

望远镜主镜面形误差的结构函数分析方法

张振铎

(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 望远镜主镜面形误差的指标制定、分析以及评价方法对主镜加工具有重要的指导意义。提出一种结构函数分析方法, 利用它分析了大气湍流对望远镜系统成像质量的影响, 制定出主镜面形加工误差的指标要求; 通过建立泽尼克多项式与结构函数的直接转化关系, 实现了对主镜面形误差的有效评价, 给出了具体的转化步骤及结果; 通过巨型麦哲伦望远镜(GMT)实例对分析过程进行了具体说明。结构函数分析方法与整镜均方根(RMS)波像差等方法相比, 能更准确及完善地评价望远镜主镜的面形误差, 对镜面加工更具指导意义。

关键词 光学加工; 结构函数; 面形误差; 望远镜主镜; 大气湍流

中图分类号 P111 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.112201

Structure Function Analysis of Telescope Primary Mirror Figure Errors

Zhang Zhenduo

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

Abstract The methods of specification, analysis and evaluation on telescope primary mirror figure error have an important instructive meaning to mirror fabrication. A structure function analysis method is introduced. Firstly, the influence of atmospheric turbulence on image quality is analyzed and the specification on mirror figure error is determined using the structure function analysis method. Then the evaluation on mirror figure error and the guidance of mirror processing by conversion from Zernike polynomial to structure function are achieved. The conversion processes and results have been described. Finally, the analysis processes mentioned above are illustrated in detail by an example of Giant Magellan Telescope (GMT). The structure function analysis method which has a greater guiding significance can evaluate the mirror figure error accurately and perfectly and shows advantages over the root-mean-square (RMS) wave aberration method.

Key words optical processing; structure function; figure error; telescope primary mirror; atmospheric turbulence

OCIS codes 220.4610; 120.6650; 010.1330

1 引言

望远镜系统的成像质量受到大气湍流影响, 当系统自身的总成像误差小于大气误差时, 系统的进一步优化不会使成像质量变得更优。因此, 望远镜系统的技术指标要求通常根据最好的大气视宁度提出^[1,2]。例如大型双筒望远镜(LBT)要求自身系统引入总的波像差等于相干长度 $r_0=45\text{ cm}$ 的大气湍流所产生的误差(对应波长为 500 nm)。制定望远镜系统的总体误差后, 根据各分系统(如跟踪驱动、光学系统装调、光学设计、主镜及其他光学表面加工等)的造价、技术难度及技术风险, 再进行误差指标分配, 同样以相干长度的形式表示。如在主镜面形加工方面, LBT要求其面形误差等于相干长度 $r_0=120\text{ cm}$ 的大气湍流产生的误差; 巨型麦哲伦望远镜(GMT)要求其面形误差等于相干长度 $r_0=91.9\text{ cm}$ 的大气误差。

如何判断主镜的面形误差是否满足一定相干长度下大气湍流的误差要求由此成为了主要的问题。为解

收稿日期: 2011-08-17; 收到修改稿日期: 2011-08-30; 网络出版日期: 2011-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(D41074126)资助课题。

作者简介: 张振铎(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事望远镜主动光学、空间遥感技术与辐射定标等方面的研究。

E-mail: zhenduo69@163.com

决这个问题,本文使用了结构函数分析方法。其实,早在 20 世纪 60 年代,结构函数就被应用于计算一定相干长度下大气湍流所产生的波前误差^[3]。20 世纪 80 年代,结构函数作为指标评价方法第一次应用于赫歇尔望远镜(WHT)的镜面加工中,但当时所使用的面形检测设备是剪切干涉仪^[4]。随着检测技术水平的提高,目前望远镜主镜的面形误差通常通过干涉仪输出的泽尼克多项式系数来评价。所以,为实现面形误差与大气湍流误差的直接比对,建立了泽尼克多项式与结构函数之间的转化关系。

2 结构函数及大气湍流误差

结构函数以统计的形式定义不同空间间隔下成对点之间的波前差,表达式为^[5]

$$D_{\phi}(r) = \langle [\phi(x+r) - \phi(x)]^2 \rangle_x, \tag{1}$$

式中 r 代表成对点之间的空间间隔, ϕ 代表 $x+r$ 或 x 点的波前, x 取自光瞳平面,三角括号代表所有 x 点处的统计平均。

对于标准的 Kolmogorov 大气湍流模型,望远镜长曝光和短曝光图像对应的结构函数分别表示为^[5]

$$D_{\text{long}}(r) = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 6.88 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{5/3}, \tag{2}$$
$$D'_{\text{short}}(r) = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 6.88 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{5/3} \left[1 - 0.975 \left(\frac{r}{d}\right)^{1/3}\right] + 2\sigma^2, \tag{3}$$

式中 r_0 为大气相干长度, d 为望远镜主镜口径, $2\sigma^2$ 项代表大气的散射损失。短曝光图像在考虑望远镜配有快速主动导向的情况下,减小了主镜口径 d 上的大空间间隔误差并去掉了波前倾斜的影响。

望远镜观测时,以短曝光图像为例,取(3)式结构函数的平方根值,就可以计算得到一定相干长度下大气湍流所产生的波前误差,从而对主镜面形加工提出误差指标要求:

$$\sqrt{D'_{\text{short}}(r)} = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 6.88 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{5/3} \left[1 - 0.975 \left(\frac{r}{d}\right)^{1/3}\right] + 2\sigma^2}. \tag{4}$$

这种指标要求与均方根(RMS)值相比,能约束整个镜面在不同空间尺度下的面形误差,对镜面加工更具指导意义。

3 泽尼克多项式与结构函数之间的转化

主镜加工过程中,面形误差可通过干涉仪输出的泽尼克多项式系数来评价。要建立面形误差和大气湍流误差之间的直接比较关系,就要建立泽尼克多项式与结构函数之间的转化关系。使用 Matlab 工具,具体步骤如下: 1) 采用 $n \times n$ 个矩阵点创建泽尼克多项式表面,使表面离散化, n 通过使表面采样间隔小于 $1/(2r_0)$ 来确定。每个多项式创建一个表面,若干涉仪输出对应 28 个泽尼克多项式,那么共创建 28 个表面。2) 在每一个表面上,以所有创建矩阵点为圆心,空间间隔 r 为半径做圆,取圆周上 m 个不同角度下的对应点,判断它们与主镜平面的位置关系,选择落在平面内的点参与计算。3) 按照(1)式的计算方法,计算不同空间间隔 r 、单个泽尼克多项式表面所对应的望远镜主镜面的结构函数。4) 计算不同空间间隔 r 、28 个泽尼克多项式表面所对应的望远镜主镜面的结构函数。5) 将每个泽尼克多项式表面对应的结构函数用干涉仪输出的泽尼克系数进行归一化后再求和,计算得到整个主镜面形误差在不同空间间隔下的结构函数。下面通过一个例子对上述计算过程进行说明。

首先对应上述步骤 1)~ 4)。图 1 是创建的泽尼克“像散项”表面,直径取 8.4 m,遮拦比 0.4。其上的 1 st 点对应(1)式中的 x 位置, $\phi(x)$ 为泽尼克多项式在该点的取值。对于每一点 x ,图中画出了 7 个与之相距为 r 的点,取值为 $\phi(x+r)$ 。其中 5 个点落在主镜平面内,参与结构函数的计算。这样,利用(1)式,就可以计算得到像

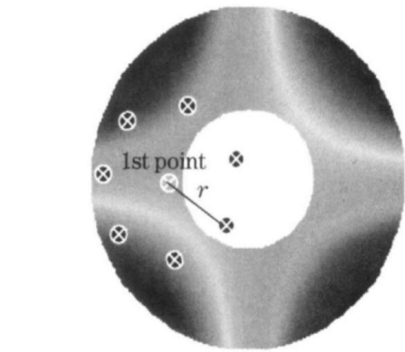


图 1 由泽尼克像散项创建的表面(遮拦比为 0.4)

Fig. 1 Zernike polynomial surface describing astigmatism with an obscuration ratio of 0.4

散项对应的结构函数。依次创建不同的泽尼克多项式表面, 分别计算得到不同泽尼克多项式在不同空间间隔、不同遮拦比下的结构函数, 如图 2 所示(r 取 0.01~ 1.00 间 10 个不同的主镜直径的归一化值, 对应主镜上的空间间隔范围为 0.084~ 8.400 m)。

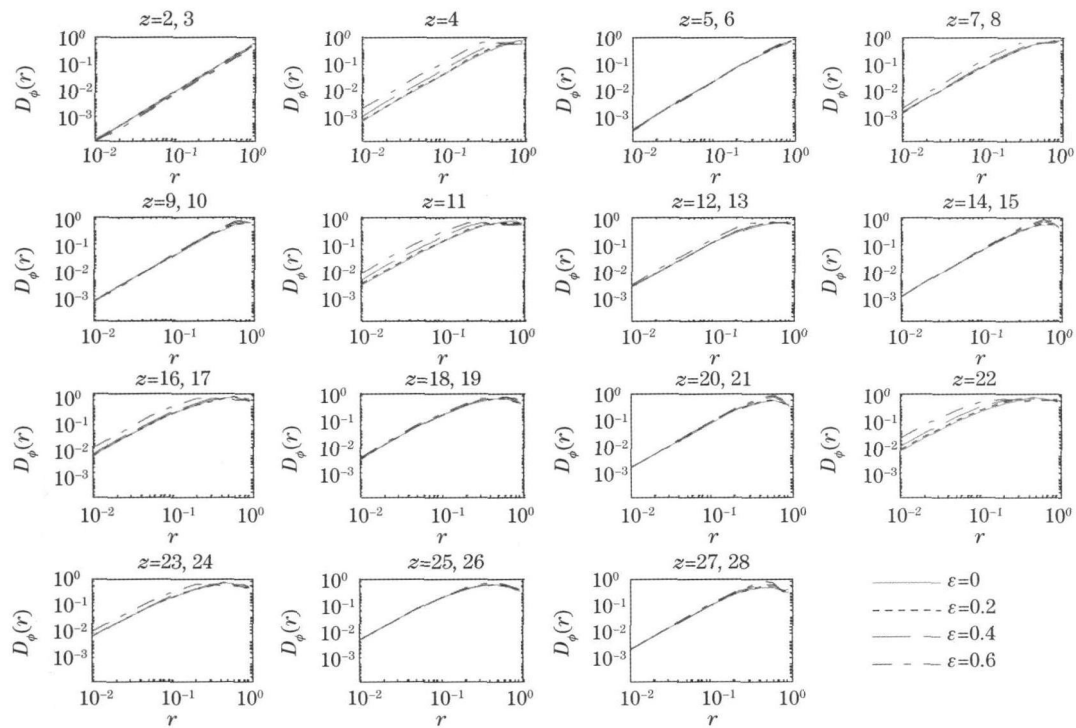


图 2 泽尼克多项式的结构函数计算结果

Fig. 2 Structure functions for Zernike polynomial

然后对应步骤 5)。在得到所有泽尼克多项式对应的结构函数以后, 可以确定整个主镜面形误差的结构函数, 计算公式为

$$\sqrt{D^{\phi}(r)} = \sqrt{C_1^2 D_{\phi 1}(r) + C_2^2 D_{\phi 2}(r) + C_3^2 D_{\phi 3}(r) + \dots}, \tag{5}$$

式中 $D_{\phi 1}(r), D_{\phi 2}(r), D_{\phi 3}(r), \dots$ 为每个泽尼克多项式对应的结构函数; $C_1, C_2, C_3, \dots$ 为干涉仪输出的泽尼克多项式的系数。

通过第 2 节和第 3 节的分析可以看出, 都以结构函数为误差分析工具, 就可以将(5)式与(4)式的计算结果进行比较, 直接判断出在特定空间尺度下, 主镜的面形误差与一定相干长度下大气湍流误差的数值关系, 进而指导主镜的加工。

4 GMT 实例

利用结构函数分析理论计算了 GMT 8.4 m 主镜对应的大气湍流误差、面形误差及检测误差, 计算数据来自参考文献[2]。图 3 为 GMT 主镜拟采用的面形检测系统示意图(现属设计阶段)。该系统主要由 8.4 m GMT 主镜、3.75 m 驱动球面镜(用来折转光路并提供系统大部分非球面校正)、0.75 m 球面镜、计算全息(用来提供其他像差的校正)以及抗振动干涉仪构成。

对该系统的面形检测误差进行了模拟分析。由于该

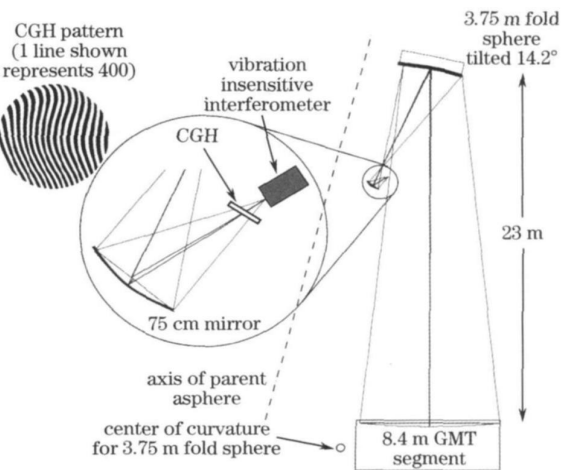


图 3 GMT 主镜面形检测装置示意图

Fig.3 Optical layout for the interferometric test for the off axis GMT mirror

系统含有主动光学校正单元,所以检测过程中考虑了主动光学的校正能力。具体步骤如下:1)针对每个系统单元(忽略其他单元的影响),在设定公差范围内,通过光学设计软件 Zemax 对其为主镜检测时所引入的面形误差进行模拟计算。2)调整主镜位置,使主动支撑促动器的平均校正力最小。分析时,将主镜调整方向分解成轴向偏移和中心旋转。3)采用最低的 16 项弯曲模式来拟合促动器校正力所引起的弯曲曲面。4)移除弯曲曲面,计算未被校正的残留面形误差,即系统单元引入的主镜检测误差,以泽尼克多项式形式表示。5)重复步骤 1)~4),计算出所有系统单元引入的主镜检测误差。具体的误差分析结果如表 1 所示。

表 1 GMT 主镜面形检测误差分析

Table 1 Error result of the GMT surface test

Element	Parameter	Tolerance / μm	Radial shift / nm	Clocking / [10 ⁻³ (°)]	Correction force (RMS) / N	Residual surface (RMS) / nm
Hologram	Axial displacement	20	0.02	0.25	5.44	11.95
	Tilt about y	10	-0.01	0.16	0.99	2.80
	Tilt about x	10	-0.02	0.02	3.16	8.27
3.75 m sphere	Axial displacement	100	1.23	-0.05	11.12	15.21
	Tilt about y	100	0.00	3.11	1.88	4.19
	Tilt about x	100	1.04	-0.04	8.05	20.09
	Radius	250	-0.40	0.01	2.84	3.10
0.75 m sphere	Axial displacement	20	-0.50	0.02	5.02	6.16
	Tilt about y	10	0.00	-0.10	2.11	3.14
	Tilt about x	10	0.12	-0.01	3.94	9.80
	Radius	20	-0.49	0.02	4.98	6.89
GMT segment	Axial displacement	200	0.40	-0.02	4.67	8.56

将各系统单元的检测误差均用 28 项泽尼克多项式表示,对应项相加,再利用(5)式进行转换,就得到了整个主镜检测系统的检测误差所对应的结构函数,结果如图 4 中最下面的虚线所示。图 4 中最上面的实线代表 GMT 主镜面形误差的指标要求,通过(4)式计算得出,指定的相干长度为 $r_0=91.9\text{ cm}$ 。以上两条线的差值,即中间虚线代表主镜所允许的面形加工误差对应的结构函数(忽略检测误差)。由图 4 还可以分析得到,GMT 的系统检测误差远小于主镜的面形误差,说明检测系统具备进一步提高主镜面形加工精度的能力。在实际加工过程中,可通过干涉仪输出的泽尼克多项式构建结构函数,与图中实线进行比对(包含检测误差),进而指导主镜加工。

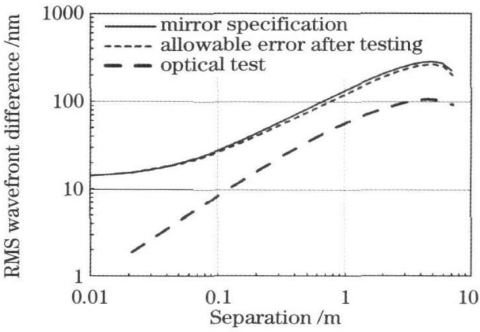


图 4 主镜面形误差的结构函数分析图

Fig. 4 Structure function for primary mirror figure error

5 结 论

望远镜主镜面形误差的指标制定、分析以及评价方法对主镜加工具有重要的指导意义。本文利用结构函数分析方法,一方面计算了大气湍流对望远镜成像质量的影响,对望远镜的主镜面形提出指标要求;另一方面在镜面加工过程中,通过建立泽尼克多项式与结构函数的直接转化关系,实现了对主镜面形误差的有效评价。最后通过上述两方面的比对结果来指导镜面加工。结构函数分析方法与整镜 RMS 波像差和目标成像尺寸等评价方法相比,更能体现出镜面在不同空间尺度下的面形误差,对镜面加工更具指导意义。

参 考 文 献

1 J. M. Hill. Optical design, error budget and specifications for the Columbus project telescope [C]. SPIE, 1990, 1236: 86~ 107

2 GMT O. Giant Magellan Telescope Conceptual Design Review[R]. Pasadena: GMT O, 2006

3 D. L. Fried. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(11): 1427~ 1431

4 D. S. Brown. Optical specification of ground based telescopes[C]. *SPIE*, 1983, **399**: 12~ 14

5 Geng Zexun, Chen Bo, Wang Zhenguo *et al.*. The Theory and Method for Image Restoration of Adaptive Optics[M]. Beijing: Science Press, 2010. 25~ 27

耿则勋, 陈 波, 王振国 等. 自适应光学图像复原理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 25~ 27