

水下激光周视扫描 $4f$ 发射光学系统设计

钟 昆, 苏 伟*, 彭 波, 黄莎玲

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对水下激光周视扫描环窗设计的缺点, 提出一种转移扫描基点的发射光学系统设计方法。该方法基于开普勒望远镜的结构, 通过对物镜和目镜组分别采用像方远心方法进行共轭设计并加以畸变控制, 对光束的发散角及其分布均匀性进行了优化。在优化设计的基础上, 分别仿真分析了平板窗和共形窗对光束质量的影响, 以及镀膜对能量传输效率的影响。最后, 对不同窗口设计进行了公差分析和水压受力仿真。光学和力学仿真结果表明, 该方法有效减小了壳体表面开窗面积, 避免了环窗设计造成的扇形探测盲区, 对水下激光周视扫描发射系统的工程设计具有一定的指导意义。

关键词: 水下探测; 激光扫描; 周向探测; 像方远心

中图分类号: TJ430 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200277

Design of $4f$ emission optical system for underwater laser circumferential scanning

Zhong Kun, Su Wei*, Peng Bo, Huang Shaling

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the design of the underwater laser peripheral scanning ring window, a design method of the transmitting optical system that shifted the scanning base point was proposed. This method was based on the structure of Kepler telescope. The divergence angle of the beam and its distribution uniformity were optimized by adopting the image-side telecentric method for the conjugated design and distortion control of the objective lens and the eyepiece group. On the basis of the optimized design, the influence of the flat window and the conformal window on the beam quality and the influence of the coating on the energy transmission efficiency were simulated and analyzed respectively. Finally, tolerance analysis and hydraulic simulation of different window designs were carried out. The simulation results of optics and mechanics show that the method effectively reduces the window area of the shell surface, avoids the blind area of the fan-shaped detection caused by the design of the ring window, and has certain guiding significance for the engineering design of the underwater laser peripheral scanning emission system.

Key words: underwater detection; laser scanning; circumferential detection; image-side telecentric

0 引言

水下蓝绿激光具有准直性好、定位精度高、抗干扰能力强等优点,在水下通信和探测领域得到广泛应用^[1-3],主要应用领域包括水下光通信^[4-7]、水下测距成像^[8-13]、海底地形探测^[14-17]、近程交会探测^[18]等方面。水下光通信研究主要集中在通过光束调制增加传输容量,减少传输损耗和误码率,如 Li 和 Cheng 等分别研究了拉盖尔-高斯涡旋光不同调制模式下的传输能力和信道容量^[19-20]。水下测距成像研究常使用距离门选通方式,如加拿大的 LUCIE 系统^[21]和欧洲的 SeaLVi 系统^[22],但距离门选通将在选通门外产生探测盲区,而且扩束照明使能量随距离衰减加快,不利于对非合作目标的探测,Aurora 等研究的单光子探测系统需要用统计方式成像^[12],不适合实时探测。海底地形探测常采用扫描探测方式^[23]。Ouyang Bing 等研制了压缩感知成像系统,采用数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)将光场进行压缩编码,对载具驶过的海底区域进行扫描还原^[24]; Simon Stemmler 等研制了飞行时间激光扫描探测系统,通过旋转 8 棱镜发射线光束进行扫描探测,可以重建水下物体的三维图像^[25]; Tu Dawei 等设计的系统则通过旋转平面镜发射激光条纹进行扫描探测实现三维探测^[26]。上述系统主要对海底静态的地形和物体进行探测,扫描区域在一固定窗口,无法周向覆盖。查冰婷、甘霖等提出周向扫描的探测系统^[10, 18]:该系统在舱壁开环形窗,通过旋转轴心平面镜实现光束的周向发射,可实现对近程交会的非合作运动目标的周向探测。但该方案要求几乎整个舱段为透明光学材料,即使用金属加强筋进行加固,仍可能因受到冲击造成窗口损坏。另外,若近程探测的目标为水下小型高速运动目标,所需光束的发射频率较高,相邻发射光束间隔角度较小,当相邻发射光束夹角小于加强筋的圆周角时,会给目标探测带来一定的扇形盲区。为解决环窗结构光学窗口面积过大带来的结构强度不足和加强筋带来扇形盲区问题,文中提出一种转移扫描基点的发射系统。通过该系统将发射光束扫描中心,从圆柱舱段中轴转移到舱体壳体下表面附近,并且重整了扫描的总视场角。不但大大减小了壳体开窗所需的面积,消除了加强筋带来视场盲区,而且避免了环窗

设计光路对舱内空间的占用。Zemax 系统的仿真结果表明,该设计可较好地满足水下周视探测的发射系统的需求。

1 系统总体设计思路

系统设计的总体要求是:舱内半径为 160 mm,以转镜反射点中心作为起点,舱内光路总长度应小于 160 mm。探测系统要求探测光束间隔均匀,由于像场畸变导致的光束发射角度偏差控制在 1% 以内。该类探测系统要求光束能量集中^[27],典型目标的直径为 300 mm,当要求最大探测距离为 20 m 时,到达目标的光斑直径不超过目标直径的 1/3,则光束发散角不超过 5 mrad。为保证有足够的能量用于探测,镜组的能量传输效率应不低于 95%。

水下单光束周视扫描探测系统在圆柱型载具采用的环形窗设计如图 1 所示。

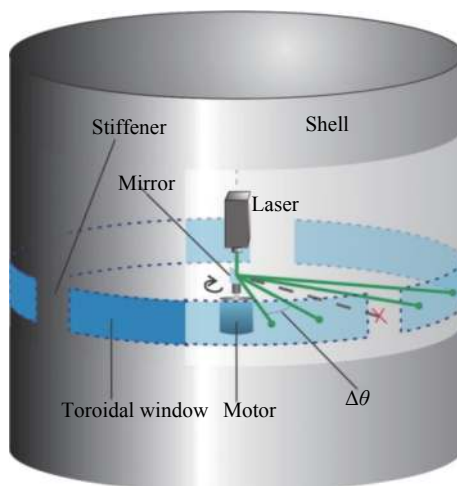


图 1 环窗探测发射系统设计示意图

Fig.1 Sketch of torus window detection transmitting system design

在系统中,激光器以一定的发射频率发射探测光束,驱动马达按激光发射频率同步驱动反射镜以均匀的步进角 $\Delta\theta$ 进行转动,探测光束经过反射镜转向后穿过环形发射窗口,对外部进行周向扫描。虽然使用加强筋进行加固,大面积环形玻璃窗仍带来一定的结构强度风险。另外,加强筋将遮挡部分扫描点,这些被遮挡的发射点将导致周向探测的扇形盲区。且这种方案还受另一局限:由于发射光路中间不能产生遮挡,载具内其他系统的供能和通信走线只能紧贴加强筋舱壁的有限空间进行布置,造成空间利用不便。

为了避免环窗设计带来的上述问题,文中提出了一种利用开普勒望远镜结构转移扫描基点的发射光学系统结构。将出瞳和转镜中心设置在开普勒望远镜结构的物镜前焦点上,通过系统对不同角度 θ_1 入射的光束进行变换,在系统目镜组出瞳位置实现光束以不同角度 θ_2 发射,两组镜片共同组成扫描基点转移系统。在舱体径向上平均排布 6 路镜组,将扫描点从舱体中心转移到舱体表面附近,最后光束通过舱体表面的窗口进入水体进行扫描探测,窗口与舱体采用 O 形圈进行静密封,压圈压接螺纹涂硅橡胶。6 路发射系统结构示意图如图 2 所示。

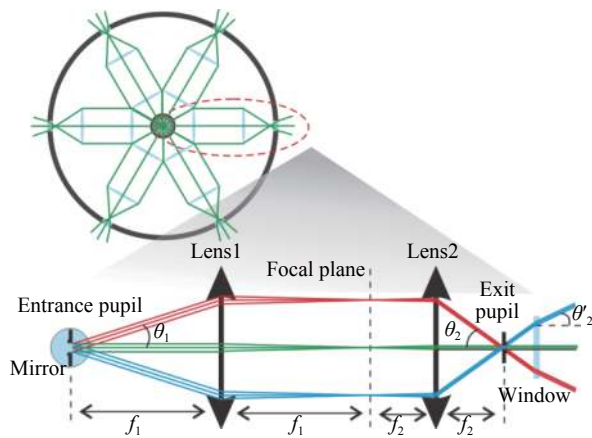


图 2 6 路发射系统示意图

Fig.2 Sketch of 6-group transmitting system

每一路结构中,转镜中心放置在前组入瞳,且恰好位于物方焦点。光源为具有一定面积的高斯光源,而非理想点光源,因此在前组入瞳处设置一定大小的入射光阑,与入射高斯光束束宽相当。若能约束主光线垂直入射像面,前组实际上变成了一个像方远心结构^[28-29],后组结构类似:结构为前组镜向,出瞳位于焦点,像方主光汇聚点位于像方无限远。将前后组焦平面重合,则不同角度平行入射的光束将按一定的对应关系平行出射,从而实现对探测光束发射角度的控制。

与环窗方案不同的是,在 6 路 4f 系统中,光束从上一路镜组到下一路镜组,每个扇区将经历扫描方向的周期性切换,按扇区依次完成 360°扫描。当舱体向前做匀速直线运动时,环窗设计和 4f 设计扫描光束的包络面如图 3 所示。

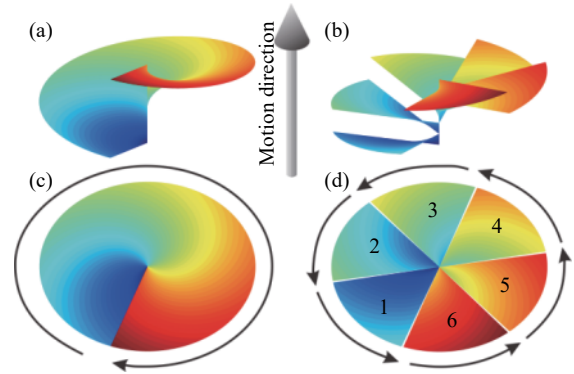


图 3 光束包络: (a), (c) 环窗侧视、俯视; (b), (d) 4f 系统侧视、俯视
Fig.3 Scan beam envelopes: (a), (c) side elevation and platform for toroidal window; (b), (d) side elevation and platform for 4f system

当舱体按图示运动方向前进,位于舱体中轴的马达以顺时针方向驱动中心反射镜时,环窗设计发射光束形成一个螺旋状的连续包络,光束扫描方向也为顺时针方向;而 4f 系统形成扇形的周期性包络,每个扇区的扫描方向为逆时针方向。从弹头方向俯视,如二者初始扫描方向一致,环窗系统将如图 3(b) 顺时针完成扫描;而 4f 系统将按 1~6 的扇区顺序依次完成每个扇区的扫描,每个扇区进行的扫描均按逆时针方向。

2 单路光学系统的优化设计

2.1 初始结构选取与优化

望远镜前组的物镜组通常只具有较小的视场,因此使用一个 3 片式柯克摄影物镜代替望远镜物镜作为前组,采用像方远心设计对前组进行优化。后组的光线传播过程为前组的镜向同样采用像方远心设计优化方法,对优化结构进行反向即可得到后组结构。

激光器发射的高斯光束直径为 1 mm,将物方入瞳直径设置为 1.155 mm,以保证光束以 30°倾角入射时不发生遮挡。

为避免相邻两路的前组镜片不发生结构干涉,每一路前组的总扫描角度应小于 60°,故设置前组的最大有效入射角度 $\theta_{1max}=28^\circ$ 。

为给转镜预留空间,入瞳距离设置为 20 mm。由于探测系统用于海洋环境,对耐潮、耐水、耐候性能具有较高要求,根据成都光明玻璃库的玻璃耐潮、耐水、耐候性能,可选取 H-BAK1 和 H-ZF7LA 玻璃作为镜片材料。

若舱体表面采用平板玻璃作为窗口,由于舱内介质折射率 $n_a=1$,舱外海水折射率 $n_w=1.333$,后组发射角度 θ_2 应大于前组入射角度 θ_1 ,以确保探测光束从每一路的窗口进入水中的最大角度为 $\theta'_2=30^\circ$ 。根据折射定律计算,后组的最大发射角度 θ_{2max} 应为 41.799° 。

较大的 F 数有利于控制像差。因为入瞳直径 d 已经确定,为了增加 F 数,应使镜组具有较大的焦距。不考虑畸变的影响,焦距 f 、像高 y 、视场角 θ 、入瞳 d 、 F 数关系如公式 (1)、(2) 所示:

$$f = \frac{y}{\tan\theta} \quad (1)$$

$$F = \frac{d}{f} \quad (2)$$

发射光路实际上是一个低倍的缩束变倍光路,根据公式 (1) 可得图 2 中前后组焦距的关系:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{y_1 \cdot \tan\theta_2}{y_2 \cdot \tan\theta_1} \quad (3)$$

因此,增加像高可以使镜组获得较大的 F 数。预留给系统的舱段高度 50 mm,故将镜组的最大直径约束到 45 mm 以内,并通过 DMVA 操作数约束前后组的像高均为 40 mm。在不考虑畸变的情况下,与像高和入瞳匹配的相应的前组焦距 f_1 为 37.615mm,后组焦距 f_2 为 22.370 mm。从前组平行入射的光束呈锥状汇聚到像面,为了增大后组 F 数,减小后组设计难度,则光束出射的束宽变窄对设计较为有利,因此前组保留较大的后截距,后组保留较小的后截距较为合理。为前组分配 90 mm 的空间,后组分配 60 mm 的空间,后组的物方光阑到舱体发射窗口表面预留 10 mm 空间。前组、后组的初始的结构参数如表 1 所示。

表 1 初始结构参数

Tab.1 Parameter of original structure

Former group parameter	Value	Latter group parameter	Value
Image height/mm	40	Image height/mm	40
f_1 /mm	37.615	f_2 /mm	22.370
Total length/mm	≤ 90	Total length/mm	≤ 60
Field/(°)	± 28	Field/(°)	± 41.799

首先对前组进行优化,并以前组的优化设计作为后组的初始结构,仍用像方远心设计进行优化,优化

完成将镜组反向,得到的前、后组结构参数,舱内转移光路如图 4 所示。

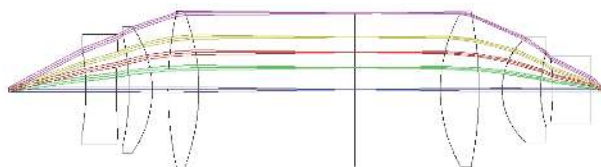


图 4 发射系统结构

Fig.4 Structure of transmitting system

初步优化后的前、后组参数如表 2 所示。

表 2 初步优化后的参数

Tab.2 Parameter after primary optimization

Former group parameter	Value	Latter group parameter	Value
Image height/mm	40.000	Image height/mm	40.000
f_1 /mm	39.669	f_2 /mm	27.045
Total length/mm	90.000	Total length/mm	60.000
Field/(°)	± 28	Field/(°)	± 41.799

初步优化后发射系统的最大发射角度 θ_{2max} 达到 41.799° ,满足出平板窗后覆盖 $\pm 30^\circ$ 扫描视场的要求。

2.2 加窗后发射角度分布优化设计

设计中期望 θ_1 到 θ_2 的映射具有线性关系。按光学设计的一般规则,查看 0、0.3、0.5、0.7、1 等 5 个相对视场入射光线在前、后组像面的高度。由于系统畸变,初步优化的系统中,二者 0° 、 8.4° 、 14° 、 19.6° 、 28° 5 个视场角入射的光线在像面高度的分布并不一致,如表 3 所示。

表 3 前、后组像高

Tab.3 Image height of former and latter group

θ_1 /(°)	Former group image height/mm	θ_2 /(°)	Latter group image height/mm
0	0	0	0
8.4	5.826	12.540	5.903
14	9.743	20.900	9.863
19.6	13.729	29.259	13.706
28	19.990	41.799	19.932

利用畸变命令查看光束以 0.56° 间隔从前组入射,从后组射入空气中的角度分布情况,如图 5 所示。

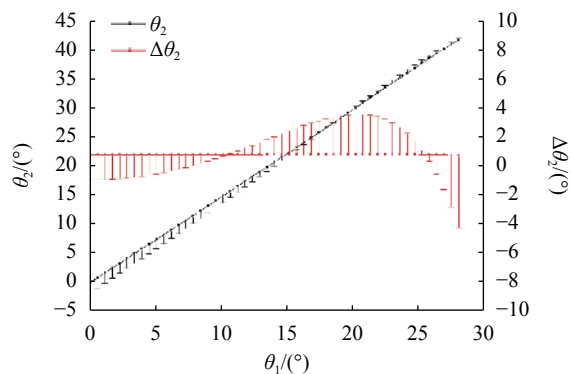


图 5 空气传播的发射角度偏差

Fig.5 Transmitting angle error in air

理想的发射角与入射角 θ_1 具有线性关系。图中用误差棒给出了 θ_2 与理想发射角的偏差。因为发射角的偏差,相邻后组发射光束的间隔 $\Delta\theta_2$ 也并不均匀,从误差棒数据看,最大误差约 6%。在出窗经历水下传播后,误差的放大可能对探测造成较大的影响。

为了解决深水抗压问题,在后组出瞳后 5 mm 处,需要增加厚度为 5 mm 的平板 H-BAK1 玻璃窗。由于光束并非完全平行,平板玻璃窗两侧介质存在的折射率差异导致水下光束的传播偏差增大。查看同样以 0.56°间隔入射的光束出窗后在水下传播的情况,绘制不同入射角度的光束发射角,并给出相邻发射光束夹角,如图 6 所示。

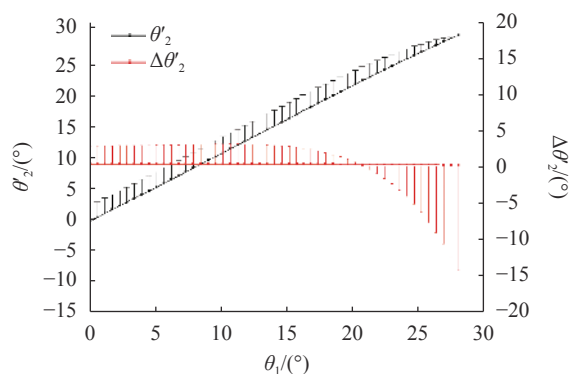


图 6 光束水下传播角度偏差

Fig.6 Underwater propagation angle deviation of the beam

前组入射的光束角度为 0°和 28°时,由于像高约束,发射角与 0°、30°的偏差几乎为 0。但由于畸变的不一致,当进入前组的光线以 0°~22.2°入射时,发射角增长的斜率大于理想的斜率,相邻光束间隔偏大;当

进入前组的光线以 22.2°~28°入射时,发射角增长的斜率小于理想的斜率,相邻光束间隔偏小。在接近 28°的大入射角条件下,相邻发射光束的夹角仅 0.513°,相对 0.6°的参考值的误差达到-14.493%。

引起这一误差的根本原因是,前后组角度的线性对应关系并未在优化中受约束,导致前后组相应视场角在像面的像高并不具有一致性。设计中希望 θ_1 、 θ_2 通过像高建立良好的线性关系,于是提出一种畸变匹配的优化方法。

引入 $f-\theta$ 镜头设计中的畸变控制方法^[30], Zemax 中, $f-\theta$ 畸变量由公式 (4) 决定:

$$\begin{cases} D_1 = \frac{y_1 - f_1 \cdot \theta_1}{f_1 \cdot \theta_1} \\ D_2 = \frac{y_2 - f_2 \cdot \theta_2}{f_2 \cdot \theta_2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_1 代表前组 $f-\theta$ 畸变; D_2 代表后组 $f-\theta$ 畸变; y_1 、 y_2 分别代表前、后组在像面的像高; f_1 、 f_2 分别代表前、后组的焦距。

由公式 (3) 可知,当 $f-\theta$ 畸变为 0,前、后组像高均正比于入射角。由于像高已经通过 DMVA 操作数约束一致,只要 $f-\theta$ 足够小,就可以满足相邻发射光束间隔均匀的要求。

系统中对畸变进行约束的操作数为 DIST 和 DIMX,但二者并不直接对 $f-\theta$ 畸变进行约束,引入 Zemax 系统标准光学畸变量公式 (5):

$$\begin{cases} D_{1s} = \frac{y_1 - f_1 \cdot \tan\theta_1}{f_1 \cdot \tan\theta_1} \\ D_{2s} = \frac{y_2 - f_2 \cdot \tan\theta_2}{f_2 \cdot \tan\theta_2} \end{cases} \quad (5)$$

θ 较小时,其值与正切值近似相等,标准畸变近似等于 $f-\theta$ 畸变;随着角度增大,正切值增长会大于 θ 增长,当 $f-\theta$ 畸变取值为 0 时,标准畸变取得负值。因此,前、后两组均在像面发生桶形畸变,且后组在边缘的畸变百分比绝对值大于前组。

保持前组不变,通过公式 (4)、(5) 得到前组的标准畸变像差 D_{1s} ,通过匹配前、后两组的 $f-\theta$ 畸变,利用前组标准畸变对后组的标准畸变进行计算,可以保证前、后组的 $f-\theta$ 畸变近似一致,入射角度和发射角度具有良好的线性匹配关系。

计算前组入射角度为最大入射角的 0° 、 8.4° 、 14° 、 19.6° 、 28° 时的前组实际像面高度, 使用 EFFL 操作数固定 f_2 , 联立公式 (4)、(5), 代入后组线性对应的 θ_2 , 计算同一像高时的 D_{2s} 。使用 DIMX 和 DISC 操作数控制相应入射角 θ_2 的畸变参数进行优化, 优化后的采用平板窗的整组结构如图 7 所示。

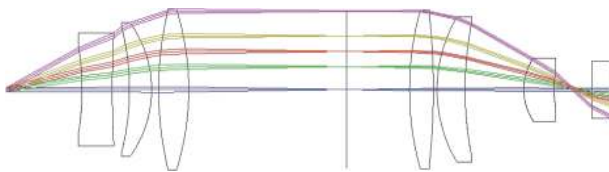


图 7 平板窗发射系统结构

Fig.7 Plane window emission system structure

若外壳表面的发射窗口要求匹配载具外形, 需将平板窗口替换为柱面外形, 若使用平凸的柱面镜, 发射的光束将会因圆弧表面在出舱后的弧矢方向聚焦, 并在远场发散, 导致能量过分分散, 对探测造成不利影响。因此基于平板窗角度优化的后组设计将平板

窗改为柱面的共形窗口, 将内侧平面也设置为可变曲率的柱面, 并利用像方远心方法继续优化, 优化后的共形窗如图 8 所示。

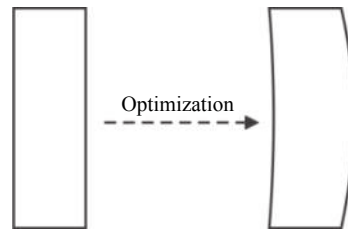


图 8 优化后共形窗结构

Fig.8 Conformal window structure after optimization

共形优化的后组曲率和厚度有微小变化, 优化后两种方案的透镜参数见表 4 和表 5。

除窗口玻璃外, 所有镜片均为球面设计, 仅共形窗为双面柱透镜, 具有良好的可加工性。由于前、后组共焦点设计, 故第 2、5、6 片为弯月镜, 减少了前、后组的场曲,

表 4 平板窗发射系统设计方案

Tab.4 Prescription for transmitting system with plane window

Lens	Surface	Surface type	Radius/mm	Thickness/mm	Material	Semi-diameter/mm
	Stop	Standard	Infinity	20.000	Air	0.577
L1	1	Standard	-64.875	7.999	H-BAK1	10.736
	2	Standard	245.825	4.563	Air	14.397
L2	3	Standard	-62.429	5.870	H-ZF7LA	15.940
	4	Standard	-28.195	1.844	Air	17.045
L3	5	Standard	83.148	8.000	H-BAK1	20.280
	6	Standard	-65.614	41.725	Air	20.513
	Focus plane	Standard	Infinity	16.725	Air	20.000
L4	7	Standard	72.584	6.308	H-BAK1	20.196
	8	Standard	-178.896	1.000	Air	19.981
L5	9	Standard	35.081	7.426	H-ZF7LA	18.457
	10	Standard	83.958	15.541	Air	16.967
L6	11	Standard	13.985	8.000	H-BAK1	8.067
	12	Standard	22.229	10.000	Air	4.536
L7	13	Standard	Infinity	5.000	H-BAK1	4.816
	14	Standard	Infinity	20000.000	Water	7.233
	Image	Standard	Infinity	0.000	Water	11 552.561

表 5 共形窗发射系统设计方案

Tab.5 Prescription for transmitting system with conformal window

Lens	Surface	Surface type	Radius/mm	Thickness/mm	Material	Semi-diameter/mm
	Stop	Standard	Infinity	20.000	Air	0.577
L1	1	Standard	-64.875	7.999	H-BAK1	10.736
	2	Standard	245.825	4.563	Air	14.397
	3	Standard	-62.429	5.870	H-ZF7LA	15.940
L2	4	Standard	-28.195	1.844	Air	17.045
	5	Standard	83.148	8.000	H-BAK1	20.280
L3	6	Standard	-65.614	41.725	Air	20.513
	Focus plane	Standard	Infinity	15.812	Air	20.000
L4	7	Standard	76.049	6.190	H-BAK1	20.184
	8	Standard	-172.721	1.000	Air	19.982
L5	9	Standard	35.089	8.000	H-ZF7LA	18.487
	10	Standard	76.462	16.200	Air	16.750
L6	11	Standard	12.782	7.798	H-BAK1	7.894
	12	Standard	20.508	10.000	Air	4.523
L7	13	Toroidal	-235.145	5.000	H-BAK1	4.710
	14	Toroidal	-160.000	20000.000	Water	7.117
	Image	Standard	Infinity	0.0000	Water	11552.735

3 系统方案发射效果仿真分析

3.1 发射光束分布角度

通过畸变数据文件,查看光束分别经过平板窗设计和共形窗设计两种转移发射旋转基点的发射系统,光束从窗口发射进入水中的角度偏差。平板窗设计的偏差如图 9 所示,共形窗设计的偏差如图 10 所示。

两种设计发射角度偏差均不超过 0.4%,以 0.6°间隔发射时,相邻光束对 0.6°的偏差不得超过 2%。当探测距离为 20 m 时,相邻光束中心理论间隔为 209.3 mm,

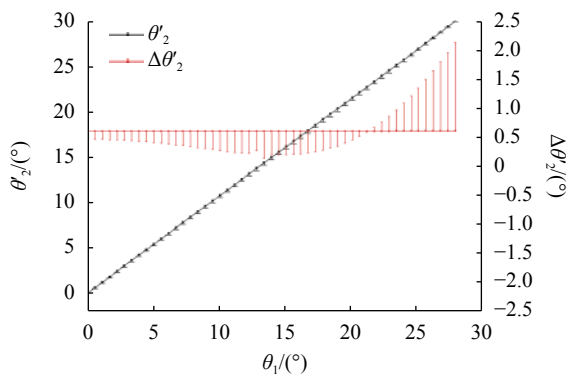


图 9 平板窗系统水下传播的发射角度偏差

Fig.9 Transmitting angle error of plane window system in water

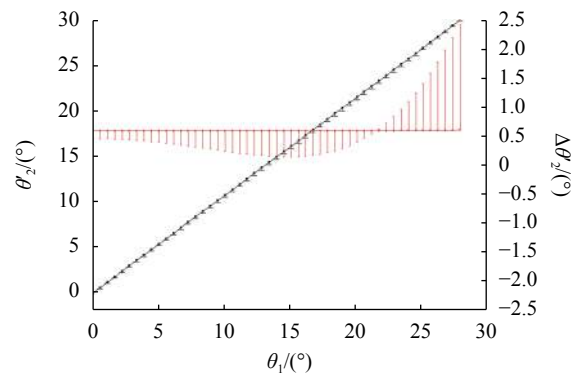


图 10 共形窗系统水下传播的发射角度偏差

Fig.10 Transmitting angle error of conformal window system in water

该系统发射光束的间隔与理论间隔的绝对差值小于 4 mm。

3.2 光束发散角

由于假想探测目标直径为 300 mm,为了使光斑直径在 20 m 的探测距离上不大于目标直径 1/3,经过发射系统后,激光的发散角应不大于 5 mrad。利用 Zemax 物理光学传播仿真模拟了分别以 0°、8.4°、14°、19.6°、28°入射,初始半径为 0.5 mm,初始发散角为 1 mrad 的高斯光束,经过发射系统调整,在水下传播 20 m 后的光束半径和发散角。平板窗设计的发射

结果如表 6 所示,共形窗设计的发射结果如表 7 所示。

表 7 共形窗设计光束发散角

Tab.7 Conformal window design beam divergence

$\theta_l/(\circ)$	X beam size/mm	X divergence/mrad	Y beam size/mm	Y divergence/mrad
0	26.402	1.303	31.576	1.561
8.4	22.553	1.097	27.943	1.346
14	16.208	0.768	22.732	1.044
19.6	9.028	0.413	18.611	0.797
28	14.700	0.649	29.755	1.101

表 6 平板窗设计光束发散角

Tab.6 Plane window design beam divergence

$\theta_l/(\circ)$	X beam size/mm	X divergence/mrad	Y beam size/mm	Y divergence/mrad
0	30.618	1.513	30.618	1.513
8.4	26.931	1.313	27.227	1.311
14	20.746	0.986	22.333	1.026
19.6	12.784	0.584	18.375	0.786
28	10.098	0.446	27.975	1.034

平板窗方案的水下发射光束的最大发散角为 1.513 mrad,水下传播 20 m 最大均方根 (RMS) 光斑半

径为 30.618 mm;共形窗方案的水下发射光束最大发散角为 1.561 mrad,水下传播 20 m 最大 RMS 光斑半径为 31.576 mm。利用物理光学传播仿真模拟了 5 个入射角下 20 m 外的光斑的图像如图 11 所示。光斑中心 X 方向能量分布如图 12 所示。

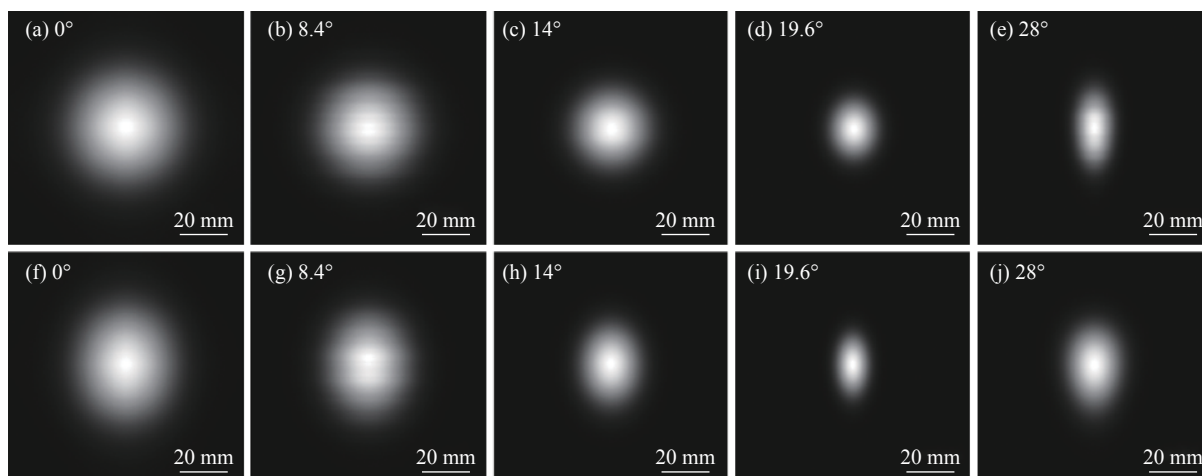


图 11 水下传播 20 m 光束截面光斑: (a)~(e) 平板窗系统光斑; (f)~(j) 共形窗系统光斑

Fig.11 Beam section spot after 20 m under water propagation: (a)- (e) Spot of plane window system; (f)-(j) Spot of conformal window system

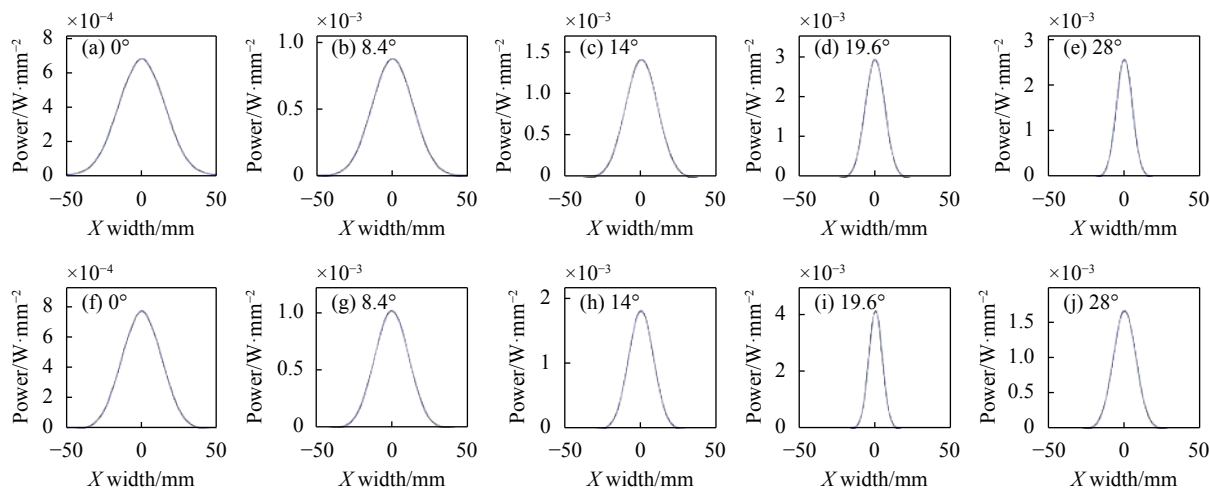


图 12 光斑能量分布: (a)~(e) 平板窗系统光斑能量分布; (f)~(j) 共形窗系统光斑能量分布

Fig.12 Spot energy distribution: (a)-(e) Spot energy distribution of plane window system; (f)-(j) Spot energy distribution of conformal window system

像面大小统一调整为 100 mm×100 mm, 光束的初始能量统一设置为 1 W, 仿真结果表明, 光斑仍近似高斯分布。不计玻璃和水介质的反射和吸收损失, 到达像面的能量均达到 99.9% 以上, 光斑最大直径均小于 100 mm。

3.3 镀膜与光学传输效率

由于镜片较多, 如不镀增透膜, 则出窗前因为各个光学面的反射, 探测光束就将产生较大的能量损失。利用 Zemax 查看未镀膜时两种设计方案能量传输效率如表 8 所示。

表 8 未镀膜传输效率

Tab.8 Coating-less transmission efficiency

$\theta_l(^{\circ})$	Efficiency (plane window)	Efficiency (conformal window)
0	47.021 4%	46.999 7%
8.4	47.057 6%	47.035 6%
14	47.118 4%	47.096 0%
19.6	47.194 1%	47.173 0%
28	47.202 9%	47.204 5%

从表 8 数据得知, 未镀膜时因为各表面反射损失, 出窗后的能量不足初始能量的 50%。

若对各表面镀增透膜, 比较 0.995 和 0.999 两种增透膜对像面能量的影响, 镀膜后两种设计方案的传输效率如表 9 和表 10 所示。

表 9 0.995 镀膜传输效率

Tab.9 0.995-coating transmission efficiency

$\theta_l(^{\circ})$	Efficiency (plane window)	Efficiency (conformal window)
0	90.935%	90.893%
8.4	91.006%	90.963%
14	91.132%	91.088%
19.6	91.320%	91.276%
28	91.719%	91.679%

表 10 0.999 镀膜传输效率

Tab.10 0.999-coating transmission efficiency

$\theta_l(^{\circ})$	Efficiency (plane window)	Efficiency (conformal window)
0	95.803%	95.759%
8.4	95.878%	95.833%
14	96.011%	95.965%
19.6	96.210%	96.163%
28	96.629%	96.587%

镀 0.995 的增透膜后, 能量传输效率可达 90% 以上; 镀 0.999 的增透膜后, 能量传输效率可达 95% 以上。为满足设计需求, 镜组需镀 99.9% 增透膜保证能量传输效率。

3.4 公差分析与深度影响

设置各面加工面型精度 ± 0.1 mm, 偏心 ± 0.1 mm, 各玻璃元件倾斜公差 $\pm 0.1^{\circ}$, 折射率和阿贝数采用默认设置, 分别为 0.001 和 1%。140 个参数, 总计 140 个公差数, 故设蒙特卡洛仿真次数 19600 次。仿真的目标为 RMS spot radius, 仿真结果如表 11、表 12 所示。

表 11 平板窗公差分析结果

Tab.11 Tolerance analysis result of plane window

Probability	RMS spot radius/mm				
	0°	8.4°	14°	19.6°	28°
98% \leq	9.603	9.877	9.878	18.675	18.697
90% \leq	8.895	9.092	9.074	17.993	17.986
50% \leq	7.609	7.695	7.673	16.848	16.826
10% \leq	6.324	6.324	6.309	15.760	15.734
2% \leq	5.599	5.553	5.506	15.164	15.122

表 12 共形窗公差分析结果

Tab.12 Tolerance analysis result of conformal window

Probability	RMS spot radius/mm				
	0°	8.4°	14°	19.6°	28°
98% \leq	8.713	12.909	12.969	22.557	22.596
90% \leq	7.949	12.026	12.057	21.775	21.792
50% \leq	6.584	10.507	10.521	20.498	20.511
10% \leq	5.260	9.036	9.071	19.305	19.332
2% \leq	4.537	8.241	8.263	18.683	18.684

加工和装配公差使平行光束的汇聚特性发生变化: 在大多数仿真中, 0°、8.4°、14° 3 个场的光束发散角比设计的理论值更小, 在 19.6°场和 28°场比设计的理论值更大。但光斑半径均小于 50 mm, 满足光束发散角小于 5 mrad 的设计需求。

由于舱内保持标准大气压, 而舱外随水深不同将承受不同的压力, 因此水深变化主要通过压力变化引起窗口玻璃的面型变化。通过有限元分析软件可以分析不同深度水压所引起变化对系统的影响^[31-32]。使用 Ansys 软件数值仿真 50~300 m 深度水压对窗玻璃的面型影响: 窗口玻璃为成都光明的 H-BAK1, 其杨氏模量 $E = 70.95$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.223$, 密度

$\rho = 2.74 \text{ g/cm}^3$, 窗口为直径 15 mm、中心厚度 5 mm 圆窗; 舱体和压圈采用 7075 铝。仿真计算得到 300 m 水深时, 舱外水压 3 MPa, 窗口中心最大的面型变化为 $0.55 \mu\text{m}$ 。将该变化引入窗口玻璃面型以及窗口玻璃内侧空气厚度间隙公差。重新计算的公差结果与表 11、表 12 所列结果相差均小于 0.1%, 表明所设计的系统理论上可以适应 30~300 m 不同深度的光束发射需求。

4 结论与展望

文中提出了一种用于转移周向扫描基点的光学发射系统, 该系统基于开普勒望远镜结构, 扫描光束通过该系统能将扫描的基点从载具圆柱舱体中心转移到舱体下表面, 避免了以往水下周视探测的所需的环窗设计, 进而消除了环窗设计由于加强筋遮挡造成的扇形盲区, 另外, 该设计减小了光路在舱体内部占用的空间, 减小了光束出射所需的开窗面积, 相比环窗方案减轻了对外壳结构强度的影响。

该系统为入射视场为 $\pm 28^\circ$, 水下发射视场为 $\pm 30^\circ$, 6 路结构能实现对周向 360° 全覆盖。发射角偏差与入射角具有良好的线性关系, 对理想发射角偏差不超过 0.4%。当束宽 1 mm、发散角 1 mrad 高斯光束入射时, 发射光束的发散角不超过 2 mrad, 水下传播 20 m 后 RMS 光斑半径不超过 35 mm。各镜面经过 0.999 透过率的增透镀膜后, 系统能量传输效率能达到 95% 以上。该发射系统舱内镜片使用全球面设计, 具有良好的加工特性, 出舱窗口表面根据舱体外形需求, 采用平板窗或柱面共形窗。系统满足发射光束发散角、发射角度分布均匀性、光路传输效率以及壳体共形的需求, 设计成果对水下周视激光扫描探测的发射系统具有一定的应用和参考价值。

由于光路中镜片数量越多, 加工和装配难度越大, 为了系统结构紧凑, 加工及装配稳定, 下一步工作考虑进行物镜目镜完全共轭设计, 减少每一组 4f 系统的镜片加工面型, 进一步降低其加工装配难度。

参考文献:

[1] Cao Fengmei, Jin Weiqi, Huang Youwei, et al. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (II) [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(3): 125-132. (in

Chinese)

曹峰梅, 金伟其, 黄有为, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(下)[J]. *红外技术*, 2011, 33(3): 125-132.

- [2] Cao Fengmei, Jin Weiqi, Huang Youwei, et al. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (I) —Underwater laser range-gated imaging technology [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(2): 63-69. (in Chinese)
曹峰梅, 金伟其, 黄有为, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(上)——水下激光距离选通技术[J]. *红外技术*, 2011, 33(2): 63-69.
- [3] Xuan Huang, Fang Yang, Jian Song. Hybrid LD and LED-based underwater optical communication: state-of-the-art, opportunities, challenges, and trends [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100002.
- [4] Wang Jingjing, Tian Changfeng, Yang Xinghai, et al. Underwater wireless optical communication system using a 16-QAM modulated 450-nm laser diode based on an FPGA [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(16): 4553-4559.
- [5] Wang Jiemei, Lu Chunhui, Li Shangbin, et al. 100 m/500 Mbps underwater optical wireless communication using an NRZ-OOK modulated 520 nm laser diode [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12171-12181.
- [6] Chun Hong Kang, Abderrahmen Trichili, Omar Alkhazragi, et al. Ultraviolet-to-blue color-converting scintillating-fibers photoreceiver for 375-nm laser-based underwater wireless optical communication [J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 30450-30461.
- [7] Muhsin Caner Gökçe, Yahya Baykal, Yalçın Ata. M-ary phase shift keying-subcarrier intensity modulation performance in strong oceanic turbulence[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(5): 056105.
- [8] Zhong Wei, Zhang Xiaohui, Han Hongwei. Irradiance spatial distribution model of laser source for underwater range-gated imaging radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401005. (in Chinese)
钟炜, 张晓晖, 韩宏伟. 水下距离选通成像雷达激光照明模型[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0401005.
- [9] Liu Na, Ke Jieyao, Yang Suhui, et al. Simulation and analysis on underwater transmission characteristics of Gaussian pulse lasers with carrier modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0401003. (in Chinese)
刘娜, 柯杰耀, 杨苏辉, 等. 载波调制高斯脉冲激光水下传输特性的仿真分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0401003.
- [10] Gan Lin, Zhang He. Underwater laser autonomous scanning

- short-range azimuth detection method based on fluid-driven [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0304004. (in Chinese)
- 甘霖, 张合. 基于流体驱动的水下激光自主扫描近程方位探测方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0304004.
- [11] Zhai Xiaoyu, Meng Zhaopeng, Zhang Haoyun, et al. Underwater distance measurement using frequency comb laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6757-6769.
- [12] Maccarone A, Rocca F M D, Mccarthy A, et al. Three-dimensional imaging of stationary and moving targets in turbid underwater environments using a single-photon detector array [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28437-28456.
- [13] Nour Alem, Fabrice Pellen, Guy Le Brun, et al. Extra-cavity radiofrequency modulator for a lidar radar designed for underwater target detection [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(26): 7367-7372.
- [14] Qi Lin, Ju Yakun, Dong Junyu, et al. Refractive laser triangulation and photometric stereo in underwater environment [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 113101.
- [15] He Zhiyi, Luo Meixing, Song Xiyu, et al. Laser line scan underwater imaging by complementary metal-oxide-semiconductor camera [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(12): 123101.
- [16] Illig D W, Jemison W D, Mullen L J. Independent component analysis for enhancement of an FMCW optical ranging technique in turbid waters [J]. *Applied Optics*, 2017, 55(31): c25-c33.
- [17] Cochenour B, Dunn K, Laux A, et al. Experimental measurements of the magnitude and phase response of high-frequency modulated light underwater [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(14): 4019-4024.
- [18] Zha Bingting, Yuan Hailu, Tan Yayun. Ranging precision for underwater laser proximity pulsed laser target detection [J]. *Optics Communications*, 2019, 58(2): 81-87.
- [19] Cheng Mingjian, Guo Lixin, Li Jiangting, et al. Propagation of an optical vortex carried by a partially coherent Laguerre-Gaussian beam in turbulent ocean [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(17): 4642-4648.
- [20] Li Yongxu, Cui Zhiwei, Han Yiping, et al. Channel capacity of orbital-angular-momentum-based wireless communication systems with partially coherent elegant Laguerre-Gaussian beams in oceanic turbulence [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(4): 471-477.
- [21] Hou W, Church P, Fournier G, et al. Overview of a hybrid underwater camera system [C]//Ocean Sensing and Monitoring VI, SPIE Sensing Technology + Applications, 2014, 9111: 91110O.
- [22] Laurenzis M, Christnacher F, Scholz T, et al. Underwater laser imaging experiments in the Baltic Sea [C]//Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VIII; and Military Applications in Hyperspectral Imaging and High Spatial Resolution Sensing II, Proceedings of SPIE, 2014, 9250: 92500D.
- [23] Tan Yayun, Zhang He, Zha Bingting. Underwater single beam circumferentially scanning detection system using range-gated receiver and adaptive filter [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(16): 1648-1656.
- [24] Ouyang Bing, Hou Weilin. Compressive line sensing imaging system in a controlled hybrid scattering environment [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(2): 023102.
- [25] Stemmler S, Werner C S, Reiterer A. Development of a time-of-flight laser scanning system for underwater applications [C]//SPIE Remote Sensing, 2019, 11150: 111500M.
- [26] Tu Dawei, Xiao Guoliang, Zhang Xu, et al. Laser stripe matching algorithm with coplanar constraint in underwater laser scanning systems [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(11): 114108.
- [27] Zhang Xiangjin, Guo Jing, Zhang He. Far-field spot compression shaping for the laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1453-1457. (in Chinese)
- 张祥金, 郭婧, 张合. 激光定距引信远场光斑的压缩整形[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1453-1457.
- [28] Zhong Yi, Tang Ziyao, Gross H. Correction of 2D-telecentric scan systems with freeform surfaces [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3041-3056.
- [29] Deng Qiang, Li Shenghui. Design of high-resolution image square telecentric continuous zoom projection lens based on TIR prism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1114005. (in Chinese)
- 邓强, 李升辉. 高分辨率像方远心连续变焦投影镜头的设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(11): 1114005.
- [30] Li Yuanyuan, Wang Chunyan, Wang Zhiqiang. $F-\theta$ lens design for high-precision semiconductor laser marking machine [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 202-208. (in Chinese)
- 李圆圆, 王春艳, 王志强. 高精度半导体激光打标机 $F-\theta$ 镜头设计[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 202-208.
- [31] Jiang Yang, Quan Xiangqian, Du Jie, et al. Design of deep-sea optical imaging system with wide field of view and ultra-high resolution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(11):

2289-2295. (in Chinese)

姜洋, 全向前, 杜杰, 等. 全海深大视场超高清光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2019, 27(11): 2289-2295.

[32] Xu Yao. The design of several special optical systems and finite

element analysis[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

许尧. 几种特殊光学系统的设计及其有限元分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.



第一作者简介: 钟昆 (1989-), 男, 博士生, 主要研究方向为散斑计算成像和 underwater laser detection technology. Email: zkw314@163.com



通讯作者简介: 苏伟 (1964-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为微机电系统。Email: zkw314@163.com