

直流光电互感器信号检测技术的仿真研究

马大千¹, 刘君¹, 李岩松¹, 王倩¹, 刘娜娜¹, 李一卓²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 南阳市供电公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 针对提高直流光学电流互感器的输出信噪比展开研究。介绍了基于法拉第磁光效应原理的直流光学电流互感器, 分析了它的信噪特性, 指出了其噪声强信号弱、噪声与信号频谱相重叠的特点。在此基础上进行了基于调制解调的方法在提高OCT测量精度中的研究, 给出了测量系统框图和推导过程, 并用LabVIEW对整个过程进行了仿真。仿真结果证明这种方法能有效提高直流光电互感器的输出信噪比, 从而提高测量精度。

关键词: 调制与解调; 直流光学电流互感器; 法拉第磁光效应; 输出信噪比; LabVIEW

Simulation research of the signal detection of DC optical current transducer

MA Da-qian¹, LIU Jun¹, LI Yan-song¹, WANG Qian¹, LIU Na-na¹, LI Yi-zhuo²

(1.School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206,China;

2.Nanyang Power Supply Company, Nanyang 473000,China)

Abstract: Focusing on the research of improving the output signal to noise ratio of DC optical current transducer, this paper introduces the principle of DC optical current transducer which based on Faraday Magneto-optic effect. Then, it analyses the character of signal and noise, and researches the method of improving measurement accuracy based on modulate and demodulate. At the same time, it shows the principle figure and flow sheet. At last, the LabVIEW is used to simulate, and the result indicates this method improves the signal to noise ratio of DC optical current transducer.

Key words: modulate and demodulate; DC optical current transducer; Faraday magneto-optic effect; signal to noise ratio; LabVIEW

中图分类号: TM45 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0079-04

0 引言

基于法拉第磁光效应的直流光学电流互感器具有优良的绝缘性能和优越的性价比、抗电磁干扰能力强、不存在暂态磁饱和和铁磁谐振、动态测量范围大、频率响应宽、安全性好等优点, 相对于传统的电磁式直流互感器和有源型电子式电流互感器, 具有广阔的发展前景^[1,2]。但是目前在光学电流互感器的实用化道路上依然存在一些问题。

由于直流光学电流互感器的信号检测具有强噪声弱信号和噪声与信号频段相重叠的背景, 在这种情况下, 使用传统的滤波器无法消除其中的噪声, 也就无法得到高精度的输出, 为了克服这个问题, 本文在基于调制解调方法的基础上对提高直流光学电流互感器的输出信噪比展开研究。

1 直流光学电流互感器测量原理^[3]

直流光学电流互感器是基于法拉第磁光效应来

进行直流电流的测量的。在光学各向同性的透明介质中, 外加磁场H可以使介质中沿磁场方向传播的线偏振光发生旋转, 这种现象称之为Faraday磁光效应, 如图1所示。

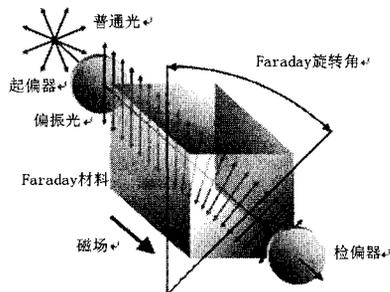


图1 法拉第磁光效应的原理图

Fig.1 Faraday magneto-optic effect principle

根据法拉第磁光效应, 一束线偏振光沿磁场方向通过Faraday材料, 光的偏振面会发生旋转, 旋转角度 θ 由式(1)决定:

$$\theta = V \int_L H \cdot dl \quad (1)$$

式中: V 是材料的费德尔常数; H 为磁场强度; l 为光在材料中通过的路径。

当磁场 H 是由于待测载流导体的电流 i 产生, 且光行进的路线围绕载导体闭合时, 由安培环路定律可知:

$$\theta = V \oint_L \bar{H} \cdot d\bar{l} = V \cdot i \quad (2)$$

因此只要测量出 θ 角度, 即可测出电流 i 。磁光玻璃中的出射光进入光电探测器后, 转变为可测的电信号进行信号处理, 在这个过程中产生了内部噪声。

2 直流光电互感器信噪分析

影响光学电流互感器的噪声主要来源于两个方面: 系统外部的噪声, 通常由电、磁、机械、杂散光等因素引起, 如电源 50 Hz 干扰等, 但该类干扰多具有一定规律性, 采取适当的屏蔽、滤波、远离噪声源等措施可以将其减小或消除; 另一种噪声是系统内部的如光电探测器、放大器等元器件的物理过程产生的固有噪声, 该类噪声具有随机性, 不能完全消除, 只能根据其统计规律采用微弱信号检测的方法予以控制。其中影响准确度的一个主要原因是 OCT 的光电检测器件内部产生的噪声。

2.1 光电探测器中的噪声分析

当前电力系统光学电流互感器中主要用光伏效应的 PIN 光电二极管, 其噪声主要包括器件中光生电流的散粒噪声、暗电流和器件的热噪声、 $1/f$ 噪声。

2.1.1 热噪声^[4]

一般电子学系统的热噪声为白噪声频谱。由统计理论推导出热噪声电流均方值 $\overline{i_n^2} = \frac{4kT\Delta f}{R}$ 和电压均方值 $\overline{U_n^2} = 4kT\Delta fR$, 由此可见热噪声的电压和系统的通频带 Δf 成正比。在保证有用信号无失真地通过的条件和器件允许的情况下, 使检测系统的通频带尽量小或降低温度, 可以降低热噪声。

2.1.2 散粒噪声

散粒噪声功率为 $\bar{i} = 2e\bar{I}\Delta f$, 其中 e 为电子电荷, Δf 为探测器工作带宽。散粒噪声正比于噪声带宽的平方根, 与频率无关, 也是白噪声, 因直接起源于电子的粒子性, 与 e 直接有关。

2.1.3 $1/f$ 噪声

电流通过具有缺陷、晶格缺陷的元器件电阻体时产生了闪烁噪声 (或 $1/f$ 噪声)。

$1/f$ 噪声特点是噪声功率谱密度与频率成反

比, 而近似与元器件中电流的平方呈正比。电流噪声的均方值可表示为 $\overline{i_{n_i}^2} = K_1 \frac{I^b \Delta f}{f^a}$ 。

$1/f$ 噪声主要出现在 1 kHz 以下的低频区, 频率越低噪声的功率谱密度越大, 因此又叫做低频噪声, $1/f$ 噪声的幅度分布服从高斯分布。当频率高于某一数值时, 与热噪声和散粒噪声这些白噪声相比可省略 $1/f$ 噪声。在实际使用中采用较高的调制频率可避免或大大减小 $1/f$ 噪声的影响。

2.2 直流光电互感器信噪特性分析

直流 OCT 的测量电流是频率为 0 Hz 的直流电流, 由 OCT 噪声的产生机理可见, OCT 噪声是随机性极强的随机信号, 前后产生的噪声是互不相关的; 同时从噪声机理和试验中发现, OCT 中对测量准确度影响较大的噪声大多集中于几十到几百赫兹的频段内, 频率在 1 kHz 以下^[3], 正好处于信号的频段之中; 另一方面在测量小电流时通过光电探测器叠加在基本光强上的有用电压信号幅度非常小, 通过放大器放大信号幅度的同时也放大了噪声, 而且还附加一些额外的噪声, 例如放大器的固有噪声及各种干扰。因此传统的滤波器和放大器不能用来滤除噪声, 只能作为辅助设备应用在电路设计中, 而只有在有效抑制噪声的条件下增大微弱电压信号的幅度才能提取出有用信号。

3 用调制解调的方法进行微弱信号检测

在微弱信号检测中, 为了便于区别信号与噪声, 往往给测量信号赋予一定特征, 即进行调制, 将被测信号进行频谱迁移, 然后再用与调制信号同频的信号进行解调得到测量信号。

由于偏振光的偏转角是不能被直接测量的, 因此, 利用马吕斯定律 (一束光强为 J_0 的线偏振光, 透过检偏器以后, 透射光的强度为 $J_1 = J_0 \cos^2 \theta$, 式中 θ 为线偏振光的光振动方向与检偏器透振方向间的夹角) 把不可测的偏转角信号转换为可测的偏振光的光强信号。为了使检偏器出射偏振光的光强获得最大, 通常将起、检偏振器夹角设定为 $\frac{\pi}{4}$, 根据马吕斯定律可得:

$$J_1 = J_0 \cos^2(45^\circ + \theta) = \frac{1}{2} J_0 (1 + \sin 2\theta) \quad (3)$$

由于法拉第旋转角很小, 只有几度, 式 (3) 就变成以下形式:

$$J_1 = \frac{1}{2} J_0 (1 + 2\theta) \quad (4)$$

将式 (2) 代入到式 (4) 可得:

$$J_1 = \frac{1}{2} J_0 (1 + 2V \cdot i) \quad (5)$$

出射光进入光电探测器后转换为电压信号, 同时产生了内部噪声。鉴于信号与噪声的频段相重叠、噪声强信号弱的特点, 无法直接用传统的滤波器来滤除噪声。在这种情况下, 采用调制解调的方法对直流信号进行频谱迁移, 将其频率迁移到噪声的频段之外, 用高通滤波器滤除低频噪声, 对通过的直流信号进行解调, 再用低通滤波器滤除其高频成分, 输出部分为一直流。测量系统框图如图 2 所示。

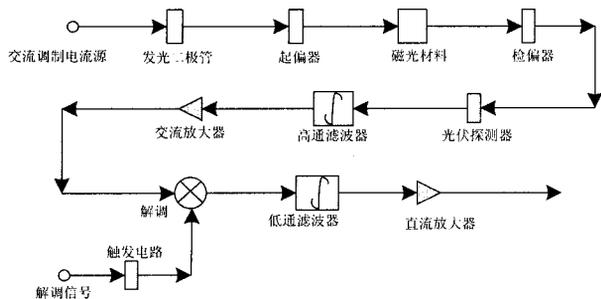


图 2 基于法拉第磁光效应的直流光电互感器测量系统

Fig.2 DC optical current transducer measurement system based on Faraday magneto-optic effect

为使发光二极管发出交流调制光信号, 设计了交流调制电源来触发发光二极管进行交流调制。调制信号 $s(t) = 1 + \sin \omega t$, 取调制频率 $f = 20$ kHz, 远离噪声的频段。从检偏器出射的光信号为:

$$J_1 = J_0(1 + \sin \omega t)(1 + 2V \cdot i) = J_0 + 2VJ_0i + J_0 \sin \omega t + 2VJ_0i \sin \omega t \quad (6)$$

光信号进入光电探测器后引入了低频噪声, 用高通滤波器滤去其中的低频成分, 同时也滤除了低频噪声, 取高通滤波器截止频率为 $f = 7000$ Hz, 通过的为含有直流信息的量:

$$s(1) = J_0 \sin \omega t + 2VJ_0i \sin \omega t \quad (7)$$

对 $s(1)$ 进行解调, 取解调信号 $r(t) = \sin \omega t$, 与调制信号同频, 可得:

$$s(2) = s(1) \cdot r(t) = -\frac{1}{2}J_0 \cos 2\omega t + \frac{1}{2}J_0 - VJ_0i \cos 2\omega t + VJ_0i \quad (8)$$

用低通滤波器滤除 $s(2)$ 中的高频项, 取低通滤波器截止频率 $f = 50$ Hz, 可得输出:

$$s(3) = \frac{1}{2}J_0 + VJ_0i \quad (9)$$

由式 (9) 可看出, 输出为一直流, 其中 $s(3)$ 和 J_0 可测得, V 为一常数, 根据选用的材料不同而有不同的值。可知直流电流与 $s(3)$ 存在线性关系, 通过这种关系即可求得直流 i 。

4 基于 LabVIEW 的仿真

用 LabVIEW 对上述测量过程进行仿真, 程序的框图和前面板如图 3 所示。

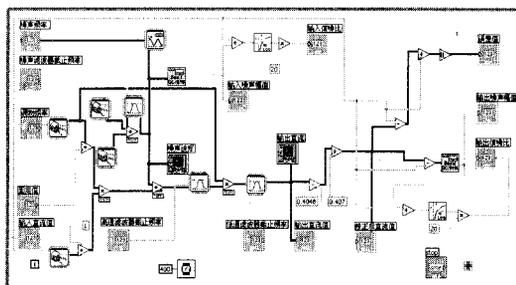


图 3 LabVIEW 仿真程序框图

Fig.3 LabVIEW simulation block diagram

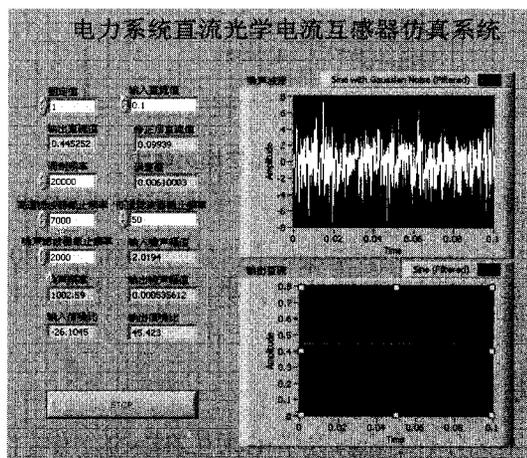


图 4 LabVIEW 仿真的前面板

Fig.4 LabVIEW simulation front panel

在仿真中, 模拟了真实的直流光电互感器运行环境, 采用噪声滤波器将噪声控制在 1 kHz 以下。根据观测, 当高通滤波器选择不同的截止频率时, 输出直流值与输入直流值呈现不同的线性关系, 设 $y = kx + b$, 式中 y 为输出直流, x 为输入直流, k 为系数, b 为常数。对于不同的截止频率下其关系如表 1 所示。

表 1 输入、输出直流的线性关系

Tab.1 Output and input of DC linear relationship

高通滤波器截止频率/Hz	7000	8000	9000	10000	11000
k	0.407	0.374 4	0.34	0.297	0.248
b	0.404 8	0.374 3	0.338 5	0.297 9	0.251 2

通过这种线性关系对输出电流进行修正, 即对于仿真中输出的电流值 y , 根据这种线性关系, 反推出输入电流 x , 再与输入的电流值进行比较分析。

经研究发现，当高通滤波器的截止频率选取不同的值时，修正后的直流值与输入直流值的误差维持在 0.2 以内，满足国家规定的标准。对不同频率下的输入、输出噪声进行了测量，测量结果显示，经低通滤波器后输出噪声幅值明显减小。

经过测量，得到噪声有效值在 2.16 左右，针对直流光学电流互感器弱信号强噪声的特点，选择了高通滤波器截止频率在 7 000 Hz 时 0.01~0.1 A 间的十个输入电流值对输入信噪比和输出信噪比进行测量，得到的信噪比曲线如图 5 所示。

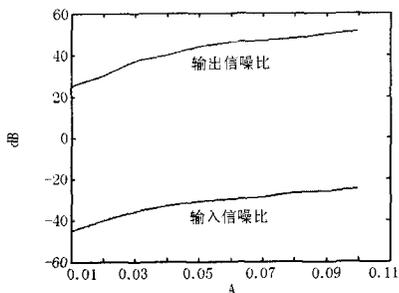


图 5 输入、输出信噪比曲线

Fig.5 Output and input curve of signal to noise ratio

由图可见，信噪比有了明显的改善，由-40 dB 左右提高到了+40 dB 左右，噪声得到了滤除，信号得到了增强。

5 结论

本文分析了直流光学电流互感器的信噪特性，针对其强噪声弱信号以及噪声与信号频谱相重叠的特点，对直流光学电流互感器的微弱信号检测问题展开研究。采用了调制解调的检测方法，给出了系统框图和推导过程，并用 LabVIEW 对检测过程进行了仿真，仿真结果证明这种方法能够有效除去噪声、提高直流光电互感器的输出信噪比，可以应用于直流光学电流互感器的进一步研究中。

参考文献

[1] 尚秋峰, 王仁洲, 杨以涵. 光学电流互感器及其在电力系统中的应用[J]. 华北电力大学学报, 2001,28 (2): 14-18.
SHANG Qiu-feng, WANG Ren-zhou, YANG Yi-han.

Optical Current Transducer and Application in Electrical Power System[J]. North China Electric Power University Journal, 2001, 28(2): 14-18.

[2] 郭志忠. 电子式电流互感器研究评述[J]. 继电器, 2005, 33 (14): 11-14.
GUO Zhi-zhong. Electronic Current Transducer Research Commentary[J]. Relay, 2005, 33(14): 11-14.

[3] 李岩松. 高精度自适应光学电流互感器及其稳定性研究(博士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
LI Yan-song. High Accuray Optical Current Transducer and The Steady Research, Doctoral Dissertation[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.

[4] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
GAO Jin-zhan. Detection of Weak Signal [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[5] 马凤鸣, 刘鸣, 杨文敏, 等. 信号调制解调实验设计[J]. 实验科学与技术, 2006, 6 (3) .
MA Feng-ming, LIU Ming, YANG Wen-min, et al. Signal Molduate and Demoduate Experiment Design[J]. Experiment Science and Technolgy, 2006, 6(3).

[6] Bishop R H.Labview7 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Bishop R H. Learning with LabVIEW 7 Express[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

[7] Horowitz P,Hill W.电子学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Horowitz P,Hill W. Electronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

收稿日期: 2008-09-18; 修回日期: 2008-11-10
作者简介:

马大千 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析运行与控制以及光学技术在电力系统中的应用;
E-mail: mdq1227@163.com

刘君 (1970-), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析运行与控制以及光学技术在电力系统中应用;

李岩松 (1970-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析运行与控制以及光学技术在电力系统中应用。