

# 光纤拉曼散射与分布光纤温度传感器系统的研究\*

刘天夫 张在宣

(中国计量学院光电子热工研究所, 杭州 310034)

**摘要** 介绍了利用普通光纤自身拉曼散射的温度特性, 并采用光时域反射计(OTDR)及高速 A/D 变换等技术, 研制了沿光纤轴线方向的长距离连续感知的分布光纤温度传感系统。

**关键词** 光纤后向散射, 光时域反射计, 斯托克斯光, 反斯托克斯光

在传感器研究领域, 近年出现的分布光纤传感器系统, 是集诸多高新科技成果于一身并具有广泛应用领域和极大实用价值的新型光纤传感器。

分布光纤温度传感器系统是利用普通光纤的自身非线性光学效应, 感知并传送沿光纤轴线方向所有各点的温度信息。由于在我们所研制的系统中, 代表光纤各点温度信息的是幅值不等的拉曼散射光脉冲信号, 所以利用光时域反射计(OTDR—optical time-domain reflectometry)技术, 观测光纤后向反斯托克斯散射光信号的相对往返时间及其幅值大小, 便可精确地检测出光纤所有各点的即时温度及其变化情况。由此可见, 分布光纤温度传感器是利用光纤自身介质  $\text{SiO}_2$ , 组成了一维连续分布的感知探测器, 因此它可以同时感知连续多点的温度信息。同时, 由于传感光纤感知的温度信息已被转换成反斯托克斯拉曼散射光脉冲信号, 传送与感知是同一根光纤, 它不带电, 既不产生也不受任何强电磁场干扰。另外, 由于光纤芯径细小, 柔软性好, 所以可以对任何复杂形状和任何恶劣环境的温度进行在线即时检测和定位。正是由于分布光纤温度传感器系统具有普通传统传感器所不具备的这些独特优点, 因此自 1985 年英国 Plessey 雷达研究中心的 J. P. Dakin 博士首次提出并在实验室第一个完成了该系统的原理性实验之后<sup>[1]</sup>, 便显示出极为诱人的应用前景。此后, 世界上许多国家竞相开展了有关的应用与研究。我们这项工作的正

式开展, 始于 1992 年。它是国家首批产、学、研工程项目之一。1994 年完成并通过了国家鉴定。

由于光纤中非线性光学效应十分微弱, 特别是对温度敏感的反斯托克斯光信号更加微弱, 它仅为入射光强的  $10^{-9}$  量级左右, 因此, 我们所感兴趣的拉曼散射光信号完全被淹没在噪声之中, 这也正是该项工作的困难之处。所以我们在研制中精心设计了光学部件及软硬件结构, 并采用高灵敏度的雪崩二极管及高增益、低噪声的放大电路和高速、高精度 A/D 变换等电路, 组成了我们的光电微弱信号处理系统。

## 1 系统的测温原理

### 1.1 测温原理

我们研制的分布光纤传感器系统的测温原理, 是基于光纤中拉曼散射光的强度与温度存在着密切关系的特性<sup>[2]</sup>。

如所周知, 当光纤中传送某一波长的光波时, 光子的传播必然与构成光纤的介质  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$  分子间发生相互作用, 也就是说, 振动的分子与传播的光子间要发生能量传递的过程。伴随这种过程的能级跃迁, 会产生新的发光现象, 这就是光纤中的拉曼散射效应。一般情况下, 这种正常的拉曼散射光有两种频率成分: 一

\* 国家经贸委产、学、研办公室和国家技术监督局科研资助项目。

1995年2月13日收到初稿, 1995年4月8日收到修改稿。

种是比泵浦光能量低的斯托克斯光；一种是比较泵浦光能量高的反斯托克斯光。由于反斯托克斯光的产生是从激发态向基态的辐射跃迁过程，而且处于激发态上的粒子数的密度与温度有密切的关系，所以光纤中的拉曼散射现象是与温度有关的函数。反斯托克斯光的频率可以写成

$$\nu_{as} = \nu_0 + \Delta\nu,$$

斯托克斯光的频率可写成

$$\nu_s = \nu_0 - \Delta\nu, \quad (1)$$

式中  $\nu_0$  为泵浦光频率， $\nu_{as}$  为反斯托克斯光频率， $\nu_s$  为斯托克斯光频率， $\Delta\nu$  为拉曼频移量。由(1)式可见，与温度相关的拉曼散射光的波长与泵浦光波长不同，因此可以利用分光系统把它从泵浦光谱中分离出来。同时，利用表达物质能量结构和能级分布的玻耳兹曼分布函数，对光纤中拉曼散射过程可写出反斯托克斯与斯托克斯散射光光强之比  $I_{as}/I_s$  为如下形式<sup>[3]</sup>：

$$I_{as}/I_s = \exp(-hc\Delta\nu/kT), \quad (2)$$

式中  $I_{as}$  为反斯托克斯散射光光强， $I_s$  为斯托克斯散射光光强， $h$  为普朗克常数， $c$  为真空中光速， $k$  为玻耳兹曼常数， $T$  为绝对温度。从(2)式可以清楚地看出， $I_{as}/I_s$  比值只是温度  $T$  的函数。因此，如果能测出光纤中某一位置的反斯托克斯散射光光强与斯托克斯散射光光强，利用(2)式就可以知道该点的温度值。

## 1.2 光纤各点温度的定位方法

由上述讨论可知，光纤各点温度由拉曼散射光强度的大小确定。利用基于光学雷达原理的 OTDR 测出散射光波的时间延迟，这就确定了光纤中拉曼散射光波的产生位置，这也就是测温点至光纤输入端的距离。其基本原理如图1所示，利用自聚焦透镜将泵浦脉冲光耦合进入光纤后，其传输波形如图1(a)所示。此时因泵浦光脉冲的传播，在光纤各点将引起各种散射光和反射光发生。它们其中的一部分要返回到光纤的入射端，一般把它称为光纤后向散射光，由1×3路双工器D端输出，其波形如图1(b)所示。光纤后向散射光的光谱主要成分为：一是因折射率的不连续性而产生的端点菲涅耳反射

光；二是因光纤折射率的微小涨落而引起的瑞利反射光；三是因光学三阶非线性效应而引起的拉曼散射光与布里渊散射光。前两种反射光的波长与入射的泵浦光波长一样，而后两种散射光的波长都偏离泵浦光波长，因而发生频移现象<sup>[4]</sup>。而且由于拉曼散射光的频移量远大于布里渊散射光的频移量，因此利用波分复用器可以比较容易地把拉曼散射光从光纤后向散射光谱中分离出来。

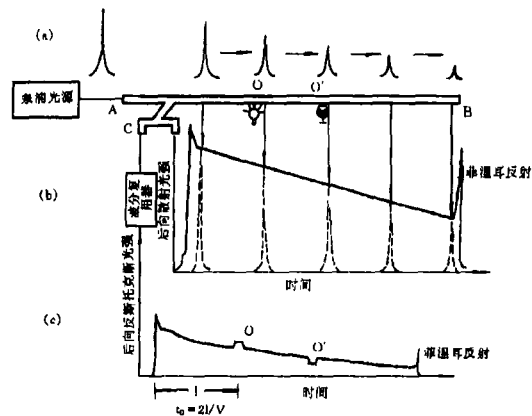


图1 光纤各点温度定位原理图

- (a) 边传播边衰减的泵浦光脉冲；
  - (b) 光纤各点产生散射光的 OTDR 波形；
  - (c) 光纤后向反斯托克斯光的 OTDR 波形
- (时间轴：10 ns 相当于 1 m)

如图1所示，假设距光纤 A 端为  $l$  的点 O 处有一热源，根据光纤拉曼散射原理，泵浦脉冲光在该点引起的拉曼散射光脉冲幅度将高于其他点，如图1(c)所示。代表热源 O 点温度的反斯托克斯光脉冲信号返回到光纤输入端 A 所需要的时间  $t_0 =$  (泵浦脉冲光从 A 点传输到 O 点所需要的时间) + (在 O 点产生的反斯托克斯光脉冲自 O 点返回到 A 端所需要的时间)，即  $t_0 = 2l/V$ ，其中  $V = 2 \times 10^8 \text{m/s}$  为光波在光纤中的传播速度，它是已知的常量。因此如果测出时间  $t_0$ ，就可以知道热源所在的具体位置。另一方面，由于拉曼散射光信号在光纤介质中往返传输距离  $l$  的损耗是可求的已知量，

它的大小为  $\exp(-2\alpha l)$ , 其中  $\alpha$  为与波长相关的光纤传输衰减系数. 所以, 根据光纤后向拉曼散射光的 OTDR 波形参数值, 可以计算出光纤各点的实时温度值及其相应的位置.

## 2 分布光纤温度传感器系统

我们研制的分布光纤温度传感器系统, 主

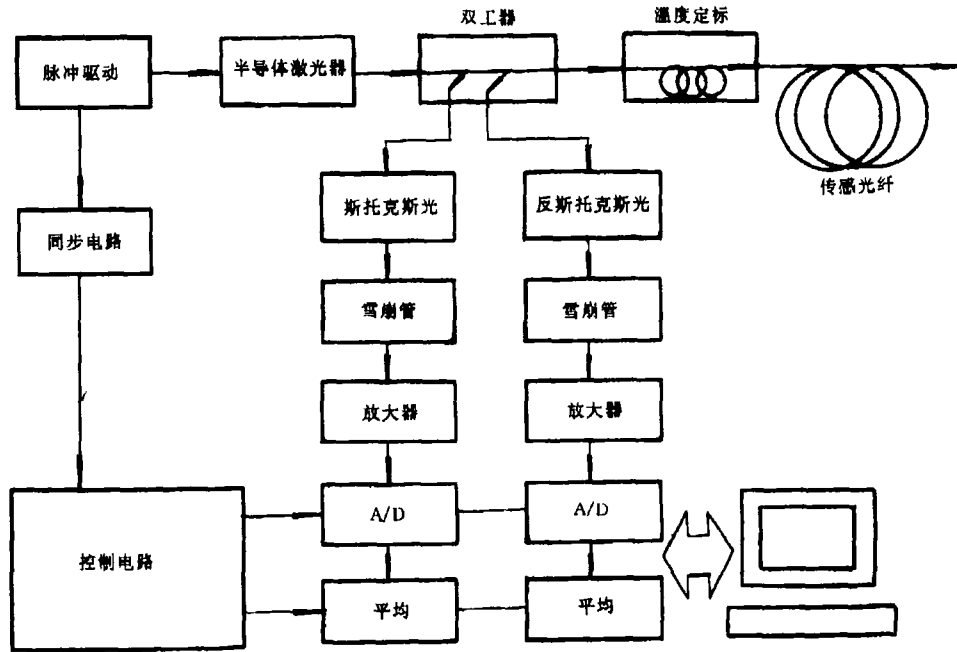


图2 分布光纤温度传感器系统结构方框图

要由传感光纤、光学器件、信号处理及计算机等四个部分组成, 系统的方框图如图2所示. 我们采用长度为 1 km, 50/125  $\mu\text{m}$  GI 多模普通光纤作为系统的传感光纤, 它放置在被测环境中. 光学部分主要由半导体激光器、脉冲驱动电源、1 $\times$ 3 路双工器及两路波分复用器组成. 泵浦光源采用波长为 905 nm, 最大输出功率为 10W 的 GaAs 半导体激光器. 脉冲驱动源内阻小于 1  $\Omega$ , 脉冲宽度为 50 ns, 重复频率为 1 kHz. 光纤耦合效率为 20%, 光纤后向散射光由 1 $\times$ 3 路双工器分成两路, 进入波分复用器分光系统. 该系统由中心波长为 875 nm、偏离中心波长 17 nm 隔离度优于 35dB 与中心波长为 945 nm、偏离中心波长 20 nm 隔离度优于 35 dB 的两组干涉滤光片组成, 分别把反斯托克斯光 (875 nm) 和斯托克斯光 (945 nm) 分离出来. 由于光纤后向散射光谱分离出来的反斯托克斯光与

斯托克斯光信号及其微弱, 它们仅为入射光强的  $10^{-8}$  量级, 约为后向瑞利散射光强的  $10^{-3}$  量级<sup>[5]</sup>. 因此, 系统分别采用对称性好并附有低噪声前置放大器的高灵敏度的雪崩二极管进行光电变换. 尽管如此, 有用信号仍被淹没在噪声中. 为此我们设计了低噪声、高动态范围宽带放大器对光电信号进行二级放大, 并送入高速 A/D 变换系统进行多次累加平均, 进一步提高了系统的信噪比 S/N. 通过双路放大双通道处理得到的反斯托克斯与斯托克斯光信号, 按照 (2) 式求比值确定温度的方法, 可以大大减小因光纤种种应力损耗或泵浦光功率等非温度因素的变化而引起的测量误差. 我们的系统测量时间取决于信号的累加次数, 由计算机平均累加  $2^{14}$  次大约需要 38s 左右, 表1列出了我们通过国家鉴定的系统主要特性参数.

表1 分布光纤温度传感器系统的主要特性

性能	指标
传感光纤	GI 50/125 $\mu$ m
测温精度	$\pm 1^\circ\text{C}$
测温范围	-20—150 $^\circ\text{C}$
空间分辨能力	10 m
最大测量距离	2 km
测量时间间隔	约40 s

### 3 系统的测温方法和测量精度

由于分布光纤温度传感器具有一次测量可同时感知数公里长一维多点分布温度的特点,因此它不仅可以取代传统的单点热电偶测温方式,而且还可以把传感光纤按照测温环境的需要,弯折成矩阵形式的二维平面或三维立体空间方式的测温系统。

#### 3.1 测温精度

由(2)式可知,光纤后向拉曼散射光光强只是温度的函数,因此,保证光纤后向反斯托克斯与斯托克斯光信号的检测精度是系统测温精度的关键所在。我们在研制中,微弱拉曼信号的检出,分别采用了衍射光栅与干涉滤光片两种波分复用器的分光手段进行了对比实验<sup>[6]</sup>。实验结果表明,波分复用器的分光本领对反斯托克斯光与斯托克斯光的检出和噪声光的抑制起着极其关键的作用,它是决定系统测温精度的主要因素之一。另外由(2)式可知,被测温度决定了拉曼散射光强度大小。当被测温度低于-200  $^\circ\text{C}$  时,反斯托克斯光强将急剧减小。同样在温度高于400  $^\circ\text{C}$  以上时,由于拉曼散射光强变化率降低,将导致系统信噪比 S/N 变坏。<sup>[7]</sup>另外,由于光纤传输损耗的影响,随着光纤长度的增加,拉曼散射光强损耗也增加,使系统的信噪比 S/N 变坏,测温精度下降。

#### 3.2 测温范围

系统的测温范围主要取决于传感光纤的物理性质。目前市售普通光纤或特殊掺杂的光纤,它们的基本成分都是  $\text{SiO}_2$ , 这种物质在-100  $^\circ\text{C}$  以下至 1000  $^\circ\text{C}$  温度范围内都呈现出稳定的适应性。但是系统的实际测温界限,受到

保护光纤强度的套层材料耐温限制。在-100  $^\circ\text{C}$  以下,由于套层材料变脆而使光纤容易受损。当温度过高时,由于套层材料容易燃烧而使光纤断裂。目前普通光纤的套层材料温度适应范围在-50  $^\circ\text{C}$ —150  $^\circ\text{C}$  之间,但是,根据测温环境的需要,采用特殊耐高、低温套层材料的光纤,可以进一步扩大系统的测温范围。

#### 3.3 测温的空间分辨能力

测温空间分辨能力是分布光纤温度传感器系统特有的物理量。由于光纤后向拉曼散射光信号的 OTDR 波形参数值决定着光纤各点的温度,从各取样点输出的拉曼散射光幅度值,是沿着光纤某一长度的平均值,或者说是沿某一长度上各点产生的后向拉曼散射光在时间轴上的混合平均值。这一长度能够允许的最短距离,称为系统的测温空间分辨力。显然它取决于两个因素:一是泵浦光源的脉冲宽度,也就是在半导体激光器输出激光脉冲宽度的时间内,对应的光波行进距离,也就是对应 OTDR 波形的时间坐标长度,它决定了分布光纤温度传感器系统的最高空间分辨能力,例如在我们的系统中,泵浦光脉冲宽度为 100 ns,相应的空间分辨能力最高不会超过 10 m;第二是,系统的 A/D 变换采样周期,它也决定着系统的测温空间分辨能力,例如,100 MHz 的采样周期,即 10 ns 的采样脉冲宽度,如果不考虑泵浦光源脉冲的宽度,它相当于最高可以分辨 1 m 的测温空间分辨能力。

#### 3.4 最大测量距离

分布光纤温度传感器系统的最大测量距离,取决于传感光纤的长度。但是,为了使传感光纤在尾端部位各点也有足够的测量精度,传感光纤的长度不能任意长。在我们研制的分布光纤温度传感器系统中,为保证传感光纤各点的测温精度均不低于  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,传感光纤长度为 1 km。在室温(26  $^\circ\text{C}$ )条件下,系统的后向反斯托克斯散射光的测温 OTDR 曲线如图3所示。由图3可以看出,除传感光纤在 550—700 m 的部分置于恒温槽内以外,其余部分的光纤后向反斯托克斯光的 OTDR 曲线呈指数衰减变化,

它遵循不同波长光波在光纤中传输损耗特性的衰减规律. 在我们系统的泵浦光功率及其耦合的条件下(如图3所示), 在1 km 处的光强还未衰减到零, 也就是说传感光纤在尾端1 km 处反斯托克斯光的 OTDR 曲线还保持着一定的动态范围. 实验结果表明, 传感光纤尾端部位的 OTDR 曲线的动态范围决定了系统测温精度下限, 同时也决定了传感光纤的最大长度, 即系统的最大测量距离.

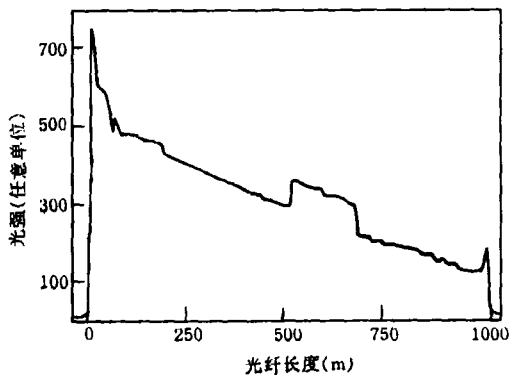


图3 系统的测温 OTDR 曲线

#### 4 测温实例

实验室中, 实际测量的温度分布曲线如图3所示. 系统的传感光纤全长1 km, 其中550—700 m 的部分被放置在80℃的恒温槽中保持恒定的温度, 其余部分放置在室内26℃温度环境里. 图4示出了按(2)式处理后得到的测温曲线. 实验结果证明, 在-20—150℃范围内, 系统的测温精度可以达到±1℃, 温度分辨能力在0.5℃左右. 但是, 由于实际应用中的测温环境可能十分复杂, 所以传感光纤还必须根据测温现场的具体情况, 进行合理的安放与布设, 才能保证系统的测温精度. 此外, 在隧道、高层建筑或危险品仓库等温度监测及火灾报警系统应用中, 由于传感光纤接受的是辐射温度信号, 系统感知预报的是相对温度变化的速率, 因此要转换成实际的温度值还必须加以必要的修正.

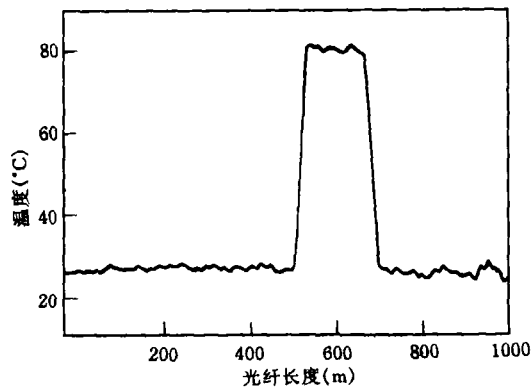


图4 系统的测温曲线

#### 5 结束语

综上所述, 不难看出分布光纤温度传感器是具有十分广泛应用前景的新型传感器. 目前英国、日本及我国已开始把它商品化, 并将其逐步应用于电站、矿井、大型变压器、地下管路、隧道及高层建筑等场合的温度检测及火灾报警等系统<sup>[8]</sup>. 今后, 随着光纤生产技术的不断完善, 系统的测温范围还可以向高、低温范围扩大. 同时, 随着今后的微弱信号高速化处理技术的发展和功率半导体激光器的不断进步, 分布光纤温度传感器系统还可以向着超长距离测温和高空间分辨能力方向发展.

#### 参考文献

- [1] J. P. Dakin and D. J. Pratt, *Electron Lett.*, **13**(1985), 569.
- [2] F. L. Galecner et al., *Appl. phys., Lett.*, **1** (1978), 32.
- [3] 阿崎達哉等, *フジクラ技報*, **4**(1989), 28.
- [4] A. H. Hartog and A. P. Leach, *Electron Lett.*, **23** (1985), 1061
- [5] J. K. A. Ererard et al., *Electron Lett.*, **2** (1989), 140.
- [6] Zhang ZaiXuan et al., *SPIE*, **21** (1994), 186.
- [7] 和田史生等, 第5回光波ヤンシング 技術研究会, 應用物理学会, **5**(1990), 24.
- [8] 小沢保夫等, 平成4年電氣学会全国大会, **1** (1992), 1442.