

引用格式: 闫占军, 杜春雷, 张海军. 激光扫描显示用随机微透镜阵列扩散屏设计[J]. 电光与控制, 2020, 27(2): 98-102. YAN Z J, DU C L, ZHANG H J. Design of a random microlens array extended screen for laser scanning display[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2): 98-102.

## 激光扫描显示用随机微透镜阵列扩散屏设计

闫占军<sup>1,2,3</sup>, 杜春雷<sup>1</sup>, 张海军<sup>3</sup>

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 与传统 DMD 数字显示相比, MEMS 激光扫描显示具有高对比度、无背景光晕等优势, 然而单根细激光束发光角度极小, 需要进行扩展, 同时消除激光相干引起的散斑, 以提高显示性能。提出了将 2DR-SPP 用于随机微透镜阵列激光扫描显示扩展屏的结构设计, 同时开发了激光直写热熔技术, 实现了激光扫描显示屏的精确制作, 最终获得发散角 70° 以上, 均匀性 70% 以上, 光能利用率 90% 以上的消散斑激光扫描显示扩展屏, 可应用于机载和车载激光扫描显示系统。

**关键词:** 激光扫描显示; MEMS; 随机微透镜; 扩展屏

中图分类号: V271.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.021



## Design of a Random Microlens Array Extended Screen for Laser Scanning Display

YAN Zhanjun<sup>1,2,3</sup>, DU Chunlei<sup>1</sup>, ZHANG Haijun<sup>3</sup>

(1. Chongqing Institutes of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Compared with traditional DMD digital display, MEMS laser scanning display has the advantages of high contrast and no background halo. However, the single fine laser beam emits light at a very small angle, which needs to be extended, and the speckle caused by laser coherence should also be eliminated to improve the display quality. The structural design of a random microlens array extended screen for laser scanning display was put forward based on 2DR-SPP algorithm. The laser direct writing hot melting technology was developed to realize the accurate production of the laser scanning extended screen. Finally, the extended screen of laser scanning display with speckle eliminated was obtained, which has a divergence angle of above 70°, a relative uniformity of luminance of above 70%, and an efficiency of energy utilization of above 90%. The extended screen can be used in laser scanning display systems onboard the aircrafts and ground vehicles.

**Key words:** laser scanning display; MEMS; random microlens; extended screen

### 0 引言

依据全球平显市场发展预测与分析, 激光扫描显示被称为继光波导显示<sup>[1-2]</sup>之后的第四代显示技术。激光扫描显示技术的突出优点是低能耗、高对比度和亮度, 无背景光晕, 即使在夜间弱光室外环境下, 也可以同时清晰观察到显示画面和外景图像, 可以简化系统, 而且色彩亮度动态范围宽, 从而显著改善显示观察

舒适性、复杂环境可靠性, 提高人机效能。

激光扫描显示技术作为先进显示技术而得以被广泛关注<sup>[3-6]</sup>。从理论研究、高性能元器件研制、系统集成到产业化应用示范均有布局。然而单根细激光束发光角度极小, 需要进行扩展, 同时抑制激光相干引起的散斑, 以提高显示性能。扩展屏是激光扫描显示系统的关键元件, 具有消散斑、扩束、匀化等多种复合功能, 在激光扫描显示技术中发挥着重要作用<sup>[7-11]</sup>。

目前, 市场所能获得的扩展显示屏类似产品为工程漫射体, 利用随机分布的微结构实现匀光、扩束和消散斑的功能<sup>[12-13]</sup>。随机微透镜阵列作为激光扫描显

收稿日期: 2019-09-25

修回日期: 2019-11-28

作者简介: 闫占军(1986—), 男, 河南洛阳人, 博士生, 高工, 研究方向为精密仪器、衍射光学及显示技术。

示扩展屏,具有良好的光束匀化、较大发光角度扩展效果,随机分布还可以进一步消除激光相干作用,抑制散斑效应。Thorlabs 公司和 RPC Photonics 公司已经开发出随机微透镜阵列扩展屏器件,然而随机分布设计和工艺制备方法却鲜有介绍,尚无系统的理论设计或工艺技术分析。工艺上采用湿法腐蚀技术,可以在石英上刻蚀出随机排布龟裂状的微结构方式,但微结构的扩散及消散斑能力主要取决于石英在氢氟酸中的纵横向腐蚀性质,角度不可控、均匀度不高,难以满足激光扫描显示系统的需求。

本文将二维矩形条带装箱问题(2D Rectangular Strip Packing Problem, 2DR-SPP)用于激光扫描显示随机分布微透镜阵列扩展屏的设计,分析了设计方法和工艺技术方法。通过随机布置微透镜的底面边长从而打破其随机相干性。利用透镜数值孔径决定其发散角的原理,将单透镜的数值孔径设计成固定值,最终达到匀化及抑制散斑的目的。同时开发了激光直写热熔工艺技术,实现激光扫描显示扩展屏的精确制作。该设计有利于促进激光扫描显示技术的发展,可应用于机载和车载激光扫描显示系统。

### 1 激光扫描显示扩展屏设计

#### 1.1 随机单透镜的光学结构设计

本文采用随机微透镜阵列作为激光扫描显示扩展屏,激光器发出细激光束经 MEMS 二维扫描振镜反射后入射在扩展屏上,形成发光角度扩展的发散光,由于激光具有相干性,微透镜阵列随机分布抑制散斑。激光扫描显示用随机微透镜阵列扩展原理,如图 1 所示。

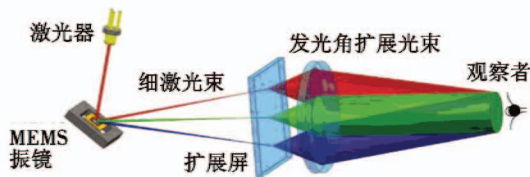


图 1 激光扫描显示用随机微透镜阵列扩展原理

Fig. 1 The principle of random micro-lens array extended screen for laser scanning display

影响透镜扩展角的关键因素为透镜的数值孔径,数值孔径正比于微透镜的口径  $D$ ,反比于其曲率半径  $R$ 。为了保证其在特定发散角  $\theta$  范围内具有良好的均匀性,要求每个微透镜的数值孔径相同,即口径  $D$  与曲率半径  $R$  的比值为常数,如:

$$\sin(\theta/2) = D/R \quad (1)$$

#### 1.2 随机透镜阵列设计算法

为了消除周期相干造成的散斑效应,需将进一步将透镜口径随机分布控制,从而抑制激光入射光束的相

干性。随机分布点的常规优化算法数据量惊人,而且无法避免各种盲点出现。为解决此问题,借鉴装箱问题算法:将透镜底面设置为长方形,以实现无缝设计,避免缺陷点出现,优化长( $H$ )和宽( $W$ )2个参数,转化为解决二维矩形条带装箱问题。2DR-SPP 是指将若干个不同尺寸大小的矩形( $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n$ )装进长度  $H$  未知、宽度  $W$  固定的矩形区域  $C$  中,要求每个矩形不重叠,同时装箱完毕之后,区域所需要的长度  $H$  最小,以达到节约空间、保持空间规划紧凑的目的。

2DR-SPP 是一个 NP 完全问题,其时间复杂度随着问题规模的增大呈指数增长。实际常见的问题中,待装箱矩形一般不超过 100 个,常见的二维装箱算法可以快速而精确地处理,而本文中的矩形数量大于 10 000 个,若使用常规方法求解,其时间复杂度变得无法接受,现有常规工作站根本无法完成如此巨大的计算量。因此采用启发式布局算法,即底部左齐择优匹配算法(Lowest-level Left Align Best Fit, LLABF)来解决本问题。LLABF 规定了 5 种匹配优先规则:完全匹配、宽度匹配、高度匹配、组合宽度匹配及可装入优先匹配。在装箱过程中先按照上述 5 种匹配规则寻找合适的矩形,再进行装箱。因装箱之前有 5 个优化匹配,可大大减少装箱搜索时间,缓解时间复杂度过大问题。随机微透镜阵列设计 LLABF 2DR-SPP 算法如图 2 所示。

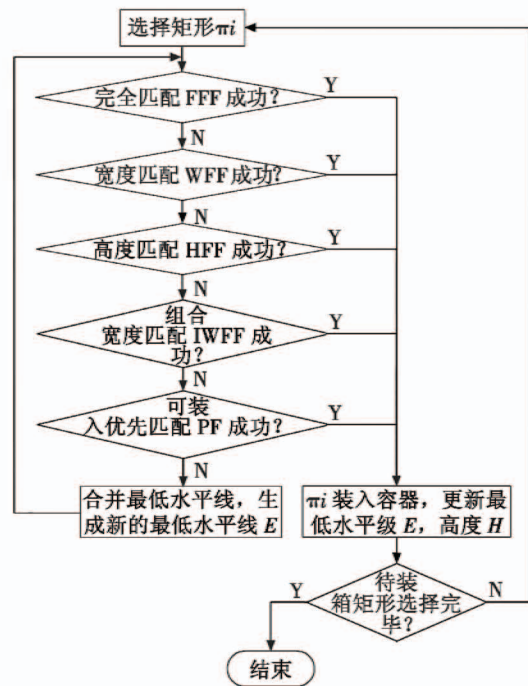


图 2 随机微透镜阵列设计 LLABF 2DR-SPP 算法

Fig. 2 The LLABF 2DR-SPP algorithm for the design of random micro-lens array

#### 1.3 随机透镜阵列精确设计

随机微透镜阵列以矩形底面轮廓微透镜作为激光



扫描显示扩展屏的基本单元,本文将长方形的长( $H$ ),宽( $W$ )随机分布在  $10\ \mu\text{m}$  到  $100\ \mu\text{m}$  之间,球冠所形成的圆为长方形的外接圆。图3为微透镜单元模型示意图。

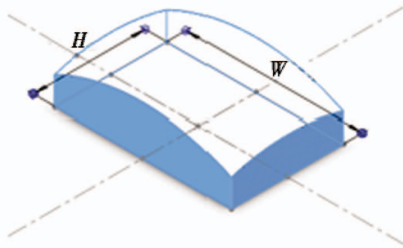


图3 微透镜单元模型示意图

Fig.3 Single micro-lens model

最终阵列结构如下:

- 1) 生成大于 10 000 个如上所述的几何体,其球半径大小随机,但对角线与曲率半径比值为常数;
- 2) 单个体紧密排列,实现光能的全部利用,而且避免缺陷区光直接透射,影响照明均匀性;
- 3) 设计基底图形区,然后将其阵列化,这样既减少运算时间,又保证样品单元图形区大于入射激光光斑尺寸,避免周期性带来的干涉增强散斑状况。

利用本文算法设计的随机微透镜阵列,排布的随机微透镜结构随机性较好,而且基本无缺陷,可将其进一步转化为掩模板激光直写机的加工图纸。

## 2 扩展屏制作工艺

随机的连续面形微浮雕结构实现的方式包括热熔法、移动掩模法、激光直写法等。其中,采用传统热熔法,首先把光刻胶制作成孤立的微柱结构,然后通过加热融化的方式使其流动成球冠状结构,该技术成本较低,效率较高,但单透镜之间的间隙导致光能利用率较低,消散斑的情况较差。基于移动掩模法的微透镜制作,受到掩模板数据量较大的限制,加工精度较低,通常能够制作的微透镜边长为  $100\ \mu\text{m}$  以上,尚达不到  $10\sim 100\ \mu\text{m}$  口径的微透镜要求。激光直写法可以个性化制作,比较适合随机微透镜阵列的制作,但直接制作连续面形结构,同样受到数据量较大的影响,甚至造成文件打不开的情况。

为解决随机微透镜阵列制作的问题,本文提出直写台阶随机微透镜阵列热熔成型技术。随机微透镜阵列制备工艺流程如图4所示。首先将随机的微透镜阵列设计图离散成台阶结构,将其输入计算机,并对每个台阶赋予相应的灰度值,然后将光刻胶基片通过匀胶烘焙准备好,接着放于激光直写机进行灰度曝光处理,再进行显影并后烘热熔成所需形状,最后通过等离子刻蚀机刻蚀出所需石英激光扫描显示扩展屏。

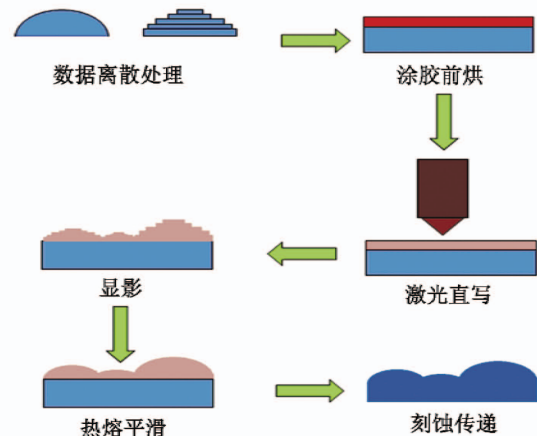
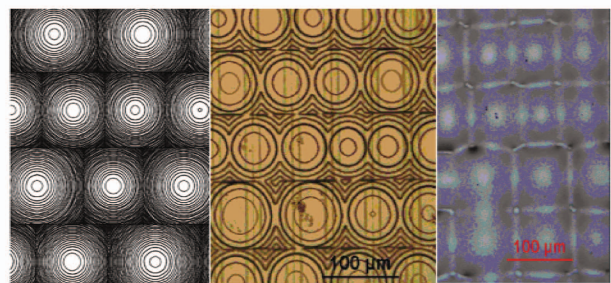


图4 随机微透镜阵列制备工艺流程

Fig.4 The fabrication technology procedures for random micro-lens array

首先将连续面形随机微透镜编码为 8 个台阶,然后输入激光直写系统。各个台阶的灰度赋值原则为进行光吸收系数矫正后,不同台阶对应深度按线性编码,从 0~128 阶灰度值按 8 台阶均分赋值。光刻胶采用 AZ4562 型光刻胶,涂胶厚度  $20\ \mu\text{m}$ ,  $80\ ^\circ\text{C}$  热板烘烤,持续时间 5 min。激光直写采用 DWL66FS 系统,曝光剂量选作 70%。显影液采用 MIF300,显影 60 s,然后置于  $120\ ^\circ\text{C}$  热板后烘热熔 2 min。最后置于等离子体刻蚀机中传递刻蚀,采用三氟甲烷 ( $\text{CHF}_3$ ) 与六氟化硫 ( $\text{SF}_6$ ) 两种气体,刻蚀持续时间 10 h,最后形成所需的随机微透镜结构激光扫描显示扩展屏。随机微透镜阵列微观结构照片如图5所示。显影前台阶随机微透镜阵列微观结构照片如图5(a)所示,与设计图形基本吻合。显影、热熔并刻蚀后连续随机微透镜阵列微观结构如图5(b)所示,同样达到设计需求。



(a) 掩模版设计 (b) 显影前台阶分布 (c) 显影后连续分布

图5 随机微透镜阵列微观结构照片

Fig.5 Microstructures of stochastic micro-lens array

## 3 实验结果及数据分析

为了得到扩展均匀性,采用两片随机微透镜阵列组合使用<sup>[12-13]</sup>,因此激光扫描显示扩展屏为两个胶合的随机微透镜阵列屏,胶合方式采用结构面相对隔空



胶合,器件材料选用熔融石英,两外表面镀增透膜使其具有较好的透过率。单微透镜阵列屏与双微透镜阵列屏对比情况如图 6 所示。

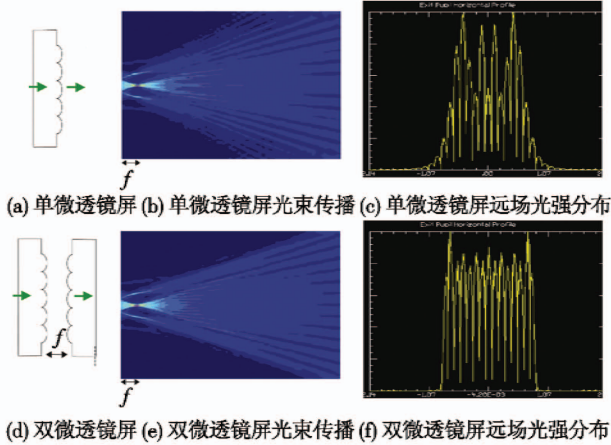


图 6 单微透镜阵列屏与双微透镜阵列屏对比示意图

Fig. 6 Single micro-lens array screen and dual micro-lens array screen

根据图 6 所示远场光强分布曲线可知,相对于单微透镜屏,双微透镜屏的远场光强分布曲线峰值间距紧密,发光区域内整体的光强分布连续性增强,光强分布均匀性提高,因此双微透镜阵列屏的光束扩展更加均匀。

光能利用率采用能量计测量,先测量入射激光直接入射的功率为 1 W,然后透过双微透镜阵列屏,使得投射光斑全部处于探测面上,测量投射功率为 0.905 W,即光能利用率达 90.5%。

对于光斑的均匀性及扩散角,本文通过德国摄像式亮度计拍摄照明光斑,然后通过仪器自带软件进行亮度分布及图像边缘分析。消散斑激光光斑,如图 7 所示,进行图像处理得出扩散角与亮度之间的关系。

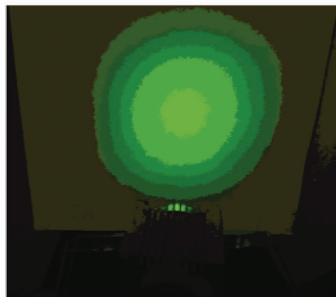


图 7 消散斑激光扩展光斑

Fig. 7 Extended laser spot with speckle eliminated

扩散角与亮度分布测试结果如图 8 所示。根据图 8 可知,横向扩展角度约为  $\pm 35^\circ$ ,纵向扩展角度同样约为  $\pm 35^\circ$ ,具有较好的一致性,同时纵向与横向光斑均匀性均大于 70%,满足国家标准中关于显示屏发光角范围内亮度衰减不超过 40%的要求。

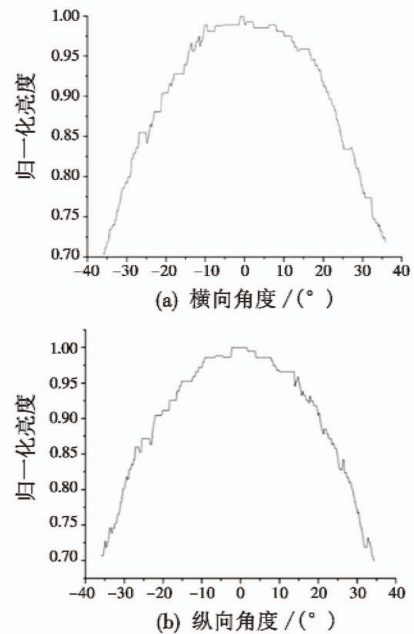


图 8 扩散角与亮度分布测试

Fig. 8 Test of divergence angle and brightness distribution

### 4 结论

本文给出了基于 LLABF 2DR-SPP 算法的激光扫描显示用随机微透镜阵列扩展屏的设计方法,同时开发了直写台阶随机微透镜阵列热熔成型技术,实现了激光扫描显示屏的精确制作,最终获得发散角达  $70^\circ$  以上,均匀性达 70% 以上,光能利用率达 90% 以上,满足国家标准中关于显示屏发光角范围内亮度衰减不超过 40% 的规定,且肉眼观察无明显散斑,具备优异的性能。可适用于机载和车载激光扫描显示系统,并能促进激光扫描显示技术的推广应用。

### 参考文献

- [1] LEE Y H, YIN K, WU S T. Reflective polarization volume gratings for high efficiency waveguide-coupling augmented reality displays[J]. Optics Express, 2017, 25(22):27008.
- [2] LIU A, ZHANG Y N, WENG Y S, et al. Diffraction efficiency distribution of output grating in holographic waveguide display system[J]. IEEE Photonics, 2018, 10(4):1-10.
- [3] WINTER C, FABRE L, CONTE F L, et al. Micro-beamer based on MEMS micro-mirrors and laser light source [J]. Procedia Chemistry I, 2009, 1311-1314.
- [4] NIESTEN M, SPRAGUE R, MILLER J. Scanning laser beam displays [C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2008, 7001:70010E-10.
- [5] HARDING T H, RASH C E, DENNIS S J. Evaluation of Mi-



- crovision SD2500 scanning laser display [C]//Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2006.
- [6] ROSCHER K U, GRAETZ H, SCHENK H, et al. Low-cost projection device with a 2D resonant microscanning mirror [C]//Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2004:22-31.
- [7] 刘红,王蔚生,郑健. 激光显示中消散斑方案研究[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(6):33-37.
- [8] 梁传祥. 激光投影显示光学系统关键技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [9] 唐国贤,石云波,刘俊,等. 基于微型光机电系统扫描镜技术的激光散斑抑制方法[J]. 激光与光电子学进

- 展, 2011, 48(6):105-109.
- [10] ZHU R D, HONG Q, GAO Y T, et al. Tailoring the light distribution of liquid crystal display with freeform engineered diffuser[J]. Optics Express, 2015, 23(11):14070-14084.
- [11] 程志远,李治国,折文集,等. 激光相干场成像散斑噪声复合去噪方法[J]. 物理学报, 2019, 68(5):154-160.
- [12] SALES T R M. Structured microlens arrays for beam shaping[J]. Optical Engineering, 2003, 42(11):3084-3085.
- [13] MORRIS G M, SALES T R M, SHAKMAKJIAN S, et al. Engineered diffusers for display and illumination systems: design, fabrication, and applications [J]. Optical Engineering, 2013, 42(3084):1-11.

(上接第 63 页)

表 4 自对准结果

Table 4 Self-alignment results

序号	补偿前对准值/(°)	补偿后对准值/(°)	序号	补偿前对准值/(°)	补偿后对准值/(°)
1	177.7794	177.6986	12	177.7839	177.7014
2	177.7787	177.6971	13	177.7712	177.6910
3	177.7820	177.7009	14	177.7756	177.6964
4	177.7686	177.6894	15	177.7681	177.6886
5	177.7644	177.6856	16	177.7719	177.6899
6	177.7717	177.6965	17	177.7782	177.6969
7	177.7837	177.7025	18	177.7819	177.7015
8	177.7748	177.6956	19	177.7883	177.7033
9	177.7770	177.6986	20	177.7748	177.6925
10	177.7749	177.6922	极差/(")	85	63
11	177.7698	177.6887			

从表 4 可以看出,补偿后旋转式惯导内杆臂自对准精度提升了 35%。

## 4 结论

本文针对旋转式惯导系统,分析了旋转式惯导自对准过程中因转动带来的杆臂误差影响,结合杆臂误差模型,提出了一种利用自对准流程标定旋转式惯导内杆臂的方法,该方案无需额外的标定流程,能方便地进行工程应用。测试试验验证了本文方法的有效性。

## 参考文献

- [1] SAVAGE P G. Strapdown analytics [M]. Maple Plain: Strapdown Associates, 2000.
- [2] 孙伟. 旋转调制型捷联惯性导航系统[M]. 北京:测绘出版社, 2014.
- [3] 郭琦,周召发,徐梓皓,等. 单轴旋转惯导系统误差传播特性分析[J]. 电光与控制, 2016, 23(12):18-22.
- [4] 胡华峰,刘明,李旦,等. ADOP 可观测性分析方法在旋转式惯导初始对准中的应用[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(5):33-40.
- [5] 徐海刚,郭元江,李志峰,等. 旋转调制光纤陀螺惯导寻北精度探索[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(3):11-15.
- [6] 崔鹏程,邹志勤,王翌,等. 杆臂效应误差对晃动基座粗对准的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(4):462-466.
- [7] 程向红,仲小丽,冉昌艳,等. 箭载 SINS 杆臂效应频域处理方法[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(1):61-64.
- [8] 王海明,李四海. 弹载惯组的杆臂效应补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(3):332-335.
- [9] 胡华峰,刘明,李旦,等. 可观测性分析方法探讨及其在初始对准中的应用[J]. 电光与控制, 2016, 23(4):75-80.