

基于 DSP 及 ARM 的分布式高压断路器机械特性监测系统

熊小伏, 孙鑫, 蔡伟贤, 杨洋

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 针对高压断路器机械特性监测的具体要求, 设计了基于 ARM+DSP 主从处理器架构的分布式监测系统。基于模块化系统设计思想, 提出了由 ARM 核心板、DSP 协处理板和信号处理模块组成的硬件实现方案。采用通用的设备驱动器模型和柔性的软件架构, 开发了易于扩展和移植的 DSP 协处理器固件程序, 运用 Windows CE 操作系统构建嵌入式 Web Server 的方法, 结合 ASP+COM 组件技术, 设计实现了基于 Web 技术的远程服务功能。该系统具有可靠性高、组态灵活、传输距离远、易于部署、扩展方便等特点, 能够在线实时分析高压断路器机械特性的多个特征参量, 基于 Web 页面的远程服务功能使得分布式监测系统的易用性和易维护性得到显著提升。

关键词: 高压断路器; 机械特性; 分布式监测; 嵌入式系统; 嵌入式网络服务器

Distributed monitoring system based on DSP and ARM for mechanical characteristic of high voltage breaker

XIONG Xiao-fu, SUN Xin, CAI Wei-xian, YANG Yang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The prototype for distributed monitoring system is brought forward according to the demand of online monitoring system for mechanical characteristic of high voltage breaker. In this solution, architecture of ARM as host processor and DSP as co-processor is embodied. The hardware platform based on modular design is presented, which consists of ARM core board, DSP co-processing board, and signal-modulated module. The firmware that can be easily transplanted and extended for DSP board is developed based on general module of device driver and flexible software structure. Remote service for distributed monitoring unit is implemented based on web technology. It embodies ASP and COM component technology, and is built upon ARM processor which is transplanted with Windows CE. This system has the characteristic of high reliability, flexible configuration, long-distance transmission, as well as convenient installation and extension and many characteristic parameters of mechanical conditions in high voltage breaker can be obtained through it. Remote service based on web technology can facilitate distributed monitoring maintenance and utility.

Key words: high voltage breaker; mechanical characteristic; distributed monitoring; embedded system; embedded web server

中图分类号: TM561 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0064-05

0 引言

高压断路器作为电力系统中最重要设备之一, 担负着控制和保护的双重任务, 其可靠性直接影响电网运行的安全与稳定。国际大电网会议对高压断路器可靠性所作的两次世界范围的调查, 以及国家电力科学研究院对高压开关事故的统计分析均表明, 80%的高压断路器故障是由于机械性能不良所造成的^[1]。如何高效的实现对于高压断路器的机械特性的在线监测, 已成为国内外科研及工程技术人员热切关注的技术课题。随着嵌入式系统技术的不断发展与成熟, 将其应用于工业在线监测领域的各种研究尝试也日渐普遍^[2-6], 然而系统在数据的管

理交换、可扩展性、稳定性以及远程维护等方面还存在一定不足。

为克服上述目前研究中存在的不足, 本文设计了一个基于 ARM+DSP 的分布式高压断路器机械特性在线监测系统, 能够实现对分合闸线圈电流信号、动触头的行程曲线等的测量分析, 较好地实现了机械特性参数的显示、存储和数据通讯等, 并且具有远程配置、远程程序上载, 及远程重启监测单元等功能。

1 系统的监测原理

本监测系统利用现场端传感器获得的采集量, 根据断路器机械参数特性的定义来求取表征装置性

能的参数, 需要计算与转换的有位移量、时间量、速度量等。

本系统通过将旋转式光栅传感器安装在断路器操动机构的主轴上, 来监测断路器动触头的运动过程。根据测得传感器输出电压的变化量 ΔU 与参考电压 U_{ref} 的关系, 即可得出主轴的角位移曲线^[7]。假设角位移传感器的有效电气转角为 β , 则被测主轴的转角 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \Delta U \cdot \beta / U_{ref} \quad (1)$$

再根据转角与触头直线行程的关系可得到直线位移曲线。同时, 测试系统以一定的采样频率读取脉冲信号, 便得到断路器操作过程中的行程-时间特性曲线^[8]。利用合、分闸操作动触头的行程-时间曲线, 可算出动触头合、分闸操作的运动时间、动触头行程、动触头运动速度、触头弹跳等参数。

断路器的刚分/关合时刻通过检测分合闸线圈的电流变化, 并结合在断口加辅助回路的状态信号来获得。由于起始的依据是判断分合闸线圈中有无电流通过, 故线圈电流出现时刻的测定将直接影响测量的精度和系统稳定性。本系统选用对信号反应非常迅速的穿心式霍尔磁平衡电流传感器对分合闸线圈通电的瞬间进行高速数据采集, 并同时电流波形进行分析记录。

传感器输出的检测信号经信号调理电路转换成 0~3 V 电压信号输出至 DSP 的 A/D 模块; 断口及其他开关状态信号经信号调理及光电隔离后输出至 DSP 的 I/O 模块。进行机械特性监测的特点是实时性要求较高, 表征系统性能的最终参数均需经过计算与转换才能得到, 并且当监测点较多时并行处理的信息量较大, 为尽可能减少因延时而产生的误差, 要求后续的数据计算与处理单元具有较强的运算能力。

2 监测系统总体方案设计

面对复杂的工业现场应用以及机械特性监测的具体要求, 本文提出如图 1 所示的分布式监测系统构架。现场监测部分使用传感器对相关数据进行获取; 嵌入式系统提供了监测单元配置、对传感器获取数据的计算处理、按地址存储与用户访问等功能。在嵌入式系统内部采用模块化结构, 其中包括主处理器模块、协处理器模块和信号处理模块三个部分: 主处理器由 ARM 及其相关外围电路构成, 内部运行嵌入式操作系统, 处于用户和协处理器之间, 通过 Ethernet 与客户端的 PC 通信, 同时通过 HPI 接口与协处理器通信; 协处理器由 DSP 及相关外围电路构成, 内部固件程序在 DSP/BIOS 模式下构架, 主要用来获取信号处理模块的数据信息并进行处

理, 同时还需和主处理器通信; 信号处理模块处于监测单元的最前端, 负责获取实际机械特性数据信息。

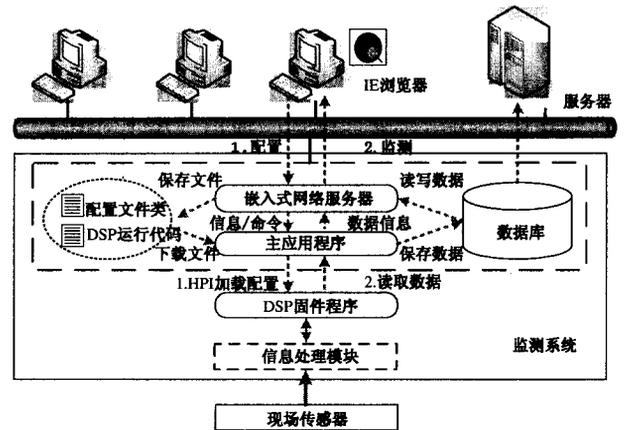


图1 分布式系统监控平台架构

Fig.1 Structure of monitoring platform of distributed system

3 基于 DSP+ARM 的硬件平台

分布式监测系统的硬件平台如图 2 所示, 主要由 ARM 核心板、DSP 协处理器板和信号处理模块等几部分组成。

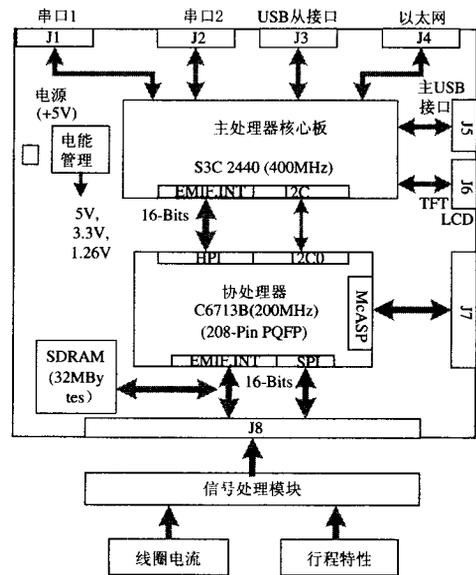


图2 监测系统的硬件平台

Fig.2 Hardware platform of monitoring system

其中, ARM (S3C2440)^[9]核心板是监测系统的主处理器电路, 主要完成以下几个方面的功能: 实现与上位机的远程通信; 管理和维护系统配置; 实时获取 DSP 协处理器的数据处理和特征值的计算结果。

DSP 协处理器与模块通过 DSP 板按照功能分为 3 个部分：ARM 接口电路、DSP 协处理器电路和电源系统。ARM 接口电路用来扩展 ARM 核心板的外围接口电路，包括 UART、USB、以太网等；DSP 协处理器电路以 TMS320C6713^[10]为核心，选择其主机接口 HPI 口作为主从处理器的同步和通信硬件接口，与信号处理模块的通信使用 EMIF 总线来扩展；电源系统完成对这两个模块内芯片的供电。

信号处理模块实现模拟信号调理和 A/D 转换，A/D 采用的是 6 路 16 位的高精度转换芯片 AD7656。

4 DSP 协处理器固件程序的开发

DSP/BIOS 是基于 DSP 平台的软件可裁剪、规模可控制的实时操作系统内核，同时也是 TI 公司实时软件技术 eXpressDSP 技术的核心部分。参考架构 (RF5) 提供了一套完整的数据采集和处理流程，给出了标准的设备驱动器模型以及基于任务线程 (TSK) 的算法/控制模块，建立了针对设备驱动器与任务线程以及任务线程之间的两类任务同步机制^[11-15]，由于以往 DSP 的传统编程方式—主程序+中断服务程序的设计方法存在升级复杂和维护困难的不足，本文采用基于 DSP/BIOS 实时操作系统和 RF5 的开发架构，设计了 DSP 固件程序架构，完成了设备驱动器的开发，设计和实现了三个任务线程及其同步通信。

首先对 DSP 的固件程序进行功能划分，DSP 固件程序需要完成初始化，数据采集，数据处理，数据存储等功能。初始化功能需要完成对 DSP 协处理器的寄存器和其他功能模块的初始设置。数据采集、数据处理和数据存储功能可分别对应于一个任务线程，即 TskSplit、TskProcess 和 TskSave。TskSplit 主要功能是从设备驱动器获取实时数据，并按通道将数据分割开来。TskProcess 主要功能是按通道处理实时数据，通道内根据应用需要可以有一个或多个算法单元，通过这些算法分析数据，获取监测对象的状态信息。TskSave 则是将处理好的数据按照约定好的格式存储到指定物理地址空间。同时还需要设计从外部设备获取数据的标准 DSP/BIOS 设备驱动器。

然后在 DSP/BIOS 下开发设备驱动器和任务线程，其过程需要两个步骤：静态配置和代码实现。静态配置是在 CCS 的 DSP/BIOS 组件管理器配置工具中进行的，通过配置工具可以完成系统设置和存储区的划分等任务，最后生成扩展名为 .cdb 的配置文件和 .cmd 的命令文件。设备驱动器是由初始化的函数和一个 IOM 的函数表组成的，对设备驱动器的

开发实际上就是对其中的微型驱动器的开发，也就是根据函数需要实现的功能来开发初始化函数和函数表内 6 个函数。

代码实现后的固件程序的数据流如图 3 所示。固件程序包含的数据采集/处理模块共四个：一个设备驱动器和 3 个任务线程。

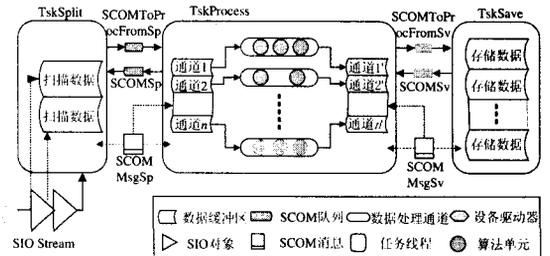


图 3 DSP 固件程序的数据流图

Fig.3 Data flow diagram of firmware of DSP

整个程序的执行流程为：

1) 设备驱动器从外部设备获取数据后，通过 SIO 对象通知数据采集线程 Tsksplit 获取数据，TskSplit 读取并按通道分割到通道数据区后（通道 1~n）使用，将通道数据区指针通过 SCOMToProcessFromSp 队列传递给数据处理线程 TskProcess，同时通过 SIO 对象将读空的扫描数据区返还给设备驱动器，以便为下次的写入做好准备，接着将自己悬挂（阻塞）；

2) TskProcess 线程按通道顺序执行完数据处理程序，同时将处理后的数据存储到处理后的数据缓冲区，然后使用 SCOMSplit 将读空的数据区（通道 1~n）发送给 TskSplit，以备后续使用，同时使用 SCOMSave 通知数据存储线程 TskSave 获取处理后的数据缓冲区指针，同时将自己悬挂；

3) TskSave 线程通过数据缓冲区（通道 1'~n'）的指针获取数据并整理到存储数据区中，然后通过 SCOMToProcessFromSv 队列将读空的数据缓冲区返还给 Tskprocess 线程。

当所有线程都被悬挂时，由于设备驱动器采用的是 EDMA 方式，基本无需占用 CPU 资源，此时，系统运行 IDL_loop 引导程序进入 DSP/BIOS 空闲循环，等待线程的触发，整个过程周而复始的进行。

5 基于嵌入式 Web Server 的远程服务

本文采用前后台的方式开发基于嵌入式操作系统 Windows CE 的 Web Server 网络服务功能，动态网页 ASP 完成前台功能，COM 组件完成后台对文件、数据库以及硬件的操作，采用 ASP 动态网页方式可使页面更加美观，同时 COM 组件是一种基于

标准接口开发的组件, 可以很方便地嵌入到动态网页中, 前后台之间的信息交换通过 COM 的标准接口来完成。这种方式使得 COM 组件复用性强, 当需要实现相同的功能时, 只需采用标准接口引用这个 COM 组件即可, 开发者实现一项功能时, 可以自己开发 COM 组件, 也可以使用第三方开发好的 COM 组件, 大大节约了开发的人力和时间, 同时升级和维护更为方便。但是由于采用 ASP 网页方式, 需要占用额外的内存资源^[16]。

为便于监测单元的远程维护, 本文基于嵌入式 Web Server 开发了以下服务:

1) 远程配置: 监测单元在应用现场安装时, 需对监测单元的参数进行初始化配置, 来满足实际应用需求, 通过网络服务来完成这个功能, 可使安装和布网更加方便。

2) 远程文件上传: 监测系统升级需对代码更新时, 若需要在工业现场对数量众多的监测单元逐个烧写, 从安全与便利性来考虑均不可取, 采用网络服务来更新代码解决了这一难题。

3) 远程重启监测单元: 由于使用了嵌入式操作系统, 当监测单元内一些系统参数被修改时, 需重新启动操作系统来把参数加载到系统中, 同时监测单元发生故障时也需要用户重启系统来恢复到正常工作状态。

其中, 需要利用主从处理器接口程序将配置的参数和代码加载到 DSP 的存储空间中, 来实现远程配置功能中信息处理参数的配置和远程文件上传功能。

6 实验结果

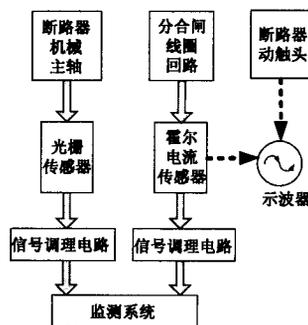


图 4 机械特性试验总体方案

Fig.4 General blueprint of mechanical characteristic experiment

机械特性测量试验的总体方案如图 4 所示。光栅传感器安装在主轴上, 用来采集分合闸电流的霍尔电流传感器串接在分合闸线圈回路中, 断路器动

触头回路电压突变显示在示波器上。

本文设计了一系列试验来检验分布式监测系统对于断路器机械特性参数测量的准确性。试验中所用的断路器样机为 VS1 型真空断路器。由于实验室条件所限, 只能通过在实验室进行的一系列离线试验来验证, 这些试验虽与在线情况有一些差距, 但对于检验系统的稳定性和精度来说是可行的。各项参数测量三次取均值, 与来自于断路器厂家提供的理论数据进行比较和分析, 实验所得数据结果如表 1 所示。通过对分合闸动作时动触头行程测量试验、固有分合闸时间测量试验、分合闸平均速度测量试验、合闸同期性测量试验, 验证了本监测系统基本符合各项测量要求。

表 1 实测数据比较及误差

Tab.1 Error between measured value and theoretically

测试项目	value		
	系统测试结果 (平均值)	理论值	误差 / (%)
行程/mm	24.8	25.0	0.8
固有合闸时间/ms	77.5	75.9	2.1
合闸平均速度/(m/s)	1.56	1.1-1.6	—
固有分闸时间/ms	64.9	65.4	-0.7
分闸平均速度/(m/s)	1.44	1.1-1.6	—
合闸不同期性/ms	1.82	≤2	—

7 结论

本文基于 ARM+DSP 的硬件架构和嵌入式操作系统, 开发了具有模块化硬件平台和柔性化软件架构的分布式高压断路器机械特性在线监测系统, 该系统具有可靠性高、组态灵活、传输距离远、易于远程部署、扩展方便等优势, 能够实时反映真空断路器机械运行状态, 可为现场人员分析开关的运行状态提供可信的判据。

参考文献

- [1] 郎福成, 徐建源, 林莘. 真空断路器机械特性的在线监测[J]. 东北电力技术, 2005, (1): 12-15.
LANG Fu-cheng, XU Jian-yuan, LIN Xin. On-line Monitoring of Mechanic Characteristic for Vacuum Breaker [J]. Northeastern Electric Power Technology, 2005, (1): 12-15.
- [2] 肖文明, 孔力, 于龙. 高压开关机械特性在线监测系统的研制[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 52-53.
XIAO Wen-ming, KONG Li, YU Long. Development of Online Monitoring System of High Voltage Breaker Mechanical Characteristic [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 52-53.
- [3] 戴怀志, 吕一航, 贾申利, 等. 断路器综合在线监测系

统研制[J]. 高压电器,2004,40(2) : 104-106.

DAI Huai-zhi, Lü Yi-hang, JIA Shen-li, et al. Design of On-line Monitoring System for Circuit Breaker[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(2) : 104-106.

[4] 吕一航, 李静, 戴怀志, 等. 高压断路器综合在线监测系统的研制[J]. 中国电力,2004,37(3) : 68-71.

Lü Yi-hang, LI Jing, DAI Huai-zhi, et al. Research and Development of the On-line Synthetic Monitoring System of High Voltage Circuit Breakers[J]. Electric Power,2004,37(3): 68-71.

[5] 马强, 李琨, 荣命哲. 开关设备在线监测系统级专用芯片的设计[J]. 电力系统自动化,2005,29(3) : 73-76.

MA Qiang, LI Kun, RONG Ming-zhe. Design of System on Chip for Switchgear On-line Monitoring [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3) : 73-76.

[6] Estrin D. Connecting the Physical World with Pervasive Network [J]. IEEE Pervasives Computer, 2002,1(1) : 56-59.

[7] 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 Yong-peng, JIA Shen-li, RONG Ming-zhe. On-line Monitoring Method for Mechanical Characteristics of Vacuum Circuit Breakers [J]. High Voltage Apparatus, 2006,42(1) : 31-34.

[8] 徐建源, 朗福成, 林萃. 高压断路器机械特性在线监测技术的现状与发展趋势[J]. 华通技术,2005,(2): 17-20.

[9] Samsung Semiconductor Corporation. S3C2440 Data SheetRev.D. <http://www.samsungsemi.com>[EB/OL]

[10] TMS320C6713 Data Sheet. Texas Instrument Co.Ltd, 2004.

[11] TMS320C6000 DSP/ BIOS User's Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2003.

[12] TMS320C6000 Chip Support Library API Reference Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2004.

[13] TMS320C6000 DSP EDMA Controller Reference Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2004.

[14] TMS320 DSP Algorithm Standard Developer's Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2007.

[15] TMS320C6000 DSP Cache User's Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2004.

[16] 马骏骁, 田地, 杨智君, 等. 支持 HTTP 代理的分布式监测终端的设计与实现[J]. 吉林大学学报,2007,37(1) : 160-163.

MA Jun-xiao, TIAN Di, YANG Zhi-jun, et al. Design and Implementation of Distributed Monitoring Device Supporting HTTP Proxy [J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology,2007,37(1) : 160-163.

收稿日期: 2008-05-13; 修回日期: 2008-06-24

作者简介:

熊小伏(1962-), 男, 博士, 教授, 长期从事电力系统保护与监控的科研、教学工作;

孙鑫(1980-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护研究; E-mail: syncsun@126.com

蔡伟贤(1982-), 男, 硕士, 从事电力系统保护研究。

(上接第 47 页 continued from page 47)

[5] 李红巍. 一种实用的双回线测距方法[J]. 电力系统自动化,1995,19(9):30-33.

LI Hong-wei. A Useful Algorithm for Fault Location of Parallel Transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995,19(9):30-33.

[6] 周大敏, 冯璞乔, 易良廷. 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距的新算法[J]. 电网技术,1997,21(7): 47-51.

ZHOU Da-min, FENG Pu-qiao, YI Liang-ting. A New Algorithm to Estimate Fault Location on a high Voltage Transmission line Using Two Terminal's Voltage and Currents[J]. Power System Technology, 1997,21(7):47-51.

[7] 赵永娴, 曹小拐, 刘万顺. 同杆并架双回线准确参数未知时的故障测距新算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(4):72-76.

知时的故障测距新算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(4):72-76.

ZHAO Yong-xian, CAO Xiao-guai, LIU Wan-shun. New Fault Location Algorithm for Double Transmission Lines on a Sametower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4):72-76.

收稿日期: 2008-05-09; 修回日期: 2008-08-24

作者简介:

余胜(1983-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护与故障定位; E-mail: yushdada@sina.com

许钢(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护与故障定位。