

高等学校电子信息类专业“十二五”规划实践教材

数字电路与FPGA 设计实验教程

徐少莹 任爱锋 编著
石光明 主审

高等学校电子信息类专业“十二五”规划实践教材

数字电路与 FPGA 设计 实验教程

徐少莹 任爱锋 编著
石光明 主审

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是国家级电工电子实验示范中心规划教材。全书共6章：第1章介绍了数字电路设计方法与实验方法；第2章介绍了常用计算机EDA软件；第3章介绍了数字电路的VHDL描述方法；第4章介绍了数字电路常用实验仪器；第5章是数字电路基础实验；第6章是数字电路的FPGA设计实例。

本书内容丰富，编排合理，可作为通信工程、电子信息工程、自动控制、电子科学与技术、电气信息工程、微电子学等专业本科生、专科生的数字电路和数字电路EDA课程的实验教材以及课程设计的参考书，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字电路与FPGA设计实验教程/徐少莹，任爱锋编著。

—西安：西安电子科技大学出版社，2012.11

高等学校电子信息类专业“十二五”规划实践教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2941 - 4

I. ① 数… II. ① 徐… ② 任… III. ① 数字电路—

可编程逻辑阵列—高等学校—教材 IV. ① TN790.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 248634 号

策划编辑 张 媛

责任编辑 雷鸿俊 张 媛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2012年11月第1版 2012年11月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18

字 数 426千字

印 数 1~2000册

定 价 31.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2941 - 4/TN

XDUP 3233001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜，谨防盗版。

前 言

EDA(Electronic Design Automation)即电子设计自动化,是现代电子工程领域的一门新技术,它提供了基于计算机和信息技术的电路系统设计方法。EDA 技术的发展和推广应用极大地推动了电子工业的发展。随着 EDA 技术的发展,硬件电子电路的设计几乎全部可以依靠计算机来完成,这样就大大缩短了硬件电子电路设计的周期,从而使制造商可以快速开发出品种多、批量小的产品,以满足市场的需求。EDA 教学和产业界的技术推广是当今世界的一个技术热点,EDA 技术是现代电子工业中不可缺少的一项技术。

VHDL(Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language,超高速集成电路硬件描述语言)是一种电子设计师用来设计硬件系统与电路的高级语言。用硬件描述语言 HDL 描绘出硬件的结构或硬件的行为,再用 EDA 工具将这些描述综合映射成与半导体工艺有关的硬件配置文件,半导体器件(如 FPGA,即 Field Programmable Gate Array)则是这些硬件配置文件的载体。当这些 FPGA 器件加载、配置上不同的文件时,这个器件便具有了相应的功能。

鉴于 EDA 技术的快速发展,数字电路课程和数字电路实验课程的改革势在必行。数字电路课程的教学目标是培养学生掌握 EDA 技术和使用 FPGA 器件的能力。为此,我们在进行数字电路实践课程教学改革工作的过程中编写了本教材,旨在优化数字电路的实验与课程设计的教学内容与方法,达到引导学生掌握数字电路实验与 EDA 技术,促进学生创新实践,提高学生综合素质的目的。在编写中,我们特别注意了以下两个方面:

(1) 突出新技术、新器件的应用。本书引入了目前流行的电子电路设计仿真软件 Multisim 10 和可编程逻辑电路编程软件 Quartus II 等 EDA 软件,可为学生以后深入学习 EDA 技术打下基础。

(2) 注重将基础训练与创新提高相结合。在实验项目安排中,将实验分为基础型、设计型和综合应用型等类型,以兼顾不同层次和不同要求的数字逻辑电路课程实践教学的需求,也利于使用该书的读者在多方面有所获益。

本书内容编排如下:

第 1 章介绍数字电路设计方法与实验方法,强调在实验中进行检查和排除故障的方法。第 2 章介绍常用计算机 EDA 软件,包括仿真软件 NI Multisim、FPGA 设计软件 Quartus II 和 PCB 设计软件 Protel 99SE。第 3 章介绍数字电路的 VHDL 描述方法,其中包括组合电路、时序逻辑电路、有限状态机的 VHDL 描述方法以及数字电路的层次化设计方法。第 4 章介绍数字电路常用实验仪器,包括函数信号发生器、示波器和数字电路实验箱。对于函数信号发生器,介绍了两种型号仪器的使用方法,而示波器则主要介绍了数字存储示波器的使用。第 5 章是数字电路基础实验,包括传统的基本数字电路实验和基本实验的 FPGA 下载(可以用原理图或 VHDL 描述电路)。第 6 章是数字电路的 FPGA 设计实例,用几个实例说明了复杂的数字系统如何用 FPGA 实现并给出了几个 EDA 综合设计题,供读者选做。

本书第 1、2、4、5 章和附录由徐少莹编写,第 3、6 章由任爱锋编写,徐少莹负责统筹

全稿。石光明老师在百忙中审阅了全书并提出了许多宝贵的建议和修改意见。周佳社老师对本书的编排给予了许多帮助。在此，对给予帮助的所有老师表示衷心的感谢。

由于水平有限，本书难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2012 年 8 月

目 录

第 1 章 数字电路设计方法与实验方法	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 数字电路的设计方法	(2)
1.2.1 数字电路设计的基本原则	(2)
1.2.2 数字电路设计的一般步骤	(2)
1.2.3 单元电路的设计	(3)
1.3 数字电路实验的一般步骤	(4)
1.4 数字电路实验方法	(6)
1.4.1 实验规则	(6)
1.4.2 电路调试中应注意的问题	(8)
1.4.3 检查故障和排除故障的一般方法	(9)
第 2 章 计算机仿真软件、FPGA 设计软件和 PCB 设计软件介绍	(11)
2.1 NI Multisim 软件简介	(11)
2.1.1 NI Multisim 10 的主窗口及工具栏	(11)
2.1.2 电路原理图的输入与绘制	(12)
2.1.3 Multisim 中仪表库的使用	(18)
2.1.4 Multisim 10 的电路分析功能	(28)
2.2 FPGA 设计软件 Quartus II 简介	(34)
2.2.1 简介	(34)
2.2.2 Quartus II 软件的设计过程	(38)
2.2.3 设计输入	(39)
2.2.4 设计项目的编译	(62)
2.2.5 设计项目的仿真验证	(72)
2.2.6 时序分析	(78)
2.2.7 引脚分配	(82)
2.2.8 器件编程	(83)
2.3 PCB 设计软件 Protel 99SE 简介	(88)
2.3.1 原理图设计	(89)
2.3.2 印制电路板(PCB)设计	(97)
第 3 章 数字电路的 VHDL 描述方法	(103)
3.1 VHDL 简介	(103)

3.1.1	VHDL 的诞生	(103)
3.1.2	VHDL 的特点	(103)
3.1.3	VHDL 语言设计基本流程	(104)
3.1.4	软件开发工具	(105)
3.2	组合电路的 VHDL 描述	(105)
3.2.1	VHDL 的基本模型结构	(106)
3.2.2	VHDL 实例	(110)
3.2.3	VHDL 的数据对象和数据类型	(113)
3.2.4	VHDL 的运算操作符	(117)
3.2.5	VHDL 的基本语句	(119)
3.3	时序逻辑电路的 VHDL 描述	(126)
3.3.1	时钟信号不同表述下 D 触发器的 VHDL 描述	(126)
3.3.2	进程(PROCESS)语句	(128)
3.3.3	VHDL 实例介绍	(132)
3.3.4	有限状态机设计	(141)
3.4	层次化设计的 VHDL 描述	(146)
3.4.1	层次化设计方式	(146)
3.4.2	子程序结构	(147)
3.4.3	用于层次化描述的 VHDL 语言基础	(152)
3.4.4	层次化设计实例	(154)
第 4 章	数字电路实验常用电子仪器简介	(158)
4.1	概述	(158)
4.2	函数信号发生器	(159)
4.2.1	函数信号发生器的实现方法	(159)
4.2.2	函数信号发生器 TFG1010 的使用	(160)
4.2.3	函数信号发生器 FG-506 的使用	(163)
4.3	示波器	(165)
4.3.1	数字存储示波器的特点	(165)
4.3.2	数字存储示波器 GDS-2062 的介绍与使用	(169)
4.4	数字电路实验箱	(173)
4.4.1	数字电路实验箱简介	(173)
4.4.2	数字电路实验箱框图简介	(173)
第 5 章	数字电路基础实验	(176)
5.1	组合逻辑研究实验(一)	(176)
5.1.1	实验准备与要求	(176)
5.1.2	设计举例	(180)
5.1.3	实验内容	(185)
5.2	组合逻辑研究实验(二)	(185)
5.2.1	实验准备与要求	(185)

5.2.2 设计举例	(188)
5.2.3 实验内容	(193)
5.3 集成触发器实验	(194)
5.3.1 实验准备与要求	(194)
5.3.2 实验内容	(198)
5.4 计数器及其应用研究实验	(199)
5.4.1 实验准备与要求	(199)
5.4.2 设计举例	(202)
5.4.3 实验内容	(207)
5.5 移位寄存器及其应用实验	(208)
5.5.1 实验准备与要求	(208)
5.5.2 实验原理	(209)
5.5.3 实验内容	(214)
5.6 脉冲波形的产生与形成实验	(214)
5.6.1 实验准备与要求	(214)
5.6.2 实验原理	(215)
5.6.3 实验内容	(218)
5.7 发光二极管点阵显示器的应用实验	(218)
5.7.1 实验内容及要求	(218)
5.7.2 设计说明及思路提示	(219)
5.7.3 设计举例	(220)
5.8 时钟控制器的设计实验	(223)
5.8.1 实验内容及要求	(223)
5.8.2 设计说明及思路提示	(223)
5.9 十字路口交通灯自动控制器的设计实验	(226)
5.9.1 实验内容及要求	(226)
5.9.2 设计说明及思路提示	(227)
5.10 D/A 及 A/D 转换器实验	(227)
5.10.1 实验要求	(227)
5.10.2 实验原理	(228)
5.10.3 实验内容与步骤	(232)
第 6 章 数字电路的 FPGA 设计实例	(234)
6.1 数字电路的 FPGA 设计方法	(234)
6.2 基于 FPGA 的 DDS 波形发生器的设计	(236)
6.2.1 DDS 的基本原理	(236)
6.2.2 DDS 的顶层设计	(237)
6.2.3 子模块设计	(237)
6.2.4 功能和时序仿真	(245)

6.3	VGA 视频信号产生	(249)
6.3.1	设计原理	(249)
6.3.2	VGA 同步信号产生	(251)
6.3.3	字符的视频显示设计	(254)
6.4	PS/2 键盘接口的 FPGA 设计	(259)
6.4.1	PS/2 接口连接器	(259)
6.4.2	键盘扫描编码	(259)
6.4.3	PS/2 串行数据传输	(261)
6.4.4	用 FPGA 实现 PS/2 键盘接口通信的 VHDL 设计	(263)
6.4.5	设计应用	(264)
6.5	EDA 综合设计题目	(265)
6.5.1	自动售货控制系统设计	(265)
6.5.2	PS/2 键盘接口控制器设计	(266)
6.5.3	VGA 图像显示控制模块	(267)
6.5.4	基于 FPGA 的电梯控制系统的设计	(269)
6.5.5	洗衣机洗涤控制系统的设计	(270)
6.5.6	基于 FPGA 的多路数据采集系统的设计	(272)
附录	数字集成电路外引线排列图	(273)
参考文献		(280)

第1章

数字电路设计方法与实验方法

1.1 概 述

数字电子技术是当前发展最快的学科之一。随着集成电路工艺的发展,数字集成器件已经经历了从小规模集成电路(SSI)、中规模集成电路(MSI)、大规模集成电路(LSI)到超大规模集成电路(VLSI)的发展过程。特别是半导体存储器和可编程逻辑器件的使用,使得数字技术在各个领域得到了非常广泛的应用。而且,数字电子技术是计算机课程的基础,更是通信、信号与信息处理等领域不可缺少的重要组成部分。数字电路是实践性很强的一门课程,因此,在学好理论课程的同时,理论联系实际,动手做好数字电路实验,也是十分必要的。

数字电子技术的迅猛发展,对当代大学生在电子线路实验创新精神和创新能力方面提出了更高的要求。实验,作为一种更好地掌握理论知识,进一步将理论应用于实际的手段,在数字逻辑电路课程中占据着极为重要的地位。开设数字电路实验课程的目的,就是培养学生的实验技能,在此基础上,进一步发挥他们的潜能,激发他们的创新意识,为其以后成为一名合格的电子工程师打好基础。

数字电路是一门应用性很强的课程,而数字电路实验是该课程的重要教学环节之一。数字电路实验就是按教学、生产和科研的具体要求对所设计的线路进行安装、调试与测试的过程。在实验过程中,既能验证理论的正确性和实用性,又能从中发现理论的近似性和局限性,并且往往可以发现新问题,产生新设想,从而既促使数字电路和应用技术的进一步发展,又培养了学生的创新意识和创新能力。

目前,数字电路的发展日新月异,新器件、新电路相继产生并迅速转化为生产力。要认识和掌握应用种类繁多的新器件和新电路,最为有效的途径就是进行实验。通过实验,可以分析器件和电路的工作原理,完成性能指标的检测;可以验证和扩展器件、电路的性能或功能的使用范围;可以设计并制作出各种实用电路和实用产品。可见,熟练掌握数字电路实验技术,对从事无线电技术工作的人员来说是至关重要的。

通过电子线路实验可以巩固和加深数字电路基础理论和基本概念,使学生受到必要的基本实验技能的训练,学会识别和选择所需的元器件,设计、安装和调试实验电路,分析

实验结果，从而提高其实际动手能力以及分析问题和解决问题的能力。

1.2 数字电路的设计方法

1.2.1 数字电路设计的基本原则

数字电路设计是指根据设计任务、要求和条件，选择合适的方案，确定电路的总体组成框图，接着对单元电路进行设计，最后得到满足技术指标和功能要求的完整电路图的过程。

一个好的设计不但要满足设计要求，还要求电路简单可靠，系统集成度高，兼容性好，性价比高，同时还要求系统功耗小，安装调试方便。

1.2.2 数字电路设计的一般步骤

数字电路和系统的设计不是一个简单、一次就能完成的过程，而是一个不断完善、反复试探的过程。一般情况下，可以按如下步骤来完成数字电路和系统的设计：

(1) 仔细研究题目，反复阅读设计任务书，明确设计要求。

在接到设计课题后，一定要仔细分析、充分理解题目的要求，这是完成数字电路和系统设计的前提。

(2) 进行方案选择，画出总体框图。

在明确了题目以后，就可以进行总体方案设计了。可以通过查找参考资料和利用网络检索资料，参考与设计课题相近的电路方案，选择满足要求的器件。对于同一个题目，实现的方案可能有很多个，我们可以将不同的方案与途径加以对比，根据自己现有的条件从中选择一种方案来实现。

一旦方案选定，就着手构筑总体框图，将系统分解成若干个模块，明确每个模块的功能和任务、各模块之间的连接关系，以及信号在各模块之间的流向等，并画出一个能表示系统基本组成和相互关系的总体组成框图。

例如，设计一个十字路口交通灯自动控制器电路，并要求系统在黄灯亮时闪烁，具有处理紧急情况的功能。由题目要求可知，该系统要完成的主要功能是十字路口的红、黄、绿灯按要求亮、灭。根据要求，可以设计出系统的总体框图如图 1.2.1 所示。

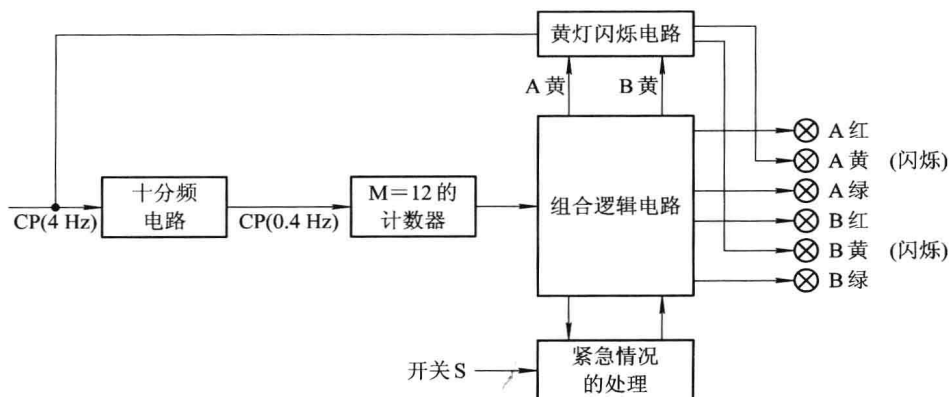


图 1.2.1 十字路口交通灯自动控制器电路总体框图

(3) 设计模块中的单元电路并进行计算机仿真。

各模块的功能与任务确定后,就可以利用我们学过的知识设计模块中的单元电路,包括具体电路的形式、电路元器件的选择、参数的计算等。必要时,还应该参阅一些课外资料,以补充课本知识的不足。在这一阶段,可充分利用 EDA 软件(如 Multisim 和 Quartus II)来帮助设计电路,优化调整电路结构和元器件数值,直到达到指标要求。

如果各单元电路理论设计和计算机的仿真结果符合要求,那么我们还要将各单元电路连接起来进行仿真,看总体是否达到了要求、各模块之间配合是否合理正确以及信号流向是否顺畅。如果发现问题,则需要回过头来重新审视各部分电路的设计,进一步调整、改进各部分电路设计和连接关系,这一过程可能要反复多次,直到计算机仿真结果证明电路设计确实正确无误为止。

在图 1.2.1 中,各单元电路的设计可分析如下:在函数发生器中提供 4 Hz 的脉冲信号(或用 555 定时器振荡产生 4 Hz 的脉冲信号)后,用计数器进行十分频,得到 0.4 Hz 的信号,作为系统时钟。然后,用计数器设计一个模数等于 12 的计数器(因为系统循环一周需要 12 个系统时钟)。再用门电路进行组合,得到所需要的红、黄、绿交通灯,使灯按要求亮、灭。紧急情况可用手动开关控制,低电平有效。黄灯闪烁可用一个与门实现,将 4 Hz 的脉冲信号和黄灯信号相与就可得到闪烁的黄灯信号。

(4) 元器件的选择与应用。

电路是由若干元器件构成的,对元器件性能的深入了解和应用是保证正确设计和达到指标的关键之一。有时候,一个元器件的应用或一个新的元器件的出现,将会使系统简化而变得十分容易实现。在一般情况下,对于元器件选择,建议在保证电路性能的前提下,尽量选用常见的、通用性好的、价格相对低廉、手头有的或容易买到的。一切从实际需求出发,将分立元件与集成电路巧妙地结合起来,而且尽量应用集成电路,以使系统简化、体积小、可靠性高。在应用集成电路时,除了考虑集成电路的功能和性能指标外,还要注意芯片的供电电压、功耗和速度等因素。

在上面的交通灯电路中,十分频计数器可选用二一五一十进制异步计数器 74LS90, $M=12$ 的计数器可选用四位同步可预置计数器 74LS161,组合逻辑电路以及紧急情况的处理、黄灯闪烁电路可选用门电路或中规模的组合逻辑器件译码器或数据选择器等。

(5) 画出总体电路图。

在单元电路设计完成后,应画出能反映各单元电路连接关系的完整的电路图。此电路图只能是一个初步设计的草图,在经过实验调试后,才能绘制正式的总体电路图。要求绘制的总体电路图布局合理,排列均匀,图面清晰,便于读图和理解,而且应标出信号的流向。一般电路图应从信号源开始画起,按照从左到右或从上到下的信号流向依次画出各单元电路。

1.2.3 单元电路的设计

数字电路中单元电路的设计包括组合逻辑电路的设计和时序逻辑电路的设计两大部分,对于这两大部分的设计讨论如下。

1. 组合逻辑电路的设计

组合逻辑电路的设计以所用组合逻辑器件个数最少、品种最少以及器件间的连线最少

为基本原则，它的设计步骤如下：

- (1) 根据所给题目，进行逻辑抽象，列出真值表。
- (2) 利用逻辑代数化简法或卡诺图化简法写出逻辑函数表达式。
- (3) 将逻辑函数表达式化简为最简表达式或变换成中规模逻辑器件(MSI)所需要的函数形式。
- (4) 画出逻辑电路图。

2. 时序逻辑电路的设计

采用 SSI 器件设计同步时序电路时，以使用门和触发器数目最少以及连线最少为追求目标；采用 MSI 器件设计同步时序电路时，除了要求用较少的集成芯片和较少的连线实现电路外，还要求设计的电路和实现的逻辑功能之间有明显的对应关系，这样便于理解和查找故障。

采用 MSI 器件设计同步时序电路的步骤如下：

- (1) 状态化简一般不必进行，只有在某些特殊情况下，如化简能够减少 MSI 器件的数目，才需要进行状态化简。
- (2) 状态分配根据器件的功能而定。在选择了合适的 MSI 器件后，可根据它的操作特点来进行状态分配。

(3) 求激励方程和输出函数时，应该先确定 MSI 器件在每个状态下执行的操作功能，然后根据需要执行的操作去设置各控制端的激励，进而再导出激励方程和输出方程。

对于数字电路的 FPGA 设计方法在本书的第 6 章将有详细的论述。

1.3 数字电路实验的一般步骤

数字电路实验一般包括以下几个步骤：

第一步，拿到实验任务以后，首先要进行理论设计。

先要画出整个系统的框图。这就要求查阅相关的资料，选出能够实现任务要求的最佳设计方案，然后把系统划分为若干个单元电路，将技术指标和功能分配给各个单元电路。有了这些单元电路，就可以进行各个单元电路的设计了，然后把各单元电路联系起来，就组成了一个系统。

在理论准备阶段，可以利用仿真软件进行系统仿真。现在常用的系统仿真软件有 Electronic Workbench、Multisim 10 等，在本书的第 2 章对 Multisim 10 将有详细的介绍。对于比较简单的电路，可在电路仿真的基础上，反复调试电路直至达到任务要求为止。但是对于一个复杂的系统，电路设计不是一个简单的、一次就能完成的过程，而是一个逐步试探的过程。所以，有了仿真软件，就能缩短电路设计的进程，但是，仿真绝不能代替硬件实验，它只是理论设计的一种延伸。

第二步，正确选择元器件。

首先应该对元器件的功能、性能、特性参数等有所了解，所选元器件的精度、速度必须满足设计要求。

对于数字器件而言，运算速度是很重要的一个技术指标。例如，在用数字方法实现多波形发生器电路时，地址计数器的选用就涉及器件的速度问题。用数字方法产生多种波形的原理是读出存入 EPROM 中的波形数据，再经过 D/A 转换器产生所需要的模拟波形。

它的原理框图如图 1.3.1 所示。

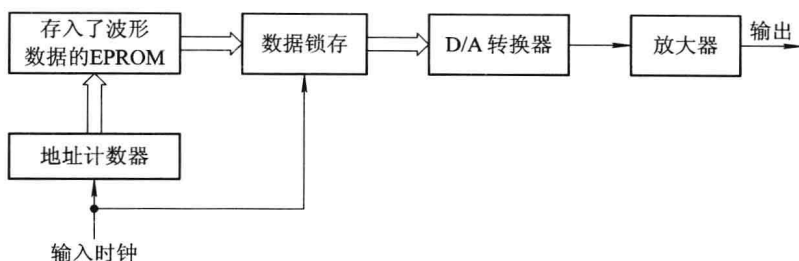


图 1.3.1 数字方法产生多种波形的原理框图

图 1.3.1 中，地址计数器的作用是指定 EPROM 数据写入的地址。地址计数器如果采用普通的 CD4040B，在电源电压为 +5 V 时计数频率只能达到 10 MHz，这会影响到后续电路，跟不上 D/A 转换器的速度。但如果将地址计数器换作高速 CMOS 电路 74HC4040，计数频率可以达到 15 MHz，就不会出现由于器件速度跟不上而产生错误动作的情况了。

因此，正确选择元器件，不但可以使电路简化，而且可以避免出现很多错误，以保证后面电路调试的顺利进行。

第三步，在理论准备充分的前提下，进行硬件实验。

(1) 正确搭接实验线路。可以用面包板或实验箱插接实验线路，也可以将元器件焊接在 PCB 上进行调试。对于比较简单的电路，可以采用上述两种方法。对于比较复杂的电路，则采用先在普通实验板上调试，正确后画出 PCB 版图，制作 PCB 板，然后在 PCB 板上进行焊接、调试的方法。

下面对面包板作一简单的介绍。

面包板是由有许多小方孔的塑料板组成的，如图 1.3.2 所示。图 1.3.3 是面包板的结构图。

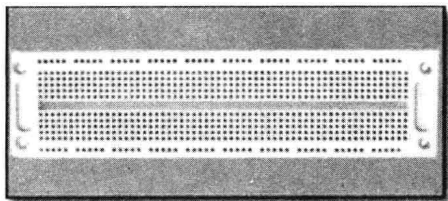


图 1.3.2 面包板

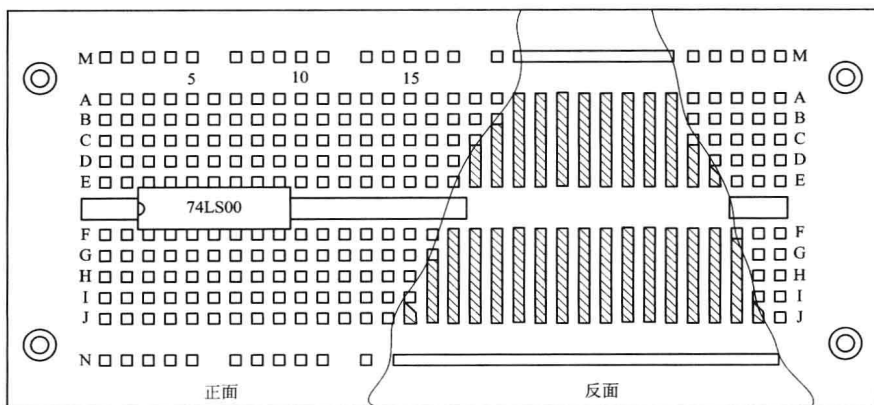


图 1.3.3 面包板结构图

每块面包板中央有一凹槽，凹槽两边各有 60×5 个插孔。纵向每 5 个插孔为一组(图 1.3.3 中的 A、B、C、D、E 或 F、G、H、I、J)，5 个孔由内部的金属簧片连通。面包板的最上面和最下面各有一条横向的 10×5 的小插孔(图 1.3.3 中的 M 和 N)，左右每 5 个孔为一组，它们是相通的，这两条插孔可用作电源线和地线的插孔。集成电路引脚必须插在面包板中央凹槽两边的孔中(如图 1.3.3 中的 74LS00 所示)，并且使集成电路的缺口端朝向左方。

在面包板上安装集成器件时，要求使器件的缺口朝向左方，先对准插孔的位置，然后稍稍用力将其插牢，防止集成器件引脚弯曲或折断。所有集成块的方向要一致，便于正确布线和查线。在拔出集成块时，最好用螺丝刀或镊子插入到芯片下面的凹槽中两头轻轻用力撬起，以免引脚弯曲或断裂。

有关数字电路实验箱的知识在本书的第 4 章将有详细的介绍。

制作 PCB 板的方法，就是用制板软件 Protel 99 画出 PCB 版图，制作出 PCB 板，然后进行焊接、调试。Protel 99 软件在本书的第 2 章将有详细的介绍。但要注意的是，在制板以前，必须保证电路是完全调试好而没有错误的，否则板子做好后，就没有办法修改了。

搭接电路完成后就构成了一个完整的系统。通过给输入端加入信号，在系统的输出端得到输出信号，来测试系统是否达到了任务书规定的指标要求。

(2) 进行电路调试和测量。可以进行静态调试，也可以进行动态调试。在这一步中，仪器的选择也是很重要的。如果仪器的精度和指标达不到要求，或者选择了错误的仪器，即使系统本身的输入、输出是正确的，也得不到正确的结果。

第四步，撰写实验报告。

在系统调试和测量结束后，应撰写一份实验报告，这是一个合格的电子工程师应该具备的基本的文字表述能力。实验报告的内容包括：

- ① 实验题目。
- ② 实验任务要求。
- ③ 理论设计，包括系统总体框图、各单元电路的具体设计、选择的元器件清单列表等。
- ④ 电路仿真，包括仿真的电路图、得到的仿真结果(数据、波形图等)。
- ⑤ 硬件电路实验，包括实验中遇到的故障以及故障是如何排除的。
- ⑥ 实验数据处理。
- ⑦ 实验总结，包括收获、体会等。

1.4 数字电路实验方法

1.4.1 实验规则

电子技术实验技能是每一个从事电子设计的工程技术人员必须具备的基本技能。对于数字电路这门实践性很强的课程所开设的实验课程，做好实验是十分必要的，同时，这也是培养学生实验技能最直接、最有效的方法。

在充分的理论准备的前提下做数字电路硬件实验时要遵循一定的实验方法和实验规

则,如果盲目地进行实验,不但浪费时间,而且有可能损坏实验器材,这是十分不可取的。

数字电路实验可以按以下规则进行。

1. 合理布线

首先应正确、合理地布线。特别要强调的是应先布线,再加电。有的学生喜欢加上电以后插接导线,这样极容易损坏器材,而且容易损坏实验箱的控制电路。所以一定要注意接线和加电的先后顺序。布线的原则以直观、便于检查为宜。例如,电源的正极和地可以用不同颜色的导线加以区分,一般电源正极用红色,地用黑色,这样便于分清,不至于接错线而造成电源正、负极短路的严重后果,而且也便于查错。

2. 检查实验线路

在连接完实验电路后,不能急于加电,先要认真检查一下。检查的内容包括:

(1) 连线是否正确。这其中包括有没有接错的导线,有没有电路图中有而未连接的导线,有没有电路图中没有而连接了的导线,即检查有没有错线、少线和多线。检查的方法是对照电路图,按照一定的顺序逐一进行检查,比如从输入开始,一级一级地排查,一直检查到输出。

(2) 连接的导线是否导通。这需要用万用表的欧姆挡,对照电路图,一个点一个点地检查,在电路图中应该连接的点是否都是通的,有电阻的两点之间的电阻是否存在等。

(3) 电源的正极、地线是否正确,信号源连线是否正确。

(4) 电源到地之间是否存在短路。如果电路比较复杂,常常容易将电源正极与地接在一起,造成电源短路,如果这时不认真检查而急于通电,则容易损坏器件。

3. 通电调试

检查完实验线路后,就进入调试阶段。调试包括静态调试与动态调试。在调试前,应先直接观察。先在稳压电源空载的情况下调好所需的电源电压,然后给电路通电。此时要观察电路有无异常现象,包括有无冒烟,是否有异常气味,用手摸元器件看是否发烫,电源是否有短路现象等。如果出现异常情况,应该立即切断电源,排除完故障后再加电。在组合逻辑电路和时序逻辑电路的调试中,可以用不同的方法,讨论如下。

1) 集成逻辑门和组合逻辑电路调试

(1) 静态调试。静态调试是指给电路的输入端加入固定的高、低电平值,测试输出的高、低电平值,输出可以用指示灯或数码管显示状态,或者用数字万用表或逻辑笔测量各输出端的逻辑电平值,并分析各逻辑电平值是否符合电路的逻辑真值表,以此来观察电路工作是否正常。

(2) 动态调试。动态调试是指在电路的各输入端分别接入一脉冲信号,用双踪示波器观察各输入端和输出端的波形,并画出这些脉冲信号的时序波形图。如果出现异常,还要查找出现故障的原因,予以排除后继续调试。

2) 时序逻辑电路调试

(1) 时序逻辑电路的静态调试。静态调试主要是按照集成电路的功能表对芯片的复位、置位、计数等功能进行测试。静态调试时,可以先将电路的复位端、置位端和使能端接到逻辑开关上,再给时钟接上单次脉冲或频率很低(1 Hz 左右)的 TTL 电平的脉冲信号,电路的输出端接到逻辑电平显示器(如发光二极管或译码、显示电路)上,然后按照功能表给定输入信号,从逻辑显示器上观察电路的输出状态的变化情况,以此来判断电路工作是否正常。

(2) 时序逻辑电路的动态调试。动态调试是指在时钟脉冲(1 kHz 左右的 TTL 电平的脉冲信号)的作用下,测试电路各输出端的状态是否满足功能表的要求。通常的做法是用示波器双踪观察输入、输出信号波形,分析并记录输入、输出波形的对应关系。

当需要用示波器同时观察多路信号,而各路信号又有严格的相位关系时,则应该选择一个合适的信号作为内触发(或外触发)信号,也称为基准信号。在用示波器同时观测两路信号的相位关系时,设两路信号的周期为 T_1 、 T_2 ,如果有 $T_1 = nT_2$,即 T_1 是 T_2 的整数倍,必须用周期长、变化慢的 T_1 信号作为触发源信号,这时示波器上就能稳定地显示出 T_1 、 T_2 的波形;否则,如果用 T_2 信号作为触发源信号,则示波器上 T_1 信号的波形就不能稳定显示,当然就不能分辨 T_1 、 T_2 之间的相位关系。对于多于两路的信号,要用示波器观察它们之间的相位关系,同样需要选择周期最长的信号作为触发信号。

例如,观测一个十进制递增计数器的 CP(下降沿触发)及各路输出 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 和进位输出 C 的波形时,用周期最长的 C 或 Q_3 作为触发信号,固定在 CH₁(或 CH₂)通道,用另一个通道观察其余的信号,可以画出时序波形如图 1.4.1 所示。

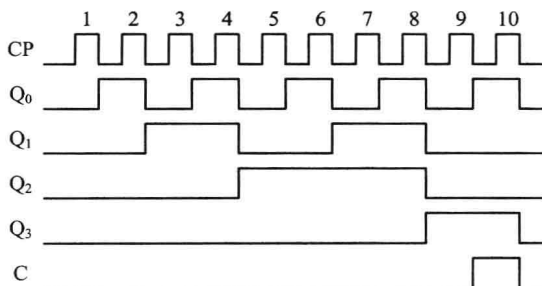


图 1.4.1 十进制递增计数器时序波形图

在进行比较复杂的系统性实验的调试时,应该接一级电路就调试一级(其中包括静态调试和动态调试),正确后,再将上一级电路的输出加至下一级电路的输入,接着调试下一级电路,这样直到最后一级。如果每一级的结果都正确,最后就应该得到正确的结果。这样做可以解决一次连接电路时由于导线过多而调试起来比较困难的问题,不但节省时间,还可以减少许多麻烦。

1.4.2 电路调试中应注意的问题

测量结果的正确与否直接受测量方法和测量精度的影响,因此,要得到正确的测量结果,应该选择正确的测量方法,提高测量精度。为此,在电路调试中应该注意以下几点。

1. 正确使用仪器的接地端

在电路的调试过程中,仪器的接地端连接得是否正确是一个很重要的方面。如果接地端连接不正确或者接触不良,会直接影响到测量精度,甚至会影响到测量结果的正确与否。在实验中,直流稳压电源的“地”即是电路的地端,所以直流稳压电源的“地”一般要与实验箱的“地”连接起来,直流稳压电源的“地”是与机壳连接起来的,这样就形成了一个完整的屏蔽系统,减少了外界信号的干扰,这就是我们常说的“共地”。示波器的“地”应该和电路的“地”连接在一起,否则看到的信号是“虚地”的,是不稳定的。函数信号发生器的“地”也应该和电路的“地”连接在一起,否则会导致输出的信号不正确。另外,在模拟、数字混合的电路中,数字“地”与模拟“地”应该分开连接,“热地”用隔离变压器,以