超大口径凹非球面反射镜的动态干涉测量技术

张 伟，王 婴，王 玲

（哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心，哈尔滨 150080，wangzhaoq@163.com）

摘 要：为了克服超长光路造成的振动和大气扰动的影响，采用动态干涉测量结合补偿法进行超大口径凹非球面的精密检测. 通过分析超大口径凹非球面反射镜检测的难点，采用动态干涉仪克服检测中振动和大气扰动，并利用 Zemax 光学设计软件，以口径 3.5 m 的凹非球面反射镜为例设计了干涉补偿光路. 误差分析结果表明，采用动态干涉仪和补偿法进行超大口径凹非球面反射镜面形检测，不仅可以克服振动和大气扰动的影响，还能达到 $\lambda/90$ 以上的检测精度.

关键词：超大口径凹非球面反射镜；超长光路；振动；大气扰动；动态干涉仪

中图分类号：TH706 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)07－1042－04

Dynamic interference testing technology of extra-large concave aspheric mirrors

ZHANG Wei, WANG Zhao, WANG Ling

(Space Optical Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, wangzhaoq@163.com)

Abstract: To deal with the vibration and turbulence due to the long optical paths in extra-large concave aspheric mirrors testing, the dynamic interferometer associated with compensators is advanced. The difficulties in large concave aspheric mirrors testing are studied in this paper. Dynamic interferometer is employed to deal with vibration and air turbulence. Using the optical design software Zemax, compensators with 3.5 m aperture are designed as an example for concave aspheric mirror testing. Tolerance analysis indicates that the precision of this testing method is better than $\lambda/90$.

Key words: extra-large concave aspheric mirror; long optical path; vibration; air turbulence; dynamic interferometer

近年来，由于地基、天基天文学系统的发展，大口径乃至超大口径的光学系统得到越来越广泛的应用，大口径光学系统的检测技术也相应得到迅猛发展. 由于大口径光学元件及系统检测具有长光路乃至超长光路（如 10 m 以上的检测光路）的特点，检测过程中出现的环境振动和大气扰动无法有效隔绝，导致传统的干涉检测不能顺利进行，严重限制了大口径、超大口径光学元件及系统的检测和制造的发展. 主镜的检测和制造，各个国家的发展水平参差不齐. 先进国家的主流望远镜的主镜直径很多在 8 m 以上，比较著名的如美国口径 10 m 的 Keck 望远镜、欧洲南方天文台 8 m 口径的 VLT（Very Large Telescope）等[1]. 相应的大口径光学系统检测也达到了相当高的水准，以美国为例，MMT（Multiple Mirror Telescope）[2] 主镜口径 6.5 m，RMS 测量精度已达 0.03 λ. 即将发射的 JWST（James Webb Space Telescope）[3]，主镜为拼接式凹非球面，口径 6.5 m，面形误差 RMS 值可达 $\lambda/40$ 以内，这也代表着美国目前的加工测量水平.

我国大口径光学系统和元件的制造和检测均处于起步阶段，主镜口径 2.16 m[4] 在检测方法上使用定性检测与定量测量结合的方法，定量测量仍然使用古典的哈特曼屏和剪切干涉仪等测量精度较低的检测方法. 本文在分析了超大口径非球面反射镜的检测特点及难点后，采用动态干涉与

收稿日期：2009－04－03.
作者简介：张 伟（1962—），男，教授，博士生导师.

补偿法结合的方法进行面形检测，并以 3.5 m 口径的凹非球面反射镜为例，设计了检测方案，进行误差分析.

1　传统干涉测量技术难点

传统干涉测量法具有技术成熟、检测精度高的特点，是高精度非球面检测的主流方法[5]. 然而该方法极易受到机械振动和大气扰动的干扰，环境要求极高. 小口径、短光路的测量系统可通过隔振塔、真空容器罐等措施将振动和大气扰动隔离，从而做到精确测量，但对于口径几米、测量光路几十米的应用，隔振塔、真空罐代价昂贵，甚至完全不可能实现.

为了解决大口径、长光路干涉测量法中振动和大气扰动的影响，测量工作者们想过很多方法，除提高测量环境质量外，还曾尝试采用新的算法、使用平均法剔除振动等等，但均未能从振动和大气扰动的干扰机理上解决问题，效果都不理想.

针对大口径、长光路光学系统测量中的振动和大气扰动难点，本文引入“动态干涉”的概念[6]，利用美国 4D 技术公司研发的一种新型动态干涉仪，结合补偿干涉法进行大口径凹非球面反射镜的检测，这种方式能从机理上消除振动的影响，且通过信号平均的方法，能剔除大气扰动的作用.

2　动态干涉测量技术

2.1　振动对干涉测量的干扰方式

传统的干涉仪采用时间相干的方法，在待测光束和参考光束之间引入相移，然后按时间序列将不同相位条件下的多幅干涉图记录下来，经处理得到最终的测量结果.

大部分商用的干涉仪都与一个工作在 30 帧/s，曝光时间约 30 ms 的摄像机相连，在这种速度下，典型的 5 帧运算需要至少 167 ms 来获取整列数据. 而环境振动的频率在 20 ~ 200 Hz 之间[7]（5 ~ 50 ms），可见，典型的机械振动速度并不比干涉仪曝光速度慢，振动很容易将非线性相移误差和标定误差引入到测量结果中. 不仅如此，在167 ms的数据获取时间内，干涉条纹自身也可能会有很大变化.

2.2　大气扰动对干涉测量的干扰方式

大口径凹非球面反射镜的检测光路一般都很长，很多情况下可达 10 m 以上，这么长的光路决定了检测过程不可避免的受到大气扰动的影响. 事实上，若采样过程曝光时间 $t \leqslant \tau$（τ 为大气相干时间），则图样中除了含有望远镜系统的像差以外，还包含了大气对像质的影响. 反之，若 $t \geqslant \tau$，则由于大气的时间平均效应，图样中的细节被平滑掉，于是图样变得模糊甚至不可分辨，有时根本无法采样，所以有效地分离大气的影响是干涉法需要克服的问题.

从上述分析可知，造成传统干涉仪易受振动和大气扰动的影响的根本原因在于传统干涉仪采用时间相移的方式，长曝光时间和帧获取时间的特点让振动和大气扰动有充分的时间干扰测量结果.

2.3　动态干涉仪工作机理

动态干涉测量技术的原理如图 1 所示，整个工作过程分为三大功能模块：极化干涉仪、相位掩膜块和 CCD 传感器. 其中：相位掩膜块是动态干涉测量技术的核心功能元件，如图 2 所示. 它由多个相位步进单元格重复排列构成，每个单元格包含四片微型起偏器，起偏器能让通过的光束分别发生 0°、90°、180° 和 270° 的相移. 相位掩膜块与 CCD 传感器相连，模块上每个单元格对应 4 个 CCD 像素点，将 4 种不同的相移通过不同的像素点记录下来.

工作过程为：极化干涉仪产生 R（参考光）和 T（测量光）两束正交偏正光，通过相位掩膜块后，在起偏器的作用下分别引入不同的相位延迟，在同一采样瞬间产生不同相移条件下的 4 种干涉图，被 CCD 传感器记录下来.

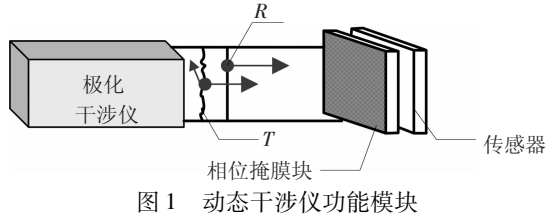


图 1　动态干涉仪功能模块

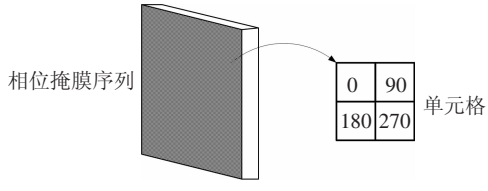


图 2　动态干涉仪像素化的相位掩模块

这种方式不需要通过时间序列引入相移，合成最后的干涉图的 4 幅不同相移干涉图都是在同一瞬间采样完成，所需时间取决于采样相机的曝光时间，典型的动态干涉仪曝光时间仅 30 μs，远比振动的频率高得多，故干涉不再受振动的影响.

2.4 信号平均法剔除大气扰动

动态干涉仪的曝光时间在微秒量级,在这种情况下采集到的每幅干涉图中都含有大气扰动. 大气扰动是随机性扰动,它对像质的影响也是随机的,有正有负. 按照统计学原理,只要采集多组数据进行平均,便可大幅度降低大气扰动的影响.

$$\varepsilon_{\mathrm{Turb}} \approx \frac{\mathrm{RMS}_{\mathrm{Turb}}}{\sqrt{N}}.$$

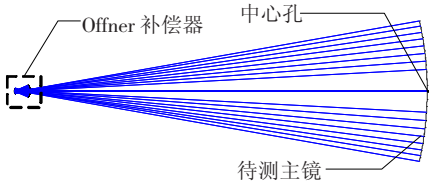
式中:$\varepsilon_{\mathrm{Turb}}$ 为平均结果中由于大气扰动产生的 RMS 误差,$\mathrm{RMS}_{\mathrm{Turb}}$ 为每次测量中大气扰动产生的 RMS 误差,N 为测量次数.

可见,对大气扰动的遏制情况取决于采用了多少组数据进行平均. 事实上,典型的 PhaseCam 动态干涉仪帧获取率≥25 帧/s,即使使用几百帧的数据来进行平均,最多也只需要几分钟的时间.

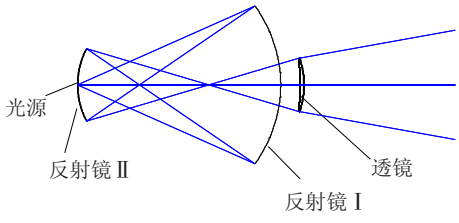
3 动态干涉测量技术误差分析

3.1 动态干涉测量技术光路设计

在动态干涉仪的技术支撑下,振动和大气扰动不再是困扰大口径非球面检测的关键问题,也不再需要庞大而昂贵的隔振、真空措施. 本文在此基础上,以口径 3.5 m,中心孔口径 0.98 m,非球面系数 -0.975 05 的大口径主镜为例,利用 ZEMAX 软件设计了补偿器,并进行了相关的公差分析. 图 3 为主镜检测的设计光路,光路中最后一片反射镜即为待测大口径凹面反射镜. 该方案采用 Offner 反射式补偿器,具体参数如表 1 所示.



(a) 反射式补偿器设计光路



(b) 细节图

图 3 主镜检测反射式补偿器设计光路及细节图

检测时,动态干涉仪放置在系统的光源处,发出的光经补偿器入射到主镜上,经主镜反射后原路返回到光源,与干涉仪中的参考光发生干涉,产生干涉条纹. 由于设计中采用 Offner 反射式补偿器,中心部分存在挡光现象,但待测主镜中心部分有孔,通过合理的设计,可让补偿器的中心挡光暗淡处口径小于主镜中心孔的大小.

表 1 补偿器具体参数

表面	曲率半径 R/ mm	间隔厚度 d/ mm	半口径 r/ mm	非球面系数	材料
反射镜 Ⅰ	-263.7	-3 331.0	143.1	-0.201 977	Mirror
反射镜 Ⅱ	162.1	361.6	66.7	1.432	Mirror
透镜 -Ⅰ 面	-914.3	6.9	48.7	0	BK7
透镜 -Ⅱ 面	-168.3	8 782.7	48.9	0	-
待测主镜	-8 870.4	-8 782.7	1 750.0	-0.970 505	Mirror

由表 1 中数据可知,补偿器每个元件的尺寸都控制在国内技术可加工的范围内,最大的反射镜口径也仅 286.2 mm,辅助元器件容易实现. 测量光路长达 10 m,如果采用普通的干涉测量方法,这么长的测量光路,几乎无法实现对振动和大气扰动的环境控制. 因此动态干涉仪在其中起到非常关键的作用.

图 4 是该补偿光路的波前图,系统波像差的 P - V 值为 0.004 8λ,RMS 波像差 0.001 5λ,系统性能良好.

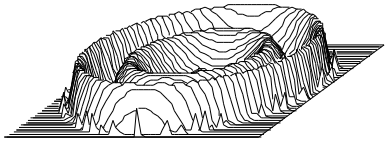


图 4 反射式补偿器设计系统波前图

3.2 误差分析

补偿器设计好后,并不能说明检测系统就是一个可用系统,因为补偿器光学零件的制造及其装配,以及补偿器相对于光源和被检面(或其它元件)的定位,干涉仪和被检镜自身的定位等必然会引进各种误差源.

补偿器的误差主要有:光学系统设计公差、光学元件材料及加工公差、光学系统装调公差和不可预计误差(偶然误差).

1)光学系统设计公差. 从图 4 可知,光学系统的设计公差 $\delta_1 = 0.004\ 8\lambda$.

2)光学元件材料和加工公差.

现有的光学反射镜和透镜的材料及加工误差包括曲率半径,0.01%;透镜厚度,1 ~ 10 μm;面倾斜,1″;面偏心,1 μm;圆锥系数误差,0.01%.

利用 ZEMAX 公差分析功能,对上述参数在误差范围内进行 20 次 Monte Carlo 分析,将得到的波像差结果进行均方根运算,得到由光学元件材料和加工误差引起的系统公差为

$$\delta_2 \approx 0.003\,2\lambda.$$

3）光学系统装配公差.

光学系统装配误差包括：空气间隔测量误差，20 μm；元件倾斜，1″；元件偏心，0.01 mm. 同样利用 Zemax 进行公差分析可得，由装配引起的误差为

$$\delta_3 \approx 0.0015\lambda.$$

4）环境变化产生的误差.

大气干扰每次产生的误差达 0.2 ~ 2.0 条纹，设每次测量的 RMS 误差为 0.1λ，进行 1 600 次测量，则根据 $\varepsilon_{\mathrm{Turb}} \approx \dfrac{\mathrm{RMS}_{\mathrm{Turb}}}{\sqrt{N}}$ 可得，由大气产生的误差为

$$\delta_4 = 0.002\,5\lambda.$$

该误差的大小可以通过增加测量次数来收紧.

使用动态干涉仪测量不受振动干扰，故振动项可不予计算.

5）不可预计误差（偶然误差）.

反射镜、透镜表面面形误差：以现有的加工水平面形误差可达 λ/100[8].

透镜材料不均匀误差：补偿器透镜的材料经过精细选样，透镜材料的不均性误差可达到 $0.1\times10^{-6}\sim0.2\times10^{-6}$，补偿器透镜总厚度为 7.9 mm，故所产生的波差为

$$\delta_t = t\cdot\Delta n = 7.9\times10^{-7}\lambda.$$

该项可以忽略.

干涉仪引入的误差[9]：动态干涉仪 RMS 可重复性 0.002λ.

不可预计误差为上述各项的均方根值为

$$\delta_5 \approx 0.01\lambda.$$

补偿器总误差为

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2+\delta_2^2+\delta_3^2+\delta_4^2+\delta_5^2} \approx 0.011\,08\lambda \leqslant \lambda/90.$$

可见，采用该补偿器进行主镜面形检测，测量精度能达到 λ/90. 该精度并非测量极限，可通过优化系统结构降低系统误差，增加测量次数减小环境扰动误差等措施来降低误差，提高测量精度.

4　结　论

1）干涉测量法是光学度量中精确而有效的测量方法，但大口径、超大口径的非球面反射镜因口径太大、检测光路太长，隔振、真空措施难以实施，故一直以来国内的大口径、超大口径非球面加工和检测停留在较低的水平.

2）本文基于动态干涉技术，结合 Offner 补偿法，以 3.5 m 口径的凹非球面反射镜检测为例，利用 Zemax 软件设计了检测方案，并进行了误差分析. 分析结果表明，采用动态干涉技术进行大口径非球面检测，能有效克服振动和大气扰动等环境因素的影响，且理论检测精度能达到 λ/90.

参考文献：

[1] 晋江科技馆. 现代大型光学望远镜[EB/OL]. [2005 - 03 - 19]. http://www.stm.gov.cn.

[2] MARTIN H M, ALLEN R G, ANGEL J R P, *et al.* Fabrication and measured quality of the MMT primary mirror[J]. SPIE, 1998(3352): 184 - 204.

[3] KESKI-KUHA R A, SAIF B, EEGHOLM B, *et al.* Development of interferometry for testing the JWST optical telescope element[J]. SPIE, 2008(7010): 70100R(1 - 9).

[4] 林京，刘忠，金振宇. 天文高分辨像复原技术检测地基天文光学望远镜成像质量[J]. 天文研究与技术 - 国家天文台台刊, 2004, 1(3):189 - 194.

[5] 郭培基，余景池，孙侠菲. 一种大数值孔径非球面检测用补偿器设计[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 519 - 521.

[6] BROCK N, HAYES J, KIMBROUGH B, *et al.* Dynamic interferometry [J]. SPIE, 2005(5875):1 - 9.

[7] MARTINEK S. Overcoming the fringe jitters[EB/OL]. [2003 - 02 - 01]. http://www.4DTechnology.com.

[8] 张忠玉，余景池. 用补偿器测量非球面的研究[J]. 光学精密工程, 1992, 7(1):621 - 821.

[9] 4D Technology Corporation. High performance dynamic Twyman Green interferometer PhaseCam 5030[EB/OL]. [2008 - 06 - 08]. http://www.4DTechnology.com.

（编辑　张　红）