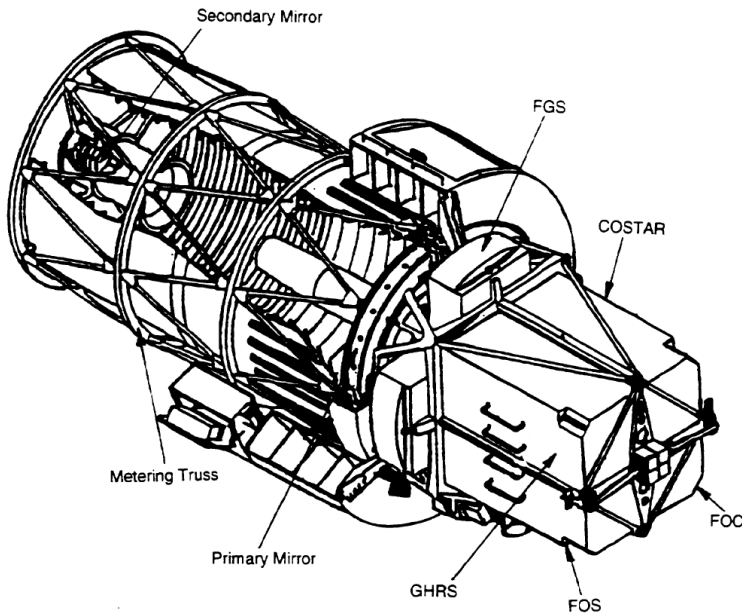


太空望远镜复合材料桁架管件 超低热膨胀系数测试系统技术方案

Design Proposal of Ultralow Thermal Expansion Coefficient Measurement System for Composite Truss Used in Space Telescope



上海依阳实业有限公司

www.eyoungindustry.com

摘要：太空望远镜用各种大尺寸复合材料桁架管件和镜筒普遍要求超低热膨胀系数以保证太空望远镜的热稳定性，传统热膨胀系数测试中的小尺寸试样已无法满足大尺寸构件的超低热膨胀系数测量，需要精确测量整个构件的超低热膨胀系数。本文基于成熟的激光干涉法微位移测试技术，根据复合材料桁架管件工艺质量控制技术要求，提出了大尺寸构件超低热膨胀系数测试系统设计方案。

1. 需求背景

在太空中运行的望远镜由于没有大气层保护，其工作温度变化很大，受阳面温度可高达上百摄氏度，而被阳面温度却在零下几十摄氏度。因此，太空望远镜在空间环境中，望远镜桁架材料的热膨胀，会引起太空望远镜光学结构的尺寸变化，从而造成望远镜观测精度下降。这样对太空望远镜的某些部件和仪器的技术要求就是热稳定性要好，要求太空望远镜的大尺寸桁架结构在一定的环境温度变化范围内不因热应力产生变形或者变形极小，热膨胀系数达到 $E-08/K$ 量级，即所谓零膨胀。

传统热膨胀系数测试只针对长度 100mm 以下的小试样，无法满足大尺寸构件的超低热膨胀系数测

量。为适应太空望远镜制造的要求，特别是对于以米为单位的大尺寸 E-08/K 量级部件的超低热膨胀系数，需要更加准确的测量。因此，研究太空望远镜用复合材料工程构件的超低热膨胀系数测试方法和相应的测试设备，具有重要的科学意义和实用价值。

本文基于成熟的激光干涉法微位移测试技术，根据复合材料桁架管件工艺质量控制技术要求，提出大尺寸构件超低热膨胀系数测试系统设计方案，为管件的设计、生产和质量评价提供技术支撑，并为今后整体桁架结构的尺寸稳定性测试评价奠定技术基础。

2. 超低热膨胀系数测试系统技术要求

2.1. 样件形式和尺寸范围

- (1) 刚性固体复合材料制成的横截面为圆柱形、矩形和 T 型等形式的管件；
- (2) 样件外径范围为 70mm~150mm；
- (3) 样件长度范围为 500mm~2000mm；
- (4) 样件端面平整度小于 0.05mm；
- (5) 样件两端面平行度小于 0.05mm。

2.2. 技术指标

- (1) 测试温度范围： $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ；
- (2) 测温精度： $\leq 0.01^{\circ}\text{C}$ ；
- (3) 样件温度均匀性： $\leq 0.05^{\circ}\text{C}$ ；
- (4) 变形测量分辨率： 0.4nm ；
- (5) 变形测量不确定度： $\leq 30\text{nm}$ ；
- (6) 测温点数：1 个/ 2°C ；
- (7) 热膨胀系数测量不确定度： $\leq 1\times 10^{-8}/\text{K}$ 。

2.3. 验收大纲

(1) 验收测量长度为 1m 的 2 等量块或同等制造精度的碳纤维复合材料管件（其直径为 $70\text{mm}\sim 150\text{mm}$ ，长度为 $1000\text{mm}\sim 2000\text{mm}$ ）。

(2) 以 1m 的碳纤维复合材料管件为验收样品，在温场均匀度优于 0.05°C 、测温步长为 2°C 条件下，5 次测量结果的长度变化量优于 30nm ，热膨胀系数标准偏差优于 $1\times 10^{-8}/\text{K}$ 。

3. 整体结构设计

大尺寸样件超低热膨胀系数测试系统主要由真空系统、试验系统和测量系统三部分组成，整个测试系统放置在气浮隔振台上，如图 3-1 所示。

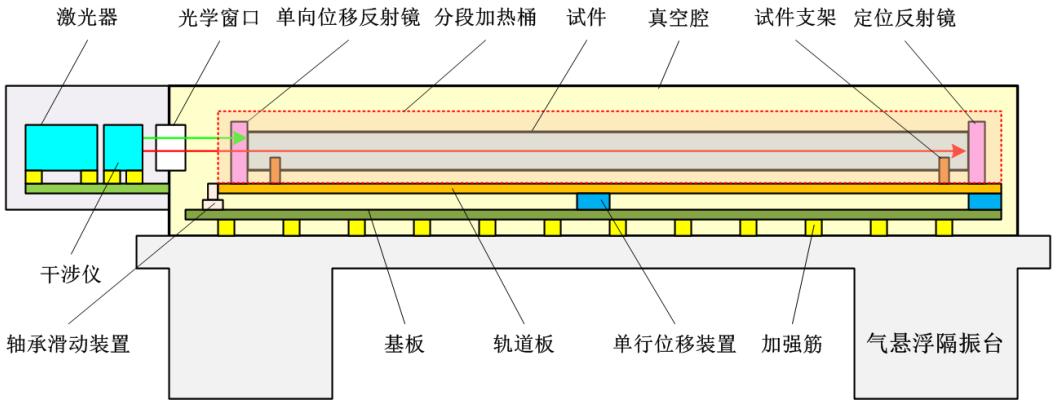


图 3-1 整体结构示意图（侧视图）

针对大尺寸样件，超低热膨胀系数测试系统可以根据激光干涉仪的分布位置设计为单端测量和双端测量布局两种形式。

3.1. 单端测量布局

单端测量布局形式如图 3-2 所示。

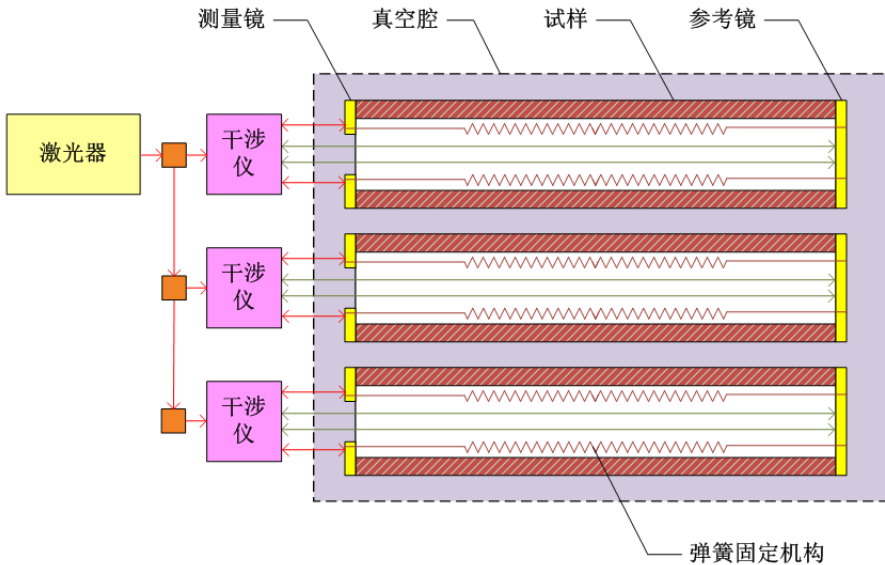


图 3-2 单端测量结构示意图（俯视图）

单端测量布局的特点：

(1) 光程差大（试件长度），两反射镜平行度要求高，可能会带来一定误差。

(2) 优点是便于今后多通道测量和扩展，一台激光器可带三台干涉仪进行三个试样测量。

(3) 关键是可以进行空载测量，确定系统误差。

3.2. 双端测量布局形式

双端测量布局形式如图 3-3 所示。

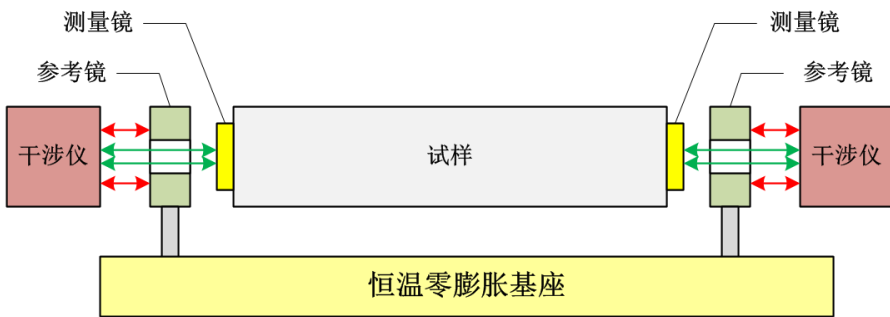


图 3-3 双端测量结构示意图（侧视图）

双端测量布局的特点：

(1) 光程差小，两端反射镜平行度要求不高，有利于保证测量精度。

(2) 多通道测量和扩展成本高，两台干涉仪只能测量一个试样。

4. 分系统设计

4.1. 真空系统

真空系统为大尺寸样件的热膨胀系统测量提供精确恒定的真空环境，避免激光干涉测量受到气体（气压）波动的影响。

4.1.1. 真空腔体及整体布局

真空腔体及整体布局如图 4-1 所示。

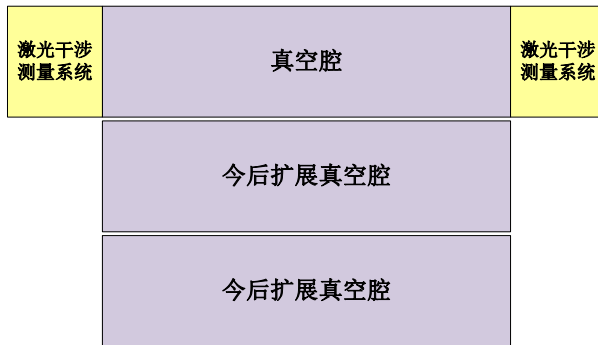


图 4-1 真空腔体布局示意图

真空腔体为矩形上开盖结构，因真空会使腔体变形不便做成大跨度的多试样整体结构，只能做到长矩形腔体并进行加固，减少腔体对测量影响。

今后扩展采用独立真空腔体形式，至少可在两个方向上扩展，甚至可能在三个方向上扩展。

设计中考虑了激光干涉测量系统光路扩展，留有扩展功能。

4.1.2. 光学窗口

光学窗口是实现真空条件下测量稳定性的关键，其功能是保证真空环境形成过程中对激光光路的影响最小。光学窗口的结构如图 4-2 所示。

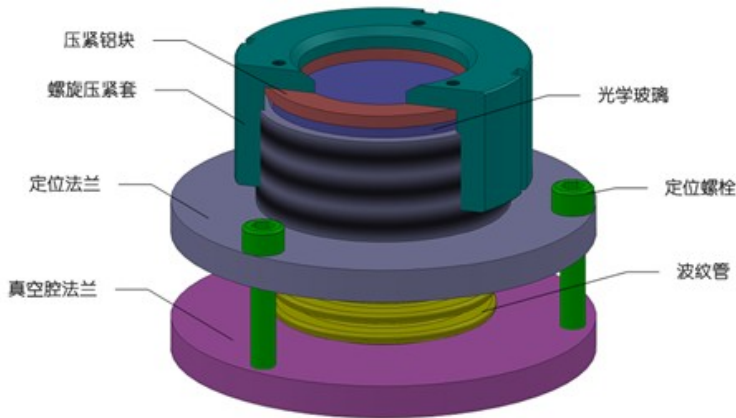


图 4-2 光学窗口结构示意图

光学窗口设计有以下两个特点：

- (1) 采用局部刚性密封避免石英片移动。
- (2) 采用弹性调节和固定方式，将光学窗口石英片水平面调节和固定在常用真空度恒定时的位置上，同时保证与激光光路垂直。

4.1.3. 真空度测量和控制系统

真空腔体内的真空度（气压）需要长时间的精确恒定控制，采用高精度薄膜电容规测量真空度，采用特制的控制器进行自动控制，真空度精确控制在 100Pa，波动率小于±1%，气氛为干燥氮气。

选择真空度为 100Pa 是为了既能消除气体折射率波动对激光干涉测量的影响，同时还能最大限度利用气体传热能力便于试件温度快速达到热平衡。

采用干式真空泵抽取真空，降低真空泵对光学器件的污染。真空度控制系统结构如图 4-3 所示。

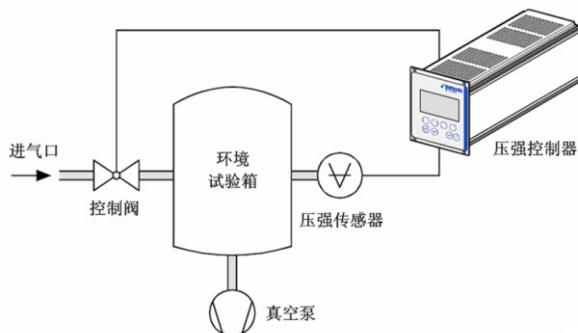


图 4-3 真空度控制系统结构示意图

4.2. 试验系统

试验系统整体放置在真空腔内，用于放置被测试件、加热试件、保证试件受热膨胀形成单方向变形并将试件热变形转换为光程变化。

4.2.1. 支撑平台机构

热膨胀系数测试中，被测试件无论通过什么形式都要与真空腔体底部发生连接关系，真空腔体温度变化及其不均匀性都会造成这些连接关系发生二维形变。支撑平台机构除了给试件与真空腔底部提供连接关系之外，其重要功能是为试件提供一个基准平台，此基准平台只在光学测量方向上产生一维

变形。支撑平台机构如图 4-4 所示。

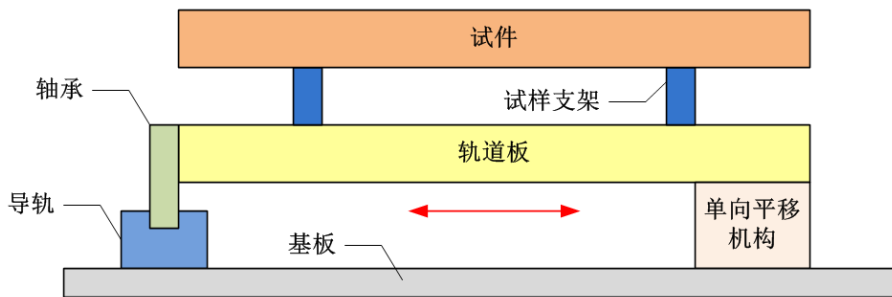


图 4-4 被测样件支撑结构示意图

试件变形测量的基准为导轨板，导轨板水平方向上的变形必然是二维形式。通过固定在真空腔底板和导轨板一端的单向平移机构保证导轨板一维变形，通过导轨板另一端的轴承导轨结构消除掉另一个水平方向上的位移，保证导轨板单向水平移动。

4.2.2. 试件支架结构

试件支架结构如图 4-5 所示。

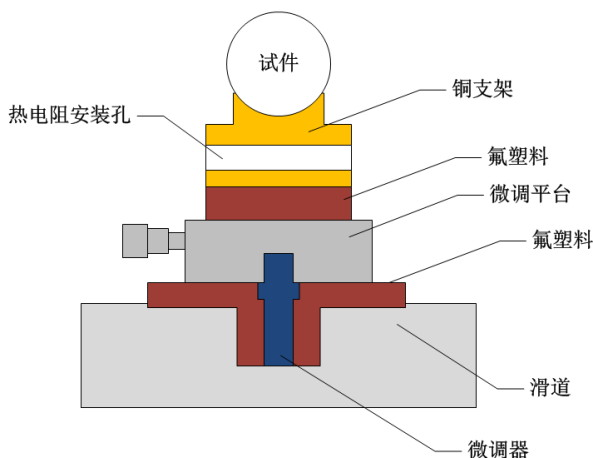


图 4-5 试件支撑结构示意图

为使试样尽量处于轴向自由移动状态，整个试样采用两个弧形支架支撑，尽可能减少试样与支架的接触面积。

支架采用铜材料，其中安装测温用热电阻测量试样温度。

采用氟塑料进行隔热，避免试样温度向下传递。

铜支架放置在可调节水平和高度的微调平台上，并能滑动以改变支点位置满足不同长度试件要求。

4.2.3. 试样绝对变形量传递装置

试样绝对变形量传递装置如图 4-6 所示

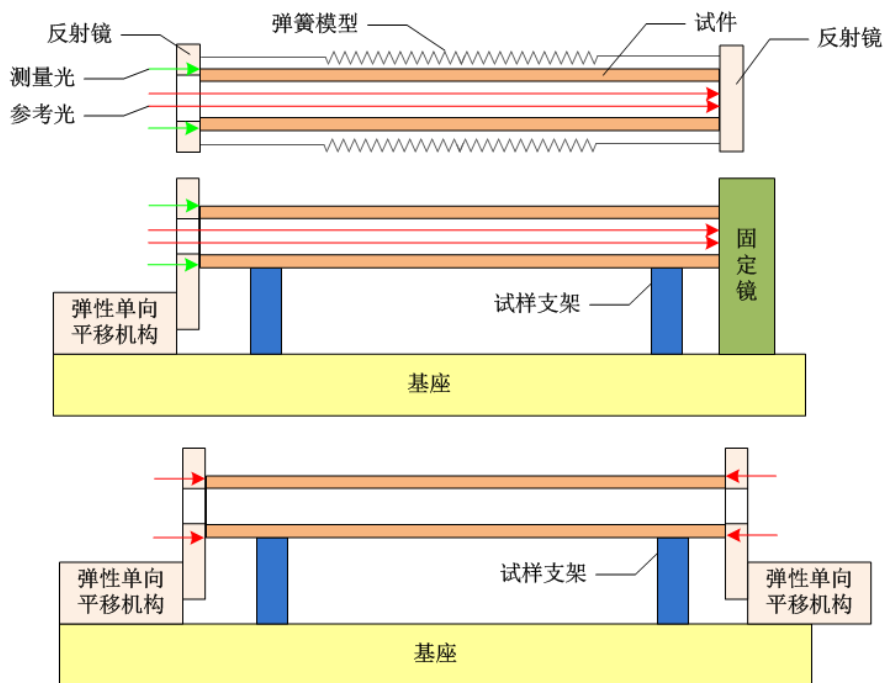


图 4-6 绝对变形量传递装置示意图

绝对变形量传递装置的核心是将两个平面反射镜设法固定在试件的两个端面上，试件长度方向上的受热变形会使得平面反射镜同步线性位移。

此设计方案并未采用简陋的胶粘方式将两个平面反射镜固定在试件两个端面上，这是因为胶粘后的两个平面反射镜并不能保证相互的平行度，会给激光干涉测量带来很大误差，甚至无法进行测量。

新型绝对变形量传递的基本原理是采用弹簧机构把贴附在试件两端面上的平面反射镜拉紧固定，并采用调整机构使得两个平面反射镜相互平行，从而保证两个平面反射镜随着试件尺寸变化进行单向移动，将试件变形转换成平面反射镜的单向位移。

单端测试时采用一个平移机构，另一端平面镜固定不动。双端测试时采用两个平移机构。

4.2.4. 试样加热装置

根据技术指标要求，在大尺寸试件上要保证温度测量精度达到 0.01°C 和均匀性达到 0.05°C ，采用普通电加热和油浴加热方式都很难实现，且实现所需时间非常漫长。试样加热装置如图 4-7 所示。

采用分段闭合筒式加热结构，便于安装和卸载试样，并满足不同长度试件的加热需要。

加热套外部采用半导体热电器件进行温度控制，

0.01℃超高精度温度控制，并通水冷却，最外部覆盖隔热材料。

加热桶壁上开小孔导入铂电阻温度传感器，并粘贴在试件上测试试件温度分布。

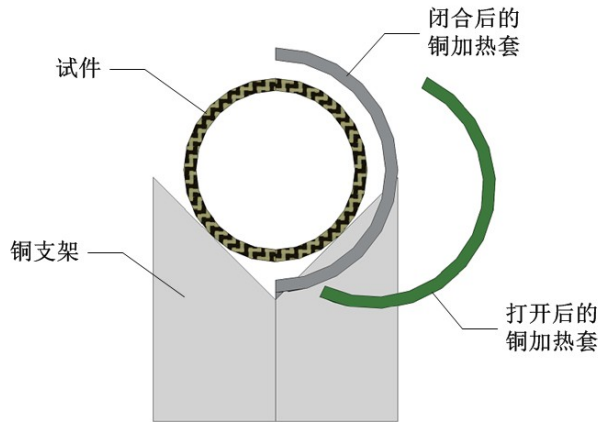


图 4-7 试件加热装置结构示意图

4.3. 测量系统

测量系统包括激光干涉仪测量装置、光路调整装置以及光学测量环境保障装置三部分。

4.3.1. 激光干涉仪测量装置

激光干涉仪测量装置是微位移测量的关键，在激光干涉仪选型中必须要满足以下三方面要求：

(1) 必须是外差式双频激光干涉仪，这样才能消除环境振动等因素对测量的影响，保证测试系统可以长时间连续运行而不受外界干扰，实现在普通实验室内的操作条件下进行微位移测量。

(2) 激光干涉仪温度偏移小，否则很难实现高精度的微位移测量。

(3) 外差式双频激光干涉仪抗偏移性能优良，就算测量光和参考光发射一定偏离造成干涉信号强度下降 30%以上，照样可以进行测量。

4.3.2. 光路调整装置

在放入试件且抽真空后，整个光路将不能进行调整，再需调整还要充气并打开真空腔。

为了便于真空环境下的光路进一步精细调整，在真空腔内的相应位置上增加压电陶瓷驱动的微位移调节装置，从而保证起始温度下具有稳定的起始位置。

4.3.3. 激光干涉仪测量装置的密封和恒温

密封和恒温装置如图 4-8 所示。

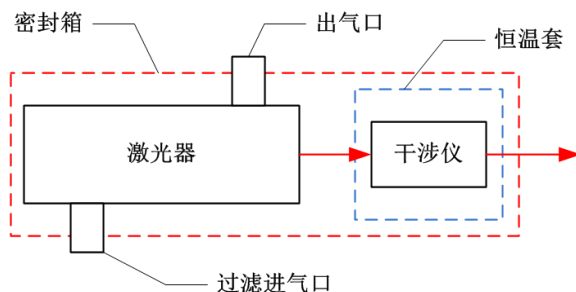


图 4-8 光学系统密封和恒温结构示意图

采用半导体热电控温装置对干涉仪恒温套进行

恒温控制和测量，始终使干涉仪处于恒温状态避免收到环境温度的影响，减小激光干涉仪温度漂移。

激光器和干涉仪全部放置在密封箱内，通过专门进出气口对激光器通风冷却。

5. 结论

太空望远镜复合材料桁架管件超低热膨胀系数测试系统技术方案借鉴了国内外的成功经验，整个测试系统的硬件设计充分考虑了各个测量不确定度分量对应的工程内容，提出了切实可行的解决方案。

整个测试系统设计考虑了测量的准确性、可靠性、操作便利性和可扩展性，整个实施方案的技术成熟度较高、工程实现性强。