

战斗部破片光电测速系统设计

刘璞¹, 陈果², 郑晨皓¹

(1. 西安机电信息技术研究所, 西安 710065; 2. 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 战斗部破片的飞行速度是体现其性能指标的重要参数; 针对目前在战斗部破片速度参数测试中存在对测试环境要求高, 测试面积小, 设备结构易被破片误击而损坏, 成本昂贵等问题, 设计了非接触式战斗部破片光电测速系统, 包含原向反射膜、反射式光电探测装置、光电转换电路、信号处理电路及测速装置; 阐述了系统结构组成和测速原理, 通过反射式光电探测装置与光电转换电路, 将得到的光信号转换为电信号, 利用集成信号处理电路对电信号滤波放大, 比较整形处理, 由 FPGA, STM32 及其他外设组成的测速装置自动处理数据输出并显示战斗部破片的飞行速度结果; 实验结果表明: 该系统能够可靠, 稳定地完成战斗部破片速度的测量任务; 与传统测速系统相比, 具有不受限于环境, 测试区域大, 易维护, 低成本, 操作简单等优势。

关键词: 战斗部破片; 光电测速; 信号处理; FPGA; STM32

Design of Photoelectric Velocity Measurement System for Warhead Fragment

LIU Pu¹, CHEN Guo², ZHENG Chenhao¹

(1. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China;

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

Abstract: The flight speed of warhead fragments is an important parameter to reflect its performance index. Aiming at the problems in warhead fragment velocity parameter tests, such as high test environment requirement, small test area, equipment structure easy to be damaged by fragment mishit, and high cost, a contactless warhead fragment photoelectric velocity measurement system is designed, which includes the original reflection film, reflection photoelectric detection device, photoelectric conversion circuit, signal processing circuit, and velocity measurement device. This paper describes the system structure and velocity measurement principle, the obtained light signal is converted into the electrical signal through the reflective photoelectric detection device and photoelectric conversion circuit. The integrated signal processing circuit is used to filter, amplify, compare, and process the electrical signal. The speed measuring device is composed of FPGA, STM32, and other peripherals, which automatically processes the data output and displays the flight speed results of warhead fragments. The experimental results show that the system can reliably and stably complete the measurement task of warhead fragmentation velocity. Compared with traditional speed measurement systems, it has the advantages of not limitation to environments, large test area, easy maintenance, low cost, simple operation and so on.

Keywords: warhead fragments; photoelectric speed measurement; signal processing; FPGA; STM32

0 引言

战斗部是用于直接毁伤预定目标或完成与之有关的其他预定战斗任务的专门装置, 是导弹的有效载荷。战斗部分为常规战斗部、核战斗部、特种战斗部、新型战斗部等, 其中常规战斗部是具有对目标物进行武器弹药打击的最终毁伤单元, 作为导弹的重要组成部分承担着杀伤目标并完成对目标摧毁的任务^[1], 破片是目前大部分常规战斗部采用的杀伤方式^[2], 常规战斗部可在爆炸过程中会发出巨大的能量, 产生剧烈的冲击波及高温高压爆裂产物, 使破片能够以一定的初速度飞行出去, 从而高速撞击和击穿目标, 在打击目标内形成引爆与引燃作用^[3], 因此评价战斗部爆炸威力的一项重要参数就是破片飞行速度。

对战斗部破片飞行速度进行研究是其性能指标的重要体现^[4], 也是各国研究的重点内容^[5]。目前国内外在对战斗

部破片速度研究的测试系统中, 根据破片是否与测速装置相接触, 分为接触式测速系统和非接触式测速系统。接触式测速系统的典型应用有网靶、箔靶和惯性靶等, 具有结构简单、易于制造和抗干扰能力强的优势。非接触式测速系统的典型应用有线圈靶、雷达测速、GPS 测速、高速摄影测速、光幕靶、天幕靶等^[6]。非接触式测速系统在使用过程中, 破片不需要与测速装置接触, 不仅测速精度高, 而且可以多次使用等优点, 因而已经广泛应用于破片测速实验中^[7]。

目前现有关于战斗部破片测速系统存在以下问题: 接触式测速系统在破片穿过时会对其飞行速度和姿态产生直接影响, 导致破片穿过靶面前后的飞行状态发生变化, 进而使测速结果产生较大的误差。其次接触式测速系统的操作较为繁琐, 单发破片测试后需要调整靶面位置, 测试效率不高。另外接触式测速系统还存在精度较低、可靠性不

收稿日期: 2023-12-08; 修回日期: 2024-01-05。

作者简介: 刘璞(1974-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 刘璞, 陈果, 郑晨皓. 战斗部破片光电测速系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 163-171.

够高等缺点,在现代实际应用中已逐渐被淘汰,无法应用于高速度、高精度的测速场合^[8]。在非接触式测速系统中,线圈靶是根据电磁感应原理设计而成,因而极易受到外界电磁场的干扰造成误触发^[9]。雷达测速利用多普勒效应进行速度测量,但这种测速系统设备体积庞大且价格昂贵^[10]。GPS测速的精度依赖于卫星信号强度,容易受限于天气等外界环境因素。高速摄影测速使用高速摄影机研究物体的飞行速度,但是设备成本高,并且在后续图像处理中较为复杂^[11]。以固定靶架为结构的矩形光幕靶测速系统,设备庞杂,测试面积相对较小且靶架易被破片击中而造成设备损坏^[12]。以天空为背景的天幕靶为核心测速系统,存在对使用者操作水平要求较高,对测试环境中背景光要求高等问题^[13]。

目前无论是接触式测速系统还是非接触式测速系统中都存在一些问题,针对这些问题本文设计了一种战斗部破片速度测量的光电测速系统,反射式光电探测装置中激光器发射出激光后,原向反射膜将激光原向返回由菲涅尔透镜聚焦位于中心的光敏器件处,当有破片经过激光光幕导致返回光敏器件的光强发生变化,根据光电效应光敏器件产生电流也会变化,通过光电转换电路将光信号转换为电信号,再经过信号处理电路中的滤波放大电路和比较整形电路处理,最终将数据交由 FPGA, STM32 和串口屏等组成的测速装置计算处理,输出并显示破片的飞行速度,具有操作简易,集成度高,测试面积大,模块化好易维护,稳定性高等优点。

1 光电测速系统结构组成及测速原理

1.1 光电测速系统组成

系统由原向反射膜,反射式光电探测装置 1 和 2,光电转换电路 1 和 2,信号处理电路 1 和 2 以及测速装置组成,其中信号处理电路包括滤波放大电路,比较整形电路,测速装置由 FPGA 模块, STM32 模块,串口屏,电源等组成。系统结构如图 1 所示。

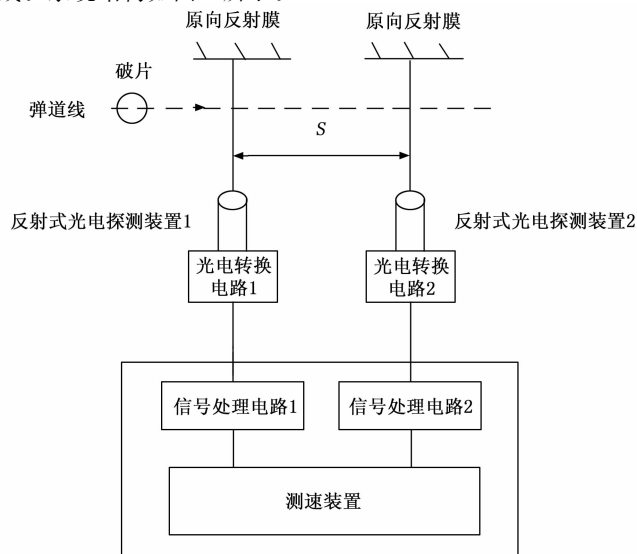


图 1 系统结构框图

图中所示的系统结构框图中,反射式光电探测装置 1,反射式光电探测装置 2 和原向反射膜形成探测激光光幕,经过光电转换电路 1 和 2 后,由位于后方的信号处理电路 1,信号处理电路 2 和测速装置组成对破片经过探测激光光幕时信号的处理,破片飞行速度的计算与显示模块。 S 为两个反射式光电探测装置之间的距离。

系统各个部分采用的是模块化设计,不仅可以增加整个系统的可维护性,而且可以提高各个部分的复用性。模块化设计的另一个优点是测试人员可快速便捷地搭建测速系统,将关注点放在测速实验本身。系统所使用的原向反射膜造价低并且可重复使用,反射式光电探测装置所形成的扇形光幕比固定靶架式光幕测试面积大,采用主动式激光光源与以天空为背景的天幕靶相比不受外界环境亮度的影响进行测速工作。

1.2 测速原理

对破片飞行速度的测量从原理上可分为瞬时速度测量法和平均速度测量法^[14]。从数学上对物体运动速度的定义出发,某时刻物体的位移对时间的微分即物体的运动速度,根据下式:

$$V_i = \frac{dS}{dT} \quad (1)$$

但是在实际情况中,受限于测量方法与测量精度的原因,物体的实际瞬时速度无法直接测量出来,一般选择测量物体的平均速度作为物体的速度,也就是物体飞行的一段距离与飞过此段距离所用时间的比值,根据下式:

$$V_m = \frac{\Delta S}{\Delta T} \quad (2)$$

式中, ΔS 为物体飞行距离, ΔT 为所用时间。从式中可以看出,当 ΔS 与 ΔT 值越小时,平均速度 V_m 也就越接近瞬时速度 V_i 。

根据以上原理,考虑到破片飞行速度通过瞬时速度测量法直接测量起来比较困难,且并不能准确反映破片在某一阶段的速度情况,因此选择平均速度测量法。平均速度测量法中又可分为定时测量法和定距测量法。结合实际情况与测量方法难易程度,本文选择定距测量法^[15],根据图 1 所示,所谓定距测量法就是调整好反射式光电探测装置对原向反射膜的姿态,测得两个反射式光电探测装置之间的距离 S ,当破片依次穿过两个反射式光电探测装置形成的扇形光幕时,此时把破片通过的第一个反射式光电探测装置编号为 1,第二个编号为 2,这个过程中两个反射式光电探测装置接受来自原向反射膜的反射光强发生变化,在光敏器件上引起光电效应产生的电信号也会随之改变,电信号经过光电转换电路与信号处理电路后,测速装置可以获得破片经过两个光幕所用的时间 T ^[16],根据下式:

$$V = \frac{S}{T} \quad (3)$$

S 与 T 已经得到,由上式测速装置可以得到破片的平均飞行速度 V 。

2 系统硬件及电路设计

2.1 原向反射膜

原向反射膜由透明表层膜，玻璃微珠，塑胶树脂，背胶和护纸组成，通常用在非接触式测试中。入射光到达透明表层膜表面后，通过透明表层膜，由玻璃微珠以很小的发散角原方向反射回去，其下层的背胶可便于将原向反射膜固定在需要的位置。原向反射膜结构如图 2 所示。

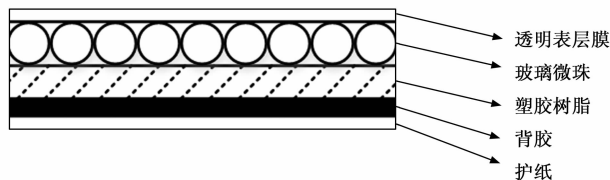


图 2 原向反射膜结构图

原向反射膜中主要起到反射作用的是玻璃微珠，如果将入射光看做一束平行光，当平行光进入玻璃微珠时，遵循物像计算公式：

$$l' = \frac{n'r}{n' - n} \quad (4)$$

式中， l' 为像距， r 为玻璃微珠半径， n' 为玻璃微珠折射率， n 为外界折射率，近似为 1。如果玻璃微珠折射率 n' 等于 2 时，则根据上式计算出的像距 l' 等于 $2r$ ，也就是玻璃微珠的直径，即入射到玻璃微珠的平行光汇聚到其后表面后，相对于光轴的另一侧原方向反射回去，实现激光原向反射的功能^[17]。

2.2 反射式光电探测装置

反射式光电探测装置工作原理如图 3 所示，一字线激光器安装于菲涅尔透镜中央，发射的激光射向原向反射膜，原向反射膜可以使光按照原路反射回来^[18]，由原向反射膜反射回来的激光经过窄带滤光片返回到菲涅尔透镜，菲涅尔透镜接收到返回的光线并聚焦到位于后方的光敏器件，之后由光敏器件将光信号转换成电信号。当破片飞行通过扇形光幕时，会遮挡住一部分反射回的光线，此时光敏器件接受的光信号会发生变化，进而转换的电信号也发生相应变化，可以根据光生电流的大小来判断是否有破片通过。本装置中使用的原向反射膜配合反射式光电探测装置可以在增大测试区域的同时缩小实验设备的占用空间。

图 3 中 θ 为激光器视场角， H 为光敏器件长度， F 为菲涅尔透镜焦距， L 为菲涅尔透镜到原向反射膜距离， W 为激光器的探测范围横向宽度。这些物理量之间的关系如下式：

$$\tan\theta = \frac{H}{F} = \frac{W}{L} \quad (5)$$

光敏器件的尺寸选择，所处前后位置以及激光器的视场角受上式的约束关系。综合上述因素激光器选择梅曼光电科技波长为 638 nm、功率为 700 mW 的一字线形激光器，工作电压为 5 V，其优点是激光光线准直及稳定性高。光敏器件选择滨松光子学株式会社的 S3588-08 型 PIN 硅光敏器件，检

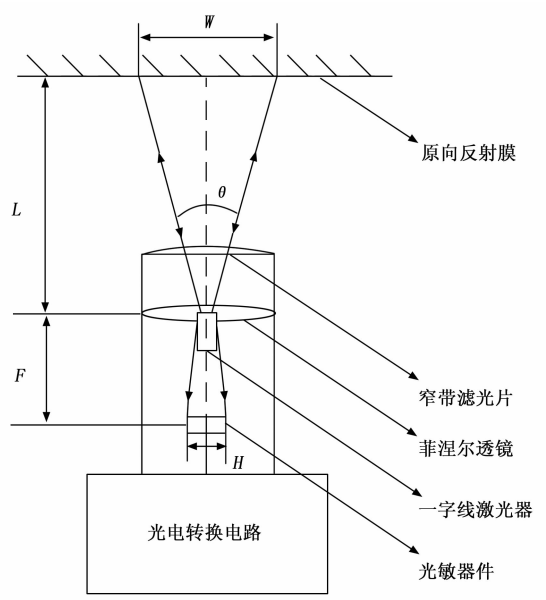


图 3 反射式光电探测装置工作原理图

测波长范围 340~1 100 nm，受光面为 30×3 mm 长方形，具有高稳定性，高速响应和良好的能量分辨率等特点^[19]。

在现有的反射式光电探测装置设计中，一般都是将激光发生器与光敏器件竖直平行安装，如图 4 所示。

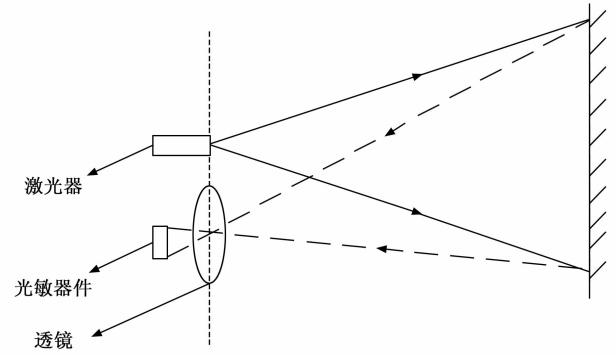


图 4 传统反射式光电探测装置示意图

图 4 所示设计方式产生的问题是由于激光器与光敏器件和透镜不在一条水平线上，这样会造成反射光部分光能的损失，即激光器发射光有一部分不会被光敏器件接收到。本文设计的测速系统如图 3 所示，将激光器安装于光敏器件的正前方，激光器与光敏器件位于菲涅尔透镜的中轴线上，通过菲涅尔透镜聚焦收集反射光，相较于将激光器与光敏器件并排水平安装可减小反射光能量损失。

2.3 光电转换电路设计

根据测试对象为破片与所选光敏器件设计光电转换电路，光电转换电路主要功能是当光敏器件通过光电效应将光信号转换为电信号后，完成电流到电压的转换，对电压的放大以及前后电路的隔离。光电转换电路图如图 5 所示。

由于 S3588-08 型光敏器件输出电流为微安级，因此使

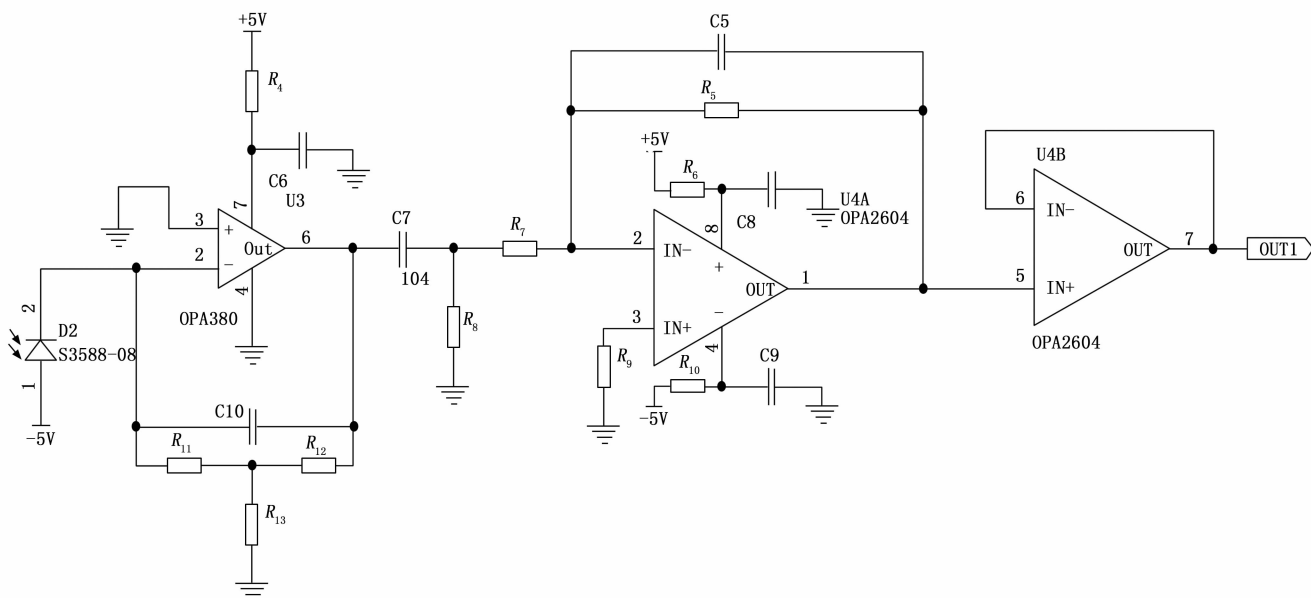


图 5 光电转换电路图

用 OPA380 (U3) 运算放大器设计跨阻放大电路, 使输入电流能够转变成输出电压。在理想情况下, 经过放大器的电路输出电压 V_{out1} 为:

$$V_{out1} = I \cdot R_f \quad (6)$$

式中, I 为输入电流, R_f 为反馈电阻。在这里引入 T 型反馈网络到反向输入端, 采用这种电路设计不但可以满足电压增益高的要求, 又能减少反馈电阻 R_f 的阻值^[20]。T 型网络可以实现低数值电阻完成高增益反馈电阻匹配, 保证电路维持一定的频响带宽, 缺点就是噪声大, 由于是开环电路, 会引入较大噪声, 需要匹配去耦电容, 因此使用 C10 电容用来抑制噪声。同时 R_f 阻值大小既要保证电路对信号的高灵敏度, 又要兼顾光敏器件的频率响应, 因此 R_f 阻值大小至关重要, 其阻值大小为:

$$R_f = \frac{R_{11}R_{13} + R_{11}R_{12} + R_{12}R_{13}}{R_{13}} \quad (7)$$

输入电流经过 OPA380 (U3) 运算放大器与 T 型反馈网络后变为电压输出, 通过 OPA2604 (U4A) 运算放大器对电压比例放大, 输入电压与输出电压关系如下:

$$V_{out2} = -\frac{R_5}{R_7} V_{in2} \quad (8)$$

最后再以 OPA2604 (U4B) 运算放大器进行电压跟随, 作用是实现信号隔离, 最终输出给滤波放大电路。

2.4 滤波放大电路设计

由于现场测试环境大多复杂多变, 所需的有效信号中夹杂着各种噪声干扰, 因此要在采集到破片经过激光光幕所产生的触发信号的同时对该触发信号进行滤波来消除噪声的干扰。首先应求得有用信号的通带频率^[21], 根据以下两式确定:

$$t = \frac{d+h}{v} \quad (9)$$

$$f = \frac{1}{t} \quad (10)$$

式中, d 为破片横向长度, h 为光幕厚度, v 为破片飞行速度, t 为破片穿过光幕时间, f 为对应的信号频率。滤波电路的截止频率 f_c 为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (11)$$

根据一般性经验可知, 战斗部破片速度在 100 ~ 1 500 m/s 之间, 圆形破片直径大于等于 3 mm^[22]。根据破片飞行速度与破片大小, 经过实验确定选择合适的电阻与电容组成滤波电路。在电阻和电容并联电路中, 利用到电容两端电压不能发生突变, 具有阻碍电压变化率的特性, 因而起到滤波, 平滑输出信号的作用。

依据以上设计了滤波放大电路, 如图 6 所示。滤波放大电路的主要目的是在对电压信号进行放大的同时尽可能抑制交流噪声信号产生的影响。

图中 CA3140 (U1) 运算放大器与 INA103 (U2) 仪表放大器用于放大电压信号, JRC-23F (JDQ1、JDQ2) 继电器用来选择破片前端或者后端为测试基点以及高灵敏度与低灵敏度之间的切换, 这两个模式的选择要根据破片大小以及测试现场情况灵活选择。另外每一级之间通过电容与电阻组成滤波电路, 用来抵消运算放大器之间的直流漂移与降低蚊虫等微弱信号引起的干扰。经过滤波放大电路后, 信号最大可被放大 1 800 倍, 然后将该信号输出给比较整形电路。

2.5 比较整形电路设计

经过滤波放大电路的输出信号是一个不规则波形, 不能作为测速装置的触发信号, 因此使用比较电路中调节电位器通过设置比较电压阈值, 不仅能够将不规则波形变

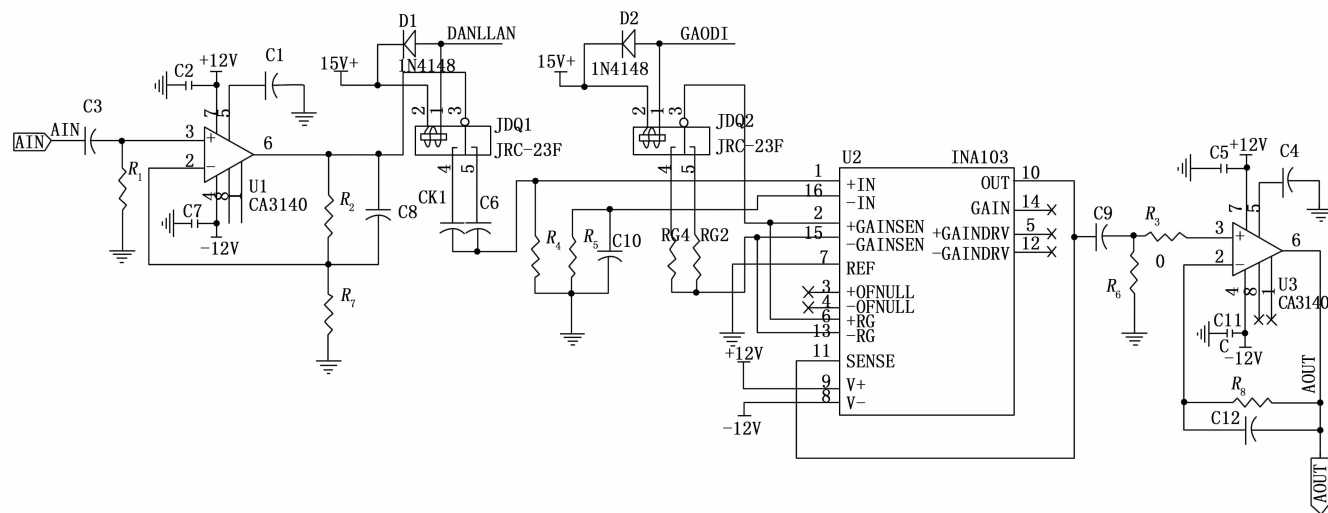
为方波脉冲信号,而且能够防止蚊虫等干扰产生误触发信号。比较整形电路如图7所示。

图中输入信号首先经过CA3240(U9A)运算放大器构成的信号跟随电路,实现前后级的隔离,消除它们之间的影响。然后通过MPS2222A(Q1、Q3)三极管信号跟随与相位延时后,当输入LM311P(U10)比较器的输入信号达到设定的电压差时,输出方波信号。由于实际波形会有多个震荡干扰,为了避免出现序列方波,因此最后利用CD14838(U11)单稳态振荡器输出一个固定宽度的脉冲信号输出给测速装置。

2.6 测速装置设计

测速装置由FPGA模块,STM32模块,串口屏,电源,外部按键等组成,其架构如图8所示。FPGA芯片选用Xilinx公司的Spartan-6,该芯片实现了低成本,低风险和低功耗的最佳平衡,其内部默认时钟为50 MHz,可分频为10 MHz作为计时的最小单位。在FPGA芯片外部配有外置

FLASH,型号为W25Q128FV,可存储128 Mbit的数据。每次系统上电时,FPGA芯片会自动加载FLASH中的bit程序文件。STM32芯片选用的是ARM的STM32F103C8T6,该芯片性价比高,能够完成大多数任务。其内部的FLASH容量为64 KB可用于保存程序代码。串口屏选择的是淘晶驰12英寸串口屏,使用配套软件USART HMI可实现串口指令的发送与接收,控制设计的自定义UI界面。FPGA模块与STM32模块可在室内环境由交流220 V直接供电,也可在没有外接电源的情况下使用内置的20 Ah锂电池组,充足一次电可保证连续18小时工作时间,正常使用可循环使用1 000次以上。串口屏使用排线接口由STM32供电,电源经FPGA模块通过七芯屏蔽线给反射式光电探测装置供电。光电探测装置1和2在测速装置上的接口使用七芯航空插座。外部按键包括复位按键,破片前端或者后端为测试基点切换按键以及高灵敏度与低灵敏度切换按键。FPGA与STM32,STM32与串口屏之间均使用串口进



行通讯。

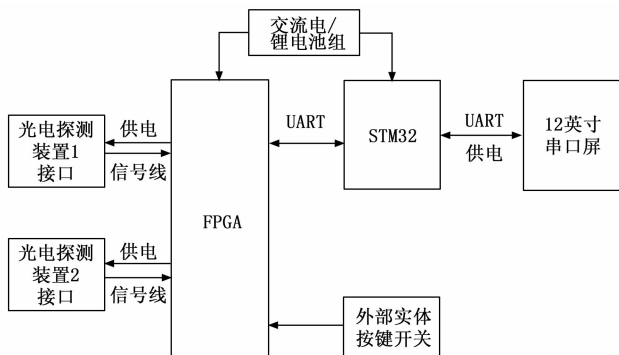


图 8 测速模块架构图

3 系统软件设计

测速装置的主要功能是在接收到两个光电探测装置的开始和停止触发信号后，完成破片飞行时间的记录并计算出破片的飞行速度显示结果到串口屏上。FPGA 主要功能是计时，STM32 主要功能为数据处理并将速度数据传递给串口屏，由串口屏显示结果。当反射式光电探测装置 1 的最终处理后信号到来，即破片通过第一个光幕，FPGA 采集到脉冲信号的上升沿，同时计数器立刻开始从 0 计数，通过 50 MHz 分频得到 10 MHz，作为计数的最小单位时间即 100 ns。当反射式光电探测装置 2 的最终处理后信号到来，即破片通过第二个光幕，采集到脉冲信号的上升沿后，停止计数，将计数的数值乘以最小单位时间可得到破片经过两个反射式光电探测装置所形成光幕的时间，也就是破片的飞行时间。得到时间数据后，FPGA 通过串口通信将数据发送给 STM32，STM32 接收到数据根据事先测量设定的两个反射式光电探测装置间距与公式 (3) 得到破片平均飞行速度，并显示在串口屏上，完成系统测试整个工作流程。

3.1 FPGA 程序设计

利用 FPGA 设计 D 触发器，计数器，串口通信等模块来完成信号捕捉，时间计时及传输数据信息等功能。FPGA 工作流程图如图 9 所示。系统上电之后初始化，复位信号 (CLRN) 拉高电平，输出信号 1 (Q1) 与输出信号 2 (Q2) 输出 0，FPGA 程序初始化复位成功，接下来进入等待状态。当光电探测装置 1 的触发信号即开始信号到来之后，此时检测到开始触发上升沿信号 (CLK1)，Q1 输出 1，计数器立即开始计数并持续拉高 FPGA 对 STM32 输出信号 1 (OUT1)，此后计数器一直以 100 ns 为单位进行计数，直到光电探测装置 2 的触发信号即停止信号到来之后，检测到停止触发上升沿信号 (CLK2)，Q2 输出 1，计数器立即停止计数并持续拉高 FPGA 对 STM32 输出信号 2 (OUT2)，保存此时的计数器数值到先进先出存储器 (FIFO, First In First Out) 中，并将其拆分为 4 个 8 位的无符号数据后通过串口发送给 STM32，完成一次测试流程。如果按下外部复

位按键以拉高 CLRN，便清空锁存的数据和计数器数值，等待下次触发信号。

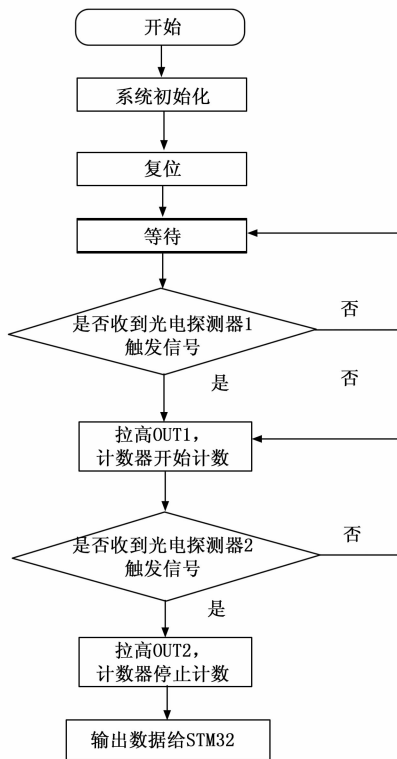


图 9 FPGA 工作流程图

3.2 STM32 程序设计

STM32 适合实现处理数据，转换数据格式以及和各种外设进行通信交互等功能。STM32 工作流程图如图 10 所示。系统上电之后初始化与 FPGA 和串口屏的串口，然后通过串口向串口屏发送初始化指令，向 FPGA 发送初始化指令，OUT1 与 OUT2 恢复为默认低电平，接下来进入等待状态。当 OUT1 到来时，即光电探测装置 1 的触发信号到来，此时向串口屏发送开始触发信号到来指令 1，等待 OUT2 到来后，向串口屏发送停止触发信号到来指令 2，并接收 FPGA 向 STM32 发送的数据，由于串口发送的是字符串数据，将字符串数据转为字节数组数据，再将字节数组数据中的 4 个 8 位的无符号字节按照从高位到低位的顺序依次拼接起来，然后转换为无符号 32 位数据，将计数数值乘以 100 ns 最小单位可得到破片飞行所用时间。若串口屏已经设置两个光电探测装置之间的距离，此时根据式 (3) 计算出破片的平均飞行速度，将数据以一定格式发送给串口屏。等待 FPGA 的下一轮测试信号。STM32 与 FPGA 采用自定义帧数据格式，包含帧头 0X1C，功能码，数据和帧尾 0XEF。STM32 与串口屏采用串口屏所定义的串口命令数据帧，包含字符串指令，结束符。

3.3 串口屏界面程序设计

在测试测量中友好的显示界面必不可少，本文中使用了 USART HMI 配套其软件设计用户显示界面。该软件降低

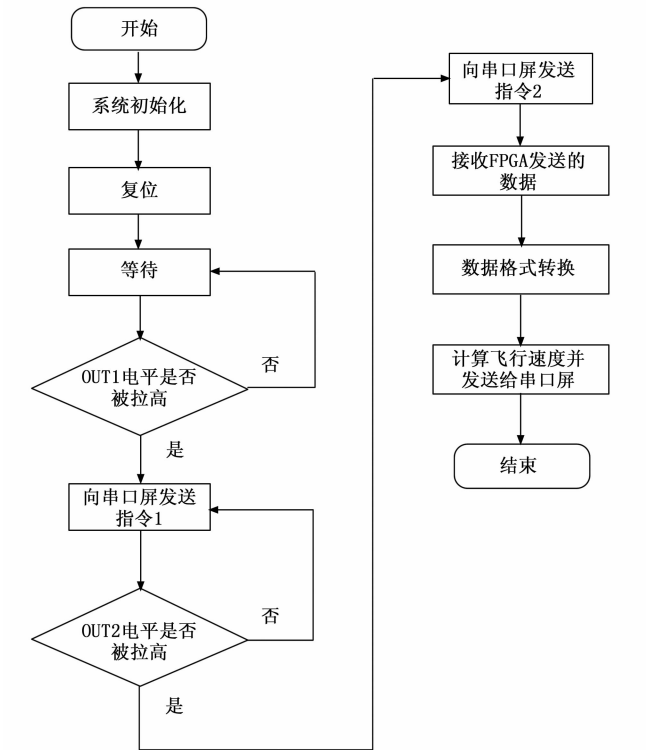


图 10 STM32 工作流程图

了仪器设备交互系统设计难度，解决了交互相关工作的重复性设计问题。淘晶驰 12 英寸串口屏具有以下特点：使用字符串指令，比十六进制指令开发更加方便并且其源代码更容易读；数据结构精简，采用字符串指令+结束符，比其他产品帧头+数据长度+指令+变量地址+数据+结束符的结构更加简单；使用 C 语言指令，比汇编语言更易读写等。当设计好串口屏显示界面与设置好相关参数后，可通过 RS232 接口将配置文件下载到串口屏板载的 TF 卡中进行保存，这样可在离线状态下使用相关指令操作界面设置的控件。

串口屏界面程序工作流程：系统上电后接收到 STM32 的初始化指令，首先进入到帮助说明界面，等待 10 s 后切换到测试界面。当接收到 STM32 发送的开始触发信号到来指令 1 后，随即点亮显示界面的输入 I 布尔型控件，当接收到 STM32 发送的停止触发信号到来指令 2 后，点亮显示界面的输入 II 布尔型控件，根据测试前设置的光电探测装置间的距离 STM32 将计算的破片平均飞行速度数值显示到界面的速度值文本显示控件，完成一次测试流程，等待 STM32 的下一轮测试指令。若按下外部复位按键，将输入 I 和输入 II 布尔型控件熄灭并清空速度显示控件的数值。串口屏界面如图 11 所示。

4 实验测试

4.1 系统搭建及实验要求

为了验证本文设计的战斗部破片光电测速系统的性能，搭建测速系统，把原向反射膜张贴于垂直地面的背景板上，

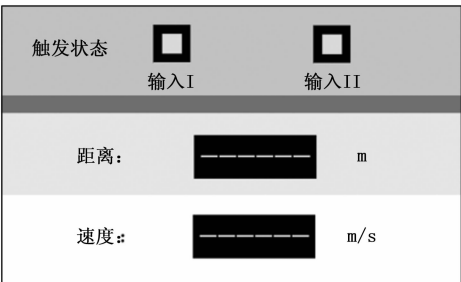


图 11 串口屏界面图

固定好反射式光电探测装置之间的距离且让两个反射式光电探测装置保持在同一水平面与垂直面，调整反射式光电探测装置对原向反射膜的方向使之发射的激光能够原路返回，将光电探测装置输出信号线与信号处理电路的输入端连接，完成整个测速系统的搭建。光电探测装置距离原向反射膜的距离要遵循式（5）的关系，因此要根据现场实际情况调整位置。系统搭建现场如图 12 所示。



图 12 系统搭建现场图

根据枪弹测速仪校准规范，最大允许相对误差在±0.1%~2%，读数分辨为 0.1 m/s，采用比对测速实验来验证本系统的测速精度，比对系统是选择经过严格检定和实弹验证过的天幕靶测速系统。

4.2 实验过程及结果分析

破片低速飞行实验采用室内实验环境来模拟，以直径为 5 mm 圆形弹丸代替破片，使用气枪装载圆形弹丸在反射式光电探测装置 1 前方 1.5 m 处发射实验，两个反射式光电探测装置之间的距离为 2 m，作为对比标准，在同样环境条件下，以天幕靶测速系统进行同样的实验，读取实验结果并记录。实验结果如表 1 所示。

在西安某靶场实验基地进行破片高速飞行速度测试。所用破片为直径 5 mm 的预制球形破片，采用弹道枪作为发射装置在反射式光电探测装置 1 前方 2 m 处发射实验，两个反射式光电探测装置之间的距离为 5 m，作为对比标准，在同样环境条件下，以天幕靶测速系统进行同样的实验，读取实验结果并记录。实验结果如表 2 所示。

表 1 破片低速飞行实验结果

序号 i	本文设计测速系统速度 $v_1/(m/s)$	天幕靶测速系统速度 $v_2/(m/s)$	$\Delta v = v_1 - v_2 \text{ m/s}$	$\Delta v/v_2 \%$
1	152.1	152.0	0.1	0.657 8
2	164.5	164.4	0.1	0.608 2
3	154.7	154.8	-0.1	-0.645 9
4	162.4	162.3	0.1	0.616 1
5	173.8	173.9	-0.1	-0.575 0

表 2 破片高速飞行实验结果

序号 i	本文设计测速系统速度 $v_1/(m/s)$	天幕靶测速系统速度 $v_2/(m/s)$	$\Delta v = v_1 - v_2 \text{ m/s}$	$\Delta v/v_2 \%$
1	1 157.7	1 157.9	-0.2	-0.172 7
2	1 161.2	1 161.5	-0.3	-0.258 3
3	1 131.9	1 131.3	0.6	0.530 4
4	1 159.3	1 159.8	-0.5	-0.431 1
5	1 155.7	1 155.3	0.4	0.346 2

根据表 1 和表 2 实验结果可得,将本文中所设计战斗部破片光电测速系统与天幕靶为核心的测速系统所得到的实验数据进行对比,在破片低速飞行实验测试中,最大相对误差为 0.657 8 ‰,最小相对误差为 0.575 0 ‰,在破片高速飞行实验测试中,最大相对误差为 0.530 4 ‰,最小相对误差为 0.172 7 ‰,经过不同破片大小与速度飞行实验,本系统可测得破片飞行速度在 20~1 500 m/s 之间,可测破片直径为 3~5 mm,测速相对误差均小于 1 ‰,满足测速规范,系统测试数据稳定波动小,结果可靠,符合战斗部破片的实际测速要求。

5 结束语

本文从目前战斗部破片速度测速中存在的问题入手,设计了对测速环境要求更低的反射式光电探测装置,集成度更高的信号处理电路,使用更简单的测速装置,通过实验与常规测速系统相比,验证了该系统所得结果的稳定性与可靠性。相比 GPS 测速,雷达测速,高速摄影测速等测速系统极大降低了整套系统设备成本,相较于以靶架固定的矩形光幕靶和以天空为光源的天幕靶为核心的测速系统,本系统中的反射式光电探测装置在增大测试空间的前提下降低对外界环境的要求,将涉及到的信号处理电路集成起来,测试人员只需要关注测速装置给出最终结果,具有操作简单易维护、系统性能稳定、模块化好,能够进行自动化数据处理等特点,具有较高的实用性,实验结果表明:在同样的实验环境与条件下,本文所设计的光电测速系统能够满足低成本,高稳定性的要求下很好的完成对破片飞行速度的测量,为战斗部破片的飞行速度参数测量提供了更优的测试解决方法。进一步地,也可将本文中设计的光电测速系统用于类似于破片等相同类型的飞行物体速度测试中,拓展其应用场景。

参考文献:

[1] 丁自毅. 战斗部破片动能参数测试技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023.

[2] 倪晋平, 田 会, 杨 雷. 战斗部破片速度光幕靶测量方法研究 [J]. 光学技术, 2008 (1): 152-155.

[3] 李广嘉. 破片测速系统校准方法及试验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.

[4] 严 博. 多通道混合数据采集系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 224-228.

[5] CAGLE C, HILL K J, WOODRUFF C, et al. Target penetration and impact analysis of intermetallic projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 136: 103427.

[6] 孟 南. 主动式激光光幕测速系统的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.

[7] 陈兴旺. 大口径弹丸光幕靶测速技术 [J]. 四川兵工学报, 2012, 33 (12): 7-10.

[8] GILL G S, KUMAR A. Velocity measurement system for small caliber projectiles [C] //Proceedings of the World Congress on Engineering, 2008, 1: 2-4.

[9] 章启成, 孔德仁, 狄长安. 感应式线圈靶感应电势模型及其分析 [J]. 测试技术学报, 2009, 23 (6): 501-504.

[10] 周旦红, 杨莘元, 杨 楠. 多普勒测速雷达速度转换的误差分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007 (1): 93-96.

[11] LIU Z, ZHANG Y, ZHAO J, et al. High-speed photography velocity measurement in range based on digital photogrammetry [J]. Journal of Ballistics, 2015, 27 (4): 47-51.

[12] 蔡荣立, 倪晋平, 田 会. 光幕靶技术研究进展 [J]. 西安工业大学学报, 2013, 33 (8): 603-610.

[13] 倪晋平, 魏建凯. 天幕靶技术研究进展 [J]. 西安工业大学学报, 2011, 31 (7): 589-596.

[14] YANG W, PEI D, ZHANG Y, et al. Study on projectile dynamic parameters measurement [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28 (10): 1467-1470.

[15] 柏超龙, 江 剑, 赵传荣. 基于 FPGA 的反射式光幕测速系统 [J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39 (12): 231-235.

[16] 易春林, 赵传荣, 周 岚, 等. 区截测速系统无偏一致性有效性考核方法试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (3): 220-223.

[17] 李浩楠, 赵冬娥, 范小伊. 玻璃微珠原向反射屏分散特性研究 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (3): 14-16.

[18] 赵冬娥, 周汉昌. 原向反射式激光光幕测速技术研究 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2005 (6): 432-435.

(上接第 155 页)

含 A 系统作战效能 2 项三级指标计算评估, 采用基于比值的体系贡献率计算方法计算体系贡献率^[18-19], 具体计算公式如下:

$$\text{体系贡献率} = \frac{|\text{含 A 系作战效能} - \text{不含 A 系作战效能}|}{\text{含 A 系统作战效能}}$$

5.5 指标体系的评估

要地防空导弹作战试验的指标体系构建完成后, 根据评估指标体系完成数据采集需求分析, 通过主观评定法、统计分析法、数学解析法、仿真模拟法等多种方法综合运用, 采用定性与定量相结合, 实装试验数据与仿真推演结果相结合等手段, 对试验中的数据进行综合分析^[20], 对指标体系中的指标进行一一计算和评估, 从而得出对要地防空导弹武器系统的综合评估结论。

6 结束语

要地防空导弹作战试验的指标体系构建是一个复杂的过程, 其构建不但与装备的作战使命任务、系统结构功能有关, 还与构成作战体系的各武器装备有关。为了检验装备是否能完成典型作战任务, 完成的能力和程度如何, 必须构建科学、可测和可评的指标体系。依据作战任务, 采用层次分析等方法对装备所有的指标进行分解构建, 并融入到作战试验的每个环节中去考核, 通过定量分析与定性评估相结合的方式得出综合结论。限于文字和篇幅, 本文只针对系统主要的几类指标进行了分解, 其指标体系还可以依据本文的方法继续完善; 关于指标体系评估部分只进行了综合论述, 对于指标体系计算评价的具体过程和应用算法, 未展开深入分析和详细论述。本文论述的方法在海军战术导弹试验鉴定中已进行了多次的应用和实践, 得到了充分地验证和检验, 对相关领域的试验工作, 具有一定的借鉴意义和推广应用价值。

参考文献:

[1] 李廷延, 等. 导弹武器系统的效能及其分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[2] 燕雪峰, 等. 面向任务的体系效能评估 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.

[3] 吴玲等. 舰载武器系统效能分析 [M]. 北京: 电子工业出版

[19] NI J P, LEI Y. Method for measuring velocity of warhead fragments based on photoelectric detection [J]. Journal of China Ordnance, 2007, 3 (4): 275-280.

[20] 段守敏, 李小宁, 王 艳. 运算放大器的应用与 T 形电阻网络 [J]. 郑州工业大学学报, 2000 (3): 71-72, 79.

[21] 王文涛. 反射式光幕精密测速系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.

[22] 李 楚. 基于梳状靶的爆炸破片分布与速度研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023.

社, 2020.

[4] 郭齐胜, 等. 装备效能评估概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[5] 许树柏, 等. 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

[6] 段绍展. 层次分析法在电子武器效能评估中的应用 [J]. 电子信息对抗技术, 2006, 21 (1): 38-40.

[7] 王 凯, 等. 武器装备作战试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

[8] 胡剑文, 等. 武器装备体系能力指标的探索性分析与设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[9] 陆 欣, 谭乐祖, 高传斌. 水面舰艇平台防空作战能力指标体系与评估 [J]. 舰船电子工程, 2012 (9): 23-25.

[10] 庄世杰, 邱涤珊, 沙基昌. 潜射反舰导弹武器系统作战效能指标体系设计初探 [J]. 火力与指挥控制, 1998 (12): 21-22.

[11] 陈怀瑾, 等. 防空导弹武器系统总体设计和试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995.

[12] 斗计华, 郭 锐, 杨兴宝. 舰空导弹武器系统作战效能评估 [M]. 北京: 海潮出版社, 2010.

[13] 时维科, 刘 乔, 李绍隆. 基于舰载平台的近程反导武器系统作战能力评估方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (1): 282-287.

[14] 李兴兵, 谈跃进, 杨克巍, 许秉军. 基于体系对抗仿真的装甲装备体系效能评估 [J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30 (6): 59-62.

[15] 陈文奇. 防空导弹武器系统作战效能评估分析 [D]. 厦门: 厦门大学, 2006.

[16] 姜鲁东, 余家祥, 李 源. 舰空导弹多次射击作战效能评估方法 [J]. 舰船电子工程, 2015 (8): 18-22.

[17] 谷亚辉, 程中华, 白旭华. 合成旅战时装备维修保障效能评估指标研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 258-261.

[18] 李小波, 林 木, 束 哲. 体系贡献率能效综合评估方法 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30 (12): 4520-4535.

[19] 罗小明, 朱延雷, 何 榕. 基于复杂适应系统的装备作战试验体系贡献度评估 [J]. 装甲兵工程学院报, 2015, 29 (2): 1-6.

[20] 腾克难. 舰空导弹反导作战效能综合评估方法探讨 [J]. 弹箭与制导学报, 2003 (2): 26-28.