

编号：0151

内 部

科学技术成果报告

多功能伪随机信号相关仪
及系统在线辨识

24

73-1

科学技术文献出版社

刊登国内、外广告启事

我社出版的科技刊物，学科较全，专业较广。为给国内、外各厂矿、企业、科研单位、大专院校等刊登广告提供方便，决定从即日起开辟广告栏，欢迎选用。

有关刊登广告的具体手续、价目及刊物，详见我社的“承办国内广告业务暂行办法”及“承办国外广告业务暂行办法”。此项业务请直接与我社广告组联系，统一办理。

(社址：北京和平街北口 电话：46局4504)

科学技术文献出版社

一九八〇年四月十日

科学技术成果报告

多功能伪随机信号相关仪

及系统在线辨识

(内部发行)

编辑者：中国科学技术情报研究所

出版者：科学技术文献出版社

印刷者：中国科学技术情报研究所印刷厂
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787 × 1092¹/₁₆ 印张：3 字数：75.2千字

1980年7月北京第一版第一次印刷

印数：1—2,350册

科技新书目：166—31

统一书号：15176.467 定价：0.48元

目 录

1. 多功能伪随机信号相关仪的研制	(1)
一、伪随机信号相关仪原理.....	(1)
二、伪随机信号发生器.....	(5)
三、相关器.....	(12)
四、相关函数及脉冲响应函数的计算.....	(14)
五、数据记录与显示.....	(16)
六、逆重复 m 序列二项式加权平均电路.....	(19)
七、多路辨识.....	(25)
2. 应用伪随机信号相关仪的系统在线辨识试验	(31)
一、模拟系统辨识试验.....	(31)
二、轧机控制系统在线辨识试验.....	(38)
三、由辨识试验曲线估算被测系统传递函数.....	(42)
参考文献.....	(46)

多功能伪随机信号相关仪及 系统在线辨识

1. 多功能伪随机信号相关仪的研制

北京钢铁学院

李白男 钟延炯 赵开群*

为随机相关仪是一种用于控制系统或生产过程在线辨识的电子仪器，它可以在不破坏被测系统的正常运行状态的前提下，给正在运行的系统叠加一个低电平的伪随机二进制序列激励信号，同时对系统的输出信号进行互相关计算，从而获得描述被测系统动态特性的单位脉冲响应函数，单位脉冲响应函数也可以变换成系统的传递函数或微分方程形式，这就是由过程控制计算机实现动态控制所需的动态数学模型。此外，这种仪器对于复杂控制系统的在线调整也有重要的意义。

伪随机信号相关仪由伪随机信号发生器和相关器二部分组成。伪随机信号发生器的任务是产生宽度随机变化的二电平方波，这个信号用来激励被测系统。相关器的任务是被测系统的输出信号与延迟了的伪随机信号进行互相关计算，所得互相关函数（正比于被测系统单位脉冲响应函数）由示波器显示出来，也可用x-y仪记录，或数字打印机记录。

为了提高在线辨识的准确度，本仪器内设置了预扰动控制电路，它保证给予被测系统一周期的伪随机信号的扰动后才开始相关运算，这就克服了系统过渡状态的不平稳性对辨识结果的影响。为了消除被测系统中经常存在的缓慢漂移对辨识结果的影响，仪器内还专门设置了实时加权平均电路，使得系统输出中的漂移成分在相关积分运算过程中自动对消掉，从而保证了辨识结果的正确性。此外，本仪器还利用格雷码产生原理生成两组独立的伪随机序列，再配合以适当的相关积分电路，构成了二输入二输出系统的在线辨识功能。以上多种功能，使得仪器对于现场各种复杂的试验条件有着更好的适应能力，展宽了它的使用范围，提高了辨识的准确度。

在结构上，除了全部采用数字和线性集成电路组件，以减少仪器的体积、重量，增加可靠性外，还在多功能的设计中，充分利用原有的基本运算单元，使得仪器的结构更加紧凑与合理。

一、伪随机信号相关仪原理

1. 线性非时变系统描述

线性非时变动力学系统动态特性可用单位脉冲响应函数 $g(t)$ ，或传递函数 $G(S)$ ，或单位过

* 王永英、吴业云、陈清辉、马宏海、杨宝书、刘立成、杨志坚等同志曾帮助，表示感谢！

渡函数 $u(t)$ 描述, 设系统输入为 $x(t)$, 其拉氏变换为 $X(S)$, 输出为 $y(t)$, 拉氏变换为 $Y(S)$, 如图1所示, 则 $g(t)$ 、 $G(S)$ 、 $u(t)$ 之间有如下关系:

$$y(t) = \int_0^{T_s} g(t)x(t-\tau)d\tau \quad (1-1)$$

其中 $g(t)=0, t>T_s$

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} \quad (1-2)$$

$$g(t) = L^{-1}\{G(S)\} \quad (1-3)$$

$$u(t) = L^{-1}\left[\frac{G(S)}{S}\right] \quad (1-4)$$



图 1

系统辨识, 就是求出 $g(t)$ 、 $G(S)$ 、 $u(t)$ 三者中之一即可。

2. 采用伪随机信号辨识系统

首先, 令电平为 $\pm a$ 的伪随机信号为 $x(t)$ 。

$x(t)$ 的自相关函数是

$$\left. \begin{aligned} R_{xx}(\tau) &= a^2 \left[1 - \frac{|\tau|}{\Delta t} \frac{(N+1)}{N} \right] - \Delta t < \tau < \Delta t \\ &= -\frac{a^2}{N} \quad \Delta t \leq \tau \leq (N-1)\Delta t \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

它近似一个 δ 函数, 如图2所示。

$x(t)$ 作试验信号输入到系统, 则 $x(t)$ 与对应输出 $y(t)$ 之间的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 与系统脉冲响应 $g(\tau)$ 之间的关系由下列维纳-何甫方程表示:

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{T_s} g(\tau) R_{xx}(\tau-S)dS \quad (1-6)$$

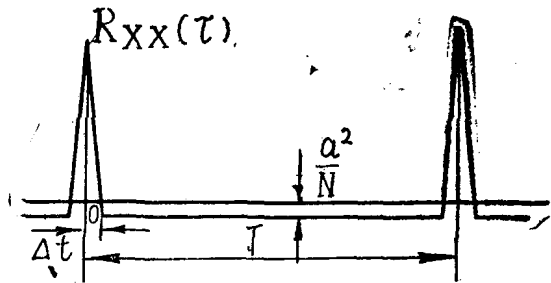


图 2

式中:

$$g(\tau) = 0, \tau > T_s \quad (1-7)$$

T_s 为系统的调整时间。把(1-5)代入(1-6)整理后有:

$$\left. \begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \frac{a^2(N+1)\Delta t}{N} \cdot g(\tau) - \frac{a^2}{N} \int_0^{T_s} g(\lambda)d\lambda \quad \tau \geq \Delta t \\ R_{xy}(0) &= \frac{a^2(N+1)\Delta t}{2N} \cdot g(0) - \frac{a^2}{N} \int_0^{T_s} g(\lambda)d\lambda \quad \tau = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

(1-8)式左边所示互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 根据 $x(t)$ 、 $y(t+\tau)$ 按下式计算

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{QT} \int_0^{QT} x(t)y(t+\tau)dt \quad (1-9)$$

式中: T ——伪随机序列的周期;

N ——伪随机序列的位数;

Δt ——伪随机序列的钟周期;

a ——伪随机序列的幅度;

g ——伪随机序列的周期数。

(1-8) 式右边第二项可用下述方法求出, 在 (1-8) 式中, 令 $\tau = S\Delta t$, $N\Delta t > S\Delta t > T_s$, 这时 (1-8) 式中的 $g(S\Delta t) = 0$, 因此有

$$\frac{a^2}{N} \int_0^{T_s} g(\lambda) d\lambda = R_{xy}(S\Delta t) \quad (1-10)$$

把 (1-10) 代入 (1-8) 式后可求出 $g(\tau)$

$$g(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{A} + \frac{R_{xy}(S\Delta t)}{A} \quad (1-11)$$

式中: $A = \frac{a^2(N+1)}{N} \Delta t$, 它代表 $x(t)$ 的自相关函数中三角形面积。

当 N 很大时, $\frac{a^2}{N} \int_0^{T_s} g(\lambda) d\lambda \approx 0$, 则

$$g(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{A} \quad (1-12)$$

3. 伪随机信号相关仪原理

欲求 $g(\tau)$, 只要按 (1-9) 式求出 $R_{xy}(\tau)$ 即可, 相关仪就是实现 (1-9) 式运算而设计的, 如图 3 所示。

对应一个特定的 τ 值, 只能求出 $R_{xy}(\tau)$ 曲线中的一个点, 欲求整个 $R_{xy}(\tau)$ 曲线, 就必须对应不同的 τ 值作许多次试验, 这种所谓串行辨识必然使测试时间很长, 过长的测试时间在工业系统辨识中有时是不允许的。为了缩短测试时间, 采用图 4 所示的串—并行辨识方法。

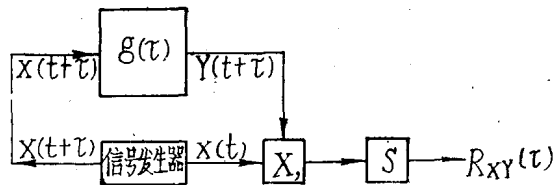


图 3 伪随机信号相关仪原理图

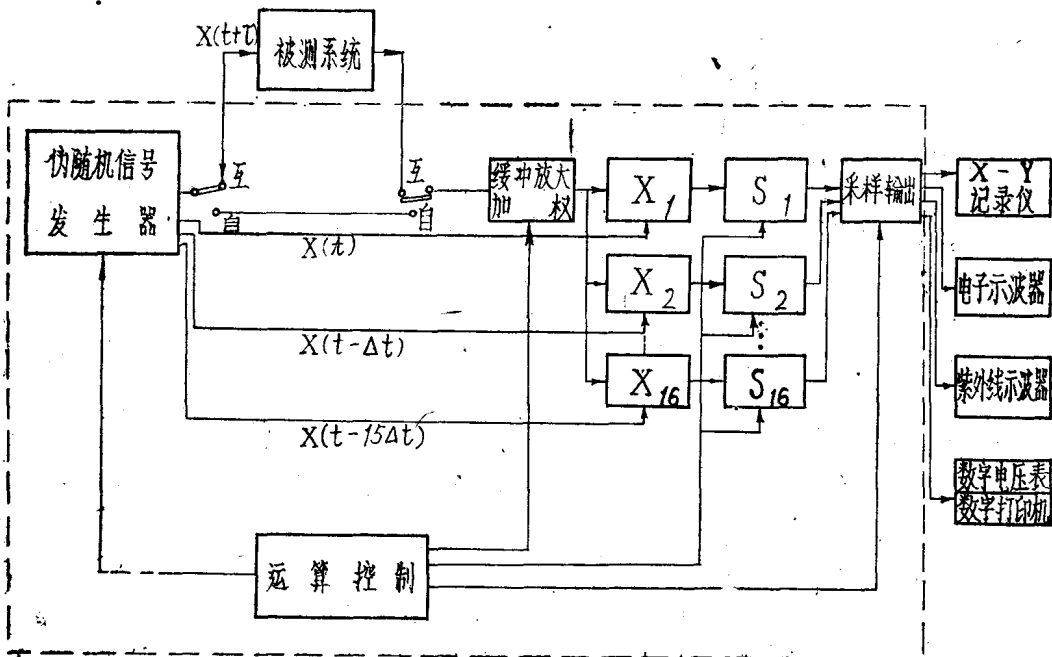


图 4 伪随机相关仪总框图

串一并行辨识时, 对应一个特定的 τ 值可以测出 $R_{xy}(\tau)$ 曲线上的十六点, 即 $x(t)$, $x(t-\Delta t)$, \dots , $x(t-15\Delta t)$, 它与 $y(t+\tau)$ 互相关运算有:

$$\left. \begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \frac{1}{qT} \int_0^{qT} y(t+\tau)x(t)dt \\ R_{xy}(\tau+\Delta t) &= \frac{1}{qT} \int_0^{qT} y(t+\tau)x(t-\Delta t)dt \\ \dots\dots \\ R_{xy}(\tau+15\Delta t) &= \frac{1}{qT} \int_0^{qT} y(t+\tau)x(t-15\Delta t)dt \end{aligned} \right\} (1-13)$$

第一次试验 $\tau=0$, 测出 $R_{xy}(0)$, \dots , $R_{xy}(15\Delta t)$, 第二次 $\tau=16\Delta t$, 测出 $R_{xy}(16\Delta t)$, \dots , $R_{xy}(31\Delta t)$, \dots 进行 m 次试验测出 $16m$ 个点。

由于脉冲响应曲线的初始部分信息量大, 曲线的尾部信息量较少, 因此要求 $R_{xy}(\tau)$ 曲线初始部分的点数多些, 尾部点数少些。为了适合这个特点, 迟延信号是不均匀的, 前面八个相位相差 Δt , 即 $x(t)$, $x(t-\Delta t)$, \dots , $x(t-7\Delta t)$, 中间四个相位相差 $2\Delta t$, 即 $x(t-9\Delta t)$, \dots , $x(t-15\Delta t)$, 后面四个相位相差 $3\Delta t$, 即 $x(t-18\Delta t)$, \dots , $x(t-27\Delta t)$, 一次试验, 迟延总量达到 $27\Delta t$, 一条完整的 $R_{xy}(\tau)$ 曲线将测试出来, 这就是所谓并行辨识, 辨识结果曲线如图5所示。

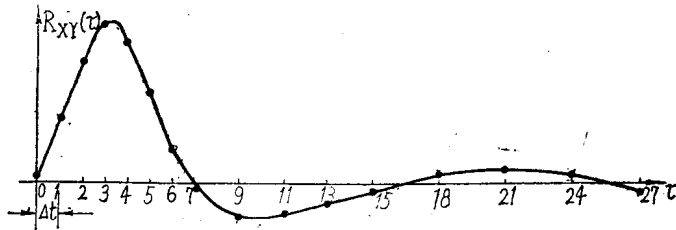


图5 非均匀迟延测试互相关曲线 $R_{xy}(\tau)$

综上所述, 相关仪有两个部分, 一个是信号发生器, 它产生周期性伪随机信号, 包括超前伪随机信号 $x(t+\tau)$, 伪随机信号 $x(t)$, 固定迟延伪随机信号 $x(t-\Delta t)$, $x(t-2\Delta t)$, \dots , $x(t-27\Delta t)$ 。另一个是相关器, 它实现 $x(t-i\Delta t)$ ($i=0, 1, \dots, 27\Delta t$) 与 $y(t+\tau)$ 的相乘运算, 以及 $x(t-i\Delta t)y(t+\tau)$ 的平均运算。

信号发生器部分, 全部用数字集成电路构成, 结构简单可靠, 而相关器部分, 其相乘运算 $x(t-i\Delta t)y(t+\tau)$ 是二电平的 $x(t-i\Delta t)$ 与 $y(t+\tau)$ 相乘, 因此用简单的开关电路实现, 而平均电路, 是用高输入阻抗, 高增益的线性集成器件构成, 线路简单, 漂移小。

4. 系统预扰动消除过渡过程的影响

伪随机信号 $x(t+\tau)$ 是周期为 T 的信号, 它从0开始加入到系统, 其输出 $y(x+\tau)$ 是微分方程式

$$a_n \frac{d^n y(t+\tau)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t+\tau)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 = x(t+\tau) \quad (1-14)$$

的解, 即

$$y = y' + y'' \quad (1-15)$$

y' 是 (1-14) 的特解, 它是 $x(t+\tau)$ 引起的强制振荡, 为稳态分量, y'' 是 (1-14) 齐次方程的解, 是过渡分量。 y'' 所代表的过渡过程衰减至 0 的时间, 也是 y 从 0 变至稳态的时间, 这个时间就是系统的调整时间 T_s , 在 $y(t+\tau)$ 达到稳态之前, 不能用来与 $x(t)$ 互相关运算以估算脉冲响应 $g(\tau)$, 只有 $y(t+\tau)$ 达到稳态后才可以, 否则 $y(t+\tau)$ 不符合换尔过得假设。在系统辨识时, 伪随机信号的周期一定大于被测系统调整时间, 即 $T > T_s$, 因此在 $y(t+\tau)$ 与 $x(t)$ 进行互相关运算之前, 给系统预先加上一个周期的伪随机信号扰动系统, 当 $x(t+\tau)$ 进入第二周期后才将系统输出信号 $y(t+\tau)$ 与 $x(t)$ 进行互相关运算。加上预扰动电路之后, 辨识系统的准确度大大提高, 尤其是采用短周期伪随机信号辨识时, 更是如此。本相关仪内采用简单电路实现了对系统的预扰动。

二、伪随机信号发生器

伪随机信号发生器框图如图 6 所示, 它是为实现 (1-13) 所示互相关运算而设计的, 令高电平为 1, 低电平为 0 的伪随机信号为 $x(t)$ 。发生器产生的伪随机信号应当发有 q 个周期, 伪随机信号包括 $x(t+\tau)$ 、 $x(t)$ 、 $x(t-\Delta t)$ 、 $\dots\dots x(t-27\Delta t)$, 这些信号能够自动停止、自动启动, $x(t+\tau)$ 中的 τ 值能够自动累积。下面分别叙述各个部件的原理。

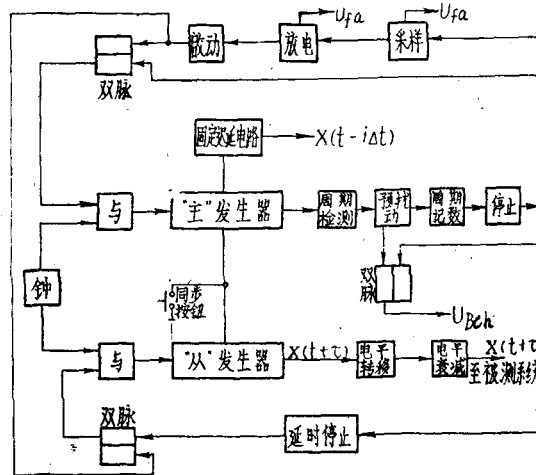


图 6 伪随机信号发生器框图

1. 伪随机信号的产生

我们把若干级移位寄存器加以反馈连接便可产生伪随机二进制信号。例如, 由 n 个 $J-K$ 触发器组成的 n 级移位寄存器, 在第 n 级和第 k 级取出信号, 进行模 2 相加后, 反馈到第一级, 对移位寄存器输入移位钟脉冲后, 在各个 $J-K$ 触发器的输出端 Q 便得到 $2^n - 1$ 位伪随机二进制信号, 如图 7 所示。所谓模 2 相加就是表 2-1 所列举的真值。

表 2-1

A	0	0	1	1
B	0	1	0	1
$A \oplus B$	0	1	1	0

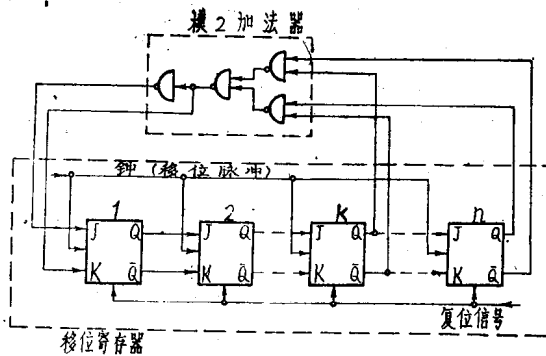


图7 伪随机信号的产生

例：当 $n=4$ ， $k=3$ ，移位寄存器各级状态如表2-2所示，其任一级Q端输出波形如图8所示。

表2-2

级数	状态															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
2	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
3	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
4	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1

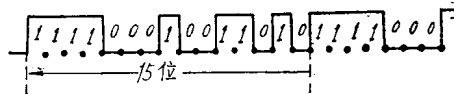


图 8

值得注意的是，一个反馈式移位寄存器，在不同的地方引出反馈线，可以得到不同的序列，例如上述四级寄位寄存器，从第四级和第二级引出反馈时，即 $n=4$ ， $k=2$ 。各级状态如表2-3看出，从第四、二级引出反馈线的移位寄存器产生的信号总共只有六个状态，到第七状态便重复第一状态。

可见，一个 n 级反馈式移位寄存器，只有当反馈线引得合适时才能得到除了一种 n 个“0”状态以外的 n 种逻辑状态的所有组合，即产生所谓最大长度伪随机二进制序列，最大长度 $N=2^n - 1$ ，其中 N 表示位数， n 表示级数。表2-4列举了最大长度序列的长度以及取反馈线

表2-3

级数	状态						
	第一	第二	第三	第四	第五	第六	
1	1	0	0	1	1	1	1
2	1	1	0	0	1	1	1
3	1	1	1	0	0	1	1
4	1	1	1	1	0	0	1

表2-4

级数	反馈级数	序列长度 ($2^n - 1$)	级数	反馈级数	序列长度 ($2^n - 1$)
2	1, 2	3	7	4, 7	127
3	1,3或2,3	7	8	4,5及6,8	253
4	3,4或1,4	15	9	5,9或4,9	511
5	3,5或2,5	31	10	7,10	1023
6	5, 6	63	11	9,11	2047

的级数。

仪器共有5, 6, 7, 9, 10级五种序列, 通过面板开关选择。

2. 周期检测与发生器的停止

为了实现互相关运算, 要求伪随机信号持续时间仅仅为 q 个周期, 因此周期检测电路每当伪随机信号 q 个周期结束时发出一个停止信号。

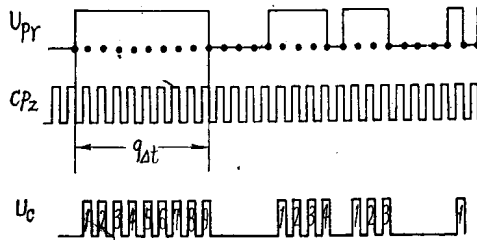


图 9

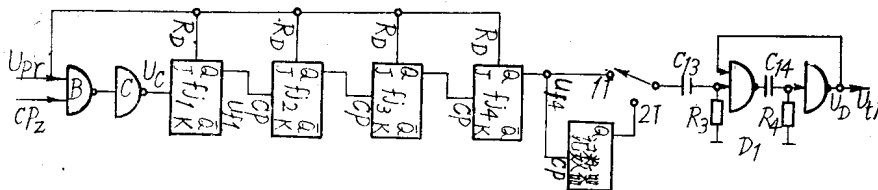


图10 周期检测电路

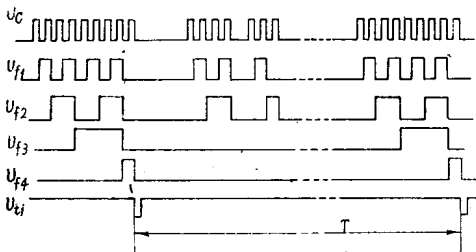


图11 九级伪随机信号的周期检测

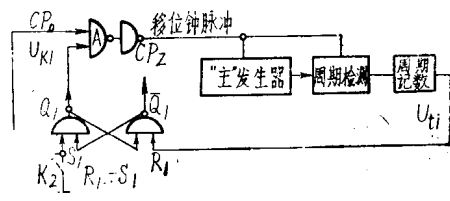


图 12

从伪随机二位数信号的特点可知，一个 n 级伪随机信号共有 N 位， $N=2^n-1$ ，在这 N 位信号中，持续 n 个“1”才转换的状态只有一个，以 $N=511$ 为例，其中9个“1”状态的持续的时间为九个钟周期（ $9\Delta t$ ），因此我们可以用持续9个“1”才转换的状态来辨别伪随机信号是否到了一个周期。为了使伪随机信号到了一个周期就发出一个负脉冲，我们采用如图10所示的电路。首先把伪随机信号电压 U_{pr} 与移位钟脉冲 CP_z 分别加到与非门“B”的两个输入端，再经过另一个与非门“C”倒相之后，得出在伪随机信号的一个周期 T 中，只有一次连续出现9个钟脉冲，其它连续出现钟脉冲的个数都小于9，其波形如图9所示，电路如图10所示。把 U_c 加到四级计数器输入端，每个计数器都用伪随机信号 U_{pr} 去复位，即计数器只有当伪随机信号 U_{pr} 处在高电平“1”时方可记数，而 U_{pr} 处在低电平“0”时，计数器全部复位，结果， U_c 中连续出现的9个钟脉冲，经过四级计数器记数，在末级得到一个方波 U_{f4} ，如图11所示，而 U_c 中连续出现7个，6个，5个……钟脉冲，经过有伪随机信号复位的四级计数器后，在末级输出等于0，因此，伪随机信号持续9个“1”状态完了时出现一个方波电压 U_{f4} ， U_{f4} 的后沿便是持续9个“1”状态结束的瞬间，最后把 U_{f4} 加到单稳态触发器 D_1 的输入端，在输出端得到负脉冲 U_{t1} ， U_{t1} 的前沿是持续9个“1”状态结束的瞬间，两个负脉冲前沿之间的距离正好是伪随机信号的一个周期 T ，根据 U_{t1} 的负脉冲出现，检测出伪随机信号的周期 T 。若要伪随机信号持续 q 个周期，则在复位计数器后面加有周期计数器。例，若需要持续二个周期，则把 U_{f4} 脉冲用一级计数器记数，计数器端输出再加到单稳态 D_1 ， D_1 输出负脉冲前沿之间的距离正好是伪随机信号的二个周期。不同级数的周期检测要用不同级数的复位计数器，用波段开关可选择复位计数器的级数。

伪随机信号持续的时间应当是 qT ，因此用周期检测计数停止信号 U_{t1} ，使发生器停止。发生器停止控制图如图12所示。启动 K_2 （即把 K_2 闭合随后立即打开）， Q_1 端电压 U_{k1} 处在高电平“1”，钟信号 CP_z 送入信号发生器，使其产生伪随机信号，当伪随机信号到了持续 n 个“1”状态结束的那个瞬间，周期检测电路发出一个负脉冲 U_{t1} ，并送入到 R_1-S_1 的 R_1 端，结果使 Q_1 端的 U_{k1} 处在低电平，钟信号不能通过“A”门，信号发生器的移位寄存器各级保持移位钟脉冲停止瞬间的那个状态，以后又启动开关 K_2 ，信号发生器又重新工作。

3. 预扰动控制电路

预扰动就是按（1-13）式进行互相关运算之前预先加一个周期的伪随机信号给系统，例如加入系统的信号是五个周期，则（1-13）式进行的积分却是从第二周期开始，至第五周期结束，总共四个周期。

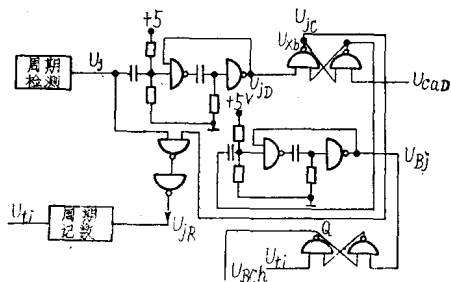


图13 预扰动控制电路

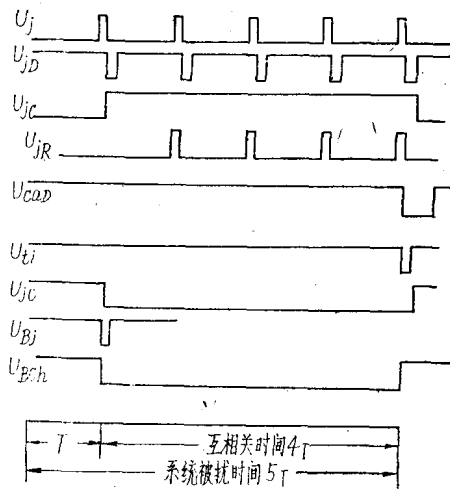


图 14

预扰动控制电路如图13所示，周期检测出来的脉冲 U_j 送入预扰动控制电路，经过变换后丢掉了第一个脉冲，变成 U_{jR} ，如图14所示。把 U_{jR} 送入周期记数，这时发生器发出的伪随机信号共有五个周期，但只有四个脉冲送入二级周期数计数器，因此加入预扰动控制电路之后，伪随机信号要多一个周期。

(1—13)式进行积分的时间是这样控制的，从单稳态输出脉冲 U_{B1} ，与停止脉冲 U_{t1} ，分别送入R—S触发器的R端与S端，其Q端输出信号 U_{Bch} 的高电平正好为四个周期，这时积分器工作，当 U_{Bch} 为低电平时控制积分器不工作。

4. 延时伪随机信号的产生

1) 串行迟延

信号发生器除了“主”发生器外，还有一个结构相同的“从”发生器，它们用同一钟脉冲来移位。“主”发生器产生 $x(t)$ ，“从”发生器产生 $x(t+\tau)$ 。

“主”、“从”发生器的移位钟脉冲在同一时刻启动，但在不同时刻停止。“主”发生器经过 qT 后自行停止，它产生 $x(t)$ 。“从”发生器在“主”发生器停止后再经过 $\eta\Delta t$ 段时间才停止，即“从”发生器比“主”发生器多翻转 η 次，下次启动时，“从”发生器发出信号的相位要超前上一次启动后发出信号的相位，其超前量为 $\eta\Delta t$ ，图15所示，是 $\eta=4$ 的情况，每停止、启动一次，“从”发生器产生的信号超前位数增加 $\eta\Delta t$ ，若第一次启动“主”“从”发生器均产生 $x(t)$ ，则启动 m 次后，“从”发生器便产生 $x(t+m\eta\Delta t)$ ，而“主”发生器产生的 $x(t)$ 与启、停次数无关。

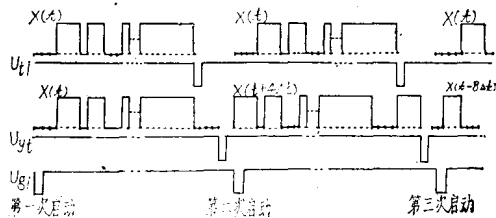


图15 超前信号 $x(t+\eta\Delta t)$ 的产生 ($\eta=4$)

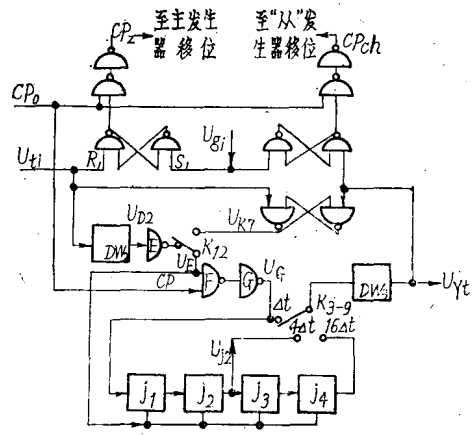


图 16

达到上述目的，是通过延时停止电路来实现的，如图16所示。

“主”发生器的停止信号 U_{t1} 一方面加到“主”发生器 R_1-S_1 触发器 R_1 端使“主”发生器停止，另一方面加到延时停止电路中单稳态触发器 DW_2 的输入端，其输出是 U_{t1} 的延时方波 U_{D2} ，又经过与非门“E”倒相之后，变成 U_E ， U_E 与移位钟脉冲 CP_0 分别加到“F”门的两个输入端，其输出 U_F 经过“G”倒相之后输出 U_G ，进入单稳态触发器 DW_3 ，其输出为延时停止信号 U_{yt} ，从波形图17a可以看到“主”发生器停止信号 U_{t1} 的前沿与“从”发生器停止信号 U_{yt} 的前沿正好相差一个钟周期 Δt ，即 U_{t1} 与 U_{yt} 相差一个钟周期，则“主”、“从”发生器产生信号的相位，每启动一次便相差一个钟周期。当钟频 CP_0 较低时，开关 K_{12} 放在另一位置，否则单稳态 DW_2 的延时方波不稳定。

有时要求“主”、“从”发生器产生信号之间的相位，启动一次，相位相差二倍、八倍或十六钟周期。图17所示两个信号之间的相位，每启动一次相差四倍钟周期，即 $4\Delta t$ ，电路是这样，在图16所示延时电路中，把开关 K_{3-9} 放在 $4\Delta t$ 的位置，使延时停止电路中的 U_G 电压

经二级计数器记数，其输出 U_{j2} 再加入到 DW_3 的输入端，其输出便是与“主”发生器停止信号 U_{ti} 相差四倍钟周期的延时停止信号 U_{yt} 。

2) 并行固定迟延

n 级“主”发生器的移位寄存器第一级输入端为 $x(t)$ ，则第一级输出端信号比输入端信号迟延一个钟周期 Δt ，即 $x(t-\Delta t)$ ，第二级输出为 $x(t-2\Delta t)$ ……，第 n 级输出为 $x(t-n\Delta t)$ ，如图18所示，若要产生大于 $n\Delta t$ 迟延量时，只要在 n 级线性反馈移位寄存器后面再附加普通移位寄存器，若附加 2^n-1-n 级移位寄存器，则可产生所需全部迟延序量，即 $x(t-(n+1)\Delta t)$ 至 $x(t-(2^n-1)\Delta t)$ ，记作 $D^k x$ 为 $x(t-k\Delta t)$ 。伪随机相关仪最大固定迟延量为 $D^{2^7} x$ 。

用这种方式产生迟延的一个优点，就是使用同一组移位寄存器，改变引出反馈线 n 及 k 得到不同序列时，其固定迟延量不变。而这一点，正好由一周期予扰动提供了保证。

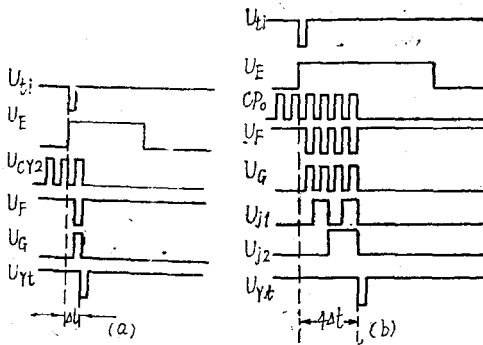


图17 延时停止 U_{yt} 的形成

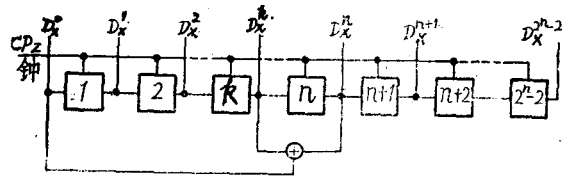


图18 并行固定迟延信号的产生

5. “主”“从”发生器的初始状态与同步

1) “主”发生器的初始状态

“主”发生器各级初始状态并不是任意的，应该使它的各级初始状态每次停止时都是一致，只有这样才能使“主”发生器第一次启动时发出序列的长度与以后各次启动发出序列的长度一致。

以图7所示发生器 $n=4$ ， $k=3$ 为例，若从第四级取出信号作周期检测，则从表2-2看出，发生器在第五状态停止，这时第一级处于“1”状态，其它各级处于“0”状态，因此移位寄存器的初始状态应当是第一级置“1”，其它各级置“0”，若从第一级输入端取出

信号作周期检测，则发生器在第一状态停止，所有各级初始状态应该置“1”。

2) “主”“从”发生器的同步

在系统辨识，测量脉冲响应时，要求第一次启动时，伪随机信号 $x(t)$ 与超前伪随机信号 $x(t+\tau)$ 的相位相同，即 $x(t+\tau)$ 中 $\tau=0$ ，以后第二次启动， $x(t)$ 不变，而 $x(t+\tau)=x(t+\eta\Delta t)$ 即 $x(t)$ 与 $x(t+\tau)$ 相差 η 倍钟周期，第三次启动 $x(t+\tau)=x(t+2\eta\Delta t)$ ，……。要作到上述“主”“从”发生器同步，首先“从”发生器的初始状态应当与“主”发生器一样，因此“主”“从”发生器加入一个置“1”同步开关 K_1 ，而周期检测信号

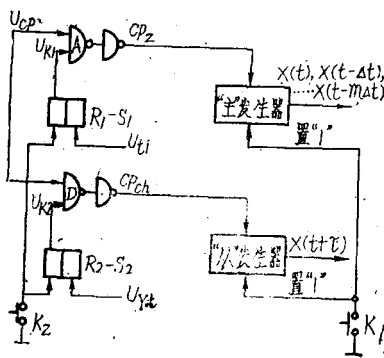


图19 “主”“从”发生器的同步

从“主”发生器的 D_1^0 端（即第一级输入端）取出， $x(t+\tau)$ 自“从”发生器的 D_2^0 端取出。因此，启动 K_1 ，即 K_1 闭合随后又打开，结果“主”“从”发生器移位寄存器各级初始状态都相同，例都是“1”。以后重复启动开关 K_2 （闭合随后又打开）便得到 $x(t+\tau)$ ； $x(t)$ ， $x(t-\Delta t)$ ， \dots ， $x(t-(\eta-1)\Delta t)$ ，其中 $\tau=0$ ， $\eta\Delta t$ ， $2\eta\Delta t$ ， \dots 。 i 值取决于并行辨识的点数。

6. 发生器的自动启动

图19所示的手动启动开关 K_2 ，用启动信号 U_{gi} 代替。当信号发生器停止后，也就是互相关运算完毕，把其结果采样，再启动。采样分单点、多点两种，通过开关 K_{3-8} 选择。单点采样信号 U_{cad} 由单稳态 DW_4 展宽 U_{ti} 产生，而多点采样控制脉冲 U_{k4} 由16点采样信号发生器得出，启动脉冲 U_{gi} 由单稳态 DW_5 据采样信号后沿得出，启动电路如图20所示，时序图如图21所示。

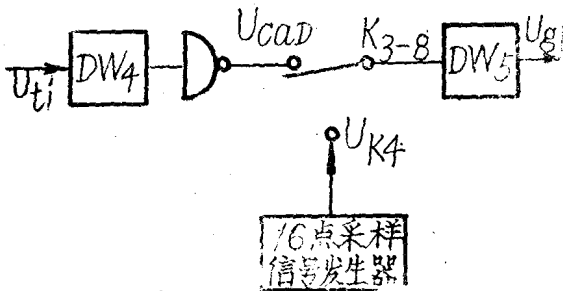


图20 启动信号 U_{gi} 的产生

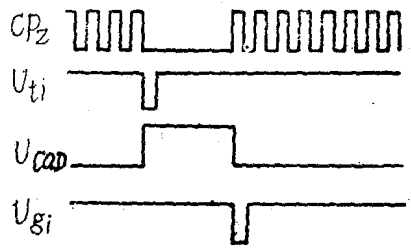


图21 产生启动信号时序图

7. 电平转移及衰减

用数字固体电路构成 n 级伪随机信号发生器输出的信号，它的低电平约 $0.3V$ ，高电平 $4V$ ，而真正输入到被测系统的伪随机信号，它的高、低电平必须是以 0 对称的 $\pm a$ 电平，因此要求把 $0.3V$ 至 $4V$ 电平转换成 $-a$ 至 $+a$ 电平，而 $\pm a$ 的大小，由实际要求来决定。

$x(t+\tau)$ 与 $\overline{x(t+\tau)}$ 分别加到比例放大器 x_{g1} 的同相、反相输入端进行相减，由另一个比例放大器 x_{g2} 衰减后得到对称的 $\pm a$ 电平伪随机信号 $x(t+\tau)$ 。

值得注意的是，由于 $x(t+\tau)$ ， $\overline{x(t+\tau)}$ 信号在伪随机发生器停止时，一个处于“0”电平，另一个处于“1”电平，若这时加入到 x_{g1} ，则 x_{g1} 输出端必然不处于“0”电平。为了使伪随机信号发生器停止时 x_{g1} ， x_{g2} 输出处于“0”电平，前面附加四个与非门，如图22所示，用“主”发生器的起停控制信号 u_{k1} 控制“与非”门 m 和 n ，由于发生器停止时 u_{k1} 处于“0”电平，结果“与非”门 r 、 Q 输出也必将处于“0”电平，结果 x_{g1} ， x_{g2} 这时处于“0”电平。

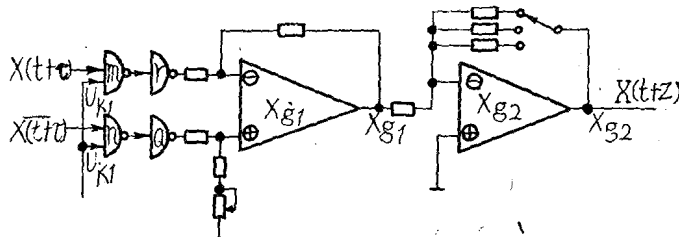


图22 电平转移及衰减

三、相 关 器

相关器就是要实现下述相关运算

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{QT} \int_0^{QT} y(t+\tau)x(t)dt \quad (3-1)$$

式中 $x(t)$ 是电平为 $\pm a$ 的伪随机信号， $y(x+\tau)$ 是在 $x(t+\tau)$ 作用下被测系统输出， QT 是相关运算的时间，伪随机信号发生器本身保证了 $x(t)$ 以及与 $x(t+\tau)$ 相对应的 $y(t+\tau)$ 持续的时间正好是(3-1)式相关运算的时间 QT 。因此相关器只要完成 $y(t+\tau)$ 与 $x(t)$ 的相乘运算，以及积分运算，并把积分结果除以常数 QT ，其框图如图23所示。

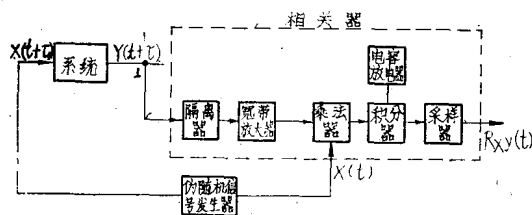


图23 相关器方框图

应当指出，在积分器完成对应 $\tau = \tau_1$ 积分 $\frac{1}{QT} \int_0^{QT} y(t+\tau_1)x(t)dt$ 时，其输出只有 $t=QT$ 那瞬间的结果才是互相关函数值 $Kg(\tau_1)$ ，如图24所示，至于 $t=0$ 至 $t=QT$ 这段时间是积分器累积过程，它并不是互相关函数值，因此必须有采样保持电路，它把 $t=QT$ 瞬间的积分值保持下来，并进行采样，以便记录。

此外，为了在每次积分之前积分电容上的电荷为零，因此还有一个积分电容放电电路，它可以在积分结果采样后，迅速把电容器积累电荷清除。

下面分别叙述放大器、乘法器、采样以及积分电容放电工作原理。

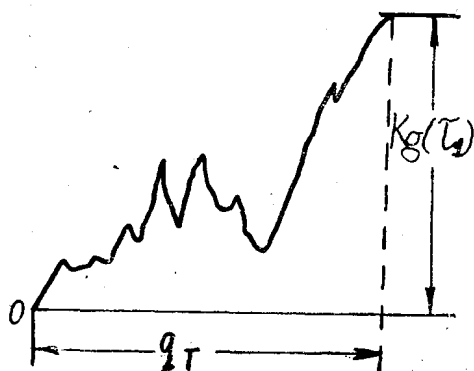


图 24

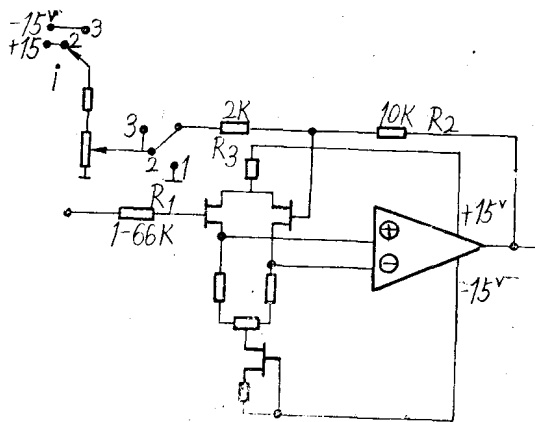


图25 隔离消直放大器

1. 隔离消直放大器

在互相关测试时为了不影响被测系统的正常工作，在系统输出与相关器之间加了一个高输入阻抗的隔离放大器，如图25所示，由于采用了场效应管，及同相输入，因此隔离放大器的输入阻抗达 $100M\Omega$ 。

此外，辨识试验时，系统的输出信号，往往有一个较高的直流分量，欲对被扰输出进行放大时，必然造成饱和，无法工作，因此需要把这一直流电压除去，在隔离放大器的反相输入端加一个直流电压，用以抵消被扰输出的直流分量。从图看出放大器的放大倍数

$$K_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

2. 宽带放大器

线性集成组件一般频带较窄，特别是组成放大倍数较大的比例放大器时，更趋狭窄，造成严重的信号失真。因此在组件上加上展宽频带电路。

3. 乘法器

乘法器就是实现 $y(t+\tau)$ 与 $x(t)$ 的相乘运算，由于伪随机信号只有“+a”和“-a”两种状态，为了简化，看成“+1”和“-1”两种状态记作 $x^*(t)$ ，因此上述相乘运算简化成简单的开关过程。设 $x^*(t)$ 与 $x(t)$ 是相同序列，但电平不同，当 $x(t)$ 为“-1”时 $x^*(t)$ 是“0”，当 $x(t)$ 为“+1”时 $x^*(t)$ 也是“+1”，又设 $\overline{x(t)}$ 是 $x(t)$ 的反码，则：

$$y(t+\tau)x(t) = y(t+\tau)x^*(t) - y(t+\tau)\overline{x(t)} \quad (3-2)$$

按照 (3-2) 式右边运算组成的乘法器如图26所示，图中上通道是实现 (3-2) 式右边第一项运算，下通道是实现 (3-2) 式右边第二项运算。当 $x(t)$ 为高电平“1”时， $\overline{x(t)}$ 必然为低电平“0”，这时上通道导通，下通道不通，当 $x(t)$ 为“0”时， $\overline{x(t)}$ 必然为“1”，下通道导通，上通道不通，两通道之和就是 (3-2) 式左边之量 $y(t+\tau) \cdot x(t)$ 。

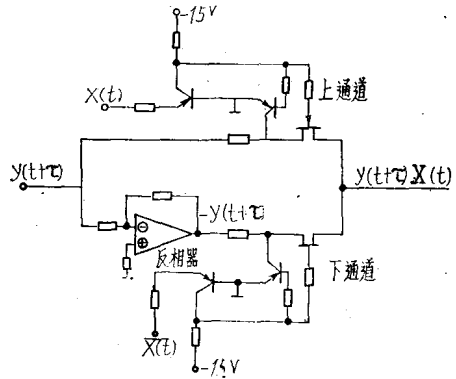


图26 乘法器

4. 积分保持

积分保持由积分器与保持电路组成。积分器包括线性集成电路与场效应管，其输入阻抗大，增益大，温漂小，结构简单。采用体积小，漏电小的积分电容，使得积分误差小。

积分器在 $t=qT$ 求得的互相关值 $R_{xy}(qT)$ ，就用积分器自己保持着。其保持电路，就是在积分器的输入端加一个场效应管 T_B ，它象开关一样，开关打开，积分器的输入端断路，积分器的输出值保持在断开瞬间的数值。开关接通积分器工作，其电路如图27所示。在予扰动一节中，曾指出要求互相关运算的时间比对系统扰动的少一个周期，用保持信号 U_{BCh} 控制场效应管 T_B 实现系统的予扰动，其控制波形如图28所示。

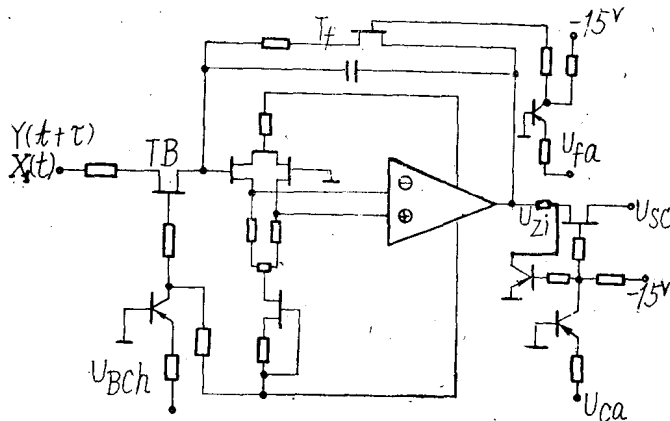


图27 积分保持放电电路

5. 积分电容放电和采样

测出系统的脉冲响应, 就是求出 $y(t + \tau)$ 与 $x(t)$ 的互相关函数, 即计算下列积分

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{qT} \int_0^{qT} y(t + \tau)x(t) dt$$

对于一个特定的 τ 值, 例 $\tau = \tau_1$, 图27所示, 积分器输出为:

$$\begin{aligned} \overline{R_{xy}(\tau_1)} &= \frac{1}{RC} \int_0^{qT} y(t + \tau_1) x(t) dt \\ &= U_{ji}(qT) - U_{ji}(0) \\ &= U_{ji}(qT) \quad (3-3) \end{aligned}$$

其中 $U_{ji}(t)$ 是积分器的输出值, 初始条件为 $t=0$, $U_{ji}(t)=0$, 可见积分器从 0 开始至伪随机信号 q 个周期这段时间对 $y(t + \tau_1)x(t)$ 积分, 在 $t=qT$ 时刻积分结果 $U_{ji}(qT)$ 便是对应 $\tau = \tau_1$ 时之 $\overline{R_{xy}(\tau_1)}$ 值。

我们只需要 $t=qT$ 瞬间的积分结果, 对于 0 至 qT 这一段时间的积分值并不需要, 因此要求把 $t=qT$ 瞬间的积分值, 保留一段时间 ΔT_B , 使之把 $U_{ji}(qT)$ 值采样出来, 以便在记录仪上进行记录, 与此同时, 采样完毕后使积分器上积累的电荷迅速放掉使积分器恢复到零初始状态, 在下一个周期开始积分之前, 积分电容上不积累电荷。为了达到上述目的, 要作到两点:

(1) 积分器完成 q 个周期的积分之后, 要准确的使在 ΔT_B 段时间积分器输入端开路即场效应管 T_B 不通, 并在 ΔT_B 段时间积分器输出 $U_{ji}(t)$ 到达总输出端 U_{sc} 。(2) 积分值 $U_{ji}(qT)$

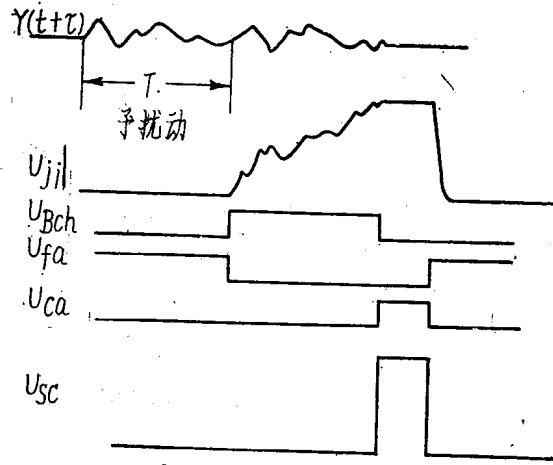


图28 积分保持放电时序图

保持 ΔT_B 段时间后, 积分器上积累电荷应当迅速放掉, 为此, 在积分电容上并联一个场效应管 T_f , T_f 也是起开关作用, 在 0 至 $(qT + \Delta T_B)$ 段时间, T_f 打开, 积分器正常工作, 在 $qT + \Delta T_B$ 瞬间以后 T_f 导通, 电容器放电, 放电一段时间后, T_f 又截止, 积分器又正常工作。放电信号 U_{fa} 与采样信号 U_{ca} 由图28得出。

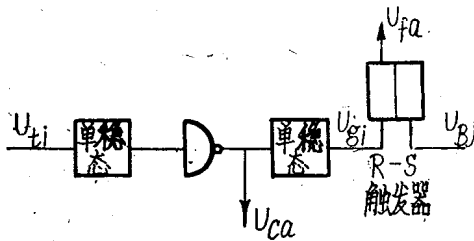


图 29

U_{Bch} 由图13得出。

四、相关函数及脉冲响应函数的计算

伪随机实时相关仪用于实现(1-9)式互相关运算, 并利用 $R_{xy}(\tau)$ 来估算系统的脉冲响应函数 $g(\tau)$ 。为了得出 $g(\tau)$, 还必须求出自相关函数 $R_{xx}(\tau)$ 的三角形面积 A , 并用(1-11)式数据处理。为了实现(1-9)式运算, 相关仪内部采用了各种电路, 下面叙述按仪器内部结构得出 $R_{xx}(\tau)$, $R_{xy}(\tau)$ 及 $g(\tau)$ 。

1. 自相关函数的计算

伪随机信号发生器产生的 $x(t + \tau)$ 具有对称的正负电压 $\pm a$, 把 $x(t + \tau)$ 直接引入到相关