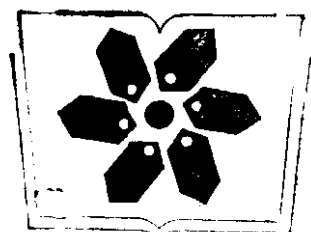


新光学系统的 计算机设计

王永仲 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

新光学系统的计算机设计

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书集中讨论高次非球面系统、二次非球面系统、不共轴系统和特殊形面系统在计算机上的光线追迹、象质评价和自动最优化设计。

在计算方法、数学建模、优化理论、优化技术和程序中关键问题的处理方面,本书阐述了若干新的观点和方法,且结合各种光学系统的自动设计实际,以计算机输出的现场信息为依据,对自动优化的主要技术问题和程序处理做了分析说明。

本书可供高等院校光学仪器、应用光学专业及其相近专业的师生、研究生阅读,也可供从事光学工程专业的技术人员参考。

新光学系统的计算机设计

王永仲 著

责任编辑 马长芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

东华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行,各地新华书店经售

1993年10月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1993年10月第一次印刷 印张: 15 3/4

印数: 1—1100

字数: 348 000

ISBN 7-03-003481-3/O·621

定价: 14.00元

前 言

光学仪器的发展使得作为其核心部分的光学系统远远超出传统共轴球面系统的范畴。在高科技领域，在军事工程上，在武器系统和许多现代化生产过程中，非球面系统、不共轴系统和包含各种新形面的复杂光学系统的应用越来越多。如果说共轴球面系统的设计和计算已够繁琐的话，则这些新系统就更令人望而却步了。其设计和计算的严重困难不仅在于它们结构的特殊和复杂，还由于许多经典的概念、理论和方法对它们不再适用。

人们对共轴球面系统的认识和实践已很充分，出版了许多专著，但关于以上新型复杂系统的讨论和分析还很匮乏，全面阐述其设计和计算的书籍则更少见。光学自动设计在共轴球面系统中取得了极大成功，而关于这些新系统的计算机设计却还是个新课题。系统讨论此类问题的书籍基本还是空白。这种状况亟待改变。为引起广泛注意和讨论，促进了解与交流，遂将自己点滴认识提炼总结而成此书，希望对弥补现有书籍的不足有所裨益。

从内容说，本书是《光学设计与微型计算机》（国防科技大学出版社1986年版）的续篇。它集中阐述非球面系统、不共轴系统和新形面系统在光路计算、象质评价及自动设计中所出现的新理论问题和技术问题。全书共六章：前两章讨论二次和高次非球面系统；第三章阐述各种特殊形面对光束的传递；第四章研究不共轴系统中的坐标变换和光线追迹；第

五章探讨不共轴系统和新形面系统的自动最优化设计；第六章以各类典型系统的计算机设计为例进行设计分析。

以上都是同类书籍不曾涉及或涉足甚少的内容。作者斗胆献丑，将己一隅之见和盘托出，唯图以此叩开同行专家施教之门，求得指导。

学部委员苏定强曾在百忙中热忱赐教；知名学者董太和、高伯龙、徐大雄、丁汉章、陈晃明、周立伟、袁旭沧为指导作者花费了大量心血；周仁忠、陶纯堪、项敏达等专家为使本书增色付出了辛勤劳动；刘京郊、张学庄、郁启华等都给予了指点和帮助；研究生马长芳、李勇、余新和为课题研究做出了创造性贡献；徐大雄教授审阅书稿并提出宝贵意见，在此一并致谢！同时，感谢北京理工大学工程光学系的老师和领导！感谢况惠孙、薛鸿陆教授的指导和支持！感谢所有同仁和朋友！

王永仲

1992年5月于国防科技大学

目 录

前言

第一章 非球面系统的光路计算与象质评价	1
§ 1-1 非球面的应用前景	1
§ 1-2 高次非球面的光线追迹	2
§ 1-3 高次非球面轴外物点的细光束焦点	11
§ 1-4 高次非球面象差计算公式汇集	14
§ 1-5 二次非球面系统的光线追迹	23
§ 1-6 二次非球面轴外物点的细光束焦点	26
§ 1-7 非球面系统光路计算程序框图	28
§ 1-8 非球面系统轴外物点细光束焦点计算框图	32
第二章 非球面系统的自动设计	34
§ 2-1 概述	34
§ 2-2 高次非球面系统自动设计的难点	37
§ 2-3 高次非球面系统的象差特征	44
§ 2-4 复合优化理论与新型象质抽样	51
§ 2-5 预优化技术及其应用	60
§ 2-6 新的病态处理技术	63
§ 2-7 自变量增量的确定与比较过程	74
§ 2-8 自动设计程序中的质量指标	79
§ 2-9 自动设计程序中的若干问题	84
第三章 新光学形面的光线追迹	100
§ 3-1 概述	100
§ 3-2 圆柱面	101
§ 3-3 圆锥面	108

§ 3-4 菲涅尔透镜	115
§ 3-5 镯面及一般双曲率面	134
§ 3-6 光栅	150
§ 3-7 全息面	167
§ 3-8 理想面	214
§ 3-9 虚设面	220
第四章 非共轴光学系统的光线追迹与象质评价	226
§ 4-1 引言	226
§ 4-2 不共轴状态的描述及坐标变换	229
§ 4-3 入瞳与光线起始坐标	236
§ 4-4 光路计算过程与结果	242
§ 4-5 初始象面方位与象质评价	246
§ 4-6 最佳象面位置的自动优选	260
第五章 复杂光学系统的自动设计	270
§ 5-1 导言	270
§ 5-2 实现自动设计的技术难点	271
§ 5-3 数学基础	276
§ 5-4 特殊的光线抽样	284
§ 5-5 边界光线及抽样点坐标	289
§ 5-6 切比雪夫积分型质量函数	293
§ 5-7 优化指标的遴选	298
§ 5-8 结构参数自变量及其增量	308
§ 5-9 边界约束与违背查处	319
§ 5-10 线性检查与变步长迭代	326
§ 5-11 不收敛和无解状态的处理	330
§ 5-12 有关技术问题	335
第六章 设计实例与分析	342
§ 6-1 二次非球面系统	344
§ 6-2 高次非球面系统	378

§ 6-3	圆柱面系统	436
§ 6-4	圆锥面系统	459
§ 6-5	非共轴系统	470
§ 6-6	光焦度为零的系统	484
参考文献		496

第一章 非球面系统的光路计算与象质评价

§ 1-1 非球面的应用前景

大家知道,广泛采用非球面结构是光学仪器追求已久的目标。但由于非球面系统设计的极度困难和加工检测的超常繁琐,这一愿望久未实现。随着光学仪器应用的发展,光学系统正越来越多地与高精度光电探测器件、CCD阵列元件、光导纤维、计算机接口等耦合使用。这些场合常希望光学系统以最小的外形尺寸和最简单的结构组成取得最好的光能传输质量,甚至要求光能集中程度达到或接近衍射极限,而军用光学仪器在这方面的要求则更迫切。显然,传统的球面光学系统早已不能全面满足这种日趋强烈的要求,因而在光学仪器中广泛使用非球面光学系统的呼声越来越高。

在日本,机械产业界在80年代对技术发展课题进行了征询调查,其中关于光学仪器发展的调查对象是30名光学仪器专家和23个照相机生产厂家。结果,确认普及非球面是镜头发展方向者,在被调查专家中占80%,在厂家中占86%。日本应用物理学会光学恳谈会旨在引导光学产业新潮、开拓光学技术新领域、发展光学仪器和推广新技术,它把“非球面的设计及应用”作为第十三届光学新技术讲座的一大专题(见其1987年专辑)。

西方发达国家从未间断非球面光学系统的设计和应用研究,在80年代以来的有关国际学术会议中,非球面光学系统

的设计和研 究是其重要内容之一。

从生产制造来说，非球面加工检测的困难正在被克服，有的已经形成先进的工艺和生产流程，不少含非球面的优质光学仪器已经制造出来。我国在这方面业已取得长足进展。当然，非球面系统目前还远未普及，但它代表了一个新的方向，是光学系统发展的一种趋势，其广泛应用将使光学仪器质量出现飞跃。可以断言，非球面的应用前景无限宽阔。

§ 1-2 高次非球面的光线追迹

本书遵循参考文献[1]所定的符号规则，并采用右手坐标系（见图1-1）。

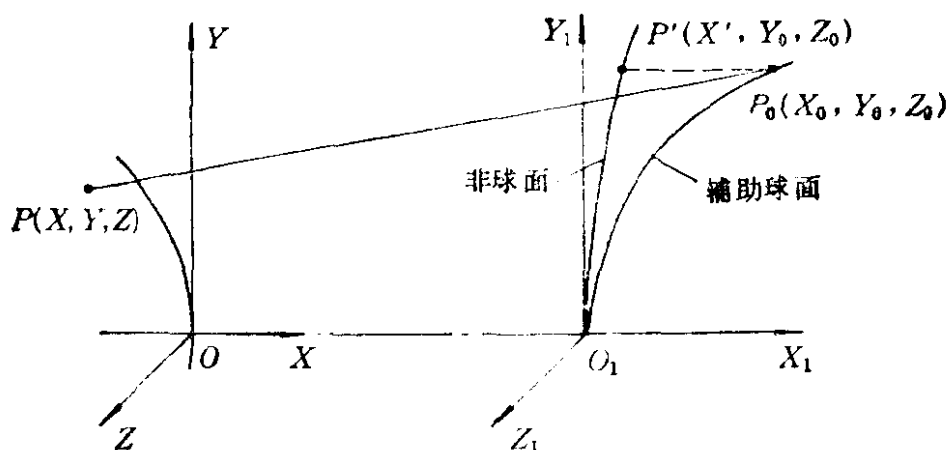


图 1-1

图中， OX 为光轴； OXY 面为子午面；非球面顶点在坐标原点 O_1 。

下式表示轴对称高次非球面：

$$X = cH^2 / (1 + \sqrt{1 - kc^2H^2}) + a_4H^4 + a_6H^6 + a_8H^8 + a_{10}H^{10} + a_{12}H^{12} \quad (1-1)$$

$$H^2 \equiv Y^2 + Z^2$$

$$k = 1 - e^2$$

式中， c 为表面顶点曲率； a_4 — a_{12} 为高次非球面的系数； e 为离心率。

射向该非球面的某光线在前一表面的投射点由矢量 $\mathbf{P}$ 标示，方向由光线行进方向上的单位矢量 $\mathbf{Q}$ 确定。已知入射光线坐标是

$$\mathbf{P} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k}$$

$$\mathbf{Q} = \alpha\mathbf{i} + \beta\mathbf{j} + \gamma\mathbf{k}$$

我们要据此求出该光线在非球面上的投射点和折射后的方向，即求出

$$\mathbf{P}_1 = X_1\mathbf{i} + Y_1\mathbf{j} + Z_1\mathbf{k}$$

$$\mathbf{Q}_1 = \alpha_1\mathbf{i} + \beta_1\mathbf{j} + \gamma_1\mathbf{k}$$

一、求光线在表面的交点

因光线在高次非球面上的投射点不能像在球面上那样一次准确算出，故我们用牛顿切线法实行逐次迭代逼近。本书采用的非球面表达式与文献[1]不同，现将迭代逼近过程简述如下：

(1) 假定有一辅助球面在顶点与高次非球面相内切。按球面系统光线追迹的矢量方法^[2]求出光线与辅助球面的交点 $P_0 (X_0, Y_0, Z_0)$ ，即

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X - d + \alpha D \\ Y_0 &= Y + \beta D \\ Z_0 &= Z + \gamma D \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

(2) 在高次非球面上找第一逼近点 $P'(X', Y_0, Z_0)$ 。
方法是从 P_0 作光轴的平行线与非球面交于 P' ，于是 P' 点的坐标必满足式 (1-1)，即

$$X' = cH_0^2 / (1 + \sqrt{1 - kc^2H_0^2}) + a_4H_0^4 + a_6H_0^6 + a_8H_0^8 + a_{10}H_0^{10} + a_{12}H_0^{12} \quad (1-3)$$

式中， $H_0^2 = Y_0^2 + Z_0^2$ 。

(3) 过 P' 点作高次非球面的切面，该切面方程

$$(X - X') - m(Y - Y_0) - n(Z - Z_0) = 0 \quad (1-4)$$

可按多变量函数理论求出。式中

$$m = Y_0[(c/\sqrt{1 - kc^2H_0^2}) + 4a_4H_0^2 + 6a_6H_0^4 + 8a_8H_0^6 + 10a_{10}H_0^8 + 12a_{12}H_0^{10}] \quad (1-5)$$

$$n = Z_0[(c/\sqrt{1 - kc^2H_0^2}) + 4a_4H_0^2 + 6a_6H_0^4 + 8a_8H_0^6 + 10a_{10}H_0^8 + 12a_{12}H_0^{10}] \quad (1-6)$$

(4) 求光线与上述切面的交点 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 。

设 $\overline{P_0P_1} = l$ ，则按直线方程有公式

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_0 + \alpha l \\ Y_1 &= Y_0 + \beta l \\ Z_1 &= Z_0 + \gamma l \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

又因为 P_1 点的坐标应满足切面方程式，故可将式 (1-7) 代入式 (1-4)，求得

$$l = (X' - X_0) / (\alpha - \beta m - \gamma n) \quad (1-8)$$

以此代入式 (1-7)，即得 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 。

(5) 由 P_1 作光轴的平行线，并把此平行线与非球面的交点作为第二逼近点，按高次非球面方程重求新的 X' 值。

(6) 判定 $|X' - X_1|$ 是否小于预定数值 δ 。

若 $|X' - X_1| \geq \delta$ ，则从步骤 (3) 开始重新进行迭代逼近，直至 $|X' - X_1| < \delta$ 为止；

若 $|X' - X_1| < \delta$, 则以 (X', Y_1, Z_1) 作为光线与高次非球面的交点坐标, 并终止迭代过程。

关于上述迭代逼近过程的出发点选取、逼近精度的数值判据、程序设计的大致构思以及其它文献尚未提及的问题, 我们下面要做必要说明。

1. 关于辅助球面

显然, 我们没有采用一般文献资料介绍的从“基准球面”或顶点处的切平面入手寻求迭代起点的作法, 而是提出了“辅助球面”的新概念。

所谓“辅助球面”是这样—个球面, 它在顶点处与高次非球面内切, 并具有可变曲率: 开始, 其曲率 c_1 与高次非球面顶点的曲率相同, 即 $c_1 = c$ 。若光路计算发现实际光线在辅助球面上有“不相交”或“全反射”(即通常所说的“光线溢出”)发生, 则使辅助球面曲率变为 c_2 , 且 $c_2 = 0.1c_1$ 。在按 c_2 重新追迹光线时, 若仍有“溢出”现象, 则再使其曲率变为 $c_3 = 0.1c_2$, …如此等等, 直至完全消除迭代逼近前的光线“溢出”现象, 便可得到光线与辅助球面的交点——后续迭代过程的起始点。

根据上述变曲率的辅助球面概念和作法, 迭代起点肯定可以找到, 而且这个起点应该比较靠近光线与高次非球面的实际交点。

2. 一般文献的疏漏

显然, 本方法与一般文献的根本区别在于迭代起点的选择。我们是取光线与变曲率的辅助球面之交点为起点, 而一般文献介绍的两种取法, 一种是直接以光线与坐标面 $Y_1O_1Z_1$

(见图1-1)的交点为起点；一种是以非球面顶点曲率 c 作“基准球面”，取光线与基准球面的交点为起点。我们在实践中发现，这两种办法都有严重的疏漏，下面进行分析。

在图1-2(a)中，光线与非球面本来确有交点 T_2 ，但由于 $Y_1O_1Z_1$ 面的曲率与非球面曲率相差太大，因而实际光线与 $Y_1O_1Z_1$ 面的交点 P_{01} 比它与非球面的交点 T_2 高得太多，致使由 P_{01} 作光轴的平行线时，此平行线与非球面不能相交 [如图1-2(a) 中虚线 $P_{01}T$]，造成后续迭代根本无法进行。显然，这是第一种办法无可避免的问题。

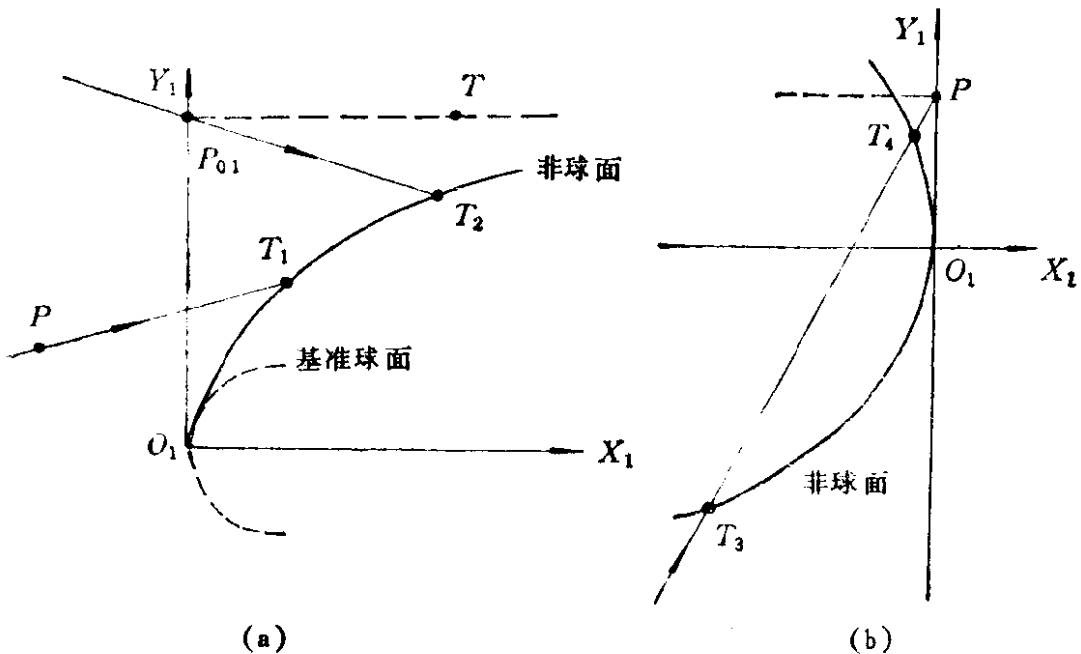


图 1-2

在图1-2(b)中，实际光线 T_3P 本来是在 T_3 点与非球面相交，并相应发生折射（或反射）。但若按上述第一种办法，则迭代过程系以光线与 $Y_1O_1Z_1$ 坐标面的交点 P 为起点，逼近的结果必定在图中 T_4 点的邻域内（邻域的大小取决于逼近精度的数值判据 δ ），于是导致一个错误结果，因为按这种方法是绝对逼近不到实际交点 T_3 的。此类错误十分严重却又难以

由逼近过程本身监察纠正，故是一种更具危险性的疏漏。可见，一般文献介绍的前述的第一种作法不可取。

第二种作法的根本缺陷亦不难分析。因为基准球面恒以非球面顶点的曲率为曲率，如果高次非球面顶点曲率（绝对值）甚大，则投射高度较大的实际光线必在基准球面上发生“溢出”现象。图1-2(a)中光线 PT_1 对基准球面（虚线所示球面）来说即是一条被“溢出”的光线。它与非球面本来确有交点 T_1 ，但由于非球面顶点曲率半径很小，基准球面不可能与光线 PT_1 相交。这里只表示了一种误判为光线“溢出”的错误现象：光线与实际非球面本有交点，而从一般文献介绍的基准球面入手却连迭代起点都找不到。另一种可能出现的光线“溢出”误判也容易想见，实际光线在非球面上本来可以正常折射而不会出现全反射，但由于基准球面曲率太大，实际光线在基准球面上的入射角超过或达到了全反射临界角，于是造成与上述“溢出”类似的错误。

不难理解，光学系统的相对孔径和视场角越大，出现以上问题的危险越多。由于高次非球面多用于大相对孔径或大视场（甚至二者都比较大）系统中，采用一般文献介绍的两种方法时，出现上述错误的情况屡见不鲜。此说并非危言耸听，以上问题都是我们在实践中不止一次碰到过的。我们认为，这是此前一般文献的一个共同疏漏。针对这种情况，我们提出了变曲率的辅助球面概念和相应的处理方法，并在程序中付诸实施。经多种高次非球面系统设计和计算，已证明上述思想是正确可行的。

3. 逼近精度的数值判据及浮动处理

采用迭代方法计算光线与高次非球面的交点，其逼近精

度取决于预定的判据 δ 。显然， δ 的大小还直接影响迭代次数和所用时间。 δ 取值太大，则逼近结果偏离光线实际投射点甚远，光路计算不能准确描述光线的实际行径；若 δ 取值过小，又可能无谓延长迭代时间。这两种情况都是有害的。这里介绍我们所用的基本判据和以它为基础的浮动处理办法。

我们以光波波长作为考虑此问题的出发点。一般从近紫外到中红外这个常用光波段，波长大致是 10^{-4} — 10^{-3} mm量级。我们取约万分之一波长为基本判据 δ_0 ，即

$$\delta_0 = 10^{-8}(\text{mm})$$

为防止 δ_0 的不适，同时考虑到实用光波波长有一个较宽的分布范围，我们在程序中设置了根据迭代实况而自动调节的判据浮动处理功能，其实施过程如下：

若迭代不足10次即达到 δ_0 ，则改判据为 $\delta = 10^{-9}$ ；若迭代50次尚未达到 δ_0 ，则判据改为 $\delta_1 = 10^{-7}$ ；若迭代80次仍未达到 δ_1 ，则判据改为 $\delta_2 = 10^{-6}$ ；若迭代100次也达不到 δ_2 ，则程序报警，打印最终达到的 $|X' - X|$ 实际数值，机器挂停，听候处理。此时，用户可直接启动程序，令其突破100次迭代的限制而继续迭代，亦可输入一个大于1的系数使 δ_2 扩大后再行判断和迭代。

程序实用证明，采用这种基本判据加浮动处理的思想是切实可行的。

4. 简要分析

以上所论两个问题是高次非球面光路计算中必须妥善解决的重要问题，它关系到光路计算的成败，而且每个高次非球面光学系统都无例外地面临这种问题。

关于迭代起点的选择，一般文献介绍的方法，无论是从

顶点的切平面入手还是从所谓基准球面入手，其思路都有一个共同的毛病：在过渡球面（顶点的切面可视为曲率为零的球面）的选取上，采取了静止的、一成不变的概念——顶点的切平面曲率恒为零，而基准球面的曲率则恒为非球面顶点的曲率。不难理解，无论从实际光束的走向，还是从高次非球面自身的结构特点来说，这种固定不变的概念都不适宜。从实际光束而言，随着视场取点的不同和相对孔径的变化，光线在高次非球面上的投射点位置千差万别，它们相对于非球面的入射角度和方位也各不相同。从曲面结构而言，高次非球面各处的曲率和法线方向差异甚大，因而光路计算时，对所有光线毫无区别地都用同一球面或平面来过渡无疑是不妥的。除了上面所分析的错误之外，还可能隐含着另一个不易发现的缺点，那就是迭代起点离光线与非球面的交点太远造成的迭代次数增加（下面有实例）。

基于实践和上述分析，我们摒弃了一般文献介绍的方法，采用了变曲率的辅助球面进行过渡。其宗旨在于，不仅能顺利找到迭代起点，而且希望此起点比较贴近光线与非球面的实际交点，以实现快速逼近。

显然，对于同一高次非球面、同一物面上不同物点发出的光线，追迹时所取的辅助球面一般是不一样的；自同一物点追迹的不同相对孔径的光线，其所用的辅助球面也不尽相同。下面实例可说明变曲率辅助球面方法的使用效果。

在计算文献[6]所列非球面大孔径广角物镜（ $f' = 24.5$ ， $L_f' = 36.5$ ， $2\omega = 84^\circ$ ， $D/f' = 1/1.4$ ）时，若采用一般文献所述的基准球面方法，则光线追迹到第14面（最高次项为10次幂的高次非球面）上时，反复出现不同光线在基准球面（其 $r_{14} = -34.176$ ）上“溢出”，造成计算过程中途停止。若