



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

现代大孔径长焦距全画幅变焦光学系统设计方法研究

作者姓名: 温林凯

指导教师: 孙强 研究员

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

学位类别: 工学硕士

学科专业: 光学工程

培养单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

2019年6月

**Study on Design Method of Modern Large-aperture Long-
focus Full-frame Zoom Optical System**

A thesis submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Science in Engineering

in Optical Engineering

By

Wen Linkai

Supervisor: Professor Sun Qiang

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese

Academy of Sciences

June 2019

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：温林凯
日期：2019年5月27日

中国科学院大学
学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：温林凯
日期：2019年5月27日

导师签名：[Signature]
日期：2019.5.27

摘 要

成像是光学设计的主旋律，随着现代化的高速发展，各行业对成像镜头需求和要求逐步提高，如在摄影、安防、科研、医疗、工业等领域，对镜头的视场、孔径、靶面、变焦比等提出了更高的要求。当前，中画幅、全画幅等大靶面高品质镜头占据着行业发展主流，但国内相关技术水平处于初级发展阶段，高端镜头仍被国外产品所垄断。

传统连续变焦系统高斯结构计算方法难以满足大孔径、长焦距、全画幅变焦镜头的计算要求，本文提出了基于广义拉格朗日乘子法、内点法、修正序列二次规划法三种连续变焦高斯结构最优化算法。结合给定的系统参数及初级像差理论构建一个自定义的目标优化函数，采用像差分布合理的正-负-正-负-正五组结构形式，通过设定合理的普适性参数，利用三种算法优化计算分别获得了焦距 30.356 - 100.243 mm、F/# 2.8(恒定不变)、全画幅五组全动连续变焦系统高斯结构，并对比分析了三种优化算法所获得的变焦镜头高斯结构的优势与不足。鉴于内点法稳健性及在高变倍比优化计算方面的优势，本文又利用内点法优化计算获得了焦距 21.421 - 109.835 mm、F/# 2.8(恒定不变)、全画幅六组全动连续变焦系统高斯结构。

针对结构紧凑广义拉格朗日乘子算法获得的五组全动高斯结构进行了实际镜组替换，获得了焦距 33 - 100 mm、F/# 3.0(恒定不变)、全画幅五组全动连续变焦系统初始结构，并通过控制保持实际系统主平面与高斯结构的一致性，保证初始结构凸轮曲线具有良好线性度。此外，针对内点法获取的六组全动高斯结构进行实际镜组替换，同时控制实际变焦系统主平面与高斯结构一致性，得到焦距 24.67-107.00 mm、F/#为 4.0(恒定不变)、全画幅连续变焦光学系统合理的初始结构。

利用以上设计所得的初始结构，通过减少对凸轮曲线的约束（增加优化设计自由度），同时引入非球面对系统高级像差进行平衡校正，最终获得了焦距 33 - 100 mm、F/# 3.0(恒定不变)、全视场角 24.42° - 66.51° 、全画幅五组全动连续变焦系统设计和焦距 22.183 - 109.808 mm、F/# 3.0(恒定不变)、全视场角 22.28°

-88.58°、全画幅六组全动连续变焦系统的优化设计结构。最终设计变焦系统全视场传递函数在 50 lp/mm 处均大于 0.2，30 lp/mm 处均大于 0.5，满足全画幅高品质成像要求。

关键词：大孔径长焦距，全画幅连续变焦，最优化算法，高斯结构计算，优化设计

Abstract

Imaging is the main theme of optical design. With the rapid development of modernization, the demand and requirements for imaging lenses in various industries are gradually increasing. For example, in the fields of photography, security, scientific research, medical treatment, industry, and etc., put forward higher requirements for the field of view, the aperture, the target image size of the lens, and the zoom ratio. At present, high-quality lenses such as medium format and full-frame are occupying the mainstream of the industry, but the domestic related technology level is at the primary stage of development and the lens in the high-end field are still monopolized by foreign countries.

The Gaussian structure calculation method of the traditional continuous zoom system is difficult to meet the requirements of large aperture, long focal length and full-frame zoom lens. This thesis proposed three optimization algorithms for continuous zoom Gaussian structure optimization based on generalized Lagrangian multiplier method, interior point method and modified sequence quadratic programming. The zoom Gaussian structure optimization algorithm combined the given system parameters with the primary aberration theory to construct a custom target optimization function, and adopted a positive – negative – positive – negative - positive five-group structure with reasonable aberration distribution. The universal parameters were optimized by three algorithms to obtain focal length of 30.356 - 100.243 mm, F/# 2.8 (constant), full-frame continuous zoom system Gaussian structure with five moving groups, and the advantages and disadvantages of the Gaussian structure of the zoom lens calculated by the three optimization algorithms were compared and analyzed. In view of the robustness of the interior point method and its advantages in high-magnification ratio optimization calculation, this thesis uses the interior point method to optimize the structure to obtain the focal length of 21.421 - 109.835 mm, F/# 2.8 (constant), full-frame continuous zoom system Gaussian structure with six moving groups.

The actual lens group was used to replace the Gaussian structure of five moving groups obtained by Generalized Lagrangian Multiplier, and the initial structure of focal length of 33 - 100 mm, F/# 3.0 (constant), full-frame continuous zoom system with five groups was obtained. By controlling the consistency of the principal plane of the actual system and the Gaussian structure, the cam curves have good linearity. In addition, the

Gaussian structure of six moving groups obtained by interior point method were subjected to the actual group replacement, the principal plane of the actual zoom system was controlled to be consistent with the Gaussian structure, and the focal length of 24.67-107.00 mm, F/# 4.0 (constant) was obtained, which is a reasonable initial structure for a full-frame continuous zoom optical system.

Using the initial structure obtained from the above design, by reducing the constraint on the cam curve (increasing the optimization design freedom), and advanced aberration correction of aspherical surface was introduced. The focal length of 33 - 100 mm, F/# 3.0 (constant), full field of view $24.42^\circ - 66.51^\circ$, full-frame continuous zoom system with five moving groups and focal length of 22.183 - 109.808 mm, F/# 3.0 (constant), full field of view $22.28^\circ - 88.58^\circ$, full-frame continuous zoom system with six moving groups was finally obtained. The full field of view modulation transfer function of the final design zoom system have greater than 0.2 at 50 lp/mm and greater than 0.5 at 30 lp/mm, meeting the full-frame high-quality imaging requirements.

Key Words: Large aperture long-focal length, full frame continuous zoom, optimization algorithm, Gaussian structure calculation, optimization design

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 论文主要研究内容	6
第 2 章 变焦系统最优化算法理论	7
2.1 最优化算法概述	7
2.2 广义拉格朗日乘子算法	8
2.3 内点法	11
2.4 序列二次规划算法	15
2.5 三种优化算法特点总结分析	18
2.6 本章小结	18
第 3 章 普适性变焦光学系统的高斯理论	19
3.1 传统及全组全动型变焦光学系统简介	19
3.3 变焦光学系统优化计算目标函数的建立	26
3.4 本章小结	27
第 4 章 30-100 mm 变焦系统初始结构优化计算	28
4.1 广义拉格朗日乘子算法优化计算变焦系统高斯结构	28
4.2 内点法优化计算变焦系统高斯结构	29
4.3 序列二次规划算法优化计算变焦系统高斯结构	31
4.4 三种优化算法结果对比分析	33
4.5 本章小结	33
第 5 章 大孔径长焦距全画幅变焦系统优化设计	34
5.1 变焦系统镜组结构形式选择及初始结构计算（基础理论）	34
5.2 30-100 mm 五组全动型恒定大孔径全画幅连续变焦系统设计	37
5.2.1 构建变焦系统初始结构	37
5.2.2 初始结构非球面设计	46
5.2.3 结论	57
5.3 22-110mm 六组全动型恒定大孔径全画幅连续变焦系统设计	58
5.3.1 构建变焦系统初始结构	58
5.3.2 初始结构再优化	68

5.3.3 结论.....	73
5.4 本章小结	74
第 6 章 总结与展望.....	75
6.1 论文的研究成果.....	75
6.2 论文的创新点.....	76
6.3 未来工作展望.....	76
参考文献.....	78
附录 计算程序（以 GLM 算法为例）	81
致 谢.....	102
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	103

第1章 绪论

本章将围绕论文课题背景、意义展开，阐述国内外目前变焦系统高斯结构求解方法研究现状，并详细列出本文各章主要内容。

1.1 课题背景及意义

随着现代科学技术不断向前发展，各行各业对光学镜头的需求量越来越大，对镜头的视场与孔径提出了更高的要求，如目前受到许多行业关注重视的高端监控领域，用户对大变焦比、大孔径的需求；如在摄影摄像领域对大靶面（全画幅甚至中画幅）大孔径镜头的需求量越来越大；又如在深海科学探测方面，研究人员对变焦镜头的变焦比、镜头的视场、孔径要求较高以更好地在深海等光线较弱的地方仍有较好的成像质量。这就给从事光学设计的研究人员与工程师带来了一定的挑战，一方面大靶面大视场意味着系统的视场像差会比较大，而大孔径虽然意味着系统单位像素接收的信息量大，这同样意味着系统整体孔径像差的增大，意味着镜组承担的光焦度与像差也会相应增加，另一方面为实现较大的变焦比，各镜组光焦度分配必须合理、整体像差校正平衡、光线走势平缓、在变焦过程中像差变化不会出现激增或激减的情况。

针对大靶面大孔径的变焦系统设计，为寻求一个合适的初始结构用于设计，而这又难以从文献或可用的专利上获取，需要研究人员或工程师自己建立，而现有光学设计软件如 Zemax、Code-V 等均采用阻尼非线性最小二乘算法，针对已有的初始结构进行优化设计，其对初始值要求高。如果从一个很糟糕或是不能基本满足初级像差关系的初始点出发，很难收敛到一个好的结构上，对于视场，孔径，成像都有较高要求的变焦系统更是如此。这也正是本文研究出发点，寻求高效建立大视场（大靶面）大孔径大变焦比连续变焦光学系统初始结构的方法。

在传统变焦系统设计中，需要根据经验对变焦系统高斯结构参数主观设定和推导，然后根据镜组相对孔径大小等因素去评判设计的实现性。这种方法需要依赖比较丰富的设计经验，且设计评判具有滞后性，一旦发现人为设定参数不可行，需要重新反复计算，由此设计周期较长，投入的时间与资源也将会增

加。且传统设计往往需要固定组的出现以便于变焦系统参数计算及色差校正，反观当今摄影市场，许多商品化产品均采用全组（即全部镜组）全动方式实现变焦，以日本镜头厂商为例，早已在其产品及专利^[1-3]中广泛采用全组全动型变焦系统，如下图 1.1-1.3 所示。目前各镜头厂商评价镜头成像质量均用 10-30 线对（Line pairs）处调制传递函数（MTF）衡量，如下图 1.4-1.5 所示为目前市面上佳能公司 EF 24-70mm f/# 2.8 及徕卡公司 VARIO - ELMARIT-SL 24 - 90 f/# 2.8 - 4 ASPH 镜头传递函数(10/20/30/40lp)。

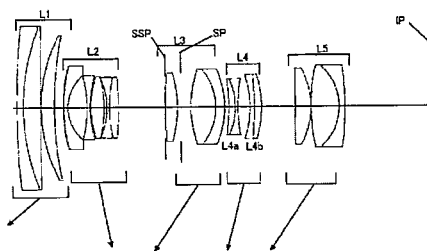


图 1.1 佳能公司 EF 24-70mm f/# 2.8 IS 镜头镜组运动形式

Figure 1.1 Diagram of the movement of Canon EF 24-70mm f/# 2.8 IS lens

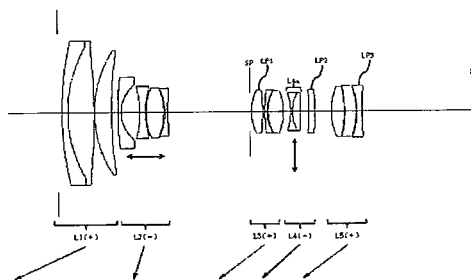


图 1.2 佳能公司 EF-S 18-200mm f/# 3.5-5.6 IS 镜头镜组运动形式

Figure 1.2 Diagram of the movement of Canon EF-S 18-200mm f/# 3.5-5.6 IS lens

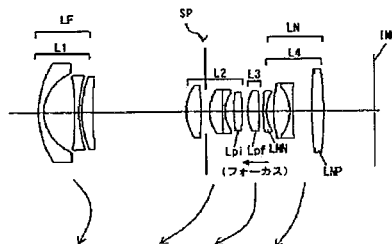


图 1.3 佳能公司 EF-M 16-47mm f/# 3.5-5.6 镜头镜组运动形式

Figure 1.3 Diagram of the movement of Canon EF-M 16-47mm f/# 3.5-5.6 lens

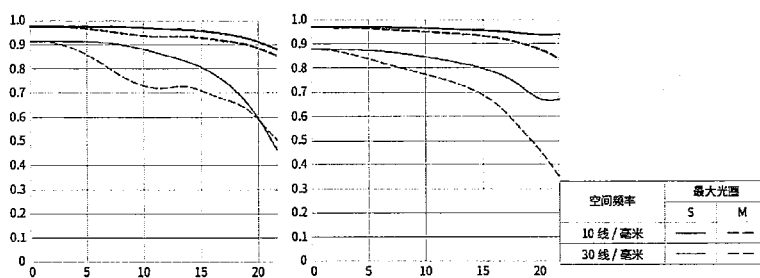


图 1.4 EF 24-70mm f/# 2.8 镜头传递函数示意图

Figure 1.4 Diagram of EF 24-70mm f/# 2.8 lens modulation transfer function

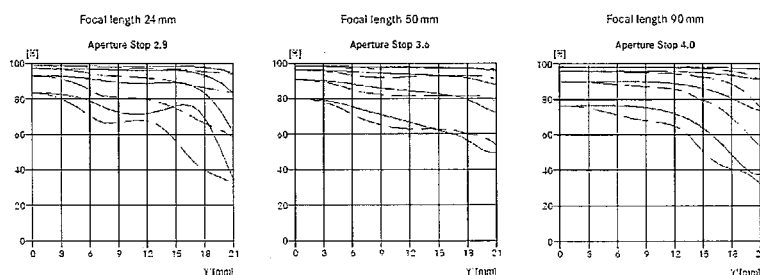


图 1.5 VARIO - ELMARIT-SL 24 - 90 f/# 2.8 - 4 ASPH 镜头传递函数示意图

Figure 1.5 Diagram of VARIO - ELMARIT-SL 24-90 f/# 2.8-4 ASPH lens modulation transfer function

从上述商用镜头传递函数可以看出其部分焦段在 30lp (佳能) 或 40lp (徕卡) 处传递函数值在 0.3 以上, 而镜头的广泛应用及高昂的价格也正显示了此类镜头的实用与设计的不易。

讨论全组全动是更具普遍性意义的, 因为传统设计所采用的具有固定组的变焦结构可以看成是全组全动中某一组运动量为 0。另外, 全组全动镜头对实现大视场大孔径, 缩小筒长等方面具有独特优势, 由此许多著名镜头厂商才将此种形式广泛应用于许多高质量成像镜头设计中。这也正凸显本文研究的意义所在, 结合已发展较为成熟的优化算法与高斯结构参数关系、像差关系求解大变焦比全画幅 (对角线像高约 43.28 mm) 连续变焦系统参数, 减少设计变焦系统初始结构过程中对经验的依赖性及评判的滞后性, 减少对复杂变焦系统设计周期, 同时考虑最具普遍意义的全组全动的形式进行变焦系统设计, 使得该方法具有较大的普适性意义。值得一提的是, 本文提出的方法对大视场大孔径定焦光学系统设计也具有普遍实用性意义, 因为对于定焦系统的设计, 其可以看做是变焦系统设计的特殊形式, 即只考虑一个变焦位置的参数分配问题, 甚至

将调焦时的像差也考虑在内，或是考虑不同物距时成像的权重来设定优化目标。简而言之，本文所提出连续变焦、定焦系统设计的方法对实际系统设计具有参考价值与实用性。

1.2 国内外研究现状

随着机械加工水平的发展，可加工出相对精度较高的各类变焦凸轮曲线，使得在变焦系统中更具优越性的机械补偿式变焦系统得到广泛应用发展。传统变焦光学系统有机械补偿与光学补偿两种，其中机械补偿式连续变焦光学系统相对光学补偿式变焦系统，有着变焦比大，像面稳定，各变焦组运动曲线可变形多样，可实现连续变焦的同时保证成像质量好等优点，而正是得益于现代机械加工工艺水平的提高，精准的凸轮保证了镜组的准确运动，机械补偿连续变焦光学系统几乎占据变焦光学系统全部市场，且几乎所有连续变焦光学系统相关文献也是基于机械补偿式，本文研究主体同样只讨论机械补偿式连续变焦光学系统。

变焦镜头高斯结构的光焦度分配及镜组的运动形式对变焦镜头的设计的影响十分关键，是变焦系统发展过程中不断研究的主要方向之一。早期有 M. Herzberger^[4]提出了高斯括弧法。K. Tanaka^[5-8]将高斯括弧法应用于机械补偿变焦镜头的设计，详细讨论了四组元、五组元变焦系统，实现了的大视场连续变焦光学系统的设计，但是由于其数学形式的复杂性，并未被广大的光学设计师所采用。近年来，国外不少研究人员提出了各种各样的分析求解高斯结构的算法。例如，T. Kryszczyński^[9]等提出可以利用矩阵光学分析多组元变焦镜头高斯结构，T. Milde^[10]等运用差分进化算法与序列二次规划、阻尼最小二乘结合，并将它们运用于变焦镜头高斯结构的求解。Sourav Pal 和 Lakshminarayan Hazra^[11-14]将进化规划算法引进三组与四组元变焦系统高斯结构的优化，国外目前更有研究学者结合三级像差理论（Third-order aberration theory）提出折射式液体调焦透镜^[15-17]及基于折射式液体可调焦透镜的变焦系统。

在国内，陶纯堪^[18-19]运用垂轴放大倍率为参数提出微分方程的方法，其数学形式简单实用具有易于计算等优势，被国内光学设计师所广泛采用。崔军和何国雄^[20]运用高斯括弧法较深入地讨论了全动型变焦距系统的一般近轴特性。崔军^[21]还提出了基于最速变焦曲线，全组全动型镜组光焦度分配及倍率选段的优化规范。

李晓彤、何国雄、岑兆丰^[22-23]将赛德像差、镜组偏角等影响后期光学设计的重要因素包含于自建评价函数,实现了对四组元全动变焦镜头高斯结构的优化。值得提出的是该算法采用的是非线性最小二乘,其对初始值要求非常高,且四组元运动形式较少,组元相对孔径大,不利于像差校正及大孔径大视场变焦镜头的设计。张丽琴^[24]等将序列二次规划用于四组元全动型变焦镜头高斯结构的优化问题,但因其初始值的选择较高,且并未考虑像差问题,镜组相对口径大,实用性不高。王琦^[25]等运用乘加递推算法替代连分式算法结合切比雪夫多项式理论深入优化高斯光学结构参数,解决了任意变焦方式的机械补偿问题,凸轮轨迹曲线的光滑性、奇异点问题。李林^[26]等以组元间距作为优化量,利用乘子罚函数法对单变倍组与单补偿组、双组连动和多组元全动型等变焦距系统的高斯结构参数求解。程雪岷^[27]等提出了针对不同镜组的F/#、视场、放大倍率等为主要参数分析几千个专利镜头构建专家数据库,再从中挑选合适的镜组结构建立变焦系统的初始结构,同时运用阻尼最小二乘算法用于平滑化凸轮曲线。蔡伟^[28-29]等提出了各组元之间的距离来反推出系统各组元的光焦度及系统组元的运动形式。郝群^[30]等利用高斯括弧法实现了一个含有两个可变焦距组元的四组元变焦系统镜组光焦度分配,且达到小型化高变焦比的特性。钟刘军^[31]等提出利用光线正切差、变焦曲线曲率、视场角、系统总长间隔等对变焦系统初始结构参数进行优化计算。张金凯^[32-33]等提出了使用厚透镜模块的变焦透镜系统的像差设计的系统方法,在设计变焦镜组结构的初期便考虑了初级像差,实用性较高。近几年也有研究者将新发展的最优化算法引进变焦系统高斯结构的求解,如黄浩^[34]等提出将粒子群算法用于六组全动高变倍比高斯结构的求解;翟婷婷和朱健强^[35]把组元的光焦度和组元间隔都作为优化变量,以限制系统像面位置、系统总长和 Petzval 场曲作为评价函数,利用粒子群算法求解变焦系统的高斯结构参数。

在上述相关文献中采用的三组或四组全动设计,一旦系统视场较大,像面(如达到全画幅像面大小)较大,导致变焦系统各个镜组相对孔径较大,镜组负担重,轴上及轴外光束主光线入射高度大,高级球差及轴外高级彗差及场曲成为抑制镜头成像质量的因素。由于剩余像差较大,不利于实现进一步扩大视场和孔径。实践证明,采用五组(或五组以上)全动,取线性度较好的凸轮曲线下,各个镜组的相对孔径较小,镜组负担小,像差便于校正,可以实现大视场恒定大孔径连续变焦光学系统的设计。

1.3 论文主要研究内容

本文研究内容围绕全画幅大孔径 ($F/\#3.0$) 连续变焦光学系统初始结构的构建为核心展开, 从五组全动、六组全动的变焦形式出发, 引用 PW 形式的三级赛德像差, 将其加入高斯结构自定义的优化函数当中, 考虑非常简单的镜组运动形式, 借助三种最优化算法, 实现了初始值的任意收敛。所获得的高斯结构是在满足初级像差的情况下得到的, 具有很高的实用性。论文设计目标为 3 倍变焦比全画幅大孔径 ($F/\#3.0$) 33-100 mm 连续变焦光学系统及变焦比近 5 倍全画幅大孔径 ($F/\#3.0$) 22.209-109.791 mm 连续变焦光学系统的设计, 系统设计是以算法所得高斯结构为基础实现实际镜组替换后, 再以此作为初始结构进一步校正系统像差完成设计。本章主要介绍了构建大视场大孔径连续变焦光学系统初始结构方法的意义, 追述了变焦系统高斯结构的研究历史及目前国内外学者的研究进展及现状。后面章节主要工作内容如下:

(1) 第二章, 介绍了本文所采用的三种算法——广义拉格朗日算法、内点法、序列二次规划算法的基本理论与核心思想, 最后分析了三种优化算法各自的特点。

(2) 第三章, 结合本文所采用的五组全动及六组全动变焦系统高斯结构为例, 介绍了全组全动型变焦光学系统的高斯理论, 根据变焦系统为实现 3 倍、5 倍变焦比所要达到的参数关系、变焦过程中变焦系统所需要满足的初级像差关系, 及光线在变焦过程中各镜组的入射角、入射高度等参数构建目标优化函数。

(3) 第四章, 介绍了在给定三种优化算法及其任意且合理的初始值及相应的边界条件后, 运用算法优化计算得到三种高斯结构参数, 在独立分析每个优化结果 (即高斯结构) 后, 整体对比分析了三种优化算法在优化计算变焦系统高斯结构参数上的优缺点。

(4) 第五章, 介绍了光学系统像差参数与镜组结构参数之间的关系, 讨论了实际镜组替换的计算过程。接着进行实际镜组替换, 给出五组全动、六组全动设计实例, 对比分析了对凸轮曲线进行线性度限制对优化结果的影响, 这也证明了目标函数属于高度非线性函数, 其在解域空间存在许多局部最优解 (局部最小解) 的事实, 同时给出设计在沿着凸轮曲线运动过程中各焦段的成像质量。

(5) 第六章, 总结了本文的主要工作及研究成果, 并列出本文的创新点以及对未来进一步研究工作的展望。

第2章 变焦系统最优化算法理论

最优化算法理论不仅在已有变焦系统初始结构的基础上进行优化有着重要的应用（如现在许多优化软件采用的阻尼最小二乘算法），其在寻求变焦系统初始结构，在变焦系统光焦度分配优化计算上更能凸显其优势，且如何在种类繁多的优化算法中选择合适可靠的算法用于变焦系统初始结构参数求解显得尤为重要，本章将主要着重选择最优化理论中的三种算法集中进行详细讨论其基本理论与思想，为后期的应用提供很好的理论依据与工具基础。

2.1 最优化算法概述

最优化理论是一门庞大的领域，无论科学计算，还是工程运用，都发挥着很大的作用。基于论文讨论主体为变焦光学系统的设计方法，其最优化问题为一高度非线性的构造函数，故论文基础内容集中讨论非线性函数的最优解（局部最优）求解。针对无约束最优化问题，有最速下降算法、一维线搜索算法、共轭梯度算法、拟牛顿算法等。针对有约束最优化问题，有（阻尼）非线性最小二乘算法、广义拉格朗日乘子算法、内点法、序列二次规划、遗传算法及粒子群算法等。

本文选用发展时间较长、相对完善成熟的算法——广义拉格朗日乘子算法（结合拟牛顿算法）^[36-38]、（修正）内点法^{[36][38]}、二次序列规划^[36-38]作为优化算法进行变焦系统高斯结构参数的优化计算。在实际变焦系统的高斯结构优化计算中，总需要有一定的条件限制，以使得最终计算所得解是可行合理的，例如需要设定镜组之间的间距不能为负值（即位置发生了交换），再如当设计焦距在30-100mm的连续变焦系统时，系统的总长设定在100mm以上应该会比较合理的，一个过度压缩的变焦系统势必带来某些镜组负担的像差较重而提升该镜组的设计难度，甚至不可实现。由于无约束优化问题在算法实现上程序较容易编写且比较迅速高效，本文的第一种优化算法便采用了广义拉格朗日乘子算法（结合拟牛顿算法），在应用广义拉格朗日乘子算法时，将约束条件并入目标优化函数，故转变为无约束条件问题。一般无约束优化问题标准形式如下：

$$\min(\text{minimize}) \quad f(x) \quad \text{for } x \in E^n \quad (2.1)$$

待优化问题可以用一个非负目标函数来表示，而目标优化函数即为使之取最小

或极小值。其中 $\mathbf{x}$ 是由 n 个待求量组成的欧几里得空间中的一个 n 维向量。在工程应用中，许多约束条件并不能并入目标函数而发展出了针对有约束条件的优化算法，约束优化问题标准形式如下：

$$\min f(\mathbf{x}) \quad \text{for } \mathbf{x} \in E^n \quad (2.2)$$

$$\text{subject to: } a_i(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m \quad (2.3)$$

$$b_j(\mathbf{x}) \geq 0 \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, n \quad (2.4)$$

其中 $a_i(\mathbf{x})$ 为原优化问题的等式约束条件， $b_j(\mathbf{x})$ 为不等式约束条件。 m 、 n 表示约束条件个数。以下将逐个讨论三种优化算法的形式、内容、核心思想及其运用流程。

2.2 广义拉格朗日乘子算法

广义拉格朗日乘子算法^[36-40]是结合罚函数与拉格朗日乘子，构造新的目标函数。算法基本思想在于在计算过程中若取到一个稍微违反边界条件的数值时，由于罚函数的存在，会使得原目标函数值比之前的取值更大，从而放弃该值，这样便能保证函数值尽可能取的边界条件内的值。针对一个目标函数 $f(\mathbf{x})$ ，其等式约束条件下的广义拉格朗日乘子法标准形式如下：

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (2.5)$$

$$\text{S.t. } h_i(\mathbf{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (2.6)$$

其拉格朗日函数可写成：

$$L(\mathbf{x}, M_k, \mathbf{v}) = f(\mathbf{x}) + \frac{M_k}{2} \sum_{i=1}^l h_i^2(\mathbf{x}) - \sum_{i=1}^l v_i h_i(\mathbf{x}) \quad (2.7)$$

式中 M_k 是一个常数，第二项为罚函数项，第三项是乘子项， v_i 是拉格朗日乘子。

对于不等式约束问题，

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (2.8)$$

$$\text{S.t. } h_i(\mathbf{x}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (2.9)$$

$$g_j(\mathbf{x}) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.10)$$

可以引入松弛变量 y_j 令

$$g_j(\mathbf{x}) - y_j = 0, \quad (2.11)$$

$$y_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.12)$$

将不等式问题转化成等式约束问题。原来的问题即转化为：

$$\min L(\mathbf{x}, M_k, \nu) \quad (2.13)$$

这是一个无约束条件的优化问题，可以通过许多最优化算法进行优化。构造完目标函数的下一步便是要获得让目标函数在每一次优化数值都下降的方向，最经典的算法是最速下降算法与牛顿法，设目标函数 $f(\mathbf{x})$ 在当前第 k 次循环取值 $\mathbf{x}_k$ ，且在 $\mathbf{x}_k$ 附近连续可微，其梯度 $\mathbf{g}_k = \nabla f(\mathbf{x}_k) \neq 0$ 。由泰勒（Taylor）展开：

$$f(\mathbf{x}_{k+1}) = f(\mathbf{x}_k) + (\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k)^T \nabla f(\mathbf{x}_k) + o(\|\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k\|) \quad (2.14)$$

记 $\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k = \alpha \mathbf{d}_k$ ，即表示变化方向向量，显然，当 $\mathbf{d}_k^T \mathbf{g}_k < 0$ 时第 $k+1$ 次取值 $f(\mathbf{x}_{k+1})$ 比第 k 次取值 $f(\mathbf{x}_k)$ 小，即 $\mathbf{d}_k = -\mathbf{g}_k$ 时二者相差最大，即此方向为最速下降方向。由上面表达式可知上述方向为最佳方向成立的条件应为每次该变量十分小以至于泰勒展开式的第三项及以后的项均为高阶小量时成立，而牛顿法较最速下降法优越的地方在于其考虑了二阶项，由泰勒展开：

$$f(\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\delta}) = f(\mathbf{x}_k) + \nabla f(\mathbf{x}_k)^T \boldsymbol{\delta} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}^T \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) \boldsymbol{\delta} + o(\boldsymbol{\delta}^3) \quad (2.15)$$

其中 $\boldsymbol{\delta} = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$ ， $\nabla^2 f(\mathbf{x}_k)$ 表示一个 n 阶矩阵：

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}_k) = \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) = \nabla(\nabla f(\mathbf{x}_k)^T) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

$\mathbf{H}(\mathbf{x}_k)$ 也叫 Hessian 矩阵。同理，为使得第 $k+1$ 次取值 $f(\mathbf{x}_{k+1})$ 比第 k 次取值 $f(\mathbf{x}_k)$ 小，应使得 $f(\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\delta}) - f(\mathbf{x}_k) < 0$ ，当 $\mathbf{H}(\mathbf{x}_k)$ 可逆时，且 $\boldsymbol{\delta} = -\mathbf{H}^{-1}(\mathbf{x}_k) \mathbf{g}_k$ 二者相差最大，与最速下降所得的方向对比可知其形式为牛顿法的特殊情况，即最速下降中的矩阵取单位矩阵。由此可见牛顿法更为精确地获得了原函数的下降方向。需要注意的是，牛顿法的应用中是假设了 Hessian 矩阵可逆才得到了下降方向，当其不可逆时，该方法不可用，为此需要对其进行改进。牛顿法的优势在于其充分利用原函数在当前点处的曲率信息，从而获得下降方向，但 Hessian 矩阵带来的计算量大，且无法保证在针对非线性度较大的优化函数时保持正定可逆。本文所构造的目标优化函数由连续变焦系统高斯结构的焦距、口径、入射角、入射高度

等结构参数构成外，还含有 PW 形式的初级像差关系。优化函数十分复杂，非线性较大，因无法保证其 Hessian 矩阵的正定性，不可采用牛顿法。而拟牛顿法克服了这些问题，其继承了牛顿法中充分利用目标函数及其梯度信息的优势，来逼近原函数的曲率，不需要计算 Hessian 矩阵，收敛速度快。本文第一个优化算法即采用拟牛顿法中广泛使用的方法——BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno) 法。为保证目标函数的下降，BFGS 基本思想是采用一个秩 2 矩阵来校正牛顿法中的 Hessian 矩阵，同时保持相当好的收敛速度，该矩阵不仅可以保证正定性，而且使得最终收敛到 Hessian 矩阵的逆矩阵上，其具体表示为如下形式：

$$S_{k+1} = S_k + (1 + \frac{\gamma_k^T S_k \gamma_k}{\gamma_k^T \delta_k}) \frac{\delta_k \delta_k^T}{\gamma_k^T \delta_k} - \frac{(\delta_k \gamma_k^T S_k + S_k \gamma_k \delta_k^T)}{\gamma_k^T \delta_k} \quad (2.17)$$

式中 S_k 表示第 k 次 BFGS 算法中的代替矩阵， δ_k 为第 k 次步长值， γ_k 为第 $k+1$ 次与第 k 次梯度差值。

在获得使原函数不断下降的方向后需要确定每次循环优化目标向量在下降方向所改变的步长值，一个合适的步长值可以获得一个合理的下降趋势，而一旦步长太长，容易引导算法程序至不合理的解域甚至发散不收敛。步长太短在较多的目标参数及复杂的优化函数中则严重影响计算速度，造成时间的浪费。本文采用常用的一维不精确线搜索 (Inexact Line Searches) 算法以获得步长值。目标优化函数无论在一阶还是二阶泰勒展开式中，当初始点 $\mathbf{x}_k$ 与方向 δ 确定以后，实际 $f(\mathbf{x}_{k+1})$ 仅为步长 α 的函数，令：

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \delta = \mathbf{x}_k + \alpha \mathbf{d}_k \quad (2.18)$$

为了找到一个 α 使 $f(\mathbf{x}_{k+1})$ 下降最快或较快，一维不精确线搜索思想在于将该值限制在一个合理的区间内，为了找到该区间，由泰勒公式， $f(\mathbf{x}_{k+1})$ 一阶近似：

$$f(\mathbf{x}_{k+1}) \approx f(\mathbf{x}_k) + \alpha \mathbf{g}_k^T \mathbf{d}_k \quad (2.19)$$

对 α 取导数，且取 $\alpha = 0$ 可得 $\mathbf{x}_k$ 处斜率为 $\mathbf{g}_k^T \mathbf{d}_k$ (即第 k 次循环计算时的初始点)，为叙述方便，假设 $f(\mathbf{x}_{k+1})$ 与 α 关系如下图 1 所示，其中 α^* 为局部极小值点。

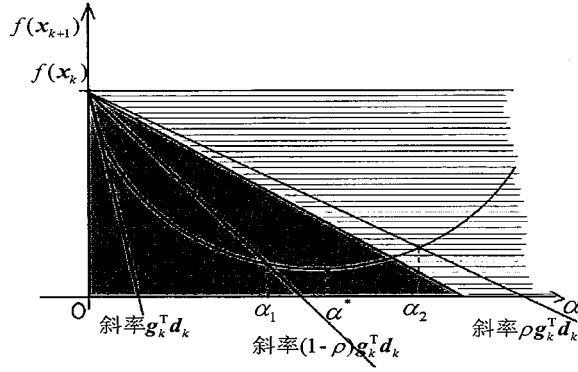

 图 2.1 $f(x_{k+1})$ 与 α 关系图

 Figure 2.1 $f(x_{k+1})$ and α relationship diagram

引入一常数参数 ρ ，且设两条直线：

$$f(x_{k+1}) = f(x_k) + \rho \alpha g_k^T d_k \quad (2.20)$$

$$f(x_{k+1}) = f(x_k) + (1 - \rho) \alpha g_k^T d_k \quad (2.21)$$

其中 $0 \leq \rho < 1/2$ ，由图中可见，该两直线将 α 的取值合理地分成了两份，由此将 α 的取值限定在二者之间，随着 ρ 的取值不同，两直线的夹角随之变化，可见，当取定 α 的估计值（不精确到极小值） α_0 时，若有：

$$f(x_{k+1}) \leq f(x_k) + \rho \alpha_0 g_k^T d_k \quad (2.22)$$

$$f(x_{k+1}) \geq f(x_k) + (1 - \rho) \alpha_0 g_k^T d_k \quad (2.23)$$

此时该值已接近极小值，可作为一个不精确取值。若不符合条件，则应再根据插值公式调整取值。Fletcher^[41]证明了当该算法随着循环次数趋于无穷时可收敛到一个驻点上去的，同时也修正了当两条任取直线所得的区间不能包含有 α 极小值点时的情况，引入第二个参数 σ ($\sigma > \rho$)，当满足：

$$g_{k+1}^T d_k \geq \sigma g_k^T d_k \quad (2.24)$$

其中 $0 < \sigma < 1$ ，上式用以判定极值点是否包含在 ρ 取定两直线包含的空间内。

2.3 内点法

内点法^{[36][38]}是解决有约束优化问题的一类方法，讨论约束优化问题有着重要意义，其解决的优化问题范围更广，实用性更强，但较无约束优化问题要复

杂得多，如优化函数的非线性度是否为凸函数（Convex function），及约束条件下所定义的可行域是否为凸等问题都会对算法的要求及可行性带来本质性的影响。前述中提及一个合理的连续变焦系统高斯结构所描述的是一个高度非线性函数关系，该函数显然不是一个凸函数。由于非线性规划，非凸规划问题需推广凸规划中的各类算法，故首先需要讨论在凸规划中全局最优解（Global solution）存在的充分必要条件，即 KKT（Karush-Kuhn-Tucker）条件。设 $\mathbf{x}^*$ 为 (2.2) 所描述的约束优化问题的局部极小值解（Local minimizer），则有：

$$(1) \quad a_i(\mathbf{x}^*) = 0 \quad \text{for } i=1, 2, \dots, m \quad (2.25)$$

$$(2) \quad b_j(\mathbf{x}^*) \geq 0 \quad \text{for } j=1, 2, \dots, n \quad (2.26)$$

(3) 存在拉格朗日乘子 λ_i^* 、 μ_j^* 使：

$$\nabla f(\mathbf{x}^*) = \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \nabla a_i(\mathbf{x}^*) + \sum_{j=1}^n \mu_j^* \nabla b_j(\mathbf{x}^*) \quad (2.27)$$

其中 $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ 。

$$(4) \quad \lambda_i^* a_i(\mathbf{x}^*) = 0 \quad \text{for } i=1, 2, \dots, m \quad (2.28)$$

$$\mu_j^* b_j(\mathbf{x}^*) = 0 \quad \text{for } j=1, 2, \dots, n \quad (2.29)$$

$$(5) \quad \mu_j^* \geq 0 \quad \text{for } j=1, 2, \dots, n \quad (2.30)$$

值得注意的是，当目标优化函数是凸函数，且可行域也是凸的时候，上述 KKT 条件是约束优化问题存在全局最优解的充分必要条件。但是若目标函数与可行域有一为非凸，则 KKT 条件仅为局部最优解存在的必要条件。当局部最优解存在时，式 (1) (2) 的成立时理所应当的，而式 (3) - (5) 则为求解局部最优解提供了方法，其中式 (3) 可看作以下拉格朗日函数（Lagrangian）

$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ 的梯度：

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f(\mathbf{x}) - \sum_{i=1}^m \lambda_i a_i(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^n \mu_j b_j(\mathbf{x}) \quad (2.31)$$

在凸规划中，有时为了计算方便需要将原优化问题转化为其对偶问题，二者求解最优解是等价的，若 $\mathbf{x}^*$ 为 (2.2) 所描述的约束优化问题的局部极小值解（也即局部最优解），且 $\boldsymbol{\lambda}^*$ 、 $\boldsymbol{\mu}^*$ 为其相应约束条件的拉格朗日乘子所组成的向量，则此时它们也满足以上对偶问题的解，且使得其函数值 $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ 取最大：

$$\text{maximize } L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \quad (2.32)$$

$$\text{S.t.} \quad \nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = 0 \quad (2.33)$$

$$\boldsymbol{\mu} \geq \mathbf{0}$$

此外, $f(\mathbf{x}^*) = L(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*)$, 由此, 在算法运行过程中, 可以通过计算 $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ 与 $f(\mathbf{x})$ 的差值来了解计算结果与最优解的接近程度, 二者差值常被称为对偶间隙 (Duality gap)。

如前所述, 求解优化问题一般需要构造目标函数、获取改进方向、计算步长、计算数值并判断是否结束计算过程等四步以上。与其他算法相同, 本文优化计算的目标函数均为连续变焦系统所满足的函数关系, 而步长值的计算均可采用上述一维线搜索中的不精确线搜索等算法。许多优化算法最大的区别均在于其优化方向的求解计算。为简单叙述内点法求解目标函数优化方向的思想, 假设目标函数仅含有不等式约束条件。考虑以下非线性凸规划优化问题:

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (2.34)$$

$$\text{S.t.} \quad b_j(\mathbf{x}) \geq 0 \quad \text{for } j=1, 2, \dots, n \quad (2.35)$$

同理可引入松弛变量 $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$, 由此上述优化问题转为:

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (2.36)$$

$$\text{S.t.} \quad \mathbf{b}(\mathbf{x}) - \mathbf{y} = \mathbf{0} \quad \text{for } j=1, 2, \dots, n \quad (2.37)$$

$$\mathbf{y} \geq \mathbf{0}$$

其中 $\mathbf{b}(\mathbf{x}) = [b_1(\mathbf{x}) \ b_2(\mathbf{x}) \ \dots \ b_n(\mathbf{x})]^T$, 再将松弛变量的不等式条件该做屏障

(barrier) 函数并入目标函数, 可得:

$$\min f_{\tau}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) - \tau \sum_{i=1}^n \ln y_i \quad (2.38)$$

$$\text{S.t.} \quad \mathbf{b}(\mathbf{x}) - \mathbf{y} = \mathbf{0} \quad \text{for } j=1, 2, \dots, n \quad (2.39)$$

上述问题的拉格朗日函数为:

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\lambda}, \tau) = f(\mathbf{x}) - \tau \sum_{i=1}^n \ln y_i - \sum_{i=1}^n \lambda_i [b_i(\mathbf{x}) - y_i] \quad (2.40)$$

$$b_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.41)$$

根据 KKT 条件, 有:

$$\nabla_{\mathbf{x}} L = \nabla f(\mathbf{x}) - \mathbf{A}^T(\mathbf{x}) \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (2.42)$$

$$\nabla_y L = -\tau Y^{-1} \mathbf{I}_E + \lambda = 0 \quad (2.43)$$

$$\nabla_\lambda L = \mathbf{b}(\mathbf{x}) - \mathbf{y} = 0 \quad (2.44)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = [\nabla b_1(\mathbf{x}) \cdots \nabla b_n(\mathbf{x})]^T \quad (2.45)$$

$$\mathbf{Y} = \text{diag}\{y_1, y_2, \cdots, y_n\} \quad \mathbf{I}_E = [1, 1, \cdots, 1]^T \quad (2.46)$$

第 k 次迭代, 由 $(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, \lambda_k)$ 构成的向量需要添加一个优化量 (优化方向) $(\Delta \mathbf{x}_k, \Delta \mathbf{y}_k, \Delta \lambda_k)$ 即第 $k+1$ 次迭代初始值 $(\mathbf{x}_{k+1}, \mathbf{y}_{k+1}, \lambda_{k+1})$ 为:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \Delta \mathbf{x}_k \quad (2.47)$$

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{y}_k + \alpha_k \Delta \mathbf{y}_k \quad (2.48)$$

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + \alpha_k \Delta \lambda_k \quad (2.49)$$

式中 α_k 即步长值, 由一维线搜索算法给出。由一阶泰勒展开公式对上式中的梯度量进行近似计算可得:

$$\mathbf{g}_{k+1}(\mathbf{x}_{k+1}) \approx \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k) + \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) \Delta \mathbf{x}_k \quad (2.50)$$

$$\mathbf{A}_{k+1}^T(\mathbf{x}_{k+1}) \approx \mathbf{A}_k^T(\mathbf{x}_k) + \sum_{i=1}^n \nabla^2 b_i(\mathbf{x}_k) \Delta \mathbf{x}_k \quad (2.51)$$

$$\mathbf{b}_{k+1}(\mathbf{x}_{k+1}) \approx \mathbf{b}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{A}_k(\mathbf{x}_k) \Delta \mathbf{x}_k \quad (2.52)$$

$$\mathbf{Y}_{k+1} \mathbf{A}_{k+1} \mathbf{I}_E \approx \mathbf{Y}_k \mathbf{A}_k \mathbf{I}_E + \mathbf{A}_k \Delta \mathbf{y}_k + \mathbf{Y}_k \Delta \lambda_k \quad (2.53)$$

代入上式, 将待求量分离, 化为矩阵相乘的形式:

$$\begin{pmatrix} -\mathbf{H}_k & \mathbf{0} & \mathbf{A}_k^T \\ \mathbf{0} & -\mathbf{Y}_k^{-1} \mathbf{A} & -\mathbf{I}_E \\ \mathbf{A}_k & -\mathbf{I}_E & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x}_k \\ \Delta \mathbf{y}_k \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_k \\ -\gamma_k \\ \rho_k \end{pmatrix} \quad (2.54)$$

其中

$$\sigma_k = \mathbf{g}_k - \mathbf{A}_k^T \lambda_k \quad (2.55)$$

$$\gamma_k = \tau \mathbf{Y}_k^{-1} \mathbf{I}_E - \lambda_k \quad (2.56)$$

$$\rho_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{b}_k \quad (2.57)$$

值得注意的是 $\rho_k = 0$ 时, 此方程的解正好满足原优化问题的约束条件, 即表示上述解即为原优化问题的解。由此 ρ_k 的取值可看做一个尺度, 即上述方程解与原优化问题解的接近程度, 实际上, 此即为内点法的核心思想, ρ_k 即为扰动值, 迭代计算过程中 $(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, \lambda_k)$ 取值均取可行域内 (内点), 当 $\rho_k \rightarrow 0$ 时, 该值即趋于原

问题局部最优解。由此可以计算出每一次迭代 $(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, \boldsymbol{\lambda}_k)$ 的变化方向，即所求优化方向：

$$\Delta \mathbf{x}_k = -\mathbf{N}_k^{-1} \mathbf{g}_k + \tau \mathbf{N}_k^{-1} \mathbf{A}_k^T \mathbf{Y}_k^{-1} \mathbf{I}_E + \mathbf{N}_k^{-1} \mathbf{A}_k^T \mathbf{Y}_k^{-1} \mathbf{A}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{c}_k) \quad (2.58)$$

$$\Delta \mathbf{y}_k = -\mathbf{A}_k \mathbf{N}_k^{-1} \mathbf{g}_k + \tau \mathbf{A}_k \mathbf{N}_k^{-1} \mathbf{A}_k^T \mathbf{Y}_k^{-1} \mathbf{I}_E - (\mathbf{I}_E - \mathbf{A}_k \mathbf{N}_k^{-1} \mathbf{A}_k^T \mathbf{Y}_k^{-1} \mathbf{A}_k) (\mathbf{y}_k - \mathbf{c}_k) \quad (2.59)$$

$$\Delta \boldsymbol{\lambda}_k = \mathbf{Y}_k^{-1} \mathbf{A}_k [(\mathbf{y}_k - \mathbf{c}_k) - \mathbf{A}_k \Delta \mathbf{x}_k] + \tau \mathbf{Y}_k^{-1} \mathbf{I}_E - \boldsymbol{\lambda}_k \quad (2.60)$$

其中， $\mathbf{g}_k$ 是第 k 次迭代目标函数梯度值， $\mathbf{A}_k = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q\}$ ， $\mathbf{N}_k$ 是对偶正规矩阵：

$$\mathbf{N}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) + \mathbf{A}^T(\mathbf{x}) \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{A}(\mathbf{x}) \quad (2.61)$$

$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ 是拉格朗日函数的 Hessian 矩阵。再由线搜索算法得到其步长值，即可进行下一个循环迭代过程。但是以上算法均为针对函数及可行域为凸的情况，而为了推广到非凸优化，我们需要对对偶正规矩阵 $\mathbf{N}_k$ 进行修正，以使得其每次迭代过程中保持正定性。

$$\mathbf{N}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\lambda}) = \bar{\mathbf{H}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) + \mathbf{A}^T(\mathbf{x}) \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{A}(\mathbf{x}) \quad (2.61)$$

$$\bar{\mathbf{H}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) + \eta \mathbf{I}_E \quad \eta \geq 0 \quad (2.62)$$

内点法在线性规划、二次规划及凸规划当中十分有效，当被应用于求解非凸优化问题 (Nonconvex Optimization) ^[17] 同样十分高效，值得提出的是该最优解一般均为局部最优解。

2.4 序列二次规划算法

序列二次规划^[36-40]是由求解二次规划问题推广至非线性规划问题的算法。考虑以下二次规划问题：

$$\min f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{p} \quad (2.63)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (2.64)$$

假设矩阵 $\mathbf{A}$ 为 $(p \times n, p < n)$ 行满秩矩阵，根据线性代数奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 方法，式中线性方程组的约束条件可解：

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^\dagger \mathbf{b} + [\mathbf{I}_E - \mathbf{A}^\dagger \mathbf{A}] \hat{\boldsymbol{\phi}} \quad (2.65)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (2.66)$$

式中 $\mathbf{A}^\dagger$ 称为矩阵 $\mathbf{A}$ 的伪逆矩阵 (Pseudo-inverse)。 $\hat{\boldsymbol{\phi}}$ 为一个任意 n 维参数矩阵，

矩阵 $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{V}$ 为酉矩阵 (Unitary matrix)。 Σ 是一对角矩阵, 称为矩阵 $\mathbf{A}$ 的 SVD。
由

$$\mathbf{I}_E - \mathbf{A}^\dagger \mathbf{A} = \mathbf{V} \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n-p} \end{pmatrix} \mathbf{V}^T = \mathbf{V}_r \mathbf{V}_r^T \quad (2.67)$$

$$\mathbf{V}_r = [\mathbf{v}_{p+1}, \mathbf{v}_{p+2}, \dots, \mathbf{v}_n] \quad (2.68)$$

矩阵 $\mathbf{V}_r$ 表示矩阵 $\mathbf{V}$ 的最后 $n-p=r$ 列, 则该线性方程组的解可写为:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^\dagger \mathbf{b} + \mathbf{V}_r \phi \quad (2.69)$$

ϕ 表示一个 r 维任意常向量。代回原函数, 原二次规划问题化为:

$$\min \quad \hat{f}(\phi) = \frac{1}{2} \phi^T \hat{\mathbf{H}} \phi + \phi^T \hat{\mathbf{p}} \quad (2.70)$$

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{V}_r \mathbf{H} \mathbf{V}_r^T \quad (2.71)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{V}_r^T \mathbf{H} \mathbf{A}^\dagger \mathbf{b} + \mathbf{p} \quad (2.72)$$

这是一个无约束优化问题, 当矩阵 $\mathbf{H}$ 为正定矩阵是, 矩阵 $\hat{\mathbf{H}}$ 亦正定, 此时存在全局最优解:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{V}_r \phi^* + \mathbf{A}^\dagger \mathbf{b} \quad (2.73)$$

式中 ϕ^* 为线性方程组 $\hat{\mathbf{H}} \phi = -\hat{\mathbf{p}}$ 的解。

文献[4, 9]当中已经使用了二次规划算法讨论了变焦镜头的设计, 对于非线性优化问题, 序列二次规划 (Sequential quadratic Programming) 也是非常有效的算法之一。为叙述序列二次规划算法方便, 假设目标非线性优化函数仅含等式约束条件:

$$\min \quad f(\mathbf{x}) \quad (2.74)$$

$$S.t. \quad a_i(\mathbf{x}) = 0, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m \quad (2.75)$$

为充分利用优化函数对偶关系方便求最优解, 构造相应的拉格朗日函数:

$$L(\mathbf{x}, \lambda) = f(\mathbf{x}) - \sum_{i=1}^m \lambda_i a_i(\mathbf{x}) \quad (2.76)$$

根据 KKT 条件, 设 $\mathbf{x}^*$ 为该目标函数的局部最优解, 则有:

$$\nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}^*, \lambda^*) = 0 \quad (2.77)$$

$$\nabla_{\lambda} L(\mathbf{x}^*, \lambda^*) = 0 \quad (2.78)$$

设第 k 次迭代的待求量为 $(\mathbf{x}_k, \lambda_k)$, 不妨假设其值十分接近局部最优值 $(\mathbf{x}^*, \lambda^*)$ 比

较接近，则下一迭代量 $(\mathbf{x}_{k+1}, \lambda_{k+1})$ 与该值更加接近，有泰勒展开式一阶近似：

$$\nabla L(\mathbf{x}_{k+1}, \lambda_{k+1}) \approx \nabla L(\mathbf{x}_k, \lambda_k) + \nabla^2 L(\mathbf{x}_k, \lambda_k) \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{pmatrix} \quad (2.79)$$

因 $(\mathbf{x}_{k+1}, \lambda_{k+1})$ 更加接近局部最优解，由上式可知 $\nabla L(\mathbf{x}_{k+1}, \lambda_{k+1}) \approx 0$ ，则有：

$$\nabla^2 L(\mathbf{x}_k, \lambda_k) \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{pmatrix} = -\nabla L(\mathbf{x}_k, \lambda_k) \quad (2.80)$$

上述关系可用矩阵表示：

$$\begin{pmatrix} \mathbf{W}_k & -\mathbf{A}_k^T \\ -\mathbf{A}_k & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_k^T \lambda_k - \mathbf{g}_k \\ \mathbf{a}_k \end{pmatrix} \quad (2.81)$$

$$\mathbf{W}_k = \nabla_x^2 f(\mathbf{x}_k) - \sum_{i=1}^m (\lambda_k)_i \nabla_x^2 a_i(\mathbf{x}_k) \quad (2.82)$$

$$\mathbf{A}_k = \nabla_x \mathbf{a}_k(\mathbf{x}_k) = [\nabla_x^T a_1(\mathbf{x}_k) \quad \nabla_x^T a_2(\mathbf{x}_k) \quad \cdots \quad \nabla_x^T a_m(\mathbf{x}_k)]^T \quad (2.83)$$

$$\mathbf{g}_k = \nabla_x f(\mathbf{x}_k) \quad (2.84)$$

$$\mathbf{a}_k = [a_1(\mathbf{x}_k) \quad a_2(\mathbf{x}_k) \quad \cdots \quad a_m(\mathbf{x}_k)]^T \quad (2.85)$$

式中 $\mathbf{W}_k$ 为拉格朗日函数的 Hessian 矩阵， $\mathbf{A}_k$ 为约束条件梯度， $\mathbf{g}_k$ 为原目标函数梯度。式 (2.81) 可改写成：

$$\mathbf{W}_k \delta_x + \mathbf{g}_k = \mathbf{A}_k^T \lambda_{k+1} \quad (2.86)$$

$$\mathbf{A}_k \delta_x = -\mathbf{a}_k \quad (2.87)$$

显然上式的解 δ_x ，可看做 δ_x 同时是以下二次规划问题局部最优解的必要条件：

$$\min \frac{1}{2} \delta^T \mathbf{W}_k \delta + \delta^T \mathbf{g}_k \quad (2.88)$$

$$\text{S.t.} \quad \mathbf{A}_k \delta_x = -\mathbf{a}_k \quad (2.89)$$

式中 δ 是待求量， $\mathbf{W}_k$ 是原函数的拉格朗日函数的 Hessian 矩阵， $\mathbf{g}_k$ 是原函数的梯度， $\mathbf{A}_k$ 代表等式约束条件梯度， $\mathbf{a}_k$ 及 $\mathbf{b}_k$ 表示第 k 个等式约束条件。求解上述二次规划问题便可找到序列二次规划优化方向使迭代不断进行下去。由此可见，序列二次规划算法的思想在于每次迭代运算过程中，通过求解一个二次规划子问题来确定使目标函数下降的方向，使用序列二次规划算法解决非线性优化问题的关键点之一在于保证 $\mathbf{W}_k$ 的正定性，确保寻找的方向是目标函数的下降方向，而本文采用的方法是采用拟牛顿法中的 BFGS 校正公式^[17]对 $\mathbf{W}_k$ 进行校正，保证了算

法的任意值（合理）收敛性。

2.5 三种优化算法特点总结分析

上述即为本文实现一个全画幅 F/#3.0 连续变焦系统高斯结构参数计算所采用的三种最优化算法。在构建一个合理的连续变焦系统，需要考虑变焦比的实现范围、各镜组光焦度分配、变焦过程中初级像差合理校正等，这就使得目标函数复杂，且非线性度大。上述三种算法均可用于解决非线性目标函数的优化问题，且三种算法较其他算法而言具有发展时间长、算法成熟，计算速度快，在解决非线性函数优化问题方面高效可靠等优点。

如前所述广义拉格朗日乘子算法属无约束优化算法，在解决有约束非线性最优化问题时，利用拉格朗日乘子将所有约束条件加入目标函数，这种处理方式，简单易于理解，其算法的程序实现较其他算法容易。有约束优化算法可专用于求解有约束条件的最优化问题，应用范围更广，求解更加系统高效。内点法与序列二次规划算法均属于有约束优化算法，二者同样是由用于解决凸规划问题中的算法推广而来，在求解非线性优化问题一般都是收敛至局部最优解。序列二次规划算法由于其优化速度及精确高效等优点成为许多行业领域应用的热点，而内点法近期才被研究人员逐渐应用于各类非线性优化问题，在算法的稳健性与高效性方面同样具有研究与应用价值。

2.6 本章小结

本章着重讨论了广义拉格朗日乘子算法（结合拟牛顿法）、内点法、序列二次规划法三个算法的理论内容及其求解最优化问题的主要思想，并分析了三种算法各自的特点与优势，本章内容是变焦系统初始结构优化计算的理论基础和编写程序的工具基础。

第3章 普适性变焦光学系统的高斯理论

变焦系统高斯理论对变焦系统设计具有重要意义，其为理想状态下变焦系统的成像关系，因所有的光学系统的元件都是存在像差，有厚度的，其实际成像与理想成像总是存在差距，而变焦系统成像越好的设计越接近理想高斯理论所得的情况，因此变焦系统的高斯理论对变焦系统的实际设计具有指导性意义，讨论普适性变焦系统高斯理论更是如此。本章将着手于全组全动型变焦系统初始结构参数求解这一优化问题目标函数的构建。

3.1 传统及全组全动型变焦光学系统简介

变焦光学系统的设计的首要问题^[18]是决定变焦系统该采取怎样的变焦形式，一般有正组补偿，负组补偿，双联动，全组全动的形式。在传统的变焦系统设计中，根据变焦形式与经验设定变焦组的倍率以实现足够的变焦比要求；再决定各镜组焦距值，在众多设定方案中根据二级光谱估计值的大小选定合适的方案；然后分析变焦过程中，第一、第二辅助光线在各个镜组上的入射高度及角度，在合适的位置放置光阑，获得各个镜组相对孔径较小的方案；接下来利用阻尼最小二乘算法求解各个镜组的 P^∞ 与 W^∞ 以计算各镜组的实际结构参数；由以上过程得到的是一个基本符合初级像差的初始结构，最后仍需要对系统高级像差再做优化平衡。

变焦光学系统的广泛应用及其复杂的光学结构引起了许多学者及工程师的关注研究。所谓变焦光学系统的高斯理论，即变焦光学系统的理想光学系统参数关系，各镜组仅用焦距，口径，间隔，放大倍率等来表示一个理想的光学成像系统。经过实践证明，变焦系统高斯解的取值（即各镜组焦距值的分配及间隔）对于后期设计起着关键性的作用。

传统机械补偿式连续变焦光学系统根据变焦组光焦度的不同分两种形式——正组补偿变焦系统与负组补偿变焦系统，以四组元变焦系统为例，两者补偿系统的运动形式分别如下图 3.1、图 3.2 所示。其中图 3.1 中变倍组是 ϕ_2 ，补偿组是 ϕ_3 ，光焦度为正的镜组，图 3.2 中变倍组是 ϕ_2 ，补偿组是 ϕ_3 ，但其光焦度为负。上图表示广角端位置时各镜组位置，下图表示摄远端各镜组位置各镜组位置。图 3.1 和图 3.2 是经典的正组补偿与负组补偿变焦系统，正组补偿的

变倍组与补偿组做相对运动（或相向运动），形成摄远或反摄远形式以达到长变焦比的要求。同时从下面两图也可观察出变焦系统光学总长一般固定不变，对小型化设计是不利的。

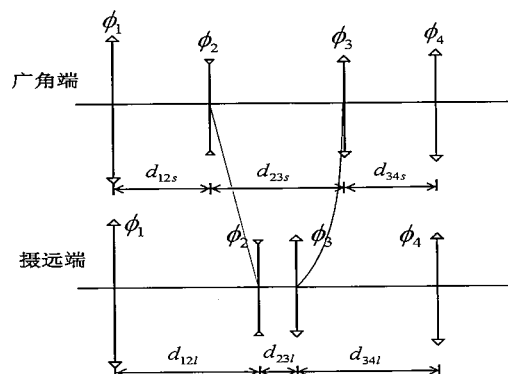


图 3.1 正组补偿变焦系统广角端及摄远端镜组位置示意图

Figure 3.1 Diagram of the position of the wide-angle and the telephoto mode of the positive compensation zoom system

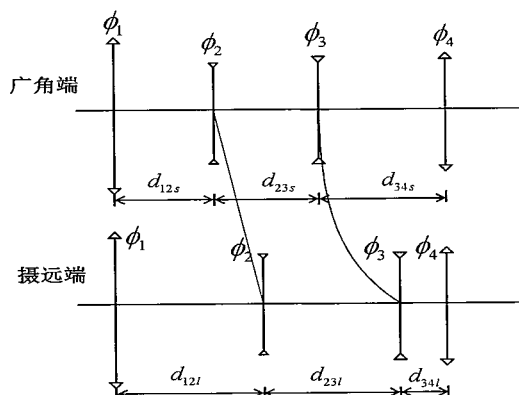


图 3.2 负组补偿变焦系统广角端及摄远端镜组位置示意图

Figure 3.1 Diagram of the position of the wide-angle and the telephoto mode of the positive compensation zoom system

具有固定组的传统连续变焦光学系统在结构计算及像差、色差校正等方面具有较大的优势，最常见的是具有固定前组及固定后组的连续变焦光学系统，如 Canon 公司的一款镜头^[42]——EF 70-200 mm f/# 2.8L USM，其光学系统示意图如下图 3.3 所示。但是具有固定前组及固定后组的变焦光学系统往往总长较大，且口径一般也较大，同时固定组意味着其变焦过程空间位置不变，这也实际上是缩小了实际变焦参数选择的解域，不利于充分发挥各镜组参与像差校正的作用，不利于光学系统的小型化及进一步提升光学系统像质。

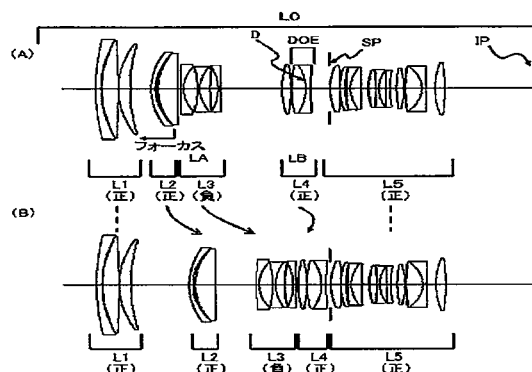


图 3.3 Canon 公司镜头——EF 70-200 mm f/2.8L USM 示意图

Figure 3.3 Canon lens - Diagram of EF 70-200 mm f/2.8L USM

全组全动型变焦系统意味着所有镜组在变焦过程中均是运动的，即在传统变焦系统基础上进一步释放固定镜组空间位置的自由度，进一步扩大变焦系统解域，相对传统设计有了更大的空间。全组全动型变焦系统是最具一般性的变焦系统，传统变焦系统可看作它的子集，即可看作是某些镜组运动量为 0（静止不动）。各组元均为运动组（需要指定一组作为补偿组以保持像面稳定），充分发挥镜组参与系统变焦与系统像差校正，如镜组可按照最有利于像差校正的方向移动，这也可以使得各镜组内部镜片加工有着比较宽松的公差。值得一提的是，在全组全动变焦系统当系统组分较多或是运动曲线有众多可选方案时，适当结合当代机械加工及凸轮加工水平，采用联动方案可以大大减少凸轮曲线所需数目，简化凸轮等机械加工难度，节约生产成本。图 3.4 与图 3.5 分别表示五组全动与六组全动高斯结构及运动形式，如上所述，两种变焦系统中均采用了联动的形式。

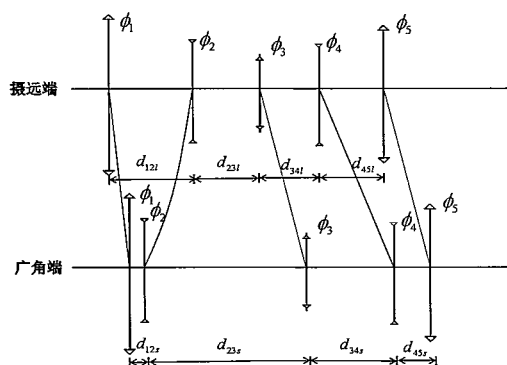


图 3.4 五组全动变焦系统高斯结构运动形式

Figure 3.4 Motion form of five moving groups of zoom system Gaussian structure

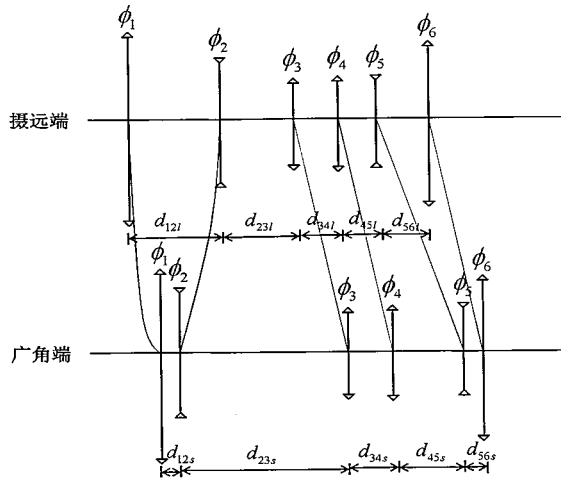


图 3.5 六组全动高斯结构运动形式

Figure 3.5 Motion form of six moving groups of zoom system Gaussian structure

正因为以上诸多优点，反观目前光学镜头的市场产品，全组全动型光学镜头几乎占据了大部分市场。

3.2 变焦光学系统高斯理论的 PW 像差模型

镜组光焦度是影响光学系统的重要参数之一。传统变焦系统设计往往根据经验计算得到各镜组焦距值及变焦过程中各镜组距离，再结合理想光线走势，即第一、第二辅助光线在各镜组上的入射角及入射高度等，给出变焦系统初级像差关系，从而求解出各镜组满足的 P^∞ 与 W^∞ 值。具体过程如下，根据光学设计 PWC 像差理论^[43]，镜组的 P 、 W 与镜组偏折角及折射率关系为：

$$P = \sum_1^k \left(\frac{\Delta u}{1} \right) \cdot \Delta \frac{u}{n} \quad (3.1)$$

$$W = \sum_1^k \left(\frac{\Delta u}{1} \right) \cdot \Delta \frac{u}{n} \quad (3.2)$$

因光学系统的初级像差可由参数 P 、 W 、 C 表示，常见表达方式是将初级像差由 P 、 W 、 C 表示（这里为了不增添初始结构计算的复杂性，暂不考虑色差的关系），其中 P 、 W 是 P 、 W 的规化形式：

$$S_I = \sum_{i=1}^k h_i^4 \varphi_i^3 P_i \quad (3.3)$$

$$S_{II} = \sum_{i=1}^k (h_i^3 h_{pi} \varphi_i^3 P_i - J h_i^2 \varphi_i^2 W_i) \quad (3.4)$$

$$S_{III} = \sum_{i=1}^k (h_i^2 h_{pi}^2 \varphi_i^3 P_i - 2J h_i h_{pi} \varphi_i^2 W_i + J^2 \varphi_i) \quad (3.5)$$

$$S_V = \sum_{i=1}^k (h_i h_{pi}^3 \varphi_i^3 P_i - 3J h_{pi}^2 \varphi_i^2 W_i + J^2 \frac{h_{pi}}{h_i} (3 + \mu) \varphi_i) \quad (3.6)$$

其中 i 表示镜组序号, J 表示拉赫不变量, h_i 与 h_{pi} 分别表示第一辅助光线及第二辅助光线在镜组上的入射高度, μ 表示平均折射率倒数的一个参量, 其表达式为:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^k \varphi_i / n_i}{\sum_{i=1}^k \varphi_i} \approx 0.6 \sim 0.65 \quad (3.7)$$

有限远像差参数 P_i 、 W_i 与 P^∞ 、 W^∞ 关系如下:

$$W_i = W_i^\infty + (2 + \mu) u_i \quad (3.8)$$

$$P_i = P_i^\infty + (4W_i^\infty - 1) u_i + (3 + 2\mu) u_i^2 \quad (3.9)$$

u_i 为规化角, $u_i = u_i / h_i \varphi_i$ 。且 P 、 W 与 P^∞ 、 W^∞ 的规化关系如下:

$$P = \frac{P}{(h\varphi)^3} \quad W = \frac{W}{(h\varphi)^2} \quad (3.10)$$

结合像差理论与上述关系表达式可以知道, P 、 W 因物距的不同而不同, 但进一步规划后的 P^∞ 、 W^∞ 与物距无关, 一个镜组仅有一组 P^∞ 与 W^∞ , 它们可以代表透镜组本身的初级像差性质, 将 P^∞ 与 W^∞ 代入上式关系式便可以得到由 P^∞ 与 W^∞ 表示的变焦系统的初级像差关系, P^∞ 与 W^∞ 一方面代表着初级像差关系, 另一方面又联系着镜组内的曲率半径与折射率等结构参数。综上所述, P^∞ 、 W^∞ 与 P 、 W 在初级像差范围内用于描述光学系统或变焦镜组像差特性的作用是一致的, 即求解 P^∞ 、 W^∞ 像差关系的方程与求解 P 、 W 方程用于解决变焦系统满足上述四种初级像差要求的问题是等价的, 这也为简化复杂变焦系统

初级像差关系计算提供了更方便的理论基础。

以下将以 30-100 mm-F/# 2.8 及 22-110 mm-F/# 2.8 全画幅连续变焦光学系统高斯结构为例展示光学系统各镜组与像差相关参数的计算。

考虑第一辅助光线，入射角 $u(1)$ （在五组全动与六组全动高斯结构中均为 0，即物点位于无穷远处），变焦系统 F/#（为增强变焦系统相对孔径的选择弹性，两类变焦系统均取 2.8 的恒定大孔径），由此可以得到其在第一镜组的入射高度为：

$$h_1 = \frac{f'}{2} (F/\#) \quad (3.11)$$

其中 f' 为当前系统焦距值。循序渐进利用以下公式即可依次求解得到第一辅助光线在各镜组上的入射角及入射高度：

$$u_i' - u_i = \frac{h_i}{f_i'} \quad (3.12)$$

$$u_i' = u_{i+1} \quad (3.13)$$

$$h_{i+1} = h_i - d_{i,i+1} u_i' \quad (3.14)$$

其中 f_i' 为相应镜组的焦距值。再考虑第二辅助光线在各镜组入射角及入射高度计算。为了提高系统对称性，减少变焦系统彗差、畸变、垂轴色差等横向像差，将光阑放置在靠近对称中心处，为方便计算，在五组全动与六组全动变焦系统中均将光阑放在第三镜组处。首先应用理想高斯公式，根据各镜组焦距值、间距计算相应入瞳位置：

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (3.15)$$

在五组及六组全动高斯结构中，先对镜组 2 进行成像点位置的计算，再对镜组 1 计算二次成像点位置即为入瞳位置，其中 l 的大小即为 $D2$ 值。这里需要判断入瞳位置是否在第一镜组前，若在镜组前，则第二辅助光线在镜组 1 上的入射高度即为第一辅助光线在镜组 1 上的入射高度。如若不是，则可以根据理想光学系统理论求得其入射高度为：

$$h_{m1} = \text{Entd} \cdot \frac{h_{lm}}{f'} \quad (3.16)$$

其中 Entd 为入瞳距离镜组 1 的距离， h_{lm} 为半像高（在本文的设计中为全画幅

光学系统，即大小为 21.64mm)， f' 为相应系统焦距值。而第二辅助光线在镜组 1 上的入射角为：

$$u_m(1) = \frac{h_{lm}}{f'} \quad (3.17)$$

反复利用下述公式即可求得第二辅助光线在各镜组上的入射角及入射高度：

$$u'_{mi} - u_{mi} = \frac{h_{mi}}{f'_i} \quad (3.18)$$

$$u'_{mi} = u_{mi} \quad (3.19)$$

$$h_{mi+1} = h_{mi} - d_{i,i+1} u'_{mi} \quad (3.20)$$

这里下标 m 与无下标分别用于表示第二辅助光线与第一辅助光线相关参数。五组与六组全动高斯结构示意图及参数如下图 3.6-3.7 所示。

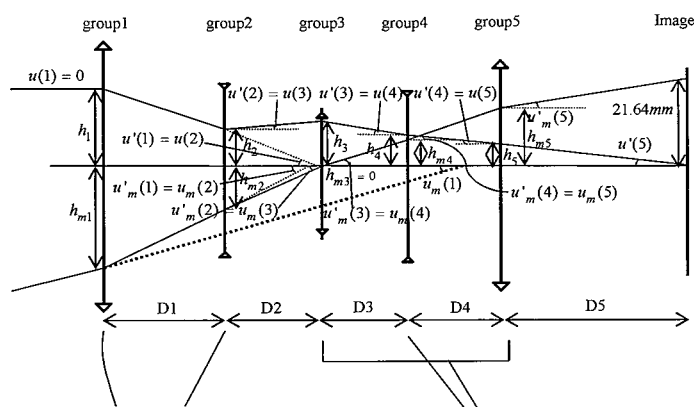


图 3.6 五组全动变焦光学系统高斯结构

Figure 3.6 Five moving groups of zoom system Gaussian structure

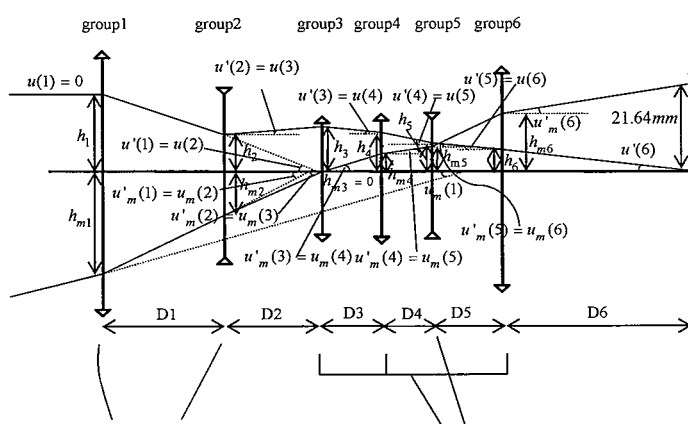


图 3.7 六组全动变焦光学系统高斯结构

Figure 3.7 Six moving groups of zoom system Gaussian structure

3.3 变焦光学系统优化计算目标函数的建立

以下根据像差的 PWC 理论建立优化计算目标函数^[22]，这里 W 取值采用袁旭沧《光学设计》^[43]里的定义为准，定义满足像差及相对孔径要求高斯结构的优化函数为：

$$H_1 = \sum_{j=1}^n (\Delta_{j+1} - \Delta_j)^2 \quad (3.21)$$

$$\Delta_j = (D1_{j+1} + D2_{j+1} + D3_{j+1} + D4_{j+1} + D5_{j+1}) - (D1_j + D2_j + D3_j + D4_j + D5_j)$$

$$H_2 = \sum_{i=1}^5 (u'_w(i) - u_w(i))^2 \quad (3.22)$$

$$H_3 = \sum_{i=1}^5 (u'_t(i) - u_t(i))^2 \quad (3.23)$$

$$H_4 = 3 * (u'_{wm}(1) - u_{wm}(1))^2 + \sum_{i=2}^5 (u'_{wm}(i) - u_{wm}(i))^2 \quad (3.24)$$

$$H_5 = 3 * (u'_{tm}(1) - u_{tm}(1))^2 + \sum_{i=2}^5 (u'_{tm}(i) - u_{tm}(i))^2 \quad (3.25)$$

$$H_6 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 \quad (3.26)$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^5 h_i^4 \varphi_i^3 P_i$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^5 (h_i^3 h_{mi} \varphi_i^3 P_i - J h_i^2 \varphi_i^2 W_i)$$

$$S_3 = \sum_{i=1}^5 (h_i^2 h_{mi}^2 \varphi_i^3 P_i - 2 J h_i h_{mi} \varphi_i^2 W_i + J^2 \varphi_i)$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^5 (h_i h_{mi}^3 \varphi_i^3 P_i - 3 J h_{mi} \varphi_i^2 W_i + J^2 \frac{h_{mi}}{h_i} (3 + \mu) \varphi_i)$$

$$W_i = W_i^\infty + (2 + \mu) \bar{u}_i$$

$$P_i = P_i^\infty + \bar{u}_i (4 W_i^\infty - 1) + \bar{u}_i (3 + 2\mu)$$

$$\bar{u}_i = u_i / (h_i \varphi_i)$$

$$H_7 = \sum_{j=1}^n (f_1 + (1 - 1/\beta_{2j}) * f_2 - D1_j)^2 \quad (3.27)$$

$$H_8 = (f_1 * m_t - f_t)^2 + (f_1 * m_w - f_w)^2 \quad (3.28)$$

式中：下标 i、w、t、m 分别表示第 i 镜组、广角端、摄远端、主光线，下标 j 表

示镜组移动到第 j 个位置, β_{2j} 则表示第 j 个位置镜组 2 的垂轴放大率, n 表示总共移动数目, Δ 与 S 均表示一个记号参量, μ 表示平均折射率倒数的一个参量, φ_i 表示镜组光焦度, u_i 是摄远端或广角端入射角。 m_t, m_w 分别代表系统摄远端、短焦端的垂轴放大率, f_t, f_w 是摄远端焦距、广角端焦距。 H_1 表示补偿曲线线性度, $H_2 \sim H_5$ 表示轴上光线及主光线在各镜组上的偏折量, H_6 表示系统的赛德像差 (PW 表示法), P^∞, W^∞ 为物距无穷远处薄透镜系统的基本像差参数, H_7 表示由微量移动产生的光学系统像移量, H_8 为系统当前焦距与目标焦距的差距。综合考虑变焦曲线线性度、光焦度分配、像差特性等因素, 建立系统综合评价函数为:

$$f(x) = c_1 H_1 + c_2 H_2 + c_3 H_3 + c_4 H_4 + c_5 H_5 + c_6 H_6 + c_7 H_7 + c_8 H_8 \quad (3.29)$$

式中 $c_1 \sim c_8$ 是相应的权重因子, 根据 (1-8) 式, 可计算出由变焦系统的高斯结构参数和像差向量参数组成的参数向量 x_0 :

$$x_0 = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, P_1^\infty, P_2^\infty, P_3^\infty, P_4^\infty, P_5^\infty, W_1^\infty, W_2^\infty, W_3^\infty, W_4^\infty, W_5^\infty, D2, D3, D4, D5]。$$

3.4 本章小结

本章对本文所采用的全组全动型变焦系统与传统具有固定组的变焦系统进行对比分析与讨论, 以五组全动及六组全动变焦系统高斯结构为例, 引入初级像差、镜组相对孔径等与实际设计息息相关的参数构建了普适性全组全动型变焦系统结构参数优化计算的目标函数。本章是变焦系统目标优化函数构建的理论基础, 所构建的目标函数将为下一步实际计算做好准备。

第 4 章 30-100 mm 变焦系统初始结构优化计算

由前几章理论基础的铺垫，应用现代编程语言编写相应算法程序进行变焦系统初始结构参数优化计算便可水到渠成。正如不同物理定律的成立均需要满足一定的条件，在应用最优化理论算法进行计算时也需要根据相应算法的特性特点选择适当的边界条件与计算程序进行目标函数最优解（局部）的求解。

4.1 广义拉格朗日乘子算法优化计算变焦系统高斯结构

如前所述，传统阻尼非线性最小二乘法需要一个合适的初始值，才能使得评价函数收敛，得到较为合适的变焦镜头的基本参数。而广义拉格朗日乘子法没有这样的限制，可从一个五组初始焦距值为 100, -100, 100, -100, 100，利用该方法结合拟牛顿法（BFGS），成功使得评价函数收敛，得到一个适用于五组全动变焦镜头光焦度分配值。我们取初始向量为：

$$\mathbf{x}_0 = [100, -100, 100, -100, 100, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 2, 13.3, 30, 50];$$

前五个数据代表变焦镜头镜组 1 至镜组 5 焦距值大小，第 6-15 这十个数据代表五组镜组的 P° 和 W° 值的大小，第 16-19 这四个数据分别代表镜组 2 到镜组 3，镜组 3 到镜组 4，镜组 4 到镜组 5，镜组 5 到像面的间距。为使得最终获得有意义的解，需要确定各个镜组间距的边界条件，列表 4.1 如下：

表 4.1 广义拉格朗日乘子法-镜组及总长度边界条件

Table 4.1 Generalized Lagrangian Multiplier method - Group and total length boundary conditions

Mode	D1	D2	D3	D4	Total length
Long focal length	≥ 25	≥ 0	≥ 1	≥ 0	≥ 155
Short focal length	≥ 1		≥ 0	≥ 0	

经过算法优化，得到如下结果：

$$\mathbf{x}_0 = [67.35, -25.33, 51.45, -145.79, 74.86, 9.045, 0.8114, 1.3977, 0.0868, 0.1, 2.2546, -0.3491, 1.3077, 3.1401, 0.1, 25.60, 18.98, 32.84, 52.59];$$

短焦处各个镜组距离（mm）1.52, 65.20, 43.49, 8.33, 39.38。系统长焦端焦距值大小为 100.24 mm，短焦焦距值大小为 30.36 mm。长焦端总长为 159.19 mm，短焦端总长为 157.79 mm，变焦过程相对孔径保持 2.8 不变。其示意图如下图 4.1 所示，各个镜组焦距值与相对孔径的大小如下表 4.2 所示：

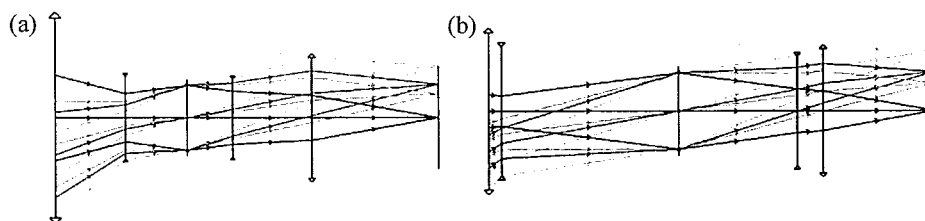


图 4.1 广义朗格朗日法变焦镜头高斯结构 (a) 图为摄远端, (b) 图为广角端

Fig. 4.1 The Gaussian structure of the zoom lens obtained by the generalized Lagrangian method - image (a) is the telephoto mode and (b) is the wide-angle mode.

表 4.2 广义拉格朗日乘子法-各镜组的焦距及相对孔径

Table 4.2 The generalized Lagrangian method - Focal length and relative aperture of each group

Group name	group1	group2	group3	group4	group5
Focal value	67.357	-25.3331	51.4496	-145.7941	74.8594
Relative aperture	1:0.8	1:0.535	1:1.89	1:3.64	1:1.48

由数据可见, 镜组 1 及镜组 2 相对口径较大, 镜组承担的光焦度较大, 设计难度较其他几个镜组高, 需要复杂化才可能获得比较好的设计。从以上高斯结构图可以看出, 该结构紧凑, 后工作距较长, 光线较平缓, 其中轴外主光线与近轴边缘光线在镜组 2 上入射高度变化较大, 可见其在变焦系统的像差比重也是较大的, 这从镜组的相对口径较大上也可说明这点。

4.2 内点法优化计算变焦系统高斯结构

内点法在线性规划、凸规划当中十分有效, 而最近也被用于非凸优化问题, 为了和以上广义朗格朗日法做对比, 同时证明根据运动形式求解变焦镜头参数的可行性以及局部最优解的不唯一性, 我们研究了内点法对五组全动变焦镜头参数求解进行了研究, 并且发现其收敛性也十分好, 同样可以从一个任意的合理初始解 (不违反边界条件) 收敛到一个满足设计要求的五组全动三倍变焦比的全画幅恒定光圈变焦系统。同样, 我们取初始值为:

$$\mathbf{x}_0 = [100, -100, 100, -100, 100, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 2, 13.3, 30, 50];$$

其中边界条件设置如下表 4.3 所示:

表 4.3 内点法-镜组及总长度边界条件

Table 4.3 Interior point method - Group and total length boundary conditions

Mode	D1	D2	D3	D4	Total length
Long focal length	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 130
Short focal length	≥ 2		≥ 0	≥ 0	

需要指出本次算法设定目标焦距为 25-100 mm，且权重为 0.7。经过算法优化，得到如下结果：

$x_0=[113.05, -37.47, 52.15, -118.83, 84.85, -2.757, 1.8765, 0.706, 0.2884, 0.1700, 1.9598, -0.1374, 0.921, -1.1848, 1.0746, 34.11, 26.85, 23.31, 51.40]$ 短焦处各个镜组距离（mm）2.00，101.16，41.17，8.99，29.05。系统长焦端焦距值大小为 99.85 mm，短焦焦距值大小为 27.08 mm。长焦端总长为 180.58 mm，短焦端总长为 182.42 mm，变焦过程相对孔径保持 2.8 不变。其示意图如下图 4.2 所示：

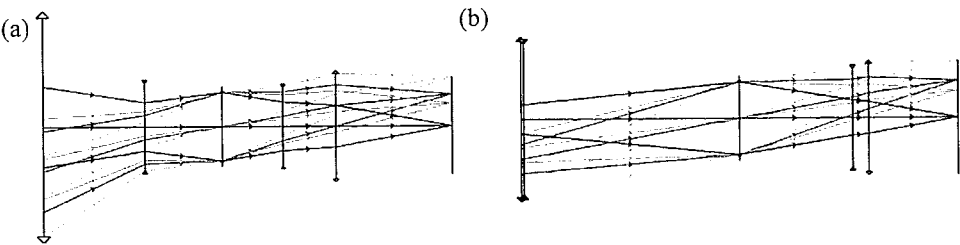


图 4.2 内点法变焦镜头高斯结构——（a）图为摄远端，(b)图为广角端

Fig. 4.2 The Gaussian structure of the zoom lens obtained by Interior point method – image (a) is the telephoto mode and (b) is wide-angle mode.

各个镜组焦距值与相对孔径的大小如下表 4.4 所示：

表 4.4 内点法-各镜组光焦距及相对孔径

Table 4.4 Interior point method - Focal length and relative aperture of each group

Group name	group1	group2	group3	group4	group5
Focal value	113.0514	-37.4657	52.1471	-118.8328	84.8462
Relative aperture	1:1.168	1:0.54	1:1.68	1:3.25	1:1.82

由数据可见，镜组 2 相对口径较大，对设计难度较高，其他相对孔径均不算太大，较拉格朗日乘子得到的结果更易设计，同样镜组 2 需要复杂化才可能获得比较好的设计。从高斯结构图中可看出镜组 1 较广义拉格朗日算法所得结果大，且镜组

1-2 在广角端主平面位置十分接近, 这为在实际玻璃替换后的设计中保正主平面与高斯结构控制带来难度。

4.3 序列二次规划算法优化计算变焦系统高斯结构

文献[10][24]当中已经使用了二次规划算法讨论了变焦镜头的设计, 同样, 为与前面两种算法做一个对比, 我们也进行了该算法对目标函数收敛性的尝试, 发现该算法对初始值的要求及边界条件的限制较高, 一旦初始值违反边界条件返回一个非常糟糕的数值, 算法可能迅速结束, 无法进行下去。对于非线性优化问题, 序列二次规划 (SQP) 思想在于每次迭代运算过程中, 通过求解一个二次规划子问题来确定使目标函数下降的方向, 是非常有效的算法之一。取初始值为:

$$\mathbf{x}_0 = [100, -100, 100, -100, 100, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 2, 13.3, 30, 50];$$

镜组边界条件的设定需要注意不要范围初始值, 具体如下表 6 所示:

表 4.5 序列二次规划法-镜组边界条件

Table 4.5 Sequence Quadratic Programming - Group and total length boundary conditions

Mode	D1	D2	D3	D4	D5	Total length
Long focal length	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 49	≥ 120
Short focal length	≥ 0		≥ 0	≥ 0	≥ 0	

经过算法优化, 得到如下结果:

$\mathbf{x}_0 = [138.78, -44.12, 41.93, -99.92, 85.23, 1.6369, -0.1237, 0.7590, -0.1342, 0.0754, -0.5208, 1.0841, 1.0917, 1.6040, -0.2275, 20.66, 0.26, 37.87, 52.30]$
 短焦处各个镜组距离 3.267, 74.959, 15.420, 22.709, 34.198。系统长焦端焦距值大小为 100.034, 短焦焦距值大小为 30.700。长焦端总长为 172.297 mm, 短焦端总长为 150.432 mm, 变焦过程相对孔径保持 2.8 不变。其示意图如下图 4.3 所示, 各个镜组焦距值与相对孔径的大小如下表 4.6 所示:

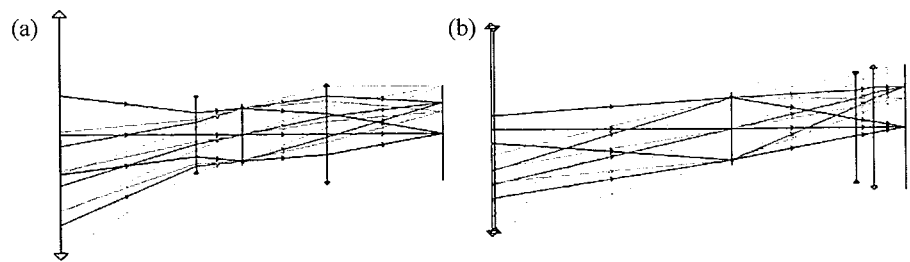


图 4.3 序列二次规划法变焦镜头高斯结构——(a) 图为摄远端, (b) 图为广角端

Fig. 4.3 The Gaussian structure of the zoom lens obtained by Sequence Quadratic Programming –image (a) is the telephoto mode and (b) is the wide-angle mode.

表 4.6 序列二次规划法-各镜组光焦距及相对孔径

Table4.6 Sequence Quadratic Programming - Focal length and relative aperture of each group

Group name	group1	group2	group3	group4	group5
Focal value	113.0514	-37.4657	52.1471	-118.8328	84.8462
Relative aperture	1:1.3	1:0.722	1:1.747	1:3.643	1:1.968

从 SQP 所得高斯结构图可见, 该结果较之前两个结构的口径还要大, 且镜组 3-4 主平面在摄远端的距离、镜组 1-2 在广角端的距离都很接近, 这都会对后期主平面的控制带来一定难度。而广角端后工作距较短, 不利于变焦系统的应用范围 (甚至对最终设计能否达标产生不利的影响)。

三种算法凸轮曲线如下图 4.4 示, 每种曲线颜色表示不同的镜组, 而不同的线型表示不同的算法, 纵坐标表示各镜组距离像面的距离, 横坐标代表抽样点:

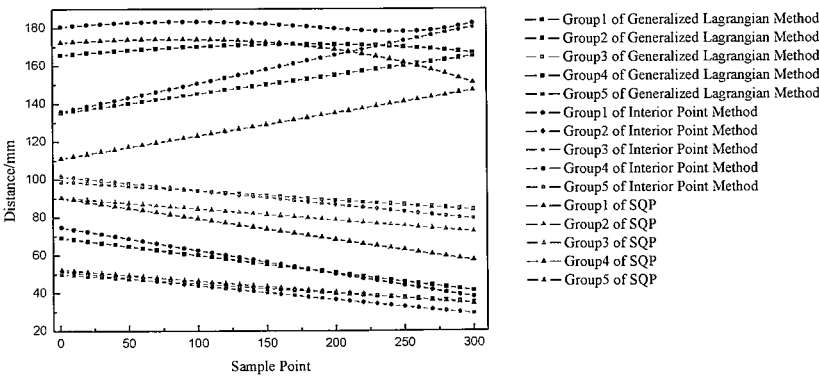


图 4.4 变焦镜头凸轮曲线

Figure 4.4 Cam curve of zoom lens

可见, 三种算法所得凸轮曲线除镜组 1 外较为接近, 这个结果正是得益于

前期目标函数的构造中针对凸轮曲线线性度的限制，在高度非线性的多维解空间中，存在着非常多的局部最小解，从结果上看，以上所得局部最小解是符合要求的解。

4.4 三种优化算法结果对比分析

综上所述，在镜头运动形式确定情况下，三种优化算法利用评价函数均可获得在满足小像差要求下的收敛值，而且凸轮曲线均具有良好的线性度。此外，三种优化算法还存在各自的优缺点，其中 GLM 算法属于无约束条件算法，收敛速度最快，适用于快速判断变焦镜头高斯结构运动形式与边界条件（收敛域）可行性，优化结果得到总长最短，系统口径最小，适用于变焦镜头的小型化设计，内点法鲁棒性好，获得的结果用于实际镜头设计相对容易，但是收敛速度最慢，系统总长最长，系统口径较 GLM 大，修正的二次序列规划收敛速度较快，但是对边界条件非常敏感，算法容易发散，且得到高斯结构口径最大。三种算法在应用于变焦镜头高斯结构求解结果，特点与分析如表 4.7 所示。

表 4.7 三种优化算法优势与不足对比

Table 4.7 Comparison of advantages and disadvantages of three optimization algorithms

Algorithm	The Generalized Lagrangian Method	Interior Point Method	Sequence Quadratic Programming(modified)
Total length	159.19/157.79	180.58/182.42	172.30/150.43
Largest relative aperture value	1/0.54	1/0.54	1/0.72
Aperture of group 1	84	97	106
Analysis	Smallest aperture with Shortest total length	Larger aperture with longest total length	Largest aperture with longer total length

4.5 本章小结

本章展示了三种优化算法——广义拉格朗日乘子（GLM）算法、内点法、序列二次规划算法在取定相同初始值得情况下，应用于一 30-100 mm、F/# 2.8、全画幅连续变焦系统高斯结构参数求解结果，对比分析了三种算法优化计算结果，为下一步实际镜组替换，获取一个实用变焦系统初始结构提供了数据基础。

第5章 大孔径长焦距全画幅变焦系统优化设计

上一章算法所得变焦系统高斯结构参数为实际镜组替换提供了有效的依据, 根据系统镜组 P^∞ 、 W^∞ 、焦距、相对孔径参数等参数逐步获得镜组实际结构参数, 即镜片数、胶合镜组数、镜片各个面曲率半径及材料等。本章将应用变焦系统镜组内部的 P^∞ 与 W^∞ 分配理论, 将五组全动变焦系统高斯结构转化为实际光学结构, 然后利用光学设计软件进一步优化设计。

5.1 变焦系统镜组结构形式选择及初始结构计算 (基础理论)

根据像差理论的 PWC 理论^{[18][43-45]}, P^∞ 与 W^∞ 是物体处于无穷远处时 P 与 W 的规划值, 属于薄透镜光学系统镜组的内部参数, 每个镜组只有一对固定的 P^∞ 与 W^∞ , 不因物距像距的不同而不同。

如前所述, 上述连续变焦光学系统初级像差系数 (暂不考虑色差, 且由于初级场曲主要由各组分的光焦度所决定也暂时不考虑) 可列为:

$$S_I = \sum_{i=1}^k h_i^4 \varphi_i^3 P_i \quad (5.1)$$

$$S_{II} = \sum_{i=1}^k (h_i^3 h_{pi} \varphi_i^3 P_i - J h_i^2 \varphi_i^2 W_i) \quad (5.2)$$

$$S_{III} = \sum_{i=1}^k (h_i^2 h_{pi}^2 \varphi_i^3 P_i - 2 J h_i h_{pi} \varphi_i^2 W_i + J^2 \varphi_i) \quad (5.3)$$

$$S_V = \sum_{i=1}^k (h_i h_{pi}^3 \varphi_i^3 P_i - 3 J h_{pi}^2 \varphi_i^2 W_i + J^2 \frac{h_{pi}}{h_i} (3 + \mu) \varphi_i) \quad (5.4)$$

其中 i 表示镜组序号, J 表示拉赫不变量, h_i 与 h_{pi} 分别表示第一辅助光线及第二辅助光线在镜组上的入射高度, μ 表示平均折射率倒数的一个参量, 其表达式为:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^k \varphi_i / n_i}{\sum_{i=1}^k \varphi_i} \approx 0.6 \sim 0.65 \quad (5.5)$$

有限远像差参数 P_i 、 W_i 与 P^∞ 、 W^∞ 关系如下:

$$W_i = W_i^\infty + (2 + \mu)u_i \quad (5.6)$$

$$P_i = P_i^\infty + (4W_i^\infty - 1)u_i + (3 + 2\mu)u_i^2 \quad (5.7)$$

u_i 为规化角, $u_i = u_i/h_i\varphi_i$ 。解上述用 P^∞ 与 W^∞ 表示的方程, 即解决满足光学系统初级像差要求的求解问题。不同镜片的组合都有其固有的 P^∞ 与 W^∞ , 由上述算法得到各镜组的 P^∞ 与 W^∞ 后, 进一步需要进行镜组内部 P^∞ 与 W^∞ 的分配。采用不同的组合, 如双胶合与单片镜片的组合或单片镜与双胶合的组合, 不同组合满足不同的 P^∞ 与 W^∞ 的方程组, 求解后即可为经组内分配给各组元 (单片或胶合镜) 的 P^∞ 与 W^∞ 值。一般情况下相对孔径与镜组组分数关系如下表 5.1 所示:

表 5.1 变焦镜组相对孔径与所需镜片参考数

Table 5.1 relative aperture of zoom system group and required lens reference number

镜组相对孔径	参考镜片分数
大于 (1/0.8~1/0.9)	三片透镜以上
1/0.9~1/3	二片透镜以上
小于 1/3	一片透镜以上

镜组内 P^∞ 与 W^∞ 分配与镜组内的光焦度分配及单镜规化曲率值相关, 为了叙述方便, 这里以 30-100mm-F/#2.8 全画幅连续变焦光学系统镜组 1 所得为例, 采用一组双胶合镜组与三片单镜组合的形式。

取镜组焦距值为 ff , 且镜组内光焦度分配为 $zfi(1): zfi(2): zfi(3): zfi(4)$, 各单镜曲率分别为 $c2$ 、 $c4$ 、 $c6$, 单镜材料均为 H-ZK9B, 根据曲率半径与光焦度关系:

$$\varphi = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = (n-1)(c1 - c2) \quad (5.8)$$

可求得单镜曲率半径 r_1 与 r_2 , 再根据单透镜结构参数与 P^∞ 、 W^∞ 关系:

$$P^\infty = P_0 + \frac{4a}{(a+1)}\left(W^\infty - \frac{1}{2(n+2)}\right)^2 \quad (5.9)$$

$$W^\infty = -\frac{n+1}{n}Q2 - \frac{1}{n-1} \quad (5.10)$$

$$P_0 = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right] \quad (5.11)$$

其中 $Q_2 = c_2 - 1$ 。由此可以求得各单镜 P^∞ 与 W^∞ 大小。由镜组内部各组元 (N 组元) P^∞ 与 W^∞ 关系:

$$P^\infty = \varphi_1^3 P_1^\infty + \varphi_2^3 P_2^\infty + \cdots + \varphi_N^3 P_N^\infty \quad (5.12)$$

$$W^\infty = \varphi_1^2 W_1^\infty + \varphi_2^2 W_2^\infty + \cdots + \varphi_N^2 W_N^\infty \quad (5.13)$$

此例中, N 为 4, 且 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 值为 zfi(1)、zfi(2)、zfi(3)、zfi(4), 可求得镜组内胶合镜的 P^∞ 与 W^∞ 值, 对于密接薄透镜组, 组分内为满足色差校正, 应满足:

$$\left(\frac{\varphi}{v} \right)_{\text{胶合}} + \sum_{i=1}^k \frac{\varphi_i}{v_i} = 0 \quad (5.14)$$

即胶合透镜应满足的规化色差系数为:

$$c_{\text{胶合}} = \frac{-\sum_{i=1}^k \varphi_i / v_i}{\varphi_{\text{胶合}}} \quad (5.15)$$

此例中 $\varphi_{\text{胶合}}$ 即 zfi(1), 针对要求的选择玻璃组合的程序 (见附录) 计算顺序及其公式如下:

$$\varphi_1 = \left(c_{\text{胶合}} - \frac{1}{v_2} \right) / \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) \quad (5.16)$$

$$a = 1 + 2 \frac{\varphi_1}{n_1} + 2 \frac{1 - \varphi_1}{n_2} \quad (5.17)$$

$$b = \frac{3}{n_1 - 1} \varphi_1^2 - \frac{1}{n_2 - 1} (1 - \varphi_1)^2 - 2(1 - \varphi_1) \quad (5.18)$$

$$c = \frac{3}{(n_1 - 1)^2} \varphi_1^3 + \frac{1}{(n_2 - 1)^2} (1 - \varphi_1)^3 + \frac{n_2}{n_2 - 1} (1 - \varphi_1)^2 \quad (5.19)$$

$$P_0 = c - \frac{b^2}{4a} \quad (5.20)$$

$$Q_0 = -\frac{b}{2a} \quad (5.21)$$

$$W_0 = -\frac{a+1}{2} Q_0 + \frac{1 - \varphi_1 - b}{3} \quad (5.22)$$

由上述公式可以求得胶合镜三个面的规化曲率值:

$$c2 = Q_0 - 2 \frac{W^\infty - W_0}{a+1} \quad (5.23)$$

$$c1 = c2 + \frac{\varphi_1}{n_1 - 1} \quad (5.24)$$

$$c3 = c2 - \frac{1 - \varphi_2}{n_2 - 1} \quad (5.25)$$

由此可求得胶合镜三面曲率半径值大小为：

$$r_1 = \frac{ff}{c1 \times \varphi_{\text{胶合}}} \quad (5.26)$$

$$r_2 = \frac{ff}{c2 \times \varphi_{\text{胶合}}} \quad (5.27)$$

$$r_3 = \frac{ff}{c3 \times \varphi_{\text{胶合}}} \quad (5.28)$$

各种组合形式的结构参数的计算方式类似，具体计算程序代码^{[39-40][46]}放在附录中。

5.2 30-100 mm 五组全动型恒定大孔径全画幅连续变焦系统设计

5.2.1 构建变焦系统初始结构

鉴于上述分析，本文选取 GLM 算法实现一个全画幅、恒定大光圈 (F/# 3.0)、33-100 mm 连续变焦镜头实际镜组的替换和优化。为了避免各个镜组之间色差相互迭加，导致设计失败，本文设定各运动镜组自身具有色差平衡校正功能，所以每个镜组至少包含一组胶合镜，并从各镜组相对口径对像差的影响考虑确定镜片的数量，例如：镜组 1 相对孔径为 1/0.8，属于大孔径系统，需采取三片以上镜片，由视场与孔径带来的高级像差大，为了更好校正像差，镜组 1 采用四组分形式；镜组 2 相对孔径 1/0.54，属于超大孔径系统，在整个系统变焦过程中运动总长最大，且第一辅助光线与第二辅助光线在其上的入射角及入射高度变化大，其对于系统整体像差贡献最大，为了更好校正镜组像差与系统整体色差，也采用四组分形式，且引入两组胶合镜组；镜组 3-5 相对孔径小，一般采用单组胶合或一片单镜与胶合组合的形式。具体实现步骤如下。根据由最优化得到的具体参数，具体玻璃选型及弯曲计算可以通过计算机自动化进行（程序可参考附录），最终

得到各个镜组内部玻璃的选型及曲率如下图 9 及表 9-表 13 所示：

现根据各镜组焦距值及像差参数 P^∞ 与 W^∞ 进行镜组内部光焦度分配，面型计算与玻璃材料的选择。镜组1—— P^∞ 为9.045与 W^∞ 为2.255。通过计算发现三片单镜的曲率分为-0.8、-1.7、-1.3时，且光焦度分配为0.1:1.2:0.55：（-0.85）下，胶合镜胶合面曲率半径较大（高级像差小），其他镜片曲率半径也较大，如

表 5.2 镜组 1 结构参数计算结果

Table 5.2 Calculation results of structural parameters of group 1

折射面	第 1 面	第 2 面	第 3 面	第 4 面	第 5 面	第 6 面	第 7 面	第 8 面	第 9 面
曲率半径 (mm)	435.675	-101.494	-312.160	69.133	-70.156	-1388.960	-72.032	-254.092	60.950

下表5.2所示，胶合镜玻璃材料为H-LAK4L与H-ZF88，单镜材料为N-SK16，所得参数基本可以满足成像要求。引入玻璃厚度后，通过缩放整体镜组焦距值至67.357，得到镜组1具体参数如表5.3所示：

表 5.3 镜组 1 结构参数

Table 5.3 Structural parameters of group 1

Group 1	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9
Radius	465.662	-108.474	-333.630	73.888	-74.982	-1484.494	-76.986	-271.568	65.142
Thickness	8.55	3.206	1.069	10.688	1.069	5.344	1.069	5.334	Variable
Material	H-LAK4L+H-ZF88			N-SK16		N-SK16		N-SK16	

镜组 2—— P^∞ 为 0.8114 与 W^∞ 为-0.3491。计算两单镜的曲率分为-1.8、-0.2，且光焦度分配为 0.1:0.8:0.05:0.05 下，胶合镜胶合面曲率半径较大，其他镜片曲率半径也较大，如下表 1 所示，胶合镜玻璃材料为 H-K51 与 ZF7，单镜材料为 N-SK16。计算得各面参数如下表 5.4 所示，引入玻璃厚度后，通过缩放整体镜组焦

表 5.4 镜组 2 结构参数计算结果

Table 5.4 Calculation results of structural parameters of group 2

折射面	第 1 面	第 2 面	第 3 面	第 4 面	第 5 面	第 6 面	第 7 面	第 8 面	第 9 面	第 10 面
曲率半径 (mm)	1346.176	140.722	-61.860	28.784	-39.035	69.274	-142.493	-39.035	69.274	-142.493

距值至-25.333，得到镜组 2 具体参数如下表 5.5 所示：

表 5.5 镜组 2 结构参数

Table 5.5 Structural parameters of group 2

Group 2	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}
Radius	1458.447	152.458	-67.020	31.185	-42.291	75.052	-154.377	-42.291	75.052	-154.377
Thickness	3.25	2.167	3.25	5.417	3.25	3.25	3.25	3.25	5.417	Variable
Material	N-SK16		N-SK16		H-K51+ZF7			H-K51+ZF7		

镜组 3—— P^∞ 为 1.398 与 W^∞ 为 1.308。由于是采用单组胶合镜，结构简单，主要选择色差尽可能少的组合，胶合镜玻璃材料选为 H-ZF88 与 H-LAK53A。计算得各面参数如下表 5.6 所示，引入玻璃厚度后，通过缩放整体镜组焦距值至 51.450，得到镜组 3 具体参数如下表 5.7 所示：

表 5.6 镜组 3 结构参数计算结果

Table 5.6 Calculation results of structural parameters of group 3

折射面	第 1 面	第 2 面	第 3 面
曲率半径（mm）	70.961	50.026	-76.088

表 5.7 镜组 3 结构参数

Table 5.7 Structural parameters of group 3

Group 3	r_3	r_4	r_5
Radius	69.343	48.885	-74.353
Thickness	4.886	4.886	Variable
Material	H-LAK52+H-ZF88		

镜组 4—— P^∞ 为 0.0868 与 W^∞ 为 3.1401。同理，采用单组胶合镜组，取色差小且胶合镜胶合面曲率半径较大的组合，玻璃材料选为 H-ZLAF71 与 H-ZBAF3，计算得各面参数如下表 5.8 所示，引入玻璃厚度后，通过缩放整体镜组焦距值至 -145.794，得到镜组 4 具体参数如下表 5.9 所示：

表 5.8 镜组 4 结构参数计算结果

Table 5.8 Calculation results of structural parameters of group 4

折射面	第 1 面	第 2 面	第 3 面
曲率半径 (mm)	-259.655	-56.283	93.578

表 5.9 镜组 4 结构参数

Table 5.9 Structural parameters of group 4

Group 4	r_1	r_2	r_3
Radius	-261.169	-56.611	94.124
Thickness	7.038	5.027	Variable
Material	H-LAF71+H-ZBAF3		

镜组 5—— P^∞ 为 0.1 与 W^∞ 为 0.1。计算单镜的曲率分为-0.4，且光焦度分配为 0.9:0.1 下，胶合镜胶合面曲率半径较大，其他镜片曲率半径也较大，胶合镜玻璃材料为 H-FK71 与 H-ZLAF75A，单镜材料为 N-SK16。引入玻璃厚度后由于焦距值相近，不必缩放，具体各面参数如下表 5.10：

表 5.10 镜组 5 结构参数

Table 5.10 Structural parameters of group 5

Group 5	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
Radius	210.329	-166.356	43.558	-90.283	-784.54
Thickness	5	2	5	5	Variable
Material	N-SK16		H-FK71+H-ZLAF75A		

根据确定的各镜组结构形式，利用 PW 像差理论获得各镜组中镜片的结构参数，由于计算比较粗糙，使得某些边缘光线并不能通过初始结构，需要利用非线性最小二乘对结构做稍微的调整优化。系统实际镜组替换经过 Zemax^[47] 自动优化（5 circles），得到比较好的初始结构，如下图 5.1 所示：

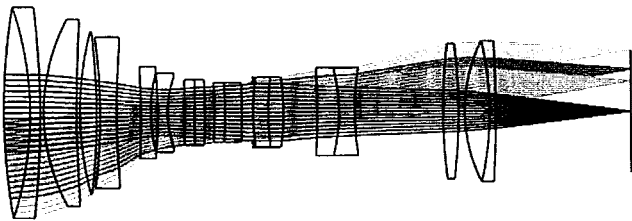


图 5.1 五组全动初始结构

Figure 5.1 Initial structures of five groups of motion zoom lenses

初始结构光学系统整体参数如下表 5.11 所示：

表 5.11 五组全动变焦系统的初始结构参数

Table 5.11 Initial structural parameters of five moving groups of zoom system

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
1	标准面	204.967	8.55	H-LAK4L
2	标准面	-105.992	3.206	H-ZF88
3	标准面	-297.622	1.069	
4	标准面	64.410	10.688	N-SK16
5	标准面	464.132	1.069	
6	标准面	103.939	5.344	N-SK16
7	标准面	-214.711	1.069	
8	标准面	-192.431	5.344	N-SK16
9	标准面	249.619	变化	
10	标准面	-347.431	3.250	N-SK16
11	标准面	52.587	2..167	
12	标准面	-150.126	3.250	N-SK16
13	标准面	34.017	5.417	
14	标准面	-1419.368	3.250	H-K51
15	标准面	-2708.071	3.250	ZF7
16	标准面	-231.692	3.250	
17	标准面	-107.087	3.250	H-K51
18	标准面	-148.019	5.417	ZF7
19	标准面	-328.752	变化	
20	光阑		0.000	
21	标准面	78.239	4.886	H-ZF88
21	标准面	78.239	4.886	H-ZF88
22	标准面	91.486	4.886	H-LAK53A
23	标准面	-76.619	变化	
24	标准面	-261.662	7.041	H-ZLAF71
25	标准面	-55.875	5.029	H-ZBAF3
26	标准面	93.415	变化	
27	标准面	180.774	5.000	N-SK16
28	标准面	-179.323	2.000	

表 5.11 五组全动变焦系统的初始结构参数（续）

Table 5.11 Initial structural parameters of five moving groups of zoom system(Continued)

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
29	标准面	51.611	8.000	H-FK71
30	标准面	-100.904	2.000	H-ZLAF75A
31	标准面	-403.757	变化	

系统像差校正在 Zemax 中进行，同时为了保证变焦比达到 3 倍左右，且保证镜组按照高斯结构的运动形式实现变焦，进行像差校正的同时，应该保证主平面之间不发生太大的偏移，同时保持有较大的间距以实现变焦比。系统始终采用普通球面透镜，最终实现了一款采用全球面的 33-100mm-F/#3.0 全画幅连续变焦镜头的设计，下图 5.2-图 5.4 为系统在 F3.0 及 F8.0 情况下的横截图及传递函数图：

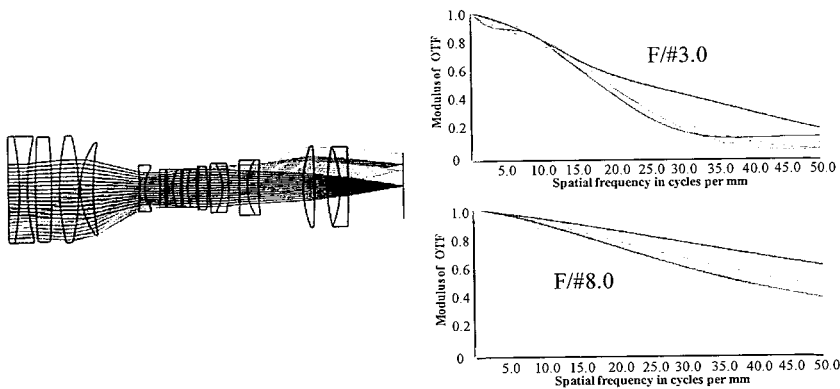


图 5.2 长焦端示意图及其在 F3.0/F8.0 下传递函数

Fig. 5.2 Diagram of telephoto mode and its transfer function under F3.0/F8.0

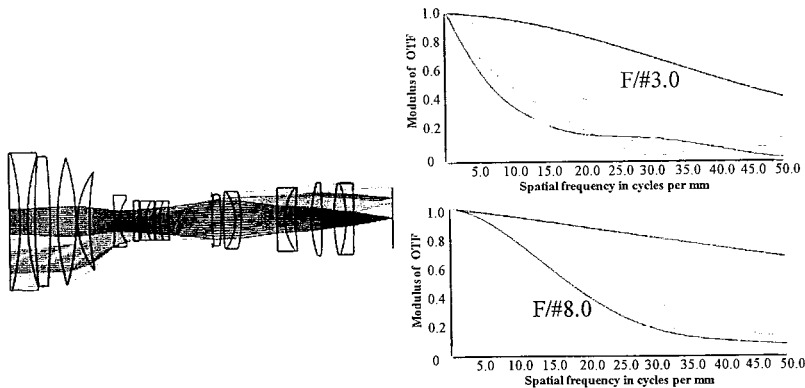


图 5.3 中焦端示意图及其在 F3.0/F8.0 下传递函数

Figure 5.3 Diagram of middle focal length mode and its transfer function under F3.0/F8.0

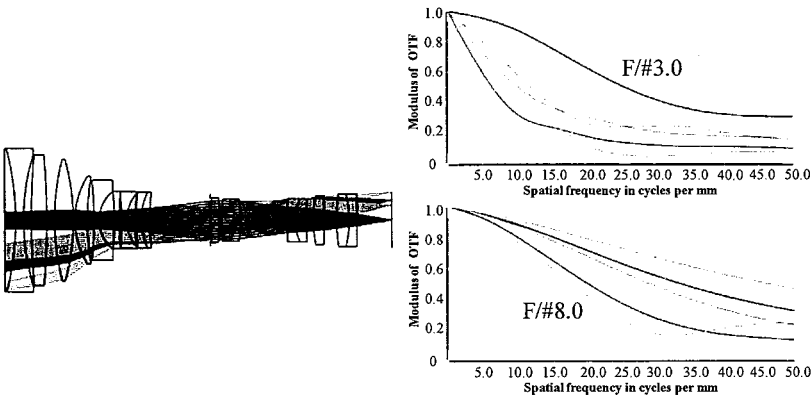


图 5.4 广角端示意图及其在 F/# 3.0/F/# 8.0 下传递函数

Figure 5.4 Diagram of wide-angle mode and its transfer function under F/# 3.0/F/# 8.0

从图中可知：在 F/# 3.0 孔径下，光学系统的平均传递函数在 50 lp 处均大于 0.1，在控制主平面条件下进行像差校正得到的凸轮曲线与初始高斯结构相吻合。

上述变焦系统均采用普通球面玻璃，在 F/#3.0 孔径下，其平均传递函数在 50lp 处均大于 0.1，而在 F/#8.0 孔径下，平均传递函数均大于 0.3。高级像差得到基本校正，系统成像质量较好。为了验证上述设计是否满足原始高斯结构，以及其运动形式是否满足由拉格朗日乘子法得到的凸轮曲线，下表 5.12-表 5.14 给出各焦段镜组主平面间距与高斯结构主平面间距差距：

表 5.12 长焦端各镜组主平面数据

Table 5.12 Principal plane data of each group at the telephoto mode

Telephoto mode	group1-2	group2-3	group3-4	group4-5
Gaussian structure	29.185	25.600	18.980	32.840
Actual structure	29.202	25.593	18.984	32.842
Difference (absolute)	0.016	0.007	0.004	0.002

表 5.13 中焦端各镜组主平面数据

Table 5.13 Principal plane data of each group at the Middle focal length mode

Middle focal length mode	group1-2	group2-3	group3-4	group4-5
Gaussian structure	16.755	53.653	36.340	15.477
Actual structure	16.798	53.630	36.351	15.467
Difference (absolute)	0.043	0.023	0.011	0.01

表 5.14 短焦端各镜组主平面数据

Table 5.14 Principal plane data of each group at the Short focal length mode

Short focal length mode	group1-2	group2-3	group3-4	group4-5
Gaussian structure	4.655	63.553	42.468	9.348
Actual structure	4.666	63.546	42.471	9.351
Difference (absolute)	0.011	0.007	0.003	0.003

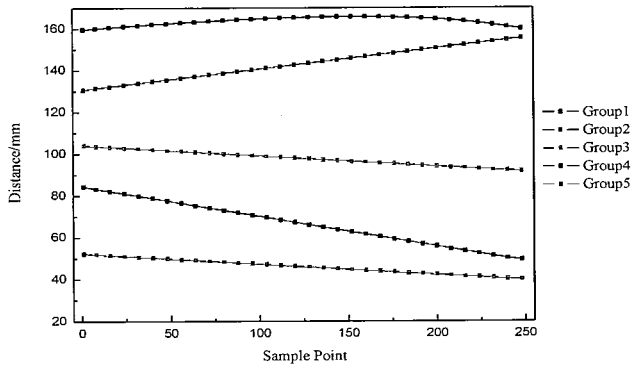


图 5.5 33-100mm-F/#3.0 五组全动变焦全球面光学系统凸轮曲线

Figure 5.5 Cam curve of five groups of motion 33-100 zoom lenses

高斯结构对于变焦系统设计来说至关重要，其光角度分配、镜组间距大小、运动形式及凸轮，采用全球面光学系统整体参数如下表 5.15 所示。

表 5.15 五组全动变焦全球面系统的初始结构参数

Table 5.15 Initial structural parameters of five moving groups zoom systems with all spherical surfaces

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
1	标准面	-5.576×10^7	7.000	PSK3
2	标准面	-187.791	5.000	LASF35
3	标准面	144.515	5.001	
4	标准面	481.875	10.000	BAK1
5	标准面	-484.213	5.000	
6	标准面	158.494	12.000	H-LAK67
7	标准面	-147.993	1.000	
8	标准面	54.065	8.000	N-LAF34
9	标准面	176.214	变化	
10	标准面	-207.319	3.250	F5

表 5.15 五组全动变焦全球面系统的初始结构参数（续表）

Table 5.15 Initial structural parameters of five moving groups zoom systems with all spherical surfaces (Continued)

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
11	标准面	24.026	9.666	
12	标准面	-213.586	3.250	N-SSK2
13	标准面	248.946	1.424	
14	标准面	-220.405	3.250	H-BAK8
15	标准面	26.643	5.000	N-SF4
16	标准面	83.247	1.096	
17	标准面	187.240	3.250	H-K1
18	标准面	40.386	5.417	SF53
19	标准面	125.408	变化	
20	光阑		0.000	
21	标准面	117.270	6.000	H-LAF54
22	标准面	-125.584	1.353	
23	标准面	165.384	8.000	BAFN6
24	标准面	-32.655	4.000	H-ZF13GT
25	标准面	-81.313	变化	
26	标准面	3225.222	5.000	ZF7L
27	标准面	36.258	7.000	D-LAK70
28	标准面	210.702	变化	
29	标准面	80.358	7.000	LAKN13
30	标准面	-375.828	7.959	
31	标准面	111.951	8.000	SK2
32	标准面	-71.848	5.000	H-ZLAF53BGT
33	标准面	-913.697	变化	

由于曲线线性度等因素直接影响到后续系统的像差校正与加工装调。考虑到凸轮曲线的加工与装调（且一般不超过 4 条），各镜组采用简单的运动形式，曲线线性度好，在确定运动形式的情况下，利用三种最优化算法——广义拉格朗日乘子法、内点法及序列二次规划算法得到五组全动全画幅恒定大孔径（F/# 2.8）连续变焦系统的高斯结构。这些高斯结构是在满足评价函数，满足三级赛德像差（ PW 表示）要求的情况下得到的局部极小值点这三种算法得到的，具有很高的

实用性。其中由广义朗格朗日乘子法得到的高斯结构某些镜组的相对孔径较其他算法来说较大,但仍不失为一个好的高斯结构,所以本文从此高斯结构出发,将高斯结构转变成实际镜片,在进行像差校正的同时,控制主平面间距与高斯结构的一致性,整个系统只包含普通球面镜,最终获得一款 33-100 全画幅恒定大孔径 ($F/\# 3.0$) 连续变焦系统,其运动形式简单,凸轮曲线只需加工四条,线性度好,加工方便,成像质量在长中短三个焦段相当,基本可以满足需求。也由此可见,利用最优化算法求解高斯结构的实用性及便利。由于系统仅仅采用普通球面透镜,系统仍然存在一定的高级彗差及高级场曲等高级像差,如果引进非球面,对系统剩余像差进行校正,系统成像质量将得到进一步提升。

5.2.2 初始结构非球面设计

如前所述,为了进一步提升系统成像质量,需要引入非球面对系统高级像差做进一步的平衡校正^[48-50]。接下来将以上述球面连续变焦光学系统为初始结构做进一步设计。连续变焦光学系统中各镜组光焦度的合理分配、凸轮曲线的线性度对整体系统像差有很大影响,为此在进行优化设计过程中,应降低相关参数的权重,获得更广的解域,有利于最小二乘法算法找到合适的局部最小解。同时,为了进一步减少各镜组产生的高级像差,对像差承担较大的镜组(如主光线入射高度较大的镜组)引入非球面(偶次)。一般情况下,在远离光阑处设置非球面有利于高级球差的校正,在远离光阑处设置非球面,有利于系统彗差、像散及畸变的校正。有必要指出的是非球面不能改变镜片的光焦度,故对 Petval 场曲无影响,而对非球面第 4 阶系数的优化与优化初级像差的效果是一样的^[48],所以一般只选择其一作为优化变量。为了对比一阶光学参数(镜组焦距等)权重及凸轮曲线线性度权重的影响,作者设计了两个方案,成像质量均较好,同时也证实了在高度非线性空间中存在许多可行局部极小解,举例如图 5.6 所示,在高度非线性的多维空间存在许多的局部极小值点,当然最小值点一般情况下是唯一的,若不做限制,由阻尼最小二乘算法从初始点(满足初级像差要求)自由收敛至局部极小值解 1,但是若对凸轮曲线的线性度等进行限制,则收敛域会相应缩小,最终将从原初始点收敛至局部极小点 a,如下图 5.7 所示。(原图 5.6 中局部极小点 2)。方案一属于不对变焦系统凸轮曲线做限制要求,其最终优化结果的结构参数如下表 5.16 所示。

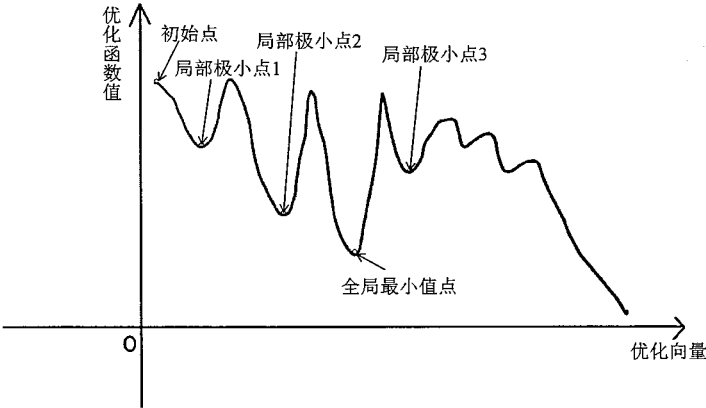


图 5.6 不限制凸轮曲线下目标函数极小点分布示意图

Figure 5.6 Diagram of the distribution of the minimum point of the objective function without limiting the cam curve

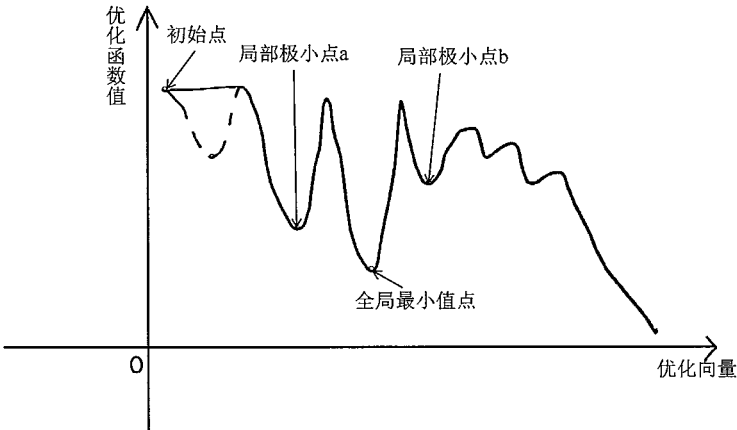


图 5.7 限制凸轮曲线下目标函数极小点分布示意图

Figure 5.7 Diagram of the distribution of the minimum point of the objective function under the limit cam curve

表 5.16 不限制凸轮曲线下变焦系统最终优化结构参数

Table 5.16 The final optimized structural parameters of the zoom system without limiting the cam curve

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
1	标准面	87.995	15.000	H-ZPK5
2	标准面	139.993	6.292	
3	标准面	199.148	3.000	H-ZF7LA
4	标准面	83.671	3.670	
5	偶次非球面	82.747	9.446	H-ZPK2A

表 5.16 不限制凸轮曲线下变焦系统最终优化结构参数 (续表)

Table 5.16 The final optimized structural parameters of the zoom system without limiting the cam curve (Continued)

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
6	标准面	151.774	1.000	
7	标准面	73.394	19.437	H-ZPK5
8	标准面	3.713×10^4	变化	
9	偶次非球面	167.483	2.994	H-ZBAK7
10	标准面	21.611	15.146	
11	标准面	-90.383	1.000	H-K9LGT
12	标准面	42.745	3.461	H-ZF71
13	标准面	92.884	6.543	
14	标准面	-31.757	2.754	H-ZK3
15	标准面	78.683	7.449	D-ZLAF50
16	标准面	-65.214	变化	
17	光阑		1.000	
18	偶次非球面	38.252	8.000	H-K10
19	标准面	634.940	1.000	
20	标准面	248.676	2.273	H-KF6
21	标准面	-258.874	3.000	D-ZF93
22	标准面	-163.496	变化	
23	标准面	-56.065	3.643	H-ZLAF71
24	标准面	111.810	4.935	D-ZK2
25	标准面	-58.149	变化	
26	偶次非球面	121.906	8.000	H-LAF1
27	标准面	-43.203	0.999	
28	标准面	137.786	10.000	H-BAK2
29	标准面	-26.386	4.000	H-ZLAF89L
30	标准面	-1663.901	变化	

其中偶次非球面定义如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \alpha_6 r^{12} + \alpha_7 r^{14} + \alpha_8 r^{16}$$

c 为顶点曲率大小, k 为二次曲线常数, $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 为第 2、4、……、16 阶系数。

各面非球面系数如下表 5.17 所示，其摄远、中焦及广角端渐晕系数如下表 5.18 所示。

表 5.17 非球面系数

Table 5.17 Aspheric coefficient

非球面阶数	第 5 面	第 9 面	第 18 面	第 26 面
4	-1.820×10^{-7}	-2.634×10^{-11}	-3.044×10^{-15}	-4.093×10^{-19}
6	2.112×10^{-6}	-1.682×10^{-9}	1.080×10^{-12}	-4.113×10^{-16}
8	-2.453×10^{-6}	-3.356×10^{-8}	2.265×10^{-10}	-5.813×10^{-13}
10	-8.504×10^{-7}	2.024×10^{-9}	-2.288×10^{-12}	3.710×10^{-15}

表 5.18 渐晕系数

Table 5.18 Vignetting coefficient

视场	摄远端	中焦端	广角端
1.0 视场	0.228	0.505	0.429

各焦段镜组间距（mm）及变焦系统后工作距（即最后镜组与像面的距离）如下表 5.19 所示：

表 5.19 各焦段镜组间距值

Table 5.19 Spacing between zoom groups of each focal length

系统焦距值 /mm	镜组 1-2 间距	镜组 2-3 间距	镜组 3-4 间距	镜组 4-5 间距	后工作距
100	33.450	0.997	7.370	0.999	53.150
90	30.764	4.219	6.595	1.550	52.694
80	27.877	8.010	5.896	2.097	51.740
70	24.650	12.543	5.264	2.622	50.342
60	20.489	17.689	4.584	3.300	48.860
50	14.817	23.592	3.741	4.312	47.345
40	7.055	31.000	2.654	5.723	45.553
33	0.998	39.046	1.949	6.586	43.409

上述设计均采用成都光明玻璃，系统摄远端（焦距 100mm）处总长为 240.008mm，广角端（焦距 33mm）处总长 236.030mm，整体长度适中，其平面示意图如下图 5.8 所示。由以上镜组移动数据可知，由于目标优化函数任由算法收敛至附近极小解，

各镜组运动曲线线性度是不足，畸变量各及焦段传递函数（50lp 及 30lp）如下
图 5.9-5.10 所示，其凸轮曲线如图 5.11 所示。

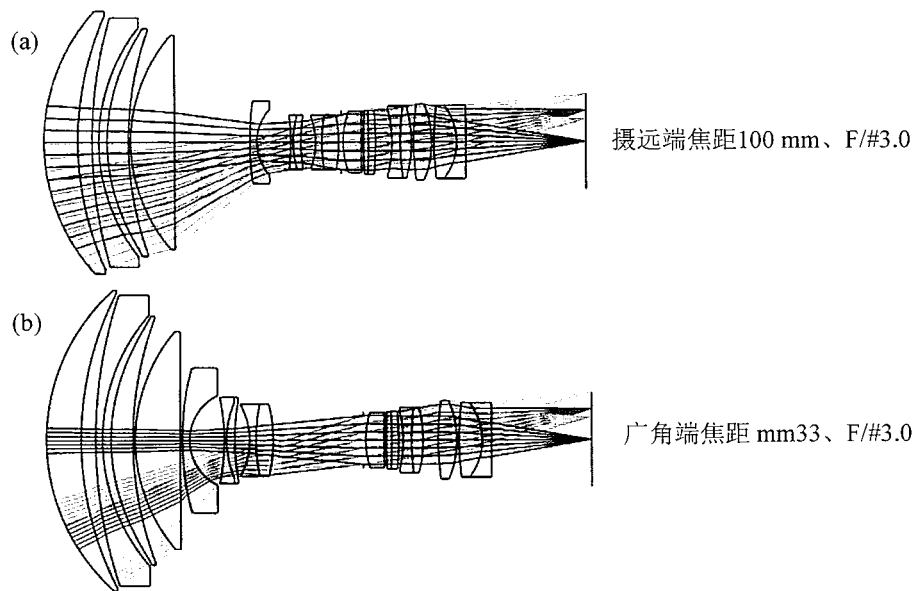


图 5.8 不限制凸轮线性度下变焦系统摄远端与广角端示意图 (a) 摄远端结构示意图 (b) 广角端结构示意图

Figure 5.8 Diagram of the telephoto mode and wide-angle mode of the zoom system without limiting the linearity of the cam curve (a) Diagram of the telephoto mode structure (b) Diagram of the wide-angle mode structure

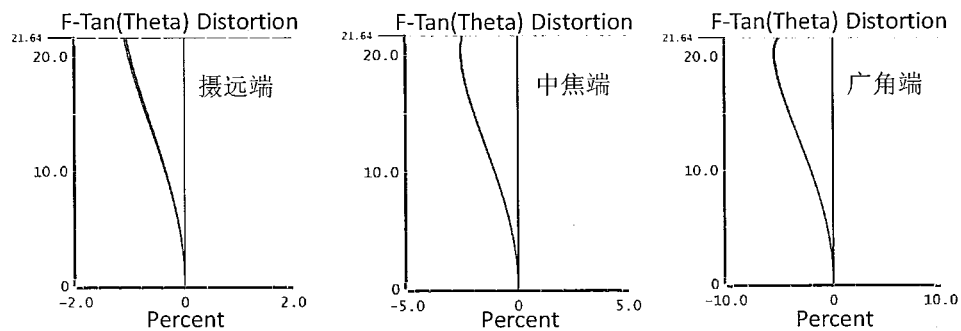


图 5.9 摄远、中焦、广角端畸变量示意图

Figure 5.9 Diagram of the distortions at the telephoto, mid-focal length, and wide-angle mode

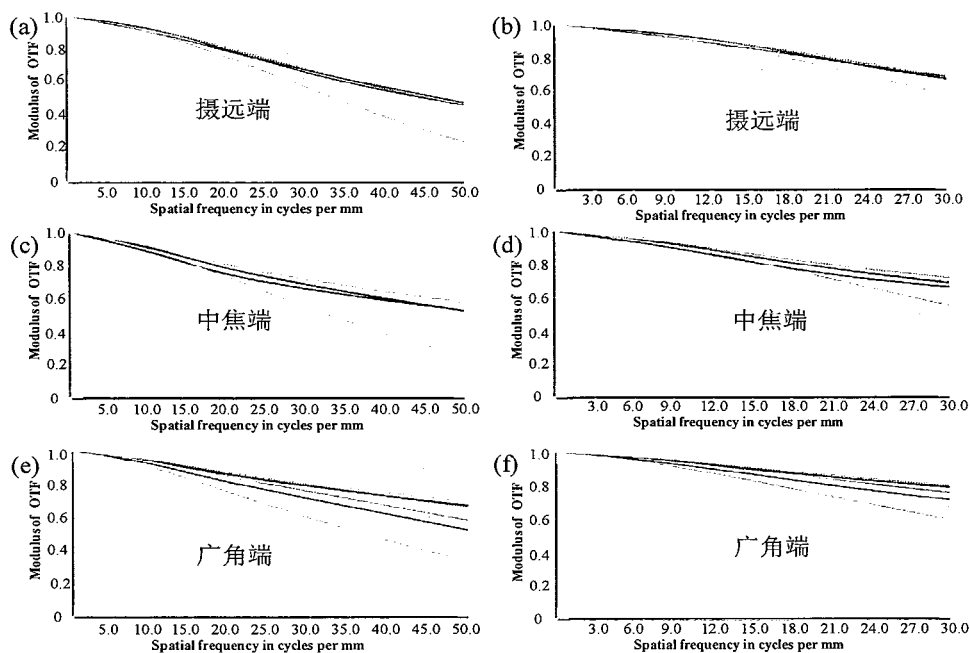


图 5.10 不限制凸轮线性度下变焦系统摄远、中焦及广角端在 50lp、30lp 下全视场传递函数值 (a) 摄远端 50lp 处全视场传递函数 (c) 中焦端 50lp 处全视场传递函数 (e) 广角端 50lp 处全视场传递函数 (b) 摄远端 30lp 处全视场传递函数 (d) 中焦端 30lp 处全视场传递函数 (f) 广角端 30lp 处全视场传递函数

Figure 5.10 Full field of view modulation transfer function(MTF) at 50 lp, 30 lp at telephoto, middle focal length and wide-angle mode of the zoom system without limiting cam curve linearity (a) Full field of view MTF of telephoto mode at 50 lp (c) Full field of view MTF of middle focal length mode at 50 lp (e) Full field of view MTF of wide angle mode at 50 lp (b) Full field of view MTF of telephoto mode at 30 lp (d) Full field of view MTF of middle focal length at 30 lp (f) Full field of view MTF of wide angle mode at 30 lp.

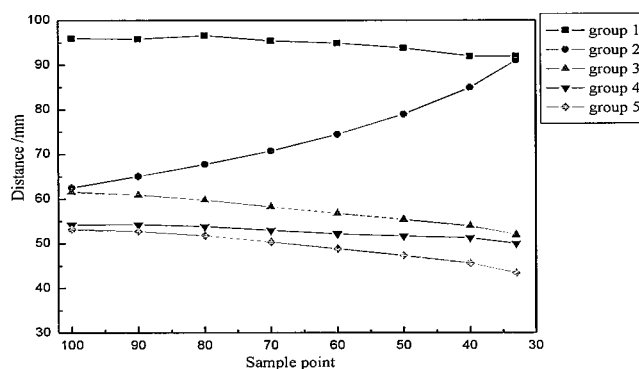


图 5.11 不限制凸轮情况下凸轮示意图

Figure 5.11 Diagram of the cam curve without limiting

从图 5.10 中可看出, 变焦系统各焦段系统全视场范围的传递函数在 50lp 处

均大于 0.2，在 30lp 处均大于 0.5，摄远端畸变量小于 2%，中焦端小于 3%，广角端小于 6%，全视场成像质量好。这是一个满足系统像差平衡的解。

但由图 5.11 所描述的镜组凸轮曲线可见，在不对运动镜组的凸轮曲线作限制情况下，凸轮曲线线性度不好，甚至有些镜组有高阶非线性运动的出现，提升了后期凸轮加工的难度。为此对凸轮线性度进行限制，从上述未限制凸轮情况下的结果看，对于镜组 3-5 进行线性度限制是比较合适的。重新从原初始点（满足初级像差要求）出发进行优化设计，同前所述，在设计过程中引入偶次非球面对高级像差进行平衡，最终可以得到以下设计结果，其结构参数如下表 5.20 所示：

表 5.20 限制凸轮曲线下变焦系统最终优化结构参数

Table 5.20 Final optimization of structural parameters of the zoom system with cam curve limit

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
1	标准面	81.476	14.495	H-ZBAF21
2	标准面	214.704	0.906	
3	标准面	199.830	1.000	H-ZF71
4	标准面	74.942	0.499	
5	偶次非球面	63.225	16.323	H-ZPK7
6	标准面	727.859	变化	
7	偶次非球面	148.013	0.499	H-ZK10L
8	标准面	27.654	13.083	
9	标准面	172.288	0.500	D-ZLAF50
10	标准面	28.404	7.380	
11	标准面	54.968	17.328	H-ZK2
12	标准面	-36.578	0.499	
13	标准面	83.437	8.981	H-ZLAF76
14	标准面	-155.569	变化	
15	光阑		0.499	H-ZPK5
16	偶次非球面	44.812	22.026	
17	标准面	-36.787	1.078	ZF2
18	标准面	-92.070	变化	
19	标准面	-245.891	0.500	TF3

表 5.20 限制凸轮曲线下变焦系统最终优化结构参数（续表）

Table 5.20 Final optimization of structural parameters of the zoom system with cam curve limit (Continued)

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
20	标准面	44.360	10.000	H-LAK11
21	标准面	123.959	变化	
22	偶次非球面	72.211	8.570	H-ZPK5
23	标准面	-45.707	1.773	
24	标准面	-165.592	9.291	H-K1
25	标准面	-22.459	7.004	D-LAF82L
26	标准面	-140.152	变化	

偶次非球面定义与前述一致，各面非球面系数如下表 5.21 所示，其摄远、中焦及广角端渐晕系数如下表 5.22 所示：

表 5.21 非球面系数

Table 5.21 Aspheric coefficient

非球面阶数	第 5 面	第 7 面	第 16 面	第 22 面
4	-1.464×10^{-7}	6.540×10^{-7}	-2.501×10^{-6}	-1.430×10^{-6}
6	-4.697×10^{-11}	-2.557×10^{-10}	-2.152×10^{-9}	-2.807×10^{-9}
8	-6.602×10^{-16}	8.908×10^{-14}	5.179×10^{-12}	-1.086×10^{-13}
10	-5.271×10^{-18}	-2.252×10^{-17}	-1.362×10^{-14}	7.507×10^{-15}

表 5.22 渐晕系数

Table 5.22 Vignetting coefficient

视场	摄远端	中焦端	广角端
1	0.199	0.402	0.508
0.7	0.054	0	0
0.5	0.022	0	0

各焦段镜组间距（mm）及变焦系统后工作距（即最后镜组与像面的距离）如下表 5.23 所示：

表 5.23 各焦段镜组间距值

Table 5.23 Spacing between zoom groups of each focal length

系统焦距值 /mm	镜组 1-2 间距 /mm	镜组 2-3 间距 /mm	镜组 3-4 间距 /mm	镜组 4-5 间距 /mm	后工作距 /mm
100	25.229	0.494	3.585	2.959	81.499
90	23.738	3.413	3.261	3.248	76.377
80	21.901	6.869	2.908	3.572	71.241
70	19.594	11.036	2.498	3.964	66.079
60	16.597	16.171	2.019	4.455	60.883
50	12.487	22.662	1.472	5.052	55.651
40	6.494	31.082	0.874	5.723	50.396
33	0.495	39.069	0.499	6.547	46.459

上述设计亦均采用成都光明玻璃，系统摄远端（焦距 100mm）处总长为 256.002 mm，广角端（焦距 33mm）处总长 235.306 mm，其平面示意图如下图 5.12 所示。经过凸轮曲线线性度的限制，目标优化函数由算法收敛至附近极小解，该解是符合线性度要求的局部极小值解，各焦段传递函数（50lp 及 30lp）及畸变量如下图 5.13-5.14 所示，由上述数据可得最终凸轮曲线如图 5.15 所示。

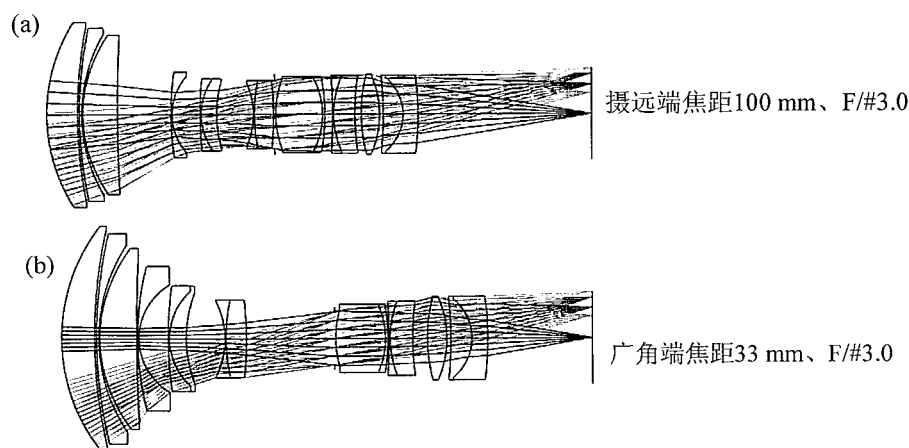


图 5.12 限制凸轮线性度下变焦系统摄远端与广角端示意图 (a) 摄远端结构示意图 (b) 广角端结构示意图

Figure 5.12 Diagram of the telephoto mode and wide-angle mode of the zoom system with limited the linearity of the cam curve (a) Diagram of the telephoto mode structure (b) Diagram of the wide-angle mode structure

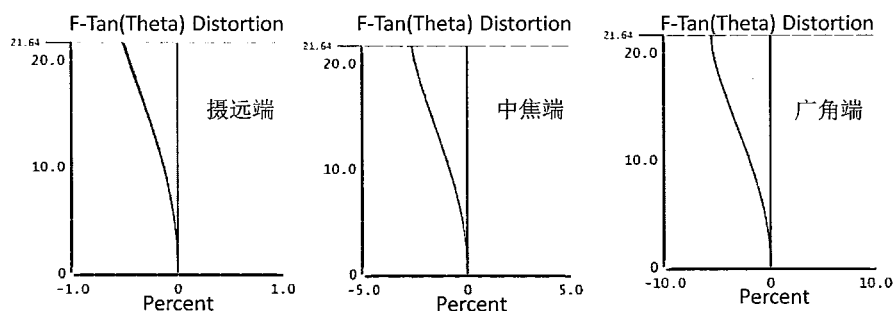


图 5.13 摄远、中焦 (50 mm)、广角端畸变量示意图

Figure 5.13 Diagram of the distortions at the telephoto, mid-focal length(50 mm), and wide-angle mode

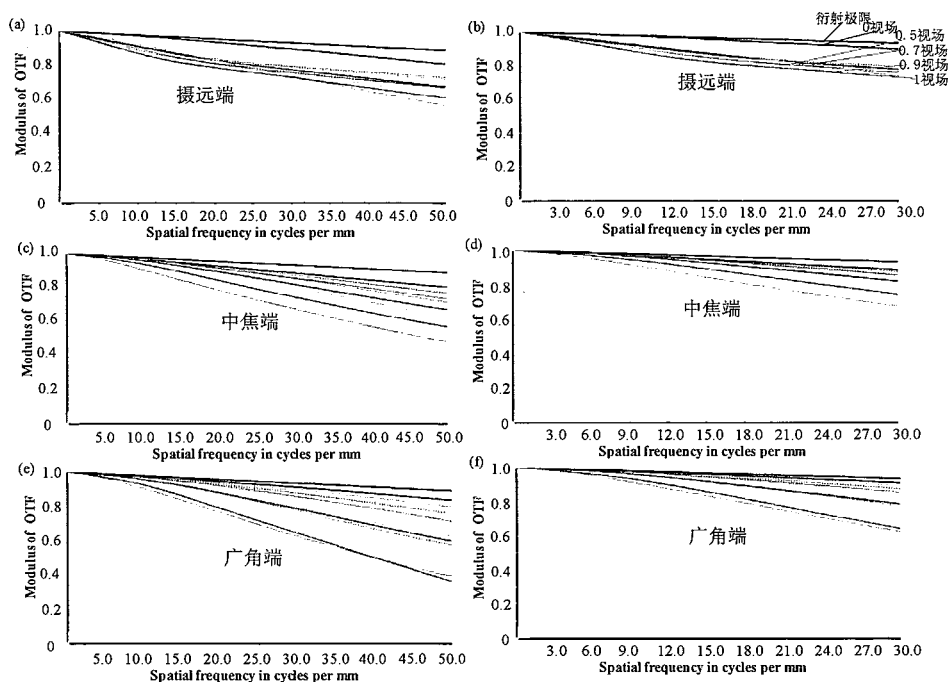


图 5.14 限制凸轮线性度下变焦系统摄远、中焦及广角端在 50lp、30lp 下全视场传递函数值 (a) 摄远端 50lp 处全视场传递函数 (c) 中焦端(50mm)50lp 处全视场传递函数 (e) 广角端 50lp 处全视场传递函数 (b) 摄远端 30lp 处全视场传递函数 (d) 中焦端 30lp 处全视场传递函数 (f) 广角端 30lp 处全视场传递函数

Figure 5.14 Full field of view modulation transfer function(MTF) at 50 lp, 30 lp at telephoto, middle focal length and wide-angle mode of the zoom system with limited cam curve linearity (a) Full field of view MTF of telephoto mode at 50 lp (c) Full field of view MTF of middle focal length mode at 50 lp (e) Full field of view MTF of wide angle mode at 50 lp (b) Full field of view MTF of telephoto mode at 30 lp (d) Full field of view MTF of middle focal length at 30 lp (f) Full field of view MTF of wide angle mode at 30 lp.

从图 5.14 中可看出, 变焦系统各焦段系统全视场范围传递函数在 50lp 平均值大于 0.4, 在 30lp 处平均值大于 0.6, 摄远端畸变量小于 1%, 中焦端小于 3%, 广角端小于 6%, 全视场成像质量好。这是一个满足系统像差平衡的解。从图 5.15 可以看出, 由于针对凸轮曲线的非线性度进行优化, 镜组 3-5 凸轮曲线线性度有了很大的改善, 降低了变焦系统机械加工凸轮的难度。为验证设计成像质量, 沿凸轮曲线相应取焦距 90mm、80mm、70mm、60mm、40mm 为抽样点, 查看光学系统全视场范围成像质量, 结果表明成像质量好, 具体如下图 5.16-5.20 所示:

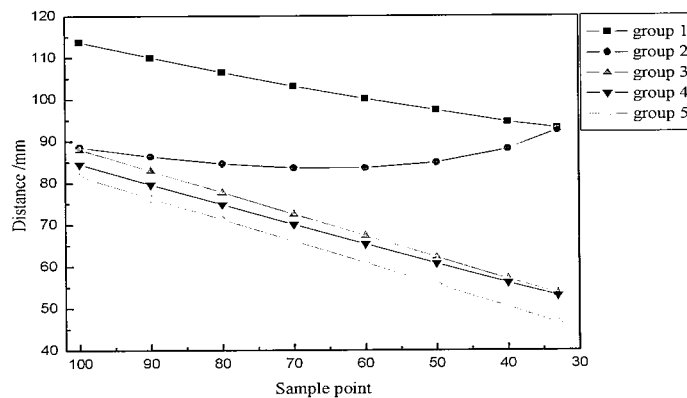


图 5.15 限制凸轮情况下凸轮示意图

Figure 5.15 Diagram of the cam curve with limit

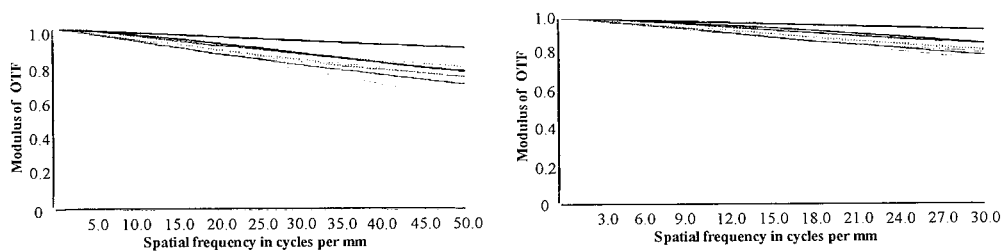


图 5.16 50lp 及 30lp 处焦距 90 mm - F/# 3.0 传递函数

Figure 5.16 Focal length 90 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

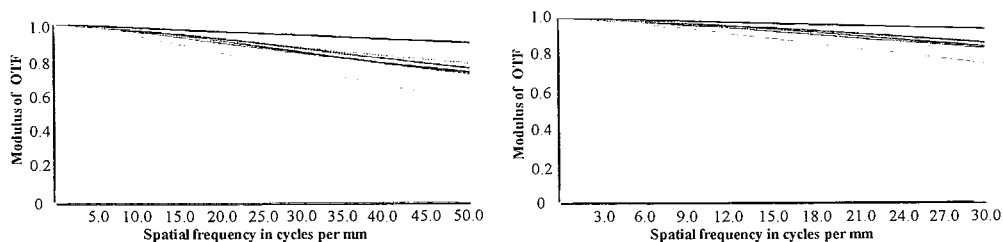


图 5.17 50lp 及 30lp 处焦距 80 mm-F/#3.0 传递函数

Figure 5.17 Focal length 80 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

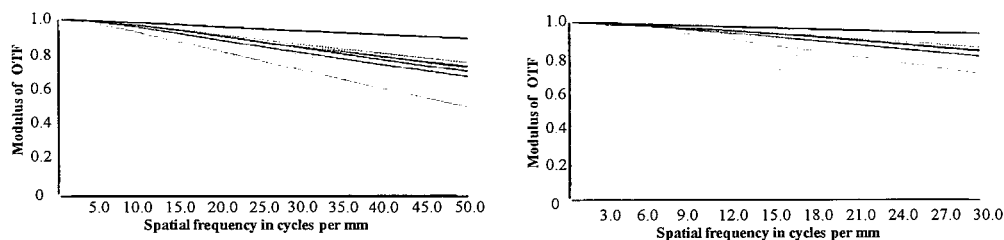


图 5.18 50lp 及 30lp 处焦距 70 mm - F/# 3.0 传递函数

Figure 5.18 Focal length 70 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

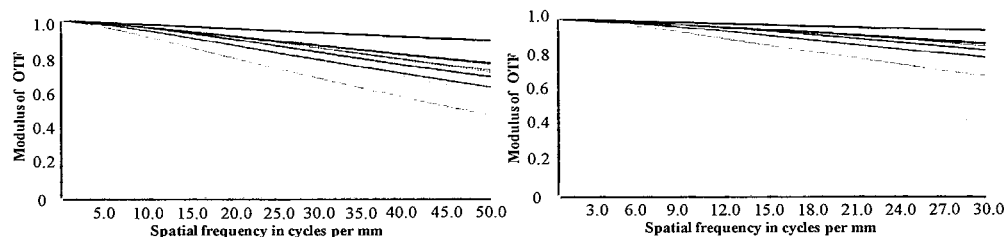


图 5.19 50lp 及 30lp 处焦距 60 mm-F/#3.0 传递函数

Figure 5.19 Focal length 60 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

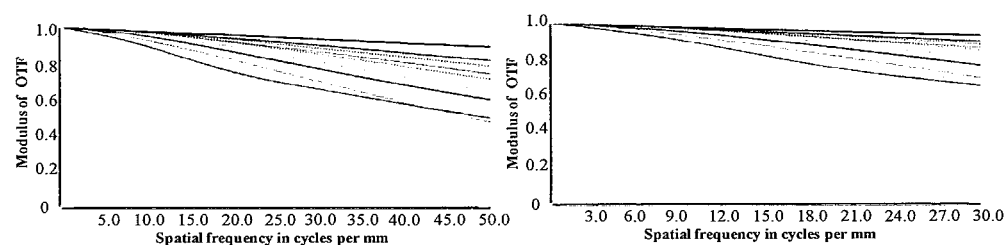


图 5.20 50lp 及 30lp 处焦距 40 mm-F/#3.0 传递函数

Figure 5.20 Focal length 40 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

5.2.3 结论

高斯结构对于变焦系统设计来说至关重要，其光焦度分配、镜组间距大小、运动形式及凸轮曲线线性度等因素直接影响到后续镜头的像差校正与加工装调。考虑到凸轮曲线的加工与装调（且一般不超过 4 条），各镜组采用简单的运动形式，曲线线性度好，在确定运动形式的情况下，利用三种最优化算法——广义拉格朗日乘子法、内点法及序列二次规划算法得到五组全动全画幅恒定光圈（2.8）连续变焦系统的高斯结构。这些高斯结构是在满足优化函数，满足三级赛德像差（PW 表示）要求的情况下得到的局部极小值点这三种算法得到的，具有很高的实用性。

由广义朗格朗日乘子法得到的高斯结构镜组的相对孔径较其他算法来说较大,但仍不失为一个好的高斯结构,所以本章从此高斯结构出发,将高斯结构转变成实际镜片,在进行像差校正的同时,控制主平面间距与高斯结构的一致性,整个系统只包含普通球面镜,最终获得 33-100 mm 全画幅恒定光圈 (F/# 3.0) 连续变焦系统,其运动形式简单,凸轮曲线只需加工四条,线性度好,加工方便,成像质量在长中短三个焦段相当,基本可以满足需求。由此可见,利用最优化算法求解高斯结构的实用性及便利。

由于初始变焦系统仅仅采用普通球面透镜,系统仍然存在一定的高级彗差及高级场曲,如果引进非球面,对系统剩余像差进行校正,系统成像质量将得到进一步提升。本章后期对变焦系统引入非球面优化设计,从以上全球面设计后的初始结构出发,针对凸轮曲线是否限制线性度出发,得到两个优质成像质量的变焦设计。其中限制凸轮曲线线性度所得结构较为紧凑,最小总长 235.306 mm,与有限制凸轮线性度所得结构最小总长相当,同时线性度有了很大的提升,且全视场成像质量有了更大的提升,50lp 处均能达到 0.4 左右,30lp 处均能达到 0.6 以上,广角端最大畸变量小于 6%,其中限制凸轮线性度变焦系统设计给出了各焦段成像质量,从图中也可看出该设计整体成像质量优质,设计更佳。

上述最终的变焦系统的设计结果表明,利用广义拉格朗日乘子法、内点法、修正序列二次规划算法等最优化理论结合自建优化函数,实现长焦距大孔径(恒定 F 数)全画幅连续变焦光学系统高斯结构的参数优化计算具有很高的实用价值,整个变焦系统的设计正是从算法所得的结果出发逐步得到最终的设计,这可为进行变焦或定焦等高性能光学系统初始结构的计算提供一个思路。

5.3 22-110mm 六组全动型恒定大孔径全画幅连续变焦系统设计

5.3.1 构建变焦系统初始结构

如前面所述,在取各镜组尽可能线性运动的简单形式下,五组全动难以实现更大变焦比的全画幅大孔径连续变焦光学系统。为增强设计的实用性,仍然限定变焦系统的凸轮曲线不超过 4 条。基于内点法具有鲁棒性好,收敛速度快等特点,作者通过增加一个镜组,采取图 3.5 的联动形式作为初始结构,利用内点法实现一全画幅、恒定大孔径 (F/#2.8) 20-100mm 连续变焦光学系统高斯结构的优化计

算。初始结构选定一长焦端焦距 100mm 各镜组焦距值比较任意的初始值如下：
 $x_0=[100, -50, 100, 100, -50, 50, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 5, 5, 20, 5, 48.8]$;
前 6 个数据代表镜头镜组 1 至镜组 6 焦距值大小，第 7-18 位分别表示镜组的 P^∞ 和 W^∞ 值的大小，第 19-23 位分别表示镜组 2 到镜组 3，镜组 3 到镜组 4，镜组 4 到镜组 5，镜组 5 到镜组 6，镜组 6 到相面距离，而镜组 1 实际上可根据高斯光学理论计算 (30)。镜组的边界条件合理限制了解空间，可避免无意义的解的出现，在高度非线性的解空间内部存在着许许多多的局部最小解，同时一旦取定边界条件，根据最优化理论，一般局部最优解总会在某个边界上，所以取适当的边界条件往往才能获得比较实用的解，各镜组边界条件列表 5.24 如下：

表 5.24 内点法-镜组及总长度边界条件

Table 5.24 Interior point method - Group and total length boundary conditions

Mode	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Total length
Long focal length	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 0	≥ 1	≥ 0	≥ 100
Short focal length	≥ 2	≥ 0	≥ 0		≥ 0	≥ 20	

值得注意的是对于一阶边界条件，如变焦系统的长焦及短焦端焦距值，一般给予较小的权重，这对于系统像差平衡是十分有利的，但对系统变焦比为 5 倍应取较大权重。经过内点法优化计算，得到如下结果：

$x_0=[100.03, -30.49, 83.35, 93.33, -61.60, 49.52, -0.99, 1.65, 0.0072, 0.077, -0.13, 0.47, 0.42, 0.0096, 0.74, 0.46, 1.16, 0.24, 17.79, 5.0024, 22.73, 11.75, 47.24]$;

其中短焦端 D1=1.92，D2=84.39，D3=5.00，D4=31.11，D5=3.37，D6=30.59。系统长焦端焦距值大小为 109.84，总长为 154.76，短焦端焦距值为 21.42，总长为 156.28。变焦过程保持相对孔径 2.8 不变。各个镜组焦距值与相对孔径的大小如下表 5.25 所示：

表 5.25 内点法-各镜组光焦距及相对孔径

Table 5.25 Interior point method - Focal length and relative aperture of each group

Group name	group1	group2	group3	group4	group5	Group6
Focal value	100.026	-30.494	83.354	93.331	-61.598	49.516
Relative aperture	1:1.01	1:0.46	1:3.73	1:3.68	1:1.76	1:1.14

镜组 2 相对口径较大,其他相对孔径均不算太大,根据镜组相对孔径选择镜片数,与前述一致,为使得各运动镜组自身具有像差平衡校正功能,所以每个镜组至少包含一组胶合镜,镜组 1 相对孔径介于 1/0.9 ~ 1/3 之间,一般选用二透镜组,但是由于本设计镜组 1 直径超过 100,为避免镜组内部某一镜片承担的光角度过大,弯曲过大,这里选用三透镜组,即一胶合镜与两片单镜组合。镜组 2 相对孔径大,高于 1/0.8 故采用两片单镜和两片双胶合镜组成。镜组 3 和镜组 4 相对孔径低于 1/3 且联动,为避免胶合镜作用冗余的同时多引进曲率变量便于后期像差的校正,两组采用两片单镜和一片胶合镜组合。镜组 5 与镜组 6 相对孔径均介于 1/0.9~1/3 之间,且镜组 5 相对孔径较小,可采用单镜与双胶合组合,而针对镜组 6,考虑到本设计为变焦比达到 5 倍,且焦距跨度从广角端 22mm 到摄远端 110mm,靶面为全画幅的连续变焦光学系统,系统高级像差和色差的平衡都具有很高的挑战性,故采用两组双胶合镜和单镜的组合方式,提高系统色差校正能力。

现根据各镜组焦距值及像差参数 P^∞ 与 W^∞ 进行镜组内部光焦度分配,面型计算与玻璃材料的选择。镜组 1—— P^∞ 为-0.9919 与 W^∞ 为 0.4216。通过计算发现取两片单镜的曲率为-3 和 1.6 时,且光焦度分配为 0.5:0.1:0.4 下,所有镜片曲率半径较大,如下表 5.26 所示,胶合镜玻璃材料为 H-K9L 与 H-ZF72A,单镜材料为 H-ZK9B,所得参数基本可以满足成像要求。引入玻璃厚度后,通过缩放整体镜组焦距值至 100.026,得到镜组 1 具体参数如下表 5.27 所示:

表 5.26 镜组 1 结构参数计算结果

Table 5.26 Calculation results of structural parameters of group 1

折射面	第一面	第二面	第三面	第四面	第五面	第六面	第七面
曲率半径 (mm)	124.900	-100.049	-187.588	-720.563	-333.420	77.857	156.290

表 5.27 镜组 1 结构参数

Table 5.27 Structural parameters of group 1

Group 1	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
Radius	122.777	-98.348	-184.399	-708.314	-327.752	76.534	153.633
Thickness	14.745	1.966	0.983	2.949	0.983	4.915	变化
Material	H-K9L+H-ZF72A			H-ZK9B		H-ZK9B	

镜组 2—— P^∞ 为 1.6465 与 W^∞ 为 0.0096。通过计算发现取两片单镜的曲率为-2 和 0.1 时，且光焦度分配为 1.3:0.5(-0.4):(-0.4)下，所有镜片曲率半径较大，如下表 5.28 所示，第一组胶合镜玻璃材料为 H-BAK7 与 H-F4，第二组胶合镜材料为 H-ZF88 与 H-KF6。单镜材料为 H-ZK9B，所得参数基本可以满足成像要求。

引入玻璃厚度后，通过缩放整体镜组焦距值至-30.4940，得到镜组 2 具体参数如下表 5.28 所示：

表 5.28 镜组 2 结构参数计算结果

Table 5.28 Calculation results of structural parameters of group 2

折射面	第一面	第二面	第三面	第四面	第五面	第六面	第七面	第八面	第九面	第十面
曲率半径 (mm)	157.120	30.494	-13.703	-234.569	-50.186	293.885	-25.54	492.723	-206.632	-56.712

表 5.29 镜组 2 结构参数

Table 5.29 Structural parameters of group 2

Group 1	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r8	r9	r10
Radius	119.03	23.102	-10.	-177.	-38.021	222.648	-19.349	373.28	-156.	-42.965
	4		381	71				7	544	
Thickness	0.758	3.788	0.758	0.758	0.758	1.515	0.758	0.758	0.758	变化
Material	H-ZK9B		H-ZK9B		H-BAK7+H-F4			H-ZF88+H-KF6		

镜组 3 采用单镜形式而提升色差校正能力，与其联动的镜组 4 采用单镜与一组胶合镜——其 P^∞ 为 0.0772 与 W^∞ 为 0.4569。通过计算，取镜组 4 单镜第二面曲率 0.2，光焦度分配为 0.3:0.7 下，镜组 3 及镜组 4 结构参数如下表 5.30 所示，胶合

表 5.30 镜组 3 和镜组 4 结构参数计算结果

Table 5.30 Calculation results of structural parameters of group 3 and group 4

折射面	第一面	第二面	第三面	第四面	第五面	第六面	第七面
曲率半径 (mm)	103.427	-103.427	171.705	1555.510	85.330	-125.756	-815.316

镜玻璃材料为 H-LAK12 与 H-ZF62，单镜材料为 H-ZK9B。引入玻璃厚度后，通

过缩放整体镜组 3 及镜组 4 焦距值至 83.3536 与 93.3306,具体参数如下表 5.31:

表 5.31 镜组 3 和镜组 4 结构参数

Table 5.31 Structural parameters of group 3 and group 4

Group l	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
Radius	102.827	-102.827	170.881	1548.044	84.921	-125.152	-815.316
Thickness	4.971	1.946	1.99	0.995	2.986	1.99	变化
Material	H-ZK9B		H-ZK9B		H-LAK12+H-ZF62		

镜组 5—— P^∞ 为-0.1299 与 W^∞ 为 1.1565。通过计算取单镜的曲率为 0.05 时，且光焦度分配为 0.65:0.35 下，各面曲率半径大小如下表 5.32 所示，单镜材料为 H-ZK9B，胶合镜玻璃材料为 H-LAK12 与 H-ZF62，所得参数基本可以满足成像要求。引入玻璃厚度后，通过缩放整体镜组焦距值至-61.5977，得到镜组 5 具体参数如下表 5.33 所示:

表 5.32 镜组 5 结构参数计算结果

Table 5.32 Calculation results of structural parameters of group 5

折射面	第一面	第二面	第三面	第四面	第五面
曲率半径 (mm)	-95.441	-52.135	133.514	-105.903	-3519.859

表 5.33 镜组 5 结构参数

Table 5.33 Structural parameters of group 3

Group l	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
Radius	-97.636	-53.334	136.585	-108.339	-3600.826
Thickness	14.745	1.966	0.983	2.949	0.983
Material	H-ZF72A+H-LAK12			H-ZK9B	

镜组6—— P^∞ 为0.469与 W^∞ 为0.2439。通过计算单镜的曲率为-1.5时，且光焦度分配为0.85:0.075:0.075下，镜组各面具体参数如下表5.34所示，胶合镜玻璃材料均为H-ZK21与H-LAF55，单镜材料为H-ZK9B。引入玻璃厚度后，通过缩放整

体镜组焦距值至49.5162，得到镜组6具体参数如下表5.35所示：
综合上述数据得到六组全动全画幅连续变焦光学系统的初始结构如图 5.21 所示：

表 5.34 镜组 6 结构参数计算结果

Table 5.34 Calculation results of structural parameters of group 6

折射面	第一面	第二面	第三面	第四面	第五面	第六面	第七面	第八面
曲率半径 (mm)	520.936	-38.840	126.539	-33.901	-1101.49	126.539	-33.901	-1101.49

表 5.35 镜组 6 结构参数

Table 5.35 Structural parameters of group 6

Group6	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8
Radius	525.312	-39.166	127.614	-34.189	1110.852	127.614	-34.189	1110.852
Thickness	5.042	1.008	5.042	2.017	1.008	5.042	2.017	变化
Material	H-ZK9B		H-ZK21+H-LAF55			H-ZK21+H-LAF55		

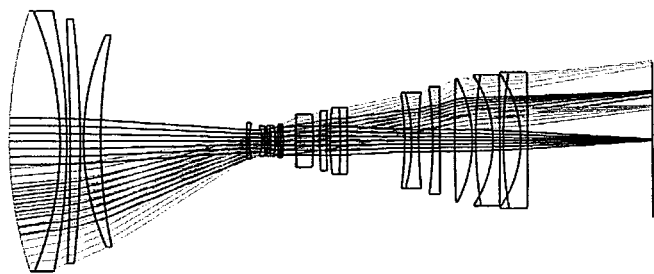


图 5.21 六组全动连续变焦光学系统初始结构示意图

Figure 5.21 Diagram of the initial structures of six moving groups of zoom system

上述初始结构是在理想高斯结构下经过实际镜组替换得到，在孔径较小视场较小的情况下符合 *PWC* 三级像差理论，但是由于变焦系统需要达到全画幅大孔径的要求且需要达到 22-110mm 连续 5 倍变焦比，其视场高级像差及孔径高级像差必然较大且复杂。在进行光学系统像差校正的过程需要考虑结构形式的变换及增减镜片的操作，以达到基本像差的平衡，同时保持主平面与原连续变焦光学系统理想高斯结构主平面的一致性。经过优化，得到一 24.67-107.00mm、F/#为 4.0 约 4.3 倍全画幅连续变焦光学系统如下图 5.22 所示。

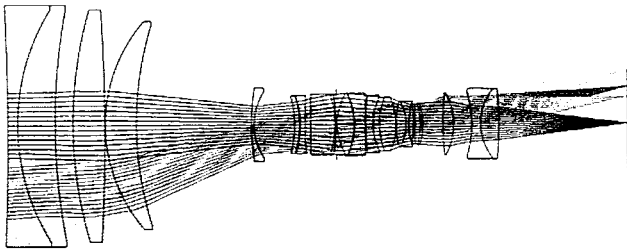


图 5.22 24.67-107.00mmF/#4.0 全画幅连续变焦光学系统示意图

Figure 5.22 Diagram of 24.67-107.00mm F/#4.0 full-frame zoom optical system

在远离光阑且主光线入射角度及高度变换较大处设定非球面以校正非球差高级像差，在光阑附近设定非球面已平衡系统球差。其中第 10 面、第 18-19 面（即第 9 片镜片）、第 33 面为采用非球面，系数均不超过 6 阶，即基本满足视场高级像差与三级像差匹配已足够满足像差平衡要求，整体连续变焦光学系统具体参数如下表 5.36 所示

表 5.36 24.67-107.00mmF/#4.0 全画幅连续变焦光学系统的结构参数

Table 5.36 Structural parameters of 24.67-107.00mm F/#4.0 full-frame zoom optical system

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
1	标准面	-1109.465	4.000	H-ZF6
2	标准面	91.419	15.000	H-ZK20
3	标准面	252.584	7.279	
4	标准面	168.968	12.835	D-ZLAF50
5	标准面	-776.906	0.162	
6	标准面	64.905	12.545	H-LAF62
7	标准面	138.951	变化	
8	标准面	103.589	1.000	D-ZLAF67
9	标准面	24.925	16.320	
10	偶次非球面	-41.967	2.000	H-LAF7
11	标准面	-38.692	0.259	
12	标准面	-37.665	2.000	H-ZLAF2A
13	标准面	457.717	2.172	

表 5.36 24.67-107.00mmF/#4.0 全画幅连续变焦光学系统的结构参数（续表）

Table 5.36 Structural parameters of 24.67-107.00mm F/#4.0 full-frame zoom optical system (Continued)

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
14	标准面	-9619.156	9.737	ZF7LGT
15	标准面	-41.744	0.500	H-K5
16	标准面	-73.351	变化	
17	光阑面		0.326	
18	偶次非球面	24.264	6.759	H-ZPK5
19	偶次非球面	-28.243	0.198	
20	标准面	-29.011	4.317	H-ZK3
21	标准面	1464.685	0.099	
22	标准面	83.741	3.000	H-ZK20
23	标准面	23.884	变化	
24	标准面	31.168	6.559	H-K9L
25	标准面	-27.748	0.096	
26	标准面	36.305	4.050	H-K11
27	标准面	-18.510	1.000	H-ZLAF1
28	标准面	24.927	变化	
29	标准面	-62.492	0.499	H-ZLAF71
30	标准面	438.861	2.272	
31	标准面	-27.830	0.899	H-LAK6A
32	标准面	-29.818	变化	
33	偶次非球面	120.778	4.254	H-ZK4
34	标准面	-26.898	7.318	
35	标准面	-44.946	3.532	H-BAF5
36	标准面	22.533	7.371	H-ZK7A
37	标准面	-167.109	变化	

其中偶次非球面定义如下：

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1r^2 + \alpha_2r^4 + \alpha_3r^6 + \alpha_4r^8 + \alpha_5r^{10} + \alpha_6r^{12} + \alpha_7r^{14} + \alpha_8r^{16}$$

c 为顶点曲率大小， k 为二次曲线常数， $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 为第 2、4、……、16 阶系数。
各面非球面系数如下表 5.37 所示

表 5.37 非球面系数

Table 5.37 Aspheric coefficient

非球面阶数	第 10 面	第 18 面	第 19 面	第 33 面
4	1.866×10^{-6}	-3.424×10^{-6}	1.040×10^{-5}	-2.273×10^{-6}
6	-2.455×10^{-9}	-3.267×10^{-9}	-1.203×10^{-8}	3.164×10^{-9}

上述 24.67-107.00mm、F/#为 4.0 连续变焦光学系统其传递函数（MTF）全视场在 50lp 处均大于 0.35，全视场 30lp 处均大于 0.6。摄远端、中焦端及广角端 50lp 处全视场传递函数如下图 5.23 所示，为了验证上述设计与高斯结构的一致性，及其运动形式是否满足原变焦光学系统高斯结构的凸轮曲线，下表 5.38-表 5.40 给出各焦段镜组主平面间距与高斯结构主平面间距差距：

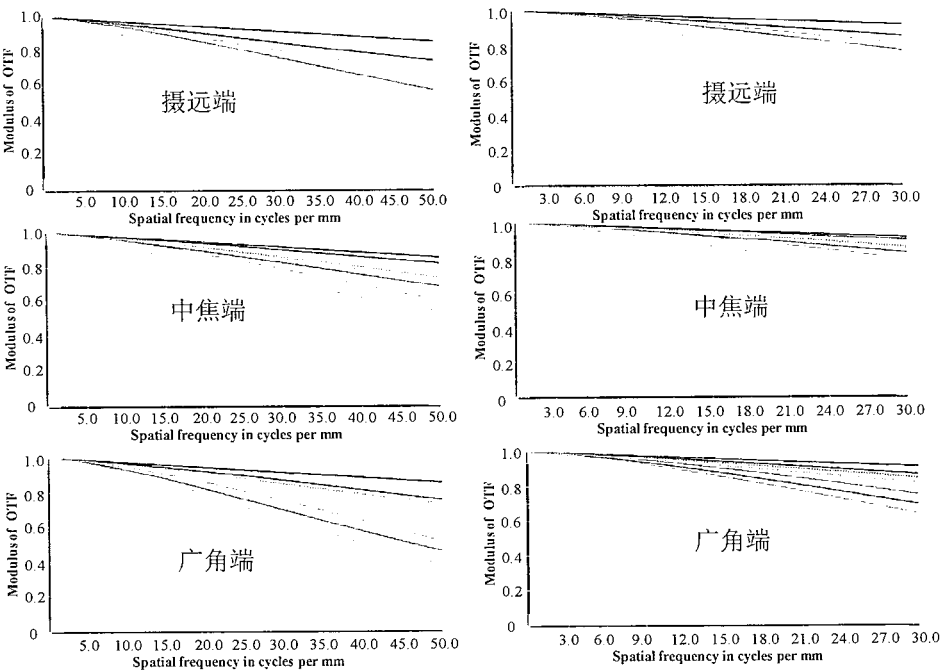


图 5.23 全画幅 24.67-107.00mm、F/#为 4.0 连续变焦光学系统全视场传递函数（MTF）

Figure 5.23 MTF of full field of view 24.67-107.00mm, F/# 4.0 full-flame zoom optical system

表 5.38 摄远端各镜组主平面数据

Table 5.38 Principal plane data of each group at the telephoto mode

Middle focal length mode	group1-2	group2-3	group4-5	group5-6
Gaussian structure	50.250	17.786	22.733	11.747
Actual structure	50.059	18.017	22.846	11.625
Difference (absolute)	0.191	0.230	0.113	0.122

表 5.39 中焦端各镜组主平面数据

Table 5.39 Principal plane data of each group at the Middle focal length mode

Middle focal length mode	group1-2	group2-3	group4-5	group5-6
Gaussian structure	35.979	51.586	26.986	7.493
Actual structure	35.472	51.219	27.204	7.666
Difference (absolute)	0.507	0.368	0.218	0.173

表 5.40 广角端各镜组主平面数据

Table 5.40 Principal plane data of each group at the Short focal length mode

Short focal length mode	group1-2	group2-3	group3-4	group4-5
Gaussian structure	2.967	83.586	31.014	3.365
Actual structure	3.713	83.629	30.323	3.572
Difference (absolute)	0.745	0.043	0.690	0.107

可见，实际镜组主平面间距与高斯结构差距不大，这是一个符合预期的设计。该设计相对孔径较高斯结构小，即实际孔径高级像差所占比重不大，整体系统像差可以由初级像差表示。由上述可知利用最优化算法得到的高斯结构是满足初级像差平衡关系的，在约束镜组运动曲线与高斯结构一致性的同时进行像差平衡，对于变焦比大且视场大（全画幅）的连续变焦光学系统，其实际像差本身就较为复杂且难以平衡校正。设计中引入非球面，增加了像差平衡的自由度。整体设计成像质量好，不足之处在于变焦比未能达到原高斯结构的 5 倍变焦比，且相对孔径较小（F/#未达到 3.0），为了进一步实现 5 倍的大变焦比，大孔径（F/#3.0）全画幅连续变焦光学系统设计，对原设计中镜组的运动形式与高斯结构一致性不做太大权重的限制，以获得更广的设计空间。

5.3.2 初始结构再优化

再以 24.67-107.00mm、F/#4.0 全画幅连续变焦光学系统为初始结构进一步优化，同时控制广角端最大畸变量不超过 6%，可以得到——22.183-109.808 mm、F/#3.0 全画幅连续变焦光学系统如下图 5.24 所示。

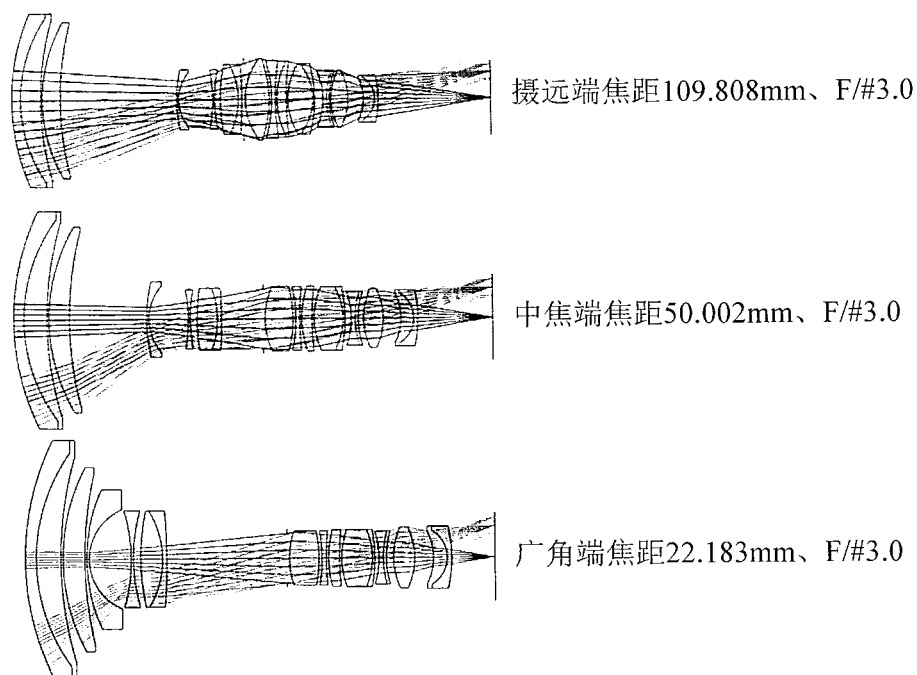


图 5.24 22.183-109.808 mm、F/#3.0 全画幅连续变焦光学系统

Figure 5.24 Diagram of 22.183-109.808 mm F/#3.0 full-frame zoom optical system

其中望远端、中焦及广角端渐晕系数如下表 5.41 所示，系统全视场平均传递函数（MTF）在 50lp 均大于 0.2，30lp 处均大于 0.5，如下图 5.25 所示：

表 5.41 渐晕系数

Table 5.41 Vignetting coefficient

视场	望远端	中焦端	广角端
1.0 视场	0.337	0.454	0.451
0.7 视场	0.153	0.077	0.023
0.5 视场	0.091	0	0

系统具体结构参数如下表 5.42 所示：

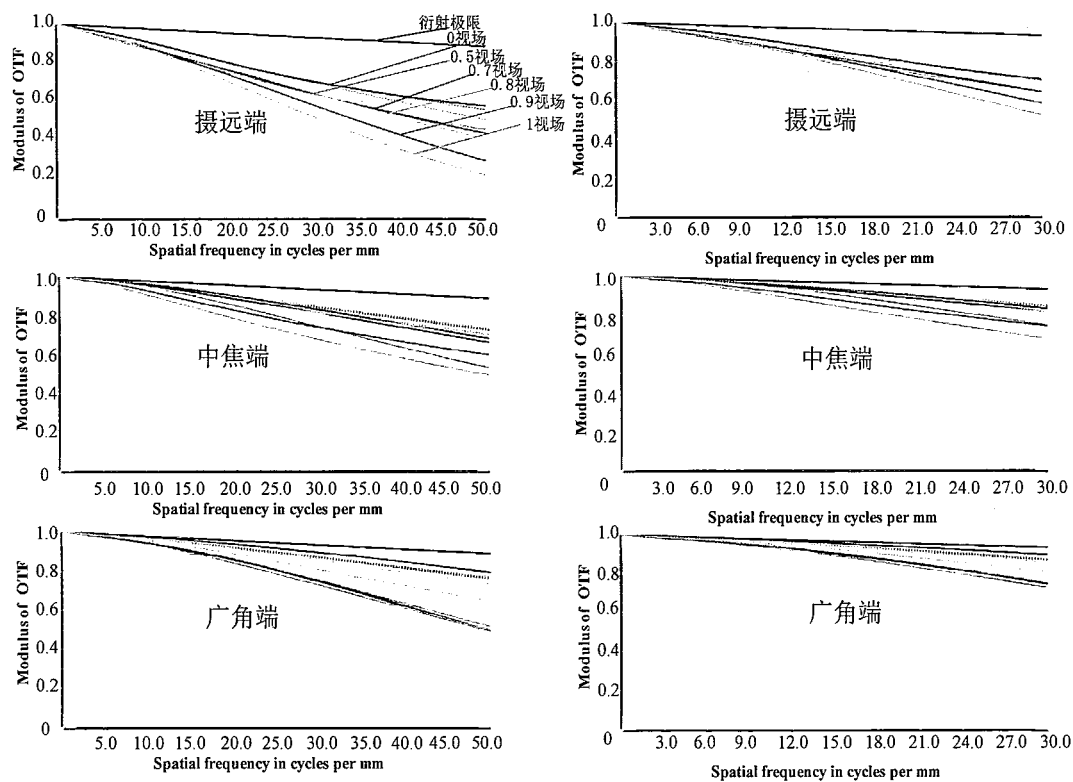


图 5.25 22.183-109.808 mm、F/#3.0 全画幅连续变焦光学系统全视场传递函数

Figure 5.25 MTF of full field of view 22.183-109.808 mm, F/# 3.0 full-frame zoom optical system

系统具体结构参数如下表 5.42 所示：

表 5.42 22.183-109.808 mm、F/#3.0 全画幅连续变焦光学系统结构参数

Table 5.42 Structural parameters of 22.183-109.808 mm, F/#3.0 full-frame zoom optical system

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
1	标准面	104.276	5.000	H-ZF62
2	标准面	74.355	9.890	H-ZK9B
3	标准面	108.677	0.999	
4	偶次非球面	96.023	10.000	D-LAF050
5	标准面	234.451	变化	
6	偶次非球面	96.711	0.999	H-ZLAF68N
7	标准面	26.209	20.880	
8	标准面	-81.994	0.999	H-LAK61

表 5.42 22.183-109.808 mm、F/#3.0 全画幅连续变焦光学系统结构参数（续）

Table 5.42 Structural parameters of 22.183-109.808 mm, F/#3.0 full-frame zoom optical system
(Continued)

表面编号	表面类型	曲率半径	厚度	材料
9	标准面	70.826	2.897	
10	标准面	90.846	9.396	ZF13
11	标准面	-58.637	2.000	H-LAK6A
12	标准面	-354.084	变化	
13	光阑面		0.999	
14	偶次非球面	41.020	12.118	H-ZPK5
15	偶次非球面	-70.193	2.195	
16	标准面	-102.441	2.000	D-LAF79
17	标准面	127.702	1.000	
18	标准面	50.640	3.609	H-ZK4
19	标准面	88.479	变化	
20	标准面	37.944	14.692	H-ZPK5
21	标准面	-29.677	1.000	D-ZLAF81
22	标准面	-61.063	变化	
23	标准面	-39.413	2.000	H-ZLAF68N
24	标准面	36.991	2.799	H-ZK20
25	标准面	56.829	变化	
26	偶次非球面	37.558	9.343	H-ZK50GT
27	偶次非球面	-32.956	10.336	
28	标准面	-23.280	4.989	H-K5
29	标准面	-14.832	2.000	H-TF3L
30	标准面	-45.624	变化	

在系统采用 F/#3.0 的连续大光圈且变焦比近 5 倍时（涵盖广角与摄远焦距），系统高级像差大且关系复杂，需要引入高阶非球面参与像差的平衡校正，这里非球面同样采用偶次非球面，其中第 14-15 面与第 26-27 面属于同一片镜片的不同面，这样便于模注生成非球面，充分利用非球面的像差校正作用提升系统成像质量，

以对高级像差进行校正平衡，具体参数如下表 5.43 所示：

表 5.43 非球面系数

Table 5.43 Aspheric coefficient

非球面阶数	4	6	8	10
第 4 面	-1.787×10^{-8}	-4.868×10^{-12}	9.475×10^{-16}	-2.865×10^{-19}
第 6 面	1.074×10^{-6}	-3.426×10^{-10}	1.837×10^{-13}	-4.115×10^{-17}
第 14 面	1.464×10^{-7}	-6.040×10^{-10}	2.787×10^{-12}	1.801×10^{-15}
第 15 面	1.245×10^{-6}	-2.164×10^{-9}	8.313×10^{-12}	-5.078×10^{-15}
第 26 面	-3.564×10^{-6}	1.015×10^{-8}	9.622×10^{-12}	-3.060×10^{-14}
第 27 面	2.747×10^{-6}	5.550×10^{-9}	-5.986×10^{-12}	3.663×10^{-15}

为验证设计成像质量，沿凸轮曲线相应取焦距 100mm、90mm、80mm、70mm、60mm、40mm、30mm 为样点，查看光学系统成像质量，结果表明成像质量好，具体如下图 5.26-5.32 所示，其凸轮曲线如下图 5.33 所示。

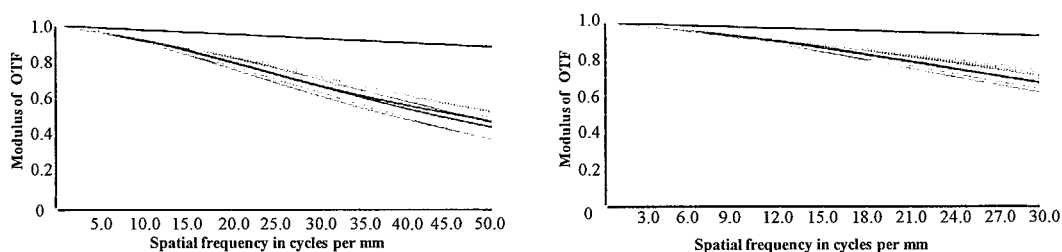


图 5.26 50lp 及 30lp 处焦距 100mmF/#3.0 传递函数

Figure 5.26 Focal length 100 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

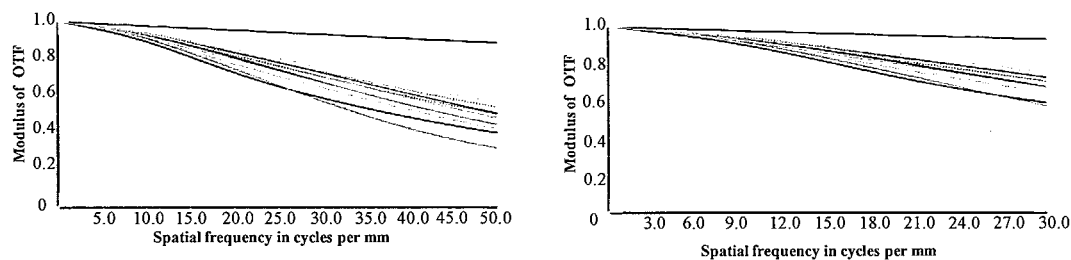


图 5.27 50lp 及 30lp 处焦距 90mmF/#3.0 传递函数

Figure 5.27 Focal length 90 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

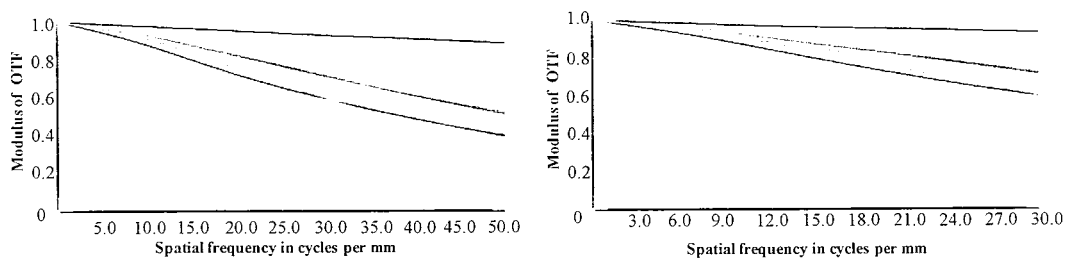


图 5.28 50lp 及 30lp 处焦距 80mmF/#3.0 传递函数

Figure 5.28 Focal length 80 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

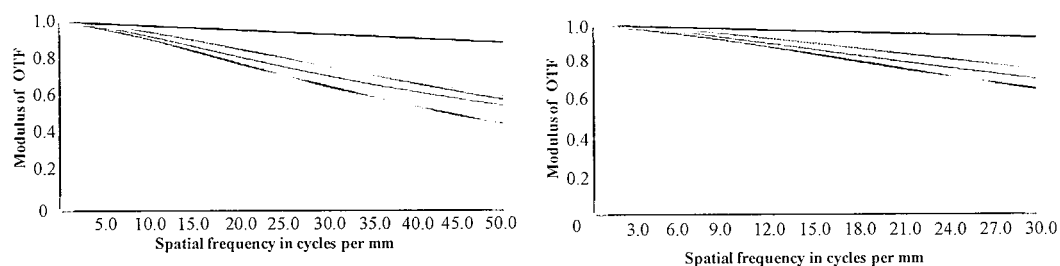


图 5.29 50lp 及 30lp 处焦距 70mmF/#3.0 传递函数

Figure 5.29 Focal length 70 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

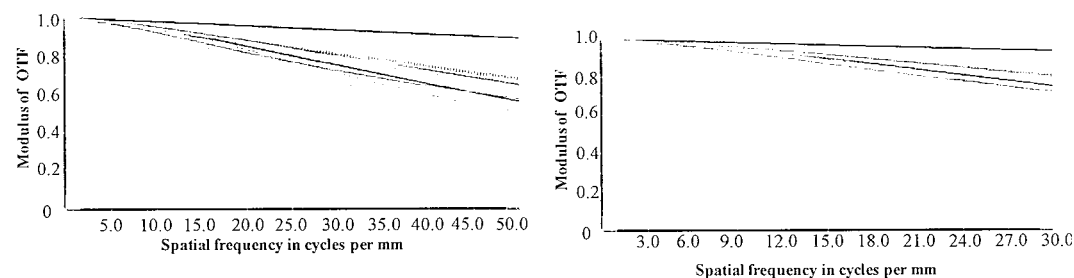


图 5.30 50lp 及 30lp 处焦距 60mmF/#3.0 传递函数

Figure 5.30 Focal length 60 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

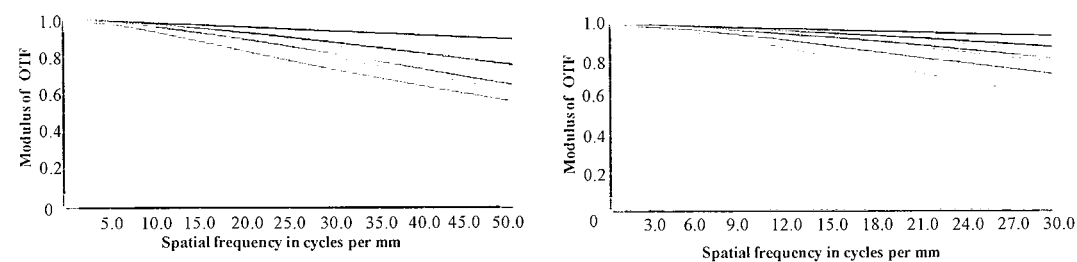


图 5.31 50lp 及 30lp 处焦距 40mmF/#3.0 传递函数

Figure 5.31 Focal length 40 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

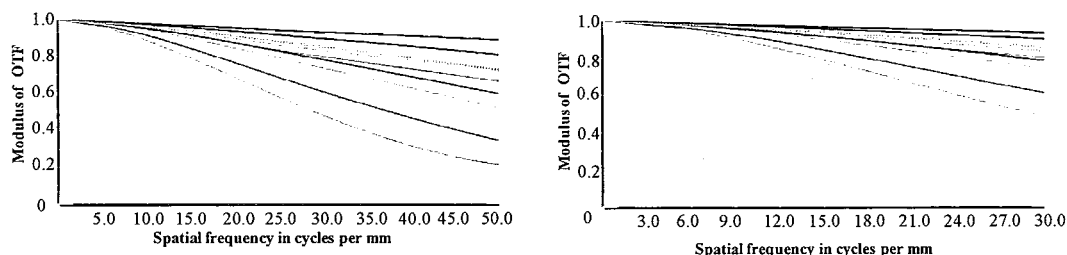


图 5.32 50lp 及 30lp 处焦距 30mmF/#3.0 传递函数

Figure 5.32 Focal length 30 mm - F/# 3.0 MTF at 50 lp and 30 lp

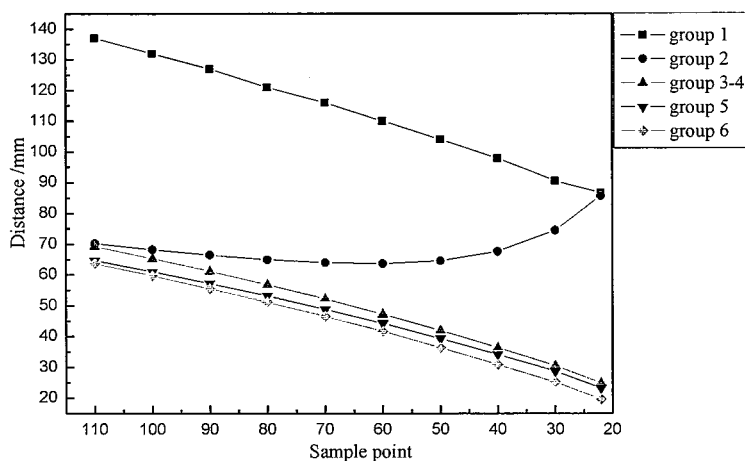


图 5.33 22.183-109.808 mm F/# 3.0 全画幅连续变焦光学系统凸轮曲线

Figure 5.33 Cam curve of 22.183-109.808 mm F/# 3.0 full-frame zoom optical system

5.3.3 结论

要得到一个复杂光学系统的初始结构一般情况下是十分困难的，依靠专利和文献往往不能找到合适可用的结构。本节利用最优化算法——内点法得到一个 21.421-109.835mm-F/#2.8 全画幅连续变焦光学系统的高斯结构的参数，再根据像差参数进行实际镜组替换，最终可以得到一个基本满足初级像差的初始结构，这样能够满足初级像差且变焦比大(5 倍)、视场大(全画幅)、相对孔径大(F/#2.8)的初始结构在文献和专利上是无法找到的。本次连续变焦光学系统的设计不仅涵盖广角焦距 22mm，也同时能达到近 110mm 的摄远长焦距，变焦比达到近 5 倍的全画幅大孔径 (F/#3.0)。最终优化得到的 22.183-109.808 mm F/#3.0 全画幅连续变焦光学系统整体上光学系统成像质量好，凸轮曲线大部分线性度好且平滑。

利用最优化算法优化计算满足初级像差平衡关系的连续变焦光学系统高斯结构的参数,这样可以大大缩短光学设计过程,同时为设计的可实现性提供了更好的保证条件,特别是针对大视场、大孔径、大变焦比(或是定焦)等难以寻得合适初始结构的光学系统,根据相关要求优化计算出其满足初级像差关系的初始结构后,再进行高级像差平衡可以大大提高设计的可行性。本文研究目的正基于此点,为难以寻得合适初始结构的光学系统的设计提供了一个自建初始结构的可行途径。

5.4 本章小结

本章主要以变焦系统 P^∞ 、 W^∞ 与镜组结构形式的理论为基础,实现了五组全画幅连续变焦系统高斯结构的实际镜组替换,获得实际结构后进一步优化得到一 33-100 mm、F/# 3.0 (恒定) 全画幅连续变焦系统,系统成像质量好,凸轮曲线线性度也较好。本章第二个设计采用内点法所得的全画幅变焦系统的高斯结构,实际镜组替换后,进一步优化,最终获得了 22.183-109.808 mm、F/# 3.0 (恒定) 全画幅连续变焦光学系统,系统整体成像质量好,凸轮曲线线性度也较好。两个设计的成功实现也证实了本文论述大视场大孔径连续变焦系统设计方法的可行性与实用性。

第6章 总结与展望

6.1 论文的研究成果

本文详细研究了从变焦系统高斯结构参数的优化求解、高斯结构实际镜组替换、变焦系统初始结构优化到最终完成高成像质量大变焦比全画幅大孔径光学系统设计的整个过程。研究了三种最优化算法——广义拉格朗日乘子算法、内点法、序列二次规划算法基本理论及核心思想,及其在连续变焦光学系统高斯结构参数优化求解中的运用。为将变焦系统高斯结构参数求解转化为一个数学最优化问题,将变焦过程中入射、出射光线在镜组上的相关参数,变焦过程各镜组光焦度、间距、初级像差参量等结合在一起构建一个自定义的目标优化函数,该函数属于高度非线性函数,无法直接应用凸规划理论求解,而能应用以上三种最优化算法进行优化求解。算法所得最优解属于局部最优解,由于考虑了初级像差的校正平衡,该解具有很高的实用性。整体论文以全画幅大孔径(F/# 3.0)连续变焦光学系统初始结构为研究基石展开,具体研究成果可列举如下:

(1) 将最优化算法——广义拉格朗日乘子算法、内点法、序列二次规划应用于变焦系统高斯结构的优化计算,完成了所有优化计算程序的编写,分别得到:

30.356 - 100.243 mm、F/# 2.8(恒定)、全画幅五组全动连续变焦高斯结构与
21.421 - 109.835 mm、F/# 2.8(恒定)、全画幅六组全动连续变焦高斯结构及对应各镜组的像差参数。

(2) 完成了对变焦系统各镜组像差参数内部分解、玻璃自动化选择及曲率计算程序的编写;

(3) 完成了 33-100 mm、F/# 3.0(恒定)、全画幅五组全动连续变焦系统初始结构, 22-110 mm、F/# 3.0(恒定)、全画幅六组全动连续变焦系统初始结构的建立。

(4) 利用光学设计优化软件 ZEMAX 对高级像差进行校正,完成了全画幅 33-100 mm-F/#3.0(恒定)五组全动连续变焦系统设计、全画幅 22.183-109.808 mm - F/# 3.0(恒定)六组全动连续变焦系统设计,两个变焦系统设计均得到高品质的成像质量。

6.2 论文的创新点

本论文创新点可总结出三点，列举如下：

- (1) 首次采用广义拉格朗日乘子算法、内点法、修正序列二次规划算法结合自建优化函数，实现五组全动长焦距 3 倍变焦比大孔径（恒定 $F/\# 2.8$ ）全画幅连续变焦系统高斯结构的参数优化计算，利用内点法优化计算实现六组全动长焦距 5 倍变焦比大孔径（恒定 $F/\# 2.8$ ）全画幅连续变焦系统高斯结构的参数优化计算。
- (2) 针对五组全动形式通过对三种优化算法设定一个任意且合理的初始值，获得了收敛性好，满足小像差要求的结构参数值，首次实现算法的通用性。针对六组全动形式，利用内点法优化计算一个任意且合理的初始值，获得一个满足像差要求的结构参数。
- (3) 进行高斯结构实际玻璃镜组的替换、优化设计，首次提到通过控制主平面的一致性，得到实际凸轮曲线线性度好，与理想高斯结构凸轮曲线保持一致性，系统在采用全球面设计的情况下，像差得到初步的校正，成像质量较好，为后期引进非球面设计奠定基础。最终完成设计目标，其中首次实现全画幅 22.183-109.808 mm - $F/\# 3.0$ (恒定) 近 5 倍变焦比大相对孔径连续变焦系统设计目标设计，本文两个设计目标的完成是在原有初始结构的基础上，实现了变焦系统的设计，这也证明了运用所述方法在设计大孔径长焦距全画幅连续变焦系统中的准确有效及实用性。

6.3 未来工作展望

准确求解非线性最优化问题无论科学计算还是工程运用来说无疑具有十分重要的地位。本文的目标函数是涵盖了变焦过程中入射、出射光线在镜组上的相关参数，变焦过程各镜组光焦度、间距、初级像差参量等众多影响初始结构及成像质量的关键要素，函数本身就是高度非线性函数，此外还拥有镜组间距、总长等边界条件的限制，更加复杂化了变焦系统高斯结构参数求解问题。可以理解的是在高度非线性函数的解域空间存在许许多多的局部最优解、以及全局最优解（可能唯一、也可能不唯一），而全局最优解因其本身的独特性一直是最优化理论所关心重视的焦点，然而目前最优化算法针对高度复杂非线性目

标函数的优化问题并不能确保收敛值属于局部最优或是全局最优解。根据最优化理论,当目标优化函数是凸函数,其解域(或是边界条件所限定的解空间)也是凸的时候,此时运用凸规划算法进行求解的最优解便一定是目标函数的全局最优解。

综上所述,如果无论从表达式还是参数简化上可以精简目标优化函数,使得函数变为凸函数或尽可能凸,则有可能实现函数的全局最优解的求解。如可以考虑将目标函数做级数展开讨论,进一步高效求解优化问题,此为未来工作展望一。未来工作展望二,即采用多项式规划、模拟退火算法、遗传算法等其他新发展优化算法,结合经简化的目标函数研究全局最优解的可能性。未来工作展望三,针对目前各类最优化算法——无约束优化算法及有约束优化算法等,种类繁多,而各类算法各有优势及不足,考虑能否结合几类算法联合应用优势互补,如在现代光学设计软件中最常见的阻尼最小二乘算法具有准确稳定等优势但对初始值的选定要求高,考虑其能否与广义拉格朗日乘子算法、内点法、序列二次规划算法等高效快捷且对初始值要求不高的算法结合,实现更优解的求解。未来展望四,针对全组全动变焦系统调焦设计、公差分析(球面、非球面加工)及装调分析系统的可实现性。

附录 计算程序（以 GLM 算法为例）

（一）构建目标优化函数程序

```

function himm=f_himm(px)
%各优化目标函数权重相同，取为 1
    focus=[px(1),px(2),px(3),px(4),px(5)];
    f1=focus(1);f2=focus(2);f3=focus(3);f4=focus(4);f5=focus(5);
    Pinf=[px(6),px(7),px(8),px(9),px(10)];Winf=[px(11),px(12),px(13),px(14),px(15)];

    Dlen=linspace(0,0,5);Dlen(2)=px(16);Dlen(3)=px(17);Dlen(4)=px(18);Dlen(5)=px(19
);
    % Dlen=[px(16),px(17),px(18),px(19),px(20)];    %长焦端各个镜组之间的间距
    fs=30;fl=100;        %短焦和长焦焦距
    %根据输入值计算长焦端各个镜组的放大倍率大小
    [m2l,m3l,m4l,m5l,ml]=fin_AF(f1,f2,f3,f4,f5,Dlen);
    Dlen(1)=fl+(1-1/m2l)*f2;
    global hw uw hwm;
    global ht ut htm;
    global ms D1 D2 D3 D4 D5;
    %将镜组 4 与镜组 5 之间的间距分段设定为微小移动量
    %注意镜组 2 每次移动量 取 Dlen(1)/d 可能太大
    deltaf2=-0.1;
    if floor(Dlen(1)/0.1)>=floor(Dlen(5)/0.05)
        d=floor(Dlen(5)/0.05);    %最多移动次数
    else
        d=floor(Dlen(1)/0.1);
    end
    deltaf4=Dlen(4)/d+0.03;    %镜组 4 每次移动量    1/5*Dlen(4)/d
    deltaf1=linspace(0,0,d);%镜组 1 每次需要移动的补偿量
    %-----
    %现开始计算为满足总变倍比所总共需要移动的移动量大小

```

```

%-----
D1=linspace(0,0,d);
D2=linspace(0,0,d);
D3=linspace(0,0,d);
D4=linspace(0,0,d);
D5=linspace(0,0,d);
%各个镜组放大倍率
beta2=linspace(0,0,d);
beta3=linspace(0,0,d);
beta4=linspace(0,0,d);
beta5=linspace(0,0,d);
%每移动一次，放大倍率变化情况计算
D5(1)=Dlen(5);D4(1)=Dlen(4);D3(1)=Dlen(3);D2(1)=Dlen(2);D1(1)=Dlen(1);
beta2(1)=m2l;beta3(1)=m3l;beta4(1)=m4l;beta5(1)=m5l;
for i=2:d
    D5(i)=D5(i-1)-0.05;
    D4(i)=D4(i-1)+0.05-deltaf4;
    D3(i)=D3(i-1)-0.05+deltaf4;
    D2(i)=D2(i-1)+0.05-deltaf2;
    %f1 补偿量计算 调用 find_mov
    deltaf1(i)=fin_mov(beta2(i-1),beta3(i-1),beta4(i-1),beta5(i-1),deltaf2,deltaf4);
    D1(i)=D1(i-1)-deltaf1(i)+deltaf2;    %D1 间距
    Dlen=[D1(i),D2(i),D3(i),D4(i),D5(i)];
    [beta2(i),beta3(i),beta4(i),beta5(i),ms]=fin_AF(f1,f2,f3,f4,f5,Dlen);    % 每
移动一次，此时各个镜组的放大倍率
    if ml/ms>=3.3
        fprintf('!!!镜组间距足够大使得成功完成所要求的的 10 倍变倍
比!!\n\n');
        break
    end
end
end

```

```

%统计非零元个数
nzero=sum(sum(D5~=0));
%摄远及广角端长度
DL=f1+(1-1/beta2(1))*f2+(1-beta2(1))*f2+(1-1/beta3(1))*f3+(1-
beta3(1))*f3+(1-1/beta4(1))*f4+(1-beta4(1))*f4+(1-1/beta5(1))*f5+(1-beta5(1))*f5;
DS=f1+(1-1/beta2(nzero))*f2+(1-beta2(nzero))*f2+(1-1/beta3(nzero))*f3+(1-
beta3(nzero))*f3+(1-1/beta4(nzero))*f4+(1-beta4(nzero))*f4+(1-1/beta5(nzero))
*f5+(1-beta5(nzero))*f5;
s2=0;
%补偿曲线二阶差分 s2 运动曲线非线性控制
delta1=linspace(0,0,nzero); %镜组 1
for j=1:nzero-1
    delta1(j)=(D1(j+1)+D2(j+1)+D3(j+1)+D4(j+1)+D5(j+1))-
(D1(j)+D2(j)+D3(j)+D4(j)+D5(j));
end
for j=1:nzero-1
    s2=s2+(delta1(j+1)-delta1(j))^2;
end
%第一辅助光线与第二辅助光线在各个镜组上的入射角
Aw0=2.8; At0=2.8; %广角端、摄远端 F 数
%广角端
uw=linspace(0,0,5);
uwp=linspace(0,0,5);
hw=linspace(0,0,5);
i=1;
while (i<=5)
    if(i==1)
        uw(1)=0; %平行光入射
        hw(1)=fs/(2*Aw0);
        uwp(1)=hw(1)/f1;
    else if(i==2)
        hw(2)=hw(1)-D1(1)*uwp(1);
        uw(2)=uwp(1);
    end
    i=i+1;
end

```

```

        uwp(2)=uw(2)+hw(2)/f2;
    else if (i==3)
        hw(3)=hw(2)-D2(1)*uwp(2);
        uw(3)=uwp(2);
        uwp(3)=uw(3)+hw(3)/f3;
    else if (i==4)
        hw(4)=hw(3)-D3(1)*uwp(3);
        uw(4)=uwp(3);
        uwp(4)=uw(4)+hw(4)/f4;
    else if (i==5)
        hw(5)=hw(4)-D4(1)*uwp(4);
        uw(5)=uwp(4);
        uwp(5)=uw(5)+hw(5)/f5;

        end

    end

end

end

end

    end

    i=i+1;

end

%假设光阑放在镜组 3 上

%计算入瞳位置

leps=(-1)*(f2*D2(nzero)/(D2(nzero)-f2)-
D1(nzero))*f1/((f2*D2(nzero)/(D2(nzero)-f2)-D1(nzero))+f1);

%第二辅助光线入射高度及入射角计算

uwm=linspace(0,0,5);
uwmp=linspace(0,0,5);
hwm=linspace(0,0,5);

if leps<=0
    hwm(1)=hw(1);
    fprintf('!!!!注意, 入瞳在第一镜组之前\n\n');
else

```

```

hwm(1)=abs(leps)*(21.64/fs);
end
i=1;
while (i<=4)
    if(i==1)
        uwm(1)=21.64/fs;
        uwmp(1)=hwm(1)/f1+uwm(1);
    else if(i==2)
        hwm(2)=hwm(1)-D1(1)*uwmp(1);
        uwm(2)=uwmp(1);
        uwmp(2)=uwm(2)+hwm(2)/f2;
    else if (i==3)
        hwm(3)=hwm(2)-D2(1)*uwmp(2);
        uwm(3)=uwmp(2);
        uwmp(3)=uwm(3)+hwm(3)/f3;
    else if (i==4)
        hwm(4)=hwm(3)-D3(1)*uwmp(3);
        uwm(4)=uwmp(3);
        uwmp(4)=uwm(4)+hwm(4)/f4;
    else if (i==5)
        hwm(5)=hwm(4)-D4(1)*uwmp(4);
        uwm(5)=uwmp(4);
        uwmp(5)=uwm(5)+hwm(5)/f5;
    end
end
end
end
end
i=i+1;
end
%摄远端
ut=linspace(0,0,5);
utp=linspace(0,0,5);

```

```

ht=linspace(0,0,5);
i=1;
while (i<=5)
    if(i==1)
        ut(1)=0;    %平行光入射
        ht(1)=f1/(2*At0);
        utp(1)=ht(1)/f1;
    else if(i==2)
        ht(2)=ht(1)-D1(nzero)*utp(1);
        ut(2)=utp(1);
        utp(2)=ut(2)+ht(2)/f2;
    else if (i==3)
        ht(3)=ht(2)-D2(nzero)*utp(2);
        ut(3)=utp(2);
        utp(3)=ut(3)+ht(3)/f3;
    else if (i==4)
        ht(4)=ht(3)-D3(nzero)*utp(3);
        ut(4)=utp(3);
        utp(4)=ut(4)+ht(4)/f4;
    else if (i==5)
        ht(5)=ht(4)-D4(nzero)*utp(4);
        ut(5)=utp(4);
        utp(5)=ut(5)+ht(5)/f5;
    end
end
end
end
end
end
i=i+1;
end
%假设光阑放在镜组 3 上
%计算入瞳位置

```

```

lepl=(-1)*(f2*D2(1)/(D2(1)-f2)-D1(1))*f1/((f2*D2(1)/(D2(1)-f2)-D1(1))+f1);
%第二辅助光线入射高度及入射角计算

utm=linspace(0,0,5);
utmp=linspace(0,0,5);
htm=linspace(0,0,5);
if lepl<=0
    htm(1)=ht(1);
else
    htm(1)=abs(lepl)*(21.64/fl);
end
i=1;
while (i<=5)
    if(i==1)
        utm(1)=21.64/fl;
        utmp(1)=htm(1)/f1+utm(1);
    else if(i==2)
        htm(2)=htm(1)-D1(nzero)*utmp(1);
        utm(2)=utmp(1);
        utmp(2)=utm(2)+htm(2)/f2;
    else if (i==3)
        htm(3)=htm(2)-D2(nzero)*utmp(2);
        utm(3)=utmp(2);
        utmp(3)=utm(3)+htm(3)/f3;
    else if (i==4)
        htm(4)=htm(3)-D3(nzero)*utmp(3);
        utm(4)=utmp(3);
        utmp(4)=utm(4)+htm(4)/f4;
    else if (i==5)
        htm(5)=htm(4)-D4(nzero)*utmp(4);
        utm(5)=utmp(4);
        utmp(5)=utm(5)+htm(5)/f5;
    end
end
end

```

```

        end
    end
end
i=i+1;
end
s3=0;s7=0;s5=0;s8=0;
for i=1:5
    s3=s3+((uwp(i)-uw(i)))^2;
    s7=s7+(3*(uwp(i)-uwm(i)))^2;    %-----可以尝试添加权重因子
    s5=s5+((utp(i)-ut(i)))^2;
    s8=s8+(3*(utmp(i)-utm(i)))^2;
    else
        s3=s3+((uwp(i)-uw(i)))^2;
        s7=s7+((uwp(i)-uwm(i)))^2;    %-----可以尝试添加权重因子
        s5=s5+((utp(i)-ut(i)))^2;
        s8=s8+(utmp(i)-utm(i))^2;
    end
end
end
y7=S_seidel(focus,hw,hwm,uw,Pinf,Winf); %广角端赛德像差
y7=y7+S_seidel(focus,ht,htm,ut,Pinf,Winf); %摄远端赛德像差
y7=y7*1;    %像差权重
%系统总焦距控制，权重取 0.1
effl=(f1*ml-f1)^2+(f1*ms-fs)^2;
effl=effl/1;
%差分求解补偿量带来的像面漂移控制
Imshift=0;
for i=1:nzero
    Imshift=Imshift+(f1+(1-1/beta2(i))*f2-D1(i))^2;
    Imshift=Imshift/10;
end
%目标函数
global g Mk v;
g=[D1(1)-25,D2(1),D3(1)-1,D5(1)-45,DL-155,2000-

```

```

(abs(f2)+abs(f3)+abs(f4)+abs(f5)),D1(nzero)-
1,D4(nzero),D3(nzero),D4(1),D5(nzero)]; %不等式约束条件
hmum=[min(0,Mk*g(1)-v(1)), min(0,Mk*g(2)-v(2)),min(0,Mk*g(3)-
v(3)),min(0,Mk*g(4)-v(4)),min(0,Mk*g(5)-v(5)),min(0,Mk*g(6)-
v(6)),min(0,Mk*g(7)-v(7)),min(0,Mk*g(8)-v(8)),min(0,Mk*g(9)-
v(9)),min(0,Mk*g(10)-v(10)),min(0,Mk*g(11)-v(11))];%min(0,Mk*g(9)-v(9))
hex=0;
for i=1:11
    hex=hex+hmum(i)^2-v(i)^2;
end
himm=s2+s3+s5+s7+s8+y7+effl+Imshift;
himm=himm+hex/(2*Mk);

```

（二）主程序

```

function M_function
global x0; global g Mk v;
x0=[100,-100,100,-100,100,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,2,15,30,50]; % 初
始值设定
Mk=5;v=[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]; %广义拉格朗日乘子算法参数设定
[x_goal,f_goal,k_goal]=bfgs('f_himm','g_himm',x0,1e-1) %注意 x0 已取转置
% -----%
% 终止判断
% -----%
hmum=[min(g(1),v(1)/Mk),
min(g(2),v(2)/Mk),min(g(3),v(3)/Mk),min(g(4),v(4)/Mk),min(g(5),v(5)/Mk),min(g(6)
,v(6)/Mk),min(g(7),v(7)/Mk),min(g(8),v(8)/Mk),min(0,Mk*g(9)-
v(9)),min(0,Mk*g(10)-v(10)),min(0,Mk*g(11)-
v(11))]; %min(g(8),v(8)/Mk),min(0,Mk*g(9)-v(9))
summ=0;
for i=1:11
    summ=summ+hmum(i)^2;
end

```

```

eson=summ^(1/2);
hmum0=hmum;
while eson>=1e-2
    if (hmum/hmum0)>=0.25        %收敛速度控制
        Mk=2*Mk;    %调整 Mk 的值
        v(1)=max(0,v(1)-Mk*g(1));
        v(2)=max(0,v(2)-Mk*g(2));
        v(3)=max(0,v(3)-Mk*g(3));
        v(4)=max(0,v(4)-Mk*g(4));
        v(5)=max(0,v(5)-Mk*g(5));
        v(6)=max(0,v(6)-Mk*g(6));
        v(7)=max(0,v(7)-Mk*g(7));
        v(8)=max(0,v(8)-Mk*g(8));
        v(9)=max(0,v(9)-Mk*g(9));
        v(10)=max(0,v(10)-Mk*g(10));
        v(11)=max(0,v(11)-Mk*g(11));
        %修正等式约束条件的拉格朗日乘子
        hmum0=[min(g(1),v(1)/Mk),
min(g(2),v(2)/Mk),min(g(3),v(3)/Mk),min(g(4),v(4)/Mk),min(g(5),v(5)/Mk),min(g(6)
,v(6)/Mk),min(g(7),v(7)/Mk),min(g(8),v(8)/Mk),min(0,Mk*g(9)-
v(9)),min(0,Mk*g(10)-v(10)),min(0,Mk*g(11)-v(11))];
        [x_goal,f_goal,k_goal]=bfgs('f_himm','g_himm',x_goal,1e-2);
        hmum=[min(g(1),v(1)/Mk),
min(g(2),v(2)/Mk),min(g(3),v(3)/Mk),min(g(4),v(4)/Mk),min(g(5),v(5)/Mk),min(g(6)
,v(6)/Mk),min(g(7),v(7)/Mk),min(g(8),v(8)/Mk),min(0,Mk*g(9)-
v(9)),min(0,Mk*g(10)-v(10)),min(0,Mk*g(11)-v(11))];
    else
        v(1)=max(0,v(1)-Mk*g(1));
        v(2)=max(0,v(2)-Mk*g(2));
        v(3)=max(0,v(3)-Mk*g(3));
        v(4)=max(0,v(4)-Mk*g(4));
        v(5)=max(0,v(5)-Mk*g(5));
        v(6)=max(0,v(6)-Mk*g(6));

```

```

v(7)=max(0,v(7)-Mk*g(7));
v(8)=max(0,v(8)-Mk*g(8));
v(9)=max(0,v(9)-Mk*g(9));
v(10)=max(0,v(10)-Mk*g(10));
hmum0=[min(g(1),v(1)/Mk),
min(g(2),v(2)/Mk),min(g(3),v(3)/Mk),min(g(4),v(4)/Mk),min(g(5),v(5)/Mk),min(g(6)
,v(6)/Mk),min(g(7),v(7)/Mk),min(g(8),v(8)/Mk),min(0,Mk*g(9)-
v(9)),min(0,Mk*g(10)-v(10)),min(0,Mk*g(11)-v(11))];
[x_goal,f_goal,k_goal]=bfgs('f_himm','g_himm',x_goal,1e-2);
hmum=[min(g(1),v(1)/Mk),
min(g(2),v(2)/Mk),min(g(3),v(3)/Mk),min(g(4),v(4)/Mk),min(g(5),v(5)/Mk),min(g(6)
,v(6)/Mk),min(g(7),v(7)/Mk),min(g(8),v(8)/Mk),min(0,Mk*g(9)-
v(9)),min(0,Mk*g(10)-v(10)),min(0,Mk*g(11)-v(11))];
end
summ=0;
for i=1:11
    summ=summ+hmum(i)^2;
end
end
fprintf('\n 最终 x_goal 的值为:');
x_goal          %输出最终优化值

```

（三）镜组倍率计算程序

```

function [m2,m3,m4,m5,m]=fin_AF(f1,f2,f3,f4,f5,Dlen)
m5=(f5-Dlen(5))/f5;
m4=(f4-Dlen(4)+(1-1/m5)*f5)/f4;
m3=(f3-Dlen(3)+(1-1/m4)*f4)/f3;
m2=(f2-Dlen(2)+(1-1/m3)*f3)/f2;
m=m2*m3*m4*m5;    %总倍率

```

(四) 补偿量计算程序

```
function del=fin_mov(m2,m3,m4,m5,deltaf2,deltaf4)
del=(-1)*((1-m2^2)*m3^2*m4^2*m5^2*(deltaf2)+0.05*((1-m3^2)*m4^2*m5^2+(1-
m5^2)))+(1-m4^2)*m5^2*deltaf4)/(m2^2*m3^2*m4^2*m5^2);
```

(五) 目标函数梯度计算程序

```
function g=g_himm(x0)
delta=1*10^(-5);
deltax=delta.*(eye(19));
g=linspace(0,0,19);
for i=1:19
    g(i)=(f_himm(x0+deltax(:,i))-f_himm(x0))/delta;
end
g=g';
```

(六) 赛德像差计算总程序

```
%计算赛德和数
function s9=S_seidel(f,h,hp,u,Pinf,Winf)
%暂取权重因子均为 1
S1=S_sphere(f,h,u,Pinf,Winf);
S2=S_coma(h,hp,u);
S3=S_asti(h,hp);
S4=S_dist(h,hp);
s9=S1^2+S2^2+S3^2+S4^2;
```

（七）球差计算程序

```

function S1=S_sphere(f,h,u,Pinf,Winf)
global P W fi; %全局变量
W=linspace(0,0,5);
P=linspace(0,0,5);
fi=linspace(0,0,5); %各组分光焦度
%P 无穷与 W 无穷求解
%规化 u(i)
for i=1:5
    fi(i)=1/f(i);
    u(i)=u(i)/(h(i)*fi(i));
end
for i=1:5
    W(i)=Winf(i)+(2+0.6)*u(i);
end
for i=1:5
    P(i)=Pinf(i)+u(i)*(4*Winf(i)-1)+u(i)^2*4.2;
end
%球差系数计算
S1=0;
for i=1:5
    S1=S1+h(i)^4*fi(i)^3*P(i);
end

```

（八）彗差计算程序

```

global J P W fi; %拉赫不变量

```

```

J=u(5)*21.64;
S2=0;
for i=1:5
    S2=S2+h(i)^3*hp(i)*fi(i)^3*P(i)-J*h(i)^2*fi(i)^2*W(i);
end

```

（九）像散计算程序

```

function S3=S_astl(h,hp)
global J P W fi; %拉赫不变量
S3=0;
for i=1:5
    S3=S3+h(i)^2*hp(i)^2*fi(i)^3*P(i)-2*J*h(i)*hp(i)*fi(i)^2*W(i)+J^2*fi(i);
end

```

（十）畸变计算程序

```

function S4=S_dist(h,hp)
global J P W fi; %拉赫不变量
S4=0;
for i=1:5
    S4=S4+h(i)*hp(i)^3*fi(i)^3*P(i)-
    3*J*hp(i)^2*fi(i)^2*W(i)+J^2*hp(i)*3.6*fi(i)/h(i);
end

```

（十一）双胶合玻璃选择与曲率计算总程序（以五组全动镜组 2 为例）

```
function calc_ddss()
clc;%单单双双透镜组求解
global ff c2 array sr1 sr2 sr3 sr4;
ff=-25.33; array=1; ns=1.62041; vs=60.34; %单镜取折射率及光焦度较大的玻璃。如 H-ZK9B (1.62041;60.34) /H-ZK7 (1.61309; 60.58)
Pinf=0.8114; Winf=-0.3491; %透镜组 P/W 无穷值.由设计者给定
%注意若规化曲率为负值（参考单镜 W 无穷与 Q 值的关系），实际透镜曲率乘以负透镜的焦距后为正值，弯向光阑。

%取光焦度分配比 0.1:0.8:0.05:0.05
zfi=zeros(1,4);
zfi(1)=0.1;
zfi(2)=0.8;
zfi(3)=(1-zfi(1)-zfi(2))/2;
zfi(4)=zfi(3);

%注意单镜 1 和单镜 2 具有相同的 P/W 无穷。但是有限距离非平行光入射时，P/W 不同。

c2=-1.8; Q2=c2-1;%单镜 1（负透镜）第二面规化曲率由设计者自行估计（根据光线走势及 W 无穷的取值来定）
[sr1,sr2]=slope_rasingle(ff,zfi(1),ns,c2);
fprintf('单单双双第一块单镜的半径为： r1=%f;r2=%f\n',sr1,sr2);
c4=-0.2;
for k=1:20
    Q4=c4-1;%单镜 2（负透镜） 第二面规化曲率由设计者自行估计（根据光线走势及 W 无穷的取值来定）
    [sr3,sr4]=slope_rasingle(ff,zfi(2),ns,c4);
```

```
fprintf('单单双双第二块单镜的半径为: r3=%f;r4=%f\n',sr3,sr4);
```

$W1\sin f = -1 * (ns+1) * Q2 / ns - 1 / (ns-1)$; %单镜 1 W 无穷 P 无穷, 仅仅和规划曲率及透镜折射率有关, 故两个单镜的 W 无穷 P 无穷不相同

```
P10s=ns*(1-9/(4*(ns+2)))/((ns-1)^2); %单镜 P0
```

```
P1sinf=P10s+(1-1/((ns+1)^2))*(W1sinf-1/(2*(ns+2)))^2; %单镜 P 无穷
```

$W2\sin f = -1 * (ns+1) * Q4 / ns - 1 / (ns-1)$; %单镜 2 W 无穷 P 无穷, 仅仅和规划曲率及透镜折射率有关, 故两个单镜的 W 无穷 P 无穷不相同

```
P20s=ns*(1-9/(4*(ns+2)))/((ns-1)^2); %单镜 P0
```

```
P2sinf=P20s+(1-1/((ns+1)^2))*(W2sinf-1/(2*(ns+2)))^2; %单镜 P 无穷
```

%这里仅需要求解单镜 2 有限距离入射情况的 W/P 值 (非平行光)

```
us2=zfi(1)/zfi(2); %规化角计算
```

```
us3=(zfi(1)+zfi(2))/zfi(3);
```

```
us4=(zfi(1)+zfi(2)+zfi(3))/zfi(4);
```

```
Ws2=W2sinf+us2*(2+1/ns);
```

```
Ps1=P1sinf; Ws1=W1sinf;
```

```
Ps2=P2sinf+us2*(4*W2sinf-1)+us2^2*(3+2/ns);
```

%双胶合的选法, 由于是二元一次方程, 共两个方程, 四个未知数 $P2/P3/W2/W3$, 因光焦度相同

```
%先尝试去 P2=P3;W2=W3;zfi(2)=zfi(3)
```

```
% P2=1/2*(Pinf-zfi(1)^3*P1inf)/(zfi(2)^3);
```

```
% W2=1/2*(Winf-zfi(1)^2*W1inf)/((zfi(2)^2));
```

%规化为无穷

```
% W2inf=W2-2.7*us2; %参数  $\mu$  取 0.7
```

```

% P2inf=P2-us2*(4*W2inf-1)-4.4*us2^2;
W3inf=(Winf-zfi(1)^2*Ws1-zfi(2)^2*Ws2)/zfi(3)/2-2.7*(us3+us4)/2;
P3inf=(Pinf-zfi(1)^3*Ps1-zfi(2)^3*Ps2)/zfi(3)^3/2-(us3+us4)*(4*W3inf-1)-
4.2*(us3^2+us4^2)/2;
W4inf=W3inf;
P4inf=P3inf;
%求双胶合透镜组在球差极小值时参数 P0 值，且两组所需要负担的色差；
P03=P3inf-0.84*(W3inf-0.14)^2;
P04=P4inf-0.84*(W4inf-0.14)^2; %由于我们取 W2inf=W3inf,P3inf=P2inf;所以
两者 P0 值相同
fprintf('胶合组 1 P 无穷值为: %f, W 无穷值为: %f, P0 值为: %f\n',P3inf,W3inf,P03);
fprintf('胶合组 2 P 无穷值为: %f, W 无穷值为: %f, P0 值为: %f\n',P4inf,W4inf,P04);

%色差系数计算
Cs=(zfi(1)+zfi(2))/vs; %单镜色差和数
%我们假定双胶合组分担的色差是以光焦度的大小来分配的。（因光焦度相等，
故比例都是 fi(3)/(fi(3)+fi(4))）
%规化后（除以相应胶合组的光焦度）
Cd=-1*Cs/(zfi(3)+zfi(4)); %注意-1 乘上之后代表单镜总和色差和数的负值
fprintf('胶合组色差和数为: %f\n',Cd);
%分火石玻璃在前与冕牌玻璃在前两种方案进行计算
Flint_infront_double(W3inf,Cd,P03,zfi(3),zfi(1));
Crwon_infront_double(W3inf,Cd,P03,zfi(3),zfi(1));

```

（十二）镜组内部单镜曲率半径计算程序

%ff 为整个镜组的焦距，fid 为单镜占据整个镜组的光焦度 C2 是单镜的规化曲率大小

```
function [r1,r2]=slove_rasingle(ff,fis,ns,C2)
```

```
Q2=C2-1;
```

```
C1=Q2+ns/(ns-1);
```

```
r1=ff/fis/C1;
```

```
r2=ff/fis/C2;
```

（十三）双胶合三个曲率半径计算程序

%本程序用于计算双胶合三个半径大小（根据胶合镜的 $n1, n2, v1, v2, W_{inf}, C_i, f_{i1}, f_{i2}$ ）

% $v1, v2$ 代表胶合镜的阿贝数， C_i 代表胶合镜的色差系数

% $f_{i1}+f_{i2}=1$,即胶合镜内部光焦度分配情况。 f_{id} 代表胶合镜本身在镜组中所占有的光焦度大小

% ff 代表镜组（补偿组，变倍组等）本身焦距值

```
function [r1,r2,r3]=rad_doub(n1,n2,v1,v2,Winf,Ci,dfi,ff)
```

%双胶合内部光焦度分配

```
detfi=[1/v1 1/v2; 1 1];
```

```
detfi1=[Ci 1/v2; 1 1];
```

```
detfi2=[1/v1 Ci; 1 1];
```

```
f1=det(detfi1)/det(detfi);
```

```
f2=det(detfi2)/det(detfi);
```

%两个参数计算 a

```
a=1+2*f1/n1+2*(1-f1)/n2;
```

```
b=3*f1^2/(n1-1)-3*(1-f1)^2/(n2-1)-2*(1-f1);
```

```
Q0=-b/2/a;
```

% $W0=(1-f1)/3-(3-a)*Q0/6$ % 此式子与下式相差一个负号

```
W0=-1*(a+1)*Q0/2+(1-f1-b)/3;
```

```
Q=Q0-2*(Winf-W0)/(a+1);
```

```
C2=Q+f1;
```

```
C1=C2+fi1/(n1-1);
```

```
C3=C2-fi2/(n2-1);
```

```
r1=ff/C1/dfi;
```

```
r2=ff/C2/dfi;
```

```
r3=ff/C3/dfi;
```

（十四）火石玻璃在前双胶合曲率半径及玻璃选择程序

```
function Flint_infront_double(Wdinf,Cd,P0p,ffi,zfl)
```

```
global ff c2 array sr1 sr2 sr3 sr4;
```

%将含有成都光明玻璃（分冕牌玻璃与火石玻璃）序号与名称的 Excel 文档读入一个矩阵内

Crown=xlsread('C:\Users\Administrator\Desktop\CDGlass_CrownK.xls');% Crown 是一个 72*3 的矩阵

Flint=xlsread('C:\Users\Administrator\Desktop\CDGlass_FlintF.xls');% Flint 是一个 120*3 的矩阵

```
fi=zeros(1,2);
```

%根据色差系数及不同玻璃组合计算光焦度分配

%火石玻璃在前

```
for i=1:1:120
```

```
    for j=1:1:72
```

```
        fi(1)=(Cd-1/Crown(j,3))/(1/Flint(i,3)-1/Crown(j,3));
```

```
        a=1+2*fi(1)/Flint(i,2)+2*(1-fi(1))/Crown(j,2);
```

```
        b=3*fi(1)^2/(Flint(i,2)-1)-3*(1-fi(1))^2/(Crown(j,2)-1)-2*(1-fi(1));
```

```
        c=Flint(i,2)*fi(1)^3/((Flint(i,2)-1)^2)+Crown(j,2)*(1-fi(1))^3/((Crown(j,2)-1)^2)+Crown(j,2)*(1-fi(1))^2/(Crown(j,2)-1);
```

```
        P0=c-b^2/(4*a);
```

```
        Q0=-1*(b/(2*a));
```

```

W0=-1*(a+1)*Q0/2+(1-fi(1)-b)/3;
delP0=P0p-P0;
if(abs(delP0)<=0.01) %玻璃 P0 值与要求的值相差小于 0.01
    fprintf('\n\n 符合条件玻璃(火石在前冕牌在后)的折射率(阿贝
数):%f(%f)--%f(%f)\n',Flint(i,2),Flint(i,3),Crown(j,2),Crown(j,3));
end
end
end
end

```

(十五), 冕牌玻璃在前双胶合曲率半径及玻璃选择程序

```

function Crwon_infront_double(Wdinf,Cd,P0p,ffi,zfl)
global ff c2 array sr1 sr2 sr3 sr4;
Crown=xlsread('C:\Users\Administrator\Desktop\CDGlass_CrownK.xls');% Crown 是
一个 72*3 的矩阵
Flint=xlsread('C:\Users\Administrator\Desktop\CDGlass_FlintF.xls');%Flint 是一个
120*3 的矩阵
fi=zeros(1,2);
%冕牌玻璃在前
for i=1:1:72
    for j=1:1:120
        fi(1)=(Cd-1/Flint(j,3))/(1/Crown(i,3)-1/Flint(j,3));
        a=1+2*fi(1)/Crown(i,2)+2*(1-fi(1))/Flint(j,2);
        b=3*fi(1)^2/(Crown(i,2)-1)-3*(1-fi(1))^2/(Flint(j,2)-1)-2*(1-fi(1));
        c=Crown(i,2)*fi(1)^3/((Crown(i,2)-1)^2)+Flint(j,2)*(1-fi(1))^3/((Flint(j,2)-
1)^2)+Flint(j,2)*(1-fi(1))^2/(Flint(j,2)-1);
        P0=c-b^2/(4*a);
        Q0=-1*(b/(2*a));
    end
end

```

```
W0=-1*(a+1)*Q0/2+(1-fi(1)-b)/3;
delP0=P0p-P0;
if(abs(delP0)<=0.01)    %玻璃 P0 值与要求的值相差小于 0.01
    fprintf('\n\n 符合条件玻璃(冕牌在前火石在后)的折射率(阿贝
数)为:%f(%f)--%f(%f)\n',Crown(i,2),Crown(i,3),Flint(j,2),Flint(j,3));
end
end
end
```