

doi:10.3788/gzxb20154401.0112003

电气设备中远距离荧光测温技术研究

宋伟¹, 李东坚², 谢伟¹, 张文松², 寇晓阔¹

(1 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要: 为了实现对高压电气设备的非接触温度监控, 设计了中远距离(0~1.5 m)非接触荧光光纤测温系统. 该系统利用稀土荧光材料的荧光温度特性, 通过测量物体表面荧光物质的受激荧光寿命获得物体的温度信息; 通过增加聚光透镜和聚光锥罩, 提高探测器接收到的光能量. 实验获得荧光强度曲线及被测对象温度, 实现了对温度的非接触实时测量, 测量误差低于 1℃, 满足高压电气设备的非接触温度监控要求.

关键词: 光纤; 荧光; 温度测量; 非接触; 电力设备

中图分类号: TH83

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0112003-5

Research on Remote Fluorescent Temperature Measurement System

SONG Wei¹, LI Dong-jian², XIE Wei¹, ZHANG Wen-song², KOU Xiao-kuo¹

(1 Henan Electric Power Company, Zhengzhou, 450052, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: To realize the non-contact temperature monitoring of high voltage electrical equipment, a non-contact (0~1.5 m) fluorescence fiber temperature measurement system was designed. Using the relation between fluorescence and temperature of rare earth materials, temperature measurement was achieved by measuring the excited fluorescence lifetime of the fluorescent material which was attached on the object. The analysis indicates that the received light energy can be increased through adding a converging lens and a converging cone. In the experiment, the fluorescence intensity curve was obtained, and the temperature was aquired according to the relation of fluorescence lifetime and the temperature of the measured object. The measurement error is less than 1℃, ensuring its application in high-voltage environment.

Key words: Fiber; Fluorescence; Temperature measurement; Remote; Electric power equipment

OCIS Codes: 120.6780; 280.6780; 060.2370

0 引言

在电力领域,随着电流及电压的增加,电力设备的温度会持续升高.这种情况如果不加以监控,会导致产品的固有性能变坏,严重的会导致设备损坏、不能正常运行.因而需要对高压电缆等进行温度监控.电力设备对测温仪器的环境适应性要求比较高,同时要求其具有好的绝缘性,安装方便并且抗干扰能力强^[1].

目前高压电气系统常用的测温方法有热电阻(Pt100)、热电偶(高阻线)等电类传感器测温,压力式温度传感器和红外测温传感器等测温^[2].热电阻、热电

偶等电类传感器测温都是采用电子学原理进行测量,其数据传输都是用金属导线完成,必须近距离放置在高压电气设备附近.这样一来,传感器长期工作在强电磁干扰环境下,存在严重的干扰和自发热现象.同时还需要保证传感器长期处在稳定的高压绝缘状态,导致其在温度测量上存在着原理性的不足.红外式测温为非接触式的可视测温,主要通过测量物体的热辐射,经过标定来实现对被测物体温度的测量.这种测量方法需要知道被测物体的发射率,对背景噪音及其他热辐射源也有同样的相应要求.对环境的要求很高,容易受到高压电磁和环境温度的干扰.同时安装需要一个相

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61275134)资助

第一作者: 宋伟(1970—),男,教授级高工,博士研究生,主要研究方向电力系统测控技术. Email: songwei3378@163.com

收稿日期: 2014-05-27; **录用日期:** 2014-07-21

<http://www.photon.ac.cn>

对开放的空间以保证安装位置,对空间要求较高^[3].

荧光测温的基本原理是通过检测荧光物质受激后荧光发射与温度的关系来测量温度.因此测温只与荧光物质相关,无需现场标定.荧光测温属于相对测量,而红外测温属于绝对测量.常见的荧光测温有荧光强度型、荧光强度比型和荧光寿命型三种方式^[4].其中单纯的强度测量为绝对测量,对测量系统的要求较高,标定工作量较大,温度性较难保证.目前开发一般采用荧光寿命型测量方式.由于荧光物质的物理特性决定荧光时间,不受外部激励的波动、测量系统误差、光学系统传输效率、设备老化及测量对象的物理特性等影响.在电力设备等特种环境下有不可替代的优势.

和传统的测温传感器相比主要有以下优点:1) 耐高压:如常见的光纤芯材料石英的耐压参量为32kV/mm.通过耐压材料的封装可以很容易实现超高压设备的测量.2) 不受强电磁场、电场、微波干扰:光信号传输及荧光产生利用的是材料的光学特性,不受电信号干扰.3) 远距离传输:光信号可以远距离传输.4) 体积小:可以制造成很小的部件,便于在狭窄的环境,特殊空间环境下进行测量^[5-7].拥有以上特点的光纤传感荧光原理测温仪器非常适合在超高压电气设备温度监控中使用,能适应超高压设备的空间、电压和电流等要求,从技术原理上克服了一般高压电气设备测温的不足.

随着我国智能电网技术的发展,《高压设备智能化技术导则》^[8]中将光纤绕组测温技术已作为一个重要的在线监测项目.但对于敞开式变电站电流及电压型发热触点测温技术尚无规范.电力系统敞开式变电站的接头及绝缘装置温度较高,同时电压等级较高,一般为110~220 kV,常规设备无法对其进行近距离接触式温度监控,需要进行远距离测温,距离在0.1~2 m之间.本文设计了非接触的单点荧光测温装置对敞开式变电站设备进行测温.

1 测温系统基本原理

当光能辐照在荧光材料上,荧光物质会发出荧光.当辐照结束时,荧光材料会继续发出荧光,荧光发光的持续时间取决于荧光材料的特性,一些稀土类荧光物质在激励后发出的荧光,其强度或寿命特性与物质温度有很好的相关性,利用这一特性可实现荧光温度测量^[9-10].

根据荧光余辉理论,一般情况下,荧光物质的发光是由于能量高的光照射荧光物质激发出比其能量低的荧光.激发出的荧光强度随时间成指数规律衰减^[11],即

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式中 I_0 是 $t=0$ 时的荧光强度, I 为激发时间为 t 时间

的荧光强度, τ 为衰减常量.荧光寿命为荧光强度从最大减小到 $1/e$ 的时间长度,因而 τ 即为荧光寿命. τ 为时间的函数,其关系式为^[12](公式适用于系统选用的荧光材料)

$$\tau(T) = \frac{1 + e^{-\Delta E/kT}}{R_s + R_T e^{-\Delta E/kT}} \quad (2)$$

式中 T 为热力学温度, k 为波尔兹曼常量,其他的为常量.根据公式可以看到,荧光寿命只和温度有关,根据荧光寿命的变化就可以知道温度的变化.

式(2)中忽略了光谱的多峰效应和展宽效应.大部分荧光物质会出现多峰情况,这时荧光光谱特性为各种指数效应的叠加.由于荧光物质在不同的跃迁区域都可以产生荧光,假设有 n 个能级可以跃迁并产生光子(如图1所示),则在荧光光谱中会出现 n 个峰值,每

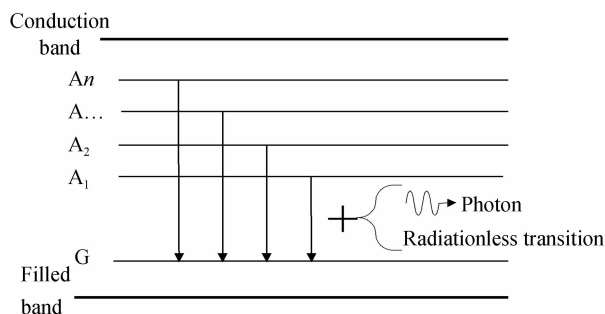


图1 多能级跃迁示意图

Fig. 1 Schematic of multilevel transition

个跃迁能级都会出现一个呈指数规律的荧光光谱.最后余辉总规律为^[13]

$$I = I_1 e^{-t/\tau_1} + I_2 e^{-t/\tau_2} + \dots + I_n e^{-t/\tau_n} \quad (3)$$

因此在选取荧光材料的时候需要刻意避免强多峰效应和峰间距离较小的荧光材料,并在光学设计中滤除多峰的杂光干扰.

荧光材料中的展宽效应指荧光谱线有一定的宽度,造成谱线宽的主要原因是多普勒展宽和碰撞展宽.展宽效应会导致曲线呈非指数形态,如果谱线足够窄的话,余辉可以近似为指数型.需要选择较窄谱线的荧光位置作为激发材料.并在计算温度是考虑展宽效应并进行处理.

目前荧光余辉曲线的数据处理方法有最小二乘法、积分面积比值法、l-m法和FFT法等^[14-16].设计采用最小二乘法进行温度测量,简单易行,在温度准确度要求不高的情况下能满足使用要求.

2 非接触测温系统

非接触荧光测温系统包括:电源模块、通讯模块、激励光源模块、光纤温度传感器(荧光物质及光纤)、荧光信号检测模块和数据采集模块等,组成原理如图2.

系统工作原理为:电源管理模块负责给全系统供电,控制中心控制激励光源输出.激励光源为脉冲光

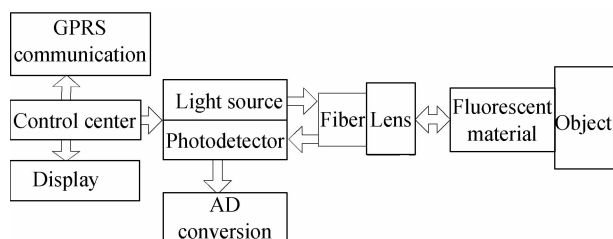


图2 非接触荧光测温系统原理

Fig. 2 Schematic of distance temperature measurement system

源,经光纤传输并通过准直透镜后照射到荧光物质上,其中荧光物质为一个较大的均匀的荧光带.荧光带激发的荧光经过同一个准直透镜聚集后进入光纤返回到探测器.探测器进行光电转换,再经放大采样后获得荧光强度信号.通过最小二乘法进行拟合计算荧光寿命,进而获得温度信息,最后通过GPRS将数据传递上报.

荧光物质的选取决定整个测温系统的温度测量范围、最低测量准确度、激励光源的选取、接收系统的灵敏度和方法.一般目前常见是掺杂 Nd^{3+} 、 Cr^{3+} 和 Er^{3+} 等稀土的荧光物质,各自有不同的光谱特性和温度特性.综合考虑光谱效率、吸收和发射光谱温度和灵敏度等因素,选取荧光物质.选取高的光谱发射效率可以降低激励光源的强度和接收器件的灵敏度,选取吸收和发射光谱均为可见光波段的荧光物质,可以保证光源在空气中和光纤中衰减较小,但不能选择紫外光谱.荧光物质尽量选取温度灵敏度较低的物质.实验中选取的物质荧光与温度的关系系数为 $5 \mu\text{s}/^\circ\text{C}$,激发波长为 430 nm ,激发荧光波长在常温下为 680 nm 左右.

由于设计的系统荧光物质裸露在大气中,需实现长距离测量.为了便于荧光材料在测量对象端面上的涂覆,选取粉末状荧光材料,表面处理为光滑状态.

荧光测温的荧光传输首先保证屏蔽外来杂光,其次滤除非荧光波长的光信号.如果有较强的杂光和其他信号叠加到探测器,会导致信号无法识别.设计中采用光学滤波法滤除多峰导致的杂光,选择峰宽较小的荧光物质保证光谱展宽效应最小,在采集前后进行本底处理,采用非线性校正法处理数据.在接收透镜结构上安装黑色镜筒,只接收探测荧光物质方向的入射光.镜筒方向不对准光源,结合窄带滤光片可以将背景杂光限制到一个极低的水平.由于入射杂光基本为大气散射光,因此能量有限.对接收系统而言,本底噪音的均方根(Root Mean Square, RMS)值远小于测量范围时不影响测量准确度.大气背景光的均值影响探测器的测量动态范围,虽然通过数据处理可以将本底扣除,但相对于测量系统不能有高本底.本底的最终大小依赖于镜头的接收角、安装位置、镜筒长度、天气和环境等因素,实验中通过标定得到最大本底值.

对于非接触荧光系统而言,激励光源在传输和接

收过程中会带来波面误差,一般荧光的余辉时间在 $10^{-3} \sim 10^{-8} \text{ s}$ 之间,将距离产生的波面到达时间差设定为 10^{-8} s ,则要求不同位置荧光波面误差为 3 m 以下,实际测量距离不大于 1.5 m ,因此可以忽略波面影响.

3 光学系统设计

非接触荧光测温的光学系统包括光源、透镜、光纤,聚光罩和荧光物质等,基本原理见图3.激励光源经汇聚透镜进入光纤,光纤输出后经准直透镜入射到荧光物质.荧光物质的激发荧光经准直透镜进入光纤,经传输后通过分光镜将荧光导入探测器.其中分光镜对激发波长的全透,对荧光波长的全反,从而实现两种光的分离.

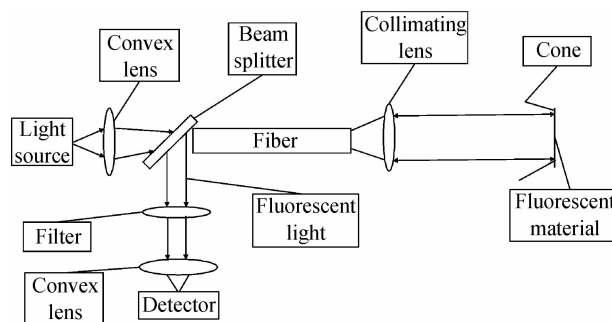


图3 非接触荧光测量光学系统

Fig. 3 Schematic of distance temperature measurement optical system

荧光物质被激发后,荧光会以散射方式出射,按照荧光受激发射原理,发射角度为 2π ,长距离接收时荧光能量损失很大,接收能量较小,无法实现有效探测.

对单光纤接触式测量在不同距离下进行模拟,模拟计算条件:光纤数值孔径 0.1 ,据此设置点光源,发散半锥角 5.8° ,能量 1 W ,设置荧光材料表面距离点光源 0.01 mm ,设置荧光材料表面为 100% 散射,光纤芯径 $62.5 \mu\text{m}$,据此设置能量探测器大小为 $\Phi 0.06 \text{ mm}$,设置能量探测器距离点光源 0.001 mm (实际应该重合).模拟条件及结果见图4.模拟计算时将荧光发射假设为散射模型中的高斯散射,通过Zemax软件进行光线追迹仿真,同等辐照情况下,在 0.01 mm 和

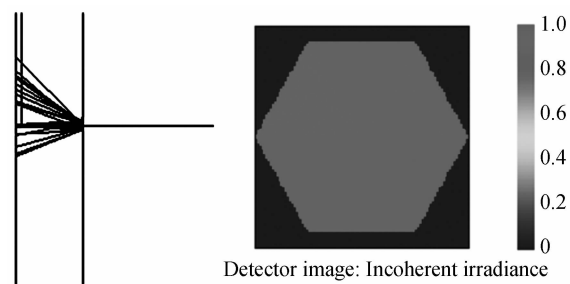


图4 单光纤探测器模拟示意图

Fig. 4 Single fiber detection

100 mm处光纤接收能量相差很大,结果见表 1.

表 1 接收能量比较

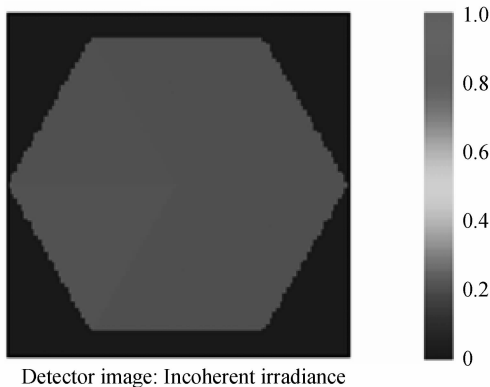
	Non-contact	Contact
Fluorescent area	Φ10 mm	Φ10 mm
Receive area	Φ1 mm	Φ62.5 μm
Distance	100 mm	0.01 mm
Energy	10 ⁻⁶	1

表中能量大小以近距离接触时光纤接收的能量为单位.可知,传统的近距离测量系统用于远距离测量时,接收的能量非常微弱.

为了提高接收能量,对测量系统进行优化,增加聚光透镜,聚光锥罩,优化光纤传输和聚焦透镜等条件.设置条件为:光纤数值孔径 0.1,据此设置点光源,发散半锥角 5.8°,能量 1 W,设计透镜 f_{43} 和 f_{87} (分别对应焦距 43 mm 和 87 mm),通过透镜将点光源发出的光汇聚到荧光材料表面,设荧光材料表面距离透镜 400 mm 和 1 300 mm,在荧光材料表面设计聚光锥罩,锥罩 100%反射,设置荧光材料表面为 100%散射,设置能量探测器大小为 Φ3 mm,设置能量探测器距离点光源 0.001 mm(实际应该重合).对距离为 400 mm 和 1 300 mm 的接收及荧光锥罩排列结构见图 5.探测器接收能量分析结果见图 6.



图 5 荧光带聚光锥罩和探测器接收光路
Fig. 5 Schematic of ray collection



Detector image: Incoherent irradiance

图 6 探测器接收能量分布

Fig. 6 Schematic of energy distribution on detector

探测器接收能量见表 2.根据探测器接收能量的计算结果,在 1 300 mm 处接收的能量为接触式测量能量的 1/9,如图 6,相对表 1 的结果有极大的提高.

表 2 改进后接收能量比较

Table 2 Simulation results with new system

	Distance 1	Distance 2	Contact
Fluorescent area	Φ10 mm	Φ10 mm	Φ10 mm
Receive area	Φ3 mm	Φ3 mm	Φ62.5 μm
Light source intensity	100	200	1
Distance	1 300 mm	400 mm	0.01 mm
Energy	0.1	0.2	1

备注:采用光纤和透镜组合实现照明,光纤数量和透镜焦距的设计与测量距离匹配.距离越远,光纤数量越少.

由分析结果可以看到,经过增加聚光系统和优化设计后,探测器接收到的能量明显提高.

4 算法分析与实验结果

在不加激励时测量背景信号值,采用多次测量平均获得本底为

$$B_{bd} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} B_i \quad (4)$$

加激励光源后荧光强度测量公式^[14]为

$$f(t) = A \exp(-t/\tau) + B \quad (5)$$

式中 B 表示本次测量的本底值, A 代表最大强度值.按照最小二乘法对获取的信号按照指数规律拟合,并计算强度变化为 $1/e$ 的荧光时间然后转换为被测对象温度.实际测量中测量起始点需进行位置标定,舍弃最前面的一部分点进行拟合,拟合过程为

将式(5)两边减去 B_{bd} ,再取对数,得到

$$F(t) = \ln[f(t) - B_{bd}] = \ln A - t/\tau \quad (6)$$

式中假定 $B - B_{bd} = 0$,可知 $F(t)$ 是关于 t 的线性函数.设测量获得的数据为 (t_k, f_k) ,其中 $t_k = k\Delta t$, Δt 为取样时间间隔, $f_k = f(t_k)$.为了计算 τ ,先将 (t_k, f_k) 转换为 (t_k, F_k) ,其中 $F_k = F(t_k)$,根据测量值 f_k 减去已知背景值 B_{bd} 获得.根据最小二乘法,这时可以用线性函数 $S(t) = a_0 + a_1 t$ 拟合曲线.并且有

$$\begin{pmatrix} (1,1) & (1,t) \\ (t,1) & (t,t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中

$$(1,1) = N, (1,t) = (t,1) = \sum_0^{N-1} t_k, (t,t) = \sum_0^{N-1} t_k^2$$

$$d_0 = (1, F(t)) = \sum_0^{N-1} F_k, d_1 = (t, F(t)) = \sum_0^{N-1} t_k F_k \quad (8)$$

将式(8)的计算结果代入式(7)即可计算出 a_0, a_1 的值,且 $\tau = -1/a_1$,此处 a_1 是负值.图 7 为一次测量的数据曲线图,横坐标为时间,纵坐标为归一化荧光强度.

测量中采用标定法在不同温度点测量荧光寿命,然后采用查表法进行荧光寿命和温度的换算.

采用恒温水槽进行标定,测量系统距离荧光带

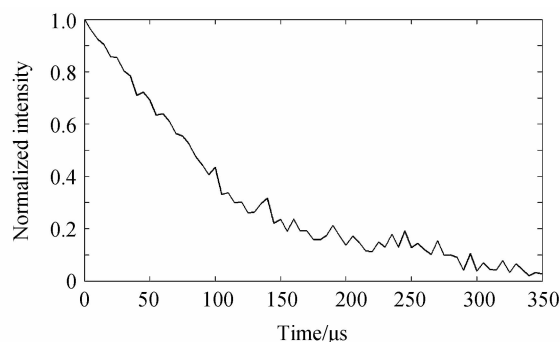


图7 单次测量数据曲线

Fig. 7 Single measurement data

10 cm,将荧光带(14 mm×14 mm)粘贴在一个铁片上,铁片置于水槽上方并与水接触,通过测温装置进行温度测量.测量结果见表3,从表3可以看出,测量获得的温度值相比标准值略低,随温度的升高测量误差增大,但总体测量误差不超过1℃,可以满足电力系统使用要求.实验中采用10 cm恒定测量距离,当距离从10 cm增加时,实验误差由负误差逐渐变为正误差.

表3 测量结果

Table 3 Measurement results

Standard thermometer/℃	Measurement results/℃	Error/℃
20.02	19.50	-0.52
30.03	29.60	-0.43
40.01	39.30	-0.71
50.02	49.40	-0.62
60.01	59.20	-0.81

5 结论

采用非接触荧光测温技术,通过计算荧光寿命实现对温度的间接测量.测量结果表明:温度取决于荧光材料的时间参量,与系统无关,在提高系统的可靠性和测量稳定性的同时,降低了对测量系统的要求.设计了激励光源、准直接接收透镜、光纤传输系统,荧光带和信号接收、放大、采样处理系统,解决了非接触荧光测温的技术问题并进行了实验验证,为高压电气设备监控提供了一种新方法.

参考文献

[1] JIN Zhen-dong, XU Zhen, JIN Feng. Summary and analysis of temperature measurement mode for domestic high voltage electrified equipment[J]. *Electrical Equipment*, 2007, **8**(12): 57-61.
金振东, 许箴, 金峰, 袁昌进. 国内高压带电设备测温方式综述及分析[J]. *电力设备*, 2007, **8**(12): 57-61.

[2] GAN Wei-bing, WANG Li-xin, ZHANG Cui. Distributed

optical fiber grating technology applied in cable temperature measurement[J]. *Laser and Infrared*, 2011, **41**(5): 577-580.

甘维兵, 王立新, 张翠. 分布式光纤光栅测温技术在线监测电缆温度[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(5): 577-580.

- [3] LI Yun-hong, SUN Xiao-gang, YUAN Gui-bin. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(9): 1336-1340.
李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(9): 1336-1340.
- [4] 廖延彪, 黎敏, 张敏, 等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009, 31-32.
- [5] SHARMA A, SCHULMAN S G. Introduction to fluorescence spectroscopy[M]. Wiley, John & Sons, Incorporated, 1999: 123-136.
- [6] MONZÓN-HERNÁNDEZ D, LUNA-MORENO D, MARTÍNEZ-ESCOBAR D. Fast response fiber optic hydrogen sensor based on palladium and gold nano-layers[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, **136**(2): 562-566.
- [7] LIU Li-hua, WANG Jun, XIN Li. Applied study and development of fiber-optic temperature sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003: 547-550.
刘丽华, 王军, 新力, 等. 光纤温度传感器的应用及发展[J]. *仪器仪表学报*, 2003: 547-550.
- [8] Q/GDW Z410—2010, 高压设备智能化技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [9] COLLINS S F, BAXTER G W, WADE S A, *et al.* Strain dependence of fluorescence from rare-earth-doped optical fibers: application to the simultaneous, co-located, measurement of strain and temperature [J]. *Composite Structures*, 2002, **58**(3): 373-379.
- [10] CASTRELLON U J, PAEZ G, STROJNIK M. Radiometric analysis of a fiber optic temperature sensor[C]. SPIE, 2002, **4486**: 164-169.
- [11] ROSSO L, FERNICOLA V C. Time and frequency-domain analyses of fluorescence lifetime for temperature sensing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**(3): 1-6.
- [12] 孙圣和, 王廷云, 徐影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000: 209.
- [13] TASHIRO Y, BIWA T, YAZAKI T. Calibration of a thermocouple for measurement of oscillating temperature[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**(12): 24901-24905.
- [14] SUN Wei-min, ZHANG Jian-zhong, YU Lei. Fitting method of fluorescence lifetime based on fast fourier transform arithmetic[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, **24**(6): 838-841.
孙伟民, 张建中, 于蕾. 荧光寿命的快速傅里叶变换拟合方法[J]. *中国光学快报*, 2004, **24**(6): 838-841.
- [15] SUN W M, ZHANG J Z. Measurement of delay time based on FFT[J]. *Optics and Laser Technology*, 2004, **36**(4): 323-326.
- [16] WADE S A, COLLIN S F. Strain-Independent temperature measurement by use of a fluorescence intensity ratio technique in optical fiber[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(18): 3050-3052.