

文章编号: 0258-7025(2010)03-0795-05

大型光学系统径向哈特曼像质检测方法

汤国茂¹ 何玉梅^{1,2} 廖 周¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 介绍了一种新的基于径向波前斜率的哈特曼检测方法及原理, 并重点介绍了采用该方法和技术研制的 800 mm 口径的径向哈特曼像质检测实验系统的组成及结构, 以及利用该系统对 700 mm 光学系统像质检测的实验结果。研究表明, 在没有昂贵的大口径标准平面镜的情况下, 用该方法在室内可实现大型望远镜系统的像质检测。

关键词 测量; 光学检测; 波前传感器; 哈特曼检测; 大型望远镜

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0795

Radial Hartmann Method for Measuring Large Optical System

Tang Guomao¹ He Yumei^{1,2} Liao Zhou¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new Hartmann test method and principle based measurement of radial wavefront slope are presented, and structure of an 800 mm aperture Hartmann test system based on this method is built. Test on a 700 mm aperture telescope using this system is performed, and the testing results show that it can be used to test the optical quality of large telescope and aspheric mirror indoor without using large flat mirror.

Key words measurement; optical testing; wavefront sensor; Hartmann test; large telescope

1 引言

随着科学技术的发展, 光学系统的口径越来越大, 比如光学望远镜口径由 2~4 米级逐渐发展到 8~10 米级, 甚至更大, 对光学系统的质量要求也愈来愈高, 因此大口径光学系统的像质检测极富挑战性。

目前大口径光学系统像质检测的主要方法为采用标准平面镜的自准直检测方法, 该方法需要利用标准平面镜的自准直光进行检测。该方法具有灵敏度高、测量结果可靠等特点, 若采用干涉仪和哈特曼波前传感器可达到很高的测量精度。但大口径标准平面镜制造难度大, 制造周期长, 其自身的检测也很困难, 制造成本甚至比相同口径的望远镜系统都高, 目前世界上超过 1 m 的标准平面镜很少, 因而是大口径光学系统像质检测的难点。在没有大口径标准平面镜的情况下, 检测望远镜系统光学质量一般采用哈特曼波前传感器, 并将望远镜对准恒星进行测

量^[1], 通过多次平均以消除大气湍流对测量精度的影响, 该方法可得到定量检测结果, 但受天气条件限制。

本文介绍了一种新的基于径向波前斜率的哈特曼检测方法及原理^[2~6], 在没有昂贵的大口径标准平面镜的情况下, 用该方法在室内可实现大型光学系统的像质检测。介绍了采用该方法建立的 800 mm 口径的径向哈特曼像质检测实验系统的组成及结构, 并利用该系统对 700 mm 光学系统进行像质检测的实验分析。

2 方法原理

径向哈特曼检测方法的工作原理如图 1 所示, 由激光器输出的光束经一物镜准直成小口径平行光束后入射到双五角棱镜组, 经中心五角棱镜 PT1 使光束偏折 90°, 再经扫描五角棱镜 PT2 折转 90°后出

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-09

作者简介: 汤国茂(1962—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事自适应光学、光学设计、光学检测方面的研究。

E-mail: gmtang@ioe.ac.cn(中国光学学会会员号: S040420105S)

射到被检测光学系统,2个五角棱镜的主截面彼此平行,通过改变2个五角棱镜之间的距离并旋转五角棱镜组实现在被检测口径的不同位置出射小口径平行光束,即对被检测口径进行采样,每个采样位置确定一个子孔径,并在被检测光学系统焦面上产生光斑,通过探测光斑位置移动的径向分量,可获得被检口径在各采样子孔径位置的局部径向斜率信息,经波前复原算法可得到被检测光学系统的波前误差^[7,8]。

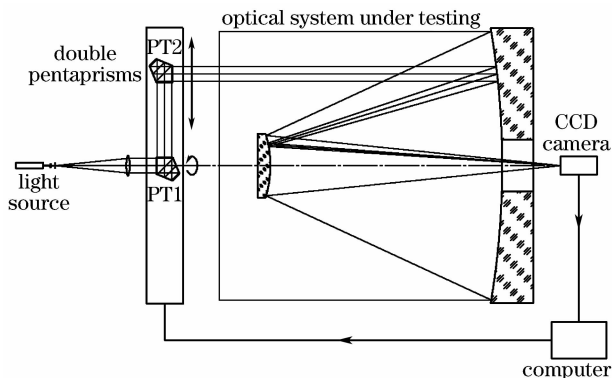


图1 径向哈特曼检测方法的工作原理

Fig. 1 Principle of radial Hartmann testing

五角棱镜是光学对准和光学检测中常用的工具,其主要作用是使光轴偏折 90° ,其最大优点是在主截面内使偏角保持为常数,不管光束是垂直入射还是倾斜入射,也就是说当五角棱镜绕垂直于主截面的轴旋转时,光束偏角保持不变。双五角棱镜扫描方法正是利用了五角棱镜这一优点。不过,当五角棱镜绕主截面内的轴旋转时,与平面反射镜的特性相同。因此径向哈特曼检测方法只能用于测量被测波前的径向斜率信息,而不能用于测量被测波前的切向斜率信息。

径向哈特曼检测系统工作时,先测量各子孔径的光斑质心位置 (X_i, Y_i) ,对于中心坐标为 (r_{ci}, θ_{ci}) 的子孔径,可得每个子孔径光斑的径向位移为

$$\Delta r_i = X_i \cos \theta_{ci} + Y_i \sin \theta_{ci}, \quad (1)$$

于是得该子孔径的平均径向波前斜率为

$$S_{ri} = \frac{\Delta r_i}{F} - G_0, \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

式中 G_0 为双五角棱镜的偏角常数, F 为斜率测量等效焦距, M 为采样子孔径数目。

基于Zernike多项式的模式波前重构算法对径向哈特曼测量方法比较适合,它根据测量的各采样子孔径的平均波前径向斜率,重构计算得到各个Zernike像差模式系数,进而得到被检测望远镜的波前误差。对于圆形孔径,光学系统的波前误差可表

示为正交Zernike多项式的叠加,通常称每个Zernike多项式为像差模式,其表达形式为

$$W(\mathbf{r}, \theta) = \sum_{j=1}^N a_j Z_j(\mathbf{p}, \theta) = \sum_{j=1}^N a_j Z\left(\frac{\mathbf{r}}{R}, \theta\right), \quad (3)$$

式中 a_j 为第 j 项Zernike多项式系数($j = 1, 2, 3, \dots, N$), $Z_j(\mathbf{p}, \theta)$ 为第 j 项Zernike多项式, θ 为极角变量, $\mathbf{p} = \mathbf{r}/R$ 为归一化单位圆上的矢径变量, \mathbf{r} 为被测口径上的矢径变量, R 为被测口径的半径, N 为Zernike多项式项数(也称波前误差模式数)。在被测口径内,对于中心坐标为 (r_{ci}, θ_{ci}) 的子孔径,其平均径向波前斜率为

$$S_{ri} = \frac{1}{P} \iint_{SA(i)} \frac{\partial W(\mathbf{r}, \theta)}{\partial \mathbf{r}} \cdot \mathbf{r} d\mathbf{r} d\theta = \sum_{j=1}^N a_j \frac{1}{P} \iint_{SA(i)} \frac{\partial Z_j(\mathbf{r}/R, \theta)}{\partial \mathbf{r}}, \quad (4)$$

式中 P 为子孔径面积, $SA(i)$ 为子孔径区域, $\partial W(\mathbf{r}, \theta)/\partial \mathbf{r}$ 为被测系统口径上的径向波前斜率误差函数, $\partial Z_j(\mathbf{r}/R, \theta)/\partial \mathbf{r}$ 为第 j 项Zernike多项式的径向偏导数,令 $DZ_{ij} = \frac{1}{P} \iint_{SA(i)} \frac{\partial Z_j(\mathbf{r}/R, \theta)}{\partial \mathbf{r}}$,于是子孔径上的平均径向波前斜率可写成

$$S_{ri} = \sum_{j=1}^N a_j \cdot DZ_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (5)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} S_{r1} \\ S_{r2} \\ \vdots \\ S_{ri} \\ \vdots \\ S_{rM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DZ_{11} & DZ_{12} & \cdots & DZ_{1j} & \cdots & DZ_{1N} \\ DZ_{21} & DZ_{22} & \cdots & DZ_{2j} & \cdots & DZ_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ DZ_{i1} & DZ_{i2} & \cdots & DZ_{ij} & \cdots & DZ_{iN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ DZ_{M1} & DZ_{M2} & \cdots & DZ_{Mj} & \cdots & DZ_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_j \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}, \quad (6)$$

或写成

$$\mathbf{S}_r = \mathbf{D}_Z \mathbf{A}, \quad (7)$$

矩阵求逆,可得复原的Zernike系数向量为

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}_Z^+ \mathbf{S}_r, \quad (8)$$

式中 \mathbf{D}_Z^+ 为矩阵 \mathbf{D}_Z 的广义逆矩阵。将 \mathbf{A} 代入(3)式可得到被测波前。

3 $\phi 800$ mm 径向哈特曼实验系统

径向哈特曼像质检测方法是一种检测大型光学系统像质的新方法,为了验证该方法并为更大口径检测系统的研制提供可靠的理论和实验基础,在实验室建立了800 mm径向哈特曼像质检测系统(RHTS800),如图2所示。它由被检测光学系统、

基准光源系统、双五角棱镜二维扫描系统、径向波前斜率探测系统和计算机控制和数据采集系统 5 个部分组成。

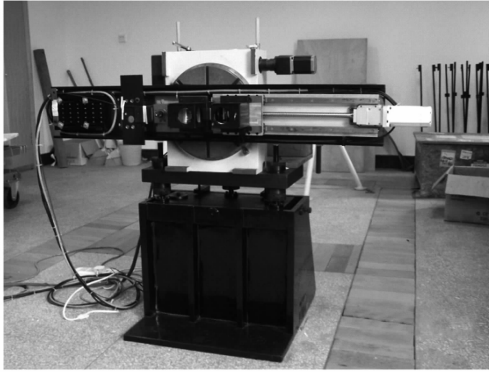


图 2 800 mm 径向哈特曼像质检测实验系统

Fig. 2 800 mm radial Hartmann testing system

被检测光学系统为口径 700 mm 经典的卡塞格伦结构,主镜为旋转抛物面,次镜为双曲面,中心遮挡为 1:4,主镜焦比为 $F/3.25$,系统焦比为 $F/13$,系统焦距 8839.93 mm,主次镜腔长 1708 mm,次镜至焦点距离 2008 mm。

基准光源系统用于产生小口径测量平行光束,它由 He-Ne 激光器、会聚物镜、空间滤波器、准直物镜(焦距 400 mm)构成,并可根据检测需要从 $\phi 10 \sim 45$ mm 调节出射光束口径。

双五角棱镜二维扫描系统固定在支承座上,旋

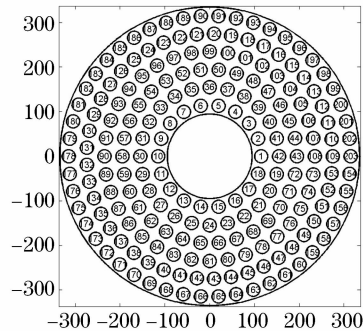
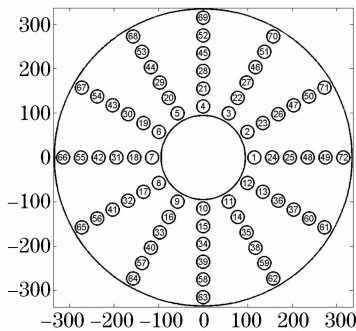


图 3 子孔径布局方式

Fig. 3 Arrangement of subapertures

RHTS800 计算机控制系统用于实现双五角棱镜扫描位置的控制和子孔径焦面光斑图像数据的采集控制和记录,可实现整个测量过程的监控及显示,其硬件结构框图如图 4 所示。包括旋转台电机驱动器、旋转台编码器电路、旋转台 ISA 控制卡、平移台电机驱动器、平移台编码器电路、平移台控制器及 ISA 控制卡、视频图像采集卡以及主控计算机。主控程序采用基于对话框的 MFC 应用程序。波前测量数据处理软件采用 Matlab 语言编程,可实现子孔

转轴水平(即采用卧式结构),用于实现小口径平行光束在被检测口径上的二维扫描。它主要由精密旋转台、精密平移台、双五角棱镜组件及必要的支承调整机构组成。精密旋转台由步进电机驱动,由光栅编码器读取角向位置数据,精密平移台由交流伺服电机驱动直线导轨,五角棱镜 PT1 安装在精密旋转台中心,五角棱镜 PT2 安装在平移台面上,可沿径向移动,并可和五角棱镜 PT1 一起绕旋转台机械轴转动。

径向波前斜率探测系统用于实现各扫描子孔径光斑质心位置的测量,进而根据子孔径位置信息和子孔径光斑质心位置信息得到各扫描子孔径的径向波前斜率信息。图 3 所示为 700 mm 望远镜光学系统像质检测时采用的二种典型的子孔径布局方式。根据径向哈特曼像质检测的工作原理,由于各子孔径径向波前斜率的测量是分时按扫描顺序进行的,因此各子孔径共用同一个光学系统和同一个探测器。它主要由二部分组成:被检测光学系统,如有必要可加检测辅助透镜,将子孔径内的入射光聚焦到 CCD 光敏面上;CCD 探测器,实现各子孔径光斑的探测,这里 CCD 相机光敏面的尺寸为 $6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$,像素数目为 $795 \text{ pixel} \times 596 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$,帧频 25 frame/s ,斜率测量动态范围为 $\pm 75'' \times \pm 56''$ 。

径多帧图像数据的预处理、子孔径焦面光斑质心位置处理运算、子孔径径向波前斜率的处理运算和径向波前重构处理运算,及波前测量结果的图形显示和数据显示。

为了解决径向哈特曼像质检测系统装调问题、与被检测光学系统对准问题及被测望远镜主次镜装调对准问题,还发展了一种基于径向哈特曼子孔径光斑扫描轨迹的装调对准方法并实现。

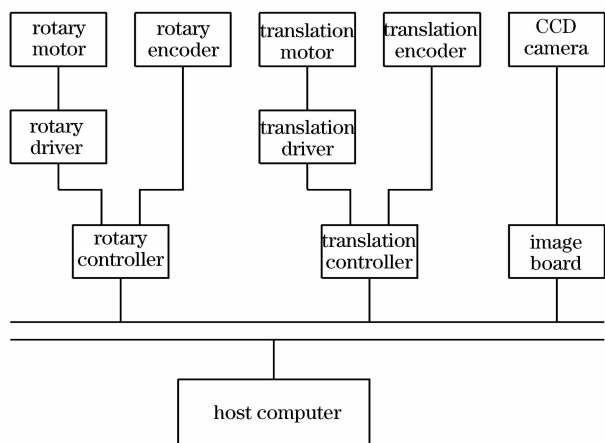


图4 计算机控制系统硬件结构

Fig. 4 Block diagram of computer control system

4 像质检测实验

利用建立的径向哈特曼像质检测实验系统,进行了一系列的望远镜光学系统像质检测实验,研究了光轴对准、子孔径布局方式、子孔径位置精度等因素对检测的影响,还研究了检测环境地基振动、环境温度气流、环境杂光等因素的影响^[9]。

图5所示为二组各子孔径的径向波前斜率检测数据的比较,图5(a),(b)为实测数据,(c),(d)为处理后的数据。图6所示为根据二次检测数据重构的波前 Zernike 像差系数。图7所示为二次检测的波前三维图和伪彩色图。二次检测的波前的均方根(RMS)值分别为 0.313λ 和 0.310λ ,峰谷(PV)值分别为 2.036λ 和 2.057λ 。表1所示为4组检测数据的波前PV值和RMS值(去倾斜)。实验结果说明检测重复性较好,优于 0.1λ ^[10,11]。

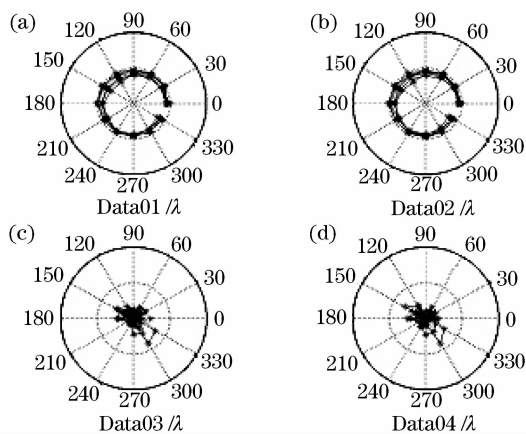


图5 实测和处理后各子孔径的径向波前斜率

Fig. 5 Measured and processed radial slope of wavefront

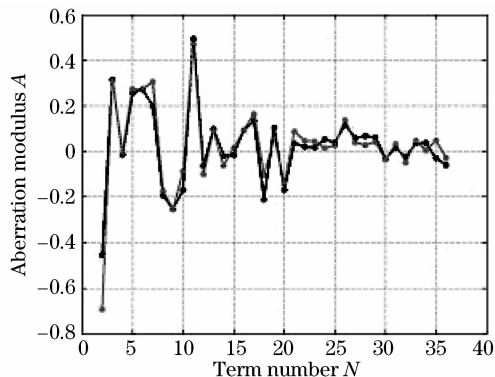


图6 重构的 Zernike 像差系数

Fig. 6 Reconstructed Zernike coefficients

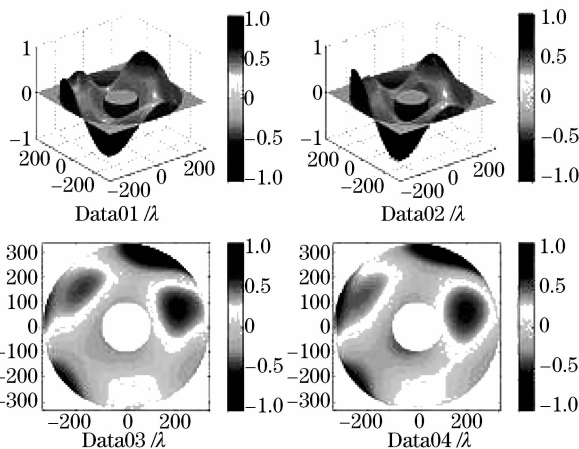


图7 700 mm 望远镜的检测波前(去倾斜)

Fig. 7 Tested wavefront errors of the 700 mm telescope

表1 4组检测数据的波前RMS值和PV值(去倾斜)

Table 1 Wavefront root-mean-square (RMS) and peak-valley (PV) value of four groups testing data

Testing data	Testing wavefront	
	W_{RMS} / λ	W_{PV} / λ
1	0.313	2.036
2	0.310	2.057
3	0.321	2.095
4	0.307	1.913

5 结 论

介绍了一种新的基于径向波前斜率的哈特曼检测方法及原理,重点介绍了采用该方法和技术研制的800 mm口径的径向哈特曼像质检测实验系统的组成及结构,并给出了利用该系统对700 mm光学系统像质检测的实验结果。研究表明,在没有昂贵的大口径标准平面镜的情况下,用本文研究的方法,在室内可实现大口径光学系统像质检测,该方法同样也适用于大口径光学元件的像质检测。

影响径向哈特曼像质检测方法测量精度的主要误差源是环境地基振动、环境温度气流等,这也是其他大口径光学系统检测方法共有的问题,为了进一步提高检测精度,需在这些方面开展研究。另外径向哈特曼像质检测方法还存在测量时间较长的问题,为了促进该方法的实用化,下一步需要在子孔径快速扫描控制方面开展工作。

参 考 文 献

- 1 R. N. Wilson. Reflecting Telescope Optics II [M]. Springer, 2001. 131~168
- 2 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun transl.. Beijing: Science Press, 1978. 182~190
M. 玻恩, E. 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 182~190
- 3 Proteep C. V. Mallik, Chunyu Zhao, James H. Burge. Measurement of a 2-meter flat using a pentaprism scanning system [C]. *SPIE*, 2005, **5869**:326~336
- 4 Cao Genrui, Zhu Qiudong, Su Peng. A novel self-referenced Hartmann wavefront sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6):1~4
曹根瑞, 朱秋东, 苏 鹏. 一种新型的自基准哈特曼波前传感器 [J]. 光电工程, 2004, **31**(6):1~4
- 5 Yang Juntao, He Yumei, Tang Guomao. Dynamic measurement and control of radial-Hartmann wave-front test system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(9):36~40
杨俊涛, 何玉梅, 汤国茂. 径向哈特曼动态测量控制 [J]. 光电工程, 2008, **35**(9):36~40
- 6 Chang Shan, Cao Yiping, Chen Yongquan. Kinematic error effect of pentagonal prism on wavefront measurement [J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(3):12~16
常 山, 曹益平, 陈永权. 五棱镜的运动误差对波前测量的影响 [J]. 光学仪器, 2005, **27**(3):12~16
- 7 Chang Shan, Cao Yiping, He Weiguo. Application of pentagonal prism in large aperture telescope testing [J]. *Tool Engineering*, 2004, **38**(12):58~61
常 山, 曹益平, 何卫国. 五角棱镜在大口径望远镜检测中的应用 [J]. 工具技术, 2004, **38**(12):58~61
- 8 J. H. Burge, B. Kot, H. M. Martin *et al.*. Alternate surface measurements for GMT primary mirror segments [C]. *SPIE*, 2006, **6273**:62732T
- 9 Zhang Wei, Deng Jian, Long Funian *et al.*. Image quality evaluation for segmented mirror synthetic aperture optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):687~691
张 伟, 邓 键, 龙夫年等. 子孔径合成光学成像系统像质评价研究 [J]. 光学学报, 2008, **28**(4):687~691
- 10 Su Yun, Ruan Ningjuan, Li Bo. Accuracy analyzing of sub-apertures stitching and application of matrix singular value decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(Suppl. 1):247~252
苏 云, 阮宁娟, 李 博. 子孔径拼接精度分析及奇异值分解方法的应用 [J]. 光学学报, 2009, **29**(增刊 1):247~252
- 11 Chen Shanyong, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):883~888
陈善勇, 戴一帆, 解旭辉等. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法 [J]. 光学学报, 2008, **28**(5):883~888