

光纤电流传感器检测系统的分析

杨雪郁 廖延彪 吴庚生 潘安培

(清华大学无线电系)

提要: 本文给出了光纤电流传感器的两种检测方案: 单路检测系统和双路检测系统。比较了他们的各自特点。分析表明: 双路检测系统有较高的信噪比, 较强的抗干扰能力, 不仅可以探测交流大电流, 也可用于测量直流大电流, 是目前光纤电流传感器信号检测的较好方案之一; 单路检测系统具有结构简单, 调整方便, 对探测器、放大器无特殊要求等优点, 在其它光纤传感系统中(如光纤电压计)具有实用意义。

Analysis of detection system of fiber current sensors

Yang Xueyu, Liao Yanbiao, Wu Gengsheng, Pan Anpei

(Department of Radio Electronics, Qinghua University, Beijing)

Abstract: Two detection systems of fiber current sensors are described and compared in this paper. The analysis indicates that the double way detection system has higher level of SNR and stronger ability of suppressing disturbances than the single way detection system. It is not only used for measuring AC but also DC and is considered to be the better detection system of fiber current sensors. The single way detection system has advantages of simple structure, convenient adjustment and no special requirement for photodetector and amplifier. It is also useful in other fiber sensors such as fiber voltage meter.

一、光纤电流传感器原理

光纤电流传感器的基本原理是利用光纤材料的法拉第效应。即在磁场作用下, 光纤中传输光束的振动面会发生旋转, 旋转角为 Ω ,

$$\Omega = V \cdot \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = V \cdot N \cdot I \quad (1)$$

其中 $\mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ 为沿光纤长度方向上的磁场强度分量, V 为 Verdet 常数, N 为光纤绕的圈

数, I 为穿过光纤环的电流强度。其原理实验框图见图 1。图中 He-Ne 激光经过起偏器后成为线偏振光, 经透镜耦合到单模光纤中去, 光纤绕载流导体若干圈。光束从光纤另一端出射后, 经透镜和一检偏器进入探测器。我们可以通过检测光强的变化获得 Ω 信息, 从而求得电流。但是由于光纤存在双折射效应, 它必然要影响 Ω 测量。单模光纤中的双折射包括内部固有双折射和外部感应双折射两种。内部固有双折射是由内部残存的应力,

收稿日期: 1985年12月5日。

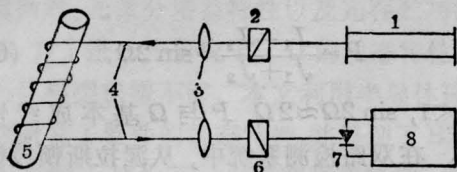


图1 光纤电流传感器方框图

- 1—He-Ne 激光器; 2—起偏器; 3—透镜;
4—低双折射单模光纤; 5—电流导体;
6—检偏器; 7—放大器; 8—带通滤波器

使光纤折射率变化,或光纤芯径不匀,其芯径的椭圆度引起的双折射。克服这类双折射的影响是在系统中采用扭光纤。这是一种在拉制光纤过程中旋转坯棒,所得到的一种超低双折射光纤,在任意长度上,光纤固有的相位延迟 $\delta < 1^\circ$,故其内部双折射影响可忽略不计。作为光纤电流传感器,光纤必须环绕载流导线,那么弯曲产生的感应双折射将不可避免。根据英国 Smith 公式^[1],每圈光纤的弯曲感应双折射 δ 与其弯曲半径 R 成反比。

$$\delta = 2\pi \times 0.245/R(\text{度/圈})$$

当 $R = 0.05 \text{ m}$ $\delta = 30.77^\circ/\text{圈}$

为了克服弯曲造成的感应双折射,我们将光纤绕在一个特制的框架上,如图2所示。使其缠绕平面每半圈交替改变 90° ,相当于快、慢轴交替变化,某半圈的双折射与另一半圈的双折射相抵消,使总的双折射相移极小或接近于抵消。我们采用超低双折射光纤,并且在特制的框架上将光纤做8字形交叉绕

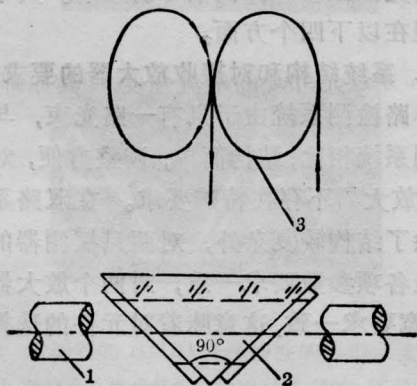


图2 线圈卷型器

- 1—电流导体; 2—线圈卷型器;
3—光纤绕在卷型器上的路线

法,构成光纤传感头。那么为了检测出电流磁场使光的振动面旋转的角度,则要求检测系统应完成如下功能:第一,该系统能将角度信息转化为光强信息,并且该强度信息与角度有确定的函数关系;第二,该强度信息与初始光强无关;第三,该检测系统具有最大的灵敏度和较高的信噪比,系统稳定可靠。根据以上原则,我们建立了两套典型的检测系统:单路检测系统和双路检测系统。

二、两种检测方案概述

单路检测系统的原理框图见图3。从光纤出射的一束光经检偏器后进入探测器。设检偏器方向和起偏器方向夹角为 ϕ ,入射光振幅为 E_0 ,出射光振幅为 E_1 ,其矢量图见图4。

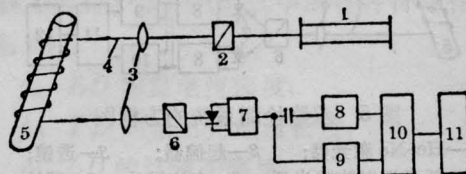


图3 单路检测系统方框图

- 1—He-Ne 激光器; 2—起偏器; 3—透镜;
4—低双折射单模光纤; 5—电流导体; 6—检偏器;
7—放大器; 8—通带滤波器; 9—低通滤波器;
10—计算机系统; 11—显示与打印系统

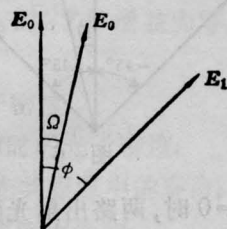


图4

当电流 $I = 0$ 时, $J_1 = |E_1|^2 = E_0^2 \cos^2 \phi$;
当电流 $I \neq 0$ 时,光的振动面转动 Ω 角,
 $I_1 = |E_1|^2 = E_0^2 \cos^2(\phi - \Omega)$;若 $\phi = 45^\circ$,
由 $\partial J_1 / \partial \phi = 0$ 可获最大探测灵敏度

$$J_1 = \frac{E_0^2}{2} (1 + \sin 2\Omega), \quad (3)$$

该式包含两项,第一项是直流项,表示直流光

强;第二项是交流项,含待测信息。该信号经接收、放大后,将其交流分量与直流分量分开,再做除法运算,

$$P_1 = \frac{\frac{E_0^2}{2} \sin 2\Omega}{\frac{E_0^2}{2}} = \sin 2\Omega \quad (4)$$

当 $\Omega \ll 1$, $\sin 2\Omega \approx 2\Omega$, P_1 与 Ω 基本成线性关系。由公式(1),可求得电流

$$I = \frac{1}{2NV} \arcsin P_1 \quad (5)$$

这些可由计算机完成。

双路检测系统的原理框图如图5所示。从光纤一端中输出的光,经渥拉斯顿棱镜分为两束,且两束光的振动方向与入射光的振动方向成 $\pm 45^\circ$,如图6所示。

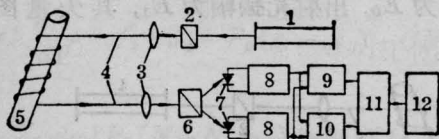


图5 双路检测系统的方框图

1—He-Ne激光器; 2—起偏器; 3—透镜;
4—低双折射单模光纤; 5—电流导体; 6—渥拉斯顿棱镜; 7—探测器; 8—放大器; 9—减法器;
10—加法器; 11—除法器; 12—信号处理系统

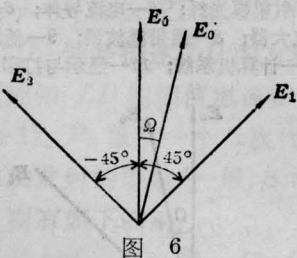


图6

当 $I=0$ 时,两路出射光强相等。

$$J_1 = J_2 = E_0^2 \cos^2 45^\circ = \frac{E_0^2}{2}$$

当 $I \neq 0$ 时,光的振动面旋转 Ω ,

$$J_1 = |E_1|^2 = E_0^2 \cos^2(45^\circ - \Omega) \\ = \frac{E_0^2}{2} (1 + \sin 2\Omega)$$

$$J_2 = |E_2|^2 = E_0^2 \cos^2(45^\circ + \Omega) \\ = \frac{E_0^2}{2} (1 - \sin 2\Omega)$$

$$P = \frac{J_1 - J_2}{J_1 + J_2} = \sin 2\Omega \quad (6)$$

当 $\Omega \ll 1$, $\sin 2\Omega \approx 2\Omega$, P 与 Ω 基本成线性关系。在双路检测系统中,从渥拉斯顿棱镜出射的两束光,通过各自的光电探测器和放大器后,产生了两路输出信号,再经过求差放大器和求和放大器,得到两个信号的差及和。最后做除法及其它有关运算,得到待测电流值及其它有用数据,这些由计算机完成。若考虑光纤双折射效应,则

$$P \approx 2\Omega \cdot \left(\frac{\sin \delta}{\delta}\right)^{[1]} \quad (7)$$

其中 δ 为光纤的相位延迟。根据公式(1),

$$I = \frac{P}{2N} \cdot \frac{1}{V' \cdot \left(\frac{\sin \delta}{\delta}\right)} = \frac{P}{2NV'} \quad (8)$$

其中 $V' = V \frac{\sin \delta}{\delta}$, V' 为系统等效 Verdet 系数。显然光纤的双折射,降低了探测灵敏度,使系统 Verdet 系数下降。

三、分析和讨论

上述两种检测方案有不同点,也有共同点。其共同点是:都是将角度信息转化为光强度信息;检偏器均以 45° 位置放置,以获得最大探测灵敏度;均采用除法器以消除激光器初始光强漂移对探测信号的影响。其不同点表现在以下四个方面。

1. 系统结构和对接收放大器的要求

单路检测系统由于只有一路光束,与双路检测系统相比,结构简单,调整方便,对探测器、放大器不存在特殊要求。在双路系统中,除了结构较复杂外,对两只探测器的灵敏度及各项参数要求一致,对两个放大器增益,带宽要求一致,这意味着对元件的选择较苛刻。

2. 信噪比

在单路检测系统中,根据公式(3),探测器产生的光电流为,

$$\dot{i} = D\alpha \left(\frac{E_0^2}{2} + \frac{E_0^2}{2} \sin 2\Omega \right) \quad (9)$$

其中 α 为受光面积, D 为光电器件转换效率 ($D = \eta q / h\nu$, η 为探测器的量子效率, ν 为激光频率, q 为电子电荷, h 为普朗克常数)。光功率 $P_w = E_0^2 \cdot \alpha$, (9) 式可简化为

$$\dot{i} = D \cdot \frac{P_w}{2} (1 + \sin 2\Omega) \quad (10)$$

其中第一项是直流光功率项, 第二项是交流信号项。直流功率项要产生散粒噪声。若考虑其它可能的噪声源, 那么经过增益为 G 的放大器和带宽为 B_0 的滤波器后, 在负载电阻 R_L 上的峰值功率的信噪比为,

$$\begin{aligned} (S/N)_{peak} &= \frac{D^2 G^2 P_w^2 \cdot R_L / 4}{2qG^2 \left(\frac{D}{2} P_w + DP_b + I_D \right) + 4kTB_0} \\ &= \frac{D^2 G^2 P_w^2 \cdot R_L / 4}{2qG^2 \left(\frac{D}{2} P_w + DP_b + I_D \right) + 4kTB_0} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, P_b 为外界光产生的背景噪声, I_D 为探测器的暗电流, $4kTB_0$ 为热噪声, T 为绝对温度, k 为玻尔兹曼常量。若只考虑量子噪声极限, 那么公式 (11) 可简化为,

$$(S/N)_{peak} = \frac{1}{4} \frac{D}{qB_0} P_w = \frac{\eta \cdot P_w}{4h\nu B_0} \quad (12)$$

(12) 式为单路检测系统的信噪比公式。

在双路检测系统中, 两路探测器的光电流分别为:

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &= D_1 \cdot \alpha_1 \left[\frac{E_0^2}{2} + \frac{E_0^2}{2} \sin 2\Omega \right] \\ &= D_1 \cdot \frac{P_{w1}}{2} (1 + \sin 2\Omega) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_2 &= D_2 \cdot \alpha_2 \left[\frac{E_0^2}{2} - \frac{E_0^2}{2} \sin 2\Omega \right] \\ &= D_2 \cdot \frac{P_{w2}}{2} (1 - \sin 2\Omega) \end{aligned} \quad (14)$$

若两路探测器、放大器完全对称, 即若 $\alpha_1 = \alpha_2$, 则 $P_{w1} = P_{w2} = P_w$; $\eta_1 = \eta_2$, 则 $D_1 = D_2 = D$ 。所以 $\dot{i}_s = \dot{i}_1 - \dot{i}_2 = D \cdot P_w \cdot \sin 2\Omega$ 。

若差放大器增益为 G , 在负载电阻 R_L 上, 峰值信号功率为,

$$R_L \cdot \bar{i}_s^2 = D^2 G^2 I_w^2 R_L \quad (15)$$

在量子噪声极限下, 噪声功率为

$$\begin{aligned} R_L \cdot \bar{i}_N^2 &= (\bar{i}_{N1}^2 + \bar{i}_{N2}^2) \cdot R_L \cdot G^2 \\ &= 2qB_0 G^2 R_L D \cdot P_w \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{所以 } (S/N)_{peak} = \frac{\bar{i}_s^2}{\bar{i}_N^2} = \frac{D \cdot P_w}{2qB_0} = \frac{\eta P_w}{2h\nu B_0} \quad (17)$$

公式 (17) 为双路检测系统的信噪比公式。与公式 (12) 相比, 双路系统的信噪比是单路系统的二倍。且信噪比与输入功率成正比。

3. 抗干扰能力

由于我们所测量的是高压大电流, 其频率为 50 Hz 的工频。周围环境的干扰是消除不掉的。我们用信号处理机对实验系统中的干扰信号的频谱进行分析表明, 主要存在的是低频干扰, 包括环境的振动、温度的变化, 特别是空间 50 Hz 的电场通过振动或光所进行的干扰, 另外还有中频段的声音干扰。而光纤对于许多物理量是非常灵敏的, 那么如何抑制干扰, 从背景噪声中, 只提取有用的电流信息, 这是评价这个检测系统品质的重要因素。在这一方面, 两种检测系统是有所不同的。

任何一个干扰, 我们可以表示为函数 $1 + Mf(t)$, 其中 M 为调制度。当它作用于单路检测系统时, 根据公式 (3), 探测到的信号为,

$$\begin{aligned} E_1^2 &= \frac{E_0^2}{2} (1 + \sin 2\Omega) [1 + Mf(t)] \\ &= \frac{E_0^2}{2} [1 + \sin 2\Omega + Mf(t) \\ &\quad + \sin 2\Omega \cdot Mf(t)] \end{aligned} \quad (18)$$

式中后两项为干扰项。

因为 $\sin 2\Omega \ll 1$, 所以 $\sin 2\Omega \cdot Mf(t)$ 是高阶项, 它是由两函数的差频项和和频项组成, 其幅度是原幅度的一半, 可忽略不计, $Mf(t)$ 干扰项将与有用信号迭加在一起, 无法区别。若测量要求允许, 探测的信号经一窄带滤波器 ($\Delta f = 50 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$), 那么可滤除 $\sin 2\Omega \cdot Mf(t)$ 项, 以及 $Mf(t)$ 中非 50 Hz 的干扰项, 那么这种方案对于 50 Hz 的干扰无法解决。

当干扰函数作用于双路检测系统时, 根据公式(6),

$$P = \frac{E_0^2 \sin 2\Omega [1 + Mf(t)]}{E_0^2 [1 + Mf(t)]} \quad (18)$$

其中分子项中只包含一项干扰项 $\sin 2\Omega \cdot Mf(t)$, 这是一高阶项, 可忽略不计, 若电路中加入一带通滤波器, 效果更好。分母项中所包含的干扰项 $Mf(t)$, 可通过低通滤波器消除。和单路检测方案相比, 双路检测方案, 其双路的共模抑制作用, 使分子中不包含 $Mf(t)$ 干扰项, 提高了系统的抗干扰能力。这对于检测 50 Hz 的工频电流是非常重要的。

4. 交流及直流大电流的探测

若用单路检测方案测量直流电流, 由于其交流项为零(根据公式 3), 而不能实现。所以它仅适用于交流电流的测量。双路检测方案既适用于交流电流, 也适用于直流电流的测量。

四、结 论

在光纤电流传感系统上, 用两种方案进行了测试。在输入光功率 0.5 mW, 交流电

(上接第 320 页)

大为采用高压的三极管对管组成, 以消除由于温度起伏带来的影响。高压电源的输出电压为 450 V 左右, 长期稳定度优于 0.1%。

二、稳定度的测试

采用由图 4 所示的装置测试功率稳定度。用 OPM-100 激光功率计(日本 ANDO 公司产品)测量仪器输出功率。经光功率计前置放大器(调制型)和射极跟随器, 把光信号转换成相应电压值输入到减法电路中去, 去除直流分量把变化量取出, 经放大后

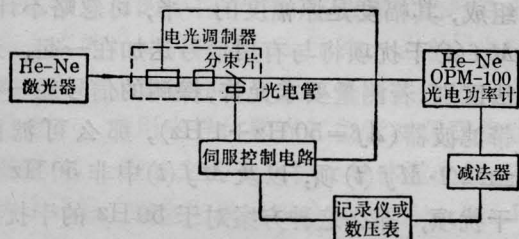


图 4 稳定度测试装置图

流为 1000 A 条件下, 双路检测系统的测量精度为 0.3%, 信噪比达 83 dB; 单路检测系统的测量精度 0.5%, 信噪比为 45 dB。以上分析表明, 双路检测系统有较高的信噪比、较强的抗干扰能力, 不仅可以探测交流大电流, 也可用于测量直流大电流, 是目前光纤电流传感器信号检测的较好方案之一。单路检测系统则具有结构简单, 调整方便, 对光电接收器和放大器无特殊要求等优点。在其它类型的光纤传感器中(如光纤电压计)有实用意义。我们认为对于利用光的偏振面变化来感知某些物理量的光纤或光学传感器, 这两种检测方案都具有实用意义。

参 考 文 献

- [1] A. M. Smith; *Optics and Laser Technology*, Feb. 1980, p. 25~29.
- [2] H. Aulich et al.; *Applied Optics*, 1980, 19, No. 22, p. 3735.
- [3] Shik-Chin Lin, T. G. Giallorenzi; *Applied Optics*, 1979, 18, No. 6, p. 916~919.
- [4] W. K. Platt; *Laser Communication Systems*, Wiley New York, 1969, Chaps. 8 and 10.
- [5] 范崇澄, 廖延彪; 《北京光学》, 1982, No 3, 17~24.

输入记录仪或数电压表, 以测量稳定光束的稳定度; 上述测量系统的不稳定度实测优于 $\pm 0.005\%$ 。同时从仪器“幅度及稳定度监视端”输出一个由采样光经仪器前置放大器放大的电压信号, 该电压信号的变化与采样光信号的变化有良好的对应关系, 而测量采样光的稳定度即是测量稳定光束的稳定度, 所以我们将仪器前置放大器的输出电压经射极跟随器后输入到数字电压表。把上述两种方法进行比较, 测量结果基本相符。由于后一种方法可避免激光功率计中光电接收器、运算放大器的温度漂移及非线性引起的误差, 提高了测量精度。测量时间为激光器开启预热半小时后, 任意取一小时进行测量。经大量实验表明, 仪器输出激光功率稳定度可优于 $\pm 0.05\%$ /小时。

(上海市测试技术研究所 袁海林 金承谦
1986年1月14日收稿)