

基于光电标签的火箭橇全程测速技术研究

李翰宗, 蔡荣立, 侯丹妮

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 火箭橇试验在兵器研制和性能测试上起着至关重要的作用, 现有火箭橇测速方法均存在一些不足之处, 针对火箭橇试验中全程速度测量难题, 提出了一种基于光电标签的火箭橇全程速度测量方法; 建立了光电标签的探测模型, 对光电标签的原向反射特性进行研究, 分析并仿真了传感器在动态测量中的信号变化过程, 基于信号的频率特性对光电探测器件与信号处理电路进行选型, 设计并搭建出硬件测量电路, 对系统进行了测试与验证; 实验结果表明: 传感器对光电标签的探测距离可达 40 cm, 系统速度测量范围满足了火箭橇试验在兵器靶场上的应用, 与传统方法相比, 光电标签法成本更低、易实现, 在火箭橇全程速度测量中有更广泛的应用场景。

关键词: 火箭橇试验; 光电标签; FPGA; 光电探测; 速度测量

Research on Rocket Sled Full-range Velocity Measurement Technology Based on Optoelectronic Tags

LI Hanzong, CAI Rongli, HOU Danni

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Rocket sled testing plays a crucial role in weapon development and performance evaluation. However, existing methods have some shortcomings for rocket sled velocity measurement. To address the challenge of full-range velocity measurement in rocket sled testing, an optoelectronic tag-based method for full-range velocity measurement is proposed. Establish the detection model for optoelectronic tags, investigate their directional reflection characteristics, analyze and simulate the signal variation process of the sensor during dynamic measurements, select the photoelectric detection device based on the frequency characteristics of the signal, build the hardware measurement circuits, and validate the system. Experimental results demonstrate that the detect distance of the sensor to the photoelectric tags reaches up to 40 cm, and the velocity measurement range meets the requirements for rocket sled testing at weapon proving grounds. Compared to traditional methods, the optoelectronic tag method has lower cost and broader applicability in full-range velocity measurement for rocket sleds.

Keywords: rocket sled testing; photoelectric tags; FPGA; photoelectric detection; velocity measurement

0 引言

火箭橇是以火箭发动机为动力, 在地面轨道的约束下, 沿近地面高速飞行的加载装置^[1-2]。它主要用于模拟飞行时的动载环境, 以解决飞机、导弹、宇航飞行器等在研制中有关高速及高加速度的许多技术问题^[3-4]。由于火箭橇试验比空中实验具有较大的灵活性, 其速度可从亚音速到 5 倍音速甚至更高, 所以研究其运行过程中的速度以及设备动作时关键点位的速度参数对火箭橇系统的工况和被试品的工作性能具有极大的参考意义。常用的速度测试方法有雷达、断靶测速、遮光板测速等手段。文献 [5] 基于断靶测速的方法, 在轨道上两点固定信号线, 滑车运行时撞断信号线, 进而得到滑车在关键点位的运行速度; 文献 [6] 利用多台测速雷达对橇体速度进行分段接力测量, 可减少火箭发动机喷焰对雷达信号的影响; 文献 [7-9] 的方法是在橇上固定永磁体, 滑轨周围固定距离分布霍尔磁传感器

或感应线圈进行区截测速, 得到火箭橇速度信息; 文献 [10-11] 使用激光二极管与接收传感器对射, 在滑轨边安装遮光板, 根据遮光板的位置和电压变化时刻就能准确测量火箭橇速度信息; 文献 [12] 使用卫星信号接收机差分定位对火箭橇位置、速度、加速度进行动态监测。

现有测量火箭橇速度的方法主要存在以下问题: 断靶测速法需要在每次实验前在固定位置布置靶网, 工作量大, 只能对寥寥几个点位速度进行测量, 且火箭橇撞断靶网时铜丝易卷入滑靴并导致橇体倾覆。雷达测速法是常用的速度测试方法, 全程速度测量要求试验场空旷无障碍物, 受限于火箭橇沿近地面高速飞行的特点, 单个雷达探测距离不宜过远, 测量精度在 1% 左右。磁感应测速法实施难点在于需在滑轨周边布置多个磁传感器, 成本较高, 被试件有可能在运行过程中展开, 不满足橇体侧面安装永磁体的条件, 使用场景有限。遮光板法主要用于橇体关键点位测量,

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2023-11-27。

作者简介: 李翰宗(1999-), 男, 硕士。

通讯作者: 蔡荣立(1974-), 男, 副教授。

引用格式: 李翰宗, 蔡荣立, 侯丹妮. 基于光电标签的火箭橇全程测速技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 24-30.

精度可达 3%, 每次试验前都需要进行安装, 工作量较大。卫星差分定位法不受天气、使用场景限制, 但刷新率不高、精度较差, 速度量程受限, 不适用于高速火箭橇测量。

上述测量方法均存在一些问题, 每次火箭橇试验前都需要花费大量时间布置设备, 本文通过火箭橇上安装反射式光学传感器, 在轨道内侧固定间隔粘贴光电标签, 基于 FPGA 时基进行脉冲测量并存储试验中各点位的时间信息, 上位机根据试验场条件和光电标签距离解算出时间-速度-加速度曲线。光电标签成本低、免维护、可多次使用和可靠性高适用于火箭橇全程速度测量以及关键点速度测量。

1 测量原理及探测模型

光电标签法通过标记火箭橇运行的关键点进行速度测量, 在滑轨内侧, 两个光电标签间隔一定距离放置, 携带传感器的火箭橇通过光电标签时传感器输出信号。测量两个光电标签的时间差, 可计算出火箭橇的速度; 测量 3 个光电标签的时间差, 可计算出火箭橇的加速度。

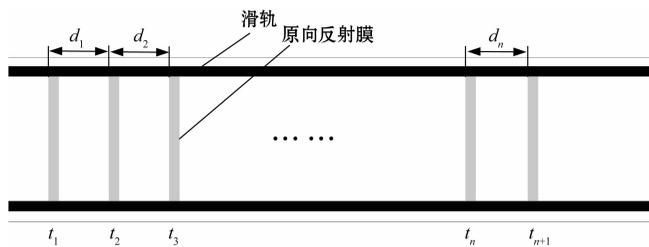


图 1 光电标签法测速原理图

上图中光电标签安装在滑轨内侧, 当火箭橇运行至光电标签 1 时, 探测器接收到较强的光信号, FPGA 记录信号时刻; 运行至光电标签 2 时, 探测器也会接收到同样的光信号。与区截测速的原理相同, 火箭橇在第段的速度可通过式 (1) 计算:

$$v_i = \frac{d_i}{t_{(i+1)} - t_i} \quad (1)$$

式中, d_i 为第 i 个光电标签到第 $i+1$ 个光电标签的距离, t_i 为装置记录到火箭橇经过第 i 段的时间。

若光电标签分布火箭橇运行的全过程, 则全段的速度可通过式 (2) 计算:

$$v_A = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{t_{(n+1)} - t_1} \quad (2)$$

传感器在对光电标签检测时, 传感器与光电标签相互垂直, 将物体的运动简化为二维平面下的运动, 建立的光电标签探测模型如图 2 所示。

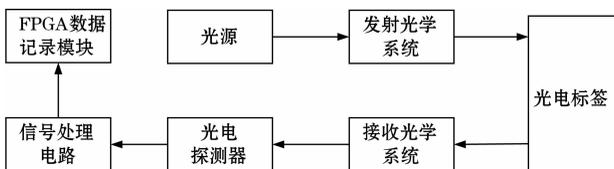


图 2 光电标签探测模型组成

在图 2 中, 探测模型包括光源、发射光学系统、光电标

签、接收光学系统、光电探测器、信号处理电路、数据记录模块。对于探测系统而言, 光电标签引起的光强变化使得光电探测器产生足够的光电流, 而模型中的每一部分都影响着最终传感器的接收到信号的强弱。假设光源采用红外 LED 且两端所加的正向电压为 V_F , 则流过 PN 结的电流为:

$$I_F = I_S (e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1) \quad (3)$$

式中, I_S 为反向饱和电流, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}$, T 为温度, 此时 LED 的发光能量为:

$$P = \eta_e I_F V_F = \eta_e V_F I_S (e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1) \quad (4)$$

式中, η_e 为 PN 结的光电转换效率, 假设光源的发光效率为 η , 总光通量为:

$$F = \eta P = \eta V_F \eta_e I_S (e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1) \quad (5)$$

对于点光源而言, 其发光强度还与立体角有关^[13]。以点光源作为球心, 其所辐射的一小块面积 dS 对应的立体角为:

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \sin i \, di \, dj \quad (6)$$

$$\omega = \iint \sin i \, di \, dj = \int_0^{2\pi} dj \int_0^U \sin i \, di = 4\pi \sin^2 \frac{U}{2} \quad (7)$$

式中, r 为球面半径, i 为子午面内的角度, j 为弧矢面内的角度, U 为物方孔径角, 当孔径角 U 很小时, $\omega \approx \pi u^2$, 此时光源的发光强度近似为:

$$I_0 = \frac{F}{\omega} = \frac{\eta V_F \eta_e I_S (e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1)}{\pi u^2} \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 影响光源的发光强度主要有 PN 结正向电压、LED 效率, 温度、二极管参数, 孔径角 u 。孔径角 u 越小, 光源的发散角越小, 光能量越集中。

光电探测系统中, 被探测目标的特性也同样重要, 光电标签采用一种由树脂、薄膜、玻璃微珠或微棱镜制成的逆反射材料。它可以入射光线以极小的发散角原向反射至入射光线的附近, 相对于微棱镜结构的逆反射材料, 玻璃珠材料的光电标签成本较低, 适用于大部分光电测量下的应用场景, 其微结构如图 3 所示。

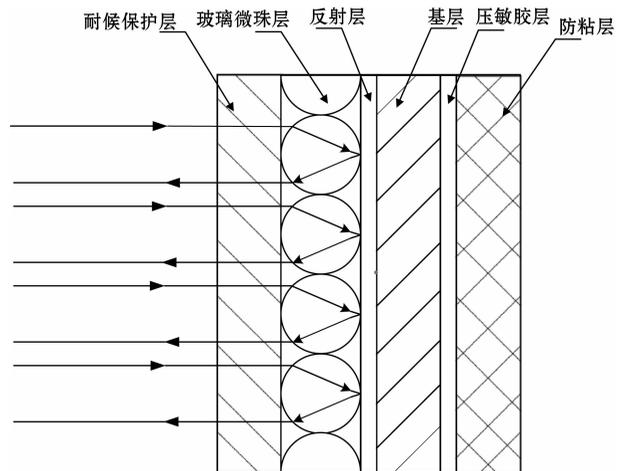


图 3 玻璃珠型光电标签微结构

在光电标签的微结构中, 具有光学特性的有玻璃珠层和反射层, 基层和耐候保护层起支撑保护作用^[14-16]。球形

玻璃珠构成球形透镜，其光轴是球心到球面任意一点的连线，因此入射玻璃珠表面的光线总向球心汇聚，当平行光入射玻璃珠表面时，根据折射球面物像位置关系得：

$$l' = \frac{n' r}{n' - n} \quad (9)$$

式中， n' 为玻璃的折射率， n 为空气的折射率，一般为 1， r 为球形透镜的半径。

实际上，玻璃珠小而密集，光线几乎都汇聚到球体的后表面上，反射光束的光轴和入射光束的光轴几乎重合，实现光线的原向反射。将光源与光电探测器布置在相近的位置时，利用混凝土地面与光电标签的反射率差异，照射到光电探测器表面的照度有较大差异，实现光电标签的识别。在搭建光电标签探测系统时需要考虑距离、光源特性、光学系统发散角等因素。若光电标签的逆反射效率为 H ，则光电探测器接收到的照度为：

$$E = \frac{HI_0 \cos q}{(2s)^2} = \frac{\eta V_F \eta_c I_s \cos q (e^{V_F/KT} - 1)}{4\pi u^2 s^2} \quad (10)$$

式中， q 为运动过程中传感器与光电标签的夹角， s 为传感器与光电标签的距离。

试验过程中，传感器与光电标签总存在相对运动，当传感器进入光电标签时，视场内的红外光逐渐增强，输出电信号的幅值也逐渐增大；当传感器完全进入光电标签后，红外光信号达到极值，并持续一段时间；当传感器离开光电标签后，光信号逐渐减弱，输出电信号逐渐恢复到初始电平。一般情况下，光电传感器输出的信号宽度与光电标签宽度和两者的相对运动速度有关。假设传感器距离光电标签的垂直距离不变，传感器光强分布均匀，光电标签发散角较小，则传感器接收到的光强大小与该时刻光源照射在光电标签的光斑面积 S 成正比。建立笛卡尔坐标系，设光斑半径为 r ，光电标签的宽度为 w ，火箭橇在通过光电标签时速度为 v ，光斑在光电标签中运动过程如图 4 所示。

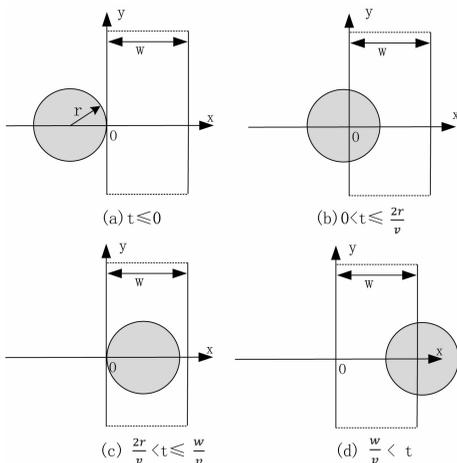


图 4 光斑在光电标签中运动过程

在图 4 中，可以看出光斑的运动过程分为 4 个阶段，光斑未进入光电标签，与光电标签直角边相切时，直角坐标系中的圆方程为：

$$(x+r)^2 + y^2 = r^2 \quad (11)$$

随着光斑的运动，图 4 (b) 阶段光斑进入光电标签中的面积增大，在光电标签中的面积 S 可表示为：

$$S = (vt - r) \sqrt{2rvt - v^2 t^2} + r^2 \left[\arcsin\left(\frac{vt}{r} - 1\right) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (12)$$

在图 4 (c) 阶段，传感器的光斑完全进入光电标签中，此时光强达到极大值并维持一段时间，光斑面积即为圆的面积 $S = \pi r^2$ 。

在图 4 (d) 阶段，传感器离开光电标签，此时光斑的面积可表示为

$$S = -r^2 \left[\arcsin\left(\frac{vt}{r} - 1\right) + \frac{\pi}{2} \right] - (vt - r) \sqrt{2rvt - v^2 t^2} \quad (13)$$

由以上过程可以看出，对应光电流的变化过程由小及大，在峰值持续一段时间后慢慢减小，不同于其他信号，光电标签的信号会持续一定的时间，持续时间长短与速度有关。后续的信号处理与滤波电路中，可根据光电标签的信号特点进行相应地信号处理。

从设计传感器的角度来说，光源的发光强度和发散角影响传感器的探测距离，同等情况下，设计时应选择发光强度大、发散角小的光源；火箭橇高速运动时，经过光电标签的时间较短，探测器的频率响应特性需要与火箭橇速度、光电标签宽度匹配。

2 传感器及电路设计

2.1 光源

传感器采用主动探测的方式对光电标签进行检测，这就要求传感器上的光源满足一定的条件：光电标签逆反射后光电探测器产生足够大的光电流，而在混凝土地面漫反射的光不足以引起光电探测器的响应。为了减小杂散光对探测器件的干扰，光源应选用非可见光，紫外光源穿透力弱，探测器种类较少，不适宜做探测用光源；近红外光源穿透力强，传感器种类丰富可适用于雾雨天气下目标的探测^[17-19]。光源的驱动方式有恒压驱动和恒流驱动。一般的红外发光二极管 (LED, light-emitting diode)，光强受温度以及外加电压影响较大。恒压驱动的方式容易造成光强的波动，引起传感器的误触发，恒流驱动让流经 PN 结的电流不随着温度的改变而改变，极大地减小了电压波动对光强的影响，根据光源的特点设计的恒流驱动电路如图 5 所示。

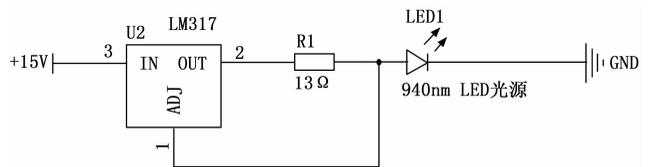


图 5 LED 光源恒流驱动电路

在图 5 中，LM317 的电压调节端连接光源，流经 LED 的电流保持不变，输入电压的波动以及 LED 温升对光强的影响很小，此时光源的驱动电流：

$$I_{out} = \frac{1.25}{R_1} + I_{adj} \quad (14)$$

式中, R_1 为电流调节电阻, I_{adj} 为 LM317 电压调节端的电流, 可忽略不计。

单个红外光源由于体积和封装限制, 驱动电流不能过大, 一般为几十毫安。相同条件下, 选择灯珠的发散角越小, 光能量越集中。值得一提的是, 当单个光源不足以满足传感器灵敏度需求时, 采用多个 LED 并联也能达到提升发光强度的效果。

2.2 光电探测器

光电探测器是光电检测中的重要一环, 指在光辐射作用下将其非传导电荷变为传导电荷的一类器件, 利用光子效应制成的探测器可以直接输出电信号^[20]。光电探测器种类很多, 不同探测器的性能特点也有区别, 光电导探测器光谱响应范围宽, 可测光强范围大, 适用于宽波段, 大视场范围信号探测; 光伏探测器是利用半导体光生伏特效应的结型光电器件, 当光照射到半导体材料中, 电子被激发并从价带跃迁到导带, 电子的移动形成光生电流, 探测器两端形成电压实现光信号的探测。

光伏探测器以 PN 结作为它的受光面, 不同结型器件的光电特性、光谱特性和频率特性有所不同。光电池结面积较大, 不需要外加偏压就可以将光能转换为电能, 线性度较好, 但结电容较大, 频率特性较差, 不适用于高速信号的探测。与光电池不同, 光电二极管 (PD, photodiode) 的结区厚而面积小, 结电容小, 频率响应特性很好, 但灵敏度低, 通常产生的光电流在微安级, 需要配合运放使用。PIN 光电二极管作为一种快速光电二极管, 结电容比光电二极管更小, 具有更高的频率响应, 但产生的光电流更小, 探测灵敏度更低。雪崩光电二极管探测灵敏度和响应速度较高, 但要求较高的工作电压, 在微型传感系统中不适用。光电三极管具有电流增益效应, 光照射在集电结上, 光生电动势使基级和发射级间电压升高, 大量电子由基级流向集电极, 光电流得以放大, 其优势在于器件本身具有电流放大作用, 频率特性不及虽光电二极管, 但配合合适的后级放大电路能得到较高的信噪比。

在光电标签组成的测速系统中, 探测器所需的频响取决于光电标签本身宽度和传感器经过的速度, 一般而言, 探测器频响大于 20 kHz 即可满足系统测量需求。根据不同

光伏探测器灵敏度、频响特性等特点, 传感器采用光电三极管既可以获得较大的光电流, 频率响应特性又符合测量要求。根据光电三极管的特点, 三极管两端需要加反向偏置, 通过内建电场加速电子向集电极移动, 提高响应速度, 光电三极管驱动电路如图 6 所示。

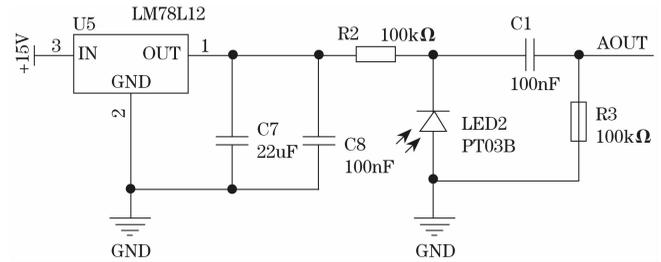


图 6 光电三极管驱动电路

在图 6 中, 电源经过三端线性稳压后为光电三极管提供 12 V 的反向偏压, $C7$ 、 $C8$ 为滤波电容。为了减小直流分量对后续信号处理电路的影响, 需要在光电三极管后级增加耦合电路, 由 $C1$ 、 $R3$ 组成的高通滤波电路可减小电路中直流电压分量对后级电路的影响, 此时, 通频带的截止频率为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (15)$$

当 $R=100\text{ k}\Omega$ 、 $C=100\text{ nF}$ 时, 截止频率为 15 Hz。光电三极管输出的信号经过耦合后去掉了光电三极管两端的直流偏置分量, 微弱的交流分量将通过后级进行放大。

2.3 信号放大与处理电路

运算放大器要对前级光电探测器中微弱的电压或电流信号进行变换, 从而获得有用的信号^[21]。使用运算放大器有两个优势, 一是运放具有高输入阻抗, 尽可能减小后级电路对原始信号的影响; 二是运放可以线性地放大原始电压或电流信号, 便于后续电路采集与处理。对于微弱信号放大, 应尽量减小因运放自身温漂、失调电压和噪声对信号的叠加影响, 选择合适的低温漂的精密运放。TLC2272 是低电压轨至轨精密运放, 信号放大与处理电路如图 7 所示。

受限于运放的增益带宽积, 对小信号可以采用两级运放级联放大, 同相放大时各级电压放大倍数为:

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (16)$$

式中, R_f 为反馈网络电阻, R_1 为反相端的输入电阻。第一

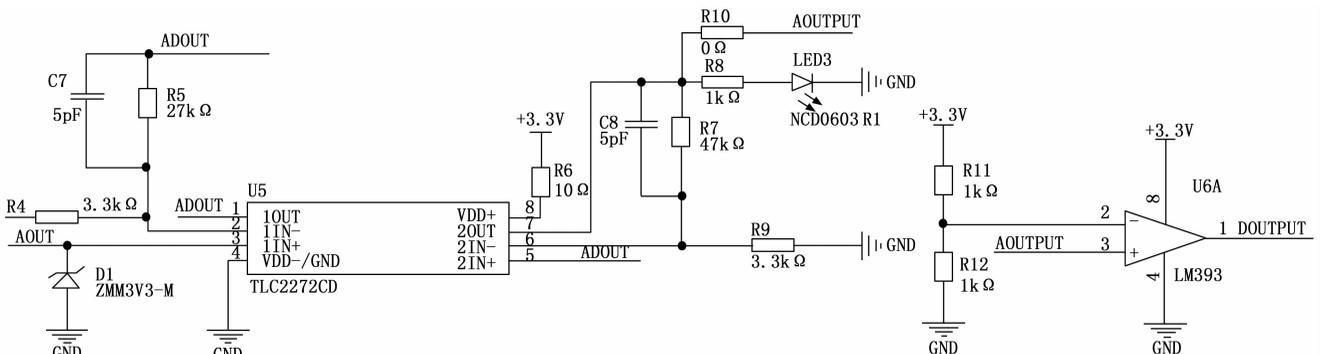


图 7 信号放大与处理电路

级放大倍数不宜过高,避免在对信号放大的同时引入过大的噪声,采用轨至轨运放既保证了线性度,又能使信号放大至电源电压附近。模拟信号经过放大后仍为模拟信号,当运放工作在开环状态下,开环增益很大,在反相端输入一个阈值电平作为比较电压,大于阈值电平为电源电压,小于阈值电平为 0,实现了模拟信号到数字电平信号的转换。

2.4 FPGA 及数据存储电路

根据光电标签测速公式,其测速的关键是测量并精确记录经过每一个光电标签的时刻信息。FPGA 是一种用时钟驱动的逻辑门电路,它以自身晶振作为时间基准,通过计数器模块记录两个信号之间晶振周期数目的方法来测定时间间隔,实现对脉冲的测量,其测量范围大,线性度较好。实际上,提供基准时钟的石英晶振的短期稳定度很高,带来的误差较小,可忽略,主要误差来源于外部脉冲信号到来时刻不定,信号边沿和时钟边沿并不完全对齐,与时基会产生 ± 1 个周期误差。因此晶振周期越短,由时钟沿不对齐带来的误差就越小,提高时钟频率可以提高测量的分辨率。系统输入的晶振频率为 50 MHz,通过锁相环(PLL, phase locked loop)倍频使得计数器工作在 100 MHz 的频率下,测量相对误差最大不超过 s ,FPGA 对脉冲进行测量并存储的过程如图 8 所示。

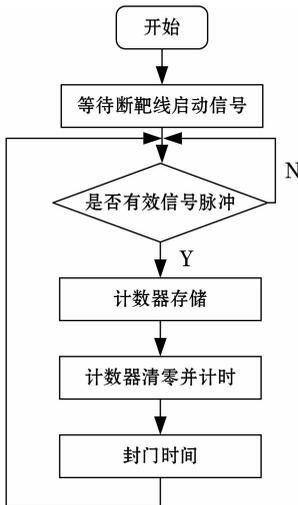


图 8 FPGA 脉冲测量程序框图

断靶触发是一种常用的仪器触发方式,在火箭橇未运行时,导线处于通路状态,不产生断靶信号,火箭橇启动后,强大的推力拉断导线之间的物理连接,FPGA 接收到脉冲信号后使能传感器信号接收。根据传感器经过光电标签的信号特点,FPGA 捕获一定脉宽长度的信号作为有效信号并进行计时。在计时开始后设置封门时间,在这一段时间内对任何信号都不作出响应,消除激波、谐波和干扰对计时系统的影响。计数器模块在时钟的驱动下向上计数,有效信号到来后输出当前计数值并复位计数器,重新开始计时。为了对计数时间值进行存储,FPGA 在片外挂载了 128 Mbit 的 NOR Flash 非易失存储器,以 4 字节对计数值进行存储,可存储 400 万条光电标签的数据,该存储器具

有较低的延迟和较好的随机访问能力,适用于存储关键的时间数据。

3 仿真及实验分析

3.1 信号特性仿真与分析

由目标探测模型以及传感器经过光电标签的信号变化过程,可以分析出光电标签的信号特征,电信号的变化与光强在光电标签上的变化有关,取光电标签宽度,火箭橇运动速度,则传感器通过光电标签的时间约为 30,信号宽度约为 50,时域信号仿真波形如图 9 所示。

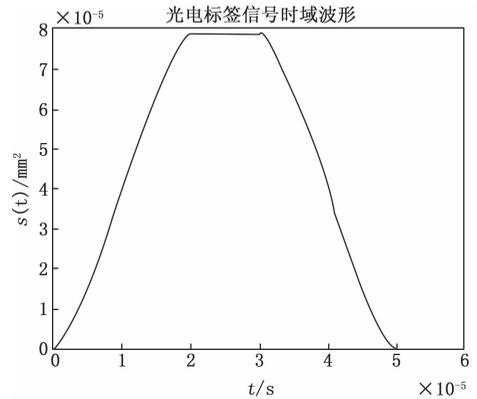


图 9 光电标签时域信号仿真波形

在时域范围内信号呈梯形分布,在信号处理时,光电标签的信号除了脉宽判断法,还可以利用互相关算法判断每一个信号之间的相关程度,进而得到光电标签的时刻信息。此外,信号的频率特性影响着光电探测器件是否能对信号做出响应,是需要关注的重要指标之一,在该条件下,相对运动速度在 1~5 Ma 之间信号宽度在 15~75 之间,在不同速度下,光电标签的信号宽度不同,随着速度的增大,通过光电标签的时间越短,光电标签信号向高频方向移动,若信号频率高于光电探测器响应频率,很有可能无法正确识别光电标签,高马赫数试验中,应考虑增加光电标签的宽度或选择有更高频响的光电探测器件。

3.2 系统方案测试与验证

为验证系统可行性,由方案中对应的电路原理图设计出对应的传感器模块,模块集光源、光电探测器、信号放大电路为一体,包含恒流源驱动、电压偏置电路等多种电路拓扑结构,模块尺寸仅为 25 mm×25 mm,图 10 (a) 为传感器 3D 效果图,白色二极管为光源,黑色二极管为光电探测器。火箭橇末端使用水刹车进行减速,传感器需要具备一定的防水、防油性能。考虑到外界复杂因素对传感器可能产生的影响,在结构上需要对传感器进行密封处理,图 10 (b) 为传感器安装结构图,传感器固定在圆柱体的密闭空间中,透过光学防护玻璃发射与接收信号,受外界环境因素影响较小。

传感器中光源与光电二极管横向距离较近,为避免两者互相干扰,焊接时光源纵向距离要高于光电探测器件。单个 LED 光源的发光强度有限,传感器与光电标签距离不



图 10 光电传感器实物图

能过远。在结构上, 传感器铝型材支撑架应具有一定的强度、刚度和调节能, 起到将传感器固定在橇体特定位置的作用, 为适应不同橇型高度, T 型支撑架便于拆卸和调整, 图 11 为传感器与数据记录模块连接实物图。

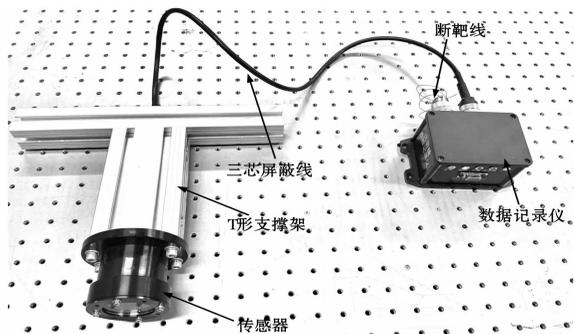


图 11 传感器与数据记录仪连接实物图

根据测试需要随意变更不同的 T 形支撑架, 使传感器与光电标签的距离不大于 300 mm, 一般情况下, T 形支撑架的长度在 150~300 mm 之间选择。传感器与数据记录仪之间使用 Y11X-1203TK2H 圆形电连接器进行连接, 具有较好的电气性能和机械性能, 符合 GJB101A-97 标准。数据记录仪里内置电池, 试验开始前断靶线连接至指定位置, 数据记录仪进入预采集模式, 传感器信号不会被记录; 试验开始后, 滑车运动断靶线连接断开, 数据记录仪进入采集模式, 记录传感器信号以及时刻信息; 试验结束后, 通过 RS232 数据接口读出记录到的时间信息在上位机进行显示。

传感器是一种主动探测器件, 在光源发光强度一定时, 信号幅值大小与光电标签的距离有较大关系。保持光源光强不变, 不同距离下, 传感器通过光电标签的信号幅值如表 1 所示。

表 1 传感器输出信号峰峰值与光电标签距离关系

光源电流 $I=96\text{ mA}$, 放大倍数 $G=126$						
距离/cm	10	20	30	40	50	60
输出/V	2.68	2.36	2.08	1.68	1.36	1.22

随着两者距离的增大, 信号幅值逐渐减弱, 探测距离大于 40 cm 后, 输出信号低于触发电平 $V_{cc}/2$, 不能被 FPGA 记录。因此, 传感器的探测距离不超过 40 cm, 10~30 cm 内探测效果最佳。

传感器对固定距离下光电标签进行探测和识别体现了系统的静态特性, 在实际应用中, 系统的输出也受到输入频率的影响, 传感器的动态特性更需要关注。

光电标签基于区截测速原理, 相同距离下, 布置的光电标签越密集, 测量出的速度曲线越平滑。利用可编程信号源模拟光电标签相对于火箭橇快速变化的过程, 验证传感器的频率响应特性, 将信号源的扫频信号加载到光源上, 使得光源快速地亮暗变化, 数据记录仪记录传感器数据后, 通过上位机软件读取出 Flash 数据如图 12 所示。

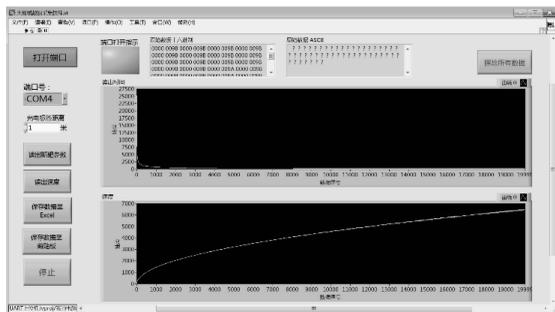


图 12 上位机读取到的 Flash 数据

在图 12 中, 数据记录模块读出的时间信息呈对数减小, 预设的光电标签距离为 1 米, 将时间换算成速度信息得到速度从 0 开始逐渐增大, 传感器接收到两个脉冲信号的时间与信号源的扫描频率一致, 证明系统能满足大部分情况下的信号测量需求。上位机通过预设两个光电标签距离对数据进行处理, 根据每个光电标签的时刻信息计算出对应的速度—加速度曲线, 还可以生成 Excel 表格方便数据保存。

4 结束语

光电标签成本低、安装简单, 相较于雷达、GPS 定位等远距离探测方法, 标记关键点得到火箭橇位置信息测速精度更高。光电标签利用光的原向反射简化了测量过程, 对于兵器试验场使用场合, 反射法实现的光电探测便于设备防护。克服原有标记关键点测速成本高、操作复杂的问题, 同时, 为火箭橇全程速度测量提供一种新的手段。

本文在建立传感器的探测模型中详细分析从传感器端到光电标签上的光强变化情况, 以及相对运动过程中传感器与光电标签的信号变化, 并通过仿真分析光电标签信号及其频谱情况, 为后续数据处理及信号滤波算法提供理论依据。

根据传感器的模型设计并搭建了对应硬件电路, 在结构上通过 T 形铝型材和防水铝外壳分别对传感器、数据记录模块进行固定密封, 传感器与数据记录模块之间通过屏蔽线进行连接, 保证了测试设备的可靠性。分别对传感器探测距离、传感器的频响特性进行测试, 实验结果表明: 传感器的探测距离达 40 cm, 传感器速度测量范围能满足现有火箭橇试验需求。光电标签下的速度测量相当于行走的“钢卷尺”, 该方案的应用解决了火箭橇试验平台全程速度测量痛点, 为火箭橇成为新型测试计量平台奠定基础。

参考文献:

[1] 李金河, 庞勇, 赵继波. 火箭橇试验加载技术研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30 (5): 137-139.
 [2] NAKATA DAISUKE, KOZU AMI, YAJIMA JUN, et al.

- Predicted and experimented acceleration profile of the rocket sled [J]. Aerospace Technology Japan, 2012, 10 (28): 1-5.
- [3] 夏有财, 孔维红, 孙其会, 等. 两级推进单轨火箭橇试验研究 [J/OL]. 航空动力学报 (2023-09-04). <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20230370>.
- [4] 谢龙, 李海涛, 沈赤兵. 火箭发动机试验通用自动测试系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (4): 491-492.
- [5] 钱礼华, 孙帅, 申晓敏, 等. 火箭橇测速电子测时仪的设计与应用 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34 (1): 120-124.
- [6] 高娜, 晁芳群, 齐永涛, 等. 超声速火箭橇全程速度雷达测试方法 [J]. 导航与控制, 2015, 14 (6): 61-64.
- [7] KHPSLA P K, Khanna Rajesh, Sood Sanjay-P. Analysis of magneto-inductive system for rocket sled velocity measurement beyond Mach 1.5 [J]. Defence Science Journal, 2014, 64 (2): 143-151.
- [8] 周洪成, 姚冉中. 感应线圈在火箭橇试验测速中的应用初探 [J]. 信息通信, 2016, (4): 9-10.
- [9] 唐瑞, 姚冉中. 基于高速火箭橇测速系统的误差分析 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (1): 103-105.
- [10] 王茜, 孙颖, 付宇, 等. 基于遥测的遮光板火箭橇时空位置测试方法 [J]. 计量与测试技术, 2021, 48 (10): 90-92.
- [11] 姚冉中, 何占雄. 基于区截光电的火箭橇测速系统设计 [J]. 信息通信, 2016, (2): 57-58.
- [12] 解晶. 基于高速火箭橇的 GNSS 接收机定位精度评估方法研究 [J]. 现代导航, 2017, 8 (1): 1-4.
- [13] 李谱林, 吴玲玲, 陈靖, 等. 大面积高均匀照明的 LED 阵列设计 [J/OL]. 激光与光电子学进展 (2023-10-11). <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20231009.1426.024>.
- [14] 高丰佳, 董涛, 谭林秋, 等. 原向反射式大靶面光幕探测灵敏度分布特性 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (4): 238-243.
- [15] 于爽, 赵冬娥, 章晓眉, 等. 玻璃微珠原向反射屏发散角测试 [J]. 激光技术, 2013, 37 (2): 211-215.
- [16] 李浩楠, 赵冬娥, 范小伊. 玻璃微珠原向反射屏发散特性研究 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (3): 14-16.
- [17] 刘群华, 施浣芳, 阎秉先, 等. 红外光幕靶测速系统和精度分析 [J]. 光子学报, 2004, (11): 1409-1411.
- [18] 高芬, 安莹, 倪晋平, 等. 红外测速光幕靶改进及测量精度分析 [J]. 西安工业大学学报, 2010, 30 (3): 205-209.
- [19] 李翰山, 袁朝辉, 雷志勇. 探测光幕的高速弹丸红外辐射信号获取研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (3): 616-618.
- [20] 胡涛, 司汉英. 光电探测器前置放大电路设计与研究 [J]. 光电技术应用, 2010, 25 (1): 52-55.
- [21] 李敬, 田会, 王文洁, 等. 光幕靶用大动态范围信号处理电路设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (12): 181-185.
- [9] 康凯, 马伟, 王治学, 等. 基于 Transformer 和胶囊网络的信息传输系统入侵检测方法 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17 (9): 862-868.
- [10] 伍德军, 韩宝华. 萤火虫优化的异构集成学习网络入侵检测方法 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46 (12): 26-31.
- [11] 王生玉. 基于多维相似度的网络传输通道恶意入侵检测方法 [J]. 科技通报, 2021, 37 (11): 57-60.
- [12] 安磊, 韩忠华, 林硕, 等. 面向网络入侵检测的 GAN-SDAE-RF 模型研究 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (21): 155-164.
- [13] 黄兆军, 曾明如. 基于 RVM 联合 GSA-SVM 的 ICS 分层入侵检测算法 [J]. 控制工程, 2022, 29 (7): 1323-1329.
- [14] 李珊珊, 李兆玉, 赖雪梅, 等. 基于概率神经网络的增量式入侵检测方法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (9): 476-482.
- [15] 魏明军, 张鑫楠, 刘亚志, 等. 一种基于 SSA-BRF 的网络入侵检测方法 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2022, 42 (5): 552-560.
- [16] 李沁雪, 刘永桂, 黎善斌, 等. 基于入侵检测的信息物理系统攻击识别综述 [J]. 控制工程, 2022, 29 (6): 1049-1057.
- [17] 刘奇旭, 王君楠, 尹捷, 等. 对抗机器学习在网络入侵检测领域的应用 [J]. 通信学报, 2021, 42 (11): 1-12.
- [18] 金志刚, 吴桐. 基于特征选取与树状 Parzen 估计的入侵检测 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (7): 1954-1960.
- [19] 常英贤, 桂纲, 杨涛, 等. 基于区块链及联邦计算的主机入侵检测方法 [J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51 (1): 42-50.
- [20] 武晓栋, 刘敬浩, 金杰, 等. 基于 DT 及 PCA 的 DNN 入侵检测模型 [J]. 计算机科学与探索, 2021, 15 (8): 1450-1458.

(上接第 23 页)

于异构网络的安全防御提供有效支持, 对于网络安全具有重要意义。在此次研究中, 通过 Agent 人工智能技术的应用有效提升了对网络环境中入侵行为的检测精度, 具有更高的应用价值。

参考文献:

- [1] 郇文明, 林海涛. 基于采样集成算法的入侵检测系统设计 [J]. 计算机科学, 2021, 48 (s2): 705-712.
- [2] 王伟, 代红, 赵斯祺. 基于特征优化和 BP 神经网络的入侵检测方法 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (10): 2755-2761.
- [3] 杨锦波, 杨宇, 姚铖鹏, 等. 基于改进深度卷积生成对抗网络的入侵检测方法 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (8): 3209-3215.
- [4] 何俊鹏, 罗蕾, 肖堃, 等. 基于特征值分布和人工智能的网络入侵检测系统的研究与实现 [J]. 计算机应用研究, 2021, 38 (9): 2746-2751.
- [5] 刘广睿, 张伟哲, 李欣洁. 基于边缘样本的智能网络入侵检测系统数据污染防御方法 [J]. 计算机研究与发展, 2022, 59 (10): 2348-2361.
- [6] 刘景美, 高原伯. 自适应分箱特征选择的快速网络入侵检测系统 [J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48 (1): 176-182.
- [7] 田桂丰, 单志龙, 廖祝华, 等. 基于 Faster R-CNN 深度学习的网络入侵检测模型 [J]. 南京理工大学学报, 2021, 45 (1): 56-62.
- [8] 陈卓, 吕娜, 陈坤, 等. 基于时空图卷积网络的无人机网络入侵检测方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47 (5): 1068-1076.