

十位数 / 模转换器半自动测试仪

广西科学院物理研究室 居怀发

提 要

随着科学技术的发展,计算机在工业自动化、数据处理等方面的应用日益广泛。因此,使得数字/模拟转换(简称D/AC)注(一)技术越来越为人们所关注。目前,国内外八位、十位、十二位数/模转换集成电路相继出现,怎样对这些转换器件的直流参数作一简捷有效的测试?本文以TTL UPC-603D数/模转换器件为例,着重介绍了以主传输为测试方法的十位数/模拟转换器半自动测试仪的原理。同时分析比较了逐点测试法和阶梯比较测试法的各自优缺点以及直流参数的定义。

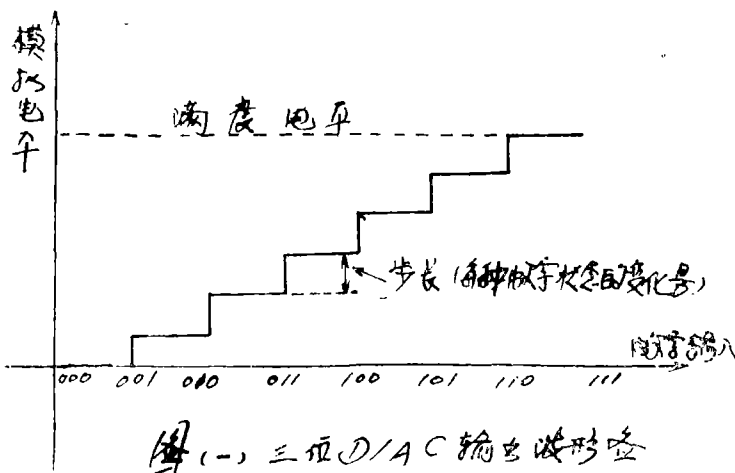
注(一)D/AC为英文DIGITAL/ANALOG CONVERSIONS的缩写,译为:数字/模拟转换。简写为数/模转换。为方便表示,下面均以D/AC来表示数/模转换或A/DC表示模/数转换。

一、D/AC 直流参数指标

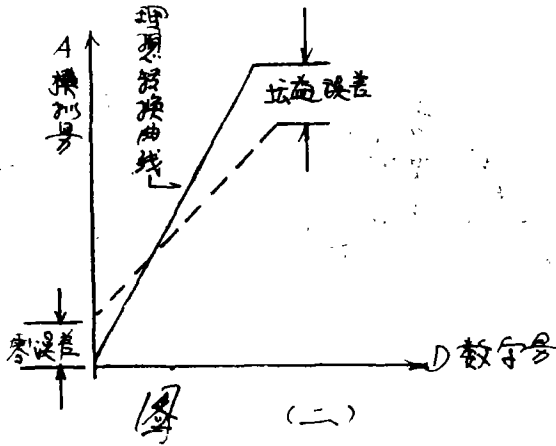
1. 最低位(英缩写LSB)——最低值对应的数字输入位或对应的模拟电平的改变(变化量),这是最小的模拟步长。见图(一)

$$\text{步长LSB} = \frac{\text{理想的满度电平}}{2^n - 1}$$

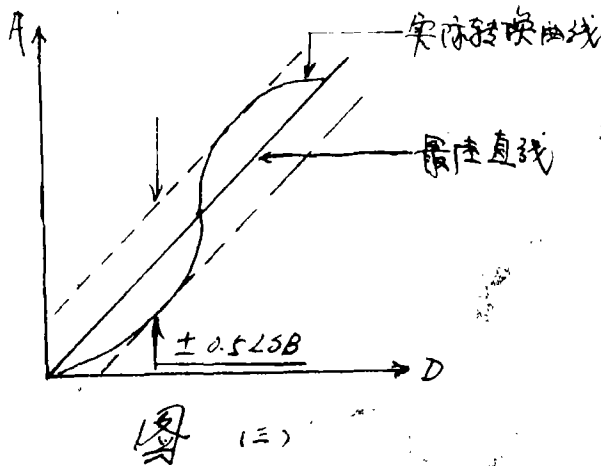
n 为总的数字输入位数



2. 精度—实际 D/AC 曲线与理想 (理论计算值) D/AC 曲线的偏差。如图 (二) 一般精度的指标要求偏差小于 $\pm 0.5\text{LSB}$ 。



3. 线性度—通过实际 D/AC 的曲线, 合理地找一最佳直线, 实际 D/A 转换曲线离此线最远的一点到此直线上的距离 (偏差), 可视为此 D/A 转换的线性度, 其最大偏差一般规定为 $\pm 0.5\text{LSB}$ 。见图 (三)

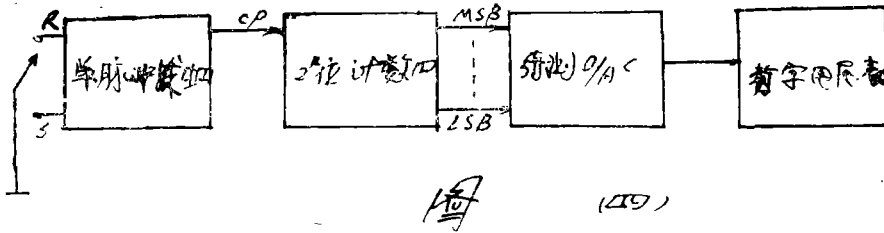


从图 (2) 中可以看出: 如果 D/AC 线性度很好的话, 精度最坏的情况发生在端头。

二、D/AC 测试方法

1. 逐点测试法:

对应二进制输入码, 通过数字电压表记录它的每点模拟输出。对具有几位数的转换器, 它将具有 2^n 个输出电压值。然后, 将上述各点电压值与理论计算值进行比较, 便得到它的精度和线性度的大小。其测试电路方框图如图 (四) 所示。



此方法的主要缺点是所费时间太长，因为它要通过逐点记录，测试效率很低，因此不利于大批量生产的测试，故一般很少使用。

2. 阶梯比较法：

测试电路如图（五）所示。

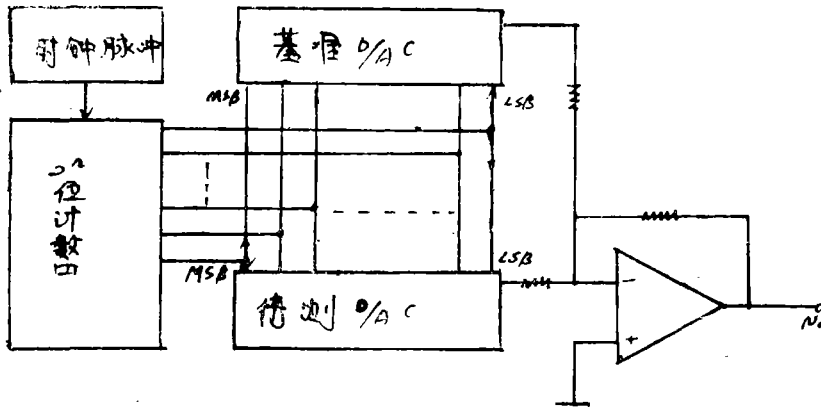


图 五

此测试电路，被测 D/A 与基准的 D/A 的输入并行连接计数器上，而它们的输出是通过运算放大器相减。相减后的运算放大器输出，在理想情况下，结果应为一条直线，但根据 D/A 技术指标规范，允许在 $\pm 0.5LSB$ 范围内变化如图（六）所示。

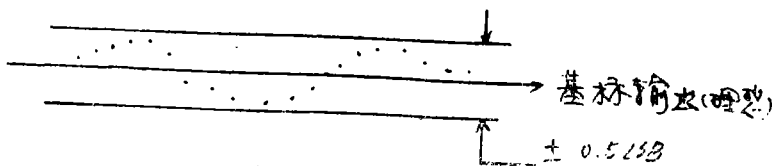


图 六

这种测试方法是快速而有效的，缺点是基准的 D/A 本身线性要好，以防止误差的引进。为了保证基准 D/A 的线性度，一般要求 D/A 要比被测试的 D/A 多四位，因此，在被测 D/A 大于八位时是不宜用此方法的。

3. 主传输测试法：

我们以六位 D/A 为例，首先在最高位，(MSB)置“0”，其余位置“1”时，读一数据。然后除最高位“1”外，其余各位都置“0”，读得另一数据，两数据相比较。在

理想的情况下，差别（即台阶步长）应为1LSB。我们称上面的两种置数状态为MSB位的主传输状态。接着重复上述步骤，将已测过MSB最高位置“0”（或置“1”均可），次高位置“0”，其余置“1”，读一数据。然后再将次高位置“1”，其余各位置“0”读得另一数据。两数据相比较，从而获得了次高位的主传输状态的线性误差。按上述过程，直至获得其它各位主传输状态的线性误差。在测定所有主传输位的线性误差时，若两数据之间步长1变化量，在0.5—1.5LSB范围内，那么D/A转换器几乎总是满足 $\pm 0.5\text{LSB}$ 线性的。六位主传输状态表如下：

位 别	主 传 输 状 态
MSB	011111→100000
2nd	001111→010000
3rd	000111→001000
4th	000011→000100
5th	000001→000010
LSB	000000→000001

在利用主传输测试时，由于后两位（5th，LSB）对整个D/A转换线性度影响较小，故一般情况下，不必对后二位的主传输进行测试。

主传输测试法，同其它测试法相比较，简化了测试步骤，从而提高了测试速度。同时，我们从主传输状态表中可以看出，它具有一定的逻辑程序。因此，我们可以通过编排计数器的码子来得到每位的主传输状态，这对于实现半自动测试是非常有利的。

三、“主传输位”的测试电路

1. 怎样实现对主传输位的测试呢？

这里首先分析一种国外的“主传输位”的测试电路。其电路形式如图(七)(a)(b)所示：

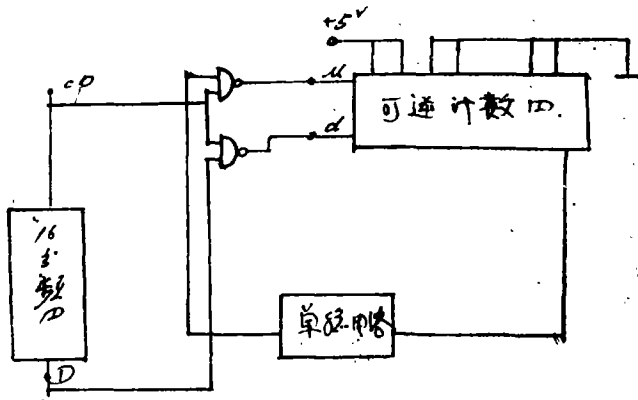
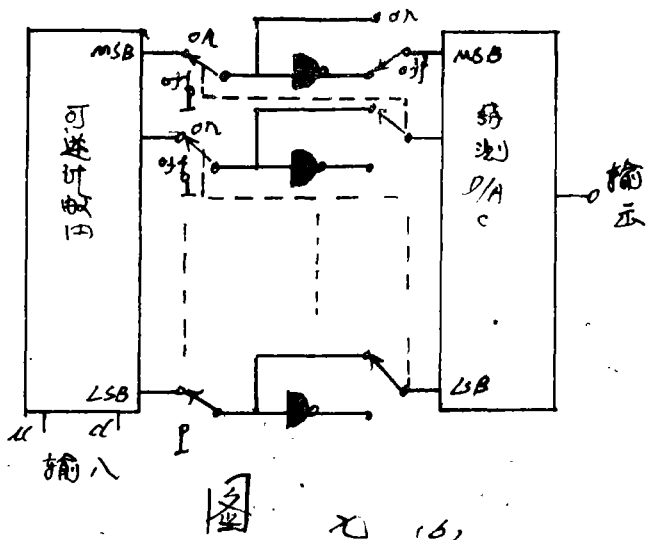


图 7 (a)



首先通过单稳电路或予置端把可逆计数器予置为00000011状态，在前八个cp间16分频D端输出为“0”，经“非门”C变为“1”使“与非门”B打开，A封锁cp经B门输入到可逆计数器d端。此时可逆计数器在前八个cp的作用下，做减法计数。在后八个cp间，分频器D端输出为“1”A门打开，B门被封锁，cp经A门输入到可逆计数器u端，从而在后八个cp的作用下，可逆计数器作加法计数。如此循环进行可逆计数，其可逆计数器的状态（输出）真值表为：

计数脉冲	计数方式	计数状态	计数方式	计数脉冲
予置	减法计数	00000011	加法计数	cp = 16
cp = 1		00000010		cp = 15
cp = 2		00000001		cp = 14
cp = 3		00000000		cp = 13
cp = 4		11111111		cp = 12
cp = 5		11111110		cp = 11
cp = 6		11111101		cp = 10
cp = 7		11111100		cp = 9
cp = 8	11111011			

可逆计数器输出真值表

下面，我们来分析一下可逆计数器的输出状态经转换开关后，是怎样提供待测D/AC主传输位的输入状态的。

首先，我们看开关的接线法如图（五）（b）所示，从图中不难看出，转换开关的输出状态除MSB位同输入状态（即可逆计数器的输出状态）相反外，其余位均与输入状态相同，从而获得了MSB位的主传输状态。待测D/AC的MSB位主传输状态见下列真值表。

此时，待测 D/AC 的输出直接由示波器显示，从而通过输出的波形图来检查 MSB 位的主传输位的线性度与精度。在理想情况下，其待测的输出波形应为图（八）所示。

接下去，将上述过程通过开关阵列重复地运用到相继的波测位上(2nd、3rd、4th...), 直到所有各位的“主传输状态”被获得。从而完成了对 D/AC 的线性度和精度的测试。

2. 十位 D/AC 参数半自动测试仪

它是根据主传输位的测试原理而设计的，由可逆计数器、扭形计数器、继电器开关阵列所组成。如图（九）所示，下面分析介绍主要部件的工作原理以及功能。

A. 可逆计数器

待测 D/AC (输入状态)	
MSB	LSB
1000	0011
1000	0010
1000	0001
1000	0000
0111	1111
0111	1110
0111	1101
0111	1100
0111	1011

MSB
位主传输状态

减法计数

加法计数

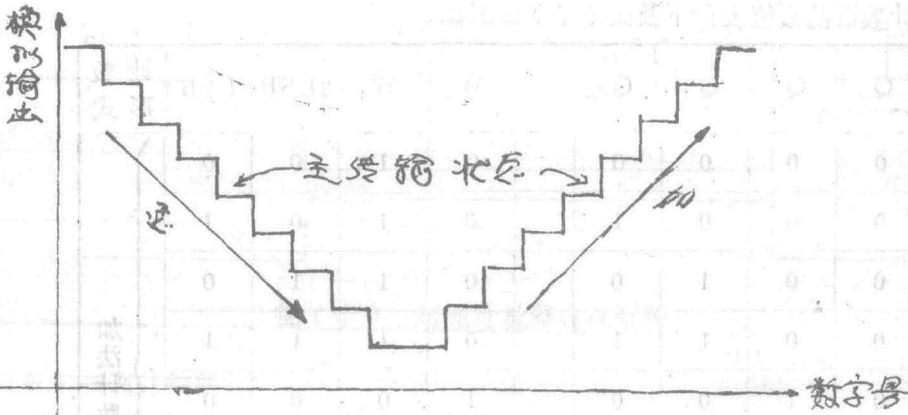


图 (八)

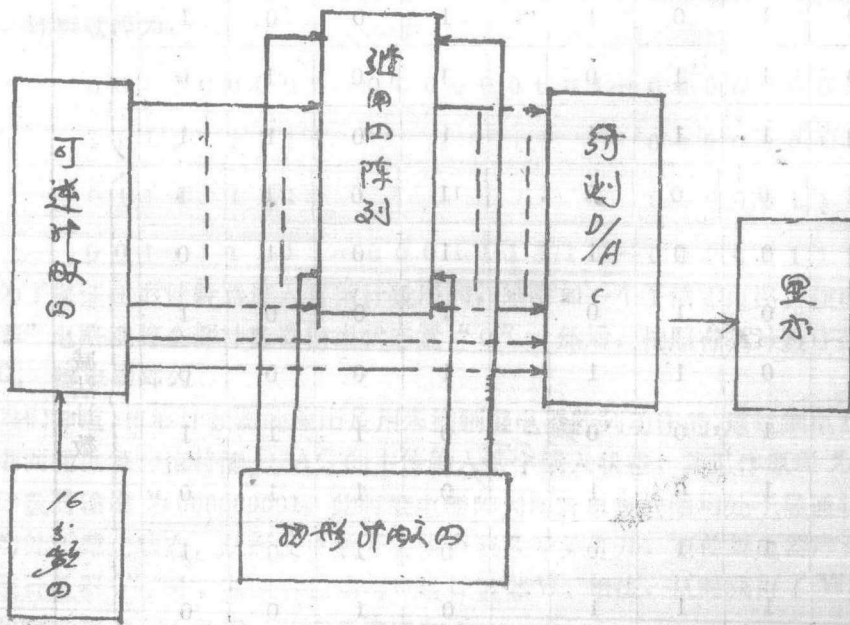


图 (九)

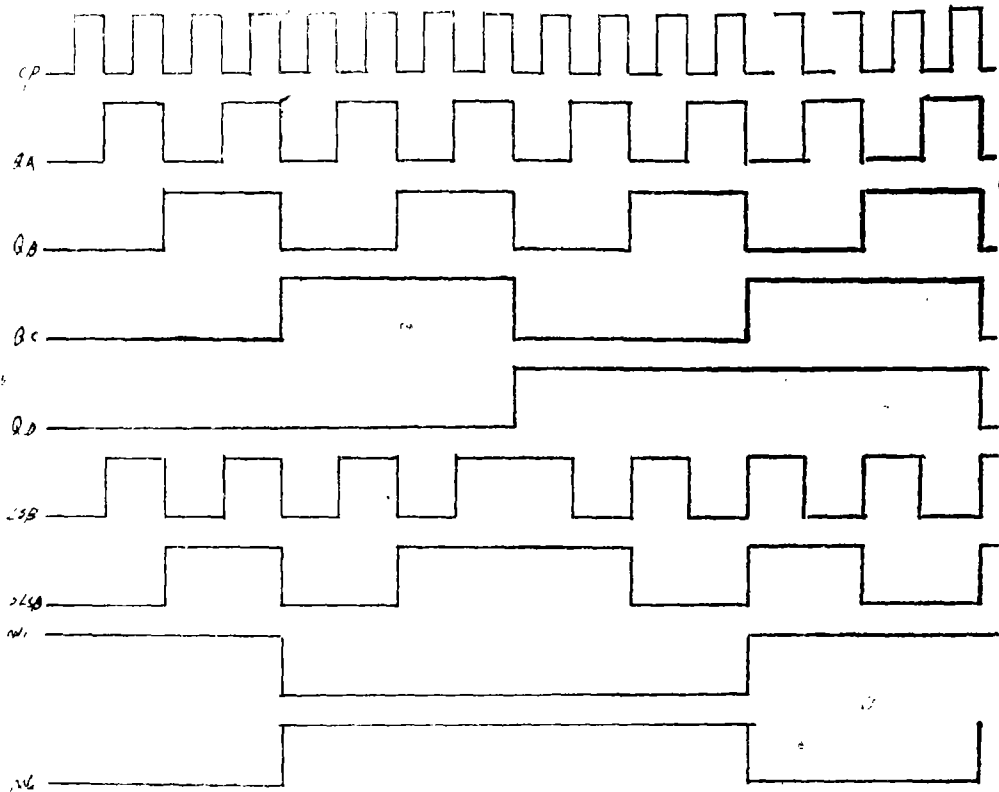
我们从主传输位的测试原理知道,要实现主传输位的测试,首先必须给待测 D/AC 提供一个主传输位的计数状态,参考上述图外可逆计数的真值表,从中可以找出一条规律,即可逆计数器在做可逆计数时,后三位的变化是二进计数的,而 MSB 和其它的次高位的状态均与第三位的状态相同,或全为“1”、或全为“0”。利用这一规律,我们可以用四个触发器设计一个计数器,利用其中三个 D 触发器输出,来提供八个状态的计数。然后,通过继电器的开关阵列组合,使 MSB 位和其它所有的次高位同计数器第三位的输出相接,从而实现了十位(或更多位)的八状态计数(即提供待测 D/AC 的输入数字量)。第四个触发器的输出是用来实现可逆计数的,在前八个 cp 间 $\overline{Q_D}$ 输出为“0”,进而封锁了 Q_A 、 Q_B 、 Q_C 的输出,使计数器输出状态从 Q_A 、 Q_B 、 Q_C 输出,此时 Q_C 的输出就是 W_1 的输出,而 W_2 、 W_3 状态相反。这样在八个 cp 的作用下, W_2 、 W_1 、2LSB、LSB 四个输出端开始从 0100→0101→……→1011 作加法计数。

在后八个 cp 间, $\overline{Q_D}$ 输出为“1”此时靠 $\overline{Q_D} = c$ 来封锁, Q_A 、 Q_B 、 Q_C 的输出,使其计数器输出状态从 $\overline{Q_A}$ 、 $\overline{Q_B}$ 、 Q_C 输出。此 W_1 的输出为 Q_C 的输出, W_2 仍与 W_1 状态相反。在后八个 cp 的作用下,计数器 W_2 、 W_1 、2LSB、LSB 四输出开始从 1011→1010→……0100 作减法计数。

从上述分析中可以看出可逆计数器是利用了 Q_D 和 $\overline{Q_D}$ 输出控制作用从而实现可逆计数的。其可逆计数器的真值表如下及图(十)波形图。

cp	Q_D	Q_C	Q_B	Q_A	W_2	W_1	2LSB	LSB	计数形式
1	0	0	0	0	0	1	0	0	加法计数
2	0	0	0	1	0	1	0	1	
3	0	0	1	0	0	1	1	0	
4	0	0	1	1	0	1	1	1	
5	0	1	0	0	1	0	0	0	
6	0	1	0	1	1	0	0	1	
7	0	1	1	0	1	0	1	0	
8	0	1	1	1	1	0	1	1	
9	1	0	0	0	1	0	1	1	减法计数
10	1	0	0	1	1	0	1	0	
11	1	0	1	0	1	0	0	1	
12	1	0	1	1	1	0	0	0	
13	1	1	0	0	0	1	1	1	
14	1	1	0	1	0	1	1	0	
15	1	1	1	0	0	1	0	1	
16	1	1	1	1	0	1	0	0	

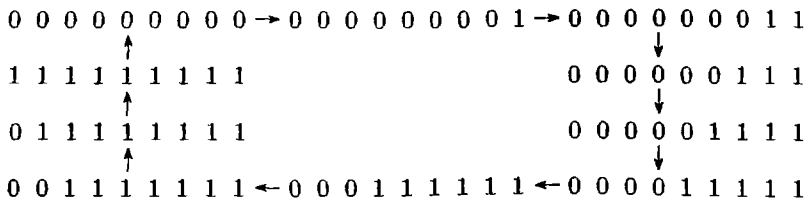
(可逆计数器输出真值表)



图(十) 可逆计数器各点形图

B. 扭形计数器

采用扭形计数器的目的是为了靠它的输出状态,来控制继电器阵列,其输出状态为循环计数,计数过程为:



为了保证扭形计数器进入有效计数序列,须附加一个予清零电路,使电源一旦接通,予清“零”电路就将全部计数器输出状态置“0”,然后,按照有效计数序列进行循环计数。

C. 继电器阵列

我们知道,扭形计数器的输出是用来控制继电器阵列动作的,通过继电器阵列动作的改变,进而提供每一位待测 D/AC 的主传输数字输入状态。其工作原理为:当 cp = 1 时,扭形计数器输出为 000000001,此时继电器阵列所有单数线圈均处于导通状态,而所有双数线圈均处于截止状态,从而使单数开关吸合双数开关打开,至使继电器阵列动作除 MSB 位接可逆计数器 W₂ 外,其余各位均与可逆计数器 W₁ 相接,从而获得了 WSB 位的主传输状态。此时待测 D/AC 的输入状态真值表如下:

扭形计数器状态	可逆计数器				继电器阵列状态	位别 → 开关动作 → 待测 ^D /A输入	MSB 2 3 4 5 6 7 8 2LSB LSB										
	计数状态						W ₂	W ₁	W ₁	W ₁	W ₁	W ₁	W ₁	W ₁	W ₁		
	W ₂	W ₁	26sβ	Lsβ													
0,0000,0001	0	1	0	0	所有单数	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
	0	1	0	1	线圈导通	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	
	0	1	1	0	双数线圈	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	0	1	1	1	截止,使得	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	0	所有单数	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	1	开关吸合	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	1	0	1	0	双数开关	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	1	0	1	1	打开	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	1	0	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	1	0	1	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	1	0	0	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	1	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	1	1		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	1	1	0		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	0	1	0	1		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	0	1	0	0		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

主传输状态

主传输状态

在 $c_p = 2$ 扭形计数器输出为 00000011 时, 继电器线圈 $L_2, L_3, L_5, L_7, L_9, L_{11}, L_{13}$ 、均处于导通状态, 其余线圈截止, 从而使得开关 $K_2, K_2', K_3, K_3', K_7, K_7', K_9, K_9', K_{11}, K_{11}', K_{13}, K_{13}'$ 吸合, 其余开关打开, 使继电器阵列的开关动作, 使 MSB 位与地相接, 次高位 (第二位) 与可逆计数器 W_2 相接, 其余位与可逆计数器 W_1 相接, 从而获得次高位 (2nd) 的主传输状态。

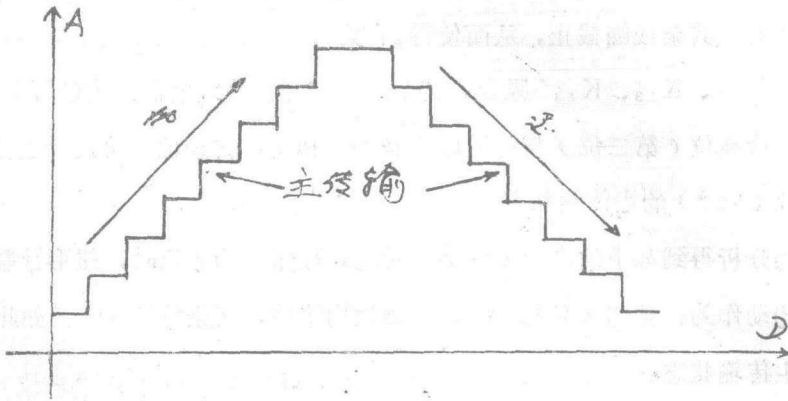
从上面的分析得到如下结论: 如设某一时刻, 被测位为 x 位时, 扭形计数器的输出就使继电器阵列的动作为: 被测 x 位接 W_2 , 已测位均接地, 其余位接 W_1 。如此循环, 进而获得所有位的主传输状态。

通过上面对扭形计数器和继电器阵列的分析, 我们将扭形计数器输出状态与被测位之间的对应关系列表如下:

扭形计数器输出状态									被测位
Q_9	Q_8	Q_7	Q_6	Q_5	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	} 测 MSB
0	0	0	0	0	0	0	0	1	
0	0	0	0	0	0	0	1	1	测 2 位
0	0	0	0	0	0	1	1	1	测 3 位
0	0	0	0	0	1	1	1	1	测 4 位
0	0	0	0	1	1	1	1	1	测 5 位
0	0	0	1	1	1	1	1	1	测 6 位
0	0	1	1	1	1	1	1	1	测 7 位
0	1	1	1	1	1	1	1	1	测 8 位
1	1	1	1	1	1	1	1	1	测 9 位
重复上述过程									

D. D/AC半自动测试仪的测试情况小结

在测试过程中, D/AC 的输出用 SBR—1 示波器观察。适当地选择示波器的量程, 即可在示波器上看到稳定地各主传输位前后共八个阶梯波形, 以及每个台阶之间差别。见图 (十一)



图(十一) 待测D/AC理想输出波形图

由测试中可以看到 D/AC 的输出, 最大误差发生在 $011111 \rightarrow 100000$ 之间, $\Delta = 184\text{mv}$ (理论计算值 $L_{\text{SB}} = 158.73\text{mv}$), 示波器明显地显示出 MSB 主传输的台阶特别高, 该数在 $180\text{mv} - 184\text{mv}$ 之间, 而相应的次高位在示波器上的显示台阶差别很小, 近似于理论计算值。这样, 我们可以预先在示波器屏上刻示出理想的 D/AC 阶梯波形 (步长为 L_{SB}), 用与实际所测的各主传输阶梯比较, 写上可以判断出此 D/AC 的误差是否在 $\pm 0.5L_{\text{SB}}$ 之内。

参 考 资 料

- 《电子模拟—数字转换》国防工业出版社。
- 《IEEE Transactions on circuits and systems》
1978.7. CAS—25(7) P 428~489。
- 《运算放大器设计和应用》科学出版社 P 357~370。