

原子核計數器的 放大器中的 訊号、噪声和分辨率

A.B. 格列士皮

科学出版社

原子核計數器的放大器中的 訊号、噪声和分辨率

A. B. 格列士皮 著

陈 奕 爱 譯

謝 家 磨 校

科 学 出 版 社

1 9 6 3

SIGNAL, NOISE AND RESOLUTION
IN NUCLEAR COUNTER
AMPLIFIERS.

A. B. GILLESPIE

Pergamon, 1953

內 容 簡 介

本书简要但深入地討論了原子核計数器(主要是电离室)所用的放大器中的訊号、噪声、分辨率和灵敏度的問題。有理論分析,也有实验数据。

全书共分6章。分析了管子和电路各种噪声的来源,放大器的時間常数对訊号和噪声的影响。闡明訊号噪声比、分辨率和放大器頻寬的相互关系。指出要达到最好工作条件,应如何选择放大器的参数与管子。最后描述了正比計数器和閃爍計数器的使用。

本书可供从事于原子核計数器的物理实验工作人員和核电子学(尤其作放大器)的工作人員閱讀。

原子核計数器的放大器中的
訊号、噪声和分辨率

A. B. 格列士皮 著

陈 奕 爱 譯

謝 家 鑒 校

*

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1963 年 1 月第 一 版

书号: 2665 字数: 116,000

1963 年 1 月第一次印刷

开本: 350×1168 1/32

(京) 0001—2,000

印张: 4 11/16

定价: 0.80 元

編 者 序

这些专論的目的是要报导在电子学和应用物理学中所做的研究。在这些方面的工作正在繼續迅速地扩大,人們認識到:把資料以可用的形式加以整理和传播对所有那些积极从事于这些方面工作的人員是极为重要的。专論将由各方面的专家来写,并且尽快付印,以便这些对新工作的报导能够又快又广地获得应用。

只要实际可行,专論在篇幅上将要保持簡短,以便使所有那些对电子学有兴趣的人在一个精炼而又集中的形式中找到对他們工作必需的主要材料。

D. W. 弗 萊

作 者 序

原子核科学的战时重大进展和随后政府与工业界对研究和发展的扩大引起了对与原子核计数器共用的电子放大器的大形增加的需要。

这种放大器在基本电路设计上和那些在电视上与雷达上所使用的放大器并无主要的差别，而题目的这个方面已广泛地为出版了的文献所包括。不过，影响原子核计数器的放大器的讯号噪声比和分辨率的因子却不是很好地被了解或者是发表过的（见本书末从[1]到[6]在内的参考资料），就是由于认识到这个需要才促使作者来写目下这本专著。

在准备本书时，作者尝试对一远非简单的题目给以包罗丰富的但主要却是简单的处理。这样就有必要在第1, 2和6章内引入曾经在别处发表过的有关原子核计数器运用的材料。不过，论及噪声、讯号噪声比、分辨率和灵敏度的第3, 4和5章却包括许多以前不曾发表过的理论和实验的数据。此外，相信在第5章内所给出的对用于总活性测量的放大器的灵敏度的分析和它的实验证明也含有许多独创的特点。

这本书主要将使两类读者感到兴趣。第一，就是那些将要初次跨进原子核科学的大门并且对原子核计数器的放大器的讯号、噪声及分辨率这个题目正在寻求紧凑而又及时的叙述的年青大学毕业生。其次就是对这种放大器的灵敏度，速度限制和在一特殊实验中如何从他的设备获得最佳的工作情况感兴趣的有经验的原子核物理学家或放射化学家。同时希望有关噪声和讯号噪声比的许多一般性知识会使较广泛的读者感到兴趣。

作者希望向 J. 好列特(Howlett)博士和 W. 沃肯梳(Walkinshaw)先生和 P. M. 伍德瓦得(Woodward)先生表示他的谢意。对前一

位是为了在理論曲綫中計算了許多点，对所有三位是为了在訊号
噪声比的一般問題上启发性的討論。也还要感謝 K. 勘弟阿
(Kandiah)先生閱讀本书的稿本和作出許多宝貴的建議，并感謝 D.
泰勒(Taylor)博士在本书写作中的不断支持。

A. B. G.

阿冰敦(Abingdon)

1953 年 1 月

符 号 目 录

(按书中使用次序)

C	室电容, 法拉
k	玻耳兹曼常数, 焦耳/°K
T_0	绝对温度, °K
e	电子的电荷, 库伦
D	电离室的极间距离, 厘米
d	电离处与集电板之间的距离, 厘米
T	集电时间, 秒
N_p	原始离子对的总数
R	室的饋电电阻, 欧姆
$\bar{n}$	讯号脉冲的平均出现率, 脉冲/秒
δt	小的时间间隔, 秒
$p_{1,2,3}$ 等	1, 2, 3 等个脉冲在时间 δt 内出现的几率
V	在室上的电压, 伏特
V_g	栅极电压, 伏特
g	在带栅的室内的电离区
h	在栅和集电板之间的区域
ΣC	总输入电容, 法拉
$T_1 = C_1 R_1$	放大器的微分时间常数, 秒
$T_2 = C_2 R_2$	放大器的积分时间常数, 秒
G	放大器的增益
Q	讯号电荷, 库伦
V_0	在室上的脉冲电压, 伏特
e	自然对数的基数

t	時間变量,秒
$V_{(0-T)}$	在 $0-T$ 時間內的脉冲电压,伏特
$V_{(T-\infty)}$	在 $T-\infty$ 時間內的脉冲电压,伏特
∞	无限大
V_m	最高脉冲电压,伏特
T_r	分辨時間,秒
$\frac{v^2}{\delta f}$	噪声电压的譜密度,伏特 ² -秒
$\frac{i^2}{\delta f}$	噪声电流的譜密度,安培 ² -秒
v_i	方均根热噪声电压,伏特
f	頻率,周/秒
π	常数
$\omega=2\pi f$	角頻,弧度/秒
f_1	低頻限度,周/秒
f_2	高頻限度,周/秒
i_s	方均根散粒噪声电流,安培
I_a	阳极电流,安培
F^2	空間电荷滑順因数
g_m	互导,安培/伏
v_s	方均根散粒噪声电压,伏特
I_s	簾柵极电流,安培
I_c	阴极电流,安培
i_g	方均根柵流噪声电流,安培
I_g	柵流,安培
I_{g+}	电子柵流,安培
I_{g-}	反向柵流,安培
v_g	方均根柵流噪声电压,伏特
V_a	阳极电压,伏特
V_s	簾柵极电压,伏特
V_A	灯絲电压,伏特

v_f	方均根閃变噪声电压, 伏特
τ	电子过渡时间, 秒
J_1	常数
R_a	阳极电阻, 欧姆
μ	放大因数
ρ	阳极阻抗, 欧姆
J_2	常数
I	通过电阻的电流, 安培
A_1	在放大器输出处的特殊脉冲幅度, 伏特
E_1	相当于 A_1 的能量, eV
x	离高斯分布曲线中心的位移, 伏特
v	方均根噪声电压, 伏特
S_1	相对于计数坪的 { 訊号級 訊号級, 伏特 噪声級
S_2	
N_o	
C_g	柵极到阴极电容, 法拉
C_s	簾柵极到柵极电容, 法拉
C_a	阳极到柵极电容, 法拉
v_{pen}	五极管的方均根散粒噪声电压, 伏特
$\frac{S}{N_{(散粒)}}$	訊号对散粒噪声比例
v_{tri}	三极管的方均根散粒噪声电压, 伏特
M	級增益
v_a	在阳极上的方均根散粒噪声电压, 伏特
n	并联的管子数
$\frac{S}{N_{(柵流)}}$	訊号对柵流噪声比例
$\frac{S}{N_{(閃变)}}$	訊号对閃变噪声比例
θ	T_1/T_2 比例
X	$[T_1 T_2]^{1/2}$ 对 T 的关系的常数

目 录

編者序.....	v
作者序.....	vi
符号目录.....	ix
1. 引言.....	1
2. 电离室产生的訊号的性質.....	3
2.1 离子室.....	3
2.2 电子室.....	9
2.3 放大器的時間常数对脉冲幅度和脉冲寬度的影响.....	11
3. 管子与电路噪声.....	16
3.1 概論.....	16
3.2 热噪声.....	17
3.3 散粒噪声.....	20
3.4 栅流噪声.....	24
3.5 閃变噪声.....	34
3.6 其他形式的噪声.....	38
3.6.1 感应栅极噪声.....	38
3.6.2 在第一个管子的阳极負載內的热噪声.....	40
3.6.3 半导体內的电流噪声.....	40
3.6.4 在第一个管子的阳极負載內的电流噪声.....	41
4. 訊号噪声比.....	42
4.1 概論.....	42
4.2 三极管与五极管的訊号噪声比.....	45
4.3 訊号噪声比、分辨時間和放大器頻寬之間的关系.....	51
4.4 輸入管和运用条件的选择.....	57
4.5 最佳可能訊号噪声比.....	58

4.6 集电時間变化的影响的减小.....	60
4.7 利用中肯阻尼的振蕩綫圈的脉冲成形.....	61
4.8 利用短路延迟綫的脉冲成形.....	62
5. 灵敏度.....	69
5.1 在能量測量中放大器的灵敏度.....	69
5.2 在总活性測量中放大器的灵敏度.....	76
6. 正比和閃爍計数器.....	93
6.1 正比計数器.....	93
6.2 正比計数器集电時間的实驗測定.....	96
6.3 在弱电离子粒子的强本底存在下的正比計数.....	98
6.4 閃爍計数器.....	106
6.5 为得最佳訊号噪声比的閃爍計数器的頻寬.....	109
参考文献.....	111
附录.....	113
索引.....	135

1. 引言

原子核計数器可以定义为：会探测和数出放射蜕变产生的单个带电粒子的任何装置。今天最常用的原子核計数器是：电离室、正比計数器、盖格-弥勒計数器和閃爍計数器。就目下这本专論而言，盖-弥計数器自成一类。它給出的輸出脉冲，其幅度不倚賴于带电粒子在計数器內所消耗的能量，它实际上不需要真空管放大；并且由于在每个脉冲后面跟随着的长的死時間，它不能用于很高的計数率上。为了这些原因，本书不討論盖-弥計数器。

在上面所提到的其他計数器中，电离室和正比計数器两者都是气体电离装置，在它們里面，高速带电粒子的能量消耗在使計数器內的气体产生电离。产生每个离子对平均需要 30 电子-伏特 (eV) 的能量。在这个电离过程中所释放出来的电子电荷被一人为地建立起来的靜电場扫送到計数器的板极上去，并且在計数器的电容上产生小的电压阶跃或脉冲。正比計数器是电离室的变型，在正比計数器內，使用高得多的場强来产生次級电离。其結果就是形成显著增大的輸出脉冲，其幅度与产生的原始离子对的数目成比例。

另一方面，閃爍計数器探测高速带电粒子是利用它在一磷光体内所产生的閃光来进行的。带电粒子的能量消耗在使磷光体内产生光子，每一光子所需的能量和在气体內每一离子对消耗的能量同一数量級。这些光子被光电倍增管的光敏阴极轉換为光电子，而这个电流脉冲随之又在光电倍增管最后阳极的負載上产生电压脉冲。

用上面的原子核計数器所探测出来的高速带电粒子可以是一个放射蜕变的原始产物，其典型例子就是 α 与 β 粒子。另一方面，它們可以从原始組成物中接受到能量的次級粒子，这里的例子就是由 X 和 γ 射綫产生的电子，和由快中子产生的质子。此外，一

些原始組成物可以用來引起次級原子核反應，在反應中產生帶電粒子。然後這些帶電粒子再被原子核計數器探測。例子就是從慢中子而來的 α 粒子和從慢或快中子而來的裂變碎片。

為作精密的定量測量，電離室在很多年中在這一門內曾經領先。不過，最近正比計數器已經變得更为流行了；並且在許多計數器的應用上，以前是用電離室來完成的，現在就用正比計數器了。正比計數器的流行主要是由於增大了的輸出脈沖，它使得在相當大的程度上免除了放大器的噪聲；雖然，次級電離過程也確實引進了性質不同的額外的問題。在最近幾年中，人們對閃爍計數器各種用途的探討予以很大的重視。這類計數器的實際應用之所以成為可能，幾乎完全是由於現代高放大倍數的光電倍增管的發展。

不過，事實上對許多應用而言，尤其是在需要甄別能量的地方，電離室還是最重要的。為了這個原因，再加上在使用這類計數器時，放大器噪聲是最關重要的這個事實，這本書的主要部分就專用於考慮與電離室同用的放大器內的訊號對噪聲的問題。對這方面的強調以後會證明是正確的，因為在第六章就將指出，對電離室技術的深刻的了解，就足以對付在使用正比計數器和閃爍計數器時所發生的同樣性質的所有問題。

脈沖放大器的作用就是接受原子核計數器所產生的微小的電壓脈沖，並且把這些脈沖放大到通常在 5 到 50 伏這個範圍內的水平。在這樣水平時，脈沖就適合於驅動定標器和記錄器、計數率表或者分析器。後面的這些儀器完成對脈沖數率和脈沖幅度分布的測量；並且從它們中間可以獲得有關放射性物質存在的數量和有關放射出來的輻射的能量的資料。從實際觀點出發，以後要討論到的脈沖放大器的唯一的設計特點就是：輸入級所用的管和零件的頻寬和噪聲特性。在輸入級以後的电子管電路的類型就不詳述了——這乃是一個在本專論範圍以外的題目。不過，讀者應該了解，所考慮的放大器都是視作根據慣用的接收管來設計的，這包括從幾百周每秒到幾兆周每秒的總的頻率範圍，和從為閃爍計數器用的約 10^3 到為電離室用的約 10^6 的最高電壓增益。

2. 电离室产生的讯号的性質

2.1 离子室

在所有原子核計数器中，最简单的就是平行板充空气离子室*。这个計数器基本上为两块平行的金属板所构成，这两块板为空气隔开，并且具有自附电容 C ，这电容此后就称作室电容。当一由放射蜕变产生的高速带电粒子穿过板間的空间时，沿着它軌迹上的空气分子就被电离了；为每一次的电离碰撞，粒子損耗約 30eV 的能量。正离子和电子虽被产生，但因为室内充有空气，电子立刻就被氧原子俘获而形成負离子。当板間不存在靜电場时，两种离子以等于 $\frac{3kT_e}{2}$ 焦耳的平均騷动能量作不規則的移动，并且在大約 300 秒^[7] 的时间后就终于复合了。在上面的数式中，

k = 玻耳茲曼常数 (Boltzmann's constant) = 1.37×10^{-23} 焦耳/ $^{\circ}\text{K}$
 T_e = 绝对温度。

用电池或类似的电压源在板間加上一个电位差和因而建立起来的电場給予离子朝着板极的漂移分速，正离子和負离子当然向着相反的方向移动。当所加的电位增加时，离子的复合减少，直到在一个称作室的飽和电压的临界数值以上时，就沒有复合发生了，并且所有形成的离子被收集在板上。漂移速度取决于单位时间内靜电場供給离子的能量与因为和中性气体分子碰撞而損失的能量之間的平衡情况。这样，漂移速度就与靜电場的强度成正比而与气体压力成反比。在空气中，在标准温度和气压情况下，当場的强度为 1 伏/厘米时，正負离子的漂移速度大約为 1.3 厘米/秒。

* 非空气的充气离子室在这节內就不描述了，因为这样的室是很少用的，并且比起那种开放于大气中的简单类型并无优越之处。

假設室的一个板是有效地接地的，我們考虑一下另一个板的充电情况，这个板此后就称为集电板。假如場的強度是均匀的，正如在一个平行板室內的情况，那么，在离子形成的一瞬間，一个离子对就在集电板上感应出数量为 $\frac{e(D-d)}{D}$ 的、相等的正和負的电荷，其中：

e = 一个电子上面的电荷 $= 1.59 \times 10^{-19}$ 庫伦

d = 离子对与集电板間的距离

D = 板間距离。

当离子相互离开的时候，由于那个向着集电板移动的离子的感应电荷綫性地增加着，一直到收集完了时达到最后数值 e ；而由于后退的离子的感应电荷則綫性地减少到零。終于，在經過称作室的集电時間的一段時間 T 以后，所有的离子到达了板上；而如果 N_p 是起初产生的离子对的总数，那么在集电板上的最后电荷就是 $N_p e$ 庫伦。

如果電池是經過一个大电阻 R 連接到集电板上，以致 CR 的时间常数比集电時間 T 大許多倍的話，那么电荷 $N_p e$ 就在集电板上产生一数值为 $N_p e / C$ 的小的电压阶跃。这个电压阶跃然后按一个時間常数 CR 衰減到零，因为电荷是通过 R 漏去的。

图 1(a) 表示在这样情况下工作的离子室，图 1(b) 表示在集电板上产生的典型的电压脉冲。

可以体会到：

(a) 一个电压脉冲在集电板上的出現就表示在室內有一个电离粒子存在。

(b) 如果电离粒子損失了它所有的能量使在室內产生电离，那么，电压脉冲的幅度就是粒子起始能量的度量。

脉冲放大器的作用是：接受那些可能在几微伏到几百微伏的量級的小的离子室脉冲，并且把它們放大到一个通常是 5 伏到 50 伏之間的水平；在这个水平时，脉冲数率和脉冲幅度能够由别的仪器高度精密地測量出来。

由离子室送到放大器的脉冲在時間上是不規則地出現的。如果平均的出現数率是每秒 $\bar{n}$ 个, 那么, 在一小的時間間隔 δt 秒內,

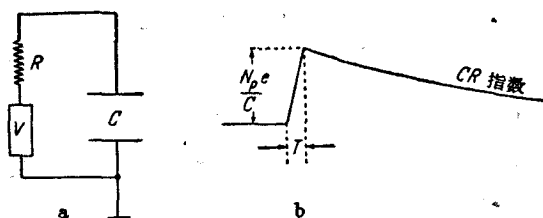


图 1 离子室的电路安排与在集电板上产生的典型电压脉冲

一个脉冲出現的几率可由泊松(Poisson)公式給出, 即:

$$p_1 = e^{-\bar{n} \delta t} \frac{(\bar{n} \delta t)^1}{1!}.$$

如果 δt 比脉冲間的平均周期为小, 亦即 $\bar{n} \delta t \ll 1$, 那么这就簡化为:

$$p_1 \approx \bar{n} \delta t.$$

同样, 两个脉冲在 δt 時間內出現的几率是:

$$\begin{aligned} p_2 &= e^{-\bar{n} \delta t} \frac{(\bar{n} \delta t)^2}{2!} \\ &\approx \frac{(\bar{n} \delta t)^2}{2} \quad (\text{当 } \bar{n} \delta t \ll 1 \text{ 时}). \end{aligned}$$

如果考虑間隔 δt 是在任何一个脉冲的起始后紧接着馬上就开始的話, 那么 $\bar{n} \delta t$ 也可以当作是每个脉冲在这个間隔內有第二个脉冲出現的几率。这个在每秒內会发生 $(\bar{n})^2 \delta t$ 次, 因而在一个時間間隔 δt 內跟在前面脉冲后面的脉冲的百分数就可以簡单地得出为 $100\bar{n} \delta t\%$ 。

从接受在時間上不規則地相隔开的脉冲这个观点来看, 而尤其是在高的平均再現率情况下, 由于大部分随后来的脉冲会在前面脉冲衰減到零以前就出現了, 每一个脉冲的长的指数式的尾巴就会造成困难。这显明地会使脉冲幅度的测量产生誤差, 并且由于紧密地重迭的脉冲被测量仪器記錄成一个单个脉冲, 也就能发

生脉冲数率的误差。要使这样的误差小,在放大器输出处的脉冲的持续时间就应该尽量短。一个室和放大器在接受高平均率的脉冲的同时,又保持幅度和脉冲数率的误差在一个低值的本领,就是这个系统的分辨率的一个度量。

要改进室和放大器联合体的分辨率,在系统的某处可以放进一个脉冲成形网络,它的主要功用就是使脉冲的后沿在室的集电时间 T 以后尽快地下降。如果在集电板上所存在的脉冲幅度与粒子能量之间的关系在放大器的输出处是保留着的话,那么,脉冲成形网络引起脉冲前沿产生重大畸变也是允许的。

最简单和最常用的脉冲成形网络就是短时间常数或所谓微分电路;它只包括两个零件——一个电容和一个电阻。其他形式的脉冲成形网络,比较显著的有中肯阻尼振荡线圈和短路延迟线,它们的灵活性较小,有着较有限的应用。在这章和以后各章里所包含的分析差不多完全是对利用电阻、电容的微分电路的脉冲成形而言的。中肯阻尼振荡线圈和短路延迟线只在第4章中讨论,在那里将指出:在已定的信号噪声比情况下,就分辨率而言,前者与微分电路是可比較的,而后者则稍胜于微分电路。

图2表示应用微分电路来使离子室的脉冲成形的情况。

在目下讨论的电离室与放大器系统内,可以把脉冲的成形放在:

(a) 离子室处,在脉冲通过放大器以前,或(b)放大器里面的某一级处。

在(a)的方法中,室电容 C 和负载电阻 R 实际上就构成了微分

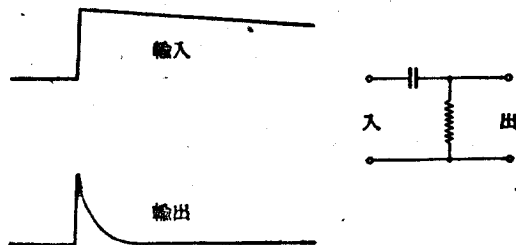


图2 利用微分电路来缩短长脉冲的持续时间