

嵌入式系统经典丛书

嵌入式系统设计与开发实践

(第2版)

[印] Shibu Kizhakke Vallathai 著

陶永才 巴阳 译

清华大学出版社

北 京

Shibu Kizhakke Vallathai

Introduction to Embedded Systems, Second Edition

EISBN 978-93-392-1968-0

Copyright © 2017, 2009 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press Limited. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2017 by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press Limited.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和清华大学出版社有限公司合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)销售。

版权©2017 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与清华大学出版社有限公司所有。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2017-3862

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统设计与开发实践(第2版)/(印)施部·基哈克·维拉哈(Shibu Kizhakke Vallathai)著; 陶永才, 巴阳 译. —北京: 清华大学出版社, 2017

(嵌入式系统经典丛书)

书名原文: Introduction to Embedded Systems, Second Edition

ISBN 978-7-302-47932-1

I. ①嵌… II. ①施… ②陶… ③巴… III. ①微型计算机—系统设计 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 193569 号

责任编辑: 王 军 韩宏志

装帧设计: 牛艳敏

责任校对: 成凤进

责任印制: 宋 林

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市铭诚印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 44.75 字 数: 1146 千字

版 次: 2017 年 9 月第 1 版 印 次: 2017 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~3500

定 价: 118.00 元

产品编号: 074609-01

译者序

嵌入式系统是一种以应用为中心，以计算机技术为基础，软硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等要求严格的专用计算机系统，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。嵌入式系统技术具有非常广阔的应用前景，其应用领域包括：工业控制、交通管理、信息家电、家庭智能管理系统、POS网络及电子商务、环境工程与自然、机器人等。

信息时代、数字时代使嵌入式产品获得了巨大的发展契机，为嵌入式市场展现了美好的前景，同时也对嵌入式生产厂商提出了新挑战。而嵌入式系统是一门实践性非常强的学科，只有多动手、多实践、多编程、多调试、多看书、多思考，才能真正掌握嵌入式开发技术。在实践之前，需要对嵌入式系统有一个全面的了解。目前，尽管市面上有关 VxWorks、MicroC/OS、WinCE、Linux、DSP、FPGA、ARM 等的嵌入式技术类书籍层出不穷，但这些书籍往往并未使用简明易懂的系统化方法向读者普及嵌入式系统基础知识；这些书籍更多是从深奥的专业领域入手，只适用于专业对口的实践工程师。

本书是从国外引进的优秀的“嵌入式系统导论”类书籍，分为两个部分，第 I 部分介绍嵌入式系统的基本概念，包括嵌入式系统简介、典型的嵌入式系统、嵌入式系统的特征与质量属性、嵌入式系统——面向特定应用与特定领域、使用 8 位微控制器 8051 设计嵌入式系统、基于 8051 微控制器的编程，以及软硬件协同设计与程序建模。第 II 部分讨论嵌入式产品的设计与开发，包括嵌入式硬件的设计与开发、嵌入式固件的设计与开发、基于实时操作系统的嵌入式系统设计、基于 VxWorks 与 MicroC/OS-II RTOS 的嵌入式系统设计简介、嵌入式硬件与固件的集成与测试、嵌入式系统开发环境、产品外壳的设计与开发、嵌入式产品开发生命周期，以及嵌入式产业发展趋势。最后的两个附录介绍 PIC、AVR 系列微控制器、ARM 处理器，以及设计案例研究。为便于教学，各章后给出了较多的思考题与习题。

本书在编写过程中，注重内容上的由浅入深、循序渐进，既便于初学者理解掌握，也考虑到知识的完整性、详尽性。本书可作为普通高校电子类、计算机类本科生或研究生嵌入式系统课程的教材，也可作为工程技术人员的参考资料。

在这里要感谢清华大学出版社的编辑们，她们为本书的翻译投入了巨大热情并付出了很多心血。没有你们的帮助和鼓励，本书不可能顺利付梓。本书全部章节由陶永才和巴阳翻译，参与翻译的还有陈妍、何美英、陈宏波、熊晓磊、管兆昶、潘洪荣、曹汉鸣、高娟妮、王燕、谢李君、李珍珍、王璐、王华健、柳松洋、曹晓松、陈彬、洪妍、刘芸、邱培强、高维杰、张素

英、颜灵佳、方峻、顾永湘、孔祥亮，在此一并表示感谢。

对于这本经典之作，译者本着“诚惶诚恐”的态度，在翻译过程中力求“信、达、雅”，但是鉴于译者水平有限，错误和失误在所难免，如有任何意见和建议，请不吝指正。

译 者

作者简介

Shibu Kizhakke Vellathai 在嵌入式系统与实时系统领域工作已经 15 年有余，参与过嵌入式产品开发生命周期的各个阶段，具有丰富的工程经验与扎实的知识背景。他在印度 Calicut 大学仪表与控制工程学院学习期间，获得了工学学士荣誉学位。随后，他来到 Thiruvananthapuram 市(印度 Kerala 邦首府)，就职于印度政府信息与通信技术产业部下属的电子研究与开发中心(ER & DCI, 是印度最大的电子研发中心)，并在该中心 VLSI(Very Large Scale Integration, 超大规模集成电路)与嵌入式系统小组担任助理研究员。在嵌入式领域，由他指导的重要科研项目包括非接触型智能卡技术以及射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术。在非接触型智能卡和射频识别技术方面，他使用了行业中最常用的 8 位微处理器 8051，并已成功开发出多款产品。

无论是使用 EDA 工具进行嵌入式硬件开发，还是使用汇编语言以及嵌入式 C 语言在各种 IDE 和交叉编译器中进行嵌入式固件开发(基于各种 8 位/16 位/32 位微处理器/微控制器以及片上系统)，Shibu 都已经积累了丰富的专业知识。他还是基于 RTOS(Real Time Operating System, 实时操作系统)嵌入式系统设计方面的专家，精通各种常用的 RTOS(包括 Windows CE、VxWorks、MicroC/OS-II、RTX51)设计。此外，他对各种工业标准协议和总线接口也相当熟悉。目前，Shibu 供职于美国微软公司的设备部，是高级固件工程师。在加入微软之前，他曾供职于 Infosys 技术有限公司(公司首页为 www.infosys.com)Thiruvananthapuram 分部的嵌入式系统与产品工程业务部，担任高级技术架构师。

致 谢

我要借此机会感谢 Mohammed Rijas 先生(Thiruvananthapuram 市 Infosys 技术有限公司移动与嵌入式系统业务部前项目经理, 现任 Arrinad 软件 CEO)和 Shafeer Badharudeen 先生(Thiruvananthapuram 市 Infosys 技术有限公司移动与嵌入式系统业务部前高级项目经理, 现任 Arrinad 软件 CTO), 他们为本书提出了宝贵的意见和建议。感谢我的工作小组和 Infosys 技术有限公司嵌入式系统小组的所有其他成员, 他们推进了本书的撰写。还要感谢 Infosys 技术有限公司移动与嵌入式系统业务部的高级领导组—— Rohit P、Srinivasa Rao M、Tadimeti Srinivasan、Darshan Shankavaram 和 Ramesh Adig——他们不断地鼓励我, 帮助我。非常感谢 R Ravindra Kumar 先生(Thiruvananthapuram 市高级计算研发中心 CDAC 高级主任, CDAC 是 ER & DCI 的前身), 他使我有机会参与 CDAC 硬件设计小组的工作; 感谢 K G Sulochana 夫人(Thiruvananthapuram 市 CDAC 联席主任), 她是我职业生涯的引路人, 使我能够第一次负责嵌入式项目, 并为我在 CDAC 工作期间提供了很大的帮助与支持。我还要感谢 Biju C Oommen 先生(Thiruvananthapuram 市 CDAC 硬件设计小组主任助理), 他给了我极大灵感, 我从他那里学到了嵌入式技术的基本课程。还要感谢 S Krishna Kumar Rao 先生、Sanju Gopal 先生、Deepa R S 女士、Shaji N M 先生和 Suresh R Pillai 先生, 他们为我在 CDAC 期间的研究活动提供了帮助。感谢 Praveen V L 先生, 他为本书的图像设计提供了极大帮助。我还要衷心感谢我所有的朋友以及之前在 Thiruvananthapuram 市 CDAC 硬件设计小组的同事——没有他们的帮助与支持, 本书是不可能完成的。最后感谢好友 Sreeja 博士, 在我努力工作的过程中, 他在精神上给予我很大的支持; 还要感谢我的家庭成员, 他们在我著书期间给予了极大的理解与支持。

特别感谢 S Krishnakumar Rao 先生(Thiruvananthapuram 市 CDAC 硬件设计小组副主任), 他帮助收集了本书有关 VLSI 设计的章节; 感谢 Shammeerudheen P T 先生, 他帮助收集了本书有关使用 Orcad 布局工具设计 PCB 的章节。

我要特别感谢下列各界人士, 对于与本书相关的产品开发、服务公司、半导体厂商以及产品信息网页, 他们整理并提供了及时的反馈意见。

Angela Williams, Keil 软件公司

Natasha Wan、**Jessen Wehrwein** 和 **Scott Wayne**, AD 公司

Derek Chan, Atmel 亚洲分公司

Moe Rubenzahl, Maxim/Dallas 半导体公司

Mark Aaldering 和 **Theresa Warren**, Xilinx 公司

Anders Edholm, Electrolux 公司

Vijayeta Karol, 印度 Siel 本田汽车有限公司

Mark David, 《电子设计》杂志

Vidur Naik, Adidas 印度分公司

Steven Kamin, Cadence 设计系统

Deepak Pingle 和 **Pralhad Joshi**, Advanced Micronic Devices Limited(AMD L)公司

Regina Kim, WIZnet 公司

Taranbir Singh Kochar, 西门子印度分公司

Crystal Whitcomb, Linksys 公司——Cisco 公司下属的子公司

Kulbhushan Seth, Casio 印度分公司

Jitesh Mathur 和 **Meggy Chan**, Philips 医疗系统

John Symonds, Burn 技术有限公司

Citron Chang, Advantech 器材公司

Michael Barr, Netrino Consultants Networks

Peggy Vezina, GM 传媒

David Mindell, MIT

Frank Miller, Pulsar.gs

Gautam Awasthi, Agilent 印度分公司

还要感谢为本书提出宝贵意见的审阅人员, 他们是:

Jayesh Sharma, Uttar Pradesh 的 Hindustan 技术与管理学院

Meenakshi Kaul, Indore 的 IPS 学院, 计算机与电子系

Mohit Singh, Uttar Pradesh 的 Meerut 工程与技术学院

Kinnar Vaghela, Gujarat Modasa, 管理过程学院

Seema Varshney, Uttar Pradesh 的 Hindustan 技术与管理学院

Prakash Kumar, Uttar Pradesh 的 Jaypee 信息技术学院

Megha Khatri, Gurgaon 的 Ansal 大学

Subrajit Mohapatra, BIT, Mesra, JharkHand

最后感谢 McGraw-Hill 出版社印度分部的出版小组, 具体包括 Vibha Mahajan、Piyush Priyadarshi、Suhaib Ali 和 Kritika Lakhera, 他们在书籍出版管理方面的高效与敬业态度给我留下了深刻印象。

Shibu Kizhakke Vellathai

前言

青年学生与实践工程师普遍存在这样一个误解：嵌入式系统设计就是编写 C 代码。这样的理解是完全错误的，这里必须强调——嵌入式系统设计是指设计嵌入式硬件，并使用 C 语言或其他支持语言设计嵌入式固件，然后对硬件和固件进行系统集成，并对系统功能进行测试。

嵌入式系统设计是电子工程领域中一个非常专业的分支，该分支集合了电子学的技术优势与机械工程的专业设计技术，将前沿科技和高端产品引入多个不同领域，如消费类电子产品、无线电通信、汽车、零售行业以及银行业等。嵌入式系统是计算机硬件与软件的整合体，其中，软件编程用于开发专用的计算机系统，设计执行一项或多项特定功能。

嵌入式产业在全球范围内提供了大量工作机会。嵌入式系统设计是一门艺术，需要有能力的人才迎接其设计挑战，并时刻关注产品设计的时间范围。嵌入式产业当今面临的最大挑战就是该领域缺乏拥有熟练技术的人员。虽然电子与计算机科技工程专业的大多数大学毕业生有天赋也有才能，但他们在嵌入式领域缺少正确的培训，往往对嵌入式系统缺乏必需的理解。此外，缺少合适的学习教材与读物也是造成上述危机的主要原因之一。尽管业界已经出版了许多介绍嵌入式技术的书籍，但这些书籍往往并未使用通俗易懂的系统化方法向读者普及嵌入式系统的基础知识；这些书籍更多是从深奥的专业领域入手，只适用于专业对口的实践工程师。

本书是一本入门书籍，向学生全面介绍了嵌入式系统，并且可以作为实践工程师与项目经理的技术指南，开创了此类书籍的先河。本书可以用作计算机科学与工程、信息技术、电气工程、电子学与通信工程、仪表与控制工程等专业的本科教程，也可以作为计算机科学/信息技术/电子学专业的理学学士/理学硕士/工学硕士、计算机应用硕士以及备考印度计算机等级考试(DOEACC)B 级的学生的重要参考资料。

本书介绍嵌入式系统的基础知识、嵌入式硬件与固件的设计与开发步骤(包括硬件与固件的系统集成)以及嵌入式系统开发生命周期管理知识。第 1 章~第 4 章介绍嵌入式系统的基本知识。第 5 章~第 13 章介绍有关嵌入式硬件与固件设计的进阶知识，对于嵌入式系统的实践工程师来说，这些知识是非常有帮助的。第 15 章说明了嵌入式系统设计的生命周期，该章的内容对实践工程师和项目经理都是有益的。每章开头列出学习目标，然后使用简明的文字说明以及大量的表格、图例、例题解答来阐明相应概念。每章的末尾列出重要知识点，其中包括本章小结、重要术语、课后习题(多项选择题)以及复习题。为了方便学生在实验室也能进行相关的实验，本书还在相关章节提供了实验练习题。本书附录介绍了 PIC 与 AVR 系列微控制器，以及 ARM 处理器，列举了贴近实际的最新嵌入式设计案例，将使你受益匪浅。

本书主要特色如下:

- 给出了学习嵌入式系统的全新方法。本书将嵌入式系统视为一个整体,说明其定义、组成结构、注意事项以及嵌入式系统设计的完整过程与方法。
- 采用面向设计与面向开发的方法,详细说明 Keil Micro Vision(即嵌入式系统/集成开发环境)、ORCAD(PCB 设计软件工具)以及 PCB(Printed Circuit Board, 印刷电路板)制造技术。
- 列举实际应用,比如洗衣机、汽车、步进电机以及其他输入/输出设备接口电路。
- 基于嵌入式 C 语言的编程概念,深入研究基础知识,揭示更高级的概念。
- 全面描述 8051 微控制器架构以及汇编语言编程。
- 详细说明 RTOS 内部机理、多任务、任务管理、任务调度、任务通信与同步。对于各种任务调度策略都列举了大量的相关实例。
- 全面说明 MicroC/OS-II 与 VxWorks 的 RTOS 内核。
- 行文清晰易懂,着重强调实例与图表。
- 对于不是很熟悉嵌入式系统及其应用的实践工程师来说,本书是非常有用的参考书。
- 丰富的教学特色,包括课后习题、实验练习题、例题解答以及复习题。

感兴趣的学生、教师以及专业人员可以进一步访问本书在互联网上的在线学习中心——<http://www.mhhe.com/shibu/es2e>。该网址提供了与本书相关的有价值的学习资料。

在线学习中心为教师提供了以下资料:

- 各章的 PowerPoint 幻灯片
- 有关嵌入式编程语言 C++/Java 的简要介绍
- 书中给出的学习案例
- 各章的习题参考答案
- 小问题与小测验,包括填空题、判断题和多项选择题(共 25 道题),以及附带答案的编程题(共 5 道题,难度级别较高)
- 与各章内容相关的重要网址及文字材料的链接
- 数字步数计
- Micro/OSIII
- 用 TI MSP430 RISC 微控制器进行设计

在线学习中心为学生提供了以下资料:

- 各章的内容提要
- 有关嵌入式编程语言 C++/Java 的简要介绍
- 书中给出的学习案例
- 本书课后习题与部分复习题的答案,以及各章实验练习题的提示
- 数字步数计
- Micro/OSIII 的其他详细阅读材料
- 用 TI MSP430 RISC 微控制器进行设计
- 小问题与自测题,包括填空题、判断题和多项选择题(共 25 道题),以及附带答案的编程题(共 5 道题,难度级别容易/中等)
- 项目概念清单

- 与各章内容相关的重要网址及文字材料的链接

有兴趣获取这些信息的读者，可填写书末的“麦格劳-希尔教育教师服务表”，与销售代表联系获取。

本书的编写完全基于我在嵌入式硬件与固件设计领域多年工作的知识积累，以及在嵌入式系统生命周期管理方面掌握的专业技术。书中使用了一些摘自互联网的文字描述与图像，作者已经事先与相关作者或网站取得联系，并获得了版权许可。

关于器件的设计参考和数据手册(包括本书相关应用实例引用的参数)，都摘自下面的网址。通过访问这些网址，读者可以获得相关设计文章的更新以及更多信息。此外，读者还可以从这些网站订购一些免费的样例，从而方便自己的设计。

www.intel.com	Intel 公司
www.maxim-ic.com	Maxim/Dallas 半导体公司
www.atmel.com	Atmel 公司
www.analog.com	AD 公司
www.microchip.com	Microchip 技术公司
www.ti.com	TI 公司
www.nxp.com	NXP 半导体公司
www.national.com	National 半导体公司
www.fairchildsemi.com	Fairchild 半导体公司
www.intersil.com	Intersil 公司
www.freescale.com	Freescale 半导体公司
www.xilinx.com	Xilinx 公司(提供可编程器件)
www.orcad.com	Cadence 系统公司(提供 Orcad 工具)
www.keil.com	Keil 公司(提供 Micro Vision 3 IDE)
www.embedded.com	《在线嵌入式》杂志
www.electronicdesign.com	《电子设计》杂志

我非常期待你给本书提出建议，以改进本书，请将建议发送到 info.india@mheducation.com。请在标题行里添加本书的书名和作者。祝你拥有愉快的职业生涯！

本书编排形式

学习目标

每章开头都列出学习目标，读者在掌握了该章内容后，应该能够达到这些学习目标。

学习目标标记

每章的这个内容表示本章要达到哪个特定的学习目标，还帮助学生确定章节对这些目标的重要性。

节和小节

每章都分为节和小节，以便在学习概念的过程中有条理地研究各个主题。

例题解答

例题解答出现在各章节合适的位置，有助于读者理解嵌入式硬件与固件设计的基本原理。

照片

重要概念、设计与架构的照片向读者直观展示了相应的实物。

图示说明

准确有效的图示说明向读者展示了嵌入式系统设计中的概念、设计问题及步骤。

小结与重要术语

每章的最后是带有学习目标的小结，重温该章各主题的要点，重要术语则列出了该章重要的术语说明。

课后习题与复习题

通过以多项选择的方式解答课后习题，读者可以评测自己的学习情况。通过解答复习题，学生可以进一步应用和结合该章的内容。它们加上了该章的学习目标标记。

实验练习题

为指导学生在实验室更好地开展实验，在相关章节的末尾给出了实验练习题。

研究案例

本书末尾给出了4个研究案例，展示了理论概念的应用。

各种微处理器和控制器系列的附录说明

附录简单介绍了PIC系列微控制器、AVR系列微控制器以及ARM处理器。

目 录

第 I 部分 理解嵌入式系统的基本概念

第 1 章 嵌入式系统简介.....3

- 1.1 嵌入式系统的含义.....3
- 1.2 对比嵌入式系统与通用
计算系统.....4
- 1.3 嵌入式系统的发展历程.....5
- 1.4 嵌入式系统的分类.....6
 - 1.4.1 基于时代的分类.....6
 - 1.4.2 基于复杂度和性能的分类.....7
- 1.5 嵌入式系统的主要应用领域.....7
- 1.6 嵌入式系统的用途.....8
 - 1.6.1 数据的采集、存储与显示.....8
 - 1.6.2 数据通信.....9
 - 1.6.3 数据(信号)处理.....10
 - 1.6.4 监测.....10
 - 1.6.5 控制.....10
 - 1.6.6 专用用户界面.....11
- 1.7 可穿戴设备——嵌入式技术与
生活方式的创新结合.....11
- 1.8 本章小结.....12
- 1.9 重要术语.....13
- 1.10 课后习题.....14
- 1.11 复习题.....14

第 2 章 典型的嵌入式系统.....15

- 2.1 嵌入式系统的内核.....17
 - 2.1.1 通用处理器与专用处理器.....17

- 2.1.2 专用集成电路.....24
- 2.1.3 可编程逻辑器件.....25
- 2.1.4 商用现货.....26
- 2.2 存储器.....27
 - 2.2.1 程序存储器.....27
 - 2.2.2 读-写存储器/随机存取
存储器.....29
 - 2.2.3 基于接口类型的存储器
分类.....31
 - 2.2.4 存储器映射.....31
 - 2.2.5 嵌入式系统中的存储器
选型.....32
- 2.3 传感器与激励器.....33
 - 2.3.1 传感器.....34
 - 2.3.2 激励器.....34
 - 2.3.3 I/O 子系统.....34
- 2.4 通信接口.....42
 - 2.4.1 板上通信接口.....43
 - 2.4.2 外部通信接口.....48
- 2.5 嵌入式固件.....56
- 2.6 系统其他元件.....57
 - 2.6.1 复位电路.....57
 - 2.6.2 欠压保护电路.....58
 - 2.6.3 振荡器.....58
 - 2.6.4 实时时钟.....59
 - 2.6.5 看门狗定时器.....59
- 2.7 PCB 与无源元件.....60
- 2.8 本章小结.....60

2.9 重要术语	62	第 5 章 使用 8 位微控制器 8051 设计 嵌入式系统	87
2.10 课后习题	64	5.1 控制器选型时需要考虑的 因素	88
2.11 复习题	67	5.1.1 功能集合	88
2.12 实验练习题	68	5.1.2 运行速度	88
第 3 章 嵌入式系统的特征与质量 属性	69	5.1.3 代码存储空间	88
3.1 嵌入式系统的特征	69	5.1.4 数据存储空间	88
3.1.1 面向特定应用和特定领域	69	5.1.5 开发环境支持	88
3.1.2 反馈与实时性	70	5.1.6 可用性	89
3.1.3 能在恶劣环境中工作	70	5.1.7 功耗	89
3.1.4 分布式	70	5.1.8 成本	89
3.1.5 尺寸小、重量轻	71	5.2 选用 8051 微控制器的原因	89
3.1.6 低功耗、节能	71	5.3 基于 8051 的设计	89
3.2 嵌入式系统的质量属性	71	5.3.1 8051 的基本架构	89
3.2.1 工作模式下的质量属性	71	5.3.2 存储器结构	90
3.2.2 非工作模式下的质量属性	73	5.3.3 寄存器	96
3.3 本章小结	75	5.3.4 振荡器	98
3.4 重要术语	76	5.3.5 端口	99
3.5 课后习题	76	5.3.6 中断	114
3.6 复习题	78	5.3.7 8051 中断系统	115
第 4 章 嵌入式系统——面向特定应用与 特定领域	79	5.3.8 定时器	125
4.1 洗衣机——面向特定应用的嵌 入式系统	79	5.3.9 串口	132
4.2 汽车——面向特定领域的嵌入式 系统	81	5.3.10 复位电路	143
4.2.1 汽车嵌入式系统工作的内部 情况	81	5.3.11 省电节能模式	144
4.2.2 汽车通信总线	82	5.4 8052 微控制器	148
4.2.3 汽车嵌入式市场上的主流 厂商	83	5.5 8051/52 的衍生产品	148
4.3 本章小结	85	5.5.1 Atmel 公司的 AT89C51RD2/ED2	149
4.4 重要术语	85	5.5.2 Maxim 公司的 DS80C320/DS80C323	149
4.5 课后习题	86	5.6 本章小结	149
4.6 复习题	86	5.7 重要术语	151
		5.8 课后习题	151
		5.9 复习题	155
		5.10 实验练习题	157

第 6 章 基于 8051 微控制器的编程	159
6.1 8051 支持的各种寻址模式	160
6.1.1 直接寻址	160
6.1.2 间接寻址	160
6.1.3 寄存器寻址	161
6.1.4 立即寻址	162
6.1.5 索引寻址	162
6.2 8051 指令集	166
6.2.1 数据传输指令	166
6.2.2 算术运算指令	171
6.2.3 逻辑指令	178
6.2.4 布尔运算指令	183
6.2.5 程序控制转移指令	185
6.3 本章小结	187
6.4 重要术语	188
6.5 课后习题	189
6.6 复习题	195
6.7 实验练习题	196
第 7 章 软硬件协同设计与程序建模	197
7.1 软硬件协同设计的基本概念	198
7.2 嵌入式设计的计算模型	199
7.2.1 数据流程图模型	200
7.2.2 控制数据流程图	200
7.2.3 状态机模型	201
7.2.4 顺序程序模型	204
7.2.5 并发处理模型/通信处理模型	206
7.2.6 面向对象模型	207
7.3 统一建模语言简介	208
7.3.1 UML 构建块	208
7.3.2 UML 工具	212
7.4 软硬件权衡	212
7.5 本章小结	213
7.6 重要术语	214
7.7 课后习题	215
7.8 复习题	216
7.9 实验练习题	217

第 II 部分 嵌入式产品的设计与开发

第 8 章 嵌入式硬件设计与开发	223
8.1 模拟电子元件	224
8.2 数字电子元件	225
8.2.1 集电极开路与三态输出	225
8.2.2 逻辑门	226
8.2.3 缓冲器	227
8.2.4 锁存器	227
8.2.5 译码器	228
8.2.6 编码器	228
8.2.7 多路复用器	229
8.2.8 多路输出选择器	230
8.2.9 组合电路	230
8.2.10 时序电路	232
8.3 VLSI 与集成电路设计	236
8.4 电子设计自动化工具	241
8.5 OrCAD EDA 工具的用法	242
8.6 使用 OrCAD 的 Capture CIS 工具实现电路图设计	242
8.6.1 电路图绘制窗口	245
8.6.2 电路图绘图工具	245
8.6.3 电路图绘制明细	249
8.6.4 创建元件编号	251
8.6.5 设计规则检查	252
8.6.6 创建材料清单	253
8.6.7 创建网表	254
8.7 PCB 布局布线设计	257
8.7.1 布局布线构建块	257
8.7.2 使用 OrCAD 布局布线工具完成布局布线设计	262
8.7.3 PCB 布局布线准则	277
8.8 印刷电路板制造	278
8.8.1 各种类型的 PCB	278
8.8.2 PCB 制造方法	279
8.8.3 PCB 设计完成后, 电路板外形及其调试测试	280
8.9 本章小结	283
8.10 重要术语	284

8.11 课后习题	285	10.6 结合使用线程、进程与调度	410
8.12 复习题	288	10.7 任务通信	414
8.13 实验练习题	289	10.7.1 存储器共享	415
第9章 嵌入式固件设计与开发	293	10.7.2 消息传递	421
9.1 嵌入式固件设计方法	294	10.7.3 远程过程调用与套接字	426
9.1.1 基于超循环的方法	294	10.8 任务同步	430
9.1.2 基于嵌入式操作系统的方法	296	10.8.1 任务通信/同步问题	430
9.2 嵌入式固件开发语言	296	10.8.2 任务同步技术	442
9.2.1 基于汇编语言的开发	296	10.9 设备驱动程序	460
9.2.2 基于高级语言的开发	303	10.10 选择 RTOS 的方法	462
9.2.3 汇编语言与高级语言混合编程	305	10.10.1 功能性需求	462
9.3 嵌入式 C 编程	308	10.10.2 非功能性需求	463
9.3.1 对比 C 语言与嵌入式 C 语言	308	10.11 本章小结	464
9.3.2 对比编译器与交叉编译器	308	10.12 重要术语	466
9.3.3 在嵌入式 C 编程中使用 C 语言	309	10.13 课后习题	468
9.4 本章小结	358	10.14 复习题	479
9.5 重要术语	359	10.15 实验练习题	483
9.6 课后习题	360	第11章 基于 VxWorks 与 MicroC/OS-II RTOS 的嵌入式系统设计简介	485
9.7 复习题	365	11.1 VxWorks	486
9.8 实验练习题	367	11.1.1 任务创建与管理	486
第10章 基于实时操作系统的嵌入式系统设计	369	11.1.2 任务调度	489
10.1 操作系统基础知识	370	11.1.3 内核服务	489
10.2 操作系统分类	374	11.1.4 任务间通信	490
10.2.1 通用操作系统	374	11.1.5 任务同步与互斥	494
10.2.2 实时操作系统	374	11.1.6 中断处理	497
10.3 任务、进程与线程	379	11.1.7 监控任务执行的看门狗	499
10.3.1 进程	379	11.1.8 定时与定时基准	500
10.3.2 线程	381	11.1.9 VxWorks 开发环境	500
10.4 多处理与多任务	390	11.2 MicroC/OS-II	500
10.5 任务调度	391	11.2.1 任务创建与管理	500
10.5.1 非抢占式调度	393	11.2.2 内核函数与初始化	506
10.5.2 抢占式调度	401	11.2.3 任务调度	507
		11.2.4 任务间通信	509
		11.2.5 互斥与任务同步	514
		11.2.6 定时与定时基准	524
		11.2.7 存储器管理	525

11.2.8	中断处理	525	13.5.1	放大镜	589
11.2.9	MicroC/OS-II 开发环境	527	13.5.2	万用表	589
11.3	本章小结	527	13.5.3	数字 CRO	589
11.4	重要术语	528	13.5.4	逻辑分析仪	590
11.5	课后习题	529	13.5.5	函数生成器	590
11.6	复习题	531	13.6	边界扫描	590
11.7	实验练习题	532	13.7	本章小结	592
第 12 章	嵌入式硬件与固件的集成与测试	537	13.8	重要术语	593
12.1	硬件与固件的集成	538	13.9	课后习题	593
12.1.1	离线编程	538	13.10	复习题	595
12.1.2	在系统编程	540	13.11	实验练习题	595
12.1.3	在应用编程	541	第 14 章	产品外壳设计与开发	597
12.1.4	使用厂家编程芯片	542	14.1	产品外壳设计工具	598
12.1.5	对基于操作系统的器件实现固件加载	542	14.2	产品外壳开发技术	598
12.2	电路板加电	542	14.2.1	外壳手工设计	598
12.3	本章小结	543	14.2.2	快速原型开发	599
12.4	重要术语	544	14.2.3	加工与制模	599
12.5	复习题	544	14.2.4	金属薄板	600
第 13 章	嵌入式系统开发环境	545	14.2.5	商用现货外壳	600
13.1	集成开发环境	546	14.3	本章小结	600
13.1.1	基于 8051 的 Keil μ Vision	547	14.4	重要术语	602
13.1.2	嵌入式系统开发 IDE 概述	570	14.5	课后习题	602
13.2	交叉编译过程中生成的各种文件	572	14.6	复习题	602
13.2.1	列表文件(LST)	572	第 15 章	嵌入式产品开发生命周期	603
13.2.2	预处理器输出文件	575	15.1	EDLC 的含义	604
13.2.3	目标文件(OBJ)	575	15.2	EDLC 的作用	604
13.2.4	Map 文件(MAP)	575	15.3	EDLC 的目标	604
13.2.5	Hex 文件(HEX)	578	15.3.1	保障产品质量	605
13.3	反汇编器与反编译器	580	15.3.2	通过管理降低风险并预防缺陷	605
13.4	模拟器、仿真器与调试	581	15.3.3	提高生产效率	606
13.4.1	模拟器	581	15.4	EDLC 的各个阶段	606
13.4.2	仿真器与调试器	582	15.4.1	需求	607
13.5	目标硬件调试	589	15.4.2	概念成型	608
			15.4.3	分析	610
			15.4.4	设计	612
			15.4.5	开发与测试	613
			15.4.6	部署	614

15.4.7	支持	615	16.3.2	基于.NET CF 的嵌入式 开发	631
15.4.8	升级	616	16.4	开放式标准、框架与联盟	632
15.4.9	退市	616	16.4.1	开放式移动联盟	632
15.5	EDLC 方法(EDLC 建模)	617	16.4.2	开放式手机联盟	632
15.5.1	线性/瀑布模型	617	16.4.3	Android	632
15.5.2	迭代/增量模型(也称为喷泉 模型)	618	16.4.4	Tizen	632
15.5.3	原型/演化模型	619	16.5	瓶颈	633
15.5.4	螺旋模型	620	16.5.1	性能、电源优化和热量 管理	633
15.6	本章小结	621	16.5.2	缺少标准或标准执行力度 不够	633
15.7	重要术语	622	16.5.3	缺少专业的人力资源	633
15.8	课后习题	623	16.6	开发平台的发展趋势	633
15.9	复习题	624	16.6.1	Arduino	634
第 16 章	嵌入式产业发展趋势	625	16.6.2	BeagleBone	634
16.1	嵌入式系统处理器发展 趋势	625	16.6.3	Sharks Cove	634
16.1.1	片上系统	626	16.6.4	MinnowBoard MAX	634
16.1.2	系统级封装	627	16.6.5	Raspberry Pi	634
16.1.3	多核处理器/片上多 处理器	627	16.6.6	英特尔的 Galileo Gen 2	635
16.1.4	可重构处理器	628	16.7	云、物联网和嵌入式系统—— 未来的重要发展	635
16.2	嵌入式操作系统发展趋势	628	附录 A	PIC 系列微控制器、AVR 系列 微控制器、ARM 处理器 简介	637
16.3	开发语言发展趋势	629	附录 B	设计案例研究	655
16.3.1	基于 Java 的嵌入式 开发	629			

理解嵌入式系统的基本概念

在学习任何一门学科的时候，理解其基本概念都是相当重要的。如果你已经熟悉了基本原理，那么设计嵌入式系统(Embedded System)并非是难以完成的任务。与所有通用计算机系统类似，嵌入式系统也拥有一个特征集合，只不过这些特征对于特定的嵌入式系统而言是唯一的。

与通用计算机系统相比，嵌入式系统本质上是瞄准高端领域和专业应用的；也就是说，嵌入式系统特别设计用于特定领域的特定应用集合，如消费类电子产品、电信、汽车、工业控制、测量系统等。与通用计算机系统不同的是，嵌入式系统设计用于满足特定领域的应用需求，通常不可以使用适用于其他领域的嵌入式系统来替换特定领域的嵌入式系统。嵌入式系统设计人员应该特别注意嵌入式系统的特征、系统面向的领域以及系统的特定应用。

嵌入式系统是一种电气/电子机械系统，旨在满足特定领域的应用需求。它是专用硬件与固件(即软件)的组合，通过裁剪来满足特定的应用需求。嵌入式系统包括处理单元、I/O 子系统、板上通信接口与外部通信接口，以及其他监测系统与支撑单元。

其中，处理单元可以是微处理器、微控制器、片上系统(System on Chip, SoC)、专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)、专用标准产品(Application Specific Standard Product, ASSP)、可编程逻辑器件(Programmable Logic Device, PLD，常用的 PLD 包括 FPGA、CPLD 等)；I/O 子系统有助于传感器和激励器的接口连接，用作嵌入式系统与外界(real world)交互消息的接口；板上通信接口与外部通信接口则是各个子系统之间的通信接口，这些子系统包括构建嵌入式系统的各种板上子系统、芯片，以及与嵌入式系统交互的外部系统；其他监测系统与支撑单元能够启动并监测嵌入式系统的功能，比如看门狗定时器、复位电路、欠压保护电路、稳压电源单元、时钟生成电路等。

嵌入式系统设计由两个方面组成：一方面是硬件设计，包括处理单元、各种 I/O 子系统、通信接口的选型，以及各部分之间的相互连接；另一方面是嵌入式固件设计，完成各种子系统的配置，实现数据通信与处理/控制算法。

根据嵌入式系统设计的响应时间需求和应用类型，嵌入式系统可以分为实时(real-time)系统与非实时系统。实时系统的响应时间需求是至关重要的，比如汽车的驾驶控制系统(Flight Control System)和安全气囊展开系统(Airbag Deployment System)等，在硬件设计与固件设计过程中必须考虑其响应时间需求；另一方面，非实时系统的响应时间需求则没那么重要，比如自动取款机(Automatic Teller Machine, ATM)和媒体播放系统(Media Playback

System)等——在上述系统中，错失截止时间是可以接受的。

与其他系统类似，嵌入式系统也有一组质量属性，这些属性并非功能性需求，比如保密性、可伸缩性、可用性、可维护性、安全性、可移植性等。嵌入式系统的非功能性需求应该是明确的，在系统设计时就应该予以重视。嵌入式系统设计人员应该特别注意嵌入式系统的各种非功能性需求，在设计过程中进行正确处理，从而确保产品具有较高质量。

本书第 I 部分浓墨重彩地介绍嵌入式系统的基本概念。本部分的教学内容按照以下方式进行组织：全面介绍嵌入式系统及其应用领域与实际应用，分析典型嵌入式系统的各种要素，说明嵌入式系统的特征与质量指标、嵌入式系统面向领域与面向应用的使用实例以及嵌入式系统软硬件协同设计方法，详细介绍 8051 微控制器(本书设计实例选用的 8 位微控制器)的架构与编程概念。下面将从“嵌入式系统简介”开始本书的第 I 部分。

嵌入式系统简介



学习目标

- LO1 学习嵌入式系统的含义
- LO2 学习嵌入式系统与通用计算系统的差异
- LO3 了解嵌入式系统的发展历程
- LO4 基于性能、复杂度以及所处的时代对嵌入式系统进行分类
- LO5 了解嵌入式系统的应用领域
- LO6 理解嵌入式系统的应用目的
- LO7 嵌入式技术已被广泛应用于人们的生活，使用真实生活中的嵌入式产品进行分析

在日常生活中，人们对嵌入式系统与数字技术的依赖程度日益增强。嵌入式技术已经融入日常生活中，甚至连人们自己都很难察觉。比如，居家使用的电冰箱、洗衣机、微波炉、空调、电视机、DVD 播放器以及音响系统等，你是否知道上述电器都是基于嵌入式系统的？再比如，你可能乘坐过本田、丰田或福特牌小汽车，这些汽车为你提供了专业服务和安全系统；但是，你是否曾经考虑过这些便捷背后的科技含量？上述功能正是由智能嵌入式系统提供的。在汽车内部存在专门的嵌入式系统，包括智能车灯控制器、引擎控制器、点火控制系统乃至复杂的气囊控制系统(当发生意外时，可以保护乘客的生命安全)。

尽管人们体验到了嵌入式系统的卓越功能，享受到了它们所提供的舒适服务，但是大多数使用者完全不知道或者很容易忽略嵌入式系统的存在——正是智能嵌入式系统给予我们如此多的保护，让我们的生活更舒适。嵌入式系统就像是忠实的仆人：它们不喜欢暴露自己的身份，也不会向主人抱怨；它们总是隐藏在人们看不见的地方，专心致志地完成主人分配的任务与工作。本书将简要介绍嵌入式系统，简述嵌入式系统设计与开发的各个步骤以及嵌入式系统的主要应用领域。

1.1 嵌入式系统的含义

LO1 学习嵌入式系统的含义

嵌入式系统是一种电气/电子-机械系统，设计用于执行特定的功能，是硬件与固件(即软件)结合的产物。

每个嵌入式系统都是唯一的，其硬件和固件都专门应用于特定领域。在当前各个领域中，嵌入式系统都在成为任何产品/设备(包括家用电器、无线电通信、医疗设备、工业控制、消费类产品等)不可缺少的部分。

1.2 对比嵌入式系统与通用计算系统

LO2 学习嵌入式系统与通用计算系统的差异

计算领域的革新起始于通用计算需求。随后人们认识到通用计算需求并不能充分满足嵌入式计算需求。嵌入式计算为了能够实时响应激励，需要满足某些特殊要求，比如计算截止时间、电源效率、有限的可用内存空间等。下面以个人电脑(Personal Computer，简称 PC，可能是台式 PC 机、膝上型 PC 机或掌上型 PC 机)为例进行说明。

PC 机围绕通用处理器进行构建，常用的通用处理器有 Intel Centrino、Duo/Quad¹ 内核、AMD A 系列处理器等，其设计不仅支持一组外围设备(比如多个 USB 2.0 端口、Wi-Fi、以太网、视频端口、IEEE 1394、SD/CF/MMC 外部接口、蓝牙等)，而且具有额外的接口(比如 CD 可读/写光驱、板上硬盘驱动器、GB 段 RAM 等)。可以将任何支持的操作系统(比如 Windows 8.X/10、Red Hat Linux/Ubuntu Linux、UNIX 等)加载到 PC 机的硬盘上。可为 PC 机编写或购买大量应用程序，并在 PC 机运行(比如，利用连接到 PC 机上的打印机和配套软件打印爱人的照片、使用 Microsoft Office Word 工具创建文档等)。

现在我们考虑播放 DVD 电影所使用的 DVD 播放器。你能否改变 DVD 的操作系统？能否编写应用程序并下载到 DVD 播放器中执行？能否将打印软件添加到 DVD 播放器，连接打印机到 DVD 播放器上，并且打印输出照片？能否通过修改嵌入式软件的方式，将 DVD 播放器的功能变为电视机？显然，上面所有问题的答案都是否定的。在 DVD 播放器上，能否看到任何通用接口(比如蓝牙或 Wi-Fi)？答案当然也是否定的。DVD 播放器上能够找到的接口都是固定的：将 DVD 播放器连接到显示器的接口，以及控制 DVD 播放器的遥控接口(可能是红外线接口，也可能是特定的无线接口)。

事实上，DVD 播放器是一种嵌入式系统，专门设计用于解码数字视频，生成视频信号，输出到电视机或支持该 DVD 播放器显示接口的其他显示器。表 1-1 对上述事实进行总结，对比了嵌入式系统与通用计算系统。

表 1-1 嵌入式系统与通用计算系统对照表

通用计算系统	嵌入式系统
由普通硬件与通用操作系统构成的系统，可以执行各种应用程序	由专用硬件与嵌入式操作系统构成的系统，专门执行特定的应用程序
包含通用操作系统(General Purpose Operating System, GPOS)	根据功能的不同，可能包含操作系统，也可能不包含操作系统
系统应用程序是用户可编程的，终端用户可以重装操作系统，也可以添加或删除用户应用程序	嵌入式系统的固件是预编程的，终端用户不可以更改。不过，对于某些支持 OS 内核的系统，可通过特殊硬件设置完成更新

1. 这里列出的内容基于截止 2015 年 12 月可用的处理器。由于处理器技术突飞猛进，因此这里提到的处理器名称在未来有可能发生变化。

(续表)

通用计算机系统	嵌入式系统
在系统选型的时候,性能是关键的决定性因素。一般说来,速度越快越好	特定应用需求(比如性能、功率需求、内存使用等)是关键的决定性因素
很少或不需要通过降低配置来减少系统运行的功耗需求,具有不同级别的电源管理方案	系统往往经过了大量裁减,可在硬件与操作系统的支持下在省电模式下工作
响应时间需求不是至关重要的	对于特定类型的嵌入式系统而言(比如任务关键系统),响应时间需求是至关重要的
系统执行的功能不需要是确定性的	对于特定类型的嵌入式系统而言(比如硬实时系统),执行的功能是确定性的

不过,在嵌入式应用的特定领域中,桌面系统与嵌入式系统之间的差异在某些环境下正在变小。智能电话就是一个典型实例。当前的智能电话, RAM 存储空间多达 2GB~3GB, 用户可以将其大多数桌面应用程序扩展并移植到智能电话中;移动嵌入式设备并没有遵循嵌入式系统的特征“嵌入式系统设计用于特定应用”。但智能电话往往使用内置操作系统,这是终端用户无法更改的——这说明在移动嵌入式设备中,“嵌入式系统的固件是终端用户不可更改的”这条规则仍然是有效的。

1.3 嵌入式系统的发展历程

LO3 了解嵌入式系统的发展历程

在 IT 技术革新之前,嵌入式系统就已经出现了。那时,嵌入式系统的构建基于古老的电子管和晶体管技术,嵌入式算法的开发则使用底层语言。随着半导体和纳米技术的发展进步,以及 IT 技术的不断革新,这些都为嵌入式系统小型化提供了发展基础。

目前公认的第一个现代嵌入式系统是阿波罗导航计算机(Apollo Guidance Computer, AGC),由麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)仪器实验室开发,用于月球探测。它是一个惯性导航系统,其运行主要基于命令模块(Command Module, CM)和登月模块(Lunar Excursion Module, LEM)。命令模块设计用于围绕月球运行,而登月模块则设计用于月球表面安全着陆。登月模块共有 18 个引擎,包括 16 个反作用控制推进器、1 个降落引擎和 1 个爬升引擎。降落引擎为登月模块提供了推进动力,从而可以偏离绕月运行轨道,最终安全降落在月球上。

MIT 的初始设计基于 4K 字的固定内存,即只读存储器(Read Only Memory, ROM);以及 256 字的可擦除内存,即随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)。到 1963 年 6 月,上述内存增加到了 10K 字的固定存储器和 1K 字的可擦除存储器。最终配置是 36K 字的固定存储器和 2K 字的可擦除存储器。

在 AGC 中使用的第一款微芯片原型,其时钟频率是 1.024MHz,来源于 2.048MHz 的时钟振荡器。AGC 的计算单元约包含 11 条指令和 16 位字逻辑。在上述设计中,FairChild 半导体公司提供了约 5000 片集成电路(3 输入的或非门,RTL 逻辑)。AGC 的用户界面单元称为显示器/键盘(display/keyboard, DSKY)。DSKY 的外表类似于计算器的按键,排列了所需的数字阵列,用于以数字形式将命令输入到模块中。

首款大批量生产的嵌入式系统是 1961 年为 Minuteman-I 型导弹设计的导航计算机。这是一

款自动控制 D-17 型(Autonetics D-17)导航计算机, 采用离散晶体管逻辑进行构建, 使用硬盘作为主存储器。第一块集成电路于 1958 年 9 月生产, 但是直到 1963 年才出现使用集成电路的计算机。集成电路的一些早期应用出现在嵌入式系统中, 特别是美国国家航空宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)使用的阿波罗导航计算机以及美国军方使用的 Minuteman-II 型洲际弹道导弹。

1.4 嵌入式系统的分类

LO4 基于性能、复杂度以及所处的时代对嵌入式系统进行分类

基于不同标准, 可将嵌入式系统分为多个类别。在嵌入式系统分类中, 常用标准包括:

- (1) 基于时代
- (2) 基于复杂度和性能需求
- (3) 基于确定性行为
- (4) 基于触发方式

其中, 第 3 种分类标准基于确定性系统行为, 适用于实时系统。对于嵌入式系统, 其应用程序/任务执行的行为可以是确定的, 也可以是不确定的。基于系统的执行行为, 实时嵌入式系统可分为两类, 也就是硬(hard)实时与软(soft)实时。后续章节将进一步讨论有关硬实时系统与软实时系统的内容。

第 4 种分类标准考虑了嵌入式系统的反馈本质(类似于工业控制应用中的过程控制系统), 因此可以基于触发方式进行分类: 反馈系统可以是事件触发(event triggered)的, 也可以是时间触发(time triggered)的。下面进一步介绍前两种分类标准。

1.4.1 基于时代的分类

这里, 分类是按照嵌入式处理系统发展的时间顺序, 从第一代嵌入式系统一直到当今最新系统。按照这种标准, 嵌入式系统可以分为如下类别:

1. 第一代嵌入式系统

早期的嵌入式系统是围绕 8 位微处理器(比如 8085、Z80)和 4 位微控制器构建的。其硬件电路设计简单, 固件开发使用汇编代码。电话的数字按键、步进电机控制单元等, 就是第一代嵌入式系统的实例。

2. 第二代嵌入式系统

在第一代嵌入式系统之后, 第二代嵌入式系统围绕 16 位微处理器和 8/16 位微控制器构建。与第一代处理器/控制器相比, 第二代处理器/控制器的指令集要更复杂、更强大。一些第二代嵌入式系统中已经开始包含嵌入式操作系统, 以便更好地支持系统运行。数据采集系统(Data Acquisition System)、SCADA 系统等就是第二代嵌入式系统的实例。

3. 第三代嵌入式系统

随着处理器技术的进步, 嵌入式系统开发人员开始使用强大的 32 位处理器和 16 位微控制器来完成设计。嵌入式应用的新概念不断产生, 专用处理器/控制器开始出现, 比如数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)和专用集成电路。此时, 处理器的指令集变得更加复杂和强大, 指令流水线操作的概念进一步发展。

处理器市场上充斥着各个厂商提供的不同类型的处理器。其中, Intel Pentium、Motorola 68K 等处理器在高性能嵌入式应用领域引起了人们的广泛关注。专用嵌入式实时操作系统和通用操作系统开始进军嵌入式市场。嵌入式系统进一步将其市场扩展到机器人、传媒、工业过程控制、网络等领域。

4. 第四代嵌入式系统

片上系统(SoC)、可重构处理器以及多核处理器的出现, 为嵌入式器件市场带来了高性能、高集成、小型化的第四代产品。通过将处理器内核的不同功能整合到单块集成电路上, SoC 技术可在单块芯片上实现整个系统。稍后将讨论 SoC。为满足其功能要求, 第四代嵌入式系统使用了高性能的实时嵌入式操作系统。智能电话设备、移动互联网设备(Mobile Internet Device, MID)等就是第四代嵌入式系统的实例。

5. 下一代嵌入式系统?

处理器和嵌入式市场需求是不断变化调整的。下一代嵌入式系统将会是什么样的? 让我们拭目以待。

1.4.2 基于复杂度和性能的分类

下面的分类基于复杂度和系统性能需求。按照这种标准, 嵌入式系统可以分为以下几个类别:

1. 小规模嵌入式系统

应用需求比较简单、实时性能要求不严格的嵌入式系统都归入此类。常见的电子玩具就是小规模嵌入式系统的典型实例。小规模嵌入式系统通常基于低性能和低成本的 8/16 位微处理器/微控制器进行构建。小规模嵌入式系统可能存在操作系统, 也可能没有操作系统, 这要根据具体的功能来确定。

2. 中等规模嵌入式系统

硬件与固件需求复杂一些的嵌入式系统都归入此类。中等规模嵌入式系统通常基于性能适中的低成本 16/32 位微处理器、微控制器、数字信号处理器进行构建。为满足系统的功能需求, 中等规模嵌入式系统通常具有嵌入式操作系统(可能是通用操作系统, 也可能是实时操作系统)。

3. 大规模嵌入式系统/复杂系统

需要使用高复杂度硬件与固件的嵌入式系统都归入此类。大规模嵌入式系统往往出现在需要高性能的关键应用领域, 其系统构建通常基于高性能的 32/64 位的精简指令集计算(Reduced Instruction Set Computing, RISC)处理器/控制器、可重构片上系统(Reconfigurable System on Chip, RSoC)、多核处理器、可编程逻辑器件等。系统中可能包含多个处理器/控制器、协作单元/硬件加速器, 从而分担系统主处理器的处理需求。

媒体解码与译码、密码功能实现等就是大规模嵌入式系统的应用实例, 它们使用协处理器/硬件加速器满足相应的处理需求。复杂嵌入式系统通常包含高性能实时操作系统(Real Time Operating System, RTOS), 用于任务调度、优先级分配以及任务管理。

1.5 嵌入式系统的主要应用领域

LO5 了解嵌入式系统的应用领域

人们为了生计奔波忙碌, 而嵌入式系统则在我们的日常生活中起到至关重要的作用: 从居

家应用到计算机工业，嵌入式系统随处可见。从第一代阿波罗导航计算机，到最近的结合了车载娱乐技术的无线电导航系统以及可穿戴计算设备(Apple 手表、Microsoft Band、Fitbit 健身跟踪器等)，嵌入式技术已经取得了长足进步。嵌入式领域的应用与产品数不胜数，下面列出一些重要的领域以及典型产品：

- (1) 消费类电子产品：便携式摄像机、照相机等。
- (2) 居家用品：电视机、DVD 播放器、洗衣机、电冰箱、微波炉等。
- (3) 自动化家用与安全系统：空调、洒水装置、入侵检测报警系统、闭路电视摄像头、火警装置等。
- (4) 汽车工业：防抱死制动系统(Anti-lock Breaking System, ABS)、引擎控制、点火系统、自动导航系统等。
- (5) 电信：移动电话、电话交换机、手持式多媒体应用等。
- (6) 计算机外围设备：打印机、扫描仪、传真机等。
- (7) 计算机网络系统：网络路由器、交换机、集线器、防火墙等。
- (8) 医疗保健：各种医疗用扫描仪、EEG、ECG 等。
- (9) 测量与仪表：数字万用表、数字 CRO、逻辑分析仪、PLC(Programmable Logic Controller, 可编程逻辑控制器)系统等。
- (10) 银行业与零售业：自动取款机、点钞机、POS 机等。
- (11) 读卡器：条形码、智能卡读卡器、手持设备等。
- (12) 可穿戴设备：健康和健身跟踪器、智能手机屏幕显示通知的扩展等。
- (13) 云计算和物联网(IOT)。

1.6 嵌入式系统的用途

LO6 理解嵌入式系统的应用目的

本章前面已经说明，嵌入式系统被广泛应用于各个领域，比如消费类电子产品、自动化家用与安全系统、电信、汽车工业、医疗保健、控制与仪表、银行业与零售业等。即使在同一个领域，根据系统应用背景的不同，嵌入式系统也可能具有不同的功能。嵌入式系统设计用于完成下面的一个或多个任务：

- (1) 数据的采集、存储与表示
- (2) 数据通信
- (3) 数据(信号)处理
- (4) 监测
- (5) 控制
- (6) 专用用户界面

1.6.1 数据的采集、存储与显示

用于数据采集的嵌入式系统将外界数据采集到系统内部。数据采集完毕后，通常用于存储、分析、处理和传输。术语数据(data)指各种信息，也就是文本、声音、图像、视频、电信号以及其他任何可测量的物理量。数据可以是模拟(连续)的，也可以是数字(离散)的。对于使用模拟数

据捕捉技术的嵌入式系统，是采用模拟信号的方式直接采集数据；而对于使用数字数据采集机制的嵌入式系统，则是通过模数(Analog to Digital, A/D)转换器将模拟信号转换为相应的数字信号，然后采集与模拟数据等价的二进制信息。如果数据是数字的，那么数字嵌入式系统可以直接捕捉数据，不需要使用额外接口。

采集到的数据后，可直接存储到系统中，可传输到其他系统中，可由系统进行处理，也可在有意义地呈现之后立即删除。其后续操作完全取决于嵌入式系统设计的目的。比如，在控制与仪表领域，用于测量的嵌入式系统完全不需要具备存储功能。这些系统采集数据，并通过图形或数值直观地表示数据的含义，当新数据到达数据采集终端时删除之前采集到的数据。不带存储功能的模拟 CRO 和数字 CRO 就是上述系统的典型实例。在医疗领域，任何用于监测的不带存储功能的测量设备也都可以归入此类。

有些嵌入式系统可对采集到的数据进行存储，用于后续处理与分析。为存储采集到的数据，这些系统往往具有内置/插件存储器。采集到数据后，系统可将其形象地展示给用户：一种方式是通过显示屏可视化(图形或数值)的形式，比如液晶显示屏(Liquid Crystal Display, LCD)、发光二极管(Light Emitting Diode, LED)等；另一种方式则是通过喇叭播放音频的形式，比如蜂鸣器、报警器等。就具有存储功能的嵌入式系统而言，常用的实例包括用于医疗保健的测量仪器和监测仪器。需要注意，有些嵌入式系统对数据进行存储之后，不会向用户直接输出显示，而是用于内部处理。

数码照相机是具有数据采集、数据存储与数据显示功能的典型嵌入式系统。拍摄到图像之后，照片可以存储在照相机的内存中；此外，用户还可以通过 LCD 显示屏，对拍摄的照片进行浏览，如图 1-1 所示。



图 1-1 数码照相机，可以抓拍、存储、显示图像

(图片为 EXILIM ex-Z850 型照相机，由 Casio 公司提供，相关信息请访问 www.casio.com)

1.6.2 数据通信

在人们的工作生活中，嵌入式数据通信系统得到了广泛应用，其应用范围覆盖复杂的卫星通信系统乃至简单的家庭网络系统。本章前面已经提到过，嵌入式终端采集到的数据，可能需要通过传输才能到达其他远程系统。传输可以通过有线介质完成，也可以通过无线介质完成。在以往的嵌入式系统中，有线介质是最常用的选择。随着技术的发展与进步，对于嵌入式系统的数据通信而言，无线技术正在逐渐变成实际标准。无线介质提供了更便宜、更便捷的通信解决方案，使得通信连接不再受限于线缆。数据可以通过模拟的方式传输，也可以通过数字的方式传输；现代工业往往趋向于使用数字通信。

数据采集嵌入式终端本身可以包含数据通信单元，比如无线模块(蓝牙、ZigBee、Wi-Fi、EDGE、GPRS 等)或有线模块(RS-232C、USB、



图 1-2 无线网络路由器，用于数据通信

(图片由 Linksys 公司提供，CISCO 系统的一个部件，相关信息请访问 www.linksys.com)

TCP/IP、PS2 等)。某些嵌入式系统的行为类似于介于发送终端和接收终端之间的专用传输设备,提供某些复杂功能,比如数据打包、加密与解密。网络集线器、路由器、交换机等设备就是嵌入式系统专用于数据传输的典型实例。这些设备的行为类似于数据通信的中继站,提供数据安全、监控等功能,如图 1-2 所示。

1.6.3 数据(信号)处理

前面已经说明,嵌入式系统采集的数据可以是语音、图像、视频、电信号以及其他可测量的物理量,系统可以对这些数据进行各种处理。具有信号处理功能的嵌入式系统,往往被应用于信号处理领域,如语音编码、语音合成、音频编解码、传输应用等。

数字助听器就是嵌入式系统基于数据处理的典型实例,可用于改善弱听者的听力,如图 1-3 所示。



图 1-3 基于信号处理技术的数字助听器
(图片由西门子公司提供, 西门子 TRIANO 3 型数字助听器, Copyright© 2005)

1.6.4 监测

专门设计用于监测的嵌入式系统都可以归入此类。在医疗领域,几乎所有的嵌入式产品都只具有监测功能。通过输入传感器,此类系统可以确定某些变量的当前状态;但是,此类系统不能对变量进行控制。心电图仪是一个非常好的实例,可以监测病人的心跳,但不能控制心跳,其传感器是连接到病人身体上的多个电极,如图 1-4 所示。

具有监测功能的嵌入式系统实例还有测量仪表,比如数字 CRO、数字万用表、逻辑分析仪等,这些系统经常用于控制与仪表应用。这些系统用来监测变量(比如电流、电压等)的状态;不过,系统不可以控制这些变量。



图 1-4 监测心跳的病患监测系统
(图片由 Philips Medical Systems 提供,该公司的网址为 www.medical.philips.com/)

1.6.5 控制

此类嵌入式系统具有控制功能,根据输入变量的变化情况,可以对某些变量进行控制。具有控制功能的系统包含传感器和激励器。传感器连接到输入端口,可以捕捉环境变量的变化或者测量变量。根据输入变量的变化情况,系统可以对连接到输出端口的激励器进行控制,从而对控制变量进行调控,将受控变量调整到指定范围。

居家应用中,经常需要使用空调系统,将室内温度调整到指定的温度值——这正是嵌入式系统用于控制的一个实例。空调包含室内温度感应元件(传感器),由电热调节器和设置所需温度值的手持控制器组成。通过无线连接或有线连接,手持控制器可以连接位于空调内部的中央嵌入式单元。另一方面,空气压缩机单元则是空调系统的激励器。根据当前室内温度和终端用户设定的温度值,可以对压缩机进行调控,如图 1-5 所示。



图 1-5 控制室内温度的空调,是具有控制功能的嵌入式系统
(图片由 Electrolux 公司提供,该公司的网址为 www.electrolux.com/au)

在空调系统中,输入变量是当前的室内温度,受控变量也是室内温度。控制变量则是压缩机单元送出的冷空气。如果受控变量和输入变量的值不同,那么控制变量将对冷空气流进行调控,从而使受控变量和输入变量的值趋于一致。

1.6.6 专用用户界面

此类嵌入式系统具有特定的用户界面,比如按键、开关、键盘、指示灯、喇叭、显示单元等。移动电话就是这样一个实例。移动电话的用户界面提供了按键键盘、可视化 LCD 显示屏、系统扬声器、振动器等,如图 1-6 所示。



图 1-6 具有专用用户界面的嵌入式系统
(图片由蓝莓智能手机公司提供,相关信息请访问
www.amazon.com)

1.7 可穿戴设备——嵌入式技术与生活方式的创新结合

LO7 嵌入式技术已被广泛应用于人们的生活,使用真实生活中的嵌入式产品进行分析

在发布本书的第一个修订版时(2015 年),可穿戴设备是一个热门话题。可穿戴设备是合成到配饰(手表、手链、戒指、项链、眼镜、发带、小圆女帽等)和服装上的嵌入式技术/系统。可穿戴技术把嵌入式技术渗透到我们的日常生活中,引领新时尚,带来了新的生活方式。它使我们具备嵌入式计算和通信能力,总是能连接到网络上,了解最感兴趣的事物(例如,社群摘要——微博客、脸书,亲友的即时消息,跟踪健身活动等),而不需要牺牲生活方式中的时尚元素。

来自卡西欧的计算器手表在 20 世纪 80 年代引入,是可穿戴设备概念的一个经典范例。就计算能力而言,目前的可穿戴设备能执行智能手机和平板电脑的许多计算任务,在某些方面,它们甚至超过了这些玩意。术语“可穿戴设备”通常用于表示很容易穿脱的一系列配饰和服装,某些设备还嵌入到人的身体里,例如智能纹身、RFID 微型芯片等。这些也在“可穿戴设备”的广义范围内。

可穿戴技术的主要目的是把具备一定功能、可移动的嵌入式计算设备平滑地合成到个人的日常生活中,提供连续、方便、无缝的集成(快速查看信息——在智能手表的屏幕上查看脸书、微博客的社群摘要,而智能手表被连接到智能手机上,用作手机的第二块屏幕),通过免提方式访问其他连接好的设备(如在智能戒指等可穿戴设备上,通过模拟的触摸手势与游戏控制台交互操作,或者操作智能手机上的音乐播放器)。在目前以及可预计的未来,市场上的大多数可穿戴设备都属于健康和健身监控、娱乐、智能手机附件或特征扩展等类别。

可穿戴设备的内部仅依赖针对的终端功能。基本上,可穿戴设备包括一个嵌入式控制器,用作单元的主脑;一个无线通信子系统(基于无线技术,如蓝牙、Wi-Fi、NFC(Near Field Communication,近场通信)、移动电话等,用于与其他电子系统(如智能手机、笔记本电脑、平板电脑、游戏控制台等)建立数据/语音通信。考虑把智能手表用作一块普通手表,同时在其中嵌入一组感应器,来跟踪各种健身活动,例如走过的步数和距离(计步器的功能)、爬上的楼层

数等，跟踪并记录重要的信息，如心率。

嵌入式处理器/微控制器(如 ARM)用作主控制器单元，与感应器模块等板上子系统连接，跟踪各种健身活动，记录重要的信号。无线通信链接(如蓝牙)与智能手机或平板电脑等连接设备建立通信信道。计步器的功能通过 MEMS 3D 加速计感应器(如 ST 微电子生产的 LIS2DH)实现。高度计/气压计感应器可以用于跟踪爬上的楼层数。心率监控功能通过光学/照相感应器、压力感应器或带有 AFE(Analog Front End, 模拟前端)芯片(例如模拟设备 AD8232 AFE 芯片)的电极来实现信号调节。根据存储在设备中的读数量，设备可以包含几 KB 到几 MB 的闪存。超低功耗的蓝牙收发器用于建立一个到设备的无线通信接口，可通过标准蓝牙配置，如 SPP(串联式, Serial Port Profile)、MAP(消息访问)、GATT(一般属性)等，与其他外设通信。因为设备要作为独立的可移动设备工作，所以要有一块电池(大多是可充电的锂电池)给单元提供电源，一个充电和监控子系统给电池充电并跟踪电池的状态。

Fitbit Charge, Surge(www.fitbit.com)是用于健身和活动跟踪的可穿戴设备示例。索尼的 SmartWatch 3(<http://www.sonymobile.com/us/products/smartwatch-3-swr50/>)、三星的 Galaxy Gear 系列智能手表就是一种可穿戴设备，它提供了手表的功能，同时用作智能手机的附件/延伸，可以快速浏览通知，例如文本、电子邮件社群摘要，接电话、打免提电话，这些都在手腕上进行。

2014 年 9 月宣布推出的 APPLE WATCH 也是一种可穿戴设备，用作 iPhone 的附件，提供了应用的通知和内容，还集成了手表、健康和健身跟踪、移动支付和许多其他很多功能(参见图 1-7)。

Microsoft Band 也是一种可穿戴设备，集成了多个移动平台(Windows/Android/iOS)来提供通知(电话、文本、社群摘要等)，还用作健身跟踪器和健康监控设备，它集成了多个感应器(光学心率感应器、3 轴加速计/陀螺仪、GPS、环境光感应器、皮肤温度感应器、UV 感应器、皮肤电反应感应器、气压计等)，跟踪步数、心率、燃烧的卡路里、睡眠质量、爬过的楼层，检测有害 UV 光和跑步路线。

可穿戴技术不断地演变，越来越大众化。它可能极大地影响交互式娱乐(游戏、音乐、视频等)、健康和健身、教育、企业、运输、零售等领域。根据一家顶尖 US 市场分析和研究公司的报告，可穿戴设备的总装货量在 2019 年估计将超过 1.5 亿台，复合年增长率(CGAR)超过 40%。

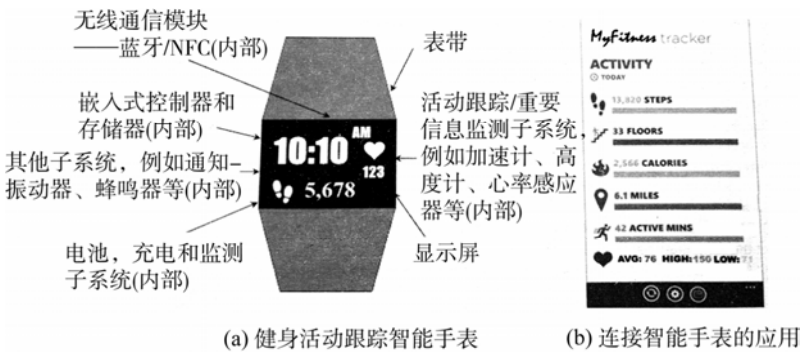


图 1-7 健身手表——跟踪健身活动的可穿戴设备的概念模型

1.8 本章小结

- 嵌入式系统是一种电气/电子-机械系统，设计用于执行特定的功能，是硬件与固件的结合体。(LO1)

- 通用计算系统由普通硬件与通用操作系统构成，可以执行各种各样的应用程序；嵌入式系统则由专用硬件与嵌入式操作系统/固件构成，专门执行特定的应用程序集。 (LO2)
- 阿波罗导航计算机是目前公认的第一个现代嵌入式系统，用于 Minuteman-I 型导弹的自动控制 D-17 型导航计算机则是大批量生产的首款嵌入式系统。 (LO3)
- 根据复杂度和系统性能需求，嵌入式系统可分为小规模嵌入式系统、中等规模嵌入式系统、大规模/复杂嵌入式系统。 (LO4)
- 嵌入式系统应用广泛，简单到电子玩具，复杂到航天与导弹控制系统。 (LO5)
- 嵌入式系统设计用于完成以下一项或多项任务：数据采集/存储/显示、数据通信、数据(信号)处理、监测、控制以及专用用户界面。 (LO6)
- 可穿戴设备是指合成到配饰和服装上的嵌入式技术/系统。它把嵌入式技术带入我们的日常生活。 (LO7)

1.9 重要术语

嵌入式系统(Embedded System)	一种电气/电子-机械系统，设计用于执行特定功能，是硬件与固件的结合体 (LO1)
操作系统(Operating system)	是系统级软件，设计用于管理和分配系统资源，并执行其他软件 (LO2)
RAM(Random Access Memory, 随机存取存储器)	是易失性存储器 (LO3)
微处理器(Microprocessor)	表示中央处理器(CPU)的硅芯片 (LO4)
微控制器(Microcontroller)	高集成度的芯片，其中包括 CPU、中间结果暂存器 RAM、专用寄存器阵列、通用寄存器阵列以及外围集成设备 (LO4)
SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition System, 监控与数据采集系统)	应用于工业控制的数据采集系统 (LO4)
DSP(Digital Signal Processor, 数字信号处理器)	是一种功能强大的专用 8/16/32 位微处理器，专门用于满足计算需求和功耗限制 (LO5)
ASIC(Application Specific Integrated Circuit, 专用集成电路)	用于执行特定功能的微芯片 (LO6)
传感器(Sensor)	用于将能量从一种形式转换成另一种形式，以便于测量或控制 (LO6)
激励器(Actuator)	可以是机械的，也可以是电子的，用于将信号转换成相应的物理行为 (LO6)
LED(Light Emitting Diode, 发光二极管)	根据流过 LED 的电流强弱，该器件可以发出可见光，用作输出指示 (LO6)
蜂鸣器(Buzzer)	是一种压电式器件，可以产生声音提示。其中含有压电振动膜，根据外加电压的大小，可以产生人耳能够听见的音频信号 (LO6)
ECG(Electro Cardiogram, 心电图仪)	用于监测病人心跳的嵌入式设备 (LO6)
ADC(Analog to Digital Converter, 模数转换器)	是将模拟信号转换成数字信号的集成电路 (LO6)
蓝牙(Bluetooth)	低成本、低功耗、短距离的无线技术，用于数据通信和语音通信 (LO6)
Wi-Fi(Wireless Fidelity, 无线高保真)	是网络通信设备常用的无线通信技术 (LO6)

1.10 课后习题

1. 嵌入式系统是:
 - (a) 通用系统
 - (b) 专用系统
2. 嵌入式系统是:
 - (a) 电气系统
 - (b) 纯粹的机械系统
 - (c) 电子-机械系统
 - (d) (a)或(c)
3. 关于嵌入式系统, 下列哪种说法是错误的?
 - (a) 基于专用硬件构建
 - (b) 总是含有操作系统
 - (c) 所执行的功能可以是确定的
 - (d) 以上所有都是
 - (e) 以上所有都不是
4. 下列各个实例中, 哪个不是小规模嵌入式系统?
 - (a) 电动芭比娃娃
 - (b) 简易计算器
 - (c) 手机
 - (d) 电动玩具汽车
5. 目前公认的第一个现代嵌入式系统是:
 - (a) 苹果计算机
 - (b) 阿波罗导航计算机
 - (c) 计算器
 - (d) 无线导航系统
6. 大批量生产的首款嵌入式系统是:
 - (a) Minuteman-I
 - (b) Minuteman-II
 - (c) 自动控制 D-17 型导航计算机
 - (d) 阿波罗导航计算机
7. 下列选项中, 哪些是嵌入式系统的用途?
 - (a) 数据采集
 - (b) 数据处理
 - (c) 数据通信
 - (d) 以上所有都是
 - (e) 以上所有都不是
8. 下列选项中, 哪些是嵌入式系统用于数据通信的实例?
 - (a) USB 大容量存储设备
 - (b) 网络路由器
 - (c) 数码照相机
 - (d) 音乐播放器
 - (e) 以上所有都是
 - (f) 以上所有都不是
9. 数字万用表是一种嵌入式系统, 其用途是:
 - (a) 数据通信
 - (b) 监测
 - (c) 控制
 - (d) 以上所有都是
 - (e) 以上所有都不是
10. 下列选项中, 哪些是嵌入式系统用于信号处理的实例?
 - (a) 苹果 iPod(媒体播放器)
 - (b) SanDisk 的 USB 大容量存储设备
 - (c) (a)和(b)
 - (d) 以上所有都不是

1.11 复习题

1. 什么是嵌入式系统? 请说明嵌入式系统各种不同的应用。 (LO1, LO2, LO3)
2. 请详细说明嵌入式系统的各种用途, 并列举出相应的实例。 (LO4, LO5, LO6, LO7)
3. 请说明嵌入式系统的分类, 并为每种类别给出相应实例。 (LO5, LO6, LO7)