

DOI: 10.7667/PSPC170888

基于 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 的供电综合保护器设计

吴尧辉^{1,2}, 刘思^{1,2}, 吴昊珍³, 魏华⁴

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学-许继电气股份有限公司煤矿井下智能供电系统实验室, 河南 焦作 454000; 3. 郑州工商学院, 河南 郑州 450000; 4. 焦作水务公司, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对供电综合保护系统功能和硬实时特性的要求, 使用 Cotex-M3 内核 MCU, 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 实时操作系统, 应用库开发方式完成了供电综合保护器的设计。根据系统要求, 将保护功能划分为数据采集处理、保护和 GUI 显示等 10 个优先级不同的应用任务。基于优先级对应用任务进行管理, 任务间通过信号量、任务消息队列和事件标志组等内核对象实现通信和同步, 从而达到系统实时运行。经系统仿真监测实验, 表明基于 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 的保护程序设计能可靠实现多任务系统的实时运行。通过对 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 系统任务的监测功能的合理配置, 可对软件系统运行状态进行监测, 并发现软件运行细节的不足, 有利于后期优化升级改进。

关键词: 供电综合保护; $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 实时操作系统; 多任务管理; 通信与同步; 内核对象

Design of power supply integrated protector based on $\mu\text{C}/\text{OS-III}$

WU Yaohui^{1,2}, LIU Si^{1,2}, WU Haozhen³, WEI Hua⁴

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. Intelligent Power Supply System for Underground Coal Mine, Henan Polytechnic University-XJ Electric Co., Ltd, Jiaozuo 454000, China; 3. Zhengzhou Technology and Business University, Zhengzhou 450000, China;
4. Jiaozuo Water Co., Ltd, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: To meet the power supply integrated protection functional requirements and hard real-time requirement, a kind of integrated protector to power supply is designed, using Cotex-M3 chip MCU and source library function and based on $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ real-time operating system. According to the system requirements, the protective functions are divided into 10 tasks, including data process task, protection task, GUI task, etc. With the task communication and synchronization realized by kernel objects of $\mu\text{C}/\text{OS-III}$, such as task semaphore, task message queue and event flag group, the tasks are managed based on task priority, so that the system runs real-timely. And it is indicated that the software design based on $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ can realize stably real-time running of the multitask protective system by monitoring experiment. Through the correct set to detective function of $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ system task, the system state and the operational details of software are detected, making for later software upgrade.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61340015) and Natural Science Research Project of Education Department of Henan Province (No. 2010A470003 and No. 2009B470003).

Key words: power supply integrated protection; $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ real-time operating system; multitask management; communication and synchronization; kernel object

0 引言

简单的小型系统通常设计为前后台系统, 作为

后台的主程序是一个无限循环, 系统实时性依赖于作为前台的中断服务程序。复杂的多任务系统则需要使用实时操作系统(RTOS), 在实时操作系统中, 每个任务都是一段简单的程序, 统一由实时内核管理, 这样就有效地减少了前后台系统中较长的中断响应时间与任务级响应时间, 提高了系统的实时性, 因而其在工业控制、信息处理等领域已得到广泛应

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61340015); 河南省教育厅自然科学研究计划项目资助(2010A470003, 2009B470003)

用^[1-4]。 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 是一个可剥夺、可固化的基于优先级的多任务操作系统, 有丰富的内核对象及系统服务, 有非常便捷的 API, 即应用程序接口, 且和其他操作系统相比, 更有配套的监测软件, 便于系统运行状态的监测, 极大地方便了软件设计, 对于供电智能综合保护器的设计及升级改进有着重要意义^[5]。

1 保护器系统组成及功能任务划分

1.1 保护器系统组成

保护器由 MCU 以及外围硬件电路两部分组成, 如图 1 所示。MCU 使用的是 Cortex-M3 内核, 集成 ADC、GPIO 等多种外设^[6]。外围硬件电路中, 信号调理电路用于将互感器所得电气信号调理至标准的 MCU 可识别电压(峰峰值为 3 V, 偏置电压为 1.5 V), 继电器驱动电路用以执行开关动作, 触摸显示屏及驱动、SD 卡及驱动以及通信接口电路分别提供了 GUI 交互、文件系统以及通信功能的硬件基础。

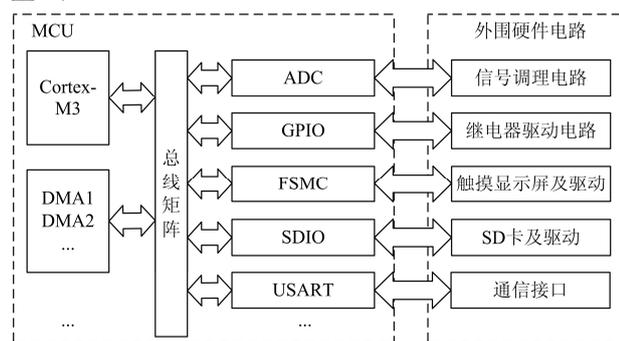


图 1 系统组成

Fig. 1 System component

1.2 保护器功能与任务划分

保护器功能按照设计有数据采集处理功能、故障识别与动作功能^[7]、数据记录功能、参数设定功能、通信功能、时间日期功能以及 GUI 交互功能等。将功能划分为保护动作任务、数据处理任务、数据发送任务等 10 个任务。任务内容及功能如表 1 所示。其中, 保护动作任务和数据处理任务是本系统中的核心, 数据处理任务由 ADC 采集^[8-9]和 FFT 算法^[10]计算两部分组成。ADC 采集、串口通信以及 SD 卡数据存读均以 DMA^[11]的方式实现。

2 保护系统软件层次及工程文件组成

2.1 保护系统软件层次

为了提高保护器的实时性、增强 GUI 交互、便于软件开发和系统升级, 系统软件使用分层结构,

表 1 应用任务划分

Table 1 Partition of application task

任务名称	任务内容	实现功能
保护动作	根据故障信息, 操作 IO 口	保护动作
数据处理	ADC 采集(DMA) 数据运算(FFT)	故障识别
数据发送	串口通信(DMA)	通信
数据接收		
数据存储	以.TXT 存储至 SD 卡(DMA)	记录查询
数据读取	读取 SD 卡文件系统中的数据	
时间日期	RTC 独立时钟、时间日期算法	日历
参数设定	将参数缓存数组转存至参数设置数组中	参数设定
液晶显示	使用 emWin 图形库, 设计 GUI 交互, 实	GUI 交互
触摸输入	现数据显示、参数设定、数据查询等。	

从上到下依次为用户层、操作系统层和 CMSIS 层^[12], 如图 2 所示。用户层主要是在操作系统上的任务设计, 操作系统层由实时内核和中间件 API 组成, 中间件包括 FatFs 文件系统 API、emWin^[13]图形库 API 等高级系统服务。CMSIS 层是由 ARM 公司与芯片厂商联合制定的硬件抽象层, 用以降低软件开发成本, 主要有 CMSIS 标准函数库组成。

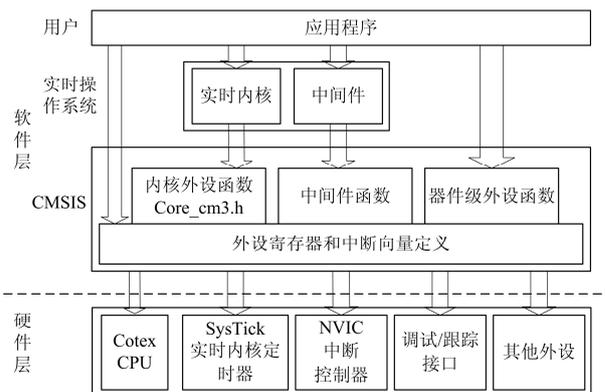


图 2 保护系统软件层次

Fig. 2 Structure of protection system software

2.2 工程文件组成

如图 3 所示, 除了硬件层, 操作系统的文件结构分为三层^[14], 分别为应用层、CPU 无关层、CPU 相关层, 其中各个部分标号与图 4 中的标号相对应。

根据图 3 中操作系统的文件结构, 系统工程文件由以下七个部分组成, 由图 4 所示。这七个部分自上到下分别为启动代码、CMSIS 标准库、用户应用程序、BSP 板级支持包、 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 操作系统文件, STemWin 图形库以及 FatFs 文件系统。CMSIS 标准库提供了访问寄存器的库函数; 用户应用程序是操作系统下的任务即中断服务程序代码; BSP 板级支持包提供了用于访问板上各个模块的函数, 由操作

系统 API 调用或用户直接调用; $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 操作系统文件包括三部分, 图 4 中的 4.1 和 4.3 是与 CPU 无关的源码, 4.2 和 4.4 是与 CPU 相关的用于系统移植的文件, 4.5 是用于系统应用配置和设计的配置文件。STemWin 图形库和 FatFs 文件系统用作 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 操作系统的高级服务, 其底层驱动由 BSP 板级支持包中的液晶显示器驱动、触摸屏驱动以及 SDIO 驱动等组成。

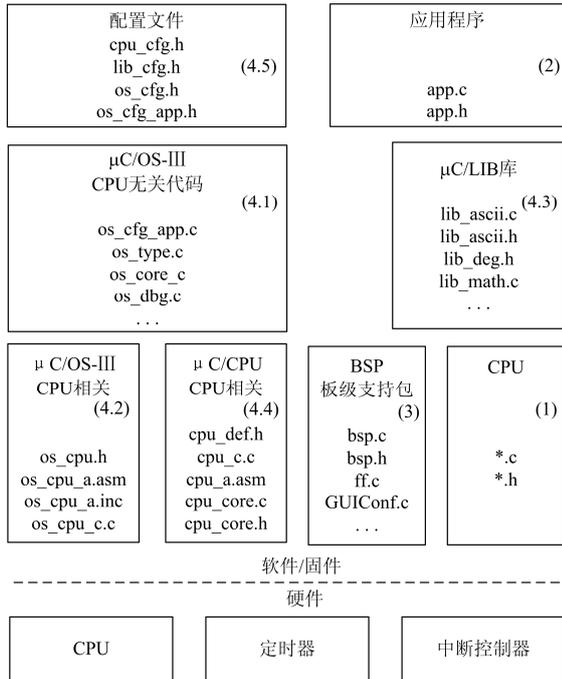


图 3 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 操作系统文件结构

Fig. 3 File structure of $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ operation system

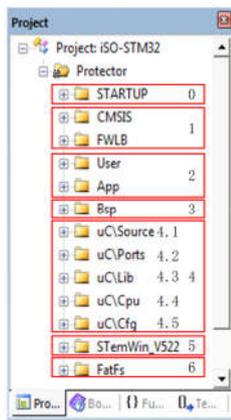


图 4 工程文件目录

Fig. 4 File catalogue of project

3 操作系统应用设计

3.1 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 实时操作系统移植与配置

$\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 是一个可裁减、可固化、可剥夺型的

多任务内核。其源代码开放, 有便捷的 API, 可移植到各种不同的 CPU 上, 有丰富的系统服务, 如任务管理、时间管理、信号量, 更有配套的监测软件, 便于软件开发^[15]。本文参照嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 参考手册, 采用 MDK 编译器, 将其移植到 Cortex-M3 内核 MCU 上。为节省资源, 根据使用到的系统服务, 对其进行裁剪配置, 其相关配置文件在图 4 中标号为 4.5 的文件目录下, 如 app_cfg.h、os_cfg_app.h、cpu_cfg.h 等^[16]。设计任务中将用到事件标志组、任务信号量、任务消息队列、互斥信号量等内核对象, 和中断服务、时间管理以及存储管理等系统服务。为使用 $\mu\text{C}/\text{Probe}$ 的调试功能, 还需要使能时间戳、DBG 调试等。

3.2 应用任务优先级配置和栈空间分配

在 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 实时操作系统中, 合理的任务优先级配置和栈空间分配对于保证实时系统的正常运行非常重要。EMS 调度法给最大执行率的任务分配最高优先级^[17]。而在本系统中, 部分任务的重要性十分明显, 本文结合 EMS 调度法, 优先考虑任务的重要性。给更重要的任务分配更高的优先级, 同样重要任务的优先级则按照 EMS 调度法来分配。应用任务的重要性和执行频率(相对大小估值)分析, 对应的优先级配置如表 2 所示。

表 2 任务分析表

Table 2 Task analysis form

任务	重要性	执行频率	优先级
保护动作	10	50	2
数据处理	9	50	3
数据发送	8	50	4
数据接收	4	0.1	7
数据存储	6	0.2	5
数据读取	6	0.1	6
液晶显示	2	10	10
触摸输入	2	10	11
时间日期	4	1	8
参数设定	4	0.1	9

任务的栈空间分配则充分利用 $\mu\text{C}/\text{Probe}$ 的任务监视功能^[18], 先给每个任务分配足够大的栈空间, 确认系统运行无误后, 根据得到的每个任务实际堆栈使用, 给定安全系数为 1.5~1.8, 计算分配栈空间。

3.3 应用任务运行机制

3.3.1 应用任务的通信与资源管理

对于一个基于 RTOS 的工业控制软件系统, 各个任务间往往需要紧密的通信^[19]。在 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 系

务还需要和数据读取任务、始终日期任务以及触摸输入任务同步, 这里使用任务信号量实现同步。需要同步的任务通过调用 OSTaskSemPend(), 将自己置为等待态, 由其等待的任务调用 OSTaskPost(), 将其置为就绪态, 这样就实现了任务间的同步。

4 保护器系统运行监测实验

以 380 V 额定电压、200 A 额定电流的供电系统为测试对象, 对本保护器进行实验, 结果如图 6 所示。供电系统正常运行时, 实时显示电力系统各个参数及故障信息。底部菜单中, Fault_Q 菜单用于故障查询, ParaSet 用于参数设定, Options 则是更多选项, 包括更改时间、界面主题、字体字号等设置, 有效地改善了 GUI 交互。

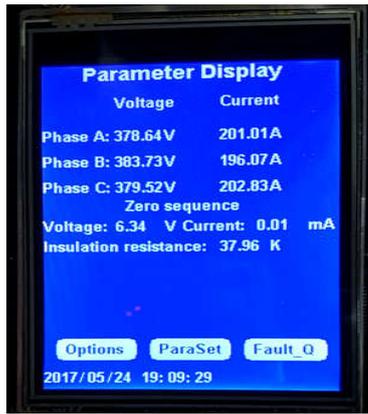


图 6 运行结果图

Fig. 6 Operation results picture

使用 $\mu\text{C}/\text{Probe}$ 对保护器进行系统运行检测, 图 7 显示了系统任务及应用任务的优先级、堆栈、运行状态以及 CPU 运行率等信息。任务 13 ($\mu\text{C}/\text{OS-III}$ Idle Task) 为空闲任务, 优先级最低, 仅当 CPU 空闲时, 它才运行, 因此其运行率和 CPU 总运行率相加为 100%, 故而可以得出 CPU 总运行率为 69%, 由 EMS 调度法推荐的系统运行率来看, 此运行率较为

Item	Car Task	Name	Prto	State	Pending On Object	Pending On	Tasks Remaining	CPU Usage	Context Switch Counter	Interrupts (Max)	Scheduler Lock Time (Max)	Used	Free	Stack Usage	
0	DeInitLoad		6	Pending	Task Message Queue	Task Q	0	0.00 %	0	0.00	0.00	37	27	64	42.19 %
1	DataStore		5	Delayed			3,452,637	0.00 %	0	0.00	0.00	206	129	332	39.16 %
2	DataReceive		7	Delayed			754	0.00 %	41	5.40	9.54	37	27	64	42.19 %
3	DataSend		4	Delayed			100	20.00 %	12,533	3.21	9.29	93	67	160	25.00 %
4	DataProcess		3	Pending	Event Flag Group	FLAG	0	10.00 %	3,203	3.21	18.40	49	47	116	16.90 %
5	Protect		2	Pending	Task Semaphore	Task Sem	0	0.00 %	233	3.11	18.40	44	39	74	13.58 %
6	RTC		8	Ready			0	0.00 %	249	3.40	9.15	66	44	110	15.69 %
7	TOUCH		11	Ready			0	0.00 %	748	3.13	18.76	45	31	76	11.21 %
8	GUI		13	Ready		Task Sem	0	23.00 %	10,894	3.19	7.72	342	114	256	39.06 %
9	ParaSet		9	Pending	Task Message Queue	Task Q	0	0.00 %	0	0.00	0.00	33	31	64	50.78 %
10	$\mu\text{C}/\text{OS-III}$ Timer Task		18	Pending	Task Semaphore	Task Sem	0	0.00 %	421	3.13	18.48	39	25	64	35.94 %
11	$\mu\text{C}/\text{OS-III}$ Slot Task		17	Delayed			1,000	0.00 %	80	3.13	9.24	30	30	64	46.88 %
12	$\mu\text{C}/\text{OS-III}$ Tick Task		1	Pending			0	3.00 %	40,721	1.74	12.89	31	33	64	48.84 %
13	$\mu\text{C}/\text{OS-III}$ Idle Task		24	Ready		Task Sem	0	31.00 %	12,964	3.29	0.00	27	47	64	21.56 %
14	$\mu\text{C}/\text{OS-III}$ SW Queue Task		9	Ready			0	3.00 %	60,997	1.50	8.54	37	27	64	42.19 %

图 7 软件运行检测图

Fig. 7 Software run test picture

合理。但这只是系统自动运行时的状态, 即不对其进行任何的操作, 当进行参数设定、故障查询等操作时, 运行率将有所提高, 经测试最高至 77%, 数据发送任务(DataSend)和液晶显示任务(GUI)运行率较高, 前者受制于通信机制, 后者则是因为刷新率过高, 这点有待改善。

5 结语

本文详细阐述了基于 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 的供电综合保护器的设计。该保护器实现了保护动作、参数设定、图形交互以及通信等多种功能; 能可靠实现多任务实时系统的运行和管理, 达到保护可靠动作; 并且保护系统设计较为合理, 便于软件后期升级, 对于供电综合保护器的改进有着重要意义。但仍有不足之处, 即数据发送任务 CPU 占用过高, 可通过改变通信方式解决; 液晶显示任务的 CPU 占用过高, 还需要使用窗口管理来降低刷新率, 进而降低其 CPU 占用率; 图形交互设计美中不足, 还需有更符合美学的设计。

参考文献

[1] 屈国旺, 王增平, 吴永超, 等. 实时操作系统 VxWorks 在微机保护中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 88-91.
 QU Guowang, WANG Zengping, WU Yongchao, et al. Application of VxWorks of RTOS in microprocessor based relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 88-91.

[2] 徐天奇, 游大海, 李程, 等. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时操作系统的发电机微机继电保护装置[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 71-75.
 XU Tianqi, YOU Dahai, LI Cheng, et al. A microcomputer based relaying protection device for generator based on $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ [J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 71-75.

[3] 安永帅, 李刚, 樊占峰, 等. 新一代智能变电站控制保护一体化智能终端研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 138-146.
 AN Yongshuai, LI Gang, FAN Zhanfeng, et al. Research and development on intelligent terminal units incorporated with control and protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 138-146.

[4] 王小强, 罗海云, 涂小刚, 等. 基于 VME 总线的柔性直流输电系统阀控系统的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 104-110.
 WANG Xiaoqiang, LUO Haiyun, TU Xiaogang, et al. Valve control system based on VME bus of flexible

- HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 104-110.
- [5] 吴尧辉, 吴天博. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 的供电保护数据采集处理系统设计[J]. 测控技术, 2016, 35(9): 98-101.
WU Yaohui, WU Tianbo. The design of data collection and processing system for power supply based on $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ [J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(9): 98-101.
- [6] 温泉源, 纪元法, 孙希延, 等. 基于 ARM+FPGA 的相位平滑伪距差分定位方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 63-68.
WEN Yuanquan, JI Yuanfa, SUN Xiyan, et al. Carrier phase smooth pseudorange differential positioning method based on ARM+FPGA[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 63-68.
- [7] 陈妍君. 电阻型超导限流器和 10 kV 配电网继电保护相配合的仿真分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 53-59.
CHEN Yanjun. Simulation of Co-ordination of resistive-type superconducting fault current limiter and relay protection in 10 kV distribution network[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 53-59.
- [8] 韩媛媛, 周皓, 陈金辉, 等. 基于 STM32F103 的光伏电站智能直流汇流箱监测单元的研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(6): 73-77.
HAN Yuanyuan, ZHOU Hao, CHEN Jinhui, et al. Study on monitoring device of intelligent DC junction box in photo voltaic power station based on STM32F103[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(6): 73-77.
- [9] 黄伟, 彭显刚, 邓小康, 等. 一种可自适应多通信模块的智能电表设计[J]. 陕西电力, 2017, 45(2): 43-48.
HUANG Wei, PENG Xiangang, DENG Xiaokang, et al. Design of intelligent electric meter with self-adap mtionmulti-communication[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(2): 43-48.
- [10] 邵璞, 赵庆生, 郭贺宏, 等. 全相位-混合基 FFT 在相量测量装置中的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 65-69.
SHAO Pu, ZHAO Qingsheng, GUO Hehong, et al. Realization of all phase-mixed radix FFT on the phase measurement device[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 65-69.
- [11] 李宁, 张国琛. 基于 CMSIS 标准的 Cortex-M3 应用软件开发[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009, 9(11): 18-20, 23.
LI Ning, ZHANG Guochen. Application software development of Cortex-M3 based on CMSIS standard[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2009, 9(11): 18-20, 23.
- [12] 刘火良, 杨森. STM32 库开发实战指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [13] 白勇斌, 张汉光, 黄强. 基于 STemWin 的 STM32 开发与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [14] LABROSSE J J. $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ -the real-time kernel[M]. USA: Micrium Press, 2011.
- [15] 唐小平. $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 在 STM32F103RC 上的移植[J]. 兵工自动化, 2016, 35(7): 62-65.
TANG Xiaoping. Transplantation of $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ on STM32F103RC[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(7): 62-65.
- [16] 李承创, 陈跃斌, 房晓丽, 等. $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 在 Cortex-M3 处理器上的移植[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012, 12(4): 42-44, 48.
LI Chengchuang, CHEN Yuebin, FANG Xiaoli, et al. Porting $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ to Cortex-M3 processor[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2012, 12(4): 42-44, 48.
- [17] 洪波, 王健, 钱春. $\mu\text{C}/\text{OS III}$ 中同优先级调度方法分析[J]. 大众科技, 2012, 14(8): 36-37.
HONG Bo, WANG Jian, QIAN Chun. Analysis of the round-robin scheduling in the $\mu\text{C}/\text{OS III}$ [J]. Popular Science & Technology, 2012, 14(8): 36-37.
- [18] LABROSSE J J. $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ -the real-time kernel for STM32 ARM Cotex-M3[M]. USA: Micrium Press, 2011.
- [19] 屈环宇, 刘姝如. $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 的内核对象解析[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012, 12(6): 79-81.
QU Huanyu, LIU Mingru. Kernel object analysis of $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ [J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2012, 12(6): 79-81.
- [20] 张勇, 夏家莉, 陈滨, 等. 嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 应用技术: 基于 ARM Cortex-M3 LPC1788 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.

收稿日期: 2017-06-13; 修回日期: 2017-09-05

作者简介:

吴尧辉(1964—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高低压开关微机综保; E-mail: wyh@hpu.edu.cn

刘思(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为高低压开关微机综保;

吴昊珍(1990—), 女, 硕士, 研究方向为工业 GUI 交互设计。

(编辑 魏小丽)