

文章编号 1674-2915(2008)01-0013-12

空间光学的发展与波前传感技术

韩昌元

(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 进入21世纪,国际上一些发达国家和有关部门都已制定了空间发展战略规划,如美国航空航天局(NASA)、欧洲空间局(ESA)和俄罗斯政府相关部门等都提出空间发展战略规划,这些规划提出了今后一段时间内空间科学要解决的问题和发展的方向,而解决这些问题并推进空间技术的发展很大程度上依赖于先进的光学和无线电望远镜及仪器设备。因此,本文介绍本世纪初国际上空间科学应用的大型天文望远镜的发展情况,重点描述了大口径光学望远镜的光学系统以及实现这类天文望远镜的关键技术之一——波前传感技术。

关键词 空间光学;大型光学望远镜;波前传感技术;波面像差测定;位相恢复;综述

中图分类号:TH751 文献标识码:A

Progress in space optics and wave front sensing technique

HAN Chang-yuan

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

Abstract : Coming into 21 century, a number of developed countries and relational government organizations in the world, such as National Aeronautics and Space Administration(NASA) in America, European Space Agency(ESA), and some organization in Russia, have established a series of strategic projects about space science development. These projects point out some problems to be solved in space science and provide the way forward for space technology, also it indicate that development of space science is dependent on advance optical and radio telescope as well as their instruments. Therefore, this paper introduces some large astronomical telescopes used in international space science studies at the beginning of 21 century, and describes several optical systems in large aperture space telescopes mainly. Finally, the wave front sensing technique which is the key technology in the development of large astronomical telescopes is discussed.

Key words : space optics; large astronomical telescope; wave front sensing technique; wave aberration test; phase retrieval; review

1 引言

目前,国际上先进的发达国家和有关部门,如美国航空航天局(NASA)、欧洲空间局(ESA)和俄罗斯政府相关部门等,都制定了21世纪空间科学发展战略规划,这些规划的制定是由专门委员会来完成的,专门委员会是由政府官员、工业部门和科学技术部门的专家组成的,大体上各占三分之一。规划中提出的大约2025年前后要研究的科学问题主要有:(1)什么是行星形成的条件以及生命在行星上出现的条件。(2)太阳系是如何运转的。(3)什么是宇宙最基本的物理规律。(4)宇宙是如何起源的及它是由什么构成的。(5)暗物质和暗能量的性质^[1,2]。这些科学问题的解决在很大程度上依赖于先进的光学和无线电望远镜及仪器设备的发展,因此,本文综述了本世纪初国际上空间科学应用的大型天文望远镜的发展情况,重点描述了大口径光学望远镜的光学系统,以及实现这类天文望远镜的关键技术之一——波前传感技术。

2 空间科学的发展与大型天文望远镜的需求

21世纪初,NASA提出了2011~2034年前要完成的21种先进望远镜和光测设备^[3],观测用的电磁波谱段包括X射线到毫米波,无线电波,也含引力波。

在地球上用于天文观测的最好的台址是南极高原,这主要是由于其约200 K的低温环境和大气中很低的水蒸气吸收条件,冬季这个地方具有很好的观测环境,晴天占70%以上,大气视宁度为0.27",有利于实现自适应光学校正。目前这里正在建设10 m口径的亚毫米波段的望远镜^[4],并计划建设100 m口径望远镜。作为100 m口径望远镜建设的准备和过渡用的中间尺度地面望远镜是GMT(Giant Magellan Telescope)红外望远镜^[5],由美国Steward天文台和Arizona大学联合研制,计划在2025年完成。图1表示其概念图,它由7个8.4 m直径的圆形子口径拼接而成,有



图1 GMT望远镜概念图

Fig.1 Concept diagram of GMT

效全口径为22 m,主镜用蜂窝状低膨胀玻璃材料制成,单块整镜最大直径为8.4 m。

月球南极是很好的天文观测台址,为了避免地球上的望远镜受到大气的影响,正在研制20 m口径的月球液面反射镜望远镜(Lunar Liquid Mirror Telescope, LLMT)^[6],图2表示其概念图,它将在100 K环境温度下工作,使用的波长为1~10 μm,适于用来探测深远处早期宇宙发出的波长为0.1~1 μm的光被红移10倍后的光。参加这项工作的有美国、加拿大、荷兰等国家。如果实现,则将探测深远处弱目标物体的能力比现在建设中的太阳-地球第二拉格朗点L2轨道的6.6 m口径望远镜,詹姆斯-韦伯空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)^[7]大100倍。

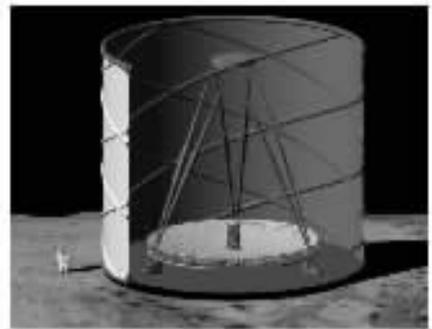


图2 20 m口径的月球液面望远镜概念图

Fig.2 Concept diagram of LLMT with 20 m aperture

太阳-地球第二拉格朗日点 L2 轨道是空间望远镜的最好轨道。图 3 表示太阳-地球系统的 5 个拉格朗日点。太阳到地球的距离为 150×10^6 km, 地球到 L2 的距离为 1.5×10^6 km。

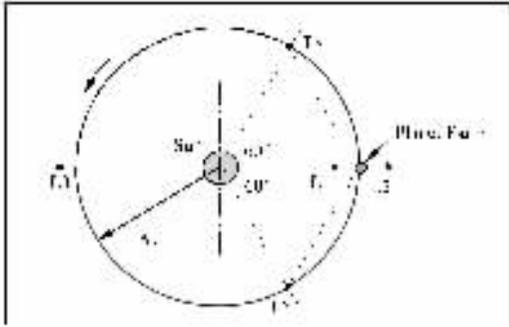


图 3 太阳-地球系统的 5 个拉格朗日点

Fig. 3 Five Lagrange points for the Sun-earth system

这个轨道对望远镜来说力和温度稳定并且低温,如果在 L2 轨道的 JWST 被动致冷到 37 K,将有利于降低红外噪声。

作为继哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HTS) 之后的下一代的空间望远镜, NASA 准备在 2013 年发射 JWST。望远镜的工作波段 $\lambda = 0.6 \sim 28 \mu\text{m}$, 口径为 6.6 m, 在波长为 $2 \mu\text{m}$ 的近红外波段成像质量达到衍射极限。图 4 表示 JWST 望远镜的概念图。望远镜在发射上天后自动展开并调整。

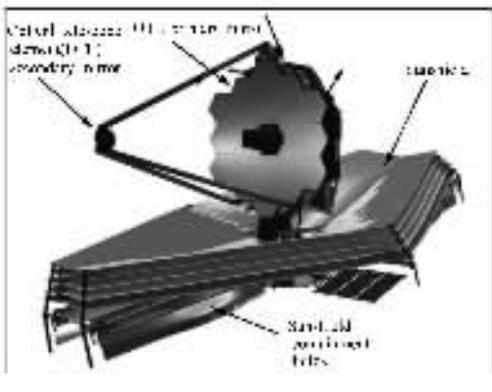


图 4 JWST 望远镜的概念图

Fig. 4 Concept diagram of JWST

类地球行星发现者日冕仪 TPF-C (Terrestrial Planet Finder Coronagraph) 和类地球行星发现者干涉仪 TPF-I (Terrestrial Planet Finder Interfero-

meter) 是继 JWST 之后将在 L2 轨道工作的下一代空间望远镜^[8]。NASA 计划在 2016 年发射 TPF-C, 带日冕仪的具有 6 m 口径的可见光光学望远镜, 其成像质量接近衍射极限。2019 年发射 TPF-I, 是由多个 3~4 m 口径的红外望远镜组成的星体干涉仪, 其望远镜之间的基线距离达几百米。图 5 表示 TPF-C 和 TPF-I 望远镜的概念图。



图 5 TPF-C 和 TPF-I 望远镜的概念图

Fig. 5 Concept diagram of TPF-C and TPF-I

作为单开口远红外 SAFIR (Single Aperture Far-Infrared) 望远镜, NASA 计划在 2022 年发射远红外天文观测仪器, 将在 L2 轨道工作, 波长范围 $\lambda = 2 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$, 望远镜口径为 10 m, 在波长 $\lambda = 30 \mu\text{m}$ 处成像质量达到衍射极限^[9,10]。图 6 表示 SAFIR 望远镜的概念图, 要求望远镜发射上天后自动展开并调整。

除了 NASA 规划之外, 还有美国和法国等有关国家正在联合研究的空间望远镜—超新星加速度探测器 (Super Nova/Acceleration Probe, SNAP) 望远镜^[11], 将用于超新星加速度探测及研究暗能量的交换原理等, 其在 L2 轨道工作, 望远镜的口径为 2 m, 焦距为 20.66 m, 波长 $\lambda = 0.35 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 成像质量在此波段达到衍射极限。图 7

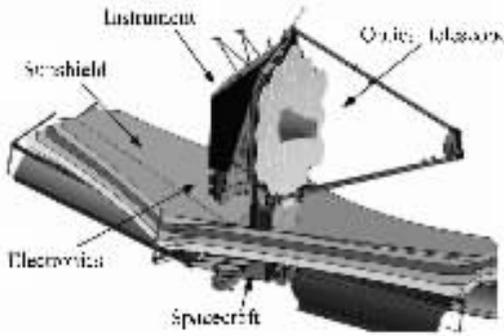


图 6 SAFIR 望远镜的概念图

Fig. 6 Concept diagram of SAFIR



图 8 Herschel 望远镜的概念图

Fig. 8 Concept diagram of Herschel

表示 SNAP 望远镜的概念图。



图 7 SNAP 望远镜的概念图

Fig. 7 Concept diagram of SNAP

ESA 规划的 Willian Herschel 望远镜原计划 2007 年发射,将在 L2 轨道工作,波长 $\lambda = 57 \sim 670 \mu\text{m}$,望远镜的口径为 3.5 m,整个望远镜采用了碳化硅 (SiC) 材料。光学系统的波像差 $< 6 \mu\text{m rms}$,工作温度在 70 K,重量 $< 300 \text{ kg}^{[12-14]}$ 。图 8 表示 Herschel 望远镜的概念图。

日本的天文红外望远镜计划是在 2010 年把 3.5 m 口径的红外望远镜 (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics, SPICA) 发射到 L2 轨道,波长 $\lambda = 5 \sim 200 \mu\text{m}$,在 $\lambda = 5 \mu\text{m}$ 处望远镜成像质量达到衍射极限水平,工作温度为 4.5 K,重量 $< 700 \text{ kg}^{[15-17]}$,将用于宇宙学和天文学的研究。图 9 表示 SPICA 望远镜概念图。整个望远镜全部采用 SiC 材料。

从以上实例可以看到地面的天文望远镜口径做得很大,目前要求做到 20 ~ 50 m 口径,这里的

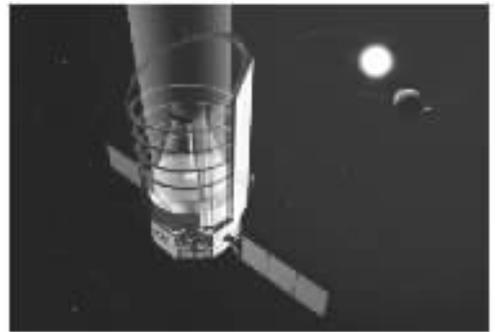


图 9 SPICA 望远镜概念图

Fig. 9 Concept of SPICA

主要难题是如何应对大气抖动的影响。因此自适应光学是突破大口径地面天文望远镜难题的关键技术之一。空间天文望远镜不存在大气抖动问题,并且在低温环境下工作,有利于消除红外背景噪声,但存在发射上天的困难。目前由于运载工具直径的限制,口径 $< 4 \text{ m}$ 的望远镜可以采用整块主镜,不用拼接,而 $> 4 \text{ m}$ 的望远镜必须采用拼接主镜并要求发射上天后自动展开和调整光学系统,这时波前传感是非常关键的技术。本文第四部分将介绍波前传感技术。

3 大口径天文望远镜的光学系统

3.1 GMT 光学系统

图 10 表示 GMT 光学系统。光学系统采用了格里高林 (Gregorian) 系统,主镜由 7 块直径为 8.4 m 的子镜拼接而成,有效口径达 22 m,最大直径达 25.3 m,主镜焦距 18 m (焦比 $f/0.7$) 6 个离

轴子镜的曲率半径 $R = 36 \text{ m}$, 直径 $D = 8.4 \text{ m}$, 二次曲面系数 $K = -0.9983$, 凹面椭球镜, 离轴距离 $d = 8.71 \text{ m}$; 次镜是凹的椭球镜, 直径为 3.2 m , 由7块直径为 1.1 m 的子镜组成, 次镜和主镜的7块子镜分别相互对应地排列, 形成7个独立口径的 8.4 m 的望远镜, 由这7个 8.4 m 的望远镜合成为一个 22 m 口径的望远镜。总的望远镜的相对孔径为 $f/8$, 视场角为 $24'$, 后截距为 5.5 m 。次镜本身作自适应光学用的变形镜。要求望远镜成像质量在波长 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 达到 22 m 全口径的衍射极限。

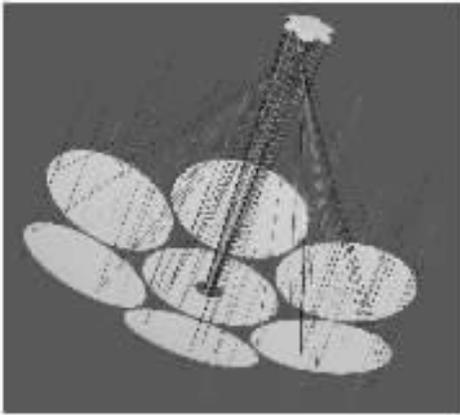


图10 GMT光学系统

Fig. 10 GMT optical system

3.2 月球液面反射镜望远镜 LLMT 光学系统

图11表示LLMT光学系统,采用同轴三反射镜消像散TMA系统。主镜是口径 20 m 的凹液面抛物镜, 焦比 $f/1.5$, 曲率半径 60 m ; 次镜是口径

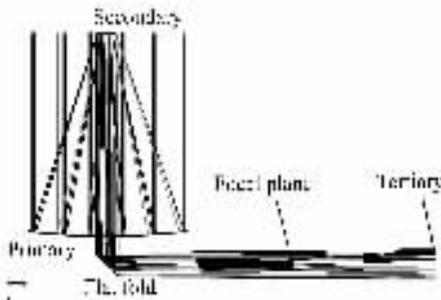


图11 LLMT光学系统

Fig. 11 LLMT optical system

2.4 m 的凸双曲面; 三镜是口径 4 m 的凹椭球镜; 次镜和三镜之间加了平面折叠镜。整个望远镜的

焦距为 300 m , 视场角为 $15'$, 成像面直径为 1.3 m 。

3.3 JWST 光学系统

图12表示JWST光学系统,采用了同轴三反射镜消像散TMA系统。整个望远镜相对孔径为 $f/20$, 口径为 6.6 m , 视场角为 $18' \times 9'$ 。主镜采用了18块六角形子镜拼接的形式, 每一个子镜的边对边的距离为 1.2 m , 18块子镜拼接合成的主镜

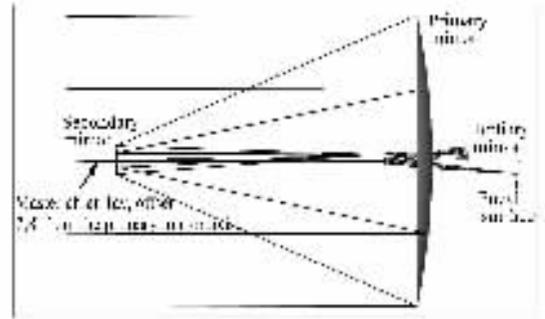


图12 JWST光学系统

Fig. 12 JWST optical system

的直径为 6.6 m , 主镜的二次曲面系数 $K = -0.9966605$, 曲率半径 $R = 15879.722 \text{ mm}$ 凹镜。次镜的直径为 718 mm , 曲率半径 $R = 1778.91267 \text{ mm}$ 凸镜, 二次曲面系数 $K = -1.65981$, 有六个自由度的控制能力。三镜的尺寸为 $686.00 \text{ mm} \times 473.15 \text{ mm}$, 曲率半径 $R = 3016.227 \text{ mm}$ 凹镜, 二次曲面系数 $K = -0.6595364$ 。三镜和像面之间有出射光瞳, 在这个出射光瞳位置放置平面反射镜, 其直径为 162.5 mm , 用于折转光路并起倾斜校正镜作用。反射镜的材料为铍, 镀膜材料为金。

由于运载工具的直径所限, 望远镜的直径不能超过 4 m , 因此这个望远镜是可折叠的, 发射上天自动展开并调整。

3.4 SNAP 光学系统

图13表示SNAP光学系统。光学系统采用了同轴三反射镜消像散TMA系统。系统的口径 $D = 2 \text{ m}$, 焦距 $f = 21.66 \text{ m}$, 视场角 $\text{FOV} = 0.68^\circ \sim 1.5^\circ$ 环形, 光学系统总长度为 3.3 m , 在光学系统出射光瞳处放置带中心孔的 45° 折叠平面反射镜, 像面环形视场内不产生二次遮拦。主镜直径为 2 m , 主镜中心孔直径为 0.5 m , 曲率半径 $R =$

4.908 057 m 凹面,二次曲面系数 $K = -0.981 128$ 。次镜直径为 0.45 m,曲率半径 $R = 1.098 948$ m 凸面,二次曲面系数 $K = -1.847 493$ 。折叠平面反射镜尺寸为 0.66 m × 0.45 m,中心孔尺寸为 0.19 m × 0.12 m。三镜直径为 0.68 m,曲率半径 $R = 1.405 997$ m 凹面,二

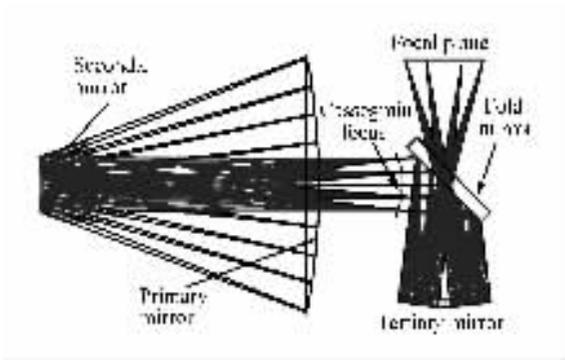


图 13 SNAP 光学系统

Fig. 13 SNAP optical system

次曲面系数 $K = -0.599 000$ 。像面是平面,其尺寸外径为 0.567 m,中心内径为 0.258 m。

3.5 Herschel-SPIRE 光学系统

图 14 表示 Herschel-SPIRE 望远镜。光学系统采用了卡塞格林(Cassegrain)系统。光学系统口径 $D = 3.5$ m,焦距 $f = 28.5$ m,视场角 $FOV = 0.25^\circ$ 。主镜口径 $D = 3.5$ m,曲率半径 $R = 3 500$ mm 凹面,二次曲面系数 $K = -1$,即抛物面。主次镜距离为 1 587.998 mm。次镜曲率半径 $R = 345.2$ mm 凸面,二次曲面系数 $K = -1.279$,次镜

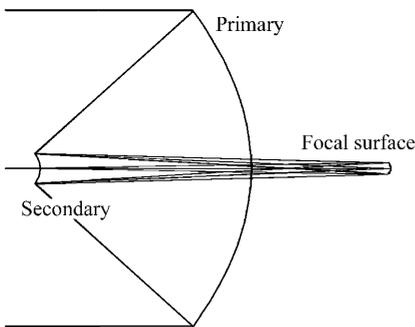


图 14 Herschel-SPIRE 望远镜

Fig. 14 Herschel-SPIRE telescope

口径 $D = 308.12$ mm。主镜到像面的距离为 1 050 mm,像面的曲率半径为 $R = -165$ mm 凹面,二次曲面系数 $K = -1$,像面直径为 246 mm。

材料全部用 SiC。

3.6 SPICA 光学系统

图 15 表示 SPICA 光学系统。光学系统采用了 R-C 系统。光学系统口径 $D = 3.5$ m,焦距 $f = 18$ m,视场角 $FOV = 20'$ 圆形。主镜口径 $D = 3.5$ m,曲率半径 $R = 7 578$ mm 凹面,二次曲面系数 $K = -1.024 0$,主次镜间距为 2 986 mm。次镜口径 $D = 0.772$ m,曲率半径 $R = 2 034$ mm 凸面,二次曲面系数 $K = -2.582 1$ 。主镜到像面的距离为 828.2 mm。材料全部用 SiC。

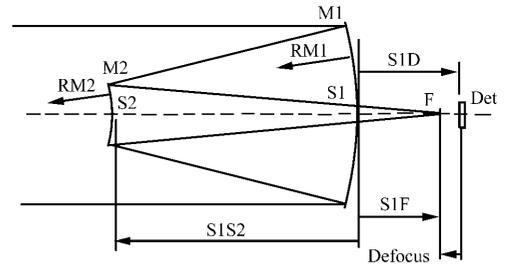


图 15 SPICA 光学系统

Fig. 15 SPICA optical system

从上面实例可以看到 Gregorian 系统比较简单,主镜和次镜都是凹的椭球镜,加工容易,视场角较大。缺点是主次镜间距较大,结构尺寸大。Cassegrain 系统结构简单,尺寸小。主镜是凹抛物面,容易加工,次镜是凸双曲面,难加工。缺点是视场角小。R-C 系统比 Cassegrain 系统视场角大一些,但主镜是凹双曲面,比抛物面加工难度大。同轴三反射镜消像散 TMA 系统比前述的二反射镜系统多一个非球面反射镜,加工和装调稍微复杂,但结构紧凑,轴外像质好,是一种可实现大视场角的大型天文望远镜的较好的光学系统。

4 大口径天文望远镜的波前传感技术

大口径天文望远镜的加工、装配以及在轨调整过程中都要用到波前传感(Wave Front Sensing, WFS)技术。在光学系统中波前传感实际上是要测定光学系统的波面像差。理想光学系统的波像差要求 $< \lambda/14$ rms 水平, λ 是使用的波长, rms 表示均方根误差。这时光学系统的中心点亮度达到 0.8,角分辨率达到 λ/D , D 是光学系统的口径。

因此为了探测远距离目标,天文望远镜必须采用大口径的望远镜。

目前,波前传感技术主要有干涉测量技术、夏克-哈特曼(Shack-Hartmann, S-H)传感器技术、五棱镜扫描技术以及位相恢复(Phase Retrieval, PR)技术。下面举例说明这些技术在大口径天文望远镜中的应用。

4.1 干涉测量技术

光学系统的加工和装配过程中一般用干涉仪测定波面像差,用来评定加工和装配的质量。该方法具有检验灵敏度高的特点,在高精度的光学检验中多被采用。而单镜的检验一般采用带零补偿器的干涉检验方法,对整个望远镜系统的检验则多采用平面镜自准干涉检验方法。

图 16 表示 JWST 主镜检验用的补偿器光路^[18]。

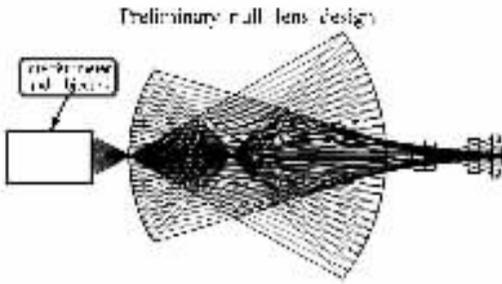


图 16 JWST 主镜检验用的补偿器光路

Fig. 16 Light path of compensator for testing JWST primary mirror

图 17 表示 JWST 次镜检验光路^[19]。采用 Hindle-Simpson(Hindle Shell)方法,第一步检验 Hindle 透镜凹球面,第二步检验标准球面,第三步用第二步检好的标准球面检验 Hindle 透镜凸面非球面,使透射波面为球面波,第四步用 Hindle 透镜检验被检凸非球面(双曲面)。这种方法的优点是不要大的 Hindle 球面,而是用比被检凸非球面稍大一点口径的一片透镜进行 Hindle 检验。图中的黑框表示低温真空罐,要求在模拟使用环境的低温环境下检验面形。

另外一种新方法是子孔径拼接方法,这种方法可简化检验用的硬件系统,如不用零位补偿器,用球面干涉仪检验被检非球面的各个局部面形,然后利用软件从各个子孔径的检验数据拼接出整

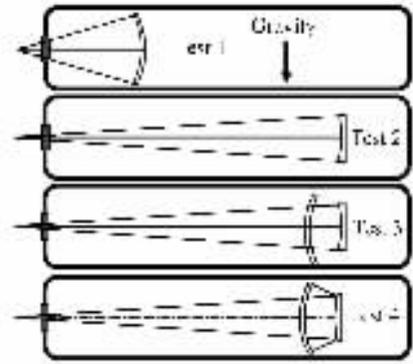


图 17 JWST 次镜检验光路

Fig. 17 Testing path of JWST secondary mirror

个被检面形。

干涉测量技术也用于整个望远镜的系统装调和系统的最终检验,一般都用平面反射镜自准检验光学系统。装调时根据测得的干涉图计算出各个面的装配误差,然后按这个计算数据重新调整光学系统,达到理想成像要求,称为计算机辅助装调技术。

对大口径望远镜的自准干涉检验,需要用大口径的标准平面反射镜。当口径 > 1 m 时,这种平面反射镜就很难加工。因此,都要用子孔径拼接方法。如用 12 块口径 1.2 m 的平面反射镜拼接检验 6.6 m 口径的 JWST 望远镜^[20],其好处是不必把这几块平面反射镜拼接调整成为一个整块标准平面镜,而只要求各个平面镜之间平行度调整在 ±5" 以内即可。这就比制作一块大平面反射镜容易得多。

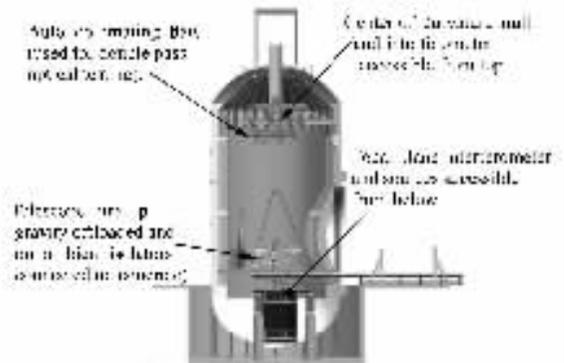


图 18 JWST 整个光学系统检验装置的示意图

Fig. 18 Test apparatus for total optical system of JWST

图 18 是 JWST 整个光学系统检验装置的示意图。整个装置低温达到 35 K, 检验用两个干涉仪, 一个干涉仪放在顶部主镜球心处, 用零位补偿法检验主镜面形, 另一个干涉仪放在下面光学系统焦点处, 自准检验光学系统的波像差, 自准直平面反射镜挂在顶部, 是拼接的。

4.2 S-H 传感器技术

图 19 表示 S-H 传感器的基本原理。

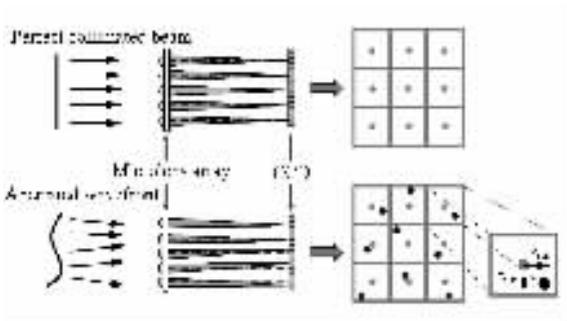


图 19 S-H 传感器的基本原理

Fig. 19 Principle of S-H sensor

使用时微透镜阵列的位置应在被测波面的成像面上, 如光学系统的出瞳位置或出瞳的成像位置, 又如被检光学表面成像的像面上。如果微透镜阵列对应的被测面是充满整个被测面, 则可实现全口径检验, 如果部分充满, 则用子孔径拼接方法检验整个被测面。这里有被测面和微透镜阵列之间成像倍率的调整问题。利用这种技术可以把被检面的局部成像在微透镜阵列上, 检验表面的高频误差^[21 22]。为了检验整个被检表面, 需要扫

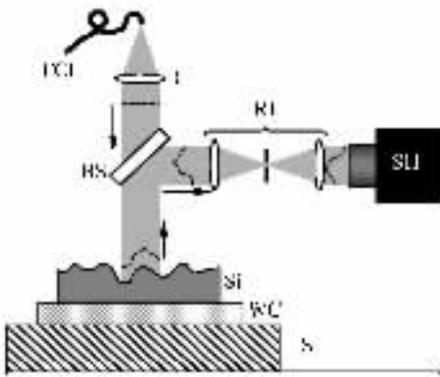


图 20 用扫描 S-H 法检验的概念图

Fig. 20 Concept diagram of testing system by scanning S-H method

描整个表面, 因此称作扫描 S-H 法, 这时也要用子孔径拼接技术。图 20 表示用扫描 S-H 法检验的概念图。

以上是点目标成像情况下的 S-H 法检验, 这时 S-H 传感器的 CCD 面上形成点像, 根据点像的位置判定波面的倾斜。但如果目标不是点目标, 则像点的位置不好判定, 例如用激光引导星情况等, 这时要采用图像相关法确定像点位置的偏移, 这种方法叫作相关 S-H 法。

4.3 五棱镜扫描技术

五棱镜扫描方法利用五棱镜可把光线折转 90° 的特性检验平面波波前, 这早已用到平行光管的像面标定等领域。由于这种方法用于检验大口径平面波误差时可以避免制作大的标准平面镜, 在大口径平面和大口径望远镜的检验上具有很好的应用前景^[23 24]。图 21 表示五棱镜扫描法检验平面镜的原理图, 其中 P1 是参考镜, P2 是扫描镜。图 22 表示用该方法检验 2 m 口径平面镜面形的试验装置。经过多个不同方向的径向扫描以

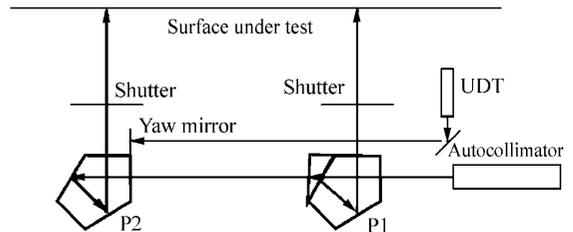


图 21 五棱镜扫描原理

Fig. 21 Scanning principle of pentaprism



图 22 五棱镜扫描试验装置

Fig. 22 Scanning testing apparatus with pentagonal prism

及数据处理可得到平面镜的二维面形等高图。

五棱镜扫描方法还可以用在检验大口径望远镜的光学系统波像差和焦面确定上。图 23 表示其原理图。在光学系统的焦面放置点光源,用五棱镜扫描法测定出射光线的平行度。这是检验前面 2.6 节介绍的 3.5 m 口径 SPICA 望远镜的一种方案^[16]。

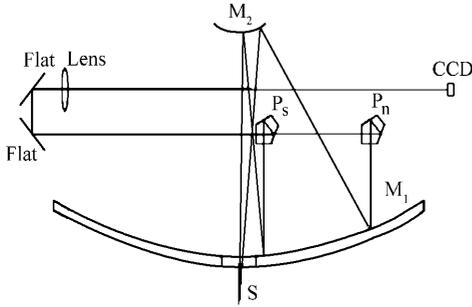


图 23 用五棱镜扫描法检验大口径望远镜原理图

Fig. 23 Testing large aperture telescope by pentaprism scanning

4.4 位相恢复 PR (phase retrieval) 技术

PR 技术是从相机获得的图像(光强分布)信息推算出光学系统的波面像差的一种波前传感技术。这种方法直接用相机获得的图像信息作为评价像质的依据,是一种最直接和真实的评价。这里没有任何其他传感器,所以系统简单,也没有传感器和图像之间的任何换算误差。

光学系统的波像差是代表光学系统成像质量的最根本的物理量。有了波像差的数据,可计算出点扩散函数和传递函数,知道图像变模糊的原因,从模糊图像恢复原来的图像。

光学系统的点扩散函数 $PSF(x, y)$ 和光学传递函数 $OTF(u, v)$ 之间存在傅里叶变换关系。

$$OTF(u, v) = \iint PSF(x, y) \cdot \exp[-2\pi i(ux + vy)] dx dy, \quad (1)$$

设振幅点扩散函数为 $ASF(x, y)$, 则

$$PSF(x, y) = ASF(x, y) ASF^*(x, y) = |ASF(x, y)|^2, \quad (2)$$

而振幅点扩散函数 $ASF(x, y)$ 和光瞳函数 $P(x', y')$ 之间存在傅里叶变换关系。即

$$P(x', y') = \iint ASF(x, y) \cdot$$

$$\exp[-2\pi i(x'x + y'y)] dx dy, \quad (3)$$

因此,光学传递函数等于光瞳函数的自相关,即

$$OTF(u, v) = \iint P(x', y') P^*(x' + u, y' + v) dx' dy' = P(x', y') \otimes P(x', y'), \quad (4)$$

光瞳函数表示为

$$P(x', y') = A(x', y') \exp[ikW(x', y')], \quad (5)$$

其中 $A(x', y')$ 表示光瞳函数的振幅部分,是光瞳形状的函数,通光孔内取 1,通光孔外取 0, $k = 2\pi/\lambda$, $W(x', y')$ 表示光学系统的波像差。

位相恢复问题归结为已知点扩散函数 $PSF(x, y)$ 和光瞳函数的振幅部分 $A(x', y')$, 求出光瞳函数的位相部分,即波像差 $W(x', y')$ 。从以上关系可知,原则上这时的解不是唯一的解,但可用迭代法和参数选择方法求得满意的结果。

图 24 表示应用 PR 技术的自适应光学系统工作原理。

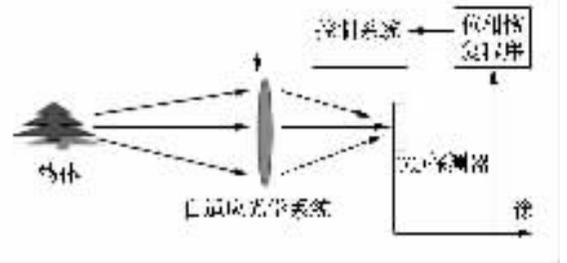


图 24 应用 PR 技术的自适应光学系统工作原理

Fig. 24 Principle of adaptive optical system using PR technology

图 25 表示已知点物体像,求位相的迭代方法流程。已知点扩散函数 $PSF(x, y)$ 和光瞳函数的振幅部分 $A(x', y')$, 求光瞳函数的位相部分 $W(x', y')$ 的迭代过程如下:初始光瞳函数的位相用任意常数代入(图中的左下角),已知光瞳函数的振幅部分(光瞳形状函数) $A(x', y')$ 保持不变,构成初始光瞳函数 $P(x', y')$, 进行傅里叶逆变换得第一次推定的振幅点扩散函数 $ASF(x, y)$ 。根据这次计算得到的 $ASF(x, y)$ 的位相值设为下次迭代的位相,保持其振幅 $|ASF(x, y)|$ 不变,得下次迭代用的振幅点扩散函数,进行傅里叶变换得第一次推定的光瞳函数 $P(x', y')$ 。每次迭代只改变位相部分,而其振幅部分保持不变,最后求得变化不大的光瞳函数的位相值就是所求得

相,即波像差值(图中右下角)。

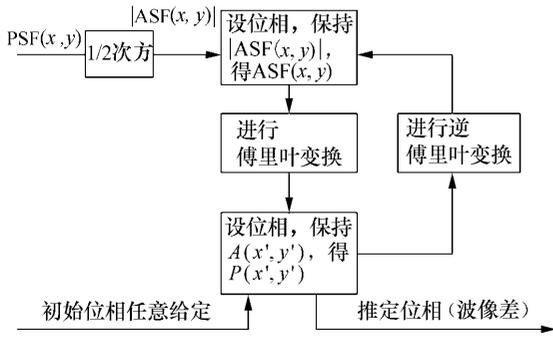


图 25 已知点物体像求位相的迭代方法流程

Fig. 25 Flowchart of iteration method for getting phase based on point image

位相恢复的参数法是把波像差展开成级数,如 Zernike 多项式展开,然后用光瞳函数的自相关运算求传递函数,改变 Zernike 系数,得不同的传递函数计算结果,与测得的点扩散函数的傅里叶变换得到的传递函数结果比较,求其均方差最小的结果作为解^[25]。

以上是对点目标物体成像时的位相恢复过程,一般的天文应用都是这种情况,如果采用位相参差(Phase-Diverse)方法,则位相恢复更准确^[26]。

对扩展的未知物体,情况较复杂,已报道很多这类研究成果^[27-29],这时必须采用位相参差的位相恢复 PD PR(Phase-Diversity Phase Retrieval)技术。图 26 表示 PD PR 技术概念图。

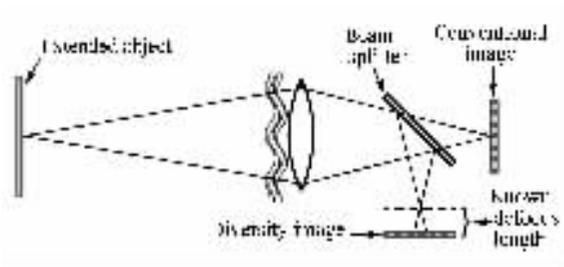


图 26 PD PR 技术概念图

Fig. 26 Concept diagram of PD PR technology

位相参差的概念是给光学系统一个或几个已知的位相差(波像差),如把像面离焦,这时知道离焦量就知道波像差,这叫作位相参差。根据已知的位相参差,把焦面上的图像和离焦的图像同时考虑可恢复光学系统的位相。用这种方法可以

对扩展的未知物体进行位相恢复,获得清晰的消模糊的图像。

为了简便,用一位变量表示二位变量,则光学系统的成像关系表示如下:

$$i(x) = h(x) * d(x) * o(x) + n(x), \quad (6)$$

其中 $i(x)$ 为像的光强分布; $h(x)$ 为光学系统的点扩散函数; $d(x)$ 为探测器的点扩散函数; $o(x)$ 为物体的光强分布; $n(x)$ 为噪声; * 符号表示卷积运算。(6)式两边取傅里叶变换得

$$I(f) = H(f)D(f)O(f) + N(f), \quad (7)$$

其中 $I(f)$ 为像的频谱; $H(f)$ 为光学传递函数; $D(f)$ 为探测器的传递函数; $O(f)$ 为物体的频谱; $N(f)$ 为噪声频谱。

利用前面介绍过的恢复位相的参数法,把(5)式光瞳函数简写成

$$P(x') = A(x') \exp[ikW(x')], \quad (8)$$

其中,波像差 W 展开成多项式

$$W(x') = \sum_{k=1}^N c_k \phi_k(x'), \quad (9)$$

光学传递函数 $H(f)$ 是光瞳函数的自相关,即

$$H(f) = \int P^*(x')P(f+x')dx' = \int A(x')A(f+x') \exp[ikW(f+x') - ikW(x')] dx', \quad (10)$$

希望求出探测到的像的频谱 $I(f)$ 和给定多项式展开系数 c_k 后推算出来的频谱 $H(f)D(f)O(f)$ 之间的方差最小的多项式系数解 c_k , 即如下的评价价值 E 最小的解。

$$E = \int |I(f) - H(f)D(f)O(f)|^2 df, \quad (11)$$

当不知道物体的光强分布 $o(x)$ 时,采取位相参差法,设在两个不同的焦点上观察物体,得到两个像 $i_1(x)$ 和 $i_2(x)$, 这时评价价值 E 改写成

$$E = \int |I_1(f) - H_1(f)D(f)O(f)|^2 df + \int |I_2(f) - H_2(f)D(f)O(f)|^2 df, \quad (12)$$

当物体的谱 $O(f)$ 取如下值时,

$$D(f)O(f) = \frac{H_1^* I_1 + H_2^* I_2}{|H_1|^2 + |H_2|^2}, \quad (13)$$

这个评价价值最小。

把(13)式代入(12)式,得出的评价价值如下:

$$E = \int \frac{|I_1 H_2 - I_2 H_1|^2}{|H_1|^2 + |H_2|^2} df, \quad (14)$$

当观察到的像有足够的信噪比并像的取样点足够密的时候,恢复位相效果较好^[25]。

图 27 给出了这种位相参差法位相恢复和图像修正的实例。

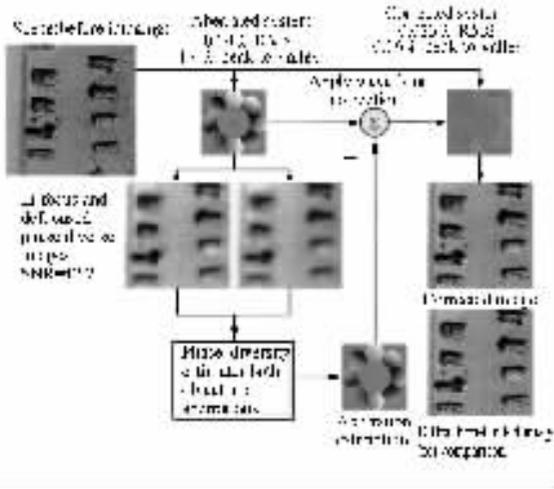


图 27 位相参差法位相恢复和图像修正实例

Fig. 27 Phase restoration and image correction by phase diversity method

这里模拟了子孔径拼接的望远镜由于子孔径

调整误差产生的波像差的传感和补偿调整后的图像的修正效果^[29]。

近年来由于计算机的发展和软件的不断优化,这种位相参差的位相恢复技术有了很大的进展^[27,28],在实验室位相恢复精度已经达到衍射极限水平,自适应控制的闭环周期达到 100 Hz。因此,该项技术已开始实际应用,应用前景颇好,前述的 JWST 天文望远镜在轨调整方案就是采用了该项技术^[30]。

5 结束语

21 世纪空间科学的发展依赖于空间光学的发展,其中大型空间望远镜的研发是决定性的因素。在大型空间望远镜的研制中波前传感技术是关键技术。本文介绍了用于大型天文望远镜的几种波前传感技术,其中基于图像的波前传感技术具有很好的应用前景。因为它不需要其他的传感器,直接用望远镜的成像传感器进行波前的测量,所以是最真实的波前传感技术。由于目前计算机技术的进展已能满足基于图像的波前传感技术的应用要求,应该说这种技术的应用与前景是相当广阔的。

参考文献:

- [1] 美国宇航局(NASA)2006~2016年战略计划[Z]. http://www.nasacc.gov.cn/Upfiles/2006-10-8-10-26-53-2006-17_.pdf/2006.
- [2] BIGNAMI G, CARGILL P, SCHUTZ B *et al.*. Cosmic Vision: Space Science for Europe 2015-2025[M]. Noordwijk: ESA Publications Division, 2005.
- [3] STAHL H P. Mirror technology roadmap for optical/IR/FIR space telescopes[J]. *SPIE* 2005, 6265: 626504/1-9.
- [4] ANGEL R. Buyer's guide to telescopes at the best site: Dome A, L2 and Shackleton Rim[J]. *SPIE* 2004, 5487: 1-12.
- [5] MARTIN H M, BURGE J H, COERDEN B *et al.*. Manufacture of 8.4 m off-axis segments: a 1/5 scale demonstration[J]. *SPIE* 2004, 5494: 62-70.
- [6] ROGER A, DAN E, SURESH S *et al.*. A lunar liquid mirror telescope(LLMT) for deep-field infrared observation near the lunar pole[J]. *SPIE* 2006, 6265: 62651U/1-14.
- [7] JWST(James Webb Space Telescope)[Z]. <http://forum.xitek.com/showarchives.php?threadid=444320/2006>.
- [8] <http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf-architectures.cfm>[Z].
- [9] JAMES B B. Space optics: challenge and opportunity[J]. *SPIE* 2004, 5524: 8-13.
- [10] DAN L, DOMINIC B, HAROLD Y *et al.*. Science promise and conceptual mission for SAFIR—the single aperture far infrared observatory[J]. *SPIE* 2006, 6265: 62651X/1-15.
- [11] SHOLL M, LAMPTON M, ALDERING G *et al.*. Snap Telescope[J]. *SPIE* 2004, 5487: 1473-1483.
- [12] GORAN L P. Herschel mission and observing opportunities[J]. *SPIE* 2004, 5487: 401-412.
- [13] TANYA L, BRUCE S, ASIER A *et al.*. First results from Herschel-SPIRE performance tests[J]. *SPIE* 2004, 5487: 460-

486.

- [14] TOULEMONT Y ,PASSVOGEL T ,PILLBRAT G *et al.* . The 3.5 m all SiC telescope for HERSCHEL[J]. *SPIE* 2004 , 5487 :1119-1128.
- [15] HIDEHIRO K ,TAKAO N ,TAKASHI O *et al.* . Development of space infrared telescope for the SPICA[J]. *SPIE* 2004 , 5487 :991-1000.
- [16] YVES T ,JACQUES B ,DOMINIQUE P *et al.* . The 3.5 m all SiC telescope for SPICA[J]. *SPIE* 2004 :5487 :1001-1012.
- [17] EMMANUEL S ,YVES T ,JACQUES B *et al.* . A new generation of large SiC telescope for space application[J]. *SPIE* , 2004 :5528 :83-95.
- [18] CONRAD W ,TONY W ,JOHN H *et al.* . Assembly integration and ambient testing of the James Webb Space Telescope primary mirror. *SPIE* 2004 :5487 :859-866.
- [19] KOBY Z S ,JOHN P S ,ROBERT J B *et al.* . Current concepts for cryogenic optical testing of the JWST secondary mirror [J]. *SPIE* 2004 :5494 :141-151.
- [20] LEE D F ,JOHN G H ,CHARLES D *et al.* . New approach to cryogenic optical testing the James Webb Space Telescope [J]. *SPIE* 2006 :6265 :62650P/1-9.
- [21] RAYMOND T D ,NEAL D R ,TOPA D M *et al.* . High-speed , non-interferometric characterization of Si wafer surfaces [J]. *SPIE* 2002 :4809 :208-216.
- [22] CRAIG K ,DANIEL R N ,JOHN K *et al.* . The JWST infrared Scanning Shack Hartman System :A new in-process way to measure large mirrors during optical fabrication at Tinsly[J]. *SPIE* 2006 :6265 :62653D/1-11.
- [23] PROTEEP C V M ,CHUNYU Z ,JAMES H B *et al.* . Measurement of a 2-meter flat using a pentaprism scanning system [J]. *SPIE* 2005 :5869 :58691A/1-11.
- [24] PROTEEP C V M ,CHUNYU Z ,JAMES H B *et al.* . Measurement of a 2-meter flat using a pentaprism scanning system [J]. *Optical Eng.* 2007 :46 :023602/1-9.
- [25] ROBERT A G ,ROBERT C. Wavefront sensing by phase retrieval[J]. *SPIE* ,1979 :207 :32-39.
- [26] BRUCE H D ,DAVID L A ,SMITH J S *et al.* . Phase retrieval algorithm for JWST flight and testbed telescope[J]. *SPIE* , 2006 :6265 :626511/1-17.
- [27] RICHARD G P ,BRIAN J T ,RYAN J M *et al.* . Phase-diverse adaptive optics for future telescopes[J]. *SPIE* 2007 , 6711 :671103/1-15.
- [28] MARTIN J B ,DELPHINE D ,TONY W *et al.* . Image-based wavefront sensorless adaptive optics[J]. *SPIE* 2007 :6711 :671102/1-7.
- [29] DAVID A C ,BRIAN J T ,RICHARD G P *et al.* . Aberration correction of segmented-aperture telescopes by using phase diversity[J]. *SPIE* 2000 :4123 :56-63.
- [30] ADAM R C ,ACTON D S ,ATCHESON P D *et al.* . Aligning and maintaining the optics for the James Webb Space Telescope(JWST) on-orbit :the wave front sensing and control concept of operations[J]. *SPIE* 2006 :6265 :62650X/1-16.

作者简介 韩昌元(1940—) ,男 ,吉林延吉人 ,研究员 ,主要研究方向为光学设计与光学测试、工程光学系统测试。

E-mail hancy962@sohu.com。