文章编号:1002-2082(2011)03-0562-06

多波长激光复合点目标运动模拟

高教波,李建军,孙治家,王　军,郑雅卫,王吉龙

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘　要:介绍了多光谱激光复合点目标运动模拟系统的构成和工作原理。该系统用于光电火控装备及成像导引头系统的研发及验证。3 种激光波长(0.65 μm、0.808 μm、10.6 μm)可满足电视(0.4 μm～1.1 μm)和长波红外成像(8 μm～11.5 μm)光电跟踪系统的动态仿真测试。12 m 半径 1/4 球幕在 0.4 μm～12 μm 宽波段漫反射率大于 0.7,点目标运动范围:方位 0°～ ±90°;俯仰 0°～90°。该技术已用于车载防空光电火控系统半实物仿真试验评估中,跟踪精度从0.4 mrad 提高到 0.2 mrad。

关键词:多波长激光;目标仿真;光电导引头

中图分类号:TN249　　**文献标志码**:A

Simulation of multi-wavelength laser composite point target motion

GAO Jiao-bo, LI Jian-jun, SUN Zhi-jia, WANG Jun, ZHENG Ya-wei, WANG Ji-long

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065,China)

Abstract: The layout and operation principle of multi-spectrum laser composite point target simulation dome is given, which is used for research, development and validation of fire control and electro-optical seeker systems. Three laser wavelengths(0.65 μm, 0.808 μm and 10.6 μm) meet the dynamic simulation test requirements of TV (0.4 μm～1.1 μm) and long-wavelength infrared imaging (8 μm ～11.5 μm) electro-optical tracking system. The diffuse reflectivity of 12m radius dome screen is greater than 0.7 (0.4 μm～12 μm), target motion range is 0°～+90° in azimuth, and −90°～+90° in elevation. This technology is developed for the hardware-in-the-loop simulation of vehicle borne air-defense electro-optical fire control system and the tracking precision is increased from 0.4 mrad to 0.2 mrad.

Key words: multi-wavelength laser; target simulation; electro-optical seeker

引言

随着计算机技术的发展,仿真技术已成为武器系统研制与试验中的先导技术、校验技术和分析技术。武器系统都是多模式复合系统,为了测试其多种功能,就要在一个受控环境中输入各种模式下所要求的各种激励信号,并确定系统对激励信号的响应灵敏度。由于受到实际试验环境的限制,多功能测试很难实现,而仿真试验能够方便地实现高精度可重复测试,从而得到统计性试验数据;能够完成野外因安全问题不能进行或受经费限制的限定环境下的测试与评估试验;同时能够大大减少试验费用,减少环境污染。因此,应用仿真技术代替武器系统的前期测试评估是一种经济可行的方法。

球幕多光谱激光点目标模拟系统可用于自行高炮防空系统、坦克和制导装备的光电传感器及火控系统原型样机的评估及测试,还可以对自行高炮、坦克、装甲车辆等进行硬件闭环仿真评估试

收稿日期:2010-11-08;　**修回日期**:2010-01-10

作者简介:高教波(1962－),男,湖北广水人,研究员,主要从事目标光学特性开发与应用、光电系统建模仿真评估技术、超光谱成像探测技术等方面研究工作。E-mail:gjbxiang@163.com

验。主要完成的试验任务有:光电系统的探测与跟踪性能测试与评估;光电系统的多目标识别、跟踪性能测试与评估;跟踪系统对多目标的动态分派范围及精度评估;多光谱光电对抗性能评估;光电火控半实物仿真。

1　系统构成及工作原理

1.1　系统构成

球幕多光谱激光点目标模拟系统由 4 个部分构成,如图 1 所示。宽波段漫反射 1/4 球幕子系统、多光谱激光点目标投射子系统、载体运动模拟子系统、仿真控制与评估子系统。1/4 球幕内壁对宽波段(0.4 μm～12 μm)激光具有较高的漫反射特性。多光谱激光点目标投射子系统完成 3 种波长(0.65 μm、0.808 μm、10.6 μm)激光合成的光强,大小尺寸连续可变的点目标由两轴转台控制按所需轨迹在球幕上运动。载体运动模拟器子系统由六自由度运动模拟器和车载光电跟踪系统构成被试产品。仿真控制与评估子系统负责整个系统的运动控制、数据采集和仿真过程监视及性能评估分析等功能。

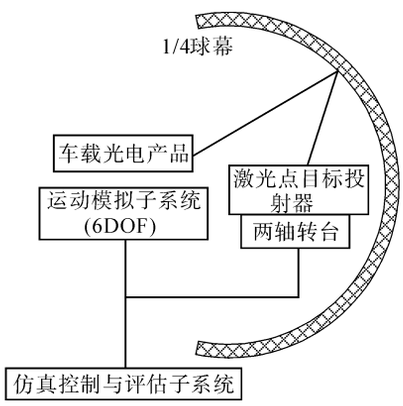

图 1　球幕多光谱激光点目标运动模拟系统

Fig. 1　Multi-spectrum laser point target simulation dome

1.2　工作原理

根据被试光电产品作战任务拟定仿真计划书,分解到目标运动轨迹、目标大小变化特性、强度变化特性,通过两轴目标运动转台及目标特性控制器(光斑大小及强度控制),驱动复合激光投射器按照计算轨迹在球幕上运动,载体运动模拟器上光电跟踪仪实时跟踪多波长激光光斑进行半实物仿真试验,通过采集光电跟踪仪输出视频或炮塔输出方位俯/仰角度值,与目标运动轨迹对比计算得出光电跟踪仪性能。

2　多光谱激光点目标运动模拟器

多光谱激光目标发生器由 3 波长激光复合点目标准直投射器、激光光斑/强度控制器、高精度两轴转台、控制器和主控计算机构成,如图 2 所示。

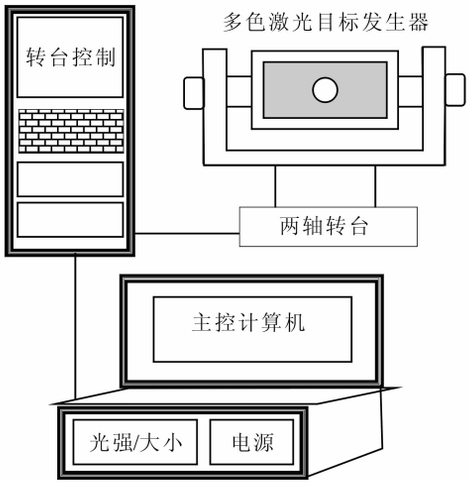

图 2　多光谱激光目标发生器

Fig. 2　Multi-spectrum laser point target simulator

三色复合激光点目标投射器由三路激光构成,如图 3 所示,其中两路采用 650 nm 和 808 nm 半导体激光器模拟电视目标。另一路采用10.6μm 二氧化碳激光器模拟长波热像目标。经过透可见光反红外合束镜合成一路光束经过宽波段 ZnS 窗口投射到球幕。光斑的大小通过可变光栏变化,通过渐变衰减器实现强度变化,这些功能都可以通过电控实现远程控制。

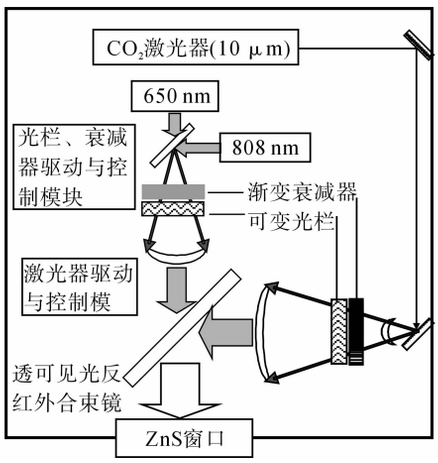

图 3　3 波长激光复合目标投射器

Fig. 3　Three-wavelengths laser composite target projector

2.1　不同光栏大小所对应的像斑大小

采用激光器波长 0.65 μm(红光)和 0.808 μm(近红外光)作为电视点源目标,激光经过扩束成像至球幕上。其中电控光栏孔径可以由 Φ2 mm～

Φ28 mm 变化,使得球幕上的光斑大小随之发生变化,以模拟目标远近距离变化,如图 4～图 7 所示。

激光经过显微镜头扩束得到一定大小的光斑,由可变光栏控制,连续可变光栏作为成像物镜的物,投射到球幕上产生复合点源目标,根据飞机目标等效几何尺寸以及作用有效距离,计算光学系统的参数值(焦距,口径、物距、放大倍率等)。根据实际飞机目标与距离之间张角关系,确定球幕光电大小变化范围。

1) 可见光/近红外扩束镜(λ=656.27 nm、808 nm)

扩束比	20×
聚焦镜:	
材料	K9-ZF1
焦距/mm	5
入瞳大小/mm	2
视场/mrad	2 mrad
后截距/mm	3.44
准直镜:	
材料	K9-ZF1
入瞳大小/mm	40
焦距/mm	100
后截距/mm	93.77
口径/mm	40

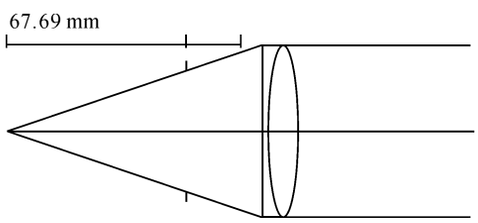

图 4　可见光通道光栏位置图

Fig. 4　The position of optical stop in TV channel

2) 红外通道光学参数(10.6 μm)

聚焦镜:	
扩束比	20×
材料	ZnSe-ZnSe
焦距/mm	5
入瞳大小/mm	4
视场	0.283°(5mrad)
后截距/mm	2.37
准直镜:	
材料	Ge-Ge
入瞳大小/mm	80
焦距/mm	100
后截距/mm	88.06
口径/mm	80

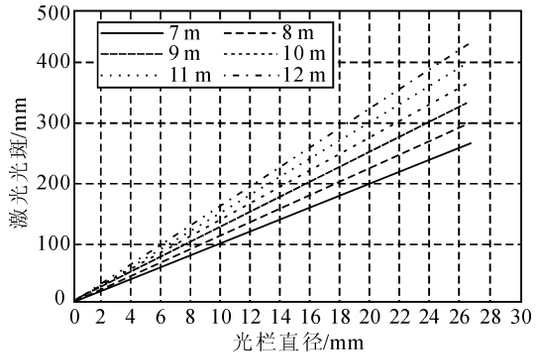

图 5　球幕光斑与光栏尺寸及距离大小关系

Fig. 5　The dependence of laser spot on optical stop diameter and dome distance

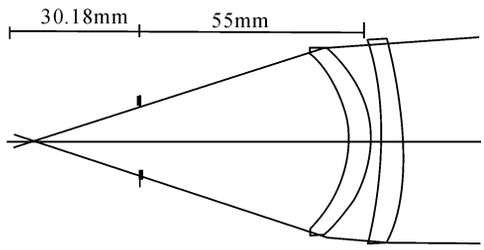

图 6　红外通道光栏位置图

Fig. 6　The position of optical stop in FLIR channel

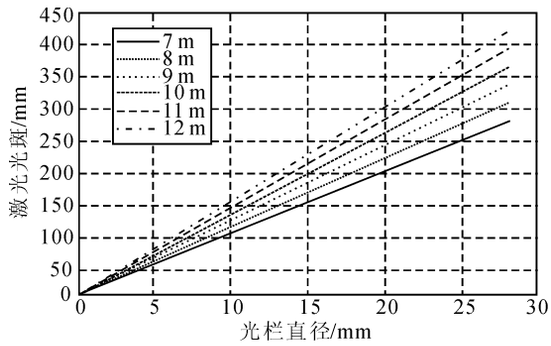

图 7　红外光斑与球幕距离及光栏口径之间的关系

Fig. 7　The dependence of laser spot on dome distance and optical stop diameter

根据所要模拟目标(飞机等)距离远近,确定球幕激光光斑大小,再根据转台上激光束的方位俯仰角度来调整光栏的大小;根据目标距离计算大气衰减和目标强度变化值来调节激光的强度。

2.2　连续衰减器组件

该组件由一对偏振片组合而成,其中一片起偏器固定不动,另一片检偏器采用旋转电机控制在不同角度,根据盖吕定理得到不同透过率,从而实现光强变化。旋转电机采用专用驱动器和控制器,通过计算机程控,如图 8 所示。本系统中激光器本身具有偏振特性,可以去掉取偏器,只需用检

偏器旋转即可实现激光强度的连续变化。当然,对于不同激光波长需要选择相对应偏振片。

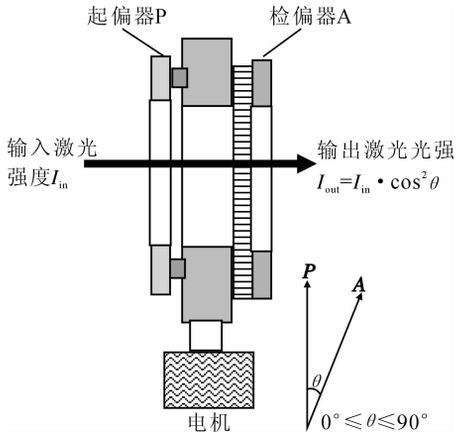

图 8　激光衰减组件原理图

Fig. 8　Schematic of laser attenuation components

2.3　短波通合束器

采用合束器 1 将可见光、近红外两束激光合成一束光,以满足不同电视成像(可见光或近红外)仿真测试的需求。合束器 1 采用镀膜技术让 650 nm 激光全透过,对 808 nm 激光全反射短波通分光膜如图 9 所示。

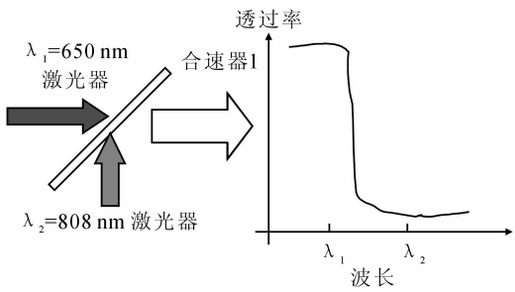

图 9　可见光/近红外激光合束器 1

Fig. 9　Visible/near infrared laser beamsplitter(BS)1

采用合束器 2 将可见光/近红外激光与 10.6 μm 再合成一束光,以满足不同电视和热像仿真测试的需求。合束器 2 采用镀膜技术 650 nm/808 nm 激光全透过,10.6 μm 激光全反射,如图 10 所示。

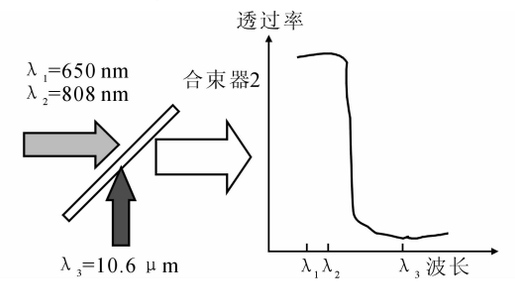

图 10　透可见光/近红外反红外激光合束器 2

Fig. 10　Visible/near infrared/infrared laser BS2

2.4　控制流程及界面

图 11 给出了激光点目标模拟的主控流程(上半部分)及人机交互界面功能图(下半部分)。主控计算机负责全系统的协调和各种接口通信控制,通过目标的运动轨迹、辐射强度和几何参数计算,经网络编程控制航迹控制计算机驱动两轴转台和激光目标投影仪,实现球幕上多光谱激光复合点目标的运动模拟,供被试光电火控系统硬件闭环仿真测试与评估分析。

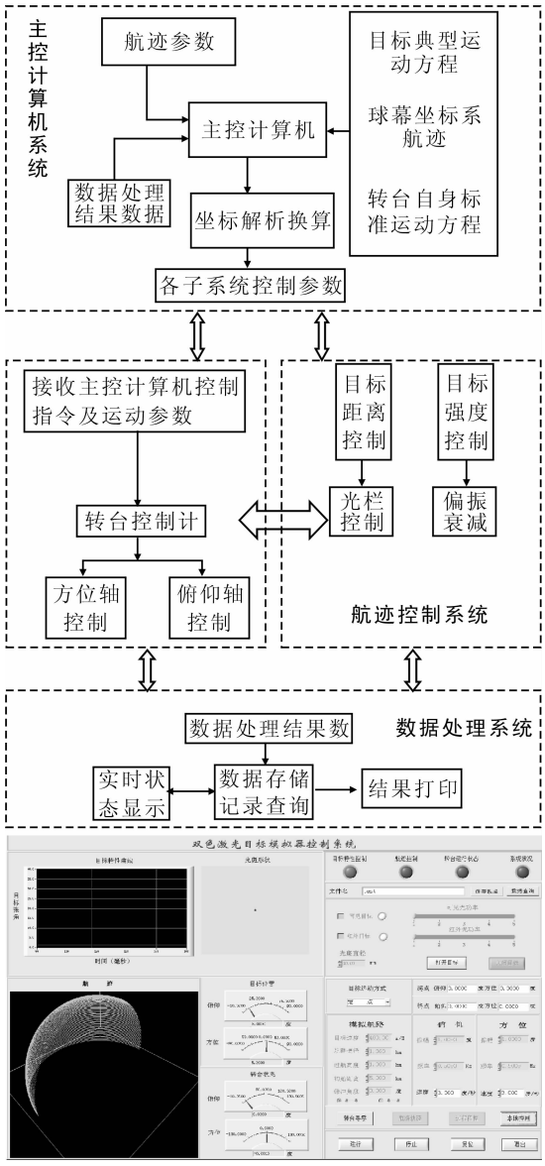

图 11　控制流程及界面

Fig. 11　Control flowchart and interface

典型目标航迹运动模式:根据所要模拟目标的空间运动轨迹,映射到球幕交点的相对球心坐标值(α,β),再转换到相对转台坐标值(α',β'),下载到转台控制计算机中,通过转台坐标跟踪模式实现点源目标的航迹运动控制模拟功能。

典型的目标运动模式有:沿球幕纬线运动轨迹、沿球幕经线运动轨迹、沿球幕斜线运动轨迹以及固定点的远近大小变化运动等。

2.5　偏置转台方位/俯仰角度修正

如图 12 球坐标所示,已知 A 的俯仰方位为 φ,θ,$|OA|=R$,B 的俯仰方位为 φ_B,θ_B,$|OB|=r$,A 相对 B 的俯仰为 φ_1,θ_1,设 A,B 的坐标分别为 (x_A,y_A,z_A),(x_B,y_B,z_B),作 $AA'\perp$圆 O 于 A',$BB'\perp$圆 O 于 B',则有:

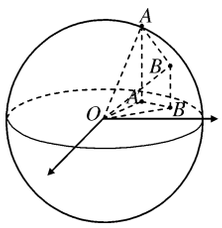

图 12　球坐标

Fig. 12　Spherical coordinates

$$\begin{cases}x_A=R\cos\varphi\cos\theta\\ y_A=R\cos\varphi\sin\theta\\ z_A=R\sin\theta\end{cases}\qquad\begin{cases}x_B=r\cos\varphi_B\cos\theta_B\\ y_B=r\cos\varphi_B\sin\theta_B\\ z_B=r\sin\theta_B\end{cases}$$

式中:$\angle AOA'=\varphi$;　　$\angle BOB'=\varphi_B$;

$\angle A'OC=\theta$;　　$\angle B'OC=\theta_B$。

设以 B 为原点的新坐标系下 A 的坐标为(x',y',z'),则有 $\boldsymbol{OB}+\boldsymbol{BA}=\boldsymbol{OA}$,即 $(r\cos\varphi_B\theta_B,r\cos\varphi_B\sin\theta_B,r\sin\varphi_B)+(x',y',z')=(R\cos\varphi\cos\theta,R\cos\varphi\sin\theta,R\sin\varphi)$,亦即:

$$\begin{cases}x'=R\cos\varphi\cos\theta-r\cos\varphi_B\cos\theta_B\\ y'=R\cos\varphi\sin\theta-r\cos\varphi_B\sin\theta_B\\ z'=R\sin\varphi=r\sin\varphi_B\end{cases}$$

又知 A 点相对于 B 点的新俯仰角及方位角为 φ_1,θ_1。设$|AB|=\rho$,则有关系式:

$$\rho=\sqrt{(R\cos\varphi\cos\theta-r\cos\varphi_B\cos\theta_B)^2+(R\mathrm{cso}\varphi\sin\theta-r\cos\varphi_B\sin\theta_B)^2+(R\sin\varphi-r\sin\varphi_B)^2}$$

则又有:$\begin{cases}x'=\rho\cos\varphi_1\cos\theta_1\\ y'=\rho\cos\varphi_1\sin\theta_1\\ z'=\rho\sin\varphi_1\end{cases}$。于是有:$\begin{cases}\rho\cos\varphi_1\cos\theta_1=R\cos\varphi\cos\theta-\cos\varphi_B\cos\theta_B\\ \rho\cos\varphi\sin\theta_1=R\cos\varphi\sin\theta-r\cos\varphi_B\sin\theta_B\\ \rho\sin\varphi_1=R\sin\varphi-r\sin\varphi_B\end{cases}$

现在已知 $\varphi_B=0°$、$\theta_B=90°$、$r=4$ m、$R=12$ m;则有如下关系式:

$$\begin{cases}\rho=\sqrt{160-96\cos\varphi\sin\theta}\\ \tan\theta_1=\dfrac{12\cos\varphi\sin\theta-4}{12\cos\varphi\cos\theta}\\ \sin\varphi_1=\dfrac{12\sin\varphi}{\sqrt{160-96\cos\varphi\sin\theta}}\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}\theta_1=\arctan\dfrac{12\cos\varphi\sin\theta-4}{12\cos\varphi\cos\theta}\\ \varphi_1=\arcsin\dfrac{12\sin\varphi}{\sqrt{160-96\cos\varphi\sin\theta}}\end{cases}$$

3　宽波段漫反射球幕

在可见光到红外宽波段范围内采用特殊处理的铝板都有较高的漫发射率,如图 13 所示。对红外激光(10.6 μm)反射强,无吸收,不产生拖尾,响应快,如图 14 所示。而涂料铝板虽然在可见光漫反射率较高,但在红外波段吸收系数较大,漫反射率较低,在激光(10.6 μm)照射时会产生拖尾。

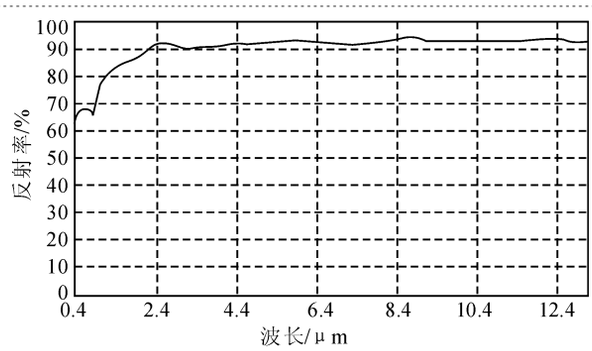

图 13　球幕漫反射光谱曲线

Fig. 13　Dome diffuse reflectance spectral curve

4　实现技术指标

4.1　点光源目标投射器主要参数指标

光谱范围:可见光响应波段 0.4 μm～1.1 μm;热像仪响应波段 8 μm～11.5 μm。

光斑变化:空间大小变化比 5 倍;投射能量变化比 5 倍。

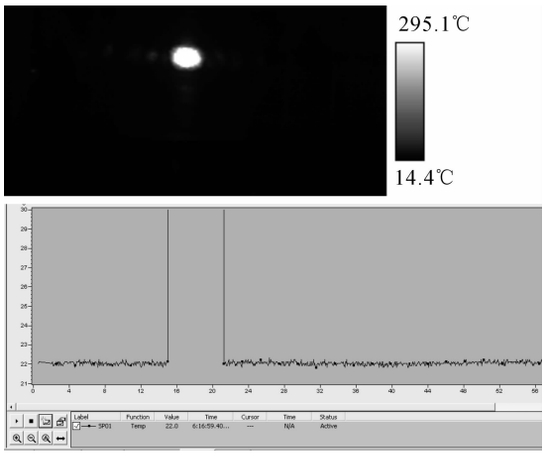

图 14　激光照射前后温度响应特性曲线

Fig. 14　Temperature response characteristic curve before and after infrared laser radiation

多光源共用同一光投射装置,三光源可切换,也可同时使用。

4.2　目标运动主要参数指标

运转角速度:水平方向 0.01°/s～120°/s;

高低俯仰 0.01°/s～120°/s;

最大角加速度 200°/s^2。

运动范围:水平方向 0°～ ±50°;

高低俯仰:0°～ 70°。

加速度误差 ≤±5%

定位精度 ≤0.1 mrad

4.3　点源目标运动方式

点源目标运动模式有以下 3 种:

1)相对被试品的匀速运动;

2)相对被试品的正弦运动;

3)相对被试品的水平、俯仰分别运动与复合运动。

以上 3 种模式可通过预设相对被试品的目标模拟航路(目标高度 h、线速度 v 与航路捷径 p、初始进入方位角与斜距离)及能接收同步信号与距离输出信号、实时输出光点目标相对被试品的斜距离、方位角和高低角来实现。

在 12 m 球幕处,采用数码相机和红外测温热像仪测试激光的光斑和强度变化结果如图 15～图 17 所示。

5　结论

介绍了 3 种波长激光复合目标运动模拟技术,

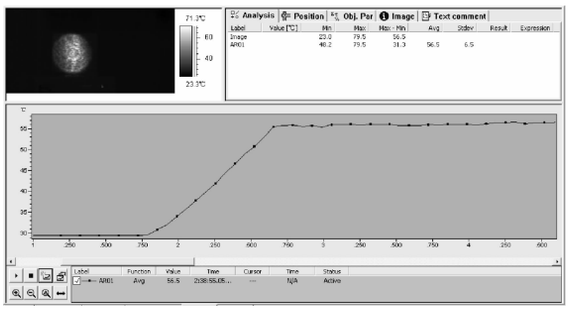

图 15　红外激光点目标温度随光斑大小变化曲线

Fig. 15　The relationship between infrared point target temperature and laser spot size

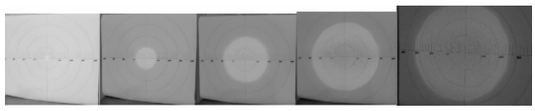

图 16　可见光光斑大小变化图片

Fig. 16　Visible laser spot size pictures

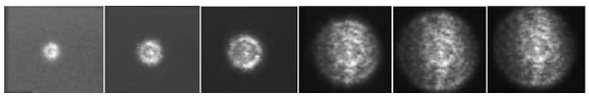

图 17　红外激光光斑大小变化图片

Fig. 17　Infrared laser spot size images

在宽光谱漫反射球幕上实现了多种模式目标运动轨迹控制,应用于自行高炮光电跟踪仪硬件闭环半实物仿真实验中,对电视/热像成像跟踪仪性能改进与炮塔控制算法优化设计起到了很大促进作用。

参考文献:

[1]　MUELLNER J. Multispectral target simulation dome for hardware-in-the-loop simulation of fire control and optronic seeker systems[J]. SPIE,2004,5408:22-32.

[2]　高教波,曲卫东,孙科峰,等,移动式多功能光电测试系统[J]. 应用光学, 2006,27(特刊):23-27.
GAO Jiao-bo,QU Wei-dong,SUN Ke-feng,et al. Mobile multifunction optoelectronic testing system[J]. Journal of Applied Optics,2006,27(sup). 23-27. (in Chinese with an English abstract)

[3]　向世明,高教波,焦明印,等. 现代光电子成像技术概论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010.
XIANG Shi-ming, GAO Jiao-bo, JIAO Ming-yin, et al. Introduction to modern electro-optical imaging technology[J]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2010. (in Chinese)