

瑞利导星发射系统设计

刘超^{1,2}, 曹召良¹, 穆全全¹, 胡立发¹, 宣丽¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在天文观测中, 瑞利激光导星自适应光学系统可以补偿大气湍流对成像的影响, 并且提高天空覆盖率。能够发射一颗合格的瑞利导星成为该技术的前提。为了实现瑞利激光导星在天文观测中的应用, 设计了一套瑞利导星发射系统。首先, 根据瑞利激光导星自适应系统的基本要求, 介绍了激光器的脉冲能量与重复频率的影响; 接着, 根据湍流理论分析了发射系统的最佳发射口径与大气湍流对导星的光斑大小的影响; 然后, 根据发射要求利用 Zemax 软件设计出一套瑞利导星发射系统。该系统最佳的发射口径为 260 mm, 采样层为 10~11 km, 导星最佳聚焦高度为 9.8 km, 理想的导星光斑半径为 0.45", 存在大气湍流情况下导星光斑半径小于 1"; 最后利用 Zemax 软件对该系统进行公差分析, 分析结果表明该系统相对较容易地实现加工与装调。该发射系统满足激光导星自适应系统的要求, 实用性高, 设计方法普适。

关键词: 瑞利导星; 自适应光学; 发射系统

中图分类号: TH754 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0818002

Design of laser projected system for Rayleigh guide star

Liu Chao^{1,2}, Cao Zhaoliang¹, Mu Quanquan¹, Hu Lifa¹, Xuan Li¹

- (1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The adaptive optics system with Rayleigh guide star could compensate the image in observational astronomy, and could improve sky coverage. Projecting a suitable Rayleigh guide star is the precondition of adaptive optics with laser guide star. To realize the image compensation in observational astronomy, a laser launched system was designed. All kinds of parameter were analyzed and a suitable method of launching a laser guide star was completed. First, based on the demand of adaptive optics system with Rayleigh guide star, all kinds of parameter of laser box were probed. Next, the laser launched telescope aperture and the guide star spot size were analyzed according to the turbulence theory. Then, the laser launched system was designed by Zemax. The aperture of launching telescope is 260 mm. The optimal altitude of laser beam waist is 9.8 km, with Rayleigh guide star at 10–11 km. The laser spot size is 0.45" without turbulence and less than 1" with turbulence. Finally, the system was analyzed with tolerance by Zemax, and the results demonstrated that the system was easily to process. The laser projected system could suffice the demand of laser guide star adaptive optics and the method to design the system could be widely used.

Key words: Rayleigh guide star; adaptive optics; laser projected system

收稿日期: 2015-12-05; 修订日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(11174274, 11174279)

作者简介: 刘超(1990-), 男, 博士生, 主要从事瑞利激光导星的设计与研究。Email: 835762651@qq.com

导师简介: 曹召良(1998-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学方面的研究。Email: caozlok@ciomp.ac.cn

0 引言

在天文观测中由于大气湍流的影响,当望远镜口径大于大气相干长度时,并不会提高望远镜的空间分辨率,为此需要自适应光学系统来实时校正湍流畸变^[1]。但如果太暗的待测目标不能提供足够的波前信号,这时需要待测目标附近的引导星^[1-2]。由于在可见波段,大气等晕角只有几个角秒,基于自然导星的自适应光学系统不能提供足够的天空覆盖度。为了使自适应光学系统在大部分的观测区域能正常使用,有必要设置一颗合适的人造导星^[1,3]。设置的人造导星是一束激光利用大气散射来制造的光源,该光源到达望远镜时携带了大气湍流的信息,从而能够实现对光波前的畸变校正。瑞利导星的高度可以从 10~20 km^[4]。发射瑞利导星的激光器已经十分成熟。国内的导星技术仍然处于研究阶段,它是以发射系统为前提的。发射系统要求发射出的光斑大小满足自适应光学探测精度的要求,在设计时需要对导星光斑大小有较准确的估计。一般的激光发射系统出射平行光,但是瑞利导星发射系统需要将激光聚焦在有限高度处^[5],因此一般的大气湍流对激光光斑的估计并不准确。文中通过大气湍流理论结合导星探测中的锥形效应来分析实际瑞利导星光斑的大小,对瑞利导星发射系统进行了详细的分析,得出的一套普适的发射方法,并且根据该方法得出的设计参数针对 500 mm 口径的接收望远镜设计了一套瑞利导星发射系统。

1 导星激光器能量与脉冲重复频率的分析与计算

1.1 激光器能量

瑞利导星是利用一束向上发射的激光在瑞利层受到分子的后向散射作用来创造出的人造信标。激光器的能量会直接影响到探测器上探测到的光子数,从而影响探测精度。对于探测器上子孔径内探测到的光子数有以下能量公式^[6]:

$$N = \left(\frac{E\lambda}{hc} \right) \times (\sigma_B n_{(z)} \Delta z) \times \left(\frac{A_R}{4\pi z^2} \right) \times (T_0 T_A^2 \times \eta) \quad (1)$$

式中: N 为子孔径内探测到的光子数; E 为激光器能量; σ_B 为散射截面; $n_{(z)}$ 为散射粒子数密度; h 为普朗

克常量; λ 为激光波长,通常为 532 nm; c 为光速; Δh 为导星的采样厚度; A_R 为接收子孔径面积; T_0 为发射和接收过程中光学元件的透过率; T_A 为单程大气透过率; η 为接收效率。接收子孔径直径为 10 cm, $T_0=0.24$, $T_A=0.5$, $\Delta z=1$ km,导星高度 $z=10$ km。如图 1 所示,激光脉冲能量与子孔径探测的光子数呈线性关系。

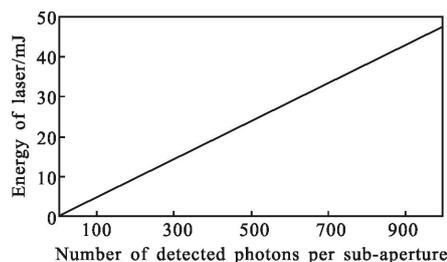


图 1 激光脉冲能量与子孔径探测的光子数的关系

Fig.1 Relationship between laser pulse energy and detected photons per sub-aperture

只有人造信标无限亮时,倾斜测量误差才为零,所以对于子孔径倾斜误差完全修正是不可能的,未修正的残余倾斜误差 $\Delta\phi_{\text{tilt}}$ 应计入总均方根残余光程差 $\Delta\phi$ 中。为使 $\Delta\phi_{\text{tilt}}$ 达到可以忽略的程度,子孔径内探测到的光子数需要满足以下关系^[7]:

$$N > 116 \left(\frac{r_0}{d} \right)^{5/3} \quad (2)$$

式中: d 为望远镜子孔径的大小; r_0 为大气相干长度。从图 1 可以看出,在 $d=r_0$ 时,当子孔径内光子数为 116 个时,激光器脉冲能量为 5.5 mJ,即发射瑞利激光导星激光器的脉冲能量最低为 5.5 mJ。

每个子孔径内探测到的光子数 $N=116$ 时,根据公式(1)计算出激光器脉冲能量与导星高度的关系,如图 2 所示。

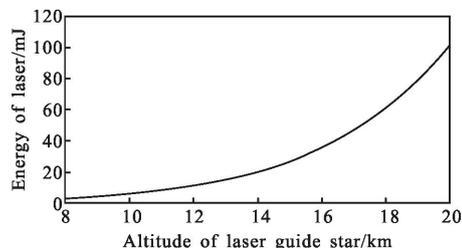


图 2 激光脉冲能量与导星高度之间的关系

Fig.2 Relationship between laser pulse energy and altitude of laser guide star

对于 500 mm 口径的望远镜来说,当导星高度为

10 km 时,引入的探测误差^[8] $\sigma < 0.9$ rad。导星高度低于 10 km 时探测误差大于 1 rad,瑞利导星不能携带足够的大气湍流信息,所以对于 500 mm 口径的望远镜,导星高度应设置在 10 km 以上。从图 2 中可以看出,随着导星高度的上升,需要的激光器能量非线性地提高,为此对于 500 mm 口径的望远镜来说,导星设置在 10 km 处是合适的。

1.2 脉冲重复频率

激光器的脉冲重复频率决定了瑞利导星的高度。瑞利导星是要求探测某一高度的后向散射光,不能有其他高度的散射光影响到探测,因此不能有两束脉冲光同时在导星路径上,即一束脉冲激光经过发射,后向散射并且被接收后下一个脉冲光才能发出。

从图 3 可以看出激光器的脉冲重复频率最大为 $c/2z$ 。导星位置越高,激光脉冲的最大重复频率就越小。对于导星高度为 11 km,激光器的脉冲最大重复频率为 13.6 kHz。

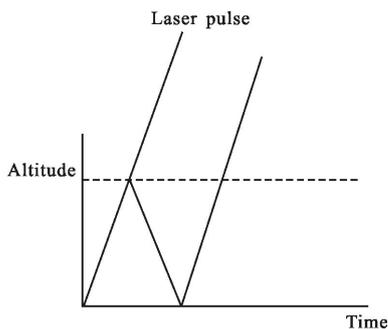


图 3 激光器脉冲的发射示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch of projecting laser pulses

激光脉冲的最低重复频率是与大气湍流的格林伍德频率相关的,在该频率下只接收一次脉冲能量,并且完成一次探测。

2 大气湍流对发射系统的影响

在激光向上发射的过程中会经过大气湍流,大气湍流也会影响发射系统设计。大气湍流对发射系统的影响与对地基望远镜的影响是一样的。当发射望远镜的口径大于大气相干长度时,大气湍流的影响就会显现出来,对激光的波前产生畸变,最终使得导星光斑变大。

2.1 大气湍流对发射口径的影响

对于激光来说,光斑半径与高度有如下关系

$$\omega_{(z)} = \omega_0 \left[1 + \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right] \quad (3)$$

式中: ω_0 为激光束腰半径; $\omega_{(z)}$ 为距离激光束腰位置 z 处的光斑半径。

通过图 4 可以看出,理想情况下对于激光来说,发射口径越大,能得到的束腰就越小;但是同时随着

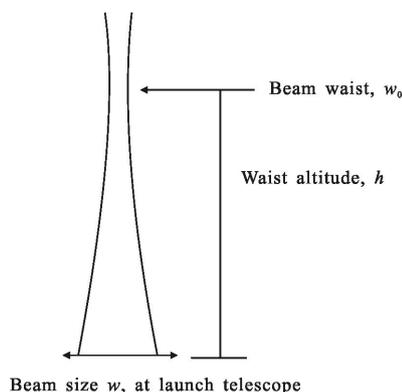


图 4 激光发射示意图

Fig.4 Geometry for projected Gaussian beam

发射口径的增大,当发射口径 D_p 远大于大气相干长度 r_0 时,湍流对光束影响也会越大。激光通过大气到达导星层的斯特列尔比为^[9]:

$$S = S_0 \times \exp(-0.134(D_p/r_0)^{5/3}) \quad (4)$$

式中: D_p 为发射望远镜的口径; S_0 为发射系统的斯特列尔比(在经过优化的系统中该值可近似为 1)。导星层的能量峰值强度等于 S 与理想情况下到达导星层的峰值强度的乘积,有公式^[10]:

$$I = S \times I_0 = 0.88 \times S I_0 / (\lambda \times h / D_p)^2 \quad (5)$$

式中: I_0 为理想情况下到达导星位置的峰值光强。

从图 5 可以看出,在 $D_p/r_0 = 3.8$ 时,导星层能量峰值最高,对应的发射口径为最佳值。在长春地区平均大气相干长度为 7 cm,因此确定发射口径为 260 mm。

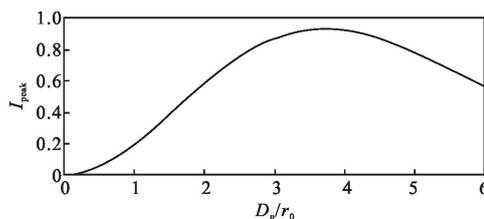


图 5 峰值光强与相对湍流的关系

Fig.5 Relationship between peak intensity and atmosphere turbulence

为保证能量 99% 传输, 需要使得发射望远镜口径为发射望远镜上高斯光斑直径的 1.5 倍, 即在发射望远镜上高斯光斑半径为 85 mm。

2.2 大气湍流对光斑大小的影响

由于导星属于有限远, 并且有一定扩展的光斑, 在探测时由于光源的扩展会引入探测误差, 该误差为^[11]:

$$\sigma^2 = \left(0.1014 \frac{\theta_{\text{gs}}}{\theta_0} \right)^{5/3} \quad (6)$$

式中: θ_{gs} 为导星大小; θ_0 为大气等晕角。根据长春地区大气等晕角 θ_0 约为 3.2", 计算出由于目标扩展引入的误差与导星大小之间的关系, 如图 6 所示。

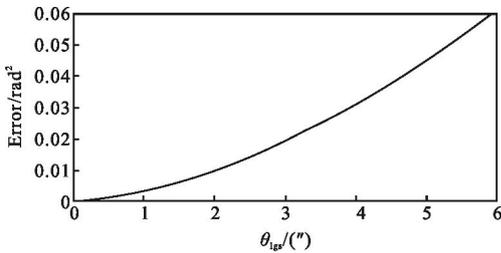


图 6 由于目标扩展引入的误差与导星大小之间的关系

Fig.6 Relationship between the error caused by the size of beacon and the size of laser spot

图 6 显示了由于目标扩展引入的误差随着导星变大非线性地增长。以该误差小于 0.01 rad² 为标准 ($\sigma < 0.016\lambda$), 此时认为由导星大小引起的误差可以忽略不计, 则对应的 θ_{gs} 为 2.01", 这里以导星光斑直径为 2" 为发射标准, 导星光斑半径大小应小于 1"。

基模高斯光束的表达式为:

$$\psi_{00} = \frac{A}{\omega_{(z)}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_{(z)}}\right) \exp\left[-ik\left(z + \frac{r^2}{2R}\right)\right] \quad (7)$$

式中: $\omega_{(z)}$ 为高斯光斑半径; R 为激光等相位面的曲率半径; r 为光束上点与传播轴线的距离; A 为常量。则光强为:

$$I = \frac{A^2}{\omega_{(z)}^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_{(z)}}\right) \quad (8)$$

在峰值光强处 $r=0$, 从式中可以看出在有湍流的情况下, 峰值光强的下降倍数为光斑半径展宽倍数的平方倍。

$$\frac{I_{\text{tur}}}{I} = \frac{\omega_{(z)}^2}{\omega_{(z)\text{tur}}^2} \quad (9)$$

由于导星是位于有限高度处, 在采样层以上的

区域的湍流并不能影响采样层内的光斑大小, 并且激光光束在到达导星层前, 光束半径随着传播逐渐减小, 因此光束实际经过的湍流会比 r_0 弱一些, 这一部分与探测时的锥形效应类似, 可以通过锥形效应来估计。因此在计算导星光斑大小时应计入锥形效应带来的影响, 锥形效应带来的波前误差为^[12]:

$$\sigma_{\text{conc}}^2 = (D_p/d_0)^{5/3} \quad (10)$$

在 HV5/7 湍流模型下, 长春地区的 $d_0=0.57$ m, 则锥形效应带来的误差为 0.270 3 rad²。由大气湍流造成的斯特列尔比计算公式为:

$$S_{\text{tur}} = \exp\left[-\left(0.134 \left(\frac{D_p}{r_0}\right)^{5/3} - \left(\frac{D_p}{d_0}\right)^{5/3}\right)\right] \quad (11)$$

根据公式(11)计算出 $S_{\text{tur}}=0.3972$, 因此 10 km 处导星的实际光斑半径大小为 $\omega_{\text{实际}} = \omega_{\text{理想}} / \sqrt{S_{\text{tur}}} = 1.67\omega_{\text{理想}}$ 。同时实际的导星光斑半径应不大于 1", 则理想情况下导星半径大小应小于 0.6"。

在此条件下发射, 不同束腰高度导星光斑的大小也不相同, 其光斑半径和束腰高度的关系如图 7 所示。可以看出, 当采样层定为 10~11 km 时, 束腰高度为 9.8 km 时情况最佳, 光斑半径大小为 0.446"。当束腰高度为 8.24~11.87 km 时, 光斑大小均在 0.6" 以内。发射系统在设计时以激光束腰高度为 9.8 km 为标准。

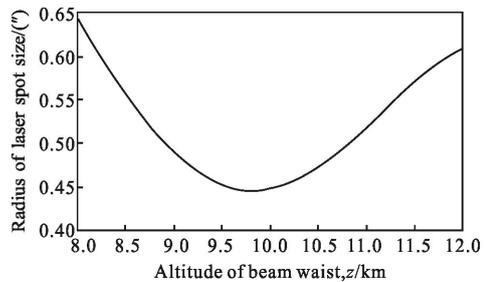


图 7 光斑半径与束腰高度的关系

Fig.7 Relationship between radius of laser spot size and altitude of beam waist

3 发射系统光学设计与评价

3.1 发射系统的设计

经过上述分析得出发射望远镜的口径为 260 mm, 发射望远镜上的高斯光斑大小为 85 mm, 激光束腰高度为 9.8 km, 对应的束腰为 21.3 mm, 选择的激光器输出束腰半径为 0.25 mm。光斑半径在 10 km 处要小于 1"。发射系统的光学设计如图 8 所示。

发射系统的光学设计包括两部分，光束扩束和发射望远镜^[1]。图 8 中 L1 与 L2 组成光束扩束系统，扩束系统为伽利略式，其放大率为 10 倍，L1 的焦距为 -30 mm，激光器的束腰在 L1 前 900 mm 处。激光束腰在经过扩束系统后进入伽利略式望远镜，束腰距离 L3 无穷远，此时发射系统满足几何光学近似，发射望远镜的放大率为 8.5 倍，主镜焦距为 2 152.5 mm，口径为 260 mm，主镜上的高斯光斑大小为 84 mm，可以通过调节 L3 与 L4 的相对距离来调节激光的束腰高度。

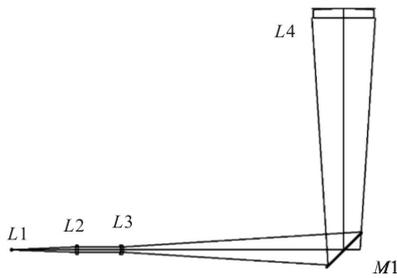


图 8 瑞利导星发射系统光路图

Fig.8 Optical layout of Rayleigh guide star projected system

3.2 发射系统的评价

瑞利激光导星发射系统不是成像系统，其最终的目的是在指定高度处创造出大小满足探测要求的光源，并且该光源要有足够的亮度，同时系统的斯特列尔比要足够高，以免影响最终的光斑大小。因此从系统的光学透过率和 10 km 处能量占总能量的 90% 时的半径和系统的斯特列尔比来评价发射系统^[2]。设计出的系统，束腰高度为 9.8 km；激光光斑半径在发射望远镜上大小为 84 mm，略小于设计的 85 mm；发射系统由四个单透镜组成，经计算得出系统透过率约为 84.3%，计算出每个子孔径探测到的光子数约为 377 个，大于 116 个探测光子数的最低标准；图 9 显示了激光到达 10 km 的采样层后，能量占总能

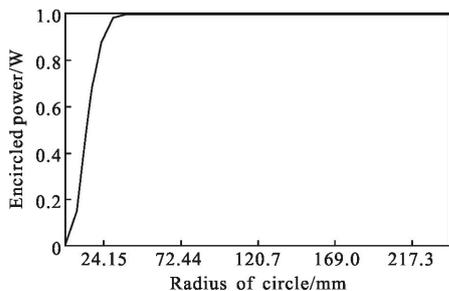


图 9 10 km 处激光能量随半径的关系

Fig.9 Relationship between laser energy and radius

量 90% 时，光斑半径为 24.15 mm，对应 0.48"，满足理想光斑半径最大 0.6" 的发射要求。

从图 10 可以看出该系统经过优化后波面的 PV 值为 0.068λ，RMS 值为 0.02λ，系统的斯特列尔比近似为 0.98，系统像差不会影响导星光斑大小，满足发射要求。

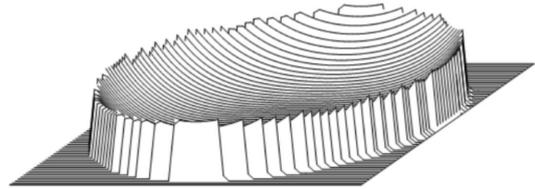


图 10 瑞利导星发射系统的波面图

Fig.10 Wavefront map of laser projected system

图 11 表示在该发射系统下，当大气相干长度大于 5.3 cm 时实际的光斑半径均小于 1"，即大气相干长度大于 5.3 cm 时发射系统均满足要求。

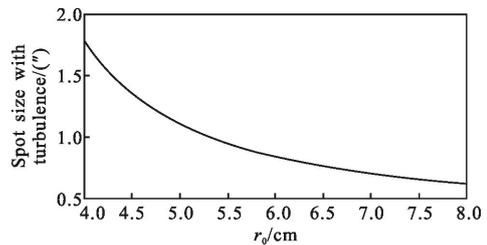


图 11 有湍流时光斑半径大小与 r_0 的关系

Fig.11 Relationship between spot size with turbulence and r_0

4 系统公差分析

公差分析对于光学系统十分重要，它给出了系统加工和装调的一个标准，同时也是衡量光学系统是否能实现的一个标准。给定的公差太小会增加系统加工装调难度，甚至不能实现，公差太大会影响光学系统的质量。对该发射系统的公差参量设置如表 1 所示。

表 1 公差分析参量

Tab.1 Tolerance parameters

Parameters	Tolerance
Radius	± 0.02 mm
Thickness	± 0.06 mm
Tilt	$\pm 0.01^\circ$
Decenter	± 0.01 mm

对于透镜加工来说,透镜的曲率公差为 0.02 mm 是容易实现的,透镜厚度的公差参量为 0.06 mm,该公差参量是合理的。利用 Zemax 软件在以上公差参量下对该系统进行公差分析,结果表明,采样层内的理想光斑半径从 0.48"变化到 0.59",依然满足发射系统对光斑半径的要求。使用 Zemax 软件中的蒙特卡洛分析模式进行公差分析,结果如表 2 所示。

表 2 蒙特卡洛法分析的结果

Tab.2 Result by Monte Carlo method

Number of traceable Monte Carlo files generated:100			
Nominal	23.42740306		
Best	22.2746621	Trial	43
Worst	51.15502743	Trial	23
Mean	26.94344288		
Std Dev	5.35707118		
Compensator statistics:			
Change in back focus:			
Minimum:	-4.354741		
Maximum:	25.507668		
Mean:	0.714573		
Standard deviation:	4.127103		
90%<	34.54656821		
80%<	31.66877627		
50%<	24.78718854		
20%<	22.56594577		
10%<	22.35664405		
End of run.			

经过蒙特卡洛分析 100 次的结果显示,80%情况下 10 km 处的光斑半径小于 31.7 mm,即 0.6",说明该公差条件下系统相对容易加工和装调。

5 结 论

文中首先分析了在哈特曼波前探测的最低条件下,激光器能量最低为 5.5 mJ;对于在 10~11 km 采样下,激光器最高频率为 13.6 kHz;其次,根据大气湍流理论分析出在 $D_p/r_0=3.8$ 情况下发射口径最佳,长春平均大气相干长度为 7 cm,确定最佳的发射口径为 260 mm;对于采样层在 10~11 km,激光束腰的最佳高度为 9.8 km;同时结合大气湍流与锥形效应分析了实际光斑的大小为理想情况下的 1.6 倍。最后根据分析结果利用 Zemax 软件进行设计并优化,

优化结果显示设计的发射系统满足设计标准,理想情况下光斑大小为 0.48",在存在大气湍流情况下,导星光斑半径小于 1"。对该系统进行公差分析,结果表明设计的发射系统相对容易实现加工和装调。

参考文献:

- [1] Boyer C, Adkins S, Anderson D R, et al. Adaptive optics program at TMT [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9148: 91480X.
- [2] Booth M J. Adaptive optical microscopy: the ongoing quest for perfect image[J]. *Light-Science & Applications*, 2014, 3(4): e165.
- [3] Raab W, Rabien S, Gässler W, et al. The ARGOS laser system: green light for ground layer adaptive optics at the LBT [C]//SPIE Astronomical Telescopes +Instrumentation, 2014, 9148: 91483K.
- [4] Arsenault R, Madec P Y, Paufigue J, et al. ESO adaptive optics facility progress and first laboratory test results [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9148: 914802.
- [5] Gavel D T. An overview of guidestar laser technologies [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8447: 84470E-84470E-7.
- [6] Sun Jingwei, Lu Tianyao, Liu Lishuang, et al. Design and assembly of transmitter-telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 369-375. (in Chinese)
- [7] Liu Xiaomin. Approach to the design of laser emitting optical system[J]. *Applied Optics*, 1996, 17(5): 19-21. (in Chinese)
- [8] Hardy W J. Adaptive Optics Forastronomy Telescope [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [9] Ageorges N, Dainty C. Laser Guide Star Adaptive Optics for Astronomy [M]. London: NATO Scientific Affairs Division, 1997.
- [10] Lv Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 47-51. (in Chinese)
- [11] Wang Yunping, Huang Jianyu, Qiao Guanglin. A method for evaluating high energy laser beam quality [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2001, 12(10): 29-33. (in Chinese)
- [12] Wu Hanpin. Evaluation and applied analysis of laser beam quality [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 128-132. (in Chinese)