

非球面及非球面测量技术

乔玉晶¹, 吕 宁²

(1 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2 哈尔滨理工大学 计算机与控制学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:为了对非球面进行行之有效的测量,从非球面的面形描述和光学特点出发,对非球面各种测量方法进行了优缺点的对比和研究,同时对目前非球面检测技术面临的问题进行了阐述,并给出了对深度非球面测量可用的方法和应当解决的问题。

关键词:非球面;非球面测量技术;零位补测量;非零位补偿测量;计算全息干涉测量

中图分类号:O174

文献标识码:A

文章编号:1672-0946(2005)03-0357-05

Study on aspheric surface and aspheric measurement

QIAO Yu-jing¹, LV Ning²

(1 School of Mechanical & Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2 School of Computer & Control, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to have a efficient method for testing aspheric surface, basing on aspheric surface finctions and features of aspheric optic, this paper studies the advantage and disadvantage of testing method for aspheric surface, and discusses the problems that is faced with testing method of aspheric of aspheric surface at present. Puts forward the adaptive testing method and ought to solve problems for the steep aspheric surface.

Key words: aspheric surface; aspheric testing method; null measurement; non-null measurement; computer-generated hologram interferometry

所谓非球面光学元件,是指面形由多项高次方程决定、面形上各点的半径均不相同的光学元件。非球面镜属于特殊表面,它具有许多独特的性质。如二次曲面在恰当的共轭位置没有球差,将非球面用于光学系统中,能够减少系统中光学元件的数量或能提高成像质量。随着光学精密加工的发展,非球面越来越广泛地应用于各种光学系统中,如:高品质的照相机、摄像机、各种光学测量仪器、扫描仪等。尤其是天文领域,大型的天文望远镜主要是由非球面镜构成。非球面的应用所遇到的困难主要是,非球面的加工,现代光学加工技术的发展,可以加工出高品质的非球面镜。尽管目前发展出多种非球面的检测技术,但对于某些形式的非球面仍然不

能有一个行之有效的测量方法。如:远紫外区投影光刻机,需要所有的光学元件都是反射的,但没有任何反射材料能够被应用在小于 100 nm 的波段内,反射系统如果严格地满足成像要求,就需要许多空间紧密连接的光学元件,而这种想法在反射光学系统中是不能实现的,因为多重镜面会彼此制约并产生各种缺陷。这就使设计人员不得不设计表面形状更加复杂的非球面,即偏离量更大的非对称非球面。但是,用现有的干涉方法检测偶次薄非球面都不容易。因此,非球面的检测技术是制约非球面发展的主要因素。文章的下面部分从非球面的面形描述和光学性质出发,对各种非球面检测技术进行总结说明,并进行优缺点的对比。

收稿日期:2004-12-27.

基金项目:哈尔滨市青年科学研究基金资助项目,项目编号:2004AFQXJ050.

作者简介:乔玉晶(1972-),女,讲师,在读博士,研究方向:测量技术.

1 非球面的面形描述及光学性质

1.1 非球面的面形描述

非球面的基本面形是二次曲面,二次曲面是旋转对称表面,偏离二次曲面的非球面称为高次非球面.二次曲面的面形描述如下式

$$s^2 - 2rz + (k + 1)z^2 = 0, s^2 = x^2 + y^2. \tag{1}$$

其中: z 轴是旋转对称轴; k 叫做二次曲面系数; r 是顶点曲率半径.

可以用弯曲方程表示(即把 z 求出)

$$Z = \frac{s^2/r}{1 + [1 - (k + 1)(s/r)^2]^{1/2}}, s^2 = x^2 + y^2. \tag{2}$$

不同 k 值代表不同形状的非球面,如图 1 所示.

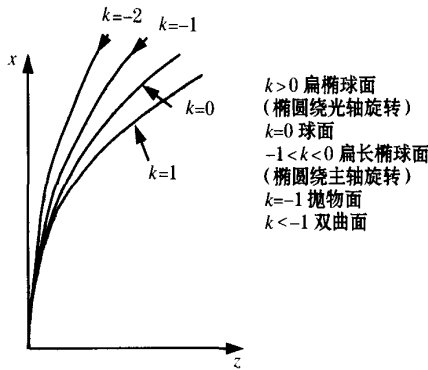


图 1 二次曲面的类型

对于高次非球面,一般用非球面的弯曲度表示法如下式,第一项表示二次曲面,其它项表示该非球面对基准二次曲面偏离情况.

$$Z = \frac{s^2/r}{1 + [1 - (k + 1)(s/r)^2]^{1/2}} + A_4 S^4 + A_6 S^6 + \dots \tag{3}$$

以上表示法是目前通用的表示法,因为由此种方程表示的非球面易于看出非球面相对于基准面的变形,尤其在非球面的光学测量中,主要考虑的是波和波前的状态,用方程(3)很容易得出波前的状态方程.式中 $A_4, A_6 \dots$ 表示高次非球面的多项式系数.

1.2 二次非球面的光学性质

反射镜

这类表面是由平面曲线围绕连结其几何焦点的轴线旋转而成的,几何焦点具有优越性质:若点光源置于几何焦点之一 F_1 上,则被非球面反射的所有光线都严格交于一点——第二焦点 F_2 . 换言之,

几何焦点 F_1 和 F_2 是一对光学共轭无象差点,即光线以任何角度入射在该反射面上都不产生象差.这个性质既应用于复杂的反射系统,也用于最简单的系统,同时也用于非球面质量的无象差点法检验.

折射面

对一理想的椭球面划分开折射率为 n 和 n' 的 2 种介质,在其上入射的会聚光束的定点 F 位于 F_2 . 若此时椭球面的偏心率 $e = n/n'$,则折射光束将转变为严格的平行光束,与入射光束的孔径无关.因为对于椭圆 $e < 1$,所以此性质仅在 $n < n'$ 时存在.显然,如果光线变至相反方向,则光束的结构不变.这个性质可用于检验折射率 $n = 1/n'$ 的透镜的凹椭球表面,该透镜的另一表面——球面的球心同 F_2 重合.从这种透镜的凹椭球面一方射入平行光束,则可以用各种方法检验出射波前的形状,理论上应该是球面波前.如果我们确信透射球面的质量是好的,并知道透射折射率精确等于 $1/n'$,则造成波前变形的唯一原因是椭球面,在此基础上建立一种间接检验的概念,由此可见研究非球面和带有非球面元件的光学性质的重要性.

2 非球面检测技术的研究

在非球面检测研究中,需要讨论非球面一些几何性质和参数,这些是为了选择最适当的检测方法所必需的.非球面检测用参数有:非球面顶点曲率半径、孔径、纵向法线象差和法线与光轴倾角的关系、与最接近比较球面的偏离量、非球面度和非球面度梯度.

非球面度 (asphericity) 是指非球面对最接近比较球面或者平面的偏离量.非球面梯度表示非球面决定在其子午曲线上毫米弧长内非球面度的变化.非球面的偏离量的大小决定测量非球面的难易程度.

目前一般的非球面检测技术可以分为 2 大类:零位补偿测量法和非零位补偿测量法.

2.1 零位补偿测量技术

零位补偿测量是用合适的补偿器,补偿非球面产生的非球面波前,使补偿后的波前成为平面波和球面波,然后和参考波进行干涉,其干涉结果显示非球面的面形偏差.如果补偿后的波前与参考波前完美的匹配,那么干涉条纹就是直条纹,反之,条纹就是弯曲的,弯曲的程度就显示了非球面表面偏离理想表面的程度.如果是畸变补偿,则补偿理想的非球面波前和被测元件的匹配,而不是补偿成球

面波或非球面波。零位补偿测量中最重要光学部分是补偿器,补偿器可以是透射的和衍射的。补偿干涉测量是一种测量精确度很高的方法,而且补偿器可以比被测非球面小很多,因此,补偿法现在广泛地应用于大口径非球面的测量中。传统的透射式补偿器有:offner补偿器和hindle补偿器。一般的传统补偿器根据被测非球面的形状制成单片或多片的形式。因此透射式的补偿器比较复杂,对其本身的精密度的要求也很高,这是因为补偿器的精密度的要求应该高于被测镜的精密度的要求。同时高精密补偿器的成本很高,这由于用以上2种补偿器测量非球面所需要的校正器和测试板与被测镜要同样大小。因此研究者的目光越来越多地投入到了衍射式补偿器,目前,研究最多的是计算全息补偿器。计算全息补偿器最大的优点是能够产生任意形状的波前,原则上,任意形状的非球面都可以用计算全息零位补偿干涉法测量,但对于更深度离轴非球面所需的复杂计算全息存在制造困难的问题。

总的来讲,零位补偿测量方法存在的缺点是:每一套补偿器只能测量一种类型的非球面,而且零位补偿器的设计、制作和它的安置都会限制测量精确度。以上所讨论的是静态补偿装置,静态补偿装置成本高,测量不灵活。自适应零位补偿测量法是一种柔性的测量方法,将自适应元件用作补偿光学系统,可以灵活地测量各种面型的非球面,而不需要改变测量装置,这是因为自适应光学元件能够自动生成各种波前。常用的动态补偿装置有:薄膜反射镜、LCD。动态补偿装置的缺点是,精确度不如静态的补偿装置高。

2.2 非零位补偿测量技术

非零位补偿测量包括干涉测量法和非干涉测量法。非零位测量可以用几何方法测量,如Foucault测量法、叉丝法或Ronchi测量法。以上这些方法同干涉测量方法比,测量的精确度要低。而且干涉测量与非干涉测量法相比,最主要的优点是计算方法非常容易,仪器结构简单,但干涉测量法不如非干涉测量法灵活。非零位干涉测量法也存在着不可避免的缺陷,干涉条纹的密度和共路假设的缺陷,而且,即使被测非球面完美地匹配理想非球面,其干涉条纹也不是直条纹,因此,非零位补偿干涉测量的精度不如零位补偿的精度高。如果在技术上扩展有用的表面测量范围,必须要致力于解决这些问题。非零位补偿干涉测量研究主要的方法有:横向剪切干涉测量、径向剪切干涉测量、亚奈奎斯特干涉测量、高密度探测器阵列、莫尔干涉测量、纹影技

术、双频干涉测量、复频干涉测量。此外,还可用轮廓仪或纹影技术测量。横向剪切干涉测量与纵向剪切干涉测量:两种方法测量的是波前的偏离,而不是波形。这两种测量方法的优点是:能够通过改变剪切的数量来改变灵敏度。横向剪切干涉测量的缺点是对于非旋转对称波前需要2个干涉图,其次必须非常精确地知道剪切的数量和剪切的方向,而且对大偏离的波前测量没什么帮助。因此,横向剪切干涉测量只能测量偏离量小的非球面。纵向剪切测量缺点是通过光瞳的剪切变量在的边缘处最大,而该处通常是最大偏离量的位置,这样,最需要精确测量的位置却无法进行精密测量。

莫尔干涉测量法被认为是全息测量的一种形式,是补偿传统全息测量的方法,尤其用长波测量光学器件具有独特的特性,这是因为莫尔干涉测量能够在长于 $10\mu\text{m}$ 光波条件下测量,或者在不依赖环境要求下,用 $100\mu\text{m}$ 波长测量,且不需要照相装置。因此,莫尔技术广泛地应用在测量小偏离量的非球面。

其他的方法如高密度探测器阵列和亚奈奎斯特干涉测量,测量非球面需要多个探测器,高密度探测器阵列测量非球面时,需要知道被测非球面的非球面度,而亚奈奎斯特干涉测量法假设波前的第一阶第二阶导数是连续的。这2种测量方法测量精度不如双频干涉测量方法的高。

双频干涉是一种莫尔方式,用于抛光表面。长波长是用2个相同表面的干涉图合成,但用的是不同的波长。用一种光波制成的全息板放置在最初位置的后面,然后用另一种波长的光波形成的被测球面的干涉图照明,并用空间滤波去除不必要的成分,结果是干涉图的条纹被分隔开,好像被测表面是用一种波长的波测量一样。双频干涉测量与相位移干涉测量相结合可以获得等效波长的动态范围和单波长的精度^[1]。

2.3 其他形式的非干涉测量技术

纹影技术(Schlieren techniques),如刀口仪测量法和哈曼特传感器测量能够对非球面进行测量。这些方法是对横向畸变进行测量,横向畸变与波前畸变的斜度成比例。例如,用哈曼特传感器测量大的凹面反射镜,一个打孔屏放在被测面前面面对波前进行采样,每个采样点的斜度用几何的方法计算,同时,形成表面斜度图。哈曼特传感器测量不需要零位光学系统,而且对环境条件也很灵敏。但尽管有这些优点,这种方法测量是表面斜度而不是偏差,因此不如干涉测量法精确度高。

光学表面也能用光学的或探针式轮廓仪测量,最适合平面的粗糙度的测量,许多轮廓仪也能测量曲面部件的表面形状.但大多数仅能进行线性扫描,得到的是二维数据.机械式的轮廓仪需要接触表面,这容易划伤元件表面.

通过以上分析我们注意到以上所提的方法没有一种能够真正满足非球面的测量.非干涉测量法缺乏干涉仪的精确度.而干涉测量不能具有足够的柔性,零位补偿测量技术测量方式不灵活,而且传统的零位校正器的检测是比较困难的过程,无法准确知道其潜在的误差.因此,需要一种灵活、简便、精密度高的测量技术测量非球面.

3 计算全息用于非球面的测量

计算全息技术是 Lohmann 和 Paris 在 1967 年提出,将计算全息用于非球面检测技术也有 30 多年的历史,由于计算全息在非球面测量方面的卓越能力而受到越来越多光学制造人员对这种测量方法的期待.目前计算全息主要用于旋转对称非球面的测量,而计算全息最大的优点在于可以模拟任意一种波前,计算全息几乎能象测量旋转对称非球面那样很容易地测量任意面型的光学元件.计算全息用于非球面检测是由美国图森大学在 20 世纪 60 年代末提出并付诸于应用^[2,3].其基本原理也是补偿干涉测量:用计算机产生的全息图纪录相应波前,和被测非球面互补成简单波前,和参考波前干涉,所形成的干涉图就记录了非球面的面形特征.鉴于当时光学制造水平,只能采用传统的感光板曝光压缩放大的方法,计算全息的误差较大,而且不能记录复杂的波前函数,因此,计算全息干涉测量法只能测量偏离量小的非球面,精确度也不是很高.为了测量深度非球面,1974 年, J · C · Wyant 提出用简单的计算全息与造价低廉的球面补偿镜一起构成补偿系统来测量偏离量较大的非球面^[4],并把它用于 Cassegrain 望远镜主镜的测量.该望远镜的偏离量平均 $455 (\approx 0.5145 \mu\text{m})$,非球面最大陡度是 $1500 / \text{radius}$.测量系统首先采用球面补偿镜补偿部分非球面性,再用 CGH 补偿剩余的非球面性.通过实验对比,昂贵的球面补偿系统可以用价格相对低廉的含有 CGH 补偿系统代替.随着激光直写机、电子束直写机的出现,计算全息的制作误差变得很小,甚至可以忽略不计,这使得测量精确度得到大大提高.

进入 21 世纪,计算全息检测非球面的方法变得多样化.如将叉丝安置在 CGH 上,用来辅助 CGH

的安置.或者,将其他的全息图放在 CGH 上用于辅助光学系统的安置或辅助 CGH 的校正. CGH 干涉法与相位移技术相结合会有很高的测量精确度和测量速度.

目前大多数光学干涉测量都采用相移技术,因为相位移是一种高精度且能快速获得干涉图信息并传送到计算机的方法,而且在获取数据的过程中,固有的噪声很低,因此能够对波长或亚波长表面高度进行测量.

CGH 干涉测量也不例外,也采用相位移技术提高其测量精确度和速度.相移干涉测量中的伪干涉条纹会引入误差,但用于相移干涉测量中的 CGH 引入足够的波前倾斜,因此用空间滤波能滤除不需要的衍射级次.图 2 所示即为 CGH 相位移干涉测量法^[5,6],这种测量方法不受环境振动的影响,因为所有帧的相移同时获得.在这个装置中,使用的是泰曼-格林干涉仪,测试光束和参考光束具有正交偏正关系. CGH 既可以放在会聚镜和被测镜之间,也可以放在光学传输装置中. 2 个光束合成后通过全息元件,全息元件将光束分成 4 个单独的光束,结果产生 4 个干涉图.这 4 个光束经过放在 CCD 相机前的双折射模片,双折射模片的 4 个部分分别在测试光和参考光之间的 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 度处引入相位移.这样,在单个探测列上用单拍就可以探测所有 4 个相位移的干涉图.这种测量方法是目前所报道中测量精确度最高的方法,测得的波前误差 RMS 值是为 0.0167 .

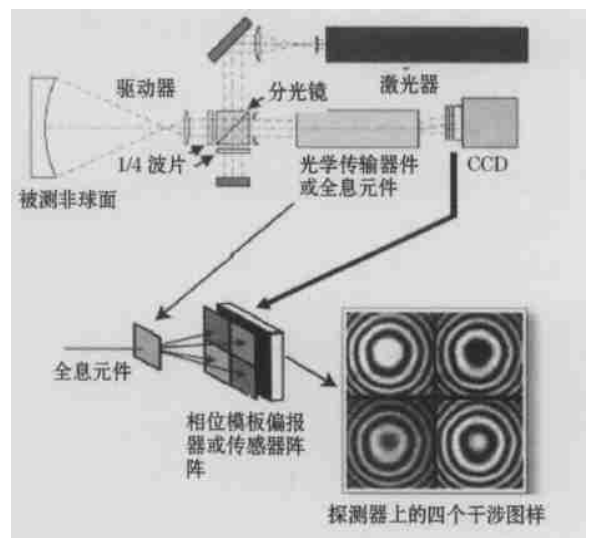


图 2 单帧图干涉仪(PhaseCamd)所示
光束分束和相移模片

4 结 语

随着对非球面越来越广泛的应用,对非球面的测量尤其是深度非球面的测量,是科技工作者不断研究和深入探讨的问题.虽然已经提出多种检测方法,但对大偏离量或大斜度非球面的测量仍没有令人满意的方法. CGH 相位干涉测量因为其卓越的特性和微光学加工技术的发展,能够真正地实现对超深度非球面测量.但对于这种测量方法,仍然存在着下列问题:CGH 能够模拟任意波前函数,但复杂的 CGH 的制造相对困难,同时,单个 CGH 只能测量一种面型的非球面,在测量大型天文望远镜方面成本仍会较高.对深度及超深度非球面的测量是本文要深入研究的课题.

参考文献:

- [1] CREATH K, CHENG Y Y, WYANT J C. Contouring Aspheric Sur-

faces Using Two - Wavelength Phase - Shifting Interferometry [J]. Optica Acta, 1985, 32(12): 1455 - 1464.

- [2] MACGOVERN A J, WYANT J C. Computer Generated Holograms for Testing Optical Elements[J]. Appl. Opt, 1971, 10: 619 - 624.
- [3] WYANT J C, BENNETT V P. Using Computer Generated Holograms to Test Aspheric Wavefronts[J]. Appl. Opt, 1972, 11(12): 2833 - 2839.
- [4] WYANT J C, NEILL P K. Computer Generated Hologram Null Lens Test of Aspheric Wavefronts[J]. Appl Opt, 1974, 13: 2762 - 2768.
- [5] BURGE J H, WYANT J C. Use of Computer Generated Holograms for Testing Aspheric Optics[C]. Tucson: Optical Sciences Center, University of Arizona, 2004.
- [6] WYANT J C. Advanced Interferometric Surface Measurement in the Technology Frontier[C]. Tucson: Optical Sciences Center, University of Arizona, 2004.

(上接 356 页)

5 结 语

本文提出了设计优化与运行优化作为统一体的系统优化思想.并将此用于组合式空调系统方案的确定.通过进行系统的仿真优化,得到各可能方案在优化运行工况下的能耗,并以此作为设计方案选择的重要依据.该优化思想可在冷水机组、锅炉等设备的设计中用于台数及匹配的确定.为寻求各城市组合变风量系统风机设置的最佳组合与最佳运行模式,本文以最小能耗为目标,建立组合变风量空调系统风机运行的数学模型,采用遗传算法对其进行寻优计算,得到了优化运行时各城市方案 K_1 和方案 K_2 在过渡季的运行电耗.各城市的优化设计方案均为 K_2 ,并且需按照文中的优化方式运行.如果采用方案 K_3 (S_1 为 VAV, S_2 为 2 台 VAV),则节能效果会更好.

参考文献:

- [1] 赵加宁,郭 骏.组合变风量空调系统研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(12):1717 - 1720.
- [2] 周 明,孙树栋.遗传算法的应用[M].北京:国防工业出版社,1999,18 - 19.
- [3] ZBIGNIEW M, CEZARY ZJ, JACK B K. A Modified Genetic Algorithm for Optimal Control Problems[J]. Computers Math. Applic, 1992, 23(12):83 - 94.
- [4] 许海平,张 彤,王子才,等.浮点数编码遗传算法及其在电站机组组合优化中的应用[J].小型微型计算机系统,1999,20(8):578 - 582.
- [5] BACK T. The Interaction of Mutation Rate, Selection and Self - adaptation within a Genetic Algorithms [M]. Parallel Problem. Solving from Nature, Amsterdam. North Holland, 1992. 84 - 94.
- [6] SRINIVAS M, PATNAIK M. L. Adaptive probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans. On System, Man and Cybernetics, 1994, 24(4):656 - 667.