

•测试、试验与仿真•

光电平台球罩的视轴指向误差分析

李森森, 吴 凡

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要:利用平面几何与立体几何基础理论和光的折射基本定律,理论计算了光学球罩内任意点光源以任意方向经过球罩后输出激光轴向偏差角度。结合光学球罩内光电探测接收系统与激光发射系统的波段不同,分析了激光发射与目标探测之间的误差,模拟计算了发射激光与目标探测误差的变化规律。计算结果表明,当发射激光波段与探测目标辐射波段不一致时,需要考虑两者之间经过球罩的视轴误差,在光电系统中进行必要的误差补偿,实现精准探测与目标跟踪。

关键词:光电平台;光学球罩;视轴误差

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-06-0067-04

Analysis of Optical Axis Error of Spherical Shell in Electro-optical System

LI Sen-sen, WU Fan

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: Based on the plane geometry and stereo geometry theory and the light refraction law, the output laser axial deviation angle of any point light source is calculated in theory after passing through the spherical shell. Considering the electro-optical detection receiving and the firing systems with different wavelength, the error between the laser firing and the target detection is analyzed and the error change law is simulated and calculated. Calculation results show that the optical axis error must be considered when the wavelength is different between the firing and the detection systems. At the same time, the optical axis error should be compensated in the electro-optical system to achieve accurate detection and target tracking.

Key words: electro-optical system; spherical shell; optical axis error

在光电对抗、激光雷达、激光照明、激光跟踪与瞄准等光电平台中,光学窗口是其中必不可少的光学元件^[1-4]。一个设计合理的光学窗口能够有效保护光电系统光学元器件,并与装载平台保持良好的共形。光学窗口的形状包括平面窗口,多边形柱面窗口、球面窗口和非球面窗口等。平面窗口易于加工,结构简单,但视场范围较小。多边形柱面窗口采用多个平面拼接而成,其结构稳定性不够好,且拼接处会影响成像质量。非球面窗口适用于较大风阻的飞行器,保持良好的共形设计,但其加工难度比较大。大视场成像或全方位扫描工作模式的光电系统,通常采用曲面形式的同心球罩作为光学窗口。

对于同心光学球罩,光学系统发射或接收中心可置于球心处,其好处是球罩引起的像差小,不足之处在于,球罩表面的剩余反射光会干扰成像系统,且置于球心的光学系统没有充分利用球罩内的空间,使得系统整体体积较大,光学球罩尺寸增加^[5]。为了节约空间,做到系统总体体积小、质量轻,光学系统输出端可置于偏离球心的位置。但光束偏离球心,会造成一定的视轴指向误差,这在总体设计中需要考虑。

利用平面几何与立体几何基础理论和光的折射基本定律,理论计算了光学球罩内任意点光源以任意方向经过球罩后输出激光轴向偏差角度。结合光学球罩内光电探测接收系统与激光发射系统

的波段不同,分析了激光发射与目标探测之间的误差,模拟计算了发射激光与目标探测误差的变化规律。为光学球罩在光电系统中的应用和光电系统设计提供了有益参考。

1 理论计算与结果

1.1 中心轴上发光点的指向偏差

模拟计算中选取球罩外径200 mm,内径190 mm,材料为K9玻璃。厚度5 mm。球罩内外层同心,整体均匀。发射激光波长为1 064 nm和532 nm。

初始激光光源位于中心轴上,仰角 90° 发射,计算与球心的偏移距离变化时的输出激光轴向偏折角度。文中以水平右向为俯仰起点 0° ,逆时针为正。球心右侧距离为正,左侧为负。轴向误差随偏离球心距离的变化如图1所示。

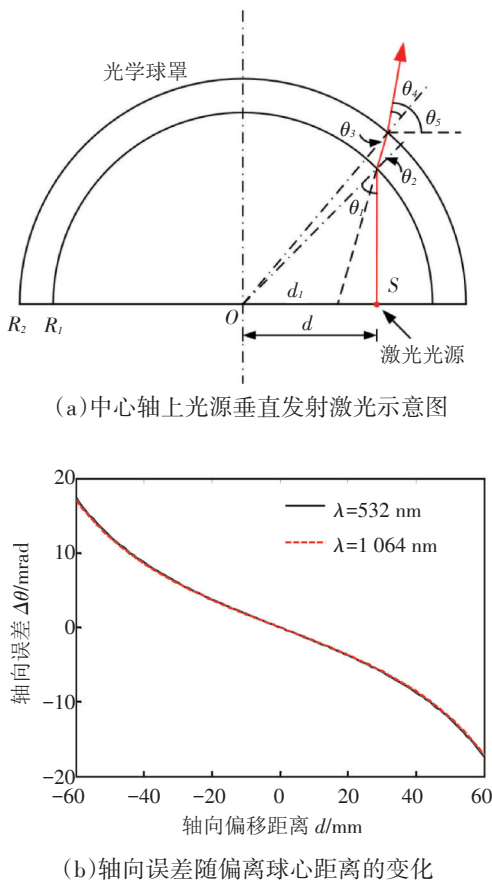


图1 轴向误差随偏离球心距离的变化

如图1a所示,球罩内外径分别为 R_1 和 R_2 ,公共球心为 O ,激光发射源为 S 点,距离球心为距离 d ,激

光垂直发射,即发射激光与球罩底面的夹角 θ 为 90° 。激光入射到内球面的入射角为 θ_1 ,折射角为 θ_2 ,激光继续传播,到达第二面的入射角为 θ_3 ,折射角为 θ_4 。发射激光与球罩地面所在平面的夹角为 θ_5 。根据三角关系和折射定律,有下式

$$\frac{\sin \theta}{d} = \frac{\sin(\pi - \theta)}{R_1} \quad (1)$$

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_2 \quad (2)$$

$$R_1 \sin \theta_2 = R_2 \sin \theta_3 \quad (3)$$

$$n \sin \theta_3 = \sin \theta_4 \quad (4)$$

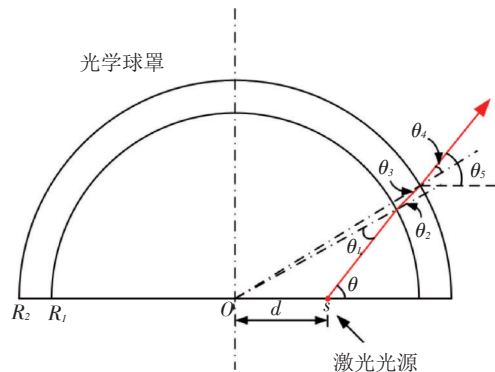
式中, n 为球罩折射率。根据式(1)~式(4)可计算输出激光轴向偏折角度为

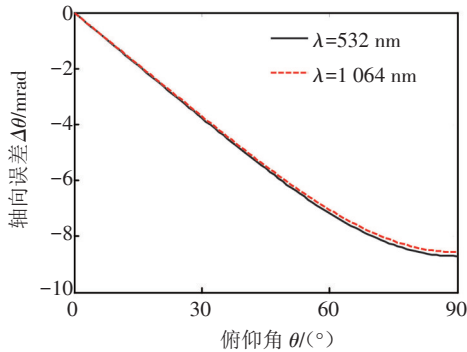
$$\Delta\theta = \theta_5 - \theta = -\theta_1 + \theta_2 - \theta_3 + \theta_4 \quad (5)$$

轴向偏折角度随光源偏离球心的距离 d 的变化如图1b所示。随着光源偏离球心距离的增加,激光经过球罩发射轴向偏折角度增加。当光源偏移球心距离为10 mm时,轴向偏折角度约为2 mrad。理论上,不同波长的激光轴向偏折角度不同,由于1 064 nm和532 nm在K9玻璃中的折射率相近,两种波段激光偏折角度分别为比较接近,分别为1.788 9 mrad和1.821 0 mrad。偏折的方向为远离球心的一侧。因此在进行光电系统总体设计时可不考虑这两种波段激光之间的轴向偏差。

初始激光光源位于中心轴上,距离球心40 mm,根据式(1)~式(5),计算发射仰角变化时的输出激光轴向偏折角度。如图2所示。

随着俯仰角度的增加,输出激光轴向偏折角度增加,总体上成线性变化,当俯仰角接近 90° 时,轴向偏折角度变化缓慢,其值接近12 mrad。不同波段由于折射率不同,轴向偏折角度不同。偏折的方向是远离球心的一侧。



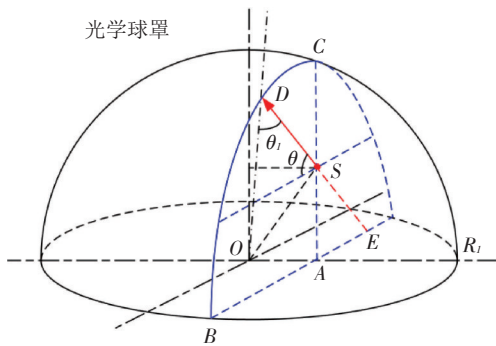


(b)轴向误差随发射俯仰角度的变化

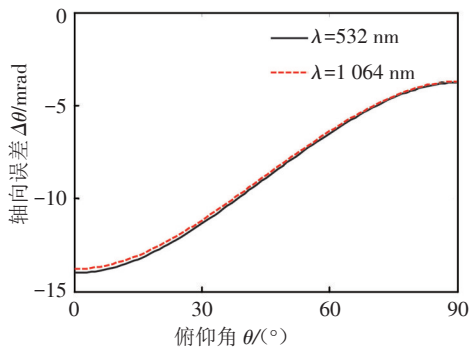
图2 轴向误差随俯仰角度的变化

1.2 中心轴外发光点的指向偏差

当激光源不在中心轴上时,如图3a所示。



(a)中心轴外光源发射激光示意图



(b)轴向误差随发射激光俯仰角度的变化

图3 轴向误差随俯仰角度的变化

光源 S 在面 ABC 内扫描,仰角为 θ ,激光入射到球罩内侧点 D 上,其发射激光的反向延长线与底线 AB 的交点为 E 。这里的关键是求出激光源在球罩内表面的入射角 θ_1 。根据立体几何与三角函数关系,在三角形 ADS 中和 ODS 中,可得下式

$$\frac{AD}{\sin(\frac{\pi}{2} + \theta)} = \frac{AS}{\sin \angle ADS} = \frac{DS}{\sin \angle DAS} \quad (6)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{OD^2 + DS^2 - OS^2}{2 \cdot OD \cdot DS} \quad (7)$$

求出入射角 θ_1 后可根据式(1)~式(5)求出发射激光的轴向误差。以 532 nm 和 1 064 nm 两种波段激光在 K9 玻璃球罩中传输为例,模拟计算中选取球罩外径 200 mm,内径 190 mm,厚度 5 mm。球罩内外层同心,整体均匀。当激光发射源在中心轴外时,例如水平与垂直方向的偏移距离分别为 20 mm 和 50 mm。计算结果如图 3b 所示。计算了 532 nm 和 1 064 nm 两种波段激光在 K9 玻璃球罩中的轴向误差变化。当俯仰角度较小时,轴向误差较大,接近 15 mrad;随着俯仰角度的增加,轴向误差减小;当仰角接近 90° 时,轴向误差约为 4 mrad。

2 讨论

对于同心光学球罩,为了节约空间,做到系统总体体积小、质量轻,光学系统输出端可置于偏离球心的位置。光束偏离球心,会造成一定的视轴指向误差,这在总体设计中需要考虑。在激光跟踪与瞄准的应用中,除发射激光之外,还需要一个探测器,能够接收目标的辐射或漫反射光。当探测光与发射激光不共轴时,需要考虑轴向误差对激光传输造成的影响,并根据不同的发射角度选择合适的补偿量。

如图 3b 所示,532 nm 和 1 064 nm 两个波段之间的指向误差比较接近,但还是有差别。当俯仰角度较小时两波段的偏差较大,此时输出激光经过球罩后出现分裂,当分裂角度远小于激光发散角时,可不予考虑;当分裂角度接近或大于激光发散角时,需要从光源端对激光发射角度进行修正。

此外,当更多波段激光发射时,穿过球罩的激光会有色散效应。当激光波长之间差别较大,在球罩材料中的折射率差别也比较大,输出激光的轴向误差会更加明显。

3 结论

理论计算了光学球罩内任意光源发射激光经过球罩后的轴向误差。以外径 200 mm,内径

190 mm, 厚度 5 mm 以 K9 玻璃球罩为例, 计算了 532 nm 和 1 064 nm 两种波段激光在光学玻璃球罩中的传播特性, 分析了双波段激光的指向误差。当激光在球罩中扫描时, 会出现轴向误差, 不同波段激光出现传播方向分离。这种轴向误差在总体设计中需要考虑补偿。文中的分析为光电系统设计提供了有意义的参考。

参考文献

- [1] David H Titterton. A consideration of the requirements for laser devices used in countermeasure[J]. Proc of SPIE, 2007, 6451: 64511Q.
- [2] 李文魁, 工俊璞, 金志华, 等. 直升机机载光电吊舱的发展现状及对策[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(5): 75-80.

- [3] 陈苗海. 机载光电导航瞄准系统的应用和发展概况[J]. 电光与控制, 2003, 10(4): 42-47.
- [4] 孙洪拓, 徐锦, 王长青, 等. 定向红外干扰技术的现状与发展趋势[J]. 船舶电子工程, 2006, 26(4): 13-18.
- [5] 郭汝海, 赵新宇, 马军. 光电对抗用激光器技术[J]. 光机电信息, 2011, 28(11): 1-7.
- [6] 许德, 章学堤, 林思文, 等. 光学球罩水波纹产生的原因及改善方案[J]. 工艺与装备, 2016, 2: 21-24.
- [7] 韩松伟, 项阳, 刘洵, 等. 机载光电平台球罩的视轴指向误差[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2386-2392.
- [8] 杜少军, 陆启生, 赵伊君, 等. 激光窗口形状对应力和光束位相影响的数值计算[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(3): 273-275.
- [9] 杜少军, 陆启生, 舒柏宏. 球壳激光窗口附加相移的分析和计算[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 681-684.
- [10] 李海波, 车驰骋. 光电设备中球罩的视轴误差研究[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(6): 75-78.

(上接第23页)

perspectival imager: the multi-scale remote sensing of Tibetan Plateau[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(1): 86-90.

- [4] Barocsi Attila. Investigation of acousto-optic tunable filter parameters for fast spectrometer application[J]. Optical Engineering, 1993, 32(10): 2569-2573.
- [5] 杨丽, 李菁, 刘翠红, 等. AOTF 近红外光谱技术在淫羊藿浓缩过程在线检测中的应用[J]. 中国医药导报, 2014(24): 111-114.
- [6] 胡浩武, 耿昭, 王木兰, 等. AOTF-近红外光谱技术在浓缩六味地黄丸提取浓缩过程理化指标快速分析中的应用研究[J]. 时珍国医国药, 2012, 23(2): 398-400.
- [7] 刘子毓, 侯玉文, 许强, 等. AOTF 近红外光谱技术及在食安领域的应用[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1): 25-28.
- [8] David A G, Diana L B, John J H. AIMS: acousto-optic imaging spectrometer for spectral mapping of solid surface[J]. Acta Astronautica, 2003, 52: 389-396.
- [9] Korablev O, Bertaux J L, Dimarllis E, et al. An AOTF-based spectrometer for mars atmosphere sounding [J]. SPIE, 2002, 4818: 261-271.
- [10] 赵慧洁, 程宣, 张颖. 用于火星探测的声光可调谐滤波器

成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 945-1951.

- [11] 常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. AOTF 成像光谱仪光机系统设计[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 45-349.
- [12] 常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. AOTF 成像光谱仪光学系统的最优方案选择[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 5-8.
- [13] 徐介平. 声光器件的原理设计 and 应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 12.
- [14] 毛谦敏, 袁雷, 余桂英, 等. 基于 AOTF 技术红外单色光调谐控制系统的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 236-240.
- [15] 何梓健, 时家明, 汪家春, 等. AOTF 高光谱探测系统对伪装目标的识别研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 796-800.
- [16] 常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. 声光可调谐滤波器(AOTF)消色散设计[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2895-2899.
- [17] Chang I C. Phosphorescence imaging system using an acousto-optic filter-based charge coupled device[J]. SPIE, 1997, 351: 229-239.
- [18] 任玉, 红星, 见瑶, 等. 声光调制光谱相机的成像漂移[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 79-186.