

一种便携式信号电缆接地故障检测仪

陈长浩, 王安

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

摘要: 铁路信号室里信号线的数量众多, 如何准确定位芯线接地故障的位置是个亟待解决的问题; 文章针对故障芯线阻容网络的接地模型, 提出了单频幅相法的故障定位方法, 即用故障芯线各个测试点的幅相信息来确定故障点的位置, 并且为了解决单频幅相法操作上的局限性, 提出了基于折合相位差的双频幅相法定位原理; 介绍了一种以 TMS320C5509A 数字信号处理芯片为数据和控制核心的便携式信号电缆接地故障检测仪, 给出了该系统的工作原理及硬件、软件实现方案; 经实验室测试及系统联调, 实验室条件下用信号发射装置和信号接收装置对模拟故障电缆进行测试, 测试结果表明, 设计的测试系统能够定位 $1\text{ M}\Omega$ 接地电阻故障; 该仪器达到了一定的精度, 能较好地适用于工程现场的测试。

关键词: 信号电缆故障测试; DSP; 铁路信号; 接地故障

A Portable Signal Cable Fault Location Detector

Chen Changhao¹, Wang An²

(Department of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: There are a lot of signal lines in the signal chamber, how to accurately locate the fault position is a problem to be solved. Aiming at grounding model of fault wire resistance-capacitance network, a single frequency amplitude-phase fault location method was proposed in this paper, that is to determine the position of the fault point according to amplitude-phase information in each test point of the fault component wire. And in response to the operational boundlessness of single frequency amplitude-phase method, dual frequency amplitude-phase location principle based on equivalent phase difference was proposed. A portable signal cable fault location detector is introduced. It has been designed in a compact size by using TMS320C5509A. The system principle is embodied with hardware and software design. Through test in the laboratory as well as systematic joint debugging, test was conducted on simulated fault cable using sender unit and signal reception device. The result of the test shows that the test system is able to locate the fault of grounding $1\text{ M}\Omega$ resistance. The error of fault location indicates that this instrument achieves satisfied precision and works well in engineering environment.

Keywords: signal cable fault detect; DSP; railway signal; cable ground fault

0 引言

近年来高速铁路和动车的快速发展对铁路控制系统的可靠性和安全性提出了越来越严格的要求^[1]。研究如何快速准确定位铁路信号电缆故障点具有很好的经济价值和社会意义^[2]。目前, 故障定位方法多是从电力电缆上移植过来的, 没有考虑铁路信号电缆自身的特殊性, 不能准确的定位故障。本文在研究高阻接地故障电缆形成的阻容网络模型特性的基础上, 提出了基于双频信号折算相位差的定位方法。该方法具有以下优点: 一是在测量信号的相位时, 不用从过零点的位置开始, 测量精度高, 操作上方便快捷; 二是以相位差的极性突变作为故障位置的判断依据, 能够定位高阻接地故障。

这些年国内外开发了多种电缆故障测试系统, 而其中多由 PC 机配以数据采集卡, 且辅以定点仪、路径仪等产品。因此价格昂贵、携带不便、处理速度慢等缺点严重地影响实际应用。于是开发了一种性能优越、价格低廉、适用于信号室内作业的便携式仪器, 用于取代原有的信号电缆接地故障检测设备^[4]。该系统以高速、低功耗 DSP 芯片 TMS320C5509A 为核心器件^[5], 提高查找信号电缆接地故障的效率与可靠性。

1 信号电缆接地故障的定位原理

1.1 铁路信号电缆高阻接地故障的模型

根据《铁路信号设备电气特性测试方法》的规定: 直流电源对地漏电流不大于 1 mA , 交流电源对地漏电流不大于 20 mA , 对信号机、轨道电路送电端电缆进行全程测量时, 对地电阻不低于 $1\text{ M}\Omega$ ^[6], 否则认定电缆有损伤。

根据《电缆线路维修与维护》的规定: 外界温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 综合扭绞型电缆任一芯线对连接到大地上的其他芯线之间的电容不大于 $0.1\text{ }\mu\text{F/km}$ (本文测试此类)。故障芯线与大地之间形成阻容网络接地模型。 R_x 为故障处的接地电阻, 取值为 $10\text{ k}\Omega\sim 1\text{ M}\Omega$; 电容 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 的值表示两端点之前芯线的长度, 若为 $0.01\text{ }\mu\text{F}$ 则表示 100 m 的芯线长度, 故障芯线的长度越长, 模型中分布电容值越大。如图 1 所示。

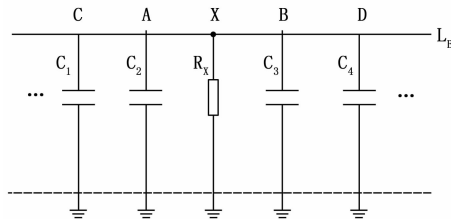


图1 故障芯线的阻容网络模型

1.2 单频幅相法原理

通过信号发射器往阻容网络模型中注入单频正弦交流信

收稿日期:2016-12-23; 修回日期:2017-02-06。

作者简介: 陈长浩(1990-), 男, 陕西安康人, 硕士研究生, 主要从事铁路信号电缆接地故障测量方法的研究。

王安(1959-)男, 山东蓬莱人, 副教授, 主要从事计算机测控系统和智能仪器仪表方向的研究。

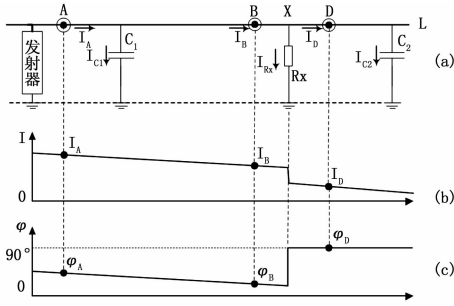


图 2 单频幅相法原理图

号,如图 2 (a) 所示,依次检测芯线各点处的电流值, A、B、D 点电流的幅值由 (2) (3) 式可得,沿着芯线的方向,电流的幅值依次减小,和图 2 (b) 中显示电流幅值的趋势一致;三点的相位由公式 (4) (5) (6) 可得,从 A 点到 B 点依次减小,越过故障点之后, D 点电流的相位反向突变为 90° 。单频幅相法定位原理:沿着芯线的方向,前后两个测试点所得信号相位差的极性在故障点前后发生突变作为判断故障点位置的依据,由上述分析可知,故障点的位置在 B、D 之间,和图 2 (a) 中故障点的位置相符。

$$I_A = U \sqrt{(\omega * (C_1 + C_2))^2 + (\frac{1}{R_x})^2} \quad (1)$$

$$I_B = U \sqrt{(\omega * C_2)^2 + (\frac{1}{R_x})^2} \quad (2)$$

$$I_D = U * \omega * C_2 \quad (3)$$

$$\varphi_A = \arctan(\omega R_x (C_1 + C_2)) \quad (4)$$

$$\varphi_B = \arctan(\omega R_x C_2) \quad (5)$$

$$\varphi_D = 90^\circ \quad (6)$$

1.3 单频幅相法的局限性

使用单频幅相法作为故障点的定位原理^[3],芯线上每一点电流必须从过零点开始检测,而且在检测电流信号的同时,要同步的检测该点的电压信号,这在 Matlab 的仿真环境下很容易实现,在实际操作中,从过零点开始检测不易实现,而且对每一个测试点,要同时检测两个信号,检测任务量大。考虑到方法研究的目的在于为故障定位设备的开发奠定理论基础,因而,必须进一步优化故障芯线的定位方法。

1.4 折算相位差的原理

当发射器注入的是双频正弦信号,且这两个信号的频率之间有一定的倍频关系,即 $f_1 = n * f_2$ 。设两个信号折算相位差公式为:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \frac{\varphi_2}{n} \quad (7)$$

注入信号为:

$$y = y_1 + y_2 =$$

$$A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (8)$$

则在 $t = t_0$ 时刻,信号 y_1 的相位为:

$$\varphi_1' = \omega_1 t_0 + \varphi_1 \quad (9)$$

信号 y_2 的相位为:

$$\varphi_2' = \omega_2 t_0 + \varphi_2 \quad (10)$$

按折算相位差的公式可得 $\Delta\varphi'$ 为:

$$\Delta\varphi' = \varphi_1' - \frac{\varphi_2'}{n} = (\omega_1 t_0 + \varphi_1) - \frac{(\omega_2 t_0 + \varphi_2)}{n} = \varphi_1 - \frac{\varphi_2}{n} \quad (11)$$

如果 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0^\circ$, 两个信号如果注入到纯阻性网络中, $\Delta\varphi$ 始终为 0; 如果注入到故障芯线的阻容网络模型中, $\Delta\varphi$ 取容性电流和阻性电流的比值,即故障前后的折算相位差分别由式 (12) 和式 (13) 可求得的。

$$\Delta\varphi_q = \arctan(\omega_1 R_x C) - \frac{\arctan(\omega_2 R_x C)}{n} \quad (12)$$

$$\Delta\varphi_h = \varphi_1' - \frac{\varphi_2'}{n} 90^\circ - \frac{90^\circ}{n} \quad (13)$$

由 (12) 式可知,当 $R_x, \omega_{11}, \omega_{22}$ 为定值时, $\Delta\varphi_q$ 是随着电容支路的减小而减小,即在故障点前,后一个测试点减去前一个测试点的折算相位差的值为负数; $\Delta\varphi_h$ 的值只与发射信号的倍频有关,和其它参数无关,其值大于故障点前的任一测试点的折算相位差,且 $\Delta\varphi_h - \Delta\varphi_q$ 的值为正数,前后两个测试点折合相位差的差值的极性发生了突变,以此来作为故障点位置判断的依据,这即是折算相位差的定位原理。

由 (11) 式可知,折算相位差与 t 无关,即对电缆芯线上的点来说,相位差的值由发射信号的初始相位和倍频值决定,与检测的时刻无关,而且不需要在检测电流信号的同时,同步的检测电压信号,折算相位差定位法克服了单频幅相定位法的局限性,为工业检测设备的研发奠定了理论基础。

2 系统的硬件设计

2.1 系统的体系结构

本系统以 TI 公司的低功耗数字处理芯片 TMS320C5509A 为核心器件^[9],并根据测试仪的功能需求,基于该 DSP 芯片进行了相应的硬件设计及驱动程序的编写;完成小电流检测的前置调理电路、数据采集等模块的软硬件调试,用 C 语言进行 FFT 算法及频谱校正的程序设计;完成外扩 EEPROM 的烧写程序,使得程序能在 DSP 上独立运行。系统框图如图 3 所示。

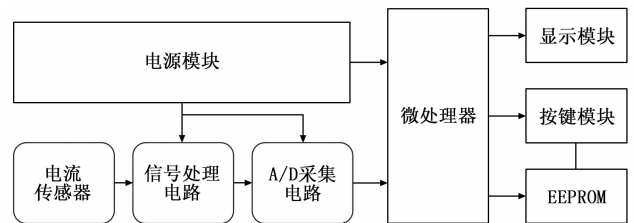


图 3 接地故障检测仪系统框图

2.2 信号调理及数据采集

2.2.1 电流检测

在线缆故障定位方案确定后,其实现过程中的一个核心和难点就是如何将故障中的电流准确检测出来。首先需要确定故障中电流的大小,依此来选用电流传感器。电流传感器分为电流互感器和霍尔电流传感器。霍尔电流传感器主要用于测量大电流的,当线缆中电流太小霍尔电流传感器检测不到,并且霍尔电流传感器卡钳式比较少。而电流互感器,能测量较小电流,并且电流互感器卡钳式比较多。

最终选择 ETCR030 高精度钳形漏电传感器,分辨率 $1 \mu A/AC$,适用于高精度的交流漏电流、高次谐波电流、相位、电能、功率、功率因数等检测。钳形设计,不必断开被测线路。用双层屏蔽技术,外界磁场的影响极小,确保了常年无间断测量的高精度、高稳定性、高可靠性^[7]。

2.2.2 采集电路

模数转换器是采集电路的核心器件, 它把被采集到的模拟信号经量化和编码后, 转换成数字信号输出。考虑到差分输入对输入通路上的共模信号有抑制作用, 为消除线路上可能存在的噪声信号, 在 A/D 选择时, 选用差分输入方式。同时考虑到 A/D 与 DSP 的接口问题, 为方便连接, 本设计采用的 A/D 芯片为 TLC320AC02。

TLC320AC02 是 TI 公司的一款单 5 V 电源供电、具有 14 位分辨率、最高采样率可达 43.2 kHz、内含开关电容式带通抗混叠输入滤波器和低通重构输出滤波器的模拟接口电路。其模拟输入采用差分输入方式, 并同时带有与 DSP 直接相连的同步串行数字接口, 可与 TMS320VC5509A 无缝连接。TLC320AC02 体积小, 工作温度范围宽 ($-40\sim85\text{ }^{\circ}\text{C}$), 功耗小 (只有 110 mW), 常用于便携设备的采集电路, 主要包括调制解调器、语音处理、工业过程控制、光谱分析、作为 DSP 的模拟接口电路进行数据采集以及各种记录仪等^[8]。AD 采集接口电路如图 4 所示。

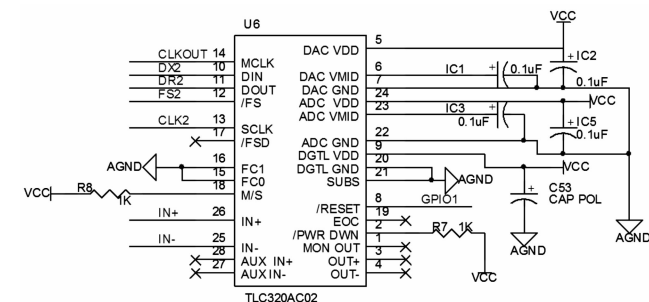


图 4 AD 采集接口电路

2.3 人机接口部分

由于对故障电缆中电流的检测, 需要将相关参数显示出来, 同时, 为了快速定位, 可通过显示“→”、“←”来指示故障点的位置, 在此选用 FYD12864 液晶。在数据读写时, 采用 8 位并行数据传送, 通过总线与 TMS320VC5509A 相连; 而参数输入、启动测试等, 需要按键的输入, 设计采用按键芯片 74C923, 为去除按键抖动, 添加阻容滤波网络, 按键输入采用中断模式, 提高 CPU 的使用效率。

2.4 外扩 EEPROM 接口

由于 TMS320VC5509A 是 RAM 型器件, 掉电后不能保存用户信息, 所以在系统设计时, 需要外扩非易失性存储器, 将程序及重要信息保存在其中。而系统上电时, 通过芯片内置的引导程序, 将外部存储器中的程序引导至内部的高速 RAM 中, 然后执行相关代码, 完成启动。在此设计中选用 Atmel 公司的 AT25512 作为外部存储芯片, 其有 64KB 的存储空间, 通过串行 SPI 总线与 DSP 相连。

TMS320VC5509A 上电复位后, 系统初始化, 然后根据预先设置的自启动模式, 通过固化在 ROM 中的 bootloader 程序进行程序引导。

2.5 电源部分

TMS320VC5509A 芯片需要 3.3 V 和 1.8 V 两种电压, 其中 3.3 V 为 I/O 所需电压, 1.8 V 为核供电电压。另外由于电路中信号调理用到运放以及数据采集中 AD 芯片的供电需求, 系统还需要提供正负 5 V 电压。为了设备便于携带及电池便于

更换, 选择 5 节干电池供电, 即电源供电为 7.5 V 左右, 为了得到仪器芯片的工作电压, 需要进行电压转换, 5 V 电源由 SPX1117M-5.0 转换得到。

3 系统软件设计

为实现电缆故障定位, 结合方案设计中定位仪的使用方法和硬件电路的需求, 基于 DSP 的软件程序^[9]整体流程如图 5 (a) 所示; 其中根据按键的功能不同, 分为故障测试如图 5 (b)、系统校正如图 5 (c)。

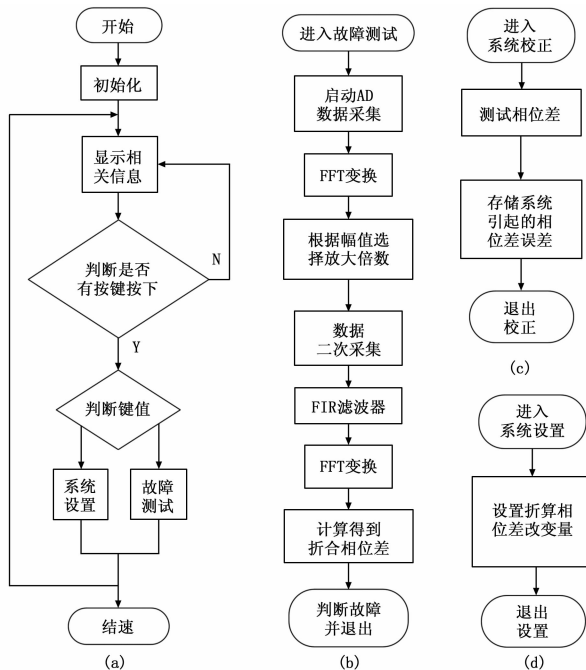


图 5 电缆故障定位仪程序设计流程图

系统的主要功能包括: 系统校正、通过测试折合相位差判断故障点。其中, 系统校正功能, 是为了消除电流转电压电路中滤波电容, 以及数字滤波器对相位的影响, 保证折合相位差的改变是由于铁路信号电缆的故障引起的。

整个软件设计采用模块化设计思想, 可分为显示模块、前置信号程控放大处理模块、数据采集模块、滤波处理模块、FFT 变换模块、折合相位差处理及故障判断模块。采用模块化设计可以提高程序的可读性和可靠性, 将任务进行分解, 便于程序设计。首先将每个模块的操作函数单独放在一个头文件中, 然后在主函数中, 如果需要用到某个相关的功能模块, 只需将该功能块的头文件包含在主函数中即可。

本设计包含的功能模块头函数如下:

```
include "my_Config.h"//配置 DSP 相关头文件
include "my_CD4051.h"//多路开关相关文件
include "my_filter.h"//FIR 滤波器相关头文件
include "TLC320AC02.h"//配置 AD 及数据采集
include "my_fft.h"// FFT 变换相关头文件
include "my_12864_DSP.h"//显示相关头文件
include "my_interrupt.h"//外部中断配置头文件。
```

其中, DSP 配置相关文件主要分为四部分:

- ① 通过锁相环的配置来设置 CPU 的时钟;
- ② 通过外部存储接口 EMIF 的配置来控制液晶的显示等;

(下转第 324 页)

[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11).

[4] 王雪荣. 全站仪三轴误差检验探讨分析 [J]. 科技展望, 2016, 26 (28).

[5] 陈 瑛, 宋俊磊, 王典洪. CAN 总线在野外地震数据传输中的应用 [J]. 电子技术应用, 2013, 39 (9): 34-37.

[6] 吴益飞, 王志宏, 陈孟驰, 等. 基于 CAN 总线的一体化角位置检测 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 2365-2368.

(上接第 319 页)

③ 通过 McBSP 的配置来实现与 AD 和外扩 EEPROM 的通信;

④ 通用 GPIO 的配置。

多路开关模块主要通过控制放大器的不同反馈电阻的接通, 来实现不同的放大倍数, 使得 AD 采集时, 信号有合适的幅值, 保证采集的数据有更高的准确度。

滤波器模块主要实现对采集的信号进行 FIR 数字滤波处理, 滤除不需要的频率成分, 同时 FIR 滤波器产生相位误差是线性的, 便于校正处理。FIR 滤波器通过 Matlab 设计得到。

液晶显示模块, 通过对带字库的液晶进行读写, 使其显示测试的相关信息。

中断模块主要实现中断向量表的设置, 清除中断标志, 使能和打开中断, 在中断子函数中对按键标志位进行设置。

4 测试结果

在实验室搭建 800 m 故障芯线接地的物理模型, 用电容的值表示芯线的长度, 接地电阻范围取 40 kΩ~1 MΩ, 模型示意图如图 6 所示。

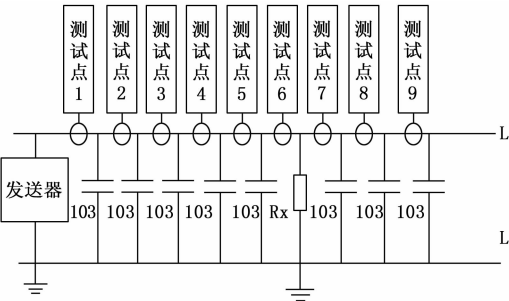


图 6 模拟故障电缆示意图

整理数据于曲线的显示和观察, 取接地电阻为 40 kΩ、75kΩ、130 kΩ、200 kΩ、525 kΩ、763 kΩ、1 MΩ 分别为故障一到故障七; 而故障八是由故障七中测试点 3 和测试点 4 之间的电容替换为 200 kΩ 的电阻得到的, 即该故障中存在两处接地故障点; 计算沿线各个测试点折合相位差的平均值, 绘制曲线如图 7 所示。

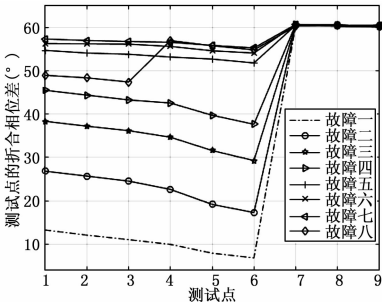


图 7 模拟故障电缆各个测试点相位差的变化

装置设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (9): 2365-2368.

[7] 韩 彬. 一种基于 CAN 总线的高精度角度变送器 [J]. 现代电子技术, 2014, 37: 419 (12): 103-106.

[8] 王旭东, 朱蕴璞. 基于 ARM 多处理器的 CAN 总线分布式控制系统设计 [J]. 国外电子测量技术, 2015 (5): 52-55.

从实测数据分析, 故障点前后相位差突变值 $\geq 5^\circ$ 左右, 利用相位差突变这一特征可以判断出 40 k~1 MΩ 的接地故障点的位置在测试点 6 和 7 之间。同理, 在故障八中, 测试点 3 和测试点 4 之间, 以及测试点 6 和测试点 7 之间都存在折算相位差的反向突变, 因此, 在故障八中, 存在两处接地故障点。在做定位芯线接地故障的实验时, 对应每一个接地电阻, 记录沿线各个测试点的折合相位差的值, 每一个测试点测量三次取相位差平均值, 实测数据统计如表 1 所示。

表 1 实测故障电缆相应测试点的折合相位差

	测试点 1	测试点 2	测试点 3	测试点 4	测试点 5	测试点 6	测试点 7	测试点 8	测试点 9
故障一	13.24	12.06	11.02	9.93	7.89	6.81	60.44	60.41	60.35
故障二	26.81	25.68	24.52	22.61	19.15	17.26	60.55	60.47	60.49
故障三	38.32	37.19	36.16	34.65	31.57	29.25	60.57	60.61	60.13
故障四	45.47	44.36	43.25	42.53	39.71	37.63	60.67	60.43	60.21
故障五	54.68	54.06	53.78	53.14	52.67	51.78	60.49	60.24	60.07
故障六	56.25	56.18	56.11	55.89	54.58	54.06	60.66	60.50	60.11
故障七	57.30	56.96	56.72	56.55	55.82	55.24	60.65	60.43	60.51
故障八	48.93	48.34	47.38	56.93	55.75	54.78	60.27	60.42	60.15

5 结论

便携式信号电缆接地故障检测仪采用高速、低功耗 DSP 芯片设计, 通过判断电缆中电流的折合相位差的变化, 查找信号电缆接地故障的位置, 达到 1 MΩ 接地故障的设计指标, 同时进一步验证了幅相法定位接地故障可行性, 可应用于通信、铁路等信号室内各类电缆的测试。

参考文献:

[1] 张 薇. 铁路信号电缆接地方式研究 [J]. 科技风, 2015 (16): 143-143.

[2] Upendar J, Gupta C P, Singh G K. Discrete wavelet transform and probabilistic neural network based algorithm for classification of fault on transmission systems [J]. 2008, 1: 206-211.

[3] 王 安, 刘三帅, 杨伟伟. 铁路信号电缆接地故障点查找方法研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2014, 11: 82-85.

[4] 高风波, 张 歆, 张小蓓, 等. 一种便携式智能电缆故障测试仪 [J]. 测控技术, 2003, 22 (12): 21-23.

[5] 陈泰红, 任胜杰. 手把手教你学 DSP: 基于 TMS320C55x [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

[6] 中华人民共和国铁道部. 铁路信号维护规则技术标准 II [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.

[7] 广州市钛泰电子科技有限公司. ETCR 钳形漏电流传感器用户手册 [Z].

[8] Texas Instruments. TLC320AC02 Data Manual Single-Supply Analog Interface Circuit [Z]. October 1997.

[9] Texas Instruments. TMS320C55x DSP Programmer's Guide [Z]. August 2001: 45-92.