

近柱面中频面形检测中曲面拟合法精度问题研究

谢本超¹⁾²⁾ 卢振武¹⁾ 李凤有¹⁾

¹⁾中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,应用光学国家重点实验室,长春 130033)

²⁾中国科学院研究生院,北京 100039)

(2004 年 9 月 20 日收到,2004 年 10 月 25 日收到修改稿)

研究了曲面拟合法对特定抛物和双曲近柱面检测中波前像差的处理过程,结果表明,对振幅为 0.1λ 的中频正弦型面形,由曲面拟合法得到的结果与该正弦型面形之差的 RMS 值分别可以达到 0.015λ (8.25nm)和 0.013λ (7.15nm).通过分析拟合阶数对精度的影响,确认存在一个特殊的阶数 n_0 ,它使曲面拟合法的精度达到最高,讨论了估计 n_0 值的方法,得到了和 n_0 真实值完全符合的估计值,表明这些方法是行之有效的.

关键词:光学检测,近柱面,曲面拟合

PACC:4225H,0760L,0270

1. 引 言

近柱面在深空探测用 Wolter-I 型 x 射线望远镜中有着重要应用,对它的检测是 Wolter-I 型 x 射线望远镜制造中的难点之一^[1].为了获得近柱面面形的比较全面的信息,需要联合使用多种检测方法,其中,光学干涉法在特定频段的面形检测中拥有重要地位^[2].图 1 所示为 Feizau 干涉仪检测近柱面的正入射式检测装置^[3].从菲索干涉仪出射的平面波被反射镜折转 90° 后穿过平凹柱透镜,变成柱面波.柱面波被近柱面反射后原路返回,在干涉仪内部与参考波发生干涉,形成干涉条纹.对检测过程测得的干涉图所对应的波像差 (W) 的进一步处理可有如下两种:

1) 利用光学 CAD 软件模拟近柱面检测装置,获取无加工误差理想近柱面对应的波像差 (W_1),然后将 W_1 从 W 中去除以得到近柱面的加工误差 (W_2),即 $W_2 = W - W_1$ ^[4].为了获得足够高的精度,必须确保实际检测装置和计算机模拟检测装置在结构上的高度一致性,这就对装调精度提出了较高的要求.

2) 波前拟合法^[5],设 W_2 由低频成分 (W_{21}) 和中频成分 (W_{22}) 组成,则有 $W = W_1 + (W_{21} + W_{22})$.对 W 进行曲面拟合并将拟合的结果 (W') 作为 ($W_1 + W_{21}$) 的估计值,则 W_{22} 的估计值 (W'_{22}) 可以由下式得

到: $W_{22} = W - W'$.波前拟合法有两个优点:无需明确 W_1 的值,降低了对装调精度的要求,得到的结果不含 W_2 的低频成分 W_{21} ,实现了中、低频成分的自动分离.

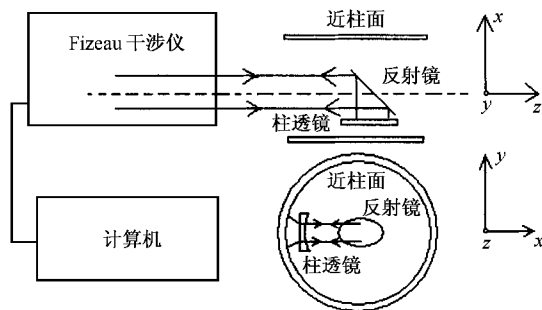


图 1 近柱面检测装置

Alfred Gatzwieler 在 1995 年就曾把基于矩形域上非正交多项式的曲面拟合法用于近柱面中频面形检测中,但对该方法所能达到的精度和提高精度的途径,则有待进一步研究^[5].鉴于国内对深空探测的研究已被提上日程^[6,7],以及近柱面检测在 x 射线望远镜制造中的重要地位,本文对曲面拟合法的实现过程进行了计算机模拟,并深入分析了其中的精度问题.研究结果表明,曲面拟合法的精度可达 0.013λ ;为了达到这样的精度,探索了可以确定最佳拟合阶数的方法,得到了两种行之有效的解决方案.

2. 曲面拟合法的计算机模拟和精度分析方法

根据公式 $W'_{22} = W - W'$,波前拟合法的计算机模拟和精度分析主要包括以下四个步骤 :1)获取 W 2)对 W 做曲面拟合得到 W' ;3)将 W' 与 W 相减得到 W_{22} 的估计值 W'_{22} ;4)求 W'_{22} 和 W_{22} 的差 (ΔW_{22}).以某抛物近柱面 Σ_1 的检测为例 ,取中频面形 W_{22} 为振幅等于 0.1λ ($\lambda = 550\text{nm}$)的正弦面 ,被检区大小约为 $15\text{mm} \times 30\text{mm}$.

第一步是 W 的获取 ,见图 2. 为了使问题简化 ,采

取了如下两个措施 :i)在公式 $W = W_1 + (W_{21} + W_{22})$ 中 , W_{21} 同 W_1 一样是波像差 W 中的低频成分 ,它对多项式曲面拟合的影响与 W_1 类似 ,因此令 $W_{21} = 0$ 对波前拟合法的精度分析没有不良影响 ,考虑到 $W_{21} = 0$ 时 $W_{22} = W_2$,为方便起见以下一律用 W_2 指代 W_{22} .ii) W_2 没有加在被检测面上 ,而是直接与近柱面无制作误差时的波像差 W_1 做标量相加 ,该措施将使 ΔW_2 不包含系统的影响——它仅仅是由曲面拟合所产生的 ,这确保了精度分析的可靠性 .采取上述两个措施后 , W 的获取过程简化为对 W_1 的 CAD 软件(比如 ZEMAX)模拟及 W_1 和 W_2 的标量相加 .

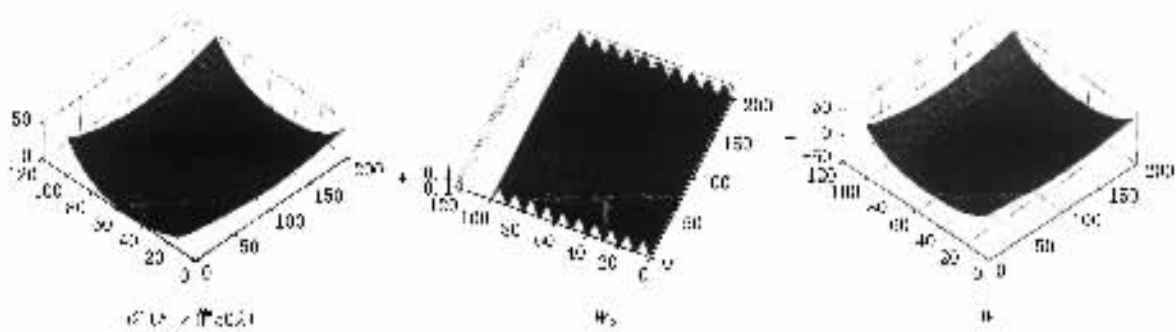


图 2 某抛物近柱面 Σ_1 对应的波像差 W 的获取

第二步是对 W 进行曲面拟合 .定义在圆域上的 Zernike 多项式由于其同几何像差的一一对应关系和正交性 ,在光学检测中有着广泛应用 ;但在本文所述的近柱面检测中 ,由于被检测区域是矩形 ,故没有采用 Zernike 多项式进行曲面拟合 ,而是采用矩形域上的非正交多项式 : $P_{ij}(x,y) = x^i y^j$,且 $i + j \leq n$, n

为拟合阶数 .取 $n = 6$,则拟合面 W' 的表达式为 $W'(x,y) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 x^2 + c_5 xy + c_6 y^2 + \dots + c_{26} x^2 y^4 + c_{27} xy^5 + c_{28} y^6$,共 28 项 ;系数 c 的值由最小二乘法确定 .

第三步把 W' 与 W 相减得到 W_2 的估计值 W'_2 ,见图 3.

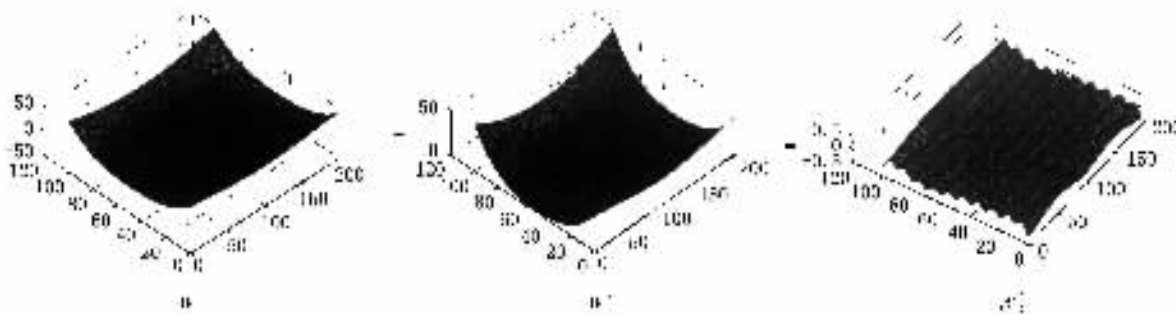


图 3 求 W_2 的估计值 W'_2

第四步求 W_2 和 W'_2 的差 ΔW_2 .为了定量评价曲面拟合法的效应 ,需要求出 ΔW_2 的均方根值 ($\text{RMS}(\Delta W_2)$)作为精度指标 : $\text{RMS}(\Delta W_2)$ 越大 ,精度越低 ,反之则精度越高 .

波前拟合法的计算机模拟和精度指标 $\text{RMS}(\Delta W_2)$ 的建立 ,为波前拟合法精度特性分析奠定了基础 .

3. 拟合阶数(n)和无加工误差理想近柱面对应的波像差(W_1)对精度的影响

为深入了解曲面拟合法应用中的误差来源和误差分布规律,需要明确 W_1, n 等对 ΔW_2 和 $RMS(\Delta W_2)$ 的影响.

首先考察 n 对精度的影响. 分别取 $n = 6-11$, 求出对应的 W_2 和 $RMS(\Delta W_2)$ 值. 结果如图 4 所示. 由图 4 可知: $n = 6, 7$ 时拟合不足, 导致 W_2 中有明显的低频成分有残留, 此时 $RMS(\Delta W_2)$ 值很大; $n = 10, 11$ 时拟合过度, 在 W_2 的中部有小量中频成分丢失, 在边缘出现明显的振幅衰减, 此时 $RMS(\Delta W_2)$ 值

也较大; $n = 9$ 时 W_2 中残留的低频成分少, 没有明显的中频成分丢失和边沿衰减, 图形与振幅为 0.1λ 的标准正弦最为接近, $RMS(\Delta W_2)$ 的值最小 ($= 0.0152\lambda$), 所以拟合的精度最高; $n = 8$ 时的 $RMS(\Delta W_2)$ 的值比 $n = 9$ 时稍大, 精度也较高.

从上面的分析知道, 当拟合阶数取一特定值 (n_0), 即 $n_0 = 9$ 时, 拟合的精度最高. 但这是特定 W_1 值下得到的结果. 既然曲面拟合法的目的是将 W_1 从 $W (= W_1 + W_2)$ 中提取出来, 那么, W_1 的取值必然会对波前拟合产生影响. 把 W_1 改为某无制作误差理想双曲近柱面 Σ_2 对应的波像差, 考察不同拟合阶数对应的拟合精度. 结果如图 5 所示.

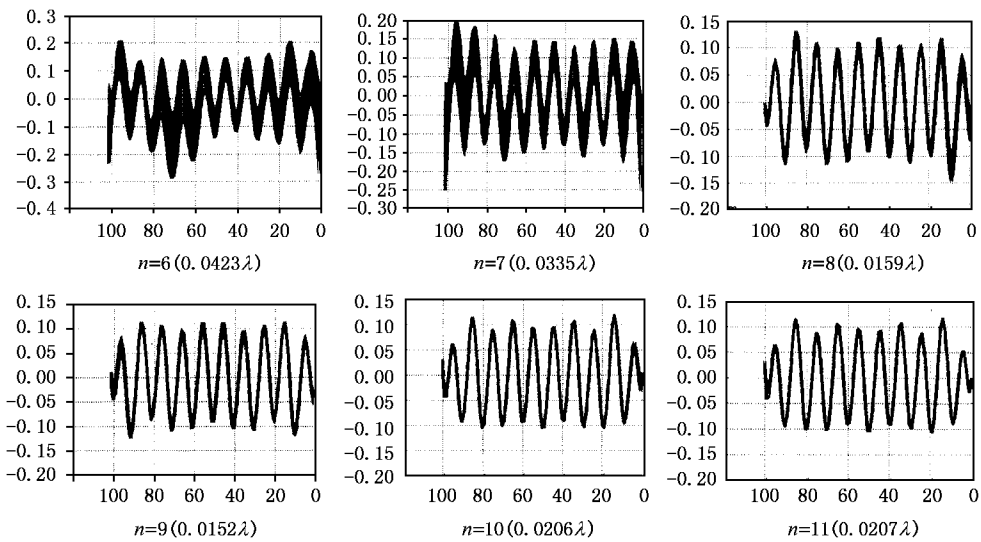


图 4 不同拟合阶数对应的 W_2 和 $RMS(\Delta W_2)$

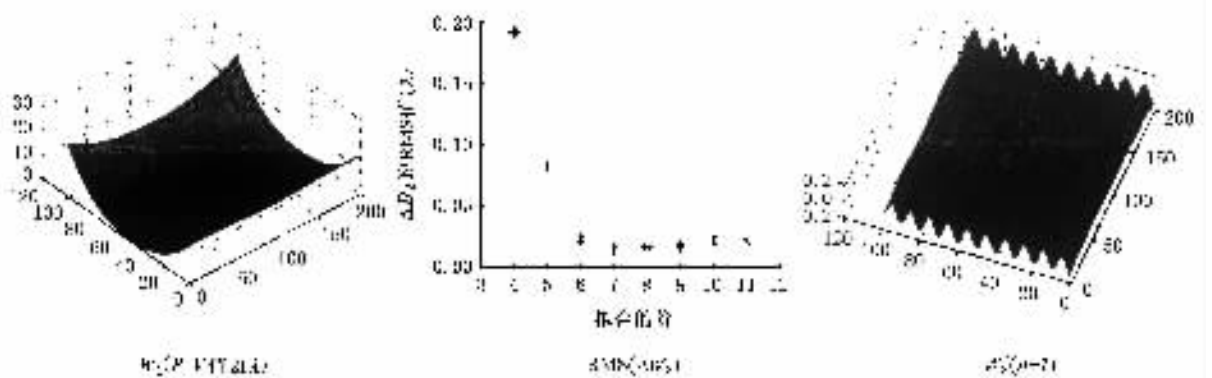


图 5 被检近柱面为双曲面 Σ_2 时不同拟合阶数对应的精度

从图 6 可以看到, 当拟合阶数 $n = 7$ 时拟合的精度最高, 对应的 $RMS(\Delta W_2)$ 为 0.013λ . 与前述抛物

近柱面检测时的结果比较,不但精度不一样,拟合阶的最佳值 n_0 也不一样. 既然 n_0 并非定值且对其确切值的掌握对提高波前拟合法的精度至关重要,那在实际的检测过程中该如何确定 n_0 的值呢?

4. 最佳拟合阶 n_0 的确定

为了使曲面拟合法的精度达到最高,需要确切知道 n_0 的值. 但在实际检测过程中, W_2 作为检测的目标,其真实值是不知道的,因此 $RMS(\Delta W_2)$ 随阶的变化关系也不知道,不能通过 $RMS(\Delta W_2)$ 与阶的关系图来判断的 n_0 取值;求 n_0 的唯一依据应该是 W 和 W'_2 . 根据曲面拟合法应用中的误差来源和误差分布规律的特点,我们采用了以下两种方法确定 n_0 的值.

办法之一. 将曲面拟合法得到的结果 W'_2 去掉

边缘,得到 W''_2 ,由之前的分析可知:当 $n < n_0$ 时拟合不足, W''_2 中有低频成分残留, W''_2 的均方根值 ($RMS(W''_2)$) 较大;当 $n = n_0$ 时,低频成分残留少, $RMS(W''_2)$ 减小;当 $n > n_0$ 时拟合过度,但考虑到过度拟合的主要影响是 W_2 的边缘衰减,且 W''_2 是 W'_2 去掉边缘后的结果,所以 $n > n_0$ 时 $RMS(W''_2)$ 与 $n = n_0$ 时差异是微量的. 总体来看, $RMS(W''_2)$ 将在 n_0 处出现一个转折点;该转折点处的 n 值 n'_0 可以作为 n_0 的估计值.

为此求出被检测面分别为近柱抛物面(图 6 (a))和近柱双曲面(图 6 (b))时 $RMS(W''_2)$ 随 n 的关系图. 在 (a) 中,转折点两边的 n 值分别为 8,9,但 $n = 9$ 时 $RMS(W''_2)$ 值与拐点处更为接近,故取 $n'_0 = 9$;同理,在 (b) 中取 $n'_0 = 7$. 由该方法得到的 n'_0 值同 n_0 的真实值完全符合,表明这种估计法是可行的.

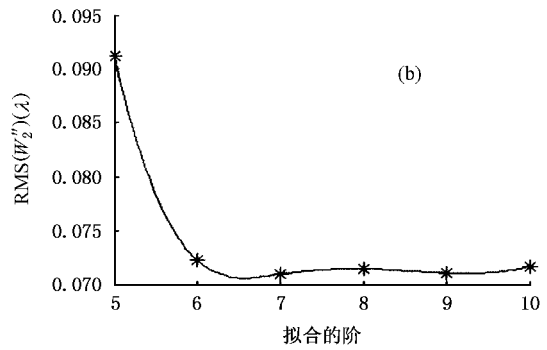
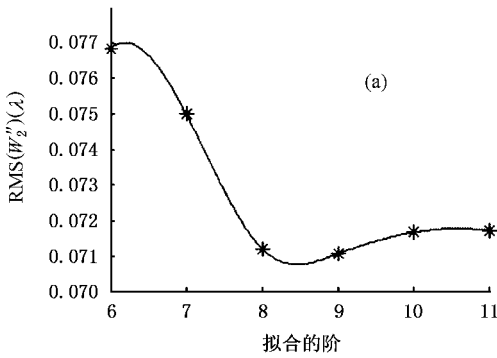


图 6 $RMS(W''_2)$ 随拟合阶数的变化关系

办法之二. 当中频面形 W_2 在被检区中的分布大致均匀时,有:1) $n = n_0$ 时 W_2 中央和边缘处的均方根值大致相当,此时 $RMS(W_2)$ 和 $RMS(W'_2)$ 差异较小;2) $n < n_0$ 时低频波像差残留且在 W_2 中央和边缘处取值不同,导致 $RMS(W_2)$ 和 $RMS(W'_2)$ 之间

出现较大差异;3) $n > n_0$ 时 W'_2 边缘衰减明显, $RMS(W_2)$ 和 $RMS(W'_2)$ 的差异亦较明显. 因此可以认为,在 $RMS(W_2)$ 和 $RMS(W'_2)$ 之差的绝对值 ($|RMS(W_2) - RMS(W'_2)|$) 随 n 的变化关系图中,最小绝对值对应的 n 可以作为 n_0 的估计值.

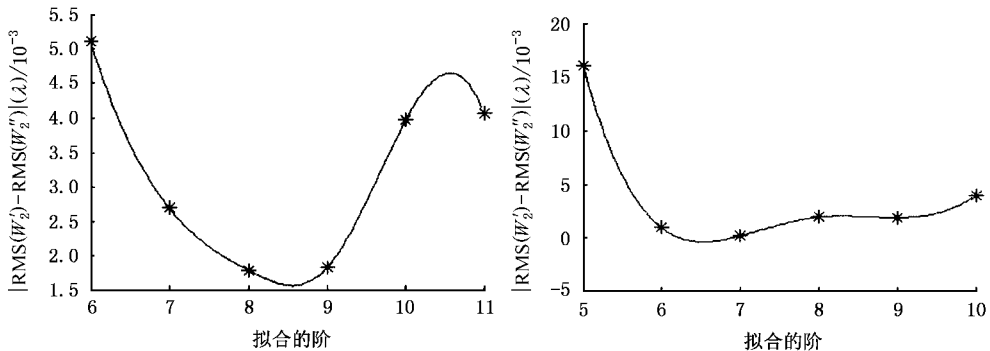


图 7 $|RMS(W_2) - RMS(W'_2)|$ 随拟合阶数的变化关系

求出被检测面分别为近柱抛物面(图 7(a))和近柱双曲面(图 7(b))时 $|\text{RMS}(W_2') - \text{RMS}(W_2)|$ 随拟合阶数 n 的关系图. 在(a)中, $n=8$ 和 $n=9$ 时的差值绝对值相同, 均为最小, 但 $n=9$ 更靠近函数的极小值点, 故取 $n'_0=9$; 在(b)中, $n=7$ 处的差值绝对值最小, 故取 $n'_0=7$. 由该方法得到的 n_0 估计值 n'_0 与 n_0 的真值相同, 足见该方法具有相当的可靠性.

5. 结 论

以 ZEMAX 和 MATLAB 为主要工具, 模拟了曲面拟合法对特定近柱抛物面和近柱双曲面检测时波前像差的处理过程; 为了定量评价曲面拟合法的处

理效果, 采用 W_2 和 W_2' 之差的均方根值 $\text{RMS}(\Delta W_2)$ 作为精度指标. 模拟的结果表明, 对振幅为 0.1λ 的中频正弦型面形, 特定近柱抛物面和近柱双曲面检测时对应的 $\text{RMS}(\Delta W_2)$ 分别可达 0.015λ (8.25nm) 和 0.013λ (7.15nm).

分析了拟合阶数对精度的影响, 确认存在一个特殊的阶 n_0 , 它使曲面拟合法的精度达到最高; 还分析了无加工误差理想近柱面所对应的波像差 W_1 对精度的影响, 结果表明, 对不同的 W_1 , n_0 的值和 $n=n_0$ 时对应的 $\text{RMS}(\Delta W_2)$ 值都不同. 在实际检测过程中, 为了尽可能的提高曲面拟合法的精度, 需要对 n_0 的值进行估计. 为此提出了两种估计 n_0 值的方法, 得到了和 n_0 真实值完全符合的估计值, 表明这两种方法是行之有效的.

[1] Thompson P L and Harvey J E 1998 *SPIE* **3444** 526

[2] Glatzel H *et al* 1994 *SPIE* **2210** 360

[3] Geary J M 1987 *Optical Engineering* **26** 1125

[4] Geary J M 1989 *Optical Engineering* **28** 217

[5] Alfred Gatzweiler and Holger Glatzel 1995 *Applied Optics* **34** 7207

[6] Ouyang Z Y, Li C L and Zou Y L 2003 *Space International* **2** 2 (in Chinese) [欧阳自远、李春来、邹永廖 2003 国际太空 **2** 2]

[7] Sun Q, Yu B, Wang Z Q, Mu G G and Lu Z W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 756 (in Chinese) [孙强、于斌、王肇圻、母国光、卢振武 2004 物理学报 **53** 756]

Investigation of the precision of curved surface fitting in the measurement of near-cylindrical surfaces' mid-wavelength deformations

Xie Ben-Chao^{1,2)} Lu Zhen-Wu¹⁾ Li Feng-You¹⁾

¹⁾ State Key Laboratory for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

²⁾ Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 20 September 2004; revised manuscript received 25 October 2004)

Abstract

The application of curved surface fitting for the disposal of the wavefront aberrations got in the measurement of certain paraboloid and hyperboloid is studied. It is found that, for mid-wavelength deformations with an amplitude of 0.1λ , results can be obtained with RMS error smaller than 0.015λ and 0.013λ separately. The existence of a special fitting order which leads to the smallest RMS error is affirmed. To find out the special fitting order, we work out two methods which help us get the order's value successfully.

Keywords: optical testing, near-cylindrical surfaces, curved surface fitting

PACC: 4225H, 0760L, 0270