



普通高等教育“十三五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

数字电路实验 与课程设计

■ 赵权科 王开宇 主 编
■ 韩延义 秦晓梅 副主编



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>

规划教材

数字电路实验与课程设计

赵权科 王开宇 主 编

韩延义 秦晓梅 副主编

孙 鹏 陈 景 商云晶 参 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

数字电路实验与课程设计的电子信息科学与电气信息类专业本科生的一门必修实践课程。本书基本涵盖了数字电路实验与课程设计的全部内容,各个实验项目侧重于学习数字电路的基本概念、数字电路设计的基本方法,以及实践的基本技能要求,突出了综合性和设计性的实验比例,同时也适当考虑了工程实践的要求。

本书既可作为高等院校电子信息类、电气信息类及相近专业数字电路课程配套的实验教材,亦可供相关领域的人员参考。

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

数字电路实验与课程设计/赵权科,王开宇主编. —北京:电子工业出版社,2019.1

ISBN 978-7-121-35591-2

I. ①数… II. ①赵… ②王… III. ①数字电路—实验—高等学校—教材②数字电路—课程设计—高等学校—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第265073号

策划编辑:竺南直

责任编辑:竺南直

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:787×1 092 1/16 印张:8.75 字数:224千字

版 次:2019年1月第1版

印 次:2019年1月第1次印刷

定 价:26.00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 zltts@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: davidzhu@phei.com.cn。

前 言

数字电路是电子信息科学与电气信息类专业和部分非电类专业本科生在电子技术方面入门性质的技术基础课,包括理论教学和实验教学两个部分。数字电路实验与课程设计是其中实验教学部分,各校安排的课时略有区别,课程名称也不尽相同。

实验教学在整个教学体系中是一个不可或缺的环节。一方面,学生在理论课程中学习了一些理论知识,完全掌握和灵活运用这些知识需要一个过程。实验教学可以提供一个新的途径,通过实际操作促进学生从另外一个角度理解这些理论。另一方面,由于理论知识是经过对客观现实的概括、简化和抽象得到的,会忽略一些次要因素,而实际中任何器件和系统都不是理想的,那些非理想的因素可能会对电路性能造成影响,因此实验课程不仅会促进学生学好基本理论,也可以培养学生的工程能力。此外,通过实验过程了解客观实际,才可以更多地发现问题、解决问题,甚至提出问题。实验能力包括电子仪器的使用、基本测试技术、实验数据的处理、实验报告的归纳和撰写、检索资料和阅读数据手册、数字系统的设计方法和器件选型,数字系统的搭建和调试、EDA 工具软件的使用等多个方面的训练和培养。

在教育部《电子信息科学与电气信息类平台课程教学基本要求》中对数字电子技术实验教学的教学任务提出了要求,包括:

- (1) 能够正确使用常用电子仪器,如示波器、信号发生器、万用表、交流毫伏表、稳压电源等。
- (2) 掌握数字电子电路的基本测试技术,如脉冲信号主要参数的测试、数字电路逻辑功能的测试。
- (3) 能够正确处理实验数据,并写出符合要求的实验报告。
- (4) 能够查阅电子器件手册和在网上查询电子器件有关资料。
- (5) 初步学会分析、寻找和排除实验电路中故障的方法。
- (6) 初步学会一种 EDA 工具软件的使用,对数字电路进行仿真、分析和辅助设计,并能够实现小系统的组装和调试。

近几年来,我们对数字电路实验与课程设计进行了一系列的改革,包括教学内容、考核方式等方面。主要的出发点就是要精心设计教学内容,多方面、多角度地培养学生的实践能力,提高教学质量,争取更好地完成课程的教学目标。

第一,不再提供实验参考电路,完全要求学生自己设计,实验教师只对实验电路的合理性进行有针对性的指导。

第二,由于相对来说实验学时较少,而教学知识点较多,所以对教学内容进行了整合,而且加大了设计性和综合性实验题目的比例,把一些验证性环节取消或者作为实验内容的一个小项目。

第三,对实验内容区分了层次性,对于不同水平的同学可以选择适当的题目,当然课程成绩会有所不同。鼓励有兴趣的学生做实验后的选做题目或者自主设计实验内容。

第四,对实验内容进行了调整,主要增加了与实际工程问题相关的题目,并考虑了与后续课程的衔接。有些实验思考题目虽然已经超出了本课程的范围,但是涉及的概念都是课程

中讲过的，需要学生自主学习，查阅相关资料。

第五，增加了电子仪器的使用次数。

第六，使用 EDA 软件可以在没有硬件平台的情况下完成实验电路的分析和辅助设计。尤其是最近两年，电工电子实验中心增加了虚拟仿真实验和虚实结合实验以及 AR、VR 实验的内容，丰富了教学内容。

关于上课的过程。首先，课前应阅读实验报告要求，完成实验目的和实验原理部分，明确每次实验的任务和内容，自主设计电路并绘制电路图，规划实验步骤和实验仪器，准备好需要的实验芯片的引脚图，预留实验数据表格。其次，在每次实验前经实验教师检查合格才能做实验，不合格的同学需要另外选择时间。实验过程中，实验教师会对学生的完成情况做记录，回答学生的提问，指导学生自己排除故障，掌握相关电子仪器的使用方法等，不帮助学生搭接电路。最后，实验课后完成实验数据的处理和图表的绘制，并回答思考问题，整理好该次实验的全部报告。

本书由赵权科、王开宇主编，韩延义、秦晓梅副主编，孙鹏、陈景和商云晶参编，其中陈景和赵权科完成了第 3 章的编写，韩延义和赵权科完成了第 6 章的编写，王开宇完成了第 8 章的编写，其余各章由赵权科编写，秦晓梅、孙鹏和商云晶老师也参与了部分书稿的讨论、撰写工作，赵权科和王开宇完成了统稿工作。感谢王兢教授、戚金清副教授和唐洪副教授仔细审阅了初稿，并提出了宝贵的修改意见。在编写讲义的过程中也参考了大量书籍以及网上资料，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 数字电路实验与课程设计概述	(1)
1.1 数字电路实验与课程设计的目的与意义	(1)
1.2 数字电路实验的基本要求	(2)
1.3 数字电路课程设计的基本要求	(3)
1.4 实验室守则	(3)
1.5 实验室安全操作规范	(4)
第 2 章 数字电路实验基础	(5)
2.1 数字集成电路的分类	(5)
2.2 数字电路中的逻辑电平	(6)
2.3 TTL 电路与 CMOS 电路的连接	(7)
2.4 数字集成电路的封装	(7)
2.5 数字电路实验的常见故障和排除方法	(9)
第 3 章 组合逻辑电路实验	(10)
3.1 TTL 和 CMOS 集成逻辑门电气参数测试	(11)
一、实验目的	(11)
二、实验原理	(11)
三、实验内容	(14)
四、思考题	(16)
3.2 数字电路基本逻辑门功能验证	(16)
一、实验目的	(16)
二、实验原理	(16)
三、实验内容	(17)
四、思考题	(18)
3.3 编码器和译码器	(18)
一、实验目的	(18)
二、实验原理	(18)
三、实验内容	(21)
四、思考题	(21)
3.4 数据分配器及数据选择器	(21)
一、实验目的	(21)
二、实验原理	(21)
三、实验内容	(23)
四、思考题	(24)

第4章 时序逻辑电路实验	(25)
4.1 触发器及其应用	(29)
一、实验目的	(29)
二、实验原理	(29)
三、实验内容	(31)
四、思考题	(31)
4.2 计数器及其应用	(32)
一、实验目的	(32)
二、实验原理	(32)
三、实验内容	(35)
四、思考题	(36)
4.3 移位寄存器及其应用	(36)
一、实验目的	(36)
二、实验原理	(36)
三、实验内容	(38)
四、思考题	(39)
4.4 集成定时器及其应用	(39)
一、实验目的	(39)
二、实验原理	(39)
三、实验内容	(41)
四、思考题	(41)
4.5 模数和数模转换器及其应用	(42)
一、实验目的	(42)
二、实验原理	(42)
三、实验内容	(45)
四、思考题	(46)
第5章 DE2 开发板上接口电路的使用	(47)
5.1 开关和按键的使用	(48)
5.2 LED 的使用	(49)
5.3 数码管的使用	(51)
5.4 时钟的使用	(53)
5.5 扩展端口的使用	(53)
5.6 液晶模块 LCD1602 的使用	(56)
5.7 VGA 接口电路的使用	(61)
5.8 PS/2 键盘接口的使用	(64)
第6章 基于 Verilog HDL 的数字电路课程设计	(69)
6.1 硬件描述语言 (HDL)	(69)
6.2 Verilog HDL 基本语法	(69)
6.2.1 数据类型	(70)

6.2.2	数据对象	(71)
6.2.3	操作符	(72)
6.2.4	程序基本结构	(73)
6.2.5	并行语句	(74)
6.2.6	顺序语句	(76)
6.2.7	例化语句	(80)
6.3	建模指导	(82)
6.3.1	常用组合逻辑的建模方法	(82)
6.3.2	常用时序逻辑的建模方法	(84)
6.4	常见的数字电路课程设计要求	(87)
6.4.1	数字钟	(87)
6.4.2	电子密码锁	(88)
6.4.3	电梯控制器	(88)
6.4.4	自动售货机控制系统	(89)
6.4.5	基于温度传感器 18B20 的温控电脑散热风扇系统设计	(89)
第 7 章	Quartus II 6.0 软件的使用	(92)
7.1	新建项目	(92)
7.2	编辑设计文件	(98)
7.3	编译	(103)
7.4	分配引脚	(104)
7.5	仿真	(106)
7.6	编程下载	(115)
第 8 章	杰创远程实验	(117)
8.1	实验背景	(117)
8.2	实验介绍	(118)
8.3	实验原理	(119)
8.4	实验流程	(121)
附录 A	常用逻辑符号对照表以及常用芯片引脚图	(126)
附录 B	数字电路实验箱使用介绍	(129)
参考文献		(131)



第1章 数字电路实验与课程设计概述

1.1 数字电路实验与课程设计的目的与意义

经常有人问做实验的目的是什么？从过程上来说，做电路方面的实验大致有两种情况。一种情况是先有一个电路，通过测试和分析认识电路原理和功能的过程。另外一种情况是先设计原理电路，再搭接实际电路，最后经过各种测试和分析完善电路的过程。前者是认识实验或者维修电路，后者是设计电路。无论哪个过程，一方面可以获得电子技术方面的基本知识和基本技能，另一方面也可以运用所学理论来分析和解决实际问题，提高实际工作的能力。理论层面上，认识需要一个过程，学习了未必能领会和掌握，需要实践环节加深理解。而且有时候看到一定的实验现象未必能立刻找到相应的理论原因，需要不断摸索。技术层面上，在理论课中为了讲清原理做了很多理想化处理，而从一张电路原理图到一个可以使用的电子产品，需要解决很多实际的问题，这些问题在设计当初未必考虑全面，所以电子工程师往往通过实验的方法先搭接一个实验电路进行调试，分析电路的工作原理，完成电路性能指标的检测，验证和扩展电路的功能及其使用范围，最后完成设计并组装为整机。在学生毕业之后的工作中也是经常出现这样的过程。所以熟练地掌握数字电路实验技术，无论是对从事电子技术工作的工程技术人员，还是对正在进行本课程学习的学生来说，都是极其重要的。

每所高校的教学内容不完全相同，课程的名称也略有区别，比如数字电路实验、数字电路逻辑实验、数字电路与系统实验、电子技术实验（数字部分）、脉冲与数字电路实验以及数字电路课程设计等，教学学时也有一定差异，有时候这几个名字混用。总的来说，数字电路实验可以分为以下三个层次：第一个层次是验证性实验，它主要以电子元器件特性、参数和基本单元电路为主，根据实验目的、实验电路、仪器设备和较详细的实验步骤，来验证数字电路的有关理论，从而进一步巩固所学基本知识和基本理论。第二个层次是设计性实验，学生根据给定的实验题目、内容和要求，自行设计实验电路，选择合适的元器件并组装实验电路，拟定出调整、测试方案，最后使电路达到设计要求。第三个层次是综合性实验，一般与工程实践比较接近，从内容上看，涉及多门课程的内容，甚至是学生没有学过的内容。这个层次的实验，可以培养学生综合运用所学知识和解决实际问题的能力。本书中的数字电路实验一般指的是第一个层次和第二个层次的实验，数字电路课程设计指的是第二个层次中较为复杂的和第三个层次中的实验。

数字电路实验内容极其丰富，涉及的知识面也很广，并且正在不断充实、更新。在整个实验过程中，对于示波器、信号源等常用电子仪器的使用方法；频率、相位、时间、脉冲波形参数和电压、电流的平均值、有效值、峰值以及各种电子电路主要技术指标的测试技术；常用元器件的规格与型号，手册的查阅和参数的测量；小系统的设计、组装与调试技术；以及实验数据的分析、处理能力；EDA软件的使用等都是需要着重掌握的。

随着技术的进步，现在虚拟实验和仿真实验，AR 以及 VR 实验都出现在了各种电路实验当中。



1.2 数字电路实验的基本要求

“数字电路实验”课程是电子信息科学与电气信息类专业学生在电子技术方面入门性质的基础课程。通过学生设计和调试实验电路，观察实验现象和分析实验结果等环节，使学生获得数字电路方面的基本知识、基本理论和基本技能，为深入学习数字电子技术及其在专业中的应用打好基础。

教学的基本要求包括能够查阅电子元器件手册和在网上查询电子元器件有关资料；初步学会组合逻辑电路和时序逻辑电路的设计方法；能够正确使用常用电子仪器，如示波器、万用表等；掌握数字电子电路的基本测试技术，如脉冲信号主要参数的测试、数字电路逻辑功能的测试；初步学会分析、寻找和排除实验电路中故障的方法；能够正确记录和处理实验数据，并写出符合要求的实验报告，鼓励提出新问题和创新思路。

和其他许多实验环节一样，数字电路实验也有它的基本操作规程。电子技术工作者经常要对电子设备进行安装、调试和测量，因此要求注意培养正确、良好的操作习惯，并逐步积累经验，不断提高实验水平。

实验操作应该注意以下几个方面。首先，实验仪器的合理布局。实验时，各仪器仪表和实验对象（如实验板或实验装置等）之间，应按信号流向，并根据连线简捷、调节顺手、观察与读数方便的原则进行合理布局。输入信号源置于实验板的左侧，测试用的示波器与电压表置于实验板的右侧，实验用的直流电源放在中间位置。其次，严格按照实验电路和操作要求接线，经认真检查并在指导教师核查无误后方可接入电源。实验中应养成接线时先接实验电路，后接电源；拆线时先拆电源，后拆实验电路的良好习惯。仪器使用完毕后，应将面板上的各旋钮、开关置于适当位置，如万用表转换开关应旋转至交流电压档最高量程。再次，在接通电源时应密切注意实验现象，如果有短路等紧急异常情况应立即关闭电源，采用不带电的方式检查电路是否连接正确。如果电路现象不对，但是没有危险的情况下可以带电测量，找到不对的地方再做实验。

记录实验数据时，为获得正确的数据和波形，应做到以下几点。首先，必须根据不同的测试对象正确选用合适的仪器仪表和量程。如在不同场合下，测量不同频率范围和不同电压量级的信号电压，应注意选用不同灵敏度和内阻、不同频响的电压表。观察不同的信号波形，同样要选用频率范围适合的示波器。其次，所选的量程要合适，否则将造成较大的测量误差。其次，所记录的数据必须是原始读数，而不是经换算后的数值，并应标明名称、单位。需绘制曲线时，注意在曲线变化显著的部位要多读取一些数据。对测得的原始数据还需预先做出估算，做到心中有数，以便及时发现并解决问题。另外，还应记录所使用仪器的型号、精度等级，必要时还应记下环境条件（如温度等），供实验后分析、核对。

实验报告是实验结果的总结和反映，也是实验课的继续和提高。通过撰写实验报告，使知识条理化，可以培养学生综合分析问题的能力。一个实验的价值在很大程度上取决于实验报告质量的高低，因此对实验报告的撰写必须予以充分的重视。实验报告的主要内容包括：实验目的、实验原理、实验设备、实验步骤和测试方法、实验数据、波形和现象以及对它们的处理结果、实验数据分析、实验结论以及实验中问题的处理、讨论和建议，收获和体会。

在编写实验报告时，常常要对实验数据进行科学的处理，才能找出其中的规律，并得出



正确的结论。常用的数据处理方法是列表和作图。实验所得的数据可记录在表格中,这样便于对数据进行分析 and 比较。实验结果也可绘制成曲线直观地表示出来。

实验报告撰写要求书写工整,文字通顺,符号标准,图表齐全,讨论深入,结论简明。

对于实验数据和实验结果应该进行讨论和分析,总结实验结果,给出实验结论,对于较为复杂的问题应进行深入讨论。

1.3 数字电路课程设计的基本要求

“数字电路课程设计”课程是电子信息科学与电气信息类专业学生在电子技术方面入门性质的基础课程。本课程基于可编程逻辑器件,使用硬件描述语言 Verilog HDL 完成一个数字系统的设计,并在实验平台上完成,使学生掌握数字电路的基本设计方法和调试方法,熟悉数字电路的基本概念和基本方法,培养学生自主学习和创新能力,为后续课程的学习打好基础。

教学的基本要求包括能够根据设计需要查阅专业资料,学会数字系统的设计方法,能够实现小系统的组装和调试;掌握 Verilog HDL 编程的基本语法和框架结构,掌握基本组合逻辑电路和常见时序逻辑电路的设计方法,掌握有限状态机设计时序逻辑电路的方法,掌握元件例化等语法完成多层级数字系统的设计方法;掌握 Quartus II 软件平台设计数字电路的基本流程,学会设计和调试数字电路的方法,会根据需要进行仿真验证设计的正确性;掌握数字电路实验平台的使用方法,能读懂要用到部分的电路图,对实验平台上没有的硬件部分要完成电路设计;初步学会分析、寻找和排除实验电路中故障的方法;能够正确记录和处理实验数据,并写出符合要求的设计报告。

1.4 实验室守则

在实验中心选课系统注册,选择相应课程时间。按照预约时间到指定实验室进行实验,不得迟到。如果不能按时上课,请在预约实验时间之前提前退课。预约网上实验的同学,也应在规定的时间内完成相应实验内容。

实验前,必须认真预习实验指导书中的相关内容,熟悉实验目的、内容和操作步骤。凡没有预习者一律不得参加实验。

严格遵照实验室的各项规章制度和安全要求,遵守课堂纪律,保持室内安静、整洁。

服从指导教师的指导,严格按照操作要求做好实验准备,待指导教师检查许可后,方可启动仪器设备。要爱护实验室的仪器设备和公共设施,移动仪器设备时,必须轻拿轻放。实验中,禁止动用与实验无关的仪器设备,未经允许不得随意调换仪器设备,更不准擅自拆卸仪器设备。凡因违反操作规程而损坏仪器设备者,须按学校有关规定进行赔偿。

实验过程中,要认真观察实验现象,详细记录相关实验数据,不允许抄袭他人的实验数据,不允许擅自离开操作岗位,如发现仪器异常,应立即切断电源或者停止实验,并及时报告指导教师。

做自行设计实验时,应事先向指导教师报告实验目的、实验内容和所需实验仪器,经过指导教师同意后,方能在实验室安排的时间内进行实验。

每次实验结束时,指导教师应对实验数据签字认可。学生应及时、认真、独立完成实验



报告，上交指导教师批阅。

实验结束后须整理好所使用的仪器设备、工具及材料，清理实验场地，关闭电源和门窗，经指导教师检查验收后方可离开实验室。离开时请将个人物品带走。

电脑中不能存放与教学无关的资料，不能做和课程无关的事情。实验应该独立完成，不能携带其他学生报告或者使用手机等工具参考其他人的设计进行实验。

1.5 实验室安全操作规范

在实验室指定的位置进行实验。实验前，应检查要使用的实验设备是否在正确的位置，注意人身安全，防止使用过程中造成事故。

使用设备前，检查是否有漏电等危险情况。如果设备不正常，要关闭电源，请指导教师更换。禁止学生未经允许移动和更换以及检修设备。实验室内的仪器设备要安全接地，注意仪器设备的通风和防尘，远离高温及强辐射区域。

仪器设备要按照使用说明书操作，严禁用锐器和硬物损坏仪器设备、电源线和信号线等，严禁在实验室刻画和做标记等行为。应正确选择和使用设备，严禁违章操作，避免人身事故和仪器损坏，造成损失的要赔偿。要掌握仪器设备的使用方法和注意事项，实验中要有目的地扳（旋）动仪器设备上的开关（旋钮），扳（旋）动时，切忌用力过猛，造成损坏。

一般情况下，禁止学生携带个人的电子元器件和设备进入实验室。学生自制的电路必须经过指导教师批准才能接到实验设备上。严禁学生携带实验室的设备和元器件等到实验室外。借用设备时要请示指导教师，登记之后再带离，并在规定的时间内归还，归还时要检查是否正常。

实验过程中，禁止带电操作，检查电路时要关闭电源。如果发现有异常发热、焦糊味和异常声响等，应首先关闭电源，并请指导教师解决。如遇到地震、火灾等灾害要按照实验室安全预案进行处理。

严禁在实验室内从事吸烟、食宿、娱乐等与实验无关的活动。实验结束后，要整理实验设备到正确的位置，打扫卫生后，经过指导教师允许才能离开。离开时把个人物品和垃圾带走，各个实验设备要关闭电源，计算机和投影仪要按照正确的方法关机，不得强行关闭。



第2章 数字电路实验基础

2.1 数字集成电路的分类

数字集成电路有双极型集成电路（如 TTL、ECL）和单极型集成电路（如 CMOS）两大类，每类中又包含不同的系列品种。

TTL 数字集成电路内部的输入级和输出级都是晶体管结构，属于双极型数字集成电路。其主要系列有：

（1）74 系列。这是早期的产品，现仍在使用，但正逐渐被淘汰。

（2）74H 系列。这是 74 系列的改进型，属于高速 TTL 产品。其“与非门”的平均传输时间只有 10ns 左右，但电路的静态功耗较大。目前该系列产品的使用越来越少，逐渐被淘汰。

（3）74S 系列。这是 TTL 的高速型肖特基系列。在该系列中，采用了抗饱和肖特基二极管，速度较高，但功耗较大，品种较少。

（4）74LS 系列。这是 TTL 的低功耗肖特基类型，当前 TTL 类型中的主要产品系列，是 74S 系列的改进型。该系列品种和生产厂家都非常多，性能价格比较高，目前在中小规模电路中应用非常普遍。

（5）74ALS 系列。这是“先进的低功耗肖特基”系列。属于 74LS 系列的后继产品，速度（典型值为 4ns）、功耗（典型值为 1mW）等方面都有较大的改进，但价格比较高。

（6）74AS 系列。这是 74S 系列的后继产品，其速度（典型值为 1.5ns）有显著的提高，又称“先进超高速肖特基”系列。

TTL 集成电路的主要特点是工作速度快，参数稳定，工作可靠，输出功率大，带负载能力强，噪声容限小，一般只有几百 mV。

CMOS 数字集成电路是利用 NMOS 管和 PMOS 管巧妙组合成的电路，属于一种微功耗的数字集成电路。其主要系列有：

（1）标准型 4000B/4500B 系列。该系列是以美国 RCA 公司的 CD4000B 系列和 CD4500B 系列制定的，与美国 Motorola 公司的 MC14000B 系列和 MC14500B 系列产品完全兼容。该系列产品的最大特点是工作电源电压范围宽（3~18V）、功耗低、速度较慢、品种多、价格低廉，是目前 CMOS 集成电路的主要应用产品。

（2）74HC 系列。74HC 系列是高速 CMOS 标准逻辑电路系列。74HCxxx 是 74LSxxx 同序号的翻版，型号最后几位数字相同，表示电路的逻辑功能、引脚排列完全兼容，为用 74HC 替代 74LS 提供了方便。

（3）74AC 系列。该系列又称为“先进的 CMOS 集成电路”，54/74AC 系列具有与 74AS 系列等同的工作速度和与 CMOS 集成电路固有的低功耗及电源电压范围宽等特点。

CMOS 集成电路的主要特点有：

（1）具有非常低的静态功耗。在电源电压 $V_{CC} = 5V$ 时，中规模集成电路的静态功耗小于 100mW。



(2) 具有非常高的输入阻抗。正常工作的 CMOS 集成电路，其输入保护二极管处于反偏状态，直流输入阻抗大于 $100\text{M}\Omega$ 。

(3) 宽的电源电压范围。CMOS 集成电路标准 4000B/4500B 系列产品的电源电压为 $3\sim 18\text{V}$ 。

(4) 扇出能力强。在低频工作时，一个输出端可驱动 CMOS 器件 50 个以上的输入端。

(5) 抗干扰能力强。CMOS 集成电路的电压噪声容限可达电源电压值的 45%，且高电平和低电平的噪声容限值基本相等。

(6) 逻辑摆幅大。CMOS 电路在空载时，输出高电平 $V_{\text{OH}} \geq V_{\text{CC}} - 0.05\text{V}$ ，输出低电平 $V_{\text{OL}} \leq 0.05\text{V}$ 。

由于数字集成电路有不同的系列，不同系列的相同型号的电路功能基本相同，所以本书中未专门指出系列。

2.2 数字电路中的逻辑电平

数字电路或数字集成电路是由许多的逻辑门组成的复杂电路。数字集成电路有各种门电路、触发器，以及由它们构成的各种组合逻辑电路和时序逻辑电路。数字电路中研究的主要问题是输出信号的状态（“0”或“1”）和输入信号（“0”或“1”）之间的逻辑关系，即电路的逻辑功能。

表示数字电压的高、低电平通常称为逻辑电平，在正逻辑下，“0”是低电平，“1”是高电平。高低电平没有明确的界限，针对具体问题需要具体分析。

首先，要确定集成电路的供电电压等级。电源电压不同，器件的特性参数相差很大。常用的逻辑电平有 TTL、CMOS、LVTTTL、ECL 等不同类型，其中 TTL 和 CMOS 的逻辑电平按照典型电压可以分为四类：5V 系列（5V TTL 和 5V CMOS）、3.3V 系列、2.5V 系列和 1.8V 系列。5V TTL 和 5V CMOS 逻辑电平是通用的逻辑电平。3.3V 及以下的逻辑电平被称为低电压逻辑电平。

其次，在供电等级相同的情况下，也要分析器件输入和输出的两种情况，也就是输入高电平（ V_{IH} ）和输出高电平（ V_{OH} ），输入低电平（ V_{IL} ）和输出低电平（ V_{OL} ）。一般地，

$$V_{\text{OH}(\text{max})} > V_{\text{IH}(\text{min})} \quad (2.1)$$

$$V_{\text{OL}(\text{max})} < V_{\text{IL}(\text{min})} \quad (2.2)$$

才能保证两个电路相连接的时候逻辑电平是正确的。

再次，不同类型的数字电路输入和输出特性相差很大，表 2.1 仅是 TTL 和 CMOS 两种类型部分电路的参数，电源电压为 5V。

表 2.1 各种数字集成电路的参数

电路种类 参数名称	TTL 74 系列	TTL 74LS 系列	CMOS 4000 系列	高速 CMOS 74HC 系列	高速 CMOS 74HCT 系列
$V_{\text{IH}(\text{min})}/\text{V}$	2	2	3.5	3.5	2
$V_{\text{IL}(\text{max})}/\text{V}$	0.8	0.8	1.5	1	0.8
$I_{\text{IH}(\text{max})}/\mu\text{A}$	40	20	0.1	0.1	0.1
$I_{\text{IL}(\text{max})}/\text{mA}$	-1.6	-0.4	-0.1×10^{-3}	-0.1×10^{-3}	-0.1×10^{-3}



续表

电路种类 参数名称	TTL 74 系列	TTL 74LS 系列	CMOS 4000 系列	高速 CMOS 74HC 系列	高速 CMOS 74HCT 系列
$V_{OH(min)}/V$	2.4	2.7	4.6	4.4	4.4
$V_{OL(max)}/V$	0.4	0.5	0.05	0.1	0.1
$I_{OH(max)}/mA$	-0.4	-0.4	-0.51	-4	-4
$I_{OL(max)}/mA$	16	8	0.51	4	4

当然，数字电路中的三态门除“0”和“1”两种取值外，还有高阻态。

2.3 TTL 电路与 CMOS 电路的连接

如 2.2 节所述，TTL 电路与 CMOS 电路有很大的差别。在电路设计中，要尽量选用同一类型的集成电路。在需要混合使用 TTL 电路和 CMOS 电路时，要考虑供电等级、不同电路类型的电平转换与电流驱动等问题，设计合适的接口电路。74HCT 系列 CMOS 电路与 74LS 系列 TTL 电路可以直接连接，不需要使用其他接口。

如果是 TTL 驱动 CMOS 电路，由于 CMOS 输入电流较小，不需要考虑驱动电流问题，但是要考虑它们之间的电平转换问题。如果都使用 5V 电源，只要在 TTL 电路的输出端接一个上拉电阻，或者采用专用的电平转换器，如 CC4504 或者 CC40109 等。

如果是 CMOS 驱动 TTL 电路，要考虑驱动电流问题。一般可以采用专用驱动电路 CC4049 或者 CC4050，也可以采用专用驱动电路 CC4009 或者 CC4010。

2.4 数字集成电路的封装

封装就是指把硅片上的电路引脚，用导线接引到外部接头处，以便与其他器件连接。封装形式是指安装半导体集成电路芯片用的外壳。它不仅起着安装、固定、密封、保护芯片及增强电热性能等方面的作用，而且还通过芯片上的接点用导线连接到封装外壳的引脚上，这些引脚又通过印刷电路板上的导线与其他器件相连接，从而实现内部芯片与外部电路的连接。

在结构方面，封装经历了从最早期的晶体管 TO（如 TO-89、TO92）封装发展到了双列直插式封装，随后由 PHILIPS 公司开发出了 SOP 小外形封装，以后逐渐派生出 SOJ（J 型引脚小外形封装）、TSOP（薄小外形封装）、VSOP（甚小外形封装）、SSOP（缩小型 SOP）、TSSOP（薄的缩小型 SOP）及 SOT（小外形晶体管）、SOIC（小外形集成电路）等封装形式。从材料介质方面，包括金属、陶瓷、塑料等，目前很多高强度工作条件需求的电路如军工和宇航级别仍有大量的金属封装。

常见的封装形式有：

1) SOP/SOIC 封装

SOP 是英文 Small Outline Package 的缩写，即小外形封装。SOP 封装技术由 1968—1969 年飞利浦公司开发成功，以后逐渐派生出 SOJ（J 型引脚小外形封装）、TSOP（薄小外形封装）、VSOP（甚小外形封装）、SSOP（缩小型 SOP）、TSSOP（薄的缩小型 SOP）及 SOT（小外形晶



体管)、SOIC (小外形集成电路) 等封装形式。SOP 的引脚中心距为 1.27mm, 见图 2.1。

2) DIP 封装

DIP 是英文 Double In-line Package 的缩写, 即双列直插式封装, 见图 2.2。引脚从封装两侧引出, 引脚中心距为 2.54mm, 引脚数从 6 到 64。封装宽度通常为 15.2mm, 也有 7.52mm 和 10.16mm 两种窄封装形式。封装材料有塑料和陶瓷两种。DIP 是最普及的插装型封装, 应用范围包括标准逻辑 IC、存储器 LSI、微机电路等。

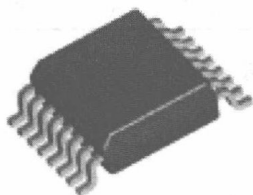


图 2.1 SSOP 封装

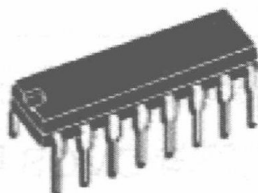


图 2.2 DIP 封装

3) PLCC 封装

PLCC 是英文 Plastic Leaded Chip Carrier 的缩写, 即塑封引线芯片封装, 见图 2.3。PLCC 封装引脚中心距为 1.27mm, 引脚数从 18 到 84 个。PLCC 封装适合用 SMT 表面安装技术在 PCB 上安装布线, 具有外形尺寸小、可靠性高的优点。

4) TQFP 封装

TQFP 是英文 Thin Quad Flat Package 的缩写, 即薄塑封四角扁平封装, 见图 2.4。TQFP 工艺能有效利用空间, 从而降低对印刷电路板空间大小的要求。几乎所有 Altera 公司的 CPLD/FPGA 都有 TQFP 封装。

5) PQFP 封装

PQFP 是英文 Plastic Quad Flat Package 的缩写, 即塑封四角扁平封装。PQFP 封装的芯片引脚之间距离很小, 引脚很细, 一般大规模或超大规模集成电路采用这种封装形式, 其引脚数一般都在 100 个以上。

6) BGA 封装

BGA 是英文 Ball Grid Array Package 的缩写, 即球栅阵列封装, 见图 2.5。20 世纪 90 年

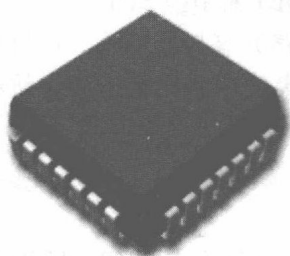


图 2.3 PLCC 封装

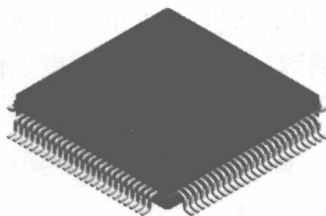


图 2.4 TQFP 封装

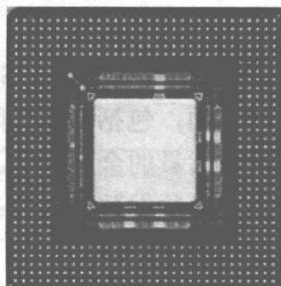


图 2.5 BGA 封装

在实验室中, 为了便于安装和调试, 更换损坏的器件等, 采用 DIP 封装的形式比较多。



2.5 数字电路实验的常见故障和排除方法

数字电路的逻辑电平只有“0”和“1”，相对于模拟电路来说较为简单。但是在实验过程中，仍然会出现这样或者那样的问题。对于那些出了故障的电路需要仔细排查，只有很好地结合理论知识和实践经验，才能快速和准确地排除故障。

常见故障有：

(1) 测试设备引起的故障。包括信号源和测试设备本身都有可能出现问题，需要通过与正常的设备比对测试加以判断。当然，有时是没有正确地使用测试设备造成的“错觉”。

(2) 电路中元器件本身原因引起的故障。这种情况在工程实践中也会发生，需要使用者在使用前做器件好坏测试。如果电路已经搭接完成，则需要做相应的功能测试来判断。

(3) 人为引起的故障。包括操作者错接或者漏接连线、芯片选择错误等。也有一些同学不接集成电路电源线或者接地线，造成芯片不能工作，这与逻辑图中经常省略电源和地有关。还要注意一些集成电路有使能端，当这些引脚无效时，电路一直处于一种无效状态，不受其他输入控制。

(4) 电路接触不良引起的故障。一般是电路连线折断或者接口松弛导致接触不良，需要通过测试加以判断。

(5) 各种干扰引起的故障。对于 TTL 电路来说，不用的输入引脚可以不接，但是有可能因干扰造成不确定性。对于 CMOS 电路来说，不用的输入引脚是不能悬空的，如果不接可能会有问题。另外，数字电路本身容易引入各种干扰，需要在布线的时候多加注意。

当出现故障时，应该按照从前到后的顺序，逐个调整单元电路。如果电路中有时序逻辑电路，可以先让时序逻辑电路保持在某个状态上，这样电路中各点的逻辑电平可以由原理推出，做相应的测试就可以了。有时电路中的故障是由该电路之前或者之后的其他电路出现故障引起的，需要先断开前后电路的耦合关系，再次测量，加以判断。

在数字电路实验室中，测试的基本设备是实验箱上的逻辑笔和示波器。学生在学习数字电路的时候，要尽量依靠测量等辅助手段进行分析和查找故障来源，并结合理论知识，思考和总结故障产生的原因，才能使个人能力有所提高。