

## 光电倍增管测试方法

## Methods of measurement for photomultiplier tubes

本标准适用于具有分立倍增极的光电倍增管光电参数和特性的测试。

## 1 名词、术语

### 1.1 辐射量和光量的基本术语

#### 1.1.1 辐〔射〕能

以辐射形式发射、传播或接收的能量。

#### 1.1.2 辐〔射能〕通量, 辐〔射〕功率

以辐射形式发射、传播或接收的功率。

#### 1.1.3 辐〔射〕强度

在给定方向上的立体角元内, 离开点辐射源 (或辐射源面元) 的辐射功率除以该立体角元所得的商。

#### 1.1.4 辐〔射〕照度

照射到表面一点处的面元上的辐通量除以该面元的面积所得的商。

#### 1.1.5 光

能引起人眼视觉反应的辐射, 广义上还包括紫外和红外辐射。

#### 1.1.6 光通量

由国际照明委员会标准光度观察者评价的辐通量, 或者光谱灵敏度为标准视觉函数  $V(\lambda)$  的选择性接收器所接收到的辐通量。

#### 1.1.7 发光强度

光源在给定方向的立体角元内发出的光通量除以该立体角元所得的商。

#### 1.1.8 〔光〕照度

照射到表面一点处的面元的光通量除以该面元的面积所得的商。

#### 1.1.9 色温

在可见光区, 光源的相对辐射功率分布与全辐射体在某一温度下的相对辐射功率分布相同时, 全辐射体的这一温度称为该光源的色温。

### 1.2 核辐射探测的基本术语

#### 1.2.1 电离辐射

由直接电离粒子、间接电离粒子或由两者组成的辐射。

#### 1.2.2 核辐射源

发射或能够发射电离辐射的物质或装置。

#### 1.2.3 闪烁

由电离粒子引起的持续时间很短 (几个微秒或更短) 的发光。

#### 1.2.4 闪烁体

以适当的形式由一定量的闪烁物质组成的对电离辐射灵敏的元件。

#### 1.2.5 闪烁探测器

把闪烁体直接或通过光导与光敏器件 (例如光电倍增管) 进行光耦合所组成的辐射探测器。

**1.2.6 切伦科夫辐射**

当带电粒子在介质中的运动速度超过光在该介质中的速度时所产生的光辐射。

**1.2.7 切伦科夫探测器**

把能产生切伦科夫辐射的介质直接或通过光导与光敏器件（例如光电倍增管）进行光耦合所组成的用于探测相对论性粒子的辐射探测器。

**1.2.8 脉冲堆积**

一个脉冲叠加在前一个脉冲上引起脉冲幅度失真甚至使一些脉冲无法分辨的现象。

**1.2.9 分辨时间**

能分辨开两个相继出现的脉冲或电离事件之间的最小时间间隔。

**1.2.10 光电峰**

$X$  或  $\gamma$  辐射的能谱响应曲线的峰，它与探测物质中通过光电效应吸收的光子能量相对应。

**1.2.11 全能峰，全吸收峰**

对于  $X$  或  $\gamma$  辐射，相当于光子在探测物质中能量全部被吸收时的能谱响应曲线的峰。

注：全能峰与光电峰的不同之处在于前者考虑了由康普顿效应和电子对效应引起的全部吸收。

**1.2.12 半高宽，半峰宽**

在单峰分布曲线上纵坐标值为峰值一半的、两点的横坐标之间的距离。

**1.3 测试的基本术语****1.3.1 光电流，阴极电流**

由光辐射使光阴极发射的电流。

**1.3.2 输出电流，阳极电流**

由光辐射使光电倍增管输出的电流。

**1.3.3 线性电流**

与入射辐通量成线性关系的输出电流。

**1.3.4 饱和电流****1.3.4.1 饱和光电流，饱和阴极电流**

在恒定辐照条件下，增加光阴极与作为光电子收集极的电极之间的电压时，不变的或仅有不明显改变的光电流。

**1.3.4.2 饱和输出电流，饱和阳极电流**

在恒定辐照条件下仅增加末级电压时，不变的或仅有不明显改变的输出电流。

**1.3.5 饱和电压**

在恒定辐照条件下，对应于饱和电流的极间电压。

**1.3.6 收集电压**

第一倍增极与光阴极之间的电压。

**1.3.7 末级电压**

阳极与末级倍增极之间的电压。

**1.3.8 工作电压，阳极电压**

阳极与光阴极之间的电压。

**1.3.9 分压比**

光电倍增管诸相邻电极之间电压的相对比值，而以中间级的均匀分压电压值作为 1。

**1.3.10 前级分压比**

从光阴极到至少前面两个倍增极诸相邻电极之间电压的相对比值，而以中间级的均匀分压电压值作为 1。

**1.3.11 后级分压比**

光电倍增管最后几级诸相邻电极之间电压的相对比值，而以中间级的均匀分压电压值作为 1。

## 1.4 直流参数的定义

### 1.4.1 阴极灵敏度

#### 1.4.1.1 阴极光照灵敏度

光电流除以入射于光阴极的光通量所得的商。

在某些特定的波长区,作为常规使用,可用特性已知的有色滤光片(蓝色、红色、红外滤光片)插入光路后测得的光电流除以未插入滤光片的光阴极受照光通量,所得的商分别称为蓝光灵敏度、红光灵敏度和红外灵敏度。蓝光灵敏度、红光灵敏度和红外灵敏度与光照灵敏度的比值分别称为蓝白比、红白比和红外白比。

#### 1.4.1.2 阴极辐射灵敏度

光电流除以入射于光阴极的辐通量所得的商。

#### 1.4.1.3 阴极光谱灵敏度

指定波长单色辐射的阴极辐射灵敏度。

### 1.4.2 量子效率

发射光电子数与入射光子数的比值。

### 1.4.3 收集效率

第一倍增极所收集的有效电子数与光阴极发射电子数的比值。

### 1.4.4 阳极灵敏度

#### 1.4.4.1 阳极光照灵敏度

阳极输出电流除以入射于光阴极的光通量所得的商。

#### 1.4.4.2 阳极辐射灵敏度

阳极输出电流除以入射于光阴极的辐通量所得的商。

#### 1.4.4.3 阳极光谱灵敏度

指定波长单色辐射的阳极辐射灵敏度。

### 1.4.5 增益

在一定工作电压下阳极输出电流与阴极电流的比值。

### 1.4.6 暗电流

在无辐照条件下光电倍增管输出的电流。

### 1.4.7 暗电流等效输入

当直流信号输出电流等于暗电流时,所对应的人射辐射。

## 1.5 脉冲幅度参数的定义

### 1.5.1 信号〔脉冲〕幅度

用一定强度的光脉冲重复照射光阴极时,阳极输出脉冲的平均幅度,一般以幅度分布曲线峰值对应的脉冲幅度表示。对输入信号为单能的 $X$ 或 $\gamma$ 辐射,为全能峰峰值对应的脉冲幅度。

### 1.5.2 最大〔脉冲〕线性电流

输出电流偏离光电线性达10%时的电流值。

### 1.5.3 〔脉冲〕幅度分辨率

在输出脉冲幅度谱上,所研究的峰的半高宽与峰值脉冲幅度的比值。

## 1.6 噪声参数的定义

### 1.6.1 暗脉冲

工作在完全黑暗中,并且隔离外界电离辐射时,光电倍增管输出的脉冲。

### 1.6.2 后脉冲

在时间上与信号脉冲有关联的乱真输出脉冲。幅度一般比触发信号脉冲幅度小,且发生在触发信号脉冲之后的差不多固定的时间间隔内。

### 1.6.3 闪烁脉冲

由闪光引起的乱真脉冲。闪光主要由窗玻璃内的发光中心与足够能量的辐射之间的相互作用产生。

#### 1.6.4 暗电流噪声

无辐照时输出的电流统计起伏的均方根值。

#### 1.6.5 信号中噪声

有信号输入时，输出的电流统计起伏的均方根值。

#### 1.6.6 信噪比

信号输出电流与噪声电流（暗电流噪声或信号中噪声）的比值。

#### 1.6.7 噪声等效输入

当信号输出电流等于暗电流噪声时，所对应的入射辐射。

#### 1.6.8 噪声能当量，噪声等效能量

输出暗脉冲谱上以 $\gamma$ 辐射能量为标尺的一个阈值。此阈值以上的总计数率为 $50\text{s}^{-1}$ 。

#### 1.6.9 暗〔脉冲〕计数率

输出暗脉冲谱上某两个阈值之间的总计数率。阈值以单电子的平均幅度作为标尺。

### 1.7 时间参数的定义

#### 1.7.1 〔脉冲〕上升时间

用一定光通量的 $\delta$ 函数光脉冲重复照射整个光阴极时，在输出脉冲波形前沿，幅度的10%与90%的两点之间的平均时间间隔。

#### 1.7.2 单电子〔脉冲〕上升时间

光阴极发射单个电子引起的输出脉冲的上升时间。

#### 1.7.3 反射脉冲上升时间

用一个与光电倍增管阳极输出接头相连接的时域反射计所观测到的反射脉冲的上升时间。

#### 1.7.4 脉冲响应宽度

用一定光通量的 $\delta$ 函数光脉冲重复照射整个光阴极时，在输出脉冲波形上两个半幅度点之间的平均时间间隔。

#### 1.7.5 单电子脉冲响应宽度

光阴极发射单个电子引起的输出脉冲响应宽度。

#### 1.7.6 〔脉冲〕下降时间

用一定光通量的 $\delta$ 函数光脉冲重复照射整个光阴极时，在输出脉冲波形后沿，幅度的10%与90%的两点之间的平均时间间隔。

#### 1.7.7 单电子〔脉冲〕下降时间

光阴极发射单个电子引起的输出脉冲的下降时间。

#### 1.7.8 渡越时间

从一个 $\delta$ 函数光脉冲照射整个光阴极的瞬间到输出脉冲前沿半幅度点的出现瞬间之间的时间间隔。

#### 1.7.9 输入系统渡越时间

一束光电子从光阴极渡越到第一倍增极所需的时间。

#### 1.7.10 倍增系统渡越时间

一束电子离开第一倍增极的瞬间与该电子束被倍增后到达阳极的瞬间之间的时间间隔。

#### 1.7.11 输出结构延迟时间

一束电子到达阳极的瞬间与在输出接头上输出脉冲前沿半幅度点的出现瞬间之间的时间延迟。

#### 1.7.12 光阴极渡越时间差

从光阴极中心发射的电子与从光阴极指定直径上某些规定点发射的电子之间的渡越时间差。

#### 1.7.13 渡越时间分散，时间分辨率

从一个 $\delta$ 函数光脉冲照射整个光阴极的瞬间到输出脉冲前沿半幅度点的出现瞬间之间所需时间的变化，以输出脉冲时间分布曲线上的半高宽来量度。

### 1.7.14 单电子渡越时间分散, 单电子时间分辨率

从一个 $\delta$ 函数光脉冲照射整个光阴极的瞬间(使每次产生的光电子不多于一个)到输出脉冲前沿半幅度点的出现瞬间之间所需时间的变化, 以输出脉冲时间分布曲线上的半高宽来量度。

## 2 光源和辐射源

### 2.1 标准光源

标准光源指作为光源标定标准或用作测试计量标准的光源。对于光电倍增管的直流性能测试, 规定采用A光源或按该光源标定的色温为2856K的钨光源。

#### 2.1.1 一级标准光源

由国家权威机关标定或经该机关认可的标准光源, 通过它可建立光的单位。

注: 现有国际标准是在铂凝固温度下的全辐射体。

#### 2.1.2 二级标准光源

恒定的复制光源, 可用一级标准光源来作比较而直接或间接地予以确定。

#### 2.1.3 三级标准光源

有规则使用的光源, 应经常地按二级标准光源进行标定。

### 2.2 辐射源

#### 2.2.1 可见光辐射源

对所考虑波长的单色辐射经过校正的一种标准光源或者标准光源和规定滤光片的组合。

#### 2.2.2 紫外辐射源

具有规定光窗和滤光片的低气压汞放电灯, 该滤光片在253.7nm上经过校正。也可采用紫外标准型高压汞放电灯, 该灯在366nm上的辐射是已知的。

#### 2.2.3 红外辐射源

对所考虑波长的单色辐射经过校正的一种标准光源或者标准光源和规定红外滤光片的组合。

### 2.3 闪烁光源

#### 2.3.1 $^{137}\text{Cs}-\text{NaI}(\text{Tl})$ 闪烁光源

用作光电倍增管幅度分辨率测试的规定光源。

$^{137}\text{Cs}$ 核辐射源发射能量662keV的 $\gamma$ 射线引起NaI(Tl)闪烁体闪烁, 光谱主要在蓝紫光区域。相应于光电效应的闪烁, 每个光脉冲约产生 $2 \times 10^4$ 个光子。闪烁体的闪烁衰减时间约为0.25 $\mu\text{s}$ 。

#### 2.3.2 $^{55}\text{Fe}-\text{NaI}(\text{Tl})$ 闪烁光源

用作光电倍增管对低能辐射的幅度分辨率测试的规定光源。

$^{55}\text{Fe}$ 核辐射源发射能量5.9keV的X射线引起铍窗NaI(Tl)闪烁体闪烁。

### 2.4 $\delta$ 函数光源

一种具有有限辐通量和无限窄宽度的脉冲光源。在光电倍增管时间参数测试中, 通常指光脉冲的持续时间比待测输出脉冲的持续时间窄得多(最大为1/3)的光源。 $\delta$ 函数光源的强度分散不得超过等效于 $^{137}\text{Cs}-\text{NaI}(\text{Tl})$ 的闪光的百分之一。

#### 2.4.1 发光二极管光源

发光二极管光源每个脉冲的光输出在 $1 \sim 10^5$ 个光子范围内变化。对少于100个光子的闪光, 典型的上升时间为500ps, 下降时间近似等于上升时间, 最快上升时间只能用 $\delta$ 函数电流脉冲激发才能获得。当每个脉冲超过几百个光子时上升时间开始增大。用阶跃函数电流脉冲激发时, 上升时间显著地变慢。

用于发光二极管的脉冲发生器, 可用水银开关脉冲发生器, 典型的重复频率为400Hz; 也可用雪崩晶体管脉冲发生器, 典型的重复频率为10kHz。这两种脉冲发生器都可引出触发信号来标记闪光的出现瞬间。

#### 2.4.2 火花光源

水银浸湿开关火花光源的上升时间约为500ps, 下降时间稍长, 并带有一个持续时间为几个纳秒的

指数型尾巴。在主脉冲后 $1\mu\text{s}$ 左右常常产生多个脉冲,这些脉冲通常不会干扰测量。一般用带有充电电缆线的水银开关作火花光源,典型的重复频率为 $400\text{Hz}$ 。也可用自激放电闪光,重复频率约几千赫。火花光源可引出触发信号来标记闪光的出现瞬间。

每个脉冲的光输出在 $1\sim 10^5$ 个光子范围内变化。对于那些需要较强的光脉冲的测量,火花光源的上升时间可增大到 $1\text{ns}$ 以上,而下降时间可超过 $10\text{ns}$ 。

火花光源的光谱分布包含紫外辐射,肉眼观察火花呈浅蓝色,可用于获得光阴极和倍增极的光电发射,例如 $\text{BeO}$ 和 $\text{GaP}(\text{Cs})$ 倍增极获得光电发射。

### 2.4.3 切伦科夫光源

可用带有 $\beta$ 核辐射源(如 $^{90}\text{Sr}$ )的塑料薄片作光源,上升时间小于 $100\text{ps}$ ,每个脉冲的光输出在 $1\sim 100$ 个光子范围内变化。光谱分布包含蓝光和紫外辐射,重复频率由辐射源的强度决定,而闪光在时间上是无规律的,因此不能提供电触发信号来标记闪光的出现瞬间。

### 2.4.4 快闪烁光源

由核辐射源和快塑料闪烁体组成的光源,典型的上升时间为 $400\text{ps}$ ,下降时间约为 $1.5\text{ns}$ ,并带有一个持续时间为几个纳秒的特征性的长尾巴。重复频率由辐射源强度决定,而闪光在时间上是无规律的,因此不能提供电触发信号来标记闪光的出现瞬间。

### 2.4.5 锁模激光光源

$\text{He}-\text{Ne}$ 激光器( $633\text{nm}$ )的脉冲宽度约为 $1\text{ns}$ , $\text{Ar}$ 激光器( $588\text{nm}$ 和 $514.5\text{nm}$ )的脉冲宽度约为 $250\text{ps}$ ,而 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器( $1.06\mu\text{m}$ )的脉冲宽度约在 $1\sim 50\text{ps}$ 范围内,因此 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器对快速光电倍增管的时间测量最为有用。

$\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器可提供电触发信号来标记每个脉冲的出现瞬间,重复频率通常在 $75\sim 200\text{MHz}$ 范围内。对于某些光电倍增管的测量,即使 $75\text{MHz}$ 的重复频率也嫌太高,用快速电光调制器封锁不需要的脉冲可获得较低的重复频率。

$1.06\mu\text{m}$ 辐射的强度,可从大多数光阴极获得实用的光电发射,即使这些光阴极(如铯阴极)通常不适用于这一波长。

用非线性晶体可将 $1.06\mu\text{m}$ 的辐射倍频到 $532\text{nm}$ 。这种皮秒脉冲可以强到每个脉冲包含 $10^8$ 个光子,因此可用来获得 $\text{GaP}(\text{Cs})$ 倍增极和光阴极的光电发射,探测倍增极的表面,画出它的空间定时特性图。

## 2.5 标准光源的校正

### 2.5.1 色温的校正

当光源的色温与全辐射体的分布温度相同时,光源在该色温下的相对辐射功率分布可由全辐射体在该分布温度下的相对辐射功率分布来表征,由于分布曲线具有连续性和可微性,因此只要在蓝、绿、红、红外几个特定波长上求得相对分布的校正,光源的色温也就得到了标定。作为一种快速的校正,只要使规定的蓝、红两个波长上相对分布的红蓝比达到标定值即可。光源色温校正所需的设备仪器主要是单色仪和辐射检测元件。

校正时,先测标准光源,调节单色仪波长,测出每一波长下辐射检测元件的读数。再将标准光源换成待校光源,测出每一相应波长下辐射检测元件的读数,并将此读数与标准光源所给出的读数一一比较。

所需的光谱纯度的等级与光源辐射对于波长的变化速率有关。通常,对于所涉及波长,其光谱带宽为该波长的百分之一数量级已足够狭窄。必须引起注意的是应保证外界辐射不落在检测元件上。

精密光栅单色仪或两次分光单色仪均可用于提供高的光谱纯度,而校正过的热电偶或热电堆及其有关的测试电路,通常用来测量单色仪出射狭缝的辐射功率。

有关色温校正方法的详细说明可参阅JJG 213—80《分布温度标准灯》检定规程。

### 2.5.2 发光强度的校正

发光强度的校正在光具座上进行,采用标准光源、光度计和光电接收器。标准光源应为二级标准

光源,也可以是麦克贝司 (Macbeth) 光源。光度计通常用鲁末——布洛亨 (Lummer—Brodhun) 光度头,它必须视场清晰,界线分明,均匀对称。光电接收器可以是性能稳定的光电池、光电管、光电倍增管,或由标准色度仪校正过的其他光敏器件。

有关发光强度校正方法的详细说明可参阅 JJG 246—81《光强度标准灯》检定规程。

### 3 测试条件

#### 3.1 暗箱和探头

##### 3.1.1 暗箱

光电倍增管的测试应在不透光暗箱中进行。用于灵敏度测试的暗箱通常分割为两节,一节供安置待测光电倍增管,另一节供固定光源。两节皆具有规定的孔径,中性减光器和滤光片则插入于分割处。光源与待测光电倍增管之间的距离通常是固定的,也可以是可调的,但此距离应不小于光源灯丝线度的200倍。图1示出了固定距离暗箱的实例。

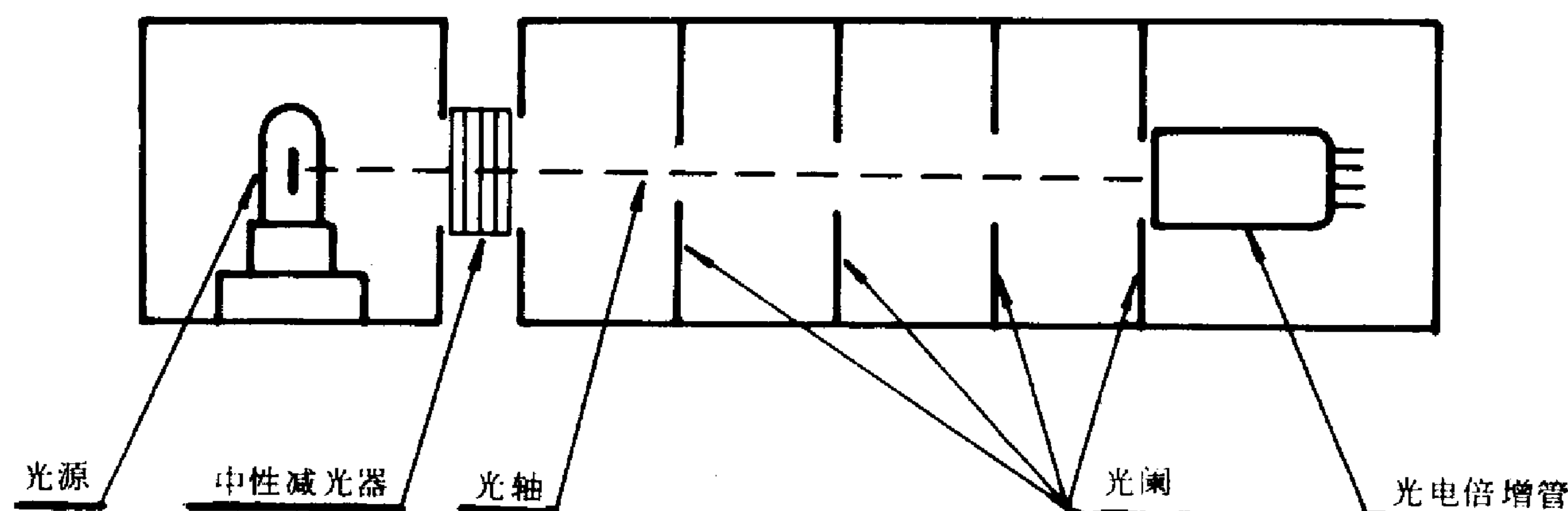


图1 测试光电倍增管的暗箱实例

光源和光电倍增管之间应设置一系列光阑,为防止连续性反射,光阑孔应具有锐利的边缘,且光阑孔径应满足测试立体角的要求。与光电倍增管紧贴的光阑孔应保证在光阴极的有效面积上受照。光源、光阑孔和光阴极受照面三者的中心应在同一轴线上。

整个暗箱的内壁和全部光阑必须进行黑化,以防止内部光反射。

由于光源热量大,因此必须对光源小室采取散热措施。

为调节光阴极面上的光照值,可采用导轨使光源在其上得以平行于光轴移动。若不得不改变光源与光电倍增管之间的距离以获得另外的光照值,则对于标准测量来说,一般应该移动光电倍增管而不宜移动光源。

##### 3.1.2 探头

核辐射测量装置的一部分,它有一个几何形状适当的外壳,在此外壳内有辐射探测器,还可能有前置放大器及其某些功能单元电路。对探头的要求如下:

- 外壳的设计必须避免在光阴极区域有较高的电场;
- 外壳的内壁和光阑等必须黑化以防止光反射;
- 外壳不得有可探测的漏光,这可以在有和没有明亮的环境光照射外壳的情况下借助于半小时的光子计数仪来验证;
- 前置放大器的重要功能是使光电倍增管的输出和与其相连接的仪器之间获得最佳的耦合,所以前置放大器应尽可能地安装在接近光电倍增管的输出端,使前置放大器的输入电容尽可能地小。此外,由于前置放大器对整个测试装置的噪声有着重大影响,因此应尽可能地减小其纹波和噪声。

### 3.2 测试仪器

#### 3.2.1 电源

电源应稳定,特别是高压电源应具有万分之一或更好的稳定度,纹波和噪声应不大于10mV。

#### 3.2.2 直流测试仪器

微电流计等测试仪器应具有合适的准确度,其指示精度应优于百分之一。

光源的供电电源的稳定度应优于千分之一，其指示精度应优于千分之五。

### 3.2.3 脉冲测试仪器

测试所用的仪器的技术指标不应对参数的测试有明显的影响。

## 3.3 测试工作状态

### 3.3.1 调选分压器

a. 流过电阻分压器的电流至少应为阳极平均电流的20倍。对于那些发射电流很大的倍增极，其极间电压应单独地稳定（如采用单独的电源）；

b. 当阳极峰值电流远大于阳极平均电流时，应在倍增极之间或倍增极与地之间跨接电荷储存电容，以保证在脉冲的持续时间内能有效地维持倍增极所需的电位；

c. 应根据测试要求选择或仔细调节分压比，以期获得参数的最佳值。

### 3.3.2 选择工作点

测试时，不允许超过光电倍增管极限参数所规定的值，如最高增益、最大工作电压、最大极间电压和最大平均阳极电流等。

### 3.3.3 选择阳极负载电阻

应根据所测参数的情况，选择相应的最佳阳极负载电阻值，同时应使阳极与地之间的分布参数尽可能小。

### 3.3.4 选择成形方法和时间常数

应采用适合于最佳性能的脉冲成形方法和时间常数，并加以注明。

### 3.3.5 建立稳定状态

应待光电倍增管和整个测试装置建立稳定工作状态后才能获取数据，另有规定除外。

注：整个测试系统应避免电路的漂移和基线偏移。

## 3.4 测试环境

### 3.4.1 温度

测试环境温度在19~25℃范围内稳定在 $\pm 2$ ℃，要重视分压器可能升高光电倍增管周围温度的情况，另有规定除外。

### 3.4.2 相对湿度

相对湿度应小于65%，否则应采取适当措施使参数的测量不受其影响。

### 3.4.3 环境光

测试室应具有适当的蔽光条件，以避免环境光对光电倍增管的影响。

### 3.4.4 电磁场

a. 在光电倍增管周围应加与玻壳接触的静电屏蔽层，该屏蔽层通过一高阻（如几兆欧）接至光阴极电位，以获得最好的测试重复性，同时也可避免可能产生的玻壳的场致发光、玻璃的电解和玻壳表面的电荷积累；

b. 光电倍增管测试前应退磁，测试时应加一磁屏蔽筒，该屏蔽筒超出光阴极面的长度应不小于光阴极半径。值得注意的是，即使地磁场的强度也足以影响测试。

### 3.4.5 本底核辐射

存在本底核辐射的环境下，应采取适当的核辐射屏蔽措施，以保证光电倍增管的暗电流和噪声等参数的测量不受其影响。

## 3.5 注意事项

### 3.5.1 清洁处理

测试前，光电倍增管的管壳、管基和管座必须清洗干净，以防止产生外部的漏电和噪声效应。

### 3.5.2 避光存放

光电倍增管在测试之前应在黑暗中存放适当时间。

#### 4 直流参数和特性测试方法

##### 4.1 阴极灵敏度

##### 4.1.1 阴极光照灵敏度

阴极光照灵敏度的测试在暗箱内进行，测试系统如图2，辐射源为标准光源。

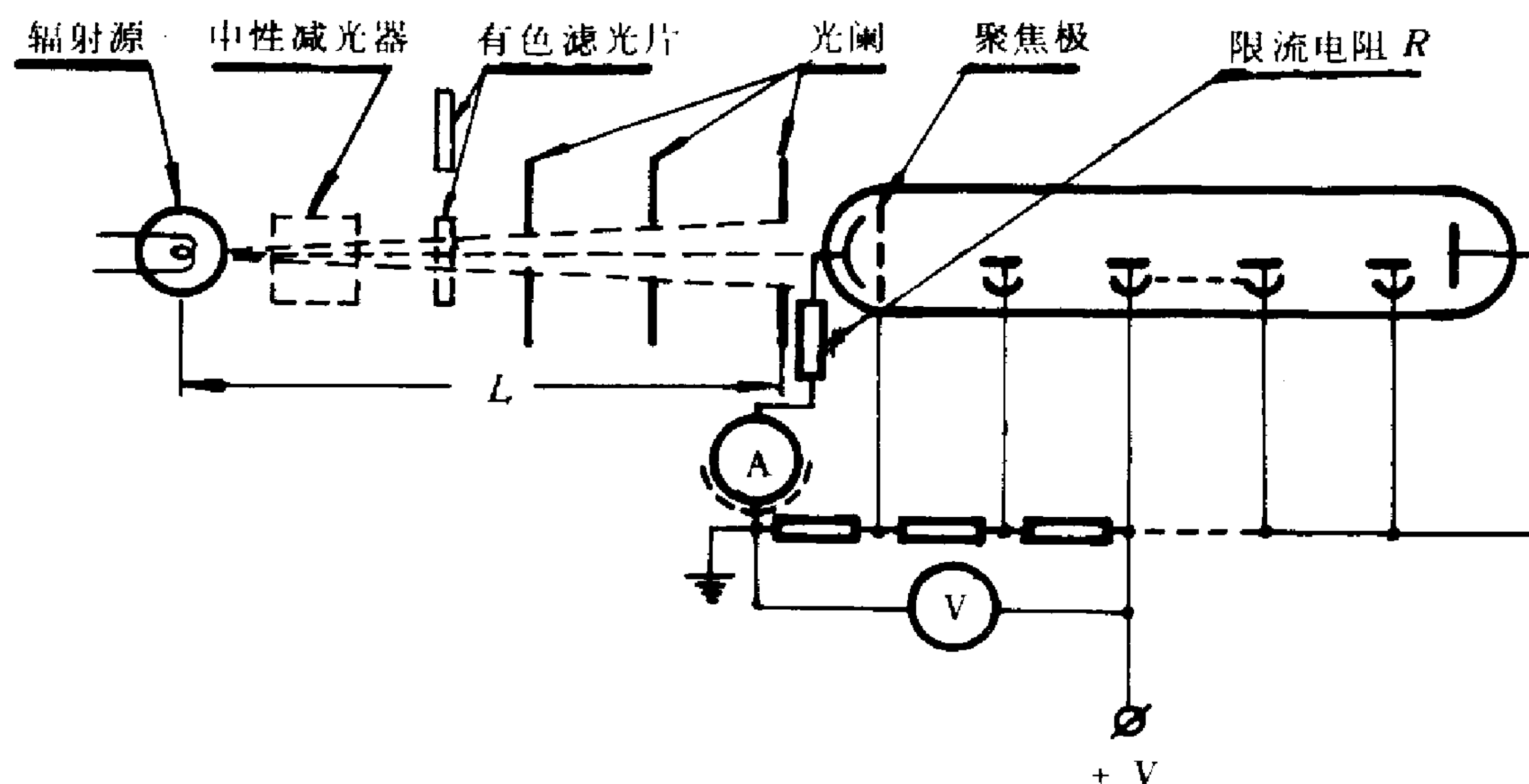


图2 阴极灵敏度的测试系统

光阴极面上的光通量和阴极光照灵敏度可按下式计算：

$$F_k = \frac{W_k A}{L^2} D_k \dots\dots\dots (1)$$

$$S_k = \frac{I_k}{F_k} \dots\dots\dots (2)$$

- 式中： $F_k$  ——光通量，lm；
- $W_k$  ——发光强度，cd；
- $L$  ——距离，m；
- $A$  ——光阴极面的面积， $m^2$ ；
- $D_k$  ——中性减光器的透射率；
- $S_k$  ——阴极光照灵敏度， $\mu A/lm$ ；
- $I_k$  ——阴极光电流，A。

测量阴极光照灵敏度，通常采用 $10^{-5} \sim 10^{-2} lm$ 范围的光通量。所用的光通量值不应太大，否则由于光阴极层的电阻损耗会引起测量误差；也不能太小，否则由于欧姆漏电流会使对光电流的精确测量难于进行。

在图2所示的测试电路中，至少应使最前两级倍增极也工作在正常电压下，以使电场分布不受影响。若光电倍增管按二极管接线对电场分布的影响并不大时，也可按二极管接线。

通常 $R$ 是一个1 M $\Omega$ 电阻，其作用是在测量过程中光电倍增管一旦受损（例如放电或短路）时限制支取电流。

由于所测电流很小，所以应注意防止漏电。所加电压应足够大以保证饱和，一般为100~400 V。可用升高一倍电压的方法来检验是否达到饱和，若已达到饱和，则升高电压只能使电流有微小的增加。

##### 4.1.2 阴极辐射灵敏度

测试系统仍如图2所示，但辐射源为标准辐射源。

若标准辐射源对一定方向上的辐强度作过校正，则与此方向垂直的光阴极面上的辐通量和阴极辐射灵敏度可按下式计算：

$$\phi_k = \frac{W_r A}{L^2} D_k \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{kr} = \frac{I_k}{\phi_k} \dots\dots\dots (4)$$

式中： $\phi_k$  ——辐通量，W；  
 $W_r$  ——辐强度，W/sr；  
 $S_{kr}$  ——阴极辐射灵敏度，mA/W。

为测量阴极辐射灵敏度，宜采用 $10^{-7} \sim 10^{-3}$  W范围的辐通量，其他与4.1.1相同。

### 4.1.3 阴极光谱灵敏度

阴极光谱灵敏度的测试设备主要包括辐射源、单色仪、接收器、检流计以及电压表五个组成部分，其推荐方框图如图3所示。

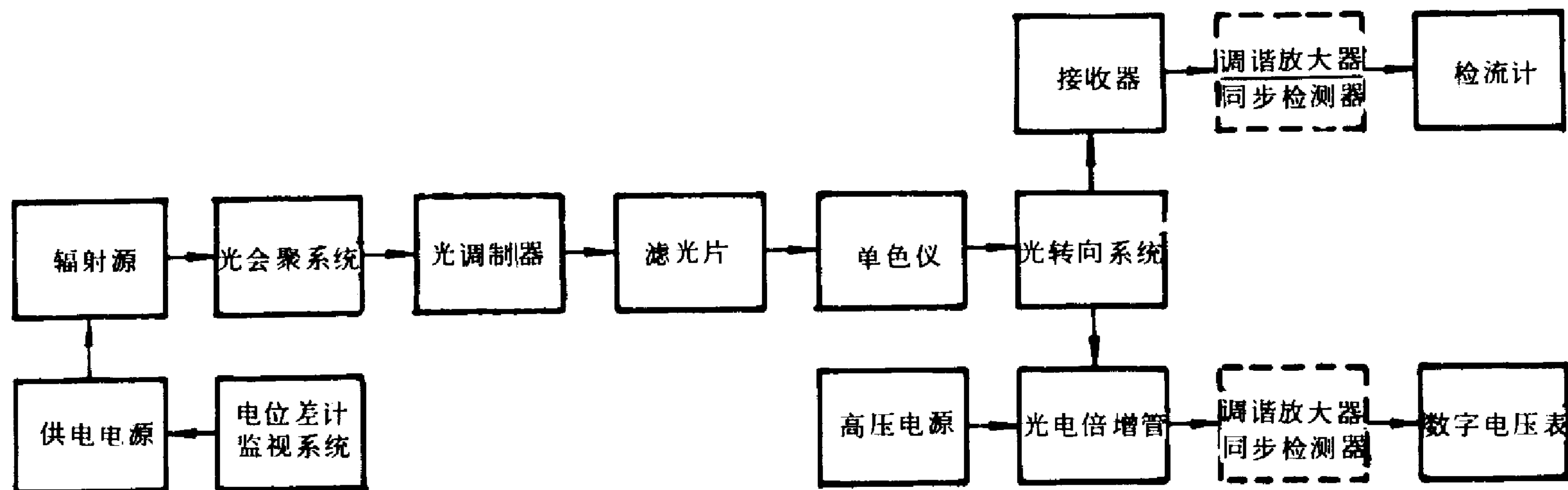


图3 阴极光谱灵敏度测试方框图

辐射源的选择，应根据测试的要求，在可见光和红外区用钨丝灯或钨带灯；在紫外区用汞放电灯、氙放电灯、氢放电灯或其他放电灯。为了读数稳定，供电电源宜采用电位差计监视系统。

单色仪应具有高的光谱纯度，具体数值取决于光谱灵敏度对波长的变化率。在某些波长上辐射源有强烈的辐射或待测光阴极有很高的灵敏度，因此有必要设置滤光片，以消除在这些波长上的散射。此外，单色仪应具有光转向装置，可用来改变从出射狭缝输出的辐射光束的方向，使其既可对准接收器，也可通过出射窗而照射光阴极面。

接收器常用真空热电偶或真空热电堆，它们需进行校正，并把辐通量表征为检流计的读数，就可以用来测量从单色仪出射狭缝输出的辐通量。

检流计和电压表均应具有较高的灵敏度和适当的输入阻抗，以测定接收器和光阴极的微弱电流。

注：应该注意避免由于热电偶的漂移与光电倍增管暗电流的变化所引起的不精确性。可实现的一种方法是在单色仪前设置一光调制器，这样一来，热电偶或光电倍增管的输出可以用调谐放大器和同步检测器来测定。

测试时，首先将辐射光束转向接收器，用接收器测定指定波长上的辐通量，再将辐射光束转向光电倍增管，测定同一波长上光阴极的饱和光电流，即可按定义求出阴极光谱灵敏度。

### 4.1.4 量子效率

在给定的入射波长上的量子效率 $\eta(\lambda)$ 可按下式计算：

$$\eta(\lambda) = \frac{1.24 S_{kr}(\lambda)}{\lambda} \dots\dots\dots (5)$$

式中： $S_{kr}(\lambda)$  ——在波长 $\lambda$ 上的阴极光谱灵敏度，mA/W；  
 $\lambda$  ——入射辐射的波长，nm。

#### 4.1.5 蓝光灵敏度和蓝白比

测试系统仍如图2所示，但应在光路中加入具有特定光谱透射率曲线的QB 24牌号的蓝色滤光片。

注：QB 24蓝色滤光片厚度的选择，应使其透过率与Corning CS-5-58（半毛坯厚度）相等效。

先由式（1）求出阴极受照光通量 $F_k$ ，再测出该阴极对经QB 24滤光后的同一标准光源的蓝光电流 $I_B$ ，即可求出蓝光灵敏度 $S_B = I_B / F_k$ 。根据阴极光照灵敏度 $S_k$ 即可求出蓝白比 $R_{BW} = S_B / S_k$ 。

#### 4.1.6 红光灵敏度和红白比

测试系统仍如图2所示，但应在光路中加入具有特定光谱透射率曲线的HB 11牌号的红色滤光片。

注：HB 11红色滤光片厚度选择，应使其透过率与Corning CS-2-62相等效。

先由式（1）求出阴极受照光通量 $F_k$ ，再测出该阴极对经HB 11滤光后的同一标准光源的红光电流 $I_R$ ，即可求出红光灵敏度 $S_R = I_R / F_k$ 。根据阴极光照灵敏度 $S_k$ 即可求出红白比 $R_{RW} = S_R / S_k$ 。

#### 4.1.7 红外灵敏度和红外白比

测试系统同图2，但应在光路中加入具有特定光谱透射率曲线的HWB 3牌号的红外滤光片。

先由式（1）求出阴极受照光通量 $F_k$ ，再测出该阴极对经HWB 3滤光后的同一标准光源的红外电流 $I_{IR}$ ，即可求出红外灵敏度 $S_{IR} = I_{IR} / F_k$ 。根据阴极光照灵敏度 $S_k$ 即可求出红外白比 $R_{IRW} = S_{IR} / S_k$ 。

### 4.2 光谱响应特性

#### 4.2.1 相对光谱响应特性

阴极光谱灵敏度相对值与波长之间的关系，通常用对峰值的归一化曲线表示。相对光谱灵敏度特性的测试系统同图3。

测试时，首先在各个波长的单色辐射下，测定接收器的输出读数。然后在同样波长的单色辐射下，测定光电倍增管的光电流，在每一波长下，将光电流除以接收器的输出读数，可得一条表征其商数与波长之间关系的过渡曲线，将此曲线对峰值归一化，即可得相对光谱灵敏度特性 $R(\lambda)$ 。

#### 4.2.2 绝对光谱响应特性

阴极光谱灵敏度与波长之间的关系，通常用曲线表示。

##### 4.2.2.1 测量法

绝对光谱响应特性的测试方法与4.2.1相同，只是接收器的输出读数需进行校正，即输出读数按辐射功率值进行定标，则按4.2.1条所得的过渡曲线即为绝对光谱响应特性。

##### 4.2.2.2 算法

由阴极光照灵敏度 $S_k$ 和阴极相对光谱响应特性 $R(\lambda)$ 进行计算。

利用2856K标准光源的辐射分布特性 $W(\lambda)$ ，视觉函数 $V(\lambda)$ 以及波长555nm单色辐射的光功当量683lm/W，由数值积分法计算出转换因数 $c$ 。

$$c = \frac{683 \int_0^\infty V(\lambda) W(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty R(\lambda) W(\lambda) d\lambda} \dots\dots\dots (6)$$

峰值波长处的阴极光谱灵敏度：

$$S_p = c S_k \dots\dots\dots (7)$$

绝对光谱响应特性：

$$S_{kr}(\lambda) = S_p R(\lambda) \dots\dots\dots(8)$$

4.2.3 量子效率特性

在各个波长下，逐一计算出量子效率，即可获得量子效率特性 $\eta(\lambda)$ ，通常用曲线表示。

4.3 阳极灵敏度

4.3.1 阳极光照灵敏度

阳极光照灵敏度的测试在暗箱内进行，测试系统如图4所示，辐射源为标准光源。

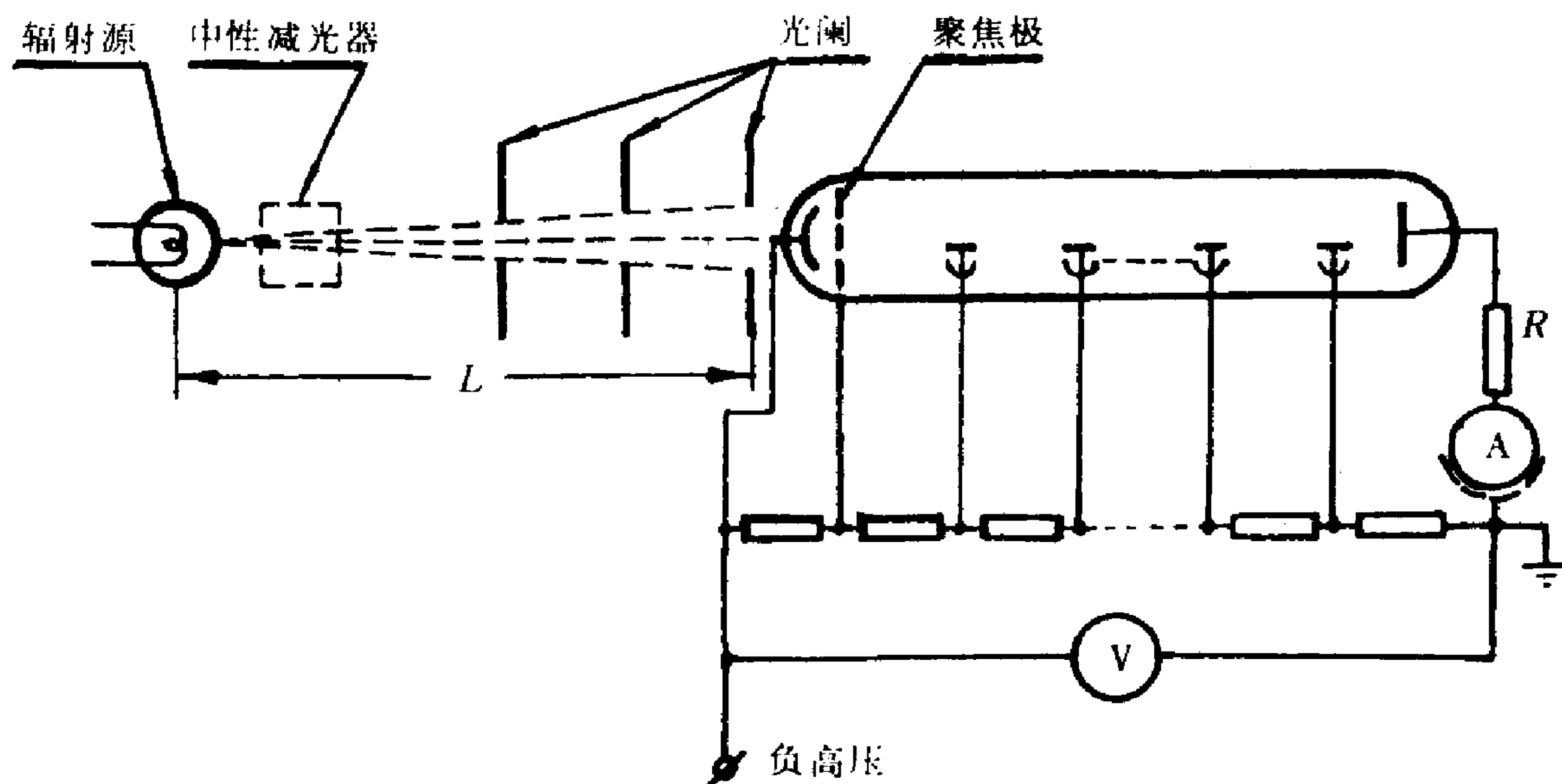


图4 阳极灵敏度的测试系统

注：R——限流电阻。

光阴极面上的光通量和阳极光照灵敏度可按下式计算：

$$F_a = \frac{W_k A}{L^2} D_a \dots\dots\dots(9)$$

$$S_a = \frac{I_a}{F_a} \dots\dots\dots(10)$$

- 式中： $D_a$  ——中性减光器的透射率；
- $S_a$  ——阳极光照灵敏度，A/lm；
- $I_a$  ——输出电流，A。

测量阳极光照灵敏度，通常采用 $10^{-10} \sim 10^{-6}$ lm范围的光通量。所用的光通量不应太大，否则会导致非线性饱和并使输出电流超过额定值；也不能太小，否则由于暗电流的作用会使对光电倍增管的输出电流的精确测量难于进行。

最理想的中性减光器应在从可见光到近红外的整个区域内具有一致的透射率。然而由于在此区域内减光器的透射率通常总是不够一致的，因此对光谱响应特性相差悬殊的光电倍增管的测试，就需要对减光器进行分区校正。

另外，为了减弱光照，既可以增大光源与光电倍增管之间的距离，也可以采用发光强度较低但辐射分布不变的光源。

在可见光各个波长上完全一致地减弱光照的另一个方法是在所示系统的光源和光阴极之间插入一个校正过的无色漫射屏，该屏最好是一块两面完全磨砂的玻璃板，也可以是一块乳白的玻璃板。当此屏处在光源和光阴极之间的某一适当位置时，可达最大程度的光照减弱。

在光谱的近紫外、可见光和近红外部分都能完全一致地减弱光照的又一个方法是采用外表面蒸铝的凸面反射镜或漫反射屏，后者如氧化镁屏或硫酸钡屏。

在图4中,所加的工作电压应保证光电倍增管工作在线性范围内,阳极电流应小于制造厂规定的最大值。

$R$ 为限流电阻,其作用是在测量过程中光电倍增管一旦受损(例如放电或短路)时限制支取电流。

#### 4.3.2 阳极辐射灵敏度

测试系统如图4所示,但辐射源为标准辐射源。

若标准辐射源对一定方向上的辐射强度作过校正,与此方向垂直的光阴极面上的辐通量和阳极辐射灵敏度可计算如下:

$$\phi_a = \frac{W_r A}{L^2} D_a \dots\dots\dots (11)$$

$$S_{ar} = \frac{I_a}{\phi_a} \dots\dots\dots (12)$$

式中:  $S_{ar}$  —— 阳极辐射灵敏度, mA/W。

测量阳极辐射灵敏度,宜采用 $10^{-12} \sim 10^{-8}$  W范围的辐通量。

其他与4.3.1相同。

#### 4.3.3 阳极光谱灵敏度

阳极光谱灵敏度的测试同4.1.3,但测试时需要注意以下各点:

- a. 阴极受照辐通量应该用一系列特性已知的中性减光器衰减至所需的微弱范围;
- b. 所加的工作电压应保证光电倍增管工作在线性范围内;
- c. 数字电压表所测得的是阳极输出电流。

若光电倍增管的增益与光阴极上的入射波长无关,则可由阴极光谱灵敏度 $S_{kr}(\lambda)$ 和增益 $G$ 获得阳极光谱灵敏度 $S_{ar}(\lambda)$ :

$$S_{ar}(\lambda) = GS_{kr}(\lambda) \dots\dots\dots (13)$$

### 4.4 增益

由于增益数值很大,要一步就测定它是困难的,因为光电流只有处在极其微弱的水平上,才能使阳极输出电流不超过指定的最大值。增益可按下述几种方法测定,但这些方法都基于下列假定:

- a. 光阴极电流、倍增极电流和阳极电流都严格地正比于入射光通量;
- b. 不论光通量及其波长的变化如何,增益总是常数。

#### 4.4.1 方法一

首先,在足够弱的光通量下测定与某一工作电压相应的阳极电流 $I_a$ ,该阳极电流应在线性范围内,且光电倍增管不应有疲劳效应。

然后,使光通量增强 $M$ 倍(但不改变其光谱分布),测定阴极电流 $I_k$ ;这时,只有光电倍增管的第一级和前几级倍增极才施加正常电压,以免光电倍增管输出过载。于是电流增益可按下式求得:

$$G = \frac{I_a}{I_k} M \dots\dots\dots (14)$$

式中:  $I_a$  —— 弱光通量下测定的阳极电流;

$I_k$  —— 强光通量下测定的阴极电流;

$M$  —— 光通量的增强倍数。

为了更确切地知道所用中性减光器的透射率,光通量的调节也可采用单色光来实现。

#### 4.4.2 方法二

首先,选择入射光通量并降低工作电压,使得刚好能测出阴极电流 $I_{k1}$ ;与此同时,测定阳极电流 $I_{a1}$ ,该阳极电流照例是阴极电流的某一倍数(例如1000倍)。其次,使光通量减弱某一适当的倍数,并测定较小的阳极电流 $I_{a2}$ 。然后,在入射光通量不变的情况下,升高工作电压至正常值,再一次测定阳极电流 $I_{a3}$ 。这样,电流增益可按下式求得:

$$G = \frac{I_{a1}}{I_{a2}} \times \frac{I_{a3}}{I_{k1}} \dots\dots\dots (15)$$

其中 $I_{k1}$ 与 $I_{a1}$ 分别为低工作电压下的阴极电流与阳极电流; $I_{a2}$ 为同一工作电压下光通量减弱至正常值时的阳极电流; $I_{a3}$ 为同一弱光通量下工作电压升高至正常值时的阳极电流。

如有必要,上述测试也可分几步进行。

测试时,阴极电流和阳极电流应互成比例,以保证测试结果的准确性。

#### 4.4.3 方法三

用阳极光照灵敏度 $S_a$ 与阴极光照灵敏度 $S_k$ 的比值计算增益:

$$G = \frac{S_a}{S_k} \dots\dots\dots (16)$$

在给出 $G$ 值的同时,应当标明相应的工作电压。由于 $S_a$ 和 $S_k$ 测试条件的不同,必须注意这种方法在某些情况下可能带来的误差。

### 4.5 阳极特性

#### 4.5.1 阳极伏安特性

当光电倍增管的其他电压均保持一定时,阳极电流可作为末级电压的函数而进行测量。

这一特性基本上类似于真空光电二极管的伏安特性;然而由于在前几级中电流增益的结果,使得阳极电流通常是如此之大,以至在常规电压下,空间电荷将导致光通量与阳极电流之间出现非线性关系。因此在各种不同的恒定光通量数值下,应该得到电流对于电压的特性曲线族。

#### 4.5.2 阳极灵敏度特性

分压比保持一定时,阳极光照灵敏度或阳极辐射灵敏度与工作电压的关系曲线。

阳极灵敏度特性是电压的幂函数,因此应绘制这些参数的对数值对于工作电压的关系曲线。

#### 4.5.3 增益特性

分压比保持一定时,增益与工作电压的关系曲线。

增益特性是电压的幂函数,因此应绘制该参数的对数值对于工作电压的关系曲线。

### 4.6 暗电流和暗电流特性

#### 4.6.1 暗电流

暗电流是在规定的工作电压下或在规定阳极光照灵敏度的工作电压下测定的。

引起暗电流的可能因素是漏电流、热电子发射、场致发射、残余气体电离以及管内荧光。在低的工作电压下,暗电流的主要成分通常是漏电流和热电子发射。

热电子发射和残余气体电离能够用它们的温度特性加以判断。在高的工作电压以及与之相应的高增益情况下,另外的暗电流分量将成为暗电流总值中的主要成分。

测试原理图如图5所示,光电倍增管隔绝外界辐射并采用规定的分压器。测试前,光电倍增管应避光存放,并应标明测试环境温度。

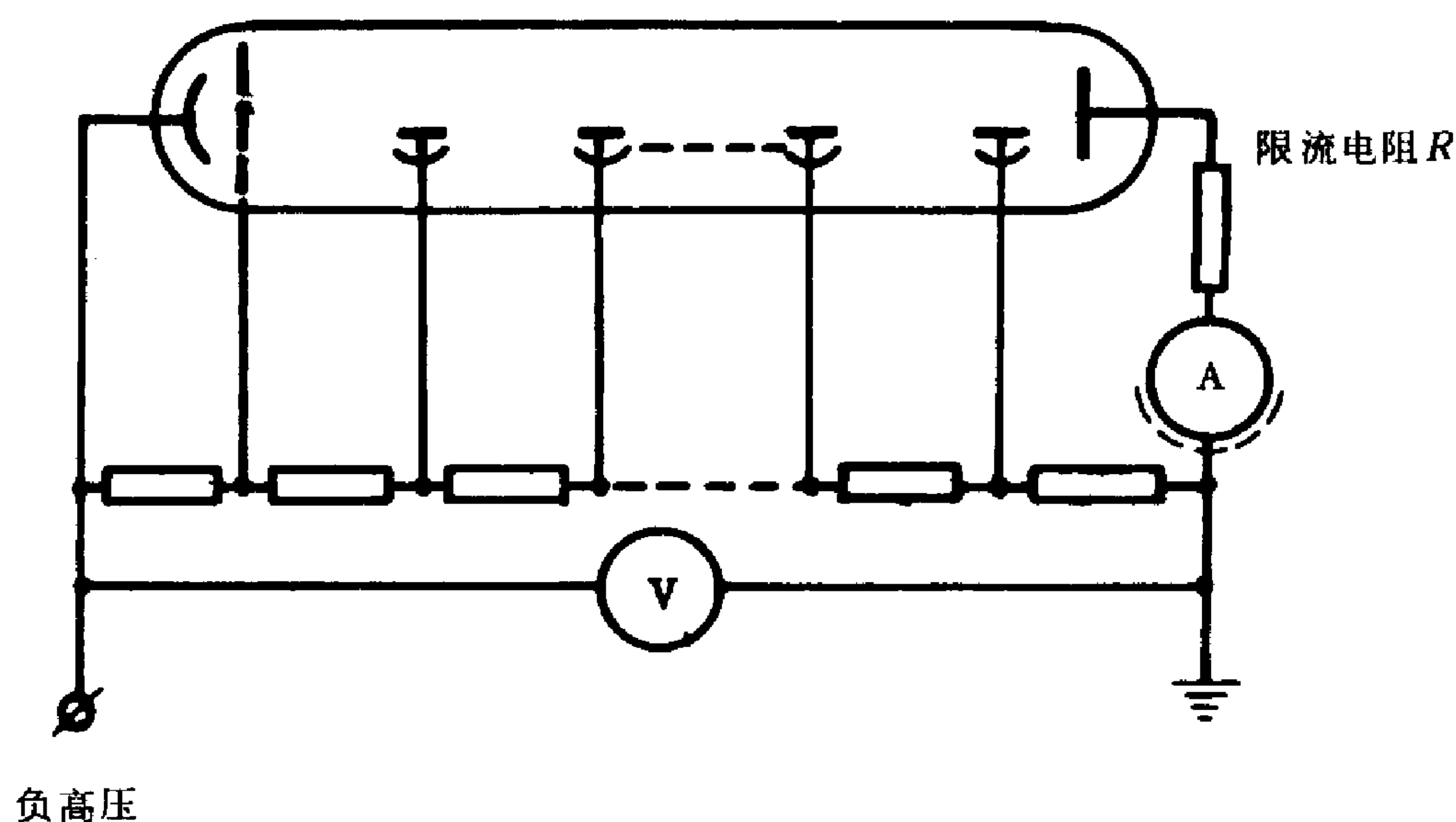


图 5 暗电流测试电原理图

#### 4.6.2 暗电流等效输入

##### 4.6.2.1 暗电流等效光通量

当直流信号输出电流等于阳极暗电流时，所对应的人射光通量。在数值上等于暗电流除以阳极光照灵敏度，单位为流明 (lm)。

##### 4.6.2.2 暗电流等效辐通量

当直流信号输出电流等于暗电流时，所对应的人射辐通量，在数值上等于暗电流除以阳极辐射灵敏度，单位为瓦特 (W)。

暗电流等效辐通量是在特定波长上的值，通常是在峰值波长上的值。

暗电流等效输入可在一定的工作电压下、或在与一定的阳极光照（或辐射）灵敏度相应的工作电压下，测量暗电流和阳极光照（或辐射）灵敏度来确定。

#### 4.6.3 暗电流的电压特性

暗电流与光电倍增管工作电压的关系，用曲线表示。

在不同的工作电压下，按4.6.1测定对应的暗电流，即可作出暗电流的电压特性曲线。

#### 4.6.4 暗电流等效输入的灵敏度特性

此特性可以表示为暗电流等效光通量对于阳极光照灵敏度、或者在规定波长上的暗电流等效辐通量对于该波长上的阳极辐射灵敏度的关系，用曲线表示。

在不同的工作电压下，按4.3测定阳极光照（或辐射）灵敏度，并按4.6.2测定对应的阳极暗电流，然后折算成暗电流等效光通量（或辐通量），即可作出暗电流等效输入的灵敏度特性曲线。

#### 4.6.5 暗电流的温度特性

暗电流或暗电流等效输入与光电倍增管所处环境温度的关系，用曲线表示。

在不同温度下，按4.6.1测量出阳极暗电流或按4.6.2折算成暗电流等效输入，并作出阳极暗电流或暗电流等效输入与温度的关系曲线。

#### 4.7 最大电压和最大电流

##### 4.7.1 最大工作电压、最大阳极电压

使光电倍增管接近出现明显放电等现象的工作电压。

测试时，采用规定的分压器，在正常的光阴极受照光通量下，逐渐加大工作电压直到光电倍增管输出电流接近出现明显不稳定现象时为止，这时的电压即为最大工作电压。通常制造单位，将与最大阳极光照灵敏度相对应的工作电压或将实测最大工作电压按适当安全系数减值后的工作电压作为推荐的最大工作电压。

##### 4.7.2 最大平均输出电流，最大平均阳极电流

使光电倍增管接近出现严重疲劳时的平均输出电流。

测试时,采用规定的分压器,在正常的工作电压下逐渐加大入射辐通量,观察30s内光电倍增管的输出电流值,直到输出电流接近出现明显不稳定现象,这时的输出电流即为最大平均输出电流。通常制造单位,将实测最大平均输出电流按适当安全系数减值后的输出电流作为推荐的最大平均输出电流。

## 5 脉冲幅度参数测试方法

### 5.1 信号〔脉冲〕幅度

对脉冲光源的信号脉冲幅度和对 $^{137}\text{Cs}-\text{NaI}(\text{Tl})$ 的信号脉冲幅度测试方框图如图6、图7所示。

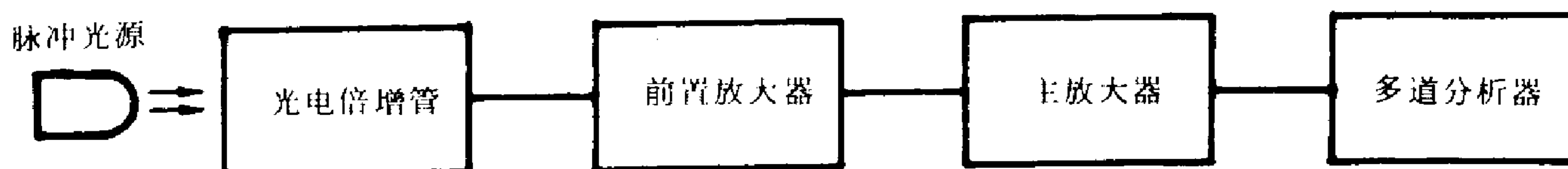


图6 光脉冲输入信号脉冲幅度测试方框图

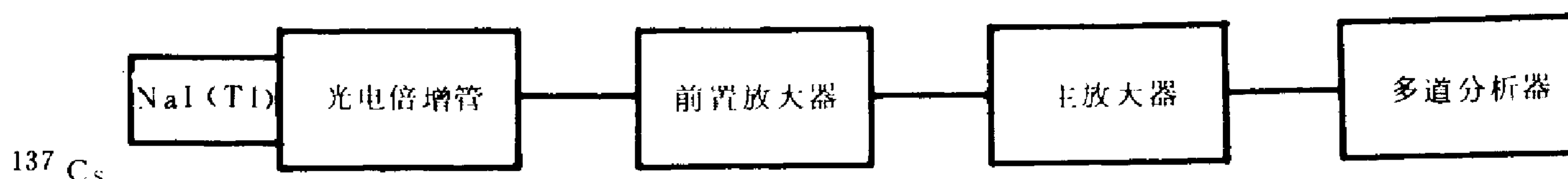


图7 电离辐射输入信号脉冲幅度的测试方框图

测试装置需用精密脉冲幅度发生器进行校准。

测试注意事项:

- 计数率和分辨时间的选择应使脉冲堆积足够小,使不致明显地影响测量的准确度;
- 光电倍增管应处于线性工作状态。整个测试装置应作线性检验,如用 $^{60}\text{Co}$ 核辐射源,它的高能峰几乎正好是 $^{137}\text{Cs}$ 全能峰的两倍。

采用具有谱光滑功能的计算机多道分析器,比一般的多道分析器能更准确地确定分布曲线峰值的脉冲幅度。

### 5.2 〔脉冲〕幅度分辨率

#### 5.2.1 闪烁探测器对 $^{137}\text{Cs}$ 的幅度分辨率

这种幅度分辨率主要是光阴极量子效率、收集效率和空间均匀性以及闪烁体分辨率的函数。

测试方框图与图7同。 $^{137}\text{Cs}$ 核辐射源直接置于闪烁体入射窗中心,源强使测试装置的总计数率不超过 $1000\text{s}^{-1}$ ;  $\text{NaI}(\text{Tl})$ 闪烁体的直径和厚度与光阴极直径近似相等,用硅油或粘性油将它与待测的光电倍增管进行光耦合。闪烁体的封装盒应处于光阴极电位。

测试注意事项:

- 仔细调节前级分压比,提高收集效率;
- 适当选择光电倍增管的阳极时间常数和放大器的微分、积分时间常数;
- 光电倍增管和测试装置应工作在线性状态。不适当的阳极电压、过高的增益(因而过大的阳极电流)或不适当的分压器,均可引起输出脉冲幅度分布的压缩,从而产生一个不正确(偏优)的幅度分辨率;
- 测试前,光电倍增管和闪烁体应避光存放;
- 闪烁探测器应预先工作若干小时,使之达到稳定的工作状态;
- $^{137}\text{Cs}$ 的全能峰的半高宽至少应占有16道,半高宽内各道的总计数应不少于50 000,微分和积分时间常数应不大于 $5\mu\text{s}$ ;
- 确定全能峰半幅度点(半峰值点)的值应采用线性内插法或曲线拟合法,所采用的方法应加以说明。

除上述的测试方法外，也可采用如下两种方法：

一种方法是采用计算机控制多道分析器的测试装置，借助于假设全能峰的上半部近似于高斯分布来决定半高宽。虽然观测到的分布曲线通常稍不对称，但一般说来，基于高斯分布所决定的幅度分辨率值与采用上述方法所得的值相符。

另一种方法是采用具有谱光滑功能的计算机多道分析器来代替一般的多道分析器，由于每道计数的统计起伏可大大减小，因而可显著提高幅度分辨率的测量精确度。

### 5.2.2 闪烁探测器对 $^{55}\text{Fe}$ 的幅度分辨率

测试方框图与图7同。核辐射源 $^{55}\text{Fe}$ 直接置于闪烁体入射窗中心，源强使测试装置的总计数率不超过 $1000\text{ s}^{-1}$ 。闪烁体的封装盒应处于光阴极电位，用硅油或粘性油将它与待测的光电倍增管进行光耦合。测试按5.2.1的方法进行。

$^{55}\text{Fe}$ 的幅度分布是不对称的，高斯分布不能完全描述观测到的分布。因此，基于高斯分布的假设所测得的分辨率是不理想的。

### 5.2.3 固有幅度分辨率

测试方框图如图8所示。采用合适的脉冲光源，例如发光二极管光源，其入射于光阴极的光子数可通过调节减光器的透射率，使输出的脉冲幅度分布的峰值与 $^{137}\text{Cs}-\text{NaI}(\text{Tl})$ 产生的全能峰的峰位在同一道数上。脉冲光源必须置于使光阴极均匀受照的位置，光谱特性和脉冲持续时间最好与 $^{137}\text{Cs}-\text{NaI}(\text{Tl})$ 信号相近，重复频率约 $1\text{ kHz}$ 。滤光片为蓝色滤光片（如QB24），阳极时间常数必须比光脉冲的持续时间和闪烁体的闪烁衰减时间大得多。

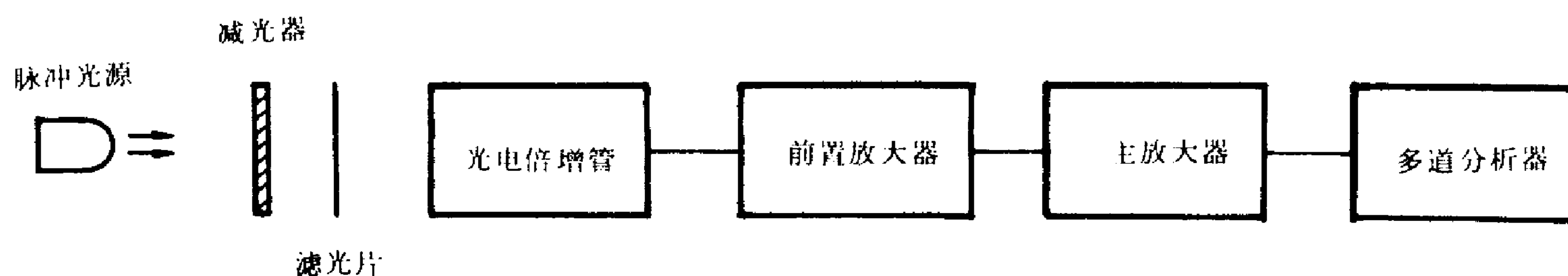


图8 光电倍增管固有幅度分辨率测试方框图

用等效于 $^{137}\text{Cs}-\text{NaI}(\text{Tl})$ 的脉冲光源测得的幅度分辨率，可用来估计 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 闪烁体可能获得的幅度分辨率。然而，由于脉冲光源的闪光不能模拟 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 闪烁体所具有的光的空间分布，而且没有考虑到闪烁体的分辨率，所以这种测试仅能提供所能期望的对 $^{137}\text{Cs}$ 分辨率的近似极限。

### 5.2.4 单电子幅度分辨率

单电子幅度分辨率仅对那些能够分辨单电子峰的光电倍增管才有意义。单电子幅度分辨率仅与倍增系统的结构、第一倍增级的次级发射系数和收集电压等有关。

#### 5.2.4.1 恒定光源法

测试方框图如图9所示。

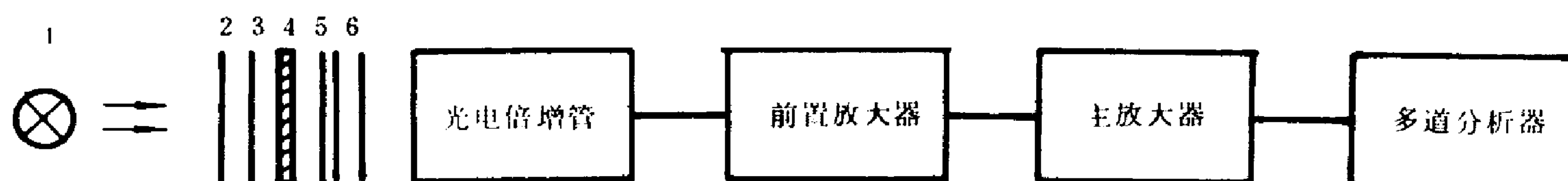


图9 单电子幅度分辨率测试方框图（恒定光源法）

1—小型钨丝灯，作为单光电子的激发源；2—光闸，控制光的通断；3—小孔光阑；4、5—分别为减光器和偏振片组，用于调节入射于光阴极的光子数；6—窄带滤光片，使入射于光阴极的光子能量近似相同

测试步骤如下：

- 开启光闸，调节减光器和偏振片组使人射于光阴极的光子所产生的输出脉冲有合适的总计数率。这时多道分析器测得的曲线是单光电子分布曲线与暗脉冲分布曲线之和；
- 关闭光闸，这时多道分析器测得的是暗脉冲分布曲线；
- 将步骤a. 与b. 测得的曲线，利用多道分析器的“剥谱”功能得到单电子分布曲线；
- 按照幅度分辨率的定义求出单电子幅度分辨率。

#### 5.2.4.2 脉冲光源法

这一方法适用于暗脉冲计数率较高的光电倍增管，其测试方框图如图10所示。

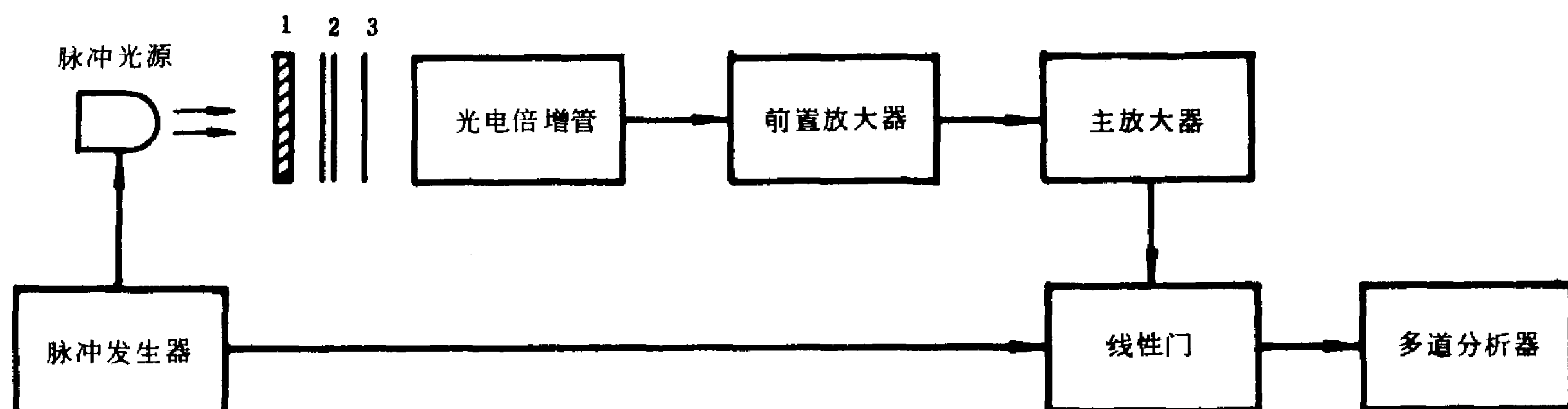


图 10 单电子幅度分辨率测试方框图（脉冲光源法）

1—减光器；2—偏振片组；3—窄带滤光片

测试步骤如下：

- 调节减光器和偏振片组，使光脉冲在光阴极产生一个与两个光电子事件之比应不小于100；
- 脉冲发生器输出触发脉冲作为线性门的开门脉冲。由光脉冲产生的单光电子脉冲经放大器放大后，通过线性门到多道分析器，在多道分析器上显示单电子分布曲线；
- 按幅度分辨率的定义求出单电子幅度分辨率。

#### 5.2.4.3 暗脉冲法

直接利用暗脉冲分布曲线来求单电子幅度分辨率。某些光电倍增管虽然可从暗脉冲来获得单电子分布，然而，恒定光对于证实多道分析器显示的真正单电子峰的位置还是需要的。

某些光电倍增管能够分辨单电子峰，但由于噪声的影响，得到的脉冲幅度分布在低能侧不可能下降到半幅度点（半峰值点）。在这种情况下，可以规定幅度分布曲线上另外某些幅度处（例如75%）的宽度与峰值脉冲幅度的比值来表示，但应强调这一数值不是以半高宽与峰值脉冲幅度的比值所定义的幅度分辨率。

单电子幅度分辨率测试注意事项：

- 收集电压应足够高（如500 V），要仔细调节前级分压比，以获得高的收集效率；
- 应保证光电倍增管测试装置工作在线性状态。在计数实验中，光电倍增管有时工作在线性状态，该状态的单电子分布也可用半高宽与峰值脉冲幅度的比值来表征。但是，该值不应称为单电子幅度分辨率，给出结果时，应指明是对非线性工作状态下的测量值。

#### 5.2.5 多电子幅度分辨率

多电子幅度分辨率是光电倍增管倍增系统对一个或两个电子组成的输入信号的分辨能力的量度。这种测量仅适用于那些能够分辨一个或两个电子事件的光电倍增管，如具有高次级发射系数第一倍增极的光电倍增管。

测试方框图与图10同，多道分析器应只在光电倍增管输出所期望的脉冲期间才选通。借助于调节入射于光阴极的光子数使单电子、双电子和其他电子数的峰值彼此之间可以建立在任一相对高度，多道分析器显示器观察到的脉冲幅度分布如图11所示。

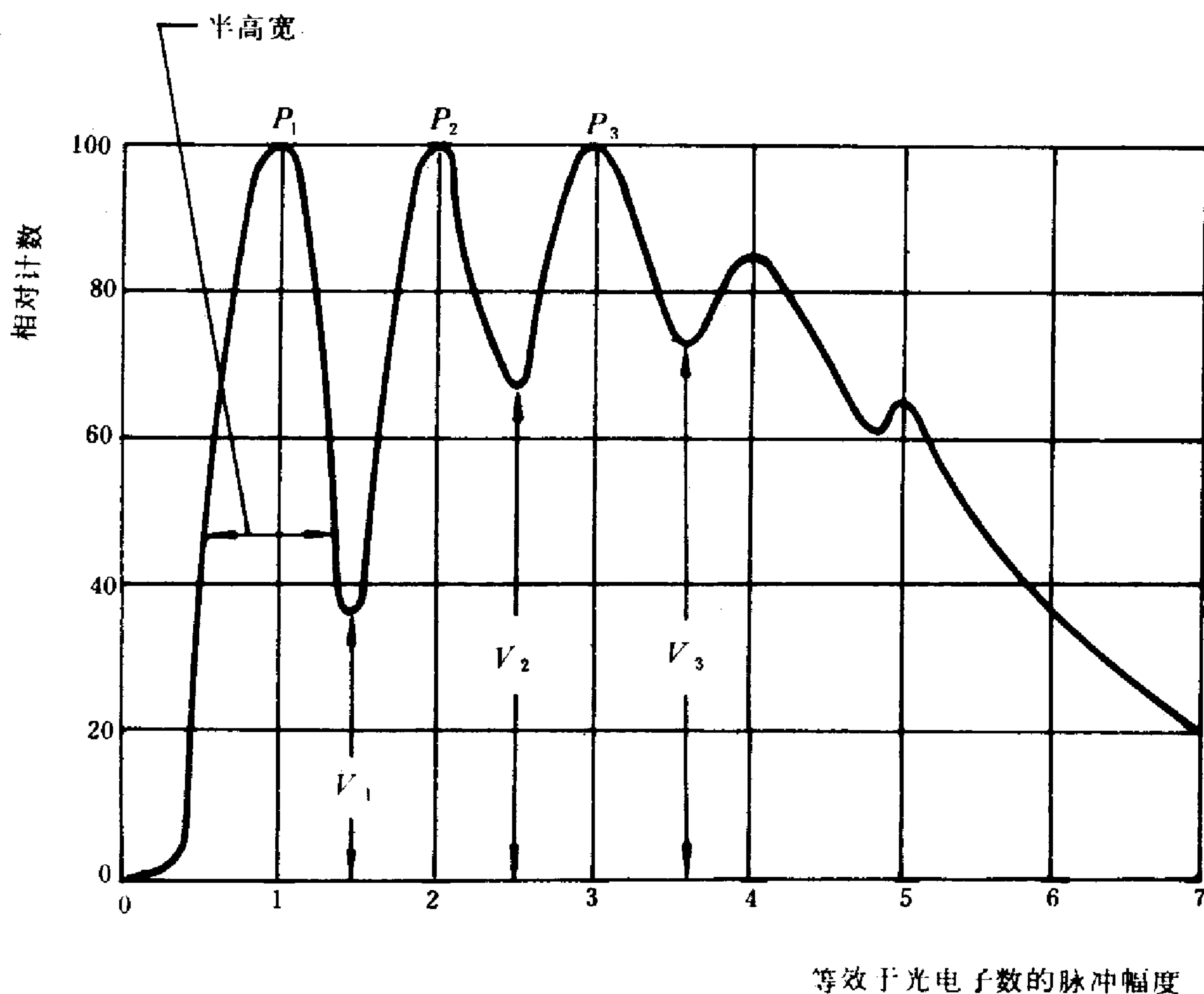


图 11 具有稳定的高次级发射系数第一倍增极(例如GaP)的光电倍增管的典型多电子幅度分布

量度幅度分辨率,对第一个电子峰既可采用半高宽与峰值脉冲幅度的比值,也可采用峰谷比 $P_1/V_1$ ,对第二个、第三个电子峰的幅度分辨率只能采用测量相等幅度的相邻峰的峰谷比 $P_2/V_2$ 、 $P_3/V_3$ ……来量度。

测试注意事项同5.2.4。

## 6 噪声参数测试方法

### 6.1 暗噪声

#### 6.1.1 暗电流噪声

暗电流噪声的测试方框图如图12所示。电路中的滤波器具有规定的噪声等效通频带,在指定的工作电压下记下噪声的均方根值,并转换成电流量,即为暗电流噪声 $I_{nd}$ 。环境温度、测试装置带宽、阳极负载电阻以及杂散电容都应加以规定或说明。光电倍增管测试前须避光存放,测试时应完全隔离外界辐射。

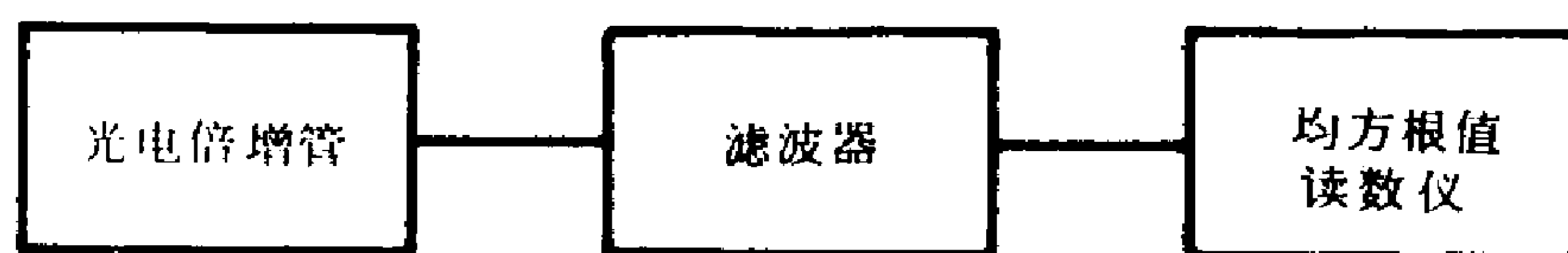


图 12 暗电流噪声测试方框图

#### 6.1.2 噪声等效输入

暗电流噪声的等效输入,可以表征为噪声等效光通量,也可表征为噪声等效辐通量,它们的测试原理图如图13所示。

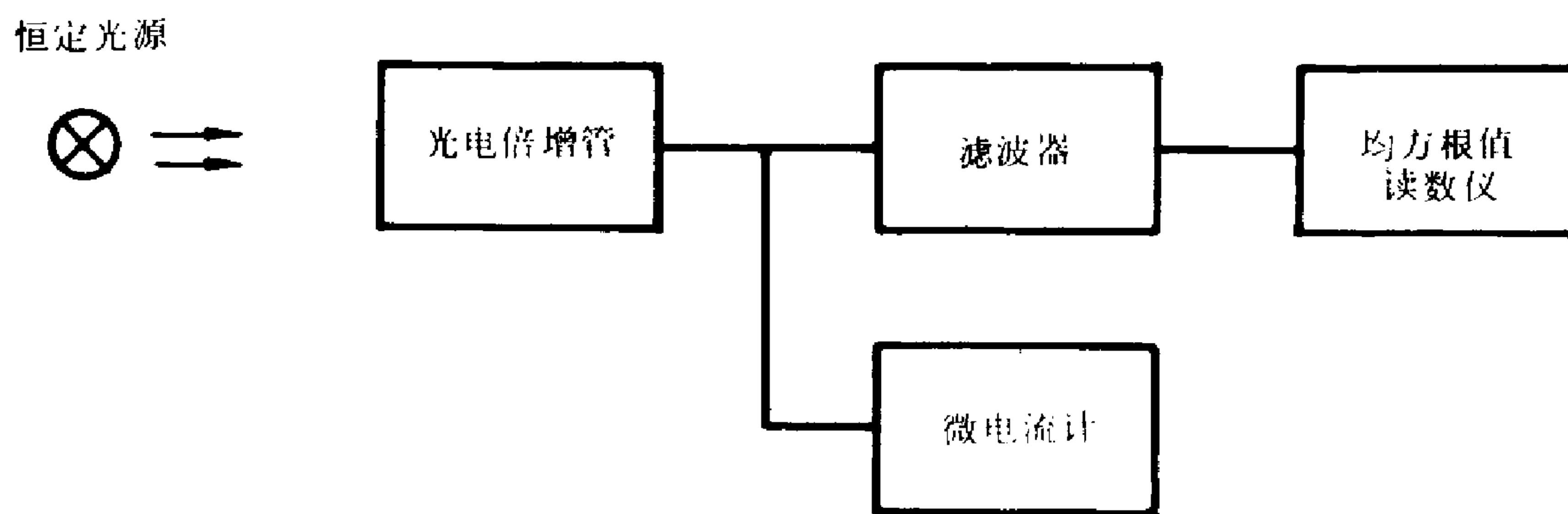


图 13 用恒定光源测试噪声的方框图

在一定的工作条件下，先测出光阴极受照时的信号输出电流，再测出无照时暗电流噪声。即可根据下面两式分别求出单位带宽的噪声等效光通量或单位带宽的噪声等效辐通量。

$$F_n = \frac{I_{nd}}{I_s} \cdot \frac{F_k}{\sqrt{\Delta f}} \dots\dots\dots (17)$$

$$\phi_n = \frac{I_{nd}}{I_s} \cdot \frac{\phi_k}{\sqrt{\Delta f}} \dots\dots\dots (18)$$

式中： $F_n$  ——暗电流噪声等效光通量， $lm/Hz^{\frac{1}{2}}$ ；  
 $\phi_n$  ——暗电流噪声等效辐通量， $W/Hz^{\frac{1}{2}}$ ；  
 $F_k$  ——测试时阴极受照的光通量， $lm$ ；  
 $\phi_k$  ——测试时阴极受照的辐通量， $W$ ；  
 $I_{nd}$  ——暗电流噪声， $A$ ；  
 $I_s$  ——信号输出电流， $A$ ；  
 $\Delta f$  ——滤波器的通频带， $Hz$ 。

6.1.3 噪声能当量、噪声等效能量

测试方框图与图 7 同，光电倍增管工作在正常工作电压下。测试时首先调节放大器的放大倍数，使  $^{137}Cs - NaI (Tl)$  信号脉冲分布曲线的全能峰位于多道分析器的适当道数上，设为  $D_s$  道。然后取去  $NaI (Tl)$  闪烁体和  $^{137}Cs$  核辐射源，并屏蔽外界所有的核辐射源。再调节放大器的放大倍数，使暗脉冲分布曲线位于多道分析器的适当道数区间。若  $D_n$  道以上的积分计数率为  $50s^{-1}$ 。则噪声能当量由下式计算：

$$E_n = \frac{D_n \cdot K_s}{D_s \cdot K_n} E_s \dots\dots\dots (19)$$

式中： $K_s$ 、 $K_n$  ——分别为放大器对  $\gamma$  辐射脉冲和暗脉冲的放大倍数；  
 $E_s$  —— $\gamma$  辐射的能量， $E_s$  和  $E_n$  的单位为  $keV$ 。

另外，也可采用积分甄别器和定标器（或其他计数仪器）来代替多道分析器。

测试注意事项：

- a. 噪声测试属于弱“信号”测试，测试系统，尤其是前置放大器的噪声应尽可能低，以保证测量的准确度；
- b. 屏蔽周围电离辐射的干扰；
- c. 避免磷光效应的影响；
- d. 选择放大器的微分和积分时间常数，使噪声最低；
- e. 给出测试结果时应注明环境温度。

6.1.4 暗〔脉冲〕计数率

测试暗计数率首先要调节上下两个阈值，而调节阈值又必须先确定单电子平均幅度的道数。光电倍增管的单电子分布曲线为非对称的玻里亚分布，如图14所示。单电子平均幅度的道数 $\bar{D}$ 由下式计算：

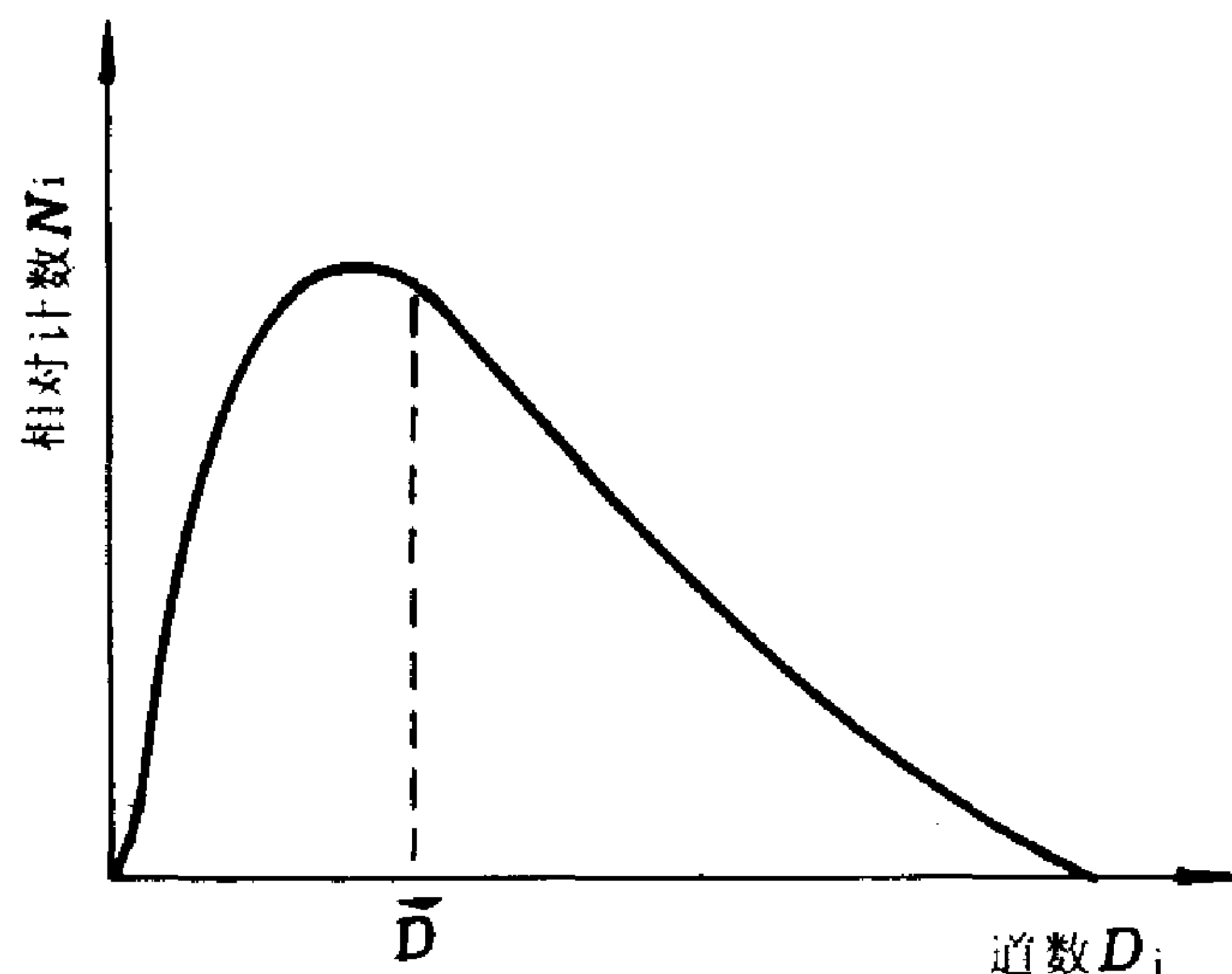


图 14 单电子分布曲线示意图

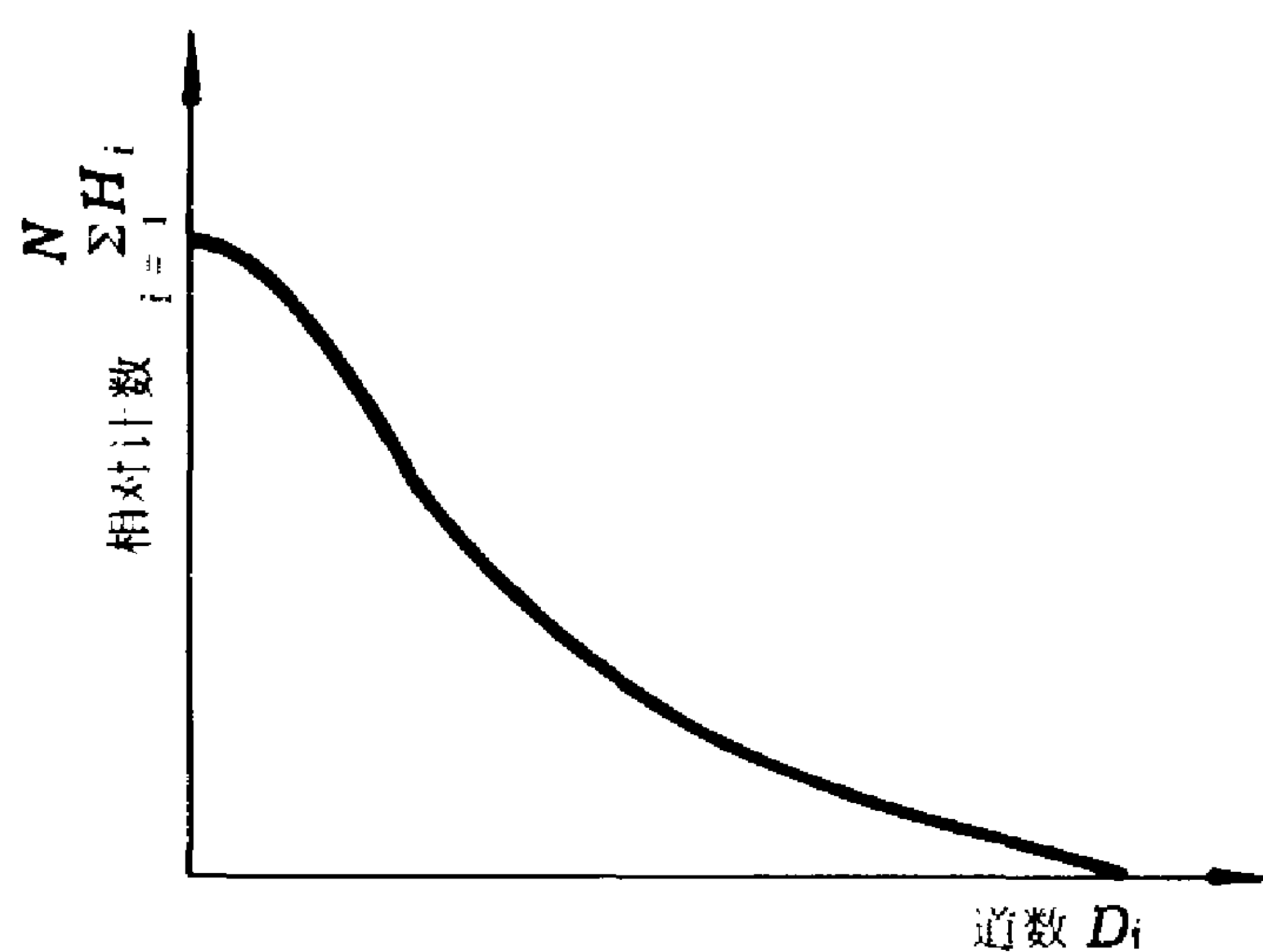


图 15 单电子积分曲线示意图

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^k N_i} \dots\dots\dots (20)$$

上式可改写成：

$$\bar{D} = \left[ \sum_{i=1}^k N_i + \sum_{i=2}^k N_i + \dots\dots + \sum_{i=k-1}^k N_i \right] / \sum_{i=1}^k N_i \dots\dots\dots (21)$$

式(21)的分子就是单电子积分曲线(图15)的面积，而分母就是单电子分布曲线(图14)的面积。因此，分别求出这两个面积即可计算出单电子平均幅度(道数)。

测试方框图与图9同，测试时首先按5.2.4所述方法在多道分析器上得到单电子分布曲线，利用多道分析器的“计数和”功能，求出单电子分布曲线的面积，再利用多道分析器的“积分”功能，将单电子分布曲线转换成单电子积分曲线，求出积分曲线的面积。由式(21)即可算出单电子平均幅度(道数)。

最后，按照暗计数率上下阈值的规定，即可由多道分析器上的暗脉冲分布曲线求得暗计数率。

除6.1.3中所述的注意事项外，应加较高的收集电压(如500V)，同时要仔细调节前级分压比，以获得高的收集效率。

6.2 信号中噪声

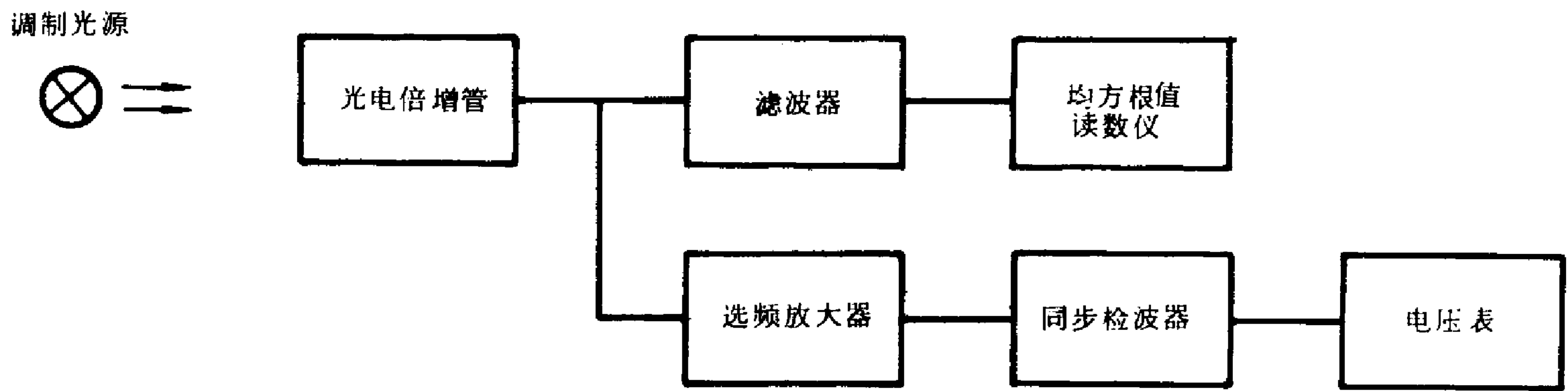


图 16 用调制光源测试噪声的方框图

信号中噪声的测试可用恒定光源测试,也可用调制光源测试,测试方框图分别如图13和图16所示。在恒定入射光情况下,先测出直流输出电流作为信号电流,再测出通过具有规定通频带滤波器的信号输出电流中噪声的均方根值,并转换成电流量,即为信号中的噪声。

在调制入射光的情况下,应采用调谐在光调制频率上的选频放大器,先通过选频放大器测出信号输出电流,再按上述同样方法测出噪声输出电流的均方根值。

工作电压、入射光通量或输出电流、阴极受照面积、环境温度、测试装置带宽、阳极负载电阻以及杂散电容等都应加以规定或说明。

6.3 信噪比

6.3.1 对暗电流噪声的信噪比

信号输出电流与暗电流噪声的比值。

暗电流噪声按6.1.1测试。

6.3.2 对信号中噪声的信噪比

输出电流与信号中噪声电流的比值。

信号中噪声按6.2测试。

7 时间参数测试方法

7.1 [脉冲] 上升时间

7.1.1 [光电倍增管] 上升时间

测试方框图如图17所示,光电倍增管的输出脉冲可作为示波器的触发信号。

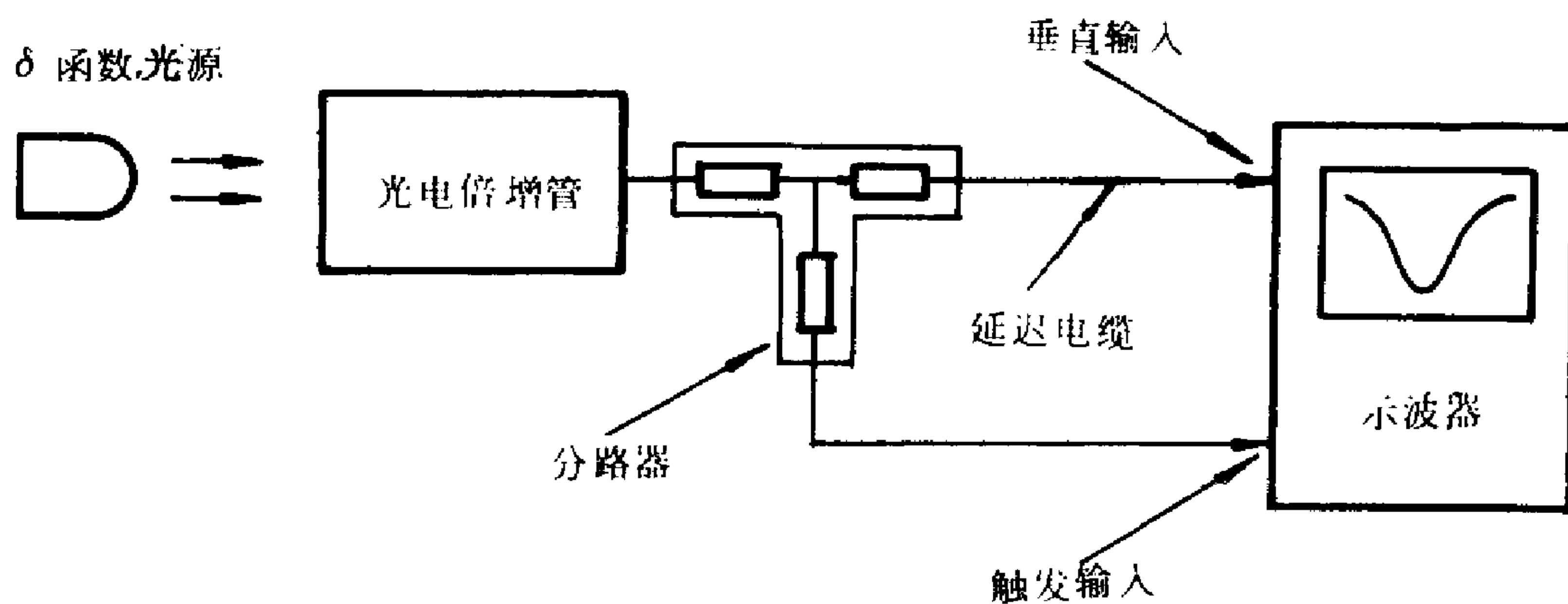


图 17 上升时间测试方框图

由于组成测试系统的各个单元具有有限的上升时间,从示波器的波形图测得的上升时间必须经过校正。光电倍增管的上升时间 $\tau_s$ 通常由下式计算:

$$\tau_s = \sqrt{\tau_{s1}^2 - \tau_{s2}^2 - \tau_{s3}^2 - \tau_{s4}^2 - \tau_{s5}^2 \dots} \quad (22)$$

式中:  $\tau_{s1}$  —— 示波器上测得的上升时间;

- $\tau_{s2}$  ——光源的上升时间；
- $\tau_{s3}$  ——分路器的上升时间；
- $\tau_{s4}$  ——延迟线的上升时间；
- $\tau_{s5}$  ——示波器的上升时间。

上式假定诸单元表现为高斯单元。

由于对于延迟线和示波器，这种假定不能成立，如果使用了电抗性的信号分路器（例如变压器耦合分路器），它也不具有高斯单元的性质。因此在用各个单元的有限上升时间对 $\tau_s$ 的校正中包含误差，为此，最好选择上升时间不超过光电倍增管上升时间的三分之一的单元。组成测量系统的诸单元的上升时间必须加以说明，例如：GaAsP发光二极管光源的上升时间小于600 ps，信号延迟线的上升时间用时域反射计测得为100 ps，示波器上升时间为50 ps。

给出测试结果时，应注明每个脉冲的光电子数、工作电压、分压比、光电倍增管增益、峰值输出电流以及光源的光谱分布。

测试注意事项：

- a. 应选用高频特性好的电缆接头和延迟电缆，选用分布电感小的电荷储存电容以及其他有关元件，并取得良好的匹配；
- b. 接线应尽量短，电荷储存电容应接在管座上，以使高频信号通道上的分布参数为最小。应该用时域反射计监测，以保证系统（包括光电倍增管管座）有尽可能小的上升时间；
- c. 应有足够的光子数（另有规定除外）入射于光阴极，使在示波器上能给出一个稳定而清晰的输出脉冲波形；
- d. 光电倍增管应处于线性工作状态。

此测试注意事项也适用于以下时间参数的测试。

### 7.1.2 反射脉冲上升时间

用时域反射计与光电倍增管阳极输出接头相连接测量上升时间，时域反射计的上升时间应不大于反射脉冲上升时间的三分之一。

如果光电倍增管没有同轴输出接头，则在管子阳极输出端与同轴电缆之间的传输部分应符合高频传输特性的要求，相应管座的反射脉冲上升时间也应加以说明。

### 7.1.3 单电子〔脉冲〕上升时间

单电子上升时间，仅是倍增系统引起的时间展宽，因此，该上升时间小于光电倍增管上升时间。测试单电子上升时间要求管子具有足够的增益，使单电子事件可在取样示波器上观测，同时光电倍增管单电子幅度分辨率应不大于200%，否则，在调节示波器触发电平时会遇到很大困难，而且测量结果可能出现错误。

单电子上升时间测试装置与图17基本相同，只是不需要 $\delta$ 函数光源。光阴极的暗发射就可用作单电子源。如果暗电流太小，可加恒定光来提高电子的发射率，为了保证输出脉冲是由单电子激发的，也需要应用恒定光来验证。当暗电流（或衰减了的恒定光）用作单电子源时，必须用阳极输出脉冲作为取样示波器的触发信号。

信号拾取探头（其上升时间应小于光电倍增管上升时间的三分之一）可采用电阻分压器，若按某种方式制造，其上升时间小于100 ps；也可来用带有内触发信号拾取的延迟线。

在给出单电子上升时间时，应对工作电压、分压器、所用的仪器和方法加以说明。

## 7.2 脉冲响应宽度

### 7.2.1 〔光电倍增管〕脉冲响应宽度

参照7.1.1的方法测试。脉冲响应宽度可由下式计算：

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 - \tau_2^2} \dots\dots\dots (23)$$

式中： $\tau_1$  ——示波器观察到的输出脉冲半幅度点之间的时间间隔；

$\tau_2$ ——光脉冲半幅度点之间的时间间隔。

$\tau_2$  应不超过  $\tau$  的三分之一。

7.2.2 单电子脉冲响应宽度

参照7.1.3和7.2.1的方法测试。

7.3 [脉冲] 下降时间

7.3.1 [光电倍增管] 下降时间

参照7.1.1的方法测试，所用光源的下降时间应小于光电倍增管下降时间的三分之一。

7.3.2 单电子 [脉冲] 下降时间

参照7.1.3和7.3.1的方法测试。

7.4 渡越时间

7.4.1 [光电倍增管] 渡越时间

测试方框图如图18所示。它需要一台示波器和一个能输出标记脉冲的 $\delta$ 函数光源，该标记脉冲在时间上应与闪光同步。

适当选择延迟电缆的长度，可将标记脉冲和输出脉冲都置于示波器的显示屏上。于是光电倍增管渡越时间可由下式计算：

$$t_{tr} = t_{z1} + t_{z2} - (t_{z3} + t_{z4}) \dots\dots\dots (24)$$

式中： $t_{z1}$  —— 标记脉冲与输出脉冲前沿半幅度点之间的时间间隔；

$t_{z2}$  —— 延迟电缆的延迟时间；

$t_{z3}$  —— 光时延即光脉冲从光源到光电倍增管所需的时间；

$t_{z4}$  —— 电缆A的延迟时间。

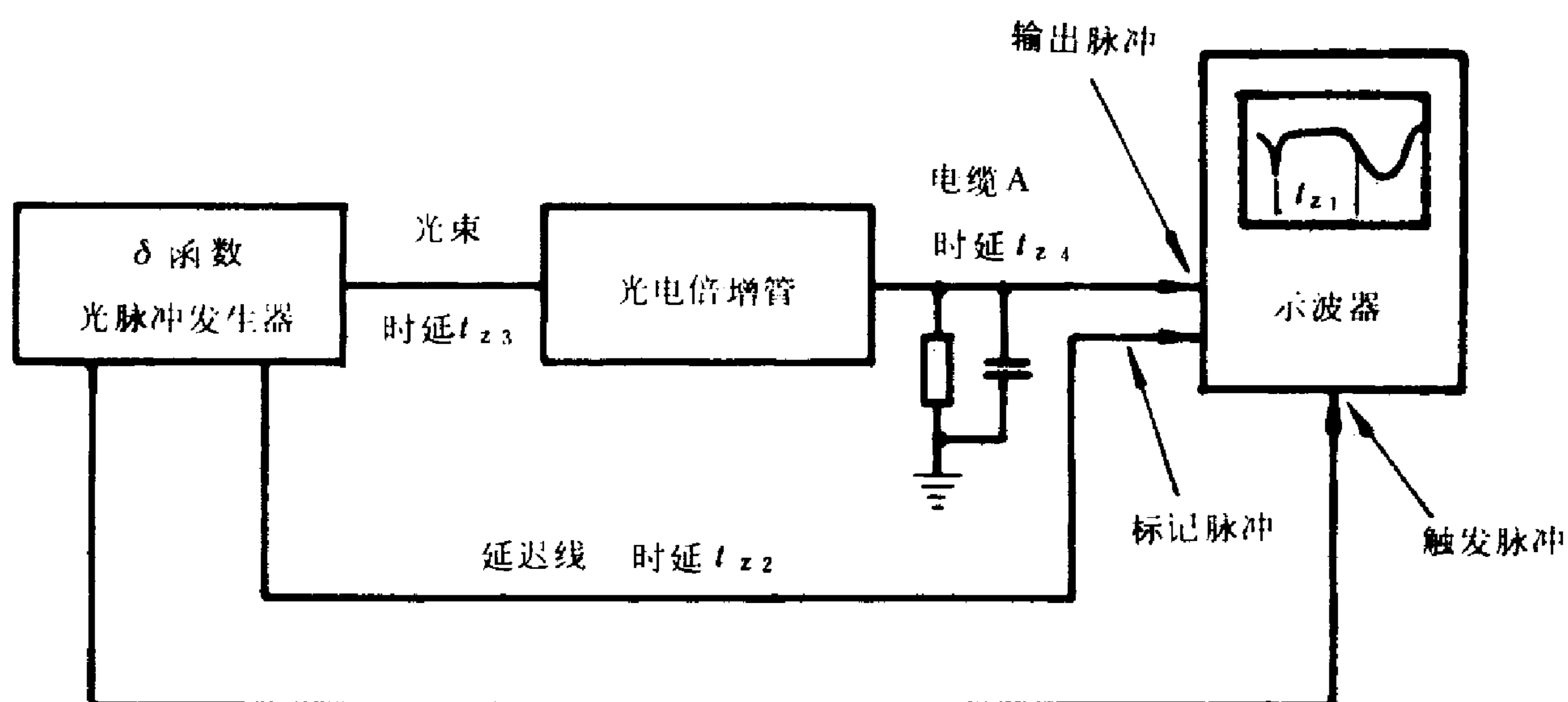


图 18 渡越时间测试方框图

电缆的延迟时间可用时域反射计准确地测量，光时延由距离和光速计算。给出渡越时间时应标明工作电压和分压比。

7.4.2 输入系统渡越时间

有关渡越时间参数的图解如图19所示。

测量输入系统渡越时间需要一个 $\delta$ 函数光源，光电倍增管的放置必须使同一光源对光阴极和第一倍增极能进行光激发。同时，光源必须具有能使光阴极和第一倍增极都产生光电发射的光谱。

测试时，首先测出光电倍增管渡越时间，然后加偏置电压来截止阴极发射的电子，使能测量倍增系统渡越时间和输出结构延迟时间的组合值，从而得到输入系统渡越时间。在计算输入系统的渡越时间时，必须考虑光阴极与第一倍增极之间的光延迟。

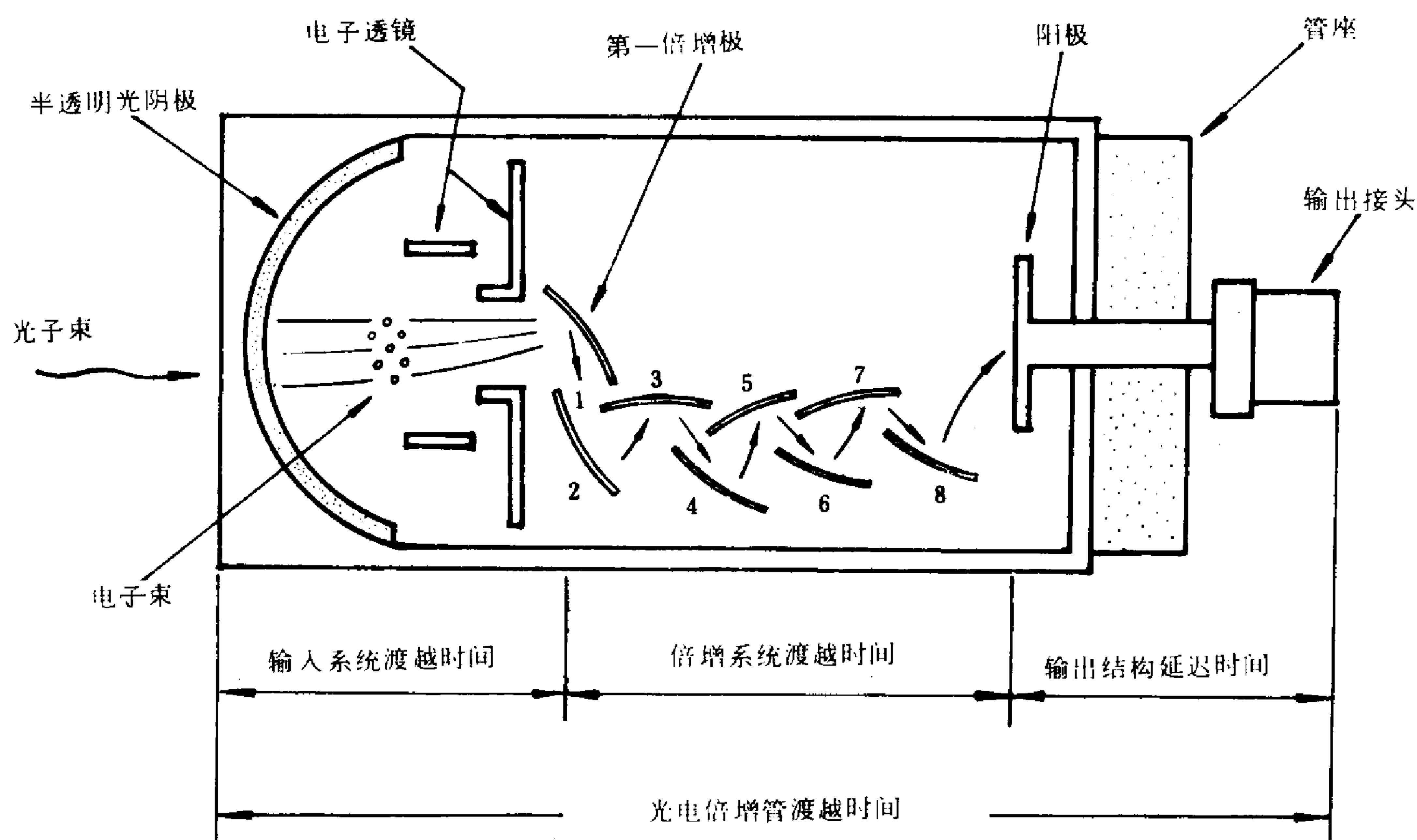


图 19 有关渡越时间参数的图解

输入系统渡越时间在整个光阴极受照下测量。光阴极偏置截止的方法必须不改变倍增系统中正常工作的电场分布，通常10V的抑制偏压就已足够，必须保证第一倍增极以外的所有其他表面不产生光电发射。

#### 7.4.3 倍增系统渡越时间

首先测出倍增系统渡越时间与输出结构延迟时间的组合值，然后减去输出结构延迟时间即可得倍增系统渡越时间。

#### 7.4.4 输出结构延迟时间

输出结构延迟时间用时域反射计测量。假如接线的管座是外输出结构的组成部分，则它的延迟时间必须和光电倍增管的内输出结构一起加以说明，例如：输出结构延迟时间为1.00ns，其中管座和同轴电缆引起的延迟时间为0.85ns。

#### 7.5 光阴极渡越时间差

光阴极渡越时间差可用一个具有触发信号来标记闪光出现瞬间的 $\delta$ 函数光源来测量。选择延迟线的长度，使在示波器上显示出标记脉冲和小光点照射光阴极中心产生的输出脉冲。然后，小光点沿着一指定直径上的某些规定点照射，显示出产生的输出脉冲。以光阴极中心为基准点，作出渡越时间差与半径的关系曲线。

#### 7.6 渡越时间分散，时间分辨率

渡越时间分散表征光电倍增管在测量一个事件出现瞬间时所能达到的精密度。

测量渡越时间分散需用一台时间—幅度变换器，一台多道分析器，此外，还需用定时甄别器来标记光电倍增管输出脉冲到达给定幅度的瞬间，建议采用恒比定时甄别器，因这种甄别器可在很宽的幅度范围内获得最佳的定时性能。

##### 7.6.1 单管渡越时间分散

测试方框图如图20所示。测试时从 $\delta$ 函数光脉冲发生器引出的触发信号作为时间—幅度变换器的“开始”信号，恒比定时甄别器的输出信号作为“停止”信号。

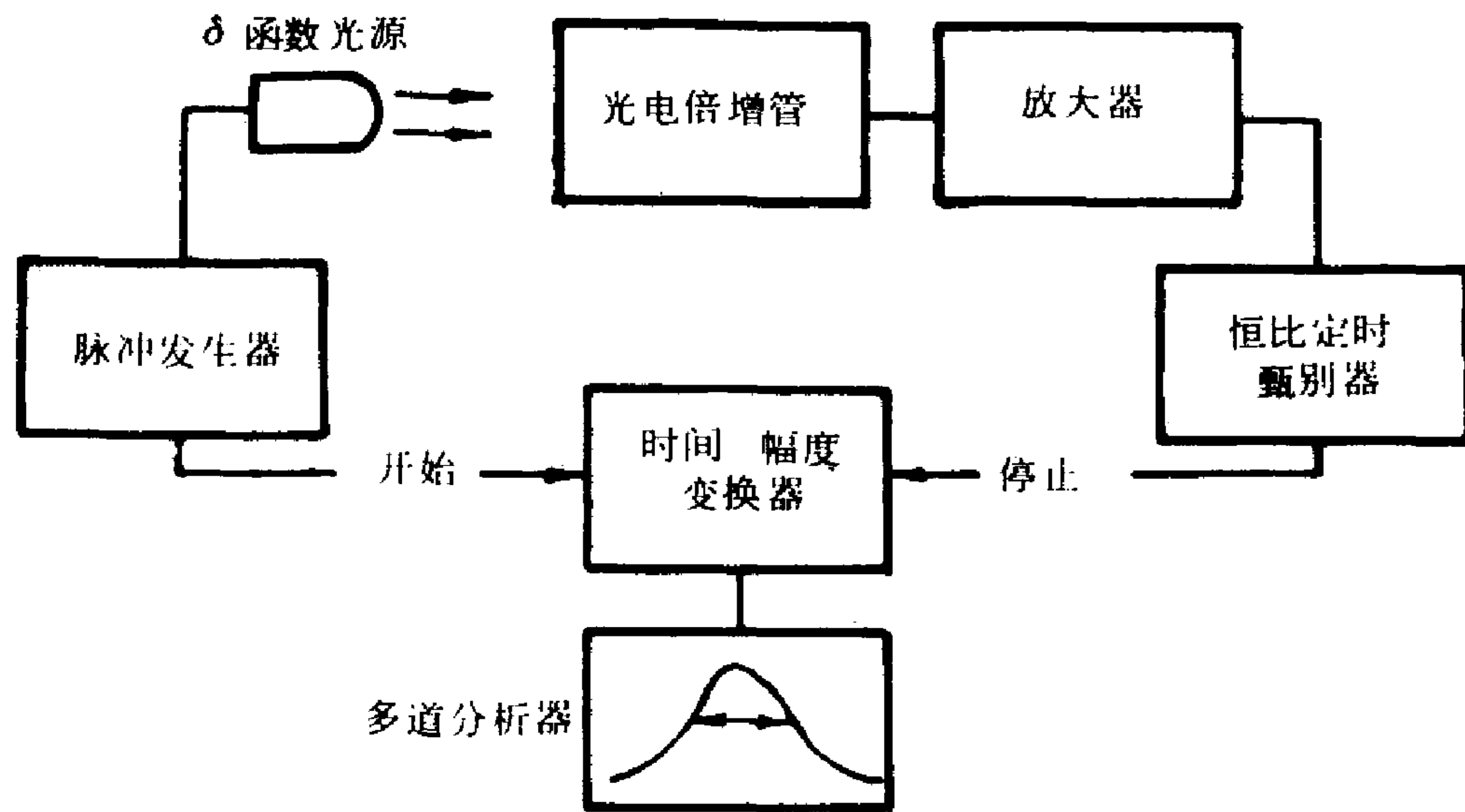


图 20 单管渡越时间分散测试方框图

给出测试结果时应标明每个脉冲的平均光电子数，因时间分辨率随每个脉冲的光电子数的增加而提高。

### 7.6.2 双管渡越时间分散

测试方框图如图21所示，用两个光电倍增管对着同一个 $\delta$ 函数光源。测试时用一个恒比定时甄别器的输出脉冲作为时间—幅度变换器的“开始”信号，用另一个恒比定时甄别器的输出脉冲作为时间—幅度变换器的“停止”信号。因此， $\delta$ 函数光源可采用切伦科夫光源或快闪烁光源。给出测试结果时应标明每个脉冲的平均光电子数。

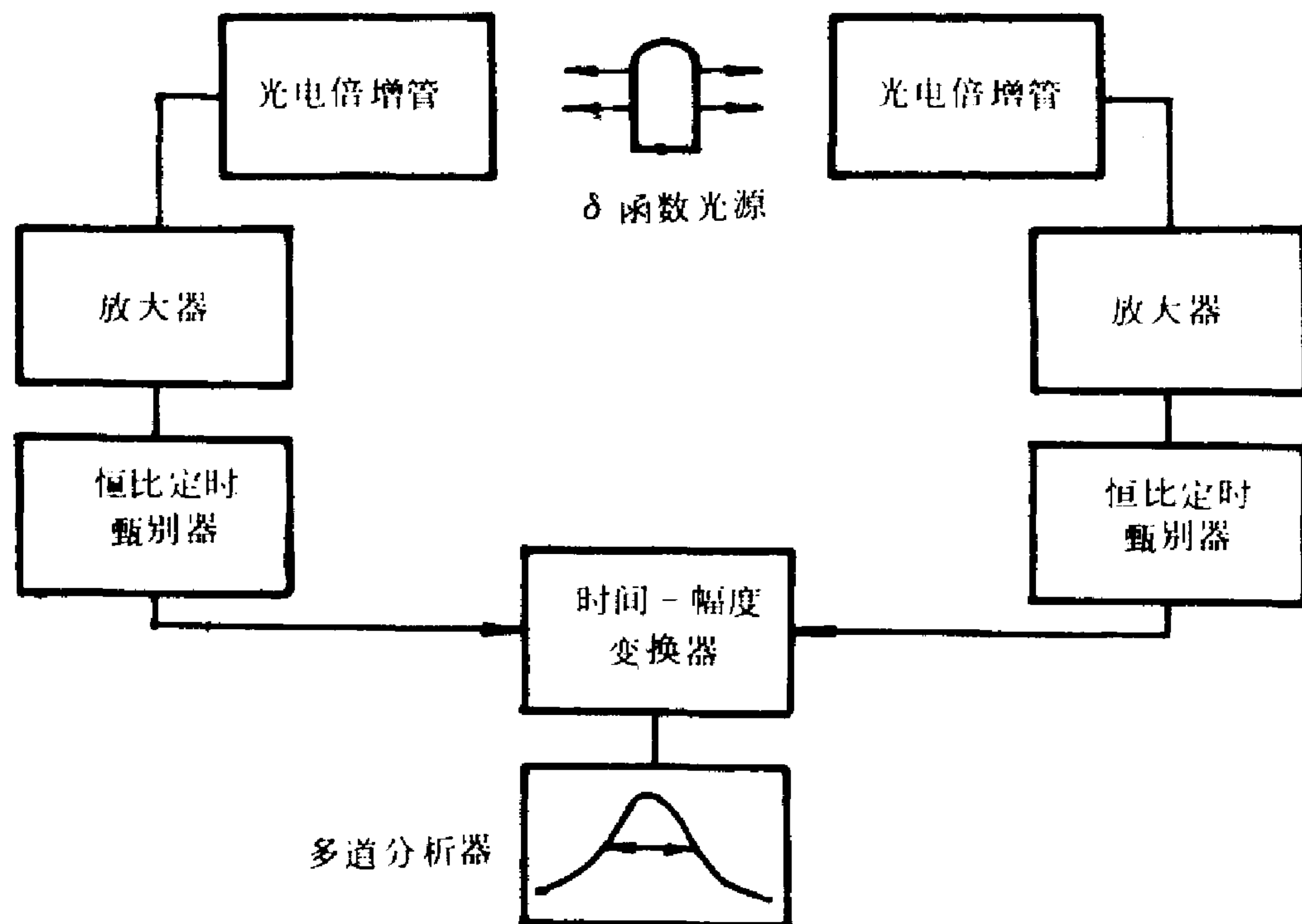


图 21 双管渡越时间分散测试方框图

### 7.6.3 单电子渡越时间分散，单电子时间分辨率

单电子渡越时间分散的测量只对单电子脉冲幅度分辨率不大于200%的光电倍增管才可靠。

测试方框图与图20同。测试时，首先按照5.2.4所述的方法，用一强衰减的恒定光，在多道分析器上取得待测光电倍增管的单电子谱。然后，衰减 $\delta$ 函数光脉冲使每个闪光所产生的最可能的光电子数等于1。当用幅度分析器监测时，一个光电子事件对两个光电子事件之比应不小于100。

单电子时间分布曲线如图22所示。

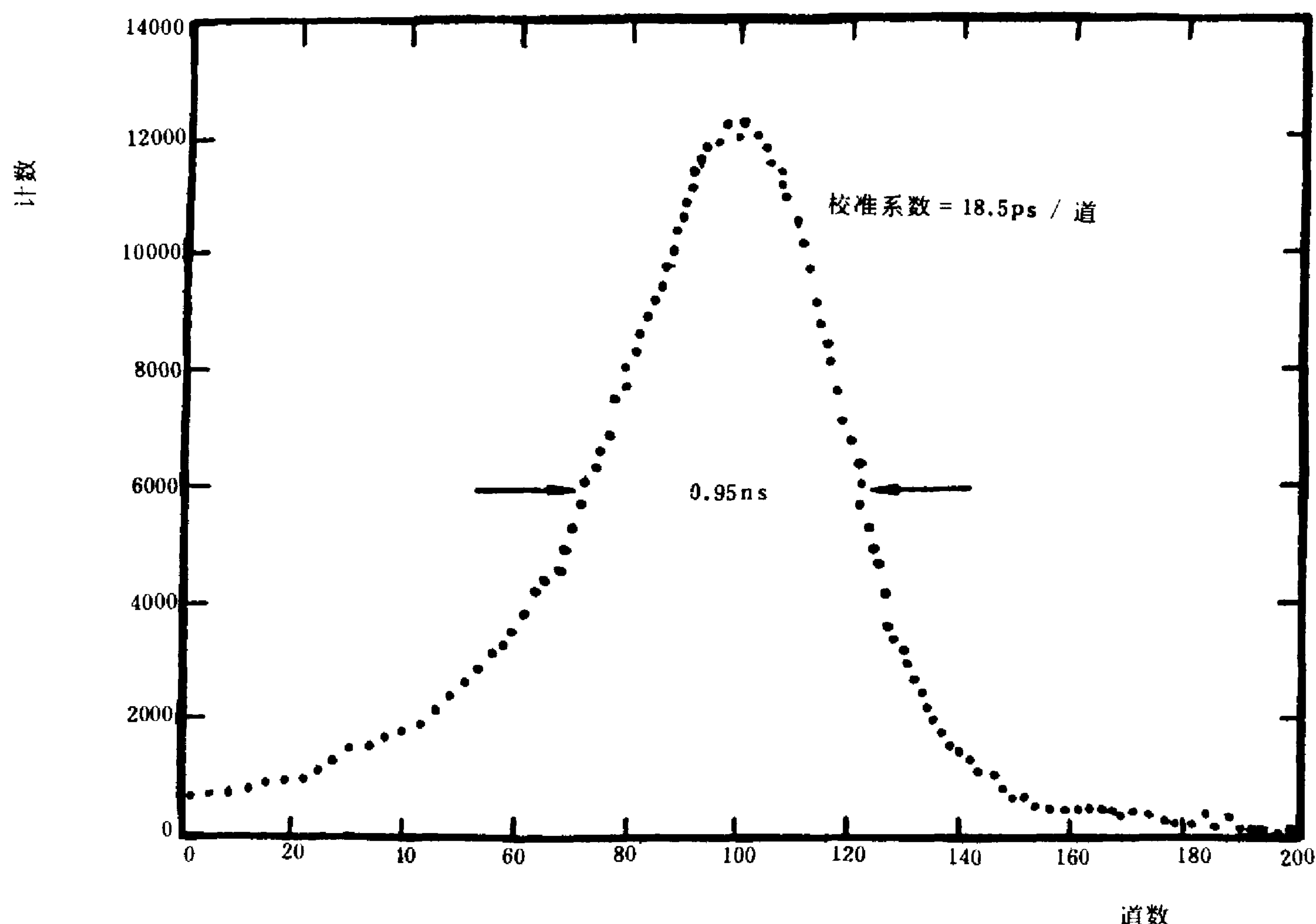


图 22 单电子时间分布曲线

测试注意事项:

- a. 时间—幅度变换器应按照制造者规定的程序校准。这种程序通常包括时基的校准，即用一已知准确延迟时间的延迟电缆接至时间—幅度变换器的“开始”或“停止”端，记下大量事件的时间位移。
- b. 光源的固有时间分散和它的触发输出应不超过被测管渡越时间分散的三分之一，并应加以说明。
- c. 时间分布曲线在半高宽内的总计数应不少于50000，半高宽至少应占有16道。
- d. 测试时，应使整个阴极面受照。
- e. 给出渡越时间分散的测试结果时，应标明是单管的、双管的还是单电子的。

## 8 光电线性测试方法

### 8.1 直流光电线性范围

输出电流与光通量之间能保持线性关系的范围。

在规定的分压器和规定的工作电压下进行测试。测试时，逐渐增大阴极受照光通量，测量与之对应的输出电流，绘成光电特性曲线，该曲线的直线部分即为直流光电线性范围。

当光通量极为微弱时，输出电流可能会被暗电流所湮没。当光通量很强时，输出电流会偏离线性，并且以偏离光电线性电流达5%时所对应的输出电流作为该工作电压下的最大直流线性电流。

光电线性直流测试方法应以电极耗散不超过安全值为前提，否则，就应该采用脉冲测试方法，见8.2。

### 8.2 最大〔脉冲〕线性电流

光电倍增管脉冲幅度的线性范围通常可达几个数量级。偏离线性通常由于两种效应:

- a. 与大电流脉冲相联系的空间电荷效应;
- b. 电阻分压器网络不能供给足够的电流来维持光电倍增管倍增极和其他电极处于恒定工作电位

的分压器效应。

### 8.2.1 偏振片法

测试方框图如图23所示。测试时旋转偏振片组的角度调节入射于光阴极的光通量，并记下相应的脉冲输出电流，然后作出脉冲输出电流与相对光通量的关系曲线，脉冲输出电流偏离该曲线的外推直线达10%时的电流值即为最大线性电流，如图24所示。偏振片组旋转的角度与透射率的关系应事先校准。

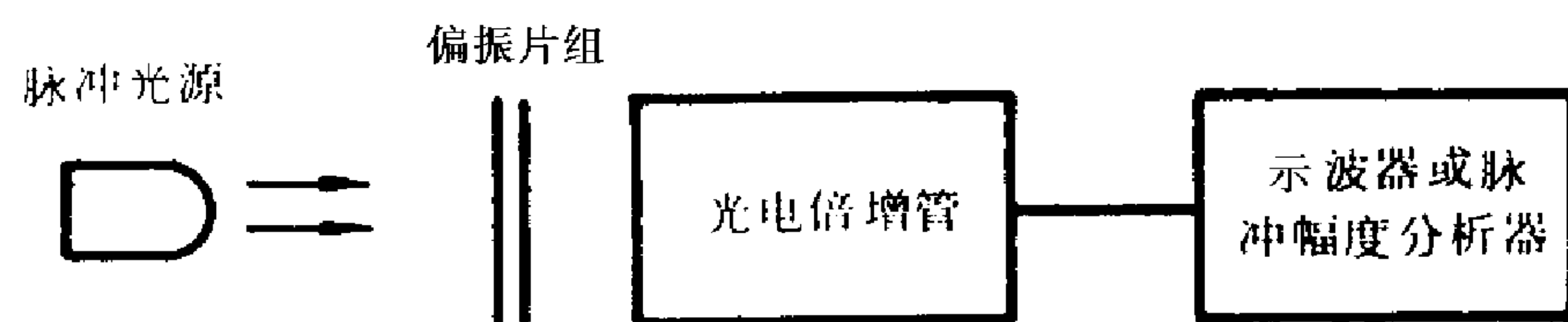


图 23 最大线性电流测试方框图 (偏振片法)

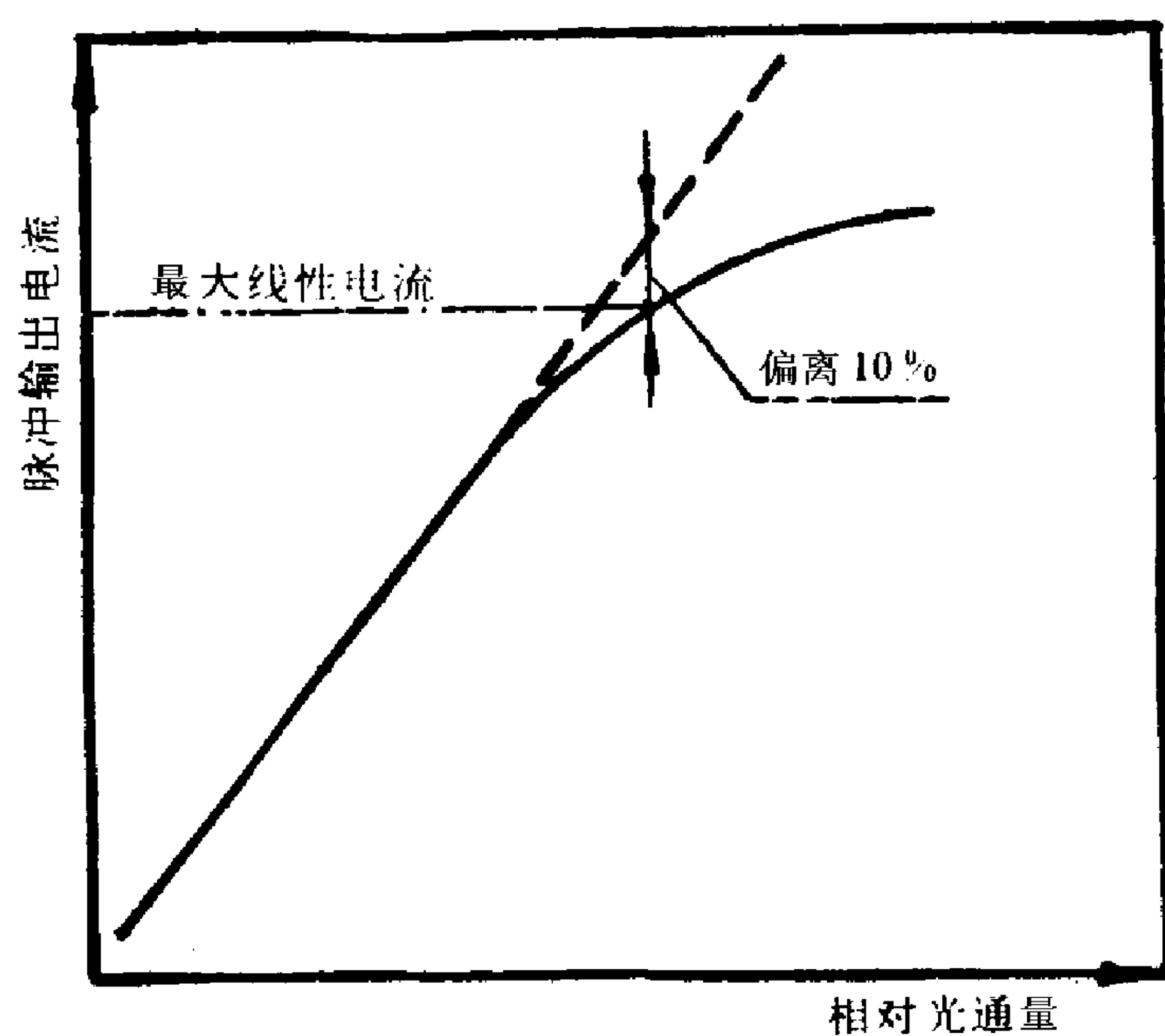


图 24 脉冲输出电流与相对光通量的关系曲线

### 8.2.2 双脉冲法

测试方框图如图25所示。光脉冲宽度应不大于 $1\mu s$ ，重复频率应足够低，使倍增极和其他电极在测试期间能保持在所需的工作电位。透射率约为10%的中性减光器安装在光闸上。输出脉冲显示在示波器或多道分析器上，记下并求出有和没有减光器情况下的脉冲输出电流的比值。然后旋转偏振片组的角度，以提高入射于光阴极的光通量并求出相应的比值，直到比值偏离弱光下比值的10%为止。这时没有减光器时的输出电流称为给定工作电压下的最大线性电流。

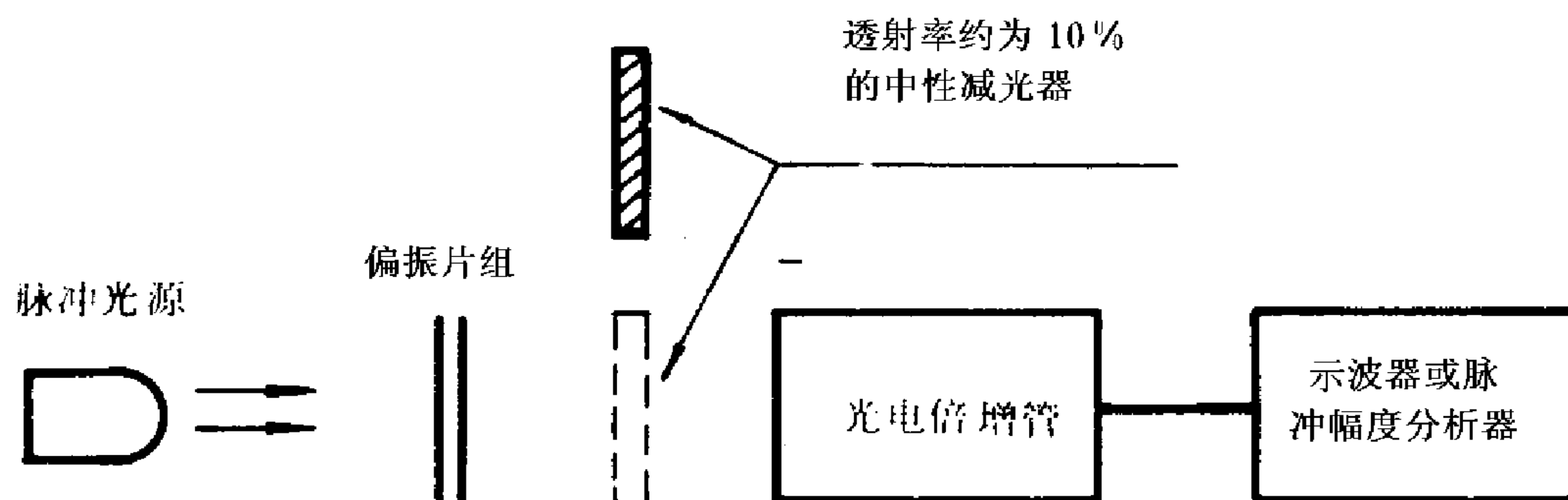


图 25 最大线性电流测试方框图 (双脉冲法)

### 8.2.3 XY示波法

测试方框图加图26所示。工作在低光通量的光电倍增管应选用快速管，使在低光通量下输出波形

不会畸变。此外，要将示波器X轴和Y轴的灵敏度分别调节到合适的值。

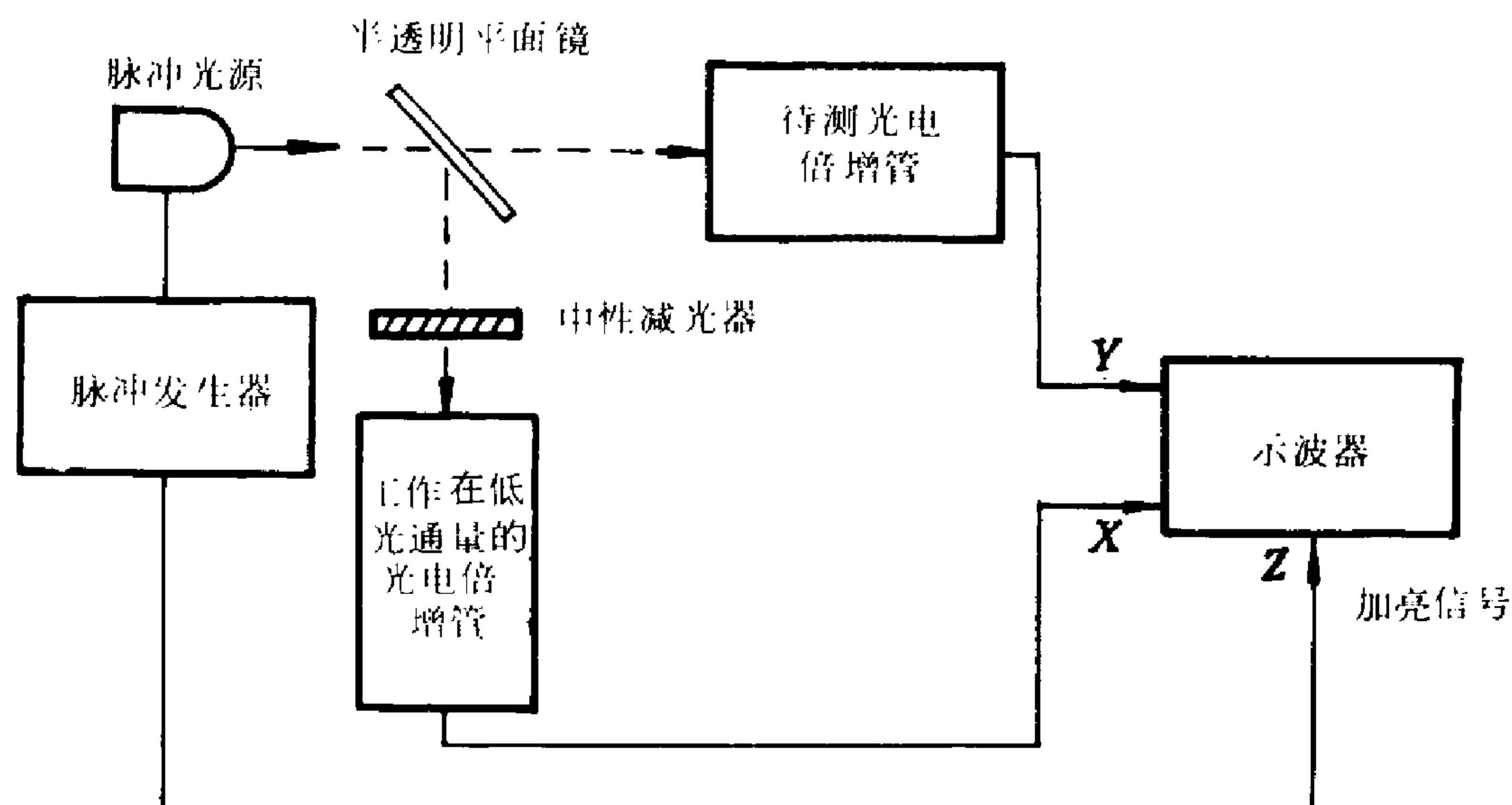


图 26 最大线性电流测试方框图 (XY 示波器)

当两个光电倍增管的脉冲幅度完全成比例时，在示波器上观察到一条直线，当脉冲输出电流偏离外推直线达10%时的电流值即为最大线性电流。

测试注意事项：

a. 脉冲光源的重复频率应尽可能低，因为分压器上并联的电荷储存电容的充电需要一定的时间，当重复频率过高时，脉冲的间隙时间过短，使电容不能充分的充电，从而造成光电倍增管电极电位分布的改变；

b. 分压器的分压电阻值要适当取小，以加快电荷储存电容充电速度；

c. 要仔细调节后级分压比，以获得较佳的最大线性电流值；

d. 在测试过程中必须注意输出脉冲波形不能改变，因为往往在脉冲输出电流幅度变化之前，可观察到上升时间的变化。

#### 8.2.4 波形比较法

测试方框图仍如图26所示，但图中示波器改用双线示波器。工作在低辐通量的光电倍增管作为基准管，该管应选用快速管，使在低辐通量下输出波形不会畸变。基准管和待测管的输出脉冲分别输入至示波器的两个垂直显示通道。

测试时，先调节入射辐通量，使待测管处于线性工作状态。然后，分别调节两个通道的水平、垂直方向的位移及偏转灵敏度，使两个通道的脉冲幅度相重合。再调节入射辐通量，直到待测管的输出脉冲幅度偏离基准管的输出脉冲幅度达10%为止，此时待测管的输出电流即为最大脉冲线性电流。

给出测试结果时要注明工作电压、分压比和负载电阻值。

## 9 均匀性测试方法

阳极光照灵敏度在整个有效阴极面内的均匀性，可用以下两种方法表示：

a. 非中心灵敏度对中心灵敏度的百分比；

b. 等灵敏度线所表征的阴极均匀性图。

均匀性可以用光谱分布已知且光通量和尺寸恒定的微小光点沿有效光阴极面作有规则的扫描，并随之测出光电倍增管阳极电流的方法来确定。扫描方法可以是手动的、电动的或电子的。测试时，需正确选择和调节分压器，并使光电倍增管工作在线性范围内。光点直径应视不同的光阴极直径（或最大线度）而适当选择，光谱分布应力求与待测光电倍增管的光谱响应特性相匹配。

常用的扫描光源可利用飞点扫描系统，测试方框图如图27所示。

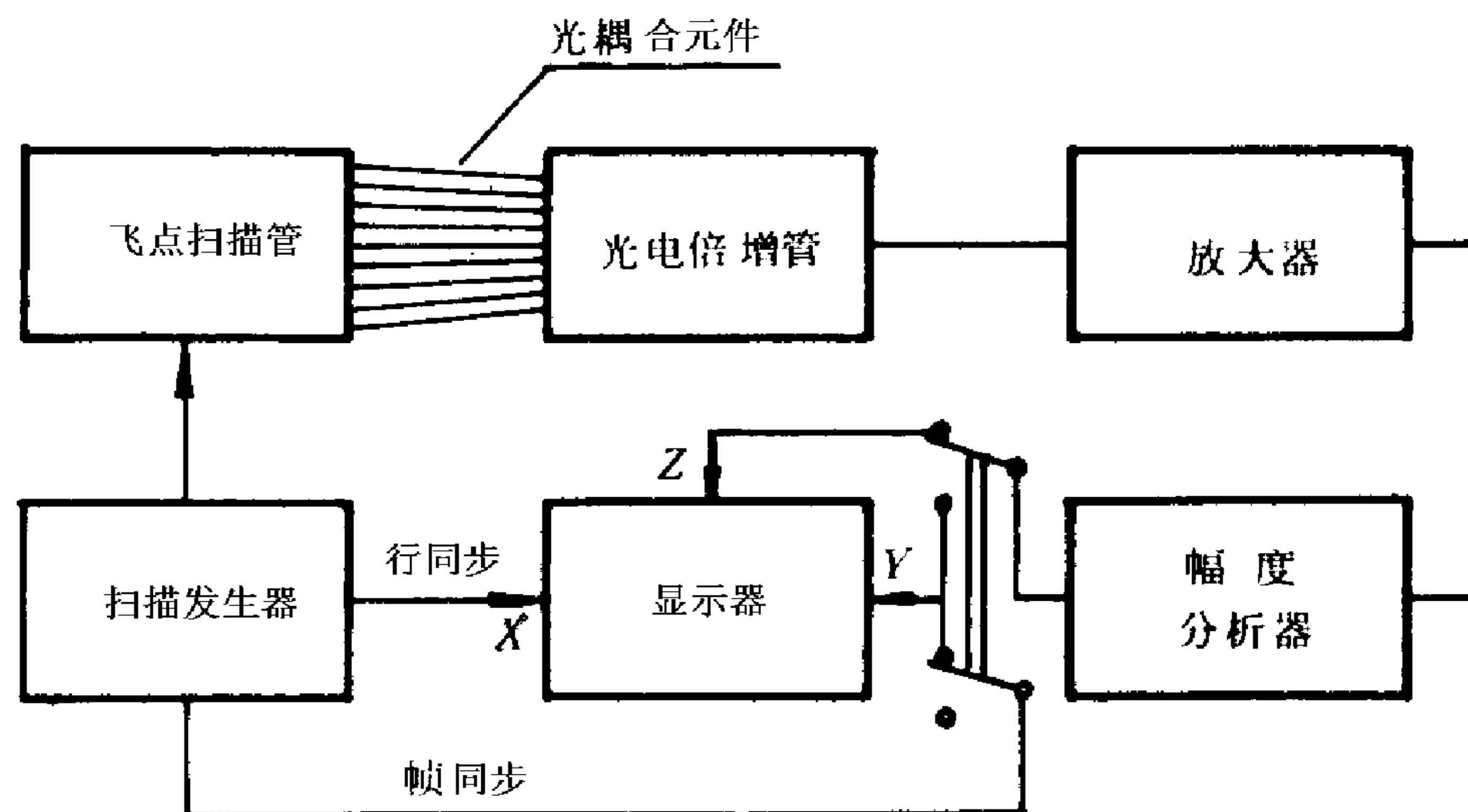


图 27 均匀性测试方框图

具有极短余辉荧光屏的飞点扫描管与光电倍增管的光阴极进行光耦合。若扫描发生器使飞点扫描管进行光栅扫描，并通过光电倍增管对显示器作Z轴输入，则此光栅再现在显示器上，因为假定光栅各点的亮度一致，所以在显示器上所显示的呈明暗变化的光栅将直接反映出光电倍增管的均匀性。若扫描发生器使飞点扫描管对光栅某一选定线条（水平、垂直均可）进行单线扫描，并通过光电倍增管对显示器作Y轴输入，则此单线扫描在显示器上出现的将是灵敏度沿该线条的相对分布。在光栅扫描的条件下，若对光电倍增管的输出信号进行甄别，使得只有幅度在指定范围内的信号才能触发显示器的Z轴，则在显示器上出现的就是一等灵敏度区，其轮廓线即为等灵敏度线。

若用经校正的示波器作为显示器，则对光阴极作单线扫描时可由这一系统取得定量数据，即将所显示的输出信号折算成非中心灵敏度对中心灵敏度的百分比。

扫描发生器可以采用通用电视扫描发生器，而显示器则可采用电视监视器，两者应严格同步。

严格说来，飞点扫描管荧光屏各点的亮度并不完全一致，而且荧光的光谱分布也不易与光电倍增管的光谱响应特性相匹配，所以作为精确测试，飞点扫描管需改用恒定光源并由电机驱动反射镜以实现光学扫描，恒定光源可视需要分别选用激光器、发光二极管或钨丝灯。

不论是飞点扫描还是光学扫描，均需对入射光的光照度进行低频方波调制，以抑制内部噪声和外界干扰，也有利于对光电倍增管的输出进行必要的处理。

## 10 稳定性测试方法

### 10.1 直流稳定性

#### 10.1.1 输出电流平均偏差稳定度

输出电流的平均偏差对于输出电流平均值的比值（以百分数表示）：

$$S_{IA} = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{I} - I_i|}{n\bar{I}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中：n —— 读数总次数；

$I_i$  —— 输出电流的第*i*次读数；

$\bar{I}$  —— *n*次读数求得的输出电流的平均值。

输出电流平均偏差稳定度在规定的电压下进行测试，此时光电倍增管接受适度稳定光照以使输出电流处在规定值。在记录读数前，应预先工作0.5~1h，然后在规定时间内，每隔一定时间记录一次输出电流。为确保测试的准确性，光电倍增管的供电电源和光源的供电电源应稳定，分压器的电阻也应具有良好的稳定性，测试时环境温度的变化不得超过±1℃，但对光源的色温不作规定。

#### 10.1.2 输出电流最大偏差稳定度

输出电流的最大值与最小值之差对于两者之和的比值（以百分数表示）。

$$S_{IM} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中： $I_{\max}$  ——测试期间所记录的输出电流的最大值；

$I_{\min}$  ——测试期间所记录的输出电流的最小值。

测试方法与10.1.1同。

10.1.1和10.1.2规定的方法同样适用于特殊温度条件下光电倍增管的测试，但应保证该测试温度下管内的温度平衡和恒温箱的温度恒定。

## 10.2 脉冲幅度稳定性

### 10.2.1 脉冲幅度平均偏差稳定度

脉冲幅度的平均偏差对于脉冲幅度平均值的比值（以百分数表示）：

$$S_{UA} = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{U} - U_i|}{n\bar{U}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中： $n$  ——读数总次数；

$U_i$  ——脉冲幅度的第*i*次读数；

$\bar{U}$  —— $n$ 次读数求得的脉冲幅度平均值。

测试系统与图7同。 $^{137}\text{Cs}$ 核辐射源置于光电倍增管和闪烁体的主轴上，使测试装置的总计数率约为 $1000\text{s}^{-1}$ 。在记录读数前应预先工作 $0.5 \sim 1\text{h}$ 。然后，每隔一小时记录一次脉冲幅度（全能峰峰位），共记录 $16\text{h}$ 。测试时环境温度的变化不得超过 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 10.2.2 脉冲幅度最大偏差稳定度

脉冲幅度的最大值与最小值之差对于两者之和的比值（以百分数表示）：

$$S_{UM} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中： $U_{\max}$  ——测试期间所记录的脉冲幅度的最大值；

$U_{\min}$  ——测试期间所记录的脉冲幅度的最小值。

测试方法与10.2.1同，但记录读数的时间为 $24\text{h}$ 。

### 10.2.3 脉冲幅度的漂移率特性

测试方法与10.2.1同。作出脉冲相对幅度与时间的关系曲线，然后微分这条曲线得出漂移率对时间的关系曲线。

### 10.2.4 脉冲幅度的计数率偏移度

测试系统与图7同。 $^{137}\text{Cs}$ 核辐射源置于光电倍增管和闪烁体的主轴上，测试系统的总计数率约为 $10000\text{s}^{-1}$ 。在记录读数前，应预先工作 $0.5 \sim 1\text{h}$ ，再测出脉冲幅度（全能峰峰位）。然后增大核辐射源与闪烁体之间的距离，使总计数率减少到 $1000\text{s}^{-1}$ ，测出脉冲幅度从而可计算脉冲幅度的计数率偏移度（以百分数表示）：

$$D_{UC} = \frac{U_{1000} - U_{10000}}{U_{10000}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (29)$$

式中： $U_{1000}$  ——计数率为 $1000\text{s}^{-1}$ 的脉冲幅度；

$U_{10000}$  ——计数率为 $10000\text{s}^{-1}$ 的脉冲幅度。

在这种测量中，要特别重视避免电子电路的基线偏移，给出测试结果时必须标明光电倍增管的增益。

### 10.3 温度稳定性

#### 10.3.1 输出电流的温度偏移度特性

将光电倍增管放入恒温箱中,并在一定的光阴极受照光通量和工作电压下,使光电倍增管在所测试的温度范围内稳定在若干个不同的值下,记录相应的输出电流。输出电流的温度偏移度是对20℃时输出电流的相对变化值,计算公式如下(以百分数表示):

$$D_{IT} = \frac{I_T - I_{20}}{I_{20}} \times 100 \dots\dots\dots (30)$$

式中:  $I_T$  —— 温度 $T$ 时的输出电流;

$I_{20}$  —— 温度20℃时的输出电流。

作出输出电流偏移度与温度的关系曲线。

测试需按规定的输出电流进行,测试时,应待光电倍增管工作进入稳定状态后才可读取输出电流。对光源的色温不作规定,但对光源的光谱分布应当加以说明。为确保测试的准确性,光电倍增管的供电电源和光源的供电电源应稳定。分压器的电阻应具有良好的稳定性。

#### 10.3.2 脉冲幅度的温度偏移度特性

用发光二极管或带有闪烁体的核辐射源作为脉冲光源,置于恒温小室内,该小室在测试过程中温度保持不变。采用在1000~10000 s<sup>-1</sup>之间的固定计数率。调节光脉冲入射于光阴极的光子数,使脉冲输出幅度至少为单电子产生的幅度的10倍。使光电倍增管在所测试的温度范围内稳定在若干个不同的值下,记录相应的输出脉冲幅度。脉冲幅度的温度偏移度是对20℃时脉冲幅度的相对变化值,计算公式如下(以百分数表示):

$$D_{UT} = \frac{U_T - U_{20}}{U_{20}} \times 100 \dots\dots\dots (31)$$

式中:  $U_T$  —— 温度 $T$ 时的脉冲幅度;

$U_{20}$  —— 温度20℃时的脉冲幅度。

作出脉冲幅度偏移度与温度的关系曲线。

必须注意避免在升高温度下由于过大的热发射引起的脉冲堆积效应。

对光电倍增管作温度偏移度测试时,也可按10.3.1采用测量平均输出电流的方法,但应确认该方法和本测试方法等效。

#### 10.3.3 噪声能当量的温度偏移因数

测试方法参照6.1.3和10.3.2,噪声能当量的温度偏移因数的计算公式如下:

$$T_{ET} = \frac{E_T}{E_{20}} \dots\dots\dots (32)$$

式中:  $E_T$  —— 温度 $T$ 时的噪声能当量;

$E_{20}$  —— 温度20℃时的噪声能当量。

### 10.4 磁场稳定性

#### 10.4.1 输出电流的磁场偏移度特性

将光电倍增管放入可变磁场内,在一定的阴极光照和工作电压下,测定光电倍增管在无磁场时的输出电流。然后在规定范围内的磁通密度下,并在同样的阴极光照和工作电压下,测出相应的输出电流。输出电流的磁场偏移度是对无磁场时输出电流的相对变化值,计算公式如下(以百分数表示):

$$D_{IB} = \frac{I_B - I_0}{I_0} \times 100 \dots\dots\dots (33)$$

式中:  $I_B$  —— 磁通密度为 $B$ 时的输出电流;

$I_0$  ——磁通密度为零时的输出电流。

光源色温不作规定。

测试应在光电倍增管三个互相垂直的方向上进行,并分别作出磁场偏移度与磁通密度的关系曲线。

**10.4.2 脉冲幅度的磁场偏移度特性**

用发光二极管或带有闪烁体的核辐射源作为脉冲光源。光电倍增管放入可变磁场内,先测量无磁场时的脉冲幅度,然后在规定范围的磁通密度下,测定相应的脉冲幅度。

脉冲幅度的磁场偏移度是对无磁场时输出幅度的相对变化值,计算公式如下(以百分数表示):

$$D_{UB} = \frac{U_B - U_0}{U_0} \times 100 \dots\dots\dots (34)$$

式中:  $U_B$  ——磁通密度为  $B$  时的脉冲幅度;

$U_0$  ——磁通密度为零时的脉冲幅度。

测试应在光电倍增管三个互相垂直的方向上进行。并分别作出磁场偏移度与磁通密度的关系曲线。

对光电倍增管作磁场偏移度测试时,也可按10.4.1采用测量平均输出电流的方法,但应确认该方法和本测试方法等效。

**10.5 滞后性**

处于工作状态的光电倍增管当光照突变后输出电流在一定时间内(如几秒)才能趋于稳定值,这种暂时的不稳定性即为滞后性。

滞后性可用滞后率表征。测试在正常工作电压下进行,先使光电倍增管在规定的输出电流下工作5 min,然后遮断光照使光电倍增管无光照保持1 min,重新开启光照,测量光电倍增管在受照1 min内输出电流的变化(见图28),从而可计算光电倍增管的滞后率(以百分数表示):

$$H_l = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_0} \times 100 \dots\dots\dots (35)$$

式中:  $I_0$  ——光电倍增管的正常输出电流;

$I_{max}$  ——在重新开启光照后1 min内所测得的输出电流的最大值;

$I_{min}$  ——在重新开启光照后1 min内所测得的输出电流的最小值。

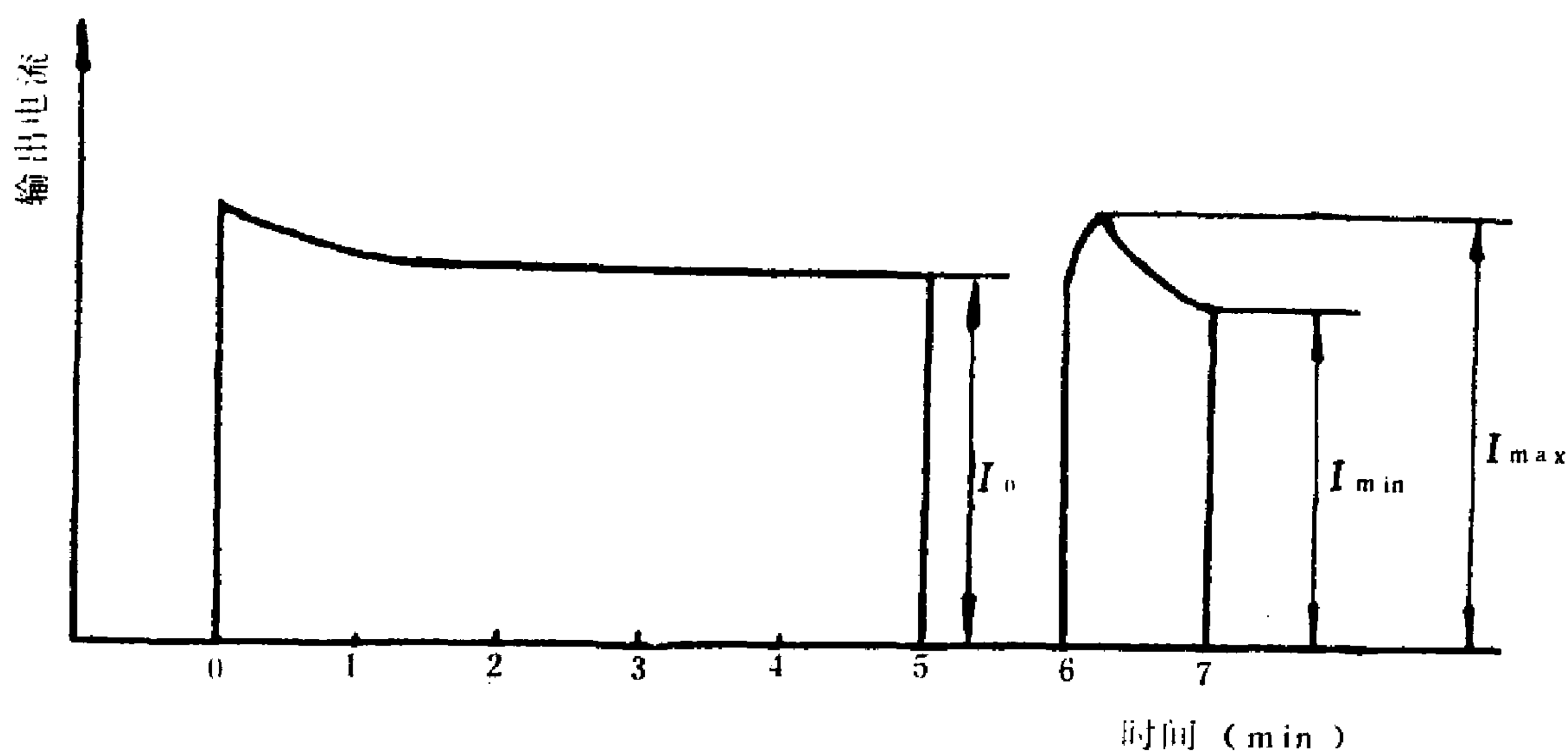


图 28 光电倍增管输出电流的变化曲线

**附加说明:**

本标准由中华人民共和国电子工业部和核工业部共同提出。

本标准由电子工业部华东电子管厂和核工业部北京核仪器厂共同负责起草。

本标准主要起草人李禄华、周焕华、贺宣庆、胡振清。