

激光制导武器半实物仿真中激光能量模拟误差研究

赵宏鹏,甘霖,殷瑞光,郭豪,梁巍巍

(中国洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471003)

摘要: 激光制导武器半实物仿真中通过对激光能量精确控制,来逼真模拟战场环境下激光导引头接收到的激光能量。需要对激光能量模拟误差进行分析研究,以保证半实物仿真的可信度。重点分析了半实物仿真中激光信号传输的全过程,给出了激光信号传输各环节引起的能量控制不确定度;提出了激光能量密度模拟误差模型和误差分析方法,举例说明了该误差分析方法的具体应用,并设计实验验证了模型准确性。根据误差分析模型,可有效评估激光能量密度模拟误差,优化仿真想定设计,保证半实物仿真结果精度。

关键词: 半主动激光制导武器; 半实物仿真; 激光能量; 误差

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1006005

Study on laser energy simulating error in laser guided weapon hardware-in-the-loop simulation

Zhao Hongpeng, Gan Lin, Yin Ruiguang, Guo Hao, Liang Weiwei

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: In laser guided weapon hardware-in-the-loop simulation, laser energy is controlled accurately to simulate the laser energy in battlefield environment. In order to assure simulation reliability, simulating error should be analyzed. The laser signal transmitting process was analyzed, and the energy control uncertainty of every transmitting link was introduced. The laser energy simulating error model was developed and error analysis method was introduced by an example. The error model can be used to evaluate laser energy simulating error and to optimize simulation design, which can assure hardware-in-the-loop simulation result precision.

Key words: semi-active laser guided weapon; hardware-in-the-loop simulation; laser energy; error

收稿日期:2018-05-05; 修订日期:2018-06-03

作者简介:赵宏鹏(1981-),男,工程师,主要从事光电对抗仿真技术方面的研究。Email:shahn@126.com

0 引言

为保证激光制导武器半实物仿真的精度和可信度,按照仿真情况下和战场环境下激光导引头入瞳处的激光能量密度相一致的原则,需要保证半实物仿真中不同战情条件下导引头入瞳处的激光能量密度模拟精度^[1-2]。半实物仿真中激光信号经过激光器发射、能量动态衰减、二维转镜反射、激光漫反射屏散射等传输过程,传输过程的每个环节都可能对激光能量密度模拟精度产生影响^[3-5]。通过建立误差模型的方法,能够定量分析不同仿真条件下个误差因素对模拟精度的影响程度,从而采取针对性措施来降低激光能量模拟误差,提高仿真精度。此外,仿真前利用误差模型能够分析预测不同仿真条件下的激光能量模拟误差,可以优化仿真实定,避免误差较大情况的出现,保证仿真的有效性。

文中开展了激光能量模拟误差分析研究,针对半实物仿真激光信号传输过程中的各个环节,分析能够引起激光导引头入瞳处激光能量密度模拟误差的误差源,基于误差理论建立激光能量密度模拟误差模型,设计实验对误差模型准确性进行验证。误差分析方法及误差模型能够实现对半实物仿真中的激光能量密度模拟精度的评估。

1 影响激光能量模拟精度主要误差源分析

1.1 激光信号传输链路分析

激光制导武器半实物仿真系统各设备布局及仿真系统物理坐标系如图 1 所示。

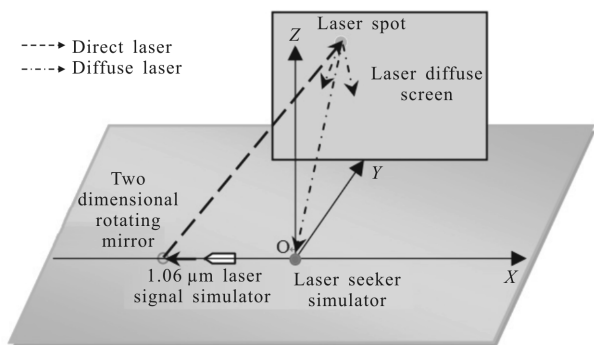


图 1 激光制导武器半实物仿真设备布局示意图

Fig.1 Equipment layout in the laser guided weapon hardware-in-the-loop simulation

仿真系统中,仿真转台回转中心、1.06 μm 激光信号模拟器的光轴、二维转镜回转中心在一条直线上,可称为设备线;激光导引头模拟器加装在仿真转台中心;激光漫反射屏垂直于地面、与设备线有一定距离并与其平行。

仿真系统物理坐标系定义如下:坐标原点 O 设在仿真转台的回转中心; OY 轴与仿真系统设备线在同一水平面内并且与设备线垂直,指向激光漫反射屏为正; OZ 轴与仿真系统设备线和水平面均垂直,向上为正; OX 轴按右手螺旋法则确定。

激光制导武器半实物仿真中,激光信号的传输过程如下:1.06 μm 激光信号模拟器输出激光,信号模拟器中的能量连续衰减装置按照仿真实定将激光信号能量精确动态衰减;输出激光照射至二维转镜;二维转镜按照仿真实定将激光反射到漫反射屏不同位置上;位于仿真转台中心的激光导引头模拟器接收经漫反射屏漫反射的激光^[6]。

激光导引头模拟器入瞳处接收到的能量密度可表示为:

$$E_r = \frac{E_0 \cdot \rho_G(\theta_G) \cdot \rho_m(\theta_m) \cdot \text{BRDF}(\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2; x, z) \cdot \tau}{\pi \cdot d^2} \quad (1)$$

式中: E_r 为仿真转台中心处漫反射激光能量密度; E_0 为 1.06 μm 激光信号模拟器出口处、连续衰减为 0 dB 时的激光能量; $\rho_G(\theta_G)$ 为激光能量连续衰减装置衰减率; θ_G 为连续衰减器的旋转角度; $\rho_m(\theta_m)$ 为二维转镜反射率,其中 θ_m 为入射角; $\text{BRDF}(\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2; x, z)$ 为漫反射屏双向反射分布函数,其中: (x, z) 为激光漫反射屏上激光照射光斑位置坐标; (θ_1, φ_1) 表示激光入射方向; (θ_2, φ_2) 表示激光散射方向; τ 为实验室内激光传输路径上的大气透过率; d 为激光导引头模拟器激光能量探测器光敏面(仿真转台中心处)与漫反射屏上光斑中心距离。

实际上要获得整个激光漫反射屏的 BRDF 特性难度很大,因此工程应用时需要精确模型进行简化。工程实践时假设激光漫反射屏表面为朗伯体,各处的半球反射系数相同,为 ρ_s ,则公式(1)可以简化为:

$$E_r = \frac{E_0 \cdot \rho_G(\theta_G) \cdot \rho_m(\theta_m) \cdot \rho_s \cdot \cos\theta_s \cdot \tau}{\pi \cdot d^2} \quad (2)$$

式中: ρ_s 为激光漫反射屏半球反射率; θ_s 为激光导引头模拟器入瞳处与光斑中心连线和漫反射屏法线的夹角。

按照简化模型, 激光导引头模拟器接收到的激光能量密度与 E_0 、 $\rho_G(\theta_G)$ 、 $\rho_m(\theta_m)$ 、 ρ_s 、 θ_s 、 τ 、 d 等因素有关系。公式(2)中,除了 $\cos\theta_s$ 、 d 可以直接由光斑位置 (x, y, z) 实时计算出来之外,其他参数均需要标定或测量,标定或测量的时机分别为: E_0 为在试验前现场标定; $\rho_G(\theta_G)$ 为激光能量连续衰减装置需要定期检测,并根据检测结果决定是否重新标定; $\rho_m(\theta_m)$ 为两维转镜的镀膜,是 Au 膜,其反射率在安装之前已经标定; ρ_s 为激光漫反射屏的漫反射率,通过测量屏上不同位置的激光漫反射率后取平均值获得,需要定期标定和检测。引起激光能量密度模拟误差的主要误差源与上述因素都有关。

从误差类别来说,主要包括激光源的能量稳定性,以及测试标定的方法、设备引入的不确定度。

1.2 1.06 μm 激光信号模拟器出口激光能量稳定度

在正式仿真前的仿真准备阶段要准确测量标定激光源出口能量,并将其作为仿真控制的输入。

激光源能量稳定性是指在给定工作条件下,激光源脉冲输出能量在一定时间间隔内随时间波动的程度,在每次试验有效激光发射开始至发射停止约几十秒钟的时间内度量,包含激光源脉冲能量随机起伏、激光源输出能量趋势变化和固定衰减片引起的激光源出口能量趋势变化。

(1) 激光源脉冲能量随机起伏

激光源脉冲能量随机起伏是指一次激光发射过程中,由于泵浦光的稳定性、放大增益、腔内损耗等因素存在随机变化,导致一次激光发射过程中输出的单脉冲能量有起伏,可用激光脉冲能量离散度来衡量。激光器做好之后,放大增益、腔内损耗等因素已经固定不变,可以通过提高泵浦灯放电电容上的电压来提高泵浦光的稳定性,从而进一步提高能量稳定性。

为考察本振电压对激光脉冲能量离散度的影响,进行了实验测量。实验结果表明激光器出口激光脉冲能量有以下几个规律:1) 随着本振电压的增加,出口激光能量平均值基本呈线性增加;2) 随着本振电压的增加,激光脉冲能量离散度逐渐改善;3) 在每次激光器出光过程中,前 3 s 的激光脉冲能量波动较大,3 s 后激光脉冲能量趋于稳定,产生这个现象的原因是激光器出光过程中光腔内需要约 3 s 的时间逐渐建立热平衡。

在仿真应用过程中,可采取以下措施来减小激光脉冲能量随机起伏的影响:1) 试验时首先控制激光器泵浦 3 s,3 s 后仿真系统其他设备再同时运行;2) 综合考虑激光器使用寿命及试验对激光能量控制精度的需求,适当增加本振电压以提高激光能量稳定度。

(2) 激光源多次出光输出能量趋势变化

激光源多次出光输出能量趋势变化是在连续开展的一组试验时,激光器在每次出光过程中逐渐在光腔内建立热平衡,又由于冷却系统工作的延迟性及晶体棒的热累积效应,导致激光每次出光的能量既有一定规律性又有一定随机性。

图 2 是在相同激光器设置、相同测量设备和测量布局、相同数据处理方法下得到的 1.06 μm 激光信号模拟器出光 391 次的能量平均值趋势变化。

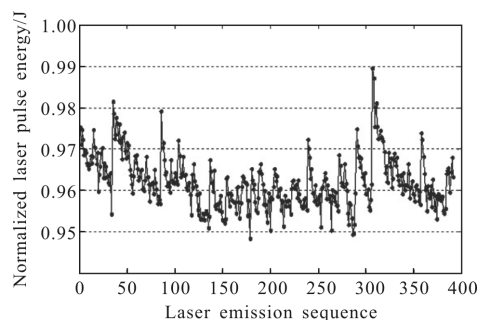


图 2 激光源输出平均能量趋势变化图

Fig.2 Laser source output average energy change in trend

经统计计算,该组测量值相对标准差为 0.70%,其中最大值与最小值之间相差 4.60%。当取上述实验中激光器第 11~20 次出光能量平均值与所有 391 次出光能量平均值比较相差约 0.66%,可以说相差不大。

(3) 由固定衰减片引起的单次出光出口能量趋势变化

激光源的能量通常比较大,仿真时需要吸收式固定衰减片将原始激光能量衰减到合适大小。吸收式固定衰减片在衰减激光能量的过程中不断吸收激光能量,引起衰减片的温度上升,从而导致了衰减片衰减倍率逐渐增大,从出口能量趋势变化来看,表现为出口能量逐渐下降。

图 3 为加 25 dB 固定衰减片的激光出口能量趋势变化,可以明显看出能量逐渐变小。整个出光

27 s 平均激光能量下降 3.70%, 约以 0.14%/s 的速度下降。以此速度, 若某次对激光制导武器半实物仿真中, 激光信号模拟器出光 20 s, 则激光出口能量下降 2.80%。

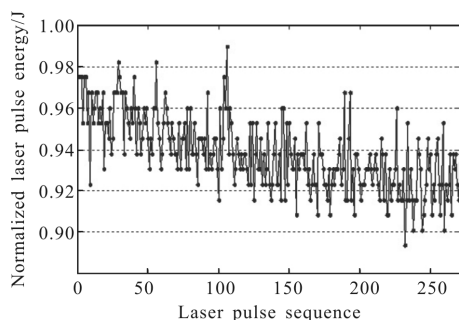


图 3 固定衰减片引起的激光源单次出光出口能量趋势变化图

Fig.3 Laser source output energy change in trend caused by attenuator in single laser emission

由固定衰减片引起的激光能量下降具有规律性, 属于系统误差, 可通过修正激光能量衰减模型来抵消由固定衰减片引起的能量变化。

1.3 测量及标定不确定度

在开展半实物仿真之前, 需要对激光能量连续衰减装置、激光漫反射屏进行标定, 需要对激光器出口能量进行测量。对激光器能量测量不确定度、各设备的标定不确定度等, 都是影响激光能量密度控制精度的主要因素^[7]。

(1) 零档出口激光能量测量不确定度分析

零档出口激光能量指每次试验前标定的、动态能量衰减器 0 dB 衰减档位及加装固定衰减片后设备输出激光能量, 零档出口激光能量标定误差是指标定测量平均值与正式试验时实际的零档出口激光能量一次差。

零档出口激光能量标定误差需要考虑校准激光能量测量设备的修正因子的测量不确定度, 以及有限测量次数带来的不确定度。

(2) 激光能量连续衰减装置动态能量衰减误差分析

由于 1.06 μm 激光信号模拟器具有良好的偏振特性, 并考虑到衰减稳定性、动态范围、损伤阈值等因素, 可采用格兰棱镜器件的偏振式衰减方式。偏振式激光能量衰减装置的组成和原理图如图 4 所示。

图中, E_1 为通过偏振片后的激光能量, E_2 为通

过第一个格兰棱镜后的激光能量, E_3 为通过第二个格兰棱镜的激光能量。通过电机精确地控制第一个格兰棱镜的角度, 就能实现对输出能量衰减的连续衰减, 激光经过起偏器和检偏器的两次衰减, 达到所需能量大小。

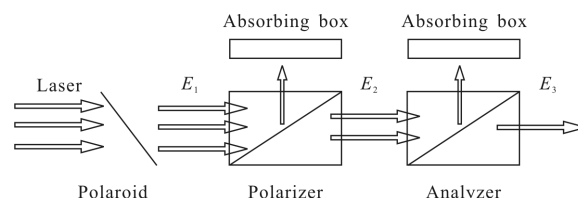


图 4 激光能量连续衰减装置组成和原理图

Fig.4 Components and principle diagram of laser energy continuous attenuation device

透射激光满足马吕斯定律, 可知:

$$E_2 = E_1 \cos^2 \theta \quad (3)$$

$$E_3 = E_2 \cos^2 \theta \quad (4)$$

所以

$$E_3 = E_1 \cos^4 \theta \quad (5)$$

因此衰减机构的衰减倍率为:

$$d = \frac{E_1}{E_3} = \frac{E_1}{E_1 \cos^4 \theta} = \frac{1}{\cos^4 \theta} \quad (6)$$

起偏器的旋转角度 θ 与衰减倍率 d 的关系为:

$$\theta = \arccos 10^{-\frac{d}{40}} \quad (7)$$

实际透射激光能量由于偏振片、格兰棱镜之间光轴不一致、零位对不准等各种因素的影响, 会在一定程度上偏离马吕斯定律, 因此实际的转动角度与衰减倍率的关系曲线必须标定。衰减曲线标定的原则是采用分光方法, 减少激光器自身能量抖动对标定精度的影响。起偏器按照一定步长的码值或者衰减倍率对应的大概角度转动, 把某一角度(码值)下测得的分束比与衰减最小时的分束比相比较, 即得到该角度下的衰减倍率。把各个衰减倍率对应的角度进行曲线拟合, 拟合出一条电机执行曲线^[8]。

在标定过程中, 引入的不确定度主要包括标定过程中衰减后激光能量探测器非线性度、衰减曲线拟合残差。

除标定误差外, 还包括衰减倍率动态控制误差, 指的是同一仿真时间下衰减倍率状态值(执行结果)与衰减倍率控制值的一次差。动态误差的产生主要

由于转台的速度或加速度过大引起。对激光能量动态衰减误差建模分析通常采用建立对其伺服控制系统误差传递函数的方法。

(3) 两维转镜反射率标定

两维转镜采用 Au 膜镀膜,性能比较稳定,标定发现入射激光与镜面的夹角越大,其对激光的反射率 $\rho_m(\theta_m)$ 越低,这种现象被称为 Brewster 定律。在仿真计算时采用两维转镜角度-反射率标定曲线。标定误差主要来自激光能量测量设备的不确定度,属于未定系统误差。

从下文阐述的激光漫反射屏漫反射率标定方法可知,由于转镜反射率作为一个参数参与漫反射屏标定,反射率的绝对值大小并不重要,只要不同角度下反射率的相对值是准的就可以。通常激光能量测量设备在较小范围内的线性度较好,因此不同角度下反射率相对值可以认为是准确的。

(4) 激光漫反射屏漫反射率标定残差分析

漫反射率的标定方法有双光路积分球方法^[9]、基于漫反射率模型的测量计算方法等,根据系统特点及标定条件,文中采用第二种方法。

由公式(2)可以得到激光漫反射屏漫反射率模型为:

$$\rho_s = \frac{E_r \cdot \pi \cdot d^2}{E_0 \cdot \rho_G(\theta_G) \cdot \rho_m(\theta_m) \cdot \cos \theta_s} \quad (8)$$

如前所述,采用简化模型的前提是激光漫反射屏喷涂比较均匀。

根据激光漫反射模型,选取激光漫反射屏上多个典型位置,测量并计算这些位置激光漫反射率的平均值。可选屏上中心及 4 个角等 5 个典型位置,屏上坐标分别为 $(x_i, z_i) (i=1 \sim 5)$,需要标定的参数为 $\rho(x_i, z_i)$ 。将激光光斑分别照射至 (x_i, z_i) 位置,用分光的方法监测激光信号模拟器出口处激光能量 $E_0 \cdot \rho_G(\theta_G)$;高灵敏度激光能量探头瞄准屏上光斑,测量仿真转台回转中心处漫反射激光能量密度 E_r (该测量过程包含了路径上两维转镜反射率 $\rho_m(\theta_m)$ 的影响); $\cos(\theta_s)$ 和 d 可由理论计算得出。将上述各值代入公式(8),得到 (x_i, z_i) 位置处的 ρ_s 。

在漫反射屏标定过程中,造成标定残差的因素主要包括测量设备的测量不确定度、分光镜分光比测量误差、有限样本数的不确定度、光斑大小引起的不确定度^[10]等。

2 激光能量密度模拟误差分析基本方法

激光能量密度模拟误差是指在同一仿真时间下,激光能量密度的状态值(系统执行结果)与该参数的控制值(亦可称为需求值、引导值)的一次差。

在前文已经分析了,在实现该参数的过程中,涉及激光信号产生设备的稳定性、标定误差等,误差类型包括已知的系统误差(可以修正消除)、未定系统误差、随机误差,这些因素共同作用,形成激光能量密度模拟的总误差。

由各分项误差/不确定度合成得到系统总的模拟误差,与误差理论中的误差合成,有着相同的数据处理方法。误差合成通常采用方和根法(Square root of the sum of square method),即由各单项误差的平方和的开方求得总误差^[11]。

当测量过程中存在各种不同性质的多项系统误差与随机误差,应将其进行综合,实现系统误差与随机误差的合成,以求得最后测量结果的总误差,并用极限误差来表示,有时也用标准差来表示。

按标准差合成的方法为:若测量过程中有 s 个单项未定系统误差, q 个单项随机误差,它们的标准差分别为:

$$\begin{aligned} &u_1, u_2, \dots, u_s \\ &\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q \end{aligned} \quad (9)$$

为计算方便,设各个误差传递系数均为 1,则测量结果总的标准差为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^s u_i^2 + \sum_{i=1}^q \sigma_i^2 + R} \quad (10)$$

式中: R 为各个误差间协方差之和。

当各个误差间互不相关时,则上式可简化为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^s u_i^2 + \sum_{i=1}^q \sigma_i^2} \quad (11)$$

3 半实物仿真激光能量密度模拟误差分析

3.1 误差分析基本模型

根据以上分析,影响激光能量密度模拟精度的主要误差源及其性质、估值如表 1 所示。

以上各个误差互相之间并不相关,因此按照方和根法误差分析方法,激光制导武器半实物仿真中激光能量密度模拟误差模型为:

表 1 影响激光能量密度模拟精度的主要误差源

Tab.1 Main error sources which influence simulating precision of laser energy density

Primary error	Two stage error	Three stage error	Error attribute	Standard deviation
Laser source energy stability	1.06 μm laser signal simulator energy stability	Laser source pulse energy random fluctuation (U_1)	Random error	2%
		Laser source output average energy change in trend (U_2)	Random error	0.66%
	Measurement uncertainty of 1.06 μm laser signal simulator output energy when attenuation is zero	Measurement uncertainty of laser energy measuring device (U_3)	Uncertain systematic error	5% ($k=2$)
		Uncertainty caused by finite sample number (U_4)	Random error	1%
Measurement uncertainty and calibration error	Calibration error of laser energy dynamic attenuation device	Nonlinearity of laser energy detector (U_5)	Uncertain systematic error	1.7%
		Attenuation curve fitting residuals (U_6)	Random error	0.6%
		Dynamic attenuation control error (U_{dyn})	Uncertain systematic error	Dynamic error function
	Calibration error of laser diffuse screen's diffuse reflectance	Measurement uncertainty of laser energy measuring device (U_7)	Uncertain systematic error	5% ($k=2$)
		Measurement error of spectroscope splitting ratio (U_8)	Random error	2%
		Uncertainty caused by finite sample number (U_9)	Random error	3%
		Uncertainty caused by laser spot size (U_{spot})	Uncertain systematic error	Error function

$$U_{LES} = \sqrt{\sum_{i=1}^9 U_i^2 + U_{dyn}^2 + U_{spot}^2} \quad (12)$$

3.2 误差模型验证

以典型想定为例开展激光能量密度模拟误差模型验证实验。按照想定,激光能量连续衰减倍率 ρ 从 40 dB 衰减到 20 dB,动态衰减速度 v_ρ 为 -1 dB/s;光斑大小从 5 mm 线性连续变化到 50 mm。使用美国相干公司 J3s-10 高灵敏度激光能量探测器测量激光能量密度。模型预测误差范围与激光能量密度实测误差曲线比较如图 5 所示,其中横坐标是仿真时间,纵坐标是误差大小,即误差量占总能量的比例。

由图 5 可以看到:(1) 模型预测的误差包络能够包含误差曲线,表明误差模型是基本准确的;(2) 在实验的约前 4.5 s 光斑直径小于 15 mm,激光能量密度抖动强烈,随光斑直径变大而抖动减弱,与模型预测一致;(3) 在实验的最后 3 s,衰减倍率变小过程中,误差变化偏离之前较为平缓的曲线,而模型同样预测误差有缓慢变大的趋势,实测与模型吻合

较好;(4) 在大部分情况下,能量密度模拟误差小于 10%,满足半实物仿真的要求。

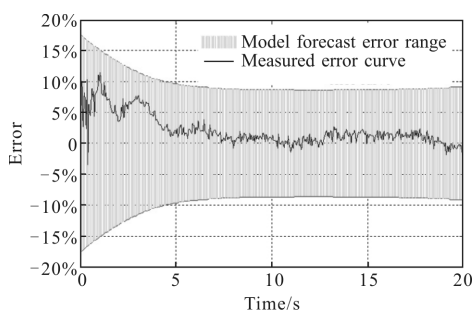


图 5 激光能量密度误差模型预测误差范围与实测误差曲线比较

Fig.5 Laser energy density error model forecast error range vs measured error curve

4 结束语

文中参照误差理论中的误差合成方法,提出了充分考虑激光信号产生设备动态激光能量误差、系统能量域标定残差等多种因素的方和根法精度分析

方法,建立漫反射方式激光能量密度模拟误差模型,实现各种动态过程情况下的激光能量密度模拟精度分析。

文中全面考虑影响激光能量密度模拟精度的误差源,误差分析方法具有普适性,可指导其他半实物仿真中的信号控制精度误差分析;误差模型可以用于激光能量密度模拟精度估计,实现半实物仿真中不同战情条件下的激光能量密度误差曲线,支持误差规律分析,优化战情设计,避免误差较大情况的出现;还可以根据误差源和误差分析过程,研究多参数合并标定等方法,进一步提出提高模拟精度的方法。

参考文献:

- [1] Wang Yunping, Zhao Changming, Li Yan, et al. Hardware-in-the-loop simulation system for laser-angle-deception jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1217-1222. (in Chinese)
王云萍, 赵长明, 李岩, 等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1217-1222.
- [2] Deng Fanglin, Liu Zhiguo, Wang Shicheng. Design and development of the hardware-in-the-loop simulation system for laser seeker [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(2): 255-257. (in Chinese)
邓方林, 刘志国, 王仕成. 激光导引半实物仿真系统的设计与研制[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 255-257.
- [3] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng, et al. Analysis of laser energy chain in the hardware-in-the-loop simulation system of semi-active laser guide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1230-1233. (in Chinese)
王江, 林蔚, 王鹏, 等. 激光半主动制导武器半实物仿真系统能量链研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1230-1233.
- [4] Zhang Jinsheng, Wang Shicheng, Xu Ping, et al. Design of a simulation system for laser guided weapons [J]. *Electronics Optics & Control*, 2005, 12(2): 55-59. (in Chinese)
张金生, 王仕成, 徐萍, 等. 激光制导武器仿真系统设计与研制[J]. 电光与控制, 2005, 12(2): 55-59.
- [5] Shen Yongfu, Deng Fanglin, Ke Xizheng. Scheme design of semi-physical simulation system for a laser-guided bomb seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(2): 166-169. (in Chinese)
沈永福, 邓方林, 柯熙政. 激光制导炸弹导引头半实物仿真系统方案设计[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 166-169.
- [6] Wang Shicheng, Zhang Jinsheng, Gao Zhijie, et al. Precise laser attenuating model in the lab on laser-guided weapon simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(2): 238-241. (in Chinese)
王仕成, 张金生, 高智杰, 等. 激光制导武器仿真实验室环境中的精确激光衰减模型[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 238-241.
- [7] Lu Changjie, Pan Quan. Research on accurate control of energy in calibration system of threshold value of laser seeker [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(2): 892-896. (in Chinese)
陆长捷, 潘泉. 激光导引头阈值标定系统能量精确控制研究[J]. 火箭与制导学报, 2006, 26(2): 892-896.
- [8] Zhao Hongpeng, Liu Yanfang, Liang Weiwei, et al. Design of a high-precision continuous dynamic laser energy attenuation device and the measure to calibrate the precision of the device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 143-148. (in Chinese)
赵宏鹏, 刘艳芳, 梁巍巍, 等. 高精度连续动态激光能量衰减装置设计及其标定方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 143-148.
- [9] Zhang Jinsheng, Wang Shicheng, Xu Ping, et al. Development and demarcating of diffuse reflector of laser guided weapon simulation system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(4): 421-424. (in Chinese)
张金生, 王仕成, 徐萍, 等. 激光制导武器仿真系统漫反射屏研制及标定[J]. 光电子·激光, 2005, 16(4): 421-424.
- [10] Wang Shicheng, Liu Yuan, Liu Zhiguo, et al. Hardware-in-the-loop simulation technology for size of laser facular of laser guided weapon [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(9): 1-5. (in Chinese)
王仕成, 刘源, 刘志国, 等. 激光制导武器目标光斑大小半实物仿真研究[J]. 光电工程, 2009, 36(9): 1-5.
- [11] Fei Yetai. Error Theory and Data Processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 87-90. (in Chinese)
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 87-90.