

三镜反射式光学系统综述 (特邀)

孟庆宇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 三镜反射式光学系统由于具备同时校正球差、彗差与像散三种像差的能力, 可以实现较高的光学性能, 基于其反射镜数量少、装调复杂性可接受等特点, 在光学成像领域有着广泛的应用。特别是离轴三镜反射式光学系统, 凭借其无孔径遮拦、可实现大视场等诸多优势, 在高性能光学仪器装备中占据着重要位置。文中以典型的三镜反射式光学系统发展为主线, 全面介绍了多种类型的三镜反射式光学系统, 涵盖同轴三反系统、两轴三反系统、离轴三反系统与无焦三反系统, 讨论了其光学结构特点、结构关联与光学系统性能, 并给出了设计示例, 供光学设计领域研究人员共同探讨。

关键词: 光学系统; 反射式光学系统; 同轴反射式光学系统; 离轴反射式光学系统;
无焦反射式光学系统

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210986

Overview of three-mirror reflective optical system (*Invited*)

Meng Qingyu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The three-mirror reflective optical system can achieve high optical performance because of its ability to correct the aberrations of spherical aberration, coma and astigmatism at the same time. Based on the characteristics of small number of mirrors and acceptable alignment complexity, it is widely used in the field of optical imaging. In particular, the off-axis three-mirror optical system occupies an important position in high-performance optical instruments and equipment due to its many advantages, such as with unobscuration and with ability of large field of view. Taking the development of typical three-mirror optical system as the main line, various types of three-mirror optical systems were introduced comprehensively, including coaxial three-mirror optical system, two-axis three-mirror optical system, off-axis three-mirror optical system and afocal three-mirror optical system, their optical configuration characteristics, relevance and optical system performance were discussed, and design examples were given for researchers in the field of optical design.

Key words: optical system; reflective optical system; coaxial reflective optical system;
off-axis reflective optical system; afocal reflective optical system

收稿日期: 2021-12-18; 修订日期: 2022-01-02

基金项目: 中国科学院青年创新促进会 (2019219); 国家自然科学基金 (61705220)

作者简介: 孟庆宇, 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学系统设计理论与设计方法、空间光学遥感器方面的研究。

0 引言

反射式光学系统已有 400 多年的发展历史,其具有无色差、环境适应性好、可实现大口径等光学性能优势,在现代光学仪器装备上有着越来越广泛的应用。反射式光学系统结构形式简洁,发展延续性强,几百年来光学构型衍生路线相对清晰,具有更强的设计理论研究性。得益于计算机性能、光学制造能力与光学测试技术的不断提升,反射式光学系统在 20 世纪至今的 100 多年时间里发展迅速,成果瞩目。

从 17 世纪至 20 世纪初,反射式光学系统经历了以 Newton 系统为代表的单镜反射式光学系统和以 Cassegrain 系统、Ritchey-Chrétien 系统为代表的两镜反射式光学系统的两大阶段,反射镜数量的增加与面型方程的非球面化使反射式光学系统的像差校正能力不断增强,但两镜反射式光学系统仅能较好地校正球差和彗差,限制了光学视场的进一步增大。1905 年, Schwarzschild 在论文中证明,不具有可以同时校正球差、彗差、像散和场曲四个赛德尔像差的实用性强的两镜反射式光学系统,拥有第三个具有光焦度的反射镜的反射式光学系统,可以在不同反射镜组合下消除所有三阶像差,而后至今的 100 多年里,各种结构形式的三镜反射式光学系统不断被研究者提出,也衍生出丰富的构型,反射式光学系统进入了三镜结构的黄金发展时代。

文中以三镜反射式成像光学系统的发展为主要路线,介绍了较为典型的同轴三镜反射式光学系统、两轴三镜反射式光学系统、离轴三镜反射式光学系统与无焦三镜反射式光学系统,简要讨论了他们各自的结构特点、结构关联、光学特性以及公开可查的典型应用情况,为光学设计人员的交流提供一定的设计参考。

1 同轴三镜反射式光学系统

同轴三镜反射式光学系统的特征是光学元件口径中心与光轴重合,光学元件基本为旋转对称型,该类型光学系统提出的时间较早,较具有代表性的为 Paul Baker 型三镜反射式光学系统。

Paul Baker 型三镜反射式光学系统于 1935 年由法国光学仪器制造商 Maurice Paul 提出,并于 1945 年被美国人 James Baker 重新独立提出。该三镜反射式

光学系统由 Cassegrain 型无焦光学系统和一个具有球面面型的三镜组成^[1]。Cassegrain 无焦光学系统由凹面抛物面主镜和凸面球次镜组成,无焦光学系统将入射光束准直缩束输出,光线经过具有球面面型的三镜反射,最终成像在像面,如图 1 所示。

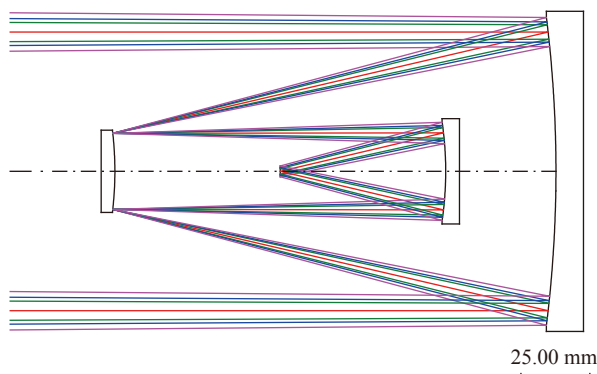


图 1 Paul Baker 三镜系统

Fig.1 Paul Baker three-mirror system

Paul Baker 三镜反射式光学系统的孔径光阑设置在次镜位置,次镜与三镜的曲率半径相同,因此该系统消除了球差、彗差和像散,但残留有像场弯曲。Paul Baker 三镜系统可以实现 5°左右的光学视场,填补了 Ritchey-Chretien 光学系统(可实现 1°左右视场)与 Schmidt 光学系统(可实现 10°以上视场)间视场实现能力的差距。

Paul Baker 三镜反射式光学系统的残余场曲可以通过调整次镜与三镜之间的轴向间隔来校正,此时的系统称为 Willstrop Mersenne-Schmidt 型三镜反射式光学系统^[2],如图 2 所示。

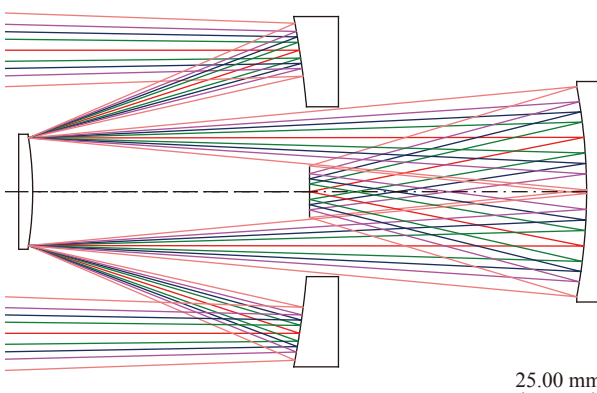


图 2 Willstrop Mersenne-Schmidt 三镜系统

Fig.2 Willstrop Mersenne-Schmidt three-mirror system

Paul Baker 三镜反射式光学系统虽然可以实现较好的成像质量,但是像面位置在光学系统的内部,而且次镜对主镜、像面对三镜均存在较大的孔径遮拦,因此 Paul Baker 三镜反射式光学系统的应用并不是十分广泛。该系统的一个典型的改进型应用是在大型综合巡天望远镜 (Legacy Survey of Space and Time,

LSST) 中, LSST 望远镜主镜、次镜及三镜的口径分别为 8.4 m、3.4 m 和 5 m, 望远镜光学系统在 Paul Baker 三镜反射式光学系统的基础上设置了像面前的校正透镜组, 形成折反射式结构, 实现了 3.5° 的光学视场^[3], 如图 3 所示。

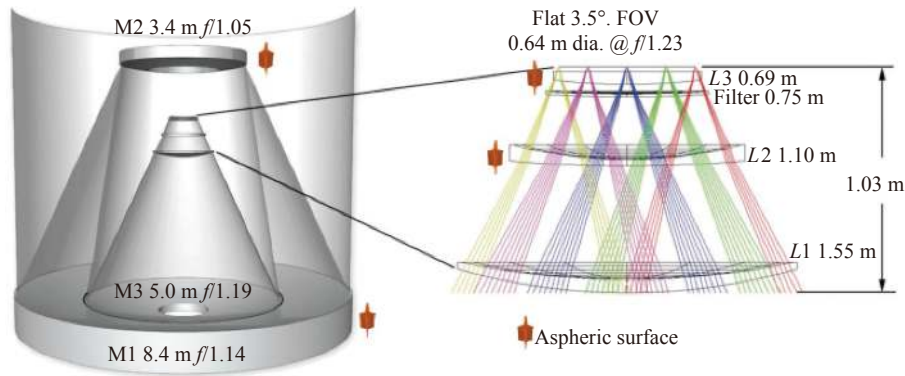


图 3 LSST 光学系统^[3]

Fig.3 LSST optical system^[3]

1969 年, Rumsey 提出了一种巧妙的同轴三镜反射式光学系统^[4], 如图 4 所示。该光学系统的主镜与三镜具有几乎相同的轴向位置与曲率半径, 主镜中心孔洞设置为次镜的镜室, 主次镜剖视图看似像一块镜体, 与 LSST 光学系统较为相似。此外, 次镜中心设置了通光孔, 光线在经过三镜反射后, 从次镜中心的通光孔穿过, 成像在位于次镜背部的像面。

播, 三个反射镜均采用双曲面面型设计, 如图 5 所示。由于该系统的三镜轴向位置与曲率半径没有被严格约束, 设计自由度高于 Rumsey 系统, 可以实现 1.2° 视场角范围内的良好成像。

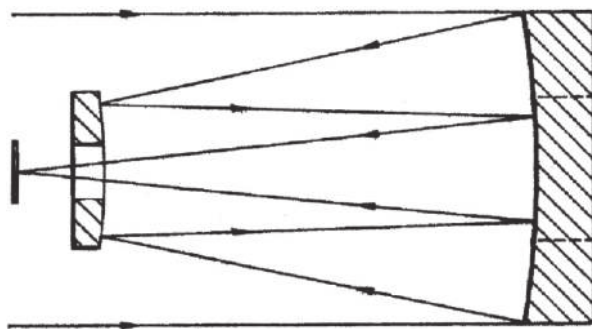


图 4 Rumsey 光学系统^[4]

Fig.4 Rumsey optical system^[4]

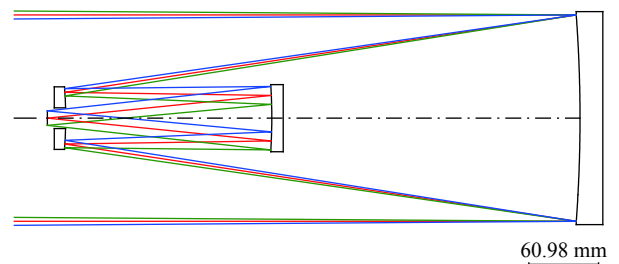


图 5 Korsch 型同轴三镜系统

Fig.5 Korsch coaxial three-mirror system

1972 年, Korsch 设计了一种同轴三镜反射式光学系统^[5], 该光学系统集成了 Paul Baker 系统与 Rumsey 系统的特点, 光束在次镜与三镜间以平缓的角度传

除了以上几种典型的同轴三镜反射式光学系统外, 无中间像面的同轴三镜反射式光学系统还有 Robb 三镜系统以及其他构型 Korsch 三镜系统等, 这些系统构型同 Paul Baker 三镜反射式光学系统相似, 由光焦度为“正”、“负”、“正”的三面反射镜组成, 均不具有中间像面, 为一次成像系统。不同的是主次镜光焦度分配略有差异, 反射镜的面型也较多由非球面或高次非球面组成, 因此可以获得良好的成像质量^[6-7]。

无中间像面的同轴三镜反射式光学系统的不足之处是体积尺寸较为庞大。

2 两轴三镜反射式光学系统

尽管光学设计者们提出的同轴三镜反射式光学系统方案较多,但由于孔径遮拦因素,许多方案不具有实用性。20 世纪 70 年代, Korsch 提出了一些两轴三镜反射式光学系统方案,具有很好的应用价值。这些系统均为二次成像系统,具有中间一次像面,同时具有实入瞳与实出瞳。

根据像差求解,三个反射镜通过光焦度的分配与非球面化设计可以消除三阶球差、彗差与像散。1972 年, Korsch 给出了可以校正前三项初级像差且可以平场的三镜反射式光学系统结构的解算方程,同时提出了一种两轴三镜反射式光学系统结构,如图 6 所示^[8]。

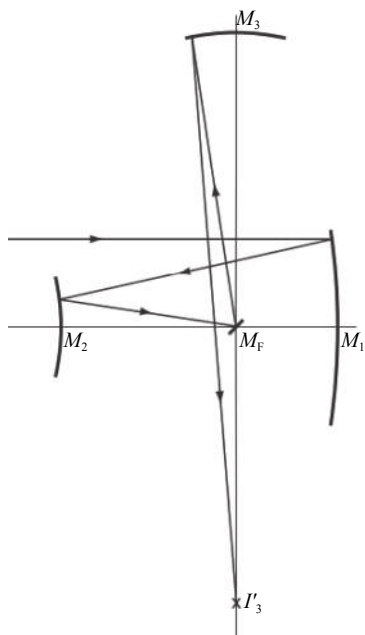


图 6 Korsch 于 1972 年提出的两轴三镜系统^[8]

Fig.6 Two-axis three-mirror system proposed by Korsch in 1972^[8]

在该系统中,主镜与次镜形成一个位于二者之间的焦点,即系统的一次像面,通过在该一次像面处设置一面 45°平面折转镜,将光线反射至三镜,再经过三镜成像在像面。

该光学系统在焦距、相对孔径、视场等指标方面可以实现较为全面的性能。图 7 为笔者设计的一个

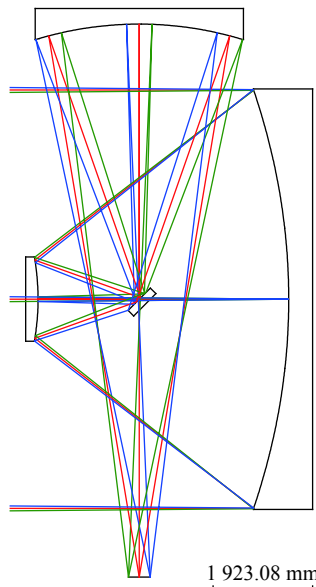


图 7 Korsch 两轴三镜系统

Fig.7 Korsch two-axis three-mirror system

Korsch 两轴三镜反射式光学系统示例,其在焦距为 24 m、相对孔径为 1 : 3、视场角 2ω 为 1°的设计指标下仍可以保证近衍射限成像。

1990 年, Sasian 将 Korsch 两轴三镜方案中的 45°平面折转镜设计为一面凹面镜,形成了一种两轴四镜系统,并将光学系统出瞳位置设计在最后一面凹面镜上,可以通过在出瞳位置设置主动镜校正光学系统像差^[9]。

1977 年, Korsch 提出了另外两种两轴三镜反射式光学系统结构^[10]。第一种结构的主镜与次镜构成类似的 Cassegrain 系统结构,在紧靠主镜后部的位置形成一个实像面,即一次像面,三镜将一次像面的像基本以 1 : 1 的放大率成像在像面。为了避免像面如 Paul Baker 三镜系统一样在光学系统内部,在主镜背部与三镜之间有一面 45°平面折转镜设置在出瞳位置,将像面引出,光路如图 8 所示。

该系统常使用偏置视场范围,具有实现 2°左右的线视场能力,光学结构可以根据成像指标需求和功能需求调整三镜的成像放大率,获得不同长度的后截距。该系统的一个典型应用为 2005 年发射的用于探测火星的高分辨率科学成像实验相机 (High Resolution Science Imaging Experiment, HiRISE) 的光学系统,焦距为 12 000 mm,相对孔径为 1 : 24,视场角为 $1.142^\circ \times 0.175^\circ$,光学系统如图 9 所示^[11],后截距范

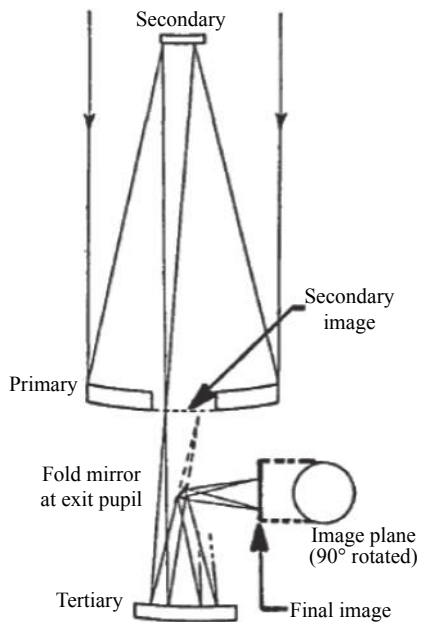


图 8 Korsch 于 1977 年提出的两轴三镜光学系统 I^[10]

Fig.8 Two-axis three-mirror optical system I proposed by Korsch in 1977^[10]

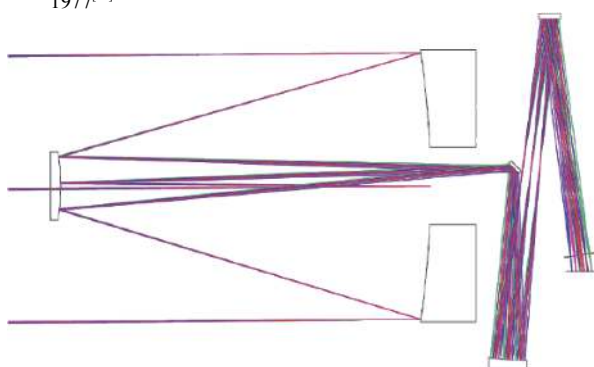


图 9 HiRISE 光学系统

Fig.9 Optical system of HiRISE

围内设置的平面镜作为调焦镜使用。

Korsch 提出的第二种结构如图 10 所示, 该结构在主镜和三镜的对角线方向上设置了一面 45°平面镜, 该平面镜中心有开孔, 使光学系统形成环形视场, 光学系统出瞳设计在平面镜中心孔附近, 以使开孔尺寸最小。

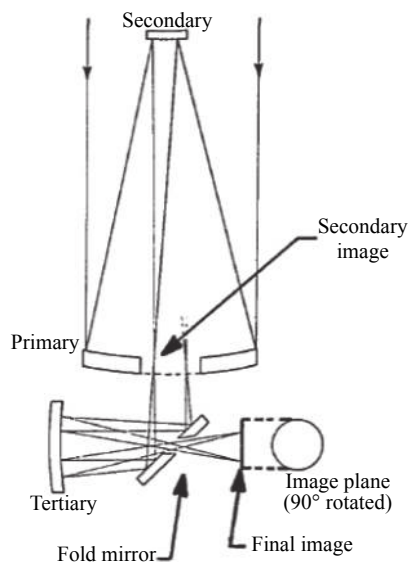


图 10 Korsch 提出的两轴三镜光学系统 II^[10]

Fig.10 Two-axis three-mirror optical system II proposed by Korsch in 1977^[10]

超新星望远镜 (Super Nova/Acceleration Probe, SNAP) 采用该种结构形式进行了望远镜光学系统设计^[12], 如图 11 所示。

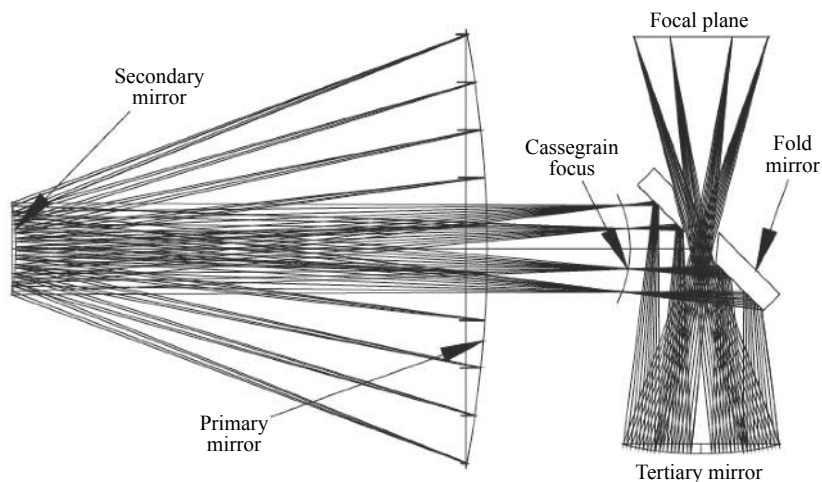


图 11 SNAP 光学系统^[12]

Fig.11 Optical system of SNAP^[12]

3 离轴三镜反射式光学系统

3.1 Schiefspiegler 光学系统

同轴反射式光学系统存在孔径遮拦,对光学系统集光能力和衍射分辨率均造成影响,尤其在视场角较大时这一现象更加明显。离轴反射式光学系统由于不存在孔径遮拦,相同光学口径下具有更强的光能利用率,也更容易获得较高的成像质量。

离轴反射式光学系统的历史可以追溯到 1616 年 Zucchi 提出的前视望远镜方案^[13],如图 12 所

示。Zucchi 将一面凹面青铜镜倾斜放置作为望远镜物镜,被铜镜反射回的光束直接衔接了一个具有负光焦度的折射式伽利略目镜,形成了一套目视天文望远镜系统。为了避免观测者头部对铜镜产生遮挡,该望远镜需要应用轴外视场观测,在当时的设计与制造条件下,该铜镜不仅缺乏详细的面型参数设计、面形精度低,而且不具备在反射镜基底上镀出高反射率膜系的技术能力,因此不可能实现良好的成像质量。

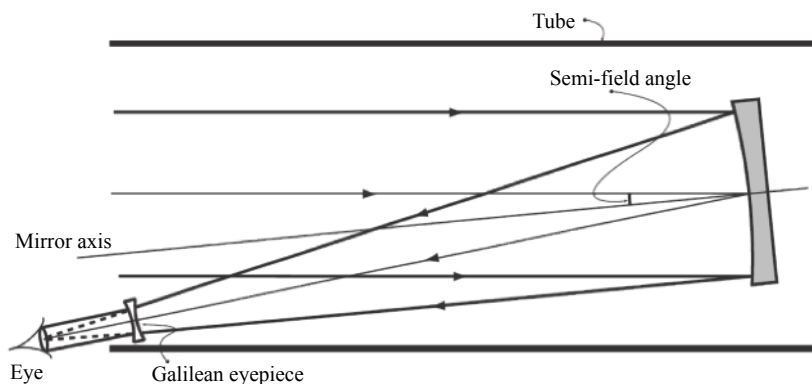


图 12 Zucchi 的前视望远镜^[13]

Fig.12 Zucchi's front-view reflecting telescope^[13]

为了去除 Cassegrain 系统的中心遮拦, Anton Kutter 于 1953 年发表了关于双倾斜镜的文章,在两镜光学系统中通过对主镜和次镜进行角度倾斜,去除了次镜对主镜所产生的孔径遮拦现象,光路如图 13 所示^[14]。Kutter 在文章中引入了德语中表示“倾斜”的一词,即“Schiefspiegler”,从此该词成为了这类无孔

径遮拦光学系统的代表性统称。此后,各种形式的 Schiefspiegler 两镜系统、三镜系统陆续出现,图 14 所示的 Buchroeder Schiefspiegler 三镜系统,图 15 所示的 Solano Schiefspiegler 三镜系统即是其中的两种 Schiefspiegler 三镜系统。

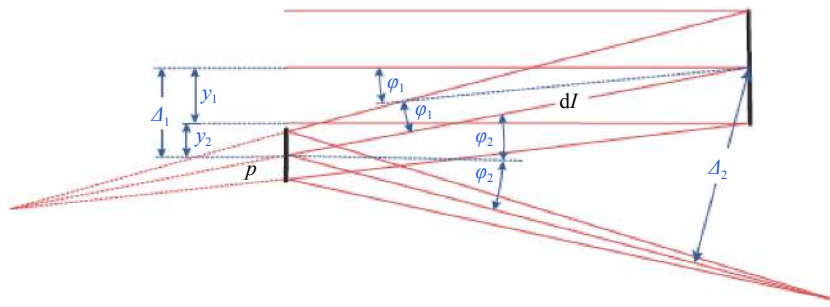


图 13 Schiefspiegler 型光学系统

Fig.13 Schiefspiegler optical system

但是由于反射镜的倾斜给光学系统引入了大量的彗差和像散, Schiefspiegler 型光学系统仅在相对孔

径为 1 : 20 以下的情况下才具有较为满意的成像质量,这也限制了 Schiefspiegler 光学系统的推广与应用。

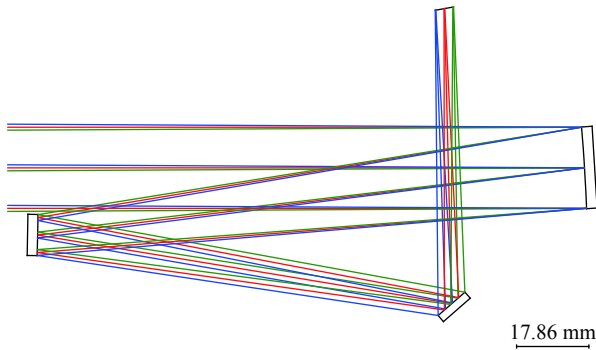


图 14 Buchroeder Schiefspiegler 三镜系统

Fig.14 Buchroeder Tri-Schiefspiegler

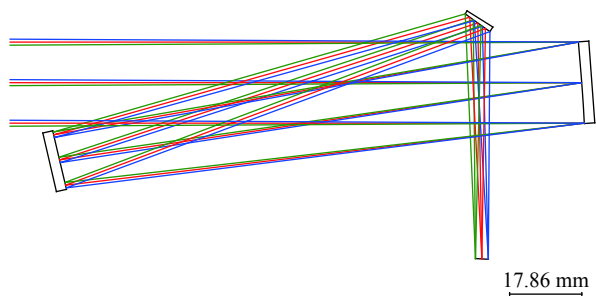


图 15 Solano Schiefspiegler 三镜系统

Fig.15 Solano Tri-Schiefspiegler

3.2 离轴 TMA 光学系统

目前应用性较为广泛的离轴反射式光学系统是离轴三镜消像散 (Three-Mirror Anastigmats, TMA) 光学系统。不同于 Schiefspiegler 系统, 离轴 TMA 系统中, 三面反射镜的母镜在一条轴线上, 这条轴线即为光学系统的光轴, 三面反射镜为其各自母镜的子孔径区域。因此, 离轴 TMA 反射式光学系统是同轴 TMA 反射式光学系统的一个偏置的子部分。从这种理解角度可以构建由同轴 TMA 系统结构向离轴 TMA 系统结构的转化过程, 下面以两种常用的结构形式为例给出说明, 如图 16 所示^[15]。

第一种为视场偏置型的离轴 TMA 光学系统, 该系统在同轴 TMA 光学系统的基础上进行视场偏置形成, 常用类型以次镜作为孔径光阑, 主镜与三镜也可同时进行孔径偏置。

第二种为孔径偏置型的离轴 TMA 光学系统, 该系统在同轴 TMA 光学系统的基础上进行孔径偏置形成, 常用类型以主镜作为孔径光阑, 也可同时进行光学系统视场偏置。

离轴 TMA 光学系统中的反射镜面型基本为二次

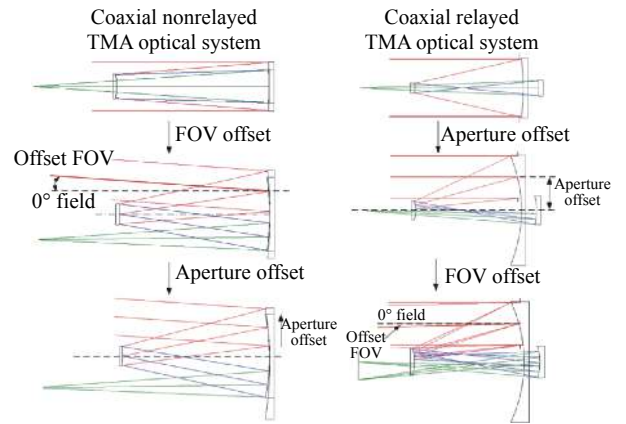
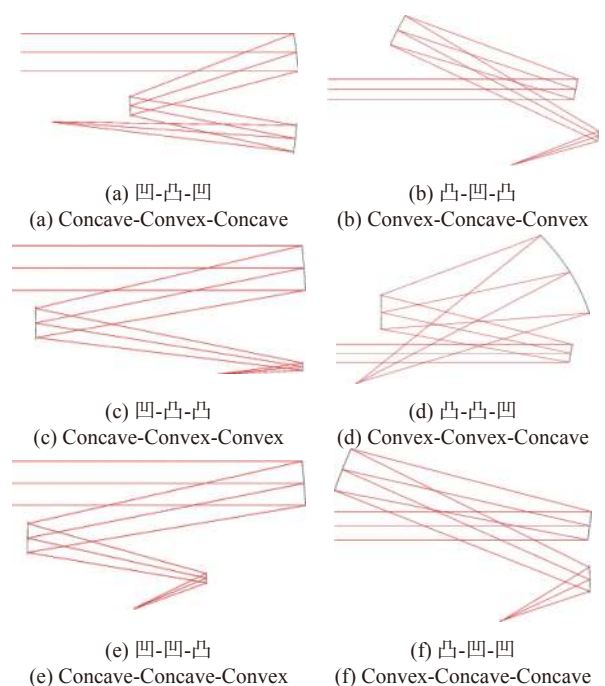


图 16 从同轴系统到离轴系统的转化过程^[15]

Fig.16 Transformation process from coaxial system to off-axis system^[15]

曲面或高次非球面, 随着光学技术的发展, 光学自由曲面也被逐渐应用, 并具有良好的应用前景。随着成像视场的增大, 光学系统不仅需要关注前三项单色像差的校正, 平场设计也尤为重要, 因此, 在离轴 TMA 光学系统中必须有一面具有负光焦度的反射镜才可以实现对场曲的校正。Korsch 归纳总结了 10 种可以实现平场设计的离轴 TMA 光学系统结构^[16], 如图 17 所示。文中后续介绍的一些光学系统也在这些结构范围内。

从图 17 中可以看出, 与同轴三镜反射式光学系



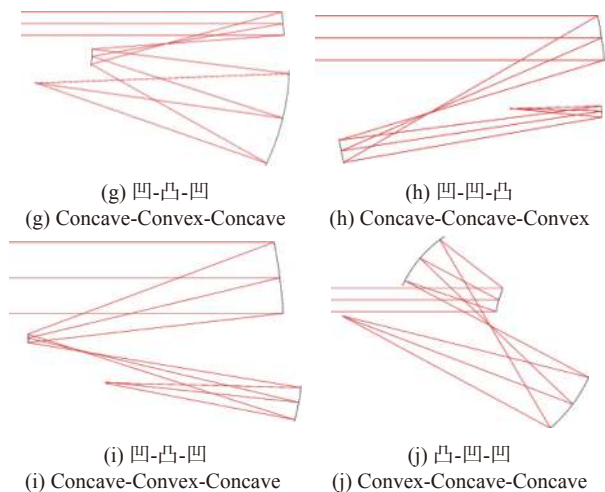


图 17 零匹兹瓦和的离轴 TMA 光学系统结构

Fig.17 Configurations of Zero-Petzval off-axis TMA optical system

统相同, 离轴 TMA 光学系统也基本可以分为两大类: 无中间像面系统即一次成像的离轴 TMA 光学系统和有中间像面系统即二次成像的离轴 TMA 光学系统。这两种离轴 TMA 光学系统的结构形式非常丰富, 其中 Cook 申请了很多专利, 并得到了较多应用, 因此很多离轴 TMA 光学系统也均被命名为 Cook 式光学系统。

3.3 无中间像面的离轴 TMA 光学系统

在无中间像面一次成像的离轴 TMA 光学系统中, 根据孔径光阑所在位置, 有三种较为经典的构型: (1) 光阑位于次镜的 Wetherell TMA 光学系统; (2) 光阑前置的 Cook TMA 光学系统; (3) 光阑位于反射镜之间的 Walrus TMA 光学系统。

1980 年, Wetherell 在专利中提出了光阑位于次镜的离轴 TMA 光学系统, 该系统无实入瞳, 出瞳在无穷远处^[17]。该光学系统与 Cooke 三片式透镜结构具有光学结构共性, 如图 18 所示, 均由光焦度为“正”、“负”、“正”的三个光学元件组成, 而且孔径光阑也均设置在次镜位置, 光学系统具有对称性。对比 Rumsey 于 1969 年在专利所提出的同轴反射式光学系统, Wetherell TMA 光学系统可以理解为 Rumsey 光

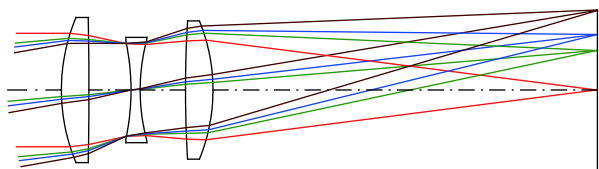


图 18 三片式透镜光学系统

Fig.18 Triplet lenses optical system

学系统的离轴化应用。

大多数应用情况下, Wetherell TMA 光学系统具有非常好的对称性, 主镜、三镜与光阑的轴向距离相近, 主镜与三镜的尺寸接近, 基于这种特点, 可以将主镜与三镜集成制造在一块反射镜材料上, 实现主三镜的一体化制造, 可以简化光学系统装调流程^[18-19]。

基于对称性特性, Wetherell TMA 光学系统善于实现很大的光学视场角, 在应用非球面的情况下, 光学系统可以较容易地获得 20°~30°的线视场角, 如图 19 所示。在应用自由曲面等复杂光学曲面后, 性能会有大幅度提升。2019 年, 笔者应用该构型光学系统结合光学自由曲面设计, 实现了焦距为 1000 mm、相对孔径为 1 : 10、视场角为 80°×4°的超大视场离轴 TMA 光学系统^[20], 如图 20 所示。

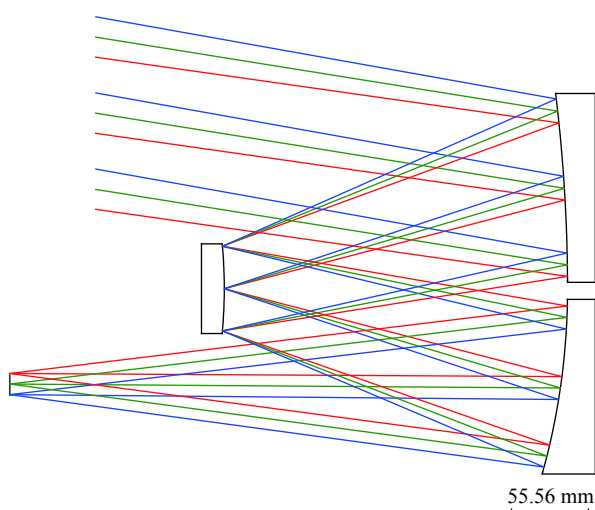


图 19 无中间像面的 Wetherell TMA 光学系统

Fig.19 Non-re-imaging Wetherell TMA optical system

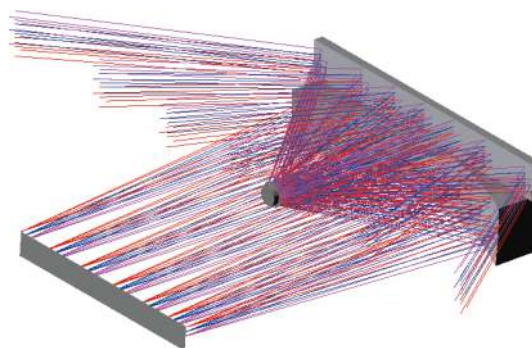


图 20 极大视场离轴 TMA 自由曲面光学系统^[20]

Fig.20 Freeform off-axis TMA optical system with ultrawide field of view^[20]

1988 年, Cook 在专利中提出了一种具有实入瞳的离轴 TMA 光学系统, 即光阑前置的 Cook 式一次成像 TMA 光学系统^[21], 如图 21 所示。该光学系统的孔径光阑位于主镜之前, 不具有实出瞳, 光学系统成像质量不如孔径光阑位于次镜的 Wetherell TMA 光学系统。但基于具有实入瞳的特点, 可以更方便地在光学系统前设置窗口、扫描镜等元件, 便于与前置光学系统进行光瞳对接。Cook 在专利所描述的设计中, 光学系统的三镜和像面均设置了角度倾斜。

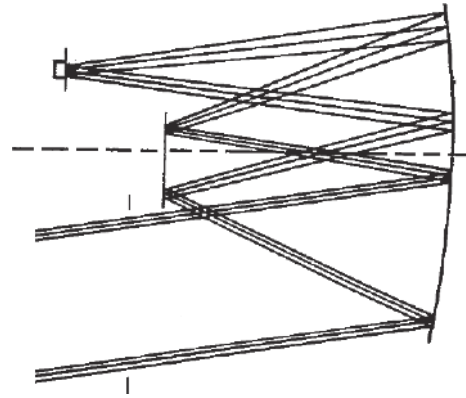


图 21 具有实入瞳的 Cook TMA 光学系统^[21]

Fig.21 Cook TMA optical system with real pupil^[21]

1986 年, Hallam 在专利中提出了一种离轴三镜反射式望远镜光学系统结构^[22], 该光学系统使用离轴角度较大的轴外视场范围成像, 如图 22 所示, 这种结构早在 1980 年即有报道, 被称为 Hughes Walrus 光学系统^[23], 如图 23 所示, 该光学系统由光焦度分别为“负”、“正”、“正”的三面反射镜组成, 孔径光阑位于次镜与三镜之间, 主镜与次镜近似构成一个无焦光学系统, 因此在孔径光阑位置非常适合设置光学平板元件, 从孔径光阑出射的光线经过三镜成像在像面,

Hallam 系统 (Hughes Walrus 系统) 的光学结构特性非常类似于一个反摄远透镜结构, 如图 24 所示。

Walrus TMA 光学系统可以实现一个很大的矩形光学视场, 但该构型光学系统体积庞大, 总长度约为焦距的 3.4 倍, 有人认为这可能是它被称为“海象 (Walrus)”的原因^[24]。

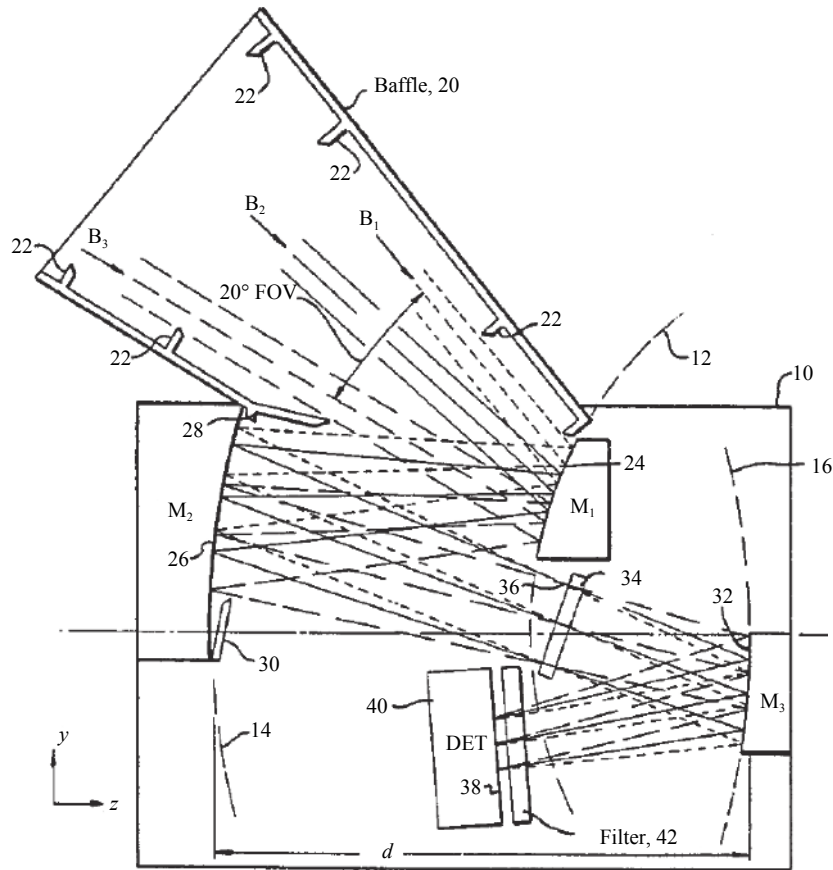


图 22 Hallam 系统 (Hughes Walrus 系统)^[22]

Fig.22 Hallam system (Hughes Walrus system)^[22]

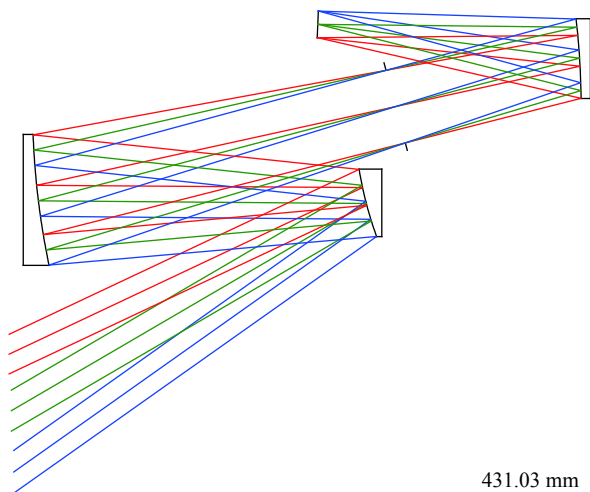


图 23 无中间像面的 Walrus TMA 光学系统
Fig.23 Non-re-imaging Walrus TMA optical system

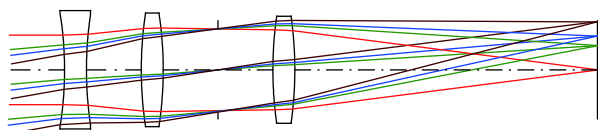


图 24 反摄远透镜光学系统
Fig.24 Inverse telephoto optical system

3.4 有中间像面的离轴 TMA 光学系统

1981 年, Cook 在专利中提出了一种具有中间像面二次成像的离轴 TMA 光学系统^[25], 光学系统的孔径光阑位于主镜, 孔径和视场均进行了离轴偏置, 如图 25 所示。该类型光学系统一次像面在次镜与三镜

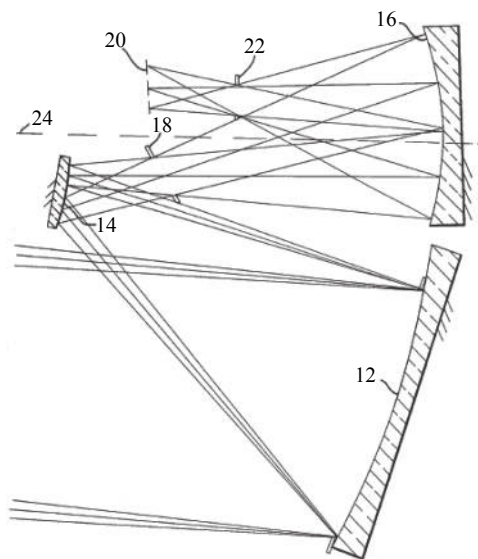


图 25 二次成像的 Cook TMA 光学系统^[25]
Fig.25 Re-imaging Cook TMA optical system^[25]

之间, 结构紧凑, 可实现较大的摄远比。可以通过在一次像面处设计里奥光阑等方式提高杂散光抑制效果; 基于具有实出瞳的光学特征, 可以配合红外制冷探测器进行冷光阑设计, 因此也十分适用于红外光学系统设计。

为了实现更好的成像质量, 专利中对光学系统的次镜和三镜进行了角度倾斜, 国内的一些研究人员有时将这种反射镜倾斜设置的离轴 TMA 光学系统称为“偏轴系统”。

我国首次火星探测任务“天问一号”环绕器上搭载的高分辨率相机 (High Resolution Imaging Camera, HiRIC) 的光学系统即采用了该型 TMA 光学系统进行设计^[26], 如图 26 所示, 光学孔径和视场角均进行了离轴偏置, 为了补偿残余像差, 焦面进行了角度倾斜。

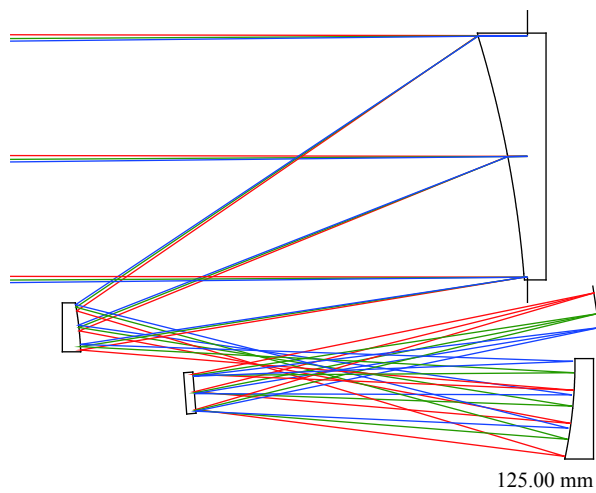


图 26 “天问一号”高分辨率相机光学系统
Fig.26 Optical system of high resolution imaging camera on “Tianwen-1” mission

二次成像离轴 Cook TMA 光学系统的中间像面可以如图 26 所示, 设计在次镜与三镜之间, 也可以通过光焦度分配的调整将中间像面设计在主镜与次镜之间的位置, 如图 27 所示。该类型二次成像 TMA 光学系统的详细设计方案在 Korsch 和 Cook 于 1988 年和 1989 年的发明专利中均有详细说明^[27-28]。1987 年, Cook 还对该光学系统进行了次镜和三镜的球面化方案设计分析, 获得了较大的光学视场^[29]。

对比无中间像面的离轴 Wetherell TMA 光学系统, 虽然有中间像面的离轴 Cook TMA 光学系统具有摄远比大、结构紧凑等优势, 但有中间像面的离轴

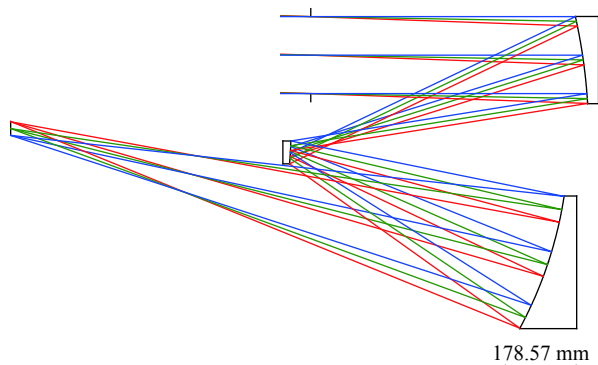


图 27 一次像面在主次镜之间的 TMA 光学系统

Fig.27 Re-imaging TMA optical system with relayed image plane between primary mirror and secondary mirror

TMA 光学系统具有反射镜加工难度大、光学系统装调误差敏感度高不足之处。有对比设计分析显示：在设计指标相同、光学系统总体长度基本相同的情况下，二次成像离轴 Cook TMA 光学系统中主镜、次镜与三镜的光焦度基本是一次成像离轴 Wetherell TMA 光学系统的 2 倍，二次成像离轴 Cook TMA 光学系统的反射镜倾斜误差敏感度、偏向误差敏感度与离焦敏感度分别是一次成像离轴 Wetherell TMA 光学系统的 9 倍、2 倍与 4 倍^[30]。因此，如何在有限资源条件下降低光学系统的误差敏感度，保证光学系统的工程实现性像质，是光学系统设计需要研究的关键问题^[31]。

1986 年，Cook 在专利中提出了一种紧凑型离轴 TMA 光学系统^[32]，该光学系统由光焦度分别为“正”、“正”、“负”的主镜、次镜、三镜组成，在次镜和三镜间具有中间像面，如图 28 所示。专利中表述：该系统并没有完全消除像散，被称为“near-anastigmatic”光学系统。

1992 年，Cook 提出了一种可实现大视场的离轴 TMA 光学系统专利^[33]，该光学系统由负光焦度主镜和正光焦度次镜、三镜组成，为二次成像光学系统，中间像面位于次镜与三镜之间，该系统具有实出瞳，光路如图 29 所示。与三面反射镜光焦度也为“正”、“负”、“负”的 Hallam 系统一样，该光学系统的特点是可以较大的面视场，视场范围可达到 $20^\circ \times 40^\circ$ ，不足之处是系统长度极长，具有空间适用性限制。

对比摄远比小、尺寸体积大的离轴 TMA 光学系统，研究者们还提出了一些其他类型的离轴 TMA 光

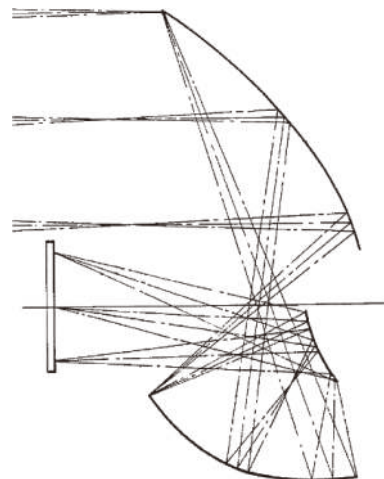


图 28 离轴紧凑型 TMA 光学系统^[32]

Fig.28 Off-axis compact TMA optical system^[32]

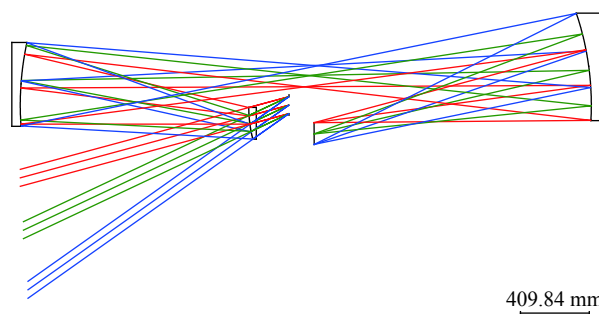


图 29 大视场二次成像离轴 Cook TMA 光学系统

Fig.29 Re-imaging wide field of view off-axis Cook TMA optical system

学系统，通过在光路中间设置平面折转反射镜、对光路进行多次折转的方式，减小光学系统的体积尺寸。

Rodgers 于 1991 年提出了如图 30 所示的离轴 TMA 光学系统^[34]。该光学系统由光焦度分别为“正”、“负”、“正”的主镜、次镜、三镜以及位于次镜和三镜之间的 45° 折转镜组成，孔径光阑靠近主镜。折转镜将三镜位置由主镜下部折转至主镜顶部，使光学系统布局更加紧凑。不同于普通平面折转镜，该折转镜为一面准平面镜，具有微小的光焦度及高次非球面面型，在折转光路的同时可以对光学系统的像差进行校正，使系统具有更佳的成像质量。Rodgers TMA 光学系统的最大特点是可以以最小的体积尺寸提供最大的人瞳孔径，严格地讲，Rodgers 提出的系统属于四镜反射式光学系统范畴。

值得一提的是与 Rodgers TMA 光学系统外形非常相似的一种紧凑型三镜反射式光学系统，该系统虽然

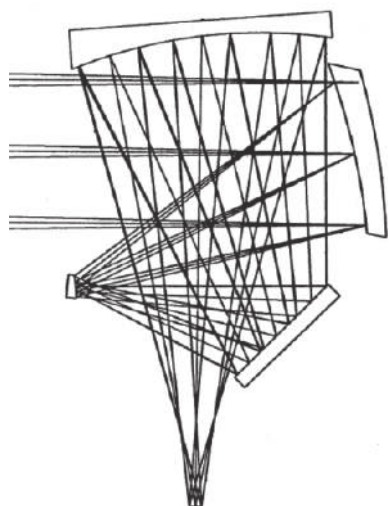


图 30 Rodgers 提出的离轴 TMA 光学系统

Fig.30 Off-axis TMA optical system proposed by Rodgers

不属于具有中间像面的二次成像系统,但反射镜位置空间布局与 Rodgers TMA 光学系统极为相似,在此一起讨论。它于 2005 年被三菱电机株式会社的 Takayuki Nakano 与 Yasuhisa Tamagawa 提出^[35],如图 31 所示,2009 年被 Rochester 大学的 Fuerschbach、Rolland 与 Thompson 再次设计,如图 32 所示。Fuerschbach 对该系统与 Rodgers TMA 进行了对比^[36]。该光学系统可以通过对一个同轴光学系统进行反射镜倾斜,形成了一种折叠式光学系统结构,并应用光学自由曲面对像差进行了校正,光学系统形成过程如图 33 所示。

类似的具有折转镜的离轴 TMA 光学系统结构形

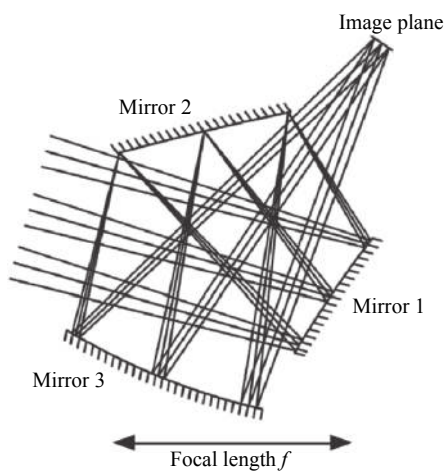


图 31 紧凑型离轴三镜反射式光学系统^[35]

Fig.31 Compact off-axis three-mirror reflective optical system^[35]

式比较丰富多样, Cook 于 1994 年和 1996 年分别提出了两种具有折转镜的离轴 TMA 光学系统方案^[37-39],如图 34 与图 35 所示。

图 36 和图 37 为笔者设计的具有折转镜的离轴 TMA 光学系统,前者通过在次镜与三镜间设计平面折转镜,将三镜从沿光轴方向折转至主镜背部,又在三镜与焦面间设置平面折转镜,将焦面折转至次镜下部,两块折转镜位置靠近,可通过一面反射镜实现功

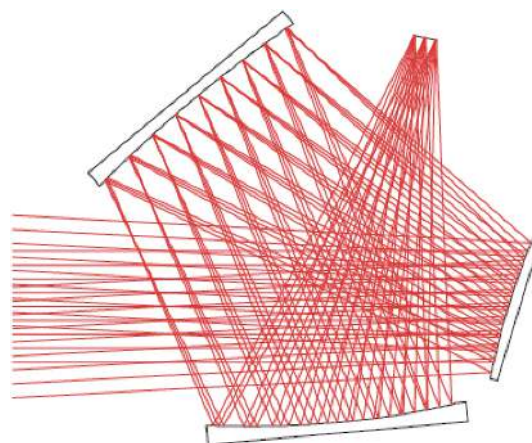
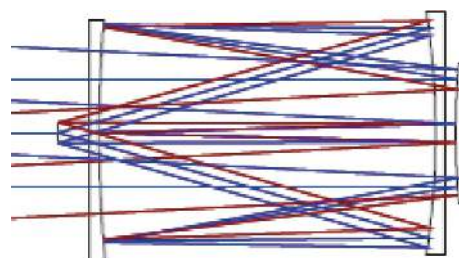
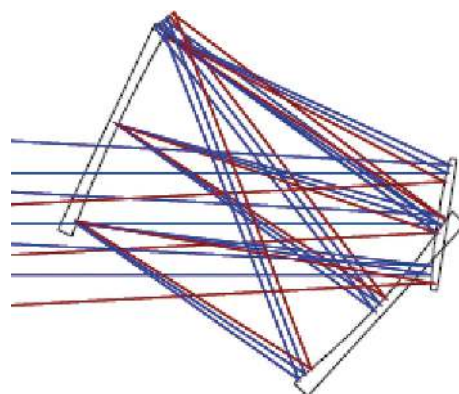


图 32 自由曲面离轴光学系统^[36]

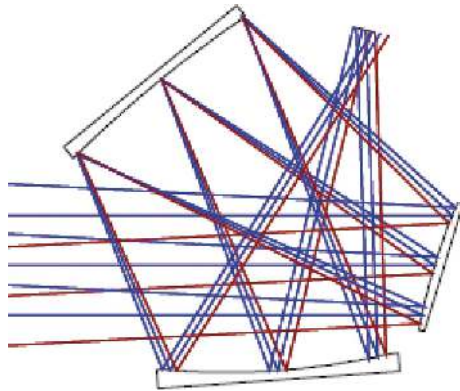
Fig.32 Layout of freeform off-axis optical system^[36]



(a) 同轴光学系统
(a) On-axis optical system



(b) 部分倾斜
(b) Halfway tilted



(c) 完全倾斜
(c) Fully tilted

图 33 光学系统形成过程^[36]

Fig.33 Optical system forming process^[36]

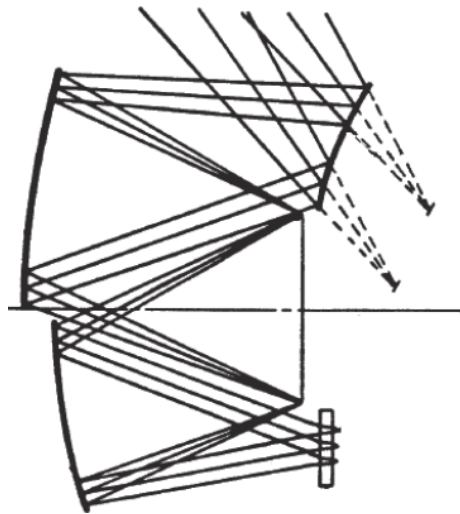


图 34 Cook 于 1994 年提出的离轴 TMA 光学系统^[37]

Fig.34 Off-axis TMA optical system proposed by Cook in 1994^[37]

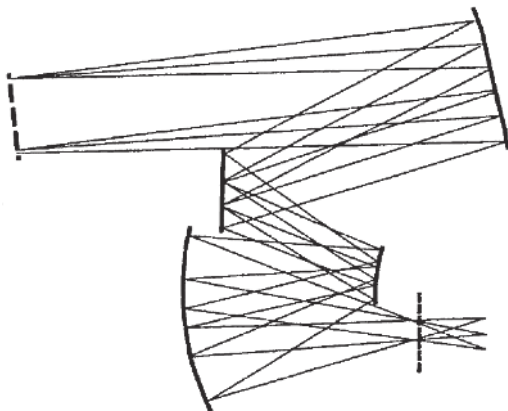


图 35 Cook 于 1996 年提出的离轴 TMA 光学系统^[38-39]

Fig.35 Off-axis TMA system proposed by Cook in 1996^[38-39]

能;后者是在次三镜之间的一次焦面附近设计平面折转镜,将三镜折转至次镜下部,又在后截距范围内设

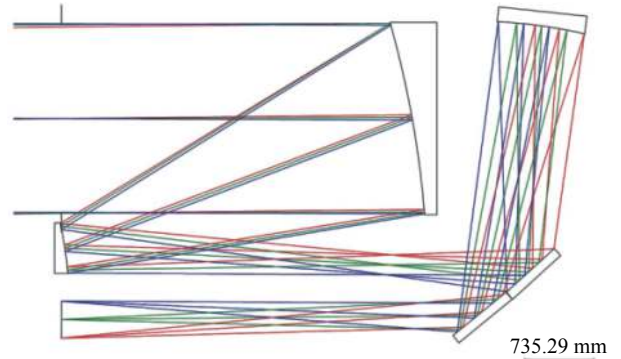


图 36 具有折转镜的离轴 TMA 光学系统 I

Fig.36 Off-axis TMA optical system with folding mirror (I)

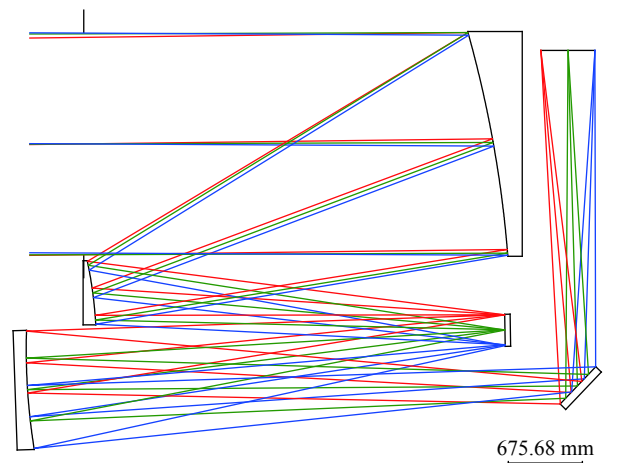


图 37 具有折转镜的离轴 TMA 光学系统 II

Fig.37 Off-axis TMA optical system with folding mirror (II)

计平面折转镜,将焦面折转至主镜背部。两种设计方案均对离轴 TMA 光学系统反射镜位置进行空间布局,提高了光学系统紧凑性。

4 无焦三镜反射式光学系统

前文介绍分析了多种类型的同轴、离轴三镜反射式成像光学系统,这些光学系统均是形成会聚光路的系统。在成像光学系统中,无焦光学系统也有着重要的作用,三镜反射式光学系统不仅可以实现光路会聚成像,而且可以通过反射镜光焦度分配与面型参数的设计实现无焦光学系统,此节做简要介绍。

1972 年, Abe Offner 在专利中提出了多种同轴、离轴 TMA 无焦光学系统^[40],如图 38 所示。其中,图 38(a)、(b)为同轴 TMA 无焦光学系统,图 38(a)的抛物面主镜与双曲面次镜组成了一个 Cassegrain 结构,通过在焦点处设置 45°平面折转镜,将光路折转至

抛物面三镜,使光路平行出射;图 38(b)的不同之处是由主镜与次镜组成的 Cassegrain 结构的焦点在主镜与次镜中间。图 38(c)为离轴 TMA 无焦光学系统,这种系统构型与具有一次像面的 Cook 式 TMA 系统相似,光路原理与图 38(b)相同,仅仅是去掉了位于主镜与次镜之间的折转镜,并应用了各反射镜的离轴口径部分。

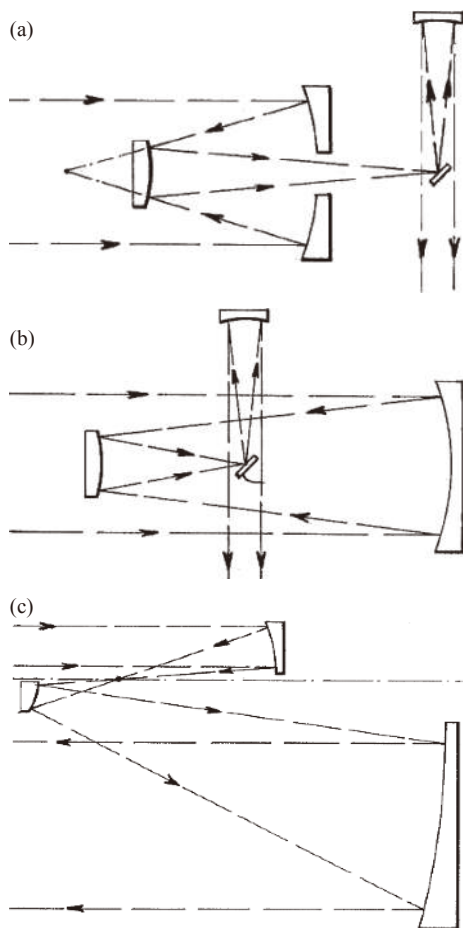


图 38 Abe Offner 提出的 TMA 无焦光学系统: (a) 同轴结构; (b) 同轴结构; (c) 离轴结构^[40]

Fig.38 Afocal TMA optical system proposed by Abe Offner: (a) Coaxial configuration; (b) Coaxial configuration; (c) Off-axis configuration^[40]

去除图 38(a)所示的同轴 TMA 无焦光学系统的 45°平面折转镜,并选用轴外视场,可以形成笔者设计的同轴偏视场 TMA 无焦光学系统,如图 39 所示。对图 38(c)所示的离轴 TMA 无焦光学系统进行中间像面位置调整,并增加 45°平面折转镜,可以形成笔者设计的离轴 TMA 无焦光学系统,如图 40 所示。同轴

TMA 无焦光学系统与离轴 TMA 无焦光学系统的变形结构较多,通过调整反射镜光焦度可以衍生出丰富的结构形式。

1992 年, Cook 提出了由光焦度分别为“负”、“正”、“正”的主镜、次镜、三镜构成的离轴无焦 TMA 光学系统^[41],如图 41 所示,该光学系统与图 29 所示的有焦光学系统结构形式一致,为二次成像系统,可以实现较大的光学视场。

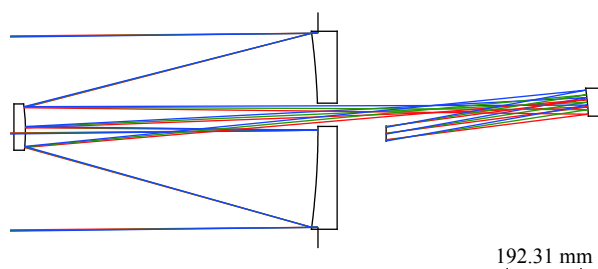


图 39 同轴 TMA 无焦光学系统

Fig.39 Coaxial afocal TMA optical system

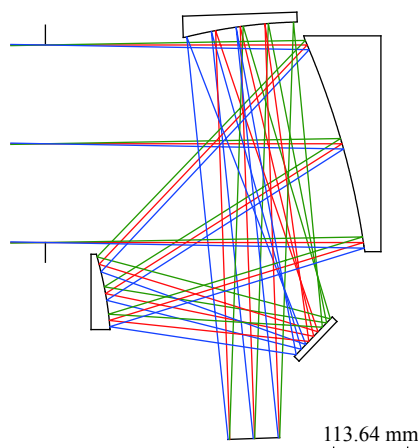


图 40 离轴 TMA 无焦光学系统

Fig.40 Off-axis afocal TMA optical system

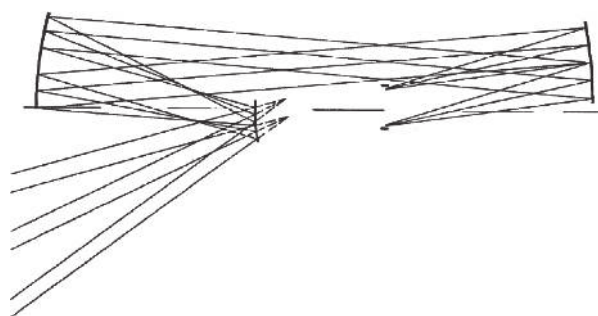


图 41 Cook 提出的离轴 TMA 无焦光学系统^[41]

Fig.41 Off-axis afocal TMA optical system proposed by Cook^[41]

5 结 论

三镜反射式光学系统是具有重要应用价值的一类光学系统,在反射式光学系统中占据重要位置,光学设计领域研究人员在百年来对其进行了深入的研究,创造、衍生了一系列丰富的结构形式。三镜反射式光学系统具有像差校正能力强、可实现大视场的优点,一直是大型光学望远镜、航空航天光学遥感器光学系统的重要应用构型。文中依据三镜反射式光学系统的发展时序,较为系统地梳理了经典的国际发明专利与学术论文等文献,较为全面地介绍了同轴三镜反射式光学系统、两轴三镜反射式光学系统、离轴三镜反射式光学系统与无焦三镜反射式光学系统结构形式的经典类型,阐述了它们各自的结构特点、设计能力,并给出一些设计示例,简要介绍了它们在可查工程项目中的应用情况,供光学设计研究人员参考与探讨。

参考文献:

- [1] Paul M. Systèmes Correcteurs Pour Réflecteurs Astronomiques[M]. 1935.
- [2] Willstrop R V. The Mersenne-Schmidt: A three-mirror survey telescope [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1984, 210(3): 597-609.
- [3] Olivier S S, Seppala L, Gilmore K. Optical design of the LSST camera [C]//Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2008, 7018: 70182G.
- [4] Rumsey N J. Telescopic system utilizing three axially aligned substantially hyperbolic mirrors: US, 3460886[P]. 1969-08-12.
- [5] Schroeder D J. Astronomical Optics[M]. California: Academic Press, 2000.
- [6] Korsch D. Design and optimization technique for three-mirror telescopes [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(21): 3640-3645.
- [7] Robb P N. Three-mirror telescopes: design and optimization [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(17): 2677-2685.
- [8] Korsch D. Closed form solution for three-mirror telescopes, corrected for spherical aberration, coma, astigmatism, and field curvature [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(12): 2986-2987.
- [9] Sasian J M. Four-mirror optical system for large telescopes [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(10): 1181-1185.
- [10] Korsch D. Anastigmatic three-mirror telescope [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(8): 2074-2077.
- [11] Gallagher D, Bergstrom J, Day J, et al. Overview of the optical design and performance of the high resolution science imaging experiment (HiRISE) [C]//Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VI, International Society for Optics and Photonics, 2005, 5874: 58740K.
- [12] Lampton M L, Akerlof C W, Aldering G, et al. SNAP telescope [C]//Highly Innovative Space Telescope Concepts, International Society for Optics and Photonics, 2002, 4849: 215-226.
- [13] Raymond N W. Reflecting Telescope Optics I: Basic Design Theory and Its Historical Development[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [14] Kutter A. The Schiefspiegler (Oblique Telescope) [M]. West Germany: Sky Publishing Corporation, 1958.
- [15] Meng Qingyu, Wang Hongyuan, Wang Wei, et al. Desensitization design method of unobscured three-mirror anastigmatic optical systems with an adjustment-optimization-evaluation process[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(6): 1472-1481.
- [16] Korsch D. Reflective Optics[M]. US: Academic Press, 2012.
- [17] Wetherell W B, Womble D A. All-reflective three element objective: US, 4240707[P]. 1980-12-23.
- [18] Meng Qingyu, Wang Wei, Ma Hongcai, et al. Easy-aligned off-axis three-mirror system with wide field of view using freeform surface based on integration of primary and tertiary mirror [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(14): 3028-3034.
- [19] Meng Qingyu, Wang Hongyuan, Wang Kejun, et al. Off-axis three-mirror freeform telescope with a large linear field of view based on an integration mirror [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 8962-8970.
- [20] Meng Qingyu. Design of off-axis three-mirror systems with ultrawide field of view based on an expansion process of surface freeform and field of view [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(3): 609-615.
- [21] Cook L G. Reflective optical triplet having a real entrance pupil: US, 4733955[P]. 1988-03-29.
- [22] Hallam K L, Howell B J, Wilson M E. Wide-angle flat field telescope: US, 4598981[P]. 1986-07-08.
- [23] Abel I R, Hatch M R. The pursuit of symmetry in wide-angle reflective optical designs [C]//1980 International Lens Design Conference. International Society for Optics and Photonics, 1980, 237: 271-280.

- [24] Herbert Gross, Fritz Blechinger, Bertram Achnner. Handbook of Optical Systems, Volume 4: Survey of Optical Instruments[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [25] Cook L G. Three mirror anastigmatic optical system: US, 4265510[P]. 1981-05-05.
- [26] Meng Qingyu, Wang Dong, Wang Xiaodong, et al. High Resolution Imaging Camera (HiRIC) on China's first Mars exploration Tianwen-1 mission [J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217: 42.
- [27] Korsch D. Wide-field three-mirror collimator: US, 4737021 [P]. 1988-04-12.
- [28] Cook L G. Method and apparatus for receiving optical signals: US, 4834517[P]. 1989-05-30.
- [29] Cook L G. Wide field of view three-mirror anastigmat (TMA) employing spherical secondary and tertiary mirrors [C]//Recent Trends in Optical Systems Design and Computer Lens Design Workshop. International Society for Optics and Photonics, 1987, 766: 158-162.
- [30] Cook L G. The last three-mirror anastigmat?[C]//Lens Design: A Critical Review. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1992, 10263: 102630G.
- [31] Qin Zichang, Wang Xiaodong, Ren Chengming, et al. Design method for a reflective optical system with low tilt error sensitivity [J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43464-43479.
- [32] Korsch D G. Near-anastigmatic compact collimator: US, 4632521[P]. 1986-12-30.
- [33] Cook L G. Wide field of view focal three-mirror anastigmat: US, 5170284[P]. 1992-12-08.
- [34] Rodgers J M. Catoptric optical system including concave and convex reflectors: US, 5309276[P]. 1994-05-03.
- [35] Takayuki Nakano, Yasuhisa Tamagawa. Configuration of an off-axis three-mirror system focused on compactness and brightness [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(5): 776-783.
- [36] Fuerschbach K, Rolland J P, Thompson K P. A new family of optical systems employing ϕ -polynomial surfaces [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21919-21928.
- [37] Cook L G. Fast folded wide angle large reflective unobscured system: US, 5331470[P]. 1994-07-19.
- [38] Cook L G. Off-axis three-mirror anastigmat having corrector mirror: US, 5550672[P]. 1996-08-27.
- [39] Cook L G. Off-axis three-mirror anastigmat having corrector mirror: US, 6016220[P]. 2000-01-18.
- [40] Offner A. Catoptric anastigmatic afocal optical system: US, 3674334[P]. 1972-07-04.
- [41] Cook L G. Wide field of view afocal three-mirror anastigmat: US, 5173801[P]. 1992-12-22.