

基于多核结构的断路器在线监测系统设计

梁君涵, 郑建勇, 潘益

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:针对目前断路器在线监测中存在的系统处理能力较弱、稳定性不足等问题,采用了微处理器(ARM),数字信号处理器(digital signal processor, DSP),现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)三核平台实现断路器在线监测。断路器在线监测功能分为数据采集、数据运算和人机交互3部分。由FPGA控制ADS8568完成数据采集,断路器状态量通过传感器传入系统。DSP利用db2小波对FPGA采集的信号进行5次小波分解。将处理之后的数据通过基于Syslink异构的双核通信机制传输到ARM端,最终由ARM完成人机交互。该方案更加充分发挥3个控制核心的优势,使系统拥有更好的数据处理能力。通过测试,基于三核结构的断路器在线监测系统较之原来已有的系统在性能上有较大提高。

关键词:高压断路器;在线监测;Syslink;异构双核通信

中图分类号:TM561

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)06-0068-05

0 引言

电气设备智能化在是当今社会电气行业发展的主旋律,断路器作为必不可少的一次设备,在变电站智能化的过程中具有不可替代的作用^[1-8]。为了保证断路器的正常运行,对其运行状态的实时监控是提升断路器运行稳定性的重要途径,近年来有不少学者对断路器在线监测装置进行了研究^[9-11]。文献[1]中开发的断路器在线监测系统采用飞思卡尔单片机为CPU,单片机的数据处理能力和系统控制能力均较弱并不适用于断路器在线监测领域。文献[2]以ARM和DSP为核心开发断路器在线监测装置,双核之间通过SPI进行通信。利用SPI通信占用硬件空间资源,而且如果装置硬件升级时需要更换ARM或者DSP,串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)部分需要重新设计,不利于装置升级。DSP善于数据运算,但由于其串行执行指令的特点,采集数据能力不能够充分满足断路器在线监测对实时性的要求。文献[3]以DSP为核心对断路器的振动信号进行监测,并将数据通过工业现场总线传递到工控机中进行数据处理。DSP的强项是数据处理,但它的外围接口不如ARM丰富,标准化通用性不如ARM好,对整个系统的控制能力也不及ARM强。文献[4]及文献[5]采用STM32作为CPU,将RS422串口收集到的数据发送到上位机中。文献[6]同样使用单核STM32实现采集断路器

实时状态数据并发送到上位机。STM32系列控制和计算能力都达不到工业级别,虽然以STM32为核心研制的装置成本低,但是其数据处理能力并不能完全胜任在线监测的要求。

综上,目前的断路器在线监测系统以单核或双核结构配合上位机的形式为主,双核之间大多是通过SPI进行通信。但是随着电气设备智能化程度的提高,断路器在线监测装置需要处理的数据越来越多,硬件系统的升级也越来越频繁,因此需要进一步提高装置处理数据的速度和运算能力,同时也要让系统升级更加方便。文中提出了基于ARM, DSP, FPGA三核结构开发的高压断路器在线监测系统,其中FPGA控制模数(analog to digital, AD)模块进行数据采集, DSP利用其强大的运算能力进行数据运算^[12],利用ARM进行整体控制以及人机交互。这样的设计方案较之单核或双核系统每一块芯片需要完成的算法减少,节约内存,从而能够更充分地发挥芯片各自的优势,大大提高系统的速度和效率。系统将ARM9和C674x系列的DSP集成为一块CPU,双核之间基于Syslink通过共享内存区域进行通信,对比通过SPI通信节省了硬件空间资源,系统稳定性好,软硬件升级更加方便。

1 总体架构

断路器在线监测是指通过监测装置获得断路器的状态量,经过数据处理之后与相关历史数据进行比对,从而判断断路器当前的运行状态。通过断路器在线监测可以对断路器的异常状态进行预判并准确做出故障诊断^[2]。断路器在线监测总体上

收稿日期:2017-07-10;修回日期:2017-08-13

基金项目:国网江苏省电力公司科技项目(5210EC14006Z);江苏省科技厅重点研发计划(BE2016113, BE2017030)

分为数据采集和故障诊断 2 部分。对断路器在线监测需要主要测量的状态量包含分、合闸线圈电流,动触头行程和振动信号,数据采集过程主要包括传感器将监测的断路器状态量以模拟电信号的形式送入系统,经过滤波和 AD 转换,模拟信号转换为数字信号之后发到处理器。故障诊断过程主要是处理器对采集到的数据进行计算,并根据数据库中的数据再与历史数据进行比较和分析,处理器中 DSP 和 ARM 之间进行双向通信。最后将断路器的工作状态显示在人机界面上并发送到后台监控,如图 1 所示。

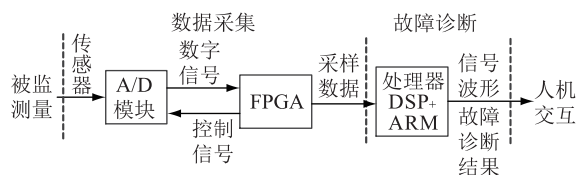


图 1 断路器在线监测系统总体架构

Fig. 1 The overall structure of on-line monitoring system of circuit breaker

2 硬件设计

2.1 传感器选择

系统需要监测的状态量包括分、合闸线圈电流,动触头行程和振动信号。影响断路器操作可靠性的一个重要因素是机械故障^[11,13,14]。分、合闸线圈电流信号包含多个特征量,可以用于诊断断路器在分、合闸控制电压异常、铁心卡涩、操动机构卡涩等故障^[11]。同时,分、合闸线圈电流采集方便并且能够较好地反应断路器操作机构动作的整个过程,所以选用分、合闸线圈电流为故障分析的依据。文中系统用霍尔电流传感器 HNC-03SY 实现对分、合闸电流信号的监测,霍尔传感器安装方便,不需要改变电路结构。系统中使用 IC 压电加速度传感器 LC0102T 采集振动信号,它内装 IC 放大器,提高了传感器监测的灵敏度。断路器动触头的行程信号指的是断路器三相动触头行程-时间特性曲线,通过对特性曲线的分析,可以准确地把握断路器分、合闸的动态过程,了解包括运动速度,时间,开距,超程等机械参数,文中采用微型线性位移传感器。

2.2 模数转换模块与 FPGA 接口设计

硬件系统利用 FPGA 在逻辑时序控制上优势进行数据采集^[15],以 FPGA 控制 AD 模块构成数据采集模块,文中介绍的断路器在线监测系统中使用 TI 公司的 ADS8568 模数转换芯片,它最多支持 8 通道同步 16 位高速转换。该设计中,由 FPGA 控制 AD 芯片以 10 kHz 的采样频率进行采样,在 CONVST 信

号的上升沿,AD 芯片开始采样并进行模数转换,FPGA 通过片选信号选中 AD 芯片,在 RD 信号为低电平时将一个通道的 16 位数据存入数据寄存器中。读取 8 次后,将数据通过数据并行总线发送给 FPGA,FPGA 对数据进行预处理,然后送入先入先出队列(first input first output, FIFO)缓存。

2.3 FPGA 与 CPU 接口设计

CPU 由 ARM 和 DSP 集成,DSP 通过 uPP 与 FPGA 连接,uPP 提供了数据总线,DSP 在读数据、写数据的过程中用相应的状态标志位来置位以指示 FIFO 的状态,通过计算数据写入和读出的计数,来判断 FIFO 中的数据量^[16],DSP 持续从 FIFO 中读出数据直到 FIFO 为空为止。DSP 和 ARM 双核之间采用共享内存进行数据通信以及消息收发,DSP 对 FPGA 所发送的数据进行处理,将结果发送给 ARM,最终由 ARM 把数据波形呈现 LCD 屏上,接收工作人员对装置的操作,完成人机交互。硬件结构如图 2 所示。

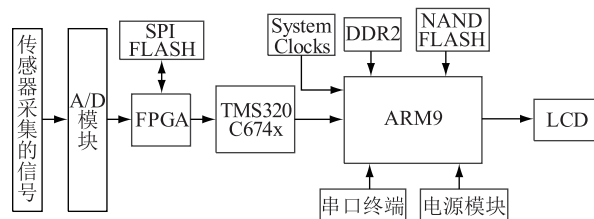


图 2 断路器在线监测系统硬件结构

Fig. 2 The hardware structure of on-line monitoring system of circuit breaker

3 软件设计

3.1 故障诊断算法

断路器分合闸线圈电流是故障诊断的重要依据,其中合闸电流波形如图 3 所示,文中采用基于小波变换的方法提取电流信号的特征值^[17]。 $x(t)$ 的小波变换为:

$$WT_v = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad a > 0 \quad (1)$$

式中: $\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$ 为基本小波函数; τ 为小波位移; a 为小波伸缩尺度。

为了方便对计算机信号进行处理,需要利用不同的 a 对信号进行离散处理,离散小波变换为:

$$WT(a_0^i, kt_0) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a_0^i, kt_0}(t) dt$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, k \in Z \quad (2)$$

设经过分解的原信号为 X_s 则信号的小波分解可表示为:

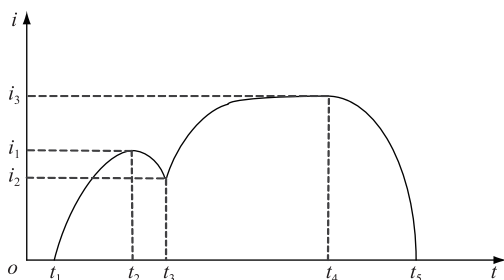


图3 断路器合闸电流波形

Fig. 3 The waveform of closing coil current of circuit breaker

$$X_s = X_1 + D_1 = X_2 + D_1 + D_2 = \dots \quad (3)$$

式中:信号 X_i 分解为下一层的 X_{i+1} 和 D_{i+1} , 相当于将 X_i 按照频率高低进行滤波, X_{i+1} 为低频部分信号, D_{i+1} 为高频部分信号^[18,19]。

小波变换在突变监测上有很大的优势,文中介绍的装置通过小波变换可以准确地提取信号波形,以及信号波形中的特征值,以此为依据进行断路器故障诊断。

3.2 算法实现

系统中 DSP 内存分为存储用于判断故障的数据和对实时采样数据进行运算处理。采样数据通过 uPP 传入 DSP 之后,首先对信号波形进行降噪处理,由于分、合闸线圈电流中突变点时刻的频率主要集中在 200~300 Hz,所以降噪之后利用 db2 基本小波函数^[20]对数据进行 5 次小波分解,经过重构得到 D_5 ,该层信号对应的频率范围与突变点频率相符。滤除 D_5 中的干扰突变点之后,第一个突变点对应的的时间就是电流信号波形开始的时间 t_1 ,后一个突变点对应的的时间就是电流信号波形结束的时间 t_5 ,除了最初和最后突变点,剩下突变点中脉冲最大的点对应电流信号波形中的极小值点对应时间 t_3 。

根据小波变换截取信号里对应 t_1 至 t_5 的波形,先检索信号里 t_1 至 t_3 中的最大值对应时间 t_2 和电流 i_1 ,再检索信号里 t_3 至 t_5 中的最大值对应时间 t_4 和电流 i_3 ,以上数据时间点 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 和电流值 i_1, i_3 以及 t_3 对应的电流值 i_2 作为故障诊断的依据,同 DSP 中存储的用于判断故障类型的数据进行对比,将结果同电流信号波形数据一起发送到 ARM 端,显示在人机界面上,整个过程执行结束大约需要 60 μs 。

由于 DSP 是串行执行指令,所以如果 DSP 在做数据运算的同时需要兼顾数据采集会导致信号数据采集不完整,甚至错过整个信号波形。本设计中将“数据采集”和“数据处理”2 个任务分开,DSP 只需要完成数据处理,由 FPGA 控制 AD 模块完成实时采样,有效地提升系统数据采集的实时性和准确

性。故障诊断算法软件实现图如图 4 所示。

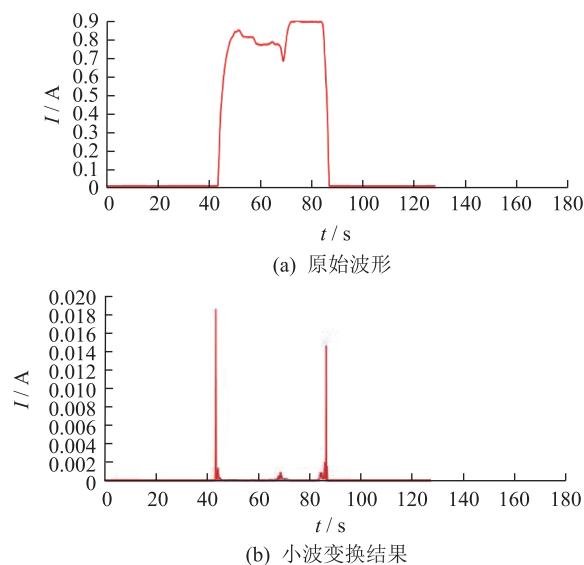


图4 故障预判算法实现图

Fig. 4 The realization of fault prognosis algorithm

3.3 双核通信功能实现

DSP 因为其具有哈佛结构并且采用四级流水线操作等特性具有极强的数据处理能力^[9],在硬件系统中以 DSP 为核心构成数据处理器,完成数据的计算和故障诊断;ARM 作为精简指令集(reduced instruction set computing, RISC)体系结构的微处理器,它最大的优势在于低功耗、芯片集成度高,具有极强的事务管理能力,可以同时处理 3 个任务,在系统中控制数据通信,并负责人机交互。DSP 端完成数据计算之后需要将数据和结果发送给 ARM,ARM 上运行 Linux 系统,DSP 上运行 SYS/BIOS 系统,双核之间通过共享内存区基于 Syslink 进行异构双核通信。

Syslink 是一个用于开发嵌入式异构多核系统的软件系统的软件开发包,它通过约定相同的编程接口,以屏蔽硬件差异,实现异构双核通信,其中包括 Linux 端的接口和 SYS/BIOS 端的接口,编程接口的数据互通由各类组件实现,如消息收发组件,共享内存管理组件,数据传输组件等。

系统启动初始化之后 DSP 上 SYS/BIOS 端软件接口里消息收发组件就开始执行等待指令操作,等待 ARM 端发送操作命令。ARM 运行有 2 个线程:一个是图形用户接口线程,运行用户应用程序用于人机交互;另一个是消息收发线程用于接收 DSP 传输过来的数据,并交给图形用户接口线程进行电流波形的绘制。系统启动初始化后,用户通过图形用户接口启动 DSP,同时启动收发线程,开始等待 DSP

发出消息。DSP 的消息收发组件接收到 ARM 的指令之后启动 AD 数据采集线程,开始对 FPGA 所发送的数据进行读取,并进行故障诊断相关的运算,同时将处理之后的数据以及故障诊断的结果写入共享内存空间内的环形缓存区,写入完成后释放存储空间,并向 ARM 发送消息,通知 ARM 可以进行采样数据的读取。消息收发线程接收到 DSP 发出的消息后,开始通过读指针获取环形缓存区中读取空间的有效数据。数据读取完成后向图形用户接口线程发送更新波形的信号并在 DSP 诊断出断路器有异常状况时提示报警。软件流程图如图 5 所示,装置最后显示的波形如图 6 所示。

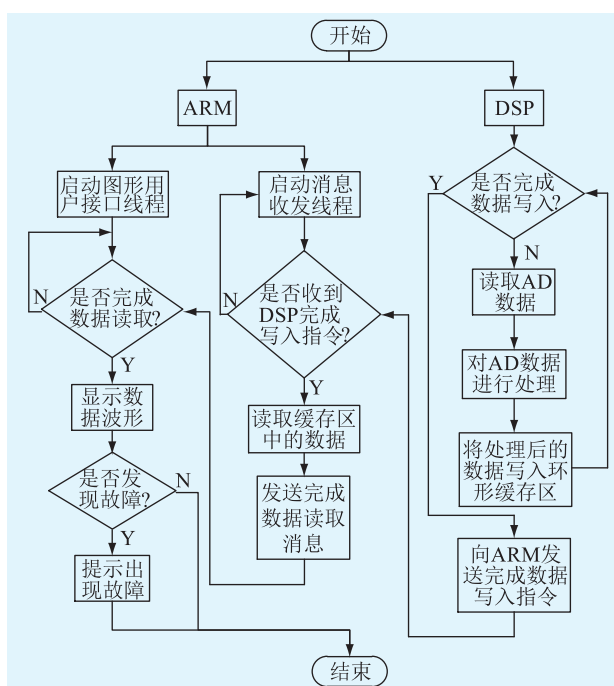


图 5 断路器在线监测软件流程

Fig. 5 The software flow of on-line monitoring system of circuit breaker

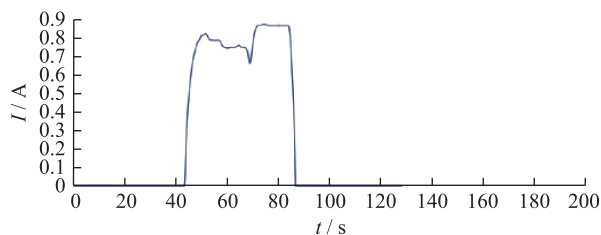


图 6 软件采集合闸电流信号波形

Fig. 6 The waveform of closing coil current of circuit breaker

4 结语

相比于单核或双核的监测系统,文中介绍的监测装置软件运行更加流畅,采样波形更加光滑,故障诊断更加准确。

综上所述,文中介绍的系统将断路器在线监测装置需要完成的功能进行了更细致地分配到 3 块芯片中,具体优势如下:

(1) 在 ARM 上运行 Linux,利用 Linux 开源,易裁剪,可以运行多种软件开发平台等优势实现人机交互,同时基于 Linux 开发了人机交互界面,利用 LCD 进行人机交互,省去了上位机,提升了监测软件运行的速度和流畅性,并利用 ARM 优秀的事务管理能力让它作为主核,负责系统的整体控制。避免用 ARM 完成复杂的数据计算或者直接控制 A/D 芯片进行数据采集。

(2) 在 DSP 上运行 SYS/BIOS 系统,利用 DSP 极强的数据处理能力,让它作为从核完成对采样数据的运算。DSP 不需要直接进行数据采集或者对整体系统进行控制,节省内存,大大提升了系统在线监测的准确性和实时性。

(3) CPU 集成了 ARM9 和 C674x,在发挥 ARM 和 DSP 各自的优势的同时,基于共享内存的 Syslink 双核通信,利于硬件升级,稳定性也高于独立安装 ARM 和 DSP 并通过总线进行双核通信的系统。

文中介绍的断路器在线监测系统既节约成本,又能够满足现场对断路器在线监测装置功能的要求,较高的实用价值。同时由于 ARM 和 DSP 双核有效地分担了计算和控制的任任务,系统在功能上依然有极大的提升空间,具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 武建文,薛利俊,张少渤,等. 中压配电断路器综合监控装置研究[J]. 高压电器,2010,46(8):26-30,34.
WU Jianwen, XUE Lijun, ZHANG Shaobo, et al. Synthetic monitoring device for medium voltage distribution circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 26-30, 34.
- [2] 黄新波,王霄宽,方寿贤,等. 智能变电站断路器状态监测IED设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):95-99.
HUANG Xinbo, WANG Xiaokuan, FANG Shouxian, et al. Design on status monitoring IED of circuit breaker for smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 95-99.
- [3] 陈盟,郎兵,牟黎. 真空断路器在线监测中分合闸时间的研究[J]. 高压电器,2015,51(1):86-91, 97.
CHEN Meng, LANG Bing, MU Li. Study on opening and closing time of online monitoring for the vacuum circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 86-91, 97.
- [4] 钟建英,孙银山,张文涛,等. 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器在线监测系统[J]. 现代电子技术,2016,39(22):133-137.
ZHONG Jianying, SUN Yinshan, ZHANG Wentao, et al. High-voltage circuit breaker on-line monitoring system based on opening and closing coil current signal [J]. Modern Electronics

- Technique, 2016, 39(22): 133-137.
- [5] 卞和营, 代克杰. 基于分合闸线圈信号的断路器状态在线监测系统[J]. 现代电子技术, 2014(3): 100-104.
BIAN Heying, DAI Kejie. Design of online monitoring system for breaker status based on closing coils signal [J]. Modern Electronics Technique, 2014(3): 100-104.
- [6] 张一茗, 袁欢, 穆广祺, 等. 高压 SF₆ 开关设备气体分解物浓度在线监测装置研制[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 134-139.
ZHANG Yiming, YUAN Huan, MU Guangqi, et al. Development of on-line concentration monitoring device for SF₆ decomposition product in high voltage SF₆ switchgear [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 134-139.
- [7] 杨景刚, 刘媛, 高山, 等. 高压断路器机械故障诊断技术[J]. 电力工程技术, 2016, 35(2): 1-6, 10.
YANG Jinggang, LIU Yuan, GAO Shan, et al. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers [J]. Electric Power Engineering Technology, 2016(2): 1-6, 10.
- [8] 薛建根. ZN65A-12 型真空断路器拒分原因分析与处理[J]. 江苏电机工程, 2015(2): 18-20.
XUE Jiagen. Analysis and treatment of the fail-to-break of ZN65A-12 type vacuum circuit breaker [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015(2): 18-20.
- [9] ANDRUSA M, ADAM M, IRIMIA F D. Aspects about the monitoring and diagnosis of high voltage circuit breakers [C] // Electrical and Power Engineering (EPE), 2012 International Conference and Exposition on, 2012: 154-158.
- [10] ANDRUSA M, ADAM M, IRIMIA F D. Embedded system and software application for monitoring and diagnosis of high voltage circuit breakers [C] // Electrical and Power Engineering (EPE), 2012 International Conference and Exposition on, 2012: 159-166.
- [11] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 真空断路器机械特性的在线监测方法[J]. 高压电器, 2006, 42(1): 31-34.
MENG Yongpeng, JIA Shenli, RONG Mingzhe. On-line monitoring method for mechanical characteristics of vacuum circuit breakers [J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 31-34.
- [12] 钟睿, 李尚柏. DSP 技术完全攻略—基于 TI 系列的 DSP 设计与开发 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 5-7, 13.
ZHONG Rui, LI Shangbai. Complete strategy of DSP technology-design and development of DSP based on TI series [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 5-7, 13.
- [13] 刘益青, 高厚磊, 魏欣, 等. 智能变电站中过程层和间隔层功能一体化 IED 的设计 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 58-62.
LIU Yiqing, GAO Houlei, WEI Xin, et al. Design of IED with integrated functions of process level and bay level in intelligent substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 58-62.
- [14] 常广, 王毅, 王玮. 采用振动信号零相位滤波时频熵的高压断路器机械故障诊断 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 155-162, 3.
CHANG Guang, WANG Yi, WANG Wei. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers utilizing zero-phase filter time-frequency entropy of vibration signal [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 155-162, 3.
- [15] 张明珠, 邹欣洁. 基于 FPGA&ARM9 合并单元的研制 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 84-87.
ZHANG Mingzhu, ZOU Xinjie. Development of merging unit based on FPGA&ARM9 [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 84-87.
- [16] 郝晓明, 李杰, 黄玉岗. 基于 ADS8568 的八路数据采集系统设计 [J]. 传感技术学报, 2016, 29(1): 150-154.
HAO Xiaoming, LI Jie, HUANG Yugang. Designing of eight-channels data acquisition system based on ADS8568 [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(1): 150-154.
- [17] 张永奎, 赵智忠, 冯旭, 等. 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断 [J]. 高压电器, 2013(2): 37-42.
ZHANG Yongkui, ZHAO Zhizhong, FENG Xu, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on opening/closing coil current parameters [J]. High Voltage Apparatus, 2013(2): 37-42.
- [18] 孙鹏, 董荣刚, 郑志成. 基于小波分析信号特征频段能量变比的故障电弧诊断技术研究 [J]. 高压电器, 2010, 46(7): 46-50.
SUN Peng, DONG Ronggang, ZHENG Zhicheng. Arc fault diagnosis technology characteristic based on the analysis of energy variation of signal's characteristic frequency band with wavelet transform [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 46-50.
- [19] 孙银山, 张文涛, 张一茗, 等. 高压断路器分合闸线圈电流信号特征提取与故障判别方法研究 [J]. 高压电器, 2015, 51(9): 134-139.
SUN Yinshan, ZHANG Wentao, ZHANG Yiming, et al. Research on feature value extraction and fault recognition of coil current signal in high-voltage circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 134-139.
- [20] 刘明才. 小波分析及其应用. 第 2 版 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 49-66.
LIU Mingcai. Wavelet analysis and its application. The second edition [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 49-66.

作者简介:



梁君涵

梁君涵(1992—),男,江苏南京人,硕士研究生,从事高压断路器在线监测方面的研究工作(E-mail: 220152191@seu.edu.cn);

郑建勇(1966—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,从事电力电子与电力传动方面的研究工作;

潘益(1993—),男,江苏无锡人,博士研究生,从事高压断路器在线监测与故障诊断的

研究工作。

(下转第 77 页)