

一种低频噪声发生器的试制*

吴 枕 江

摘 要

本文讨论了一种采用放射性物质作为噪声源的低频噪声发生器。这种噪声发生器能够输出四种噪声,即:随机脉冲序列、随机方波、正态噪声及瑞利噪声,并且足够大和比较稳定。

一、仪器的工作原理

本仪器主要是为自动控制系统统计动力学的设计而设计制作的。由于研究对象的要求,希望仪器能产生在20—30赫内有均匀频谱的正态噪声,最好在每秒几周内具有均匀频谱的瑞利噪声,以及随机脉冲序列,随机方波等讯号;且要求输出大,平稳性好。为此,在该仪器中采用了放射性钴作为初始噪声源。由于它的半衰期较长,在一定时间内可以认为微粒的放射规律不变,且不受其他化学与物理等外界因素的影响,故用这种方法得到的噪声输出是较平稳的。

本仪器可以输出四种噪声,具有如下指标:

随机脉冲序列 脉冲的出现服从泊松分布律,在单位时间内出现的脉冲个数平均是1600个/秒左右,其值可以改变。脉冲的形状大致是均匀的,幅度约20伏,宽度约10微秒,为非对称输出形式。

随机方波 输出值为 ± 100 伏,是对称输出形式,方波的转换规律同上。

正态噪声 振幅分布规律为正态律,平均值近于零,均方根值 $\sigma = 15.3$ 伏,在25赫以内有均匀频谱,为对称输出形式。

瑞利噪声 振幅服从瑞利分布律, $\sigma = 16.1$ 伏,在2.06赫以内有均匀频谱,为非对称输出形式。

仪器的原理方块图如图1所示。

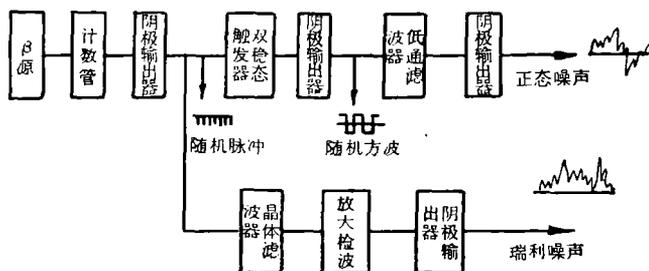


图1 原理方块图

* 本文曾于1965年7月在中国自动化年会上宣读,修改稿于1966年2月收到。

钴-60 放射的 β 粒子由 CTC-6 计数管计数而形成随机负脉冲(第一种噪声), 它的出现和 β 粒子相同服从泊松分布律。负脉冲经阴极输出器输出至双稳态触发器, 再经对称的阴极输出器得到对称的随机方波(第二种噪声), 它的转换规律同上。随机方波的相关函数是:

$$R(\tau) = u^2 e^{-2\lambda|\tau|},$$

式中, u 是方波正(或负)的电压跳变, λ 是平均每秒转换次数。其谱密度是:

$$S(\omega) = \frac{u^2}{\lambda\pi} \frac{1}{1 + T_\lambda^2 \omega^2},$$

式中 $T_\lambda = \frac{1}{2\lambda}$, 这和白色噪声通过时间常数为 $T_\lambda = \frac{1}{2\lambda}$ 的滤波器所得到的频谱有同一形式。本仪器中 $\lambda = 1650$ 个/秒, 故可认为方波频谱在 $f = \frac{2\lambda}{2\pi} = 522$ 赫内基本上是均匀的。

将随机方波加至低通滤波器, 并选择滤波器的时间常数 T_ϕ 使之 $T_\phi \gg T_\lambda$, 则输出就成为正态噪声(第三种噪声)。从随机脉冲序列中滤出通带很窄的一部分噪声, 就得到窄带正态噪声。将它放大检波, 则得到瑞利噪声(第四种噪声)。仪器所用的是窄带晶体滤波器。

二、线路说明

仪器的具体线路如图 2 所示。放射性元素采用钴-60, 计数管采用 CTC-6, 其正常

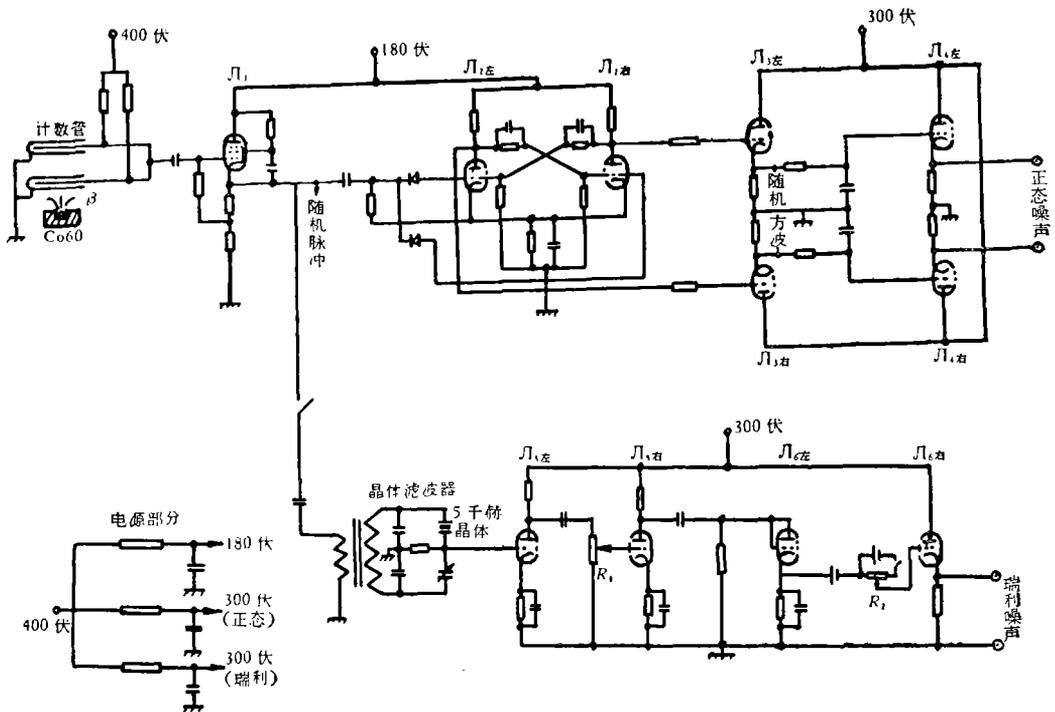


图 2 低频噪声发生器线路图

工作的最大脉冲计数为 1000 个/秒。为了提高 λ 值,采用两管并联后 λ 可达 1650 个/秒。改变放射源到计数管的距离,或在两者之间插入不同的阻挡物,即可改变 λ 值。选择 λ 值时,要根据对正态噪声的通带(也就是低通滤波器的通带)的要求来考虑。一般使 $T_\lambda \left(= \frac{1}{2\lambda} \right) < 10T_\phi$ 就可以了。直接将方波微分,即可用脉冲计数器读得 λ 的值。

计数管的工作电压选用 400 伏。为使计数管计数效率高,性能好,要求负荷电阻在 5—10 兆欧,寄生电容小于 10 微微法,故在仪器中采用一级阴极输出器 J_1 隔离。随机脉冲直接从阴极输出器输出,它耦合至晶体滤波器后,得到窄带噪声,耦合至双稳态触发器 J_2 后,得到随机方波。为使方波的正负电压跳变相等,可将双稳态触发器的板极负载调整使之对称。跳变电压应尽可能大一些,以保证有较大的输出。为了保证得到平均值为零的正态噪声,而采用了对称的阴极输出器 J_3 , 对称的随机方波可以从这里输出。两个阴极输出器后面接有对称的低通滤波器。由于滤波器的时间常数 T_ϕ 约为 $T_\lambda \left(= \frac{1}{1650 \times 2} \right)$ 的 17 倍,即 $T_\phi \gg T_\lambda$, 故可保证振幅分布服从正态律。两个滤波器电容上的电压变化刚好相反,用对称阴极输出器 J_4 和它耦合,就可获得平均值为零的正态噪声。晶体滤波器的频率特性很窄(图 3)。晶体的谐振频率选得较低(5 千赫),主要是考虑随机脉冲在低频端

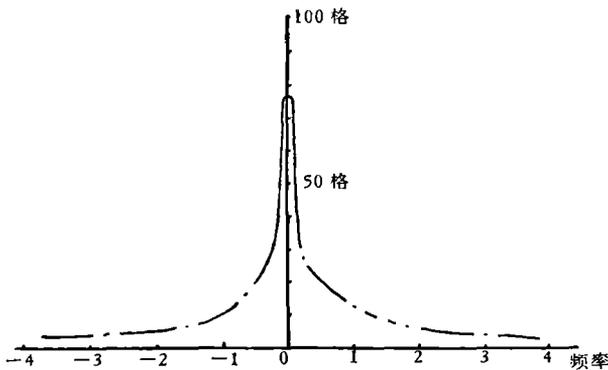


图 3 晶体滤波器频率特性曲线

在输入固定的情况下,用示波器测得的曲线。横坐标是频率刻度,每单位刻度合 0.3125 赫;纵坐标是示波屏上的格数。为了方便起见,把晶体滤波器频率特性的中心频率(5 千赫)标为零。

的讯号较大,同时可以得到较窄的通带。检波器由 $J_{6\text{检}}$ 组成,其参数要选择得当,如检波器负载的时间常数太小,则不容易把载频滤掉,达不到检波的目的;如时间常数太大,则又有可能使检波器由于惯性大而跟不上被检讯号包络的变化,产生失真。当选好检波器负载 $R = 1$ 兆欧后,经概率分布仪测试的结果 C 在 0.005—0.03 微微法范围内分布都服从瑞利律(在本仪器中选用 0.025 微法)。 $J_{6\text{检}}$ 用作阴极输出器。为了得到和检波器电压相同的输出,要求此阴极输出器在无输入时输出亦为零,而且输入输出特性是线性的,也就是要求阴极输出器的工作点刚好在管子的截止点上。为了达到此目的,在 $J_{6\text{检}}$ 的输入迴路串接一可调偏压(由电池供给)。该偏压可由电位计 R_2 调节,使之当检波器无输入时阴极输出器刚好截止,输出为零。对阴极输出器静态特性的测试结果表明,它的特性在 0—60 伏左右都是线性的,从而满足了要求。瑞利噪声输出的调整可用改变放大器增益(调整

R_1 电位计)来达到。

本仪器所用电源只需一个 400 伏电压就够了,其他电压可用阻容滤波器降压得到(见图2)。所用的电源是超低频系列的补偿稳压器。

三、正态和瑞利噪声的测试结果

1. 正态噪声

用概率分布仪测得的微分分布如图 4 所示。化成积分分布后标在正态噪声概率检验

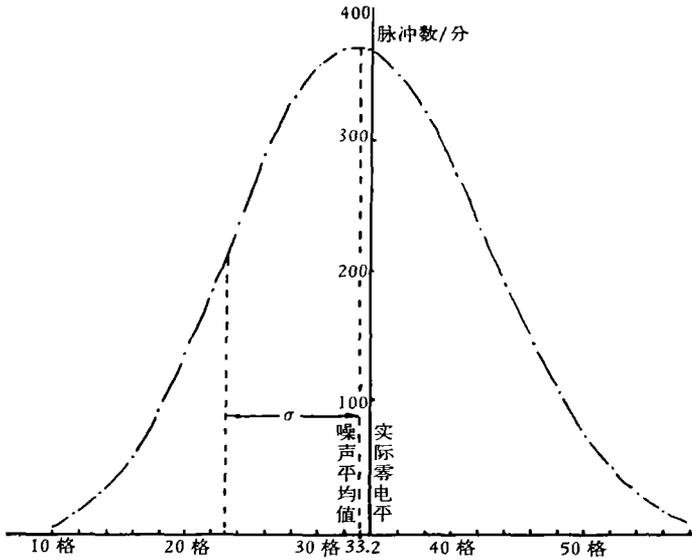


图 4 用概率分布仪测得的微分分布

道宽 2 格,测时为一分钟,纵坐标是脉冲数/分,横坐标为概率分布仪的电平选择(格),每格相当于 1.78 伏。

表上(图 5 中的点线),可以连成一直线,因此可以认为噪声符合正态分布规律。对噪声曾拍摄过照片(如图 6 所示),照片上每隔 $\frac{1}{29.45}$ 秒采一个样点,共采得 1616 个点。把分析所得积分分布标在同一个图上(图 5 中的叉线),也证明它符合正态分布规律。根据概率检验表的分析结果,分布仪所测曲线的平均值为 $\xi = 1.5$ 伏,均方根值为 $\sigma = 18.9$ 伏。按照片所得曲线, $\xi = 2$ 伏, $\sigma = 15$ 伏。

对照片每隔 $\Delta = \frac{1}{29.45}$ 秒采集一个样点,共采得二千多个样点,然后通过计算可得如图 7 所示的归化相关函数 $R^*(\tau)$,它在 20Δ 以内就基本上可以看出其规律。在求相关函数时,得出 $\xi = 0.58$ 伏, $\sigma = 15.3$ 伏。归化相关函数可以用 $e^{-\frac{\tau}{1.8\Delta}}$ 来逼近,两者之间的误差在 3% 范围内波动,这可以看成是由于观察时间有限所引起。 $e^{-\frac{\tau}{1.8\Delta}}$ 中的 $\Delta = \frac{1}{29.45}$ 秒,置换后得 $e^{-163.6\tau}$,它所对应的频谱函数是:

$$S(\omega) = 0.915 \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{163.6}\right)^2} \left[\frac{\text{伏}^2}{(\text{弧/秒})} \right].$$

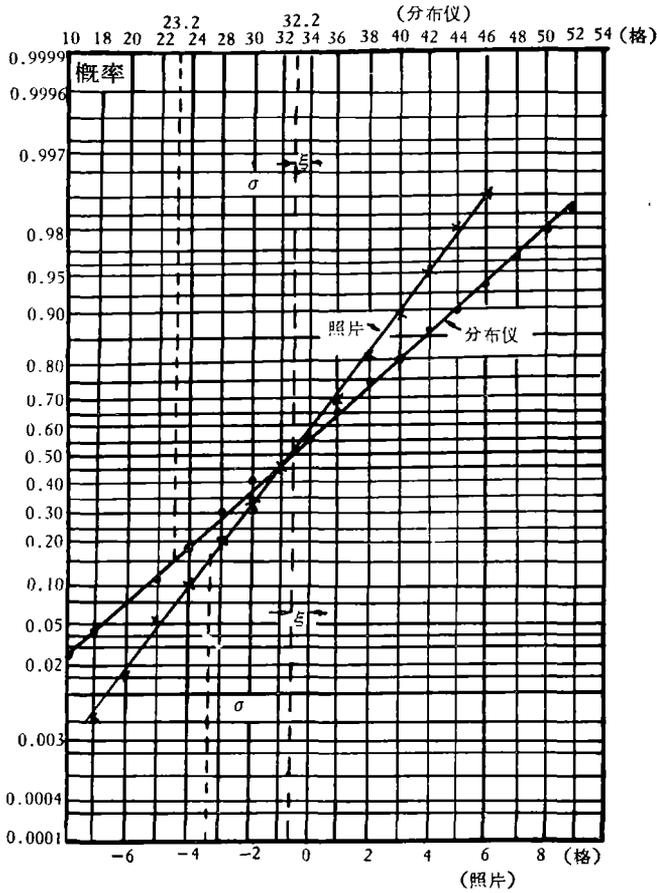


图5 正态噪声概率检验表
照片分析结果和分布仪测试结果。

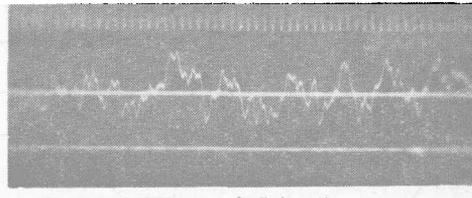


图6 正态噪声照片
中间粗直线是实际零电平,下面粗线为40伏电压标准,时标为240赫。

由上式可以看出频谱在 ω 从 0 到 163.6 弧度/秒 (即 f 从 0 到 25 赫) 之间是均匀的, 因此基本上达到了要求。

由于观察时间有限, 所得相关函数与实际值之间有一定误差。设相关函数为典型的指数衰减曲线 $e^{-\frac{|r|}{T_1}}$, 观察时间为 T , 则根据文献[3], 由于观察时间有限所引起的误差方差 $\sigma^2 \leq \frac{2T_1}{T}$ 。本实验中 $T_1 = 1.8\Delta$, $T = 2000\Delta$, 故 $\sigma \leq 4.25\%$, 而实际的波动是在 3% 范围内, 其数量级基本相符。

对正态噪声一共用了两种方法求得 ξ 和 σ 。因为用分布仪时没有核对 λ 值,而且分布仪存在一定的非线性等误差,故以照片分析为准 ($\lambda = 1650$ 个/秒)。在照片分析中又用相关函数的分析结果,这是由于求相关函数的分层比求分布时密一倍,因此结果较为准确。

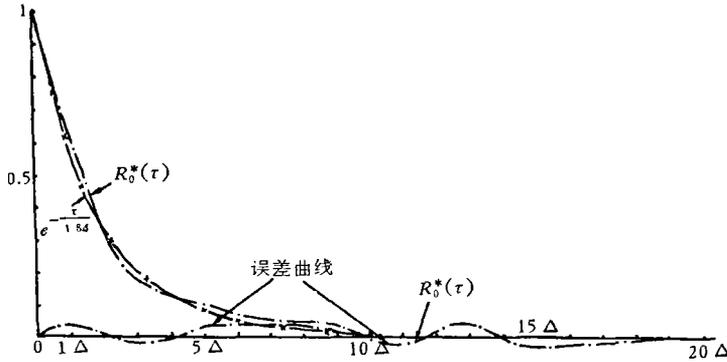


图7 正态噪声归化相关函数

采样间隔 $\Delta = 1/294.5$ 秒,共采样 2000 个,分层 35 格,每格相当实际电压 2.76 伏。 $\sigma = 15.3$ 伏, $\xi = 0.58$ 伏。

2. 瑞利噪声

用概率分布仪测得的微分分布如图 8 所示。将其积分分布标在瑞利噪声概率检验表 (图 9) 上,可以连成一直线,这就证明此噪声符合瑞利分布规律。图 10 是瑞利噪声的照片。对照片每隔 $\Delta = \frac{1}{29.4}$ 秒采一个样点,共采得 2000 多个点。按照和上述同

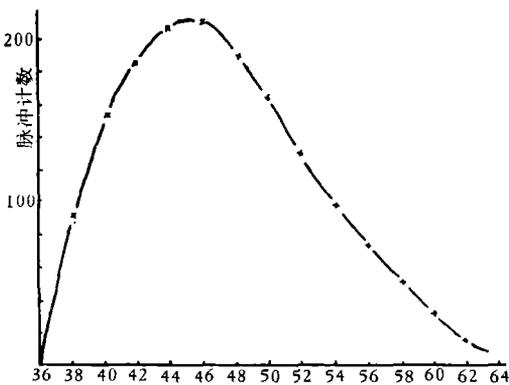


图 8 概率分布仪测得的微分分布(瑞利噪声)

分布仪的实际零电平为 36,道宽 2 格,横坐标每格相当于 2.45 伏,纵坐标是 4 分钟内测得的脉冲计数。

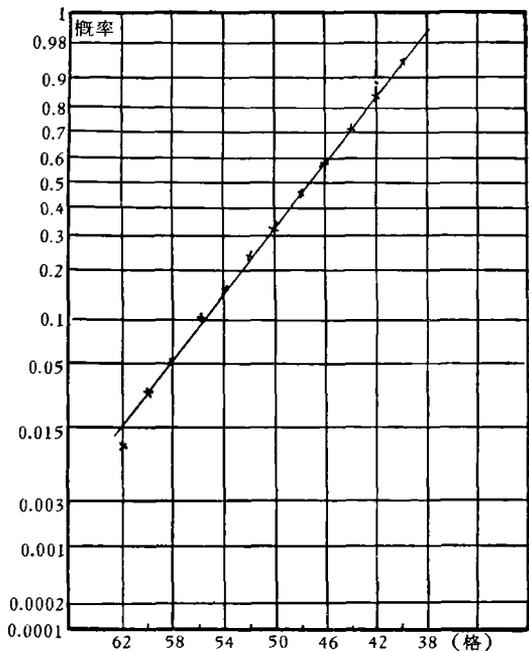


图9 瑞利噪声概率检验表

样的方法用计算机求得其归化相关函数 $R^*(\tau)$ (图 11)。在 50Δ 以内就足以看出其规律。相关函数可用一指数衰减曲线 $e^{-\frac{\tau}{2.3\Delta}}$ 来逼近,它和实际的 $R_0^*(\tau)$ 曲线的误差在 5% 范围

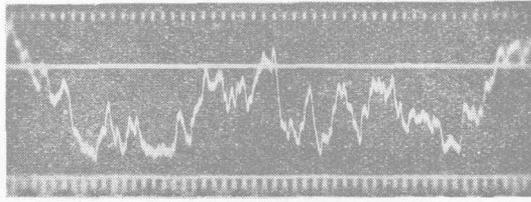


图 10 瑞利噪声照片

下面的粗直线是实际零电平, 上面的粗直线为 48 伏电压标准, 时标为 20 赫.

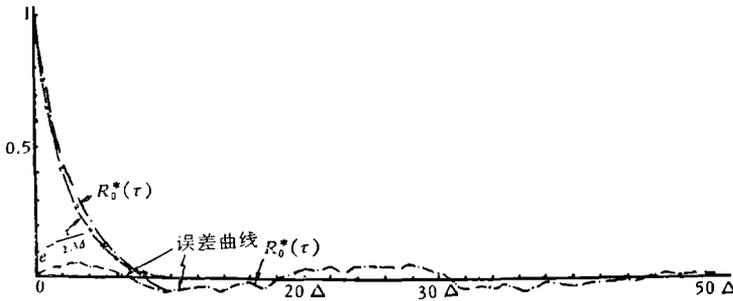


图 11 瑞利噪声归化相关函数

采样间隔 $\Delta = 1/29.4$ 秒, 共采样 2000 个, 分层 25 格, 每格合 3.1 伏,
 $\xi = 12.8 \times 3.1 = 39.5$ 伏, $\sigma = 5.2 \times 3.1 = 16.1$ 伏.

内波动(见图 11), 且无严格规律. 这也是由于观察时间(采样数目)不够所引起. 在求相关函数时, 得出 $\xi = 39.5$ 伏, $\sigma = 16.1$ 伏. 相关函数 $e^{-\frac{\tau}{2.3\Delta}}$ 所对应的谱密度函数为:

$$S(\omega) = 12.8 \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{12.8}\right)^2} \left[\frac{\text{伏}^2}{(\text{弧/秒})} \right],$$

因此, 可以认为频谱在 f 从 0 到 $\frac{12.8}{2\pi} = 2.06$ 赫之间是均匀的.

四、结 语

本仪器经实验测试结果表明: 指标基本上满足要求, 工作较稳定, 可以实际运用. 本仪器在产生瑞利噪声方面作了一些尝试, 但不足之处是瑞利噪声的通带调整问题还没有来得及详细考虑, 还需要在窄带滤波器上想办法. 滤波器的通带改变了, 瑞利噪声的通带也就改变了. 改变滤波器负载的特性和晶体的 Q 值及特性, 都可以达到此目的.

正态噪声的通带对前述要求而言已经够了, 如想再宽一些, 必须提高 λ 值, 这可以通过采用更好一些的放射源和计数管, 或采用多管并联的方法来实现.

正态噪声零平均值的调整主要在于双稳态触发器的平衡. 用一个数千欧的电位计跨接在它的两个板极电阻上, 中间接电源, 将不难进行平衡的调整.

如果配用半衰期比较短的放射性元素, 则可得到不平稳的随机过程.

先后参加本仪器研制工作的有王焕文、孙仲康、梁灼根、潘太权等同志, 仪器的制成,

是一个集体劳动的结果。

参 考 文 献

- [1] 劳颂康等, 平稳随机过程一维概率分布的测定, 工学学报, 1965 年.
- [2] Тегерич, Н. М., Генераторы шума, Госэнергоиздат, 1961.
- [3] J. H. 兰宁, R. H. 白亭, 自动控制中的随机过程, 科学出版社, 1963.

A LOW FREQUENCY NOISE GENERATOR

HUO ZUNG-KIANG

A low frequency noise generator using radioactive material as its noise source is discussed in this paper. Four types of noise, i.e., the Gaussian, Rayleigh, random impulses and random square wave signals with poisson distribution can be obtained. The output of the generator is sufficiently large and stationary for analogue computation.