

## 基于数字干涉仪的平行光管分划板安装方法

曹智睿, 吴国栋

(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:** 为了提高平行光管分划板的安装精度, 提出一种基于数字干涉仪的平行光管分划板安装方法, 介绍了该安装方法的原理和实施过程。以口径800 mm, 焦距20 m的平行光管为例, 分析并计算了该安装方法和已有安装方法的安装精度。结果表明, 该方法对任意分划板的安装精度优于0.07 mm, 远高于已有安装方法的安装精度。

**关键词:** 平行光管; 分划板安装; 数字干涉仪

中图分类号: TH744.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-03-0004-04

## Installation Method of Collimator Reticle Based on Digital Interferometer

CAO Zhi-rui, WU Guo-dong

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

**Abstract:** In order to improve installation accuracy of collimator reticle, an installation method based on digital interferometer is proposed. Principles and implementation processes of the method are introduced. Installation accuracy of this and existed methods are analyzed and calculated based on a collimator with 800 mm aperture and 20 m focal length. The results show that installation accuracy of this method for any reticle is better than 0.07 mm, which is much higher than that of existed methods.

**Key words:** collimator; reticle installation; digital interferometer

平行光管是光学实验室最常用的设备之一, 可以产生平行光束, 模拟无穷远的观测目标。通过在平行光管的焦面位置精确安装不同的分划板, 平行光管可用于光学系统的像质检测、光学参数测量和无穷远焦面位置的精确标定等工作, 平行光管分划板的安装精度直接影响到光学系统的检测精度和标定精度。

安装平行光管分划板的已有方法主要是自准直法和五棱镜法。这两种方法存在共同缺点: (1) 由自准直法和五棱镜法的实施细节和实际工作经验可知, 这两种安装方法所适用的分划板类型是极其有限的, 其适用对象主要为十字丝或波罗板等易于对准的目标, 当所安装的分划板是其他类型不易对准

的目标时, 安装精度降低甚至无法直接安装, 此时需要通过十字丝或波罗板确定平行光管的焦面位置, 再将要安装的分划板复位至该焦面位置, 而这一复位过程操作复杂并且容易引入较大的误差; (2) 这两种方法均以目视观察为准, 其极限安装精度受到人眼对准误差、平行光管焦距、平行光管口径、系统视放大率等诸多因素的限制, 而实际安装精度则容易受到操作人员主观因素的影响, 安装效果不稳定。由于这些缺点的存在, 通过自准直法和五棱镜法安装的分划板安装精度较低, 因此通常要求平行光管的焦距为被测光学系统焦距的3~5倍, 其中一个主要的目的就是为降低分划板安装误差带来的影响。

## 1 安装原理及实施过程

平行光管在使用之前需要对其波像差进行测试

试,确认成像质量合格后,再标定出平行光管的焦面位置并在该位置安装所需的分划板,分划板安装的具体流程如图1所示。

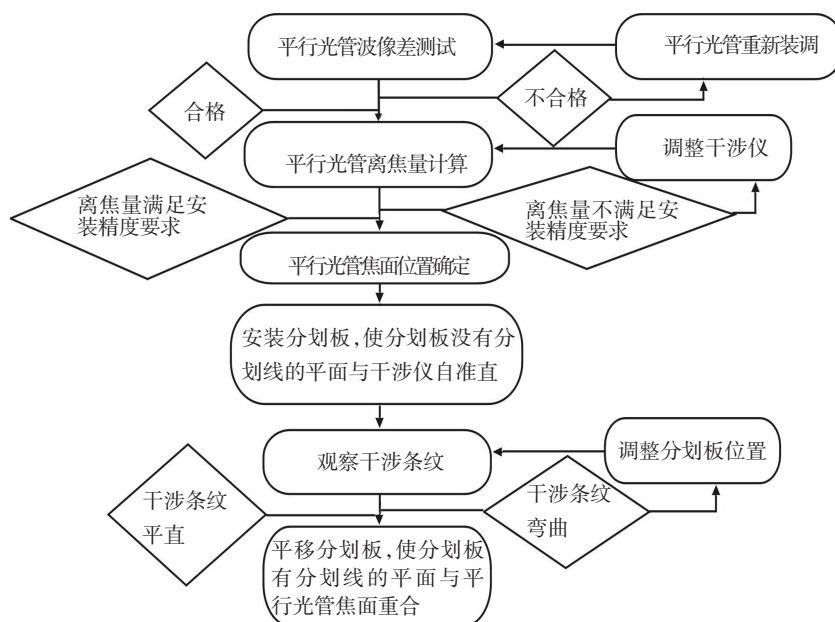
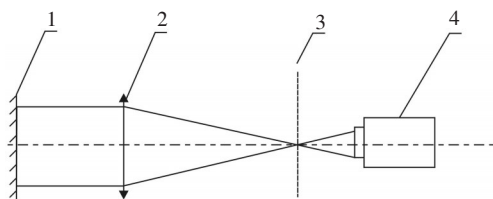


图1 分划板安装流程图

### 1.1 平行光管焦面位置标定

平行光管波像差测试光路如图2所示,在平行光管波像差的测试过程中,应尽量调整数字干涉仪,使平行光管离焦量为零,此时数字干涉仪标准球面镜的球心刚好位于平行光管的焦面位置,这个调整过程就是平行光管焦面位置的标定过程。



1—标准平面镜 2—平行光管物镜  
3—平行光管焦面 4—数字干涉仪

图2 平行光管波像差测试光路

平行光管离焦量的大小可以通过系统波像差的Zenike拟合结果判断。在平行光管波像差的测试过程中,系统波像差的Zenike拟合结果中包含了系统固有像差和干涉仪调整所引入的“像差”。干涉仪调整所引入的“像差”包括波像差 $X$ 方向倾斜量、波像差 $Y$ 方向倾斜量和波像差 $Z$ 方向离焦量分量,其中波像

差 $Z$ 方向离焦量分量 $w_p$ 对应于Zenike拟合多项式的第四项系数。由波像差和几何像差的关系推算,因干涉仪调整而引入的平行光管离焦量 $\delta$ 与波像差 $Z$ 方向离焦量分量 $w_p$ 的对应关系如下

$$\delta = 8w_p F^2 \quad (1)$$

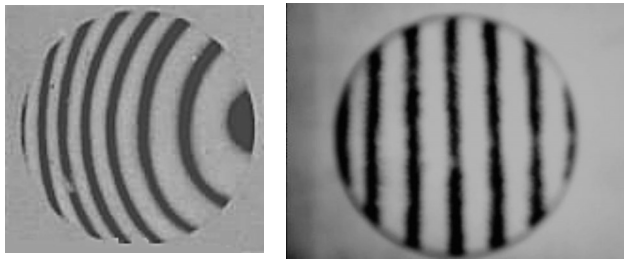
式中, $F$ 为平行光管相对孔径的倒数。

在平行光管的焦面标定工作中,通常不需要调整离焦量 $\delta$ 绝对为零,而只要求 $\delta$ 小于某一阈值即可,此时 $\delta$ 即为平行光管焦面位置的标定误差。该标定误差应与安装过程中可能引入的其他误差综合考虑,使该标定误差能够满足分划板安装精度的指标要求。

### 1.2 平行光管分划板的安装

在平行光管的焦面位置确定之后,将分划板插入到自准直测试光路中,调整分划板没有分划线的平面(下文称分划板背面)与干涉仪形成自准直干涉光路,并产生干涉条纹。当分划板背面与平行光管的焦面平行但具有一定的离焦量时,干涉条纹弯曲,如图3a所示;当分划板正面与平行光管的焦面重合时,干涉条纹笔直,如图3b所示。

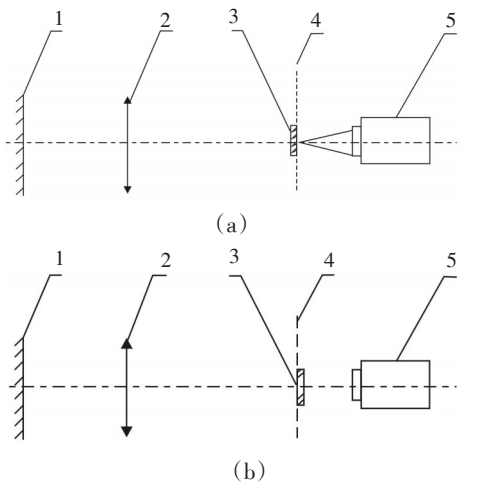
观察干涉条纹,调整分划板没有分划线的平面



(a) 离焦状态下的干涉条纹 (b) 无离焦状态下的干涉条纹

图3 离焦状态下与无离焦状态下的干涉条纹

与平行光管的焦面重合,此时的干涉光路如图4a所示。若已知分划板的厚度为 $d$ ,则利用焦面调整机构将分划板沿光轴向右移动距离 $d$ ,此时分划板的安装完成,如图4b所示。



1—标准平面镜 2—平行光管物镜 3—分划板  
4—平行光管焦面 5—数字干涉仪

图4 分划板安装过程光路图

## 2 安装精度的分析与计算

文中以口径为800 mm,焦距为20 m的平行光管为例,分析并计算各安装方法的安装精度。

### 2.1 新方法安装精度分析与计算

由新方法的安装原理及实施过程可知,基于数字干涉仪的平行光管分划板安装方法,其主要误差来源如图5所示。

由式(1)可知,平行光管焦面标定误差可以通过系统波像差 $Z$ 方向离焦量分量 $w_p$ 来计算。理论上,波像差 $Z$ 方向离焦量分量 $w_p$ 是由数字干涉仪的调整产生,同样也可以通过数字干涉仪的调整而完全

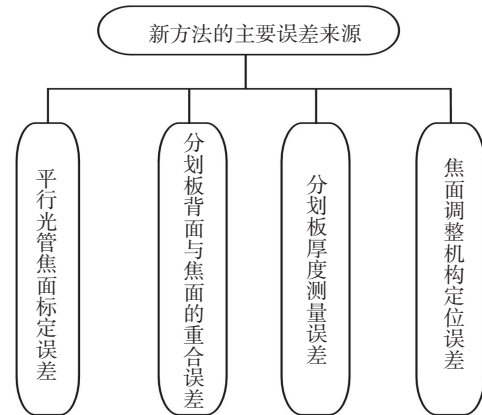


图5 新方法的主要误差来源

消除。但是在实际工作中,受实验室条件的限制,波像差 $Z$ 方向离焦量分量 $w_p$ 只能控制在一个极小的范围内,而无法完全消除。在真空、常温、隔振的条件下,采用精密的调整工装,实验人员可以较容易地将20 m平行光管的波像差 $Z$ 方向离焦量分量 $w_p$ 控制在 $\pm 0.01\lambda$ 之内,即20 m平行光管的焦面标定精度优于 $\pm 0.05$  mm。

通过观察干涉条纹的形状来判断分划板背面是否与平行光管的焦面重合,这个过程可能引入微小的误差。不同实验人员的多次实验表明,分划板沿离焦方向平移 $\pm 0.005$  mm时,干涉条纹的形状变化明显。因此分划板背面与平行光管焦面的重合误差可以控制在 $\pm 0.005$  mm之内。

分划板的厚度利用千分尺进行测量,千分尺的测量精度高达0.001 mm,分划板厚度的测量误差主要由分划板厚度的不均匀性造成。

平行光管的焦面调整机构可以确保分划板沿平行光管光轴平移,高精度的调整机构平移精度可以达到 $\pm 0.001$  mm,普通调整机构的平移精度也可以控制在 $\pm 0.005$  mm之内。

通过上述分析计算,基于数字干涉仪的平行光管分划板安装方法的安装精度可优于 $\pm 0.07$  mm。

### 2.2 已有方法安装精度分析与计算

分析自准直法和五棱镜法对任意分划板的实际安装精度是很复杂的,其中存在太多不确定的因素,因此只以可直接安装的分划板为例,分析这两种安装方法的极限安装精度。

依据光学测量的相关知识,采用自准直法以消视差安装分划板时,其极限安装精度为

$$\Delta = \frac{0.29\sigma}{\Gamma\left(D - \frac{\Gamma D_e}{2}\right)} \times f^2 \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  为人眼的对准误差;  $\Gamma$  为平行光管与高斯目镜组成的直望远镜的视放大率;  $D$  为平行光管的通光口径;  $D_e$  为眼瞳直径;  $f$  为平行光管焦距。计算时, 取  $\sigma = 0.5'$ ,  $D = 800$  mm,  $D_e = 2$  mm,  $f = 20\ 000$  mm。由于实验室常用的高斯目镜焦距为 44 mm, 取  $\Gamma = 454.55$ , 此时  $\Delta = 0.37$  mm。

采用五棱镜法安装分划板时, 其极限安装精度为

$$\Delta = \frac{0.29\sigma}{\Gamma(D - D_w)} \times f^2 \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  为人眼的对准误差;  $\Gamma$  为接收五棱镜出射光束的前置镜(望远系统)的视放大率;  $D$  为平行光管的通光孔径;  $D_w$  为五棱镜通光孔径;  $f$  为平行光管焦距。计算时, 取  $\sigma = 0.5'$ ,  $D = 800$  mm,  $f = 20\ 000$  mm。由于实验室常用的五棱镜通光孔径均大于 25 mm, 此处取  $D_w = 25$  mm, 实验室常用的前置镜(望远系统)视放大率有限, 通常均不超过几十倍, 此处取  $\Gamma = 100$ , 计算得  $\Delta = 0.75$  mm。若选取的五棱镜通光孔径大于 25 mm, 前置镜(望远系统)视放大率小于 100 倍, 则  $\Delta$  取值更大, 即极限安装精度更低。

在实际工作中, 自准直法和五棱镜法对任意分划板的安装精度远小于上述极限安装精度。

### 3 实践工作

标定精度要求达到  $\pm 0.025$  mm。标定工作选用口径为 800 mm, 焦距为 20 m 的平行光管, 在平行光管的像质得到确认后, 需要安装该平行光管的分划板。

安装工作具体实施步骤如下:

(1) 确定分划板安装精度: 平行光管分划板的安装精度应优于  $\pm 0.27$  mm。

(2) 选择安装方法: 由上文的分析计算已知, 自准直法和五棱镜法均无法满足口径为 800 mm, 焦距为 20 m 的平行光管的分划板安装精度要求, 因此分

划板的安装工作采用基于数字干涉仪的平行光管分划板安装方法。

(3) 设置实验室环境。

(4) 选择安装设备: 安装所需的主要设备包括 4D 动态干涉仪、干涉仪调整工装、分划板(厚度不均匀性  $\pm 0.01$  mm)、平行光管焦面调整机构(定位精度  $\pm 0.005$  mm)。

(5) 确定平行光管焦面定位精度: 由上文的精度分析可知, 要实现  $\pm 0.27$  mm 的最终安装精度, 平行光管焦面定位精度应优于  $\pm 0.25$  mm, 此时波像差  $Z$  方向离焦量分量  $w_p$  应控制在  $\pm 0.4\lambda$  之内。

(6) 按分划板安装流程图完成分划板安装。

## 4 结 论

基于数字干涉仪的平行光管分划板安装方法是一种新型的高效率高精度的分划板安装方法, 该方法可以对任意分划板直接安装, 且安装效果稳定。以口径为 800 mm, 焦距为 20 m 的平行光管为例, 该方法对任意分划板的安装精度优于 0.07 mm, 远高于自准直法和五棱镜法的安装精度。应用该方法安装平行光管的分划板, 既增加了光学系统的检测和标定精度, 同时也降低了平行光管的焦距和被测光学系统焦距之间的倍率要求。

### 参考文献

- [1] 李响, 张晓辉. 大口径平行光管实时检焦系统[J]. 光电工程, 2012(7):55-60.
- [2] 刘秀梅. 利用干涉仪检测调整非球面物镜的光路[J]. 红外, 2010.
- [3] 马世帮, 杨红, 杨照金, 等. 基于 Zernike 多项式的大口径离轴抛物面平行光管定焦技术[J]. 光学技术, 2012, 39(6):317-321.
- [4] 杨志文. 光学测量[M]. 北京: 北京大学出版社.
- [5] 何煦, 吴国栋. 大口径、长焦距平行光管装调技术研究[J]. 光学技术, 2009, 35(5):781-785.
- [6] 莫卫东. Zernike 多项式拟合干涉波面方法研究[J]. 高速摄影与光子学, 1991, 20(4):389-396.