

光学 非球面 检验

(苏) Д. Т. 普里亚耶夫 著

内 容 简 介

本书讨论了构成高性能光学系统的光学非球面质量检验方法,以及实现这些方法所用仪器。论述了检验二次及高次非球面的无象差点法和补偿法。介绍了检验大型望远镜的天文镜面质量的新型补偿器,列出了性能优异的万能补偿器的参数。

本书可供从事光学设计、光学工艺、光学检验工作的有关人员参考,亦可供高等院校有关专业师生参考。

Д. Т. Пуряев

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1976

光 学 非 球 面 检 验

[苏] Д. Т. 普里亚耶夫 著

杨 力 译

潘君骅 校

责任编辑 陈德义 唐友群

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982 年 8 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1982 年 8 月 第一次印刷 印张: 9 1/2

印数: 0001—2,700 字数: 214,000

统一书号: 15031·421

本社书号: 2666·15—4

定 价: 1.50 元

中 译 本 前 言

非球面在光学中占有重要地位，而且随着科学技术的进步，势将获得更广泛的应用和发展。

但到目前为止，制造非球面仍然要比制造球面困难得多，主要是加工手段和检验方法问题。如果在这两方面能逐步形成一套行之有效的方法，则将极大地推动整个光学技术领域。这是因为：一方面它可提高现在已被采用的非球面的生产效率、降低成本、提高产品质量；另一方面它可促使设计者更多地在光学系统中采用非球面，创立性能更为优越的新的光学系统。

本书比较全面地介绍了光学非球面的检验方法，大量列举了各种类型的检验方案。虽然其中有的方案未经实践验证，或只能在一定条件下应用，但对从事这方面工作的有关人员总是会有帮助的。特别当我们要设计或计算一个非球面的检验系统时，本书列举的各类方案及有关公式颇有启发性，值得我们参考。因此，这本书对从事光学设计，加工及检验工作的人员均有一定参考价值。

我国过去一直缺乏有关这方面的参考书，不少同行要我推荐一些有关资料，甚感困难。为适应需要，杨力同志特将本书译出，我本人亦校阅了全文。但愿此书的翻译出版能对我国光学技术领域的科技工作者有所裨益。译文可能会有疏漏，敬希读者指正。

潘 君 骅

1980 年 4 月

• i •

原 序

近年来,无论在我国还是在外国,都对非球面产生了非常大的兴趣。在光学仪器中采用非球面,在很多情况下能够解决重要的实际课题。例如改善象质,提高光学性能,减小外形尺寸和重量,从原则上拟定光学仪器的新型方案等。但是,广泛地实际应用非球面却遇到障碍,主要是加工和检验非球面有困难。精密非球面的加工,不可能没有精度上相适应的检验方法和仪器。因此,本书把最大的注意力放在干涉法上。干涉法具有很高的精度和灵敏度,不仅能够给出定性的、同时还能够给出非球面形状误差的定量结论。干涉法的优点还在于它能够保证一次就完成对表面的检验。

书中讨论了实际所采用的大部分类型非球面的检验法。注重在采用补偿法时对表面质量的干涉研究,而以前(1962年以前)补偿法仅仅用于阴影法研究。本书对所讨论的绝大多数方法做了系统的叙述,这些都是近10—15年来的研究成果。书中所提出的方法和仪器,主要的一些已经过实验验证,并已在生产中采用。

在本书中占较突出位置的是折射式以及折-反射式补偿器的计算方法及其精度特性的分析,在检验系统中补偿器的检验及安装法,叙述各型补偿器的结构。创立了两种原则上全新的万能补偿器,可用于检验在类型和参数上范围很大的一些非球面,例如直径达六米的抛物面,椭球面以及双曲面镜。这些补偿器具有一系列有利性质,按其特性来看在国际上处于领先地位。

首先系统地论述了检验大尺寸球面透镜的补偿法，这些透镜是在莫斯科包曼高等工业学校设计的，采用在天文照相物镜中。由于透镜的通光口径达 500—700 毫米，因此实际上不可能采用传统的借助于和被测表面同等口径的玻璃样板检验的方法。用直径不大于 180 毫米的玻璃样板只能检验透镜表面的个别带区，因此必须多次叠置样板。这样工作的效率和检验的可靠性均不能满足近代光学生产的要求。与样板法不同，补偿法可以一次完成大口径透镜球面的质量检验。必要时，补偿法不仅能够检验这种透镜的表面，同时可以检验透镜整体，包括透镜材料的不均匀性。补偿法可以检验大口径表面及透镜，这个特性具有很大的价值，因为透镜的检验条件在直接的意义上几乎和物镜的使用条件相同。

为避免重复，作者没有讨论在 М. М. Русинов 教授所著《光学非球面》一书^[5]，以及在 Л. М. Кривовяз, Д. Т. Пуряев 和 М. А. Знаменская 所著《光学计量实验室实践》一书^[2]中所论述过的检验方法和仪器，为保持叙述的完整性，所引用的必要的部分材料属于例外。

目 录

中译本前言

原序

绪言	1
第一章 非球面的基本知识	5
1. 非球面的类型及其分类	5
2. 非球面的几何性质	9
3. 二次非球面的光学性质	19
反射(镜)面	19
折射面	22
4. 具有一个二次非球面的透镜	27
理想透镜	27
平凸非球面透镜及其自准法检验	29
校正球差的非球面透镜	35
具有反射镜面的非球面透镜	38
第二章 真空非球面化方法制造的非球面的质量检验	47
1. 光学零件真空非球面化概述	47
2. 光学零件真空非球面化过程中膜层厚度的检验	49
光度法	49
干涉法	51
3. 根据在膜层上产生的干涉图形检验非球面轮廓	55
4. 在泰曼-格林干涉仪上检验真空非球面化方法制造的二次非球面	60
第三章 检验二次非球面的无象差点法	70
1. 方法的理论基础	70
2. 方法的极限可能性	82

3. 用于检验抛物面、椭球面和双曲面的自准直系统·····	84
4. 检验二次非球面的干涉仪·····	90
ИКП-1 型干涉仪·····	90
浸液干涉仪·····	97
检验抛物面透镜的干涉仪·····	106
检验凸双曲面和凹椭球面的干涉仪·····	110
第四章 补偿法·····	114
1. 方法的理论基础·····	114
2. 采用阴影法检验非球面的主要的补偿系统·····	129
3. 用补偿法检验非球面及非球面零件的干涉仪·····	135
补偿器在平行光路中的干涉仪·····	135
补偿器在发散光路中的干涉仪·····	145
重叠支路的干涉仪·····	148
4. 对补偿器的结构要求及计算补偿器的特点·····	150
5. 理想的补偿器·····	156
分隔两种介质的平面·····	156
平面平行玻璃板·····	157
球面反射面·····	160
平凸透镜·····	162
检验凹椭球面的补偿器·····	163
检验凸椭球面的补偿器·····	166
检验平凹双曲面透镜的补偿器·····	167
第五章 检验天文镜面质量的新型补偿器·····	170
1. 万能补偿器·····	170
结构和用途·····	171
应用范围·····	172
补偿器的理论和计算·····	179
补偿器的双曲面的检验方法·····	184
2. 具有用真空镀膜法制造的校正膜层的补偿器·····	187
3. 折反射补偿器·····	198
4. 检验直径六米抛物面镜质量的口径 160 毫米的三透镜	

补偿器	208
5. 检验抛物面镜、椭球面镜及双曲面镜的双透镜万能补偿器	216
补偿器的光学系统及基本特性	217
补偿器的特殊性质	219
补偿器的参数对残余象差的影响以及公差的给定	227
在工作支路中装有补偿器的激光干涉仪的原则性方案	232
补偿器能检验的非球面镜的参数范围	234
6. 卡塞格林望远镜凸双曲面镜的检验	239
第六章 关于补偿法检验高次非球面	248
1. 概述	248
2. 高次非球面的解析程序	250
3. 高次非球面的补偿器的计算	253
直径 1 米的大凹面反射镜	255
直径 290 毫米的小凹面反射镜	261
直径 290 毫米的小凸面反射镜	262
4. 把平面波前转换为非球面波前的非球面补偿器	265
5. 设计与计算用于检验非球面表面及透镜的补偿系统的一般原则	273
关于检验非球面的合理方法的选择	280
参考文献	285
汉俄名词对照索引	290

绪 言

目前,不可能找到一个科学技术领域是不应用光学仪器的。光学仪器的用途、工作原理、构造以及所获得被研究目标的信息容量等方面,其多样化令人吃惊。而且,同样使人惊讶的是,在这些仪器的光学系统中,几乎总是利用了球面或平面。然而,这并没有妨碍光学仪器制造业的发展,而仅仅是把它引向这样的途径,沿此途径,许多光学仪器已经达到了接近于理论上可能的特性要求。

采用球面光学系统的可能性是很大的,然而并不是无限的。科学和技术提出了新的课题,要解决这些课题,只有采用其它形式的光学表面——非球面才有可能。例如,在近代大型望远镜光学系统中,在地球大气范围外使用的天文仪器中,采用非球面是完全必要的,因为它们的重量和外形尺寸都将因此大大缩小。另外,在X射线波段工作的仪器,在其反射面上入射的光线近于掠入射,也必须采用非球面。在很多情况下,光学仪器采用非球面能够解决这样一些重要课题,如改善象质、提高光学特性、简化仪器结构,从而导致缩小外形尺寸减轻重量。这就是为什么光学工作者的注意力,很早就被吸引到光学非球面上来了^[4,7,51,55]。

光学表面是分隔两种物理性质、其中主要是折射率不同的介质的分界面。透镜、棱镜、反射镜和其它光学零件的表面皆为光学表面。任何光学表面在不同程度上(与所分隔的两种介质的物理性质有关),都具有使光线反射或者折射的性质。从物理光学的观点来看,光学表面的作用在于改变入射

其上的波前的方向和形状，按几何光学的观点即改变光线的方向。显然，光学表面是在光学成象仪器中最基本和最重要的元件。属于这类仪器可以列举显微镜、望远镜、天文望远镜、电影机及照相机等。

光学表面质量几乎总是决定所有仪器总体质量的关键因素。所谓表面质量，是指制成的表面同理论形状的符合程度。对于高精度光学表面来说，表面的实际形状相对于理论形状的允许偏差，用光的波长的若干分之一计量，即几十分之一到几百分之一微米。显示这个偏差，确定其正负及大小，便是检验的基本目的，非此则不可能制造光学零件，更不能制作光学仪器。

尽管对于非球面加工质量的要求在很多情况下与球面差不多，但是加工和检验球面的熟知的方法，对于非球面，要么不太适合，要么根本不能用。显然，创造加工非球面的新工艺过程，或者是改善现有的工艺，不可能没有相应的检验方法。因此，当前精密非球面的检验问题中，基本任务是寻求新检验方法，研究其理论基础以及在实验室和生产条件下实际应用的可能性。显然，我们原则性的解决方法愈多，则在每个具体情况下，选择最合理的检验方法的余地就愈大。然而，研究非球面的检验方法仅仅是掌握非球面光学的一个步骤，它与光学系统的计算和制造工艺紧密相关。

近年来，出现了许多具有很高质量的、采用非球面的光学系统的计算结果。但是，这些系统在其计算范围内所取得的成功，远远超过了它们实际应用的可能性。正因如此，非球面的工艺和检验问题具有格外的迫切性。在解决这些问题的道路上有一系列困难，但是也有很多克服困难的方法。在光学仪器中采用非球面，已成为光学仪器发展进程中不可避免的一个阶段。毫无疑问，将来在光学仪器中采用非球面，就如同

现在采用球面那样广泛和自由。非球面将为光学仪器的发展揭示新的途径，并且将提高光学仪器在科学和技术发展中的作用。

本书的目的是要对作者在解决非球面检验问题时得到的一些最重要的成果，加以系统地总结。因此，书中详细讨论了作者自己所研究的一些问题，而对一些广为熟悉的方法和仪器则注意得少些。

在干涉仪上实施的无象差点法和补偿法的研究，以及用真空镀膜非球面化方法得到的非球面的检验法的研究，可以归为最重要的研究成果。这些方法及相应的仪器已经过实验验证，并已在生产中采用。与此同时，作者也对某些原则上全新的、未经实验验证的干涉仪方案加以讨论。因为在这些方案中，形成干涉图形的条件，同熟知的经过实验验证的双光束干涉仪一样，因此所推荐系统实际实现的可能性不会引起怀疑。所以，这些系统最重要的要素是它们的理论论证，优缺点的分析，精度分析和外形尺寸计算，即解决在仪器结构设计中编制技术任务书所必需解决的那些问题。根据作者的观察，工业工作者对这些方案的关注，正是由于缺乏对理论性问题的解答而没有满足。本书能在什么程度上填补这个空白，将由读者来判断。

非球面与球面不同，按其类型、性质、参数、加工精度要求、使用条件等等，具有不可比拟的多样性，因此，创立检验非球面的万能方法或者万能仪器实际是不可能的。每个非球面在很大程度上都是个别的，因此，研究其性质，对于选择合适的检验方法是必需的。

真空非球面化方法近年来得到推广。这种方法是制造与球面或平面偏离很小的（小于20—30微米）非球面的最有前途的方法之一。这种表面的检验方法具有一系列特点。

无象差点法仅仅用于反射式二次非球面。目前,同其它类型的非球面相比,二次非球面得到更多的应用。该方法的理论基础以及实现该方法的干涉仪的主要类型具有重要意义。

补偿法用于检验二次或者高次非球面。这种方法对于大口径(超过200—250毫米)表面的高精度检验最合理,此时,其它方法实际上不能采用。补偿法还实施于阴影法或干涉法检验高精度级非球面质量,因此,它受到最大的注意。

为检验天文镜面的质量研制了新型补偿器。长时间以来一直认为,补偿法的基本缺点是补偿器应用的单一性,即只能检验它计算的那个唯一的非球面。这个缺点对天文镜面而言不存在。万能补偿器可以检验的非球面的类型及参数范围很大(直径六米的抛物面、椭球面及双曲面)。这些补偿器具有一系列有利性质,在国际上的补偿器研究实践中已首次得到。

补偿法应用于高次非球面的检验,具有很大的可能性。具体的计算支持了《最接近》法的概念的有效性。提出并研究了建立及计算检验非球面反射镜及透镜质量用的补偿系统的一般原则。这些原则揭示了补偿法应用的新的可能性,并指出了其进一步发展的途径。

第一章 非球面的基本知识

1. 非球面的类型及其分类

在光学系统计算过程中,光学设计者为了缩小外形尺寸,减轻仪器重量,提高光学性能,改善成象质量,必须在光学系统中引入一个或几个非球面(АП),其类型及参数取决于具体的计算要求。在绝大多数情况下,光学系统采用旋转面,其直角坐标系 x, y, z 的原点同该表面顶点重合,而旋转轴线同系统的光轴重合(x 轴)。此时,确定表面的如下形式最为适用

$$y^2 + z^2 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n = 0; \quad (1)$$

$$x = A_1(y^2 + z^2) + A_2(y^2 + z^2)^2 + \cdots + A_n(y^2 + z^2)^n. \quad (2)$$

根据专用程序,在电子计算机上进行光学系统计算时,经常利用这些公式。研究非球面的性质时,给出表面的子午曲线方程已经足够了,其直角坐标系 x, y 的坐标原点同曲线顶点重合,而对称轴(旋转轴)同系统光轴重合。在这种情况下,非球面的最常用类型,可以用决定非球面轮廓的平面曲线方程来确定:

$$y^2 = a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n; \quad (3)$$

$$x = A_1y^2 + A_2y^4 + \cdots + A_ny^{2n}. \quad (4)$$

方程(4)主要用于对平面偏离较小的施密特型非球面(планоидные поверхности)。熟知的一些确定非球面形状的其他公式,用得很少,例如在方程(3)中变量 x 的方次含有小数的形式。如果非球面是旋转面,则在已指出的坐标系选择

下,任何形式的方程式中,变量 y 只应含偶次项。

对于偏离球面较小的表面,有时用极坐标描述表面形状,坐标原点(极)配置在曲线顶点的曲率中心。在这种情况下,表面轮廓方程为

$$R = r_0 + a_1\varphi^2 + a_2\varphi^4 + \cdots + a_n\varphi^{2n},$$

式中 R ——曲线指定点的矢径; r_0 ——曲线顶点曲率半径;
 φ ——矢径与轴线间的夹角。

在光学仪器中,二次表面得到广泛应用。如所周知,这些表面具有一系列有益的光学性能,相对于其它类型非球面,它们占据了特殊位置。因此,直到如今,把所有类型的非球面分为二次曲面和高次曲面,已成为传统的惯例。子午曲线用高于二次以上的方程来描述者,照例归于高次非球面。当同一个非球面可以用不同类型的方程描述时,选用其中最简单的。需注意的是,非球面方程的形式根本不决定其加工及检验的难易,因为根据方程所包含的项数不可能决定非球面的那些最重要的特性,例如相对于最接近比较球面的偏离量,非球面度的梯度,孔径等。为确定这些特性必须进行补充计算。由于方程(1)和(2)中各项系数的多样性,因此对于高次非球面的性质不作一般性研究,只在每一具体情况中阐明。

在二次非球面中,圆柱面和圆锥面占有特殊位置。圆柱体型的圆柱面与所有其它类型的非球面不同,它的旋转轴与光轴垂直。圆柱面在一个截面中是圆弧,在另一个截面中是与光轴垂直的直线。在光学系统中采用的锥面,是由与光轴成一角度的直线围绕光轴旋转形成的。用在摄影物镜中的锥面,通常其顶点角度很大,接近于 180° 。

由于非球面的应用不断扩大,因此现在有必要对其中最常用的加以分类。任何一种分类法^[56],都是以被分类对象的最主要特征为依据的。对于非球面而言,这种特征包括由于

午曲线方程所决定的表面的类型和制造精度要求。在此基础上，所有非球面可分为两大类型：二次表面和高次表面（图1）。此外，分出与球面^[8,19]或者与平面偏离较小的一类非球面是恰当的。由于这类非球面的方程可能是二次的，也可能是高次的，因此它占据两大基本类型的中间位置。与球面或者平面偏离较小的非球面（几个微米的数量级）的加工及检验方法比其它类型非球面要简单得多，因此在光学系统中经常遇到。

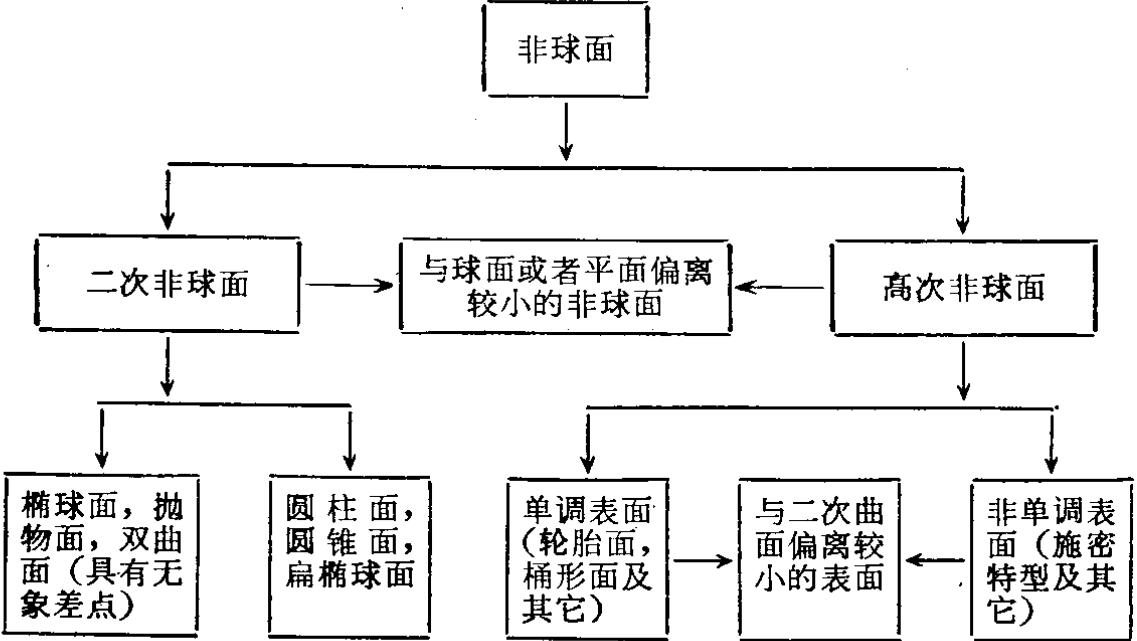


图1 非球面的分类

所有二次非球面又可分为两类。第一类包括的表面具有优越的光学性质——有一对无象差点，即二次曲线的几何焦点。这些表面由二次曲线围绕连结其几何焦点的轴线，旋转而成（伸长的旋转椭球面，抛物面和双叶双曲面）。这些表面的光学性质广泛用于不同用途的仪器，也应用于它们表面质量的检验。

第二类表面包括圆柱面^[9]，圆锥面^[10]和扁椭球面（椭圆围绕其短轴旋转形成的曲面）。其中应用得最广的是圆柱面，主

要用在形成变形象的光学系统中。

高次非球面分为单调子午曲线的表面(单调表面)和非单调表面(施密特型及其它型)。圆围绕一条不与它相交的直线旋转形成的轮胎面^[20, 37];圆弧围绕一条平行于其弦的直线旋转形成的桶形表面,都属于单调高次非球面。其它单调曲线围绕其对称轴旋转形成的表面(没有专门的名称),也属于这一类型单调表面。

对于很多高次非球面,可以找到与其偏离最小的相应的二次非球面。显然,与二次非球面偏离较小的表面可以是单调的,也可以是非单调的,因此,它们应占据单调和非单调非球面的中间位置。

现在讨论按制造精度要求对非球面分类。根据非球面的用途,这些要求可以在非常大的范围内变化。对于应用在高质量光学系统、例如摄影物镜中的非球面,其精度要求与球面一样。

设想对于任意一个非球面有一块理想的样板,并且可以精确地叠置于被检验表面上。则实际非球面与理想形状的偏差,可以用干涉圈数 N 和局部差 ΔN 来表征,和在球面中采用的一样。如所周知,一个干涉圈相当于玻璃样板和被检验表面之间,具有半个波长的空气间隙(对于可见光范围约为0.25微米)。这个间隙的大小是在非球面的法线(标准面或者是被侧面)方向测量的。于是,该非球面的 N 和 ΔN 值简单且直观地确定了精度要求,而无须改变习惯上的概念,尽管实际的样板不存在。此外,在干涉仪方案中用补偿法检验非球面时,根据干涉图形状来评价表面质量和用玻璃样板完全一样。在这种情况下,从补偿器出射的波前起了玻璃样板的作用。用 N 和 ΔN (表1)表示的对非球面的质量要求,容易转换成其它形式的公差,例如非球面法线的角偏差。

如所周知,由反射面的局部偏差引起的波前变形量,大约是折射面同样的局部偏差引起的波前变形量的四倍。然而这并不意味反射面形状的允许偏差总是折射面的四分之一。问题在于,为了保证同样大小的波象差,反射式非球面对最接近比较球面的偏离量,亦应为折射面的四分之一,因此,反射面与折射面的相对制造精度大致相同^[7]。

表 1

精度等级	非球面的 类型	精度要求	
		N	ΔN
高精度	反射面	1	0.1—0.2
	折射面	1—2	0.2—0.3
中等精度	反射面	2—3	0.1—0.5
	折射面	3—4	0.3—2
低精度	—	5 及更多	1—5

当然,所列出的 N 和 ΔN 值只算作一种大致的特性,但是它反映出了关于精度等级的确定的概念。需要注意的是,所说非球面的制造困难,指的是高精度或中等精度的非球面。现在工业部门已掌握制造低精度非球面的方法,这些非球面在不是为了得到高质量的光学象的仪器中得到应用(例如,作为聚光镜,放大镜,反射镜等等)。下面我们将要讨论的主要是高精度及中等精度的非球面,其检验方法主要是干涉法和阴影法。

2. 非球面的几何性质

我们仅仅讨论非球面的这样一些几何性质和参数,它们