

文章编号: 0253-2239(2003)10-1168-4

光纤拉曼测温系统的温度标定及设计考虑

刘建胜 李 铮

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

摘要: 分布式光纤拉曼测温系统的重要参量之一是其温度测量精度, 系统的温度标定对温度测量精度有着极其重要的影响。从该类系统的工作原理出发揭示了进行温度标定的物理原因及其对系统测温精度的影响程度。同时提出了在标定装置的实际设计上所要注意的几个方面。

关键词: 非线性光学; 光纤拉曼测温; 温度标定

中图分类号: O437.3 文献标识码: A

1 引 言

自从 1985 年 Darkin^[1] 公布了第一个基于拉曼散射的光纤分布式测温实验系统以来, 这类系统具有的阻燃、防爆、防电磁干扰、不破坏被测温度场、抗腐蚀、易安装和可实现实时多点快速定位测温等优点, 吸引了世界上许多科研机构和公司对此类系统进行了深入、广泛的研究和开发^[2~5]。目前已有商品化系统, 最好系统的指标达到了测距 30 km、距离分辨率 1 m、温度精度 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ^[6], 并成功地应用于石油钻井、电力、石化过程处理、航天等广泛的领域。然而, 商品化系

统的指标还远远未达到其理论极限值^[7], 因此有必要对这类系统进行进一步的研究和改善。

在对这类系统的报道中, 有的使用了一个如图 1 所示的恒温装置来进行温度定标, 有的却没有。而且, 报道中对于进行温度定标的物理原因及其对系统性能参量的重要程度, 何时需要何时不需要进行温度定标却未见有详细明确的分析和说明。本文的目的就是从拉曼散射激励的数学描述和该类系统工作原理出发推导和说明温度定标的物理原因及其重要性, 希望能对这类系统的实际设计有所帮助。

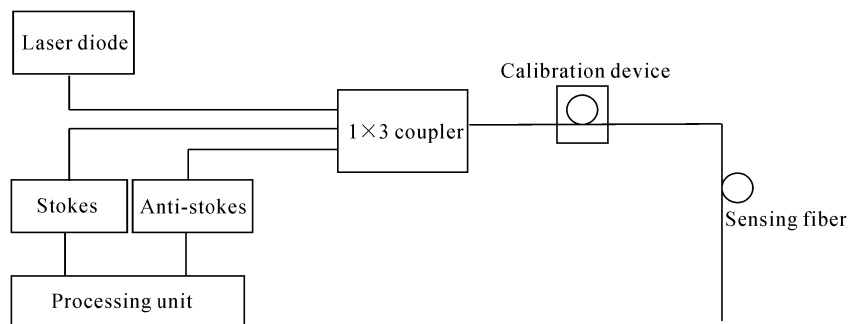


Fig. 1 The Schematic of a distributed fiber optic Raman temperature sensing system

2 光纤拉曼测温系统的温度解调

光纤在光激励下会产生拉曼散射, 产生的斯托克斯光 I_S 和反斯托克斯光 I_{AS} 的强弱与由该物质所处环境温度决定的高频声子的能量分布有关^[1]:

$$I_S = A_0 \cdot \lambda_S^{-4} \left[1 + \frac{1}{\exp(hc \Delta\nu/kT) - 1} \right], \quad (1)$$

$$I_{AS} = A_0 \cdot \lambda_{AS}^{-4} \frac{1}{\exp(hc \Delta\nu/kT) - 1}, \quad (2)$$

其中, A_0 为一常量, λ_S 和 λ_{AS} 分别为斯托克斯光和反斯托克斯光的波长, $\Delta\nu$ 为拉曼光谱与激励光的频移, h , k 和 c 分别是普朗克、玻尔兹曼常量和光速。

把式(1)式与(2)式相比得

$$R(T) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp\left(-\frac{hc \Delta\nu}{kT}\right), \quad (3)$$

从而有

E-mail: buaa_jslu@sohu.com

收稿日期: 2002-08-02; 收到修改稿日期: 2002-09-23

$$\frac{1}{T} = -\frac{k}{hc\Delta\nu} \left[\ln \frac{I_{AS}}{I_S} + \ln \left(\frac{\lambda_{AS}}{\lambda_S} \right)^4 \right], \quad (4)$$

等式右边的 I_{AS} 和 I_S 为可测量量, 而其它参量为已知常量。通过测量 I_{AS} 和 I_S , 温度 T 就可由上式简单地求出。因此, (4) 式成为所有拉曼测温系统的温度解析的基础^[1,4]。

然而, 进一步的分析发现, 对于基于拉曼散射的实际光纤测温系统, (4) 式的成立是有条件的。为此, 从光时域反射(OTDR)技术的基础公式出发, 可知返回到接收机的反斯托克斯光功率 P_{AS} 和斯托克斯光功率 P_S 分别为

$$P_{AS} = 0.5E\nu\theta_{AS}\beta_{AS}\zeta_{AS}\exp[-(\alpha_R + \alpha_{AS})Z], \quad (5)$$

$$P_S = 0.5E\nu\theta_S\beta_S\zeta_S\exp[-(\alpha_R + \alpha_S)Z], \quad (6)$$

其中 E 为激励光脉冲能量, ν 为光纤中的光速, α_{AS} 、 α_S 和 α_R 分别为光纤对反斯托克斯光、斯托克斯光和瑞利光的衰减因子, β_{AS} 和 β_S 分别为光纤对反斯托克斯光和斯托克斯光的收集因子, ζ_{AS} 和 ζ_S 分别为耦合器、光滤波器等光学部件对反斯托克斯光和斯托克斯光强度的影响, θ_{AS} 和 θ_S 分别为反斯托克斯光和斯托克斯光的散射截面^[1]:

$$\theta_S = A_0\lambda_S^{-4} \left[1 + \frac{1}{\exp(hc\Delta\nu/kT) - 1} \right], \quad (7)$$

$$\theta_{AS} = A_0\lambda_{AS}^{-4} \frac{1}{\exp(hc\Delta\nu/kT) - 1}. \quad (8)$$

另外, 在实际系统中, 反斯托克斯光和斯托克斯光强度是通过其在光接收机产生的光电流 i_S 和 i_{AS} 来体现的, 即实际测量的是电信号

$$i_{AS} = P_{AS}R_{AS}, \quad (9)$$

$$i_S = P_S R_S, \quad (10)$$

其中, R_{AS} 和 R_S 分别表示两接收机的电特性参量。这样, 实际应使用的解析温度的比值关系式为

$$R'(T) = \frac{i_{AS}}{i_S} = \frac{P_{AS}R_{AS}}{P_S R_S} = \frac{R_{AS}\beta_{AS}\zeta_{AS}\exp(-\alpha_{AS}Z)}{R_S\beta_S\zeta_S\exp(-\alpha_S Z)} \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp\left(-\frac{hc\Delta\nu}{kT}\right), \quad (11)$$

可看出, 要使(11)式与(3)式相等, 必须使 $\alpha_{AS} = \alpha_S$, $R_{AS}\beta_{AS}\zeta_{AS}R_{AS} = \beta_S\zeta_S R_S$ 。也就是说要求实际系统必须保证斯托克斯光和反斯托克斯光的经历的光通道和电通道的特性完全一致。

但是, 对于实际系统, 做到完全对称是很困难的, 这样就需要用一个参量 Q 来修正, 即实际的公式应为

$$R'(T') = \frac{i_{AS}}{i_S} = Q \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp\left(-\frac{hc\Delta\nu}{kT'}\right), \quad (12)$$

解出的温度值为

$$\frac{1}{T'} = -\frac{k}{hc\Delta\nu} \left[\ln \frac{i_{AS}}{i_S} + \ln \left(\frac{\lambda_{AS}}{\lambda_S} \right)^4 - \ln Q \right], \quad (13)$$

与理想公式(4)相比较有

$$\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} = \frac{k}{hc\Delta\nu} \ln Q \neq 0, \quad (14)$$

$$\Delta T = T - T' = \frac{k}{hc\Delta\nu} \ln Q T T' \approx \frac{k}{hc\Delta\nu} \ln Q T^2, \quad (15)$$

这说明, 由于两通道不一致性的存在(即 $Q \neq 1$), 使得用理想公式(4)求解出的温度值与实际温度间存在一个误差 ΔT , 且这一误差与测量温度 T 的平方成正比, 即所需测量的温度越高则误差就越大, 数值结果如图 2 所示。而且, Q 值是大于、还是小于 1 决定了用理想公式值解析出的温度值 T 是大于还是小于实际的温度值 T' 。

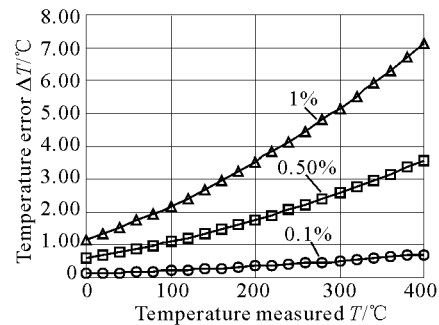


Fig. 2 Temperature error at different temperature caused by the difference between Stokes and anti-Stokes channels

可看出, 当斯托克斯光和反斯托克斯光通道存在 0.5% (即 $Q=1.005$) 的不一致时, 若要测量的真实温度为 80 °C, 则按照式(4)所解出的温度与真实温度之间的误差就会超过 1 °C。而在实际系统中产生大于 0.5% 的不一致性的原因是众多的, 如: 1×3 光耦合器斯托克斯光和反斯托克斯光端口分光比的不同, 光滤波器透射率的不同, 光接收机的响应特性的差异等等。

为了消除或减小这种测量误差, 有必要进行相应的修正。最直接的方法是找出系统的 Q 参量, 在解析温度时将它的影响扣除。而采用恒温槽是确定 Q 参量的最常用的方法。

3 恒温槽的设计

由上述讨论知道, 恒温槽在系统中的作用是得到由斯托克斯光和反斯托克斯光两通路的 inconsistency 而引入的修正参量 Q , 因此确定 Q 参量的准确程度或者说恒温槽的精确度对系统的测温精度有着至关重要的影响。

3.1 影响恒温槽精度的因素

在实际的恒温槽中,误差主要来自两方面的原因:1) 恒温槽内测量恒温槽温度的温度计误差 ΔT_t 和 2) 恒温槽的时间稳定性误差 ΔT_s , 则恒温槽总的标定温度误差为

$$\Delta T_0 = \sqrt{(\Delta T_t)^2 + (\Delta T_s)^2}, \quad (16)$$

当然,恒温槽引入的误差 ΔT_0 应越小越好,但一味地追求高精度是必将增加恒温槽制作的难度和成本,这一点对实际系统尤为重要。再者过高的精度对于某个具体的实际系统是否必要,若不必要的话,则会造成浪费。因此,就需要有一个限定恒温槽误差的标准来平衡这两方面的矛盾。

3.2 限定恒温槽误差的标准

合理地放宽恒温槽误差既可满足实际系统测温精度的要求,也可大大降低恒温槽的制作难度和成本。

假设恒温槽的真实温度为 T_0 , 则真实的修正参量应为

$$\ln Q = \frac{hc \Delta \nu}{k T_0} + \ln \frac{i_{AS}}{i_S} + \ln \left(\frac{\lambda_{AS}}{\lambda_S} \right)^4, \quad (17)$$

由于标定温度误差 ΔT_0 的存在,相应的实际测得的修正参量 Q' 为

$$\ln Q' = \frac{hc \Delta \nu}{k (T_0 + \Delta T_0)} + \ln \frac{i_{AS}}{i_S} + \ln \left(\frac{\lambda_{AS}}{\lambda_S} \right)^4, \quad (18)$$

这样,测量值 Q' 与真实值 Q 就存在一个偏差:

$$\ln Q - \ln Q' = \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_0 + \Delta T_0} \right) \frac{hc \Delta \nu}{k}, \quad (19)$$

因此,若用实际测量的修正参量 Q' 去进行系统修正,得到的温度值就会与真实的温度值存在一个偏差,而成为影响系统测温精度的一个因素。对于一个真实温度为 T 的测量点来说,使用修正参量 Q' 就会引起一个温度测量误差 ΔT 。由于是同一个系统,温度测量误差 ΔT 也应满足如下关系:

$$\ln Q - \ln Q' = \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T + \Delta T} \right) \frac{hc \Delta \nu}{k}, \quad (20)$$

则由(18)式和(19)式有

$$\Delta T = \frac{T^2}{T_0^2} \cdot \Delta T_0, \quad (21)$$

即对测量温度为 T , 精度满足 ΔT 的系统,恒温槽的精度必须满足

$$\Delta T_0 \leq \frac{T_0^2}{T^2} \cdot \Delta T, \quad (22)$$

可看出允许的恒温槽误差 ΔT_0 不仅与设计系统的参量要求 T 、 ΔT 有关,还与所选定的恒温槽的标定温度 T_0 有关。对于同样的测温范围,恒温槽的标定温度越高,引起的测量温度误差就越小;或者

说,对于相同的测量温度误差,对恒温槽精度的要求就越低。图 3 是一个测温上限分别为 80 °C、200 °C 和 400 °C, 测温精度 $\Delta T = 1$ °C 的系统,在不同的标定温度下对恒温槽标定精度的要求。因而,选择常温做标定温度,需要高的标定精度;而选择高温做标定温度,虽然可降低标定精度,但是高温设备不易维护和使用。因此,在实际设计中,在恒温槽定标温度的选择中,需要把系统测温精度要求与恒温槽制作的难易程度综合起来考虑,而(22)式就是进行这一综合考虑的理论依据。

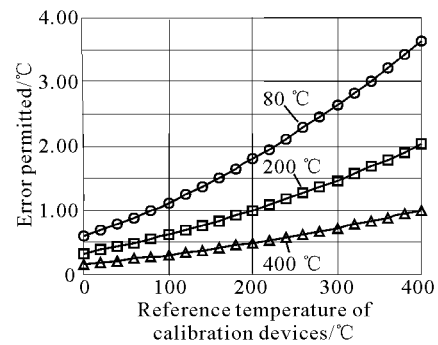


Fig. 3 The influence of the reference temperature on the error permitted

3.3 恒温槽内光纤长度的选定

由于光纤对斯托克斯光和反斯托克斯光衰减 α_S 和 α_{AS} 不同,因此对于公里级的长系统来说,还存在不可忽略的、与距离相关的通道不平衡量 $\exp[-(\alpha_{AS} - \alpha_S)Z]$ 。这样,(12)式应改写为

$$\frac{i_{AS}(z)}{i_S(z)} = Q \exp[-(\alpha_{AS} - \alpha_S)Z] \exp\left(-\frac{hc \Delta \nu}{k T_0}\right), \quad (23)$$

从理论上讲,要确定 Q 和 $(\alpha_{AS} - \alpha_S)$ 两个参量,恒温槽内只要有两倍于系统空间精度长的光纤就可。具体过程为

$$\frac{i_{AS}(z_1)}{i_S(z_1)} = Q \exp[-(\alpha_{AS} - \alpha_S)z_1] \exp\left(-\frac{hc \Delta \nu}{k T_0}\right), \quad (24)$$

$$\frac{i_{AS}(z_2)}{i_S(z_2)} = Q \exp[-(\alpha_{AS} - \alpha_S)z_2] \exp\left(-\frac{hc \Delta \nu}{k T_0}\right), \quad (25)$$

由(24)式和(25)式可求得

$$-(\alpha_{AS} - \alpha_S) = \ln \left[\frac{i_{AS}(z_1)}{i_S(z_1)} \frac{i_S(z_2)}{i_{AS}(z_2)} \right] / (z_1 - z_2), \quad (26)$$

$$Q = \frac{i_{AS}(z_1)}{i_S(z_1)} \exp\left(\frac{hc \Delta \nu}{k T}\right) \left[\frac{i_{AS}(z_1)}{i_S(z_1)} \frac{i_S(z_2)}{i_{AS}(z_2)} \right]^{-z_1/(z_2-z_1)}, \quad (27)$$

或

$$Q = \frac{i_{AS}(z_2)}{i_S(z_2)} \exp\left(\frac{hc \Delta \nu}{k T}\right) \left[\frac{i_{AS}(z_1)}{i_S(z_1)} \frac{i_S(z_2)}{i_{AS}(z_2)} \right]^{-z_2/(z_2-z_1)}, \quad (28)$$

但实际上,沿光纤长度各点的衰减因子 α_{AS} 和 α_S 并不都是完全相同的,因此恒温槽内往往要放一定长度的光纤来求得平均的衰减因子 α_{AS} 和 α_S ,以减小由衰减因子的不同造成的误差。

3.3 温度标定方式、适用条件及范围

温度标定可分为设备制成后一次性标定和使用过程中实时在线标定两种方式。一次性标定可消除制作过程中两通路的不一致性;而实时在线标定还可以消除系统在使用过程中的长期老化、漂移、环境温度变化等引起的不对称性。

当然,采用实时标定自然增加了系统的复杂程度和制作成本。并且从以上的分析中可看出,并不是所有的系统都需要进行实时标定,比如对于用于火警与泄漏检测的这种温差较大的系统,是不需要进行实时修正的。而对于常温下 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 的精度或 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 高温下 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 的精度这类高精度或(和)高温的系统则都需要进行实时温度校正。因此,这要看实际的应用而定。

另外,由于拉曼系统弱信号的特点,进行一次完整测量往往需要几十秒至几分钟的时间(用于多次累加平均),因此上述讨论是以系统中斯托克斯光和反斯托克斯光两通路(包括光路和电路)的不一致性的随时间的变化相对于一次完整测量时间来说是缓慢的条件的。

总结 分布式光纤拉曼测温系统中的温度标定主要

是为了修正斯托克斯光和反斯托克斯光两通路(包括光路和电路)在制作和运行过程中存在的不一致性,从而保证系统的温度精度。若是不进行这种修正,0.5%的不一致性,在测量温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时就会产生 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 的测量误差,因此对于中高温的高精度系统,温度标定及其装置的研制具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W *et al.*. Temperature distribution measurement using Raman ratio thermometry. *Fiber Optic and Laser Sensors III. Proc. SPIE*, 1985, **566**:259~256
- 2 Samson P J. Analysis of the wavelength dependence of Raman backscattering in optical fiber thermometry. *Electron. Lett.*, 1989, **3**(26):163~165
- 3 Tozaki T. Raman backscattering characteristics of the optical fiber and distributed temperature sensor. *Fujikura Technical Review*, 1990, 25~30
- 4 Lees G P, Leach A P, Hartog A H *et al.*. $1.64\text{ }\mu\text{m}$ pulsed source for a distributed optical fiber Raman temperature sensor. *Electron. Lett.*, 1996, **19**(32):1089~1090
- 5 Zhang Z. The signal analysis of distributed optical fiber Raman photon temperature sensor (DOFRTS) system. *Proc. SPIE*, 1996, **2895**:126~131
- 6 York-sensors documents, www.york-sensors.co.uk
- 7 Liu Jiansheng, Li Zheng, Zhang Qishan. Spatial resolution limit of a Raman distributed optical fiber temperature system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(12): 1673~1677 (in Chinese)

Physical Essentials and Design Considerations of Temperature Calibration for Distributed Optic Fiber Raman Temperature Sensing System

Liu Jiansheng Li Zheng

(Department of Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

(Received 2 August 2002; revised 23 September 2002)

Abstract: The temperature calibration has an important impact on the temperature accuracy, which is one of the two key performance parameters of distributed fiber optic temperature sensing systems. The physical essentials of temperature calibration is revealed and its effect on system temperature accuracy is analyzed. Some considerations and suggestions for practical temperature calibration design have been proposed.

Key words: nonlinear optics; optical fiber Raman thermometry; temperature calibration