



普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

现代电子技术综合实践教程

——EDA、单片机与SOPC实验

(第2版)

◎ 唐 续 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

现代电子技术综合实践教程

——EDA、单片机与SOPC实验（第2版）

唐 续 编 著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是为现代电子技术综合实践课程配套的新型教材。全书内容以 EDA 技术和单片机技术为核心,并提升到 SOPC 技术层面。

书中通过大量独立的实验项目,为教学提供了基于 VHDL 的 FPGA 应用设计和基于 C51 的 8051 兼容单片机应用设计,以及二者结合的 SOPC 综合应用设计的实例(包括原理方案分析和代码例程)。通过配套的硬件实验平台,学生可由浅入深、循序渐进地学习和训练相关技术开发的流程、方法和技能。本教材强调“做中学”的教学理念,通过各实验项目实做过程中的问题引导学生自发地进行相关知识点的学习和讨论,非常有助于他们学到实用的知识,掌握有用的技能并形成良好的工程素养。

本书可作为高等学校电子类专业电子技术实践课程的实验教材和电子设计竞赛等科技创新活动的培训教材,也可供相关领域的工程技术人员学习或参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子技术综合实践教程:EDA、单片机与 SOPC 实验 / 唐续编著. —2 版. —北京:电子工业出版社,2016.7
ISBN 978-7-121-28989-7

I. ①现… II. ①唐… III. ①电子电路—电路设计—计算机辅助设计—实验—高等学校—教材②单片微型计算机—实验—高等学校—教材③可编程序逻辑阵列—系统设计—实验—高等学校—教材 IV. ①TN702-33
②TP368.1-33③TP332.1-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 125940 号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:王羽佳 特约编辑:曹剑锋

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:477 千字

版 次:2013 年 3 月第 1 版

2016 年 7 月第 1 版

印 次:2016 年 7 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:39.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254535,wyj@phei.com.cn。

前言

电子信息技术日新月异,以 EDA 技术和嵌入式微处理器技术为代表的现代电子技术飞速发展。为了紧跟其步伐,培养既有理论知识,又有动手能力和创新思想的优秀人才,各大专院校一直进行着现代电子技术相关实践教学的改革。当中反映有以下突出问题:①长期以来,独立的 EDA 和单片机实验的教学出现了较明显的分离,一般学生少有机会同时参与两方面的学习和实践;②现有 SOPC 课程及其实验的门槛较高,与基础教学内容脱节,难以大面积普及;③在实验教学中,学生往往关注于新的软件、语言和器件方面的知识学习,对实验过程则往往浮于简单的演示结果复现,缺乏面对实验问题的正确态度和有效解决工程问题的手段。

针对上述问题,笔者在本校开展了基于实验资源整合与实验内容优化的实践教学改革,具体表现为:①整合 EDA 和单片机各自的实验平台为一体化的实验开发平台;②基于所开发的可在线调试用户程序的 8051 单片机软核,对现有独立的 EDA 应用实验和单片机应用实验进行优化与整合;③提出 EDA 和 51 单片机相结合的 SOPC 综合实验项目。在实验平台上已开设的实验项目如图 1 所示。该教学方式衔接了已开设的 EDA 技术和微处理器技术的理论基础课,使得代表最新设计思想的 SOPC 技术能被更广泛的学生所接受,在培养学生综合实践能力,特别是系统性思考能力方面获得了更好的教学效果。

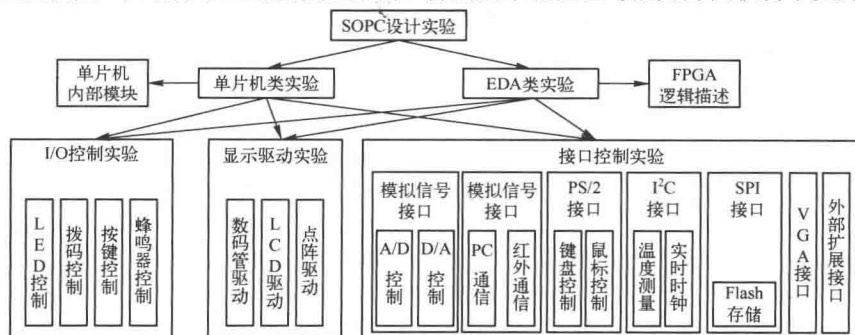


图 1 一体化实验平台的多层次实验项目

本书是上述实验教学改革的配套教材,其特点如下。

(1) 国内第一本将 EDA 技术、51 单片机技术及二者结合的 SOPC 技术整合在同一 FPGA 平台上进行实验课程开设的配套教材。

(2) 适合多类型和多层次的实验教学需求:可支撑独立的 EDA 类基础实验教学及其综合实验教学;可支撑独立的单片机类基础实验教学及其综合实验教学;可支撑 EDA 和单片机相结合的 SOPC 实验教学;可与更高阶的 DSP 设计应用接轨。

(3) 本书是作者在多年实验教学和全国大学生电子设计竞赛培训等工作的积累总结基础上编写而成的。书中提供大量的实验项目,其选材既注重内容的典型性和实用性,更强调实验过程的可操作性和延续性。教材中既有原理知识的铺垫,又有基础操作和例程的参考,还有综合应用项目的训练,更有创新设计的挑战。不同层次的读者可各取所需,并获得持续的学习兴趣。

全书分为两部分,共 5 章。第一部分为原理基础篇,包括第 1、2 章。第 1 章对现代电子系统及其设计过程进行整体的阐述,给出本书的背景和技术范畴。特别介绍了本书采用的 MC8051 处理器 IP 核。第 2 章介绍本教材配套综合实验硬件平台的各电路模块。

第二部分为应用实践篇,是本书重点。第 3 章和第 4 章分别安排了多个基础性的 EDA 实验项目和单片机实验项目。当中提供工具软件的详细操作步骤和对应的实验例程,使读者能够快速掌握 FPGA 应用和单片机应用的基本技能,以及对实验硬件平台中各功能模块的驱动方法。第 5 章为本书亮点,精选了 8 个综合性实验项目。有的侧重于硬件逻辑设计,有的侧重于软件程序设计,有的侧重于系统综合设计,还有的则与 DSP 理论及方法的掌握和运用相结合。每个项目都要求基于前面章节学习的软、硬件模块,完成一个电子应用小系统。书中对各项目既有多层次的分析 and 代码提示,同时又给读者的实践提供了充分发挥和扩展的空间。读者可尝试多种实现方案,进而掌握 EDA 和单片机技术各自的

特征, 深入理解软/硬件协同的现代电子技术设计思想和 SOPC 的优势。

本书是国内第一本真正结合 EDA 技术和 8051 单片机技术开展电子应用开发的起步教材。读者只要切实地实践书中的内容, 你可以:

- 掌握基于 VHDL 的 FPGA 应用技术;
- 掌握基于 Keil C51 的 8051 应用技术;
- 掌握基于 Xilinx FPGA 的 EDA 开发工具;
- 掌握 Xilinx FPGA 常用 IP 核的使用方法;
- 掌握电子设计中常用外围电路模块的驱动方法;
- 掌握基于 FPGA 逻辑和 MC8051 单片机核的 SOPC 设计方法;
- 构建多个 SOPC 模式的电子应用小系统;

读者在阅读本书时, 应注意以下几点:

(1) 作为实践教材, 本书重点强调实验内容, 对其中的理论原理和方法知识点的介绍主要为读者提供查阅的线索, 而非系统学习。同时, 作者也强烈推荐按照本书思路体验“做中学”的新学习方法。

(2) 书中提供的代码主要为方便学习理解, 较少考虑运行的效率, 读者可在对实验内容和方法足够理解后再行优化。此外, 对于公共的模块或函数, 会在首次出现时尽量阐述清楚, 而在后续实验项目中, 则要求读者按指引自行参阅, 以节约读者理解的时间和文字篇幅。某些较大的程序或文件, 则请登录华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 免费注册下载使用。

(3) 我们结合本书开发了一款可在线调试 8051 应用程序的 SOPC 实验教学系统(详细介绍见 1.3 节和第 2 章), 旨在将原理仿真与实际动手相结合, 可对本书中所有实例进行验证和操作, 可作为本书配套的实验平台使用。该实验平台不随教材一起发行, 如有需求可通过如下方式另行购买, 咨询和服务请联系 (<https://detail.tmall.com/item.htm?spm=0.0.0.0.rjtUqO&id=524851806590> 或 hoper@uestc.edu.cn)。

第 2 版修订说明:

(1) 本书第 1 版在我校为多个专业开设的“现代电子技术综合实验”课程中使用了多个学期。学生反映非常实用, 真正学到了理论课考试后就忘记了的 EDA 和单片机原理及 C 语言编程的知识, 重新认识了工程师的工作及其价值所在, 能更从容和自信地面对今后学业或工作中必将面对的“我不会”的境况。

(2) 本书第 2 版主要针对第 1 版大而全的特点进行了精简, 使之更适合有限学时的本专科实验教学体系, 并方便广大读者购阅。具体来说, 删减了第 1 版中介绍 EDA 和单片机基础原理的第 2~4 章和 DSP 层次的第 9、10 章。同时, 基于在教学中与各层次学生的交流, 重点在 EDA 实验和单片机实验的基础部分(实验 1~7), 对学生在使用中容易出错的步骤和含糊的知识点进行了原理分析和补充讲解, 并特别增加了引导性和扩展性的实验思考和练习, 以期更好地辅助学生跨过“开头难”的障碍, 便于读者自主实验和自觉地思考。此外, 第 2 版对已发现的第 1 版中的文字和符号错误进行了订正。

本书适合高等院校电子类专业的本专科生, 作为电子技术实践课程的实验教材或电子设计竞赛等科技创新活动的培训教材。本书也非常适合 EDA 和单片机应用设计爱好者结合实验硬件平台开展自学。

本教材适用学时数较灵活。参考学时为 32~48 学时, 其中基础实验为 8~24 学时, 综合实验为 12~24 学时。综合实验项目的选取需考虑普及型或培训型的教学对象和学时要求等具体情况, 也可适当扩展新的实验项目。本教材在电子科技大学电子实验中心为电类各专业本科生开设的“现代电子技术综合实验”课程为 40 学时, 采用开放式教学。其中, 基础训练 24 学时, 根据不同学院的学生专业基础和方向不同, 选择性地侧重 EDA 或单片机的训练; 综合训练 16 学时, 根据基础训练情况完成一个第 5 章的综合项目。

教材各章节编写的分工及安排如下: 第 1 章 1-2 节和第 3 章的 3.2.1、3.2.2 和 3.2.3 节由刘曦编写, 其余章节由唐续编写。全书由唐续统稿。董平、赵芳斌、王嘉、金辉、贾佳蔚、雷敏、杨艳芳、曲君涛、黄建、王丁、张平丽、高林、高现文、梁上烈、周健、苏金洲、吴骐和朱士强等人参与了本实验教材的编写和实验验证。

本书在编写和出版过程中, 得到了电子科技大学电子实验中心的皇晓辉、王军、熊万安、赵宏飞等同事的大力支持, 在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 书中难免仍存在不足或错误, 恳请广大师生和读者批评指正。

唐 续

2016 年 7 月于电子科技大学

目 录

第 1 章 现代电子系统设计基础与综合实验	1	2.3.9 串行 D/A 电路	24
1.1 现代电子设计技术概述	1	2.3.10 串行 A/D 电路	24
1.1.1 数字系统及其一般结构	1	2.3.11 实时时钟电路	25
1.1.2 数字系统设计的一般过程	2	2.3.12 数字温度传感器电路	25
1.2 现代数字系统设计	2	2.3.13 扩展 I/O 电路	26
1.2.1 基于 PLD 的 EDA 设计	3	2.3.14 核心板与底板接口	26
1.2.2 基于 MCU 的设计	4	2.3.15 底板跳线及接口	27
1.2.3 基于 SoC 和 SOPC 的设计	5	2.4 本章小结	28
1.3 可在线调试 8051 的 SOPC 实验教学平台	7	第 3 章 EDA 基础实验	29
1.3.1 基于 8051 单片机的 SOPC 平台	7	3.1 准备工作	29
1.3.2 小结	9	3.2 实验项目	29
第 2 章 实验硬件平台	10	3.2.1 LED 驱动	29
2.1 实验平台功能特点	10	3.2.2 LED 流水灯	42
2.2 核心板电路分析	10	3.2.3 芯片内的逻辑分析仪 ChipScope	47
2.2.1 核心板电路原理框图	11	3.2.4 键控数码管静态显示	54
2.2.2 FPGA 主芯片	12	3.2.5 数控分频器	58
2.2.3 时钟电路	12	3.2.6 含异步清零和同步使能的 4 位加法计数器	64
2.2.4 配置电路	12	3.2.7 8 位硬件加法器	66
2.2.5 存储电路	15	3.2.8 VGA 彩色信号显示控制器	68
2.2.6 电源电路	16	3.2.9 LCD 显示驱动器	74
2.2.7 按键及 LED 电路	16	3.2.10 SRAM 控制器	82
2.2.8 七段数码管显示电路	16	3.2.11 SPI 接口 Flash 模块 M25P16	87
2.2.9 拨码开关电路	17	3.2.12 通用异步收发器	100
2.2.10 FPGA 的 I/O 分配	17	3.2.13 红外收发	107
2.2.11 核心板与底板接口	18	3.2.14 D/A 转换芯片 TLC5620 的控制	109
2.3 底板电路分析	19	3.2.15 A/D 转换芯片 TLC549 的控制	116
2.3.1 底板电源电路	20	3.2.16 PS/2 键盘驱动	122
2.3.2 蜂鸣器电路	21	3.2.17 PS/2 鼠标驱动	125
2.3.3 液晶显示电路	21	第 4 章 基本单片机实验	129
2.3.4 16×16 LED 点阵电路	21	4.1 单片机实验基础	129
2.3.5 RS-232 串口电路	22	4.1.1 MCS-51 单片机的硬件结构	129
2.3.6 红外通信电路	23	4.1.2 MCS-51 存储器的结构	130
2.3.7 VGA 接口电路	23	4.1.3 8051 单片机 Keil C51 编程	131
2.3.8 PS/2 键盘和鼠标接口电路	24	4.1.4 MC8051 单片机定制与封装	132

4.1.5	MC8051 单片机最小系统	133	5.4.3	实验要求	223
4.1.6	8051 单片机系统安装与使用	135	5.4.4	实验指导	223
4.1.7	实验操作与例题使用	136	5.4.5	思考与练习	229
4.2	实验项目	136	5.5	相位测量仪	230
4.2.1	点亮 LED 灯	136	5.5.1	实验背景	230
4.2.2	简单的定时	139	5.5.2	实验目的	230
4.2.3	交流蜂鸣器	143	5.5.3	实验内容	230
4.2.4	数码管动态扫描显示	146	5.5.4	实验原理	230
4.2.5	加减计数器实验	150	5.5.5	实验指导	232
4.2.6	用 PWM 波控制 LED 亮度	153	5.5.6	思考与练习	236
4.2.7	外部中断	155	5.6	打地鼠游戏实验	236
4.2.8	使用片外 SRAM	157	5.6.1	实验背景	236
4.2.9	16×16 LED 点阵扫描显示	158	5.6.2	实验目的	237
4.2.10	液晶显示驱动	167	5.6.3	实验任务	237
4.2.11	红外收发	173	5.6.4	实验要求	237
4.2.12	实时时钟 PCF8563	176	5.6.5	实验指导	237
4.2.13	LM75A 数字温度计	190	5.6.6	思考与练习	249
4.2.14	TLC5620 串行 DAC	194	5.7	基于 FPGA 的语音录制与回放系统	249
4.2.15	TLC549 串行 ADC	196	5.7.1	实验背景	249
第 5 章	综合实验项目	199	5.7.2	实验目的	249
5.1	实验准备	199	5.7.3	实验任务	249
5.1.1	SOPC 设计方式	199	5.7.4	实验要求	250
5.1.2	SOPC 方式下的 MC8051 IP 核	199	5.7.5	实验指导	250
5.1.3	MC8051 中地址空间安排	205	5.7.6	思考与练习	253
5.2	多功能数字时钟	205	5.8	基于 LCD 界面的电压监测系统	254
5.2.1	实验背景	205	5.8.1	实验背景	254
5.2.2	实验目的	205	5.8.2	实验目的	254
5.2.3	实验任务	205	5.8.3	实验任务	254
5.2.4	实验要求	206	5.8.4	实验要求	254
5.2.5	实验指导	206	5.8.5	实验指导	254
5.2.6	思考与练习	213	5.8.6	思考与练习	255
5.3	可远程控制的简易交通灯系统	213	5.9	基于温度监测的监控系统	255
5.3.1	实验背景	213	5.9.1	实验背景	255
5.3.2	实验目的	213	5.9.2	实验目的	255
5.3.3	实验内容	213	5.9.3	实验任务	255
5.3.4	实验原理	214	5.9.4	实验要求	256
5.3.5	思考与练习	222	5.9.5	实验指导	256
5.4	频率测量仪	222	5.9.6	思考与练习	257
5.4.1	实验目的	222	参考文献		258
5.4.2	实验内容	223			

第1章 现代电子系统设计基础与综合实验



本章简要介绍现代电子系统 (Modern Electronic System) 的基本概念及其分类。重点介绍现代数字系统 (Modern Digital System) 的设计原理和设计流程, 使读者对现代电子系统及其设计过程有一个整体的了解, 明确本书的背景和技术范畴。

1.1 现代电子设计技术概述

电子系统, 泛指由各类电子器件, 如电子管、晶体管、集成电路芯片和其他的电/非电转换器件构成的, 能完成特定功能的电子装置, 如手机、出租车计价器等, 遍及当今人类社会的各个方面。为了设计和分析的需要, 电子系统的类型可做不同的划分。本书按电路的组成分类, 将系统分为模拟系统 (Analog System)、数字系统 (Digital System)、模数混合系统、微控制器单元 (Microcontroller Unit, MCU) 系统和片上系统 (System on Chip, SoC)。片上系统的一个发展分支是基于可编程器件的片上系统 (System on Programmable Chip, SOPC)。之所以把上述几个部分称为系统, 是因为它们本身具有某种特定功能, 并且是相对完整的。

电子系统设计的发展是一个从模拟系统向数字系统发展的过程。

模拟系统是指基于模拟电路来处理信号的系统。它要处理的信号为模拟信号, 并要求系统能实时工作, 主要是由模拟电路和模拟器件来实现的。早期的设计主要是靠手工绘制电路图来进行的。用于实现模拟系统 (电路) 的模拟器件也有集成化的发展过程, 但没有得到革命性的突破, 至今尚无与数字器件或微控制器单元媲美的产品问世。另外, 用于模拟电路设计的工具软件还仍止于板级 (Printed Circuit Board, PCB) 设计的层次, 而数字电路的设计软件已进入芯片级 (Chip-Level) 的层次, 因而, 现代大多数电子系统的主体功能多依赖于数字器件和软件算法来实现, 模拟电路的成分越来越少 (主要集中在系统的前、后端接口电路以及射频信号的处理电路中)。数字系统及其设计手段已成为一般现代电子系统的核心概念。

与反映该领域现状和发展趋势的实践教学相结合, 本实验教材将重点放在可编程数字逻辑电路系统、MCU 系统和 SOPC 系统上。这 3 部分的设计涵盖了现代电子技术设计的主要部分。而与模拟系统相关的内容, 在部分实验系统项目中有所涉及, 读者可根据自身兴趣参阅其他书籍或资料。

1.1.1 数字系统及其一般结构

在数字技术领域, 由各种逻辑器件构成的能够实现某种特定功能的电路称为功能部件级电路, 如计数器、加法器和存储器等就是典型的功能部件级电路, 它们只能完成计数、加法运算和数据存储等单一功能。而由若干数字电路和逻辑部件构成的、能够实现数据存储、传送和处理等复杂功能的数字设备, 则称为数字系统。电子计算机就是一个典型的复杂数字系统。数字系统在结构上可以划分为数据系统 (Data System) 和控制系统 (Control System) 两部分, 如图 1-1 所示。

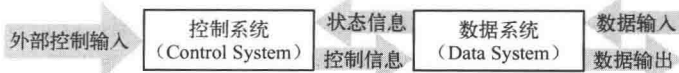


图 1-1 数字系统的一般结构

在上述划分方式中，有无控制器是区分系统级设备和功能部件级电路的一个重要标志。凡是有控制器且能按照一定程序进行操作的，不管其规模大小，均称为数字系统；反之，不论其规模多大，均不能称为一个独立的数字系统，至多只能算一个子系统。如数字交通灯控制器，虽然仅由几片中等规模集成器件构成，但因其中有控制电路，则应该称之为数字系统。而大容量存储器，尽管其规模很大，但因其功能单一、无控制器，只能称之为功能部件。表 1-1 列出了数据系统和控制系统的特点和功能。

表 1-1 数据系统和控制系统的特点和功能表

子系统名称	特 点	功 能
数据系统	数据存储与处理单元	对数据进行存储、传送和处理。能从控制系统接收控制信息，并把处理过程中产生的状态信息提供给控制系统
控制系统	控制数字系统的整个操作进程	根据外部控制信号决定系统是否启动工作。根据数据系统提供的状态信息，决定数据系统下一步将完成何种操作，并发出相应的控制信号控制数据系统实现这种操作

1.1.2 数字系统设计的一般过程

表 1-2 列出了数字系统设计的一般流程和每一步骤中的工作任务。

表 1-2 数字系统设计流程中的任务表

设计步骤	主要工作	具体任务
第一步	确定总体方案	在深入了解所要设计的系统的功能、使用环境与使用要求后，选择合适的工作原理与正确的实现方法，确定系统设计的总体方案，这是整个设计工作中最为重要的一个环节。所选的方案既要能满足系统的要求，又要结构简单，实现方便，具有较高的性价比
第二步	导出系统功能结构关系	在系统总体方案确定以后，可以将系统从结构上划分为数据系统和控制系统两部分，推导出包含必要的数据信息、控制信息和状态信息的功能结构关系。功能结构关系依据如何更有利于实现系统的工作原理来构建和划分。为了使这一步的工作不过于复杂，功能结构关系中的各功能模块可以比较笼统、比较抽象。功能结构关系既可以用作图的形式来描述，也可以用硬件描述语言（Hardware Description Language, HDL）来描述
第三步	构造数据系统	经过功能划分后获得的数据系统，其中的各模块还比较抽象，功能可能还比较复杂，必须进一步对这些模块进行功能分解，直到可用合适的芯片或模块来实现具体的存储和处理功能。然后对这些芯片、模块适当连接，就可构造出数据系统的详细结构。为了简化控制系统的设计，数据系统不仅要结构简单、清晰，而且要便于控制
第四步	构造控制系统	根据导出的数据系统结构编制出控制算法，得到数字系统的控制状态图，并采用同步时序电路设计的方法完成控制系统的设计。其中，控制算法反映了数字系统中控制系统对数据系统的控制过程，它与系统所采用的数据系统的结构密切相关

一般来讲，数据系统通常为人们熟悉的各种功能电路。无论是采用现成的模块还是自行设计，都有一些固定的方法可循，不用花费太多精力，而控制系统的设计要复杂得多。因此，可以认为数字系统设计的主要任务是设计一个良好的控制系统。

1.2 现代数字系统设计

早期的数字系统设计过程主要针对中小规模集成电路。随着电子计算机技术、电子设计自动化（Electronic Design Automation, EDA）技术、MCU 技术和深亚微米（Deep Sub Micron, DSM）技术的迅猛发展，电子系统的整个设计或大部分设计过程均可由计算机来完成，以此为基础的设计方法成为现代电子系统的设计方法，也成为数字系统设计的主流方向。其主要表现是采用可编程逻辑器件（Programmable Logic Device, PLD）或微控制器来实现数字系统。其具体系统设计过程有较大不同。

1.2.1 基于PLD的EDA设计

1. 什么是基于PLD的设计

基于PLD的设计是将硬件描述语言作为主要的设计输入手段,利用EDA开发软件和编程工具对可编程逻辑器件进行开发的过程。基于EDA和PLD的设计流程。如图1-2所示。

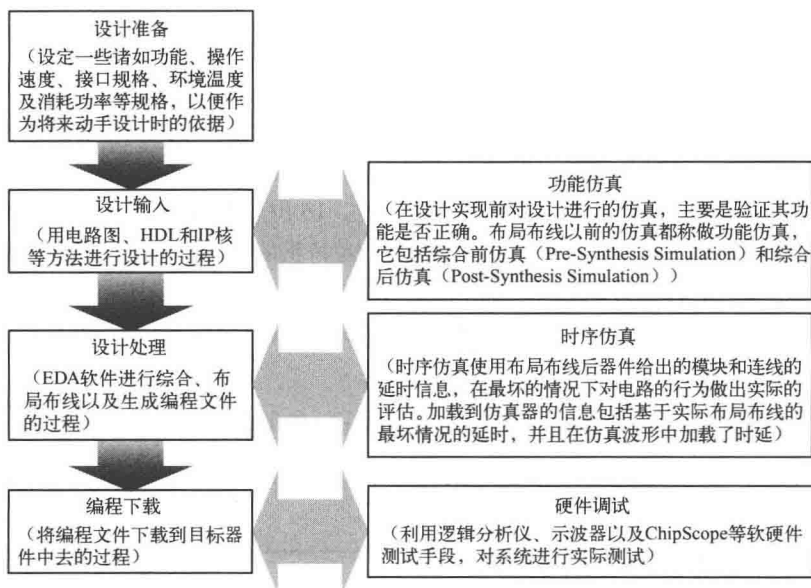


图 1-2 基于 EDA 和 PLD 的设计流程

PLD 是可以编程来对其硬件的结构和工作方式进行重构的数字逻辑器件。随着深亚微米技术的发展,PLD 的规模、功能和速度有了长足的进步。当前占主导地位的器件有两类,一类是偏于逻辑资源的 CPLD (Complex Programmable Logic Device),另一类是偏于寄存器资源的 FPGA (Field Programmable Gate Array)。它们的广泛应用为数字系统的设计带来了极大的灵活性。

硬件描述语言作为一种程序语言接口 (Programming Language Interface),提供了一个非常方便的设计入口 (Design Entry),是电路设计者与各种计算机辅助设计工具之间沟通的桥梁。不过,若缺少了 EDA 工具,硬件描述语言就只不过是一种系统规划工具或技术文件格式而已。

2. 设计特点

基于 EDA 技术的设计方法是由上而下的设计方式。它首先从系统设计入手,在顶层进行功能划分和结构设计,并在系统级采用仿真手段验证设计的正确性,然后再逐级设计低层的结构,实现设计、仿真和测试的一体化。

EDA 软件平台的另一特点是其强大的仿真 (Simulate) 和测试 (Test) 技术。所谓仿真,就是设计的输入、输出 (或中间变量) 之间的信号关系,由计算机根据设计者提供的设计方案,从各种不同层次的系统性能特点,完成一系列准确逻辑和时序验证。所谓测试,就是在完成实际系统的安装后,只需通过计算机就能对系统上的目标器件进行边界扫描测试。EDA 仿真和测试技术极大地提高了大规模系统的电子设计自动化程度。

3. 设计输入和设计流程

目前的 EDA 软件平台集成了多种设计输入方式,如电路图、HDL、波形、状态机和 IP 核 (Intellectual

Property Core) 等, 而且还提供了不同设计平台之间的信息交流接口和一定数量的功能模块库, 设计者可以根据功能模块具体情况灵活选用。

基于 EDA 和 PLD 的现代数字系统设计流程包括设计准备、设计输入、设计处理和编程下载 4 个步骤, 以及相应的功能仿真、时序仿真和硬件调试 3 个设计验证过程。

1.2.2 基于 MCU 的设计

1. 什么是 MCU

MCU 是 Micro Controller Unit (微控制器件) 的简称, 它的另一个名字是单片机。单片机是将中央处理器 (Central Processing Unit, CPU)、只读存储器 (Read Only Memory, ROM)、随机存取存储器 (Random Access Memory, RAM)、定时/计数器以及 I/O (Input/Output) 接口等部件集成在一起的微芯片。从产生至今, 单片机从 4 位单片机发展到 8 位、16 位乃至 32 位单片机, 其性能越来越强, 价格越来越低。目前, 在市场上的各类产品中均能看到单片机的身影, 小到报警器、玩具和智能充电器, 大到冰箱、电视、空调以及数据采集系统和控制终端等。单片机有多种, 表现为结构、功能、性能和价格的不同。当前, 应用最为广泛的是 Intel 51 系列的单片机。

2. MCU 的设计流程

单片机应用系统的设计主要包括外部电路设计和单片机控制程序设计, 其中以单片机控制程序设计为核心。一般来说, 一个完整的单片机应用系统设计过程如图 1-3 所示, 包括系统分析、单片机选型、单片机程序设计、仿真测试和程序下载。

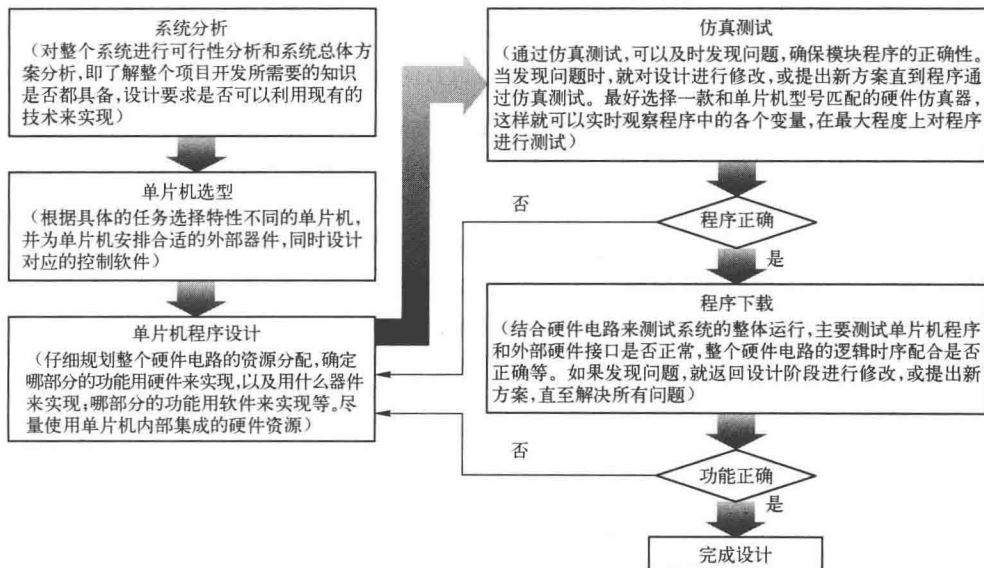


图 1-3 单片机的设计流程

3. 单片机的程序设计

在单片机程序设计中, 一般可以选择单片机汇编语言和单片机 C 语言两种。

单片机汇编语言是采用助记符标识指令的程序设计语言。其中, 助记符标识是二进制指令的形象标记。单片机汇编语言程序是单片机汇编指令的集合, 其设计与汇编指令集和硬件结构等有密切关系。汇编语言以其简练的代码、快速的硬件操作能力而最先得到广泛使用。但是, 汇编程序的可读性差, 且对于不同类型的单片机, 其汇编语言一般都有差异, 不易移植。

单片机 C 语言是对标准 C 语言的扩展。C 语言具有功能丰富的库函数,运算速度快,编译效率高,有良好的可移植性。此外,C 语言程序结构清晰,不依赖于机器硬件系统,编程人员可以不要了解单片机的指令系统。因此,单片机 C 语言得到了越来越广泛的应用。

1.2.3 基于 SoC 和 SOPC 的设计

电子系统越来越复杂,一种新的设计趋势是软硬件协同设计,其典型代表是 SoC 和 SOPC 设计。SOPC 技术以其灵活性为系统设计提供了一种更为方便有效的实现手段。

1. SoC 和 SOPC 简介

20 世纪 90 年代初,基于系统级的设计方法开始进入工程师的视野。随着半导体工艺技术的发展,特别是超深亚微米(Very Deep Sub Micron, VDSM, $0.25\mu\text{m}$) 工艺技术的成熟,在一块硅芯片上集成不同功能模块(称为系统集成芯片)成为可能。这种将各功能模块集成于一块芯片上的完整系统,就是片上系统 SoC。

SoC 的设计不再使用通用集成电路进行印刷电路板级的设计和调试,而是转向以 FPGA 或专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)为物理载体的系统级芯片设计。其中,在使用 FPGA 作为物理载体进行芯片设计时,因其具有重复可编程性,称为可编程片上系统技术,即 SOPC。

SoC 的开发是指从整个系统的功能和性能出发,利用 IP 核复用和深亚微米技术,采用软件和硬件协同的设计和验证方法,综合考虑软硬件资源的使用成本,设计出满足性能要求的高效率、低成本的软硬件体系结构,从而在一个芯片上实现复杂的应用。使用 SoC 技术设计的芯片,一般包括一个或多个微处理器和多个功能模块。各功能模块在微处理器的协调下,共同完成芯片的系统功能,为高性能、低成本、短开发周期的嵌入式系统设计提供了广阔前景。

SOPC 技术是现代计算机辅助设计技术、电子设计自动化技术和大规模集成电路技术高度发展的产物。SOPC 技术的目标是将尽可能大且完整的电子系统在一块 FPGA 中实现,使得所设计的电路在规模、可靠性、体积、功能、性能指标、上市周期、开发成本、产品维护及其硬件升级等多方面实现最优化。SOPC 的设计以 IP 为基础,以硬件描述语言为主要设计手段,借助以计算机为平台的 EDA 工具,自动化、智能化地自顶向下进行。

目前,基于 SOPC 的软硬件协同设计主要涉及的内容如表 1-3 所示。

表 1-3 软硬件协同设计

名 称	功 用
系统功能描述方法	解决系统的统一描述。系统的描述应当是对软、硬件通用的,目前一般采用系统描述语言的方式。在软、硬件划分后,能编译并映射为硬件描述语言和软件实现语言,为目标系统的软硬件协同工作提供强有力的保证
设计空间搜索技术	提供一种理解目标系统、用不同方式实现设计的机制,为设计者提出不同的软硬件体系结构并找到最优化的设计实现
最优化的评估方法	解决软硬件的计量和评估指标,从而能够对不同的设计进行资源占用评估,进而选出最优化的设计
软硬件划分理论	从成本和性能出发,提供软硬件的划分依据和方法。在划分时,应主要考虑目标体系结构、粒度、软硬件实现所用的成本等因素
软硬件详细设计	完成划分后的软件和硬件的设计实现
硬件综合和软件编译	硬件综合是在厂家综合库的支持下,完成行为级、RTL 及逻辑级的综合
代码优化	主要是进行与处理器相关的优化和与处理器无关的优化。与处理器相关的优化:根据处理器进行代码选择、指令选择、指令的调度(并行、流水线等)确定寄存器的分配策略等;与处理器无关的优化:主要有常量优化、变量优化和代换、表达式优化、消除无用变量、控制流优化和循环内优化等
软硬件协同仿真和验证	对设计好的系统进行仿真和验证。保证目标系统的功能实现,满足性能要求和限制条件,从整体上验证整个系统

2. 基于 SOPC 的软硬件协同设计流程

基于 SOPC 的软硬件协同设计流程是从目标系统构思开始的。对一个给定的目标系统，经过构思，完成其系统整体描述，然后交给软硬件协同设计的开发集成环境，由计算机自动完成剩余的全部工作。一般而言，还要经过模块的行为描述、对模块的有效性检查、软硬件划分、硬件综合、软件编译、软硬件集成、软硬件协同仿真与验证等各个阶段。软硬件协同设计流程如图 1-4 所示，其中，软硬件划分后产生硬件部分、软件部分和软硬件接口界面 3 个部分。硬件部分遵循硬件描述、硬件综合与配置，生成硬件组建和配置模块；软件部分遵循软件描述、软件生成和参数化的步骤，生成软件模块。最后把生成的软硬件模块和软硬件界面集成，并进行软硬件协同仿真，以进行系统评估与设计验证。

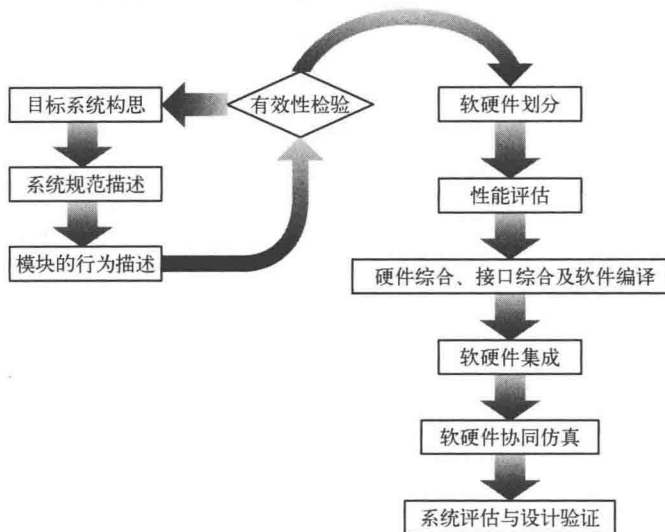


图 1-4 软硬件协同设计流程

3. 基于 SOPC 的软硬件协同设计工具

(1) Cadence Virtual Component Co-design (VCC)

第一个为 IP 复用所设计的工业系统级软硬件 Co-design 开发平台环境。在早期设计时，就可以确认软硬件划分的临界体系结构。它通过电子供给链进行交流和交换设计信息，为系统库和 SoC 提供了必要的框架。

(2) System C

一种通过类对象扩展的基于 C/C++ 的建模平台，支持系统级软硬件协同设计仿真和验证，是建立在 C++ 基础上的新型建模方法，方便了系统级设计和 IP 交换。用 System C 开发的硬件模型经编译后形成一个可执行的应用程序，设计人员可通过控制台界面来观察系统的行为，验证系统功能和结构。在 System C 语言描述中，最基本的构造块是进程。一个完整的系统描述包含几个并发进程，进程之间通过信号互相联系，且可以通过外在时钟确定事件的顺序和进程同步。System C 源码可用于综合硬件，以便 IC 实现或 FPGA 实现。

(3) 其他商用软件

当前，各 FPGA 厂商都在其 FPGA 开发平台中集成了支持软硬件协同设计的功能和工具。Altera 公司的 Quartus II 软件平台集成了作为系统生成工具的 SOPC Builder。通过 SOPC Builder，FPGA 设计人员可以构建其特有的 Nios II 处理器核，配合面向 SOPC Builder 的 IP 核，如 PCI 接口和 DDR/DDR2 外部存储器等，设计人员可迅速生成 SOPC 系统，相应的设计工具可提高设计集成度和可重用性。

Xilinx 公司的 XPS (Xilinx Platform Studio) 工具包用于开发基于该公司的 FPGA 嵌入式系统。该工具支持一般硬件逻辑和嵌入式软件的系统设计流程。其特点是 XPS 支持硬核 PowerPC 和软核 Microblaze 等多种处理器,并将设计的导入、创建和 IP 核定制进行了流水化的处理。XPS 知道 FPGA 平台的属性和选项,能自动为其外设生成软件驱动、测试代码以及创建板级支持包 BSP (Board Support Package)。此外, XPS 集成了软件和硬件调试工具,使它们之间可以相互触发,这使得嵌入式系统内部变为“可见”的,使嵌入式设计者能很快地找到问题。

4. 基于 SOPC 的软硬件协同设计的特点

SOPC 技术在电子设计上给出了一种以人的基本能力为依据的软硬件综合解决方案。它同时涉及了软件设计和底层的硬件设计,在系统化方面有了更大的自由度。开发者在软硬件系统的综合与构建方面可以充分发挥创造性和想象力,使得多角度、多因素和多结构层次的大幅度优化设计成为可能。使用其可编程特性并与现成的 IP 核相结合,可以快速、经济地开发出不同的协处理器,从而真正实现硬件编程、升级和重构。随着 FPGA 制造工艺的发展,这种优势将更加明显。

软硬件协同设计作为系统级设计的支持技术,其理论和技术一直在不断发展和完善中。随着软硬件协同设计技术研究的深入,在不久的将来,支持 FPGA 设计实现的功能强大的软硬件协同设计平台将会出现,并加速推进 SOPC 的设计开发进程。

1.3 可在线调试 8051 的 SOPC 实验教学平台

SOPC 技术虽已发展多年,但在本科教学中普及的并不理想。电子类本科生对 SOPC 设计理念和相关技术的理解和掌握相当不够。究其主要原因在于,现有商用 SOPC 系统的门槛较高,其处理器以及相关的开发工具链与现有基础课程脱节,难以融入常规课程体系中进行大面积推广。

本综合实验教学则采用了各大专院校普遍开设的经典基础课程——8051 单片机。同时,为其开发了可在线调试程序的功能,解决了该处理器在 SOPC 实验教学中使用的瓶颈。

1.3.1 基于 8051 单片机的 SOPC 平台

随着 FPGA 及 EDA 技术的发展,特别是 MCU IP 核技术的发展,出现了多种可在 FPGA 中应用的性能不同的 MCU 软核。其中,针对经典的 8051 单片机,出现了几个比较典型的 8051 IP 核,如 DW8051 核、OC8051 核、T51 核及 MC8051 核等。这些软核具有 8051 单片机简单易用的良好特性,对嵌入式系统和 SOPC 技术的发展和應用起到积极的促进作用。其中,最值得一提的是 Oregano Systems 公司提供的开源软核 MC8051。该软核用 VHDL 语言设计,代码可配合各种设计平台综合实现,可根据实际需要进行配置。该 IP 核性能稳定,非常适合 SOPC 应用设计和实践教学,因此成为本实验平台中处理器的原型。

(1) MC8051 功能特点

基本的 MC8051 IP 核的功能特点如下:

- ① 采用完全同步设计。
- ② 指令集和标准 8051 单片机完全兼容。
- ③ 指令执行时间为 1~4 个时钟周期,性能优于标准 8051 的 8 倍左右。
- ④ 用户可选择内部定时/计数器、串行接口单元的数量。
- ⑤ 新增特殊功能寄存器,用于选择不同的定时/计数器、串行接口单元。
- ⑥ 可选择是否使用乘法器(乘法指令 MUL)。

- ⑦ 可选择是否使用除法器（除法指令 DIV）。
- ⑧ 可选择是否使用十进制调整功能（十进制调整指令 DA）。
- ⑨ I/O 口不复用。
- ⑩ 内部带 256B RAM。
- ⑪ 最多可扩展至 64KB 的 ROM 和 64KB 的 RAM。

(2) MC8051 结构与层次

MC8051 IP 核的顶层结构如图 1-5 所示，顶层 MC8051_top 包括处理器核心 MC8051_core 和 3 个存储模块：内部存储模块 MC8051_ram、外部代码存储模块 MC8051_rom 和外部数据存储模块 MC8051_ramx。存储模块处于设计的顶层而不包括于核心内，可便于不同 FPGA 平台的应用设计及仿真。处理器核心 MC8051_core 由定时/计数器 MC8051_tmrcrtr、算术逻辑运算单元 MC8051_alu、串行接口 MC8051_siu 和控制单元等模块组成。图 1-5 中虚线表示定时/计数器和串行接口单元的数量可调，图中还表示了顶层的 I/O 接口。如表 1-5 所示为顶层输出的各引脚信号的对应功能。

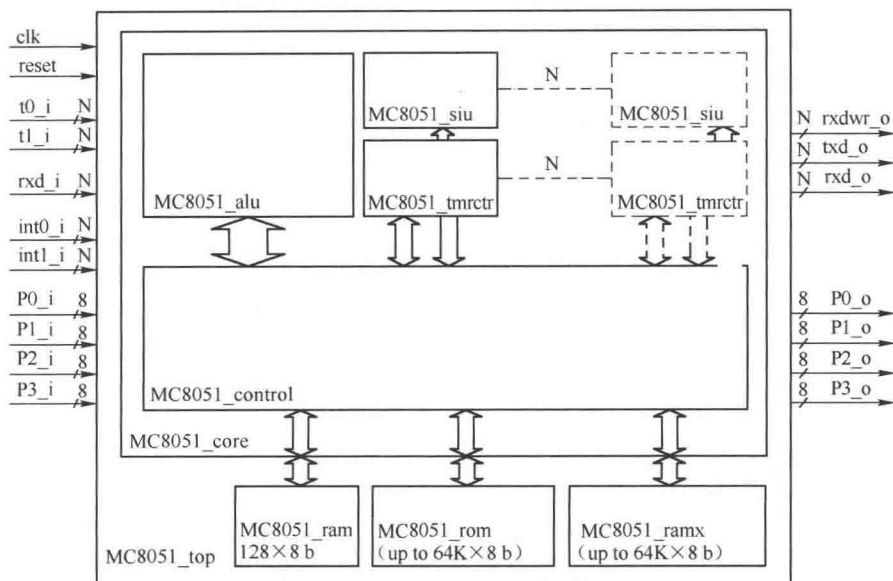


图 1-5 MC8051 IP 核顶层结构图

表 1-5 顶层输出的各引脚信号

信号名	描述	信号名	描述
clk	系统时钟，只与时钟上升沿	P2_i	P2 口输入引脚
reset	异步复位所有触发器	P3_i	P3 口输入引脚
t0_i	定时/计数器 0 输入引脚	rx_dwr_o	rx_d 输入/输出方向控制信号（高电平输出）
t1_i	定时/计数器 1 输入引脚	tx_d_o	串口数据输出引脚
rx_d_i	串口数据接收输入端	rx_d_o	串口工作于模式 0 时的数据输出引脚
int0_i	外部中断 0 输入引脚	P0_o	P0 口输出引脚
int1_i	外部中断 1 输入引脚	P1_o	P1 口输出引脚
P0_i	P0 口输入引脚	P2_o	P2 口输出引脚
P1_i	P1 口输入引脚	P3_o	P3 口输出引脚

(3) MC8051 核的使用方法简述

根据前面的讨论和实践教学的特点,在实际应用中,MC8051 核可采用两种使用方式。

① 单片机方式

该方式下,把一块 FPGA 芯片配置成一个完整的单片机或其最小系统,其结构如图 1-6 所示。MC8051 的各端口做成双向口并引出到 FPGA 引脚。通过定制系统主频和存储空间,用户可把该 FPGA 芯片作为一块独立的 8051 单片机来使用。该方式主要针对各种纯单片机的实验应用。这样,只用一块 FPGA 芯片,既可以开展 EDA 实验,也可以开展单片机实验,有效地节约了实验成本,简化了实验硬件维护。

② SOPC 方式

该方式的系统结构如图 1-7 所示。MC8051 仅作为 FPGA 中 SOPC 系统的控制处理模块,与用户自制的其他逻辑模块互连,协同完成指定的电路应用功能。该方式更加强调系统功能的整体功能优化配置。不难看出,该方式需要深入挖掘 MC8051 潜力,需要与 FPGA 逻辑之间在资源、性能和开发难度等方面进行系统级的综合考虑,才能体现出设计者更高的技术水平。

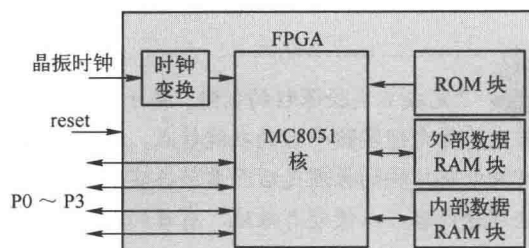


图 1-6 MC8051 完整单片机结构

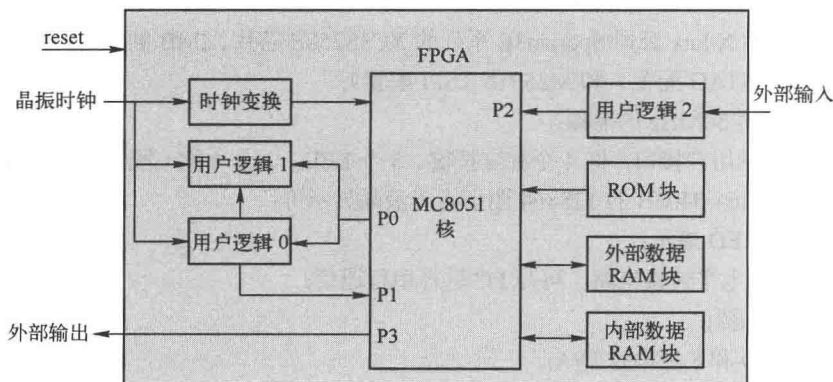


图 1-7 MC8051 的 SOPC 应用结构举例

1.3.2 小结

现代电子技术体现的是系统的综合设计,本实验课程的教学目的则是培养学生多技术多平台的综合设计能力。具体来说,本书后面章节将引领读者以“做中学”的方式对 EDA 和单片机这两种应用技术应用设计开展切实的设计体验,培养工程的素养并积累实践开发的经验。对于 SOPC,作者需要强调的是,本教材最重要的特点在于通过学习和实践,理解和掌握 SOPC 的设计理念而非某一个具体复杂的 SOPC 商用系统。经验表明,学生在有了相当基础积累后,将很容易切入今后项目开发中的高性能商用系统。

第 2 章 实验硬件平台



“完成本实验课程的训练，脑子里一定要有电路”。本章介绍与本书配套的综合实验硬件平台。首先总体介绍实验平台的功能特点，然后详细讲述其核心板和底板的硬件电路模块。实验平台中各硬件电路模块的原理是后面章节各实验项目的基础，也是初学者最容易忽略的部分。希望读者熟悉这部分内容，以便能有效地、有目的地进行实验，并在遇到相关问题时可以自主分析和独立解决。该实验平台的设计与研制综合了多个曾用实验系统的优点，也可为读者以后设计自己的硬件电路提供有益的参考。

2.1 实验平台功能特点

本综合实验平台集多种功能于一体，是 EDA 应用、51 单片机应用及 SOPC 课程教学与实验、创新实践活动和电子竞赛训练项目的良好选择。开发平台采用核心板加底板的层叠式结构，更换不同配置的核心板或底板，即可实现不同的功能组合，非常便于功能扩展、技术更新和设备维护。

本实验硬件平台包括的各项功能特点如下：

- (1) 核心板标配为 Xilinx 公司 Spartan3E 系列的 XC3S250E 芯片、2MB 的 Flash、32KB 的 SRAM、配置器件 XCF02/04 (JTAG 配置) 和 M25P16 (SPI 配置)；
- (2) 实验平台采用 50MHz 的晶振；
- (3) 核心板还包括用户接口，即 4 个独立按键、8 个 LED、2 个 4 位七段数码管和 8 位拨码开关；
- (4) 标配 FYD12864-0402B 的 128×64 图形点阵液晶显示屏；
- (5) 16×16 点阵 LED 显示；
- (6) 具有 RS-232 电平转换电路，可与 PC 进行串行通信；
- (7) 1 个交流蜂鸣器；
- (8) 8 位串行 A/D 和 8 位串行 D/A；
- (9) 实时时钟 PCF8563；
- (10) 数字温度传感器 LM75A；
- (11) 具有 PS/2 键盘和鼠标接口，能够扩展系统的输入设备；
- (12) 具有 256 色 VGA 接口；
- (13) 具有红外收发模块 HW038；
- (14) 底板上设有用户扩展接口，方便用户扩展实验板以外的其他各种功能电路；
- (15) 底板上有一系列功能跳线接口，方便与底板上的特定功能模块进行连接。

2.2 核心板电路分析

开发平台采用核心板加底板的结构，考虑核心板对用户的实用性，现提供的核心板上除设置 FPGA、配置芯片以及用户扩展存储器外，还设置了拨码开关、按键等输入接口和 LED、数码管等显示模块，以及 9V 电源插座等。基于独立的核心板，用户一方面可通过连接其他的外围功能电路，从而用于电子设计竞赛等定制的应用和用户自己的设计项目；另一方面，也可根据开放的接口来自行定制和升级核心板。