



产教融合物联网专业“十三五”规划教材

物联网 嵌入式程序设计

► 寻桂莲 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

配电子课件
源代码



产教融合物联网专业“十二五”规划教材

物联网嵌入式程序设计

主 编 寻桂莲

副主编 卞孝丽 贾正松 胡 钢

杨 燕 陈 梅 林晓鹏

参 编 张继辉 李 巍 苏清城

骆旭坤 刘鹏鹏 季云峰

孙光明



机械工业出版社

本书以物联网嵌入式程序开发基础知识为出发点，旨在让读者更清楚地了解物联网嵌入式程序开发的原理和各种与其相关的技术。

本书深入讲解了 ARM 嵌入式应用程序开发的基本原理及 ARM Linux 下的 Makefile 编写、交叉编译、进程开发、线程开发、网络编程，并使用相关技术搭建起物联网嵌入式开发应用平台，完整地体现了物联网嵌入式程序开发的体系和整体结构。

本书分为两个部分：ARM 基础与开发环境搭建和 Linux 下的嵌入式应用开发。共有 11 个单元，分别讲解了：ARM 背景知识、ARM 开发环境搭建、ARM 基础功能实现、Linux 的基本操作、Linux 下编译系统、Linux 文件 I/O 编程、进程控制开发、进程间通信、多线程编程、网络编程、应用开发。

本书采用理论与实践相结合的方法，将无线传感器网络技术运用于实践中，为物联网的学习奠定了基础。本书适用面广，可作为物联网工程、电子信息工程、自动化、计算机科学与技术等专业的教材。

本书配有电子课件及源代码，选用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教育服务网（www.cmpedu.com）免费注册后下载或联系编辑（010-88379194）索取。

图书在版编目（CIP）数据

物联网嵌入式程序设计/寻桂莲主编. —北京：机械工业出版社，2019.8

产教融合物联网专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-63140-8

I. ①物… II. ①寻… III. ①互联网络—应用—程序设计—高等学校—教材

②智能技术—应用—程序设计—高等学校—教材 IV. ①TP393.4 ②TP18

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第132375号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：梁 伟 责任编辑：梁 伟 李绍坤

版式设计：鞠 杨 责任校对：马立婷

封面设计：鞠 杨 责任印制：孙 炜

河北宝昌佳彩印刷有限公司印刷

2019年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.25印张·404千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-63140-8

定价：47.00元

电话服务

客服电话：010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机 工 官 网：www.cmpbook.com

机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

金 书 网：www.golden-book.com

机工教育服务网：www.cmpedu.com

产教融合物联网专业“十三五”规划教材编写委员会

顾 问：桂小林（西安交通大学）

石冰（山东大学）

陆培民（福州大学）

马开颜（北京教育科学研究院）

王健（工业和信息化部职业教育教学指导委员会）

毕丛福（山东信息职业技术学院）

张进（重庆工程职业技术学院）

主 任：陈继欣

副主任：程远东 李宏达 刘德强 汪贤武 杨 燕

陈 良 蔡建军 顾晓燕 梁 伟 邓 立

委 员：杜 红 卞孝丽 蔡 杰 曹建春 曹旻罡 曾 春 陈国钦 陈颖峰

陈 勇 陈振宇 褚建立 邓春红 冯福生 付兴宏 高立斌 顾兆旭

顾正飞 管胜波 郝军涛 贺小辉 胡 钢 季云峰 贾正松 姜东洋

匡 泰 赖其涛 李彩玲 李 畅 李 超 李京文 李 菁 李瑞兴

李小俊 李寅虎 廖金智 林晓鹏 刘洪坡 刘 娟 刘连钢 刘少坤

刘永立 刘占伟 陆海空 骆旭坤 吕恩胜 马文静 娜日苏 潘 君

朴仁淑 瞿立新 任宗伟 施明登 舒 松 宋海兰 苏李果 孙光明

汤宇娇 田 华 王爱红 王 超 王 川 王发荣 王 辉 王慧博

王克朝 王 磊 王立新 王亚东 王 洋 温锦辉 翁代云 吴 伟

武凤翔 夏 昕 谢继勇 谢忠敏 徐钢涛 徐华军 徐明亮 徐 欣

旭 日 薛文龙 严铮晖 严志嘉 杨 凡 杨 晶 杨清山 姚 进

叶炼炼 袁凯峰 张成叔 张汉林 张 伟 张文静 张晓东 张艳鹏

赵 恒 朱晓敏 邹承俊

参与编写学校：

安徽财贸职业学院

安徽职业技术学院

安徽机电职业技术学院

巴音郭楞职业技术学院

包头职业技术学院
北京农业职业学院
常州信息职业技术学院
承德石油高等专科学校
福建师范大学福清分校
广安职业技术学院
贵州电子信息职业技术学院
贵州水利电力职业学院
哈尔滨学院
河北工业职业技术学院
河北交通职业技术学院
河南工业职业技术学院
河南经贸职业学院
河南应用职业学院
黑龙江科技大学
湖北国土资源职业技术学院
黄河水利职业技术学院
江苏信息职业技术学院
江西旅游商贸职业学院
辽宁机电职业技术学院
辽阳职业技术学院
临汾职业技术学院
闽西职业技术学院
南通市职业大学
内蒙古商贸职业技术学院
厦门城市职业学院
山东交通职业技术学院
上海城建职业学院
山西职业技术学院
深圳职业技术学院
绥化学院
天津渤海职业技术学院

北京财贸职业学院
常州轻工职业技术学院
成都农业科技职业学院
大连职业技术学院
甘肃有色冶金职业技术学院
贵州电子科技职业学院
贵州交通职业技术学院
哈尔滨商业大学
汉中职业技术学院
河北机电职业技术学院
河北软件职业技术学院
河南机电职业学院
河南水利与环境职业学院
黑龙江工程学院
呼和浩特职业学院
湖北科技职业学院
江苏经贸职业技术学院
江西工业贸易职业技术学院
黎明职业大学
辽宁轻工职业学院
辽源职业技术学院
闽江师范高等专科学校
南京信息职业技术学院
内蒙古电子信息职业技术学院
盘锦职业技术学院
厦门海洋职业技术学院
山东信息职业技术学院
上海电子信息职业技术学院
绍兴职业技术学院
四川信息职业技术学院
塔里木大学
乌鲁木齐职业大学

无锡城市职业技术学院

无锡职业技术学院

武汉职业技术学院

新疆农业职业技术学院

许昌职业技术学院

长春职业技术学院

浙江安防职业技术学院

郑州财税金融职业学院

郑州信息科技职业学院

重庆电子工程职业学院

重庆工商职业学院

遵义职业技术学院

无锡商业职业技术学院

武汉交通职业学院

西安职业技术学院

邢台职业技术学院

长春汽车工业高等专科学校

长江职业学院

浙江育英职业技术学院

郑州铁路职业技术学院

重庆城市管理职业学院

重庆工程职业技术学院

重庆商务职业学院

物联网被看成继计算机、互联网与移动通信之后的又一次信息产业浪潮，将成为未来带动中国经济发展的生力军。2009年，在美国总统奥巴马与工商业领袖举办的圆桌会议上，IBM首席执行官首次提出了“智慧地球” (Smart Earth) 的构想，同年，欧盟发布了物联网研究战略路线图 (Internet of Things Strategic Research Roadmap)。在我国，物联网同样得到了高度重视，在2010年“两会”期间物联网已经被写入政府工作报告，确立为国家战略性新兴产业之一。在2016年国务院印发的《“十三五”国家信息化规划》中特别提出要加快信息化和生态文明建设深度融合，利用新一代信息技术，促进产业链链接循环化。推进物联网感知设施规划布局，发展物联网开环应用；实施物联网重大应用示范工程，推进物联网应用区域试点，建立城市级物联网接入管理与数据汇聚平台，深化物联网在城市基础设施、生产经营等环节中的应用。

本书编者总结了多年的物联网专业教学和指导学生参加竞赛的经验，精心选择物联网方面典型的应用开发项目展开分析，根据需求设计工作任务，按照工作任务所需的知识和技能对内容进行重构，使应用开发项目、任务、内容浑然一体，体现了“教、学、做”一体化教学的特色。全书内容以应用开发项目为主线，以ARM嵌入式开发知识和技能为支点，深入浅出地阐述了物联网嵌入式项目开发的过程和方法，使读者能够快速奠定物联网嵌入式开发的编程基础。本书内容包括：ARM基础与开发环境搭建和Linux下的嵌入式应用开发两大部分。ARM基础与开发环境搭建部分重点介绍ARM处理器开发环境的安装与设置、裸机程序的开发等。Linux下的嵌入式应用开发部分从Linux的安装过程、基本操作命令讲起，为Linux初学者快速入门提供了保证；嵌入式Linux编译系统以及嵌入式Linux I/O与文件系统的开发、进程控制开发、进程间通信开发、网络应用开发、与物联网相关的实际应用开发等为读者深入理解、应用物联网嵌入式开发的基本技能指明了实践方向；丰富的实验内容使读者能够边学边用，更快更好地领会物联网嵌入式程序开发知识并掌握开发技能。

本书的特点如下：

1) 理论与实践相结合。将ARM的技术融入若干个任务之中，通过任务

驱动的方式，让读者在动手实践的过程中自然地理解嵌入式程序开发相关的知识点。

2) 技术剖析深入浅出。本书寓知识、技能学习于开发实践中，对任务进行了细致的分解，按照由易到难的顺序展开训练，让读者在完成的同时，通过必要的反思学习，达到“知其然，也知其所以然”的效果。

本书由寻桂莲担任主编，卞孝丽、贾正松、胡钢、杨燕、陈梅和林晓鹏担任副主编，张继辉、李巍、苏清城、骆旭坤、刘鹏鹏、李云峰和孙光明参加编写。

本书得到了北京新大陆时代教育科技有限公司相关人员的大力帮助和支持，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者提出批评和建议，以便进一步完善。

编 者

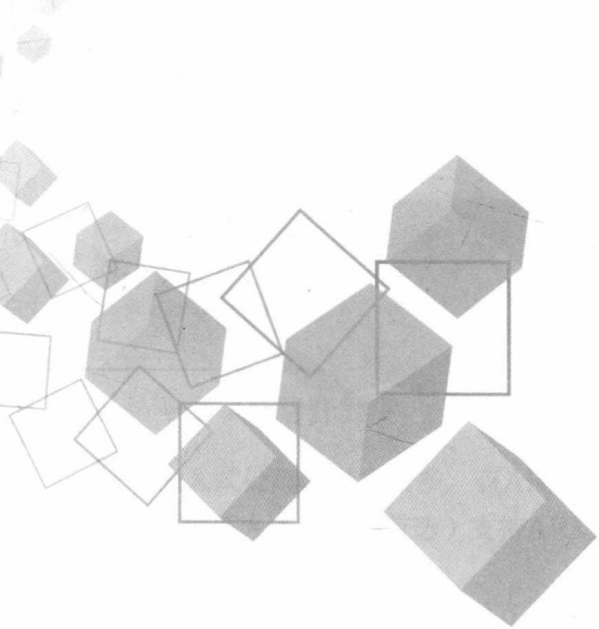
前言

第一部分 ARM基础与开发环境搭建

第一单元 ARM背景知识	2	任务三 交叉编译环境搭建	36
任务一 ARM处理器	3	任务四 NFS服务器搭建	40
任务二 ARM920T内核	5	第三单元 ARM基础功能实现	44
任务三 S3C2451处理器	7	任务一 GPIO接口实验	45
任务四 NEWLab实验箱与ARM核心模块	9	任务二 UART接口实验	50
第二单元 ARM开发环境搭建	13	任务三 中断实验	56
任务一 开发工具的安装和使用	14	任务四 RTC读写时间	64
任务二 虚拟机的安装	24	任务五 按键实验	77

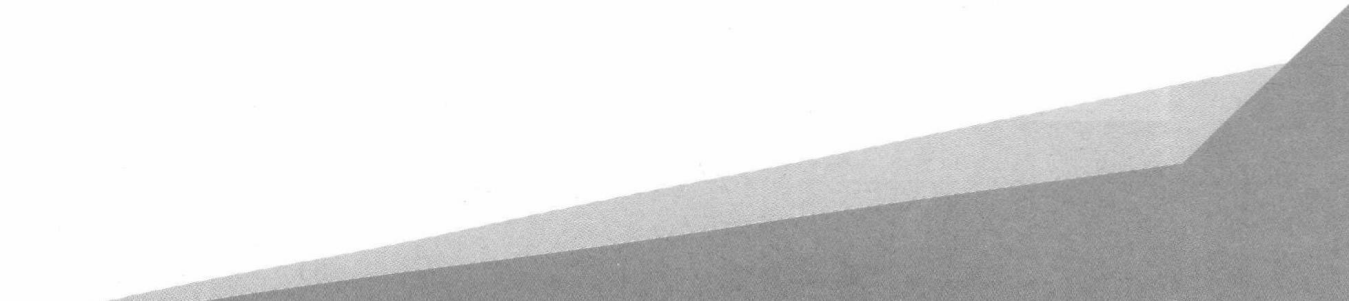
第二部分 Linux下的嵌入式应用开发

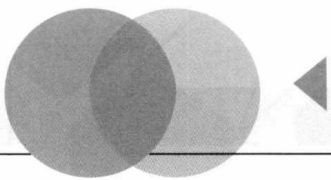
第四单元 Linux的基本操作	84	任务二 信号通信	167
任务一 Linux系统常用命令	85	任务三 共享内存	176
任务二 全屏编辑器vi	87	任务四 消息队列	178
任务三 Linux Shell	91	第九单元 多线程编程	182
任务四 Shell编程举例	93	任务一 Linux下线程概述	183
第五单元 Linux下编译系统	98	任务二 生产者消费者问题	195
任务一 认识GCC交叉编译器	99	第十单元 网络编程	199
任务二 认识GDB调试器	100	任务一 认识TCP/IP	200
任务三 认识Makefile工程管理器	103	任务二 TCP程序设计	207
任务四 使用autotools工具集	108	任务三 UDP程序设计	210
第六单元 Linux文件I/O编程	113	第十一单元 应用开发	213
任务一 Linux系统调用及应用程序接口API	114	任务一 应用程序设计基础	214
任务二 不带缓存的文件I/O操作	116	任务二 键盘模板应用	215
任务三 Linux串口应用编程	123	任务三 GPRS模块应用	220
任务四 标准I/O开发	130	任务四 3G/4G模块应用	227
第七单元 进程控制开发	137	任务五 条码识读模块应用	235
任务一 Linux系统进程概述	138	任务六 液晶模块应用	240
任务二 Linux进程控制编程	141	任务七 IC/SAM卡模块应用	244
任务三 Linux守护进程	152	任务八 Wi-Fi模块应用	251
第八单元 进程间通信	159	任务九 蓝牙模块应用	256
任务一 管道通信	160		



第一部分

ARM基础与开发环境搭建





第一单元

ARM背景知识

目 标

- 了解ARM处理器的概念与特点
- 了解ARM920T的特点及其内核结构
- 了解S3C2451处理器的特性及其结构
- 了解NEWLab平台及ARM核心板资源

单元简介

本单元主要介绍了ARM基础背景知识，包括ARM处理器的概念与特点、ARM920T内核和S3C2451处理器的特点及其结构。

任务一

ARM处理器

一、ARM介绍

嵌入式处理器种类繁多，有ARM、MIPS、PPC等多种。ARM处理器的文档丰富，各种嵌入式软件大多（往往首选）支持ARM处理器，使用ARM开发板来学习嵌入式开发是一个好的选择。

ARM（Advanced RISC Machines）既可以认为是一个公司，也可以认为是一类处理器，还可以认为是一种技术。作为公司，它是微处理器行业的一家知名企业，设计了大量高性能、廉价、耗能低的RISC（Reduced Instruction Set Computer，精简指令集计算机）处理器及软件，适用于多个领域，比如嵌入式控制、消费/教育类多媒体、DSP和移动式应用等。

ARM体系结构是面向低预算市场设计的一款RISC微处理器。20世纪90年代，ARM 32位嵌入式RISC处理器扩展到世界范围，处于低功耗、低成本和高性能的嵌入式系统应用领域的领先地位。ARM当前主要应用于消费类电子领域。到目前为止，基于ARM技术的微处理器应用约占据了32位嵌入式处理器90%以上的市场份额。

ARM处理器的特点是：

- 小体积、低功耗、低成本、高性能。
- 支持Thumb（16位）/ARM（32位）双指令集，能很好地兼容8位/16位器件。
- 大量使用寄存器，指令执行速度更快。
- 大多数数据操作都在寄存器中完成。
- 寻址方式灵活简单，执行效率高。
- 指令长度固定。

二、ARM处理器的工作模式及其寄存器介绍

ARM处理器的工作模式有7种，见表1-1。

表1-1 ARM处理器的工作模式

工作模式	说 明
用户模式（usr）	正常的程序执行模式
快速中断模式（fiq）	支持高速数据传输或通道处理
外部中断模式（irq）	用于通常的中断处理
管理模式（svc）	操作系统的保护模式
数据访问终止模式（abt）	用于虚拟存储以及存储保护
系统模式（sys）	支持操作系统的特殊用户模式（运行操作系统任务）
未定义指令终止模式（und）	支持硬件协处理器的软件仿真

除了用户模式外，其余6种模式都属于特权模式。特权模式中除了系统模式以外的其余5种模式称为异常模式。大部分程序都运行在用户模式下，进入特权模式是为了处理中断、异常或者访问被保护的系统资源。

选择ARM处理器作为嵌入式处理器的原因之一是ARM芯片具有大量的寄存器。由于ARM芯片采用RISC体系结构，其指令长度固定、格式规整、基本寻址方式简单。ARM处理器大量使用寄存器，数据处理指令只对寄存器进行操作，只有加载/存储指令可以访问存储器，以提高指令的执行效率。

ARM处理器共有37个寄存器（见图1-1），被分为若干个组。这些寄存器包括：

- 31个通用寄存器，包括程序计数器（PC指针），均为32位的寄存器。
- 6个状态寄存器，用以识别CPU的工作状态及程序的运行状态，均为32位。

System & User	FIQ	Supervisor	Abort	IRQ	Undefined
R0	R0	R0	R0	R0	R0
R1	R1	R1	R1	R1	R1
R2	R2	R2	R2	R2	R2
R3	R3	R3	R3	R3	R3
R4	R4	R4	R4	R4	R4
R5	R5	R5	R5	R5	R5
R6	R6	R6	R6	R6	R6
R7	R7	R7	R7	R7	R7
R8	R8_fiq	R8	R8	R8	R8
R9	R9_fiq	R9	R9	R9	R9
R10	R10_fiq	R10	R10	R10	R10
R11	R11_fiq	R11	R11	R11	R11
R12	R12_fiq	R12	R12	R12	R12
R13	R13_fiq	R13_svc	R13_abt	R13_irq	R13_und
R14	R14_fiq	R14_svc	R14_abt	R14_irq	R14_und
R15 (PC)	R15 (PC)	R15 (PC)	R15 (PC)	R15 (PC)	R15 (PC)

ARM State Program Status Registers

CPSR	CPSR SPSR_fiq	CPSR SPSR_svc	CPSR SPSR_abt	CPSR SPSR_irq	CPSR SPSR_und
------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

图1-1 ARM处理器的寄存器

注：▨表明用户或系统模式使用的正常寄存器已经被异常模式指定的另一个寄存器取代。

(1) 通用寄存器

通用寄存器包括未备份寄存器、备份寄存器和程序计数器。

1) 未备份寄存器：未备份寄存器包括R0~R7。这些寄存器在所有的处理器模式下指的都是同一个物理寄存器。

2) 备份寄存器：备份寄存器包括R8~R14。其中R8~R12分别对应两个不同的物理寄存器。当使用用户模式时，这些寄存器记为R8_usr~R12_usr；而使用快速中断模式时，这些寄存器记为R8_fiq~R12_fiq，这使得中断处理非常简单。例如，仅仅使用R8~R14寄存器时，FIQ处理程序可以不必执行保存和恢复中断现场的指令，从而使中断处理非常迅速。

备份寄存器R13和R14分别对应6个不同的物理寄存器。其中1个是用户模式和系统模式

使用的，其他5个寄存器分别对应5种处理器模式。其中R13常用来作为栈指针，而R14用来作为连接寄存器。

3) 程序计数器R15: R15作为系统的程序计数器使用。

(2) 状态寄存器

CPSR（当前程序状态寄存器）可以在任何处理器模式下被访问。每一种处理器模式下都有一个专用的物理状态寄存器，即SPSR（备份程序状态寄存器），当特定的异常中断发生时，这个寄存器用来存放CPSR的内容。异常中断结束之后，使用SPSR来恢复CPSR。

(3) 异常

所谓异常就是正常的用户程序被暂时中止，处理器就进入异常模式。例如，响应一个来自外设的中断，或者当前程序非法访问内存地址都会进入相应异常模式。当多个异常中断同时发生时，按照各个异常中断的优先级选择最高优先级的异常中断。ARM处理器的异常有复位、中断请求、软件中断、数据访问中止等，见表1-2。

表1-2 异常中断表

异常中断类型	异常中断模式	向量地址	优先级（1最高）
复位	管理模式	0×00000000	1
未定义指令	未定义模式	0×00000004	6
软件中断（SWI）	管理模式	0×00000008	6
指令预取终止	终止模式	0×0000000C	5
数据访问终止	终止模式	0×00000010	2
保留		0×00000014	保留
外部中断请求IRQ	IRQ模式	0×00000018	4
快速中断请求FIQ	FIQ模式	0×0000001C	3

任务二

ARM920T内核

ARM微处理器目前包括下面几个系列，其他厂商基于ARM体系结构的处理器除了具有ARM体系结构的共同特点以外，每一个系列的ARM微处理器都有各自的特点和应用领域。

- ARM7系列
- ARM9系列
- ARM9E系列
- ARM10E系列
- ARM11系列
- Cortex系列

- SecurCore系列
- StrongARM系列
- Xscale系列

其中，ARM7、ARM9、ARM9E和ARM10为4个通用处理器系列，每一个系列提供一套相对独特的性能来满足不同应用领域的需求。SecurCore系列专门为安全要求较高的应用而设计。下面详细了解一下ARM9系列。ARM9系列微处理器包含ARM920T、ARM922T和带有高速缓存处理器宏单元ARM940T 3种类型，以适用于不同的应用场合。

ARM920T是一种比较常见的ARM9处理器内核，其结构如图1-2所示，它是基于ARM9TDMI哈佛结构，具有5条流水线的处理器核。ARM920T有指令高缓存器，数据高速缓存器、MMU、TLB、写缓冲器等模块。ARM920T是在ARM9TDMI的基础上分别增加了16KB的指令和数据缓存、数据和指令存储管理单元、写缓冲器及协处理器CP15，各单元之间通过AMBA（Advanced Microcontroller Bus Architecture）总线同总线主控单元相连。基于ARM920T内核且应用比较广泛的有Samsung公司生产的S3C2410和S3C2440。

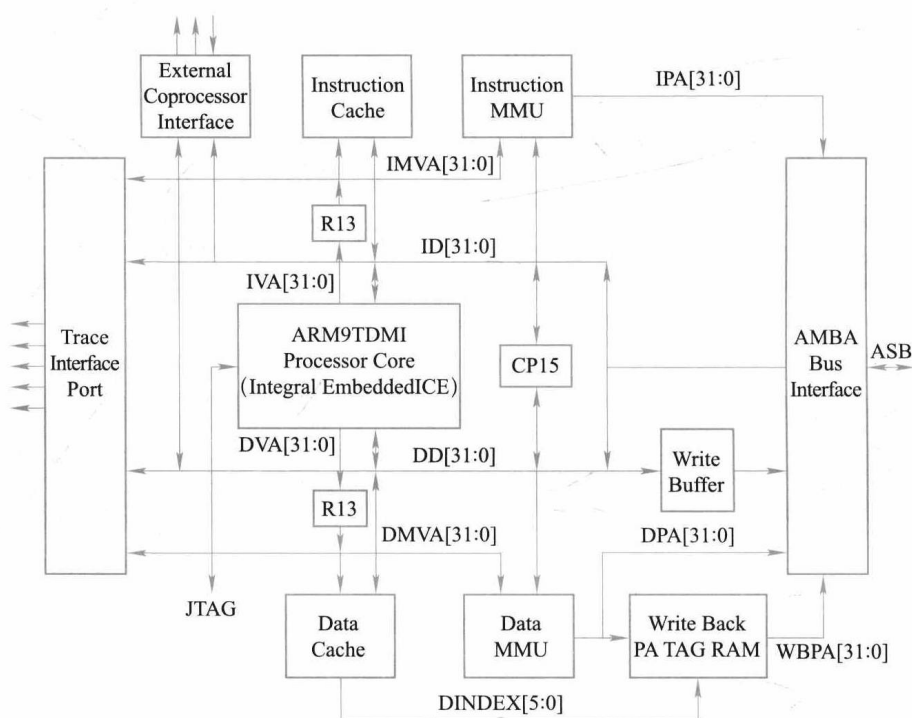


图1-2 ARM920T处理器内核结构

ARM920T微处理器的内核编程模式，与该内核支持的数据类型、存储器格式、处理器工作状态、处理器工作模式和各模式下的寄存器组的访问权限等有关。

在ARM920T处理器中，无论是指令，还是数据都有3种地址类型：VA（Virtual Address）、PA（Physical Address）和MVA（Modified Virtual Address）。VA也

就是通常说的虚拟地址或逻辑地址，是通过CP15按照PT（Page Table）转换后的地址。PA则是对应与AMBA的地址，对应存储器的地址也就是物理地址。MVA是对应于Cache和TLB中的转换地址，从虚拟地址VA到物理地址PA需要经过修正虚拟地址MVA。

ARM9系列微处理器主要应用于无线设备、仪器仪表、安全系统、机顶盒、高端打印机、数字照相机和数字摄像机等。

任务三

S3C2451处理器

S3C2451处理器包含了ARM926EJ内核，同时基于ARM核增加了丰富的外围资源。该处理器产自Samsung公司，为了降低系统成本，提高性能和降低功率，S3C2451芯片采用60nm低功耗CMOS工艺。

S3C2451处理器升级到了ARM926EJ核心，增强了二维图形加速器，降低了功耗，加入了嵌入式内部ROM/RAM用于安全引导和低功耗的音频解码。此外，外设和功能升级也提高了性能和灵活性。其内核特性是：

- 32/16位RISC架构（ARMv5TEJ）。
- 32位ARM指令集，用于实现最高的性能和灵活性。
- 16位Thumb指令集，用于提高代码密度。
- DSP指令扩展与单周期MAC运算。
- ARM Jazelle技术。
- 支持包括Symbian OS、Windows CE和Linux在内的多种操作系统的MMU。
- 容量灵活可变的指令和数据缓存。
- 带有等待状态支持的指令和数据TCM接口。
- 用于实时调试的EmbeddedICE-RT逻辑。
- 符合行业标准的AMBA总线AHB接口。
- ETM接口，通过ETM9提供实时跟踪功能。
- 可选的MOVE协处理器，提供视频编码功能。

S3C2451X的处理器结构如图1-3所示。

除了ARM926EJ内核以外，S3C2451比较重要的片内外围模块功能包括：

- 外部内存控制器（DDR2控制和片选逻辑）。
- LCD接口。
- 4个UART通道，2个SPI通道。
- 8个DMA通道。
- 2个I²C通道，2个I²S通道。

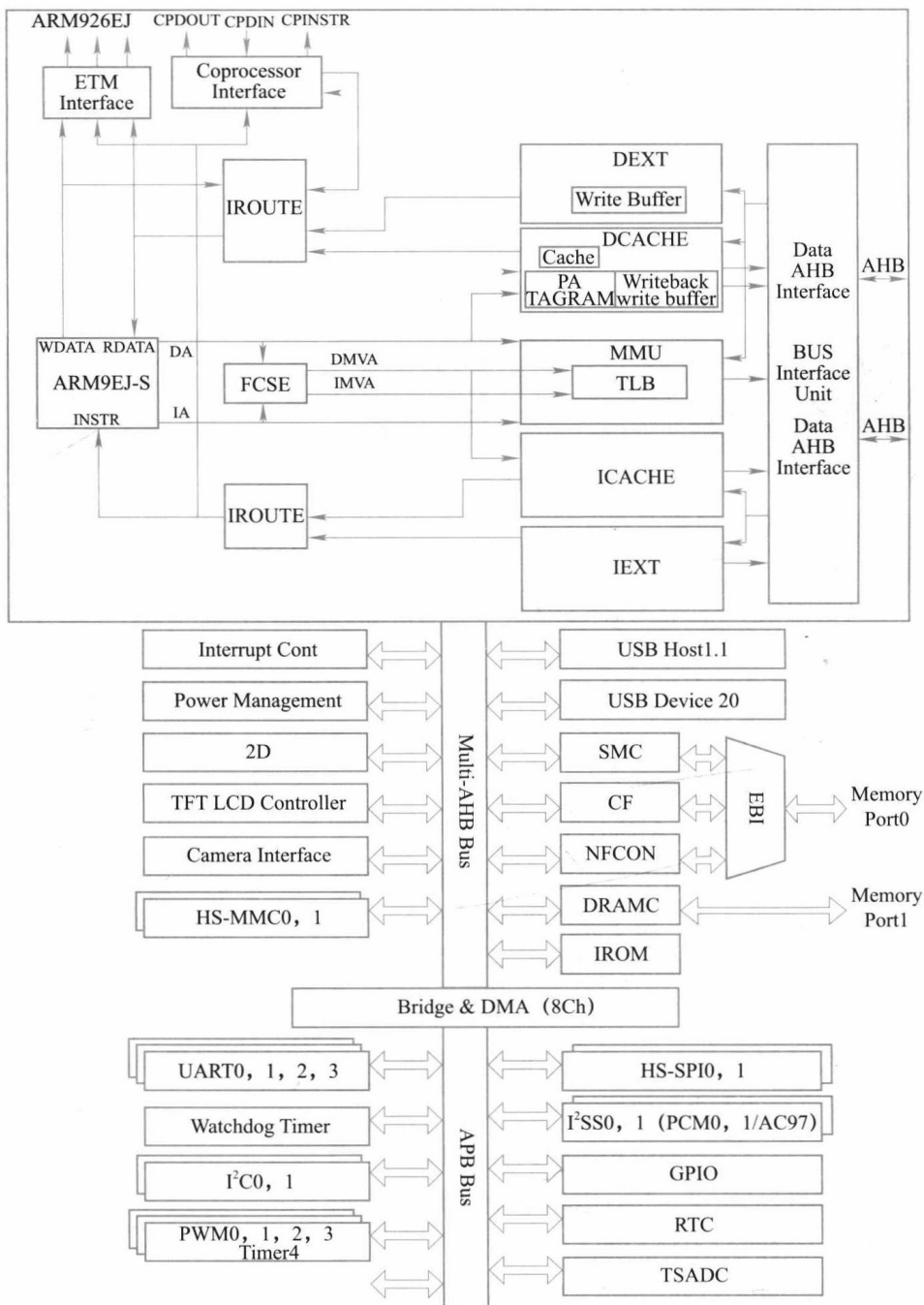


图1-3 S3C2451X的处理器结构

- SD主接口版本2.0和多媒体卡协议版本4.2兼容。
- 4个PWM定时器和一个内部定时器。
- 174个可编程的I/O口，24个外部中断源。
- 电源控制器，支持Normal、Slow、Idle及Power-off等4种模式。
- 10通道12 bit ADC和触摸屏接口。
- 带日历功能的实时时钟。
- 带PLL的片上时钟发生器。