

# 基于 DSP+CPLD 的捷联航姿系统设计与实现

宋国安<sup>1</sup>, 曾庆化<sup>1</sup>, 张 斌<sup>2</sup>, 胡倩倩<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 导航研究中心, 江苏 南京 210016;

2. 中航工业宝成航空仪表有限责任公司技术中心, 陕西 宝鸡 721006)

**摘 要:**针对捷联航姿系统高精度、小型化、高可靠性的发展需求,文中研究并实现了基于 DSP+CPLD 导航计算机的光纤航姿参考系统,在导航计算机设计中充分体现了 DSP 处理器实时解算和 CPLD 控制信号的双重优点。系统软件可实现加电 BIT、磁罗差标定、CRC 校验的存储器自检、捷联航姿解算和模糊自适应内阻尼卡尔曼滤波等功能。通过大量的试验验证了硬件的可靠性和算法的有效性。样机实验结果表明基于 DSP 和 CPLD 导航计算机的捷联惯性航姿系统性能稳定,满足系统的精度设计要求。

**关键词:**航姿参考系统;复杂可编程逻辑器件;加电 BIT;惯性

**中图分类号:**TP31

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2012)06-0187-05

## Design and Realization of Strapdown AHRS Based on DSP & CPLD

SONG Guo-an<sup>1</sup>, ZENG Qing-hua<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>, HU Qian-qian<sup>1</sup>

(1. Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shaanxi Baocheng Aviation Instrument Co. Ltd Research and Development Center, Baoji 721006, China)

**Abstract:** For development requirements of high-precision, miniaturization, reliability in the Strapdown AHRS, an optical AHRS based on DSP+CPLD navigation computer was designed and realized. During the design of navigation computer, the dual advantages of the real-time solving function of DSP and signals control of CPLD were considered. Realization of Strapdown AHRS software included following functions, such as power BIT, magnetic compass calibration, CRC memory self-test, AHRS algorithm and Damp Kalman filtering. The Experiments prove that the system hardware is reliable, the software is available. Experiment results showed that the physical prototype of Strapdown AHRS based on DSP and CPLD navigation computer had wonderful performance and it can satisfy the accuracy requirements of required system.

**Key words:** AHRS; complex programmable logic devices; power-BIT; inertial

## 0 引 言

捷联惯性航姿系统是一种自主式、低成本惯性导航系统,主要为外界提供三轴姿态信息,并能直接输出与载体坐标系一致的三轴角速率和线加速度,方便自动驾驶仪和制导系统使用。近年,随着科学技术的高速发展,捷联航姿系统朝着小型化、高精度、实时性和高可靠性方向发展<sup>[1,2]</sup>。导航计算机是航姿系统<sup>[3,4]</sup>进行数据处理和解算的核心,目前导航计算机相继出现采用基于 PC104<sup>[5]</sup>、DSP+MCU<sup>[6]</sup>等平台的系统。

目前,国内外的高校和研究所正利用不同的形式,将导航计算机与惯性测量单元结合,构建高性能、低成

本的航姿系统。由于基于 PC104 器件的系统体积和功耗相对较大,为此通常采用 DSP 作为核心计算单元。比如:在 DSP+MCU 组合的双 CPU 系统<sup>[7]</sup>,DSP (Digital Signal Processor 数字信号处理器)主要负责航姿计算,MCU 负责数据的采集和其他输入输出功能等。由于 MCU 速度较慢,系统稳定性和可靠性需要进一步提高。

为此,文中引入 CPLD 负责控制信号的整合<sup>[8]</sup>,并实现了基于 DSP+CPLD (Complex Programmable Logic Device 复杂可编程逻辑器件)的导航计算机<sup>[9]</sup>,并将其成功应用到捷联航姿系统样机中,该应用适应了高精度、低功耗、低成本导航计算机及其航姿系统的发展方向。

## 1 DSP+CPLD 的航姿计算机设计分析

导航系统对信息的实时性和精确性要求很高,为使系统快速精确地运算,系统选用 TI 公司的

收稿日期:2011-11-07;修回日期:2012-02-11

基金项目:国家自然科学基金(60904091,61104188,91016019);南京航空航天大学基本科研专项(NS2010084,NP2011049)

作者简介:宋国安(1986-),男,硕士,从事基于 DSP 的惯性导航和组合导航系统研究;曾庆化,副教授,硕士生导师,从事惯性、视觉、卫星组合导航等方面的研究。

TMS320C6713 浮点型 DSP, 主频 200MHz。CPLD 是控制时序控制导航计算机接口的重要芯片, 需要较强的稳定性和抗干扰性, 经分析对比选用 XILINX 公司的 XC95144XL 型号的 CPLD, 该 CPLD 具有 36~288 个宏单元, 800~6400 个等效门, 封装引脚 44~352 个, 其输入脚到输出脚的最大延迟时间 (简称  $t_{PD}$ ) 最快可达 4ns, 相应的计数器频率 ( $f_{CNT}$ ) 可达 200MHz, 能够满足有丰富接口要求硬件系统的协调工作。

针对航姿系统丰富的接口、大容量数据和程序存储的需求, 在 DSP+CPLD 架构基础上, 设计实现了串口通信模块、ARINC429 通信模块和数据存储模块。

串口通信模块选用 PHILIPS 公司的 8 通道全双工 UART 实现异步串口扩展, 利用 DSP 外部扩展的通用异步收发器 (SC28L198) 完成数据的缓存及采样, 实现了 4 路 RS232 和 2 路 RS422。

ARINC429 通信模块采用 Device Engineering 公司的 DEI1016 及 BD429 芯片, 设计了 4 路接收、2 路发送通道, 并用 CPLD 控制串口通信与 ARINC429 通信模块的读写操作。

系统实现的数据存储模块主要包括 EEPROM、FLASH、SRAM 模块, 并利用 DSP 的外部存储器接口 EMIF (External Memory Interface) 控制 DSP 与外部存储器之间的所有数据传输。

由于航姿系统需要提供自主的姿态和航向信息, 因此必须配备惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, 简称 IMU) 和磁传感器, 考虑到用于罗差标定和故障检测的计算机接口部分, 航姿系统的结构简图如图 1 所示。

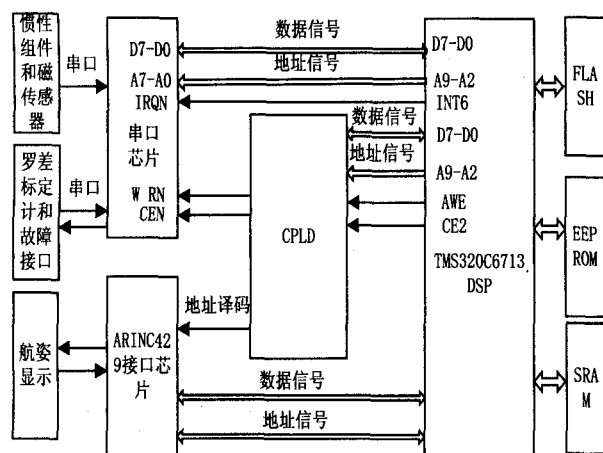


图 1 导航计算机及航姿系统结构简图

## 2 捷联航姿系统整体 1 软件设计

为了满足系统的实时性要求, 需要借助 IMU 数据实现解算周期为 10ms 的系统软件, 实现数据获取、航姿解算和罗差标定或故障操作三大功能 (流程图见图 2), 包括加电 BIT (built-in-test)、惯性测量单元及其接收和预处理、初始对准、航姿解算、在线 BIT 和故障监控、磁罗差在线标定以及航姿角 429 口输出等模块。其中加电 BIT、磁罗差在线标定及其故障操作、磁航向快慢协、航姿解算功能等是本系统工程实现的重要技术内容。

### 2.1 加电 BIT 关键技术

为了提高航姿系统的可靠性和安全性, 系统需要设计加电 BIT 功能, 实现导航计算机自身的 EEPROM、FLASH 自检, 以及 SRAM 功能和 CPU 指令自检。

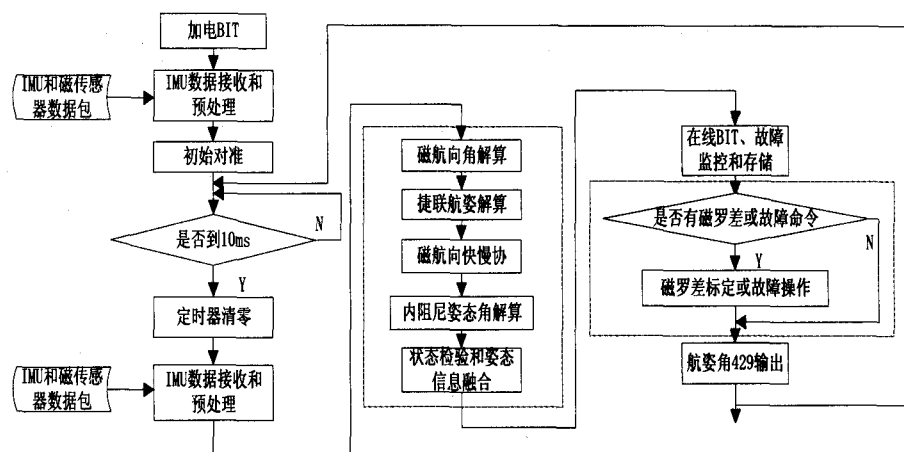


图 2 捷联航姿系统软件流程图

根据 EEPROM 和 FLASH 在断电时可保存其中数据不变的特性, 可存储前次的校验数据, 以便下次系统上电使用。通过校验存储数据的变化情况, 判断存储器的故障情况。在校验过程中采用高可靠的 CRC 校验 (循环冗余校验码) 形式校验数据。系统上电后, 若设置的 EEPROM、FLASH 循环冗余校验码与 CRC 校验法求解得到的循环冗余校验码相等, 则认为 EEPROM、FLASH 自检正常, 否则认为 EEPROM、FLASH 自检有问题。

SRAM 属于掉电易失型存储器, 无法通过保留航姿系统前次运行数据进行 CRC 校验, 为此, 采用实时读写 SRAM 的方法, 比对读出数据与写入数据的一致性, 判断 SRAM 的故障情况。针对 CPU 指令自检问题, 可以采用预制的数据与当前运算结果进行对比, 并根据运算结果与预制数据的对比结果判断 CPU 运算指令正常与否。

### 2.2 磁罗差在线标定和故障操作功能

磁航向传感器的罗差修正补偿算法是航姿系统软件中非常重要的一个环节。系统要求磁航向修正算法

具有较高的灵活性和实时性。由于机载磁环境的恶劣程度各异、标定时间和测试位置的限制条件不同,所以磁航向修正算法必须能够适应各种环境条件,并具备良好的实时性。为此,系统选用磁罗差五参数修正法,修正法如下所示:

$$\Delta\psi_c = A + B\sin\psi_m + C\cos\psi_m + D\sin(2\psi_m) + E\cos(2\psi_m)$$

其中:  $A$  表示圆周罗差,由软铁磁场产生;  $B\sin\psi_m + C\cos\psi_m$  表示半圆罗差,由硬铁磁场产生;  $D\sin 2\psi_m + E\cos 2\psi_m$  表示象限罗差,由软铁磁场产生。

为了方便在线标定磁罗差参数,专门设计了一个磁罗差标定接口和一套磁罗差标定接口交互流程,在接口交互过程中,磁罗差标定计算机主动发送命令,航姿系统根据磁罗差接口命令进行相应的响应。

为了提高航姿系统的可维护性和可靠性,专门设计了故障存储以及故障状态读取功能。航姿系统正常工作运行,每隔 15 分钟检查陀螺、加速度计、磁传感器、电源和中断等状态,并将故障状态字和故障时间点存储到指定的 EEPROM 存储空间中,当飞机回到地面状态时,可通过 422 串口读取 EEPROM 中的故障信息,并根据要求对故障进行清零。

### 2.3 磁航向快慢协修正方法

航向角是航姿系统必不可少的重要信息,磁航向虽然可以精确测试瞬时航向角,且不会有累积误差效应,但其稳定性和抗干扰性欠佳。惯性航姿的航向角能够稳定地反映航向角的变化,但其精度受陀螺精度影响,同时误差会随时间积累,无法满足系统精度要求。为此,需要利用磁航向根据实际情况,对惯性捷联航向角进行快协和慢协修正,从而达到将磁航向与捷联航向信息进行融合和互补的效果。磁航向角的快慢协的基本原则如下:

**磁航向快协原则:**当磁航向与捷联航向差值大于角度  $A$  度时,并且差值在  $A$  度以上达到一定的时间,则采用  $a$  度/秒的速度修正捷联航向角,并且一直将捷联航向与磁航向差值修正到小于  $B$  度以内为止。

**磁航向慢协原则:**当磁航向与捷联航向差值小于  $A$  度时,采用  $b$  度/秒的速度修正捷联航向角,并且

一直将捷联航向与磁航向差值修正到小于  $B$  度以内为止。

其中  $A$  和  $B$  是捷联航姿系统快修和慢修的阈值,  $a$  和  $b$  分别是捷联航姿系统快修和慢修的速率,均需要根据航姿系统的性能及其需求确定。

### 2.4 航姿解算功能

航姿解算过程是由磁航向解算、捷联航姿解算、磁航向快慢协、内阻尼姿态解算、飞行状态检验和姿态信息融合五大内容组成<sup>[10]</sup>。

内阻尼姿态角解算、状态检验和姿态信息融合是航姿解算的关键技术。为了提高捷联航姿系统的精度,系统采用南航导航研究中心的内阻尼卡尔曼滤波融合和内阻尼姿态估计求解算法<sup>[11]</sup>,包含:采用内阻尼姿态估计算法估计姿态信息、检测飞机的飞行状态是否处于匀速/平稳状态,对符合内阻尼卡尔曼滤波融合条件的数据进行信息融合提高捷联航姿的精度。

## 3 航姿系统实验结果分析

在基于 DSP+CPLD 的导航计算机上实现上述捷联航姿软件功能,结合六自由度 IMU(含三个单轴光纤陀螺和三轴挠性加速度计)、磁传感器和航姿显示仪表,实现了小型捷联航姿系统,如图 3 所示。为了考核小型捷联航姿系统的性能,需要对其进行全面的动静态测试。

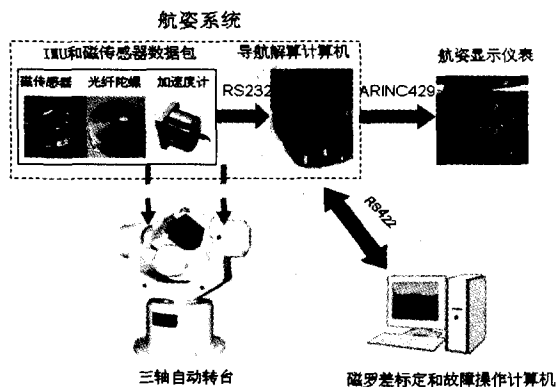


图 3 小型捷联航姿系统示意图

### 3.1 静态实验

为了测定捷联航姿系统的静态漂移,即航向角、俯

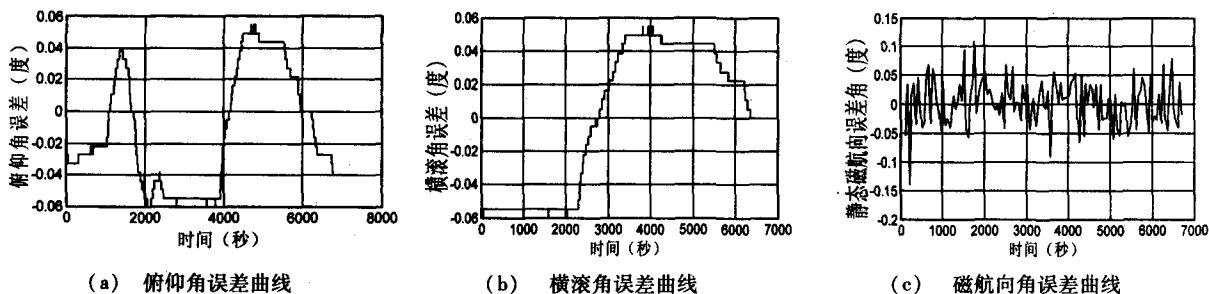


图 4 航姿系统静态实验测试结果

仰角、横滚角的静态测量误差,需要进行长时间静止放置的水平静态实验和专门测试不同航姿角度的航姿角定位实验。

从其中一组 110 分钟的水平静态试验结果(见图 4)可知,捷联惯性航姿系统的长时间稳定性较好,能够在将近 2 个小时的情况下,达到水平姿态角度小于 0.1 度,航向角度小于 0.2 度的精度。

航姿角定位实验使航姿系统经历了丰富的姿态变化,其中横滚角度范围是 $-180 \sim 180$ 度,俯仰角度范围是 $-90 \sim 90$ 度,航向角度范围是 $0 \sim 360$ 度。在航姿角定位实验测试中准确地记录各个姿态角的误差情况,其中一组的测试曲线如图 5 所示:

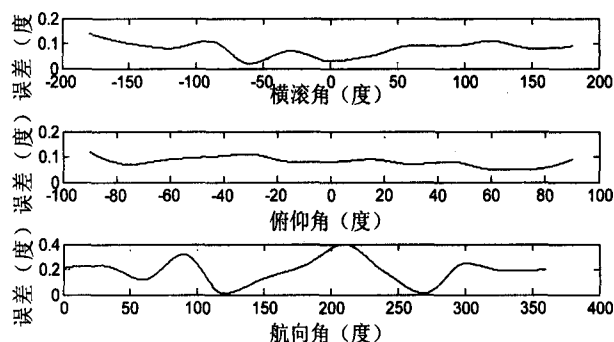


图 5 航姿角定位实验测试结果

经过多次水平静态试验和航姿角定位实验可知:捷联航姿系统的横滚角精度达到 0.2 度、俯仰角精度达到 0.1 度、航向角精度达到 0.4 度,满足了系统设计要求。

### 3.2 三轴电动转台动态实验

三轴电动转台实验主要是为了测试航姿系统的动态性能,包括航姿系统的跟踪性能和动态精度情况。文中的航姿系统样机主要做了三种类型的电动转台动态实验,分别是:

- 航姿系统沿横滚角方向以 10 度的幅度、0.1Hz 的频率做摇摆运动;
- 航姿系统沿俯仰角方向以 10 度的幅度、0.1Hz 的频率做摇摆运动;
- 航姿系统沿俯仰角方向以 40 度/秒的角速率做圆周运动。

为了清晰显示三个动态试验结果,将三个动态试验记录的航姿输出曲线和误差曲线分别绘制在图 6 中。经过多次试验测试可知捷联航姿系统能跟踪三轴电动转台的运动,其系统的横滚角精度达到 0.2 度,俯仰角精度达到 0.15 度,满足系统的动态性能要求。

## 4 结束语

文中的小型捷联惯性航姿系统利用自行研发的基于 CPLD+DSP 专用航姿计算机<sup>[12]</sup>,摆脱了通用计算机

平台的体积、功耗和成本限制。根据设计要求实现了基于 CPLD+DSP 导航计算机及其系统软件,并实现了系统所要求的多种重要功能,如磁罗差标定功能、磁航向快慢协和加电 BIT 等。

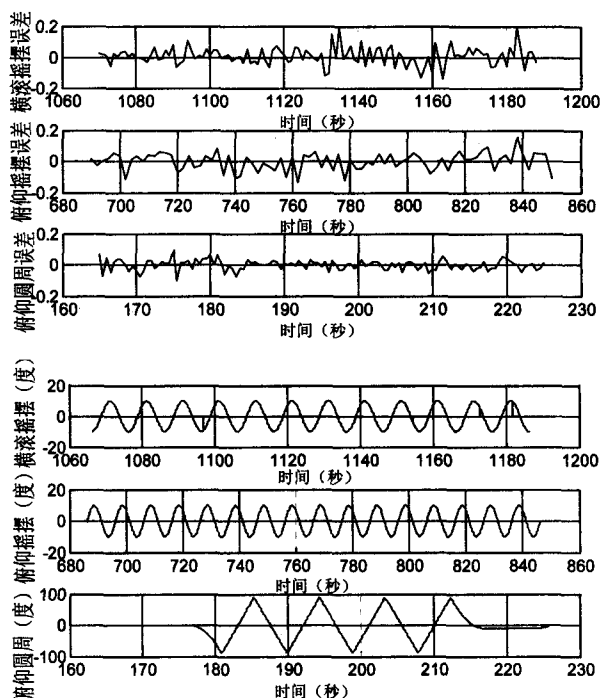


图 6 航姿系统三轴电动转台实验测试结果

针对航姿系统大量动静态实验结果表明,在降低系统的功耗和体积的情况下,基于 CPLD+DSP 导航计算机的小型捷联惯性航姿系统精度和实时性达到设计要求。目前,该系统样机已完成高低温、震动等实验,对工程系统的小型化应用具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] Yoo T S, Hong S K, Yoon H M, et al. Gain-scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System[J]. Sensors, 2011, 11(4): 3816-3830.
- [2] 王子剑, 孔 峰. 基于 DSP 的数字电子负载控制器设计[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(2): 241-244.
- [3] 王玲玲, 富 立, 陈 三. 基于低成本 IMU 的捷联航姿系统软件设计与实现[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(4): 32-36.
- [4] 杜继永, 黄国荣, 张凤鸣, 等. 基于低成本 MEMS 器件的捷联航姿系统设计[J]. 传感技术学报, 2010, 23(11): 1662-1666.
- [5] 翟建秦. 基于 DSP 的小型捷联航姿系统的设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [6] 高延滨, 蒋智勇. 基于 DSP+MCU 的小型捷联惯性导航计算机系统[J]. 应用科技, 2008, 35(4): 34-37.
- [7] 刘黎黎, 马文丽, 姚文娟, 等. 基于 ARM 和 DSP 的嵌入式

(下转第 194 页)

(3) 用户角色指派: 配置用户所拥有的角色集合。

(4) 角色权限指派: 配置角色所拥有的权限集合。

基于 RBAC 的权限管理采用 C# 语言开发, 运行界面如图 4 所示。

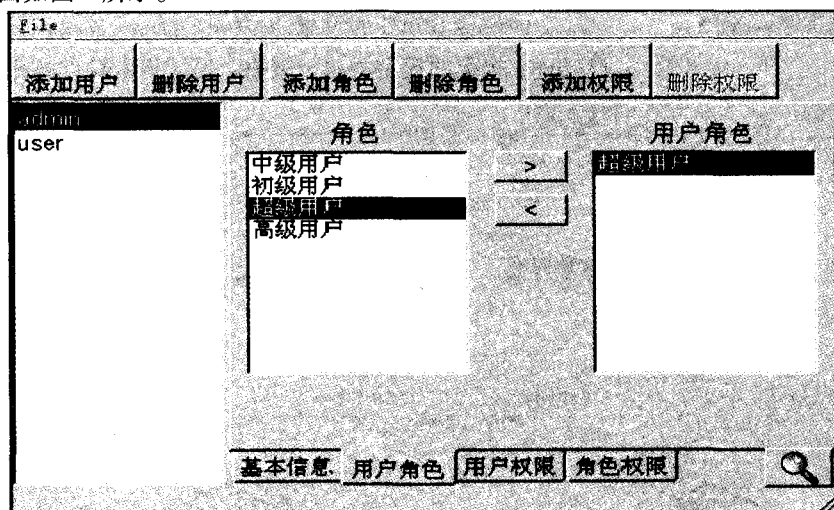


图 4 基于 RBAC 的权限管理运行界面

## 4 结束语

与 FTP 相比, 基于网络硬盘的跨平台文件共享系统没有连接数的限制, 实现了“一块空间, 资源互见”的应用需求。用户可将服务器看作自己的移动硬盘, 只需登录到服务器即可获取所需要的数据, 并保持数据的同步更新。在当前内网高速度、高覆盖率的前提下, 基于网络硬盘的文件共享系统可以使用户方便地存取数据资料, 而且稳定、安全的服务器网络环境也为用户带来了比以往传统的存储方式更好的数据携带手段。

### 参考文献:

- [1] 赵海坤. 建立一个气象卫星资料共享系统[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(2): 44-45.
- [2] 陈 晴. 基于 GIS 的面雨量气象业务的研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.

- [3] 孙利华, 吴焕萍, 郑金伟, 等. 基于 Flex 的气象信息网络发布平台设计与实现[J]. 应用气象学报, 2010, 21(6): 755-756.

- [4] 于张红. 校园网“网络硬盘”服务系统的设计与实现[D].

北京: 北京工业大学, 2009.

- [5] 李绪福. 多目录文件同步系统的研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.

- [6] 李 贞. 基于 Rsync 算法的远程文件同步系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.

- [7] 李 征, 张栋梁. 一种基于 rsync 的改进文件同步算法[J]. 通信市场, 2009(5): 78-79.

- [8] 汤晓迪, 马晓旭, 宁 静, 等. 远程文件差异同步系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(20): 4389-4392.

- [9] 林 磊, 骆建彬, 邓 宪, 等. 管理信息系统中基于角色的权限控制[J]. 计算机应用研究, 2002(6): 82-84.

- [10] 刘宏波, 罗 锐, 王永斌. 一种采用 RBAC 模型的权限体系设计[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(9): 154-155.

- [11] 李 仲, 杨宗凯, 刘 威. 一种基于 RBAC 的实现动态权限管理的方法[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(10): 1-3.

- [12] Zang Cheng, Huang Zhongdong, Chen Gang, et al. A State-transfer-based Dynamic Policy Approach for Constraints in RBAC[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3739: 755-760.

- [13] Zhao Chen, Nuermaimaiti Heilili, Liu Shengping. Representation and Reasoning on RBAC: A Description Logic Approach[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3722: 381-393.

- [14] Nabhen R, Jamhour E, Maziero C. A Policy-based Framework for RBAC[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2867: 407-416.

- [15] 王 婧, 吴伟明. 基于 RBAC 的网络文件服务系统设计与实现[J]. 微计算机应用, 2010, 31(2): 19-20.

(上接第 190 页)

- ICE 芯片扫描分析系统[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(8): 28-33.

- [8] 李玉寰. 基于 DSP 的航向与姿态信息系统设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.

- [9] 何 林, 孟宪翠, 董 砚, 等. 基于 DSP 和 CPLD 的运动控制器简化设计与应用[J]. 自动化与仪表, 2011(1): 35-39.

- [10] 许国威, 马胜前, 危淑平. 自适应滤波 RLS 算法研究与 DSP 实现[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(10): 35-38.

- [11] 刘建业, 杜亚玲, 祝燕华, 等. 航姿系统内阻尼的模糊自适应滤波算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(2): 137-142.

- [12] 孙明媚, 张代远. 车辆导航系统高速检索技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(11): 193-196.