项目 1　3 人表决器的设计与实现

1.1　项目内容

1.1.1　项目简介

现今社会已然进入数字时代，如互联网＋、物联网、移动互联网、云计算、大数据、人工智能等当下前沿技术均为数字时代的产物。而数字电子技术是数字时代的基础，经过几十年的发展，数字电子技术已经进入人们生活的各个领域，极大地方便了人们的生活。数字电子设备功能比较复杂，其内部通常是由数量不定的电路组成，这些电路人们称为逻辑门电路。

3 人表决器是一个比较简单的数字电路，它所包含的门电路数量较少。通过本项目的训练，同学们能够掌握数字电路中的逻辑关系、逻辑运算和常见门电路的基本特性，并在此基础上完成本项目的 CDIO 4 个环节，为后续项目打好良好基础。

1.1.2　项目目标

项目目标如表 1-1 所示。

表 1-1　项目 1 的项目目标表

序号	类别	目　标
1	知识目标	（1）熟悉数制和码制的概念，掌握常见数制的相互转换，以及几种常用的编码方法； （2）掌握 3 种基本的逻辑关系及其相应的复合逻辑关系； （3）熟悉逻辑代数的基本公式和定律； （4）掌握逻辑函数的表示方法及其相互转换； （5）掌握逻辑函数的化简方法； （6）了解逻辑函数的无关项概念，熟悉含有无关项的化简方法
2	技能目标	（1）能采用 Multisim12 仿真软件进行电路的仿真分析； （2）能正确选择集成电路芯片； （3）能根据逻辑关系设计并实现相应电路； （4）能用万用表、示波器等电子设备对电路进行调试与检测； （5）能完成 3 人表决器的 CDIO 4 个环节
3	素养目标	（1）学生的自主学习能力、沟通能力及团队协作精神； （2）良好的职业道德；

		（3）质量、安全、环保意识

1.2　必备知识

1.2.1　数字电路概述

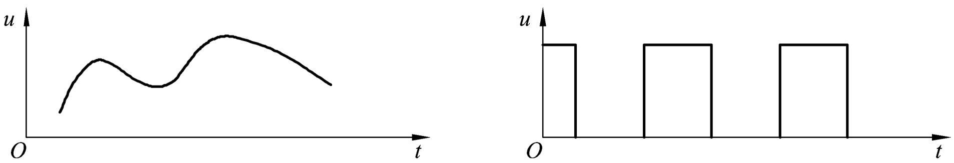
我们生活的这个时代常被称为信息化时代，信息技术已经渗透到人类社会生活的各个领域，互联网＋、物联网、移动互联网、云计算、大数据、人工智能等无时无刻不在改变着我们的生活。实现这些信息技术的设备都是以数字电路为基础的。

1. 数字信号与数字电路

电子电路中的信号可以分为两大类。

一类是时间或幅度都连续的信号，称为模拟信号，如温度、湿度、速度、压力、磁场及电场等物理量通过传感器转换成的电信号、模拟语音音频信号，以及模拟图像的视频信号等。图 1-1（a）所示为模拟信号的波形。对模拟信号进行产生、传输、加工和处理的电子电路称为模拟电路，如放大器、滤波器、功率放大器及信号函数发生器等。

另一类是时间和幅度都离散的信号，称为数字信号。图 1-1（b）所示为数字信号的波形。对数字信号进行产生、传输、加工和处理的电子电路称为数字电路，如裁判表决器、数字抢答器、数字电子钟、数字万用表和数字电子计算机等。



（a）模拟信号的波形　　（b）数字信号的波形

图 1-1　模拟信号和数字信号的波形

在数字电路和模拟电路中，研究的问题和使用的分析方法、设计方法都不相同，因此，将电子技术基础的内容分为数字电子技术和模拟电子技术两部分来学习。

目前在数字电路中普遍采用数字 0 和 1 来表示数字信号，这里的 0 和 1 不是十进制中的数字，而是逻辑 0 和逻辑 1，所以称为二值数字逻辑。在数字电路中，用 1 和 0 分别表示电压的高电平和低电平。如果数字电路中以逻辑 1 表示高电平，逻辑 0 表示低电平，称之为正逻辑体制；如果以逻辑 0 表示高电平、逻辑 1 表示低电平，称之为负逻辑体制。目前，在数字逻辑电路中习惯采用正逻辑体制。如无特殊说明，本书一律采用正逻辑体制。

表 1-2 列出了在正逻辑体制下，逻辑电平和数字电压值之间的对应关系。

表 1-2　逻辑电平和数字电压值之间的对应关系

电压/V	二值数字逻辑	电平

5	1	H（高电平）
0	0	L（低电平）

在工程实践中，电路描述一般采用正逻辑体制，负逻辑体制用得较少。如果需要，可按以下方式进行两种逻辑体制的转换：

与 ↔ 或

非 ↔ 非

与非 ↔ 或非

二值数字逻辑的产生，是基于客观世界的许多事物可以用彼此关联又互相对立的两种状态来表示。例如：事件的真与假、开关的通与断、电压的高与低、电流的有与无等。数字电路可利用电子元器件的开关特性来实现状态转换。电路中的半导体器件（如二极管、三极管等）可以处于开或关状态，有时导通，有时截止。

2. 数字电路的分类和特点

1）数字电路的分类

最基本的数字电路由二极管、三极管和电阻等元器件组成，实际应用中已经很少见到这样简单的电路。现在的数字电路一般是由集成电路组成。数字电路的种类繁多，其分类方式也较多，大致可以从以下 4 方面进行分类。

（1）按照集成电路芯片的集成度可以分为小规模（SSI，每片数十器件）、中规模（MSI，每片数百器件）、大规模（LSI，每片数千器件）、超大规模（VLSI，每片数十万器件）和特大规模（ULSI，每片器件数大于 100 万）数字电路。所谓集成度，是指每一块数字集成芯片所包含三极管的个数。

（2）按照所用器件制作工艺的不同，可以将数字电路分为双极性（TTL 型）和单极性（CMOS 型）两类。双极性电路开关速度快，频率高，信号传输延迟时间短，但制造工艺较复杂。单极性电路输入阻抗高、功耗小、工艺简单、集成密度高，且易于大规模集成。

（3）按照电路的结构和工作原理的不同，可以将数字电路分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两类。组合逻辑电路没有记忆功能，其输出信号只与当时的输入信号有关，而与电路以前的状态无关，如加法器、编码器、译码器、数据选择器等都是典型的组合逻辑电路。时序逻辑电路具有记忆功能，其输出信号不仅与当时的输入信号有关，而且还与电路以前的状态有关，如触发器、计数器、存储器、顺序脉冲发生器等都是典型的时序逻辑电路。组合逻辑电路和时序逻辑电路常常结合起来使用，用以实现控制、操作和运算各种数字系统和数字设备。

（4）按照电路的应用不同，可以将数字电路分为专用型和通用型两类。专用型数字电路是指为每种特殊用途专门设计、制造的，具有特定复杂而完整功能的产品。典型的专用型数字电路如计算机中存储器芯片（RAM、ROM）、微处理器芯片（CPU）及语音芯片等。

通用型数字电路又分为两种类型：一种是逻辑功能被定型的标准化、系列化的产品；另一种是可编程逻辑器件（Programmable Logic Device，PLD）。前一种类型的电路中，每一种器件的内部结构和逻辑功能在制造时已经固化，不能改变。目前常见的中、小规模数字集成

电路大多属于这一种。利用这些产品可以组成更为复杂的数字系统，但当系统变得复杂以后，电路的体积将会很庞大，而且由于器件之间的连线增多，降低了电路的可靠性。所以希望能找到一种既具有像专用电路那样体积小、可靠性高、能满足各种专门用途，同时又可以作为电子产品生产的数字电路，于是 PLD 便应运而生。

PLD 的内部包含了大量的基本逻辑单元电路，通过写入编程数据，可以将这些单元连接成所需要的逻辑电路。所以，它的产品是通用型的，而它所实现的逻辑功能则可由用户根据自己的需要通过编程来设定。20 世纪 90 年代，PLD 得到了迅速的发展和普及，目前在一片高密度 PLD 上可以集成数十万个基本逻辑单元，足够连接成一个相当复杂的数字电路，形成所谓的“片上系统”。

2）数字电路的特点

数字电路的工作信号是离散的二值数字信号，反映在电路上只有电流的有无或电平的高低两种状态，因此，它在结构、工作状态、研究内容和分析方法等方面都与模拟电路不同。数字电路具有下面 6 个方面的特点。

(1) 结构简单，便于集成化、系列化生产，成本低廉，使用方便。

电子器件（如二极管、三极管）的导通和截止两种稳定状态的外部表现为电流的有无或电平的高低，所以数字电路在稳态时，电子器件处于开关状态，即工作在饱和区和截止区。这种有和无、高和低相对立的两种稳定状态，可以用二进制数的两个数码 1 和 0 来表示。这里的 1 和 0 没有任何数量的含义，只表示两种不同的状态，所以在数字电路的基本单元电路中，对器件的精度要求不高，允许有较大的误差，电路在工作时只要能可靠地区分开 1 和 0 两种状态就可以了。相应地，组成数字电路的单元结构也比较简单，具有便于集成化和系列化生产、工作准确可靠、精度高、成本低廉、使用方便等优点。

(2) 抗干扰能力强，可靠性高，精度高。

由于数字电路传输、加工和处理的都是二值数字信号，不易受到外界的干扰，电路的抗干扰能力较强，可靠性较高。数字电路还可以用增加二值信号的位数来提高电路的运算精度。

(3) 便于长期存储，使用方便。

二值数字信号具有便于长期存储的特点，使大量的信息资源得以妥善保存，并且容易调出，使用方便。

(4) 保密性好。

在数字电路中可以很容易地进行保密处理，使宝贵的信息资源不易被窃取。

(5) 通用性强。

在数字电路中，可以采用标准的数字逻辑器件和可编程逻辑器件（PLD）来设计各种各样的数字系统，应用起来相当灵活。

(6) 具有“逻辑思维”能力。

数字电路能对输入的数字信号进行各种算术运算和逻辑运算、逻辑判断，故又称为数字逻辑电路。

由于数字电路具有以上优点，加之集成电路工艺技术的迅速发展，使数字电路在计算机、通信系统、仪器仪表、数控技术、家电，以及国民经济的各个领域都得到了广泛的应用。

3. 数字电路的学习方法

（1）逻辑代数是分析和设计数字电路的工具，熟练掌握和运用好这一工具才能使学习顺利进行。

（2）应当重点掌握各种常用数字逻辑电路的逻辑功能、外部特性及典型应用。对其内部电路结构和工作原理的学习，主要是为了加强对数字逻辑电路外部特性和逻辑功能的正确理解，不必过于深究。

（3）数字电路的种类虽然繁多，但只要掌握基本的分析方法，便能得心应手地分析各种逻辑电路。

（4）数字电路技术是一门实践性很强的技术基础课。学习时必须重视习题、基础实训和综合实训等实践性环节。

（5）数字电子技术发展十分迅速，数字电路的种类和型号越来越多，应逐渐提高查阅有关技术资料和数字电路产品手册的能力，以便从中获得更多更新的知识和信息。

1.2.2　数制与码制

作为数字电路的基础，数制与码制的概念在整个数字系统中起着非常重要的作用，要学会在实际应用中运用数制和码制。

1. 数　制

数字系统中经常遇到计数问题，计数的方法——数制，多种多样。在生产实践中，人们经常采用位置计数法，即将表示数字的数码从左到右排列起来，常用的数制有十进制、二进制、八进制、十六进制等。

1）十进制

十进制是用 10 个不同的数码 0、1、2、3、…、9 来表示数值的，其计数规律是“逢十进一”，即 9＋1＝10，采用的是以 10 为基数的计数体制。一种数制中允许使用的数码个数称为该数制的基数。该数制的数中，不同位置上数码的单位数值称为该数制的位权或权。基数和权是数制的两个要素。任何一个十进制数都可以写成以 10 为底的幂之和的形式，即

$$(N)_{10}=\sum_{i=-m}^{n-1}K_i\times 10^i \tag{1-1}$$

式中，m——小数部分的位数，为整数；

n——整数部分的位数，为整数；

K_i——第 i 位的系数，它是数码中的任一个；

10——计数基数；

10^i——第 i 位的权。

i——数字中各数码 K 的位置号，为正负整数。

小数点前第 1 位为 $i=0$，第 2 位为 $i=1$，依此类推。小数点后第 1 位为 $i=-1$，第 2 位为 $i=-2$，依此类推。式（1-1）称为按权展开式。

例如：$(258.32)_{10}=2\times10^{2}+5\times10^{1}+8\times10^{0}+3\times10^{-1}+2\times10^{-2}$

2）二进制

二进制的数码为 0 和 1，基数为 2，其计数规律是“逢二进一”，即 1＋1＝10（必须注意，这里的“10”与十进制数的“10”是完全不同的概念）。任何一个二进制数 N 按权展开式为

$$(N)_2=\sum_{i=-m}^{n}K_i\times2^{i} \tag{1-2}$$

利用式（1-2）展开得到的结果为十进制数，也即任何一个二进制数都可以按照式（1-2）转换为十进制数。

3）八进制

八进制的数码为 0、1、2、3、4、5、6、7，基数为 8，其计数规律是“逢八进一”。任何一个八进制数 N 按权展开式为

$$(N)_8=\sum_{i=-m}^{n}K_i\times8^{i} \tag{1-3}$$

利用式（1-3）展开得到的结果为十进制数，也即任何一个八进制数都可以按照式（1-3）转换为十进制数。

4）十六进制

十六进制的基数为 16，采用的 16 个数码为 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F，其中字母 A、B、C、D、E、F 分别代表 10、11、12、13、14、15，其计数规律是为“逢十六进一”。任何一个十六进制数 N 按权展开式为

$$(N)_{16}=\sum_{i=-m}^{n}K_i\times16^{i} \tag{1-4}$$

利用式（1-4）展开得到的结果为十进制数，也即任何一个十六进制数都可以按照式（1-4）转换为十进制数。

2. 不同数制之间的转换

1）任意进制转换成十进制数

根据前面的介绍，二进制、八进制和十六进制数分别按照式（1-2）、式（1-3）、式（1-4）展开，就能转换成十进制数。也即将非十进制数写为按权展开式，得出其相加的结果，就是

与其对应的十进制数。

2）十进制数转换为二进制数

十进制数转换为二进制数的方法中，整数转换和小数转换是不同的。

整数部分可用“降幂比较法”和“除 2 取余法”。所谓“降幂比较法”，即首先列出所有小于这个数的二进制位的权值（见表 1-3），然后用要转换的十进制数减去与它最近的二进制权值，够减就在相应位置写 1，不够减就写 0；得出的差值重复上述过程，直到差值为 0。所谓“除 2 取余法”，即将原十进制数连续除以 2，每次所得余数作为二进制数的数码，先得到的余数作为二进制数的低位，后得到的为高位，直到除得的余数为 0 为止。这种方法可概括为“除 2 取余，倒序排列”。

表 1-3　二进制位的权值与十进制数对应表

二进制权值	2^0	2^1	2^2	2^3	2^4	2^5	2^6	2^7	2^8	2^9	2^{10}	……
十进制数	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	……

小数部分可用“乘 2 取整法”，即将原十进制数连续乘以 2，每次所得整数作为二进制数的数码，先得到的整数作为二进制数的高位，后得到的为低位，这种方法可概括为“乘 2 取整，顺序排列”。

【例 1-1】 将十进制数（217.3125）$_{10}$ 转换为二进制。

解：

1）整数部分

（1）采用“降幂比较法”。

$217-128=89$　　　　$128=2^7$；

$89-64=25$　　　　$64=2^6$；

$25-16=9$　　　　$16=2^4$；

$9-8=1$　　　　$8=2^3$；

$1-1=0$　　　　$1=2^0$。

即：$(217)_{10}=(11011001)_2$

（2）采用“除 2 取余法”

2 | 217 …………余1　b_0
2 | 108 …………余0　b_1
2 | 54 …………余0　b_2
2 | 27 …………余1　b_3
2 | 13 …………余1　b_4
2 | 6 …………余0　b_5
2 | 3 …………余1　b_6
2 | 1 …………余1　b_7
0

2）小数部分

$0.3125 \times 2 = 0.625$ .... 整数为0 b_{-1}

$0.625 \times 2 = 1.25$ .... 整数为1 b_{-2}

$0.25 \times 2 = 0.5$ .... 整数为0 b_{-3}

$0.5 \times 2 = 1.0$ .... 整数为1 b_{-4}

即：$(217.3125)_{10} = (11011001.0101)_2$

3）二进制与八进制、十六进制之间的相互转换

（1）二进制数与八进制数之间的相互转换。

二进制数转换为八进制数的方法是：以小数点为界，将二进制数的整数部分从低位开始，小数部分从高位开始，每 3 位分成一组，头尾不足 3 位的补 0，然后将每组的 3 位二进制数转换为 1 位八进制数。

八进制数转换为二进制数的方法是：将每位八进制数写成对应的 3 位二进制数，再按照原来的顺序排列就行了。

【例 1-2】 将 $(11110100010.10110)_2$ 转换成八进制数。

解：

$$\begin{array}{cccccccccccc} 011 & 110 & 100 & 010 & . & 101 & 100 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & \downarrow \\ 3 & 6 & 4 & 2 & . & 5 & 4 \end{array}$$

即：$(11110100010.10110)_2 = (3642.54)_8$

【例 1-3】 将 $(364.52)_8$ 转换成二进制数。

解：

$$\begin{array}{cccccc} 3 & 6 & 4 & . & 5 & 2 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & \downarrow \\ 011 & 110 & 100 & . & 101 & 010 \end{array}$$

即：$(364.52)_8 = (011110100.101010)_2$

（2）二进制数与十六进制数之间的相互转换。

二进制数转换为十六进制数的方法是：以小数点为界，将二进制数的整数部分从低位开始，小数部分从高位开始，每 4 位分成一组，头尾不足 4 位的补 0，然后将每组的 4 位二进制数转换为 1 位十六进制数。

【例 1-4】 将 $(11110100010.11101)_2$ 转换成十六进制数。

解：

$$\begin{array}{cccccc} 0111 & 1010 & 0010 & . & 1110 & 1000 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & \downarrow \\ 7 & A & 2 & . & E & 8 \end{array}$$

即：$(11110100010.11101)_2 = (7A2.E8)_{16}$

十六进制数转换为二进制数的方法是：将每位十六进制数写成对应的 4 位二进制数，再按照原来的顺序排列就行了。

【例 1-5】 将 $(89D.5B)_{16}$ 转换成二进制数。

解：

$$\begin{array}{ccccccc} 8 & 9 & D & . & 5 & B \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & \downarrow \\ 1000 & 1001 & 1101 & . & 0101 & 1011 \end{array}$$

即：$(89D.5B)_{16}=(100010011101.01011011)_2$

十进制数、二进制数、八进制数和十六进制数之间的对应关系如表 1-4 所示。

表 1-4　进制数之间的对应关系

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
0	0000	0	0
1	0001	1	1
2	0010	2	2
3	0011	3	3
4	0100	4	4
5	0101	5	5
6	0110	6	6
7	0111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F

3. 码　制

在数字系统中，由 0 和 1 组成的二进制数不仅可以表示数值的大小，还可以表示特定的信息。用二进制数表示一些具体特定含义信息的方法称为编码，用不同表示形式可以得到多种不同的编码，这就是码制。例如：用 4 位二进制位数表示 1 位十进制数，称为二-十进制代码，即 BCD 码。常用的编码有二-十进制 BCD 码、格雷码和 ASCII 码等。

1）二-十进制 BCD 码

用 4 位二进制位数表示 0～9 这 10 个数字。4 位二进制代码有 $2^4=16$ 种组合状态，从中取出十种组合表示 0～9 这 10 个数字可以有多种方式，因此十进制代码有多种。常用的 BCD 码有 8421 码、2421 码、5421 码和余 3 码等。

（1）8421 码。

在 8421 码中，10 个十进制数码与 4 位自然二进制数一一对应，即用二进制数的 0000～

1001 表示十进制数 0～9。1010～1111 等 6 种状态是不用的，称为禁用码。8421 码是一种有权码，各位的权从左到右依次为 8、4、2、1，故称为 8421 码。

8421BCD 码是一种最基本的 BCD 码，应用较普遍。8421 码与十进制数之间的转换只要直接按位转换即可。

例如：$(1985)_{10}$＝$(0001\ 1001\ 1000\ 0101)_{8421BCD}$。

（2）2421 码和 5421 码。

2421 码、5421 码和 8421 码一样，都是有权码。2421 码和 5421 码各位的权从左到右依次为 2、4、2、1 和 5、4、2、1，则与每一代码等值的十进制数就是它表示的十进制数。

例如：$(1985)_{10}$＝$(0001\ 1111\ 1110\ 1011)_{2421BCD}$＝$(0001\ 1100\ 1011\ 1000)_{5421BCD}$

（3）余 3 码。

余 3 码是一种无权码，即每一位没有固定的权相对应。如果将每个代码视为 4 位二进制数，且从左到右每位依次为 8、4、2、1，则等值的十进制数比它所表示的十进制数多 3，故称为余 3 码。

例如：$(1985)_{10}$＝$(0100\ 1100\ 1011\ 1000)_{余3码}$。

2）格雷码

格雷码又称为循环码，这是在检测和控制系统中常用的一种代码。它的特点是：相邻两个代码之间仅有一位不同，其余各位均相同。计数电路按格雷码计数时，每次状态仅仅变化一位代码，减少了出错的可能性。格雷码属于无权码，它有多种代码形式，其中最常用的一种是循环码。

常用的 BCD 码和格雷码的编码形式如表 1-5 所示。

表 1-5　常用 BCD 码和格雷码的编码形式

十进制数	BCD 码				格雷码
	8421 码	2421 码	5421 码	余 3 码	
0	0000	0000	0000	0011	0000
1	0001	0001	0001	0100	0001
2	0010	0010	0010	0101	0011
3	0011	0011	0011	0110	0010
4	0100	0100	0100	0111	0110
5	0101	1011	1000	1000	0111
6	0110	1100	1001	1001	0101
7	0111	1101	1010	1010	0100
8	1000	1110	1011	1011	1100
9	1001	1111	1100	1100	1101