

# 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的数字化 UPS 设计与实现<sup>①</sup>

杨金辉<sup>1</sup> 洪天宇<sup>2</sup> 戴瑜兴<sup>1</sup> (1.湖南大学 电气与信息工程学院 湖南 长沙 410082;

2.斯伦贝谢中国公司 北京 100015)

**摘要:** 针对数字化 UPS, 给出了系统总体设计框图, 为提高系统控制程序的实时性, 提出一种基于实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的嵌入式 UPS 系统控制方案。通过对 UPS 控制系统结构与功能的分析, 实现了  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  在 TMS320LF2407A 上的移植, 对 UPS 系统控制项目以任务的形式进行设计并实现调度, 给出了部分参数设定和主程序清单。实验结果证明, 本文的设计有效的增强了系统控制软件的模块性、实时性, 提高了系统运行的可靠性与稳定性。

**关键词:** UPS; 系统控制;  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

## Digital UPS Design and Realization Based on $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

YANG Jin-Hui<sup>1</sup>, HONG Tian-Yu<sup>2</sup>, DAI Yu-Xing<sup>1</sup>

(1.College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.Schlumberger Group, Beijing 100015, China)

**Abstract:** For the digital uninterruptible power system (UPS), an embedded system control plan based on  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  is given to improve its timeliness. Through analysis of the control system's structure and functions, the UPS system control projects are designed as duties to be dispatched by transplanting  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  on TMS320LF2407A. Some parameters and the main software list are given. The practice proves that the design in this paper improved the control system's reliability and stability effectively.

**Keywords:** UPS; system control;  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

## 1 引言

随着信息技术的发展, 不间断应急电源(UPS)向着数字化、智能化、网络化、大容量多机冗余化和绿色化的方向发展。高性能专用 DSP 芯片为 UPS 的数字化提供了良好的硬件基础, 而嵌入式实时软件操作系统是数字化产品的核心<sup>[1]</sup>。

针对数字化 UPS, 本文给出了一种基于实时多任务操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的系统控制设计。设计采用  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  为内核, 实现其在 TMS320LF2407A 上的移植, 通过对 UPS 控制系统结构与功能的分析, 各部分控制功能划分为不同优先级的任务来调度实现, 给出了部分参数设定和主程序清单。实践证明, 基

于  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的数字化 UPS 系统提高了控制系统的实时性以及系统运行的可靠性及稳定性。

## 2 数字化UPS控制系统结构

TMS320LF2407A 是 TI 推出的专门针对工业控制领域的 16 位高性能微控制器, 其运算速度快、片内资源丰富, 能够很好的满足数字化 UPS 电源控制系统功能的需要<sup>[2]</sup>。数字化 UPS 系统总体设计框图如图 1 所示, 虚线框内为主控制模块, 按功能划分为 A/D 转换、PWM(Pulse Wide Modulate)逆变控制、锁相控制、保护控制、键盘及液晶显示、通信接口、实时时钟等功能模块。

① 基金项目:住房和城乡建设部科学技术研究开发项目(008-K6-22)

收稿时间:2010-02-03;收到修改稿时间:2010-03-26

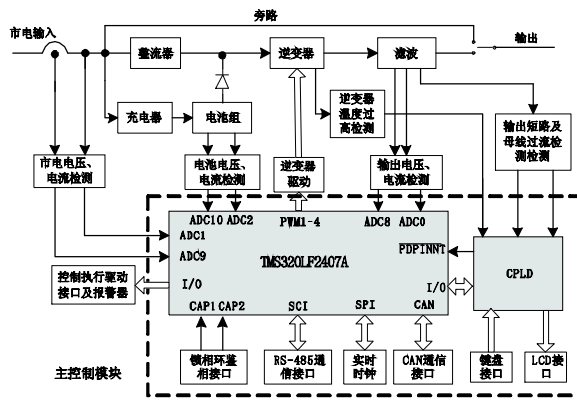


图 1 数字化 UPS 系统总体框图

(1)A/D 转换：完成对市电输入的交流电压、电流信号、逆变输出的交流电压、电流信号、电池电压和电流信号的采样，是系统数字化控制实现以及 UPS 远程监控功能的基础。根据 LF2407A A/D 转换电平要求，被采样信号必须通过信号检测模块变换为 0~3V 直流电平。为提高系统性能，对输入/输出电压、电流进行瞬时值采样，采样频率为 10kHz。

(2) PWM 逆变控制：PWM 逆变控制算法是 UPS 系统控制的核心算法，它决定了 UPS 系统输出性能。逆变算法利用 LF2407A 强大的数值运算性能以及高速计算能力实时在线计算出 PWM 信号脉宽，然后由 A 事件管理模块(EVA)的全比较单元输出 4 路带死区控制的 PWM 信号(PWM1~4)，这 4 路 PWM 信号经隔离驱动模块驱动逆变器。

(3) 锁相控制接口：利用 LF2407A 的事件捕获端口 CAP1 和 CAP2，将市电输入和逆变输出经降压及波形变换后送入 CAP1 和 CAP2，由 LF2407A 通过软件锁相环算法实现逆变输出电压与市电电压的同频同相。

(4) 通信接口：为实现对 UPS 的实时监控功能，主机需对 UPS 电源的各模拟参量采样数据及表示工作状态的开关量数据进行实时高速采集。利用 LF2407A 的 SCI 异步通讯接口，采用 RS-485 物理标准协议，实现 UPS 与主机的远程通讯，以便对 UPS 设备状态、各项参数及故障信息进行查询。

(5) 键盘操作及液晶显示：提供人机对话平台，用户通过键盘操作可设置运行模式、设备通信地址等信息；液晶显示屏以图文方式显示工作状态和参数信息，提供可视化菜单。

(6) 实时时钟：利用串行外设接口 SPI 实现与 LF2407A 控制器的通信，为整个系统提供统一、标准的时钟基准，另外，利用时钟芯片的存储器来存储系统掉电保护参数。

### 3 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在LF2407A上的移植

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的硬件和软件体系结构如图 2 所示。

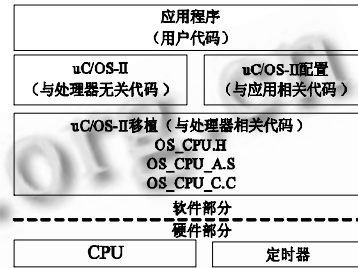


图 2  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的硬件和软件体系结构图

要使  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  正常运行，LF2407A 满足以下要求：处理器的 C 编译器能产生可重入代码，支持可扩展和可链接汇编语言模块；用 C 语言就可打开和关闭中断；处理器支持中断，并能产生定时中断；处理器有将堆栈指针以及其他 CPU 寄存器的内容读出、并存储到堆栈或内存中去的指令[3,4]。

由于  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  是源码公开的操作系统，且其结构化设计便于把与处理器相关的部分分离出来，因此  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  在 LF2407A 处理器上移植的主要工作是修改与处理器相关部分的代码。由图 2 可以看出，它们主要集中在三个文件中：头文件 OS\_CPU.H、C 文件 OS\_CPU\_C.C、汇编文件 OS\_CPU\_A.ASM。

(1) 修改 OS\_CPU.H：其中包含两部分的代码，数据类型定义代码和与处理器相关的代码。LF2407A 的堆栈数据类型定义为：`typedef unsigned int OS_STK`；所有的堆栈用 OS\_STK 声明，地址由高向低递减，OS\_STK\_GROWTH 设置为 1。

OS\_CPU.H 剩下部分是移植必须定义底层函数的声明，为使底层接口函数与处理器状态无关，同时使任务调用相应的函数不需知道函数位置，采用软中断指令 SWI 作为底层接口，使用不同的功能号来区分各函数。其定义格式如下：

```
__swi (0x00) void OS_TASK_SW(void); //任务切换函数
```

其中，swi 为软中断标志，0x00 是分配的中断号，

OS\_TASK\_SW 是函数名，两个 void 分别表示返回类型和参数类型。其它的底层函数接口定义与此相似。

(2)修改 OS\_CPU\_C.C: 初始化任务堆栈函数和软中断函数的实现。修改 OSTaskStkInit()函数,代码如下:

```
OS_STK *OSTaskStkInit (void (*task)(void *pd), void *pdata, OS_STK *ptos, INT16U opt)
{ 模拟带参数(pdata)的函数调用; 定义任务堆栈; 使用满栈递减方式初始化任务堆栈结构; 返回堆栈结构; }
```

软中断函数的实现:

```
void SWI_Exception(int SWI_Num, int *Regs)
{ /*根据不同 Num 值(功能号)跳转到不同的底层服务函数地址, 如: */ case 0x00: 任务切换函数 OS_TASK_SW; }
```

(3)修改 OS\_CPU\_A.S:包括 4 个简单的汇编语言函数: OSStartHighRdy(): 使就绪态任务中优先级最高的任务开始运行; OSCtxSw(): 实现任务级的任务切换功能; OSIntCtxSw(): 在中断级实现任务间的切换; OSTickISR(): 时钟节拍中断服务子程序。

### 4 数字化UPS任务设计及调度

控制软件主程序流程图如图 3 所示。通过对 UPS 控制系统结构与功能的分析, 各部分控制功能划分为不同优先级的任务, 由  $\mu C/OS-II$  实时内核进行调度, 实现多任务并行执行。

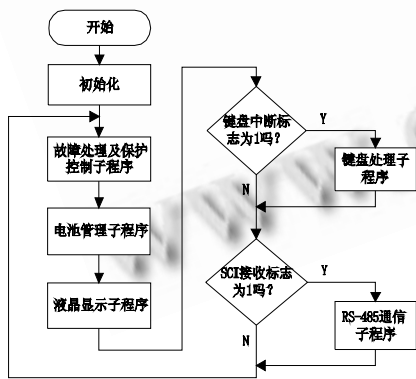


图 3 主程序流程图

(1)数字化 UPS 任务设计: 如表 1 所示, 采用层次化、模块化的设计思想, 根据各个任务的重要性和实时性, 把用户程序分成 9 个不同优先级的任务, 包括数据采集及 PWM 波计算、锁相同步、通信处理、

系统参数计算、系统状态检测及处理、键盘扫描、键盘处理、液晶显示、空闲任务。任务越重要, 实时性越强, 任务优先级越高。空闲任务不执行任何功能, 一直处于就绪状态, 只有其他任务空闲时才执行。

表 1 数字化 UPS 任务功能及其描述

任务号	任务功能	内 容	实时要求	优先级
1	数据采集及 PWM 波计算	数据采集、实时在线计算 PWM 信号脉宽	最高	3
2	锁相同步	锁相环算法实现逆变输出电压与市电电压同频同相	很高	4
3	通信处理	上位机通信、实时远程监控	较高	5
4	系统参数计算	计算系统参数	高	6
5	系统状态检测处理	温度、EEPROM 读写错误、CPU 状态检测等	高	7
6	键盘扫描	定时扫描是否有键按下, 且有防抖功能	低	8
7	键盘处理	设置运行模式、设备通信地址、波特率等信息	低	9
8	液晶显示	显示工作状态、参数信息等	低	10
9	空闲任务	空闲等待	最低	15

(2)  $\mu C/OS-II$  任务调度: 完成任务在运行态、就绪态、挂起态、休眠态以及中断态之间的转换, 是实时多任务操作系统运作的核心功能, 流程如图 4 所示。 $\mu C/OS-II$  的任务调度是基于优先级的抢占式调度算法, 系统共有 9 个任务和 3 个中断。系统在任务控制块(OS\_TCB)中分配一个字(OSTCBPrio)来表示每个任务的优先级, 数值越小优先级越高。当发生任务调度时, 系统通过任务就绪表查找到优先级最高的任务后, 调用函数 OS\_TASK\_SW()完成任务切换。

(3) 数字化 UPS 中断: 设计 3 个硬件中断, 一个是 AD 采样中断, 优先级最高, 采用自适应频率方式每周期采样 32 个点; 另一个是系统时钟节拍中断, 优先级次之, 每 10ms 中断一次作为系统时钟; 最后是通信中断, 优先级低, 当接收到外部数据时, 便发生中断并对接收的数据进行处理。

(4)任务间通信与同步: 采用访问共享数据资源的方式实现多任务间的通信, 采用信号量进行任务间的同步。为实现任务间的同步, 本软件系统建立了 3 个信号量:

数据计算信号量 OSPWMCntSem, 用于任务 1

和数据采集 PWM 波计算子程序通信。每完成一次中断采样便发出这个信号量,告诉任务 1 对采集数据和 PWM 波进行计算处理。

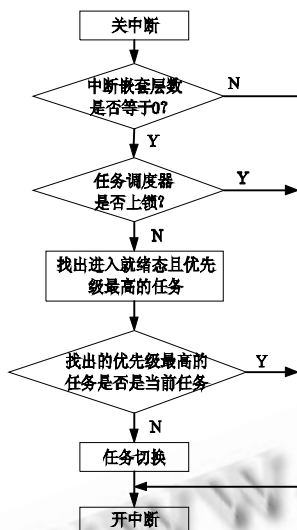


图 4 任务调度流程图

通信信号量  $OSComSem$ , 用于任务 3 和通信中断子程序进行通信。一旦接收到上位机发过来的信号, 中断子程序就发出这个信号量, 告诉任务 4 对接收数据进行处理。

键盘信号量  $OSKeySem$ , 用于任务 6 和任务 7 通信, 一旦扫描到有键按下则发出该信号量告诉任务 7 做键盘处理。

(5)  $\mu C/OS-II$  主程序框架: 调用任何服务之前,  $\mu C/OS-II$  要求首先调用系统函数  $OSInit()$  初始化所有变量和数据结构, 同时建立一个空闲任务。多任务的启动通过  $OSStart()$  实现, 但启动前至少需建立一个应用任务。当调用  $OSStart()$  时,  $OSStart()$  从任务就绪表中找出用户建立的优先级最高任务的任務控制块, 然后调用任务启动函数, 接下来就完全交给实时操作系统来管理, 实时内核不断地对任务进行切换调度, 管理各个应用任务和系统资源。系统主程序清单如下:

```
void main(void)
{ OSInit(); //初始化  $\mu C/OS-II$ 、处理器和硬件;
  OSTaskCreate(PWMCountTask, 0, (void*)0,
  PWMCountTaskStk[100], 3);
  OSTaskCreate(PhaseLockTask, 0, (void*)0,
  PhaseLockTaskStk[100], 4);
```

```
OSTaskCreate(CommunicationTask, 0, (void*)0,
CommuTaskStk[100], 5);
```

```
OSTaskCreate(ParaCountTask, 0, (void*)0,
ParaCountTaskStk[100], 6);
```

```
OSTaskCreate(SystemCheckTask, 0, (void*)0,
SystemCheckTaskStk[100], 7);
```

```
OSTaskCreate(KeyboardScanTask, 0, (void*)0,
KeyboardScanTaskStk[100], 8);
```

```
OSTaskCreate(KeyboardTask, 0, (void*)0,
KeyboardTaskStk[100], 9);
```

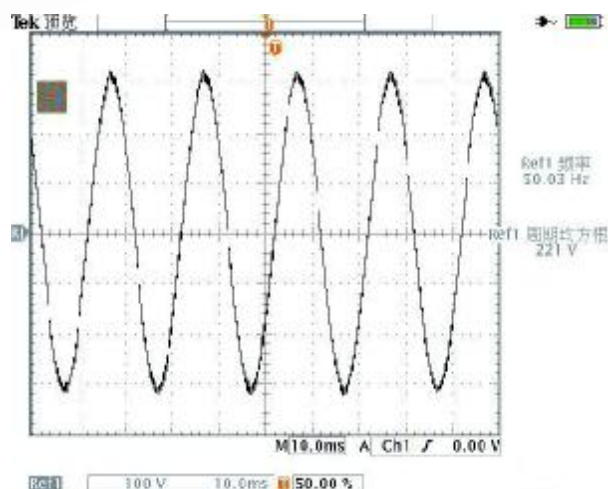
```
OSTaskCreate(LcdDispTask, 0, (void*)0,
LcdDispTaskStk[100], 10); //分别产生表 1 中各任务;
```

```
OSStart(); return (0); //产生信号量与邮箱; 开始运行; }
```

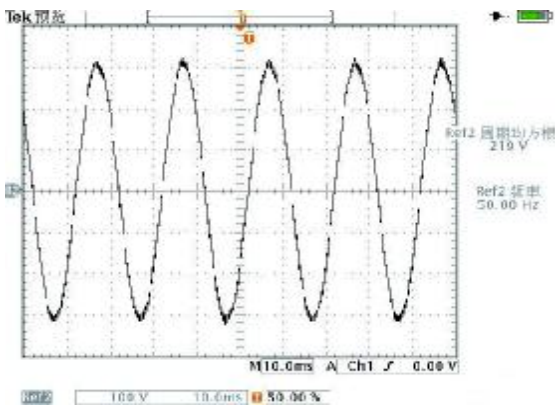
## 5 实验结果

根据前述控制系统设计, 成功研制了一台 3.75KVAUPS 样机。以下为该样机实时性、可靠性、稳定性测试运行情况, 测试设备与仪表包括: 泰克 TDS3043B 数字示波器、Gad-2016 失真度测试仪、FLUKE189 数字万用表、FLUKE36 钳型电流表、红外线温度计、负载三相 3KW 灯泡(约 3.75KW 炉丝)。

(1) 市电输入 380V, 负载变化: 输出相电压稳定度  $220V \pm 1\%$ , U 相频率稳定度  $50Hz \pm 0.4\%$ , 波形失真度  $< 2\%$ , 其他两相与 U 相基本相同, 任何两相相位差  $120^\circ \pm 1^\circ$ 。图 5 为空载与满载逆变输出波形。



(a) 空载



(b) 满载

图5 U相输出逆变电压波形

(2)市电逆变互切, 切换时间及可靠性测试: 市电输入 384V, 电池电压 490V, 3.75KW 额定负载运行, 市电断电或按下“强起”按钮, 逆变器带负载正常启动, 启动时间约 60ms。市电、逆变切换时间经多次反复试验, 均小于 120ms。图 6 所示为市电到逆变的切换波形, 切换时间约 60ms, 图中波形经检测变压器隔离降压; 市电来电, 逆变器立即停止工作。

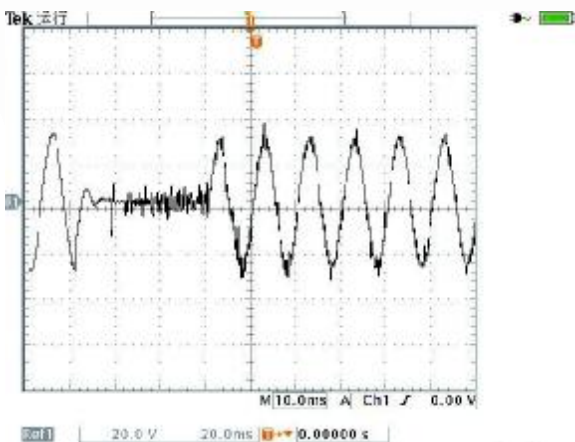


图6 市电到逆变的切换波形

(3)逆变应急长时间工作, 输出电压情况测试与系

统稳定性验证: 电池 513V 开始放电, 带 3.75KW 炉丝额定负载, 运行约 80 分钟, IGBT 及散热器温度始终低于 32℃, 系统工作正常且稳定, 测试参数如表 2 所示。

表 2 逆变运行温升测试

电池		逆变输出参数(3750W 负载, 环境温度 14℃)				
运行时 间(min)	电池电 压(V)	逆变输入线电压 (V)			U 相频 率(Hz)	逆变器温升 (℃)
0	513	386	386	387	50.01	24.2
30	487	380	381	381	49.89	27.5
60	480	378	377	378	50.25	28.2
80	471	365	367	367	50.09	31.4

## 6 结论

本文针对数字化 UPS, 给出了基于 LF2407A 的系统总体设计结构, 实现了实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  在 LF2407A 上的移植, 对 UPS 系统任务进行设计和实现调度, 给出了部分参数设定和主程序清单。该设计方案已经成功应用于青岛创统 3.75KVA 数字化 UPS 的设计项目中。实践证明,  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  在嵌入式 UPS 控制系统中的应用有效地提高了系统控制的实时性以及系统整体可靠性与稳定性。

### 参考文献

- 1 谢力华, 苏彦民. 正弦波逆变电源的数字控制技术. 电力电子技术, 2001, (12): 52 - 55.
- 2 吴波, 吴红缨. 基于 DSP 的单相 UPS 全数字控制技术. UPS 技术与应用, 2001, (12): 20 - 23.
- 3 TI Instruments Co. TMS320LF/LC240xA DSP Controllers System and Peripherals Reference Guide (Rev. C). Texas Instruments Literature Number SPRU357C, 2006, 125 - 224.
- 4 邵贝贝. 一种源码公开的实时嵌入式操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ . 世界电子元器件, 2001, (10): 41 - 42.