

一种全相位 FFT 法的高精度相位测量仪设计

徐巧玉¹,刘锦霞¹,王军委²,朱 佩¹,黄梦彬³

(1. 河南科技大学 机电工程学院,河南 洛阳 471003;2. 洛阳银杏科技有限公司,河南 洛阳 471003;3 中国船舶重工集团公司 第七二二研究所,湖北 武汉 430205)

摘要:针对传统相位测量仪结构复杂、精度低的缺点,提出了一种全相位快速傅里叶变换(FFT)法的高精度相位测量仪设计方案。该方案以高性能 Cortex-M4 内核的 STM32F407VGT6 作为系统核心,利用高速同步 AD7606 获取相位信号,采用高精度的全相位 FFT 法进行相位计算,并通过以太网接口实现数据的远程传输和显示。实验结果表明:采样点数取 1 024,测相位为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$,测频为 1 Hz ~ 60 kHz 时,实际测量误差小于 0.003°,响应时间小于 1.0 s。

关键词:相位测量;全相位 FFT 法;高精度;以太网接口

中图分类号:TP274;TP273

文献标志码:A

0 引言

相位是工业测控领域的常用参数,广泛应用于电能质量检测、精密测量、全球定位系统(global positioning system, GPS)导航等领域。相位测量方法主要分为模拟式和数字式两种^[1]。其中,模拟式测量方法设计复杂,测量精度低,且硬件成本高;而数字式测量方法由硬件电路和软件算法结合完成测量,具有设计简单,硬件成本低,测量精度较高的优点。数字式相位测量方法大致分为 3 类。第 1 类,采用 LabVIEW 虚拟机设计^[2-3],在 LabVIEW 虚拟仪器中完成相位的测量,该方法具有测量精度高、抗干扰能力强和电路简单的优点,但是依赖于计算机,在工业环境中使用不便。第 2 类,采用双中央处理器(central processing unit, CPU)设计^[4-5],双核心架构,利用数字化算法实现相位测量,该方法具有运算速度快、测量精度高的优点,但整体结构复杂、开发难度较大,且成本较高。第 3 类是目前的主流方式,采用单一现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)、数字信号处理(digital signal processing, DSP)或高级精简指令集处理器(advanced RISC machine, ARM)等器件实现^[6-9],这种方法设计简单、成本较低,但是仍存在测量精度不够高、功能比较单一的缺点。

针对以上问题,本文提出了一种全相位快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)法的高精度相位测量仪设计方案。利用 STM32F407VGT6 芯片的高速计算和传输性能,将模数转换器采集到的数据进行全相位 FFT 法处理,并在 STM32 控制器上构建 WEB 服务器。通过以太网接口实现设备与计算机的网络通信和处理结果的显示。

1 系统设计

本文设计的相位测量仪主要由中央处理模块、数据采集模块和以太网通信模块组成,系统框图如图 1 所示。

中央处理模块作为系统核心,采用 32 位 Cortex-M4 内核的 STM32F407VGT6 微控制器开

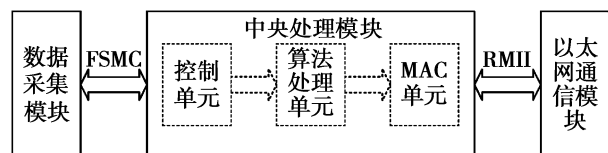


图 1 系统框图

基金项目:国家自然科学基金项目(51205108);河南省高等学校重点科研基金项目(15A535001)

作者简介:徐巧玉(1979-),女,河南洛阳人,副教授,博士,硕士生导师,主要研究方向为嵌入式系统、机器视觉、智能测试技术及仪器。

收稿日期:2018-05-11

发设计,包括控制单元、算法处理单元及媒体访问控制(media access control,MAC)单元。控制单元实现各个模块间的协调工作;算法处理单元主要实现全相位 FFT 算法;MAC 单元为以太网通信提供标准接口。数据采集模块作为系统的前端模块,采用 16 位同步 AD7606 获取输入信号的数字信息,并实现 8 通道的并行同步采集,保证了相位测量的精度和速度。以太网通信模块作为系统的外设接口,实现设备与外部的通信。采用 LAN8720 以太网接口芯片,移植 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统和 LWIP 协议栈,搭建网络通信,对设备实现在线监测。

系统工作流程:上位机通过以太网发送采集命令,中央处理模块解析命令后,开始控制数据采集模块获取输入信号,并进行模数转换和存储;再经过全相位 FFT 法计算得到相位信息;最后通过以太网接口打包,并发送给上位机。

1.1 数据采集模块的设计

本文采用 AD7606 设计数据采集模块,实现 8 通道的 16 位并行同步采集,各通道采样速度达到 200 kB/s,保证了该相位测量仪的准确性和高速度。

AD7606 与微控制器的接口电路如图 2 所示^[10-11]。采用 5.0 V 单电源供电,引脚 VDRIVE 接 STM32 的供电电源 3.3 V,使两者接口电平兼容;拉低 PAPER/SER/BYTE SEL 引脚,选择并行接口;模拟输入信号接入 AD7606 的 V1~V8 引脚,经转换后输出的数字信号 DB0~DB15 接到 STM32 的可变静态存储控制器(flexible static memory controller,FSMC)接口,使用 FSMC 总线读取。

AD7606 并行读取数据的时序,如图 3 所示。首先,将 RESET 引脚拉高 50 ns,复位 AD7606;然后,将 CONA/B 引脚拉低 0.5 ms,开启 AD 转换,此时 BUSY 引脚被拉高,证明 AD 开始转换;当转换结束,BUSY 引脚自动被拉低;当判断到 BUSY=0 时,就开始通过 FSMC 总线对 AD7606 进行读 8 通道操作。

1.2 以太网接口模块的设计

与传统的 CAN、RS485、RS232 等通信方式相比,以太网速度快、通用性更好,并且能接入 Internet 网络,实现更大范围的远程访问。本文通过 STM32 内置的 MAC 控制单元,外接物理层(physical layer,PHY)芯片 LAN8720A,与变压器 H1102NL 和 RJ45 实现了一个 10/100 MB 自适应的网卡,通过移植嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 和开源的轻量级网络协议栈(a lightweight TCP/IP protocol,LWIP),实现设备的网络通信功能。

以太网接口模块的设计框图如图 4 所示。MAC 控制器与 LAN8720A 连接采用 RMII 接口,使 STM32 连接 LAN8720A 仅需 10 根线。LAN8720A 参考时钟要求是 50 MHz,这里采用 25 MHz 外部有源晶振,经 LAN8720A 的锁相环(phase locked loop,PLL)电路倍频为 50 MHz,为 STM32 的 RMII 接口提供时钟信号。

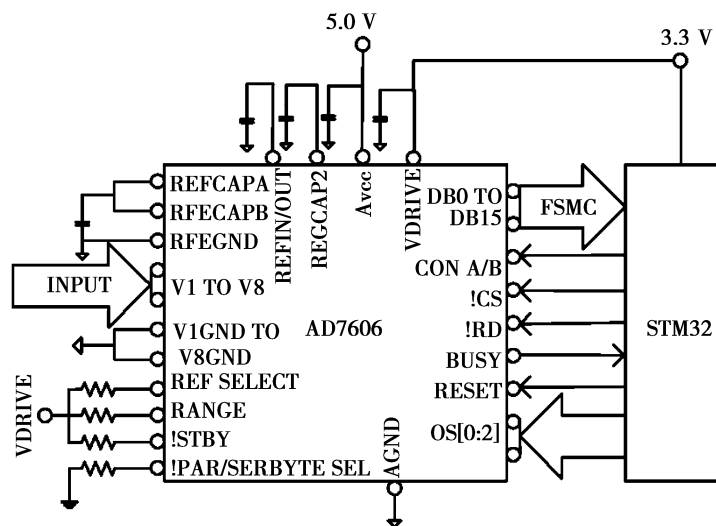


图 2 AD7606 与微控制器的接口电路

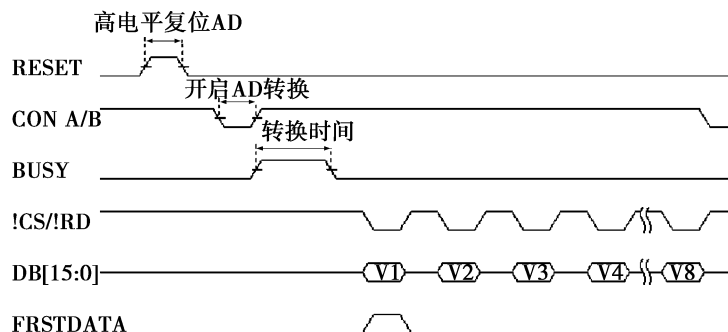


图 3 AD7606 并行读取 AD 数据时序图

本文采用浏览器/服务器 (browser/server, B/S) 结构, WEB 服务器的工作原理^[12-13] 如图 5 所示。由 LWIP 协议栈搭建网络底层, 利用 CGI 和 SSI 技术实现网页控制。在浏览器中输入目标互联网协议 (internet protocol, IP) 地址, 当服务器接收到请求信号后, 经 CGI 程序分析与处理, 告知服务器回复对应的网页数组文件, 再通过 SSI 技术将数据嵌入到网页中, 定时刷新数据, 实现数据的实时显示。网页数组文件是用户编写的超文本标记语言 (hyper text markup language, HTML) 网页通过工具转换成的 C 语言格式网页数组。

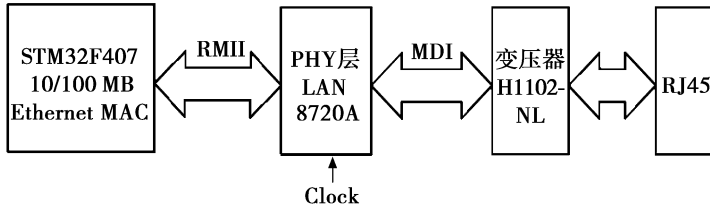


图 4 以太网接口模块设计框图

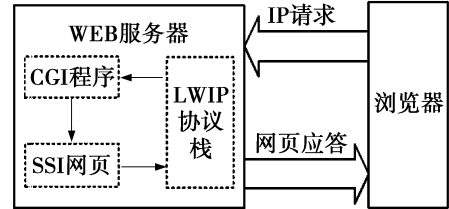


图 5 WEB 服务器工作原理

2 全相位 FFT 测量算法的分析

相位测量算法作为系统核心, 其测量精度及性能至关重要。全相位 FFT 法具备相位不变性和克服频谱泄漏的特性^[14], 解决了传统 FFT 法测相位时数据被截断带来的误差, 又抑制了谐波的干扰。该算法数据处理简单、测量精度高、运算量较小, 便于实时实现。

2.1 全相位 FFT 法理论分析

若输入信号为 $x(n) = e^{j(\frac{2\pi n f}{N} + \theta_0)}$, f 为信号频率, θ_0 为初相位。取 N 个采样点, 其输入数据为 $\{x(-N+1), \dots, x(-1), x(0), x(1), \dots, x(N-1)\}$ 。全相位预处理过程^[14-15] 如下所示。

列出包含 $x(0)$ 且长度为 N 的向量 $\mathbf{x}_i (i=0 \sim N-1)$, 考虑了包含 $x(0)$ 的所有情况。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_0 = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T; \\ \mathbf{x}_{-1} = [x(-1), x(0), \dots, x(N-2)]^T; \\ \mathbf{x}_{N-1} = [x(-N+1), x(-N+2), \dots, x(0)]^T. \end{cases} \quad (1)$$

将向量 $\mathbf{x}_i$ 循环移位, 使其 $x(0)$ 对齐, 得到另外 N 个 N 维向量 $\mathbf{x}'_i$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{x}'_0 = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T; \\ \mathbf{x}'_{-1} = [x(0), x(1), \dots, x(-1)]^T; \\ \mathbf{x}'_{N-1} = [x(0), x(-N+1), \dots, x(-1)]^T. \end{cases} \quad (2)$$

对准 $x(0)$ 在截断的主区间内求和的平均, 得全相位预处理结果 $\mathbf{x}_{AP}$ 。

$$\mathbf{x}_{AP} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{x}'_i = \frac{1}{N} [Nx(0), (N-1)x(1) + x(-N+1), \dots, x(N-1) + (N-1)x(-1)]^T. \quad (3)$$

由式(3)可知: 全相位预处理的结果 $\mathbf{x}_{AP}$ 等价于用卷积窗 W_c 对输入数据 $x(n)$ 进行加权处理, 再移位求和。全相位预处理等效图如图 6 所示。

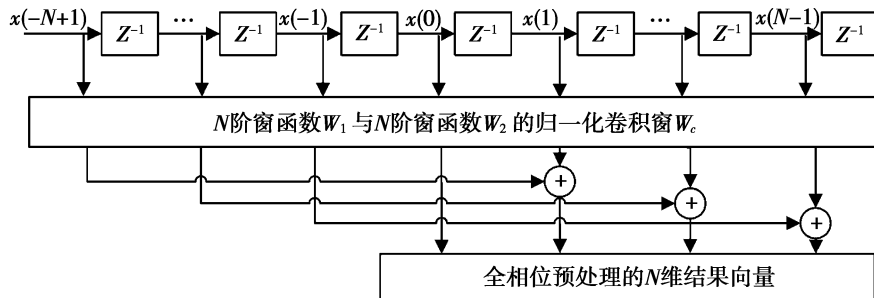


图 6 全相位预处理等效图

最后,将全相位预处理的结果向量 $\mathbf{x}_{AP}$ 进行传统的 FFT 运算,得全相位 FFT 的结果:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{AP}(k) &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{X}'_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{X}_i(k) e^{\frac{2\pi ki}{N}} = \\ &= \frac{1}{N^2} e^{j\theta_0} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(n-i) e^{-\frac{2\pi kn}{N}} e^{\frac{2\pi ki}{N}}, \end{aligned} \quad (4)$$

归一化处理得:

$$\mathbf{X}_{AP}(k) = \frac{1}{N^2} e^{j\theta_0} \frac{\sin^2 \left[\frac{\pi(f-k)}{N} \right]}{\sin^2 \left[\frac{\pi(f-k)}{N} \right]}. \quad (5)$$

由式(5)可知:对全相位 FFT 谱进行分析,找出谱峰值 k ,再计算谱峰值 k 的相位值,即输入函数的相位 θ_0 。

2.2 仿真测试

在 MATLAB 软件中对全相位 FFT 法进行仿真实验,分别在不同噪声干扰、不同采样点数 N 的条件下,对算法的测量结果进行比较分析,并测试算法的性能^[16]。

输入信号为:

$$x(t) = 5 \cos(2\pi 50t + \theta_x), \quad y(t) = 5 \cos(2\pi 50t + \theta_y). \quad (6)$$

以采样点数 $N=1\,024$ 为例,输入信号的相位差 $\theta=\theta_y-\theta_x$ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 取值,间隔为 1° ,在输入信号中叠加 0%、1%、3%、5%、10% 的高斯白噪声,得到在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 测相位内的最大绝对误差值。以 10 次仿真结果为一组实验数据,进行多组重复实验,实验结果如表 1 所示。

表 1 每组数据在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 最大绝对误差均值 (°)

噪声比/%	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	平均值	标准差
0	6.03E-06	6.03E-06	6.03E-06	6.03E-06	6.03E-06	6.03E-06	0.00E+00
1	0.036 4	0.039 6	0.037 1	0.043 6	0.049 5	0.041 24	0.005 410
3	0.118 0	0.106 9	0.121 7	0.110 5	0.086 9	0.108 80	0.013 575
5	0.161 7	0.228 1	0.169 0	0.181 3	0.181 6	0.184 34	0.025 882
10	0.352 4	0.413 6	0.385 6	0.497 3	0.342 8	0.398 34	0.062 015

由表 1 可知:在 $0^\circ \sim 360^\circ$,随着噪声的不断加大,最大绝对误差均值也逐渐增加;在同一噪声比的条件下,不同组次间的测量结果的波动也越来越大。在没有噪声的条件下,测量精度可以达到 10^{-6} 数量级;当噪声信号加到 10% 时,最大绝对误差均值约为 0.4° ,标准差为 0.062 015。

为验证采样点数 N 对测量精度的影响,在相同条件下,取采样点数 N 为 256、512、1 024、2 048 和 4 096 时,该算法在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的最大绝对误差值,经过多次重复实验后,测量的最大绝对误差均值如表 2 所示。

表 2 不同采样点数 N 时最大绝对误差均值 (°)

噪声比/%	$N=256$	$N=512$	$N=1\,024$	$N=2\,048$	$N=4\,096$
0	9.44E-05	2.39E-05	6.03E-06	1.51E-06	3.79E-07
1	0.078 7	0.056 6	0.031 8	0.021 4	0.020 2
3	1.137 1	0.983 6	0.919 7	0.912 1	0.904 6
5	1.917 9	1.643 9	1.592 0	1.498 1	1.495 3
10	3.402 9	3.431 0	3.083 0	3.033 8	2.998 7

由表 2 可知:在 $0^\circ \sim 360^\circ$,随着采样点数 N 越来越大,最大绝对误差均值呈下降趋势,但其下降趋势越来越平缓。噪声比为 0% 时,误差从 $N=256$ 的 10^{-5} 数量级降至 $N=4\,096$ 的 10^{-7} 数量级,测量精度有明显提升。

由上述仿真结果可知:全相位 FFT 法可以精确测量相位差值,在无噪声的情况下,误差可以达到 10^{-6} 数量级。噪声对算法的测量精度影响很大,当信号叠加噪声时,所测相位精度就降低。增加采样点数 N 可以提高测量精度,但是当 N 增加到一定程度时,其测量效果不再得到改善。

3 实验结果与分析

为测试系统的性能,本文通过精度和速度两个实验,对系统的测量精度和实时性进行实验验证。实验平台搭建如下:采用信号源输出频率为 50 Hz,幅值 5 V 的两路同步正弦信号,由本文设计的相位测量仪进行相位差测量。通过以太网接口将数据传输到计算机网络上,在浏览器中请求 IP 地址 192.168.0.10,获取实时刷新测量结果的 WEB 界面。

3.1 精度实验

当取采样点数 $N=1\,024$ 时,输入信号的相位差 θ 在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 取值,分度为 1° ,实际测量误差如图 7 所示。

由图 7 可知:本相位测量仪可以实现在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 的相位差测量,随着输入信号相位差值的增加,实际测量误差呈上升趋势。因此,该系统在测量小相位差时,具有更高的测量精度,但其整体测量误差均小于 0.003° 。

由 2.2 仿真测试小节可知,系统的测量精度也受采样点数 N 取值的影响,在系统资源充足的情况下,取不同的采样点数 N ,得到在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 的最大测量绝对误差值,以 10 次测量结果的均值为一组数据,进行多组实验验证,实验数据如表 3 所示。

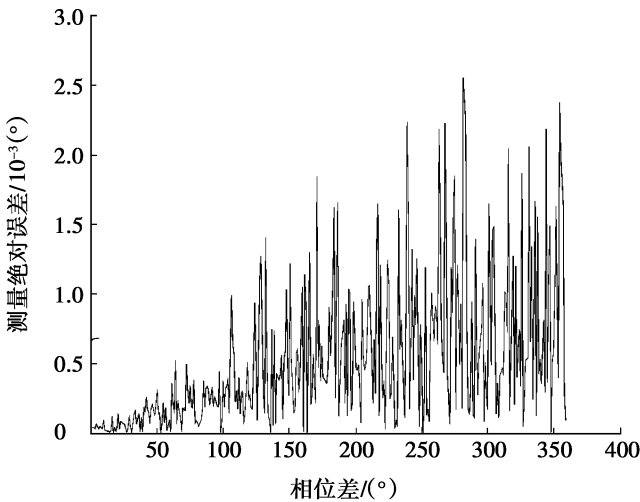


图 7 实际测量误差

表 3 每组数据在不同采样点数 N 时的最大绝对误差均值 ($^\circ$)

采样点数 N	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	平均值
256	0.007 0	0.007 1	0.006 8	0.006 8	0.007 0	0.006 94
512	0.005 0	0.004 8	0.005 1	0.004 8	0.004 9	0.004 92
1 024	0.003 1	0.002 9	0.002 8	0.003 0	0.002 9	0.002 94
2 048	0.002 4	0.002 3	0.002 4	0.002 5	0.002 2	0.002 36
4 096	0.002 0	0.001 9	0.002 1	0.001 9	0.001 8	0.001 94

由表 3 可知:随着采样点数 N 的幂次方递增,系统在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 的最大绝对误差均值呈现下降趋势,当采样点数 $N=1\,024$ 时,系统精度约为 0.003° ,所以,在系统资源充足的情况下,可以通过增加采样点来进一步提高系统的测量精度。

3.2 速度实验

以上位机 WEB 界面刷新测量结果的时间作为系统的响应时间,得到采样点数 N 分别为 256、512、1 024、2 048 和 4 096 时上位机刷新测量结果的时间,以 10 次刷新时间的均值为一组实验数据,进行多组实验验证,实验数据如表 4 所示。

由表 4 可知:随着采样点数 N 的幂次方递增,上位机数据的刷新时间呈上升趋势,在采样点数 N 为 256 时,系统实现小于 0.2 s 的刷新时间,当采样点数 N 取 4 096 时,刷新时间为 1.1 s 左右。

以上实验结果表明:随着采样点数的增加,系统的测量精度越来越高,相应的系统响应时间也越来

越长,因此,在实际应用中需权衡精度与速度的需求,合理分配系统资源。该系统取采样点数为 1 024,测相位为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$,测频为 1 Hz~60 kHz 时,实际测量误差均值小于 0.003° ,响应时间小于 1.0 s。

表 4 每组数据在不同采样点数 N 时的刷新时间均值

采样点数 N	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	平均值
256	0.196 5	0.198 8	0.201 1	0.199 1	0.203 0	0.199 70
512	0.382 1	0.452 4	0.412 2	0.373 7	0.431 5	0.410 38
1 024	0.613 8	0.622 3	0.612 0	0.605 0	0.698 2	0.630 26
2 048	0.887 2	0.889 3	0.891 2	0.890 0	0.889 0	0.889 34
4 096	1.124 3	1.069 9	1.110 6	1.078 8	1.108 6	1.098 44

4 结论

本文提出了一种全相位 FFT 法的高精度相位测量仪,通过同步 AD7606 获取原始数据,消除了不同步采样带来的误差,采用全相位 FFT 法完成相位值的高精度测量,并在 STM32 上移植 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 实时操作系统和 LWIP 协议栈,实现了网络通信。该系统取采样点数为 1 024,测相位为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$,测频为 1 Hz~60 kHz 时,实际测量误差小于 0.003° ,响应时间小于 1.0 s。

参考文献:

- [1] 曾玲,陈伟,陶金.低信噪比正弦信号相位差测量算法对比研究[J].电子测量技术,2017,40(1):71-75,89.
- [2] 付志远,马琳,陆兵兵.基于 LabVIEW 的相关法测量相位差计的设计[J].电子世界,2013(13):154.
- [3] 任智鹏,原明亭.基于乘法器和 LabVIEW 仿真的谐波分析[J].青岛大学学报(工程技术版),2016,31(1):34-39.
- [4] 杨新华,陈玉松,金兴文.基于 FFT 谱分析算法的高精度相位差测量方法[J].自动化与仪器仪表,2006(6):75-77.
- [5] 杨云,王明绪.基于 SOPC 全相位 FFT 相位差测量系统设计[J].自动化与仪器仪表,2016(8):183-185.
- [6] 李雪璐,刘伟杰.基于 FPGA 的测相方法[J].信息通信,2016(4):40-41.
- [7] 沈艳芳,陈丽花,陈星.基于 FPGA 的全相位 FFT 高精度相位测量[J].电子测量技术,2011,34(8):52-55.
- [8] 刘宾.基于 DSP 的新型电参数测量系统的设计研究[J].工程技术(引文版),2016(1):286.
- [9] 邱良丰,刘敬彪,于海滨.基于 STM32 的全相位 FFT 相位差测量系统[J].电子器件,2010,33(3):357-361.
- [10] 王华刚,邓志燕,董鹏飞.多功能多通道数据采集系统设计与实现[J].自动化与仪器仪表,2016(9):36-37.
- [11] 肖李欢,黄元峰,代文泽,等.基于 AD7606 的高精度数据采集系统的实现[J].电脑知识与技术,2017,13(20):210-211,214.
- [12] 王水鱼,王伟.基于 AD7606 的智能电网数据采集系统设计[J].微型机与应用,2016,35(22):8-10.
- [13] 何勉,许军.基于嵌入式 WEB 的智能家居系统设计[J].陕西理工学院学报(自然科学版),2017,33(1):39-43,50.
- [14] 王兆华,黄翔东,杨尉.全相位 FFT 相位测量法[J].世界科技研究与发展,2007,29(4):28-32,27.
- [15] 邵璞,赵庆生,郭贺宏,等.全相位-混合基 FFT 在相量测量装置中的实现[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):65-69.
- [16] 黄翔东,王兆华.全相位 FFT 相位测量法的抗噪性能[J].数据采集与处理,2011,26(3):286-291.

本文引用格式:

徐巧玉,刘锦霞,王军委,等.一种全相位 FFT 法的高精度相位测量仪设计[J].河南科技大学学报(自然科学版),2019,40(5):25-30.

XU Q Y, LIU J X, WANG J W, et al. Design of high-precision phase measuring instrument based on all phase FFT method[J]. Journal of Henan university of science and technology(natural science), 2019, 40(5):25-30.