



DOI: 10.12086/oe.2018.170735

TMT 激光导引星系统设计

李 敏^{1,2*}, 江长春^{1,2*}, 魏 凯^{1,2}, 凡木文^{1,2},
芮道满^{1,2}, 唐金龙^{1,2}, Boyer C³, Wang L Q³,
Trubey M³

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³三十米望远镜, 加利福尼亚州 帕萨迪纳 91107, 美国

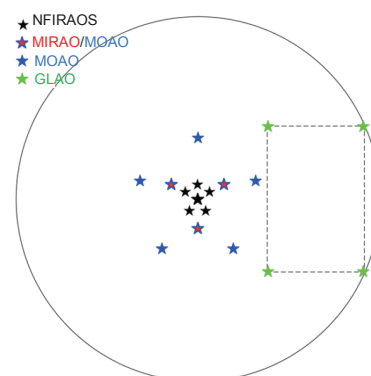
摘要: 激光导引星系统(LGSF)是美国 30 m 望远镜(TMT)的组成部分之一, 在满足 TMT 对科学目标高分辨力成像和光谱探测的性能需求方面, LGSF 具有重要的作用。LGSF 主要负责为窄视场红外自适应光学系统(NFIRAOS)和下一代 TMT-AO 系统提供人造钠导星。本文主要讨论 LGSF 以下几部分: 设计概述, LGSF 星群模式, LGSF 波前误差分配, 发射系统设计。

关键词: 激光导引星系统; 30 m 望远镜; 星群; 波前误差分配

中图分类号: O439

文献标志码: A

引用格式: 李敏, 江长春, 魏凯, 等. TMT 激光导引星系统设计[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170735



Design of the TMT laser guide star facility

Li Min^{1,2*}, Jiang Changchun^{1,2*}, Wei Kai^{1,2}, Fan Muwen^{1,2}, Rui Daoman^{1,2}, Tang Jinlong^{1,2},
Corinne Boyer³, Lianqi Wang³, Melissa Trubey³

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³Thirty Meter Telescope, Pasadena, California 91107, USA

Abstract: The laser guide star facility (LGSF) is an integral component of thirty meter telescope (TMT), and is of critical importance in enabling TMT to achieve the performance required to meet the Science Requirements for high resolution imaging and spectroscopy. The LGSF is responsible for generating the artificial LGS required by narrow field infrared adaptive optics system (NFIRAOS) and by the next generation of the thirty meter telescope (TMT) AO systems. The following sections will discuss the LGSF's: design overview, LGSF asterisms, wavefront error budget and Laser Launch Telescope design.

Keywords: laser guide star facility; TMT; asterisms; wavefront error budget

Citation: Li M, Jiang C C, Wei K, *et al.* Design of the TMT laser guide star facility[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170735

收稿日期: 2017-12-09; 收到修改稿日期: 2018-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11443009)

作者简介: 李敏(1981-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事激光导引星技术的研究。E-mail: limin_alanna@163.com

通信作者: 江长春(1986-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光导引星技术的研究。E-mail: jiangchangchun@ioe.ac.cn

1 引言

为了实现对暗弱目标的高分辨力成像和光谱探测,必须采用基于人造激光信标(也称激光导引星)的自适应光学技术。激光信标技术当前主要有瑞利信标和钠信标两种,其中基于钠信标激光器的激光信标生成高度高,已接近大气顶层,属于理想的信标类型。因此人造钠导引星技术是对暗弱目标进行高分辨力成像不可或缺的关键技术。

美国普林斯顿大学的 Happer 在 1982 年首先提出激光钠导引星技术^[1];1984 年,美国麻省理工学院林肯实验室的 Humphreys 等进行了实验验证^[2]。1985 年,法国的 Foy 和 Labeyrie 首先公开发表了激光钠导引星技术^[3];1987 年,美国的 Thompson 和 Gardne 也公开发表了激光钠导引星实验结果^[4]。随后,德国、日本、英国、俄罗斯、中国等都加强了激光钠导引星技术研究,促使其获得快速发展。2003 年,美国在 Starfire 观测台实现了连续波激光钠导引星^[5];2005 年,美国在 Palomar 天文台进一步实现了微秒脉冲激光钠导引星^[6];2009 年欧洲南方天文台与德国 TOPTICA 公司合作采用光纤激光拉曼频移再倍频技术^[7],实现了连续波钠导引星激光输出 25 W,线宽约 2.3 MHz,在 8 m 口径 VLT 望远镜开展了单星自适应光学校正实验,产生的钠导引星光子回波约为 660 photons/cm²/s,相当于约 8 等星;2010 年又进一步实现了 50 W 钠导引星激光输出^[8]。2011 年美国 Lockheed Martin 公司采用 Nd:YAG 激光和频技术,获得了钠导引星激光输出平均功率达 58 W^[6],并在美国 8 m 口径 Gemini 望远镜上加装了 5 颗钠导引星星群系统,开展了自适应光学技术验证实验,验证了星群的优势^[6]。2013 年美国在 Gemini 望远镜上实现了连续波激光钠导引星星群^[9];目前,正在向最先进的微秒脉冲激光钠导引星星群发展。

激光钠导引星系统已经成为自适应光学望远镜的核心装备之一,国际上米级以上口径的天文望远镜都在积极研发,包括日本 8 m 口径的 Subaru 望远镜、欧洲 8.2 m 的甚大望远镜(very large telescope, VLT)、美国星光观测台 1.5 m 望远镜、美国 3.5 m 口径的 Lick 望远镜、美国 5 m 口径的 Hale 望远镜、美国 10 m 口径的 Keck 望远镜-目前世界最大口径的光学望远镜,以及在建的世界最大的光学望远镜之一——30 m 口径的 TMT(thirty meter telescope)望远镜。

2 LGSF 综述

2.1 设计概述

激光导引星系统^[10](Laser guide star facility, LGSF)是 30 m 望远镜(TMT)首光分系统之一,负责为 TMT 首光自适应光学系统-窄视场红外自适应光学系统(NFIRAOS),以及未来的自适应光学系统产生人造导星。本系统由美国 30 m 望远镜委托中国科学院自适应光学重点实验室进行设计。LGSF 使用 9 路钠信标激光,通过镜面传输到固定在 TMT 次镜后端的发射望远镜,再发射到钠层产生 4 种不同模式的星群。LGSF 光路布局如图 1 所示。

2.2 激光导引星系统设计要

根据 TMT 自适应光学系统的波前探测需求,激光导引星系统将在钠层产生 4 种不同模式的星群,如图 2 所示。对激光导引星系统的光学指标主要要求如下:

- 1) 波前误差:波前高阶像差 RMS 小于 40 nm,波前低阶像差 RMS 小于 78 nm。
- 2) 光轴指向精度优于 1"(PV)。

3 LGSF 误差分配

3.1 误差来源

波前误差分配是根据顶层误差要求,通过误差来源分类,将波前误差分配到系统的每一个光学元件,以指导光学元件的加工以及机械装置的设计和装调。

激光导引星系统的光学误差主要来源于以下几方面:光学镜面抛光误差、原理误差、光学加工误差、光学装调误差,以及由于系统重力变形或环境温度变化引起的光学误差。其中光学镜面抛光误差表现为波前高阶像差,其他误差表现为波前低阶像差。如图 3 所示。

3.2 波前高阶像差分配

从激光器出射的激光通过镜面传输,然后发射到钠层。光学镜面抛光误差会对激光束进行相位调制,使得波前相位发生畸变,导致远场光强分布发生变化,影响光斑质量。按照设计要求,激光传输系统和 LGSF 顶端系统的波前高阶像差 RMS 小于 40 nm。首先将 40 nm 总误差分别分配给激光传输系统和 LGSF 顶端系统,然后再按照分系统内部的光学元件进行依次分配。在分配计算时,透镜和反射镜的波前误差和镜面抛光

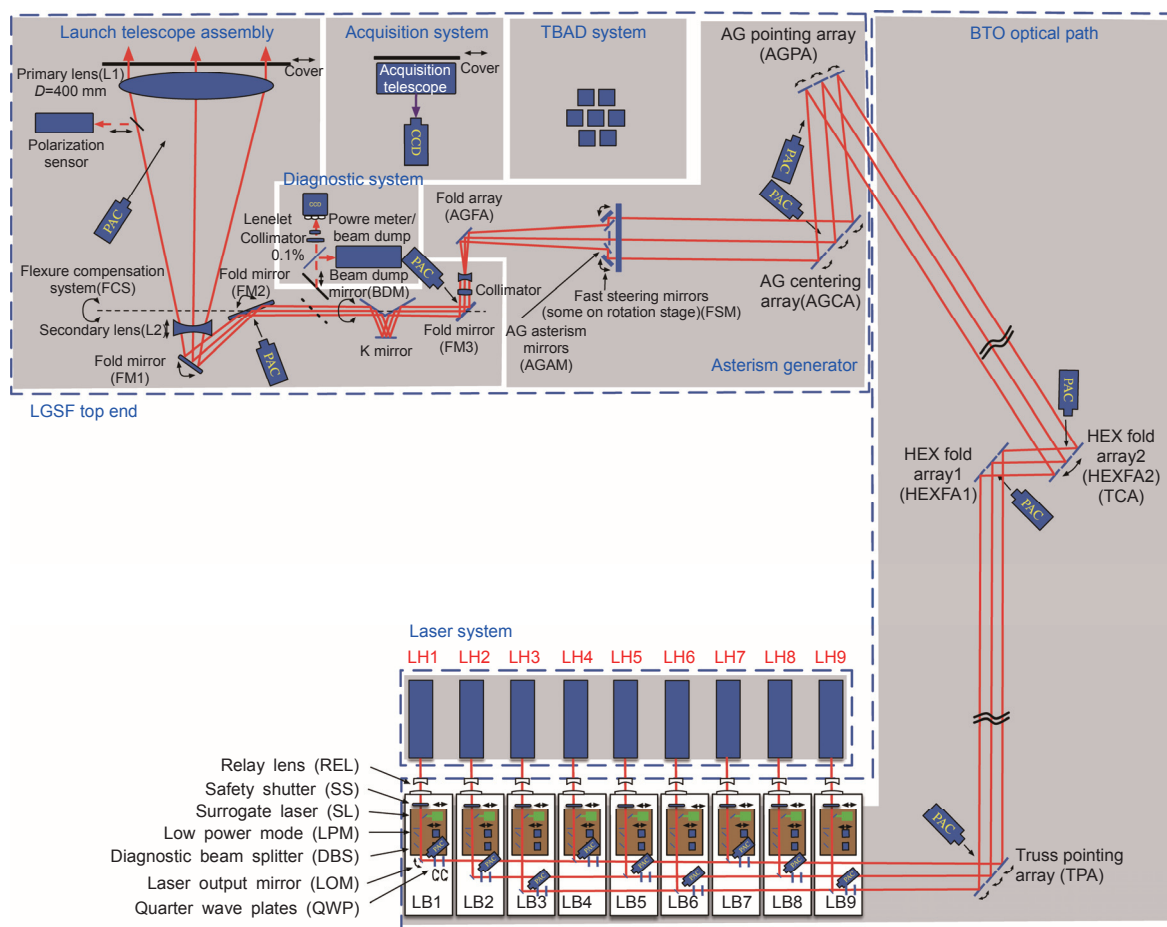


图 1 激光导引星系统光学布局

Fig. 1 Optical layout of laser guide star facility

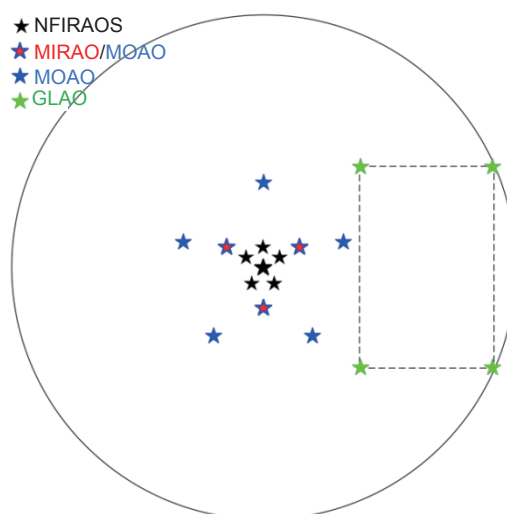


图 2 激光导引星星群模式

Fig. 2 Asterism of laser guide star facility

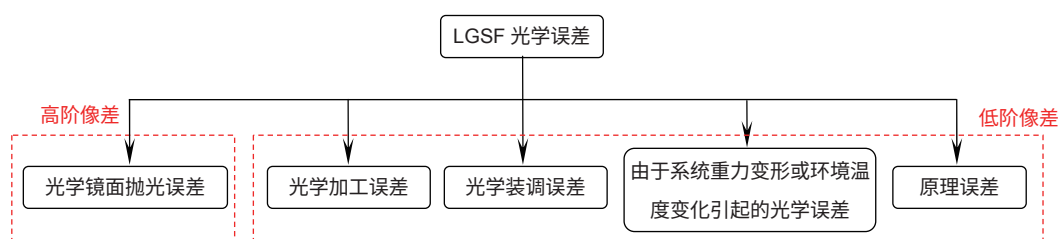


图 3 激光导引星系统的光学误差主要来源

Fig. 3 Main source of optical error of laser guide star facility

误差的关系分别为

$$\text{透镜波前误差} = \text{镜面抛光误差} \times (\text{折射率} - 1) \times \sqrt{\text{光学面数量}}, \quad (1)$$

$$\text{反射镜波前误差} = 2 \times \text{镜面抛光误差} \times \cos(\text{入射角}) \times \text{光学面数量}。 \quad (2)$$

在进行镜面抛光误差分配时，参考目前国际光学镜面高精加工的最好加工水平，总结了不同口径的平面、球面和非球面的实际加工面形抛光误差数据，然后再结合激光导引星系统的具体光学元件，分别对激光传输系统和顶端系统的高阶像差进行了分配。

3.3 波前低阶像差分配

按照设计要求，激光传输系统和 LGSF 顶端系统的波前低阶像差 RMS 小于 78 nm。波前低阶像差主要包括：原理误差、光学加工误差、光学装调误差，以及由于系统重力变形或环境温度变化引起的光学误差。

差。将总的低阶像差按照激光传输系统和 LGSF 顶端系统两部分，利用 Zemax 光学设计软件进行数值模拟仿真计算得到每一项误差分配值，误差分配树如图 4 所示。

其中原理误差是由于实际的光学系统不可能理想成像，因此都会存在一个光学系统的实际像与理想像之间的差异，这种差异就是光学元件的设计误差。原理误差是在光学元件的设计中，为了简化结构而采用了近似的工作原理、公式和参数所造成的误差。

光学加工误差是由于零件各表面的尺寸、形状等偏离了理想值造成的误差，主要考虑曲率半径、厚度、非球面系数、折射率等引起的波前误差，如图 5 所示。

光学装调误差是指组成光学系统的各光学元件的工作表面在系统中的相位位置误差，主要考虑单元件的倾斜和偏心误差，以及元件组之间的间距变化引起

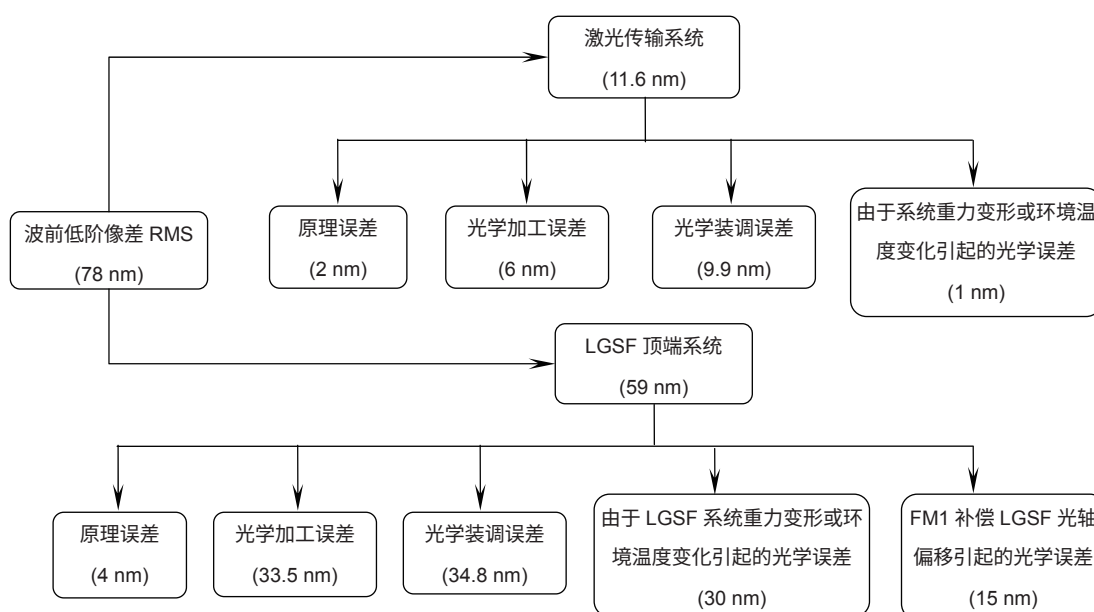


图 4 波前低阶像差分配树

Fig. 4 Low order aberration distribution tree

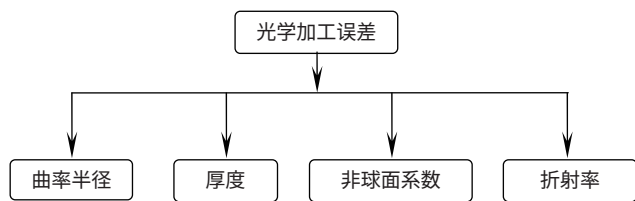


图 5 光学加工误差
Fig. 5 Optical processing error

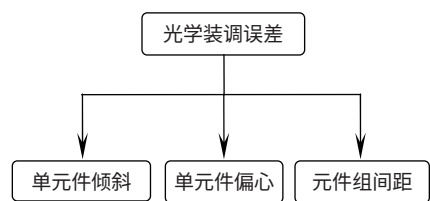


图 6 光学装调误差
Fig. 6 Optical alignment error

的波前误差，如图 6 所示。

重力变形或环境温度变化引起的光学误差，是因为激光导引星系统安装在 TMT 望远镜上，随着 TMT 望远镜高角变化而一起运动，因此 LGSF 系统所受重力方向的变化会导致光学元件面形的变化，从而引入波前误差。同时 TMT 系统的工作温度从 -5°C 到 9°C 的变化也会引起光学元件和机械件的变形，从而引入波前误差。

另外，在 LGSF 顶端系统中，FM1 可通过电动调整来实现光轴补偿和星群偏移，但同时它也会因此引入一定的光学误差。

综合以上各类型误差，将其分配到系统中每一个光学元件，从而指导光学元件的加工以及机械装置的设计和装调。

4 LGSF 设计

根据 LGSF 光路布局，从激光器出来的光，依次通过激光诊断平台、激光传输系统、星群发生器和激光发射系统，最终被发射到钠层。其中发射系统包含了复杂的光路，是激光导引星系统的核心，决定了最终的光束质量能否满足设计要求。

4.1 激光发射系统光学设计

激光发射系统将 9 路不同视场的激光光束放大，

然后通过一个发射望远镜发射到钠层，同时利用 K 镜消除星群的旋转。发射系统的指标要求如表 1 所示。

表 1 发射系统主要指标
Table 1 Main requirement of LTA

Item	Requirement
FoV	Cover the GLAO filed
Zenith range/($^{\circ}$)	0~65
Temperature/($^{\circ}\text{C}$)	-5~9
Throughput	0.88
Aperture/mm	400
WFE(High order)/nm	36(RMS)
WFE(Low order)/nm	59(RMS)

根据指标要求，设计了两种发射系统方案：反射式发射系统和透射式发射系统，两种方案如图 7、图 8 所示，主要包含了以下光学元件：

- 1) 准直器：由 2 块透镜组成，将 9 路激光耦合进发射望远镜，并作为 LTA 的第一级放大；
- 2) K 镜：像消旋器，通过查表控制 K 镜的转动，消除由于 TMT 望远镜高角的变化对钠导星星群产生的旋转；
- 3) 发射望远镜：反射式发射望远镜由离轴抛物面

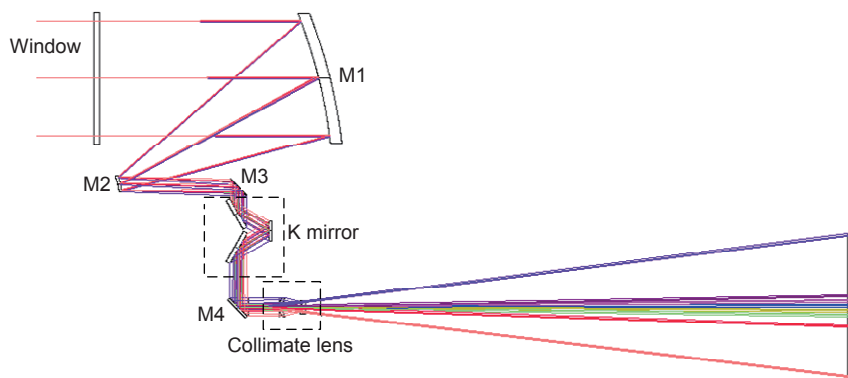


图 7 反射式发射系统光路图
Fig. 7 Reflective design of LTA

反射镜和双曲面反射镜组成,透射式发射望远镜由 2 块透镜组成,作为 LTA 的第二级放大,发射口径为 400 mm,高斯光束 $1/e^2$ 的口径为 240 mm,与 TMT 望远镜同轴。

经过初步分析,两种发射系统在不同视场的性能如图 9 所示,可以看出两种方案在要求的视场内光学性能大致相当。

由于整个发射望远镜固定在与 TMT 望远镜 X 轴平行的枢轴上,以补偿 TMT 望远镜在 X 轴方向的变形引起的指向误差, Y 轴方向变形则通过发射系统内

部反射镜来补偿。其中,反射式系统通过双曲面次镜 M2 绕着“零慧差点”旋转补偿(如图 10),透射式系统则通过反射镜 FM1 倾斜实现补偿。M2 绕“零慧差点”的旋转要求具有非常严格的公差(0.0001 mm 的 X 轴偏移、 0.0003° 的 X 轴旋转和 0.00075° 的 Y 轴旋转),综合考虑光学性能、公差要求和风险等多个因素,最终放弃反射式,采用透射式发射系统。最终系统参数如表 2 所示。

4.2 发射望远镜结构设计

由于激光导引星系统在工作状态下需要跟随望远

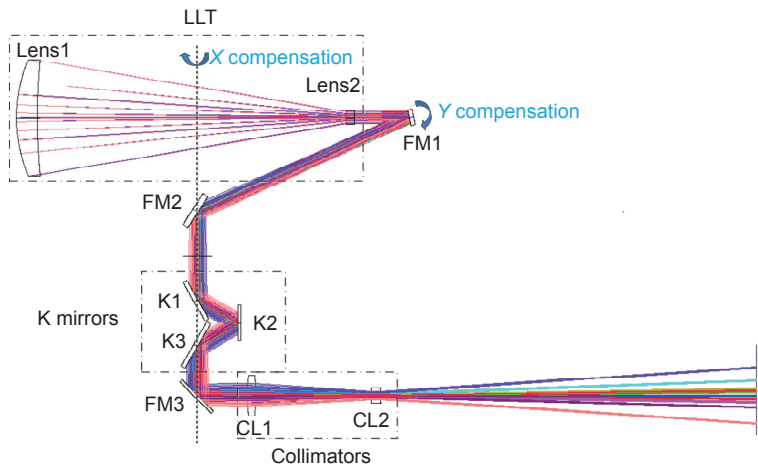
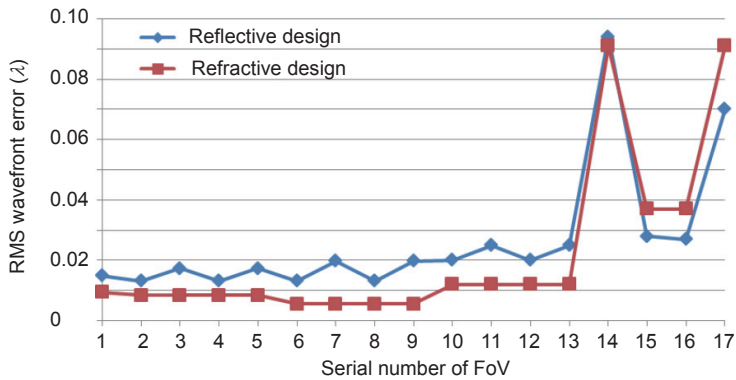


图 8 透射式发射系统光路图
Fig. 8 Refractive design of LTA



Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
FoV/(°)	0	35(+x,+y)	35(+x,-y)	35(-x,+y)	35(-x,-y)	70(+x,+y)	70(+x,-y)	70(-x,+y)	70(-x,-y)
Serial number	10	11	12	13	14	15	16	17	
FoV/(°)	150(+x,+y)	150(+x,-y)	150(-x,+y)	150(-x,-y)	408(x),279(y)	168(x),279(y)	168(x),-279(y)	408(x),-279(y)	

图 9 两种发射系统性能比较
Fig. 9 Optical performance of different LTA design

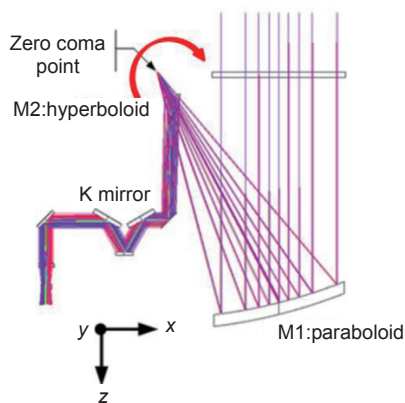


图 10 反射式望远镜 M2 绕“零慧差点”旋转补偿方案
Fig. 10 Compensation plan of reflective design

镜俯仰轴转动,因此发射望远镜的结构设计需要考虑：

- 1) 重力方向变化范围： $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$
- 2) 外部环境温度变化范围： $-5^{\circ}\text{C} \sim +9^{\circ}\text{C}$

根据光学设计的误差分配，发射望远镜透镜位置误差分配如表 3 所示，两个透镜间距的公差要求非常严格，这也要求结构设计必须对此重点考虑。另外，

当外部环境温度发生变化时，两个透镜的折射率和曲率半径都会发生相应的变化从而引入像差，可以通过透镜间距变化来主动补偿这一误差。根据仿真分析，发射望远镜两个透镜间距补偿需求为 $0.00147\text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 。

发射望远镜结构示意图如图 11 所示,为保证透镜间距在外部环境温度变化等不同工况下的公差，采用了分段式镜筒和热变形补偿的结构形式。发射望远镜外

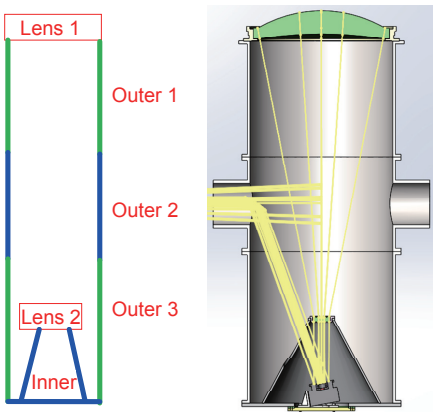


图 11 发射望远镜结构示意图
Fig. 11 Approach of LLT structure

表 2 激光发射系统光学参数

Table 2 Optical parameters of laser launch telescope assembly

#	Optic	Radius/mm	Thickness/mm	Clear aper. diam/mm	Material	Conic value	Tilt/deg
1	Lens1	397.6348	70	400	BK7	-0.3778	
2		1235.0483	900	400			
3	Lens2	-78.9557	13	64	F2	-0.8014	
4		-1097.3432	190	64			
5	FM1	Infinity	600	64	Mirror		10
6	FM2	Infinity	440	115	Mirror		55
7	K1	Infinity	130	143	Mirror		60
8	K2	Infinity	130	93	Mirror		30
9	K3	Infinity	225	150	Mirror		60
10	FM3	Infinity	72	110	Mirror		45
11	CL1	176.0704	29.3	90	SF4	-0.27	
12		389.6267	299.8	90			
13	CL2	-86.8874	30	40	SF4		
14		139.1348		40			

表 3 发射望远镜透镜位置误差分配

Table 3 Lens location tolerance of LLT

Item	LLT decenter /mm	LLT tilt/ deg	Lens decenter /mm	Lens tilt/ deg	Lens distance/ mm	Thermal compensation of lens distance/ (mm/°C)
Tolerance	0.01	0.017	0.01	0.005	0.004	0.00147

表 4 发射望远镜透镜位置变化有限元计算结果

Table 4 The LLT deformation FEA results

Item	LLT decenter /mm	LLT tilt /deg	Lens decenter /mm	Lens tilt /deg	Lens distance /mm
Tolerance	0.01	0.017	0.01	0.005	0.004
C1	0	0.0001	-0.0027	-0.0003	-0.0001
C2	-0.0005	-0.0002	0.0043	0.0005	-0.0005
C3	0	0	0	0	0.001

部镜筒由三段组成，上下两段材料均为铟钢，中间段及内部 Lens2 透镜的支撑筒材料为普通碳钢，通过优化各段长度，确保在外部环境温度变化 1 °C 时，透镜间距变化为

$$\Delta L_{\text{outer1}} + \Delta L_{\text{outer2}} + \Delta L_{\text{outer3}} - \Delta L_{\text{inner}} \approx 0.00147 \text{ mm}$$

为了验证设计的有效性，建立了发射望远镜的有限元模型计算在不同工况下，发射望远镜透镜位置的变化。最终的仿真分析结果如表 4 所示，其中工况 C1 为望远镜天顶角由 0 ° 变化至 45 °，工况 C2 为望远镜天顶角由 0 ° 变化至 90 °，工况 C3 为环境温度由 +9 °C 变化至 -5 °C。

通过有限元仿真计算结果表明，发射望远镜的结构设计能够满足对透镜位置的公差分配要求。

5 结 论

在激光导引星系统的详细设计阶段，根据顶层误差要求，通过误差来源分类，确定了波前误差分配的方法。从光学性能、公差要求等方面对比研究了两种发射系统方案，最终确定了采用透射式发射系统；设计了分段式镜筒和热变形补偿的发射望远镜结构形式，有限元计算结果表明，发射望远镜结构设计能够满足光学设计的公差要求。

参考文献

[1] Happer W, MacDonald G J, Max C E, et al. Atmospheric-

turbulence compensation by resonant optical backscattering from the sodium layer in the upper atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, **11**(1): 263–276.

[2] Humphreys R A, Primmerman C A, Bradley L C, et al. Atmospheric-turbulence measurements using a synthetic beacon in the mesospheric sodium layer[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(18): 1367–1369.

[3] Foy R, Labeyrie A. Feasibility of adaptive telescope with laser probe[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1985, **152**(2): L29–L31.

[4] Pfrommer T, Hickson P, She C Y. A large-aperture sodium fluorescence lidar with very high resolution for mesopause dynamics and adaptive optics studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(15): L15831.

[5] Bienfang J C, Denman C A, Grime B W, et al. 20 W of continuous-wave sodium D_2 resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(22): 2219–2221.

[6] Velur V, Kibblewhite E J, Dekany R G, et al. Implementation of the Chicago sum frequency laser at Palomar laser guide star test bed[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5490**: 1033–1040.

[7] Feng Y, Taylor L R, Calia D B. 25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(21): 19021–19026.

[8] Taylor L R, Feng Y, Calia D B. 50W CW visible laser source at 589nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(8): 8540–8555.

[9] d’Orgeville C, Diggs S, Fesquet V, et al. Gemini South multi-conjugate adaptive optics (GeMS) laser guide star facility on-sky performance results[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8447**: 84471Q.

[10] Li M, Wei K, Tang J L, et al. The progress of TMT laser guide star facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9909**: 99095Q, doi: 10.1117/12.2231987.

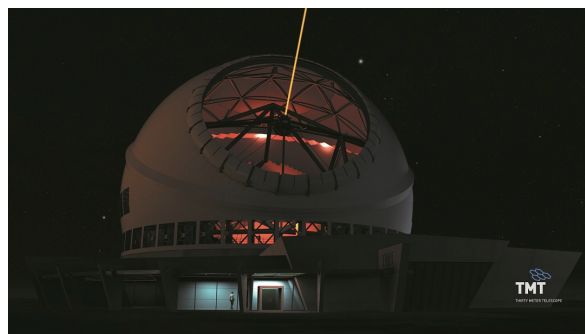
Design of the TMT laser guide star facility

Li Min^{1,2*}, Jiang Changchun^{1,2*}, Wei Kai^{1,2}, Fan Muwen^{1,2}, Rui Daoman^{1,2},
Tang Jinlong^{1,2}, Corinne Boyer³, Lianqi Wang³, Melissa Trubey³

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³Thirty Meter Telescope, Pasadena, California 91107, USA



TMT is working using LGSF(Rendering)

Overview: The laser guide star facility (LGSF) is an integral component of thirty meter telescope (TMT), and is of critical importance in enabling TMT to achieve the performance required to meet the Science Requirements for high resolution imaging and spectroscopy. The LGSF is responsible for generating the artificial LGS required by narrow field infrared adaptive optics system (NFIRAOS) and by the next generation of TMT AO systems. The Institute of Optics and Electronics (IOE) in Chengdu of China is the lead supplier and system integrator of the LGSF at TMT. The TMT LGSF design, manufacturing, testing and integration work is managed and carried out by IOE.

The LGSF will project several possible asterisms on sky, generated at first light by up to six 589 nm sodium lasers and situated on a platform behind the TMT primary mirror. The beams are then transported using beam transport optics around the elevation rotating structure of the telescope, to a center launch location situated behind the TMT secondary mirror. The asterisms are then generated and projected on sky through a laser launch telescope. The LGSF will generate the following 4 asterisms on the sky: 1) The multi conjugate AO (MCAO) asterism. 2) The laser tomography AO (LTAO) asterism. 3) The multi object AO (MOAO) asterism. 4) The ground layer AO (GLAO) asterism. The LGSF requires strict tolerance both for wavefront error and pointing error.

The wavefront error resources are analyzed and then the wavefront budget is distributed based on the requirement which has different amplitude weighted wavefront error in low order modes and high order modes and the calculation method of tolerance is described. The high order wavefront error is related to the optical mirror polishing error. It is distributed to every optical element by the experience. The low order wavefront error is mainly influenced by the following aspects: design error, optical processing error, optical alignment errors, and optical error due to gravity deformation or temperature change. It is distributed to every element by numerical simulation calculation.

The key component of LGSF is the laser launch telescope assembly through which the laser beams are expanded to 240 mm($1/e^2$ diameter of Gaussian beam) and launched to the Sodium layer. According to the requirements, two alternative optical designs are designed. Compared with the reflective design, the refractive design has the same level of optical performance but requires more relaxed tolerance. As a result, the refractive design is chosen and the mechanical design is conducted. Considering the tight tolerance of the lens location and distance, a three-section tube and thermal compensation structure are used for the laser launch telescope. The FEA results show that the design could meet the tolerance requirement well.

Citation: Li M, Jiang C C, Wei K, *et al.* Design of the TMT laser guide star facility[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170735

Supported by National Natural Science Foundation of China (11443009)

* E-mail: limin_alanna@163.com; jiangchangchun@ioe.ac.cn