

一种新型三相多功能电能测量系统设计

王安宁¹,何东健²

(1. 西北农林科技大学 机电学院,陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 信息工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:在介绍 ADE7758 多功能芯片特性的基础上,提出一种新型三相多功能电能测量系统设计方案。该方案以 ADE7758 为计量芯片进行硬件电路设计,以 P89C51RD2 单片机作为系统处理器,设计了相应的测量系统软件及 PC 机应用软件,并对 ADE7758 实现谐波分析的特性进行了分析。用标准的测试设备对系统的测量精度进行了实验论证,实验结果表明:当电流在 0.1~6.0 A 时测量误差小于 $\pm 0.5\%$,电压在 150.57~260.18 V 时测量误差小于 $\pm 0.2\%$,具有较高的测量精度,可以满足电能测量的精度要求以及电力设备实时监控方面的要求。

关键词:电能测量系统;多功能芯片;谐波分析;测量误差

中图分类号: TM 930.9

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2005)05-0081-04

从 1880 年电能表诞生至今的一百多年间,感应式电能表已经逐渐被电子式电能表替代^[1]。近几年来,微电子技术、计算机技术的飞速发展,有力地推动了电子式电能表技术的迅速更新与进步,国内外许多公司研制出不同测量原理的电能表专用芯片^[2]。在简要介绍 ADE7758 多功能芯片特性的基础上,提出系统设计方案。以 ADE7758 为系统的核心元件进行硬件电路设计;以 P89C51RD2 单片机作为系统处理器,设计相应的测量系统软件,并对 ADE7758 实现谐波分析的特性进行分析;最后利用标准测试设备对系统的测量精度进行实验验证。

1 系统设计方案

1.1 ADE7758 基本特性

ADE7758 是由美国 ADI 公司生产的一种具有 6 路 A/D 采样通道,带 IRQ 的 SPI 兼容的串行通信口及两路 CF 脉冲输出口的三相高精度电子式电能测量

芯片,支持 IEC 60687,IEC 61036,IEC 61268,IEC 62053-21,IEC 62053-22 及 IEC 62053-23。它可以同时对三相电压、电流模拟量进行独立采样^①,是以微处理器为核心的数字乘法器型电子式电能表。经 TV,TA 变换的被测电压和电流,经 A/D 转换器完成数字化处理之后,微处理器对数字化的被测信号进行各种判断、处理和运算,从而实现多种功能^[2]。

ADE7758 内部集成了两级 $\Sigma - \Delta$ A/D 转换器、数字积分器、片上温度传感器,三相有功、无功、视在电能量测量和电压、电流有效值计算的信号处理部分。ADE7758 采用 HERBIT(希尔伯特)转换,能将各次谐波正确移相 90° ,在无功率含有谐波分量时,ADE7758 的精度完全满足国际标准的要求。该芯片支持多电网模式选择,基波频率可以为 60 Hz,也可以为 50 Hz,兼容三相三线制和三相四线制电源

^① ADE7758:poly phase multi-function energy metering IC with per phase information data sheet(Rev.0.2/2004). <http://www.analog.com>.

收稿日期:2004-09-09;修回日期:2005-01-18

Bandwidth analysis of main-steam temperature PID controller parameters in fossil-fired power station

HOU Shu-wen¹,DUAN Ai-xia¹,HUANG Wei-feng¹,HUANG Yong-zhi²

(1. Dept. of Power Engineering, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, China; 2. Zhengzhou University, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: The PID controller is widely used in the main steam temperature control in the fossil-fired power station, and its parameter variations affect the frequency characteristics of the cascade control system. For the increases of proportional, integral and derivative coefficients, the system step response diagrams and bode diagrams are analyzed respectively. Its influences on response speed, overshoot, stability, amplitudes and phases of three frequency bands are studied, and the change tendencies of amplitude steady margin, phase steady margin, through frequency and shearing frequency are summarized. Based on which, a set of PID parameters is designed by using frequency bandwidth analysis to improve the performance of main steam temperature controller.

Key words: main-steam temperature; PID controller; frequency characteristics; bandwidth analysis

接线法。用户可设置线电压跌落检测、过电压检测以及过电流检测的阈值。

1.2 系统设计方案

系统的总体框架如图 1 所示。



图 1 系统总体框架图

Fig.1 The system frame

整个系统可以分为用电现场模拟量采集、ADE 7758 计量单元和实时数据的显示三大部分。用电现场为我国电网中的标准低压用户,采用三相四线制电源接线法,电压为 220 V。ADE 7758 计量单元主要完成模拟量的分析、计算和储存。然后,通过 MAX 232 进行 RS-232 标准电平转换,转换后的数据通过串口与 PC 机进行通信,实时数据的显示部分即可将数据显示出来。

2 以 ADE 7758 为计量芯片的硬件电路设计

本文提出的一种以 ADE 7758 为计量芯片的电能测量系统硬件电路,原理框图如图 2 所示。

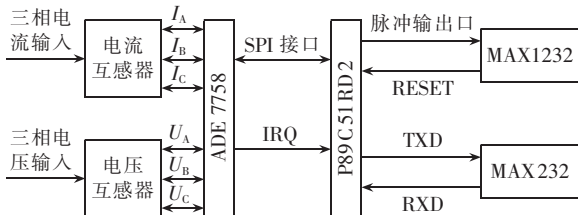


图 2 以 ADE 7758 为计量芯片的硬件设计图

Fig.2 The hardware design with ADE 7758 as measuring IC

ADE 7758 的电压和电流采集通道,其交流信号幅值最大为 500 mV。三相电压、电流的模拟量经过 TA、TV 变比之后,输入到 ADE 7758 芯片中,通过 6 路 A/D 采样通道完成数字化。ADE 7758 的微处理器对数字化的被测信号进行各种判断、处理和运算,并将结果储存在 18 个只读寄存器中。P89C51RD2 单片机通过 SPI 接口对 ADE 7758 进行读写操作, ADE 7758 内部有一个中断屏蔽寄存器 MASK,可以选择中断源。当相关的中断产生时,IRQ 脚置低,等待单片机跳入中断服务子程序。

2.1 P89C51RD2 的结构和性能

P89C51RD2 是 Philip 公司采用先进 CMOS 工艺制造的 8 位微控制器,指令系统与 80C 51 完全相同。该器件的一个机器周期由 6 个时钟周期组成,运行速度在同样的晶振频率下是传统 80C 51 的 2 倍。片内有 4 组 8 位 I/O 端口、3 个 16 位定时/计数器、多个中断源、4 个中断优先级、1 个增强型 UART、1 kByte 高速暂存 RAM、片内振荡器及看门狗电路。具有 64 k 并行可编程的非易失性 FLASH 程

序存储器,可实现对器件串行在系统中编程 (ISP: In-System Programming) 和在应用中编程 (IAP: In-Ap-plication Programming)。存储容量大,不用再外扩存储器,大大提高了系统的集成度。

2.2 电流互感器

电流互感器 TA 采用的是一种三相四线制组合式微型电流互感器,电流比为 1.5(6) A/5 mA,精度等级为 0.1 级,额定负载为 20 Ω 。

2.3 电压互感器

电压互感器 TV 采用的是一种三相组合式电压互感器,初级输入电压为 220 V,初级空载电流不大于 0.3 mA,次级空载电压为交流 7.56 ± 0.03 V,初级与次级之间的绝缘电阻 $\geq 1\,000\text{ M}\Omega$ ($U_{DC} = 500\text{ V}$)。采用 TA 和 TV,使得电路设计简单清晰,可靠性高。

2.4 看门狗电路

看门狗电路采用 MAXIM 公司的 MAX1232 芯片,利用 P89C51RD2 的 PWM 模式产生的占空比可调的脉冲信号作为喂狗信号,监视电源电压和微处理器的工作状态,结构简单、功能丰富,大大提高了系统的可靠性和准确度^①。

2.5 RS-232 接口

采用 MAXIM 公司的 MAX 232 芯片完成 TTL 电平和 RS-232 标准电平的转换。方便通过串口与计算机进行通信^②。

3 系统软件设计

系统的软件设计包括基于硬件部分的单片机程序和 PC 机应用程序设计两部分。

3.1 单片机程序设计

以 P89C51RD2 单片机为核心的程序框图如图 3 所示。

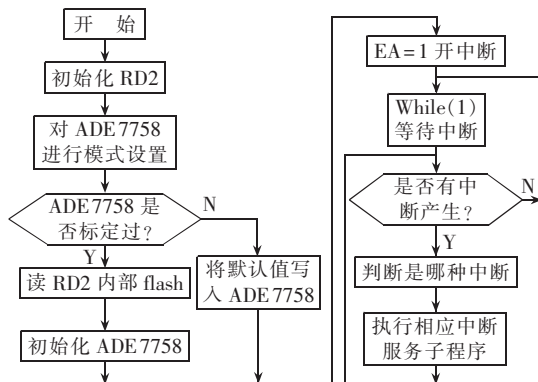


图 3 程序流程图

Fig.3 The program flowchart

对于中断的判断和处理是该程序的核心部分。根据具体的功能需要,中断包括外部中断 INT0、定时中断和串行中断 3 种。

① MAX1232 Microprocessor Monitor. <http://www.maxim-ic.com>.

② Multichannel RS-232 Drivers/Receivers. <http://www.maxim-ic.com.cn/pdfserv/en/ds/MAX220-MAX249.pdf>.

3.1.1 外部中断 INT0

ADE7758 的 IRQ 脚连接 P89C51RD2 单片机的 INT0 脚,IRQ 脚置低即表示 ADE7758 有中断产生,单片机通过 SPI 口将线电压频率值、电压和电流值取出。ADE7758 为用户提供了中断屏蔽寄存器 MASK,通过设置 MASK 可以根据自己的需要放开相应的中断,实现多种功能,如三相电压、电流越限报警、相序错报警和三相失压报警等。

3.1.2 定时中断

P89C51RD2 单片机内部有 3 个定时器,分别为定时器 0,1,2。定时器 2 又有 3 种操作模式,即捕获、自动重新装载、计数和波特率发生器。此处采用定时器 2 的捕获模式做一个 1 s 的定时器,在中断产生时,单片机通过 SPI 口读取有功功率、无功功率和视在功率。

3.1.3 串行中断

P89C51RD2 内部有一个 8 位的串行口控制字 SCON,通过设置该寄存器的相应位可方便改变单片机的串口通信模式。本文采用 9 位 UART,波特率为 9 600 bit/s。ADE7758 的标定及三相电流、电压、有功功率、无功功率、视在功率、有功电能、无功电能、视在电能、功率因数等测量数据,按照多功能电能表通信规约^[3],打包成串口通信报文的工作均在该中断里完成。

3.2 采集数据的显示

为了更好地实现人机交互功能,采用 VC++6.0 设计了用于 PC 机显示的后台软件,以实现从对串口发来的打包报文进行解释并显示。该软件分为串口的打开、关闭和设置,数据分析和数据显示三部分。

3.2.1 串口的打开、关闭和设置

定义一个类 CPhysics,利用 Windows API 通信函数 OpenComm() 和 CloseComm()^[4] 打开和关闭串口。同时定义 2 个成员函数 ReadFromCom() 和 WriteToCom() 对串口进行读写操作。串口的设置利用 Windows API 函数 SetCommState() 完成。串口参数可以根据需要进行设置,此处设置通信波特率为 1 200 bit/s,8 个数据位,1 个停止位,偶校验。

3.2.2 数据分析

该部分的重点是解释按 645 规约^[3] 组织的报文,实时显示部分的具体报文格式如下所示。

PC 机下发:68 01 00 00 00 00 00 68 01 02 32 E9 CS 16

单片机上发:68 01 00 00 00 00 00 68 81 33 32 E9 46 34 33 33 45 34 DD 33 33 33 33 33 DD 33 33 33 33 33 33 33 33 33 33 37 33 37 DD 33 33 33 33 33 33 33 DD 33 43 33 43 33 43 33 43 DD 24 16

单片机上发报文数据区的格式为:12~17 字节为三相电压,每相电压 2 字节,单位为 V,后为分隔

符 AA H;19~24 字节为三相电流,每相电流 2 字节,单位为 0.01 A,后为分隔符 AA H;26~41 字节为瞬时有功功率,总有功功率、A~C 相有功功率各为 3 字节,单位为 10 W,后为分隔符 AA H;43~50 字节为瞬时无功功率,总无功功率、A~C 相无功功率各 8 字节,单位为 10 W,后为分隔符 AA H;52~59 字节为瞬时功率因数,总功率因数、A~C 相功率因数各 2 字节,后为分隔符 AA H。

从 CPhysics 类派生一个类 CMasterMeter 645 DataAnalyse,在该类中定义 m_chOutBuffer[1024] 和 m_chInBuffer[1024] 两个数组成员变量,作为读入和输出数据缓冲区;整型成员变量 m_nOutLength 表示输出数据长度。再定义一个成员函数 AnalyseFromCom() 对报文进行解释、处理。

3.2.3 数据显示部分

数据显示采用滚动列表方式,每隔 1 s 显示一次实时数据。因此,从 MFC 的通用类 CListCtrl^[5] 类派生出一个 CMyList 类。显示内容的宽度及起始坐标等由该类的成员函数 AddItemString 控制。

4 测试结果与分析

采用本方案设计的三相多功能电能测量系统,输入端电压范围为 150~260 V,电流范围为 0~6 A。以 ONLY 6108G 计算机继电保护测试系统作为标准源,对电压、电流测量精度进行试验验证,结果分别如表 1、表 2 所示。

表 1 ADE7758 电流测量误差
Tab.1 Current measurement error of ADE7758

I_B/A	I_C/A			$\alpha/\%$		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0.1	0.128 78	0.127 03	0.124 68	0.479	0.451	0.411
0.5	0.511 44	0.513 31	0.513 29	0.191	0.222	0.222
1.0	0.999 51	1.000 62	1.000 91	-0.008	0.010	0.015
1.5	1.495 95	1.497 69	1.497 93	-0.068	-0.039	-0.035
2.0	1.992 40	1.994 34	1.995 00	-0.127	-0.094	-0.083
3.0	2.986 19	2.989 53	2.990 80	-0.230	-0.175	-0.153
4.0	3.980 67	3.985 55	3.987 46	-0.322	-0.241	-0.209
5.0	4.976 04	4.982 65	4.984 89	-0.399	-0.289	-0.252
6.0	5.970 96	5.978 98	5.982 03	-0.484	-0.350	-0.299

注: I_B 为标准电流; I_C 为电流测量值; α 为测量电流误差。

测试结果表明,该系统具有较高的测量精度,当电流在 0.1~6.0 A 时测定误差不超过 $\pm 0.5\%$; 电压在 150.57~260.18 V 时测定误差小于 $\pm 0.2\%$, 根据交流采样远动终端技术条件的规定^[6], 此系统的准确度等级为 0.5 级,属于精密级测量仪表。

此外,ADE7758 强大功能之一,就是可以提供用于谐波分析的多个采样点数据,它的最高采样速率为 26 kbit/s,按照我国电网工频 50 Hz^[7] 计算,每个周期可以采样 516 个点。当然,ADE7758 也有不足之处,它只能进行谐波电压或者谐波电流的采样,不能进行谐波功率的采样。因为,电压通道的最高

表 2 ADE 7758 电压测量误差
Tab.2 Voltage measurement error of ADE 7758

U_B/V	U_C/V			$\beta/\%$		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
150.57	150.50	150.26	150.43	-0.026	-0.119	-0.119
160.67	160.57	160.37	160.51	-0.038	-0.115	-0.062
170.67	170.58	170.42	170.54	-0.035	-0.096	-0.050
180.69	180.58	180.46	180.56	-0.042	-0.088	-0.050
190.72	190.57	190.49	190.57	-0.058	-0.088	-0.058
200.34	200.19	200.15	200.20	-0.058	-0.073	-0.054
210.67	210.47	210.49	210.50	-0.077	-0.069	-0.065
219.40	219.60	219.66	219.66	0.077	0.100	0.100
230.26	230.48	230.58	230.56	0.085	0.123	0.115
240.29	240.51	240.66	240.60	0.085	0.142	0.119
250.27	250.46	250.65	250.58	0.073	0.146	0.119
260.18	260.39	260.62	260.53	0.081	0.169	0.135

注： U_B 为标准电压； U_C 为测量电压； β 为测量电压误差。

频率为 260 Hz,是基波频率 50 Hz 的 5.2 倍,根据采样定理不能作谐波分析。电流通道的最高频率为 14 kHz,是基波频率 50 Hz 的 280 倍,可以做到 140 次电流谐波分析。ADE 7758 的 6 路采样通道的电压峰峰值都为 500 mV,可以通过设置 OPMODE 模式寄存器实现电压和电流通道的切换,从而实现电压的高次谐波数据采样。

上述分析表明,ADE 7758 从理论上可以做到 128 次谐波分析,已能完全满足电力系统谐波分析的需求。本文设计的系统通过读取和保存 ADE 7758 提供的实时数据,并利用全周波傅氏算法对数据进行处理,可以分别计算电压、电流的谐波分量。目前,由于受到单片机运算速度的影响,该系统还不能达到 128 次谐波分析,但是一般电力系统现场应用所需要的 3, 5,7,9,11 等较低次谐波电量的测量还是可以实现。

5 结论

如果去掉显示部分,采用 MAXIM 公司的 MAX 1487 芯片替代图 2 中的 MAX 232 芯片完成 TTL 电平和 RS-485 标准电平的转换,就可以把该电能测量系统作为电力负荷监控终端中的内置多功能电能表来用,不依赖于外置的多功能电表就可以对电力

运行的实时数据进行采集和分析。故该系统不仅可以用于电能测量,在电力设备实时监控方面也有很好的应用前景。

本系统设计方案已在山东大学电气工程学院所属山东许继科华自动化技术有限公司的负荷监控终端中作为电能测量部分被采用。终端设备已经在福州市电业局安装运行,该系统运行稳定可靠,达到了预期的效果和设计要求,对减少运营成本、加强用电管理和提高电网供电质量起到了积极作用。

参考文献:

[1] 赵 伟,庞海波,刘灿涛. 电能表技术的发展历程[J]. 电测与仪表,1999,(6): 4-7.
ZHAO Wei, PANG Hai-bo, LIU Can-tao. Development of the technology on watt-hour meter [J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**,1999,(6): 4-7.
[2] 郭松林,林海军,张礼勇. 电子式电能表专用芯片分类及原理[J]. 电测与仪表,2002,(10): 5-7.
GUO Song-lin, LIN Hai-jun, ZHANG Li-yong. Classifying of the CMOS chip focus on watt-hour meter and the theory of the CMOS chip focus on watt-hour meter [J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**,2002,(10): 5-7.
[3] DL/T 645-1997,多功能电能表通信规约[S].
[4] 李现勇. Visual C++ 串口通信技术与工程实践[M]. 北京:人民邮电出版社,2002.
[5] 朱 岩,高 伟. 标准 Windows 程序设计——Visual C++ 与 MFC 及 Win 32 API 的应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1997.
[6] DL/T 630-1997,交流采样远动终端技术条件[S].
[7] 单渊达. 电能系统基础[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

(责任编辑:戴绪云)

作者简介:

王安宁(1980-),女,山东高唐人,硕士研究生,研究方向为智能化检测与监控系统(E-mail: xiaorenren9898@126.com);
何东健(1957-),男,陕西西乡人,院长,教授,博士,博士研究生导师,主要从事智能化检测与控制、农业信息系统、教育软件研究与教学。

Design of three-phase multifunction energy metering system

WANG An-ning¹, HE Dong-jian²

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northwest Sci. -Tech. University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;
2. College of Information Engineering, Northwest Sci. -Tech. University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: A design scheme of three-phase multifunction energy metering system is given based on the introduction of ADE 7758. ADE 7758 is used as measuring IC, while single-chip P89C51RD2 as system processor. The corresponding measuring system software and PC application software are designed as well. The harmonic analysis function of ADE 7758 is introduced. Its measurement accuracy is verified by the experiment using standard test instrument. Results show that, when current is between 0.1 and 6.0 A, the measurement error is within $\pm 0.5\%$, while when voltage is between 150.57 and 260.18 V, the measurement error is within $\pm 0.2\%$. Its high accuracy meets the requirements of energy metering and real-time supervision of electric equipment.

Key words: energy metering system; multifunction IC; harmonic analysis; measurement error