

文章编号: 1001-3806(2011)06-0770-03

基于双光楔的激光模拟训练系统弹道模拟研究

吕战强, 万 华, 陈 峰

(中国人民解放军总参谋部第六十研究所, 南京 210016)

摘要: 为了实现激光模拟训练系统的弹道模拟, 以双光楔光束偏转性质为基础, 研究了通过控制双光楔的旋转角度来控制激光光轴的偏转, 并根据光折射理论计算推导了双光楔角度控制方程。结果表明, 模拟训练系统激光光束指向精度高于 1mrad, 能够满足实际需要。该系统可用于坦克等直瞄重武器的实兵对抗训练。

关键词: 激光技术; 模拟训练; 双光楔; 弹道模拟

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.012

Study on ballistic trajectory simulation of a laser simulation training system based on dual-wedge

LÜ Zhan-qiang, WAN Hua, CHEN Feng

(60th Research Institute of General Staff Department, Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to actualize ballistic trajectory simulation in a laser simulation training system, on the basis of the beam deflexion character of dual-wedge, the laser beam was deflected by control turning angle of the dual-wedge. The formula for controlling the turning angle of dual-wedge was also deduced from the optical ray refraction theorem. The experimental results indicate that the laser beam pointing accuracy of the system is higher than 1mrad. This system can be used for force-on-force engagement training of direct heavy weapons such as tanks.

Key words: laser technique; simulation training; dual-wedge; ballistic trajectory simulation

引 言

随着激光技术的发展, 其在军事训练器材的改进和训练方式的变革方面发挥着越来越重要的作用。激光模拟训练系统以光代弹, 结合声光效果可逼真地模拟实际战场环境的实兵对抗, 是部队训练器材和训练样式的一次革命, 也是和平时期部队训练的有效手段之一^[1-2]。因此, 美国、俄罗斯、英国、瑞士等国都在进行激光模拟训练系统的研制, 并已开发出多种系列产品。其中 MILES “多功能综合激光交战训练模拟系统” 是最为成功的产品, 可精确模拟 36 种实装武器, 性能好, 大大推动了部队的训练工作。

国内对激光模拟训练系统的研究开展得比较晚, 性能与国外相比有较大差距。针对特定的武器开发出了不同的模拟训练系统, 如高炮的激光模拟训练系统^[3-4], 也设计出了基于激光技术的轻武器打靶训练系统^[5]。这些训练系统使现场效果更加逼真, 大大激发

了训练人员的兴趣, 从而提高了训练效果。但由于这些产品还不成体系, 仅实现了以光代弹功能, 更重要的是设计时都未考虑实际装备弹道参量的模拟, 不能完全符合部队军事训练贴近实战的要求, 所以有一定的应用局限性。

弹道模拟需要激光光束指向可自动调整, 而双光楔在光束偏转中有着重要的应用。目前, WEI 等人^[6]采用光的标量衍射理论分析了双光楔光束折射特性, DING 等人^[7]研究了双光楔光束指向精度与指向时间, HE 等人^[8]设计了基于双光楔的高精度角度发生器。但是这些研究都没有给出双光楔偏转角度与出射激光指向之间的函数关系, 即双光楔弹道模拟角度控制方程。

作者的目的在于介绍一种激光模拟训练系统, 适用于坦克等直瞄武器的精确弹道射击模拟, 采用双光楔的光束偏转特性来模拟实装的弹道参量, 达到对抗射击的逼真模拟。并通过理论计算给出双光楔弹道模拟角度控制方程。

1 激光实兵模拟系统弹道模拟

激光模拟训练系统采用发射编码激光脉冲的形式

作者简介: 吕战强 (1966-), 男, 高级工程师, 主要从事激光模拟训练方面的研究。

E-mail: lzq60@126.com

收稿日期: 2011-01-24; 收到修改稿日期: 2011-04-02

来模拟实装的弹丸发射,但光和弹之间存在两个重要的差异:(1)由于弹丸本身的重量以及空气阻力,其飞行轨迹是一个抛物曲线,而激光以直线传播;(2)弹丸从发射到命中目标需要一定时间,而激光的传播时间可认为是0。因此,对于激光模拟训练系统设计来说,需要考虑以上因素的影响,主要体现在如下两方面。

1.1 弹道修正

由弹道方程,根据弹药的性能以及到目标的距离可以解算出火炮应装定的射角 α_0 。如图1所示,此时炮身轴线 OA 与瞄准线 OB 之间夹角为 α_0 ,一般初始情况下,激光光轴 OC 与炮身轴线 OA 保持平行,由于激光沿直线传播,若使发射的激光脉冲能够击中目标,激光光轴应相对于炮身轴线向下转动 α 角,假设 α 为激光光轴实际的转动角度。若装定正确, $\alpha_0 = \alpha$, 目标将被激光脉冲击中。

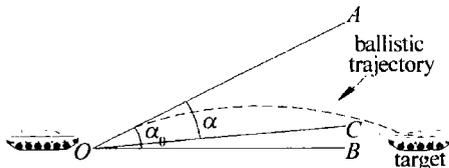


Fig. 1 Sketch map of ballistic trajectory correction

1.2 水平提前量修正

参见图2,若目标的切向速度为 v ,弹丸若要命中目标,需要使炮身轴线向目标前方旋转角度 $\theta = Tv/D$,其中, T 为弹丸到目标的飞行时间, D 为火炮到目标的距离,弹丸经过时间 T 到达 C_1 ,目标经过时间 T 也到达 C_1 ,目标被命中。但是激光脉冲以光速到达 C_1 ,此刻目标还未到达 C_1 ,将导致模拟失败。只有使激光光轴反向旋转 θ ,才能够使激光脉冲命中目标。

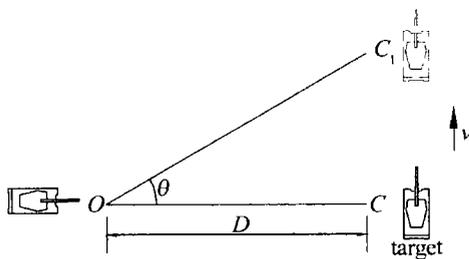


Fig. 2 Sketch map of lead correction

弹道修正和水平提前量修正分别对应垂直和水平方向上激光光轴的偏转,如果激光模拟训练系统不考虑以上两方面,那么用激光模拟训练器射击只能是一种不装定距离和水平提前量的射击。实际军事训练中,测距、装定距离和提前量是瞄准射击的基本功,是精确射击的基本前提,也是士兵军事素质的体现。激光模拟训练系统的设计初衷即为训练士兵的军事技能,因此,弹道修正和提前量修正(以下统称为弹道模拟)是激光模拟训练系统必须具有的功能,也是设计

是否成功的重要标志之一。

2 基于双光楔原理的弹道模拟的理论分析

激光模拟训练系统的出射激光光轴应能在一定范围内任意调整,而其调整的依据则是根据目标的距离和速度等由弹道方程给出的弹道模拟参量 (θ, α) 。光束偏转有以下几种方式:机械平台、组合转镜以及双光楔。相对于同样精度的机械平台和组合转镜,采用双光楔控制光束偏转有着更高的指向精度^[7]。

双光楔是由两个楔角很小、大小相同的棱镜组成,如图3所示,两光楔的两个相邻面平行同向放置。若入射激光光束与双光楔的光轴一致时,可通过双光楔的转动,使出射光束指向在某一立体角内任意方向上,而出射光束的方向与光楔角位置之间的函数关系即是双光楔弹道模拟角度控制方程。

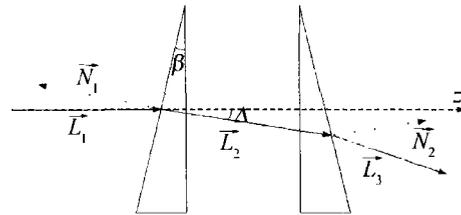


Fig. 3 Laser propagation in dual-wedge

由于双光楔的两个相邻面相互平行,不改变光束经两相邻面折射后的传播方向,光束在双光楔内部可简化为沿直线传播,故只需考虑双光楔外侧的两个折射面。因此双光楔光束传输主要涉及5个矢量(见图3),分别采用图4所示极坐标形式表示如下:入射光矢量 $\vec{L}_1: [0, 0, 1]$;第一折射面法向量 $\vec{N}_1: [\cos\varphi_1 \sin\beta, \sin\varphi_1 \sin\beta, -\cos\beta]$;光楔内光矢量 $\vec{L}_2: [\cos\omega_2 \sin\delta_2, \sin\omega_2 \sin\delta_2, \cos\delta_2]$;第二折射面法向量 $\vec{N}_2: [\cos\varphi_2 \sin\beta, \sin\varphi_2 \sin\beta, \cos\beta]$;出射光矢量 $\vec{L}_3: [\cos\omega \sin\delta, \sin\omega \sin\delta, \cos\delta]$ 。其中 φ_1 和 φ_2 分别表示两光楔的旋转角度,见图3,若楔角向纸面外旋转转角为正; β 表示光楔的楔角; (ω_2, δ_2) 和 (ω, δ) 分别为 \vec{L}_2 和 \vec{L}_3 的角度参量, (ω, σ) 为弹道模拟参量 (θ, α) 的极坐标变换。

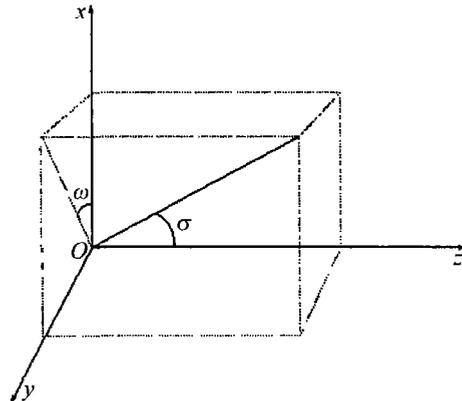


Fig. 4 Coordinate of output laser vector

光线在两介质界面上的折射方程,其矢量形式为^[9]:

$$n_i \vec{L}_i \times \vec{N} = n_o \vec{L}_o \times \vec{N} \quad (1)$$

式中, $n_i, \vec{L}_i, n_o, \vec{L}_o$ 分别表示入射和出射空间的折射率和光矢量, \vec{N} 为界面法向量。因此, 双光楔光束传输过程的矢量形式可以表示为:

$$\vec{L}_1 \times \vec{N}_1 = n \vec{L}_2 \times \vec{N}_1 \quad (2)$$

$$n \vec{L}_2 \times \vec{N}_2 = \vec{L}_3 \times \vec{N}_2 \quad (3)$$

式中, n 为光楔的折射率。由(2)式可得 \vec{L}_2 :

$$\vec{L}_2 = [-\cos\varphi_1 \sin\Delta, -\sin\varphi_1 \sin\Delta, \cos\Delta] \quad (4)$$

式中, Δ 为 \vec{L}_2 与 z 轴的夹角, 见图 3, 满足如下关系:

$$n \sin(\beta - \Delta) = \sin\beta \quad (5)$$

将(4)式、(5)式及相应的矢量代入(3)式, 即可得到出射光束参量(ω, σ)与双光楔角度参量(φ_1, φ_2)之间的关系, 但是直接得到其解析式非常困难。当光楔的楔角很小时, 可做如下近似: $\sin\beta \approx \beta, \cos\beta \approx 1, \sin\Delta \approx \Delta, \cos\Delta \approx 1$ 。将其代入并经过一系列的数学变换后可得到如下的方程组:

$$\begin{cases} \cos(\omega - \varphi_1) = -\frac{\sigma}{2(n-1)\beta} \\ \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{\sigma^2}{2(n-1)^2\beta^2} - 1 \end{cases} \quad (6)$$

(6)式就是双光楔弹道模拟角度控制方程。在通过弹道方程得出弹道参量(ω, σ)的情况下, 可从中解出对应的双光楔角度状态(φ_1, φ_2), 从而调整双光楔姿态, 最终使出射光束光轴指向(ω, σ)方向。当然通过(6)式不能得到唯一解, 其中的无效解可通过下式去除:

$$n \sin\Delta \sin(\varphi_1 - \varphi_2) = \sin\sigma \sin(\varphi_2 - \omega) \quad (7)$$

3 实验验证

激光模拟训练系统的光路见图 5, 激光器发射激光经准直透镜准直后, 进入双光楔组件。光楔的楔角为 2° , 折射率为 1.52。双光楔通过齿轮分别与步进电机相连, 如图 6 所示, 由步进电机控制双光楔的旋转实现出射激光指向的调整, 同时通过码盘反馈光楔的旋转角度, 以保证光楔转动角度的精确度。

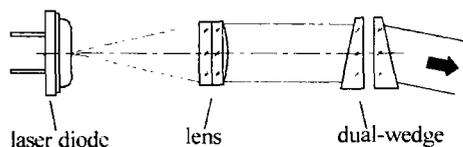


Fig. 5 Optical path

在实际应用中须保证光学系统光轴与火炮炮管轴线平行。激光模拟训练系统根据车载弹道计算机给出的弹道模拟信号控制双光楔的转动来反向调整出射激光光轴。系统出射光轴的最大调节范围为 35mrad , 在实验中人为输入调控角度, 在 50m 处测量出射光斑的

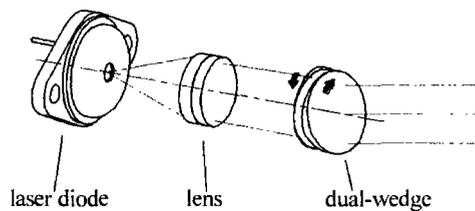


Fig. 6 Adjustment mechanism

位置, 通过空间位置转换计算整个系统的实际指向精度, 测量结果参见表 1。

Table 1 System pointing accuracy

number	insert angle		pointing accuracy/mrad
	ω/rad	δ/mrad	
1	$\pi/4$	20	0.3
2	$3\pi/4$	20	-0.9
3	$5\pi/4$	20	0.8
4	$7\pi/4$	20	0.7
5	$\pi/3$	30	-0.3
6	$5\pi/6$	30	-0.5
7	$4\pi/3$	30	0.1
8	$11\pi/6$	30	0.6

从表 1 中可以看出, 系统激光光束指向偏差都小于 1mrad , 由于激光光斑本身有一定的尺寸, 因此, 测量数据偏差产生的原因, 还在于计算中用到的参量含有测量误差。相对于出射激光本身 2mrad 的发射角来说, 角度偏差完全在误差允许的范围。目前该系统已被应用于在实装武器的实兵对抗训练中, 对抗中 2000m 外运动目标上的光电探测器接收到了装备本系统坦克发射的激光脉冲信号, 这就意味着目标被命中。实际验证表明, 本系统能够有效模拟坦克等直瞄重武器的弹道参量, 有效作用距离不低于实装武器的射程。可大大提高实兵对抗训练的逼真度。

4 结 论

弹道模拟是激光模拟训练系统必须具备的功能。通过控制双光楔的旋转角度可以精确地控制激光光束的出射方向, 以达到激光模拟训练系统弹道模拟的效果, 并通过计算得到了其控制方程。实验证明, 该系统完全能够满足实际的需要。

基于统一的激光脉冲信号编解码方式, 该系统是目前所采用激光模拟训练系统的重要组成部分之一, 可用于坦克等直瞄重武器的模拟训练, 该系统的应用能够进一步推动激光模拟训练系统发展和部队训练效能的提高。

参 考 文 献

[1] CONARED H. The light brigade: lasers provide the edge in training and control[J]. Photonics Spectra, 1994, 28(6): 76-81.

以这是一个常数。(5)式都为激光测距机的内部参量,也是本检测设备需要测量的参量。因为各个被测激光测距机之间的光学系统透过率,接收口径与视场差异很小,所以(5)式中,只要知道激光功率量 P_i 与最小可探测功率 P_{\min} ,就可求出 S ,再将 S 与 S' 进行比较,只要 $S \geq S'$,就可认为产品的测距能力合格。

检测设备测距能力检测过程如下:(1)设置激光脉冲运行时间。可以通过单片机把精密延时器延时时间设置为被测激光测距机测距对应的激光脉冲运行时间;(2)测距过程。当检测设备接收到“取样”脉冲信号后,单片机控制精密延时器^[10]开始进行计时,计时结束后,单片机控制精密延时器发出一个模拟回波脉冲信号,同时,单片机发光强度控制电路控制半导体激光器发出激光脉冲的能量,使该能量相当于对应距离目标回波的能量,在激光测距机的接收通道上就可以对应测距上目标回波脉冲;(3)测距能力判断。根据激光测距机所显示结果可判断在光轴正常情况下激光测距机可否满足测距指标要求。

5 试验结果

经过多次试验,该设备的实际测量结果如下:激光接收通道口径为 $\varnothing 40\text{mm}$;发射通道口径为 $\varnothing 40\text{mm}$;模拟距离调节范围为 $1500\text{m} \sim 20000\text{m}$;测距精度为 $\pm 5\text{m}$ 。发射与接收通道调节参量:方向调节范围为 $50\text{mm} \sim 150\text{mm}$;高低调节范围为 $0\text{mm} \sim 60\text{mm}$;发射与接收通道互换性:左右通道可互换;环境试验($-5^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$)工作正常。

6 结论

设计的新型激光测距机性能检测设备具有发射和

接收装置位置可以任意调节和互换、调整瞄准方便、检测效率和测试精度高,检测结果数字化显示等优点,可以对不同型号的激光测距机进行性能检测。该设备各项指标在国内同类仪器中达到领先水平,经试用,反映效果良好。

参考文献

- [1] YIN Z T, DUAN Zh J, LIANG J. Testing of extinction-ratio of pulse laser range finder by fiber extinction[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2009, 7(2): 58-61 (in Chinese).
- [2] CHEN A J, LU X D. Design and reserch of a new type military laser range syetem[J]. Laser & Infrared, 2001, 31(2): 90-92 (in Chinese).
- [3] SUN Zh W, WANG Ch Y. Design of comprehensive performance testing equipment of laser rangefinder machine based on AVR[J]. Modemelectronics Electronics Technique, 2010, 33(15): 139-140 (in Chinese).
- [4] SHEN X J, ZHOU Sh G, ZHANG Y F. Transmission characteristics of optical transmitting system in laser range finder[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 143-147 (in Chinese).
- [5] ZENG Ch E, WANG Q Q, CHANG G, et al. Novel method for maximum range measure of pulse laser range finder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(6): 664-668 (in Chinese).
- [6] WANG D, LI X Q. New progress in semiconductor lasers and their applications[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 280-284 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y, FENG G B, CHEN Zh B. The study of automatic testing on alignment of optical axes for impluse laser range finder[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(4): 228-230 (in Chinese).
- [8] CHEN Zh B, LI Y Zh, WANG Ch Y, et al. Laser spot and it's opti-caxis collimation detection method for laser range rinder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 261-264 (in Chinese).
- [9] SUN B, WANG X B, LIN Y, et al. Range-finding capability of laser range finder by extinction-ratio measurement without target[J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 82-84 (in Chinese).
- [10] CHEN X W, LIU Y. The design of programmable large frequency band-width precise delay apparatus [J]. Control & Automation, 2004, 20(9): 79-80 (in Chinese).

(上接第 772 页)

- [2] LAWRENCE J D, DAVID J P. Combat simulation in USA army training and testing[C]//Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 1996: 896-902.
- [3] FU Z X. The design of 57mm anti-craft gun type 59 laser signal shooting training system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 4-17 (in Chinese).
- [4] ZHAO J J, HOU Y D. Design of computer simulation system for Archibald firing training[J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 567-568 (in Chinese).
- [5] ZHU J, ZHAO Y S, ZHANG W J, et al. Design of laser simulation training system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2006, 4(2): 61-63 (in Chinese).
- [6] WEI Z C, XIONG Y W, MO W, et al. Analysis for refractive property of rotary dual-wedge prism system and 2-D scanning trace[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 939-943 (in Chinese).
- [7] DING X C, KUANG D B. Theoretic analysis of 2-D beam steering with dual-wedge[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1992, 11(1): 53-58 (in Chinese).
- [8] HE L, YUAN J H, LI Z, et al. Design of high-precision angle generator with double optical wedges[J]. Opto-electronic Engineering, 2002, 29(2): 46-49 (in Chinese).
- [9] GAO F W, LI J X. Applied optics[M]. Beijing: People's Liberation Army Press, 1986: 5 (in Chinese).