

# 光幕靶用大动态范围信号处理电路设计

李 敬<sup>1</sup>, 田 会<sup>1</sup>, 王文洁<sup>1</sup>, 张 辉<sup>2</sup>

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021; 2. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157000)

**摘要:** 为提高光幕靶测速精度和弹径适应范围, 设计了一种光幕靶用自动调节增益的对数放大电路, 扩大信号处理电路的测试动态范围; 分析矩形探测光幕和扇形探测光幕两类典型光幕靶式光幕工作原理, 分析弹丸过幕信号幅值与弹丸直径和过幕位置之间的关系; 依据对数放大电路特性设计了基于 TL441 芯片的电压型对数放大电路和 LOG112 芯片的电流型对数放大电路, 对设计的电路进行对数放大特性和动态范围进行测试; 试验结果表明, 设计的信号处理电路的输入输出信号幅值具有对数特性, 其动态范围可达 31 dB, 提高了光幕靶的测试动态范围, 满足各口径弹丸的速度测量。

**关键词:** 兵器靶场测试; 弹丸测速; 光幕靶; 对数放大电路

## Design of Large Dynamic Range Signal Processing Circuit for Light Screen Target

Li Jing<sup>1</sup>, Tian Hui<sup>1</sup>, Wang Wenjie<sup>1</sup>, Zhang Hui<sup>2</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Heilongjiang North Tools Co., Ltd., Mudanjiang 157000, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of speed measurement and the adaptive range of projectile diameter, a logarithmic amplifying circuit with automatic gain adjustment is designed to expand the dynamic range of signal processing circuit. This paper analyzes the working principle of two kinds of typical light curtain: rectangular light curtain and fan-shaped light curtain, and analyzes the relationship between the signal amplitude of projectile passing through the curtain, the diameter and position of projectile passing through the curtain. According to the characteristics of the logarithmic amplifying circuit, the voltage-type logarithmic amplifier circuit based on TL441 and the current-type logarithmic amplifier circuit based on LOG112 are designed. The logarithmic amplification characteristic and dynamic range of the designed circuit are tested. The test results show that the input and output signal amplitude of the designed signal processing circuit has logarithmic characteristics, and its dynamic range can reach 31dB, which improves the dynamic range of the light curtain target test, and meets the speed measurement of various caliber projectiles.

**Keywords:** weapon proving ground testing technology; velocity measurement of projectile; light screen target; logarithmic amplifying circuit

## 0 引言

各类身管武器及其弹药在研制和生产过程中, 为有效评判该类武器的效能, 需准确测量发射弹丸在预定位置的飞行速度<sup>[1-4]</sup>, 非接触式区截测速装置具有布设操作简便、使用成本低、可连续测试等优势, 现已完全替代传统的钢板靶、铜丝断靶等接触类测速设备。在区截测速装置中, 光幕靶是一类代表性设备<sup>[5-8]</sup>, 自带人工光源, 通过探测弹丸穿过探测幕面时引起光通量的变化量, 通过信号处理电路, 实时输出弹丸过幕信号, 利用测时仪或数据采集仪测量弹丸穿过两个光幕输出信号的时间, 并计算出弹丸速度。光幕靶具有灵敏度高、抗干扰能力强、测速精度高等优势, 现已在兵器生产企业得到广泛应用<sup>[9-12]</sup>。光幕靶输出的弹丸

过幕信号幅值与弹丸直径密切相关, 随着弹丸直径的增大, 其穿过光幕时遮挡的光能量增加, 引起光电探测器件输出的光电流变大, 采用固定增益的信号处理电路输出的过幕信号幅值极易出现饱和, 引起信号在下降过程中出现过冲, 从而导致信号波形发生畸变, 最终导致时间测量出现较大偏差, 试验失效。虽有研究者提出将光幕靶的探测灵敏度分为 2~3 档, 以适应不同的弹径, 但该方法需要切换内部电路的增益系数, 有时会导致信号出现自激<sup>[13-15]</sup>。本文针对上述问题, 设计一种光幕靶用对数放大电路, 采用对数放大原理放大弹丸过幕信号, 确保各种口径弹丸信号幅值均在信号处理电路允许的范围内, 提高信号的动态范围。

## 1 两类光幕靶式光幕工作原理分析

光幕靶是一种应用光电转换原理的区截测速装置, 采用了定距测时原理, 主要由光源、接收装置(含光电探测器件)和信号处理电路组成。其工作原理是在预定的测试轨道上放置两个相同的光幕靶, 相隔间距为  $S$ , 弹丸穿过靶面时会遮挡部分进入光电探测器件的光线, 产生变化的光电流信号, 经信号处理电路放大, 输出弹丸过幕信号, 作为时间测量的触发信号。通过测量间隔放置的两台光幕靶

收稿日期:2020-04-27; 修回日期:2020-05-16。

基金项目:国家国防科工局基础科研项目(JSJL2017208B009); 陕西省科技厅基础科研计划项目(2019JM-601)。

作者简介:李 敬(1996-), 男, 重庆巫溪人, 硕士, 主要从事兵器试验与测试方向的研究。

通讯作者:田 会(1980-), 男, 河北任丘人, 博士, 教授, 主要从事兵器外弹道参数光电测试与信号处理方向的研究。

的脉冲输出信号的时间间隔  $T$ ，结合靶距  $S$ ，依据公式  $V = \frac{S}{T}$  可计算弹丸的飞行速度。

探测光幕作为光幕靶的重要组成部分，功能是感应弹丸过幕时物理状态，输出弹丸过幕信号，为时间测量提供依据。光源的光经光阑进入接收装置的光电探测器件，光阑与接收装置的共同作用，在光源与接收装置之间形成一个具有一定厚度的薄型光幕面，称之为光幕。目前应用较为广泛的光幕靶按照光幕实现形式主要分为两类：LED 线阵列光源配合线阵列光电接收器件构成的矩形探测光幕，一字线型激光器发射的激光束经原相反射膜反射后被面型光电探测器接收构成的扇形探测光幕。

### 1.1 矩形探测光幕

矩形探测光幕构成如图 1 所示，光源采用直线型 LED 线阵列光源，接收装置为由光电二极管拼接成直线型线阵列探测阵列。光源与探测器件之间形成有效探测矩形探测光幕。弹丸从矩形光幕内任意位置穿过时，遮挡了部分进入光电探测器件的光能量，利用光电转换原理，探测器件输出微弱变化的电信号，经信号处理电路后输出弹丸过幕信号，包括有模拟过幕信号和脉冲信号，可根据具体要求选择相应的信号。放大电路输出的模拟信号可进行放大驱动后输出，该信号可用示波器进行观察，也可通过信号采集仪记录以作进一步的分析。

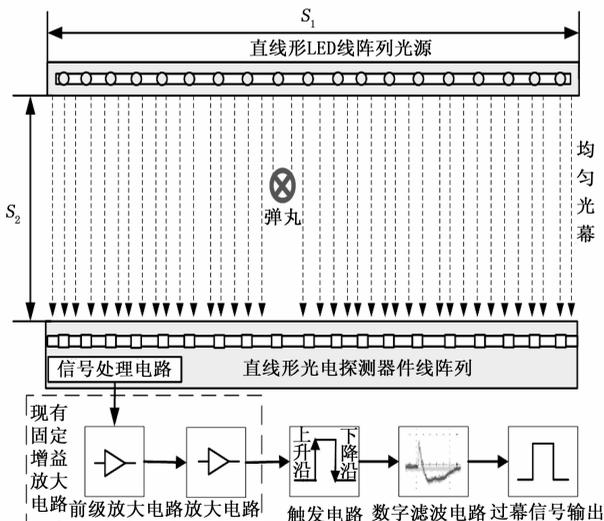


图 1 矩形探测光幕的典型构成方式

同一直径的弹丸在幕面内任意位置穿过时，引起光通量的变化量相同，输出信号幅值跳动范围不大，也即弹丸信号幅值与弹丸过幕位置无关。随着弹丸直径增大时，穿过光幕时遮挡的光能量增加，光电探测器件输出电信号增大，经固定增益的放大电路后，模拟信号幅值增大。随弹丸直径不断增加，模拟信号幅值易出现信号饱和，弹丸过幕时间提取算法计算两个过幕信号时间时易出现测量误差，进而导致测速精度下降。

### 1.2 扇形探测光幕

扇形探测光幕构成如图 2 所示，主要由激光器、原相

反射膜和面型光电探测器件组成。激光器包括激光器发射装置和光学系统组件，激光器发射的光线经聚焦、准直与柱透镜变成一字线型激光束，穿过小孔形成扇形光幕，入射到原相反射膜上，其反射光束被位于激光器同侧的面型光电探测器件接收。弹丸从扇形光幕内任意位置穿过时，遮挡部分激光光线，引起面型光电探测器件接收到的光能量发生变化，经信号处理电路输出弹丸过幕电信号。

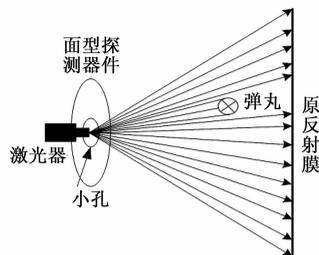


图 2 扇形探测光幕构成

根据扇形光幕形成的原理可知，当弹丸从距离激光器不同高度的位置穿过时，弹丸遮挡的激光束在反射膜上形成的阴影大小存在差异，引起探测器件接收到光能量的变化量不同，因此输出信号幅值存在差异。弹丸过幕位置越靠近激光器，弹丸在反光膜上成的阴影越大，输出的过幕信号幅值越大，反之信号幅值越小。过幕信号经固定增益放大电路后易出现信号饱和或者信号太微弱现象，同样原理会引起过幕时间测量误差增大，进而导致测速误差增大。

为了提高光幕靶的测速精度，研究了大动态范围的光幕靶用信号处理电路，采用对数放大原理，在保持原信号基本幅频特性基础上扩大光幕靶测试动态范围，能够满足各种口径弹丸的速度测量要求。

## 2 光幕靶用对数放大电路设计

在电子电路中，电子元器件的输入输出信号特性都有一定的范围限制，且输入输出具有一定的对应关系。在电子元器件输出范围确定的情况下，要测量更大范围的输入信号，就要提高输入信号的动态范围，即将大范围输入信号压缩成电子元器件能测量的小范围信号。而对数关系，正好满足这个条件。对数放大器的特点<sup>[16]</sup>：1) 输入输出信号呈对数关系，且一一对应；2) 动态压缩，将大动态输入信号压缩成小动态的输出信号，且自动调节增益；3) 信号瞬时处理。理想的对数放大器是输出信号幅度与输入信号幅度呈对数关系，而实际对数放大器具备线性和对数放大功能。弱信号时，是一个线性放大器，增益较大；随信号增强，变成一个对数放大器，增益随输入信号的增加而减小。

### 2.1 对数放大电路特性

当前级放大电路输出的弹丸过幕信号较为微弱时，后级放大电路需要进行较高的放大增益，确保输出的信号能够有效地从噪声中分离出来；当前级放大电路输出信号幅

值较大时, 应适当地降低后级放大电路的增益, 确保输出信号幅值不饱和。该特性与对数放大电路的特性相吻合, 图 3 为对数放大电路的输入—输出幅度特性曲线。在线性放大区, 输入信号幅度较低, 增益高且恒定, 输出信号幅度呈线性增大; 在对数放大区, 随输入信号幅度增加, 增益逐渐减小, 促使输出信号幅度随之呈对数增大。可实现低输入高增益放大输出, 高输入低增益放大输出, 避免信号太微弱以及强信号引起的信号饱和。

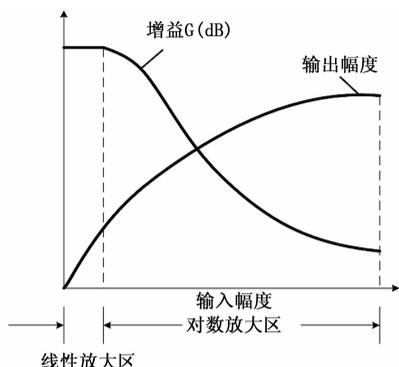


图 3 对数放大电路输入—输出幅度特性

由于对数放大电路具有上述特性, 在应用光幕靶信号处理电路中, 可对小尺寸弹丸输出的信号进行高增益放大, 对大尺寸弹丸进行低增益放大。

图 4 为基于对数放大电路的光幕靶信号处理电路框图, 在原有光幕靶信号处理电路基础上增加对数放大电路, 使原有固定增益放大转为根据弹丸口径自动调节增益放大。本文仅对对数放大电路进行设计, 其余电路均采用原有光幕靶用电路。

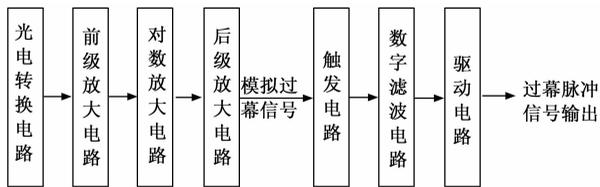


图 4 光幕靶信号处理电路框图

## 2.2 对数放大器分类

根据对数放大器原理不同, 对数放大器分为两类: 真对数放大器和似对数放大器。真对数放大器分为跨到线性放大器和电压对数放大器, 似对数放大器分为基带对数放大器和解调对数放大器。

### 2.2.1 真对数放大器

利用二极管或者三极管的工作特性来实现对数放大, 称为跨导线性对数放大器; 电压对数放大器采用 RC 电路充放电时电压与时间呈指数规律变化的原理, 由于电路复杂, 对温度环境要求较高, 实际应用较少。随集成电路的发展, 跨导线性对数放大器趋向集成化, 采用差分输入消除二极管或三极管的反向饱和电流, 以提高对数准确度, 增加集成芯片的抑噪能力。真对数放大器适用于输入信号为缓变信号的电路, 在高频输入信号时, 误差较大。

### 2.2.2 似对数放大器

似对数放大器能够处理高频信号, 但放大单元不具备对数关系, 采用多个限幅器串联级联或并联级联后求和, 以达到对数放大的目的。基带对数放大器将输出直接累加, 而解调对数放大器需要检波后输出累加。

实际应用中, 对数放大器越来越集成化, 市场出现许多集成对数放大器芯片, 根据对数放大的对象, 可分为电压型对数放大器和电流型对数放大器, 后文根据对应对数放大器芯片分别进行设计。

## 2.3 对数放大器关键性能指标

### 2.3.1 动态范围

对集成电路来说, 其输入输出都有一定的范围。输入不能太小, 也不能过大。输入信号过小, 集成芯片可能被噪声淹没而检测不到; 输入信号过大, 集成芯片的输出信号会饱和, 输出信号与输入信号对应关系不成立, 故将器件允许输入信号的最大最小值的范围称为动态范围。对数放大电路动态范围如式 (1):

$$\text{动态范围} = 20 \lg \left( \frac{IN_{\max}}{IN_{\min}} \right) \quad (1)$$

式中,  $IN_{\max}$  为有效输入最大电压值;  $IN_{\min}$  为有效输入最小电压值。

### 2.3.2 带宽

在电子电路中, 输出信号与输入信号的关系与输入信号的频率有关。放大电路中, 输入信号低于下限截止频率时, 电路中容抗很大, 输出较小; 输入信号大于上限截止频率时, 电路感抗很大, 电路放大倍数较小, 输出较小; 在中频段, 电路放大倍数最大。在对数放大器中, 输入信号经对数变换后幅度减小, 如果用恒定输入信号而输出信号下降 3 dB 的频率间隔为带宽, 不能反映对数放大器的频率特性, 需采用恒定输出而输入下降 3 dB 时的频率间隔作为对数放大器的带宽。

## 2.4 电压型对数放大电路设计

图 5 为设计的电压型对数放大电路, 对数放大芯片采用 TI 公司的对数放大器 TL441, 该芯片利用四级完全相同的差动放大器, 每个差动放大器放大 30 dB。该图为电压型对数放大芯片 TL441 的完整接法, 整体电路理论增益可达 120 dB。实际工作中, 输入电压范围一般大于 80 dB, 对数线性度为  $\pm 0.5$  dB, 带宽从直流到 40 MHz, 输入端采用差分输入, 可有效抑制共模噪声。为了处理微弱电平到 +10 dB 的高电平信号, U7—9 脚和 U7—12 脚输入单元需接前置放大器, 即 U5 和 U8 运放模块。输入信号 IN1 直接送给 U7—4 脚, 并经分压电阻 R3 后与 U7—7 脚连接。U5 运放模块的输出信号送给 U7—12 脚和 U8—3 脚, U8—6 脚输出送给 U7—9 脚, 输出电压信号 Y、Z 通过加法器 U6 运放模块相加输出  $V_{\text{out}}$ 。

### 2.5 电流型对数放大电路设计

图 6 为电流型对数放大芯片电路连接图, 主芯片为 TI 公司生产的电流型对数放大器 LOG112。该芯片特点: 1) 基准

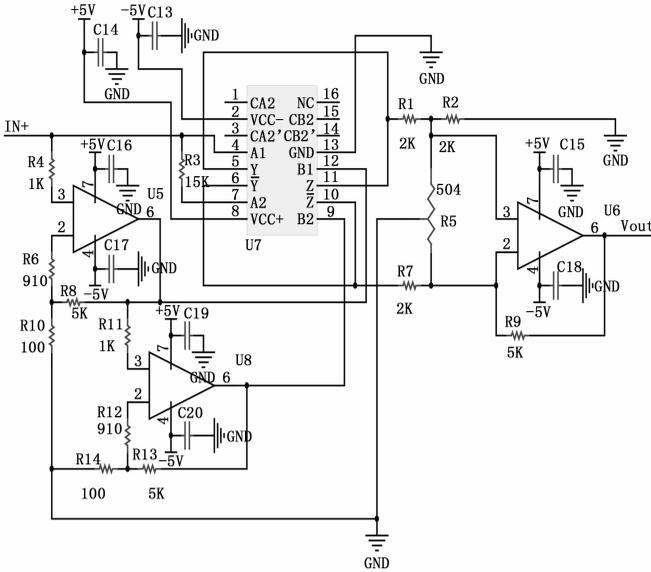


图 5 电压型对数放大芯片电路连接图

电压为 2.5 V；2) 输入信号动态范围为 100 pA~3.5 mA；3) 静态电流：1.75 mA；4) 电源电压：±18 V。运算放大器 OPA380 将 PIN 型光电二极管的光电流信号转化为电压信号，电压信号经过电阻转化为电流信号 (IN1) 输入至 U1-1 脚。IN2 是直接由精度电压参考芯片 D1 和精密电阻提供，以提高检测的精确度。为了降低电源线引线电感的影响，在芯片的供电管脚 6 和 9 分别对地连接去耦电容。输入电流信号由电流对数放大器 LOG112 进行对数放大后通过 5 脚  $V_{Logout}$  输出，连接至后续电压放大电路的输入端。该芯片 5 脚具有对数变化的特性，作为后级放大的输入，可根据式 (2) 计算对数放大的总输出幅值。

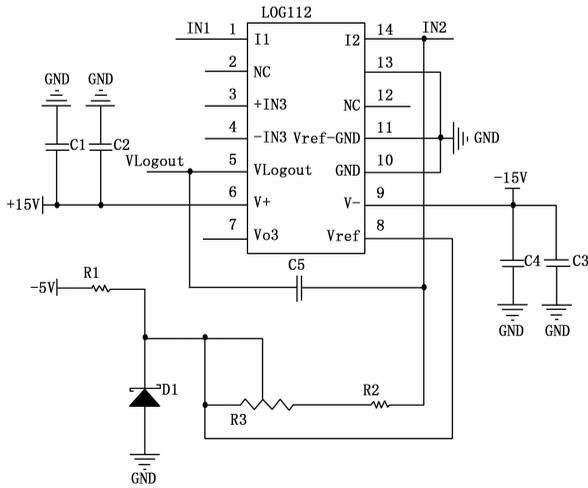


图 6 电流型对数放大芯片电路连接图

电流型对数放大电路的输出关系如式 (2)：

$$V_{LOGOUT} = 0.5 \times \log(IN_1/IN_2) \quad (2)$$

### 3 试验验证

为了验证设计的对数放大电路工作特性，采用信号发生器产生不同幅值的正弦波的正半周期作为输入信号

(Sig1)，该信号与光幕靶前级放大电路输出信号特性相似，Sig1 通过对数放大电路放大后输出为输出信号 (Sig2)，两路信号用示波器进行波形比较，并导出波形至 Matlab 进行曲线拟合。为验证对数放大电路测试动态范围，信号发生器产生信号 Sig1 经过信号衰减器进行衰减后的信号为 Sig2，再通过对数放大电路进行放大后输出的信号为 Sig3，利用示波器同步采集三路信号，并分析其幅频特性。

#### 3.1 对数特性测试

电路测试如图 7 所示，信号发生器 (输入信号) 和光幕靶用对数放大电路 (输出信号) 两路信号同时送给示波器，进行波形比较。

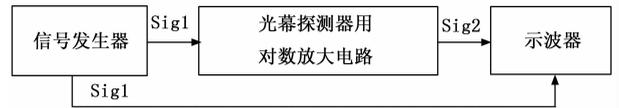


图 7 对数特性测试框图

由信号发生器输出单次正半周期正弦波，用示波器观察经光幕探测器用对数放大电路后的输出信号波形。两路信号波形如图 8 所示，X 轴为采样时间，Y 轴为输入/输出幅度。第一幅图是信号发生器的输出波形，第二幅图是光幕探测器用对数放大电路输出的信号波形。将两路信号波形导入 Matlab 并统一坐标，得到拟合曲线如图 9 所示，X 轴表示输入信号 Sig1，即图 8 第一幅图，Y 轴表示光幕靶用对数放大电路的输出信号 Sig2。从图中可看出，输入信号与输出信号呈对数关系。

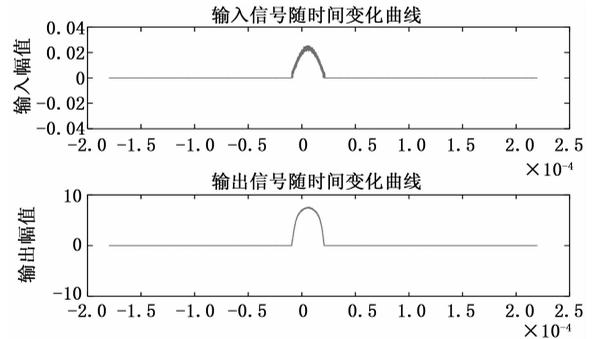


图 8 输入与输出信号幅值波形

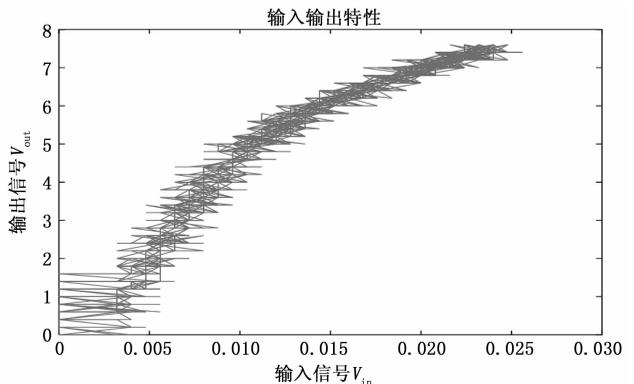


图 9 输入输出拟合曲线

由于在 Matlab 中无法直接进行对数关系数学拟合, 将输入与输出信号进行线性处理后, 再通过软件实现数学拟合, 得到输入与输出幅度的拟合函数。根据对数放大电路的输出与输入的对数成正比的特点, 将图 9 曲线进行线性拟合, 其结果如图 10 所示, 并得到线性拟合曲线函数如式 (3):

$$V_{out} = 15(0.2299 \log(V_{in} \times 6.6) + 0.9294) \quad (3)$$

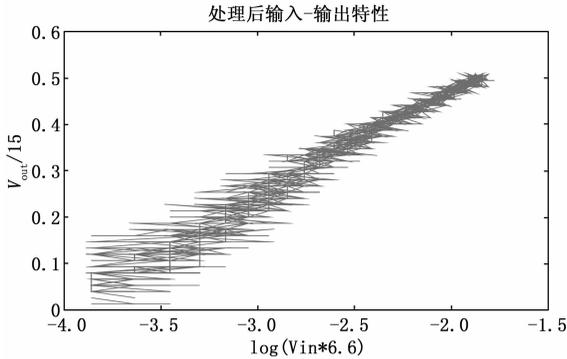


图 10 处理后的拟合曲线

试验结果表明, 光幕靶用对数放大电路的输入输出拟合曲线直观上表明对数放大电路的对数特性, 其拟合函数进一步证明电路具有对数特性设计的 光幕靶用电压型对数放大电路可以实现对输入信号的动态压缩。

### 3.2 电路动态范围测试

将信号发生器 (输入信号)、信号衰减器和光幕靶用对数放大电路 (输出信号) 三路信号送给示波器, 进行波形对比, 动态范围测试如图 11 所示。

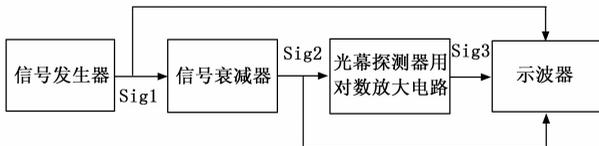


图 11 电路动态范围测试框图

信号发生器产生的输入信号幅值不变, 改变衰减器的衰减量, 经电压型对数放大电路后输出信号 Sig3, 即对数放大输出信号, 示波器同时接收 Sig1、Sig2、Sig3 三路信号进行信号幅值比较, 并记录各自幅值, 为计算输入信号动态范围提供依据。表 1 为三路信号在示波器中的输出幅值, 衰减量体现了对数放大电路的测试动态范围大小。

表 1 电路动态范围测试结果

序号	输入信号幅值/mV	衰减增益/dB	衰减后信号幅值/mV	对数放大信号幅值/mV
1	140	0	140	720
2	140	10	45	620
3	140	20	14.8	460
4	140	30	5.8	260
5	140	35	4.1	136
6	140	36	3.7	128

分析测试数据, 最大输入电压为 140 mV, 最小电压为 3.7 mV, 根据式 (1) 可知, 该电压型对数放大电路的实际测

试动态范围为 31.5 dB, 该范围已满足各口径弹丸的速度测量。证明了设计的光幕靶用电压型对数放大电路可以实现对输入信号的动态压缩, 提高了光幕靶输入信号的动态范围。

## 4 结束语

本文针对现有光幕靶用信号处理电路无法满足各种口径弹丸的速度测量问题, 设计了光幕靶用对数放大电路。分析了矩形光幕靶和扇形光幕靶的工作原理, 根据对数放大原理, 设计了电流型和电压型对数放大电路, 并验证电压型对数放大电路的对数特性验证以及电路测试动态范围。试验结果表明, 本文设计的光幕靶用电压型对数放大电路的输入输出信号符合对数特性, 其测试动态范围满足各口径弹丸的速度测量, 提高了光幕靶用信号处理电路的测试动态范围。

### 参考文献:

- [1] 高 芬, 倪晋平, 田 会, 等. 室内超大面积探测域测速光幕设计 [J]. 光学技术, 2012, 38 (2): 175-179.
- [2] 王占选, 赵冬娥, 刘 吉, 等. 基于激光测速技术的空气炮弹丸速度测试系统设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34 (2): 51-54.
- [3] 江旭东, 李锦明, 秦 丽, 等. 一种双光幕弹丸测速系统设计与实现 [J]. 电子器件, 2016 (1): 172-175.
- [4] 王红宇, 孟立凡, 黄广炎, 等. 一种改进型红外光幕靶测速系统 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (8): 182-187.
- [5] 蔡荣立, 倪晋平, 田 会. 一种抗光干扰光幕靶的设计与改进 [J]. 光学技术, 2006 (5): 151-153.
- [6] 蔡荣立, 倪晋平, 田 会. 光幕靶技术进展 [J]. 西安工业大学学报, 2013, 33 (8): 603-609.
- [7] 董 涛, 倪晋平, 高 芬, 等. 大靶面激光光幕靶研究 [J]. 工具技术, 2010, 44 (6): 85-87.
- [8] 张智谏, 徐 达, 罗建华, 等. 一种大面积抗干扰高射频激光光幕靶设计 [J]. 光学技术, 2009, 35 (3): 464-466.
- [9] Kalonial R C, Monhanl C, Bahuguual B B, et al. Small caliber projectile velocity measurement system based on a single laser source and a single detector [J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2011, 70 (9): 762-766.
- [10] 江 念, 王召巴, 陈友兴. 激光光幕靶测速系统设计 [J]. 测试技术学报, 2013, 27 (4): 354-357.
- [11] 唐孝容, 张 蓉, 虞德水, 等. 用于小破片群测量的光幕靶测试技术 [J]. 高压物理学报, 2014, 28 (1): 103-107.
- [12] 李亚玲. LED 大靶面立靶坐标与速度测试系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [13] 田 会, 倪晋平, 焦明星, 等. 镜头式光幕探测灵敏度分布规律研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37 (2): 325-331.
- [14] 倪晋平, 赵静远, 高 芬. 弧形光源镜头式光幕灵敏度分布研究 [J]. 应用光学, 2013, 34 (2): 295-299.
- [15] 田 会, 魏 鑫. 光幕靶探测灵敏度与响应时间测量方法 [J]. 工具技术, 2017 (9): 144-147.
- [16] 石智熔, 宋章明, 黄英俊, 等. 对数放大器特性测试与应用分析 [J]. 电子测试, 2018 (8): 11-13.