

文章编号: 1001-3806(2012)06-0844-05

激光制导武器能量仿真系统设计

王伟峰, 刘志国, 王仕成*, 刘源, 臧永强

(第二炮兵工程大学 精确制导与仿真实验室, 西安 710025)

摘要: 为了实现对激光制导武器半实物仿真系统中能量的精确控制, 采用理论分析和工程实践相结合的方法, 设计了能量仿真系统, 对能量衰减模型及系统设计方案进行了研究, 对其中激光生成子系统和能量衰减子系统进行了优化设计, 并利用 E1000 激光能量计对设计的系统进行了标定。结果表明, 该系统在不同频率下生成的能量稳定在 40mJ 左右, 可变衰减比范围优于 47dB。该系统的实时性和精度均满足半实物仿真中激光能量模拟的要求, 且稳定可靠。

关键词: 激光技术; 能量仿真; 系统标定; 衰减器

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.033

Design of energy simulation system for laser guided weapons

WANG Wei-feng, LIU Zhi-guo, WANG Shi-cheng, LIU Yuan, ZANG Yong-qiang

(Accuracy Guidance and Control Laboratory, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to control the energy precisely in the hardware-in-the-loop for laser-guided weapons, an energy control system was designed. Combining theoretical analysis and engineering practice, the energy attenuation model and design of the laser were discussed, focusing on laser energy generation subsystem and attenuation subsystem. Finally, this system was calibrated with an E1000 laser energy detector. Experimental results show the energy generated by the laser system kept 40mJ at different frequencies, and the range of variable attenuation was greater than 47dB. The system meets the need of energy simulation of laser guided weapons in the character of real time and precision.

Key words: laser technique; energy simulation; system demarcating; attenuators

引言

激光制导武器是当今武器家族中重要成员,早在越南战争期间就已经崭露头角,它以精度高、结构简单、成本低、抗干扰性强的优点,引起了各国军方的高度重视。在随后的马岛、海湾、科索沃、阿富汗、乃至伊拉克战争中发挥着显著的作用。随着武器技术的发展,通过外场打靶获得实验数据的难度也随之增加,同时耗资巨大,因此在实验室环境下,采用半实物仿真的手段来进行研究、实验,显示出了强大生命力^[1]。

目前在激光制导武器半实物仿真方面,采用的方法主要有两种:直写投射法和投影漫反射法。相对而言,后者实现简单、使用频率高。根据仿真相似性原理,在实验条件下真实再现战场环境中激光目标光学特性,主要是对目标光斑大小、能量和相对位置进行仿真^[2],因此不论采用哪种方法对激光目标仿真都要求精度高、实时性好。本文中以某型激光制导武器为背

景,通过投影漫反射法,进行能量仿真方面的研究。

实际飞行中,在弹目距离较远时,能量将影响武器激光导引头探测概率,在中距离时,接收信噪比将影响解算及跟踪精度,在近距离时,由于武器飞行速度快,能量密度变化率大^[3],因此,在实验室中对激光能量进行精确控制显得尤为重要。能量精确控制一直是半实物仿真研究的重点,也是制约其发展的关键技术。

1 能量衰减模型

激光制导武器导引头探测器接收到的激光能量主要来自目标反射的能量。为了在实验室条件下对真实环境中导引头入瞳处的能量密度进行仿真,必须首先研究激光能量在传播过程中的衰减问题^[4]。激光传输过程非常复杂,影响因素也很多。图1为激光能量衰减示意图。

图中符号含义如下:在真实环境中:1是照射机激光输出能量;2、4是大气传输衰减;3是目标反射衰减;5是导引头接收能量。在仿真环境中:1是目标模拟器输出激光能量;2、4、6是大气传输衰减;3是镜面反射衰减;5是屏幕漫反射衰减;7是导引头接收能量。

为了实现仿真条件下和真实环境下导引头入瞳处

作者简介:王伟峰(1987-),男,硕士研究生,现主要从事导航、制导与控制方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wshicheng@vip.163.com

收稿日期:2012-04-28;收到修改稿日期:2012-06-13

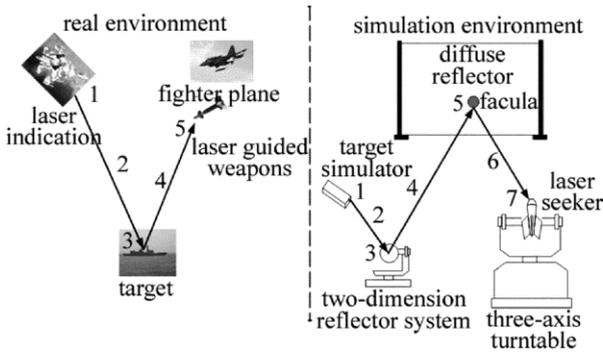


Fig. 1 Schematic diagram of laser energy attenuation

能量相一致的目标, 必须通过单因素分析法逐一进行研究, 最终得出仿真条件下能量密度的数学计算模型, 由于该过程计算推导复杂, 在此不作为重点进行详细推导, 直接给出结果。

对于符合朗伯特特性的大目标, 导弹在实际飞行时导引头入瞳处的激光能量密度可用下式计算^[5]:

$$\varepsilon = \frac{E\rho\tau_a(l)\tau_a(r)\cos\theta_1\cos\theta_2}{\pi r^2} \quad (1)$$

式中 ε 为导引头入瞳处的能量密度; E 为照射激光器的系统输出能量; ρ 为目标反射率; l 为照射激光器至目标间的距离; r 为目标至航弹导引头间的距离; $\tau_a(l)$ 为照射光路大气透过率; $\tau_a(r)$ 为接收光路大气透过率; θ_1 为激光照射方向与目标反射平面法向的夹角; θ_2 为导引头接收方向与目标反射平面法向的夹角。

在本仿真系统中, 导引头入瞳处的激光能量密度的计算公式为:

$$\varepsilon_m = \frac{E_m\rho_m\tau_a(l_m)\tau_a(r_m)\cos\theta_f\cos\theta_r}{\pi r_m^2} K \quad (2)$$

式中 ε_m 为仿真系统导引头入瞳处的能量密度; E_m 为激光目标模拟器系统的输出能量; ρ_m 为漫反射屏反射率; l_m 为激光目标模拟器至漫反射屏上模拟目标的距离; r_m 为漫反射屏上模拟目标至仿真系统导引头间的距离; $\tau_a(l_m)$ 为照射光路大气透过率; $\tau_a(r_m)$ 为接收光路大气透过率; θ_f 为激光照射方向与目标反射平面法向的夹角; θ_r 为导引头接收方向与目标反射平面法向的夹角; K 为能量衰减比。

在实验室条件下, 激光器与漫反射屏及导引头与漫反射屏之间的距离很近, 一般在 10m 左右, 大气传输衰减几乎为 0, 故 $\tau_a(l_m) \approx 1$, $\tau_a(r_m) \approx 1$, 于是有:

$$\varepsilon_m = \frac{E_m\rho_m\cos\theta_f\cos\theta_r}{\pi r_m^2} K \quad (3)$$

由(1)式和(3)式可确定出 K 的变化规律。

2 能量控制系统设计

为了在仿真系统中准确模拟导引头入瞳处能量密度的实际变化情况, 需要做的核心工作有两项: 一是设

计符合要求, 输出稳定的激光生成系统; 二是设计精度高, 实时性强的衰减系统^[6]。

2.1 编码调 Q 激光生成系统

编码激光器生成系统用于生成一定波长的激光, 且要求其对激光的控制具有良好的稳定性。根据现有激光寻的制导武器所使用的波长, 针对某型激光制导武器仿真需求, 本系统中选用了 1.064 μm 波长的调 Q 激光器^[7], 其工作介质选择 Nd:YAG 固体激光器, 抽运方式选择闪光灯抽运, 调 Q 方式采用升压式电光调 Q。同时, 考虑仿真系统的实际能量需求较小, 为便于调试激光器, 并有利于激光输出稳定和光斑均匀, 输出脉冲能量定为 30mJ ~ 60mJ。图 2 为编码调 Q 激光生成系统结构示意图。

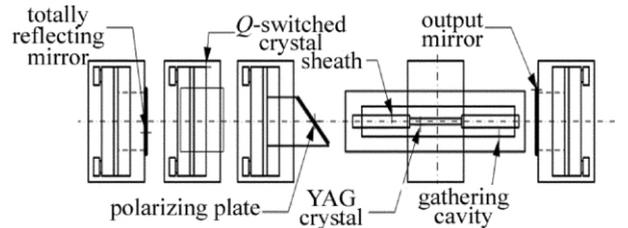


Fig. 2 Structure diagram of Q-switched laser-generated coding system

2.2 能量衰减系统的设计

由(1)式估算与实际飞行数据相结合可知, 为了模拟导引头入瞳处的能量密度, 能量密度变化应在 10000 倍(40dB)。

该系统采用的方案是固定衰减子系统加可变衰减子系统, 即将(3)式中 K 改写为 $K_1 \times K_2$, 其中 K_1 表示固定衰减比, K_2 表示可变衰减比。

设计了 1 组可根据需求灵活组配的 10 种不同规格的固定衰减片, 能够使导引头入瞳处的激光能量密度预先控制在一个合适的范围内。

根据实际飞行过程中, 导引头入瞳处能量变比, 在激光目标模拟器能量控制方面设计了一个 3dB ~ 40dB 连续可调的可变衰减器系统。

2.2.1 固定衰减子系统的设计 固定衰减子系统由 1 组固定衰减片组成, 衰减片的衰减量及块数分别为: 3dB(2片), 5dB(2片), 10dB(2片), 15dB(2片), 20dB(2片), 见图 3。衰减片成品经过标定, 已将具体的衰减

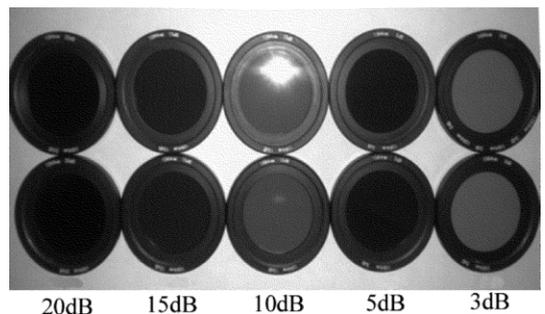


Fig. 3 Photo of fixed attenuators

比标记在衰减片框架上,固定衰减片采用旋转方式安装在激光出瞳处,可以根据需要灵活增减,见图4。

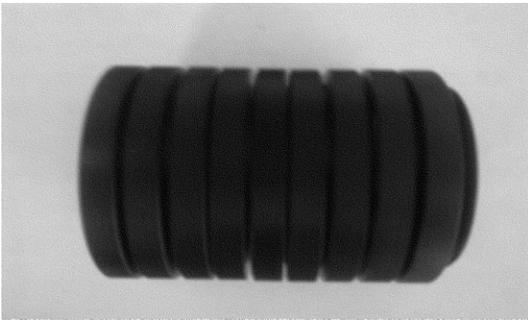


Fig. 4 Installation of fixed attenuators

2.2.2 可变衰减系统的设计 激光衰减可以通过多种方式得到,常用方法有:(1)对激光抽运能量进行控制。这种方法需要通过不断改变抽运能量来实现,然而调节能量的方式会严重影响激光输出的稳定性和激光输出脉宽,不能正确编码,因此,性能指标要求较高的仿真实验,一般不采用该方法;(2)采用固定衰减片调节器。该方式为在一个圆盘上根据需要设定1-n个衰减片,转动调节盘可得到不同的衰减,同时配合其它方式的衰减(如调节抽运电流等),可实现连续可调激光衰减,但是该调节器在衰减过程中容易产生突变,控制精度不高;(3)偏振型连续激光衰减器。光的偏振特性为连续可变激光衰减提供了可行的手段,目前关于激光偏振棱镜的设计有多种形式,常见的有格兰型和尼科耳型。尼科耳型设计是人们最早使用的一种,但由于结构本身的缺陷给使用带来很多不便,已经逐渐被格兰型设计所代替。

在格兰型棱镜中以格兰-付科棱镜和格兰-泰勒棱镜为主要代表。本系统经过大量试验,选用格兰-付科棱镜实现激光能量的连续衰减控制。图5所示为实验测试得到的衰减曲线。

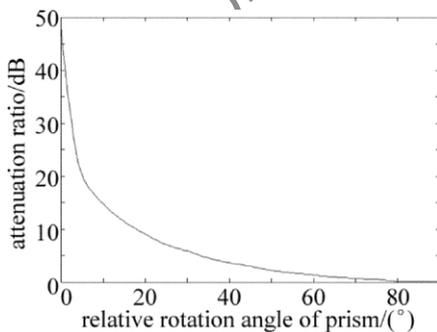


Fig. 5 Experimental curve of transmission light intensity of Grand-Fuke prism

实验结果表明,本系统中经过严格筛选的1组格兰-付科棱镜构成的起偏-检偏系统在相对旋转90°的过程中,可以得到50dB左右的能量衰减,对于激光制导目标仿真过程已能够满足要求,在需要更大衰减比的场合,可以采用两级或多级格兰-付科棱镜

来实现。

可变衰减系统采用了1组格兰-付科棱镜,在理想状态(不考虑应力双折射),只允许单一的线偏振光通过。其原理结构如图6所示。

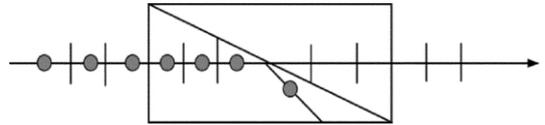


Fig. 6 Theory of Grand-Fuke prism deflection

选择这样的1对棱镜,通过的光强由马吕斯定律给出:

I = I_0 cos^2 beta (4)

式中 I_0 为入射光强 beta 为两棱镜通光电矢量之间偏振面夹角,透过率计算公式为:

T = I/I_0 = cos^2 beta (5)

图7为可变衰减子系统具体原理。图8为可变衰减子系统实物图。

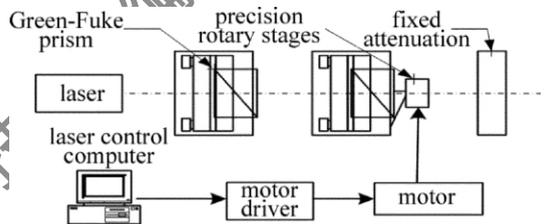


Fig. 7 Principles of variable attenuation subsystem

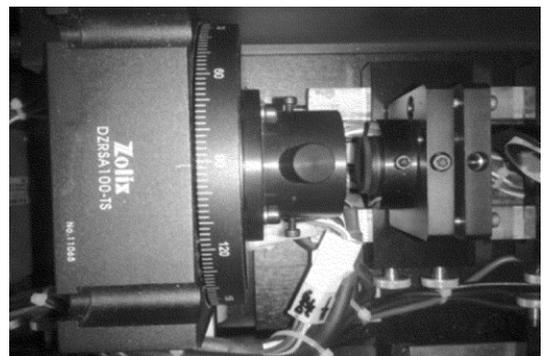


Fig. 8 Photo of variable attenuation subsystem

3 系统标定

根据中国计量科学院的规定,在系统设计完成后,只有在标定合格的前提下(即各项技术指标符合设计要求)方能投入使用,故为了检验所设计的能量精确控制系统的各项指标,必须首先对其进行标定。

3.1 使用仪器及环境

标定仪器选用中国计量科学院研制的E1000激光参量测量仪,配合相应的探测头,在环境温度满足20°C ± 5°C、湿度不大于80%(20°C时)的条件下即可对1064μm的激光进行能量测量,范围在0.2μJ ~ 200mJ之间。

3.2 标定方法

图 9 为能量标定示意图。在未添加任何固定衰减的情况下,将可变衰减器中的格兰-付科棱镜调至相对平行的位置,而后将激光探测头放置于激光出瞳口正前方 1m 处;设置测量仪参量,选择合适波长、测量内容及量程;运行激光器,使能量稳定输出;实时采样,并记录数据。

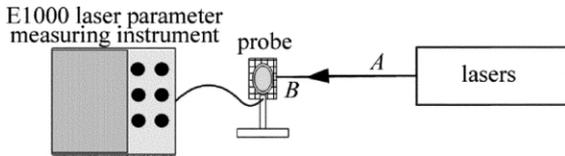


Fig. 9 Schematic diagram of laser energy demarcating

在上所述方法基础上,通过转动伺服电机,实时调整棱镜相对转动角度,进而改变可变衰减比,而后测量激光器出瞳处能量值,并记录。

3.3 标定数据及结论

通过对不同频率下激光器输出能量的检测(见表 1)可以发现,所设计的激光器,输出能量稳定在 40mJ 左右,变比可达到 47dB,优于提出的技术指标,故可以认为该能量精确控制系统标定合格,完全可以用于实验仿真。

Table 1 Dynamic maximum attenuation of laser
laser power voltage 520V

working frequency /Hz	average output energy of prism parallel state/mJ	average output energy of prism vertical state/ μ J	variable attenuation ratio/dB
1	39.95	0.797	47.0006
10	43.72	0.752	47.6446
20	43.51	0.743	47.6760
30	44.38	0.743	47.7620

4 控制实时性设计

激光衰减的控制实时性是仿真系统的一个关键。由实弹打靶经验可知,在飞行末段,导引头接收到的激光能量随着时间的增加,变化很大。以往采用的步进电机在对能量进行控制时,实时性较差,为仿真结果带来了较大的误差。本系统在设计时既充分考虑光斑大小和能量的实时跟踪范围,又考虑到工程上实现的可能性,采用数控系统控制模式来实现,整个控制系统硬件由 PC 机、DMC5400 多轴控制器、DMC5400 接线板 TB-68、增量式编码器以及全数字式交流伺服系统(包括电机和驱动器)等组成^[8-9]。使得能量和光斑变化在弹目距离大于 300m 时能完全满足实时性控制要求。而在剩余时间内,由电机做全速运动来近似逼近末段的陡峭变化。该系统硬件组成如图 10 所示。

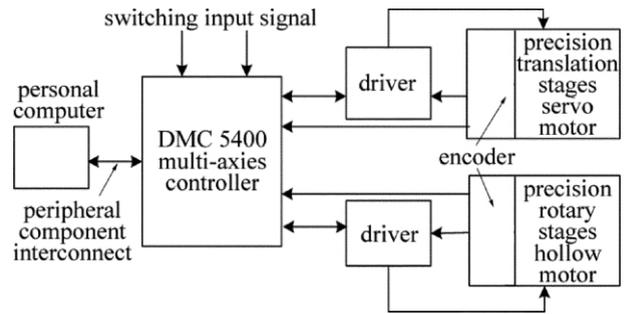


Fig. 10 Structure of control system hardware

5 仿真实验

根据大气传输理论,(1)式中 τ_a 可用以下经验式来表示:

$$\tau_a = [1 - \text{erf}(0.0617 \sqrt{W})] \times \exp\left[-\frac{3.91}{V_m} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^b L\right] \quad (6)$$

式中, W 表示水蒸气含量, V_m 表示气象能见度, λ 表示激光波长, b 表示经验常数, L 表示激光传输距离。

假设气象能见度为 12km,采用机照方式,目标固定不动,激光目标照射器距目标 5km,发射能量为 0.15J,目标反射率为 0.3,激光制导炸弹投放高度为 1.5km,目标点与炸弹投放点在地面的投影距离为 4km,投放时水平初速率为 232m/s,四象限探测器半径为 4cm,且不考虑风速的影响下,进行仿真试验。由于在半实物仿真过程中,导引头入瞳处能量很小,不能直接通过测试的方法获得。因此,在仿真前通过精确标定伺服电机脉冲数与衰减倍数关系,获得脉冲数与导引头敏感能量间的关系。半实物仿真试验时,通过伺服电机实际运行的脉冲数获得的 1 组光斑能量的数据典型曲线如图 11 所示。

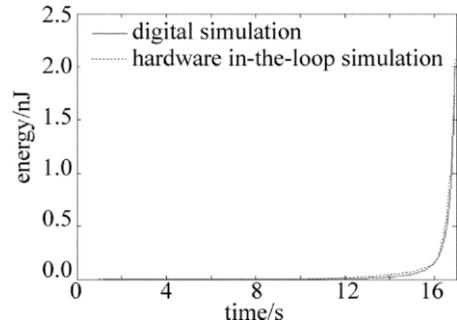


Fig. 11 Curve of the laser facular energy's change

由上述数据和图形可见,在初始投弹和飞行的大部分时间里,能量变化较缓慢,而接近目标时发生了剧烈的变化。这说明当炸弹接近目标时,激光能量随时间的变化并不是一个线性关系^[10],在导引头工作区间能量变化为 34dB,这和制导武器实际打靶情况相符。通过数字仿真和半实物仿真得出的图形分析可知,二者拟合程度较高,进而验证了能量控制系统的实时性。

和精确性。

6 结 论

以某激光制导武器仿真系统为基础,对激光能量在传输过程中的衰减进行了建模,并对仿真条件下能量控制中的重难点进行了研究,提出了能量控制的优化设计方法,通过标定和仿真验证,该方法精度高、实时性好。目前,该激光能量精确控制系统已经成功用于多种型号激光制导武器的仿真实验中,在试验中发挥着极其重要的作用。

参 考 文 献

- [1] SHANG J Y , MENG X Y , DING Y. Hardware-in-the-loop simulation [M]. Beijing: National Defence Industrial Press ,2008: 1-30 ,87-98 , 112-115(in Chinese) .
- [2] SU J G , HUANG Y J , LIU Sh Q *et al.* Research on the hardware-in-the-loop simulation technology for the energy characteristics of laser guided weapons [J]. Acta Photonica Sinica 2007 ,36(9) : 1722-1725 (in Chinese) .
- [3] BING Y K , TONG Sh F , SONG H F *et al.* The laser energy attenuator of wide range ,high precision and stepless [J]. Opto-Electronic Engineering 2010 ,37(11) : 48-51(in Chinese) .
- [4] WANG Sh Ch , ZHANG J Sh , GAO Zh J *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) .
- [5] CONG M Y , SHAO Ch X , WANG X X. Target and atmospheric environment model of 1.064 μm laser [J]. Infrared and Laser Engineering 2000 29(4) : 71-77(in Chinese) .
- [6] ZHANG J Sh , WANG Sh Ch , XU P. Design of a simulation system for laser guided weapons [J]. Electronics Optics & Control ,2005 ,4(12) : 55-59(in Chinese) .
- [7] LU Ch J , PAN Q. Development of a calibration system for the threshold value of laser homing guidance seeker [J]. Mechanical Science and Technology 2007 26(4) : 532-536(in Chinese) .
- [8] JIANG R. A servo motor control system based on the control card [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products 2006 , 19(3) : 113-114(in Chinese) .
- [9] WU L , CUI H L , XIN D *et al.* Real-time control study of laser guided targets simulation system based on AC servo-motors and DMC5400 [J]. The World of Electrical Product 2010 6(2) : 26-28(in Chinese) .
- [10] GUO H M , DING Y. Modeling and analyse of lase target simulator [C]//2003 Conference of National System Simulation Technology. Beijing: Association for System Simulation ,2003: 342-346(in Chinese) .

版权所有 © 《激光技术》编辑部