

国外数字系统设计经典教材系列

Real Digital, A Hands-on Approach to Digital Design

[美] 科尔·克林特 著

数字系统设计 快速入门

赵不赅 徐雷钧 郑 博 译
赵 峰 审校



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

经典教材系列

数字系统设计快速入门

Real Digital, A Hands-on Approach to Digital Design

[美] 科尔·克林特 著
赵不赟 徐雷钧 郑博 译
赵峰 审校

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是数字系统设计初学者的入门教材,书中内容共分10章,内容涉及电子电路、逻辑化简、VHDL语言、组合逻辑电路、组合算术电路、存储器、时序电路、信号传输延时、开发板和CAD工具的使用。每章都围绕一个主题,为检验对所学课程的理解和所学课程更深层次的研究,配备了练习和实验工程。

本书可作为高等院校电类和非电类专业低年级学生相关课程的教材和教学参考书,适合用作企业职工初级培训,也可作为从事电子产品开发和生产的工程技术人员、电子爱好者的自学教材。

图书在版编目(CIP)数据

数字系统设计快速入门 / (美)科尔·克林特著;赵不赟,徐雷钧,郑博译. --北京:北京航空航天大学出版社, 2010.10

书名原文: Real Digital, A Hands-on Approach to Digital Design

ISBN 978-7-5124-0218-8

I. ①数… II. ①克… ②赵… ③徐… ④郑… III. ①数字系统—系统设计—教材 IV. ①TP271

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第180239号

版权所有,侵权必究。

数字系统设计快速入门

Real Digital, A Hands-on Approach to Digital Design

[美] 科尔·克林特 著

赵不赟 徐雷钧 郑博 译

赵峰 审校

责任编辑 李松山

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:15.25 字数:342千字

2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷 印数:4 000册

ISBN 978-7-5124-0218-8 定价:32.00元

译者的话

自从世界上第一片 GAL 芯片在美国 Lattice 公司问世以来,可编程逻辑器件的应用取得了日新月异的发展。特别是 Lattice 公司在 1991 年开发并推出的在系统可编程技术,开拓了新一代在系统可编程逻辑器件,给电子产品的设计和和生产带来了革命性的变化。前几年,人们还认为 40 nm 集成电路工艺是一个瓶颈,现如今,Altera 公司刚刚宣布即将推出 28 nm 的 FPGA 产品,这与 1985 年 Xilinx 公司推出第一款 FPGA 产品相隔不到 25 年的时间,这种发展速度令人瞠目结舌,似乎进入了一个神话般的世界,可编程片上系统(System on a Programmable Chip)、可编程片上网络(Net on a Programmable Chip)时代已经真正到来。

在系统可编程技术如此迅猛的发展,在带给人们设计便利与创造性极大发挥惊喜的同时,也给设计者与企业带来了极大的挑战与竞争的压力,这种挑战与压力也直接传递到了高等院校。复杂大系统的开发需要更多的专业知识与技术,产品的性价比要求越来越高而产品的上市时间要求越来越短。因此,企业越来越青睐那些具有丰富设计经验的优秀工程师,那么,高校应当如何培养企业所需要的人才呢?

对在系统可编程技术而言,如果学生能够较早地了解这方面的知识并获得实验条件,在学习的过程中能较早引入工程应用技能并得到实践,使之与专业知识相结合,这不仅会提高学生学习的兴趣和工程实践能力,而且还会培养学生的创新思维,激发学生的创新灵感。许多公司开发出了廉价的可随身携带实验开发板,非常适合于低年级和初学者使用。例如,美国 Digilent 公司的 BASYS 开发板,塑料盒包装,如同书本一般,并配以存有工具软件与资料的光盘。同时 Digilent 公司总裁、华盛顿州立大学教授科尔·克林特先生,以他丰富的教学和产品研发经验,为初学者编写了《Real Digital, A Hands-on Approach to Digital Design》一书。该书深入浅出,通俗易懂,言简意明,将作者丰富的设计经验渗透在其中。全书共分 10 章,每章围绕一个主题,配有练习和设计工程,检验对所学课程的理解和对所学课程更深层次的研究,同时强调要自己动手,按时递交自己的作业。

教学实践证明,即使是“电路”和“数字电路”课题没学的大学一、二年级学生,也能够较好

译者的话

地掌握 Verilog-HDL 语言并用 BASYS 开发板设计出令人感到惊讶的电路来。

本书由赵不贿、徐雷钧、郑博翻译,最后由赵不贿修改定稿,硕士研究生吴长江、于小燕、李洪池、杨旻、屠君君参与了翻译工作。根据图书出版规范要求,给书中的图和表加了图题和表题。Digilent 公司中国区经理赵峰先生对译稿进行了仔细的校对,提出了许多合理的意见和建议,译者在此致以衷心的感谢,译者还要感谢与非网科技(北京)有限公司总经理苏公雨先生和贺潇荃先生的支持,同时感谢在本书翻译和出版过程中给予关心、支持和帮助的所有人士。由于译者水平有限,疏漏和不足之处在所难免,恳请读者给予批评指正。

译者

前 言

工科学生最好在课程学习的同时能有意识地培养自己的设计经验。积极的学习方法是贯穿本书的特色,将具有挑战性的设计工程与各个新主题结合在一起,从简单的逻辑电路到复杂的数字系统。如果在学生学习的过程中能较早引入工程应用技能并得到实践,那么他们将从中大受裨益,他们不仅学到了基本的工程知识,也获得了挑战和验证所学知识的信心与能力。

本书前面几章的工程设计中,有详细的设计指导和相关计算机辅助设计(CAD)工具的介绍。随着工程的难度加大,设计也越来越复杂,指导与约束条件也越来越少,这有助于鼓励学生找到自己独特的、创造性的解决问题的方法。每一个阶段,当学生获得电路设计、仿真、实现工具的信心和能力时,他们就会在好奇心的驱使下去检验并扩展所学的知识。

为了从本书中充分获益,学生应该在学习下一章之前完成本章所有的设计工程,课后作业中的工程对主动设计工作有帮助,本书与课堂中还会不时地加强这些概念。完成那些工程每周需要 8 个小时或更多的时间,所以学生需要免费的 CAD 工具和设计工具包。本书的设计基于 Digilent Basys 板或者 Nexys2 设计工具包。Digilent Basys 板和 Nexys2 设计工具包是低成本的设计平台,它们包含有强大的、先进的可编程逻辑器件。使用 Xilinx 公司免费的 WebPack CAD 软件,学生可以在任何地方(实验室内或实验室外)使用这些工具包拥有的强大的设计功能。

本书共分 10 章,每章都围绕一个主题,并有配套的练习和设计工程。练习是为了检验对所学课程的理解,不需要设计工具就可以完成。设计工程是对所学课程更深层次的研究,允许学生用电路和系统设计工具完成,进一步巩固所学的知识。

目 录

第 1 章 电子电路简介	1
1.1 概 述	1
1.2 背景知识	1
1.2.1 电气与电子电路	3
1.2.2 实际电路和模型电路	4
1.3 数字电路	4
0 和 1	5
1.4 电子元件	7
1.4.1 电 阻	7
1.4.2 电 容	8
1.4.3 输入类元件(按钮和开关)	9
1.4.4 输出类器件(LED)	9
1.4.5 连接器件.....	10
1.4.6 印制电路板(PCB)	11
1.4.7 集成电路(芯片).....	12
1.5 逻辑电路.....	13
1.5.1 三极管开关.....	16
1.5.2 FET 构成的逻辑电路	19
1.5.3 逻辑电路图.....	22
练习 1 数字电路和 Basys 板	24
第 2 章 Digilent FPGA 开发板介绍	31
2.1 概 述.....	31
2.2 Digilent 开发板参考资料	33
练习 2 Digilent FPGA 开发板介绍.....	34
实验工程 2 开发板检验和基本逻辑电路	37
附录 用 Adept 对 Digilent 开发板进行编程	39

目 录

第 3 章 逻辑电路结构与 CAD 工具简介	46
3.1 概 述.....	46
3.2 逻辑电路基本结构简介.....	47
3.2.1 原理图及其原型.....	47
3.2.2 组合电路结构.....	49
3.2.3 SOP 与 POS 电路	51
3.2.4 异或运算.....	53
3.3 CAD 工具简介	55
3.3.1 产品设计流程.....	56
3.3.2 电路仿真.....	57
练习 3 逻辑电路结构	62
实验工程 3 电路原理图绘制简介	66
附录 WebPack 原理图设计入门指南	67
第 4 章 逻辑化简	82
4.1 概 述.....	82
4.2 背景介绍.....	83
4.3 布尔代数.....	85
4.4 逻辑图.....	89
4.5 逻辑函数的不完整表述(无关项).....	93
4.6 加入变量.....	94
4.7 基于计算机的逻辑化简算法.....	98
练习 4 逻辑化简	100
实验工程 4 逻辑化简	107
第 5 章 VHDL 语言介绍	110
5.1 概 述	110
5.2 背景介绍	111
5.2.1 电路的结构设计与行为设计比较	112
5.2.2 综合与仿真	114
5.3 VHDL 语言介绍	115
5.3.1 信号的赋值	116
5.3.2 使用 Xilinx VHDL 工具.....	117
实验工程 5 VHDL 介绍.....	118
附录 使用 Xilinx VHDL 工具	120

第 6 章 组合逻辑块	126
6.1 概 述	126
6.2 背景介绍	127
6.2.1 信号的二进制码(总线)	127
6.2.2 多输出电路的化简	128
6.3 组合电路块	129
6.3.1 数据选择器(多路选择器)	129
6.3.2 译码器	133
6.3.3 数据分配器	135
6.3.4 七段显示器和译码器	136
6.3.5 优先编码器	138
6.3.6 移位寄存器	139
练习 6 组合逻辑块	142
实验工程 6 组合逻辑块	151
第 7 章 组合算术电路	153
7.1 概 述	153
7.2 背景介绍	154
7.2.1 位分段设计方法	154
7.2.2 比较器	155
7.2.3 加法器	157
7.2.4 减法器	160
7.2.5 负 数	161
7.2.6 加法/减法器	163
7.2.7 加法器溢出	164
7.2.8 硬件乘法器	164
7.2.9 ALU 电路	165
7.2.10 VHDL 的 ALU 行为描述	167
7.3 VHDL 进阶	168
7.3.1 结构设计与行为设计比较	168
7.3.2 VHDL 中的模块化设计	170
7.3.3 VHDL 中的算术函数	172
练习 7 组合算术电路	173
实验工程 7 组合算术电路	181

目 录

第 8 章 信号传输延迟	183
8.1 概 述	183
8.2 逻辑电路中的传输延迟	184
8.2.1 电路延迟与 CAD 工具	185
8.2.2 在 VHDL 源文件中指定电路的延迟	186
8.2.3 毛 刺	187
8.2.4 使用 CAD 工具生成延迟	189
实验工程 8 信号传输延迟	191
附录 ISE/WebPack 仿真器后布线模式运行	194
第 9 章 基本存储电路	196
9.1 概 述	196
9.2 背景介绍	197
9.2.1 存储器电路介绍	197
9.2.2 基本单元	199
9.2.3 D 锁存器	201
9.2.4 D 触发器	202
9.2.5 存储器复位信号	204
9.2.6 存储器的其他输入信号	204
9.2.7 其他类型触发器	205
9.2.8 寄存器	205
9.2.9 其他类型存储器电路	206
9.2.10 存储电路的 VHDL 描述	206
9.2.11 VHDL 中的进程语句	206
实验工程 9 基本存储电路	210
第 10 章 时序电路的结构化设计	213
10.1 概 述	213
10.2 背景介绍	213
10.2.1 时序电路的特征	213
10.2.2 时序电路设计	215
10.2.3 使用状态图来设计时序电路	217
10.2.4 时序电路的结构化设计	220
10.2.5 二进制计数器	222
10.2.6 用 VHDL 描述二进制计数器	224
练习 10 时序电路的结构化设计	227
实验工程 10 时序电路的结构化设计	230

第 1 章

电子电路简介

1.1 概 述

本章简要介绍电子电路与系统。除最基本的概念外,还着重强调了后续章节所需的内容。本书在每章内容结束后,都有与之配套的练习,练习记入学分,请完成并按时提交。

阅读本章前,你应该:

- 找一个安静的地方坐下来阅读。

本章结束后,你应该:

- 理解电压、电流和电阻的定义,能够在基本电路中应用欧姆定律;
- 熟悉各种不同的电子元器件;
- 了解基本场效应管(FET)的结构、工作原理以及在逻辑电路中的作用;
- 理解逻辑门的功能;
- 能够根据逻辑表达式绘制出逻辑电路,并根据原理图写出逻辑表达式。

完成本章,你需要:

- 有阅读的能力和学习的愿望。

1.2 背景知识

一切物质都是由原子组成的,原子包含带正电荷的质子和带负电荷的电子。带电粒子的周围形成电场,能够对其他带电粒子施加力的影响。质子周围形成正电场,电子周围形成负电场。对每一个电子和质子而言,它们周围的场强大小是相同的,所带电荷的“基本单元”其量值为 1.602×10^{-19} C。C 为电荷的单位,通过电流(在某一闭合回路中)的测量得到:1 C 电荷等

于1 A大小的电流在1 s内输送的电荷量(1 C电荷大约为每秒通过120 W灯炮的电量)(译者注:美国电网电压为110 V)。如果电荷量为1 C的质子与电荷量为1 C的电子相距1 m,根据库仑定律,将会产生 8.988×10^9 N的引力,相当于地球表面约一百万吨的重力。同样,两个电荷量为1 C的质子或电子之间也存在同样大小的斥力。在电路中发挥动力作用的就是这种内部粒子间巨大的作用力。

一个或多个质子周围的正电场将会对其他质子产生斥力,对其他的电子产生引力。电场可以使带电粒子移动,这样它就对带电粒子做了一定量的功,也就是存在势能。电场对单位电荷贡献的能量为J/C,常称为电压。电压经常被认为是“电子驱动力”,可以使电荷移动。电源就是一种在局部含有不平衡电子的材料,其一端(负极)聚集着大量电子,而另一端(正极)电子相对缺乏。电源的电动势以伏特为单位,由其储存的电荷量、负极与正极间的距离、材料之间的势垒以及其他因素决定。一些电源(如小电池)输出电压小于1 V,而有些电源(如发电站)可以输出上万伏的电压。通常,9~12 V的电源被认为对人体是安全的(表面皮肤至少要完整),但是有些人即使在低电压下也会受到伤害(有时是致命的)。本书的实验中,读者不会接触超过5 V的电压。

电子携带着最小的负电荷量,即使最微小的物质也包含数十亿个电子。大多数材料中,电子被牢牢地束缚在带正电荷的质子周围。在绝缘体中,电子不能在原子中自由移动。在另外一些材料(如金属)中,电子可以随意地从一个原子移动到另一个原子,这样的材料称为导体。电子在导体中的移动称为电流,以安培为单位。如果给导体接上电源,电子会从电源负极穿过导体,移至正极。所有的材料,即使是导体,都会对电流的流动产生电阻。电阻的大小决定了电流的大小,电阻越大,电流越小。根据定义,导体的电阻非常小,所以导体不能直接与电源两端相连,因为这样会产生巨大的电流,从而损坏电源或导体本身。通常用电阻器与导体串联来限制电路中电流的大小。

大约在1825年,Georg Ohm通过一系列的实验验证了电压、电流和电阻间的基本关系:电压(V)等于电流(I)乘以电阻(R),即 $V=I \cdot R$ 。这个电学中最基本的方程表明,当三个量中的任意两个量已知时,就可以求出第3个量。

电阻以欧姆为单位,符号为 Ω 。根据欧姆定律,1 V的电压加在1 Ω 的电阻上将会产生1 A的电流(1 s内电阻中将通过1 C的电荷)。同样,3.3 V的电压加在3.3 Ω 的电阻上将会产生1 A的电流。在图1.1所示的电路图中,与电源正极和负极两端连接的是导体,其电阻可以忽略不计。这样,电源电压加在电阻两端——电阻左端3.3 V,右端为地

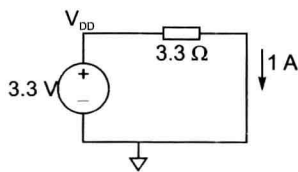


图 1.1 欧姆定律举例

(GND)。当电流通过电阻时,流经电源和电阻材料上的电子会发生碰撞,这些碰撞导致电子失去它们的势能并且这些失去的势能以热能的形式损耗掉。就像在一些物理系统中定义能量对时间的导数为功率一样,在电路中,功率以瓦特为单位(符号为W),定义为电压乘以电流,

或 $P=V \cdot I$ 。在任意给定的时间内,传送到电阻上的功率会使电阻发热。电阻传输的功率越大,它发热就越多。对给定的电压,阻值小的电阻通过较大的电流(参见欧姆定律),因此也会有较多的能量以热量的形式损耗(电阻将会发热)。电路中总共损耗的能量为功率对时间的积分,单位为 $\text{W} \cdot \text{s}$,或称为 J 。这样,在如图 1.1 所示的电路中,功率为 $P=3.3 \text{ V} \times 1 \text{ A}$,即 3.3 W ,每秒 $3.3 \text{ J}(3.3 \text{ W} \times 1 \text{ s})$ 的能量散发掉了。

1.2.1 电气与电子电路

相互连接以实现特定功能的电子元件的集合通常称之为电路。电路一词的来源是因为电能必须从电源的正极流出,通过一个或多个电子器件并最后返回到电源的负极,从而形成了电路。如果电子器件和电源正极或负极间的连接断开,电路将被破坏,器件将不能工作。

现代电路中还有许多不同类型的电子元件和设备,包括电阻、电容、电感、半导体元件(如二极管、三极管、集成电路等)、传感器(包括麦克风、光敏元件和运动传感器等)、执行器(如电动机、电磁线圈)以及各种其他电子器件如发热、发光器件。电路中的元器件通过导体或电线相连。这些导线能输送电流到电路中不同的地方。一条连线一旦连接两个或更多的元件,它和所有这些附加的元件连接器形成一个单独的电路节点或网络。对于给定的网络,其上面的任何电气行为都能够将信息传输到与之相连网络上的所有器件。有些网络给器件提供电力,另外一些网络在器件间传递信息。网络所传递的信息称为信号,且信号在电路中传递编码为电平的信息。信号网络用的导体越小,传输的电流越小。传递能量的网络称为电网(或简称为电源),它在电路中传递电功率。电力网络中的导体通常比信号网络中的大,因为它们要传输较大的电流。

电气电路用电功率实现某些功能,如使元件发热或发光、使电动机运转或产生电磁场。电子电路不同于电气电路。因为在电子电路中,使用的器件可以用其他电信号来控制。也就是说,电子电路由一些用电流去控制电流的器件组成。大多数电子电路使用 $5 \sim 10 \text{ V}$ 的电压;过去几年,电路中的信号都在 $3 \sim 5 \text{ V}$ 之间。某些电子电路可以用连续电平来表示编码的信息,该电平在电源高、低电平之间是连续的——这样的电路被称为模拟电路。例如,语音电平变换器(也就是麦克风)可以将声音的压力按一定比例转换为 $0 \sim 3 \text{ V}$ 的电信号。这样的话,如果声波本身是连续的,那么麦克风输出的电平信号也是连续的。其他电路只使用两种离散的电平来表达信息。通常,这两种电平由相同电压的电源提供。这种电路被称作数字电路,所有信息必须以二进制数码表示, 0 V (或地电平)表示一种信息, 3.3 V 表示另一种信息(哪怕电源提供的电压更高)。本书只讨论数字电路。

第1章 电子电路简介

1.2.2 实际电路和模型电路

实际电路由真实的物理元件组成。可以对它们进行检查、测试和改进。它们在通电时消耗功率,可以实现某些功能并做一些有意义的事情;当然,它们也会发生故障,会对人们的健康和财产带来严重威胁。即使是可以快速简单构造出的小型电路也需要时间和金钱去实现,还要花很长时间去完善。

很久以前,工程师们就意识到,在实现即便是最简单的电路之前,表示所有相关施工细节的文档也是不可缺少的。类似于一个建筑的蓝图,电路原理图给出了电路中所有器件以及器件之间连接的信号和电源。在开始搭建实际电路之前,原理图要经过拟定、分析、讨论、重构以及尽可能多的反复论证;而实际的实现工作,需要更多的时间和成本。自从使用计算机后,工程师们很快就意识到,电路原理图可以用计算机程序来描述,而且在电路实际搭建之前可以仿真到任何的精度。的确,电路仿真器是计算机所有应用中最有效、最强大的应用之一。

几乎所有的实际电路,开始都是在计算机上模拟,使用计算机辅助设计(CAD)工具。通过构建基于计算机的电路模型,工程师可以在搭建电路之前快速、简便地研究给定电路的方方面面,从而节省了大量的时间和金钱。但头脑中必须牢记“电路模型不是实际电路”,这一点是很重要的!模型只是模型,是“有条件存在”的,工程师用CAD工具设计的电路模型只是和设想的一样。现代电路模型使用下面两种定义形式之一:原理图(即电路器件与连接线的图形表示)和硬件描述语言(HDL,即基于本文的器件及连接线描述)。这两种形式在后续的章节中都将给予讨论。

1.3 数字电路

一个基本的数字电路由电源、器件以及导电网络共同构成。一部分网络提供来自“外界”的输入;在原理图中,输入网络部分通常都画在器件或整个电路的左边。还有一部分网络是表示通向外界的输出电路;这些输出电路通常画在原理图的右边。在如图1.2所示的原理图示例中,电路器件可以用任意形状来表示,网络用线条表示,输入、输出用连接符号表示。

数字电路需要由电源提供持续、稳定的电能给所有的器件。如上所述,电功率是由带电粒子(如质子和电子)间相互作用产生的电动力驱动的。也就是说,电子之间是相互排斥的,所以哪里的电子越少,所形成的正电场就越能够吸引电子。大量的带电粒子是被束缚在处于电中性状态的原子结构(在原子结构中,有大量电荷数相同的正、负粒子)中。一些导电性材料(如金属)中,电子没有被紧紧地束缚在所属原子中。如果为这些导电材料提供一个电压源,那么电压源负极区域的电子将会很轻松地挣脱束缚后流向电压源的正极。在数字电路中,电源要

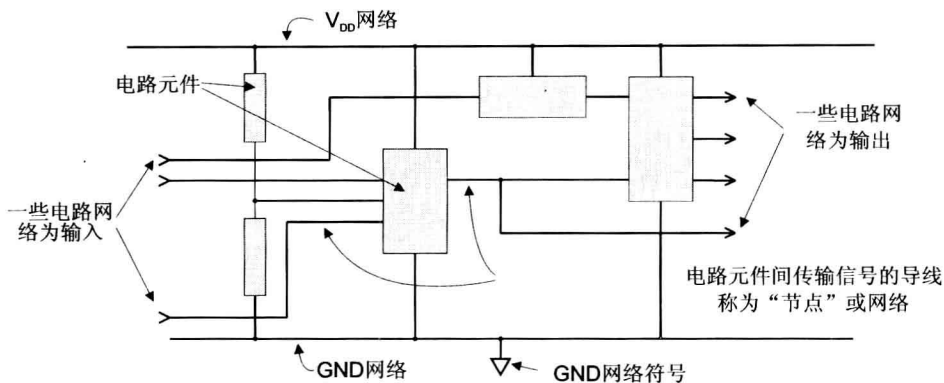


图 1.2 数字电路原理图

提供电压以完成实际的电路功能,如通过导体从一个器件到另一个器件传递信号。数字电路允许从电源负极到电源正极的受控电子流动,但是电流必须要从指定的路径进入电路。当电流流经给定电路中的器件时,能够在多方面改变器件的性能。

在数字电路中,电源电压有两种电平值——“逻辑高电平”(称为 LHV 或是 V_{DD}),和“逻辑低电平”(称为 LLV 或是 GND)。GND(地)节点在任何电路中都是共同的电压参考点,所有的电压都以地节点来衡量(在现代数字电路中,GND 在电路中通常是最小电压)。如图 1.3 所示,在原理图中,一般很难画出连接所有地节点的连线;通用的做法是把所有标有 GND 标号的节点都看作是连接在一起的,而不必画出它们之间的连线。一般在原理图中都会用一个向下的小三角(\downarrow)来代替标号 GND。

V_{DD} (电压)节点在数字电路中通常是最高电压;同样,所有标有 V_{DD} 的节点也都被认为是连接在一起的。 V_{DD} 在电路中可以被认为是“电源”的正端,而 GND 也可以被认为是“电源”的负端。在现代数字系统中, V_{DD} 和 GND 之间又被分为 1~5 V 不等。年代长的、便宜的电路一般使用 5 V 电压,而新近的电路使用 1~3 V 的电压。

在数字电路中, V_{DD} 和 GND 之间的电压不仅给电路器件提供电流,也用来表示信息。

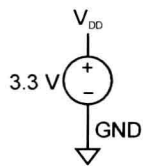


图 1.3 电位示例

0 和 1

在数字电路中,器件与器件之间传送的输入、输出电压被称为信号。在数字电路中,信号电平必须是两种电平中的一种,要么是 V_{DD} ,要么是 GND。所以,数字电路中由信号表示的所有数据都是两种状态中的一种。同时,所有的数据运算都会以二值(two-state)数据输入来产生二值数据输出。使用二值数据的系统就是众所周知的二进制系统,那么二值信号就是二进

制信号。数字电路中电平集合 $\{V_{DD}, GND\}$ 定义的实际信号值可以被抽象地表示为数字符号 $\{1, 0\}$ 。“1”表示 V_{DD} ，“0”表示 GND 。由于数字系统只能表示二进制数据，并且也给出了数字符号“0”和“1”的实际状态和意义，那么就可以用二进制码来表示数据。数字电路中的一条信号线可以传送一个二进制比特(位，缩写为 bit)的信息；而一组信号线可以传送一组二进制比特信息，这样就可以定义一组二进制数。在数字系统中采用比特来表示数据就可以很容易地用已有的逻辑和数字技术来学习数字电路。例如，与逻辑在逻辑上可以描述为：当所有的输入都为“真”时，输出也为真(如当输入 A, B, C, … 都为真时，输出 Y 也为真，如表 1.1 所列)。如果将符号“1”定义为“真”，那么当所有输入为“1”时，与逻辑也会产生“1”。可以用真值表来简单表示，用“1”表示 V_{DD} ，“0”表示 GND 。那么与逻辑真值表就可以定义出一个逻辑电路，在这个电路中，一旦所有输入都为“1”，输出也变为“1”。

一组独立的数字信号可以看作是一组有逻辑关系的信号，并且可以用来定义多位数据单元。类似这样有逻辑关系的一组信号称为总线。由于总线中的每一个信号都可以传送“1”和“0”信息，那么总线就可以传送二进制数据。例如，一个 4 位总线就可以用来表示 4 位二进制数据，那么总线就可以传输从 0 到 15 的十进制数(从 0000 到 1111)。

与数字电路相比，模拟电路信号的电平不是离散的两个电平值，而是 V_{DD} 和 GND 之间的连续值。许多输入设备，尤其是那些使用了电子传感器的设备(如麦克风、照相机、温度计、压力传感器、运动与接近探测器等)，在它们的输出端会产生模拟电压。在现代电子设备中，通常这些信息在使用前，在器件内部先将模拟信号转换为数字信号。例如，一台数字式录音装置就会使用模拟麦克风电路来将声音信号转换为电压信号。一种特殊的电路称为模拟-数字转换器，即 ADC，它将模拟电压转换为离散的二进制码，从而可以在数字电路中以总线方式表示。ADC 的功能是先将输入的模拟信号采样，检测其输入信号的电压值(通常以 GND 为参考)并量化，并且根据其量化得到的值输出相应的二进制信号。一旦模拟信号转换成二进制信号，总线就可以传递该数字信号了。类似地，使用数字-模拟转换器 DAC，数字信号也可以转换为模拟信号。因此，由二进制数表示的声音样本也可以转换为模拟信号，如驱动喇叭发声等。

模拟信号对噪声是很敏感的，而且会随着时间和距离的增加而衰减，但是数字信号对噪声相对不敏感而且衰减很少。这是因为数字信号分别有两个范围较宽的电压带来表示“0”和“1”，任何带宽内的电压都被认为是有效的，如图 1.4 所示。数字信号中有几十至几百毫伏的噪声，但仍能忽略噪声并准确地确定出 0 和 1。如果相同数量的噪声出现在模拟信号中，电路中的信号就会失真。正是因为数字信号有更强的鲁棒性和使用的方便性，世界电子工业正掀起一股“数字化”浪潮。

表 1.1 与门真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

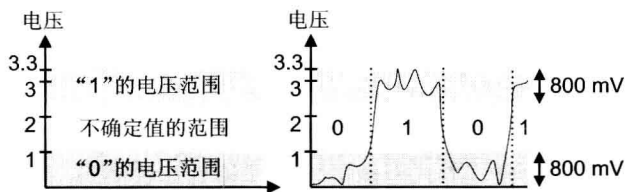


图 1.4 模拟信号与数字信号抗干扰能力比较

1.4 电子元件

1.4.1 电阻

电阻是对电流呈阻碍、抵抗特性的两端元件。根据欧姆定律,在相同电压下,电阻值越大,流经该电阻上的电流值越小。电流经过电阻时,电阻材料内部的电子会相互挤压、排斥、碰撞,而正是这些碰撞产生了电阻的阻抗特性。电阻内的电子碰撞会导致能量以热和光的形式损耗掉(如电烤炉和电灯泡)。电阻的单位是欧姆,1 Ω 的定义是:在 1 V 电压下能够通过 1 A 电流的阻值。电阻符号如图 1.5 所示。

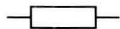


图 1.5 电阻符号

目前各种阻值的电阻都可以买到,从几毫欧到几兆欧。大多数电路中,1 Ω 是阻值很小的电阻,100 k Ω 一般来说相对较大。电阻的物理尺寸和形状可以根据具体需要制定。一般来说,消耗大量热能的电阻器都比较大(如电烤炉),消耗少量电流的电阻器相对都较小(如各种功能的 Digilent 开发板)。电阻消耗的功率可以用公式来计算: $P=I^2R$ (或者 $P=V \cdot I$) 其中 I 为通过电阻的电流, V 是电阻两端的电压, R 是电阻。一个消耗 5 W 功率的电阻,其尺寸大小和写字的笔差不多;而一个消耗 1/8 W 功率的电阻,其尺寸大概只有一颗米粒大。如果电路板中放置的电阻所消耗的功率超过额定功率时,那么它将熔化。

在 Digilent 开发板中使用了各种不同的电阻。其中,一些用来限制 LED 的电流,还有一些用在主要芯片的输入端以限制电流(如按钮和开关电路)和过冲放电(即 ESD,这在后面将详细讨论)。Digilent 开发板所使用的电阻,同大多数数字系统中使用的电阻一样,物理尺寸小,这是由于这些电阻所承受的电压和电流都较小。对于这些小尺寸电阻,电阻上都印有极小的欧姆值,但肉眼是看不到的。

一些年代久远的或低成本的电路板使用“插针”类元件,现被更小型化(更便宜)的“贴片”元器件所替换。插针型电阻一般 5 mm 长、2 mm 宽,典型的以棕色和蓝色为底色,在电阻上还有色环(这些色环按照一定的编码代表着电阻值)。在电路原理图和元器件列表中,电阻一般都以参考标识“R”开头来标记。读者可以看到在 Digilent 开发板丝印层上有一些方形白框标