

## 基于 IEEE1588 的时钟同步技术研究

李 智 张景宇 牛军浩 覃斌毅

桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 广西桂林 541004 )

**摘要** 分布式测量控制系统的快速发展对时钟同步精度提出了更高的要求,IEEE1588 协议是关于网络测量和控制系统的协议,可实现高精度的时间同步。深入分析了 IEEE1588 协议的最佳主时钟 BMC 算法原理和本地时钟同步主时钟的过程,提出了一种在物理层加盖时间戳的 IEEE1588 实现方案,提供了硬件设计方法,阐述了主从时钟的软件设计流程。在此基础上对主从时钟的同步进行了验证。实验证明,该方法是切实可行的,时钟同步精度可达亚微秒级。通过不同网络电缆长度的测试,证明该设计基本消除了固定网络延迟造成的影响。

**关键词** 时钟同步 IEEE1588 最佳主时钟算法 时间戳

中图分类号 TP393 文献标识码 A 文章编号 1002-1841(2012)12-0099-04

## Research on Clock Synchronization Technology Based on IEEE1588

LI Zhi ZHANG Jing-yu NIU Jun-hao QIN Bin-yi

Dept. of Electronic Engineer and Atomic, Guilin Univ. of Electronic Technology, Guilin 541004, China )

**Abstract** The rapid development of distributed measurement control system puts forward higher request for the clock synchronization precision. IEEE1588 is a protocol on the network measurement and control system, and with it, the clock synchronization can realize high precision. This paper analyzes the principle of best master clock BMC algorithm and the time synchronization process of local clock and master clock. Puts forward a IEEE1588 realization scheme, provides a hardware design method, and elaborates the master-slave clock software design process. On the basis of the work, verifies the master-slave clock synchronization, and experiments show that the method is feasible, clock synchronization precision can reach submicrosecond, and the test of different length of network cables demonstrates the design basically eliminates the impact of fixed network latency.

**Key words** clock synchronization IEEE1588 best master clock algorithm timestamp

### 0 引言

近几年,随着分布式网络化测量和控制技术的快速发展,测量和控制的实时性问题越来越突出,从而对时钟同步的精度提出了更高的要求。移动通信技术中,TD-SCDMA 和 cdma2000 都是基站同步系统,对时间同步精度的要求达到微秒甚至亚微秒级,并且基站之间的切换和漫游也要求精确的时间控制<sup>[1]</sup>。基于 IEC61850 标准的新型数字化变电站也对时钟同步提出了高精度的要求,即数字信号的采集和传输必须基于统一的时序和时钟标准,以便于不同合并单元之间和同一合并单元的电子互感器采样同步<sup>[2-3]</sup>。自动测试领域中的航空航天测试、武器装备运行状态检测以及钢铁石油化工等工厂自动化测试,都具有数据量大、地域高度分散、测试实时性和可靠性要求高等特点,传统测试系统已经不能胜任<sup>[4]</sup>。

IEEE1588 协议为上述问题的解决提供了良好的参考。IEEE1588 协议是关于网络测量和控制系统的精密时间协议(Precision time protocol, PTP)于 2002 年提出,并于 2008 年提出 V2 版。应用网络时间协议(NTP)只能达到毫秒级的同步精度,而应用 IEEE1588 协议则可达微秒级甚至更高的精度。LXI 规范中明确要求 A 类和 B 类 LXI 仪器可实现 IEEE1588 时钟同步功能。文中将介绍 IEEE1588 的重要算法原理——最佳

主时钟算法和从时钟同步于主时钟的方法,并提出了一种基于 DP83640 的在物理层加盖时间戳的实现方案,实现了从时钟同步于主时钟,时钟同步精度可达亚微秒级,并基本消除了固定网络延迟对系统的影响。

### 1 最佳主时钟算法

对于一个系统而言,可能有众多的时钟节点,那么必须找到一个最准确的时钟,作为整个系统的精确时钟源,协调各个部分的工作和运行。这个时钟称为主时钟,与主时钟同步的时钟称为从时钟。主时钟的确定依据的算法称之为最佳主时钟 BMC 算法。随着线路连接的状态变化和时钟的接入或移除,主时钟也会发生变化。

IEEE1588 协议为每个时钟端口配置时钟数据集,作为协议判定的基础。这些数据集如表 1 所示。

最佳主时钟算法由两部分组成:数据集比较算法、状态决策算法<sup>[5-6]</sup>。

数据集比较算法是指比较两个数据集的优劣关系,从而可以确定端口 r 收到的合格 Sync 消息的最佳估计  $E_{r_{best}}$ 。如果时钟有 N 个端口,可以利用该算法从 N 个  $E_{r_{best}}$  中确定所有消息的最佳估计  $E_{best}$ 。其中用到时钟的方差排序,计算式如式 1( )。

$$\sigma_{PTP}^2 = \frac{1}{3} \left[ \frac{1}{2(N-2)} \times \sum_{k=1}^{N-2} (x_{k+2} - 2x_{k+1} + x_k)^2 \right] \quad (1)$$

式中  $x_{k+1}$  和  $x_{k+2}$  是  $t_k$ 、 $t_{k+\tau}$  和  $t_{k+2\tau}$  时刻被测时钟和本地参考时钟

测得的时间之间的时间残差。

表 1 时钟数据集

时钟数据集	说明
默认数据集	本地时钟固有的或假定的属性
当前数据集	本地时钟当前属性,描述本地时间的来源和时间品质。
父数据集	反映 PTP 端口或父端口当前属性特征,是 PTP 从端口的时间源
全球时间属性数据集	定义 PTP 消息字段所需的与时间相关的成员
端口配置数据集	反映端口状态,PTP 消息序号及端口地址等内容,作为协议判定的基础
外来主时钟数据集	反映外来主时钟的标识符及其 Sync 消息的数量

状态判决算法是指根据时钟的等级、算得的  $E_{rbest}$  及  $E_{best}$  的值进行比较而对时钟的状态进行判定,并给出时钟状态的推荐值。例如如果时钟为 1 等或 2 等时钟并且通过数据集比较算法与  $E_{rbest}$  相比更好或者路径长度优于  $E_{rbest}$ ,则判定该时钟端口处于 PTP\_MASTER 状态。根据状态判决算法的结果,时钟端口还要对它的数据集进行更新,为下一次最佳主时钟算法的运行做好准备。

每个时钟的所有端口上最佳主时钟算法的连续运行,保证了整个系统对网络或时钟的变化连续地自适应。

## 2 从时钟同步主时钟的过程

从时钟和主时钟的同步过程<sup>[7-11]</sup>如图 1 所示,主时钟周期性(一般 1 次/2 s)地向通信通路上发送 Sync 消息,此时主时钟的时刻是  $t_1$ ,从时钟的时间点是  $t_1 + \text{Offset}$ ,其中 Offset 表示从时钟与主时钟的时间偏差。从时钟在接收到 Sync 消息时,记录下接收的时刻  $t_2$ ,则有下式成立:

$$t_2 = t_1 + \text{Offset} + \text{MtoS\_Delay} \quad (2)$$

式中 MtoS\_Delay 表示消息经通信通路由主时钟到达从时钟经历的时间延迟。

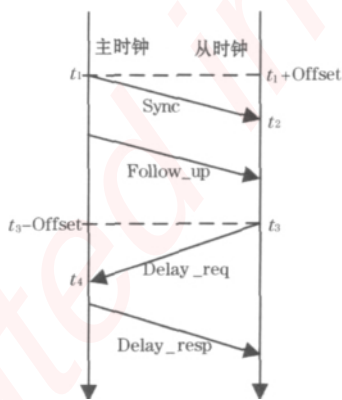


图 1 从时钟同步主时钟的过程

主时钟发出 Sync 消息后一段时间再发送 Follow\_Up 消息,该消息将  $t_1$  时刻的时间值传递给从时钟。然后从时钟在  $t_3$  时刻向主时钟发送 Delay\_Req 消息,此时主时钟处在  $t_3 + \text{Offset}$  时刻。主时钟接收时记录下接收时刻  $t_4$ ,将  $t_4$  时刻的时间值通过

Delay\_Resp 消息发送给从时钟。则有下式成立:

$$t_4 = t_3 - \text{Offset} + \text{StoM\_Delay} \quad (3)$$

式中 StoM\_Delay 表示消息经通信通路由从时钟到达主时钟经历的时间延迟。

设主时钟到从时钟的线路延迟和从时钟到主时钟的线路延迟相等,即:

$$\text{StoM\_Delay} = \text{MtoS\_Delay} = \text{Delay}$$

则根据式 2(和式 3)可得:

$$\text{Delay} = \frac{t_4 - t_1 + t_4 - t_3}{2}$$

$$\text{Offset} = \frac{t_3 - t_1 + t_4 - t_3}{2}$$

根据得到的 Delay 和 Offset 数据,可以修正从时钟的速率使之与主时钟同步。

## 3 硬件设计

硬件设计如图 2 所示,以太网数据通过 RJ45 接口后,经过具有加盖和提取时间戳功能的 PHY 芯片 DP83640,然后再传送给上层。控制芯片采用 ARM7 系列芯片 LPC2368,这款芯片集成了 10Mbps/100Mbps 的 MAC 控制器,有 4 个串行通信接口,可以方便地通过串口进行调试。PHY 采用 DP83640,这是一款集成 IEEE 1588 精确时间协议(PTP)硬件支持功能的以太网收发器,可在物理层对 PTP 同步消息加盖时间戳,最大程度地减少消息通过网络协议栈造成的延时和抖动,可确保分布式网络上各节点能按照主时钟的时间精确地同步定时<sup>[11-13]</sup>。控制器可通过串行管理总线 MDIO 和 MDC 对 DP83640 进行管理和访问。

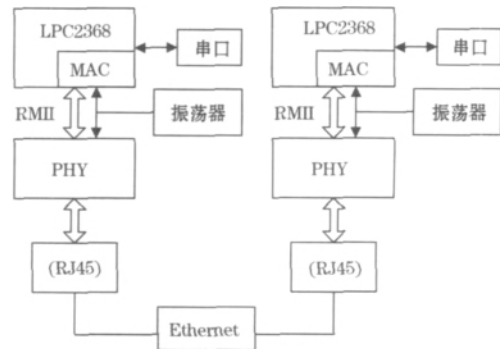


图 2 硬件设计

## 4 软件设计

为验证主从时钟的同步过程,设计指定了主时钟和从时钟。图 3 所示为主时钟程序流程图<sup>[14-15]</sup>。上电后初始化 MAC、DP83640、串口及时钟数据集和协议栈。然后启动定时器,两秒钟后发出 Sync 消息,这时 DP83640 记录下发出 Sync 消息的时刻,构建 Follow\_Up 消息并将其内发给从时钟。如果定时时间还没到或发送完 Follow\_Up 消息,则进行判断是否收到 Delay\_Req 消息,如果是,则从 DP83640 的寄存器中读取接收 Delay\_Req 的时刻值,构建 Delay\_Resp 消息并发出去,如果不是,则返回判断是否定时时间已到。

图 4 所示为从时钟程序流程图<sup>[14-15]</sup>。初始化完成后,等

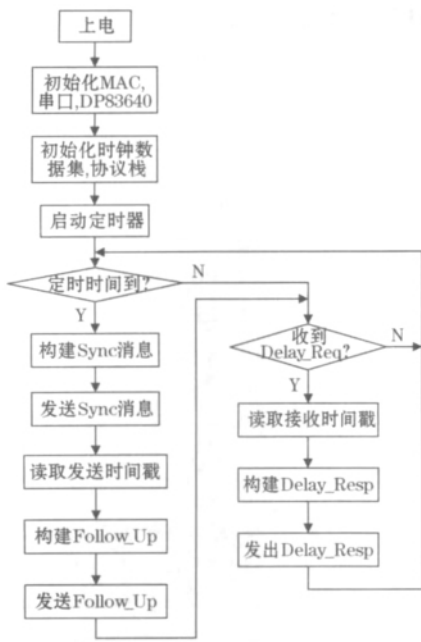


图3 主时钟程序流程图

待接收 PTP 消息,如果接收到 PTP 消息,则进一步判断是哪一种 PTP 消息。如果是 Sync 消息,则从 DP83640 寄存器中读取该消息的接收时刻值。如果是 Follow\_Up 消息,则计算时钟偏移 (Offset) 并依据之前的循环计算得到的延迟 (delay) 更新时钟速率。构建 Delay\_Req 消息并发送出去。如果是 Delay\_Resp 消息,则从该消息中获取主时钟接收 Delay\_Req 的时刻值,计算线路延迟 Delay。上述消息处理完后,返回继续判断是否收到 PTP 消息。

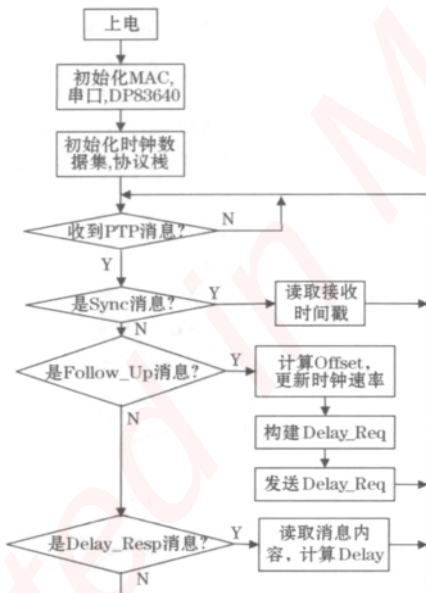


图4 从时钟程序流程图

进行更新时钟时,根据时钟运行情况,可能会对 PTP 时钟有 3 种调整:步调调整、临时速率调整和正常速率调整。步调调整是在主从时钟时间偏差较大时,对从时钟的时间直接加上或减去一个偏移量。临时速率调整是在主从时钟偏差较小时,在一定时间内控制从时钟的运行速率加快或变慢,经过这段时间后,从时钟将更接近主时钟。正常速率调整则是基于多次临

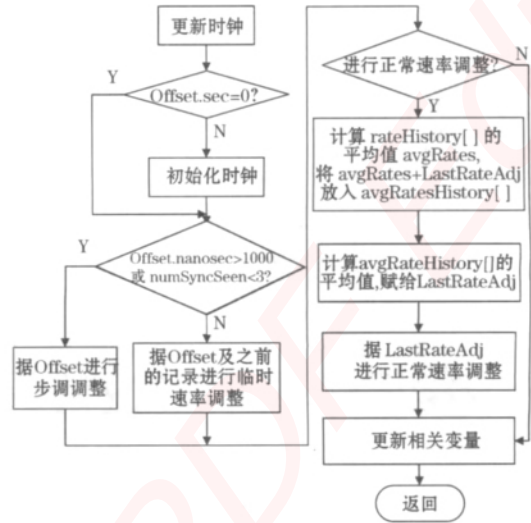


图5 更新时钟流程图

时速率调整而进行的,目的是调整从时钟的正常运行速度,使其和主时钟一致。具体流程图如图 5 所示。其中 rateHistory<sup>[1]</sup> 是根据 2 次 Sync 消息的发送和接收时间戳计算得到的。

### 5 测试结果

为验证主从时钟的同步效果,将两个时钟模块通过网络电缆相接搭建测试平台,设定主从时钟每隔 2s 输出 1 次脉冲信号,用示波器观察主从时钟的同步触发,测试设置如图 6 所示。

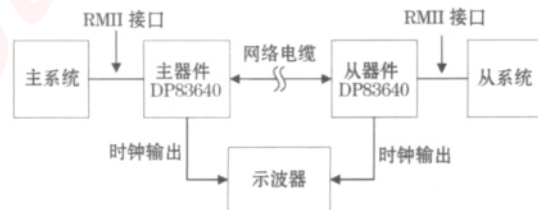


图6 测试接线图

按照表 2 的测试条件进行测试,从系统每 2s 计算 1 次从时钟的误差值,测试结果如表 3 所示。

表2 测试条件

网线长度 /m	网络速度 /Mbps	频率源 /MHz	同步间隔 /s	温度 /°C	测试时间 /h
1	100	50	2	25	6

表3 测试结果

平均值 /ns	标准偏差 /ns	样值数目
-0.04	11.59	118 52

将从时钟的误差值进行统计可得图 7。

图 8 是通过示波器观察到的某次主从时钟同步触发图,触发误差 42.4 ns。

为验证 IEEE1588 系统消除了网络延迟造成的影响,将网络电缆长度改为 20 m,按表 4 进行测试,测试结果如表 5 所示。

表4 测试条件

网线长度 /m	网络速度 /Mbps	频率源 /MHz	同步间隔 /s	温度 /°C	测试时间 /h
20	100	50	2	25	3

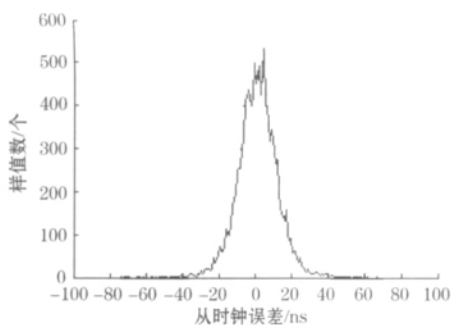


图7 从时钟误差分布

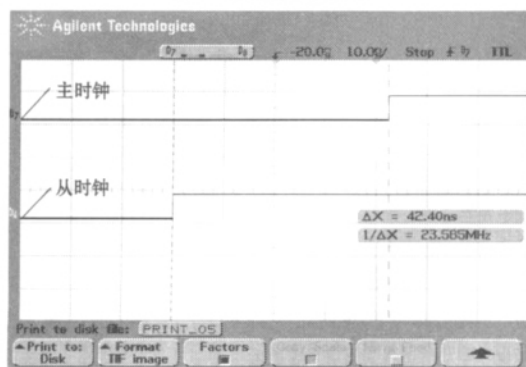


图8 主从时钟同步触发

表5 测试结果

平均值 / ns	标准偏差 / ns	样值数目
0.39	13.84	5 539

同样 将这些主从时钟时间偏差值进行统计可得图9。

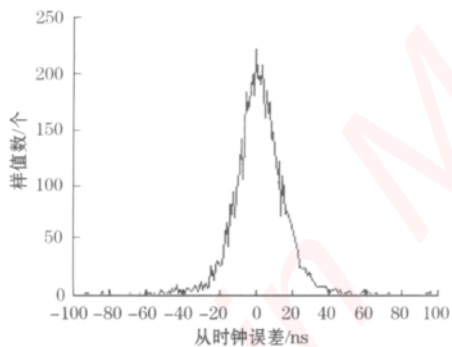


图9 从时钟误差分布

## 6 结论

测试结果表明,该设计实现了主从时钟在亚微秒级的同步,并通过不同长度网线的测试,证明了系统可以基本消除固定网络延迟的影响。文中在对 IEEE1588 协议的最佳主时钟算法和同步过程进行分析的基础上,提出了协议的实现方案,设计了程

序流程,并对主从时钟的同步进行了验证。实验结果表明,该方案是切实可行的,可为 IEEE1588 的工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] 徐荣,胡昌军. 分组网中的 IEEE1588v2 同步技术及应用. 电信网技术 2009 8( 8 )-11.
- [2] 汪祺航,吴在军,赵上林,等. IEEE1588 时钟同步技术在数字化变电站中的应用. 电力系统保护与控制 2010 38 10 137:-141.
- [3] 张洪源,王倩,王腾,等. 基于 PTP 的数字化变电站时钟同步技术的应用研究. 电力学报 2010 25 3( 3 )246:-250.
- [4] 习友宝,古军. 分布式网络化测试技术综述. 仪器仪表学报 2002, 23 5( 5 )212:-216.
- [5] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. New York, USA. IEEE 2002.
- [6] 魏丰,孙文杰. IEEE-1588 协议时钟同步报文的精确时间标记方法研究. 仪器仪表学报 2009 30 1( 1 )62:-169.
- [7] VALLAT A, SCHNEUWLY D. Clock Synchronization in Telecommunications via PTP (IEEE 1588). Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. Geneva, Swiss IEEE 2007 334-341.
- [8] ULLMANN M, VOGELER M. Delay attacks — Implication on NTP and PTP time synchronization. IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Brescia, Italy IEEE 2009 1:-6.
- [9] 王相周,陈华婵. IEEE1588 精确时间协议的研究与应用. 计算机工程与应用 2009 30 8( 8 )846-1849.
- [10] MURAKAMI T, HOURIUCHI Y. Improvement of synchronization accuracy in IEEE 1588 using a queuing estimation method. IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Brescia, Italy IEEE 2009 1:-5.
- [11] FERRANT J, GILSON M, JOBERT S, et al. Development of the first IEEE 1588 telecom profile to address mobile backhaul needs. Communications Magazine 2010 48 10 118:-126.
- [12] 孙中尉. IEEE1588 高精度网络时间同步应用研究:学位论文. 北京 中国科学院研究生院 2010.
- [13] 史先好,高厚磊,向珉江,等. IEEE1588 时钟同步协议在数字化变电站中的应用探讨. 电力自动化设备 2011 31 4( 4 )32:-135.
- [14] 王康. 基于以太网的网络化时间统一系统的研究及实现:学位论文. 北京 中国科学院研究生院 2010.
- [15] 庾智兰,李智. 精确时钟同步协议最佳主时钟算法. 电力自动化设备 2009 29 1( 1 )74 ÷ 77.

作者简介 李智 1965 - 博士,教授,博士生导师,主要从事自动测试总线与系统的教学与研究。E-mail zhangjingu4381@163.com

上接第 98 页)

- [2] MATSUMOTO A, SATO Y, OHNO H, et al. A New Monitoring Method of Train Derailment Coefficient. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Long Beach 2005.
- [3] 陈建政. 轮轨作用力和接触点位置在线测量理论研究:学位论文. 成都 西南交通大学 2008.
- [4] 李彬,林建辉. 基于轨道轮轨力连续测试的车辆运行状态地面安全监测系统的研究. 实用测试技术 2002 5( 5 )9-10.
- [5] 黄志辉,申文静,刘超. 高速车轮扫描力监测系统的集成研究. 现代制造工程 2009 6( 6 )-3.

- [6] 赵国堂,田越. 轮轨水平力连续测试技术的研究. 铁道学报 2000, 22 3( 3 )69 ÷ 73.
- [7] JONSSON J, SVENSSON E, CHRISTENSEN J T. Strain gauge measurement of wheel-rail interaction forces. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 1997 32 3( 3 )183:-191.
- [8] 潘周平,张立民. 轮轨力连续测试系统设计. 西南交通大学学报, 2004 39 1( 1 )69 ÷ 72.
- [9] 冯毅杰,张格明. 车辆运行状态地面安全监测系统研究的新进展. 中国铁道科学 2002 3( 3 )-
- [10] 刘光恒. 称重传感器弹性体的有限元分析. 仪表技术与传感器, 1996 1( 1 )10 ÷ 12.

# 嵌入式资源免费下载

## 总线协议:

1. [基于 PCIe 驱动程序的数据传输卡 DMA 传输](#)
2. [基于 PCIe 总线协议的设备驱动开发](#)
3. [CANopen 协议介绍](#)
4. [基于 PXI 总线 RS422 数据通信卡 WDM 驱动程序设计](#)
5. [FPGA 实现 PCIe 总线 DMA 设计](#)
6. [PCI Express 协议实现与验证](#)
7. [VPX 总线技术及其实现](#)
8. [基于 Xilinx FPGA 的 PCIE 接口实现](#)
9. [基于 PCI 总线的 GPS 授时卡设计](#)
10. [基于 CPCI 标准的 6U 信号处理平台的设计](#)
11. [USB30 电路保护](#)
12. [USB30 协议分析与框架设计](#)
13. [USB 30 中的 CRC 校验原理及实现](#)
14. [基于 CPLD 的 UART 设计](#)
15. [IPMI 在 VPX 系统中的应用与设计](#)
16. [基于 CPCI 总线的 PMC 载板设计](#)
17. [基于 VPX 总线的工件台运动控制系统研究与开发](#)
18. [PCI Express 流控机制的研究与实现](#)
19. [UART16C554 的设计](#)
20. [基于 VPX 的高性能计算机设计](#)
21. [基于 CAN 总线技术的嵌入式网关设计](#)
22. [Visual C 串行通讯控件使用方法与技巧的研究](#)
23. [IEEE1588 精密时钟同步关键技术研究](#)
24. [GPS 信号发生器射频模块的一种实现方案](#)
25. [基于 CPCI 接口的视频采集卡的设计](#)
26. [基于 VPX 的 3U 信号处理平台的设计](#)
27. [基于 PCI Express 总线 1394b 网络传输系统 WDM 驱动设计](#)
28. [AT89C52 单片机与 ARINC429 航空总线接口设计](#)
29. [基于 CPCI 总线多 DSP 系统的高速主机接口设计](#)
30. [总线协议中的 CRC 及其在 SATA 通信技术中的应用](#)
31. [基于 FPGA 的 SATA 硬盘加解密控制器设计](#)
32. [Modbus 协议在串口通讯中的研究及应用](#)
33. [高可用的磁盘阵列 Cache 的设计和实现](#)
34. [RAID 阵列中高速 Cache 管理的优化](#)

35. [一种新的基于 RAID 的 CACHE 技术研究与实现](#)
36. [基于 PCIE-104 总线的高速数据接口设计](#)
37. [基于 VPX 标准的 RapidIO 交换和 Flash 存储模块设计](#)
38. [北斗卫星系统在海洋工程中的应用](#)
39. [北斗卫星系统在远洋船舶上应用的研究](#)
40. [基于 CPCI 总线的红外实时信号处理系统](#)
41. [硬件实现 RAID 与软件实现 RAID 的比较](#)
42. [基于 PCI Express 总线系统的热插拔设计](#)
43. [基于 RAID5 的磁盘阵列 Cache 的研究与实现](#)
44. [基于 PCI 总线的 MPEG2 码流播放卡驱动程序开发](#)
45. [基于磁盘阵列引擎的 RAID5 小写性能优化](#)
46. [基于 IEEE1588 的时钟同步技术研究](#)
47. [基于 Davinci 平台的 SD 卡读写优化](#)
48. [基于 PCI 总线的图像处理及传输系统的设计](#)
49. [串口和以太网通信技术在油液在线监测系统中的应用](#)
50. [USB30 数据传输协议分析及实现](#)
51. [IEEE 1588 协议在工业以太网中的实现](#)
52. [基于 USB30 的设备自定义请求实现方法](#)
53. [IEEE1588 协议在网络测控系统中的应用](#)
54. [USB30 物理层中弹性缓冲的设计与实现](#)
55. [USB30 的高速信息传输瓶颈研究](#)
56. [基于 IPv6 的 UDP 通信的实现](#)
57. [一种基于 IPv6 的流媒体传送方案研究与实现](#)
58. [基于 IPv4-IPv6 双栈的 MODBUS-TCP 协议实现](#)
59. [RS485CAN 网关设计与实现](#)
60. [MVB 周期信息的实时调度](#)
61. [RS485 和 PROFINET 网关设计](#)
62. [基于 IPv6 的 Socket 通信的实现](#)
63. [MVB 网络重复器的设计](#)
64. [一种新型 MVB 通信板的探究](#)
65. [具有 MVB 接口的输入输出设备的分析](#)
66. [基于 STM32 的 GSM 模块综合应用](#)
67. [基于 ARM7 的 MVB CAN 网关设计](#)
68. [机车车辆的 MVB CAN 总线网关设计](#)
69. [智能变电站冗余网络中 IEEE1588 协议的应用](#)
70. [CAN 总线的浅析 CANopen 协议](#)
71. [基于 CANopen 协议实现多电机系统实时控制](#)
72. [以太网时钟同步协议的研究](#)
73. [基于 CANopen 的列车通信网络实现研究](#)
74. [基于 SJA1000 的 CAN 总线智能控制系统设计](#)
75. [基于 CANopen 的运动控制单元的设计](#)
76. [基于 STM32F107VC 的 IEEE 1588 精密时钟同步分析与实现](#)

77. [分布式控制系统精确时钟同步技术](#)
78. [基于 IEEE 1588 的时钟同步技术在分布式系统中应用](#)
79. [基于 SJA1000 的 CAN 总线通讯模块的实现](#)
80. [嵌入式设备的精确时钟同步技术的研究与实现](#)
81. [基于 SJA1000 的 CAN 网桥设计](#)
82. [基于 CAN 总线分布式温室监控系统的设计与实现](#)

## VxWorks:

1. [基于 VxWorks 的多任务程序设计](#)
2. [基于 VxWorks 的数据采集存储装置设计](#)
3. [Flash 文件系统分析及其在 VxWorks 中的实现](#)
4. [VxWorks 多任务编程中的异常研究](#)
5. [VxWorks 应用技巧两例](#)
6. [一种基于 VxWorks 的飞行仿真实时管理系统](#)
7. [在 VxWorks 系统中使用 TrueType 字库](#)
8. [基于 FreeType 的 VxWorks 中文显示方案](#)
9. [基于 Tilcon 的 VxWorks 简单动画开发](#)
10. [基于 Tilcon 的某武器显控系统界面设计](#)
11. [基于 Tilcon 的综合导航信息处理装置界面设计](#)
12. [VxWorks 的内存配置和管理](#)
13. [基于 VxWorks 系统的 PCI 配置与应用](#)
14. [基于 MPC8270 的 VxWorks BSP 的移植](#)
15. [Bootrom 功能改进经验谈](#)
16. [基于 VxWorks 嵌入式系统的中文平台研究与实现](#)
17. [VxBus 的 A429 接口驱动](#)
18. [基于 VxBus 和 MPC8569E 千兆网驱动开发和实现](#)
19. [一种基于 vxBus 的 PPC 与 FPGA 高速互联的驱动设计方法](#)
20. [基于 VxBus 的设备驱动开发](#)
21. [基于 VxBus 的驱动程序架构分析](#)
22. [基于 VxBus 的高速数据采集卡驱动程序开发](#)
23. [Vxworks 下的冗余 CAN 通讯模块设计](#)
24. [WindML 工业平台下开发 S1d13506 驱动及显示功能的实现](#)
25. [WindML 中 Mesa 的应用](#)
26. [VxWorks 下图形用户界面开发中双缓冲技术应用](#)
27. [VxWorks 上的一种 GUI 系统的设计与实现](#)
28. [VxWorks 环境下 socket 的实现](#)
29. [VxWorks 的 WindML 图形界面程序的框架分析](#)
30. [VxWorks 实时操作系统及其在 PC104 下以太网编程的应用](#)

31. [实时操作系统任务调度策略的研究与设计](#)
32. [军事指挥系统中 VxWorks 下汉字显示技术](#)
33. [基于 VxWorks 实时控制系统中文交互界面开发平台](#)
34. [基于 VxWorks 操作系统的 WindML 图形操控界面实现方法](#)
35. [基于 GPU FPGA 芯片原型的 VxWorks 下驱动软件开发](#)
36. [VxWorks 下的多串口卡设计](#)
37. [VxWorks 内存管理机制的研究](#)
38. [T9 输入法在 Tilcon 下的实现](#)
39. [基于 VxWorks 的 WindML 图形界面开发方法](#)
40. [基于 Tilcon 的 IO 控制板可视化测试软件的设计和实现](#)
41. [基于 VxWorks 的通信服务器实时多任务软件设计](#)
42. [基于 VXWORKS 的 RS485MVB 网关的设计与实现](#)
43. [实时操作系统 VxWorks 在微机保护中的应用](#)
44. [基于 VxWorks 的多任务程序设计及通信管理](#)
45. [基于 Tilcon 的 VxWorks 图形界面开发技术](#)
46. [嵌入式图形系统 Tilcon 及应用研究](#)
47. [基于 VxWorks 的数据采集与重演软件的图形界面的设计与实现](#)
48. [基于嵌入式的 Tilcon 用户图形界面设计与开发](#)
49. [基于 Tilcon 的交互式多页面的设计](#)
50. [基于 Tilcon 的嵌入式系统人机界面开发技术](#)
51. [基于 Tilcon 的指控系统多任务人机交互软件设计](#)
52. [基于 Tilcon 航海标绘台界面设计](#)
53. [基于 Tornado 和 Tilcon 的嵌入式 GIS 图形编辑软件的开发](#)

## Linux:

1. [Linux 程序设计第三版及源代码](#)
2. [NAND FLASH 文件系统的设计与实现](#)
3. [多通道串行通信设备的 Linux 驱动程序实现](#)
4. [Zsh 开发指南-数组](#)
5. [常用 GDB 命令中文速览](#)
6. [嵌入式 C 进阶之道](#)
7. [Linux 串口编程实例](#)
8. [基于 Yocto Project 的嵌入式应用设计](#)
9. [Android 应用的反编译](#)
10. [基于 Android 行为的加密应用系统研究](#)
11. [嵌入式 Linux 系统移植步步通](#)
12. [嵌入式 CC++ 语言精华文章集锦](#)
13. [基于 Linux 的高性能服务器端的设计与研究](#)



14. [S3C6410 移植 Android 内核](#)
15. [Android 开发指南中文版](#)
16. [图解 Linux 操作系统架构设计与实现原理（第二版）](#)
17. [如何在 Ubuntu 和 Linux Mint 下轻松升级 Linux 内核](#)
18. [Android 简单 mp3 播放器源码](#)
19. [嵌入式 Linux 系统实时性的研究](#)
20. [Android 嵌入式系统架构及内核浅析](#)
21. [基于嵌入式 Linux 操作系统内核实时性的改进方法研究](#)
22. [Linux TCP IP 协议详解](#)
23. [Linux 桌面环境下内存去重技术的研究与实现](#)
24. [掌握 Android 7.0 新增特性 Quick Settings](#)
25. [Android 应用逆向分析方法研究](#)
26. [Android 操作系统的课程教学](#)
27. [Android 智能手机操作系统的研究](#)
28. [Android 英文朗读功能的实现](#)
29. [基于 Yocto 订制嵌入式 Linux 发行版](#)
30. [基于嵌入式 Linux 的网络设备驱动设计与实现](#)
31. [如何高效学习嵌入式](#)
32. [基于 Android 平台的 GPS 定位系统的设计与实现](#)
33. [LINUX ARM 下的 USB 驱动开发](#)
34. [Linux 下基于 I2C 协议的 RTC 驱动开发](#)
35. [嵌入式下 Linux 系统设备驱动程序的开发](#)
36. [基于嵌入式 Linux 的 SD 卡驱动程序的设计与实现](#)
37. [Linux 系统中进程调度策略](#)
38. [嵌入式 Linux 实时性方法](#)
39. [基于实时 Linux 计算机联锁系统实时性分析与改进](#)
40. [基于嵌入式 Linux 下的 USB30 驱动程序开发方法研究](#)
41. [Android 手机应用开发之音乐资源播放器](#)
42. [Linux 下以太网的 IPv6 隧道技术的实现](#)
43. [Research and design of mobile learning platform based on Android](#)
44. [基于 linux 和 Qt 的串口通信调试器调的设计及应用](#)
45. [在 Linux 平台上基于 QT 的动态图像采集系统的设计](#)
46. [基于 Android 平台的医护查房系统的研究与设计](#)
47. [基于 Android 平台的软件自动化监控工具的设计开发](#)
48. [基于 Android 的视频软硬解码及渲染的对比研究与实现](#)
49. [基于 Android 移动设备的加速度传感器技术研究](#)
50. [基于 Android 系统振动测试仪研究](#)
51. [基于缓存竞争优化的 Linux 进程调度策略](#)

Windows CE:

1. [Windows CE.NET 下 YAFFS 文件系统 NAND Flash 驱动程序设计](#)
2. [Windows CE 的 CAN 总线驱动程序设计](#)
3. [基于 Windows CE.NET 的 ADC 驱动程序实现与应用的研究](#)
4. [基于 Windows CE.NET 平台的串行通信实现](#)
5. [基于 Windows CE.NET 下的 GPRS 模块的研究与开发](#)
6. [win2k 下 NTFS 分区用 ntldr 加载进 dos 源代码](#)
7. [Windows 下的 USB 设备驱动程序开发](#)
8. [WinCE 的大容量程控数据传输解决方案设计](#)
9. [WinCE6.0 安装开发详解](#)
10. [DOS 下仿 Windows 的自带计算器程序 C 源码](#)
11. [G726 局域网语音通话程序和源代码](#)
12. [WinCE 主板加载第三方驱动程序的方法](#)
13. [WinCE 下的注册表编辑程序和源代码](#)
14. [WinCE 串口通信源代码](#)
15. [WINCE 的 SD 卡程序\[可实现读写的源码\]](#)
16. [基于 WinCE 的 BootLoader 研究](#)
17. [Windows CE 环境下无线网卡的自动安装](#)
18. [基于 Windows CE 的可视电话的研究与实现](#)
19. [基于 WinCE 的嵌入式图像采集系统设计](#)
20. [基于 ARM 与 WinCE 的掌纹鉴别系统](#)
21. [DCOM 协议在网络冗余环境下的应用](#)
22. [Windows XP Embedded 在变电站通信管理机中的应用](#)
23. [XPE 在多功能显控台上的开发与应用](#)
24. [基于 Windows XP Embedded 的 LKJ2000 仿真系统设计与实现](#)
25. [虚拟仪器的 Windows XP Embedded 操作系统开发](#)
26. [基于 EVC 的嵌入式导航电子地图设计](#)
27. [基于 XPEmbedded 的警务区 SMS 指挥平台的设计与实现](#)
28. [基于 XPE 的数字残币兑换工具开发](#)

## PowerPC:

1. [Freescale MPC8536 开发板原理图](#)
2. [基于 MPC8548E 的固件设计](#)
3. [基于 MPC8548E 的嵌入式数据处理系统设计](#)
4. [基于 PowerPC 嵌入式网络通信平台的实现](#)
5. [PowerPC 在车辆显控系统中的应用](#)

6. [基于 PowerPC 的单板计算机的设计](#)
7. [用 PowerPC860 实现 FPGA 配置](#)
8. [基于 MPC8247 嵌入式电力交换系统的设计与实现](#)
9. [基于设备树的 MPC8247 嵌入式 Linux 系统开发](#)
10. [基于 MPC8313E 嵌入式系统 UBoot 的移植](#)
11. [基于 PowerPC 处理器 SMP 系统的 UBoot 移植](#)
12. [基于 PowerPC 双核处理器嵌入式系统 UBoot 移植](#)
13. [基于 PowerPC 的雷达通用处理机设计](#)
14. [PowerPC 平台引导加载程序的移植](#)
15. [基于 PowerPC 嵌入式内核的多串口通信扩展设计](#)
16. [基于 PowerPC 的多网口系统抗干扰设计](#)
17. [基于 MPC860T 与 VxWorks 的图形界面设计](#)
18. [基于 MPC8260 处理器的 PPMC 系统](#)
19. [基于 PowerPC 的控制器研究与设计](#)
20. [基于 PowerPC 的模拟量输入接口扩展](#)
21. [基于 PowerPC 的车载通信系统设计](#)
22. [基于 PowerPC 的嵌入式系统中通用 I/O 口的扩展方法](#)
23. [基于 PowerPC440GP 型微控制器的嵌入式系统设计与研究](#)
24. [基于双 PowerPC 7447A 处理器的嵌入式系统硬件设计](#)
25. [基于 PowerPC603e 通用处理模块的设计与实现](#)
26. [嵌入式微机 MPC555 驻留片内监控器的开发与实现](#)
27. [基于 PowerPC 和 DSP 的电能质量在线监测装置的研制](#)
28. [基于 PowerPC 架构多核处理器嵌入式系统硬件设计](#)
29. [基于 PowerPC 的多屏系统设计](#)
30. [基于 PowerPC 的嵌入式 SMP 系统设计](#)

## ARM:

1. [基于 DiskOnChip 2000 的驱动程序设计及应用](#)
2. [基于 ARM 体系的 PC-104 总线设计](#)
3. [基于 ARM 的嵌入式系统中断处理机制研究](#)
4. [设计 ARM 的中断处理](#)
5. [基于 ARM 的数据采集系统并行总线的驱动设计](#)
6. [S3C2410 下的 TFT LCD 驱动源码](#)
7. [STM32 SD 卡移植 FATFS 文件系统源码](#)
8. [STM32 ADC 多通道源码](#)
9. [ARM Linux 在 EP7312 上的移植](#)
10. [ARM 经典 300 问](#)

11. [基于 S5PV210 的频谱监测设备嵌入式系统设计与实现](#)
12. [Uboot 中 start.S 源码的指令级的详尽解析](#)
13. [基于 ARM9 的嵌入式 Zigbee 网关设计与实现](#)
14. [基于 S3C6410 处理器的嵌入式 Linux 系统移植](#)
15. [CortexA8 平台的  \$\mu\$ C-OS II 及 LwIP 协议栈的移植与实现](#)
16. [基于 ARM 的嵌入式 Linux 无线网卡设备驱动设计](#)
17. [ARM S3C2440 Linux ADC 驱动](#)
18. [ARM S3C2440 Linux 触摸屏驱动](#)
19. [Linux 和 Cortex-A8 的视频处理及数字微波传输系统设计](#)
20. [Nand Flash 启动模式下的 Uboot 移植](#)
21. [基于 ARM 处理器的 UART 设计](#)
22. [ARM CortexM3 处理器故障的分析与处理](#)
23. [ARM 微处理器启动和调试浅析](#)
24. [基于 ARM 系统下映像文件的执行与中断运行机制的实现](#)
25. [中断调用方式的 ARM 二次开发接口设计](#)
26. [ARM11 嵌入式系统 Linux 下 LCD 的驱动设计](#)
27. [Uboot 在 S3C2440 上的移植](#)
28. [基于 ARM11 的嵌入式无线视频终端的设计](#)
29. [基于 S3C6410 的 Uboot 分析与移植](#)
30. [基于 ARM 嵌入式系统的高保真无损音乐播放器设计](#)
31. [UBoot 在 Mini6410 上的移植](#)
32. [基于 ARM11 的嵌入式 Linux NAND FLASH 模拟 U 盘挂载分析与实现](#)
33. [基于 ARM11 的电源完整性分析](#)
34. [基于 ARM S3C6410 的 uboot 分析与移植](#)
35. [基于 S5PC100 移动视频监控终端的设计与实现](#)

## Hardware:

1. [DSP 电源的典型设计](#)
2. [高频脉冲电源设计](#)
3. [电源的综合保护设计](#)
4. [任意波形电源的设计](#)
5. [高速 PCB 信号完整性分析及应用](#)
6. [DM642 高速图像采集系统的电磁干扰设计](#)
7. [使用 COMExpress Nano 工控板实现 IP 调度设备](#)
8. [基于 COM Express 架构的数据记录仪的设计与实现](#)
9. [基于 COM Express 的信号系统逻辑运算单元设计](#)
10. [基于 COM Express 的回波预处理模块设计](#)
11. [基于 X86 平台的简单多任务内核的分析与实现](#)

12. [基于 UEFI Shell 的 PreOS Application 的开发与研究](#)
13. [基于 UEFI 固件的恶意代码防范技术研究](#)
14. [MIPS 架构计算机平台的支持固件研究](#)
15. [基于 UEFI 固件的攻击验证技术研究](#)
16. [基于 UEFI 的 Application 和 Driver 的分析与开发](#)
17. [基于 UEFI 的可信 BIOS 研究与实现](#)
18. [基于 UEFI 的国产计算机平台 BIOS 研究](#)
19. [基于 UEFI 的安全模块设计分析](#)
20. [基于 FPGA Nios II 的等精度频率计设计](#)
21. [基于 FPGA 的 SOPC 设计](#)
22. [基于 SOPC 基本信号产生器的设计与实现](#)
23. [基于龙芯平台的 PMON 研究与开发](#)
24. [基于 X86 平台的嵌入式 BIOS 可配置设计](#)
25. [基于龙芯 2F 架构的 PMON 分析与优化](#)
26. [CPU 与 GPU 之间接口电路的设计与实现](#)
27. [基于龙芯 1A 平台的 PMON 源码编译和启动分析](#)
28. [基于 PC104 工控机的嵌入式直流监控装置的设计](#)
29. [GPGPU 技术研究与发展](#)
30. [GPU 实现的高速 FIR 数字滤波算法](#)
31. [一种基于 CPUGPU 异构计算的混合编程模型](#)
32. [面向 OpenCL 模型的 GPU 性能优化](#)
33. [基于 GPU 的 FDTD 算法](#)
34. [基于 GPU 的瑕疵检测](#)
35. [基于 GPU 通用计算的分析与研究](#)
36. [面向 OpenCL 架构的 GPGPU 量化性能模型](#)
37. [基于 OpenCL 的图像积分图算法优化研究](#)
38. [基于 OpenCL 的均值平移算法在多个众核平台的性能优化研究](#)
39. [基于 OpenCL 的异构系统并行编程](#)
40. [嵌入式系统中热备份双机切换技术研究](#)

## Programming:

1. [计算机软件基础数据结构 - 算法](#)
2. [高级数据结构对算法的优化](#)
3. [零基础学算法](#)
4. [Linux 环境下基于 TCP 的 Socket 编程浅析](#)
5. [Linux 环境下基于 UDP 的 socket 编程浅析](#)
6. [基于 Socket 的网络编程技术及其实现](#)

7. [数据结构考题 - 第 1 章 绪论](#)
8. [数据结构考题 - 第 2 章 线性表](#)
9. [数据结构考题 - 第 2 章 线性表 - 答案](#)
10. [基于小波变换与偏微分方程的图像分解及边缘检测](#)
11. [基于图像能量的布匹瑕疵检测方法](#)
12. [基于 OpenCL 的拉普拉斯图像增强算法优化研究](#)
13. [异构平台上基于 OpenCL 的 FFT 实现与优化](#)
14. [数据结构考题 - 第 4 章 串](#)
15. [数据结构考题 - 第 4 章 串答案](#)
- 16.

## FPGA / CPLD:

1. [一种基于并行处理器的快速车道线检测系统及 FPGA 实现](#)
2. [基于 FPGA 和 DSP 的 DBF 实现](#)
3. [高速浮点运算单元的 FPGA 实现](#)
4. [DLMS 算法的脉动阵结构设计及 FPGA 实现](#)
5. [一种基于 FPGA 的 3DES 加密算法实现](#)
6. [可编程 FIR 滤波器的 FPGA 实现](#)
7. [基于 FPGA 的 AES 加密算法的高速实现](#)
8. [基于 FPGA 的精确时钟同步方法](#)
9. [应用分布式算法在 FPGA 平台实现 FIR 低通滤波器](#)
10. [流水线技术在用 FPGA 实现高速 DSP 运算中的应用](#)
- 11.