



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

**Designing**  
Embedded System

# 嵌入式系统设计

© 李秀娟 张晓东 于心俊 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

# 嵌入式系统设计

李秀娟 张晓东 于心俊 编著



机械工业出版社

嵌入式系统遍及人们生活的各个领域,涉及嵌入式硬件与软件技术。本书先由嵌入式系统基本构成开始,介绍嵌入式系统硬件结构、硬件开发平台和嵌入式操作系统,然后重点阐述嵌入式系统的开发方法和技术,以及针对嵌入式 Linux 系统的应用开发,并结合实例详细讲述嵌入式系统开发环境设置、系统移植方法和驱动程序的开发,最后给出嵌入式系统工程开发实例。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、测控技术与仪器等专业的高年级本科生和研究生的参考教材,也可作为从事嵌入式系统设计、微控制系统设计和电子设计等科研人员和工程技术人员的参考读物。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统设计/李秀娟编著. —北京: 机械工业出版社, 2013. 7

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 42795 - 7

I. ①嵌… II. ①李… III. ①微型计算机 - 系统设计 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP360. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 122219 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: 于苏华 责任编辑: 于苏华 任正一

版式设计: 常天培 责任校对: 陈秀丽

封面设计: 张 静 责任印制: 张 楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20 印张 · 544 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 42795 - 7

定价: 39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

## 编审委员会委员名单

**主任委员：**刘国荣

**副主任委员：**张德江 梁景凯 张 元 袁德成

焦 斌 吕 进 胡国文 刘启中

汤天浩 黄家善 钱 平 王保家

**委 员**（按姓氏笔画排序）：

丁元明 马修水 王再英 王 军 叶树江

孙晓云 朱一纶 张立臣 李先允 李秀娟

李海富 杨 宁 陈志新 周渊深 尚丽萍

罗文广 罗印升 罗 兵 范立南 娄国焕

赵巧娥 项新建 徐建英 郭 伟 高 亮

韩成浩 蔡子亮 樊立萍 穆向阳

# 前 言

嵌入式系统是融先进的计算机技术、半导体技术、电子技术和各个行业的具体应用于一体的产物，是一个技术密集、不断创新的知识集成系统，是无处不在、广泛嵌入到各个应用领域的智能系统。在科学技术高度发展的今天，嵌入式系统产品充满了竞争、机遇和创新，嵌入式系统开发人才也成为了炙手可热的紧缺人才。

本书共分为 10 章。第 1 章嵌入式系统基础，对嵌入式系统进行了全面的概括，通过人们身边熟知的电子设备，引出无处不在的嵌入式系统的概念，介绍嵌入式系统的组成、应用领域及发展趋势，并就嵌入式系统的选型原则进行概述。第 2 章介绍嵌入式系统的硬件构成，主要对 ARM 微处理器家族产品特点、结构以及 ARM 存储与接口技术进行分析研究。第 3 章详细介绍基于 ARM9 处理器的硬件开发平台，并通过“JTAG 烧写 Flash”实训讲述平台的应用方法。第 4 章介绍有嵌入式系统灵魂称谓的操作系统，重点对嵌入式 Linux 操作系统的组成和工作原理进行详细讲述，并通过实训介绍创建虚拟机环境的方法。第 5 章介绍如何构建嵌入式系统的开发环境，以及确保嵌入式系统正常运行的引导程序、内核和根文件系统的设置与加载方法，最后通过实训讲述嵌入式系统软件环境的建立过程。第 6 章介绍嵌入式 Linux 系统的移植，利用综合实训详细讲述 Linux 内核的裁剪、编译与移植过程。第 7 章介绍嵌入式 Linux 应用程序的开发与调试，重点以流行的嵌入式 C 语言程序环境和 ARM 的集成开发软件 ADS 为开发工具，详细介绍开发原理与调试方法。第 8 章针对设备驱动程序如何开启硬件设备的活力，分析研究驱动程序的开发过程和遇到的问题，并对解决办法进行详细的论述，最后结合工程实训介绍 ARM 系统下直流电动机的驱动程序设计。第 9 章介绍嵌入式 Linux 下 GUI 的开发方法，重点讲述基于 Qt/Embedded 的嵌入式 GUI 开发技术，并将基于 Qt/Embedded 开发实例发布到嵌入式 Linux 系统的小型设备上。第 10 章以两个工程开发实例详细阐述嵌入式系统开发过程中的软硬件系统设计，并扩展到嵌入式 CAN 网络的应用设计。

全书结构清晰、编排合理、深入浅出，全面地阐述了嵌入式系统开发所必需的基础知识和技术，同时，在第 3、4、5、6、8、9 章中分别给出了综合实训，并结合作者的研发经验，在第 10 章通过两个工程实例详细讲述了如何进行嵌入式系统的开发。本书对于从事嵌入式系统开发和学习的低年级本科生、研究生和相关科研技术人员不失为一本有价值的教学、自学参考书。

本书由河南工业大学李秀娟教授组织编写，并进行统稿。第 1 章由李秀娟编写，第 2 章由于心俊编写、张晓东参与部分编写，第 3、5、6、7、9 章由张晓东编写，第 4 章由张晓东编写、李秀娟参与部分编写，第 8、10 章由于心俊编写、李秀娟参与部分编写。

本书在编写过程中参考了一些相关资料，并得到了相关学校的领导和同行的大力支持与帮助，对部分章节余磊给出意见、李贝贝进行改图，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 嵌入式系统基础 ..... 1

### 1.1 嵌入式系统 ..... 1

#### 1.1.1 嵌入式系统简介 ..... 1

#### 1.1.2 嵌入式系统的组成 ..... 2

#### 1.1.3 嵌入式系统的特点 ..... 4

#### 1.1.4 嵌入式系统的分类 ..... 5

#### 1.1.5 嵌入式系统与 PC 的区别 ..... 5

### 1.2 嵌入式系统的历史与发展 ..... 6

#### 1.2.1 嵌入式系统的历史 ..... 6

#### 1.2.2 嵌入式系统的应用领域 ..... 6

#### 1.2.3 嵌入式系统的发展趋势 ..... 7

### 1.3 嵌入式操作系统 ..... 8

#### 1.3.1 Android ..... 9

#### 1.3.2 Linux ..... 10

#### 1.3.3 $\mu$ C/OS-II ..... 10

#### 1.3.4 Windows CE ..... 10

#### 1.3.5 VxWorks ..... 10

#### 1.3.6 Palm OS ..... 11

### 1.4 嵌入式系统的选型原则 ..... 11

#### 1.4.1 嵌入式处理器的选型原则 ..... 11

#### 1.4.2 嵌入式操作系统的选型原则 ..... 12

### 本章小结 ..... 13

### 思考与练习 ..... 13

## 第 2 章 嵌入式系统的硬件结构 ..... 14

### 2.1 嵌入式系统的硬件组成 ..... 14

### 2.2 ARM 微处理器概述 ..... 14

#### 2.2.1 ARM 公司简介 ..... 14

#### 2.2.2 ARM 微处理器的家族 ..... 15

#### 2.2.3 ARM 微处理器的结构 ..... 18

#### 2.2.4 ARM 微处理器核的技术特点 ..... 21

### 2.3 ARM 的存储系统 ..... 22

#### 2.3.1 ARM 的存储空间 ..... 22

#### 2.3.2 存储器的格式 ..... 22

#### 2.3.3 存储器的管理 ..... 23

### 2.4 输入/输出设备 ..... 24

#### 2.4.1 LCD 显示 ..... 24

#### 2.4.2 触摸屏 ..... 24

#### 2.4.3 键盘 ..... 27

### 2.5 ARM 的接口技术 ..... 28

#### 2.5.1 并行通信接口 ..... 28

#### 2.5.2 串行通信接口 ..... 29

#### 2.5.3 USB 接口 ..... 31

#### 2.5.4 红外线接口 ..... 33

#### 2.5.5 PCMCIA 和 CF ..... 34

### 2.6 总线技术 ..... 35

#### 2.6.1 I<sup>2</sup>C 总线 ..... 35

#### 2.6.2 SPI 总线 ..... 38

#### 2.6.3 I<sup>2</sup>S 总线 ..... 40

#### 2.6.4 CAN 总线 ..... 42

### 本章小结 ..... 45

### 思考与练习 ..... 45

## 第 3 章 基于 ARM9 处理器的硬件

### 开发平台 ..... 46

### 3.1 ARM9 处理器 ..... 46

#### 3.1.1 ARM9 与 ARM7 处理器的比较 ..... 46

#### 3.1.2 ARM920T 简介 ..... 49

### 3.2 三星 S3C2410X 处理器概述 ..... 53

#### 3.2.1 S3C2410X 处理器 ..... 53

#### 3.2.2 S3C2410X 处理器的工作原理 ..... 55

### 3.3 S3C2410X 处理器单元电路的设计 ..... 59

#### 3.3.1 S3C2410X 处理器主要引脚的定义 ..... 59

#### 3.3.2 电源和复位电路 ..... 66

#### 3.3.3 晶体振荡器电路的设计 ..... 67

#### 3.3.4 串口和 USB 接口电路 ..... 68

### 3.4 存储器的设计 ..... 69

#### 3.4.1 ROM 接口电路的设计 ..... 69

#### 3.4.2 Flash 接口电路的设计 ..... 71

#### 3.4.3 SDRAM 接口电路的设计 ..... 71

### 3.5 JTAG 调试接口的设计 ..... 72

### 3.6 博创 UP-NETARM2410-S 嵌入式平台简介 ..... 74

### 3.7 综合实训：通过 JTAG 烧写 Flash ..... 75

### 本章小结 ..... 77

### 思考与练习 ..... 78



<b>第4章 嵌入式操作系统</b> .....	79	6.3.2 修改 Makefile 文件 .....	153
4.1 嵌入式操作系统概述 .....	79	6.3.3 设置 Flash 分区 .....	153
4.1.1 操作系统简介 .....	79	6.3.4 添加对 Yaffs 文件系统的支持 .....	156
4.1.2 嵌入式操作系统的分类 .....	80	6.3.5 Linux 内核的配置、编译与移植 .....	156
4.2 Linux 操作系统 .....	81	6.4 综合实训: Linux 内核的编译与移植实验 .....	157
4.2.1 Linux 简介 .....	81	6.4.1 实验目的 .....	157
4.2.2 Linux 的特点 .....	82	6.4.2 基础知识 .....	157
4.2.3 Linux 的组成 .....	83	6.4.3 实验设备 .....	157
4.2.4 Linux 的目录和路径 .....	84	6.4.4 实验内容 .....	157
4.2.5 Linux 的常用命令 .....	85	6.4.5 实验步骤 .....	157
4.2.6 Linux 单操作系统的安装 .....	92	本章小结 .....	160
4.3 嵌入式 Linux 操作系统 .....	95	思考与练习 .....	160
4.4 虚拟机简介 .....	96	<b>第7章 嵌入式 Linux 应用程序的开发与调试</b> .....	161
4.5 综合实训: 虚拟机的安装和使用 .....	97	7.1 开发的环境与工具 .....	161
本章小结 .....	103	7.1.1 交叉编译 .....	161
思考与练习 .....	103	7.1.2 gcc 编译器 .....	162
<b>第5章 嵌入式开发环境的建立</b> .....	104	7.1.3 gdb 调试器 .....	165
5.1 嵌入式系统的开发模式与设计流程 .....	104	7.1.4 Vi 编辑器的使用 .....	170
5.1.1 嵌入式系统的开发模式 .....	104	7.1.5 Makefile 文件和 make 命令 .....	172
5.1.2 嵌入式系统的设计流程 .....	105	7.2 Linux 下的 C 语言编程 .....	176
5.2 嵌入式 Linux 的开发流程 .....	109	7.2.1 嵌入式 C 语言程序设计 .....	176
5.3 嵌入式系统开发环境的建立 .....	111	7.2.2 程序的编译与下载 .....	178
5.3.1 建立开发环境 .....	111	7.3 嵌入式系统的开发软件与调试工具 .....	178
5.3.2 开发环境的配置 .....	115	7.3.1 嵌入式系统调试方法概述 .....	178
5.4 BootLoader .....	119	7.3.2 常用调试方式 .....	179
5.4.1 BootLoader 详解 .....	119	7.3.3 ADS 集成开发环境的使用 .....	180
5.4.2 vivi .....	123	7.3.4 用 AXD 进行代码调试 .....	187
5.4.3 U-Boot .....	131	7.4 ARM 仿真器 .....	190
5.5 Linux 的根文件系统 .....	132	7.4.1 UArmJtag 的 JTAG 在线仿真调试 .....	190
5.5.1 文件系统概述 .....	132	7.4.2 UP-ICE200 仿真器的使用 .....	194
5.5.2 Linux 根文件系统 .....	133	本章小结 .....	196
5.5.3 网络文件系统 .....	139	思考与练习 .....	196
5.6 综合实训: 建立嵌入式软件环境 .....	139	<b>第8章 设备驱动程序的开发</b> .....	197
本章小结 .....	143	8.1 设备驱动概述 .....	197
思考与练习 .....	143	8.1.1 驱动程序和应用程序的区别 .....	197
<b>第6章 嵌入式 Linux 系统的移植</b> .....	144	8.1.2 Linux 的设备管理 .....	197
6.1 移植的概念 .....	144	8.2 设备驱动程序的开发过程 .....	201
6.2 Linux 的体系结构 .....	145		
6.2.1 Linux 内核的结构 .....	145		
6.2.2 Linux 内核的配置 .....	147		
6.3 Linux 内核的编译与移植 .....	152		
6.3.1 安装交叉编译工具 .....	153		

8.2.1 字符设备驱动程序的设计 .....	201	实例 .....	247
8.2.2 块设备驱动程序的设计 .....	207	9.3.1 基于 PC 的 Qt 程序 .....	247
8.2.3 网络设备驱动程序的设计 .....	208	9.3.2 发布 Qt/Embedded 程序到目标机 开发板 .....	250
8.2.4 驱动程序的注册 .....	210	本章小结 .....	251
8.2.5 设备驱动程序的编译 .....	212	思考与练习 .....	251
8.2.6 驱动程序的加载 .....	213	<b>第 10 章 嵌入式系统的工程开发</b>	
8.2.7 驱动程序的调用 .....	213	<b>实例</b> .....	252
8.3 驱动程序开发的常见问题 .....	215	10.1 基于 ARM 的可燃气体报警系统 .....	252
8.4 综合实训：直流电动机驱动程序 的设计 .....	217	10.1.1 系统设计概述 .....	252
本章小结 .....	222	10.1.2 硬件电路的设计 .....	252
思考与练习 .....	223	10.1.3 驱动程序的设计 .....	260
<b>第 9 章 嵌入式图形用户界面编程</b> .....	224	10.1.4 应用程序的设计 .....	270
9.1 嵌入式系统 GUI 简介 .....	224	10.2 CAN 总线应用实例 .....	285
9.1.1 MiniGUI .....	225	10.2.1 CAN 总线概述 .....	285
9.1.2 Microwindows/Nano-X .....	228	10.2.2 CAN 智能节点的设计 .....	286
9.1.3 OpenGUI .....	229	10.2.3 CAN 接口电路的设计 .....	287
9.1.4 Qt/Embedded .....	230	10.2.4 报文的发送与接收 .....	287
9.1.5 几种常见嵌入式 GUI 的对比 .....	232	10.2.5 SPI 接口 .....	290
9.2 基于 Qt 的嵌入式 GUI 应用开发 .....	232	10.2.6 CAN 总线波特率的设置 .....	292
9.2.1 Qt 概述 .....	232	10.2.7 CAN 总线驱动程序 .....	292
9.2.2 Qt 的信号与槽机制 .....	235	10.2.8 CAN 应用程序 .....	307
9.2.3 Qt 图形设计器 .....	239	本章小结 .....	309
9.2.4 Qt 的开发流程 .....	241	思考与练习 .....	309
9.2.5 建立 Qt/Embedded 开发环境 .....	244	<b>参考文献</b> .....	310
9.3 综合实训：Qt/Embedded 的编程			



# 第 1 章 嵌入式系统基础

无所不在的嵌入式系统，就在你的身边，就在你的手头。

本章首先从人们身边熟知的电子设备谈起，介绍什么是嵌入式系统、嵌入式系统的组成与特点；之后简要回顾一下嵌入式系统的发展历史，介绍嵌入式系统的应用领域和常见的几种典型嵌入式操作系统；最后从实际应用角度介绍嵌入式系统的是如何进行选型的。通过本章的学习，读者可以对嵌入式系统有个基本认识，理解嵌入式系统无处不在的特点，初步掌握嵌入式系统的组成结构，激发学习嵌入式系统的兴趣。

- ✓ 理解什么是嵌入式系统。
- ✓ 了解嵌入式系统的特点与应用领域。
- ✓ 初步掌握嵌入式系统的组成。
- ✓ 了解嵌入式系统的选型原则。

## 1.1 嵌入式系统

### 1.1.1 嵌入式系统简介

在人们的日常生活中，随处可见、触手可及的智能手机、汽车、取款机以及电梯等设备中都存在着嵌入式系统（Embedded System），可是人们对此却毫无察觉。人们之所以会忽视自己身边的嵌入式系统，主要原因是嵌入式系统的有别于传统计算机系统的“看不见”和“无所不在”的特性。与通用计算机系统不同，嵌入式系统是嵌入到设备内部的，具有“不可见”特性。例如，嵌入到手机、洗衣机、电冰箱和微波炉中微电脑系统；嵌入在汽车、电梯和 POS 机等设备中的小巧的计算机系统；嵌入在工业机器人、医疗设备和卫星等执行专门任务的小型计算机系统。在这些应用的电子设备或者装置中，嵌入式系统执行的是带有特定要求的预先定义好的任务。那么，到底什么是嵌入式系统呢？下面给出目前比较常见的定义：

1) 广义上对嵌入式系统的定义：凡是带有微处理器的专用软硬件系统都可以称为嵌入式系统。

2) IEEE（国际电气电子工程师协会）对嵌入式系统的定义：“用于控制、监视或者辅助设备、机器或车间的操作的装置”（原文为：Devices Used to Control, Monitor or Assist the Operation of Equipment, Machinery or Plants）。

3) 国内普遍认同的嵌入式系统的定义：以应用为中心，以计算机技术为基础，软硬件可裁剪，适合于应用系统对其功能、可靠性、成本、体积、功耗等方面严格要求的专用计算机系统。

4) 应用上对嵌入式系统的通俗的定义：嵌入式系统是一种专用于某个应用或者产品的基于计算机的系统，该系统可以结合处理器的系统电路和专属软件，成为一个独立的系统或者更大的系统的一部分。

由此可见，嵌入式系统是融先进的计算机技术、半导体技术、电子技术和各个行业的具体应用于一体的产物，是一个技术密集、不断创新的知识集成系统，是无处不在、广泛嵌入到各个应用领域的智能系统。在科学技术高度发展的今天，嵌入式系统产品充满了竞争、机遇和创新。

### 1.1.2 嵌入式系统的组成

既然嵌入式系统是具有执行独立功能的专用计算机系统，那么，嵌入式系统的组成与传统计算机系统组成相比较，就有其不同点。从宏观上讲，嵌入式系统也是由硬件结构和软件结构组成。硬件结构包括嵌入式处理器、存储器等一系列微电子芯片与器件，软件结构包括嵌入式操作系统（Embedded Operating System, EOS）和应用软件。从应用上讲，嵌入式系统是硬件和软件结构相结合的综合体，共同实现诸如实时控制、监视、管理、移动计算、数据处理等各种自动处理任务。简言之，嵌入式系统主要由嵌入式处理器、相关支撑硬件、嵌入式操作系统及应用软件系统等组成，它是可独立工作的“器件”。嵌入式系统的组成如图 1-1 所示。

#### 1. 嵌入式系统硬件结构

由图 1-1 可以看出，嵌入式系统硬件结构的核心仍是嵌入式处理器。嵌入式处理器是控制、辅助系统运行的硬件单元。但嵌入式系统的存储器不像传统计算机那样使用大容量存储介质（硬盘等），而大多使用 EPROM、EEPROM 或闪存（Flash Memory）作为存储介质。根据半导体集成电路技术的发展，人们通常将嵌入式处理器分为嵌入式微处理器（MicroProcessor Unit, MPU）、嵌入式微控制器（Micro Controller Unit, MCU）、嵌入式 DSP（Digital Signal Processor）和嵌入式片上系统（System On Chip, SOC）四种类型。各个类型处理器之间的关系如图 1-2 所示。

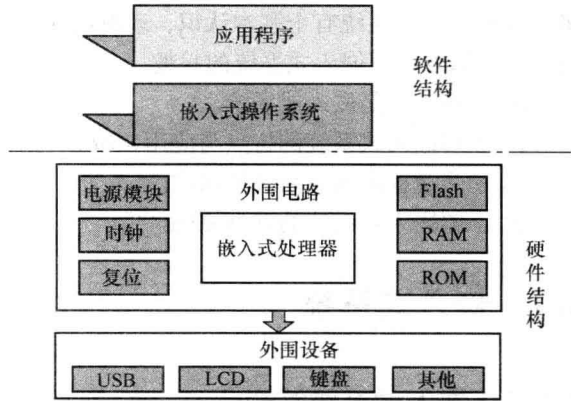


图 1-1 嵌入式系统的组成

各个类型处理器之间的关系如图 1-2 所示。

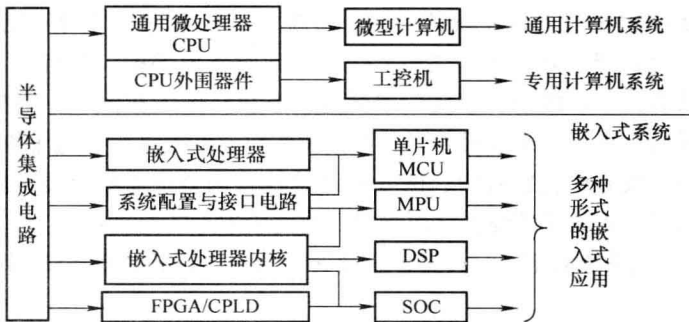


图 1-2 嵌入式处理器分类及其之间的关系

1) 嵌入式微处理器（MPU）。MPU 在嵌入式系统中的作用类似于通用计算机中的 CPU。与 CPU 不同之处在于，嵌入式系统在具体应用中只保留了与嵌入式应用紧密相关的功能硬件，去除了其他的冗余功能部分，这样就能达到以最少资源和最低的功耗实现嵌入式应用的特殊要求。在实际应用中，一般是将嵌入式微处理器装配在专门设计的电路板上，俗称“核心板”，如图 1-3 所示。MPU 具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点。比较流行的 MPU 的类型有 Am186/88、386EX、SC-400、Power PC、68000、MIPS、ARM/ StrongARM 系列等。

2) 嵌入式微控制器（MCU）。MCU 亦称单片机，是将微处理器、存储器（少量的 RAM，ROM 或两者都有）和其他外围设备封装在同一片集成电路内，如图 1-4 所示。MCU 的最大特点

是单片化, 体积大大减小, 从而使功耗和成本下降、可靠性提高。典型有代表性的 MCU 有 MCS-8051、MCS-251、MCS-96/196/296、P51XA、C166/167 系列以及 MCU 8XC930/931、C540、C541 系列, 并且有支持 I<sup>2</sup>C、CAN-Bus、LCD 及众多专用 MCU 和兼容系列。

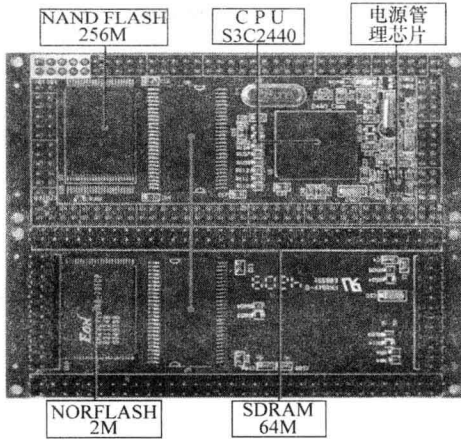


图 1-3 嵌入式处理器核心板

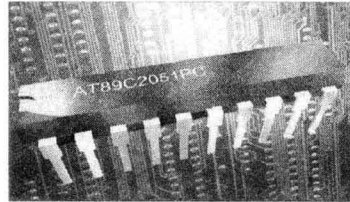


图 1-4 嵌入式 MCU

3) 嵌入式 DSP。DSP 是专门用于信号处理方面的嵌入式处理器, 如图 1-5 所示。DSP 具有对离散时间信号进行极快处理与计算的特点, 提高了编译效率和执行速度。DSP 已经在数字滤波、快速傅里叶变换 (FFT)、谱分析、图像处理等领域发挥着巨大作用。目前最为广泛应用的是 TI 公司的 TMS320C2000/C5000/C6000 系列, 另外还有像 Intel 的 MCS-296 和 Siemens 的 Tri-Core 也有各自的应用对象。

4) 嵌入式片上系统 (SOC)。SOC 指的是在单个芯片上集成嵌入式处理器内核、存储器以及外围电路等构成一个完整的嵌入式系统, 包含了嵌入式软件的全部内容, 如图 1-6 所示。SOC 最大特点是直接在处理器片内嵌入操作系统的代码模块, 成功实现了软硬件无缝结合, 整个系统特别简洁。比较典型的 SOC 产品是 Philips 的 Smart XA、Siemens 的 TriCore 和 Motorola 的 M-Core 等。SOC 芯片在声音、图像、影视、网络及系统逻辑等应用领域中的作用不可限量。

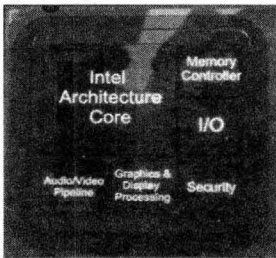


图 1-5 嵌入式 DSP

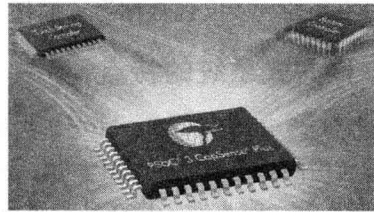


图 1-6 嵌入式 SOC

据不完全统计, 目前全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1000 种, 流行的嵌入式处理器结构有 30 多个系列, 如 x86、8051、ARM、MIPS、PowerPC68K 等。现在几乎每个半导体制造商都生产嵌入式处理器, 越来越多的公司有自己的处理器设计部门。在此, 有必要向读者介绍一下 ARM。ARM (Advanced RISC Machines) 是专门从事基于 RISC 技术芯片设计开发的公司名字, 同时也代表了嵌入式处理技术, 是嵌入式系统业界著名品牌。该公司主要出售芯片设计技术的授

权。在全世界有几十家大的半导体公司都使用 ARM 公司的授权, 因此 ARM 技术既获得更多的第三方工具、制造、软件的支持, 又使整个系统成本降低, 使产品更容易进入市场被消费者所接受, 更具有竞争力。基于 ARM 技术的微处理器应用约占据了 32 位 RISC 微处理器 75% 以上的市场份额, ARM 微处理器已遍及消费类电子产品、工业控制、通信系统、网络系统、无线系统等各类产品市场。

综合上述分析, 总结嵌入式处理器的主要特点如下:

1) 硬件可裁剪特性, 方便扩展处理器结构, 可以迅速地获得满足应用要求的高性能的嵌入式处理器。

2) 由于软件固化特性, 具有很强的存储区保护功能, 避免了在软件模块之间出现错误, 同时也有利于软件诊断。

3) 具有很强的支持实时和多任务能力和较短的中断响应时间, 内部代码运行时间和实时操作系统的执行时间可减少到最低限度。

4) 嵌入式处理器的功耗低, 功耗可达到毫瓦级。

## 2. 嵌入式系统软件结构

嵌入式系统软件结构包括嵌入式操作系统和应用软件。嵌入式操作系统不仅起到管理协调嵌入式处理器、存储器、电源等硬件资源的作用, 还为应用软件提供统一服务。嵌入式操作系统特有的实时性和多任务机制, 直接影响嵌入式系统产品的性能。目前嵌入式操作系统种类繁多, 如常见的 Android、Linux、Windows CE、 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  等。虽然各种嵌入式操作系统侧重点和应用特点不同, 但是一般具有以下共同点:

1) 嵌入式操作系统内核很小, 具有可裁剪、可扩充和可移植性, 可以移植到各种处理器上。

2) 嵌入式操作系统以实时快速响应和多任务为标志特征, 响应时间很短, 任务执行时间可确定。

3) 嵌入式操作系统有较强的实时性和可靠性, 适合嵌入式应用。

嵌入式系统上的应用软件则是根据对象设备或产品编制出来的解决具体任务的专用代码, 是直接作用在嵌入式操作系统之上, 并与具体对象执行的功能紧密结合的软件编码。一般根据设备或产品功能要求与特点, 按用户提出的要求开发或由用户直接开发。嵌入式系统上的应用软件通常是暂时不变的, 所以也常称为“固件”。

### 1.1.3 嵌入式系统的特点

嵌入式系统是将一个具有计算机内核的电子系统嵌入到对象体系中, 从而实现对象系统的智能化。与通用的计算机系统相比, 嵌入式系统具有以下特点:

1) 嵌入性。嵌入性是指在某个对象体系中嵌入了计算机系统内核, 如人们常用的手机就是一个具体对象, 而将计算机系统内核嵌入到手机对象后就形成了嵌入式系统。

2) 专用性。专用性是指嵌入式系统只是被用于解决一项或者几项特殊任务, 每个嵌入式系统都面向一个特定应用, 如智能手机专门为人们进行通信服务、网络服务和多媒体服务, 银行 ATM 专门为人们存取款提供服务。

3) 可裁剪性。嵌入式系统是软硬件设计高效、可裁剪的完整的计算机体系结构, 设计人员可以对它进行优化、裁剪尺寸、降低成本。

4) 集成性。嵌入式系统是各种先进技术和各行业具体应用相结合的产物, 是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。

5) 精简性。嵌入式系统内核小, 没有明显的系统软件与应用软件区分, 并且软件一般固化在存储器芯片或单片机中, 结构精简, 可靠性高。

6) 交叉编译。嵌入式系统一般采用购买现成产品与自行独立开发相结合的方式构建, 但嵌入式系统不具备自举开发能力, 需要开发工具和环境支持。开发过程中利用宿主机和目标机思想, 宿主机用于程序的开发, 目标机作为最后的运行机, 开发时需要交替结合进行。

7) 生命周期长。嵌入式系统与具体应用有机结合在一起, 产品升级换代也是同步进行。因此, 嵌入式系统产品一旦进入市场, 具有较长的生命周期。

#### 1.1.4 嵌入式系统的分类

由上文可知, 所有的嵌入式系统都是嵌入式处理器、嵌入式操作系统与具体应用的物理对象相结合, 无论应用到哪个领域, 嵌入式系统都是嵌入计算机内核的电子设备或电子产品, 只是设备或产品的复杂程度不同而已, 如各种带“电脑”的家用电器, 工业控制领域中的智能化工具和设备, 仪器仪表领域中的智能仪表等。通常, 根据嵌入式系统的规模和复杂度将嵌入式系统分为小型嵌入式系统、中型嵌入式系统和复杂嵌入式系统三种类型。

1) 小型嵌入式系统。小型嵌入式系统一般采用8位或者16位微控制器设计, 硬件与软件复杂度很小, 需要进行板级设计, 可以电池驱动。软件开发时可以使用控制器自带专用编辑器、汇编器和交叉汇编器, 通常用C语言编码, 然后再编译成可执行代码存储到存储器中。例如, 各类智能IC卡、医用电子器械、鼠标、打印机控制器、工业温度记录仪等。

2) 中型嵌入式系统。中型嵌入式系统一般是采用一个16位或者32位的微控制器、微处理器ARM或者DSP设计, 硬件与软件复杂度都比较大, 硬件扩充了总线接口、网络接口, 以解决硬件复杂性的问题。对于复杂的软件开发, 如物理和虚拟设备驱动程序、任务调度优化、中断处理机制等程序, 可以使用专用的编程工具, 如C语言、RTOS、源代码设计工具、调试器和集成开发环境(ODE)和软件调试工具。例如, 计算机互联网上的各种路由器、交换机、中继器, 图像处理、模式识别机, 手持设备PAD, 上网笔记本、银行系统的ATM机等。

3) 复杂嵌入式系统。复杂嵌入式系统的软件与硬件都非常复杂, 采用可升级的处理器或者片上系统(SOC)和可编程逻辑阵列(FPGA), 需要硬件和软件协同设计。复杂嵌入式系统可在硬件单元中实现一定的软件功能, 即软件硬化, 如加密和解密算法、离散余弦变换和逆变换算法, TCP/IP协议栈和网络驱动程序功能等。也可将系统中某些硬件资源的功能用软件实现。除了必要的编程工具如C语言、RTOS和其他编程工具等外, 复杂嵌入式系统还需要十分昂贵开发工具, 甚至还必须为这些系统开发专门的编译器。例如, 实时视频嵌入式系统、高速网络接口、无线LAN设备、太空救生舱等。

#### 1.1.5 嵌入式系统与PC的区别

除了具有计算机系统的基本特征外, 嵌入式系统与PC最根本的区别是, 嵌入式系统是专用系统, 而PC是公共平台。

1) 在系统资源方面, 嵌入式系统资源紧缺, 没有编译器等相关开发工具; 而PC系统资源充足, 有丰富的编译器、集成开发环境、调试器等。

2) 在组成结构方面, 嵌入式系统是面向特定应用的处理器, 总线和外围设备一般集成在处理器内部, 软硬件紧密结合; 而PC是通用处理器、标准总线和外围设备, 软硬件相对独立。

3) 在软件危机方面, 嵌入式系统应用软件一般不能重新编程开发, 而PC应用程序可以重新编程。嵌入式系统软件故障导致的故障后果比PC大得多。

4) 在效率性能方面, 嵌入式系统大都有成本、功耗和实时性要求, 而 PC 一般没有实时性要求。

5) 在开发平台与开发方式方面, 嵌入式系统需要专用的开发工具, 采用交叉编译方式, 开发平台一般是通用计算机, 运行平台是嵌入式系统; 而 PC 开发平台和运行平台都是通用计算机。

6) 在外观形式类型上, 嵌入式系统是“看不见”的, 是嵌入了计算智能的电子装置或设备, 且形式多样、应用领域广, 以应用领域分类; 而 PC 是实实在在的计算机。

## 1.2 嵌入式系统的历史与发展

### 1.2.1 嵌入式系统的历史

嵌入式系统诞生于微型计算机时代, 可以追溯到 20 世纪 70 年代单片机的产生时期。历经三十多年的发展至今, 各式各样的嵌入式系统产品随处可见, 从居家生活、工业生产到军事和航空航天等领域, 无处不在。通过内嵌微处理器、微控制器和片上系统技术, 已经使得家电、汽车、工业机器人、通信装置和飞行器等, 以及成千上万种产品更加智能化、专用化和微型化。

1976 年, Intel 公司生产出第一个单片机 8048, Motorola 公司同时推出 68HC05, Zilog 公司也推出 Z80 系列, 从此开启了单片机独立发展之路。这一时期的嵌入式系统, 突出的特点是它的嵌入性, 它的嵌入对象如电冰箱、洗衣机、微波炉等都是独立的商品。单片机应用系统的嵌入, 替代了原先的传统电子系统, 实现了嵌入对象的智能化。

到了 20 世纪 80 年代初, Intel 公司成功研制了 MCS-51 单片机, 开创了嵌入式系统独立发展的单片机时代, 就是人们常说的微控制器时代。与此同时, 嵌入式操作系统的实时核也开始应用。实时核包含了许多传统操作系统的特征, 如任务管理、任务间通信、同步与互斥、中断支持、内存管理等功能。其中比较著名的有 Ready System 公司的 VRTX、Integrated System Incorporation (ISI) 的 PSOS、WindRiver 公司的 VxWorks、QNX 公司的 QNX 等。

20 世纪 90 年代以后, 随着对嵌入式系统实时性要求的提高和软件规模的不断上升, 实时多任务操作系统 (RTOS) 逐步成为国际上嵌入式系统的主流, 数十种嵌入式操作系统应运而生, 如 Palm OS、Windows CE、嵌入式 Linux、Lynx、Android 和 Nucleux, 以及国内的 Hopen、Delta Os 等。嵌入式处理器也同样经历了从低到高的发展过程, 尤其是 ARM 处理器开启了 32 位处理器的新纪元。从 ARM1 到 ARM11, 再到今天 ARMv7 架构的 Cortex 系列, 还有新型服务器架构的微处理器进入市场, ARM 为嵌入式系统进驻高端服务注入了活力。2010 年, ARM 公布了适合处理服务器任务的 ARM Cortex™-A15 MPCore™ 处理器。2010 年, Marvell 公司发布了采用 ARM 架构的服务器芯片。2011 年年底, Calxeda 公司发布业界第一款专门面向服务器应用的 ARM SOC 处理器 EnrgyCore ECX-1000, 2012 年 7 月, 采用 EnrgyCore ECX-1000 的新型服务器 Boston Viridis 的诞生。

### 1.2.2 嵌入式系统的应用领域

今日, 举凡智能手机、平板电脑、电子阅读器、数码相机和平板电视等移动设备和消费类电子产品, 以及电动机车、电动脚踏车及电动汽车等电动交通工具的控制核心, 乃至随处可见的与电有关的器材设备, 无不与嵌入式系统息息相关。嵌入式系统已经渗透到人们生活的每个角落, 工业、服务业、消费电子、军事、航空航天等领域, 无处不在。图 1-7 给出了各类嵌入式产品及应用。



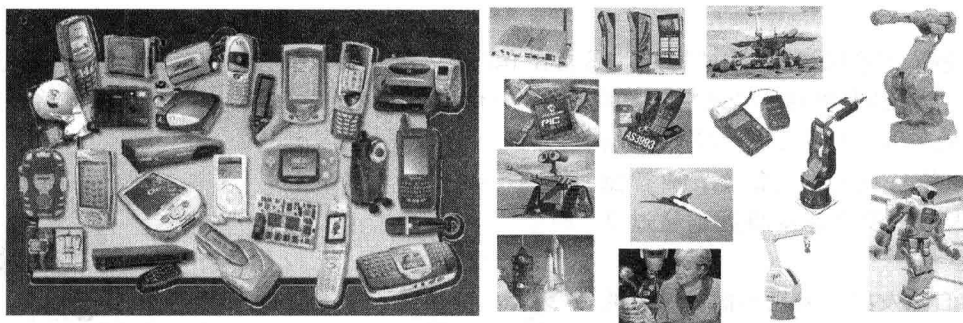


图 1-7 嵌入式产品及应用

1) 信息家电。家用电器产品,如冰箱、空调、电饭煲等的智能化、网络化已经开启人们生活崭新空间。在这些设备中,嵌入式系统功不可没。未来即使你不在家里,也可以通过电话线、网络远程控制它们。

2) 家庭智能管理系统。水、电、天然气表的远程自动抄表,家庭安全监控系统等,其中嵌有的专用控制芯片将代替传统的人工检查,并实现更高效、更准确、更安全的性能。目前在服务领域如远程点菜器等已经体现了嵌入式系统的优势。

3) POS 网络及电子商务。公共交通无接触智能卡(Contactless Smartcard, CSC)发行系统、公共电话卡发行系统、自动售货机及各种智能 ATM 终端将全面走入人们的生活,到时手持一卡就可以行遍天下。

4) 工业控制。目前已经有大量的 8、16、32、64 位嵌入式处理器应用于工业自动化设备中。就传统的工业控制产品而言,低端型设备采用的往往是 8、16 位单片机,而 32 位、64 位的处理器已逐渐成为工业控制设备的核心,如工业过程控制和数字机床、电力系统、电网安全和电网设备监测、石油化工系统等嵌入式系统不可或缺。

5) 交通管理。在车辆导航、流量控制、信息监测与汽车服务等交通运输领域,内嵌 GPS 模块、GSM 模块的移动定位终端已经获得了成功的使用。目前, GPS 设备已经从尖端产品进入了普通百姓的家庭,只需要几千元甚至几百元,就可以随时随地找到你的位置。

6) 环境工程与自然。在水文资料实时监测、防洪体系及水土质量监测、堤坝安全监测、地震监测、实时气象信息监测、水源和空气污染监测等方面,尤其在很多环境恶劣、地况复杂的地区,嵌入式系统将实现无人监测。

7) 机器人。嵌入式处理器的发展使机器人在微型化、高智能方面的优势更加明显,机器人产品的价格大幅度降低,使其在工业领域和服务领域获得更广泛的应用。

### 1.2.3 嵌入式系统的发展趋势

嵌入式系统是将先进的计算机技术、电子技术和半导体技术与各行业具体应用高度集成的产物。今天在数字化、网络化与信息化产品的强大需求推动下,嵌入式技术具有广阔的发展创新空间,同时,嵌入式产品也具有巨大的商机。正如 20 世纪 80 年代问世的 PC 成就了 90 年代互联网的根基一样,嵌入式系统发展至今面临的机遇是嵌入式智能系统和物联网的发展。如图 1-8 所示,嵌入式系统的应用从能够识别驾驶员的汽车,到能够实现客流量统计的数字安全监控系统,以及能够无缝安全地与现有企业和通信基础架构集成的智能网络,甚至具备社交功能的健身设备、具有计算体验的智能设备等,正在迅速渗透各行业并蓬勃发展。未来嵌入式系统的几大发展



趋势如下：

1) 嵌入式系统智能化。“智能”是指在嵌入式系统中加入一些感知或是计算设备，通过识别语音、手势或是外界环境来判断人的意图，并做出相应的反应。传统的嵌入式系统将获得类似于 PC、服务器、智能手机和平板电脑等通用系统所具备的智能性，而智能系统在未来的发展速度将远远超过这些通用系统。

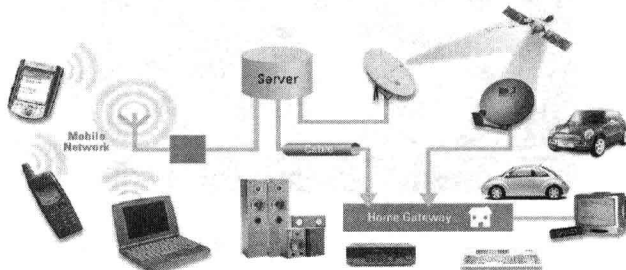


图 1-8 嵌入式系统应用的趋势

2) 自然友好的人机界面。精美的人机界面以及方便的操作环境让手机使用者倍感温馨。为了确保用户在智能设备上获得与在 PC 和智能手机上是一样的消费体验和计算体验，人机界面对一般的嵌入式设备也提出更高要求。友好的多媒体人机界面能够使得嵌入式设备与用户亲密接触，手写文字输入、语音拨号上网、短消息发布、收发电子邮件以及彩色图形、图像等都会使使用者获得自由的感受。

3) 规模化跨行业协作。由于嵌入式系统不具备自举开发能力，因此嵌入式系统厂商不仅要提供嵌入式软硬件系统本身，同时还需要提供强大的硬件开发工具和软件包支持，各类中间开发厂商也加入支持系统开发。目前很多厂商在主推系统的同时，将开发环境也作为重点推广。例如，三星公司在推广 ARM7、ARM9 芯片的同时还提供开发板和板级支持包（BSP），而 Windows CE 在主推系统时也提供 Embedded VC++ 作为开发工具，还有 VxWorks 的 Tonado 开发环境、DeltaOS 的 Limda 编译环境等。

4) 进一步的网络支持。随着大量移动设备被接入互联网和云中，企业和服务提供商网络的安全性问题将日益凸显，未来的嵌入式系统必须支持多种标准网络通信接口，以满足多种场合的需要。同时，新一代的嵌入式系统还应支持 USB、BLUETOOTH、CAN、IrDA 等多种通信接口，同时也需要提供相应的通信组网协议软件和物理层驱动软件。软件方面，系统内核支持网络模块，甚至可以在设备上嵌入 Web 浏览器，真正实现随时随地用各种设备上网。

5) 小尺寸、低功耗、低成本。嵌入式产品是软硬件紧密结合的设备，减低功耗和成本始终是设计者的追求。为了达到这个目标，首先需要进一步改进嵌入式微处理器，精简系统内核，只保留和系统功能紧密相关的硬件，利用最低的资源实现最适当的功能；其次进一步优化嵌入式软件，这就要求设计者选用最佳的编程模型和最优的算法，优化编译器性能；再者，发展先进嵌入式软件技术，如 Java、Web 和 WAP 等。

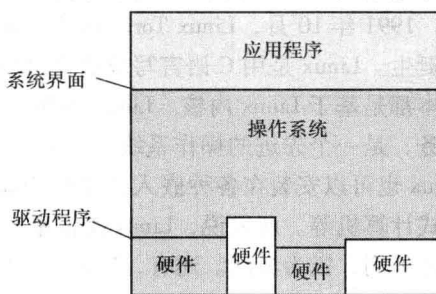
6) 物联网的应用。嵌入式系统是物联网发展的基础，是物联网的重要组成部分。当嵌入式系统嵌入到一个物理对象中，给物理对象以计算和通信智能，并产生完整的物联界面时，加上与物理参数相联的传感器通道接口和控制接口，即可实现人一物交互的人机交互和物一物交互的通信。

目前，嵌入式系统在物联网和智能化城市建设中发挥着前所未有的作用。

### 1.3 嵌入式操作系统

使用过计算机的读者想必都比较熟悉微软的 Windows 操作系统，那么操作系统在计算机中起到什么作用？一句话，操作系统的作用就是协调、管理计算机软硬件资源。图 1-9 所示为操作系

统在计算机软件系统中所处的位置。由图可以看出，操作系统就是让所有硬件发挥作用，再者就是让不同的硬件组成的装置都能够利用操作系统提供的统一的接口为上层服务。所以，操作系统的根本任务就是对系统进行内存管理、多任务进程管理和对外围设备与接口资源进行管理。然而，嵌入式软件系统是将所有程序包括操作系统、驱动程序、应用程序等的程序代码全部都烧进一个 RAM 里，即固化。因此，有人把嵌入式软件系统形象地比喻为库（Library）函数，可以在系统执行过程中直接调用，但不能修改。事实上，由于嵌入式硬件的 RAM 的容量有限，因此嵌入式操作系统核心通常要求要很小，除了用户自己开发的应用程序之外，不希望操作系统占太多的空间。实际上，嵌入式操作系统也真的很小，仅仅提供管理界面的算法及一些管理表格，缩小到 10~20KB 以内的嵌入式操作系统比比皆是。操作系统除了熟悉的 Windows 外，还有 UNIX、苹果的 Mac OS 和开源的 Linux 等，都是很常见的操作系统。与操作系统相比较，嵌入式操作系统就要多很多，下面介绍几款常见的嵌入式操作系统。



### 1.3.1 Android

Android 是 2003 年 10 月由美国人安迪·鲁宾（Andy Rubin）专为移动设备手机开发的软件系统，俗称安卓。Android 操作系统的内核属于 Linux 内核的一个分支，具有典型的 Linux 周期和功能，是半开源操作系统。Android 系统于 2005 年 8 月被 Google 收购。2007 年，由 Google 成立的开放手持设备联盟（Open Handset Alliance, OHA）持续地、更好地推动了 Android 系统的开发。之后，Google 以 Apache 免费开源许可证的授权方式，发布了 Android 的源代码，让生产商推出搭载 Android 的智能手机。后来，Android 操作系统又被逐渐拓展到了平板电脑及其他领域。由于 Android 操作系统的开放性和可移植性，它可以被用在大部分电子产品上。

Android 系统架构和其操作系统一样，采用分层的架构体系。Android 从高层到低层分为四个层次。

1) 应用程序层。Android 不仅仅是操作系统，也包含了许多应用程序，诸如 SMS 短信客户端程序、电话拨号程序、图片浏览器、Web 浏览器等。这些应用程序都可以被开发的其他应用程序所替换，所有的应用程序都是使用 JAVA 语言编写的。

2) 应用程序框架层。该层是 Android 开发的基础，开发人员也可以完全访问核心应用程序所使用的 API 框架。该应用程序的架构设计简化了组件的重用。利用组件重用机制，可实现快速开发应用程序，也可以方便地替换程序组件。

3) 系统运行库层。系统运行库层分别是系统库和 Android 运行时的核心库与 Dalvik 虚拟机。系统库是连接应用程序框架层与 Linux 内核层的重要纽带。Android 系统库包含一些 C/C++ 库，这些库能被 Android 系统中不同的组件使用，并通过 Android 应用程序框架为开发者提供服务。Android 运行时的核心库是 Android 的一些核心 API，如 android.os、android.net、android.media 等。Dalvik 虚拟机依赖于 Linux 内核的线程机制和底层内存管理机制。Dalvik 被设计成一个设备，可以同时高效地运行多个虚拟系统。每一个 Android 应用程序都在自己的进程中运行，都拥有一个独立的 Dalvik 虚拟机实例。

4) Linux 核心层。Android 是基于 Linux 2.6 内核，其核心系统服务如安全性、内存管理、进程管理、网路协议以及驱动模型等都依赖于 Linux 内核。