

大视场四象限探测光学系统设计

薛珮瑶*, 吴耀, 冯茜, 李川

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要: 为了实现大视场激光探测跟踪, 分析了大视场激光探测光学系统的研制特点。首先, 根据四象限探测对光学系统光斑均匀性的要求, 结合系统的指标参数, 选定合理的光学结构型式, 提出像差校正的设计方案。然后, 基于 ZEMAX 软件完成大视场四象限探测光学系统设计, 并利用点列图、光线足迹图、包围圆能量定性评价系统光斑质量; 通过 TRACEPRO 光学分析软件, 得到探测器靶面的光线照度分布。最后, 依据设计结果完成光学系统的加工装配及性能测试。测试结果表明: 激光探测系统线性视场为 $\pm 6^\circ$, 测角精度优于 0.15° , 并根据实测数据针对线性视场进行曲线拟合, 与理论曲线相符, 验证了设计结果的正确性。

关键词: 四象限探测; 光学设计; 光学仿真; 像差校正

中图分类号: TN977; TH703 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20140703.0462

Design of the large field optical system for four-quadrant detecting

XUE Pei-yao*, WU Yao, FENG Qian, LI Chuan

(The 27th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

* Corresponding author, E-mail: peiyaoxuenannan@hotmail.com

Abstract: In order to realize large field laser detecting and tracking, the characteristics of optical system are analyzed. First, based on the requirement of light spots uniformity for four-quadrant detector and system indexes, the premium structure of optical system is selected and the method of aberration correcting is presented. Then the large field optical system for four-quadrant detector is designed by using the ZEMAX software. The light spots quality is evaluated by the spot diagram, footprint and encircled energy while the distribution of the rays illuminance on the quadrant detector is obtained by TRACEPRO software. Finally, manufacture and assembly for the optical system are finished and optical performance is tested based on designing result. Testing results indicate that linear field of laser detection system is 6 degree and precision of angle measurement is less than 0.15 degree. Testing curve is consistent with theoretical curve, which validates correction of the design.

Key words: four-quadrant detecting; optical design; optical simulation; correcting aberration

1 引言

将激光制导技术应用于传统炮弹,是炮弹技术发展的飞跃,可以使炮弹“长了眼睛”。加上激光导引头制导后,可使炮弹的命中率得到显著提高。同时,与造价高昂的红外或电视制导相比较,激光制导炮弹以其低成本和高精度的显著优势得到快速发展,在多次战争中发挥了重要作用。“铜斑蛇”和“红土地”是激光制导炮弹的典型代表。美国研制的“铜斑蛇”半主动激光制导炮弹,是一种 155 mm 口径的炮弹,命中精度为 0.4 ~ 0.9 m。俄罗斯研制的“红土地”激光制导炮弹在性能上较“铜斑蛇”更胜一筹。该炮弹由 152 mm 火炮发射,采用了火箭增程,射程超过 22 km,命中概率高达 90%^[1]。以色列研制的“火球”120 mm 激光制导迫击炮弹,与目前正在大量部署的地基和天基激光指示器一起使用,圆概率误差约 1 m。鉴于激光制导炮弹的高命中精度和低成本,使得它在近 40 多年来得到各国军方的重视,得到飞速发展。我国激光制导炮弹的发展历程主要是仿制俄罗斯早期的“红土地”,目前已经定型。但是该型号激光制导炮弹成本较高,而且是俄罗斯早期激光制导产品。随着激光技术的发展和战场需求的提高,研制更高性价比、更符合作战需求的激光制导武器具有重要的军事意义。捷联式激光半主动导引头相对于其它几种激光半主动导引头虽然精度相对稍低,但它具有成本低、可靠性高、结构简单、体积小、抗过载能力强、技术成熟等优点,是消耗型精确打击炮弹的理想选择^[2]。

四象限探测器、多元探测器(如 CCD)和红外探测器是光学跟踪中普遍采用的 3 种位置传感器,其探测机理不同。前者属于主动能量探测(非成像),光学像质不要求达到衍射极限,镜片数量少、体积小、价格低。后两者均是被动成像探测^[3],光学像质都要求达到衍射极限,镜片数量多、体积大、价格高,故国内外一般均采用四象限光电探测器作为精跟踪和通信光接收器^[4]。

四象限探测光学系统起着收集、会聚激光能量的作用,探测器接收目标反射的激光信号,将微弱光信号转换为电信号,通过分析光斑在探测器

光敏面上的分布状况来获取目标的位置信息,实现对目标的跟踪和逼近^[5],具有位置分辨率高、响应速度快等优点,在卫星光通信中的高精度 APT 技术、激光半主动导引头、激光自动跟踪等各个领域得到了广泛应用^[6]。国内四象限探测光学系统视场可达 $\pm 15^\circ$,但线性区较小。研制大视场、大线性区、高精度测角、小型化、可靠性、工程实现容易的捷联导引头是对导引头性能改进的方向之一。

某四象限探测光学系统具有如下特点:

- (1) 线性视场较大: $\pm 6^\circ$;
- (2) 线性视场内光斑能量分布均匀;
- (3) 体积小,结构紧凑、重量轻。

本文基于 ZEMAX 软件完成四象限探测光学系统设计,依据设计结果完成系统的加工装配及性能测试。测试结果表明,激光探测系统线性视场为 $\pm 6^\circ$,测角精度优于 0.15° ,并根据实测数据拟合出目标角度(视场)一输出特性曲线,实测曲线和理论曲线符合,结果表明该光学系统设计正确,满足系统使用要求。

2 四象限探测器探测原理

四象限探测器的光敏面窗口分布为 4 个面积相等、形状相同、位置对称的四个象限,每个象限为一个光电器件,照射在光敏面上的光斑被四个象限分为 4 个部分,对应输出不同幅度的电信号,然后利用和差电路来测定目标相对于光轴的偏移量大小和偏移量方位,其基本探测原理如图 1 所示^[7-9]。

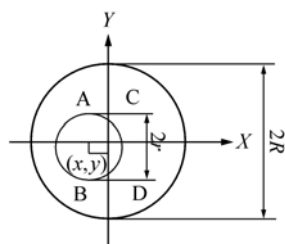


图 1 四象限探测器原理图

Fig. 1 Operating principle diagram of four-quadrant detector

图中探测器直径尺寸为 $2R$;光斑直径尺寸为

$2r; (x, y)$ 为光斑的中心点坐标; 探测器 4 个象限分别用 A、B、C、D 表示。通常 4 个探测器相互独立, 位于直角坐标系 4 个象限中, 每个探测器代表一个象限, 能接收一定的光能量, 输出一定的光电压, 输出电压大小与探测器接收的光功率成比例, 对应的输出信号为 V_A 、 V_B 、 V_C 和 V_D 。照射在光敏面上的光斑被 4 个象限分为 4 个部分, 对应输出不同幅度的电信号, 方位和俯仰两个方向的误差信号为 V_X 、 V_Y :

$$V_X = k \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} = 2k [x \sqrt{1 - (x/r)^2} + \arcsin(x/r)] / \pi, \quad (1)$$

$$V_Y = k \frac{(V_A + V_C) - (V_B + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} =$$

$$2k [y \sqrt{1 - (y/r)^2} + \arcsin(y/r)] / \pi, \quad (2)$$

式中, k 为电路放大系数。如果四象限探测器光敏面接收到的光斑能量分布均匀且四个象限特性一致, 则方位和俯仰两个方向上的误差信号仅取决于各象限上的光斑面积之差。

通过式(1)和式(2)便可以求出目标方位和俯仰偏移角 α 和 β :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{f}\right), \quad (3)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{y}{f}\right), \quad (4)$$

式(3)、(4)中, f 是光学系统的焦距。

3 光学系统设计

3.1 对光学系统的要求

3.1.1 对光敏面接收光斑的要求

四象限探测器是通过四个象限的光斑面积进行信号处理从而求出目标的方位和俯仰偏角, 因此对光斑有特殊的要求^[10], 主要包括两个方面: 首先是光斑能量的均匀性。由四象限探测原理可知探测器在信号处理时是基于光斑能量分布均匀为前提, 因此为了保证探测精度, 不同视场光斑能量分布必须均匀; 其次是光斑直径大小。根据式(1)和式(2), 光斑面积不能比探测器面积大; 另外光斑面积也不能太小, 通常光斑直径尺寸 $2r$ 为探测器直径尺寸 $2R$ 的一半^[11]。结合工程实际经验, 即探测器响应度差异, 光斑直径应稍大于探测

器直径尺寸, 这样可在测量范围内使测量偏差保持在合理的限度内^[12-13]。另外线性视场范围内各个视场光斑直径尺寸应大小一致, 偏差量控制在 5% 以下。总之, 回波光斑尺寸与光学系统视场大小密切相关, 要结合探测器的几何尺寸以及系统的灵敏度和角跟踪误差的要求, 通过优化光学系统的设计来进行合理选择。

3.1.2 对光学系统像差要求

实际光学系统都存在一定像差, 在设计时必须对其进行控制, 对四象限探测光学系统进行像差控制最主要的目的是保证聚焦光斑内能量分布均匀。系统中目标指示器光源都是波段较窄的激光器, 在探测接收光学系统中会加入窄带滤光片, 因而不存在色差, 只需要考虑球差、彗差、像散、场曲、畸变等 5 种单色像差。球差影响光斑的大小而不影响其分布对称性; 彗差、像散、场曲和畸变这 4 种像差的产生将影响光斑分布的均匀性^[14-16]。但需要注意的是激光制导四象限探测光学系统是能量探测系统, 属于大像差系统, 主要作用是接受能量, 因此需校正的像差和评价方法不同于成像系统。成像光学系统优化设计方法是以寻找最小光学弥散斑为目标, 而不考虑能量分布是否均匀。激光探测光学系统在优化设计时, 要摒弃光学设计软件的自动优化功能, 人为地加入操作数去校正球差之外的那 4 种非对称像差, 以达到优化光线非对称性的作用^[17]。对于球差, 首先在光斑聚焦焦面位置处将其控制在合理的范围内, 然后调节四象限探测器离焦距离, 使线性视场范围内各个视场光斑直径尺寸满足四象限探测光学系统对光斑尺寸的要求。

3.2 光学系统设计

3.2.1 光学系统技术指标

- (1) 波长 λ : 1 064 nm;
- (2) 通光口径 D : $\geq \Phi 20$ mm;
- (3) 视场 2ω : $\pm 12^\circ$;
- (4) 线性视场 $2\omega'$: $\pm 6^\circ$;
- (5) 角精度: 优于 0.3° ;
- (6) 光敏面尺寸: $\Phi 10$ mm。

3.2.2 设计结果

光学系统设计时尽可能简化其结构形式、减轻重量。根据指标要求, 利用 ZEMAX 软件进行

优化设计,最终采用两片材料为 ZF2 的单透镜片实现系统 $12^\circ (\pm 6^\circ)$ 大线性视场指标,并将滤光片放置在两片单透镜之间,减小了滤光片入射角度,降低了滤光片的设计加工难度,保证了波长的稳定性,降低了成本。设计结果如图 2 所示。

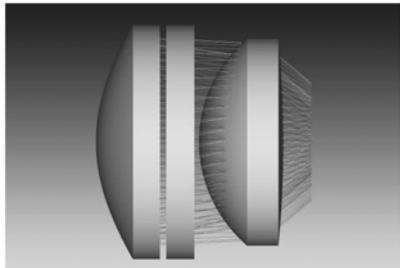


图 2 光学系统三维图
Fig. 2 3D optical diagram

光学系统入瞳 D 为 22 mm, F 数为 0.8, 系统总长为 23 mm, 总质量为 18.4 g。通过优化透镜曲率半径和镜片间的距离来减小 5 种单色像差, 同时为了减小不同视场光斑大小的差异性, 在第一个透镜的第一面使用了二次非球面。

3.2.3 像质评价

探测光学系统主要关注光斑能量分布均匀性, 因此不能用成像系统的传统评价方法, 一般主要是通过点列图、光线足迹图、包围能量分布图来评价。

(1) 点列图

点列图可以反映不同视场的光斑大小及能量分布, 对分析光斑分布均匀性有一定指导意义, 图 3 分别给出了 0° 、 3° 、 6° 、 8° 和 12° 视场的光斑点列图。

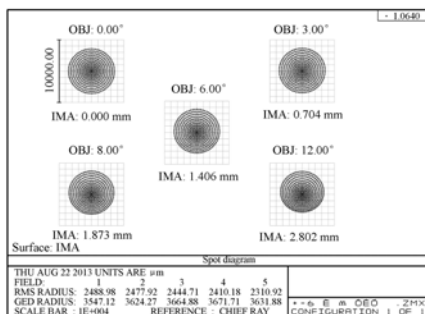


图 3 光学系统点列图
Fig. 3 Spot diagram of optical system

从图 3 中可以看出, 0° 、 3° 、 6° 、 8° 和 12° 视场光斑直径大小分别为 7.1、7.25、7.3、7.3、7.3 mm, 最大偏差量小于 3%, 且光线分布比较均匀, 满足四象限探测对光斑尺寸的要求。

(2) 光线足迹图

光线足迹图主要是为了显示不同视场光斑在探测器光敏面的位置, 可以直观地得到光斑和探测器中心的相对位置, 图 4 分别给出了 0° 、 6° 和 12° 时光斑的痕迹图。

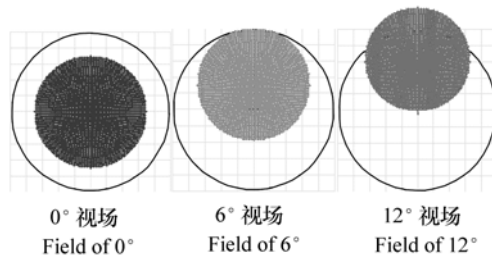


图 4 光斑痕迹图
Fig. 4 Spots footprint

由图 4 可以看出, 视场为 6° 时, 光斑边缘刚好和探测器边缘重合, 满足线性视场 $\pm 6^\circ$ 的指标要求。

(3) 包围能量分布曲线

圆内能量是像直径函数的能量百分比, 包含 80% 能量的圆的直径。图 5 给出了不同视场下光斑包围能量分布曲线。

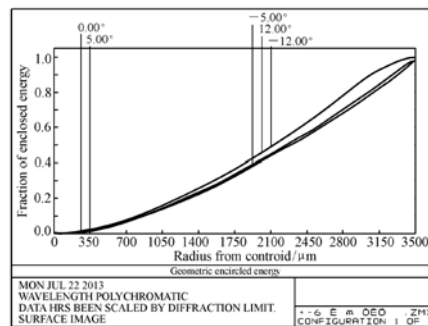


图 5 不同视场包围能量曲线
Fig. 5 Encircled energy curves for different fields

由图 5 可以看出, 各视场光斑能量的分布均匀一致, 可以较好地满足系统的使用要求。

3.2.4 系统仿真

利用 TracePro 光学分析软件, 进行仿真建模

分析,如图6所示。分别对0°、3°、6°视场追迹光线,得到不同视场探测器上的光斑分布情况,如图7所示。

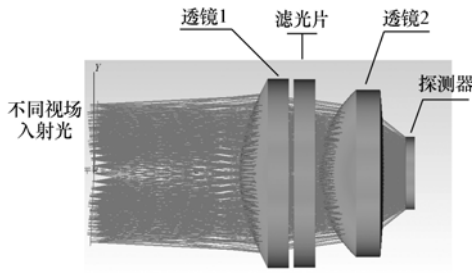


图6 系统仿真

Fig.6 System simulation

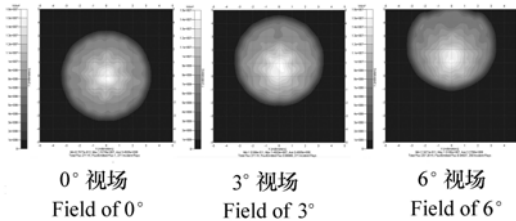


图7 不同视场光斑分布情况

Fig.7 Spots distribution for different fields

由图7可以看出,仿真结果与设计结果一致,各视场光斑能量分布较均匀,设计结果可行,可较好地满足系统的使用要求。

4 实验测试

完成四象限探测光学系统加工装配后,利用1 064 nm光源、平行光管、精密转台和示波器搭建实验平台,对系统进行线性视场测试。光学系统和探测器均关于方位轴和俯仰轴对称,在系统测试时可将目标和四象限探测系统俯仰调平,只改变目标方位角观测探测系统输出特性。实验系统

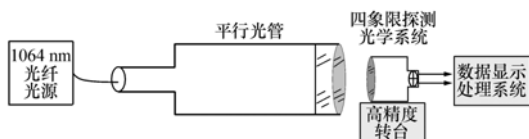


图8 实验系统原理框图

Fig.8 Principle diagram of testing system

原理图如图8所示。

4.1 线性视场测试

1 064 nm光经平行光管后出射为平行光束,再经过探测光学系统聚焦到四象限探测器光敏面上,探测器将光信号转换为电信号。命令控制使高精度转台转动范围为-12°~12°(相对值),每次转动1°,数据采集处理后与理论式(1)、(3)进行对比,如图9所示。

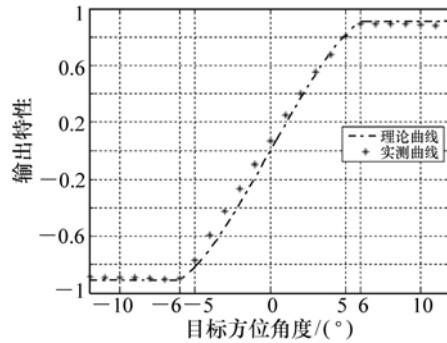


图9 线性视场曲线

Fig.9 Linear field curve

图9可以看出线性视场测试曲线与理论曲线符合,四象限探测系统线性视场为±6°,满足指标要求。

4.2 角精度测试

线性视场内测角精度是探测系统中另一重要

表1 角精度测量数据

Tab.1 Testing data of angle precision (°)

序号	转台角度	系统角度	偏差
1	-6	-5.89	-0.11
2	-5	-4.90	-0.10
3	-4	-3.93	-0.07
4	-3	-3.00	0.00
5	-2	-2.08	0.08
6	-1	-1.08	0.08
7	0	-0.01	0.01
8	1	0.91	0.09
9	2	1.95	0.05
10	3	2.95	0.05
11	4	3.91	0.09
12	5	4.87	0.13
13	6	5.92	0.08

指标要求,也是验证四象限探测光学系统性能的一项重要参数。本系统测角精度数据见表1。

表1表明,四象限探测系统在 $\pm 6^\circ$ 线性视场内测角精度优于 0.15° ,极好地满足系统使用要求。

5 结 论

激光探测光学系统设计的好坏,对系统探测

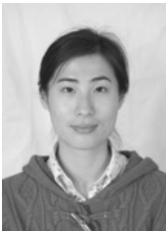
性能起着非常重要的作用。本文对采用四象限探测器的光学系统设计进行了深入细致的探讨。根据系统对光斑均匀性的要求,对光学系统设计时的像差进行分析,总结其像差校正的特点,结合系统指标要求,研制一套线性视场为 12° 的光学系统,其线性视场实测曲线与理论曲线相符,测角精度优于 0.15° ,充分验证设计过程的准确性。系统结构形式简单,重量轻,较好地满足了激光探测系统的使用要求。

参考文献:

- [1] 金岚.“红土地”与“铜斑蛇”之争[J]. 兵器知识,1996(2):18-20.
JIN L. Dispute between HONG Tu-di and TONG Ban-she[J]. *Ordnance Knowledge*,1996(2):18-20. (in Chinese)
- [2] 鲍海阁. 国外激光半主动寻的制导武器的发展[J]. 舰船电子工程,2010,30(5):21-25.
BAO H G. Development of the laser semi-active homing guidance weapons[J]. *Ship Electronic Engineering*,2010,30(5):21-25. (in Chinese)
- [3] 李娜,王红. 激光驾束观瞄制导仪参数检测系统[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(3):285-289.
LI N,WANG H. Parameter testing system for laser-beam riding guided sighting instrument[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Optics*,2010,3(3):285-289. (in Chinese)
- [4] 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.
SHEN Y F,DENG F L,KE X ZH. 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)
- [5] 刘宁,柴金华. 四象限光电探测器在激光光学系统中的典型应用分析[J]. 光机电信息,2009,26(1):43-49.
LIU N,CHAI J H. Analysis of applications of quadrant photodetectors to modern optical systems[J]. *OME Inpormtions*,2009,26(1):43-49. (in Chinese)
- [6] 王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展[J]. 红外与激光工程,2007,36(5):651-656.
WANG K B. Status quo, key technology and development of laser quided weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2007,36(5):651-656. (in Chinese)
- [7] 崔子浩,付石友. 基于905 nm 激光器的激光跟踪系统研究[J]. 激光与红外,2010,40(9):950-953.
CUI Z H,FU SH Y. Research on laser tracking system based on 905 nm laser[J]. *Laser and Infrared*,2010,40(9):950-953. (in Chinese)
- [8] NISLSEN T T. Pointing,acquisition and tracking system for the free space laser communication system[J]. *SPIE*,1995,2381:2.
- [9] 林志琦,李会杰. 用四象限光电探测器获得光斑参数[J]. 光学精密工程,2009,17(4):764-770.
LIN ZH Q,LI H J. Obtaining spot parameters by quadrant photodetectors[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(4):764-770. (in Chinese)
- [10] 张雷,张国玉. 影响四象限探测器探测精度的因素[J]. 中国激光,2012,39(6):1-5.
ZHANG L,ZHANG G Y. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector[J]. *Chinese J. Lasers*,2012,39(6):1-5. (in Chinese)
- [11] YANHAI Y. The design of echo spot and optical focusing in automatic laser tracking[J]. *Optics and Laser Technology*,1986,18(2):75-79.
- [12] KAZOVSKY G. Theory of tracking accuracy of laser systems[J]. *Optical Eng.*,1983,22(3):339-347.
- [13] 王仕成,刘源. 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.

- WANG SH CH, LIU Y. Hardware-in-the-loop simulation technology for size of laser facular of laser guided weapon[J]. *Opto-Electronics Eng.*, 2009, 36(9):1-5. (in Chinese)
- [14] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- WANG ZH J. *Theoretical Foundation of Optical Design*[M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)
- [15] 魏文检, 秦石乔. 像差对激光制导目标方位探测精度的影响[J]. *光学技术*, 2007, 33(S1):142-146.
- WEI W J, QIN SH Q. Influence of optical system aberration on precision of detecting target position in laser semi-active seeking guidance[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(S1):142-146. (in Chinese)
- [16] SANYAL S. Optics for laser seeker[C]. ICOP 2009-International Conference on optics and Photonics, Chandigarh, India, 2009.
- [17] 胡博, 常伟军. 激光半主动制导导引头光学系统的设计[J]. *应用光学*, 2012, 33(2):402-405.
- HU B, CHANG W J. Laser semi-active seeking guided seeker optical system[J]. *J. Appl. Optics*, 33(2):402-405. (in Chinese)

作者简介:



薛珮瑶(1982—),女,陕西大荔人,硕士,工程师,2008年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计及光学应用等方面的研究。E-mail: peiyaoxuenannan@hotmail.com



冯茜(1978—),女,河南郑州人,硕士,工程师,主要从事无线通信等方面的研究。E-mail: seesealady@126.com



吴耀(1987—),男,河南信阳人,硕士,工程师,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事激光雷达及光学应用等方面的研究。E-mail: yang1986423@163.com



李川(1982—),男,河南焦作人,硕士,工程师,2008年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事激光告警及对抗等方面的研究。E-mail: xiaqian123@yeah.net