

何案华, 赵刚, 薛娜, 王军, 郭藐西, 郭柏林, 付子忠. 2009. EDA 技术结合 μ Clinux 操作系统在地震前兆仪器中的应用. 地震学报, 31(4): 449-456.

He Anhua, Zhao Gang, Xue Na, Wang Jun, Guo Miaozi, Guo Bailin, Fu Zizhong. 2009. Application of EDA technology and μ Clinux operating system in earthquake precursor instruments. *Acta Seismologica Sinica*, 31(4): 449-456.

EDA 技术结合 μ Clinux 操作系统在地震前兆仪器中的应用^{*}

何案华^{1)•*} 赵刚¹⁾ 薛娜²⁾ 王军³⁾
郭藐西¹⁾ 郭柏林¹⁾ 付子忠¹⁾

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国天津 300201 天津市地震局

3) 中国北京 100036 中国地震台网中心

摘要 应用 Altera 公司的 Quartus II、NIOS II IDE 开发软件和 SOPC Builder 工具, 采用 cyclone II 系列 FPGA 芯片——EP2C35, 设计了质子式旋进磁力仪原理主机硬件平台。构建和配置了 Nios II 软核处理器、IO 接口电路及传感器控制电路, 编写了全数字锁相环、等精度计数器等硬件单元的 VHDL 代码, 实现了质子旋进式磁力仪原理主机核心电路的单芯片系统逻辑设计。研究了 μ Clinux 嵌入式操作系统的配置技术, 并建立了基于 Nios II 软核处理器的 μ Clinux 交叉编译环境, 成功将 μ Clinux 移植到 Nios II 环境中。在该系统下编写了主机硬件平台的设备驱动程序和用户程序, 实现了原理样机各设计功能, 达到了预期目标。

关键词 EDA μ Clinux 质子旋进式磁力仪 设备驱动 数字锁相环 等精度频率计

文章编号: 0253-3782(2009)04-0449-08 中图分类号: P315. 62 文献标识码: A

Application of EDA technology and μ Clinux operating system in earthquake precursor instruments

He Anhua^{1)•*} Zhao Gang¹⁾ Xue Na²⁾ Wang Jun³⁾
Guo Miaozi¹⁾ Guo Bailin¹⁾ Fu Zizhong¹⁾

1) Institute of Crustal and Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Earthquake Administration of Tianjin, Tianjin 300201, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100036, China

Abstract: Using Altera's Quartus II, Nios II IDE and SOPC Builder development tools, the proton precession magnetometer principle host hardware platform is designed with a cyclone II series FPGA chip (EP2C35). The single-chip system-logic design of the proton precession magnetometer principle host core circuit is achieved by building and configuring the Nios II soft-core processor, developing the IO interface and sensor control circuits, and programming some

* 基金项目 中国地震局地震行业专项(200708045)、中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金(J2207824)资助。

收稿日期 2008-08-07 收到初稿, 2008-11-04 决定采用修改稿。

• 通讯作者 e-mail: hua98611@163.com

hardware units' VHDL code, for example, the equal precision cymometer and the DPLL. Through researching the embedded operating system configuration technology and building the NIOS II soft-core processor's μ Clinux cross-compile environment, the μ Clinux system is transplanted to the NIOS II environment. Another important task of this study is writing the code for device drivers and user programs. Through these works, the design has realized the host function and achieved the expected target.

Key words: EDA; μ Clinux; proton precession magnetometer; device driver; DPLL; equal precision cymometer

引言

电子设计自动化(electronic design automation, 简写为 EDA)是以计算机为工具, 根据硬件描述语言 HDL(hardware description language)完成的设计文件, 自动地完成逻辑编译、化简、分割、综合及优化、布局布线、仿真以及对于特定目标芯片的适配编译和编程下载等工作。相比较传统的电子设计方法, 它有着很明显的优势: 采用硬件描述语言作为输入, 有着强大的系统建模和电路仿真功能, 具有自主知识产权, 开发技术的标准化、规范化及 IP 核的可利用性, 适用于高效率大规模系统设计的自顶向下设计方案, 以及高性能好等特点(潘松, 黄继业, 2002), 使它成为当今电子技术发展的前沿和核心之一。

Linux 系统是一种开放源代码、稳定、成熟、实用的操作系统, 并且其内核可以根据需要任意裁剪。 μ Clinux(Micro-Control-Linux, 针对微控制领域而设计的 Linux 系统)是 Linux 逐渐地应用于嵌入式设备的结果。

可编程片上系统(system on programmable chip, 简写为 SOPC)是 Altera 公司提出来的一种灵活、高效的 SOC 解决方案, 它将处理器、存储器、I/O 口、CDR 等系统设计需要的功能模块集成到一个可编程器件上, 构成一个可编程的片上系统。与之相应的处理器是 Altera 公司提供的, 目前最流行的可配置软核处理器—— NIOS II CPU(ALTERA, 2008).

质子旋进式磁力仪是用于测量地球总磁场强度绝对值或者分量强度的测磁仪器, 其测量原理是具有自旋磁矩和自旋角动量的质子在地磁场的作用下, 会产生一个以地磁场方向为轴的拉莫尔旋进, 其旋进频率与地磁场强度关系为(中国地震局监测预报司, 2002):

$$F = 2\pi \frac{f_p}{\gamma_p} = 23.487215 f_p \quad (1)$$

式中, F 为地磁场强度, 单位为 nT; f_p 为质子旋进频率, 单位为 Hz; γ_p 为旋磁比, $\gamma_p = 0.26751513 \times 10^8 \text{ rad/T}\cdot\text{s}$. 由此可见, 地磁场强度与旋进频率成正比关系, 因而地磁场强度的测量即转化为质子旋进频率的测量。

本次设计以实现质子旋进式磁力仪原理主机为主线, 利用成熟的 EDA 技术和嵌入式 Linux 技术, 在地震前兆仪器设计中首次引入先进的电子设计方法和稳定的嵌入式系统, 可大幅提高仪器的智能化程度, 方便仪器的更新换代, 降低仪器生产成本和维护费用等。

1 仪器硬件设计

整机硬件结构如图1所示, 中央处理单元采用 NIOS II 软核CPU(带有4K片上RAM),

通过 Avalon 总线与存储设备接口、外设接口、自定义设备接口、数据锁相环以及等精度频率相连。另外还包括一些辅助外设，如显示屏、按钮、网口、串口等。

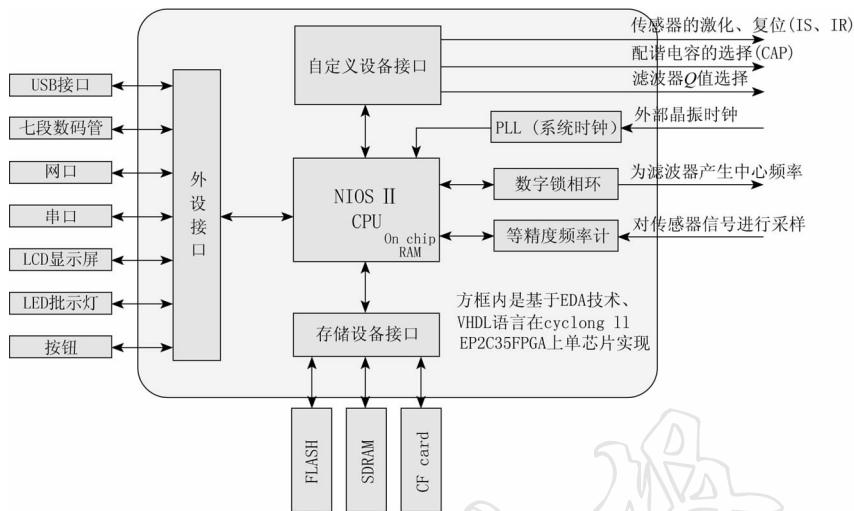


图 1 系统硬件结构示意图
Fig. 1 System hardware architecture

仪器硬件配置信息保存在外部 FLASH 中，当仪器上电时先将 FLASH 中的硬件配置信息调入到 FPGA 芯片中，完成硬件平台的搭建；仪器操作系统的镜像文件也保存在外部 FLASH 中，一旦硬件平台搭建完毕后，立即启动操作系统引导程序，该程序完成将操作系统镜像文件解压并 COPY 到 SDRAM 的 0 地址，运行 Linux 系统(刘峥嵘，2005)。

1.1 利用 SOPC Builder 工具进行系统架构设计

SOPC Builder 提供了用于组建一个在模块级和组件级定义的系统平台，其组件库包含了从简单的固定逻辑功能块到复杂的、参数化的、可以动态生成的子系统等一系列组件 (ALTERA, 2008)。本次设计中主要用到 NIOS II CPU 模块(标准型内核、4K 片上 RAM)、系统时钟、Avalon 总线以及一些接口模块。系统主频为 85 MHz。

1.2 利用 VHDL 设计等精度频率计

等精度频率计在整个系统中的作用为对探头信号进行采样并且将结果反馈给 CPU 进行计算。等精度频率计不但具有较高的测量精度(其测量精度由基准频率决定)，而且在整个频率区域内都能保持恒定的测量精度。等精度频率计的测频原理如图 2 所示。

由于标准信号计数器、被测信号计数器的启停时间都是由被测信号的上升沿触发的，在一次测量时间内对被测信号的计数无误差；在此时间内标准频率脉冲的计数个数 N_s ，最多相差一个脉

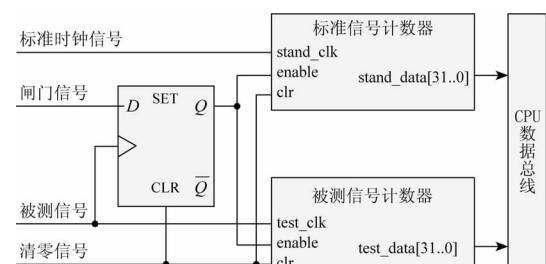


图 2 等精度频率计的测频原理
stand-data[31..0] 为标准信号计数器计数结果(32 位宽)；
test-data[31..0] 为被测信号计数器计数结果(32 位宽)
Fig. 2 The principle of equal precision cymometer
stand_data[31..0] is the result of standard signal counter(32-bit); test_data[31..0] is the result of test signal counter(32-bit)

冲, 故理论误差为 $|d| \leqslant 1/N_s$. 显然, 测量精度仅仅与 N_s 有关, 只要 N_s 值足够大, 就能保证测量精度.

设标准信号的频率为 f_s , 标准信号计数器输出为 N_s , 被测信号频率为 f_x , 被测信号计数器输出为 N_x , 则有如下关系成立:

$$\frac{N_s}{f_s} = \frac{N_x}{f_x} = t \quad (\text{从 } D \text{ 触发器 } Q \text{ 端来说的测量时间})$$

从而可以得出

$$f_x = (f_s/N_s) \cdot N_x$$

由于 f_s 为已知, N_s 和 N_x 都可以通过计数器返回得到, 从而可以方便地计算出被测信号的频率. 整个等精度频率计被分为一个 D 触发器和两个计数器, 从而用 VHDL 语言很容易来编写其实现代码(姜雪松, 刘东升, 2004).

1.3 利用 VHDL 设计全数字锁相环

全数字锁相环在系统中主要为了开关电容滤波器提供预期的中心频率. 我国地磁场总强度由南到北, 变化值为 41000—60000 nT, 由其原理公式计算机可得对应其滤波器中心频率变化值为 80—320 kHz, 变化步长设计为 5 kHz. 锁相环(万心平, 1995)中数字鉴相器采用异或门鉴相器; 数字环路滤波器由一变模可逆计数器构成; 数控振荡器则由一加/减脉冲控制器和除 N 计数组成. 由此可见, 全数字锁相环也就变成几个可变计数器模块和几个可变模除 N 计数组成, 从而可利用 VHDL 语言方便对各模块实现其功能(姜雪松, 刘东升, 2004).

图 3 为锁相环在本次设计中的具体应用. 其中, dpll_param[7..0] 为锁相环输入参数, 用它来控制其输出频率; dco_out 为锁相环频率输出, 其管脚与外部电路中的滤波器中心频率脚相连, 从而达到利用 CPU 来选择滤波器中心频率的目的.

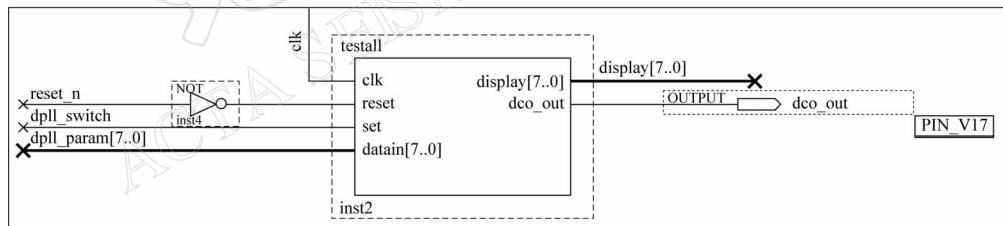


图 3 全数字锁相环的具体应用

reset_n 为复位信号; dpll_switch 为 DPLL 恢复出厂设置信号; dpll_param[7..0] 为 DPLL

输入参数, 用此来控制其输出频率; dco_out 为预期频率输出; display 用来辅助显示

Fig. 3 A specific application of DLL

reset_n: the signal of reset; dpll_switch: the signal of restoring the factory setting;

dpll_param[7..0]: the input param of DPLL, controlling the output frequency;

dco_out: the output frequency; display: the auxiliary display

1.4 传感器测控、信号放大电路

仪器硬件工作流程(中国地震局监测预报司, 2002)如图 4 所示: 质子旋进式传感器平时处在复位状态, 当 CPU 发出 IS 指令时, 对传感器进行维持 5 s 的激励, 然后断开激励电流, 并将传感器的旋进信号接入到信号放大电路; 传感器经激励后产生一个持续大约 2 s,

按指数规律衰减的正弦信号, 其信号幅度在微伏级; 该信号先经 CPU 可控(通过 CPA[7..0])来选择电容)的配谐电容放大电路, 进入 INA128 前置放大, 然后进入 CPU 可控(通过 Q[5..0]来设置 Q 值, 通过中心频率来选择滤波器中心频率)的开关电容滤波器进行选频放大, 最后经过 OP07 放大后进入 MAX953 整形电路, 最终产生方波反馈到系统内等精度频率计数器进行采样、计算、数据存储等.

2 仪器操作系统: μ Clinux

2.1 μ Clinux 交叉编译环境的建立与系统移植

本次设计中采用的交叉编译工具为 nios2gcc.tar.bz2 软件包; 系统源代码采用 git server 的方式来管理、更新源代码. 先下载 μ Clinux 源代码包, 解压后用 git pull 命令来得到最新的内核补丁. 通过 make menuconfig, 根据本次设计需要来配置内核, 如添加串口通讯协议 uart、CF 卡支持、FAT 文件系统等; 然后用 make 命令完成源代码的编译, 将最终生成的系统镜像文件下载到仪器 flash 中即完成系统移植.

2.2 采用的文件系统以及数据安全性考虑

μ Clinux 系统根文件系统采用 ROMFS 格式, 这种文件系统相对于一般的 EXT2 文件系统要求更多的空间, 并且该文件系统不支持动态擦写, 保证系统数据的安全(刘祖亮, 2000).

本次设计还另外加载了 FAT 格式的文件系统. 该文件系统主要用来支持 CF 卡中的数据保存, 从而保证 CF 卡中的数据通用性, 并且其读写采用动态挂载的方式进行, 也即要对 CF 卡中进行数据读写时才将 CF 挂载进系统中, 而操作完成后立即进行卸载, 从而保证了 CF 卡中数据的安全性.

3 软件设计

本研究中涉及的软件编写主要有两类程序: 驱动程序(运行在 Linux 内核空间)和用户程序(运行在 Linux 用户空间).

图 5 所示为仪器软件系统结构图. 图中最上层的是应用层, 如串口通讯线程、网口通讯线程等; 应用层下面是系统调用接口, 也是应用程序需要访问内核时的唯一合法通道, 通过该接口, 应用层的用户程序就可以合法地访问到内核; Linux 内核主要由 5 大块组成:

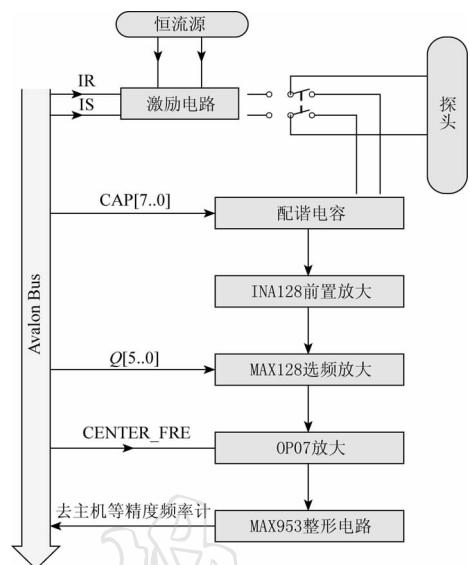


图 4 传感器测控、信号放大电路

IR 为传感器复位信号; IS 为传感器测试信号; CAP[7..0] 为配谐电容选择信号; Q[5..0] 为滤波器 Q 值设置信号; CENTER_FRE 为滤波器中心频率

Fig. 4 Circuit of measurement, control and amplifier

IR: the reset signal of sensor; IS: the test signal of sensor; CAP[7..0]: the select signal of harmonic distribution capacitor; Q[5..0]: the Q set signal of filter; CENTER_FRE: center frequency of filter

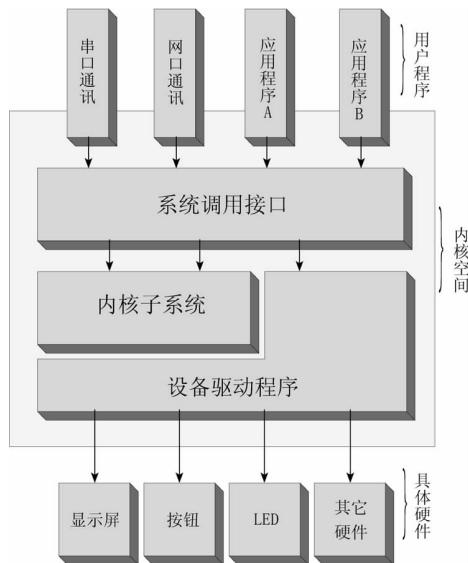


图 5 仪器软件结构图
Fig. 5 Instrument software chart

传感器控制设备等，并且在 mydriverparam.h 中统一对这些设备主设备号进行设定。

```
#define MYLCD_MAJOR          250 //LCD 显示屏主设备号
#define MYLED_MAJOR           249 //LED 批示灯主设备号
#define SET_Q_MAJOR            248 //滤波器 Q 值设置主设备号
#define CENTERFREQUENCY_MAJOR 247 //滤波器中心频率设置主设备号
#define TEST_MAJOR              246 //设置传感器工作主设备号
#define CYMOMETER_MAJOR        245 //等精度频率计主设备号
#define SETCAP_MAJOR            244 //电容选择主设备号
```

本次设计中所有设备属于字符设备，采用了“文件层和驱动层”的接口方式。例如为 LCD 帧缓冲设备定义的驱动层接口为

```
#define MYLCD_IOCTL_BASE0 xb1
#define MYLCD_CLEAR             _IO(MYLCD_IOCTL_BASE,0)
#define MYLCD_LINE               _IOW(MYLCD_IOCTL_BASE,1,unsigned long)

static struct file_operations my_fops = {
    .read = NULL,
    .write = mylcd_write,           //向设备写数据，也即要显示的内容
    .ioctl = mylcd_ioctl,          //控制该设备、如显示行的选择等
    .open = mylcd_open,             //打开该设备
    .release= mylcd_release,       //关闭该设备
};
```

通过该接口，在应用程序中对帧缓冲设备(/dev/mylcd)的操作只需调用文件层的操作函数即可：调用 open 函数打开/dev/mylcd 设备文件，然后调用 ioctl 函数对该设备进行控制，如选择到那一行显示数据、清屏操作等，调用 write 函数进行数据显示。

进程调度、内存管理、文件系统、设备驱动和网络子系统；内核的下面是设备驱动，驱动用于硬件和操作系统的连接，设备驱动下面即仪器硬件。

3.1 驱动程序

设备驱动程序作为 Linux 系统内核的组成部分，是应用层代码操作硬件设备的桥梁。它即可以直接将其源代码编译进内核，也可以单独编译成模块，运行时“插入”内核(Corbet *et al*, 2005)。本次设计的仪器硬件各外设接口均需要实现自己的驱动程序，且都采取直接将驱动程序编译进内核代码的方法。

本次设计主要涉及有如下几个设备：LCD 显示屏、LED、滤波器 Q 值设置、滤波器中心频率设置、等精度频率计参数设置、



3.2 用户程序

本次设计中用户程序的研发主要运用到 Linux 系统多线程技术。其一，多线程 (Stevens, 2005; Matthew, Stones, 2007) 是一种非常“节俭”的多任务操作方式。在 Linux 系统下，启动一个新的进程必须分配给其独立的地址空间，建立众多的数据表来维护其代码段、堆栈段和数据段，而运行于一个进程中的多个线程，它们彼此之间使用相同的地址空间，共享大部分数据，启动一个线程所花费的空间和时间远远小于启动一个进程的开销；其二，线程间方便的通信机制，对不同进程来说，它们具有独立的数据空间，要进行数据的传递只能通过通信的方式进行，线程则不然，由于同一进程下的线程之间共享数据空间，所以一个线程的数据可以直接为其它线程所用，这不仅快捷，而且方便。

3.2.1 串口线程

串口线程(李现勇, 2002)主要用来实现地震前兆仪器“九五”标准通讯功能(中国地震局监测预报司, 2003)，譬如响应从计算机串口向仪器串口发出的收取数据命令、校对仪器参数命令。另外还根据仪器本身需要添加一些自定义的非标准参数设置，如滤波器 Q 值的手动修改、滤波器中心频率的手动修改等。串口线程的创建：

```
res = pthread_create(&com_thread, NULL, com_function, (void *) message)
```

3.2.2 测量线程

测量线程主要用来完成一整次的测量过程，并且将测量反馈的数据进行显示与保存。

3.2.3 Socket 线程

Socket 线程(汪晓平, 钟军, 2003)主要用来实现地震前兆仪器“十五”规程命令，使仪器产出数据可以直接录入到“十五”前兆数据库中。再者，当仪器启动时会根据 SNTP 信息为仪器进行网络时间校对工作。

上述的几个线程同时工作在一个进程中，各线程之间既可以采用全局变量的方式，又可以采用文件的方式来进行数据共享(Stevens, 2005)。本次设计中为了节省系统内存开销和减少对 CF 卡的挂载、卸载次数，对较为常用的小型数据采用全局变量(谭浩强, 1993)的方式进行共享，如仪器的当前值、仪器台号等，这样当远程收取仪器当前值时，不必要访问到 CF 卡，而直接从程序全局变量中读取。对不太常用、数据量较大或对安全性要求较高的数据则采用文件的方式进行共享。首先用户程序受嵌入式资源的限制，不允许申请很大块的内存；再者从数据安全性考虑，即使用户程序出现异常时，其原始数据也不会因此而丢失。

4 结语

本次设计中关键的硬件电路采用 VHDL 语言进行“软”设计，处理器采用软核 NIOS CPU，所以仪器硬件的维护与升级从某种意义上说就是软件的不断完善过程，从而最大程度地方便了仪器的维护与升级，使得仪器具有较长的生命周期；整个硬件工程只占用 FPGA 芯片中不到一半的硬件资源，说明该仪器还具有很大的扩展空间，可以根据实际需要扩展仪器性能，甚至可以配置成多 CPU 的高智能化仪器；采用稳定、开源的嵌入式 Linux 作为仪器运行操作系统，系统根文件系统采用 ROMFS 文件管理系统，数据存储采取动态的数据硬盘挂载、卸载方法，从而将大大提升仪器的稳定性和数据安全。

本研究中虽未过多涉及到质子旋进磁力仪传感器的研究，但从其测量的控制过程与数

据采集过程来看，其智能化程度、仪器稳定性、仪器易维护性都已经取得了明显进步，并且 EDA 加嵌入式 Linux 技术是一项通用的技术，经过简单地变换即可实现现有的地震前兆仪器在硬件方面的更新换代。

目前的研究中还存在若干需要进一步深入研究的内容，譬如质子旋进信号的高倍低噪声放大技术，嵌入 Linux 采用通用的 U-boot 的引导，以及如何从引导程序中传递参数到系统中等问题。

本研究得到陈会忠研究员和薛兵研究员的悉心指导，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 姜雪松, 刘东升. 2004. 硬件描述语言 VHDL 教程[M]. 西安: 西安交通大学出版社: 371-417.
- 李现勇. 2002. Visual C++串口通信技术与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社: 1-427.
- 刘峥嵘. 2005. 嵌入式 linux 应用开发详解[M]. 北京: 机械工业出版社: 53-448.
- 刘祖亮. 2000. Linux/Unix 急速入门[M]. 北京: 中国青年出版社: 90-133.
- 潘松, 黄继业. 2002. EDA 技术实用教程[M]. 北京: 科学出版社: 16-357.
- 谭浩强. 1993. C 程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社: 268-291.
- 汪晓平, 钟军. 2003. Visual C++ 网络通信分析与应用实现[M]. 北京: 人民邮电出版社: 22-124.
- 万心平. 1995. 集成锁相环电路[M]. 北京: 人民邮电出版社: 1-408.
- 中国地震局监测预报司. 2002. 地震电磁数字观测技术[M]. 北京: 地震出版社: 75-110.
- 中国地震局监测预报司. 2003. 地震前兆数字观测公用技术与台网[M]. 北京: 地震出版社: 240-327.
- ALTERA. 2008. *Introduction to the Quartus II : Software*[M]. Altera Corporation: 1-247.
- Stevens R W. 2005. *Advanced Programming in the UNIX(R) Environment* [M]. USA, Indiana: Addison-Wesley Professional: 1-536.
- Corbet J, Rubini A, Kroah-Hartman C. 2005. *Linux Device Drivers*[M]. USA, O'Reilly Media, Inc: 46-285.
- Matthew N, Stones R. 2007. *Beginning Linux Programming*[M]. USA, Wrox Press: 1-605.