

# 光纤电流传感器的实验系统与性能

廖延彪 杨雪郁 吴庚生 潘安培 陈国霖

(清华大学无线电电子学系)

## Experimental system of optical fiber sensor for current measurement and its performances

Liao Yanbiao, Yang Xueyu, Wu Gengsheng, Pang Anpei, Chen Guolin

(Department of Radio Electronics, Qinghua University, Beijing)

**Abstract:** An optical fiber sensor for current measurement has been constructed by using magneto-optical effect. In this paper the main problems have been discussed, such as selection and treatment of fiber, the structure of sensing head and the method of forming fiber coil, the design of detecting and processing system, the adjustment of the optical system etc. The measurement results of the experimental system are given as well.

### 一、引言

光纤电流传感器是把光纤缠绕在导线周围, 光纤既是信息的传输元件又是信息的敏感元件, 因此这种传感器的地面设备以外的部份就只是整根的光纤, 这不但解决了绝缘问题, 且具有抗电磁干扰、灵敏度高、测量动态范围大的优点, 具有广泛的应用前景。

### 二、基本关系式

因光纤材料的 Faraday 效应, 在长直导线上绕有  $N$  圈光纤时, 其偏振光的旋转角度  $\theta$  为:

$$\theta = VNI \quad (1)$$

式中  $V$  是 Verdet 常数。图 1 为实验系统简图。从波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器发出的激光束经起偏器  $P$  变成线偏振光, 由  $10\times$  显微物镜  $L$  耦合进低双折射单模光纤; 线偏振光经光纤传感头后再由  $10\times$  显微物镜  $L$  变成平行光, 最后经 Wollaston 棱镜后分成两束偏振面互相垂直的线偏振光分别由两个光电探测器接收。若  $J_1$  与  $J_2$  代表不同光电元件所接收的光强, 理论分析表明<sup>[1]</sup>,  $J_1, J_2$  与偏振面旋转角  $\theta$  的关系为

$$P = \sin 2\theta = \frac{J_1 - J_2}{J_1 + J_2} \quad (2)$$

因此, 测出  $P$  值即可直接求出导线中电流  $I$  的大小。

光纤的双折射已被证明是影响测量值  $P$  的主要原因。它包括光纤的固有双折射、弯曲双折射和外界条件(温度、压力的变化)引起的附加双折射在  $\delta \gg \theta$  时有

$$P = 2\theta \frac{\sin \delta}{\delta} \quad (3)$$

$\delta$  是光纤双折射引起的相移。选择  $\delta$  值较小的英国 York 公司生产的低双折射光纤用于本传感器。

### 三、检测处理系统

采用双路检测计算机数据处理方案<sup>[2]</sup>(见图 1), 经 Wollaston 棱镜分光后的两束光, 分别由两只光电探测器进行光电转换, 再经前置放大、和差运算放大器、除法器、滤波器后进入计算机, 计算机将模拟

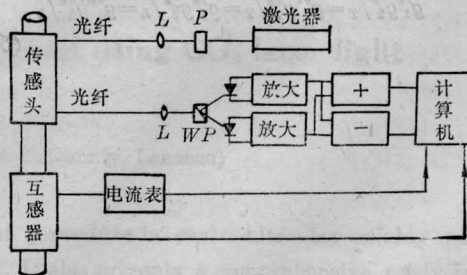


图 1 光纤电流传感器系统示意图

信号转换成数字量进行运算, 打印出待测电流的有效值。用这样系统的优点是可以提高整个系统的抗干扰能力和系统的灵敏度, 可以对误差进行自动修正以提高测量准确度和扩大线性范围。为了检查光纤传感器的测量结果, 在长直导线上同时用一个电流互感器(0.2级)和一个电流表测量导线上的电流值, 测量结果同时输入计算机, 以便进行实时比较。

#### 四、测量结果

1. 工频耐压试验。在大气压强条件下,  $P=1023.7$  毫巴, 温度  $t=12.5^{\circ}\text{C}$ , 加工频电压  $760.8$  kV, 加压时间为 1 分钟, 结果表明其具有优越的耐压能力。

2. 雷电冲击和操作冲击电压耐受试验。试验在户外进行, 雷电冲击电压和操作冲击电压均由  $6000$  kV 冲击电压发生器产生。对于雷电冲击、分别作了正、负极性的耐压试验, 对于操作冲击仅作了正极性的耐压试验。分别进行 15 次雷电冲击及操作冲击耐压试验, 均未观察到试品放电现象。

#### 3. 相角测量准确度的确定

相角误差是指母线电流的相位与光纤电流传感器输出波形的相位之间的差值。为了准确提取母线电流相位, 采用精密双级电流互感器、并配以 HEG2 型互感器校验仪。测量结果在电流  $0\sim 2400$  A 的范围内相角误差小于 6 分。因此, 此电流传感器完全可用于脉冲大电流测量。

4. 电流测量精度。在给定被测电流时, 电流测量精度取决于系统的等效 Verdet 常数的稳定性, 即  $I=V_{\text{eff}}NI$  中  $V_{\text{eff}}$  的稳定性。通过多次取值, 用  $V_{\text{eff}}$  的均方差  $\delta V_{\text{eff}}$  反映系统的稳定性。测量结果如下

$I$ (A)	$V_{\text{eff}}$ (分/A)	$\delta V_{\text{eff}}$ (分/A)	$\delta V_{\text{eff}}/V_{\text{eff}}$ ( $10^{-3}$ )
48	0.01547	2.841	1.84
100	0.01145	4.480	2.90
203	0.01539	3.955	2.57
299	0.01536	3.133	2.04
401	0.01530	2.89	1.89
505	0.01525	3.31	2.17
600	0.01521	1.81	1.19
700	0.01517	1.68	1.11
804	0.01510	1.06	0.70
900	0.01504	2.65	1.76
1000	0.01501	1.47	0.98
1102	0.01497	3.82	2.55
1200	0.01492	2.09	1.40

由上表可见, 本实验系统的测量精度优于  $0.3\%$ 。当电流  $I=1200$  A 时, 信噪比大于  $80$  dB。需要指出的是, 系统的最大等效 Verdet 常数等于  $0.0155$  分/A, 小于石英玻璃的理想值, 同时, 当电流增大时,  $V_{\text{eff}}$  不断减小; 当电流增至  $1200$  A 时,  $V_{\text{eff}}$  比最大值下降了  $3.5\%$ 。

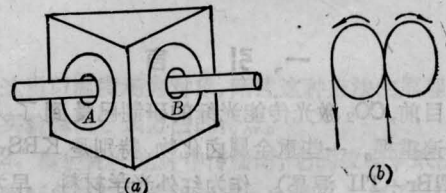
5. 电压对电流测量的影响。理想的电流表对电流测量应不受电压变化的影响。试验时, 母线对地加交流高压, 结果表明, 在  $100$  kV 电压以下, 光纤电流测量不受电压影响。

#### 五、对 $V_{\text{eff}}$ 下降及非线性现象的讨论

本实验系统传感头(图 2)的优点是能有效地抑制弯曲引起的双折射效应, 使总双折射可忽略不计。但是实验结果与描述  $\delta=0$  介质的(2)式有两点不符: 系统的等效 Verdet 常数为  $0.0155$  分/A, 比理想值小  $3.7\%$ ; 旋转角  $\theta$  与  $\sin^{-1}P$  存在非线性关系, 当被测电流为  $1200$  A 时, 偏离线性关系达  $3.5\%$ 。为解释以上两个现象, 我们对光纤传感头进行了理论分析, 其结果表明, 传感头用 8 字形绕法, 当电流为零时, 可完全抵消双折射影响, 而存在电流时, 其最后输出的信号应为

$$P = \frac{\sin \alpha}{2 \sin \alpha/2} \cdot \sin \left( 2NV I \frac{2 \sin \alpha/2}{\alpha} \right) \quad (4)$$

式中  $N$  为光纤的圈数,  $\alpha$  是单圈光纤弯曲双折射引起的相移。此式可作为设计不同应用范围和技术指标的传感头的理论依据。为了提高等效 Verdet 常数则必须减小弯曲双折射相移  $\alpha$ , 也就是必须增加传感头的几何尺寸: 为了提高灵敏度就必须增加圈数  $N$ , 但是圈数增加时线性动态范围就减小了。我们可从(4)式出发对各种技术要求进行综合考虑, 设计出合理的传感头。



(a) 光纤传感头结构 (b) 光纤绕法

图 2

由(4)式可以导出与实验相符的理论结果。由(4)式与(2)式联立, 其中  $\theta=V_{\text{eff}}NI$ , 消去电流  $I$  后可得

$$V_{\text{eff}} = \frac{2 \sin \alpha / 2}{\alpha} \cdot \frac{\arcsin P}{\arcsin \left( \frac{2 \sin \alpha / 2}{\sin \alpha} \cdot P \right)} \cdot V \quad (5)$$

当电流很小时即  $P \rightarrow 0$ , 容易由上式导出最大  $V_{\text{eff}}$  与理想值  $V$  之间的关系

$$V_{\text{eff}} = \frac{\sin \alpha}{\omega} \cdot V \quad (6)$$

这说明交叉绕制的传感头的等效 Verdet 常数比理想值下降了  $\sin \alpha / \alpha$  倍, 只与单圈光纤的感应双折射大小有关, 与光纤的总圈数  $N$  无关。因此, 采用交叉绕制的传感头可以大大减小弯曲双折射的影响, 获得与理想介质相近的测量灵敏度。实验中实际采用的传感头  $N=20$ ,  $R=0.06 \text{ m}$ ,  $\alpha=25.6^\circ$ 。代入

(6) 式解得  $V_{\text{eff}}=0.0156 \text{ 分/A}$ , 与实验结果  $V_{\text{eff}}=0.0155 \text{ 分/A}$  符合得很好。另外, (5) 式也可以纠正非线性现象。根据  $I=1200 \text{ A}$  时的测量值  $P=0.2068$ , 易从 (5) 式得  $V_{\text{eff}}=0.0156 \text{ 分/A}$ , 与  $I=0$  时的实验值  $V_{\text{eff}}=0.0155 \text{ 分/A}$  吻合, 从而完全克服了非线性误差, 拓宽了线性动态范围。

## 参 考 文 献

- 1 Smith A. M., *Appl. Opt.*, **17**, 52 (1978)
- 2 杨雪郁 *eta al.*, *中国激光*, **14** (5), 308~312 (1987)

(收稿日期: 1987 年 3 月 24 日)

# KRS-5 多晶光纤研制及 $10.6 \mu\text{m}$ 损耗

王风云 侯印春 权宁三 王人淑 钟鹤裕

(中国科学院上海光机所)

## Loss of polycrystalline KRS-5 fiber at $10.6 \mu\text{m}$

Wang Fengyun, Hou Yinchun, Quan Ningsan, Wang Renshu, Zhong Heyü  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

**Abstract:** Polycrystalline fiber KRS-5 with  $0.5 \sim 1 \text{ mm}$  in diameter and up to 10 meters long have been prepared by an extrusion method. The effects of fiber length and the features of fiber end on the measured value of fiber loss are studied. After comparing the losses of KRS-5 fibers prepared in different conditions, possible ways to further reduce the fiber are briefly discussed.

## 一、引 言

目前,  $\text{CO}_2$  激光传能光纤的研制已受到了人们的普遍重视。一些重金属卤化物, 特别是 KRS-5 晶体 ( $\text{TlBr} + \text{TlI}$  混晶), 作为红外光学材料, 早为人们所熟知。KRS-5 晶体透射波长范围  $0.5 \sim 40 \mu\text{m}$ , 不易潮解。制成光纤的可挠性好, 适于传输高功率  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  激光, 被认为是一种很有希望的材料。已用 KRS-5 晶体制成了多晶光纤<sup>[1]</sup>, 并试用激光加工和激光手术器件中<sup>[2, 3]</sup>。

KRS-5 晶体光纤,  $6 \mu\text{m}$  附近的理论最低损耗

为  $10^{-3} \text{ dB/km}$ , 比石英光纤的理论最低损耗值小两个数量级。在  $10.6 \mu\text{m}$  理论损耗值为  $10^{-1} \text{ dB/km}$ <sup>[4]</sup>。目前所获得的多晶光纤  $10.6 \mu\text{m}$  最低损耗为  $2 \times 10^2 \text{ dB/km}$ <sup>[2]</sup>, 单晶光纤<sup>[5, 6]</sup>为  $4 \times 10^2 \text{ dB/km}$ , 比理论值高三个数量级以上。为了监视和评定 KRS-5 多晶光纤质量, 为改善光纤制作工艺提供依据, 需正确测量并分析光纤在  $10.6 \mu\text{m}$  处的损耗。

## 二、实验及结果

KRS-5 多晶光纤的制作工艺和质量评定过程如下: 将  $\text{TlBr}$  和  $\text{TlI}$  粉末按一定比例混合均匀后装