

近地天体望远镜配置大阵面CCD后 轴外像差的校正*

照日格图^{1,2†} 赵海斌^{1,2,3,4‡} 刘伟⁵ 李彬^{1,2,6}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210033)

(2 中国科学院行星科学重点实验室 南京 210033)

(3 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室 上海 200083)

(4 中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

(5 中国科学院紫金山天文台望远镜技术实验室 南京 210033)

(6 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 近地天体望远镜由SI600S ($4k \times 4k$) CCD升级为STA1600LN ($10k \times 10k$) CCD后, 观测视场由 4 deg^2 增至 9 deg^2 , 可用视场直径由望远镜原设计视场的 3.14° 增至 4.28° , 超出原设计36%, 同时作为CCD密封窗的场镜增厚8.75 mm; 两个因素导致10k CCD成像的轴外像差增大, 视场外围的像质变差. 依据望远镜原始设计光学参数, 借助光学设计软件ZEMAX进行像质改善尝试, 最终选择在10k CCD场镜前插入一个由两片球面透镜组成的场改正镜, 使10k CCD的轴外像差得到校正. 同时还提出了一个进一步拓展近地天体望远镜观测能力的设计方案, 将望远镜的可用视场从目前的 14.38 deg^2 扩展至 28.27 deg^2 .

关键词 大视场巡天望远镜, CCD, 场镜, 轴外像差, 施密特改正镜, 高级像差, 场改正镜

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

近地天体望远镜是中国科学院行星科学重点实验室的主力观测设备, 主要承担太阳系内小天体(小行星、彗星)的巡天搜索观测, 作为国际小行星预警网(International Asteroid Warning Network, IAWN)正式成员之一, 探测发现对地球具有潜在威胁的近地小天体, 是近地天体望远镜的首要任务. 同时它还承担国内银河系反银心方向数字巡天(XDSS-GAC)以及银河系反银心方向 2000 deg^2 $\text{H}\alpha$ 窄波段巡天观测计划等大样本海量观测数据的国内合作任务. 得益于其超大的光学视场、自动化的观测系统、结合人工智能的数据处理方案, 近地天体望远镜在大视场光学巡天领域有极高的能力和效率.

2019-04-10收到原稿, 2019-06-21收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11633009、11273067), 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室基金资助

†getu@pmo.ac.cn

‡meteorzh@pmo.ac.cn

近20年来国际天文学界大视场光学巡天项目层出不穷, 使用大视场光学望远镜进行巡天观测已经形成趋势, 由新概念主导的现代光学设计思想造就了一大批光学性能优异而又各具特色的大视场巡天望远镜。配合技术日新月异的CCD终端, 极大地提高了光学巡天的观测效率, 使天文观测迎来了海量数据时代。表1列出部分具有代表性的大视场巡天望远镜的性能参数。

表1 大视场巡天望远镜的性能参数
Table 1 The performance parameters of wide-field survey telescopes

Telescope ^a	Diameter/m	FoV area ^b /deg ²	Focal ratio	Wavelength/nm	Purpose
LSST	8.4	9.62	1.23	320–1080	imaging
LAMOST	4.0	19.6	5.0	340–1040	spectrum
BigBOSS	3.79	7.0	3.22	360–980	spectrum
SDSS	2.5	7.0	5.0	340–1028	imaging&spectrum
Pan-STARRS	1.8	7.0	4.44	420–1050	imaging
ZTF	1.32	47.0	2.32	340–1040	imaging
CNEOST	1.0	14.3	1.8	486–1040	imaging
ATLAS	0.5	43.0	2.0	420–820	imaging

^a LSST: Large Synoptic Survey Telescope; LAMOST: Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope; BigBOSS: The Big Baryon Oscillation Spectroscopic Survey; SDSS: Sloan Digital Sky Survey; Pan-STARRS: Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System; ZTF: Zwicky Transient Facility; CNEOST: China Near Earth Object Survey Telescope; ATLAS: Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System.

^b FoV: Field of View.

表1中的CNEOST (China Near Earth Object Survey Telescope)即中国科学院紫金山天文台(紫台)的近地天体望远镜, 其光学系统为折反射平像场施密特望远镜结构, 由紫台杨世杰先生设计。施密特改正镜口径1 m, 球面主镜口径1.2 m, 系统焦距1.8 m, 焦比1.8, 底片比例9 $\mu\text{m}/1''$, 圆形无晕视场直径3.14°。观测波段486.1–1014 nm, 中心波长656.3 nm, 像斑几何能量集中度50% $\leq 1''$ 、80% $\leq 2''$ ^[1]。2006年秋季望远镜投入观测时, 终端配备4k CCD SI600S, 像元尺寸15.4 μm , 靶面边长63×63 mm^[1], 对应4 deg²正方形视场, 对角线89 mm对应直径2.81°圆形视场, 约使用到望远镜设计视场直径的89%。口径120 mm的场镜作为CCD杜瓦的密封窗, 透镜内面距离CCD靶面6 mm。在其4 deg²视场内像斑均呈完美的圆点, 视场中心区域与视场外围的像斑大小几无差别。图1显示望远镜原始光学设计的成像情况, 图2显示4k CCD图像不同视场区域的截图, 截取范围200×200 pixel。截图显示靶面边角的图像背景上有宽窄不等的暗淡灰白色条纹为干涉条纹, 并非噪声。

近地天体望远镜自2006年秋季投入太阳系内小天体巡天搜索观测以后, 其巡天观测能力和效率一直处于领先地位, 但在获得大量新发现的同时也逐渐感受到来自国外新建成的大视场望远镜的压力。唯有进一步提升近地天体望远镜的巡天观测效率才能够保持领先优势, 故在2013年初近地天体望远镜完成了软硬件系统的全面升级, 用10k CCD

STA1600LN替换4k CCD SI600S, 将观测视场由 4 deg^2 扩展至 9 deg^2 ; 同时启用自动化观测系统并结合了具有自主学习能力的数据处理系统, 使近地天体望远镜的小天体巡天搜索观测效率和数据处理能力产生了质的飞跃.

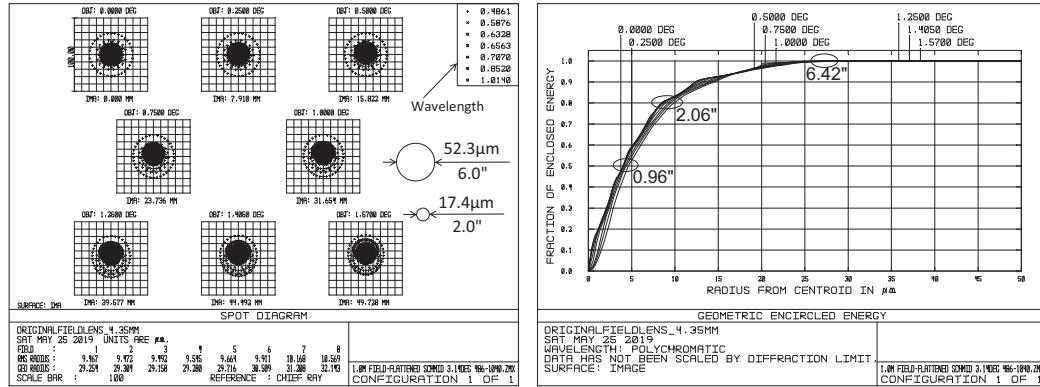


图 1 望远镜原始设计的像斑点图和像斑几何能量集中度. OBJ: **DEG-物方(Object)半视场角, 单位为度(以DEG表示). IMG: **MM-像方(Image)视场半径, 单位为毫米(mm). RMS RADIUS: (像斑)均方根半径. GEO RADIUS: (像斑)几何半径.

Fig. 1 The spot diagram and geometric encircled energy of the original design for the telescope. OBJ: **DEG-The half FoV angle in the direction of the object, in unit of degree (DEG). IMG: **MM-The radius of the FoV of the image position, in unit of millimeter. RMS RADIUS: (image disk) Root-Mean-Square radius. GEO RADIUS: (image disk) Geometrical radius.

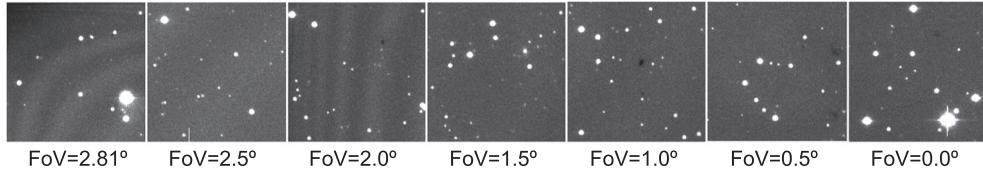


图 2 4k CCD不同视场区域的图像

Fig. 2 The images of different FoV areas of the 4k CCD

2 近地天体望远镜升级大阵面CCD带来的问题

近地天体望远镜使用的10k CCD STA1600LN, 其像元尺寸为 $9 \mu\text{m}$, 靶面边长 $95 \times 95 \text{ mm}$, 对角线长 134.4 mm 对应直径为 4.28° 圆形视场, 约为原设计视场直径的136%. 因视场直径增大, 新设计的平场透镜直径由4k CCD的 120 mm 增至 160 mm . 视场增大导致轴外像差的增加, 视场外围超出原设计视场的区域像质下降较为明显, CCD靶面边缘尤其四角的像斑呈现出一定的椭圆拖尾特征. 由于平场透镜同时也是CCD杜瓦腔体的密封窗, 在CCD杜瓦腔体内抽真空后将承受一个大气压的负压. 其中心挠度(应力变形)与透镜半径的4次方成正比, 与透镜厚度的3次方成反比^[2]. 故CCD厂家将其厚度由4k CCD的 4.35 mm 增至 13.1 mm , 因而场镜的凸球面与CCD靶面的间距增加了 8.75 mm . 这一因素导致望远镜的色球差略有增加, 整个视场内像斑的几何能量集中度也有所下降. 由于主镜的有效口径 1200 mm 是与原设计无晕视场 3.14° 相匹配的, 视场

增大到4.28°后,超出原设计视场的区域,通过改正镜直径1000 mm的入射光束将有部分落到口径1200 mm的主镜反射面之外,使10k CCD靶面四角的像斑呈现一定的渐晕效应。图3显示10k CCD图像不同视场区域的截图,截取范围200×200 pixel。截图显示的图像背景为灰白色,是将CCD的16个读出通道的显示对比度调节一致所致,并非噪声。图4显示望远镜新场镜设计的成像情况。

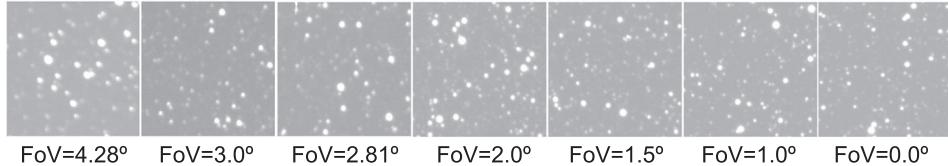


图3 10k CCD不同FoV区域的图像

Fig. 3 The images of different FoV areas of the 10k CCD

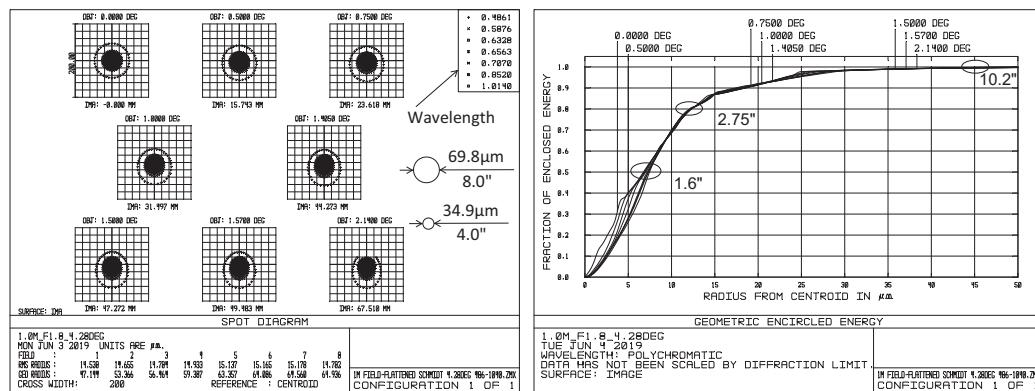


图4 新场镜设计的像斑点图和像斑几何能量集中度

Fig. 4 The spot diagram and geometric encircled energy of the new field lens design

3 施密特系统特性与10k CCD轴外像差分析与校正

单片玻璃改正镜的施密特望远镜,其残余像差中占比最大的是色球差^[3]。因其改正镜玻璃对不同波长的光线具有不同程度的色散,所以系统像斑是由全波段不同色光像斑叠加而成的,基于三级像差理论的色球差计算公式为:

$$\delta u'_p = \frac{\eta'}{f'_1} = \frac{1611}{v_A N^3} \text{ arcsec}, \quad (1)$$

(1)式中, $\delta u'_p$ 为色球差(100%几何能量), η' 为系统像斑直径, f'_1 为施密特系统的焦距, N 为施密特系统的焦比, v_A 为施密特改正镜光学玻璃的阿贝数, $v_A = \frac{n'_0 - 1}{n'_1 - n'_0}$, n'_0 、 n'_1 分别为施密特改正镜光学玻璃在望远镜工作波段红蓝两端的折射率^[3]。由(1)式可知,单片玻璃改正镜的施密特望远镜,其残余色球差与工作波段内红蓝两端的折射率差 $n'_1 - n'_0$ 成正比,工作波段越宽残余色球差越大。残余色球差也与系统焦比的3次方成反比,即在口径相同的情况下,焦距越短残余色球差越大。欧洲南方天文台(ESO)口径1 m的施

密特望远镜, 焦比 $N = 3$, 视场直径 6.4° , 观测波段365–1014 nm, 单片施密特改正镜玻璃材料为UBK7. 其在486.1–1014 nm波段的像斑约为 $1.5''$, 在365–1014 nm波段的像斑约为 $3.0''$ ^[3]. 由(1)式分别算得 $\delta u'_p$ 为 $1.723''$ 和 $3.354''$, 两者是相符的. 近地天体望远镜焦比 $N = 1.8$, 观测波段486.1–1014 nm, 改正镜玻璃材料为K9, 由(1)式可得 $\delta u'_p = 7.975''$, 与图1显示的像斑几何能量集中度数值相符.

减小施密特望远镜残余色球差的有效途径有两个, 其一是合理缩小望远镜工作波段的宽度. 近地天体望远镜的科学目标是以太阳系内小天体(小行星、彗星)的巡天搜索观测为主, 小行星、彗星等天体因反射太阳光而变得可见, 因此光学系统设计时将工作波段确定在486.1–1014 nm之间, 中心波长656.3 nm. 由于避开了可见光谱蓝端365–486.1 nm之间的一段, 由(1)式可得在365–1014 nm波段的 $\delta u'_p = 15.53''$, 即望远镜的残余色球差减小约一半, 才得以实现1.8的快焦比. 其二是将施密特改正镜由单片玻璃形式, 改为由两片不同类型光学玻璃组成的消色差结构, 可以大幅度减小残余色球差对成像的影响. 如上述ESO 1 m施密特望远镜, 用UBK7和LLF6两种光学玻璃组成消色差改正镜替换原有的单片UBK7玻璃改正镜, 系统焦比和视场角保持不变, 在365–1014 nm波段的像斑最大尺度约为 $0.6''$ ^[3].

施密特望远镜校正像差的关键因素是施密特改正镜上的施密特高次曲面, 近地天体望远镜的施密特曲面参数是针对 3.14° 无晕视场设计的, 对于超出原始设计视场之外的区域, 校正轴外像差的效果会有所下降. 现代光学设计理论对施密特光学系统的研究已非常详尽, 10k CCD增加的轴外像差(高级像差)有两个来源. 其一, 超出原设计视场角的倾斜入射光束, 与原始设计视场角的倾斜入射光束相比, 其通过改正镜的光程增加了. 其二, 倾斜入射光束在施密特高次曲面上的有效入射高度存在 $y/\cos u_{pr}$ 的投影效应^[3] (y 为倾斜入射光束的入射高度, u_{pr} 为半视场角). 对于施密特改正镜的高级像差有基于三级像差理论的计算公式:

$$\delta W' = \frac{\Delta\eta'}{f'_1} = \frac{u_{pr}^2}{16n'N^3} \text{ rad}, \quad (2)$$

(2)式中, $\delta W'$ 为高级像差, $\Delta\eta'$ 为轴外像斑直径, n' 为改正镜玻璃材料的折射率^[3]. 将近地天体望远镜的光学参数: 焦比1.8, 施密特改正镜K9玻璃在486.1–1014 nm波段两端的折射率 n' (1.521955和1.507308)以及10k CCD对应的半视场角 2.14° , 望远镜原始设计的半视场角 1.57° , 分别代入(2)式得: $1.847''$ 和 $1.865''$ 及 $0.994''$ 和 $1.004''$, 即望远镜视场由 3.14° 增大到 4.28° , 施密特改正镜的高级像差增量在 $0.853''$ – $0.861''$ 之间. 这一结果也说明, 施密特改正镜的高级像差对于不同波段的像斑差异很小.

近地天体望远镜的施密特改正镜已经加工成形, 无法通过改变其施密特曲面的面形参数来校正因增大视场而增加的高级像差, 而10k CCD的新场镜只能校正像面的弯曲, 因此, 只有通过在光路中添加新光学元件的方式来校正新增的高级像差. 新增加的光学元件有几个限制条件: 尺寸尽量小且结构简单, 原材料和制造工艺都容易解决; 安装位置不能与望远镜现有的光学和机械结构相干涉; 镜框的直径必须小于主镜中心孔定位压圈的直径332 mm, 即不对成像光路产生新的遮光. 综合考虑, 选择在10k CCD场镜前的一定距离内插入一个场改正镜的校正方案. 现代光学设计理论对用于各种类型的反射望远镜主焦点的场改正镜已有详尽的理论研究和大量成功的应用实例. 如美国帕洛玛天

文台的5 m Hale望远镜, 其主焦点的场改正镜由4片球面透镜构成, 与抛物面主镜组合, 在其直径25'的视场范围内保持像斑直径约为0.5''左右^[3]. 夏威夷天文台的10 m Keck望远镜, 其主焦点的场改正镜由3片透镜组成(其中两片透镜带有一个非球面), 与双曲面主镜组合, 在其直径30'的视场范围内保持像斑直径约为0.5'' (红波段)和0.7'' (蓝波段)^[3]. 图5为5 m Hale望远镜和10 m Keck望远镜主焦点场改正镜结构示意.

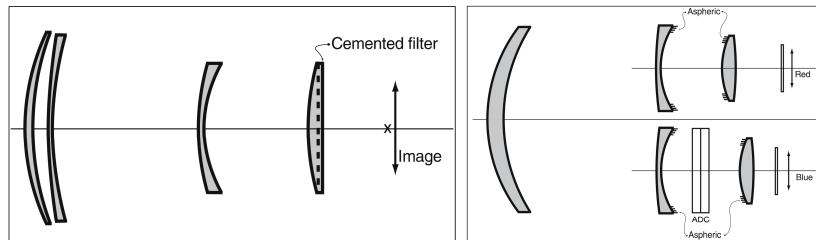


图5 用于5 m Hale望远镜及10 m Keck望远镜主焦点的场改正镜

Fig. 5 The field corrector of the 5 m Hale and 10 m Keck telescopes' primary focus

依据望远镜原始设计的光学参数^[1], 借助光学设计软件ZEMAX进行设计尝试, 最终确定了A、B两个场改正镜应用方案, 两个场改正镜均由两片球面透镜构成. A方案将场改正镜置于滤光片开合机构的活动范围之外, 与场镜间距离为249 mm, 不需要改变目前滤光片系统的运作方式. B方案将场改正镜置于场镜前95 mm的位置并与场镜一同优化, 距离95 mm足以容纳快门和插片式滤光片系统, 应用时还需重新加工一片场镜. 图6给出场改正镜A、B两个设计方案的光路结构示意及A方案与滤光片运作机构之间的空间位置关系, 表2给出A、B两个场改正镜设计方案的部分结构参数, 图7显示分别插入场改正镜A、B后望远镜的成像情况.

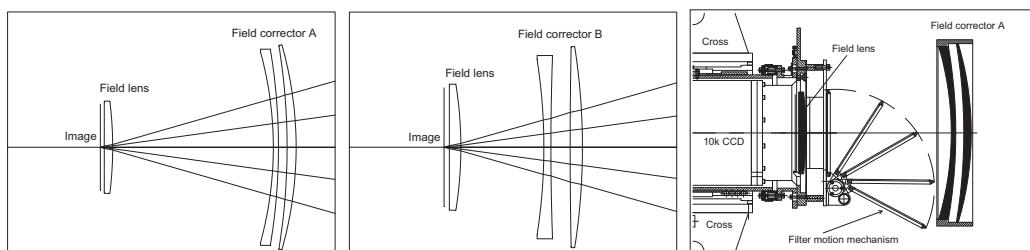


图6 场改正镜A和B的光路结构示意及场改正镜A的机械结构简图

Fig. 6 The optical layout of the correctors A and B, and the mechanical sketch of the corrector A

表2中的透镜直径均已加入了预留的装夹尺寸, 可以看出两个方案都能够保证其镜框直径小于望远镜光路中心直径332 mm的遮挡区域, 不会产生新的遮光. 两个场改正镜的透镜面形均为球面, 材料获得和制造工艺上没有特别的困难. 透镜最大径厚比39, 没有超过1 m施密特改正镜的径厚比41.6 (1040/25), 但加工时需仔细考虑支撑和抛光工艺, 控制透镜变形量在公差范围内.

从图7可以看出, 在10k CCD场镜前分别插入场改正镜A、B之后, 10k CCD视场外的像质都有明显的改善, 像斑椭圆拖尾现象消失, 同时整个视场内像斑的几何能量集

中度也有所提高。场改正镜B的校正效果更好些, 但因其是与场镜一同优化的, 应用时需更换一片新的场镜。

表 2 两个场改正镜的透镜尺寸参数

Table 2 Size parameters of the lens of two field correctors

Field corrector	Glass	Diameter/mm	Thickness/mm	Diameter/Thickness
A	first lens	SILICA	325	14
	second lens	K10	312	8.0
B	first lens	QK1	235	14
	second lens	K9	215	8.0

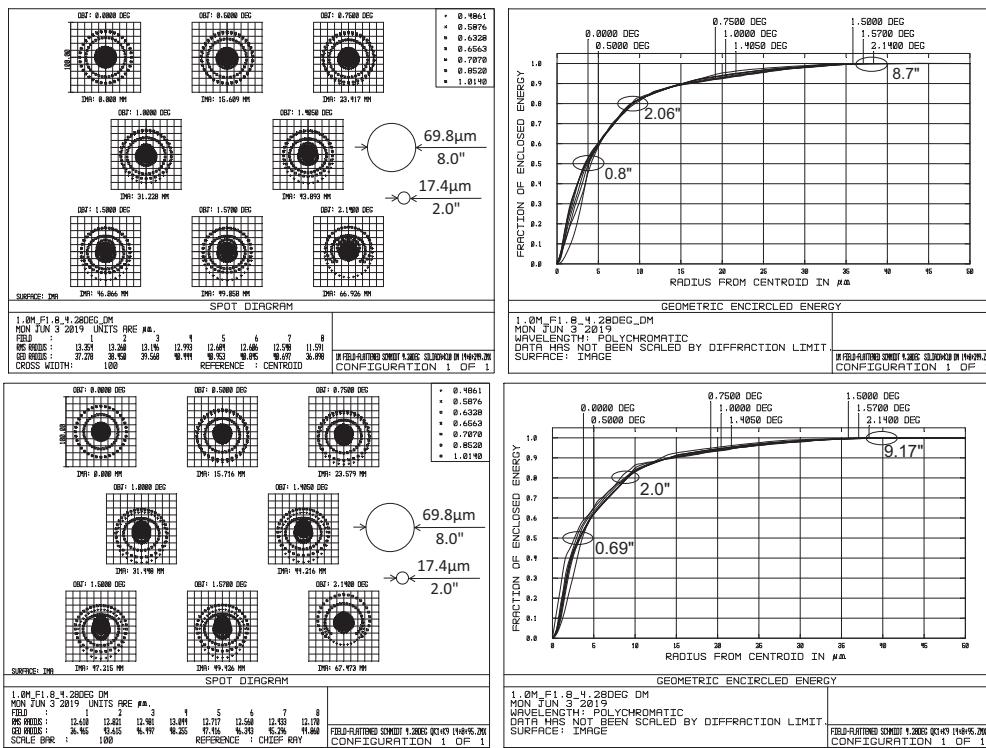


图 7 上面两图为插入场改正镜A后望远镜的成像情况, 下面两图为插入场改正镜B后望远镜的成像情况。

Fig. 7 The two top panels show the spot diagram and geometric encircled energy of the corrector A, while the two bottom panels show the spot diagram and geometric encircled energy of the corrector B.

表3列出了望远镜原始设计、10k CCD新场镜设计以及10k CCD分别与场改正镜A、B方案组合的像斑几何能量集中度, 可以看出A、B两个场改正镜设计方案均可将望远镜的像质校正至接近望远镜原始设计3.14°视场的像质水平, 10k CCD成像残存较大轴外像差的问题得到了较好的解决。

表3 4个光学设计的像斑几何能量集中度
Table 3 The geometric encircled energy of the four optical design

Optical design	50%	80%	100%
Original design (FoV 3.14°)	0.96"	2.06"	6.42"
10k CCD (FoV 4.28°)	1.60"	2.75"	10.2"
10k CCD + Field corrector A (FoV 4.28°)	0.80"	2.06"	8.70"
10k CCD + Field corrector B (FoV 4.28°)	0.69"	2.0"	9.17"

4 展望与探索

如前所述, 通过使用场改正镜的方式校正因扩大望远镜视场而增大的轴外像差的方法是可行的, 球面透镜的场改正镜容易制造, 具有经济性和实用性, 是解决此类问题的又一种思路。展望未来, 结合可能的望远镜CCD终端升级换代, 我们沿着使用场改正镜改善望远镜成像质量的思路继续拓展, 尝试将望远镜的可用视场进一步扩大。从目前10k CCD对应的直径4.28°圆形视场扩大到直径6°圆形视场, 视场面积由 14.38 deg^2 扩展至 28.27 deg^2 , 可将近地天体望远镜的巡天观测效率再提高1倍。最终优化得到的6°场改正镜依然由两片球面透镜构成, 置于未来的CCD场镜前109 mm处。第1透镜有效口径327 mm、厚度15 mm; 第2透镜有效口径280 mm、厚度10 mm、玻璃材料为QK1和KF1。透镜的直径依然控制在其镜框直径小于望远镜光路中心直径332 mm的遮挡区域。图8显示6°场改正镜的光路结构示意及插入6°场改正镜后望远镜的成像情况。

由图8的像斑几何能量集中度可知, 望远镜的可用视场直径扩大到6°时, 由于有场改正镜校正因视场增大而增加的轴外像差, 视场范围内所有像斑的几何能量集中度, 50%能量保持在1.0"以内, 80%能量保持在2.0"左右, 100%能量约为8.7"。这样的成像质量依然与望远镜原始设计3.14°视场的成像质量相近似, 具有很好的实用性。由图8的像斑点图可知, 半视场角1.57°之外的像斑开始呈现渐晕特征。近地天体望远镜的主镜有效口径1200 mm, 与原设计无晕视场3.14°相匹配, 在3.14°视场范围内成像没有渐晕。超出3.14°范围后, 透过改正镜入射的直径1000 mm的光束将有部分落到主镜反射面之外, 成像的渐晕效应会随着视场角的增大而增加。在入射光瞳平面上, 轴外光束截面面积与轴向光束截面面积之比称为面积渐晕^[4]。由此算得视场3.14°时面积渐晕为1.0, 视场4.28°时面积渐晕约为0.98, 视场6.0°时面积渐晕约为0.925。即在直径4.28°视场边缘的像斑, 其光能量损失约为2%, 在直径6.0°视场边缘的像斑, 其光能量损失约为7.5%。这样的光能量损失尚处于可以接受的范围之内, 6°视场的场改正镜设计方案依然具有实用价值。

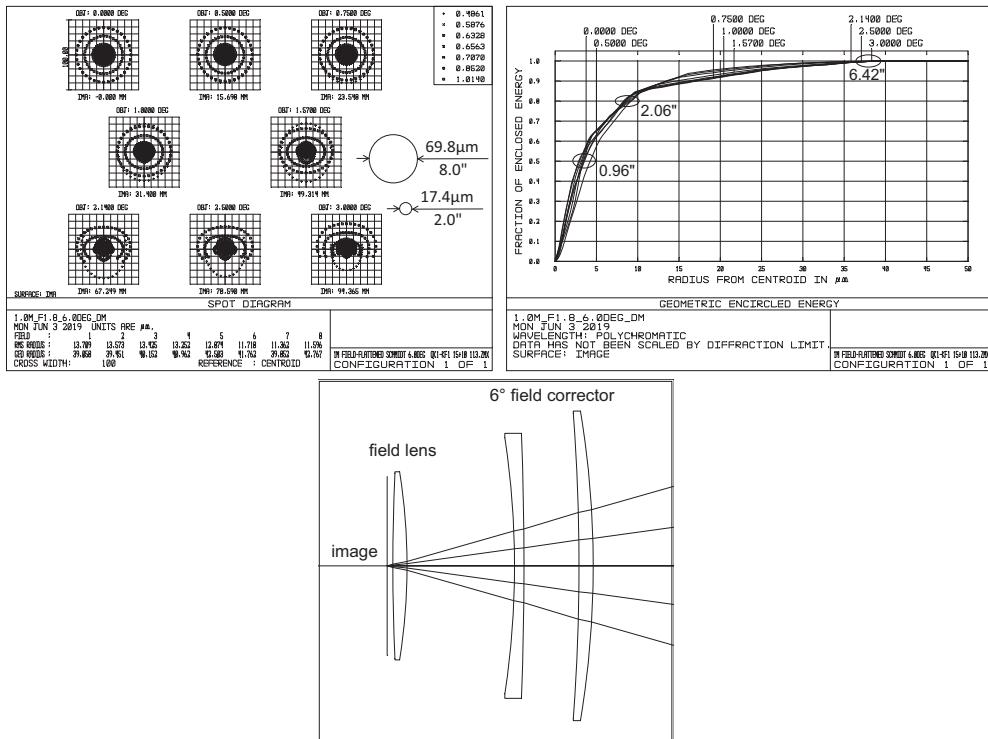


图 8 上面两图为 6° 场改正镜的像斑点图和像斑几何能量集中度, 下面的图为 6° 场改正镜的光路结构示意。

Fig. 8 The two top panels show the spot diagram and geometric encircled energy of the field corrector for 6° , while the bottom panel shows the optical layout for the field corrector for 6° .

本文从改善近地天体望远镜10k CCD的成像质量出发, 进而探索了进一步拓展近地天体望远镜观测效率的可能途径, 给出了3个可行的场改正镜光学设计方案, 其思路可供相同或近似类型的大视场望远镜升级大面阵CCD时参考借鉴。

致谢 感谢中国科学院天文财政专项, 中国科学院创新交叉团队, 中国科学院行星科学重点实验室和中国科学院紫金山天文台小行星基金会的支持。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院紫金山天文台. 近地天体望远镜项目验收鉴定会资料, 2009
- [2] 成大先. 机械设计手册-第2卷. 5版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 162
- [3] Wilson R N. Reflecting Telescope Optics I. 2nd ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 2004
- [4] 光学仪器设计手册编辑组. 光学仪器设计手册(上). 北京: 国防工业出版社, 1971: 13

Correction of Off-axis Aberration of the China Near Earth Object Survey Telescope with 10k CCD

ZHAORI Ge-tu^{1,2} ZHAO Hai-bin^{1,2,3,4} LIU Wei⁵ LI Bin^{1,2,6}

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033*)

(2 *Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033*)

(3 *Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083*)

(4 *Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026*)

(5 *Laboratory of Telescope Technology, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033*)

(6 *School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

ABSTRACT The SI600S (4k×4k) CCD of CNEOST (China Near Earth Object Survey Telescope) now has been upgraded to STA1600LN (10k×10k), with the image region size that becomes larger, and the observation field of view (FoV) of telescope that enlarges from 4 to 9 deg². And correspondingly, the diameter of the original available FoV is expanded, from 3.14° to 4.28°, which is improved by 36% compared with the original design. Moreover, the thickness of the field lens increases by 8.75 mm. These two factors lead to the result that the off-axis aberration increases and image quality becomes worse. In order to solve this problem, based on the original optical design parameter of the telescope, we try to improve the image quality with the ZEMAX optical design software. The method is to design an additional field corrector to correct the off-axis aberration. The corrector is composed of two lenses with all spherical surfaces, and placed in front of the existing field lens. Furthermore, we put forward a new optical design which expands the available FoV from 14.38 to 28.27 deg².

Key words wide-field survey telescope, CCD, field lens, off-axis aberration, schmidt corrector, higher order aberrations, field corrector