



“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”组织

电工电子实验系列教材

数字逻辑电路 设计实践

徐莹隽 常春 曹志香 董梅



高等教育出版社
Higher Education Press



“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”组织

电工电子实验系列教材

数字逻辑电路 设计实践

徐莹隽 常春 曹志香 董梅



高等教育出版社
Higher Education Press

TN790.2
X3

00-28965



内容提要

本书是“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”组织的电工电子实验系列教材之一,是一本数字逻辑电路实验教材,由浅入深地介绍了数字逻辑电路的工程设计技术和测量调试方法。在内容安排上紧紧围绕开放实验的教学模式,以提高学生自主学习能力、工程实践能力和创新能力为目标,将重点放在学生工程研究基本素质的培养,分析、设计、调试方法的训练以及系统分析设计能力的提高上。

全书共7章,包括数字逻辑电路实验基础、门电路和组合逻辑、组合逻辑函数设计、时序逻辑电路、模拟和数字接口、数字系统设计和可编程数字系统设计基础,从认知性实验、基础性实验到系统设计型实验。每章以实验理论知识讲解、预习思考、实验和实验分析为主线,引导学生做好、做懂、做深实验。实验的形式多样、实用性强,在一定程度上反映了数字逻辑电路分析、设计和调试技术的最新发展。

本书可作为高等院校工科电子类、通信类、电气类各专业的实验教材,也可供从事电子工程设计的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑电路设计实践/徐莹隽等. —北京:高等教育出版社,2008.5

ISBN 978-7-04-023942-3

I. 数… II. 徐… III. 数字电路:逻辑电路-电路设计-高等学校-教材 IV. TN790.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第046831号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 唐笑慧 封面设计 张志奇 责任绘图 尹莉
版式设计 陆瑞红 责任校对 朱惠芳 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京地质印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 15.75
字 数 380 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008年5月第1版
印 次 2008年5月第1次印刷
定 价 20.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23942-00

总 序

如何通过实践环节来培养工科大学生的创新意识以及如何更好地开展实验教学等问题已成为当前高等院校工科专业教学改革的热点与难点问题。“教育部关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知”(教高[2003]1号文件)中明确指出:“理论教学与实践教学并重。要高度重视实验、实习等实践性教学环节,通过实践培养和提高学生的创新能力。要大力改革实验教学的形式和内容,鼓励开设综合性、创新性实验和研究型课程。”但是,目前实验教材的现状却不容乐观,正式出版的实验教材品种很少;多数院校的实验教材都是校内讲义,验证性实验内容偏多,综合性、设计性实验内容很少,不利于学生能力的培养;优秀实验教材不多,与理论教材相比尤其明显。这样,众多学校很难选到合适的优秀实验教材。

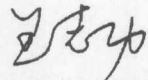
鉴于上述情况,“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社共同策划组织了示范性电工电子实验系列课程教材的建设项目,该项目以国家电工电子教学基地院校为基础,发挥这些院校在理论教学和实践教学方面的示范作用,组织编写电工电子实验系列教材。

2003年12月在云南大学召开了“电工电子实验系列课程教学与教材建设研讨会”,成立了“电工电子实验系列教材编审委员会”(见附件)。30余所院校的参会代表围绕电工电子实践教学所涉及的知识点进行了充分研讨,确定了电工电子实践教学基本要求,为实验教材的编写提供参考依据。通过研讨达成了以下共识:(1)实验教学是非常重要的教学环节,是学生学习科技知识的重要手段。学生应能通过实验获取科学知识、验证相关理论,培养创新能力。(2)从培养学生能力的角度,实验一定要单独设课,而且要有不同于理论课程的实验课程体系。要改变依附于某一理论课程的原有模式。(3)实验能力的培养包括实验设计、测试与仪器使用、仿真、简单故障排除、数据分析、实验报告与总结、查阅器件手册等方面的能力。(4)实验教学应按基础性、设计性、综合性等不同层次、循序渐进地提出要求。

2004年4月14日~15日在华中科技大学召开了由全体编审委员会成员参加的教材评审会。本着保证水平、突出特色、宁缺毋滥的原则,编审委员会成员对东南大学、华中科技大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学、西安电子科技大学、上海交通大学、浙江大学等15所院校申报的38种实验教学改革成果教材进行了评审。评出首批入选的教材有:东南大学、西安交通大学的两套实验系列教材,上海交通大学、哈尔滨工业大学和浙江大学的3种电路课程实验教材,华中科技大学、浙江大学和南京航空航天大学3种电子技术课程实验教材,北京交通大学的信号处理课程实验教材,西安电子科技大学的电磁场课程实验教材,上海交通大学、西安交通大学、厦门大学和ación 计量学院的4种非电类电工学课程实验教材。

希望这些优秀实验系列教材的出版能推动各高校的实验教学改革,真正达到培养学生创新能力之目的。

教育部电子信息科学与电气信息类基础课程
教学指导委员会主任



“电工电子实验系列教材”

编审委员会成员名单

专 家 组	蔡惟铮	哈尔滨工业大学	
	唐 介	大连理工大学	
	孙肖子	西安电子科技大学	
	谢自美	华中科技大学	
	朱承高	上海交通大学	
主任委员	王志功	东南大学	
	副主任委员	孙雨耕	天津大学
委 员	马西奎	西安交通大学	
	胡仁杰	东南大学	
	陈洪亮	上海交通大学	
	陈后金	北京交通大学	
	王小海	浙江大学	
	王永军	东北大学	
	杨 浩	重庆大学	
	殷瑞祥	华南理工大学	
	段哲民	西北工业大学	
	王成华	南京航空航天大学	
	罗 杰	华中科技大学	
	朱 红	电子科技大学	
	林育兹	厦门大学	
	秘 书	韩 颖	高等教育出版社

前 言

本书是“教育部电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会”组织的电工电子实验系列教材之一。“数字逻辑电路设计实践”是所有电类和部分非电类专业的基础主干实验课程,是后续“计算机组成原理”、“单片机系统设计”、“数字信号系统设计”等课程的基石,是培养学生系统概念和工程实践能力的重要环节,在电气信息类教学中占有举足轻重的地位。目前,数字逻辑电路设计实践课程一般可分为两部分,一部分是传统的以中小规模器件为主的硬件实验,另一部分是以硬件描述语言为主的可编程数字系统实验,本书归属前一部分。

本书完全按照开放实验的特点和要求组织编写,对实验每个环节都进行了精心设计,以提高实验完成的质量。主要包括:在实验相关知识的讲解上更为详细;教材中每个知识点安排思考指南;每一个具体实验安排分析指南;有意增加一些故障性的、反面的实验等。

在内容安排上更侧重工程实践能力和方法的培养,减少实验的数量,丰富每个实验的内容,增加每个实验的研究深度,以工程研究的标准来要求学生实验的每个环节,注重项目分析、资料查找和分析、设计方案比较论证、测试方案设计、系统调试、测试结果分析和总结等能力的培养。

重视数字逻辑系统测量、调试和数据分析,将数字逻辑分析仪作为主要的测试仪器,将现代数字系统测量调试方法和计算机辅助数据分析方法贯穿在整个实验教学内容中。

本书分7章,第1章数字逻辑电路实验基础为认知实验,主要介绍数字逻辑电路中的主要器件、测量仪器和测量方法,电路搭接和调试的基本方法;第2~4章为基础数字逻辑设计实验,主要介绍数字逻辑器件的硬件特性、中小规模数字逻辑电路的设计方法和测量调试方法;第5章模拟和数字接口介绍A/D转换和D/A转换的基本特性、选型、设计方法和调试方法;第6章数字系统设计介绍数字逻辑电路系统设计方法,并综合前面各章的实验模块完成一个较完整的中小规模数字系统;第7章可编程数字系统设计基础介绍可编程数字系统设计的基本流程和图形化设计输入方法,为后续的可编程数字系统设计课程打基础。在安排教学内容时,可以视具体要求和学时的多少,做必要的增删。

本书由东南大学电工电子实验中心集体编写而成,其中第1、3章由常春执笔,第2章由董梅执笔,第4、6章由曹志香执笔,第5、7章由徐莹隽执笔,徐莹隽担任主编。全部编写工作都是在东南大学电工电子实验中心主任胡仁杰教授亲自组织和具体指导下完成的。

南京航空航天大学王成华教授、郑步生副教授在百忙之中对全书进行了审阅,提出了大量宝贵的意见,在此对他们致以最诚挚的谢意。还要感谢东南大学电工电子中心的全体教师,是他们完成了3年的样稿试点教学,并对教学过程发现的问题提出了很多有建设性的建议。

由于作者水平有限,错误和不足之处在所难免,殷切期望各方面的读者能给以批评和指正, 邮件请寄 yi_xu@seu.edu.cn.

作 者
2008年1月

本书共分五章。第一章为绪论,主要介绍本书的研究背景、意义、研究内容、研究方法、研究思路、研究创新点等。第二章为... 第三章为... 第四章为... 第五章为... 本书在写作过程中,参考了国内外大量的文献资料,在此对有关作者表示衷心的感谢。同时,感谢东南大学... 本书的出版得到了... 的支持,在此表示诚挚的谢意。

目 录

第 1 章 数字逻辑电路实验基础 1	
1.1 认识数字集成电路 1	
1.1.1 概述 1	
1.1.2 TTL 系列集成电路 3	
1.1.3 CMOS 系列集成电路 3	
1.1.4 ECL 系列集成电路 4	
1.2 脉冲信号研究 4	
1.2.1 脉冲信号的基本参数 4	
1.2.2 脉冲信号的模拟特性 5	
1.2.3 用示波器测量脉冲信号 8	
1.3 实验:用示波器测量脉冲信号 ... 17	
1.4 逻辑分析仪基础 22	
1.4.1 逻辑分析仪概述 22	
1.4.2 逻辑分析仪基本组成 23	
1.5 实验:逻辑分析仪测量数字逻辑信号 28	
1.6 电路连接基础 34	
1.6.1 面包板介绍 34	
1.6.2 电路连接基本技术 36	
1.7 数字电路的故障检查和排除方法 38	
1.8 电路安装调试与故障排除举例 41	
1.9 实验:电路安装调试与故障排除 42	
第 2 章 门电路和组合逻辑 44	
2.1 TTL 门电路的静态特性 44	
2.1.1 静态电压特性 44	
2.1.2 静态电流特性 45	
2.1.3 静态电源电流和静态功耗 48	
2.2 CMOS 门电路的静态特性 50	
2.2.1 静态电压特性 50	
2.2.2 静态电流特性 51	
2.3 OC 门、OD 门和三态门 51	
2.3.1 集电极开路门(OC 门) 52	
2.3.2 三态门 53	
2.3.3 漏极开路门(OD 门) 53	
2.4 TTL 与 CMOS 器件的连接 54	
2.4.1 连接规则 54	
2.4.2 常用接口电路 54	
2.5 实验:门电路静态特性的测试 ... 57	
2.6 门电路的动态特性 61	
2.6.1 数字门电路的门传输延时和线延时 61	
2.6.2 数字门电路的交流噪声 63	
2.6.3 数字门电路的动态电源电流和动态功耗 64	
2.7 实验:门电路动态特性测试 65	
2.8 SSI 组合逻辑设计 65	
2.8.1 设计方法概述 65	
2.8.2 变量选择 66	
2.8.3 变量编码的选择 66	
2.8.4 根据器件特点调整设计 69	
2.9 竞争-冒险现象 71	
2.9.1 竞争和冒险的基本概念 71	
2.9.2 毛刺捕捉 73	
2.9.3 消除竞争-冒险现象的	

方法	74	4.2.1 常见的时钟类型	115
2.10 实验:SSI 组合逻辑设计及竞争-冒险现象	75	4.2.2 时钟产生电路	116
第3章 组合逻辑函数电路	77	4.3 时序电路调试技巧	119
3.1 基本组合逻辑函数电路	77	4.3.1 静态调试	119
3.1.1 值固定、传递和取反	77	4.3.2 动态调试	120
3.1.2 使能的概念和应用	79	4.3.3 逻辑分析仪作状态分析	121
3.2 用 MSI 设计组合逻辑函数电路	80	4.4 实验:触发器设计时序逻辑电路	123
3.2.1 编码器设计组合逻辑函数电路	80	4.5 常用时序功能块	125
3.2.2 译码器设计组合逻辑函数电路	82	4.5.1 计数器	125
3.2.3 数据选择器设计组合逻辑函数电路	84	4.5.2 计数器的应用	128
3.2.4 半加器和全加器设计组合逻辑函数电路	87	4.5.3 移位寄存器	139
3.2.5 用 MSI 设计组合逻辑函数电路小结	92	4.5.4 移位寄存器的应用	140
3.3 实验:用 MSI 进行组合逻辑函数电路设计	92	4.6 实验:用时序功能块设计时序电路	144
3.4 只读存储器	93	第5章 模拟和数字接口	148
3.5 实验:用 ROM 设计组合逻辑函数电路	96	5.1 概述	148
第4章 时序逻辑电路	103	5.2 模数(A/D)转换	149
4.1 基本时序逻辑电路	103	5.2.1 A/D 转换中的取样、保持和量化	149
4.1.1 时序逻辑电路的特点	103	5.2.2 集成 A/D 转换器基本参数	152
4.1.2 锁存器	104	5.2.3 集成 A/D 转换器选择	159
4.1.3 触发器	105	5.2.4 线路设计	162
4.1.4 用触发器设计同步计数器	107	5.2.5 设计举例	162
4.1.5 用触发器实现状态机	108	5.3 实验:模数转换	164
4.1.6 触发器的时间参数	112	5.4 数模(D/A)转换	167
4.1.7 时序逻辑电路的延时分析	113	5.4.1 概述	167
4.2 时序逻辑电路中的时钟	114	5.4.2 集成 D/A 转换器基本参数	167
		5.4.3 集成 D/A 转换器选择	170
		5.5 实验:数模转换	172
		第6章 数字系统设计	174
		6.1 概述	174
		6.2 设计举例:数字密码锁	177
		6.2.1 分析原始系统功能要求	177

6.2.2	确定硬件算法,划分系统 模块	179	7.3.3	为输入信号建立输入激励 波形	212
6.2.3	数据处理单元电路设计	181	7.3.4	功能仿真	215
6.2.4	控制单元电路设计	184	7.3.5	时序仿真	216
6.2.5	单元电路调试	188	7.4	器件编程	217
6.3	实验:小型数字系统设计	189	7.4.1	概述	217
6.3.1	十字路口交通信号灯控制 电路	189	7.4.2	Quartus II 器件编程	218
6.3.2	电机测速系统	189	7.5	层次化项目设计	219
6.3.3	健身自行车控制器	190	7.5.1	底层模块符号的建立和 修改	219
6.3.4	掷骰子游戏	191	7.5.2	建立顶层设计文件	219
第7章 可编程数字系统设计			7.6	几种提高设计效率的方法	222
	基础	192	7.6.1	总线(BUS)功能	222
7.1	设计输入	193	7.6.2	MegaFunction 宏功能库	224
7.1.1	概述	193	7.7	实验:可编程数字逻辑设计	228
7.1.2	建立工程项目	194	7.7.1	简易数字钟	228
7.1.3	建立原理图输入文件	196	7.7.2	简易电子琴	228
7.2	项目处理	200	7.7.3	健身自行车控制器	230
7.2.1	概述	200	7.7.4	全自动洗衣机控制器	231
7.2.2	图形设计文件的项目 处理	203	7.7.5	模拟打乒乓球游戏	232
7.3	设计校验	209	附录 常用集成电路型号和引 脚图		
7.3.1	概述	209	234		
7.3.2	建立输入激励波形文件 (.vwf)	210	参考文献		
			238		

第 1 章

数字逻辑电路实验基础

本章将介绍与数字逻辑电路实验相关的一些基础知识,使读者初步了解数字器件和数字电路测量环境,掌握脉冲信号的概念和脉冲测量技术,熟悉小规模电路的设计、连线、调试和测量,以及示波器和逻辑分析仪的使用。

1.1 认识数字集成电路

1.1.1 概述

传统上数字集成电路器件分为 TTL、ECL、CMOS(包括高速 CMOS)三类,其部分性能比较见表 1.1.1。由表可见:ECL 速度快但功耗较大;CMOS 功耗较低,但速度较慢;TTL 介于两者之间。

表 1.1.1 三种数字集成电路的部分性能比较

性能指标	TTL	ECL	CMOS
工作电压	5 V	-5.2 V	3 ~ 15 V
平均传输延时/门 t_{pd}/ns	3 ~ 10	0.7 ~ 2	60
平均功耗/门 P/mW	2 ~ 22	25 ~ 45	1 ~ 5 μW

注意:这里讨论的是一般情况,为了满足用户在提高工作速度和降低功耗这两方面的要求,已经出现了很多改进型的器件,使得各类器件间的界限越来越模糊。比如高速 CMOS 器件已经能达到 TTL 的工作速度。在下面的讨论中将涉及部分改进型器件。

每个集成电路都具有一定的外观形状,通常称为具有某种“封装(Package)”。由于每种封装都有固定的标准,所以当封装确定的时候,集成电路的外形尺寸也就确定了,封装标准的存在有助于大型的工业化生产。需要注意的是同一个集成电路可能有不同的封装,不同种类的集成

电路又可能用同一种封装。图 1.1.1 所示是常用的一种数字集成电路,从外形上看它的外壳是塑料的,有 16 个金属引脚,而且均匀分布在两侧,这种封装称为“PDIP16”,“PDIP”是“Plastic Double In-line Package(塑料双列直插封装)”的缩写,“16”代表引脚数。这种封装的集成电路引脚顺序为以缺口向左,最左下脚为“1”脚,逆时针方向顺序计算其他引脚号。表 1.1.2 列举了常用的数字集成电路器件封装名称和特点,图 1.1.2 给出了这些封装的外观图,引脚识别等信息可参看相应的数据手册。在集成电路的壳体上一般会刻有一些文字来标注该器件的生产厂家、器件名称、生产序号等。在图 1.1.1 器件中间显示的“HD74LS138P”字样中“HD”表示是日本“日立”公司生产,“74LS138”是器件型号,通过查数据手册可知这是一个 3 线-8 线译码器,“P”代表是塑料封装。在右下脚的“9E35”则是生产厂家的内部生产序号。

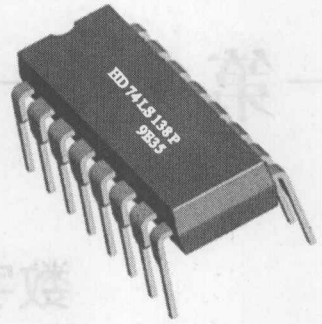


图 1.1.1 16 引脚双列直插封装图

表 1.1.2 数字集成电路封装特点比较

封装名称	特点
Double In-line Package (DIP) 双列直插封装	其外接引脚对称分布在两边,是实验中用得比较多的一种,其优点是加工容易,结构结实,易于更换。缺点是器件尺寸大,采用插入式安装方式安装密度低。引脚长,不利于高频应用。
Small Outline Package (SOP) 小外形封装	优点是体积小,引脚间距小,采用表面安装方式安装密度高,引脚短有利于高频应用,缺点是安装比较复杂,安装和更换需要专门的设备。这种封装是目前工业产品中采用得比较多的一种。
Quad Flap Package (QFP) 四边引线扁平封装	主要优缺点和 SOP 类似,但比 SOP 外形要更薄一些,同时采用四边引脚使安装密度可以更大。
Leader Chip Carry (LCC) 有引线片式载体	主要的优缺点和 SOP 类似,但其引脚的外形采用了内弯形状,有助于提高机械强度,这种封装的价格比较高。
Ball Grid Package (BGA) 球形封装	其引脚为分布在芯片底部的锡球,由芯片中心方向引出,这种设计有效地缩短了信号的传导距离,减少了信号衰减,提高了抗干扰、抗噪性能。但安装和测试工艺也相应复杂很多。

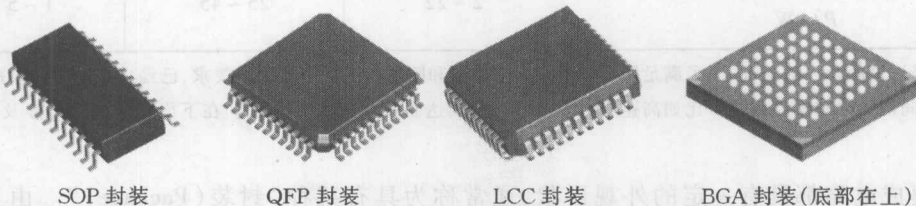


图 1.1.2 常见的数字电路封装

练习:

观察数字系统实验箱和你手上的器件,列举其中所涉及到的数字集成电路,查找相关资料写出每种集成电路的器件名称、封装类型、功能和生产厂家。

最常用的集成电路资料的查询方法之一是在如 google (<http://www.google.cn>) 或者百度 (<http://www.baidu.com>) 这样的主流搜索引擎中直接输入要查询的器件型号,然后根据自己的需要选择合适的条目。

1.1.2 TTL 系列集成电路

在中小规模数字集成电路中,历史最悠久、功能和种类最多的就是 TTL。TTL 数字集成电路的工作电压为 5 V,其编号一般以 74/54 开头的最为普遍(74/54HC × × 除外,这个系列是高速 CMOS 器件)。74 编号的是民用规格,54 编号的是军用规格,其差别主要是 54 系列比 74 系列的工作温度范围和偏置电压范围要更宽一些,另外某些具体的参数也有略微差异。TTL 家族目前常用的有 6 类,分别为标准型 TTL、肖特基 TTL 和低功耗肖特基 TTL、高速 TTL、先进肖特基 TTL、先进低功耗肖特基 TTL。其性能比较见表 1.1.3。

表 1.1.3 常见 TTL 集成电路比较(参数以两输入与非门为参照)

名 称	标准型	肖特基	低功耗肖特基	高 速	先进肖特基	先进低功耗肖特基
编 号 (54 系列类似)	74	74S	74LS	74F	74AS	74ALS
平均传输延时/门 t_{pd}/ns	10	3	9	3	1.7	4
平均功耗/门 P/mW	10	19	2	4	8	1.2

对于不同系列的 TTL 器件,只要后边的标号相同,其逻辑功能和引脚排列就相同,在使用要求不高的场合可以互相替换。如 7420、74S20、74LS20、74F20、74AS20、74ALS20 都是双 4 输入与非门,都采用 14 引脚的封装,而且输入端、输出端、电源、地的引脚位置都是一样的。但在某些特殊应用中则要根据不同的条件和要求查询相关数据手册以选择不同类型的 74 系列产品,如高速应用选择“AS”系列,低功耗选择“ALS”系列等。

1.1.3 CMOS 系列集成电路

CMOS 集成电路由于价格低廉、集成度高,同时随着工艺的改进,工作速度也得到了大幅度的提高,所以已经成为目前应用最广泛的一种集成电路。CMOS 中小规模集成电路主要以 4000 系列、14000 系列和 54/74HC 系列为主。4000 和 14000 系列是普通 CMOS 集成电路,而 54/74HC 系列则是高速 CMOS 器件,具体比较见表 1.1.4。

表 1.1.4 常见 CMOS 集成电路比较(参数以电源电压 5 V 的 2 输入与非门为参照)

名称	电源电压/V	平均功耗/门/ μW	传输延时/ns	过渡时间/ns
4000 系列	3 ~ 15	5	110	90
14000 系列	3 ~ 18	5	90	100
74HC 系列	2 ~ 6	1	7	15

一般情况下,4000 和 14000 系列的大部分器件和 74 系列有相同的功能,比如 4001、14011 和 7400 都是四 2 输入与非门,但引脚排列不尽相同,所以它们之间不能简单替代。74HC 虽然也是 74 开头的系列,但它属于 CMOS 器件,尾数相同的 74HC 器件和 74 系列器件的功能完全相同,例如 74HC00 和 7400 的功能和引脚排列完全相同,在部分情况下可以互相替代,另外还有一种特殊的 CMOS 系列为 54/74HCT,后面的 T 表示是 TTL 兼容,也就是说这个系列可以完全替换 TTL 系列中的对应型号。(能否互相替代的具体判断标准将在第 2 章中详细阐述)。

1.1.4 ECL 系列集成电路

ECL 数字集成电路具有工作速度最快、扇出能力大、噪声小等优点,其缺点主要是功耗大、输出电平稳定性差和噪声容限比较低。ECL 中小规模集成电路主要以 10K 和 100K 系列为主,具体见表 1.1.5。

表 1.1.5 常见 ECL 集成电路比较

名称	电源电压/V	平均功耗/门/ μW	传输延时/ns
10K 系列	-5.2	25	2
100K 系列	-4.5	40	0.75

1.2 脉冲信号研究

1.2.1 脉冲信号的基本参数

脉冲信号是数字电路主要信号,特别在同步时序电路中,作为时钟信号的脉冲信号控制和协调着整个系统的工作,脉冲信号的特性好坏将直接关系到系统能否正常工作以及各项参数能否正确测量。因此,对于一个数字系统设计人员来说,根据脉冲信号的特性用正确的方法去测量脉冲信号的各项参数是必不可少的一项基本技能。

脉冲信号一般可分为单脉冲和周期性脉冲。图 1.2.1 所示是一个典型的 TTL 矩形脉冲信号,TTL 脉冲的高电平一般在 5 V 左右,低电平在 0 V 左右。为了定量描述矩形脉冲的特性,通常需要给出图 1.2.1 中所标注的几个主要参数。

脉冲周期 T : 周期性重复的脉冲序列中,两个相邻脉冲之间的时间间隔。在实际应用中常用频率 $f=1/T$ 表示单位时间内脉冲重复次数。

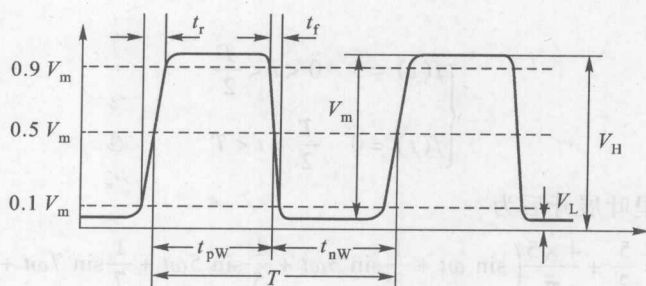


图 1.2.1 描述脉冲信号的主要参数

高电平电压 V_H : 脉冲电压的最大值, 对于 TTL 脉冲为 5 V 左右。

低电平电压 V_L : 脉冲电压的最小值。

脉冲幅度 V_m : 脉冲电压的最大变化幅度。

正脉冲宽度 t_{pw} : 从脉冲前沿 $0.5V_m$ 起, 到后沿 $0.5V_m$ 为止的一段时间。

负脉冲宽度 t_{nw} : 从脉冲后沿 $0.5V_m$ 起, 到前沿 $0.5V_m$ 为止的一段时间。

上升时间 t_r : 脉冲上升沿从 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 所需要的时间。

下降时间 t_f : 脉冲下降沿从 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 所需要的时间。

占空比 q : 正脉冲宽度和脉冲周期的比值, $q = t_{pw}/T$ 。

1.2.2 脉冲信号的模拟特性

根据高等数学的相关理论, 如果给定的周期函数 $f(t)$ 满足狄里赫利条件 (函数在任意有限区间内, 具有有限个极值点与不连续点), 则该周期函数可展开为一个收敛的正弦函数级数。

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \\ &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

式中各系数的计算公式及对应的系数关系如下

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (1.2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (1.2.4)$$

在该展开式中, A_0 称为周期函数 $f(t)$ 的恒定分量, 也称为直流分量; 与原周期函数的周期相同的正弦分量 $A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ 称为 1 次谐波, 也称为基波分量; 其他各项称为高次谐波 (如 2 次谐波、3 次谐波等)。

在电子技术中所遇到的周期函数通常均满足狄里赫利条件, 包括脉冲信号, 这样就可以将脉冲信号看成是无穷多次个正弦谐波的叠加。以图 1.2.2 所示的占空比为 50% 的理想 TTL 信号

为例,其函数表示式为

$$\begin{cases} f(t) = 5 & 0 < t < \frac{T}{2} \\ f(t) = 0 & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

利用上述公式进行傅里叶展开后为

$$f(t) = \frac{5}{2} + \frac{4 \times 5}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right) \quad (1.2.5)$$

式中, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 。

再分析一下图 1.2.3 所示的三角波信号的情况,它的幅值和 TTL 脉冲信号一样也是在 0 ~ 5 V 之间变化,其函数表达式为

$$\begin{cases} f(t) = \frac{2 \times 5}{T} t & 0 < t < \frac{T}{2} \\ f(t) = -\frac{2 \times 5}{T} (t - T) & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

进行傅里叶展开后得

$$f(t) = \frac{5}{2} - \frac{4 \times 5}{\pi^2} \left(\cos \omega t + \frac{1}{3^2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5^2} \cos 5\omega t + \frac{1}{7^2} \cos 7\omega t + \dots \right) \quad (1.2.6)$$

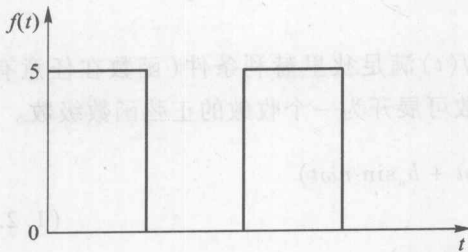


图 1.2.2 理想的 TTL 脉冲信号

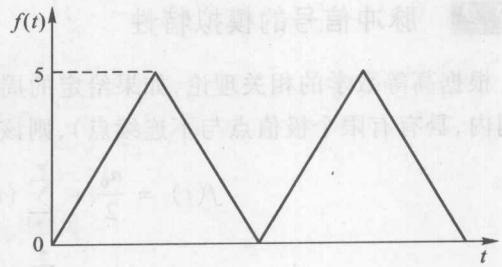


图 1.2.3 三角波信号

对 TTL 脉冲信号和三角波信号各取到 9 次谐波来分析,具体计算结果见表 1.2.1。

表 1.2.1 TTL 脉冲信号和三角波信号各次谐波幅度比较表

信号	直流分量	基波幅度	3 次谐波幅度	5 次谐波幅度	7 次谐波幅度	9 次谐波幅度
TTL 脉冲	2.5	$\frac{20}{\pi}$	$\frac{20}{3\pi}$	$\frac{20}{5\pi}$	$\frac{20}{7\pi}$	$\frac{20}{9\pi}$
三角波	2.5	$\frac{20}{\pi^2}$	$\frac{20}{9\pi^2}$	$\frac{20}{25\pi^2}$	$\frac{20}{49\pi^2}$	$\frac{20}{81\pi^2}$