

基于 FPGA 的全光纤电流互感器控制电路设计分析

The Controlling Circuits Design Based on FPGA's All-Optical Fiber Current Transformer

梁敦 供稿

摘要：电流互感器是高压电网检测的主要设备，既为电能的计量提供参数，也为继电保护提供动作依据。本文介绍利用 FPGA 实现精密时序控制的同时，实现非常复杂的信号处理算法，并以 FPGA 为核心器件完成光纤电流互感器信号检测和控制的控制电路设计，利用该电路控制光纤电流互感器传感头进行电流检测和标定。

关键词：FPGA（现场可编程门阵列）、光纤、电流互感器、DSP（数字信号处理芯片）、检测电路、控制电路

中图分类号：TM4 文献标识码：B 文章编号：1606-7517（2016）04-4-138

1 引言

电流互感器作为高压电网检测的主要设备，不仅为电能的计量提供参数，而且还为其继电保护提供动作的依据。近年来，国家智能电网和特高压电网发展迅速，以致使得传统的电磁式电流互感器检测方法不断暴露出其重大缺陷，例如高电压等级的绝缘极为困难，更高电压下容易磁饱和而导致测试精度下降等等问题。为此，引入了光纤电流互感器，因其具有抗电磁干扰能力强、绝缘可靠、测试精度高、结构简单和体积小等等诸多优点，所以是当前的热门研究项目。FPGA 作为光纤电流互感器的核心部件，其检测和控制电路对电流的检测精度和范围具有非常重要的影响。

目前，实现检测和控制电路的设计主要有两种方案：一种方案是以数字信号处理芯片（DSP）为核心。由于 DSP 的速度越来越快，使得 DSP 成为很多数据处理和信号检测方案的首选，但在时序控制方面，它存在缺陷。因为时序控制精度和速度直接影响光纤电流互感器的检测精度，所以这种方案对控制精度的提高有限。另一种方案是以现场可编程门阵列（FPGA）和 DSP 为核心器件，结合两者的优点，利用 FPGA 来完成系统时序控制。DSP 实现各种数字信号处理算法，虽然可以获得非常高的控制精度，但系统结构相对复杂，使可靠性降低。然而，随着 FPGA 技术的

发展，它不仅被用作进行精密时序控制，而且可以实现复杂的数字信号处理功能。本文介绍在利用 FPGA 来实现精密时序控制的同时，实现非常复杂的信号处理算法，并以 FPGA 为核心器件完成光纤电流互感器信号检测和控制电路设计，并利用该电路控制光纤电流互感器传感头进行电流测试和标定。试验结果表明，该系统的控制精度达到 0.2S 级测量准确度的要求。

2 全光纤电流互感器信号检测与控制原理

全光纤电流互感器传感技术是利用法拉第效应来实现电流检测的：当一束偏振光线通过处于磁场中的物质时，该偏振光束的振动面会发生一定的旋转，从而可以通过对该旋转角的测量来获得磁场及产生磁场的电流信息，其中振动面的旋转角可由以下式（1）得出：

$$\varphi = V \int H dl \quad (1)$$

式中， φ 为磁致法拉第偏转角； V 为光纤的 Verdet 常数； H 为磁场强度； l 为光与磁场之间相互作用的距离。

法拉第效应的本质是磁致圆双折射，其定义可解释为：线偏振光可以分解为两束旋转方向相反的圆偏振光（左旋和右旋），外加磁场使得物质对这两束正交圆偏振光的折射率形成差别，导致它们在物质中的传播速度不再一致；这

两束圆偏振光在传播一段距离后会产生一定相位差 $\Delta\varphi_s$ ，使得对应的线偏振光的偏振面发生旋转；通过测量该相位差就可以获得磁场及产生磁场的电流信息，同时可以证明该相位差 $\Delta\varphi_s$ 和法拉第旋转角 φ 之间的关系为： $\Delta\varphi_s=2\varphi$ 。

如果光路围绕通电导体闭合，且在磁场 H 仅由穿过传感光纤圈的导体中的电流产生时，可以利用式 (1) 和安培环路定律得到：

$$\Delta\varphi_s=2VNnI \quad (2)$$

式中， $\Delta\varphi_s$ 为磁致法拉第相位差； V 为光纤的 Verdet 常数； N 为光束环绕导体的次数； n 为传感光纤圈中导体的根数； I 为单根导体中通过的电流。

由式 (2) 可以看出，两束正交圆偏振光受法拉第效应影响后产生的相位差大小与光束环绕导体的次数 (N) 和穿过传感光纤圈的总电流大小 (nI) 成正比。由于光束绕导体的次数已知，所以，只要测出 $\Delta\varphi_s$ ，即可计算出待测电流的大小。

3 信号检测与控制电路设计

本文设计的信号检测与控制电路的总体框图如图 1 所示。其工作原理与过程为：光纤传感头将携带有相位差信息的光信号输入到光电探测器（相位差与光电探测器输出信号幅度成正比）；光电探测器输出的电压信号首先进行隔直流处理，再经过放大和滤波后，经 A/D（模/数转换器）转变为数字信号，然后送入基于 FPGA 的数字信号处

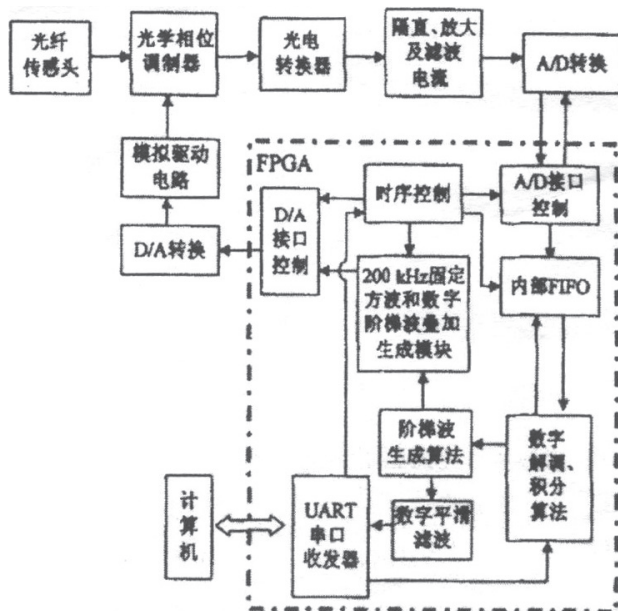


图1 信号检测与控制电路框图

理单元。在 FPGA 内进行数据解调、积分和滤波处理，并由阶梯波生成算法计算出阶梯波台阶的高度之后，该阶梯波与固定周期调制方法在时序控制单元控制下叠加，再经 FPGA 控制的 D/A（数/模转换器）转换后形成模拟电压波形来驱动相位调制器。到此即完成了系统的一次闭环反馈。此外，阶梯波台阶高度的数据经数字滤波后由异步串行收发器 (UART) 传输到控制计算机；由于该阶梯台阶高度与待测电流大小有关，上层软件通过简单的处理就可以得出被测电流的数据。整个系统的时序控制在 FPGA 内完成，而且要求方波调制，A/D 采集、数字阶梯波反馈、数据输出等的时序控制具有严格的同步关系。

3.1 前置放大器及滤波电路设计

由于光电探测器输出信号比较弱，而且含有较高频率的噪声信息，故需要对它们进行放大并滤波处理之后，才能进行后续的 A/D 转换及量化为数字信号。因此，前置放大器及滤波电路对有用信号的放大和对噪声抑制的能力会影响后续测量的精度。前置放大电路采用的是运算放大器 AD8130，该芯片具有非常高的共模抑制比，特别适用于微弱信号放大中需要低噪声、低谐波失真和高共模抑制比的应用。光电探测器输出的交流有效方波信号频率为 200kHz 左右，为保证该方波信号无失真地通过后端滤波电路，该滤波电路的高频截止频率必须以不损失 20 倍的方波基频信号的谐波设计，同时为避免高频噪声进入后端采样量化模块；高频截止带宽不能太宽，本设计采用 4MHz 带宽的 π 型滤波器来实现前端滤波。

3.2 数据采集电路设计

为保证 0.2S 级（即千分之二）测量准确度，A/D 转换位数需要达到 10 位以上。此外，为了保证对 200kHz 的方波信号每个周期高低电平采样次数，可以通过累加求平均数来提高采样精度，从而需要在每个周期内的方波高低电平分别进行 20 次以上采样后求出平均数，这就要求模数转换器采样率大于 8MS/S，设计中保留一定余量，采用了量化位数 14 位，采样率 20MS/S 的模数转换器 AD9248 模块。该芯片采用多级的带有输出错误纠正逻辑的差分流线结构，集成了两个高性能采样保持放大器和一个基准电压源，只需要提供控制时钟，其转换数据在 7 个时钟频率数之后自动出现在数据端口，为此，用于精密时序控制场合非常方便。

3.3 FPGA控制电路设计

FPGA 是光纤电流互感器控制电路实现信号检测与闭环控制的核心器件,如图 1 所示。其主要功能是负责产生整个控制系统的控制时序;完成 A/D 采集控制及数据读取、存储;对采集到的数字信号按照预定的解调和积分算法进行处理,将处理后的数据在发送到阶梯波生成算法的同时,经滤波处理后传到 UART 串口控制模块,完成与计算机的数据通信;此外,还要将阶梯波生成算法产生的数据与方波数据叠加后控制 D/A 转换器输出相应的模拟信号。FPGA 控制时序如图 2 所示,电路上电复位后,FPGA 程序加载并对外围 A/D、D/A 以及其它程控电路与接口初始化。FPGA 内部时序控制模块产生周期为 $5\mu\text{s}$ 的调制方波。该调制方波通过 D/A 控制接口输出到 D/A,产生同样周期的模拟方波信号并控制后端光调制器,以产生 $\pm\pi/2$ 的相移,确保前端光纤传感部分的相位检测灵敏度最高。模数转换器前端的输入信号是含有相位差信息的交流信号,该信号的高低电平差值与相位差成正比。通过检测该信号的高低电平差值就可以间接获得当前的相位差值,从而根据前面所述理论获得对应的电流大小,该信号周期与方波周期一致。

FPGA 通过时序控制单元来控制 A/D 转换器在每个方波周期内对该信号高电平和低电平分别进行多次采样,并求出平均值后相减,以获得该信号的解调信息即相位信息。由于前端光纤传感部分的相位差为 0 时表明实现一次闭环控制,因此,上述解调出的相位信息需要经过阶梯波生成

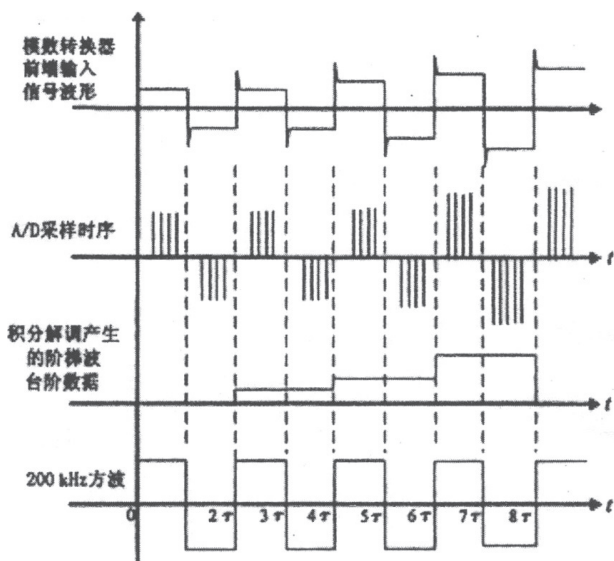


图2 FPGA闭环控制时序图

算法,以将相位差信息转换成阶梯波台阶数据,再经过后端 200kHz 固定方波和数字阶梯波叠加生成模块,将该台阶数据与方波数据累加输出到 D/A 转换器,D/A 转换器输出模拟信号驱动控制相位调制器来产生抵消上述检测到的相位差信息,形成一次闭环控制。上述设计时,应该设计阶梯波累加判别程序,当阶梯波累加数据值超过驱动相位调制器产生 2π 相移时,应该减去相位调制器产生 2π 移相所对应值后再累加。由于该阶梯波台阶的高度反映了被测电流引起的相位差值,所以该值与被测电流也成线性关系,可以将该值经数字平滑滤波后,由 FPGA 内部设计的 UART 通信接口传输到上层控制界面用于计算当前被测电流的大小。

3.4 数模转换及驱动电路设计

这一部分的功能是把 200kHz 固定方波和数字阶梯波叠加生成模块所输出的数字信号转变为模拟电压信号,经过功率驱动部分的放大和幅度调节控制相位调制器(在 D/A 满量程输出时,产生的模拟电压值为相位控制器半波电压的两倍),从而在光纤传感环中产生一个附加的反馈相移,抵消掉本次闭环控制周期内检测到的相位差。D/A 的选择主要考虑模拟信号输出建立时间、增益误差、输出线性度以及分辨率等几个指标。D/A 输出信号建立时间不仅对闭环控制带宽具有重要影响,而且当其建立时间较长时,会对输出阶梯波台阶的前沿、后沿的影响很大,导致模数转换器前端输入信号的尖峰脉冲拉长,而有效采样时间窗口变短,因此其建立时间越短越好。D/A 的增益误差和输出线性度决定着输出模拟信号的误差和线性度,而模拟信号的误差和线性度施加在相位调制器上后,将直接影响反馈相位的控制误差,因此,需要选择增益误差小和输出线性度好的模数转换器。D/A 的分辨率直接决定相位控制的最小分辨精度,其分辨率最好大于 A/D 变换器的分辨率。本设计采用的是 16 位高速 D/A 变换器芯片 AD9726 来实现该模数转换的功能。由于该芯片是电流型输出,所以,后端采用高速运算放大器芯片实现电流输出转电压输出和电压幅度放大的功能。

4 实验验证与分析讨论

为验证上述控制电路性能,结合前端光纤电流传感头模块,构建了全光纤电流互感器装置,同时,采用大电流发生器(交流,有效值为:0~5000A,50Hz)作为测试电流源,

并以 0.01 级(即误差小于 0.01%)的标准电流互感器为基准,按照国标要求,搭建了一套准确度校检系统,用以校检该全光纤电流互感器的测量准确度,从而验证上述控制电路的指标和功能。图 3 是上层控制界面通过串口获得的 50Hz 交流电信号的截图,可见通过上述控制电路可以有效解调出 50Hz 交流电信号的周期和幅度信息,从而实现对光纤传感头的闭环控制功能。

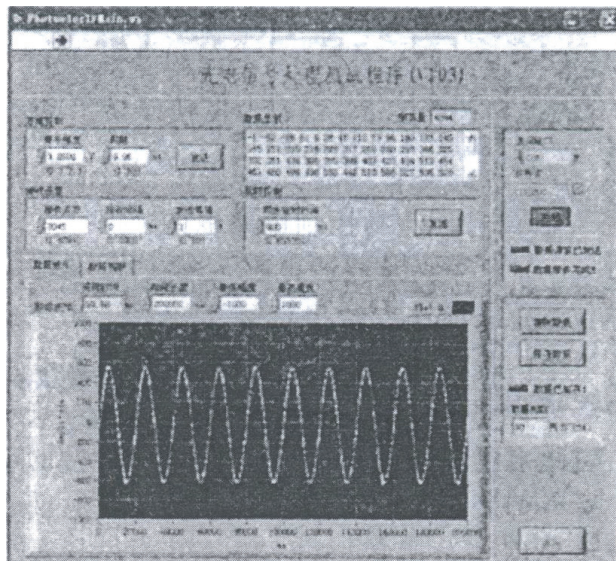


图3 上层控制界面获得的50Hz交流电信号

在本文设计分析的控制电路基础上搭建的全光纤电流互感器装置样机的额定一次电流值 I_{pr} 设定为 100A~4000A,根据国标要求, I_{pr} 在的 1%~120% 范围内,实测电流值 i 的测量误差如表 1 所列,其中标准电流值 $i_{(标)}$ 是指 0.01 级标准电流互感器对“待测电流”进行检测所得出的电流值(即有效值,与真实值之间的误差小于 0.01%),单位为 A; 样机解调信号的数字输出是指样机对“待测电流”进行解调后输出的数字量;样机解调出的电流值 $i_{(解)}$,指样机解调信号的数字输出乘以一个固定的变比而得到的数值,表征解调输出的电流值(有效值),单位为 A;电流误差为 i 标准和 $i_{(解)}$ 解调值之间的误差。

根据表 1 列出的数据,可以看到全量程范围内的实测

表1 测试点及各点的误差

标准电流值/A	样机解调信号的数字输出	样机解调出的电流值/A	电流误差/%
4 711.470 1	7 019.560 36	4 710.055 29	-0.03
3 996.705 2	5 953.198 98	3 994.537 40	-0.05
3 502.755 4	5 219.715 32	3 502.377 14	-0.01
2 983.418 8	4 446.383 57	2 983.479 22	0.00
2 518.409 5	3 753.317 24	2 518.438 59	0.00
2 030.776 3	3 027.587 87	2 031.481 39	0.03
1 511.867 9	2 252.214 04	1 511.213 25	-0.04
1 029.537 6	1 533.229 63	1 028.781 86	-0.07
798.251 8	1 188.498 56	797.470 73	-0.10
604.257 7	899.946 69	603.855 29	-0.07
400.582	596.689 81	400.372 94	-0.05
215.436 2	321.096 88	215.452 82	0.01
110.488 4	164.762 52	110.554 01	0.06
92.162 2	137.440 66	92.221 32	0.06
62.204 4	92.718 69	62.213 32	0.01
48.583 1	72.516 52	48.657 86	0.15
31.867 4	47.566 37	31.916 56	0.15
10.123 5	15.045 89	10.095 64	-0.28
5.251 6	7.849 98	5.267 26	0.30
1.028 9	1.542 79	1.035 20	0.61

误差均满足 0.2S 级测量准确度的要求,也就是说,本文所述的电路完成了对光纤传感头的闭环控制和测量数据解调。

5 小结

文章叙述了用于全光纤电流互感器的闭环检测控制电路,基于单片 FPGA 实现信号采集、数据输出以及与计算机通信等控制和数据解调、积分滤波、阶梯波产生等算法,完成了对光纤电流互感器传感头输出信号的检测以及闭环控制。本设计的控制电路具有结构简单、集成度高、闭环控制速度快、控制精度高等特点,为研制满足电力电网测试需求的全光纤电力互感器设计奠定了基础。此外,基于这种控制电路研制的全光纤电流互感器样机,经测试,其额定一次电流在 100A~4000A 的范围内,均实现了 0.2S 级测量准确度,初步满足电力电网对电流互感器测量准确度的要求。