰呈非稳定气动特征，此时会导致输电线的舞动现象。这种现象具有低频、幅度大的特点。严重情况下输电线之间会发生相互接触，产生电火花以至于导致短路、线路瘫痪。
3. 尾流或次跨振荡。在某些地域的导线束在中等强度的风作用下会发生这种现象。
4. 紊流抖振。强风作用下输电线发生低频、垂直方向的振荡。

尽管在输电线路的设计和施工中考虑到了环境荷载作用，尽可能消除环境荷载影响，但在某些危险地域仍然需要对输电线路进行远距离实时监测。现有的用于架空输电线监测传感器主要有加速度传感器和应变片等电类传感器。电类传感器易受到高压电磁环境的干扰，而且需要供电，不利于偏远地区的输电线路监测。

由于光纤光栅具有本质不受电磁干扰、信号传输距离长、体积小、安装方便等优点，成为了架空输电线监测的理想传感元件。对架空输电线路安装了光纤光栅传感器，进行了实时监测。

## 监测背景

### 1. 监测地点

所监测的架空输电线路跨度为 160m、输电压为 60kV，具有 6 根独立导线(并排 3 列)。该输电线位于挪威的 Trondheim，海拔约 200m。导线由 7 根 2.11mm 直径的钢丝与 42 根 3.8mm 直径的铝线绞合而成。参数如表：

表 8.1 导线参数

导线质量	1.52kg/m
直径	29.13mm
截面积	500.8mm <sup>2</sup>
导线断裂强度	97.8kN

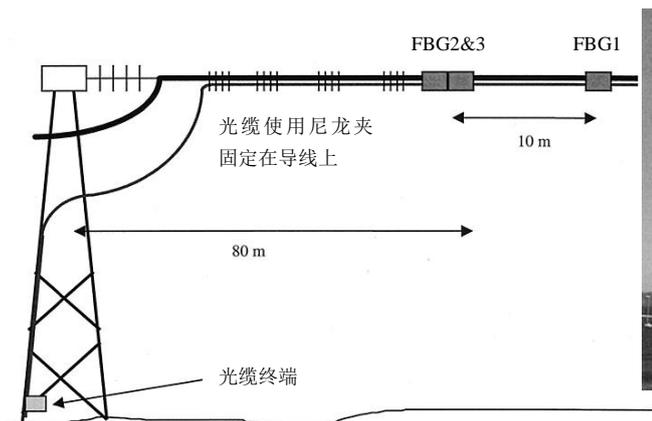


图 8.1 60kV 架空输电线光纤光栅传感器位置图

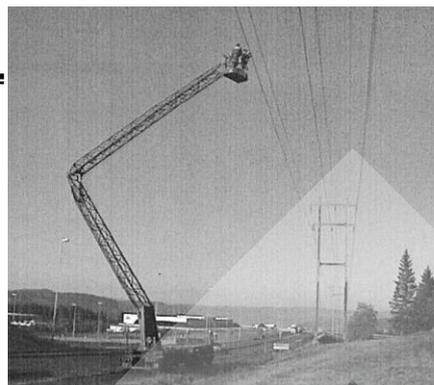


图 8.2 传感系统现场安装图

在输电导线表面安装了 3 个光纤光栅传感器。所用光纤光栅中心波长为 1550nm 附近，反射率约 85%，应变系数为  $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ ，温度系数为  $14\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。3 号光纤光栅用于温度补偿，封装于玻璃细径管中，光纤保持松弛状态。1 号和 2 号光纤光栅粘贴在输电线路的导线表面上，其中 2 号光纤光栅位于输电线路跨中位置，1 号光纤光栅位于距 2 号约 10m 处的位置。信号传输线路使用军用非金属柔性光缆。光缆使用尼龙夹固定在导线上，布设至最近的输电塔上。光缆连接到输电塔底部的终端盒内。图 8.1 和图 8.2 分别为监测系统的结构图和现场施工图。

## 2. 监测设备

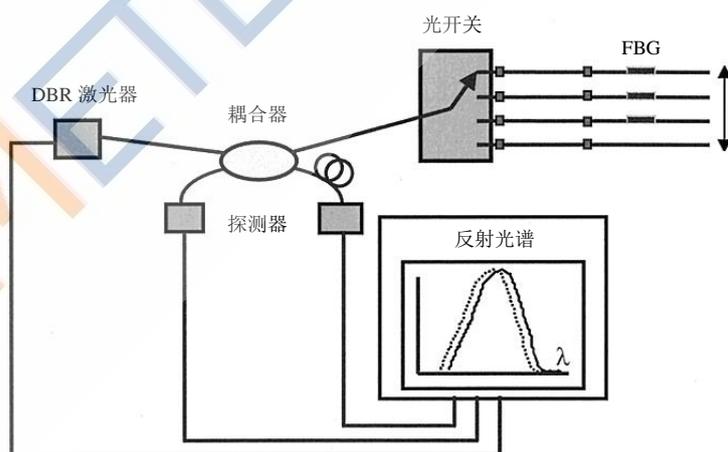


图 8.3 光纤光栅解调系统的示意图。

光纤光栅解调系统的结构示意图如图 8.3 所示。光源为可调谐分布式 Bragg 反射式激光器，具有 5.2nm 的调谐范围，中心波长约为 1551.6nm，并安装有 65dB 的隔离器。激光器保持恒温。激光器波长扫描频率可达 100Hz。一个扫描周期包含有 1000 个分立波长单元。耦合器的一端

连接光纤光栅传感器，另一端连接一个光电探测器，用于补偿光源功率波动和入射光波长变化所导致的耦合器分光比变化给解调系统带来的误差。光路中加有光开关以同时测量 3 个光纤光栅传感器的信号。

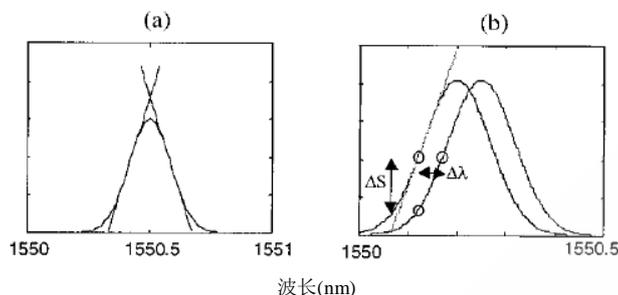


图 8.4 两种波长解调算法原理图：(a)低采样率；(b)高采样率

采用了两种波长解调算法来拟合光纤光栅反射光中心波长。第一种是低采样率方法：激光器扫描过整个波长可调谐的范围，包括光纤光栅的反射波长。程序自动拟合出光强最大值 30% 至 80% 的两条直线，两直线的交点即为光纤光栅反射光中心波长，如图 8.4 (a)所示。这种方法扫描频率最高仅为 20Hz，但可以同时测量多个光纤光栅。另一种方法为高采样率方法：激光器波长固定在光纤光栅反射光强度为 3dB 波长处，如图 8.4 (b)所示。已知光纤光栅的反射谱曲线，通过将所测信号的大小输入光纤光栅反射谱曲线方程即可得光纤光栅反射光中心波长的变化量。假设在 3dB 点附近光纤光栅反射谱曲线为线性，则由信号强度  $\Delta S$  便可得光纤光栅反射光中心波长的变化量  $\Delta\lambda$ ， $\Delta\lambda = \Delta S/A$ ，这里 A 为光纤光栅反射谱曲线斜率。这种方法通过提高光纤光栅反射谱曲线的拟合度可以提高测量精度。这种解调方法扫描频率可达 kHz 量级。

### 架空输电线理论模型

通过悬链线公式可以建立架空输电线数学模型，该模型为

$$y(x) = \frac{L}{2\beta} \left\{ \cosh \left[ \beta \left( 2 \frac{x}{L} - 1 \right) \right] - \cosh(\beta) \right\}, \beta = \frac{mgL}{2H_0} \quad (8.1)$$

式中， $L$  为跨距， $m$  为电线单位质量， $g$  为重力加速度， $H_0$  为电线水平方向拉应力， $x$  和  $y$  分别为水平和垂直位置。式(8.1)中假定导线两端处于相同高度，即  $y(0)=y(L)=0$ ； $\beta$  与电线垂度相关，受电线拉应力影响。电线的静应力为

$$\varepsilon_0(x) = \frac{F(x)}{EA} = \frac{H_0}{EA} \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} = \frac{H_0}{EA} \cosh \left[ \beta \left( 2 \frac{x}{L} - 1 \right) \right] \quad (8.2)$$

式中  $E$  和  $A$  分别为电线的弹性模量和截面积。电线的应变不仅与外部荷载作用有关，而且与电线的热膨胀有关。

风振动的幅值与电线直径的量级相当，主要受风速、电线拉应力、到悬垂线夹距离以及温度等参数影响。与悬垂线夹的距离相比，输电线可看作一根忽略其刚度的振动线，本征频率和振动幅值为

$$f_n = \frac{n}{2L} \left( \frac{H_0}{m} \right)^{1/2}, \quad y_n(x) = Y_0 \sin \left( \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (8.3)$$

式中  $n$  为模式。

式(8.3)描绘了一个固定振动模型，其振动频率由电线长度、单位质量和拉应力决定。在分析输电线振动情况时，常用到一个激励频率的经验公式

$$f = S \frac{V}{D} \quad (8.4)$$

式中  $V$  为风速， $D$  为输电线外径， $S$  为斯特拉哈常数(Strouhal number)，取值范围为 0.18-0.22。

式(8.4)揭示了振动频率与风速之间的关系。较低风速情况下，直径较大的输电线振动频率较小，而相对高的风速下直径小的输电线振动频率大。风速的变化可以使输电线产生多个振动模式。振动的幅值与振动频率、风速相关，也与输电线的自身阻尼有关。当忽略输电线的刚度，并将其简化为弯曲杆结构时，输电线表面的应变可以表示为：

$$\varepsilon(x) = \frac{D}{2} y_n''(x) = \frac{DY_0}{2} \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \sin \left( \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (8.5)$$

从上式看可以看出，最大应变在波腹位置，即  $x=L(k-1/2)n$ ， $k=1, 2, 3 \dots 2n$ 。

另外，考虑到水平方向风作用于输电线可以使输电线产生水平方向的变形，输电线单位长度的水平作用力可表示为[4]：

$$F_h = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 D \quad (8.6)$$

式中， $\rho$  为空气密度(1.245kg/m<sup>3</sup>)， $V$  为风速， $C_D$  为阻力系数。考虑风作用和导线自重影响，输电线的拉应力为：

$$H = H_0 \left[ 1 + \left( \frac{F_h}{mg} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8.7)$$

输电线的应变变化为：

$$\Delta\varepsilon(x) = \frac{H - H_0}{EA} = \varepsilon_0(x) \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{F_h}{mg} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (8.8)$$

在实际测量中，风作用力并不是固定不变的，与风速、方向以及湍流有关。但通过光纤光栅的监测结果，可以估计风荷载作用的极值、均值以及变化趋势。

## 监测结果

光纤光栅输电线监测系统运行了 18 个月，成功监测到了输电线在风荷载作用下的应变变化。以下为系统监测到的典型结果。

### A. 风振动测量

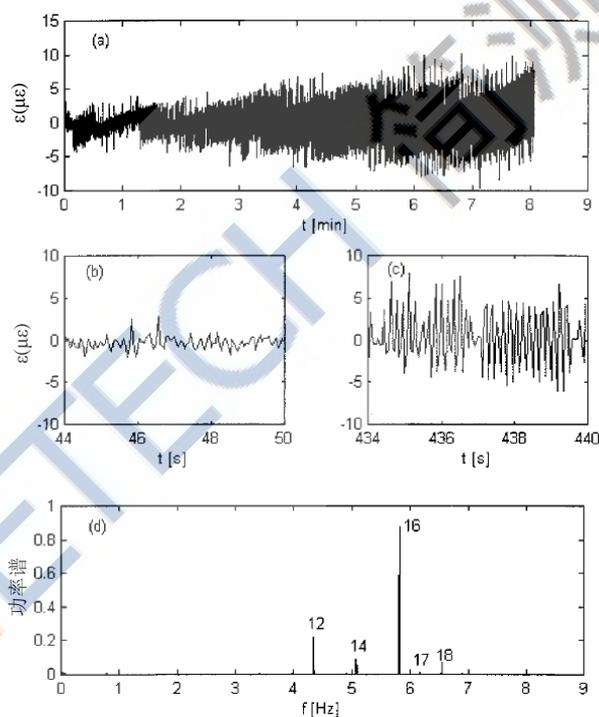


图 8.5 1 号光纤光栅监测到的风振动作用结果：(a) 整个应变时程；(b) 和 (c) 分别为监测开始和结束时的应变变化；(d) 信号的频率谱。

风振动现象在该监测输电线上比较常见，特别是在温度较低的秋冬季节。由于光缆附着在输电线上，起到了阻尼器的作用，因此在通常的情况下，风振动对输电线的影 响比较小。但在某些时候也出现比较强的振动。图 8.5 为 1 号光纤光栅传感器所监测到的风振动结果。采样频率为 18Hz，现场温度为 3℃。图 8.5 (a) 为所监测到的风振动的整个应变时程，图 8.5 (b) 和 (c) 为

监测开始和结束时 6 秒钟内的应变时程，图 8.5 (d)为风振动应变信号的频率谱。风振动导致的输电线最大应变为 $\pm 9.4\mu\epsilon$ 。风振动的主要频率为 5.81Hz，同时在频域上存在相同间隔的多个峰值较小的频率，这与式(8.3)结果相符。图 8.6 为不同采样频率下所监测到的风振动应变信号频率谱。从这两个频谱图中均没有发现 12Hz 以上的信号。这两种不同采样频率的监测为连续测量，因此频谱的不同反映了外界主要荷载风的变化。图 8.6 所示的频谱也同样存在等间隔的频率峰值信号，峰值大小与图 8.5 (d)所示接近。所有监测结果中均存在有 0.365Hz 的基频信号，而且风振动信号能量主要集中在 4-7Hz 频率范围内，12Hz 以上没有明显信号。

图 8.7 为同一天 2 号光纤光栅所监测信号的频谱图。2 号光纤光栅位于输电线跨中位置，距 1 号光纤光栅 10m。对于 2 号光纤光栅传感器，所监测到的风振动信号能量主要集中在 10-13Hz 频率范围内，同样也存在等间隔的频率峰值信号，而且频率间隔与 1 号光纤光栅一致。频率的不同是由于风振动信号的频率不仅与风速相关，更主要是受与位置参数相关的振动模式节点影响。2 号光纤光栅所监测到的应变信号幅值较低，为  $7.2\mu\epsilon$ 。

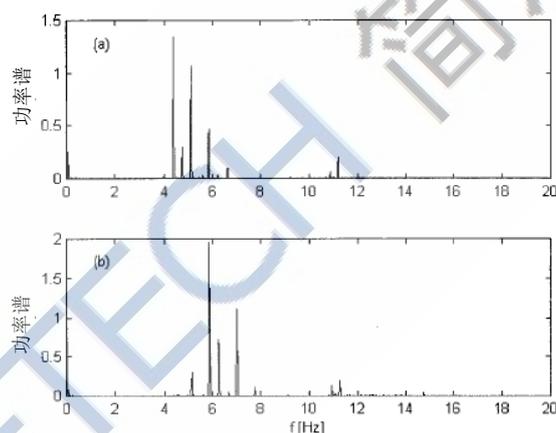


图 8.6 不同采样频率下 1 号光纤光栅监测到的风振动应变信号频率谱：(a)40Hz 采样率；(b)100Hz 采样率。

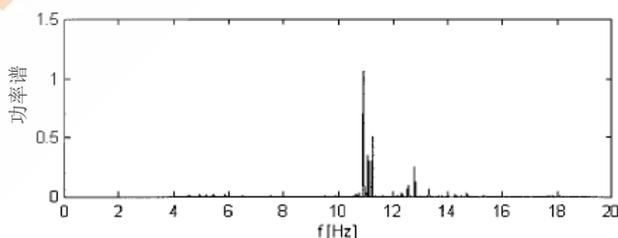


图 8.7 同一天内 2 号光纤光栅所监测信号的频谱图

## B. 强风作用监测

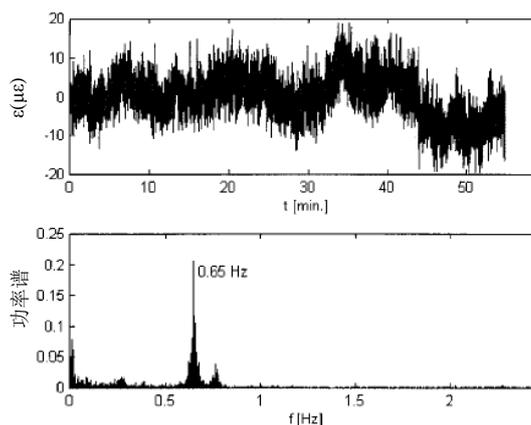


图 8.8 1 号光纤光栅传感器在 1 小时内的应变  
监测时程以及频率谱

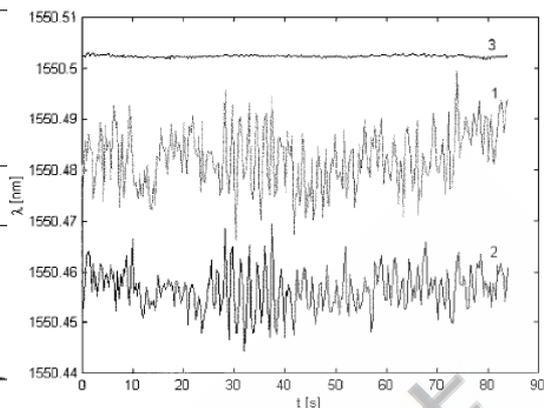


图 8.9 3 个光纤光栅传感器同时监测的测量  
结果，采样率为 10Hz

图 8.8 为 1 号光纤光栅传感器在 1 小时内的应变监测时程以及频率谱，采样频率为 5Hz。监测期间，气象观测仪器监测到当地的平均风速为 15m/s，最大风速 29m/s，现场气温 0℃。从图 8.8 可以得出应变幅值为  $\pm 16\mu\epsilon$ ，信号主要频率为 0.65Hz。2 号光纤光栅监测结果与 1 号光纤光栅基本一致。在几次同样气流环境中的监测数据都得到信号主要频率为 0.65Hz 的结果，只是风速低的情况下应变幅值略低一些。图 8.9 给出了 3 个光纤光栅传感器同时监测的结果。可以看出，用于温度补偿的 3 号温度传感器工作良好，有效的消除了外界应变影响。