KAIGUAN
DIANLU
YUANLI

开关电路原理

[美] 弗雷德里克·H·爱德华兹 著

王尉亢 王占宁 徐惠民 易章智 译

开 关 电 路 原 理

【美】 弗雷德里克 H. 爱德华兹 著
王蔚亢 王占宁 徐惠民 易章智 译

人 民 邮 电 出 版 社

Dt57/17

The Principles of Switching Circuits

(美)*Frederick H.Edwards* 著

(1978)

内 容 提 要

本书比较详细地论述了开关电路原理。全书共分九章。第一章介绍数字系统、各种数制和二进制代码；第二至四章介绍组合电路理论，内容包括开关代数、组合电路的分析和综合方法，以及最简化方法，第五至九章介绍时序电路理论，内容包括时序电路分析、按基本方式及脉冲方式工作的时序电路的综合、钟控时序电路，以及时序电路最简化。

本书可供大专院校有关专业作为教学参考书，也可供从事数字电路技术的工程技术人员参考。

开关电路原理

〔美〕弗雷德里克 H. 爱德华兹 著
王蔚亢 王占宇 徐惠民 易章智译

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1982年8月 第一版
印张：10 28/32页数：174 1982年8月河北第一次印刷
字数：247 千字 印数：1—17,000 册
统一书号：15045·总2586-无6184
定 价：1.20元

前　言

本书是作者1960年以来开设开关电路课程的总结。撰写这个课程的讲稿，是打算对时序电路理论提供一个统一的分析论述。

作者力图把那些目前已经通用且将来也持续有用的技术包括在本书中。由于技术和工艺不断发展，使得一些专门的设备很快淘汰，因而不打算把用目前流行的设备所实现的电路包括在内。在电路实现上只使用门的符号来表示。

全书共分九章，即引言一章，组合电路理论三章，时序电路理论五章。

第一章介绍数字系统、各种数制和二进制代码。布尔代数、开关函数以及用代数方法对布尔表达式进行变换和化简，都在第二章介绍。

第三章概述了组合电路的分析和综合方法，也讨论了功能完备性的问题，并较仔细地研究了阈值逻辑。在第四章中介绍了代数表达式的图形简化法和列表简化法。这些方法仅限于两级逻辑电路，因为多级逻辑电路实现的一般方法并非总是普遍有效的。

在介绍关于时序电路的内容时，基本目标是统一考虑时序电路的各种工作方式，并提供分析和综合这些电路的一般方法。作者认为，把电路的工作划分为基本方式或脉冲方式，以及钟控型或非钟控型，就能最好地达到前一个目的。给出了分析和综合这些电路的两种方法——代数法和列表法。

各种时序课题是按照合乎逻辑的次序来叙述的。由于读者在学习组合电路理论时已经熟悉了处于某种状态的时间不受限制的输入信号，自然首先应该研究工作在基本方式的时序电路。另外，由于读者到这时只研究了各种门电路，看来首先应该处理仅仅用门电路来实现的时序电路：其中的记忆作用是通过反馈来取得的。然后再把这种理论推广到采用专门的记忆元件（它们本身就是带反馈的门电路）的电路中去。

着重强调了一种通用方法，使得不论时序电路设计成按基本方式工作还是按脉冲方式工作，也不论是钟控的还是非钟控的，都可以或者只用门电路（附加一定延迟）来实现，或者用门电路和记忆元件的组合来实现。

在第五章中首先研究了时序电路的分析方法。虽然介绍的那些方法是直接用于按基本方式工作的电路，但它们也能应用于按脉冲方式工作的电路。差别仅在于对最后所得的表有不同的解释。对代数法和列表法都作了介绍。

第六章讲的是怎样综合按基本方式工作的时序电路。由于对这类电路来说，流通表的特征是在导出时带有冗余行，希望在具体实现之前先将它们化简。为此，介绍了一种简单的流通表简化方法。静态冒险和实质冒险也在这一章中讨论。

第七章介绍按脉冲方式工作的时序电路的综合方法。对基本方式工作的流通表作些修改，就能得到这种工作方式的流通表。这里主要的目的是要获得一种需要较少记忆状态的电路设计。本章中对时序电路的这两种工作方式作了比较。强调了脉冲方式工作所具有的显著的特征，还介绍了在电路实现中使用触发器时，获得这种特征的几种方法。

第八章介绍时序电路的钟控或称同步工作方式，同样也包括工作在基本方式和脉冲方式的两种电路。对于按每一种工作

方式设计的电路采用了同样的例题，以便突出对它们的比较，例如，这样一比较，设计在脉冲方式工作的电路需要较少记忆元件的特点就非常明显了。代数设计法和列表设计法都作了介绍。

在介绍时序电路理论时仅用到一种触发器，这样更便于对两种方式的时序电路作统一处理。所用到的触发器是RS型的，因为在通用触发器之中，只有这一种触发器可以在两种工作方式下非同步地工作。在第八章介绍了钟控电路之后，也介绍了其他类型的触发器，并在给出的例子中比较了各类触发器输入门的成本，以及成本与下一状态方程形式的关系。

最后介绍了当用控制状态和寄存器转移给出详细说明时，时序电路的实现方法。

第九章研究时序电路的最简化问题。介绍了更通用的流通表简化法，并对状态分配问题作了讨论。

本书的内容基本上可供大学高年级课程一学期之用。经验表明，使用各种开关器件的实验对读者理解数学模型极有帮助。书末还附有部分习题的答案。

弗雷德里克 H.爱德华兹

目　　录

第一章 引 言

开关理论研究用来分析及综合数字电路的模型和方法。在这种电路中，信息的表述采用离散的或数字的形式。这与模拟形式用连续方式来表述信息恰好相反。

如果我们要考虑某闭合区间内一个独立变量 x 的表示方法时，深入地了解信息的模拟表示法与数字表示法之间的基本区别是有好处的。在模拟系统里，此变量将用在一定的数值范围内连续变化的物理量来表示，如电压电平等。在数字系统中，变量 x 的区间被分成有限个子区间，而每个子区间对应于一个该系统可采取的离散**状态**。普通的双掷开关就是一个数字电路元件的例子，开关的位置可取两个状态之一——不是断开就是接通。n 个这类开关接在一起构成的系统可以给出总共 2^n 个不同的状态。

在学习开关理论之前，最好先来简要地看一看数字电路应用的某些领域，及某些以后证明有用的知识。

数字技术的应用在人们致力的广阔领域内正在迅速发展，并且应用范围很可能继续扩展。最大规模和最为壮观的数字系统之一就是拨号电话系统。其中大量的判决在不断地进行着，而且是整天每时每刻地在进行：确定呼叫终点，有效的相互接续，呼叫处理诸如送回忙音信号、接通、计费和提供系统发生故障的告警信号。然而，象过去那样，正是使用了数据处理机械才激起人们研究和应用数字技术的极大兴趣。也许人们要问一个问题：为什么要数字化呢？

回答是这样的，数据处理技术提供可靠的、准确的译释和高速的数据处理。一个重要的结果是一项活动在实际进程中的实时判断能力，不管它是某些工业生产过程，还是宇宙飞船在飞行中。数据处理的精度来自于无误差的数据译释和变换。以数字形式表示数据，要求把随时间变化的数据量化，量化一般地是由指定一个量化电平值来实现的，这个值最接近于被量化函数在定时源或钟信号确定的瞬间的大小。如果数据以二值形式量化，数据译释误差的可能性最小，因为只需要去区别两个极端的数值。一旦数据是用二值的形式表示，它们就可以在没有复合误差的情况下处理，复合误差常出现在非量化的数据系统里（例如由校正误差造成的那些误差）。对二值数据做的一组运算不管重复多少次，最终结果总是相同的。这是一个重要的因素，例如，在商用数据的处理中，要求结果不是在一定的误差容限之内，而是精确的数字。

随着数字器件不断改进，在选择数字系统时可靠性起着重要的作用。现用的空间计划为我们提供了例子：空间通信的可靠性是必须保证的，在这里飞行持续时间是以月或年来计算，而控制系统的可靠性必须保证人类飞行的安全。后者的实例，是在阿波罗指挥舱和登月舱飞行控制系统中用数据处理链接控制环。这类系统需要各种各样的工作模式，例如校正模式、点火模式、备用模式、导频控制模式等等。模拟系统里，模式的转换涉及到连接方式的改变，致使成本提高和可靠性降低，然而在数字系统中，模式转换是通过转移到另一个贮存程序来完成的。在后一种情况下，固定贮存器的高度可靠性不会降低系统的可靠性（*Miller* 1966）。

信息的数字处理要求对信息进行数字编码。为此，在这一章中，包括了数制的基本特性的一般介绍及二进数制的详细介

绍。因为在一些应用中，每一组数据的计算量并不大而数据组的数量却很大，所以要简化的是输入和输出的数据而不是计算的本身。实现上述要求靠每位十进制数的二进制编码，而不是把十进制数转换成等值的二进制数；因此还要讨论二——十进制数。最后，由于模——数转换在许多数字系统应用中是不可少的，循环码的讨论也包括在本章中。

1.1 数的表示法

一种数的表示方法是利用位置记数法。位置记数法的概念实际上早已应用在古代的运算装置（例如算盘）中，但是直到数百年后才被充分理解。在这种记数法中，数符的值不仅决定于符号本身，而且还和它所处的位置有关。这种记数法的优点是当所记的数逐渐增大时，不需要再创造新的符号。然而罗马数制不使用位置记数法。在这种数制中，大数必须用已给的符号重复多次来表示。这是麻烦的，但是，这种数制在进行算术运算时具有简单的优点—做加法或减法时，不需要记住加法表，也不牵涉到进位和借位。在*Cardner*(1968）写的书中介绍了人类所用过的各种数制。

在我们熟悉的十进制数中，我们往往忘记了数字具有位置的特征。如果我们把数$(371.625)_{10}$表示为以10为幂的多项式时，

$$(371.625)_{10}=3\times10^{2}+7\times10^{1}+1\times10^{0}+6\times10^{-1}+2\times10^{-2}+5\times10^{-3}$$

那么，我们就看到每一个数字的位置都有它相应的**权**，例如，数字 3 的位置有权10^{2}、确定权值的数10称为数制的**基数**或**底**。

在位置记数法中，10以外的数也能用来确定权。一般情况

下，在基数为 r 的位置计数制中，一个数(N)表示为：

$$(N)_r=(b_ib_{i-1}\cdots b_0.b_{-1}\cdots b_{-j})_r,$$

其中 r 是大于 1 的整数，b_i 也是一个整数，它的值满足下列关系 $0\leqslant b_i\leqslant r-1$。符号“·”称为**小数点**。上面这组并列的符号是下面这个多项式的简略记法：

$$(N)_r=(b_ir^i+b_{i-1}r^{i-1}+\cdots+b_0r^0+b_{-1}r^{-1}+\cdots+b_{-j}r^{-j})_r$$

表 1.1 与十进制数等值的二进制数和八进制数

十进制	八进制	二进制
0	00	0000
1	01	0001
2	02	0010
3	03	0011
4	04	0100
5	05	0101
6	06	0110
7	07	0111
8	10	1000
9	11	1001

计算机常用的两种数制是八进制和二进制。八进计数制有 0 到 7 八种符号，而二进计数制只有 0 和 1 两种符号。表 1.1列出了十进制数的八进制和二进制表示法。

十进制数$(371.625)_{10}$在八进制中表示为$(563.5)_8$，在二进制中表示为$(101110011.101)_2$。

1.2 数制转换

经常要求能够从一种数制转换成另一种数制。这种转换能通过下述方法实现：首先将数用已给数制的多项式表示出来，然后再用要求数制的算术运算规则求出这个多项式的值。例如，与八进制数563.5等值的十进制数是用下面求和的方法得到的：

$$\begin{aligned}(N)_{10}&=5\times8^2+6\times8^1+3\times8^0+5\times8^{-1}\\&=320+48+3+0.625\\&=(371.625)_{10}\end{aligned}$$

而与二进制数101110011.101等值的十进制数为

$$
\begin{aligned}
(N)_{10} &= 1\times 2^{8}+0\times 2^{7}+1\times 2^{6}+1\times 2^{5}+1\times 2^{4}+0\times 2^{3}\\
&\quad +0\times 2^{2}+1\times 2^{1}+1\times 2^{0}+1\times 2^{-1}+0\times 2^{-2}\\
&\quad +1\times 2^{-3}\\
&= 256+64+32+16+2+1+0.5+0.125\\
&= (371.625)_{10}
\end{aligned}
$$

数制的转换也能通过用要求数制的基数连乘和连除的迭代法来得到。这些运算是在原来给出的数制中完成的，整数部分和小数部分分别求得。由十进制转换为其他数制最好地说明了上述过程。我们首先考虑整数部分。

将原十进制数的整数部分反复除以新数制的基数，就能求得该数在新数制中表达式的整数部分；每次除后所得的余数构成了新的数字。例如，十进制数371这样地转换成等值的八进制数：

$$
\left.
\begin{array}{ll}
371\div 8=46 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 3\\
46\div 8=5 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 6\\
5\div 8=0 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 5
\end{array}
\right\} \rightarrow (563)_8
$$

余数构成了按 8 的幂次增加的系数；系数 3 表示有 3 个“1”（8^0），系数 6 表示有 6 个“8”（8^1），等等。把十进制数 $(371)_{10}$转换为等值二进数的过程如下所述：

$$
\left.
\begin{array}{ll}
371\div 2=185 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 1\\
185\div 2=92 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 1\\
92\div 2=46 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 0\\
46\div 2=23 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 0\\
23\div 2=11 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 1\\
11\div 2=5 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 1\\
5\div 2=2 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 1\\
2\div 2=1 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 0\\
1\div 2=0 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余\ 1
\end{array}
\right\} \rightarrow (101110011)_2
$$

将十进制数的小数部分反复乘以新的基数，就可得到新数

制中等值数的小数部分。每次相乘后所得的整数值($0\leqslant b_0\leqslant r-1$)按照逐位递减的次序构成这个新数位。每次相乘后得到的整数部分在以后的乘法中不再予以考虑。于是$(0.625)_{10}$转换为等值的八进制和二进制数如下：

$$(.5)_8 \leftarrow \begin{array}{r} 0.625\\ \times\quad 8\\ \hline 5.000 \end{array} \qquad\qquad (.101)_2 \leftarrow \begin{array}{r} 0.625\\ \times\quad 2\\ \hline 1.250\\ \times\quad 2\\ \hline 0.500\\ \times\quad 2\\ \hline 1.000 \end{array}$$

应当注意，一个数制中的有限位小数并不总是可能恰好转换为另一个数制中的有限位小数。

举一个用非十进制运算实现数制转换例子，把八进制数757用八进制运算转换成等值的十进制表示：

$$\begin{array}{ll} 757\div 12=61 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余5\\ 61\div 12=4 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余11\\ 4\div 12=0 \cdots\cdots\cdots\cdots & 余4 \end{array} \rightarrow (495)_{10}$$

如果我们要避免在不熟悉的数制中运算，可以先用多项式求值的方法把此数转换成十进制数，然后再用反复的除和(或)乘转换到要求的数制。

当一种数制的基数是另一种数制基数的整数(n)次幂时，数制之间的转换就很简单了，因为后一种数制中每n位数字的组合对应于前者的一位数字。通过观察就可以进行这种转换：由二进制转换为八进制时，二进制数的数字从小数点开始(向两个方向)每三位数分为一组，接着每一组数用一个等值的八进制数代替；由八进制转换为二进制时，每位八进制数字用等值的三位二进制数字来替换。

1.3 二进制算术运算

在这一节，我们研究一些基本的二进制算术运算。关于计算机用的计算方法更详细的论述已由*Chu*(1962)和 *Richars*(1971)的文献给出。

二进制加法的规则与我们习惯的十进制加法相似，下面以一位二进制数来说明。我们看到，只有当相加数中仅有一个数字为 1 时，其和为 1；而当两个相加的数字都为 1 时，就形成了进位。

$$\begin{array}{cccc} & & & 1\ (\text{进位}) \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ \underline{+0} & \underline{+1} & \underline{+0} & \underline{+1} \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

作为一个多位二进制数加法的例子，下面说明$(15)_{10}$和$(10)_{10}$怎样相加。箭头标明了向相邻的高位（或称**比特位**）进位。注意第一个进位仅在加数和被加数都为 1 时才形成。

$$\begin{array}{ccccc} 1 & 1 & 1 & & \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ +0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

而一旦有了进位后，在相邻的高位上只要加数或被加数为 1，或者两者都为 1，就继续产生新的进位。

任何基数的数字纵列相加的一般规则是要先按十进制相加，然后再除以基数。除后得到的余数就是和，商数就是进位值。

现在给出二进制减法的规则。从 0 减 1 时，要从相邻的高位借位：

$$\begin{array}{cccc} & & 1\ (\text{借位}) & \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \underline{-0} & \underline{-0} & \underline{-1} & \underline{-1} \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$