

# 基于分布式参数电路模型检测电缆故障\*

丁晓贵, 钱萌, 江晋剑

(安庆师范学院 计算机与信息学院, 安徽 安庆 246011)

**摘要:** 设计一种基于分布式参数模型查找电缆故障点系统, 以 Nios II 软核处理器和所需的外设 IP 核嵌入到 FPGA 中为硬件架构, 移植  $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$  实时操作系统为软件体系, 实现故障的检测, 具有广泛的适用性和良好的应用前景。

**关键词:** 电缆; 反射; 分布参数; 片上系统

中图分类号: TP277

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)03-0076-03

## Seeking fault points of electric cable based on distributing parameter model

Ding Xiaogui, Qian Meng, Jiang Jinjian

(Department of Computer and Information, Anqing Normal College, Anqing 246011, China)

**Abstract:** Seeking and repairing fault points of electric cable is an importance item in building intelligentized electricity net. Judging fault by reflect signal and signal round trip time. Design a device based on distributing parameter model. In this device, Nios II soft CPU core and peripheral's IP core are embedded in FPGA, the  $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$  real-time operating system is replanted. The device realizes fault seeking. It has fine applicability and application prospect.

**Key words:** electric cable; reflect; distributing parameter; SoPC

“十二五”期间, 国家将投巨资进行电网升级改造, 如何做到迅速查找电缆故障点并予以修复, 是智能电网建设的一项重要内容。

电缆在运行过程中, 易受砸、压、碰以及有害物质的腐蚀, 发生漏电、短路、断线等故障。电缆的故障是电力系统安全运行的薄弱环节, 因电缆断路、短路引发的各类重大事故的案例屡见不鲜。另外, 电缆铺设具有隐蔽性, 传输距离较长, 查找故障点十分困难。

本文利用电力电缆的分布式参数特征, 在反射法基础上, 以 SoPC 为硬件, 设计了一种电力电缆故障点检测系统, 及时发现并定位电力电缆故障, 提高现场故障判断的准确性、快速性, 对于用电安全具有重要意义, 应用前景广泛。

### 1 分布参数模型检测电缆故障点原理

为检测电缆故障类型及其位置, 在电缆上发送的信号波长远小于电缆长度, 即可把电缆看成分布参数模

型<sup>[1]</sup>, 若电缆分布式参数沿线均匀, 则电缆上信号电压通解为:

$$U(z) = A_1 e^{\gamma z} + A_2 e^{-\gamma z} \quad (1)$$

其中:  $\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta$  称为传播常数,  $A_1, A_2$  由初值确定。根据复数振幅与瞬时值之间的关系, 可求得传输线上电压和电流的瞬时值表达式为:

$$u(z, t) = \text{Re}[U(z)e^{j\omega t}] = A_1 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) + A_2 e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z) \quad (2)$$

式(2)中, 第一部分表示由信号源向负载方向传播的行波, 称之为入射波。第二部分表示由负载向信号源方向传播的行波, 称之为反射波。定义反射系数为:

$$\Gamma(z) = \frac{Z_m(z) - Z_0}{Z_m(z) + Z_0}, \text{ 当终端负载为 } Z_L \text{ 时, 有:}$$

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3)$$

利用长线终端开路、短路等不同情况, 反射系数也不同, 来判断故障类型, 进而判断故障点大致位置。

若电缆正常工作, 根据最大功率传递定理, 为达到传输效率最佳, 一般有  $Z_L \approx Z_0$ , 由(3)式可得, 反射系数

\* 基金项目: 安徽省教育厅重点项目(KJ2010A231)

$\Gamma_L \approx 0$ , 信号无反射, 信号源发出的信号呈行波<sup>[2]</sup>工作状态。

当传输线终端短路, 即  $Z_L=0$ , 由(3)式可得, 反射系数  $\Gamma_L=-1$ , 信号呈驻波工作状态, 终端的入射波将被全反射, 此时电压为  $u(z, t)=u_i(z, t)=A_1e^{-\alpha z}\cos(\omega t-\beta z)$ , 波形如图 1 所示。其中图 1(a)是信号电压和电流波形, 图 1(b)是不同位置时阻抗性质, 图 1(c)是阻抗模型。

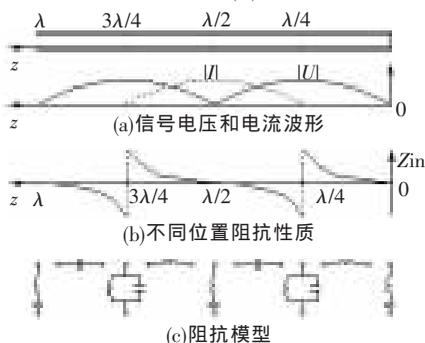


图 1 终端短路时纯驻波状态

当传输线终端开路, 一般有  $Z_L=\infty$ , 由式(3)可得, 反射系数  $\Gamma_L=1$ , 信号也呈驻波工作状态, 但波形有别于短路状况, 如图 2 所示。

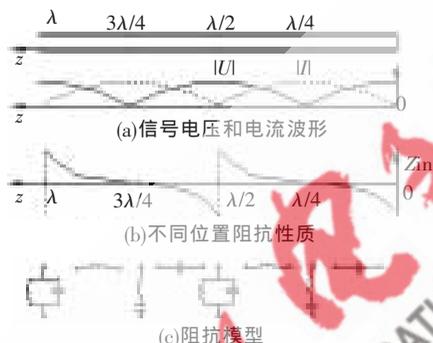


图 2 终端开路时纯驻波状态

比较图 1 和图 2 可以发现, 信号电压和电流峰值位置不同, 阻抗的性质也不同, 将反射信号波形显示出来, 通过波形可判断故障性质。

利用信号的传播速度, 测出发送、接收信号的时间差  $\Delta t$ , 即可通过  $L=v \cdot \Delta t/2$ , 计算出故障点位置。其中,  $v$  为发射信号的传播速度。

## 2 电缆故障点检测设备的硬件架构

以 SoPC 为硬件, 电缆故障点检测系统的硬件架构如图 3 所示。Nios II 软核 CPU 及各种所需的外设均通过 SoPC Builder 集成在一片 FPGA 中<sup>[3]</sup>, 构成本系统所需硬件的可重构部分, 实现真正的可编程片上系统。为了在低成本情况下完成预定功能, 选择了 Cyclone FPGA 系列器件中的 EP1C6。EP1C6 无论是从逻辑资源还是存储器均能满足设计要求。

### 2.1 主要 IP 核设计

(1)UART 内核: 通用异步接收器/发送器。UART 内核执行 RS-232 协议, 它为 FPGA 上的嵌入式系统和外部设备提供了串行字符流的通信方式。

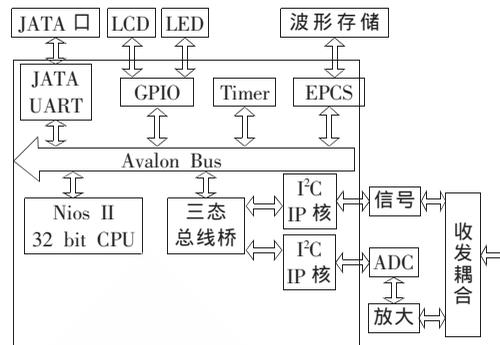


图 3 系统硬件结构

带 Avalon 接口<sup>[4]</sup>的 JTAG-UART 内核还提供 Nios CPU 系统到 PC 机的连接通路, 通过 JTAG-UART 在 PC 机上调试 Nios CPU 所需要的程序, 并通过监控程序对整个系统的运行进行控制。

(2)PIO 内核: 并行输入/输出内核。它提供 Avalon 从控制器端口到通用 I/O 口间的映射接口。该 IP 核是常规的外设控制接口。通过 PIO, 实现开关量读取, 键盘输入, 对 LED、LCD 等外设进行控制。SoPC Builder 中提供了 PIO 内核, 可以很容易将 PIO 内核集成到 SoPC Builder 生成的系统中。

(3)EPCS 内核: 带 Avalon 接口的 EPCS 设备控制器内核。EPCS 包含 1 KB 的片内存储器。该 IP 核允许 Nios II 系统访问 EPCS 串行配置芯片, 管理 FPGA 配置数据, 主要用于存储程序代码或一些非易失性数据, 本系统中用于波形存储。

(4)三态总线桥: 该 IP 核是 Avalon 和 Avalon-Tri BUS 总线以及 Avalon 和 Wishbone 总线的桥接控制器, 用于连接两种不同总线。考虑 A/D 转换器等外设需要自行开发 PC 配置接口, 这些外设不能直接连到 Avalon 总线上, 需要通过桥接控制器并以 IP 核的形式通过 SoPC Builder 连接到系统的 Avalon 总线上。

### 2.2 信号的收发

#### 2.2.1 信号的产生与发送

从微波理论可知, 发送信号的频率越高越接近于长线理论<sup>[5]</sup>, 即满足电缆分布式参数沿线均匀条件。但信号频率越高, 线路的高频损耗越大, 信号容易畸变, 给检测也会带来困难。在 SoPC 中, 信号的产生以及信号的频率和幅度可方便地由软件调整。实验测定, 若测距在 10 km 左右, 信号的频率大约在 1.5 MHz~150 MHz 为宜。

考虑到 SoPC 器件的驱动能力微弱, 不能直接发送给被测电缆, 必须要经过一定的放大, 故末端采用高频变压器加上高频晶体管射极驱动电路的形式。

#### 2.2.2 A/D 转换模块

采用 Analog Devices 公司的 8 位模数转换器 AD9481, 该转换器采样频率可达 200 MHz, 具有高速、低功耗、体积小特点。适合高采样频率和宽带宽的场合。为解决信号小不易检测的矛盾, 应加入前置放大级。参考

AD9481 数据手册,采用了 AC 耦合、双极性放大器接法。

### 3 电缆故障点检测设备的软件开发

软件系统体系主要包括嵌入式操作系统的移植、应用级代码编写等部分。为了方便用户编程,Nios II IDE 提供了设备驱动程序,在新建工程时 Nios II IDE 会根据 SoPC Builder 对系统硬件配置自动生成一个定制的 HAL,即硬件抽象层(HAL)系统库。基于 HAL 系统库的软件工程的创建和管理与 Nios II IDE 紧密相关,图 4 为 Nios II IDE 工程结构<sup>[6]</sup>。

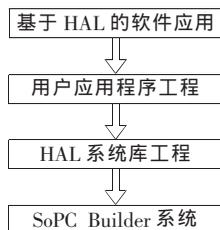


图 4 系统工程结构

一个 Nios II IDE 工程包括两个工程:用户应用程序工程和 HAL 系统库工程。用户应用程序工程中包含所有的用户代码文件,最终的可执行映像由此工程生成。HAL 系统库工程中包含所有与硬件处理器相关的接口信息,系统库工程基于用户定制的 Nios II 处理器系统,由 SoPC Builder 自动生成 .ptf 文件。

HAL 应用程序接口 (API) 与 ANSI C 标准库综合在一起,可以使用类似 C 语言的库函数来访问硬件设备或文件,如 printf()、fopen() 等,而无须关心底层硬件实现细节。

在实验室条件下,用该系统对 1 000 m 的电缆进行

多次模拟测试,包括短路和开路情况,所显示的故障类型正确,故障点距离均方根误差  $E < 1\%$ ,表明该系统具有良好的精度。但实验条件与实际的电缆敷设环境差别较大,实际的敷设环境和故障现象要复杂得多,电缆运行可能出现既非短路又非开路情况,如漏电故障。此时,反射回的信号呈现行驻波的方式,这种工作模式需要提高系统的灵敏度,可以从提高设备的抗干扰能力和合理调节发送信号的频率两个方面予以改进。

#### 参考文献

- [1] 王新稳,李萍,李延平.微波技术与天线[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [2] 戴军.现代微波与天线测量技术[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [3] 周立功.SOPC 嵌入式系统基础教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [4] Altera Corporation. Cyclone device handbook (All Sections). 2005.
- [5] OTA H, ICHIHARA M, MIYAMOTO N, et al. Application and Test of long-distance 275 kV XLPE cable lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (2): 567-579.
- [6] 杨浩,林争辉,鞠海,等.基于嵌入式处理器软核的 DVB\_S 基带处理系统[J].计算机工程,2005,31(6):203-205.

(收稿日期:2010-09-10)

#### 作者简介:

丁晓贵,男,1971 年生,副教授,硕士,主要研究方向:嵌入式系统与智能控制。