



普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

数字系统课程设计 指导教程

◎ 牛小燕 李 芸 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>



“十五”规划教材
电子设计系列规划教材

数字系统课程设计 指导教程

牛小燕 李 芸 编著

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

内 容 简 介

本书从数字系统设计技术的实用角度出发,重点介绍数字系统课程设计实践的相关知识。从基于中小规模集成电路和基于可编程逻辑器件两个方面,选取难度适中的课程设计实例进行分析和设计,给出设计方案,重在提高读者的自主电子设计能力,启发设计思路,提高工程实践和创新能力。本书主要内容包括:数字系统设计概述,常用电子元器件、电路板简介与选择、焊接与调试技术;基本课程设计项目;EDA 工具简介;Verilog HDL 语言;基于 FPGA 的数字系统课程设计等,配套电子课件、设计指导参考方案等。

本书可作为高等学校电子类专业数字系统课程设计、EDA 课程设计等实验与实践课程的教材,也可作为大学生电子设计竞赛的参考教材,还可供从事电子技术开发的工程人员及广大电子技术爱好者作为数字电路设计入门的参考资料使用。

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

数字系统课程设计指导教程 / 牛小燕, 李芸编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.6

ISBN 978-7-121-29123-4

I. ①数… II. ①牛… ②李… III. ①数字系统—系统设计—课程设计—高等学校—教学参考资料
IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 135546 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 9.25 字数: 237 千字

版 次: 2016 年 6 月第 1 版

印 次: 2016 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 29.90 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 zltz@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

电子信息类专业是实践性很强的专业,学生不仅需要理论知识扎实,还应具备很强的动手实验能力和创新意识,因此需要进行大量的实践训练。

本书主要针对电子信息类专业知识的初学者,是为已经完成了电路原理、数字电路等基础课程后,所进行的数字系统课程设计环节而撰写的。考虑到学生知识面尚有限,所以设计项目的解决不涉及单片机、数字信号处理等知识即可完成。

随着 EDA 技术的飞速发展,各个高校纷纷将其作为学习数字电路知识的有力工具,引入到数字电路的教学之中。结合 EDA 技术、数字电路知识以及可编程逻辑器件(FPGA、CPLD 等),可以设计出更丰富、更复杂的数字系统,充分发挥学生的创新精神和想象力。因此,本书也有专门的章节介绍相关的 EDA 知识,给出实例说明如何应用 EDA 技术进行数字系统设计。

本书从实用角度出发,将内容分为 3 部分,共 6 章。第一部分由第 1 章和第 2 章构成,是进行数字系统课程设计的知识和技能准备,主要介绍数字系统设计的基本方法、设计报告的撰写、基本元器件、电路板的选择与制作、焊接技术等基础知识。第二部分由第 3 章构成,主要基于传统的数字电路设计技术进行数字系统设计,给出了 5 个详细的数字系统课程设计实例,使学生能够进一步学习和巩固数字电路基本知识。第三部分为第 4 章~第 6 章,主要基于 EDA 技术进行数字系统的设计与实现。第 4 章介绍 EDA 的常用工具,包括 EDA 软件 Quartus II 以及仿真工具 ModelSim 的使用。第 5 章介绍 Verilog HDL 语言。第 6 章给出了一些基于 FPGA 数字系统课程设计实例,具有一定的实用性和代表性。第 6 章和第 3 章有相似的设计题目,提供两种不同的设计思路,供读者对比和参考。另外在附录中,我们给出了 FPGA 设计平台的相关资料介绍。

本书给出的基本数字系统课程设计项目,覆盖数字电路中组合逻辑电路、时序逻辑电路、触发器、算术电路等重要知识点;本书给出的基于可编程逻辑器件的课程设计项目,只给出最基本的解决方案,给读者以扩展和发挥的空间。

本书向使用本书作为教材的教师提供配套电子课件、实验项目参考设计方案、程序代码等。请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载。

本书的第 1~3 章由牛小燕编写,第 4~6 章由李芸编写,全书由牛小燕统稿。在本书的编写过程中,还得到盛庆华老师的帮助和支持,在此一并表示感谢。书中引用了许多学者的观点和成果,有些由于难以查明文献来源而未注明,在此一并致以敬意。

由于电子技术发展迅速,加之编者水平有限,难免有疏漏或错误之处,真诚希望广大读者提出批评和建议。

目 录

第 1 章	数字系统课程设计概述	1
1.1	课程的目的与要求	1
1.2	设计方法与步骤	1
1.2.1	设计方法	1
1.2.2	数字系统开发的一般步骤	2
1.3	课程设计报告的撰写	3
第 2 章	课程设计的基础知识	5
2.1	常用电子电路元器件介绍	5
2.1.1	集成电路	5
2.1.2	开关	7
2.1.3	显示元件	9
2.1.4	电阻	11
2.1.5	电容	12
2.1.6	二极管	13
2.1.7	三极管	14
2.2	电路板的选择与制作	15
2.2.1	常用电路板	15
2.2.2	印刷电路板的设计与制作	17
2.3	焊接技术	25
2.3.1	焊接工具和材料	25
2.3.2	焊接技术	26
第 3 章	数字系统课程设计基本项目	28
3.1	多功能数字钟电路的设计	28
3.1.1	设计要求	28
3.1.2	总体设计	28
3.1.3	单元设计	29
3.1.4	调试要点	33
3.1.5	元器件清单	34
3.2	交通灯控制系统设计	34
3.2.1	设计要求	34
3.2.2	总体设计	35
3.2.3	单元设计	36

3.2.4	调试要点	39
3.2.5	元器件清单	39
3.3	电子密码锁的设计	40
3.3.1	设计要求	40
3.3.2	方案设计	40
3.3.3	单元设计	41
3.3.4	调试要点	42
3.3.5	元器件清单	43
3.4	智力抢答器的设计	43
3.4.1	设计要求	43
3.4.2	方案设计	43
3.4.3	单元设计	44
3.4.4	调试要点	47
3.4.5	元器件清单	47
3.5	两位减法运算电路的设计	48
3.5.1	技术要求	48
3.5.2	方案设计	48
3.5.3	单元设计	49
3.5.4	调试要点	50
3.5.5	元器件清单	51
3.6	其他课程设计题目参考	51
3.6.1	彩灯显示控制器的设计	51
3.6.2	简易公用电话计时系统的设计	51
3.6.3	乒乓球游戏机的设计	52
3.6.4	病房呼叫系统的设计	52
3.6.5	数字秒表的设计	52
3.6.6	篮球竞赛 24 秒计时器的设计	52
3.6.7	简易数字式电容测量仪	52
3.6.8	自动售货机的设计	53
3.6.9	简易数字频率计的设计	53
3.6.10	汽车尾灯控制电路设计	53
3.6.11	拔河游戏机的设计	53
3.6.12	直流数字电压表的设计	54
3.6.13	多路防盗报警器的设计	54
3.6.14	微波炉控制电路设计	54
3.6.15	洗衣机控制电路设计	54
第 4 章	EDA 工具介绍	55
4.1	QuartusII 概述	55

4.2	Quartus II 设计	56
4.2.1	Quartus II 设计流程	56
4.2.2	Quartus II 设计举例	58
4.3	参数化模块库调用	67
4.4	层次化设计方法	72
4.5	嵌入式逻辑分析仪使用方法	73
4.6	在系统存储器数据读写编辑器应用	77
4.7	Modsim 使用介绍	78
4.7.1	ModelSim 概述	78
4.7.2	ModelSim 设计实例	79
第 5 章	Verilog HDL 语言	83
5.1	概述	83
5.2	Verilog HDL 基本结构	83
5.3	Verilog HDL 的描述方式	86
5.4	Verilog HDL 基本词法	87
5.5	Verilog HDL 数据对象	90
5.6	Verilog HDL 基本语句	91
5.6.1	块语句	91
5.6.2	赋值语句	93
5.6.3	条件语句	95
5.6.4	循环语句	98
5.7	Verilog HDL 状态机描述	100
5.7.1	状态机的一般结构	100
5.7.2	Moore 型状态机设计	101
5.7.3	Mealy 型状态机设计	102
第 6 章	基于 FPGA 的数字系统课程设计	104
6.1	交通灯控制电路的设计	104
6.2	多功能数字钟设计	110
6.3	乐曲演奏电路设计	114
6.4	VGA 显示控制器设计	120
6.5	DDS 信号发生器的设计	124
6.6	其他课程设计题目参考	126
6.6.1	数字密码锁设计	126
6.6.2	出租车计价器设计	127
6.6.3	高层电梯控制器设计	127
6.6.4	等精度数字频率计设计	127
6.6.5	LED 点阵显示系统设计	128
6.6.6	通用异步收发器设计	128

6.6.7 直流电机控制系统设计	128
6.6.8 数据采集系统设计	129
附录 A 常用 74 系列芯片功能	130
附录 B 常用 4000 系列芯片功能	134
附录 C KX_7C 系列实验开发系统使用说明	136
参考文献	139

第1章 数字系统课程设计概述

1.1 课程的目的与要求

数字系统课程设计是一门综合性、设计性、实践性很强的电子工程实训课程。这门课开设在“电路分析”、“数字逻辑电路”等基础课程后，要求学生运用所学的数字电路等相关知识，自选课题或者指定课题之后，以独立或合作的形式，经过广泛查阅资料，进行系统的方案设计，单元设计，软件仿真，制作硬件电路，再经过焊接调试，撰写分析总结报告等步骤，实现一个较大规模的数字系统的设计与制作。

这样系统性的工程训练对学生的成长非常有益。在这个过程里，学生不仅可以将所学理论知识和实际相结合，深化对理论知识的理解，学到课堂上很多学不到的实践知识，也可以培养动手能力，增强独立分析和解决问题的能力以及工程实践能力，激发学生的学习兴趣，以及启发学生的创新精神。

1.2 设计方法与步骤

1.2.1 设计方法

数字系统是以传输、处理数字信号为主的电子电路系统，一般由若干子系统或者子模块构成。例如，一个温度监控系统是由温度采集子系统、信号处理子系统、中央控制子系统及执行子系统等构成。子系统一般又可分解为更小的单元电路或者元件。值得注意的是，数字系统也可能包含模拟电路，并不等同于数字电路。

由于数字系统结构上的层次性，系统设计一般有自顶向下、自底向上及两者结合使用等方法。

1. 自顶向下法

自顶向下法，是从系统级出发，根据用户的设计需求和设计指标要求，做深入的调查研究，定义和描述所要实现的系统各项功能和技术指标、外部接口和协议等。再根据系统所应实现的各项功能，将系统划分为一个个子系统。子系统应相对独立，功能明确，规定好各个子系统之间的接口和耦合方式。子系统划分之后，再根据其功能要求，划分更小的子系统，直至最终用具体的部件、元件来实现。自顶向下法的设计思路如图 1-1 所示。

自顶向下法是个不断分解、不断细化的过程，使大型复杂系统的开发更具条理性、清晰性，更便于多人协作完成系统的开发，并使系统整体的功能和性能的实现得到保证。

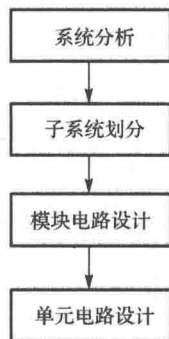


图 1-1 自顶向下设计思路

2. 自底向上法

自底向上的开发方法与自顶向下法正好相反,是从选择合适的元件和部件电路开始,将元件、部件设计成一个个功能独立的单元电路,当一个子单元电路不能直接实现系统所需的某项功能时,就需要设计多个单元电路组成的子系统来实现,直至系统所要求的全部功能都实现为止,如图 1-2 所示。

自底向上法可以继承使用经过验证的成熟的单元电路和子系统,从而实现设计复用,提高生产效率。它的缺点是系统的整体性能和功能的实现效果难以保证。

3. 以自顶向下为主、自底向上为辅的方法

随着大规模电子系统设计技术的发展,为了实现设计复用及对系统进行模块化的测试,通常采用自顶向下为主,并结合自底向上的方法。这种方法既能保证系统化的清晰易懂以及可靠性高、可维护性好的设计,又能充分利用成熟化的设计模块,减少重复劳动,提高设计效率,因而在大型复杂系统的设计中被广泛应用。

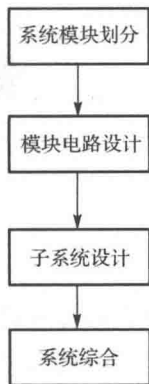


图 1-2 自底向上设计思路

1.2.2 数字系统开发的一般步骤

进行数字系统开发可以有多种方式和步骤,下面介绍一般性的开发步骤。

1. 总体方案的设计和论证

进行数字系统设计时,首先应明确设计任务和要求,确定系统应实现的功能和指标、输入及输出信号。

然后,通过广泛查阅资料,了解课题的背景知识,学习国内外相关的设计思想和方法,运用自己所学的知识,进行总体方案的设计,确定设计算法。进行总体方案设计时,需要根据系统的设计要求,将系统分解为若干容易实现的子模块,并了解其中的设计重点和设计难点,明确各部分的接口和信号传递关系,确定大致的系统设计思想及主要使用的元件或部件等。描述系统算法,可以使用算法流程图、算法状态机图、方框图、硬件描述语言(HDL)等。其中,系统方框图是一种常用的描述方法。

一般情况下,要实现既定设计目标,可选的设计方案往往不是唯一的。可根据各个方案的成熟性、可靠性、经济性等方面的情况,做出合适自己的选择。

2. 单元电路设计

将整体系统划分为若干独立功能的子模块后,接着就要着手设计各单元电路了。分析各单元电路的功能要求和技术指标,尽量采用成熟的设计方案,但也要善于创新。注意各单元电路之间信号的匹配、接口电路的设计等。尽量本着简单、实用、节能、经济的原则设计电路。单元电路设计完成之后,还应该进行整体分析,看看整体的性能是否合乎要求。否则,就需要进一步调整方案设计。

如果子系统过于复杂,可以进一步划分,直到每个部分逻辑清晰、便于设计为止。

3. 元器件的选择和参数计算

选择元器件时,首先注重功能上满足需求,其次,不可忽视的是性能参数也要满足要求。数字电路的电气参数指标较少,一般只有最高工作频率、传输延迟、工作电压及驱动电流等几项指标,而这些指标往往取决于所选择的器件。因此设计数字电路,为了满足电气特性的要求,就是要选择合适的器件。

制作小型数字系统可以使用分立元件(74系列、4000系列等)、可编程逻辑器件(CPLD、FPGA等)和半定制的ASIC等多种类型的器件,选择时要根据器件性能、自身对元器件的熟悉程度、开发时间和成本等因素来考虑并决定。

有些时候,选择元件需要进行参数的计算。在计算时,结果往往是一段范围,这时可根据可靠性、经济性等指标,选择最佳的器件来实现。

计算参数时,应把握几个原则。

(1) 冗余原则:不要让元件长时间工作在极限状态下,应留有余地。一般选择极限参数在额定值1.5~2倍的元件。

(2) 最坏情况原则:对于工作条件,应按照最坏情况去设计电路和计算参数,这样才能保证系统的稳定和可靠。

(3) 最简原则:优化设计,在元件的使用上,尽量使得元件的种类最少,数量最少,但不能以牺牲系统的整体性能作为代价来精简。

另外,在电阻和电容的选择上,应选择计算值附近的标称值元件。例如,计算出来电阻为 $5\text{k}\Omega$,则可选最常见的 $4.7\text{k}\Omega$ 电阻或 $5.1\text{k}\Omega$ 电阻。

4. 制作与调试

电路设计完成后便可进行制作和调试了。制作方式可根据自身的情况选择面包板、PCB制板或者流片等。制作完成后,借助测试工具,如万用表、示波器等进行调试。可先分模块调试,然后再进行整体联调,直到系统的各项功能和性能指标满足为止。

5. 撰写文档

设计文档是整个设计过程的详细说明。优秀的设计文档对于系统整个设计流程管理,设计者之间的协作和交流,系统后期升级更新、维护都有着重要的意义。如何撰写设计文档将在下一节详述。

1.3 课程设计报告的撰写

课程设计除了要设计制作一个小型数字系统之外,还需要撰写配套的设计文档,即课程设计报告。报告一般应包含下面几部分。

1. 系统总的设计要求和技术指标

明确阐述要做什么,以及需要达到的具体技术指标和功能指标。

2. 总体方案设计和比较

根据设计要求,广泛查阅资料,确定设计方案。可以多找几种方案,并加以对比论证,选取适合的方案。确定输入/输出信号,给出电路设计系统框图并加以说明。

3. 单元电路设计说明

进行详细的单元电路设计，给出设计电路图或者硬件描述语言（HDL）代码。各单元电路之间接口要定义清楚。

4. 元器件参数设计与选择

说明所用到元器件的参数分析计算和选择依据，并附元器件清单。

5. 制作与调试

阐述电路的制作过程、制作方法，在调试过程中主要遇到了哪些问题，以及解决方法。

6. 测试结果与结论

电路制作实物的运行测试结果，与预期的功能和性能指标进行比较，说明实物的优缺点，存在的问题，以及改进的措施。

7. 收获、体会和建议

阐述在课程设计中取得的收获、体会，以及对课程设计和形式各方面的建议。

8. 附件（PCB 电路图、程序代码等）

另外，在撰写课程设计报告时，还应注意语句通顺，文字简练，条理清楚，结构合理，计算正确，图表按制图规范绘制，清楚美观。

第2章 课程设计的基础知识

2.1 常用电子电路元器件介绍

2.1.1 集成电路

数字系统中, 会用到大量的数字集成电路, 也会用到一些模拟集成电路。所谓的集成电路是指采用一定的工艺, 将晶体管、电阻、电容等元件及连线集成在硅基片上而形成的具有一定功能的器件, 简称 IC, 俗称芯片。

1. 模拟集成电路

常见的模拟集成电路有集成运算放大器、比较器、对数和指数放大器、模拟乘(除)法器、锁相环、电源管理芯片等。模拟集成电路主要构成的电路有放大器、滤波器、反馈电路、基准源电路、开关电容电路等。

2. 数字集成电路及分类

数字集成电路发展多年, 具有很多不同种类和功能的芯片。常见的数字集成电路有基本逻辑门、触发器、寄存器、译码器、驱动器、计数器、整形电路、可编程逻辑器件、微处理器、单片机、DSP 等。

如果根据数字集成电路中包含的门电路或元器件数量, 可将数字集成电路分类如下。

(1) 小规模集成 (SSI) 电路: 小规模集成电路包含的门电路在 10 个以内或元器件数不超过 100 个。

(2) 中规模集成 (MSI) 电路: 中规模集成电路包含的门电路在 10~100 个之间, 或元器件数在 100~1000 个之间。

(3) 大规模集成 (LSI) 电路: 大规模集成电路包含的门电路在 100 个以上, 或元器件数在 103~105 个之间。

(4) 超大规模集成 VLSI 电路: 超大规模集成电路包含的门电路在 1 万个以上, 或元器件数在 105 以上。

若按照半导体工艺分类, 可将数字集成电路分为双极型集成电路, 其代表有 TTL 及 ECL 等类型的集成电路; 单极型集成电路, 典型类型有 CMOS、PMOS、NMOS 等。

3. 数字集成电路的系列

不论是 TTL 类型的集成电路还是 CMOS 类型的集成电路, 都包含多个系列, 详见表 2-1。

表 2-1 TTL 与 CMOS 集成电路各种系列名称表

类型	系列	全称	中文释义
TTL	ALS	Advanced Low-Power Schottky Logic	先进低功耗肖特基逻辑器件
	AS	Advanced Schottky Logic	先进肖特基逻辑器件
	LS	Low-Power Schottky Logic	低功耗肖特基逻辑器件
	S	Schottky Logic	肖特基逻辑器件
CMOS	AC	Advanced CMOS Logic	先进 CMOS 逻辑器件
	ACT	Advanced CMOS Logic	与 TTL 电平兼容的先进 CMOS 逻辑器件
	AHC	Advanced High-Speed CMOS	先进高速 CMOS 逻辑器件
	AHCT	Advanced High-Speed CMOS	与 TTL 电平兼容的先进高速 CMOS 逻辑器件
	HC	High-Speed CMOS Logic	高速 CMOS 逻辑器件
	HCT	High-Speed CMOS Logic	与 TTL 电平兼容的高速 CMOS 逻辑器件

4. 数字集成电路的命名规则

每种逻辑器件的命名规则有所不同,具体详见各公司的数据手册(Data Sheet)。下面以 CT74LS161CJ 为例,分析命名的含义。其中,C 表示中国制造;T 表示器件类型为 TTL 集成电路;74 表示民用系列,若为 54 则表示军用;LS 表示制造工艺类为低功耗肖特基型;161 表示其逻辑功能,为十六进制加法计数器;C 表示工作温度,范围为 $0\sim 70^{\circ}\text{C}$;J 表示封装类型为双列直插式。

5. 逻辑器件使用注意事项

CMOS 电路使用的时候要注意下面几个方面。

(1) COMS 电路是电压控制器件,它的输入阻抗很大,对干扰信号的捕捉能力很强,所以多余不用的输入引脚不要悬空。因为输入端的悬空会因静电感应或因外界干扰影响电路的正常工作,甚至造成电路击穿。应根据逻辑功能,通过接上拉电阻或者下拉电阻,输入一个稳定的低电平或者高电平信号。

(2) 尽量不用手触碰 CMOS 芯片的引脚,人体的静电有可能使管子静电击穿。

(3) 输入端接低内阻的信号源时,要在输入端和信号源之间串联限流电阻,使输入的电流限制在 1mA 之内。

(4) 当接长信号传输线时,在 COMS 电路端接匹配电阻。

(5) 当输入端接大电容时,应该在输入端和电容间接保护电阻。电阻值为 $R=V_0/1\text{mA}$ 。 V_0 是外界电容上的电压。

(6) CMOS 集成电路各输出端不允许短路,也不能直接和电源、地相接。

(7) CMOS 集成电路中的 V_{dd} 表示漏极电源电压,一般接电源正极, V_{ss} 表示源级电源电压,一般接电源负极或接地,电源极性不能接反。

(8) 更换或移动集成电路的时候,应切断电源,否则电流的冲击可能会损坏器件。

(9) CMOS 集成电路应先接通电源,再接入输入信号,不允许在尚未接通电源时先接输入信号。断开的时候应先断开输入信号,再切断电源。

TTL 集成电路使用的时候,要注意下面这些事项。

(1) TTL 的电源电压是 $+5\text{V}$,74 系列的电源电压范围为 $5\text{V}\pm 5\%$,54 系列的电源电压范围是 $5\text{V}\pm 10\%$ 。使用的时候,电源电压不能超出范围,否则会烧毁器件。

(2) TTL 集成电路, 输入端悬空相当于高电平, 但在电路中, 如果悬空不接, 容易受到干扰, 因此不用的输入端尽可能根据电路的逻辑接高电平或者接地, 从而保证运行的稳定。

(3) 普通 TTL 集成电路各输出端不能并联, OC 输出和三态输出除外。

(4) 更换和移动集成电路时应先切断电源, 否则电流的冲击可能会烧毁芯片。

6. 逻辑电平及相互驱动

TTL 和 CMOS 的逻辑电平按典型电压可分为 4 类: 5V 系列(5V TTL 和 5V CMOS)、3.3V 系列、2.5V 系列和 1.8V 系列。

各类逻辑电路输入高低电平和输出高低电平值如图 2-1 所示, 每种系列的电路各种逻辑电平范围是不一样的。

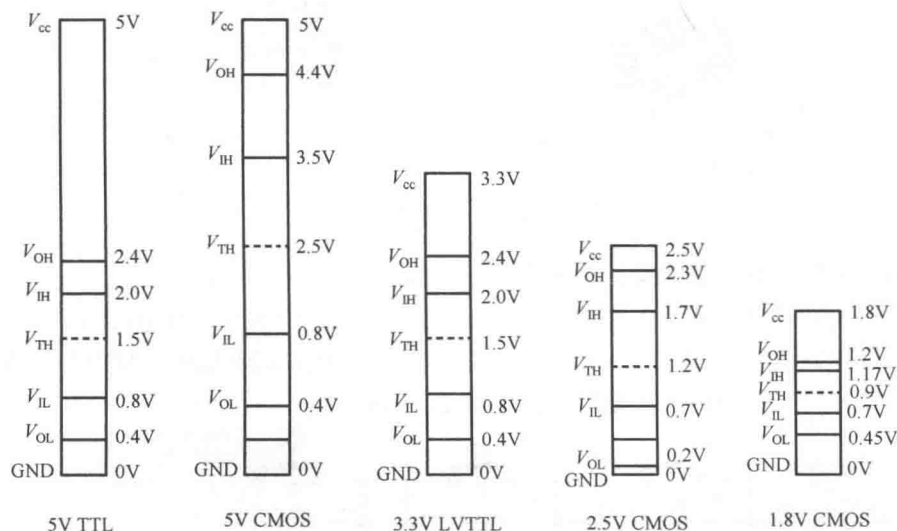


图 2-1 各类逻辑电平一览

如果将不同逻辑电路连接在一起, 需要注意是否能够直接驱动。直接驱动的条件是: 电压需满足 $\begin{cases} V_{OH(min)} \geq V_{IH(min)} \\ V_{OL(max)} \leq V_{IL(max)} \end{cases}$, 电流也需满足 $\begin{cases} I_{OH(max)} \geq nI_{IH(max)} \\ I_{OL(max)} \geq nI_{IL(max)} \end{cases}$, 其中 n 为负载门的个数。

如果不能直接驱动, 就需要采用驱动电路, 例如加上拉电阻、使用 OC 门或者专用的驱动芯片来实现。

2.1.2 开关

开关是用来接通或者断电源的器件, 数字系统中常用的开关有轻触开关、拨码开关、钮子开关、薄膜开关等, 如图 2-2 所示。开关也分为单刀单掷、单刀双掷、双刀双掷、单刀多掷等多种类型。

开关一般有闭合和断开两种状态, 可以很方便地与其他元件组成电路, 由开关的通断控制输出高电平或者低电平, 表示数字信号“0”或者“1”。

开关的主要参数有额定电压、额定电流、接触电阻、耐压及寿命等。

额定电压和额定电流即开关在正常工作状态下允许施加的最大电压和电流。

接触电阻即开关闭合后两端的电阻, 一般在 $20m\Omega$ 以下, 大部分情况下可以忽略不计。



图 2-2 各种开关

耐压是开关断开时所能承受的最大电压，一般在 100V 以上。

寿命是开关能够保证正常工作的最大按压次数，一般在 5000~10000 次以上。

有的时候电路需要的输入信号比较多，常常将多个开关制成矩阵，减少与主控制芯片的连线数量，通过编写扫描程序控制使用，如图 2-3 所示。

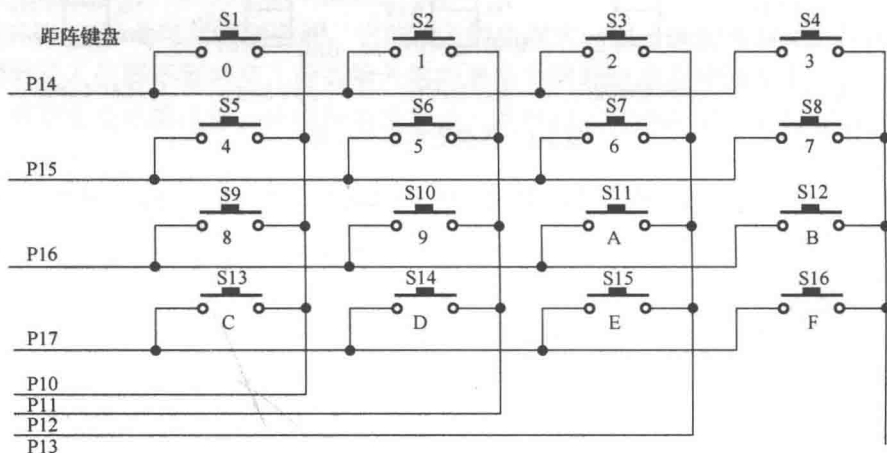


图 2-3 矩阵键盘原理图

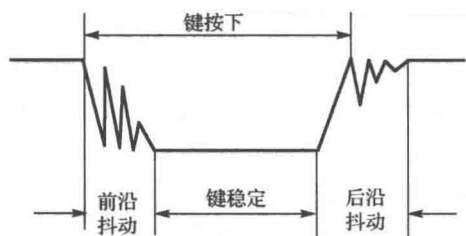


图 2-4 开关闭合和断开时产生抖动

由于大多数开关为机械装置，核心部件是弹簧金属弹片，关断的时候会产生多次来回弹跳，俗称抖动。而数字电路对信号边沿非常敏感，因此有可能产生误操作，一般需要采用硬件或者软件的方法去除抖动的影响。硬件消抖是利用电路滤波的原理实现的，软件消抖是通过按键延时来实现的，如图 2-4 所示。

2.1.3 显示元件

发光二极管是最常见的显示元件，是二极管的一种，简称 LED (Light Emitting Diode)，在正常电流的作用下能够发光，把电能转换成光能。它与普通二极管类似，具有单向导电性，符号如图 2-5 所示。LED 被称为第四代光源，具有体积小、低功耗、高亮度、可靠性高、速度快、节能环保等特点，被广泛应用于各种指示、显示、装饰、背光源、普通照明等领域。

发光二极管有很多种，常见的有单色 LED、变色 LED、红外 LED、闪烁 LED 等。构成发光二极管 PN 结的材料不同，可以发出红、绿、黄、白、蓝等多种不同的颜色。例如，磷化镓二极管发绿光，砷化镓二极管发红光。发光二极管的封装有多种，常见的是引脚式的，如图 2-5 所示，直径有 3mm、5mm 等，也有贴片式的。

发光二极管的正向导通压降比普通二极管要大，大概在 1.7~3V 范围内。按照红、橙、黄、绿、蓝的顺序，正向导通压降依次升高。发光二极管的工作电流一般在 5~20mA，在规定范围内，工作电流的大小与亮度成正比，工作电流越大，发光二极管越亮。但是工作电流超过限度时会烧毁管子，因此在使用时经常需要串联电阻限流。

发光二极管的阳极和阴极的辨别方法有多种，最直接的就是目测法，如图 2-6 所示，电极较小、引脚较长的为阳极，电极较大、引脚较短的是阴极。但是这种方法也不一定准确，因为不同厂商的制作工艺不同，有可能变换引脚的长短。那我们就需要串联一个 1kΩ 左右的电阻，加 5V 的电源，实际测试一下来判断其阳极和阴极。

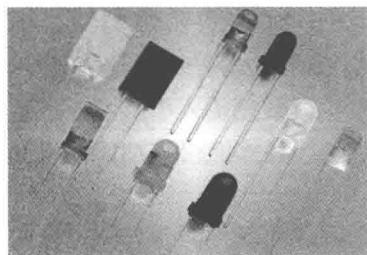


图 2-5 发光二极管示例及符号图

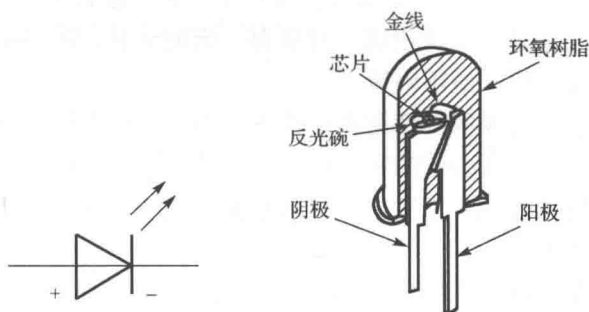


图 2-6 发光二极管的剖面图

单个的发光二极管常用于作为各种指示灯，如果把多个发光二极管集合起来，按照数码的方式排列制作的器件叫作 LED 数码管。LED 数码管有七段数码管、八段数码管及多段数码管，八段数码管比七段数码管多了一个小数点，多段数码管如图 2-7 所示，可以显示更丰富的信息。

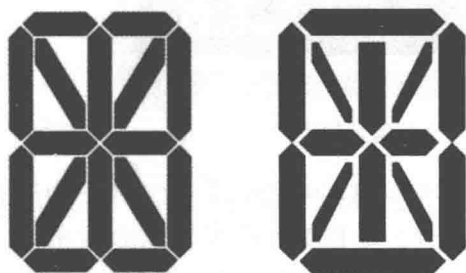


图 2-7 16 段数码管和 14 段数码管