

# 空间引力波探测望远镜系统技术初步分析\*

范纹彤, 赵宏超, 范磊, 闫勇

“天琴计划”教育部重点实验室, 中山大学天琴中心 & 物理与天文学院, 天琴前沿科学中心, 国家航天局引力波研究中心, 广东 珠海 519082

**摘要:** 为探测到 0.1 mHz~1 Hz 频段的引力波, 天琴、LISA、太极等空间引力波探测器编队 (或星座) 需在几十万到几百万公里量级的臂长上, 实现 pm 级精度的测量。因此直接作为星间干涉测量光路一部分的望远镜面临巨大的技术挑战。空间引力波探测望远镜有超高精度和超高稳定性的特点。本文以 LISA 引力波探测器望远镜为研究对象, 根据星间激光干涉测量核心指标  $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}@0.1 \text{ mHz}\sim 1 \text{ Hz}$  的要求和引力波探测的实际需求, 分析了望远镜的光学设计方案。在设计基础上, 就材料选择、光学加工、装调及杂散光抑制等方面进行了分析和探讨, 为后续望远镜的研制提供了参考依据。

**关键词:** 望远镜; 引力波; LISA; 杂散光

**中图分类号:** TH743 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0178-08

## Preliminary analysis of space gravitational wave detection telescope system technology

FAN Wengtong, ZHAO Hongchao, FAN Lei, YAN Yong

MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Frontiers Science Center for TianQin, CNSA Research Center for Gravitational Waves, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China

**Abstract:** In order to realize the detection of gravitational waves in the frequency range of 0.1 mHz~1 Hz, the formations (or constellations) of space gravitational wave detectors such as Tianqin, LISA, and Taiji needs to achieve picometer-level measurement accuracy on the order of hundreds of thousands or even millions of kilometers. Therefore, telescopes directly used as part of the inter-satellite interferometry optical path are facing huge technical challenges. Space gravitational wave detection telescope has the characteristics of ultra-high precision and ultra-high stability. This article takes the LISA gravitational wave detector telescope as the research object, and analyzes the optical design scheme of the telescope according to the requirements of  $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$  core index of inter-satellite laser interferometry and the actual demand of gravitational wave detection. And based on the design, analysis and discussion on material selection, optical processing, adjustment and stray light suppression are carried out, which provides a reference for the subsequent development of the telescope.

**Key words:** telescope; gravitational wave; LISA; stray light

\* 收稿日期: 2020-11-02

录用日期: 2020-12-09

网络首发日期: 2021-01-13

基金项目: 广东省基础与应用基础研究重大项目 (2019B030302001); 国家自然科学基金 (11803034)

作者简介: 范纹彤 (1994年生), 女; 研究方向: 引力波探测望远镜的光学系统设计;

E-mail: fanwt5@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 闫勇 (1981年生), 男; 研究方向: 空间科学仪器/载荷总体设计; E-mail: yanyong5@mail.sysu.edu.cn

## 1 引言

20世纪80年代, 欧美国家提出了空间引力波探测概念方案<sup>[1]</sup>。美国在2015年9月9日首次探测到了引力波, 这标志着爱因斯坦广义相对论已经近100年的预言成为现实<sup>[2]</sup>。与引力波的地面探测相比, 空间引力波探测在波源类型、数量、信号强度、可探测的空间距离等各方面具有明显的优势, 是开展引力波天文学研究不可替代的观测手段<sup>[3-6]</sup>。光学望远镜是空间激光干涉测距系统的关键组成部分, 它的发展直接影响到引力波探测的精度。20世纪60年代, 美国马里兰大学的 Joseph Weber 制造了世界上第一台引力波探测器<sup>[7]</sup>。至此, 引力波探测望远镜随着探测精度的提高不断地发展着。

0.1 mHz~1 Hz 的频段引力波有着丰富的天体物理来源, 包含了宇宙早期结构和演化的信息, 可以对地基干涉系统测量的波段进行有效补充。不同的频率范围不仅包括不同类型的信号源, 而且需要不同类型的探测器<sup>[8]</sup>。为了探测到此波段的引力波, LISA 将采用3颗完全相同的卫星, 每颗

卫星都在以太阳为中心的开普勒轨道上运行, 在绕日运动的同时三角形编队每年会转动一周<sup>[9]</sup>。这3颗相同的卫星组成夹角为60°的等边三角形, 任意两条臂形成一个迈克尔逊干涉仪, 每颗卫星上都需要光学望远镜实现两卫星间激光的发送和接收, 从而测量由引力波引起的两颗卫星间距离的微小变化。

本文以 LISA 为例, 针对星间激光测量精度 10 pm/Hz<sup>1/2</sup> 的测量精度要求, 对引力波探测望远镜的初步光学设计方案和设计指标进行分析研究。

## 2 望远镜的功能与光学方案

望远镜的功能是将激光从一个航天器传送到另一个航天器, 实现两地航天器间信号的传输, 以精确测量成对的测试质量块之间的距离。图1给出了望远镜的功能结构图。望远镜在这里的作用主要有两个: ① 扩束发射, 把从光学平台上输入的小直径光束扩展成接近衍射极限的准直光束, 从而减少传输过程中的衍射损失; ② 汇聚接收, 接收来自远端航天器的激光信号<sup>[10]</sup>。

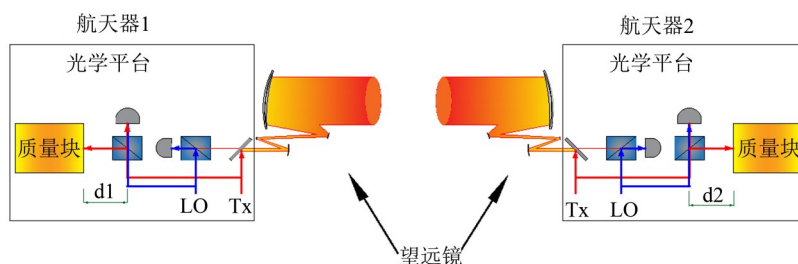


图1 望远镜的功能结构图

Fig. 1 The functional structure of the telescope

引力波光学望远镜进行设计时首先需要考虑的是透射系统和反射系统的选择。引力波望远镜的光源为激光, 透射系统不存在校正色差的问题, 然而在设计时反射系统相比透射系统仍具有优势: ① 使用反射系统可消除望远镜温差对折射率变化的影响; ② 反射系统可选择低膨胀系数甚至零膨胀系数的材料, 这样就可以尽量减小使用过程中由于材料热变形而引起的像差; ③ 对于空间望远镜应考虑轻量化的设计, 反射望远镜系统可选择低密度的材料, 从而实现轻量化的要求。基于以上几点, 引力波探测望远镜考虑使用反射系统。

引力波望远镜同轴和离轴的选择同样需要进行综合考虑。其中, 同轴设计具有结构紧凑, 加工难度低等优点, 且由于望远镜热变形而产生的

波前变化具有对称性, 有利于噪声信号的识别。同时, 同轴光路也有三个缺陷: ① 次镜及其支撑结构会发生较为严重的后向散射; ② 中心遮拦会影响发射的激光高斯光束能量和波前质量; ③ 当望远镜作为接收端时也会有遮拦, 从而降低信噪比。发射到远端航天器的激光光束由于中心遮拦会产生波前变形和泊松亮斑, 从而使探测精度难以达到指标要求<sup>[11]</sup>。离轴设计避免了上述问题, 但更容易受到热梯度的影响而引入如慧差或像散等离轴像差<sup>[12]</sup>。这些离轴像差的校正和消除也比较复杂。在光学系统设计过程中, 为了达到增大视场、简化系统、缩小尺寸、紧凑结构的目的, 通常会采用具有更多设计自由度的光学结构形式<sup>[13]</sup>。综合考虑波前质量、杂散光性能、加工

工艺等因素后,选择离轴四反无焦结构作为引力波探测望远镜的方案。此望远镜系统具有设计自由度高、无中心遮拦、质量轻、杂光抑制能力强等优点<sup>[14]</sup>。

### 3 望远镜关键指标要求与分析

为了满足空间引力波探测的需求,以 LISA 望远镜需要在距离为 250 万公里的两航天器间进行激光信号的有效传输为例,表 1 给出了 LISA 引力波探测望远镜的关键技术指标。在给出的望远镜技术指标中,对光程稳定性和杂散光的要求是比较高的,这是因为它们会直接影响到望远镜的测量精度和稳定性。下面将望远镜的关键技术指标进行简要分析。

表 1 LISA 望远镜关键技术指标  
Table 1 Key technical indicators of LISA Telescope

技术目标	技术参数
基本指标	
波长/nm	1 064 <sup>[12]</sup>
净口径/mm	300
光学效率	>0.85 <sup>[12]</sup>
捕获模式/ $\mu\text{rad}$	$\pm 200$ <sup>[14]</sup>
视场科学模式(面外)/ $\mu\text{rad}$	$\pm 7$ <sup>[15]</sup>
科学模式(面内)/ $\mu\text{rad}$	$\pm 4.2$ <sup>[15]</sup>
系统远场波前	$\lambda/30$ <sup>[16]</sup>
核心指标	
望远镜光程稳定性	$1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \text{ mHz}}{f}\right)^4}$ <sup>[14]</sup>
杂散光	$<10^{-10}$ (传输功率) <sup>[16]</sup>

#### 3.1 基本指标

**3.1.1 净口径** 望远镜口径的大小直接决定了远端航天器收集到的激光功率的大小<sup>[17]</sup>。如果将激光束腰设计在望远镜出瞳处,且激光束腰大小等于望远镜出瞳尺寸,则可得公式<sup>[18]</sup>

$$P = \frac{D^4}{2\lambda^2 L^2} P_0, \quad (1)$$

其中  $P_0$  为本地望远镜发出的功率,  $P$  为远端航天器望远镜接收到的功率,  $L$  为两航天器间的距离。由于激光器波长和两航天器间的距离已经确定,因此远端航天器上望远镜接收到的功率完全由望

望远镜净口径决定。

**3.1.2 光学传输效率** 望远镜的光学传输效率直接影响了两航天器间能量的传输效率。望远镜系统的散粒噪声直接决定了望远镜的光学传输效率。望远镜的散粒噪声可由下式决定

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{hc\lambda}{2\pi P}}, \quad (2)$$

其中  $h$  为普朗克常量,  $c$  为光速。从 (2) 式可知望远镜的散粒噪声由远处航天器 2 接收到的功率决定。 $P$  又可由公式 (1) 得到,对于口径为 300 mm 的引力波探测望远镜,如果采用的激光功率为 1 W,此时远端航天器上的望远镜接收到的功率约为 100 pW。根据表 1 给出的参数可计算得到远端望远镜接收到的散粒噪声。当望远镜净口径和激光发射功率确定的情况下,减小望远镜的散粒噪声只能通过提高望远镜的光学传输效率来增大远处航天器 2 接收到的激光功率。

目前采用的望远镜结构是离轴四反结构,其光学传输效率主要由反射镜的反射率决定。如果要求望远镜的光学传输效率大于 0.85,这就要求每个反射镜的反射率至少高于 0.96。

**3.1.3 视场** 望远镜的视场角是根据望远镜在正常操作过程中遇到的角度范围而设定的。望远镜的视场角包括捕获视场和科学视场。

捕获视场是两航天器建立星间激光链路时,一个航天器为了捕获到另一个航天器所需要满足的角度范围。为了对两航天器间的距离进行激光干涉测量,望远镜的捕获视场角约为  $\pm 200 \mu\text{rad}$ 。在这个过程中,干涉臂长,航天器轨道以及所采用的捕获策略共同决定了望远镜的捕获视场角。

航天器建立星间激光链路后,就进入到了科学操作模式。科学操作模式下的视场是根据望远镜能够适应正常科学操作过程中可能遇到的角度范围而设置的<sup>[17]</sup>。臂长和轨道的选择决定了望远镜的瞬时视场。航天器在给定的轨道上运行时,由于干涉臂长约为  $2.5 \times 10^6 \text{ km}$ ,光速为  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,所以在激光传输的过程中远端航天器 2 的位置在不断发生变化,因此本地望远镜发出的激光需要有一个前指角提前指向到航天器 2 的位置,实现星间对准。“面内”是指平行于卫星组成的三角形的平面,相对于黄道平面倾斜  $60^\circ$ ;“面外”指垂直于三角形的平面。为了能够适应正常科学操作中可能遇到的角度的变化范围,引力波望远镜在科学模式下“面内”的视场角为  $\pm 4.2 \mu\text{rad}$ ，“面外”的

视场角为  $\pm 7 \mu\text{rad}$ 。

**3.1.4 远场系统波前** 由于摄动等各种因素的影响, 两航天器上望远镜之间的视轴将会发生抖动。当望远镜波前近似为理想球面波且光滑时, 两地航天器上望远镜视轴的抖动便不会引起距离的改变, 因为球面波在各个方向上的半径都是一样的。如果远场波前存在像差, 波前的曲率半径就会随着角度的变化而不同, 从而影响百万公里外的望远镜测得的距离大小。这种因望远镜视轴改变而引起的测量距离不同造成的误差称之为 TTL 噪声 (Tilt-to-Length Coupling), 减少这一噪声最好的方法是设计接近衍射极限的波前。

望远镜良好的波前质量还可以提高两航天器间的传输效率。用斯特列尔比 (Strehl Ratio) 衡量两航天器上望远镜的光学系统光能强度分布的优劣<sup>[19]</sup>。如果干涉仪每条臂的波前误差为  $\delta = \lambda/20$ , 则可通过计算得斯特列尔比为  $1 - (2\pi\delta/\lambda)^2 = 0.9$ 。考虑到望远镜同时进行激光信号的接收和发送, 则激光能量的传输效率与斯特列尔比的平方 0.81 成正比。考虑到激光在望远镜和光学平台的传输中也会存在一定的像差, 要求望远镜的远场波前为  $\lambda/30$ 。

## 3.2 核心指标

**3.2.1 光程稳定性** 望远镜的光程指的是发射或接收的光束从入瞳到出瞳在望远镜内部传输的总的路径长度, 又可定义为总的相位与波数的比值, 其中波数  $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。光程稳定性的合理控制对测量 0.1 mHz~1 Hz 的引力波非常重要。

望远镜的光程稳定性是指在干涉测量系统中, 总体噪声预算下能够容忍的通过望远镜的路径长度的变化。目前给出的单链路测量系统总的噪声预算 (NB)

$$\text{NB} = 10 \cdot \frac{\text{pm}}{\sqrt{\text{Hz}}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^4}, \quad (3)$$

其中  $0.1 \text{ mHz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$ ,  $f_0 = 2.2 \text{ mHz}$ 。

在总的噪声预算下目前分配给望远镜的光程稳定性噪声为  $1 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ,  $0.1 \text{ mHz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$ 。望远镜的光程稳定性主要是由望远镜主次镜之间的距离稳定性决定的, 因此可通过设计稳定的支撑结构, 选择热变形较小的材料来达到望远镜需要的光程稳定性。

**3.2.2 杂散光** 由于望远镜发送 1 W 的激光功率的同时, 接收到的来自远端航天器上的激光功率约为 100 pW。并且要接收到的相对微弱的信号

和本地激光信号进行相干检测。因此要实现两个激光信号间的干涉意味着望远镜上的杂散光要足够小。

杂散光可以表示为探测器上的单个电场矢量。由于相位会随着反射表面的移动而发生变化, 光接收器上接收的能量会包含一个交叉项。该交叉项为本地振荡激光器的电场, 杂散光的电场以及两个电场夹角的余弦值的乘积<sup>[16]</sup>。杂散光和本地振荡激光器之间的相位关系是由杂散光到达检测器的路径长度决定的。如果路径长度是稳定的, 那么两个电场的夹角也是固定的, 此时杂散光便可以通过一定手段进行剔除。然而在测量过程中相位角会发生变化, 杂散光会产生时变信号, 因此需要对杂散光进行严格的控制。考虑到远端望远镜上接收到的激光功率, 要求杂散光小于发射功率的  $10^{-10}$ 。

## 4 望远镜的光学设计

根据对望远镜的指标要求给出了望远镜的参考设计, 利用像差公式求解出同轴四反望远镜系统的初始结构, 在此基础上引入偏移量进行优化。主镜  $M_1$  为离轴抛物面, 次镜  $M_2$  为离轴双曲面, 三镜  $M_3$  和四镜  $M_4$  为尺寸较小的球面。入射光瞳在主镜前, 直径 300 mm。系统的光学放大倍率主要由主次镜实现。在二次镜和三次镜之间设置一个中间像面, 便于对杂散光进行设计和优化。合理增加三镜和四镜的折转角度, 用来降低系统的向后散射能量。三镜和四镜成对安装, 便于根据需要调节系统的焦距, 补偿由于振动, 温度梯度等变化引起的望远镜结构参数的改变而导致的系统波前下降。在四镜后面设计一个可以与后面光学平台相匹配的出瞳。

以控制望远镜的像差为目标对望远镜结构进行了优化, 可以保证有效的激光传输。在优化过程中, 对望远镜的整体结构、尺寸长度、入瞳出瞳位置进行了合理布局和约束。考虑到杂散光对引力波探测的影响, 设计时通过合理优化望远镜整体结构, 增加遮光罩以及控制孔径来减小非成像光束产生的杂散光。最终得出了如图 2 所示的离轴四反望远镜系统结构图。

由前面的分析可知, 良好的波前质量不仅可以有效提高两航天器间的传输效率, 而且可以尽量减小 TTL 噪声。不同视场的波前误差  $E_{wi}$  为<sup>[20]</sup>

$$E_{wi} = E_a + E_{di}, \quad (4)$$

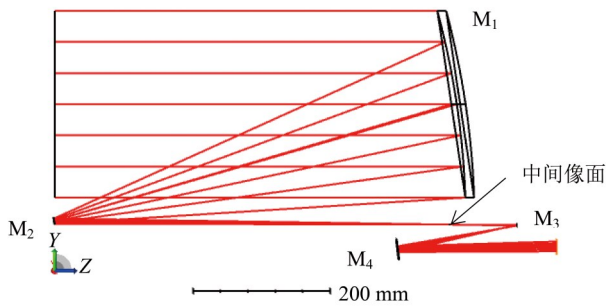


图2 望远镜光学系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of telescope optical system

其中  $E_a$  表示全视场波前差的平均值,  $E_{di}$  为全视场波前差的平均值  $E_a$  和各视场波前差的残差,  $i$  表示不同视场, 其值为  $i=1, 2, 3, \dots, m$ 。在对望远镜系统进行光学设计时不仅要通过优化减小系统的波前差  $E_w$ , 还要注意控制  $E_{di}$  的大小, 即波前差的一致性。因为在引力波测量过程中, 由  $E_a$  引起的 TTL 噪声可以通过进行标定剔除<sup>[21]</sup>, 而  $E_{di}$  产生的 TTL 噪声会直接和测量结果进行耦合, 对测量结果产生误差, 因此控制波前差的一致性可有效减小最终耦合到测量结果的 TTL 噪声水平。

这就意味着对引力波望远镜进行光学设计时, 不仅要考虑到各视场均能满足对波前质量要求小于  $\lambda/30$  的指标要求, 还要使各视场的波前一致性极佳。这样当望远镜之间的视轴有微小变化时, 波前质量不佳而产生的 TTL 噪声的变化就能在可控范围内。

## 5 望远镜的杂散光分析

### 5.1 内部杂散光的产生

对于望远镜而言, 远距离的信号传输使到达接收端的信号光强度非常微弱, 而接收端自身发射的信号光能量很强, 当接收端的发射光经过光学元件和机械件表面的后向散射到达自身探测器上时, 将对能量微弱的接收信号产生影响, 若系统对内部杂散光的抑制不足, 接收信号将会被直接湮没, 其造成的影响甚至会远远超过外部杂散光。

### 5.2 消杂散光的方法

**5.2.1 降低反射镜表面粗糙度** 根据总积分散射理论, 在空气中垂直入射的情况下, 当反射镜表面均方根粗糙度 ( $\delta$ ) 远小于入射波长时 ( $\delta \ll \lambda$ ), 基底表面总积分散射 TIS 和  $\delta$  满足关系式

$$\text{TIS} \approx (4\pi\delta/\lambda)^2. \quad (5)$$

因此可以通过降低反射镜粗糙度来降低表面散射率, 进而减弱后向散射杂光, 也就是说能否加工出具有超光滑表面的反射镜直接决定了系统后向散射杂光能否满足设计要求。模拟分析表明要实现望远镜后向散射  $10^{-10}$  的设计指标, 需对后向散射的主要来源三镜、四镜提出更高的加工粗糙度要求。

目前反射光学元件的超精密加工有磁流变抛光和离子束抛光等方法<sup>[22]</sup>, 这些方法都采用非接触式加工方式, 很好地避免了传统加工过程中的工件磨损、边缘效应、工件负载应力等一系列问题。加工后的光学元件表面粗糙度基本可以达到亚纳米量级, 其中清华大学对 K9 玻璃进行近 0.5 h 的加工, 元件表面粗糙度达到了  $0.6739 \text{ nm}$ <sup>[23]</sup>。

抑制散射另一个较好的办法是获得吸收率高的涂层。2019 年, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所先进涂层与增材制造技术团队研制出了超黑涂层。经第三方权威机构检测, 在  $200 \text{ nm} \sim 25 \mu\text{m}$  波段吸光率高达 99%, 且适应高温和低温太空环境, 可用于空间精密光学仪器。

**5.2.2 增大三镜四镜的光线折转角度** 当发射光经过望远镜的光学元件和机械件表面时, 会有一部分光后向散射到达自身探测器, 对接收信号造成干扰。在合理的范围内增加三镜和四镜的光线折转角度可有效降低达自身探测器后向散射能量, 从而降低工艺性。

**5.2.3 减小接收面尺寸** 出瞳位置处接收面的大小直接影响了接收的后向散射光能量。出瞳位置处的实际接收面越小, 能到达接收面的后向散射能量越低, 需根据实际情况尽可能减小接收面积。

## 6 望远镜的装调, 加工及材料的选择

### 6.1 望远镜的装调

在系统的装调时, 采用模型仿真、精密检测和系统测试相结合的计算机辅助装调技术。通过公差分析得出各反射镜的位置公差情况, 利用反射镜单镜检测来确定反射镜组件的状态和镜面位置, 根据反射镜补偿器位置关系建立的共轴基准标定各反射镜的间隔, 采用光学仿真软件重新优化确定各个间隔; 采用高精度三坐标测量装置结合经纬仪准确确定各反射镜的相对关系, 以便准确确定整个系统的装调状态, 使光学性能达到最优。

由于引力波空间探测望远镜焦距长、检测精

度高、装调难度大, 需采用系统联调等手段。在装调过程中使用补偿器和干涉仪等仪器结合高精度导轨和调整台确定主次镜位置。对三镜-四镜组件的相对位置的调整, 利用平面镜自准干涉法检测

系统波像差, 原理如图 3 所示。结合计算机仿真分析, 对三镜-四镜组件进行适当的微量调整, 使光学系统的成像质量达到最佳状态。

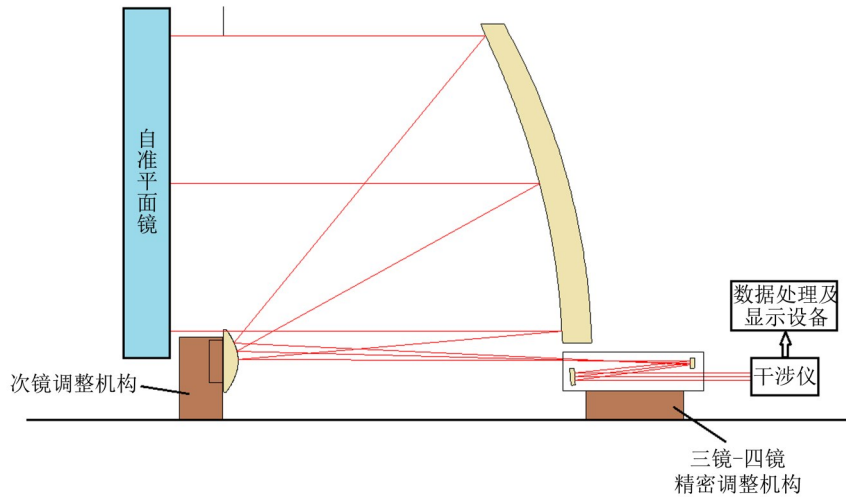


图 3 望远镜装调原理图

Fig. 3 Schematic diagram of telescope assembly and adjustment

由于引力波探测望远镜系统是无焦系统, 其装调难点在于望远镜放大率较大且波像差要求高。由于望远镜出瞳直径较小, 因此需考虑最大化利用干涉仪靶面等问题。

### 6.2 材料选择

为了保证望远镜光机结构的稳定性, 选择高弹性模量、高比刚度、高导热率与低线胀的材料。目前, 适应空间环境应用的光机材料见表 2。

为了满足空间引力波望远镜极高的稳定性要求, 在温度变化如此剧烈的工况下, 经分析, 线胀系数大于 0.2 ppm 的反射镜材料均无法满足要求, 光机材料中, 微晶玻璃的线胀系数最低, 可

以满足应用需求。框架结构材料应与反射镜材料线胀系数匹配, 否则在剧烈温度变化工况下, 会发生局部应力集中甚至产生破坏。理论上能够和微晶玻璃线胀系数匹配的结构材料有殷钢和碳纤维复合材料, 而碳纤维复合材料由于具有吸湿的特性, 真空环境中树脂基中水分子析出会使结构发生持续的变化, 导致无法实现望远镜的科学目标, 因此选择殷钢材料作为框架结构。为了实现较高的温度稳定性, 引力波探测望远镜初步选择微晶玻璃为反射镜的材料, 殷钢材料作为框架结构。

表 2 光机材料性能参数  
Table 2 Optical mechanical material performance

材料名称	密度 $\rho$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ GPa	比刚度 $E/\rho$ $10^6 \text{ m}$	线胀系数 $\alpha$ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	导热率 $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	热畸变 $\alpha/\lambda$ ( $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{W}^{-1}$ )
熔石英	2.19	72	32.8	0.50	1.40	357.14
微晶玻璃	2.53	91	36.0	0.007	1.64	4.27
硅	2.33	131	56.2	2.60	137.00	18.98
SiC	3.0	350	116.7	2.60	140.00	18.57
铍	1.85	287	155.1	11.40	216.00	52.78
TC4	4.40	114	25.9	9.10	7.40	1 229.73
铝	2.70	68	25.2	25.00	167.00	149.70
镁铝合金	1.80	40	22.2	25.20	201.00	125.37

### 6.3 望远镜的加工

主镜和次镜均为二次曲面,三镜和四镜为球面,四块反射镜面形精度用常规工艺可以保证,但光学表面的表面粗糙度则需要超光滑加工使其控制在亚纳米量级,反射镜部件研制技术流程如图4所示。选择合适的材料加工出镜坯后通过轮廓

检测,光学干涉测量等使镜坯精密成形并研磨到较高的精度。经过粘镶嵌件组件装配后进一步实现力、热、真空环境测试,采用光学干涉测量实现镜面的精抛光。经过超光滑加工处理后进行光学镀膜完成整个反射镜的加工。

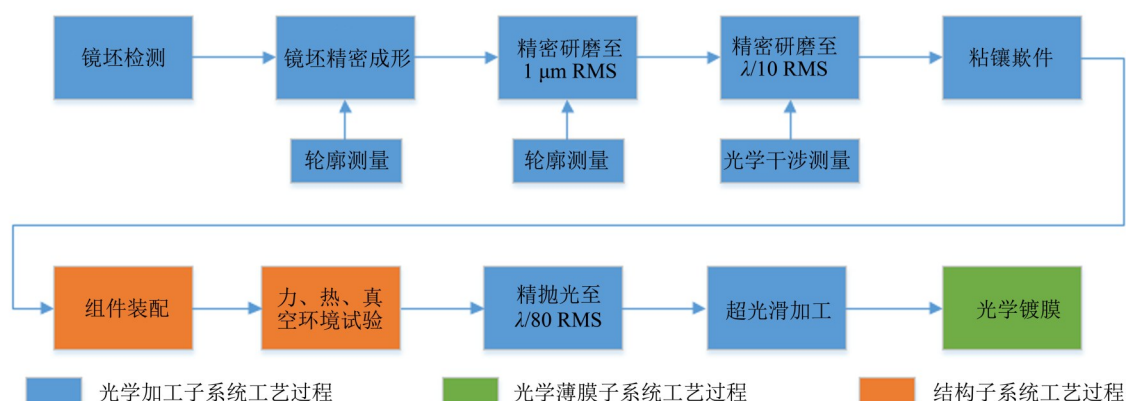


图4 反射镜加工工艺流程

Fig. 4 Mirror processing process

## 7 结 论

引力波探测的实现使人类进入了利用引力波来探测宇宙的全新时期<sup>[24-26]</sup>,可以采用外差激光干涉技术对  $0.1\ \text{mHz}\sim 1\ \text{Hz}$  的引力波频段进行空间引力波探测。星间干涉望远镜在长臂高精度引力波探测中起着重要的信号传输和接收作用。本文以作为干涉测量系统关键部件的望远镜为研究对象,以 LISA 为例根据任务需求对望远镜的设计指标进行了分析,选择了初步的引力波探测望远镜

方案,可通过降低反射镜表面粗糙度,增大三镜四镜的光线折转角度,减小接收面尺寸等方法降低杂散光的后向散射能量。最后,针对引力波望远镜提出了其装调,加工及材料的选择方案。本文以 LISA 引力波空间探测望远镜为例,全面分析了超精超稳望远镜研制所面临的关键技术难点,可为望远镜的研制指明攻关方向,为实现空间引力波的探测奠定重要的技术基础,从而积极推进我国的引力波探测计划。

### 参考文献:

- [1] ISOYAMA S, NAKANO H, NAKAMURA T. Multiband gravitational-wave astronomy: Observing binary inspirals with a decihertz detector, B-DECIGO[J]. Progress of Theoretical and Experimental Physical, 2018: 073E01.
- [2] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole Merger [J]. Physical Review Letters, 2016, 116: 061102.
- [3] CAPRINI C, HINDMARSH M, HUBER S, et al. Science with the space-based interferometer eLISA. II : Gravitational waves from cosmological phase transitions [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2016 (4): 1.
- [4] TAMANINI N, CAPRINI C, BARAUSSE E, et al. Science with the space-based interferometer eLISA. III : Probing the expansion of the universe using gravitational wave standard sirens[J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2016 (4): 2.
- [5] BARTOLO N, CAPRINI C, DOMCKE V, et al. Science with the space-based interferometer LISA. IX : Probing inflation with gravitational waves[J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2016 (12): 26.
- [6] BABAK S, GAIR J, SESANA A, et al. Science with the space-based interferometer LISA. V. Extreme mass-ratio inspirals[J]. Physical Review , 2017, D95:

- 103012.
- [7] 程景全, 杨德华. 引力波和引力波望远镜的发展[J]. 天文学进展, 2005(3): 195-204.  
CHENG J Q, YANG D H. The development of gravitational waves and gravitational wave telescopes[J]. Progress in Astronomy, 2005 (3):195-204.
- [8] KARSTEN D. LISA unveiling a hidden universe assessment study report [R]. ESA/SRE, 2011.
- [9] DANZMANN K. Laser interferometer space antenna: A cornerstone mission for the observation of gravitational waves. ESA system and technology study report [R]. 2000.
- [10] MARCELLO S. Payload preliminary design description [R]. LISA-MSE-DD-0001, 2009.
- [11] SHIRI R, STEIN R, MURPHY K, et al. Fabrication of petal-shaped masks for suppression of the on-axis poisson spot in telescope systems[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87( 4 ) : 043112.
- [12] LIVAS J , SANKAR S. Optical telescope design study results [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015,610 : 012029 .
- [13] 王小勇. 空间光学技术发展展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 79-86.  
WANG X Y. Development and prospect of space optics technology [J]. Aerospace Return and Remote Sensing, 2018, 39(4): 79-86.
- [14] CHEN S N, JIANG H L, WANG C Y, et al. Optical system design of inter-spacecraft laser interferometry telescope[J]. Optics and Photonics Journal, 2019, 9: 26-37.
- [15] DANZMANN K ,PRINCE T A , BENDER P, et al. LISA unveiling a hidden Universe[R]. ESA/SRE, 2011.
- [16] LIVAS J C, ARSENOVIC P, CROW J A, et al. Telescopes for space-based gravitational wave missions[J]. Optical Engineering, 2013, 52(9):091811 .
- [17] LIVAS J C, SANKAR S R. Optical telescope system-level design considerations for a space-based gravitational wave mission [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. 2016:99041K.
- [18] 罗子人, 白姗, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2013, 43( 4 ): 415-447.  
LUO Z R, BAI S, BIAN X, et al. Space laser interference gravitational wave detection[J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(4): 415-447.
- [19] 王智, 沙巍, 陈哲, 等. 空间引力波探测望远镜初步设计与分析[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 131-151.  
WANG Z, SHA W, CHEN Z, et al. Preliminary design and analysis of space gravitational wave detection telescope [J]. Chinese Optics, 2018, 11 ( 1 ) : 131-151.
- [20] 陈胜楠, 姜会林, 王春艳, 等. 大倍率离轴无焦四反光学系统设计[J]. 中国光学, 2020, 13(1):179-188.  
CHEN S N, JIANG H L, WANG C Y, et al. Design of a large-magnification off-axis afocal four-reflection optical system [J]. Chinese Optics, 2020, 13 ( 1 ) : 179-188.
- [21] SCHUSTER S. Tilt-to-length coupling and diffraction aspects in satellite interferometry[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2017.
- [22] 文东辉, 周海锋, 徐钉, 等. 超光滑表面加工技术研究进展[J]. 机电工程, 2015, 32(5): 579-584.  
WEN D H, ZHOU H F, XU D, et al. Research progress in ultra-smooth surface processing technology [J]. Mechatronic Engineering, 2015, 32(5): 579-584.
- [23] 张云, 冯之敬, 赵广木. 磁流变抛光工具及其去除函数[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44( 2 ): 190-193.  
ZHANG Y, FENG Z J, ZHAO G M. Magnetorheological polishing tool and its removal function [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition) , 2004, 44( 2 ): 190-193.
- [24] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence [J]. Physical Review Letters, 2016, 116: 241103.
- [25] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GW170104: Observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift [J] . Physical Review Letters, 2017, 118: 221101.
- [26] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GW170608: Observation of a 19 solar-mass binary black hole coalescence [J]. Astrophysical Journal, 2017, 851: L35.

(责任编辑 张冰)