基于小波分析的电动机综合保护器设计

雷乃清，许钰婷

(河南理工大学电气工程与自动化学院，河南 焦作 454150)

摘要：为了准确得到电动机采样信号的有效值，对电动机进行正确保护，介绍了一种基于小波分析的电动机综合保护器设计。该设计包括电动机保护算法、关键的软硬件设计。算法上，采用小波分析，可以抑制衰减的直流分量和非整次谐波分量，弥补傅立叶算法的不足，为电动机保护提供保证。软件上，采用μC/OS-II操作系统对各个任务进行调度管理，让这些任务可以并发工作，提高系统的实时性。硬件上，设计了以太网接口，满足电动机保护智能化、网络化的要求。实践表明，该保护器能较好地实现电动机保护，具有一定的现实意义。

关键词：小波分析；电动机保护；以太网；μC/OS-II操作系统；多任务调度

Design of motor comprehensive protector based on wavelet analysis

LEI Naiqing, XU Yuting

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan University of Technology, Jiaozuo 454150, China)

Abstract: In order to obtain the effective values of motor sampled signal accurately, for proper protection of motor, this paper introduces a design of motor comprehensive protector based on wavelet analysis. The design includes the motor protection algorithm and key design of hardware and software. On the algorithm side, it uses wavelet analysis, the components of damped DC and noninteger harmonics are restrained by the wavelet analysis. The wavelet analysis remedies the deficiency of Fourier algorithm and provides assurance for motor protection. On the software side, it uses the μC/OS-II operating system and manages every task, so these tasks can work simultaneously and thus the real-time performance of the system is improved. On the hardware side, it designs Ethernet interface to meet the intelligent and networked requirements of motor protection. Practice shows that the protector can realize motor protection effectively, which has certain practical significance.

Key words: wavelet analysis; motor protection; Ethernet; μC/OS-II operating system; multi task scheduling

中图分类号： TM774 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)12-0129-05

0 引言

电动机保护大多采用傅立叶算法[1-4]，但其不能滤除衰减直流分量和非整次谐波分量，且当电源频率波动时，计算结果存在较大误差。小波分析[5-14]是一种新型时域分析工具，具有多分辨分析功能，被誉为数学显微镜。小波分析是傅立叶的改进，弥补了傅立叶的缺陷。本文以小波分析作为电动机保护算法，设计了一种新型电动机综合保护器。

1 小波分析算法

傅立叶算法[15]可滤除直流分量与整数次谐波分量，计算精度较高，是电动机保护常用的算法，但其不能滤除衰减的直流分量和非整次谐波分量，且当电源频率波动时，计算结果存在较大误差。为此，有学者对傅立叶算法进行了改进。

一种方法是在进行傅立叶算法前，对输入信号进行一次一阶差分滤波[16]；另一种方法是引入补偿系数[17]。这两种方法都只能滤除衰减直流分量，仍不能抑制非整次谐波以及电源频率波动的影响。

小波分析能有效克服衰减的直流分量、非整次谐波、电源频率波动的影响，并能充分利用信号的暂态信息，比傅立叶算法更为精确可靠。

小波分析中最重要的是小波基的选择，不同小波基分析同一问题会产生不同的结果。Morlet复小波[18]采用的是时频面积最小的Gauss窗，在时频域内都有很好的紧支撑性。Morlet复小波为幅值小波，其变换结果可同时反映信号的幅值与相位信息，因

此，小波基选用Morlet复小波。

Morlet复小波定义式为

$$\psi(t)=\frac{1}{\sqrt{\pi f_b}}e^{j\omega_0 t}e^{-t^2/f_b}=\frac{1}{\sqrt{\pi f_b}}e^{-t^2/f_b}(\cos\omega_0 t+j\sin\omega_0 t) \quad (1)$$

式中，$\omega_0=2\pi f_c$，f_c为中心频率，f_b为带宽。实际工作中取$\omega_0\geq 5$，以近似满足容许性条件。

该算法是对离散采样值进行运算，将式(1)离散化，可得Morlet复小波离散表达式为

$$\psi(n)=\tau\cdot\exp[-(\frac{6n}{mN}-3)^2/c]\cdot\exp(\frac{j2\pi kn}{N}) \quad (2)$$

式中：τ为满足归一化条件的比例系数，$\tau=mN/\sum_{n=0}^{mN-1}|\psi(n)/\tau|n$；$m$为时间窗大小，$m$ = 1, 2,…，m取1、2时，分别对应全周、两周Morlet复小波；N为一个周期的采样点数，$N=f_s/f$，f_s为信号采样频率，f为信号基波频率；c为频宽调节系数；k为谐波次数；n为小波函数离散序列号，n= 1,2,…,$mN-1$。

由式(2)得Morlet复小波实部、虚部离散表达式为

$$\psi_R(n)=\tau\cdot\exp[-(\frac{6n}{mN}-3)^2/c]\cdot\cos(\frac{2\pi kn}{N}) \quad (3)$$

$$\psi_I(n)=\tau\cdot\exp[-(\frac{6n}{mN}-3)^2/c]\cdot\sin(\frac{2\pi kn}{N}) \quad (4)$$

由式(3)、式(4)求得Morlet复小波实部和虚部后，再由式(5)得到信号$f(n)$的基波和各次谐波幅值。

$$F_k(n)=\sqrt{(f(n)*\psi_R(n))^2+(f(n)*\psi_I(n))^2} \quad (5)$$

式中，*表示卷积。

2 关键的硬件设计

2.1 硬件框图

电动机保护器的硬件电路主要包括信号采集与处理、控制器STM32、输入/输出开关量、键盘、LCD显示、电源和时钟、以太网通信模块、光电隔离等。硬件框图如图1所示。

互感器实时检测电动机电压/电流，经信号处理电路送入A/D进行模数转换，STM32通过小波分析算法得到信号的有效值，与设定值进行比较判断，若有故障，则根据故障情况，选择执行跳闸或发出报警信号，并记录故障信息(故障类型、发生时间)。同时通过以太网接口与上位机通信，实现电动机的在线监测。使用光电隔离元件实现模拟量与数字量的有效隔离。

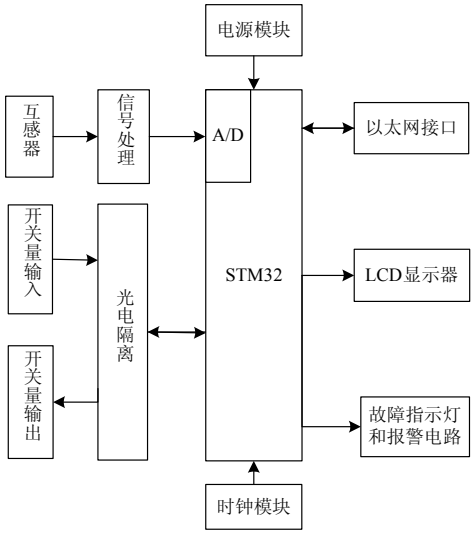

图 1 硬件框图

Fig. 1 Hardware block diagram

2.2 以太网接口设计

以太网[19]因其兼容性好、通信速率高，已成为当今网络的主流。电动机保护器通过以太网与上位机通信，实现电动机实时监测与保护。由于STM32本身没有以太网控制接口，本文设计了一个以ENC28J60为主芯片的网络模块作为以太网控制器。

ENC28J60[20]是带有SPI接口的独立以太网控制器，可作为任何配备有SPI的控制器的以太网接口。ENC28J60符合IEEE 802.3的全部规范，采用了一系列包过滤机制，以对传入数据包进行限制；还提供了一个内部DMA模块，以实现数据快速吞吐、硬件支持IP计算和校验。通过两个中断引脚和SPI实现与主控制器通信，数据传输率高达10 Mbit/s。两个专用引脚连接LED，用于指示网络活动状态。

ENC28J60网络模块采用ENC28J60作为主芯片，单芯片即可实现以太网接入，利用该模块基本上每个处理器都可以实现以太网连接。ENC28J60网络模块原理图如图2所示。

该模块通过一个8引脚排阵与STM32连接，8个引脚分别是GND、RST、MISO、SCK、MOSI、INT、CS和V3.3。其中GND和V3.3用于给模块供电，MISO/MOSI/SCK用于SCK通信，CS是片选信号，INT为中断输出引脚，RST为模块复位信号。

ENC28J60网络模块与STM32的连接关系如表1所示。STM32连接ENC28J60网络模块后，再通过一根网线连接网络模块与路由器，就可以实现保护器与上位机的联网通信。

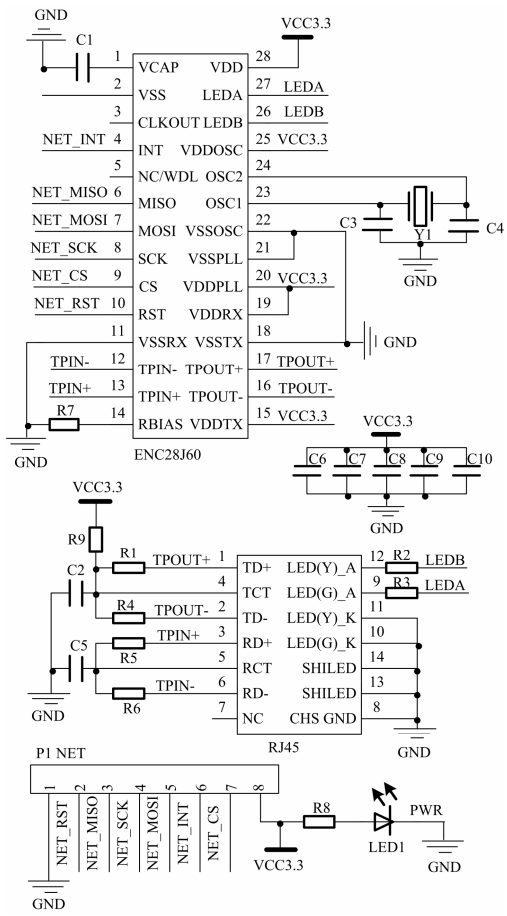

图 2 ENC28J60网络模块原理图

Fig. 2 Schematic diagram of ENC28J60 module

表1 ENC28J60网络模块与STM32的连接关系

Table 1 Connection of ENC28J60 network module and STM32

引脚号	ENC28J60 网络模块	STM32
1	GND	GND
2	NET_RST	PG6
3	NET_MISO	PB14
4	NET_SCK	PB13
5	NET_MOSI	PB15
6	NET_INT	PD2
7	NET_CS	PG8
8	VCC3.3	VCC3.3

3　软件设计

3.1 软件主程序

主程序包含系统初始化、自检、数据采集程序、故障处理程序、显示程序、按键处理程序、通信程序等。主程序主要是调用各个子程序完成各项功能。其流程如图3所示。

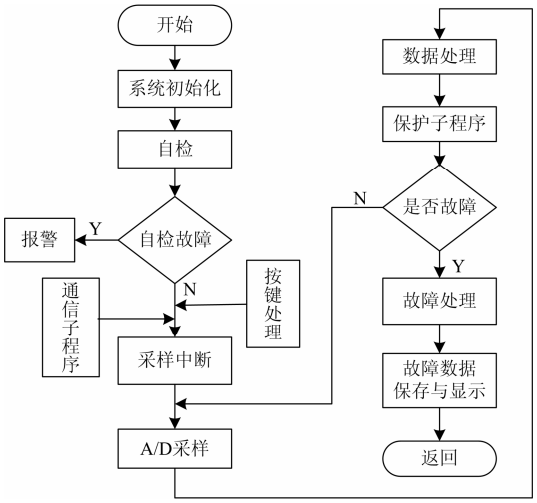

图 3 主程序流程图

Fig. 3 Flow chart of main program

3.2 μC/OS-II 操作系统

保护器要完成多种保护子程序，为保证实时性，在设计时移植了 μC/OS-II操作系统。 μC/OS-II[21]是一个可基于ROM运行、可裁剪、抢占式、实时多任务内核，具有高度可移植性。 μC/OS-II体系结构如图4所示。

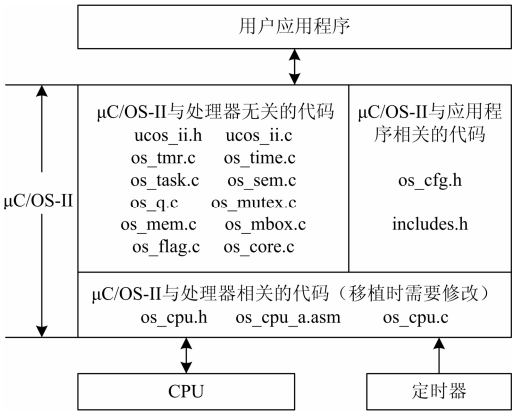

图 4 μC/OS-II体系结构图

Fig. 4 μC /OS-II system structure diagram

从图4可以看出， μC/OS-II的移植[22]只需修改os_cpu.h、os_cpu_a.asm和os_cpu.c这三个文件即可。其中，os_cpu.h 进行数据类型的定义，以及处理器相关代码和几个函数原型；os_cpu_a.asm是移植过程中需要汇编完成的一些函数，主要是任务切换函数；os_cpu.c定义一些用户HOOK函数。

软件程序实行多任务并发运行，程序分为五个任务：开始任务、队列消息显示任务、按键扫描任务、数据处理任务、主任务。

开始任务用于创建邮箱、消息队列以及其他任务，之后挂起；队列消息显示任务请求消息队列，

在得到消息后显示收到的消息数据；按键扫描任务用于扫描按键，通过消息邮箱将得到的键值发送出去。数据处理任务用于处理采集的数据并发送队列；主任务通过查询消息邮箱获得键值，进行相应操作。限于篇幅，这里只给出开始任务源代码。

```
void start_task(void *pdata)
{
  OS_CPU_SR cpu_sr=0;
  u8 err;
  pdata = pdata;
  msg_key=OSMboxCreate((void*)0);
  q_msg=OSQCreate(&MsgGrp[0],256);
  OSStatInit();
  OS_ENTER_CRITICAL();
  OSTaskCreate(data_task,(void*)0,(OS_STK*)&
  DATA_TASK_STK[DATA_STK_SIZE-1],DATA_
  TASK_PRIO);
  OSTaskCreate(qmsgshow_task,(void*)0,(OS_STK*)
&QMSGSHOW_TASK_STK[QMSGSHOW_STK_
SIZE-1],QMSGSHOW_TASK_PRIO);
  OSTaskCreate(main_task,(void*)0,(OS_STK*)&
MAIN_TASK_STK[MAIN_STK_SIZE-1],MAIN_
TASK_PRIO);
    OSTaskCreate(key_task,(void*)0,(OS_STK*)&
KEY_TASK_STK[KEY_STK_SIZE-1],KEY_TASK_
PRIO);
  OSTaskSuspend(START_TASK_PRIO);
  OS_EXIT_CRITICAL();
}
```

4 结论

该保护器以小波分析作为电动机保护算法，保证了处理数据的准确性。通过以太网与上位机联网通信，实现电动机网络化管理。以 μC/OS-II 操作系统进行多任务并发处理，提高装置实时性。保护器结构简单、功能完善、可靠性高，具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 唐颖, 李玉林. 基于 ARM 技术的新型低压电动机保护控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 119-122.
TANG Ying, LI Yulin. Design of new low-voltage motor protection controller based on ARM technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 119-122.

[2] 王惠中, 张雨默, 冯霞. 基于 DSP 电动机综合保护装置的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 105-108.
WANG Huizhong, ZHANG Yumo, FENG Xia. Design of motor synthetic protection unit based on DSP[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 105-108.

[3] 曾博, 滕召胜, 周毅波. 改进 FFT 非稳态电力谐波分析及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 256-262.
ZENG Bo, TENG Zhaosheng, ZHOU Yibo. Power system harmonic analysis under nonstationary situations and its application based on improved FFT method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 256-262.

[4] 刘旭东, 叶鹏. 基于 PC104 的电力谐波检测装置研制[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(6): 44-48.
LIU Xudong, YE Peng. Development of power harmonic detection device based on PC104[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(6): 44-48.

[5] 曾瑞江, 杨震斌, 柳慧超. 基于小波变换的电力系统谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 35-39.
ZENG Ruijiang, YANG Zhenbin, LIU Huichao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.

[6] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
ZHANG Peng, LI Hongbin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-259.

[7] 滕召胜, 罗志坤, 孙传奇, 等. 基于小波包分解与重构算法的谐波电能计量[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 200-206.
TENG Zhaosheng, LUO Zhikun, SUN Chuanqi, et al. Harmonic energy measurement based on wavelet packet decomposition and reconstruction algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 200-206.

[8] 张德丰. Matlab 小波分析与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[9] 孙鹏, 郑志成, 高翔. 基于小波分析的故障电弧检测方法[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 25-29.
SUN Peng, ZHENG Zhicheng, GAO Xiang. Arc fault detection based on wavelet analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 25-29.

[10] 张巧革, 刘志刚, 陈刚. 暂态振荡信号频率检测的 Morlet 小波谱峭度法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 1-6.
ZHANG Qiaoge, LIU Zhigang, CHEN Gang. Frequency detection of transient oscillation signal using Morlet wavelet based on spectral kurtosis method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 1-6.

[11] 孙旭霞, 郭永胜. 基于小波-卡尔曼滤波的基波分量提取[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 93-98.
SUN Xuxia, GUO Yongsheng. Wavelet-based Kalman filter for fundamental component[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(4): 93-98.

[12] 刘桂英, 粟时平. 风电接入系统暂态电能质量扰动小波检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 22-27.
LIU Guiying, SU Shiping. Wavelet detection method of transient power quality disturbance for power system connected with wind energy generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 22-27.

[13] 周龙华, 付青, 余世杰, 等. 基于小波变换的谐波检测技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 80-85.
ZHOU Longhua, FU Qing, YU Shijie, et al. Harmonic detection based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 80-85.

[14] 王坤, 余志飞, 林美玲, 等. 高效提升小波的电能质量暂态信号分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(8): 23-26.
WANG Kun,YU Zhifei, LIN Meiling, et al. Analysis of transient signals for lifting power quality efficiently in wavelet transform[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(8): 23-26.

[15] 杨晓健. 基于 SEP4020 的电动机保护算法研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2009.
YANG Xiaojian. Research and implementation on algorithm of motor protection based on SEP4020[D]. Naijing: Southeast University, 2009.

[16] 易攀, 石一辉, 张承学. 智能低压电动机保护装置的研究[J]. 继电器, 2006, 34(19): 7-10.
YI Pan, SHI Yihui, ZHANG Chengxue. Study of low-voltage motor protection devices[J]. Relay, 2006, 34(19): 7-10.

[17] 王林虎, 王见乐, 胡志坚, 等. 基于 DSP 的电动机保护装置[J]. 电力自动化备, 2004, 24(8): 69-72.
WANG Linhu, WANG Jianle, HU Zhijian, et al. Electromotor protective device based on DSP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 69-72.

[18] 郑治真, 沈萍, 杨选辉, 等. 小波变换及 MATLAB 工具的应用[M]. 北京: 地震出版社, 2001.

[19] 张玉明. 基于 ARM7 嵌入式系统的电动机保护装置的研制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
ZHANG Yuming. Research and development of the motor protection device based on the embedded system ARM7[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.

[20] 李阳, 吴成富, 邓红德. 基于 DSP 和 ENC28J60 的多串口与以太网数据传输系统设计[J]. 测控技术, 2011, 30(27): 61-65.
LI Yang, WU Chengfu, DENG Hongde. Design of data transmitting system between multi-channel RS232 and Ethernet based on DSP and ENC28J60[J]. Measurement and Control Technology, 2011, 30(27): 61-65.

[21] 任哲. 嵌入式实时操作系统 μC/OS-II 原理及应用[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

[22] 仲伟, 丁宁, 吴参林, 等. 图形化编程的继电保护软件平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 99-104.
ZHONG Wei, DING Ning, WU Shenlin, et al. Software architecture and design of the schematic programmable development platform for protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 99-104.

收稿日期：2014-09-17；　修回日期：2014-11-12

作者简介：

雷乃清(1969-)，男，工学学士学位，高级工程师，硕士生导师，从事控制理论与控制工程、检测技术与自动化装置、电子技术实验教学和科研工作；E-mail: leinaiqing@163.com

许钰婷(1990-)，女，通信作者，硕士研究生，研究方向为控制理论与控制工程，电动机保护。E-mail: 1578480379@qq.com

（编辑　魏小丽）