

北京理工大学

博士学位论文

光学系统智能化自动设计关键技术研究

姓名：张丽琴

申请学位级别：博士

专业：光学工程

指导教师：王涌天;李林

2002. 1. 30

摘 要

本论文对于光学系统智能化设计的几个问题进行了研究，其目的是为了提_高光学系统设计的智能化程度。文中主要包括以下内容：研究了遗传算法在光学系统优化设计中的应用；提出了能够同时求解多组元全动型变焦距系统组元焦距和每个变焦位置组元间隔等高斯光学参数的新方法，并应用新方法求解出变焦距光学系统的初始结构；研究了光学系统的热效应问题和相应的补偿方法即光学系统无热设计方法。（在各个研究问题中均设计了相应的光学系统验证实例。）

在课题的研究过程中，取得了一定的研究成果，主要有以下几个方面的成果与创新：

(1) 将遗传算法移植于光学系统的优化设计，构造了相应的数学模型，并编程实现了算法。（该方法克服了以往优化算法（包括局部优化算法和全局优化算法）中光学面（元件）无法自动增减的缺点，首次实现了光学面的自动增减，提高了优化设计的智能化程度。在设计过程中，首先将需要优化的光学结构编码成为二进制字符串，组成一代，然后按照类似于自然界中“自然选择”的原理对当前代进行选择、杂交和突变操作来产生下一代，这个过程重复进行直至筛选出符合要求的光学系统结构。设计实例证明遗传算法是一种有效的光学设计优化算法。）

(2) 对变焦距系统高斯光学参数的求解方法进行了系统的研究，对于多组元全动型变焦距系统，提出了一种求解其高斯光学参数的新型方法，并将该方法应用于求解变焦距系统的初始结构。（该方法在求解多组元全动型变焦距系统高斯光学参数的过程中，不再区分变倍组与补偿组的概念，统一将变焦距系统运动组元的移动距离和焦距作为变量，并将组元的 F 数作为约束条件，同时求解出多组元全动型变焦距系统在每个变焦位置的高斯光学参数，并给出了设计实例，证明了算法的可行性。）

(3) 系统地研究了变焦距系统初始结构的求解方法，分析了变焦距系统的像差特点和设计原理，在此基础上结合求解变焦距系统高斯光学参数

的过程，编制了相应的软件并设计了实例，实现了自动匹配组元参数，然后将组元组合起来整体优化的功能，提高了光学系统设计的智能化程度。

(4) 研究了温度变化对光学系统成像质量的影响，并通过软件来实现。讨论了如何补偿温度变化对光学系统造成的影响，即光学系统的无热设计技术，并给出了设计实例说明了补偿过程。（在通常的光学系统设计中，只考虑在常温、常压下光学材料的特性，在此基础上对成像质量进行评估。对于在正常条件下使用的光学系统来说，这样的处理方法是可行的。而对于处在空间环境下的光学系统，它们所承受的温度与地面相差极大，光学材料的特性参数（折射率、厚度等）都将发生变化，从而引起成像质量的变化。因此在地面上设计好的系统，如果不考虑空间环境中温度等因素变化所带来的影响，就会给系统工作的稳定性带来很大的波动。所以需要研究温度变化引起光学系统成像质量的变化，并采取措施补偿温度变化引起的影响。）

关键词：光学设计；优化设计；遗传算法；变焦距系统；热效应分析；高斯光学参数

Abstract

A few issues are investigated about intelligent computer-aided design (ICAD) of optical systems, including, (1) genetic algorithm applied into optimization of optical systems, (2) a new computable method of determining Gaussian parameters for zoom systems with multiple moving lens groups, (3) automatic generation of initial structure of zoom systems, (4) research on thermal effect analysis and compensating method (athermalization) of lens systems. Examples of practical optical systems are given in each issue.

Some new algorithms and methods of ICAD have been developed in the paper, details are as following:

(1) An attempt has been made to use the Genetic Algorithm in the field of lens design. Mathematical model has been constructed, and program code developed. Experiment results show that Genetic Algorithm can realize the automatic increase or decrease of optical surfaces in the lens system during the optimization process, which is an important step towards automatic design with artificial intelligence.

(2) A new computable method of determining Gaussian parameters is presented for zoom systems with multiple moving lens groups. These lens groups are no longer divided as focus changing group(s) and compensating group(s). Displacements and focal lengths of all the moving lens groups are taken as variables in optimization, and the Gaussian parameters are solved for all the focal positions simultaneously, with the *F-number* of each lens group constrained to a rational value. A test program is developed using the algorithm. The results of a design example show that the method is practical and it is a step toward ICAD of zoom systems.

(3) Study is carried out on the automatic selection of initial structures for all the lens groups of a zoom system. Programming codes are developed, which can automatically find the matching groups and optimizing the whole systems.

A design example shows that it is an important step toward ICAD.

(4) The effect of the temperature variation on the optical system is studied, methods of athermalization discussed, and design examples provided. The effects were analyzed by using the coefficient of thermal expansion and thermal refractive index with the method of ray tracing. A test program is developed to estimate the effects of the parameters' variation on the image quality of optical systems when environmental temperature changes.

Keywords: Optical design, Genetic Algorithm, Zoom lens systems, Athermalization, Gaussian parameters

第一章 前言

1.1 课题的研究背景和研究意义

光学设计在近四十多年来,经历了由人工计算和人工校正像差,到计算机计算和像差自动校正的巨大变革。在人工计算时期,设计一个光学系统需要相当长的时间,校正像差优化光学系统的过程,很大程度上要依靠设计人员的经验和像差理论知识。当时人们把光学设计看作是一个介于科学技术和艺术之间的学问,似乎设计能否获得成功,要靠设计者的艺术灵感,设计出一种新的光学系统就是一个发明。电子计算机出现以后,很快被用来代替人工计算像差,并进一步发展成为光学系统的自动设计。只要原始系统选择合理,光学设计程序就能很快地得出要求的设计结果,比人工设计要快上千万倍。因此借助光学自动设计程序,在计算机上设计一些一般性的光学系统已经变得非常简单,即使是复杂的系统,经过一定时间的计算,加上光学设计人员的经验和理论知识,也会得到较满意的结果。为了得到更好的光学系统来满足经济和人们日益增长的物质、文化和科研的需求,就需要不断地研究光学系统的自动化设计技术,提高光学系统设计的智能化程度。

由上述可知,借助光学自动设计程序,大大加速和简化了光学设计过程,但在光学系统的智能化设计方面还存在着许多需要研究的问题,包括:

(1) 光学系统的全局优化问题

光学系统自动设计的实质,是在光学系统结构参数的高度非线性空间,寻找一个表示系统成像质量的评价函数的极小值。目前各种光学 CAD 软件中采用的优化算法为阻尼最小二乘法或适应法^{[1][2]},这些算法在找到解空间中某一局部极小值后就停滞不前,当优化计算结束时,设计者得到的是一个与初始结构参数接近的像质相对较好的结构,而不一定是全局最优设计。软件得出的最后设计的好坏,在很大程度上取决于设计者提供的初始结构,因此在光学设计中设计者的经验仍然起着关键作用。

缓解上述矛盾的一个方法是研究全局优化算法,克服无法跳出局部极小值的困扰,提高光学系统自动设计的智能化程度。近年来国际上提出的新的全局优化方法包括全局搜索^[3]、模拟退火^{[4][5]}、逃逸函数算法^{[6][7][8]}和遗传算法^{[9][10]}等。

全局搜索和模拟退火算法由于含有随机采样的步骤, 其所需的计算量总是随着优化变量的增加呈指数上升, 同时很容易抽到一些无法实现的系统(如出现负边、负中心厚度等), 故此只能用于一些简单系统的分析, 在复杂系统的自动设计中难以实用化^{[3][4][5]}。日本的 M. Isshiki 教授^{[6][7]}提出了一种逃逸函数算法, 它的运行是由多个不加或加入逃逸函数的阻尼最小二乘法局部优化组成。这种算法通过对评价函数加一个逃逸函数的方法, 可以跳出初始系统附近的局部极小值, 找到其它的甚至更好的局部极小值。这种算法克服了以往全局优化算法的缺点, 在理论上是一种效率很高的全局优化算法。但是逃逸函数全局优化算法不能实现光学面(元件)的自动增减, 因此其智能化设计的程度还不是很高。遗传算法是基于自然界中“适者生存”原理的一种优化技术, 它是 70 年代初期由 J. H. Holland^[11]首次提出的。目前这种技术已经成功地应用于各种领域, 例如音乐创作、基因合成、VLSI 技术、战略计划、机器学习和网络设计等^{[12][13][14]}等。在光学设计中, 应用这种优化算法在理论上能实现光学系统面数(元件)的自动增减, 其前景是十分诱人的。

在软件方面, 目前美国 ORA (Optical Research Associates) 公司在其研制的 CODE V 软件中推出了实用化的全局优化 (Global Synthesis)^[15]功能。但出于商业利益, 该公司未公开其算法原理。因是一项新技术, 尚有较大局限性。此外, CODE V 软件售价极其昂贵, 非国内一般用户所能支付。在国内, 成都光电所等单位对模拟退火等算法进行了一些探讨^[16]。北京理工大学已将逃逸函数全局优化算法成功地应用于 GOLD 软件^[8], 并已达到实用化, 并且提出了对遗传算法的研究, 但是尚处在起步阶段, 没有进行深入的研究。鉴于以上情况, 本课题将深入研究遗传算法在光学系统优化设计中的应用, 提高优化设计的智能化水平。

(2)变焦距系统的设计

近年来, 变焦距系统得到了越来越广泛的应用。在民品方面, 日本各光学公司之所以长期独霸照相机、摄像机、望远镜等产品的国际高档市场, 与它们能够不断地为这类产品设计配备像质更好、变倍比更大、体积更小、重量更轻的变焦距系统有很大的关系^[17]。事实上, 这些公司都在自行研制并不断完善变焦距系统的专用设计软件, 但为维护自身的利益不对外公

开。在军事领域,各先进国家的热像系统、观瞄系统也在迅速地从传统的定焦系统向使用更方便的变焦距系统发展^[18],并积极探讨衍射光学元件^[19]等新技术在其中的应用。由于变焦距系统的飞速发展和广泛应用,国际工程光学学会(SPIE)于1995年为其召开了专题学术研讨会^[20],1998年由SPIE和美国光学学会联合举办的国际光学设计会议上,“变焦光学”又被单列为一个专题进行讨论^[21]。

国内有关单位如西安光机所、长春光机所、北京理工大学、浙江大学等对变焦距系统分别进行过探讨,有过一些成功的设计实例,但未对设计方法做系统的研究,没有成熟的专用软件^[22]。目前,我国变焦距系统设计的整体水平大大落后于日本、美国等先进国家。仍以单反式相机变焦距物镜为例:当日本公司的28-200mm、24-120mm大变倍比镜头已经充斥市场的时候,国内光学企业设计制作的28-80mm镜头尚不过关,故此国产光学民品只能在低端市场残酷竞争,大中型光学企业普遍处于亏损边缘。在国防领域中,可变焦红外热像仪等系统的设计研制也举步为艰。

变焦距系统是一类设计困难很大的光学系统,其特殊性主要体现在^{[22][23]}:

① 这类系统更新迅速,如单反照相机变焦距物镜的变倍比已从几年前的3倍发展到现在的7倍以上,因为这个原因,当设计人员接到新的设计任务时,难以从已发表的镜头专利中找到类似的参考结构,需要从高斯光学的分析出发建立初始结构。而目前无论是国内研制的光学设计软件还是国外的商品软件都没有提供初始结构的分析功能,全靠设计者的经验;

② 在结构优化时需要同时兼顾各个焦距的成像质量,因此对程序的优化能力提出了更高的要求;

③ 变焦距系统内含运动部件,在设计和优化时必须保证各运动组元间的运动曲线不相互交叉,还要尽量放松对各运动组元偏心、倾斜公差的要求,以便降低对机械部件的精度要求和加工成本。

随着变焦距系统设计任务的日益增多和设计要求的不断复杂,许多单位提出了对这类镜头智能化设计的迫切要求。鉴于以上原因,我们将进行变焦距系统设计方法的研究,它的开展和完成对提高我国光学工业的国际竞争能力和军用光学系统的设计水平具有十分重要的意义。

(3) 光学系统的热效应分析

我们通常设计的光学系统，都只考虑在常温、常压下光学材料的特性，对成像质量的评估也基于此。对于在正常条件下使用的光学系统来说，这样的处理方法是可行的。而对于处在空间环境下的光学系统，如遥感卫星上的摄像镜头、空间天文望远镜等，它们所承受的温度、压力以及太阳辐射与地面相差极大，并且随着高度、运行轨道、气候和季节变化，光学材料的特性参数（折射率、厚度）都将发生变化，从而引起成像质量的变化。因此对一个空间环境来说，在地面上设计好的系统，如果没有考虑到这个环境中温度、辐射、压力等因素变化所带来的影响，就会给系统工作的稳定性带来很大的波动，而在以上的诸多因素中，温度是主要的。用于军事或者航天器上的现代光学仪器都期望在一个很广的温度范围内有稳定的性能，通常，典型的温度变化范围是 -20°C 到 $+60^{\circ}\text{C}$ ^{[24]-[27]}。在此温度范围内，某些光学材料的性能将随温度的变化发生很大的改变，正是这种温度热效应限制了高分辨率镜头的发展^{[28][29]}。

从四十年代开始，J. M. Perry (1943) 等研究人员相继阐述了均匀温度场中，温度变化对光学系统成像质量的影响。其中一些学者还着重研究了光学玻璃透镜中径向温度梯度分布的理论，进而提出透镜无热设计 (Athermalization) 的概念。从七十年代中期到八十年代中期，无热设计取得了很大的进步，出现了几种无热设计路线^{[25][30]}，并涌现了一批成功的设计实例，从此无热设计进入了可操作阶段。

随着空间技术的飞速发展，我国空间探索的深度和广度正在以前所未有的速度增强。同时出于政治、经济等方面的考虑，也需要对本国国土上的资源有更全面更详尽的了解，这必将对空间探索系统提出更高的要求，而这些系统的核心部件往往都是光学系统，光学系统质量的优劣将直接影响整个系统的性能。因此，光学系统设计者必须探索在空间环境下系统性能指标的变化，尤其是温度变化所带来的影响，采取措施防止系统性能的恶化，以满足空间探索的要求。

在光学设计软件方面，美国 ORA 公司的 Code V 软件^[31]，Sinclair 公司的 OSLO Six 软件^[32]和英国 Kidger Optics 公司的 SIGMA PC^[30]等光学设计软件都相继增加了环境温度分析模块，帮助设计者进行温度变化时光学系统性能的优化和修正。

在国内，北京理工大学从八十年代末期开始追踪这方面的国际学术动态，并着手进行研究，积累了一定的经验。然而，国内使用面较广的光学设计软件 SOD^[33]、Gold^[34]等，尚不具备实用化的环境分析功能。鉴于以上情况，需要研究光学系统的热效应问题。

1.2 本论文的主要研究内容

针对以上提出的光学系统智能化设计中存在的问题，本论文主要研究了以下几个方面的内容：

(1)建立了遗传算法的数学模型。定义了一组零光焦度的遗传算子，达到了从一个单透镜开始，通过引入遗传算子来实现光学系统结构的改变，即实现光学系统透镜片数（元件）的增减。确定了双高斯照相物镜需要采用的遗传算子，对遗传算子进行了编码；确定了选择、杂交和突变机制。

(2)基于以上的数学建模，用软件实现了遗传算法，并以实际例子证明了算法的可行性，提高了光学系统优化设计的智能化水平。

(3)对于变焦距系统的研究，提出了一种新型的求解变焦距系统高斯光学参数的方法。这种方法在求解多组元全动型变焦距系统高斯光学参数的过程中，不再区分变倍组与补偿组的概念，统一将变焦距系统运动组元的移动距离和焦距作为变量，并将组元的 F 数作为约束条件，同时求解出多组元全动型变焦距系统在每个变焦位置的高斯光学参数，并给出了设计实例，证明了算法的可行性。

(4)编制软件实现了变焦距系统高斯光学参数的求解，并在求解变焦距系统高斯光学参数的基础上，采用逐个组元加入的方法，实现了变焦距系统初始结构参数的自动生成。

(5)研究了光学系统的热效应问题。分析了两种温度分布—均匀温度分布和径向梯度温度分布对光学系统成像质量的影响以及消除温度影响的技术—光学系统的无热设计技术，通过实例分析说明了温度补偿的过程。

1.3 本论文的组织结构

本论文研究了光学系统智能化自动设计的几种关键技术。第一章介绍

了在智能化设计中存在的几个问题以及课题的研究目的与意义；第二章介绍了遗传算法的发展历史、应用和特点以及遗传算法在光学系统优化设计中的应用，并设计了验证实例；第三章对简单变焦距系统高斯光学参数的求解公式进行了推导和总结，对全动型变焦距系统着重进行了研究，提出了一种能够同时求解出组元焦距和每个变焦位置组元移动距离等高斯光学参数的新方法，并设计了光学系统实例；第四章在第三章求解变焦距系统高斯光学参数的基础上，求解出了变焦距系统的初始结构参数，同时对变焦距系统初始结构的自动求解方法、照相机变焦距系统变焦过程中的像差特点以及设计原理进行了介绍；第五章研究了光学系统的热效应问题和光学系统的无热设计问题；第六章是本论文的总结章，对课题的研究成果和创新点以及以后需要改进的方面进行了总结。

第二章 遗传算法在光学系统优化设计中的应用

2.1 遗传算法概述

2.1.1 遗传算法的发展历史

遗传算法的最早雏形出现在生物学家 Fraser^{[35][36][37]}的论文中,他曾经试图模拟突变和选择交互作用的进化过程。

进入 60 年代,美国密执安大学的 J. H. Holland 教授^{[11][38]}认识到了生物自然进化和人工自适应系统的相似关系,提出可以运用生物遗传和突变的原理来研究和设计人工自适应系统,并且充分认识到了选择、杂交和突变在自适应系统设计中的重要性。1967 年, Holland 教授的学生 J. D. Bagley^[39]在其博士论文中首次提出了“遗传算法”一词,并发表了关于遗传算法应用方面的第一篇论文。他提出了复制、杂交和突变等遗传算子,与目前遗传算法中使用的算子非常类似。

70 年代, Holland 教授提出了遗传算法的基本原理—模式定理^[11],从而奠定了遗传算法的理论基础。模式定理揭示了群体中优良个体的数量将以指数规律增长,从理论上保证了遗传算法是一个可以用来寻求最优可行解的优化过程。1975 年, K. A. De Jong^[40]在其博士论文中结合模式定理,进行了许多纯数值函数优化的试验,得出了遗传算法的工作框架,得到了一些有重要意义的结论,推荐了在大多数优化问题中都较适用的遗传算法的参数取值。

1989 年, D. E. Goldberg^[41]出版了《Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning》一书,完整的阐述了遗传算法的基本原理和应用,系统总结了遗传算法的主要研究成果,奠定了现代遗传算法的科学基础。

1991 年, L. Davis^[42]编辑出版了《Handbook of Genetic Algorithm》一书,包括了遗传算法在工程技术、社会经济和科学计算等方面的许多应用实例,为遗传算法的推广和应用起到了非常重要的作用。

1992~1994 年, J. R. Koza^{[43][44]}提出了“遗传编程”(Genetic Programming)的概念,将遗传算法应用于计算机程序的优化设计以及自动生成。此方法已经成功地应用于机器学习、人工智能和符号处理等方面。

近年来,在我国也出现了对遗传算法的一些研究和应用。比较重要的文献有:陈国良^[45]编写的《遗传算法及其应用》、周明与孙树栋^[46]编写的《遗传算法原理与应用》和玄光男与程润伟^[47]编写的《遗传算法与工程设计》等。指出遗传算法在数值函数优化、求解集装箱问题和旅行商问题、离散空间和连续空间下机器人的路径规划等方面得到了很好的应用。

2.1.2 遗传算法的应用

近年来,随着对遗传算法研究的不断深入,越来越多的人认识和了解了遗传算法。遗传算法不依赖于问题的具体领域,提供了求解复杂系统优化的通用框架,从而被众多的领域所接受,在问题优化、模式识别、及其机器学习、人工智能等领域得到了广泛的应用。具体地说来,遗传算法有以下方面的应用:

(1)函数优化。最优化在运筹学和管理科学中起着核心作用。最优化通常是在满足一些等式和/或不等式的条件下,求解某个多变量函数的极大值或者是极小值。对于其中一些非线性、多模型、多目标函数的优化问题,用传统的优化方法很难解决,而使用遗传算法可以比较方便地得到较理想的结果^[48]。

(2)组合优化。组合优化研究的是具有有限个可行解的优化问题。典型的问题包括求解旅行商问题、背包问题、集装箱问题和车辆路径问题^{[45][46][47]}。虽然理论上这类问题的求解可以使用简单的穷举法找到,但随着问题规模的增大,搜索空间也急剧扩大,在目前的计算机上有时很难甚至不能使用穷举法求出其精确的最优解。而遗传算法是实现求解最优解的工具之一,它已经在上述的典型组合优化问题中得到了成功的应用。

(3)图像处理。在图像处理中,特征提取、图像分割等方面不可避免地存在着一些误差,这些误差会影响到图像处理的效果^{[49][50]}。计算机视觉要达到实用化必须使得这些误差最小^[51]。虽然别的方法可以达到这些目的,但是遗传算法在这些方面的应用效果更加显著。

(4)人工生命。人工生命就是使用计算机、机械等工具模拟具有自然生物系统特有行为的人造系统^[38]。人工生命与遗传算法有着密切的联系,基于遗传算法的进化模型是研究人工生命的重要理论基础,为人工生命的研究提供了一个重要工具,而人工生命的发展将促进遗传算法的进一步发

展。

(5)生产调度。生产调度问题所建立起来的数学模型很难精确求解，在实际的生产过程中主要依靠经验来调度。现在遗传算法可以较好地解决一些复杂的调度问题。如：单件生产车间调度、作业车间调度等问题都可以使用遗传算法得到较好的解决^{[45][46][47]}。

(6)自动控制。遗传算法已经在自动控制领域许多与优化相关的问题中得到了初步的应用，效果良好。例如，使用遗传算法可以进行参数辨识、进行人工神经网络和航空控制系统的优化设计等^{[52][53]}。

(7)机器学习。高级自适应系统具备的能力之一就是它具有学习能力。遗传算法在机器学习的很多领域都得到了应用。例如：基于遗传算法的机器学习可用于人工神经网络的网络结构优化设计；分类系统在学习机器人路径规化系统等方面得到了成功的应用^{[54][55][56]}。

(8)遗传编程。J. R. Koza 提出了“遗传编程”的概念，应用于计算机程序的优化设计以及自动生成等方面。他将一段 Lisp 程序作为个体的基因型，把问题的解码编为一棵树，利用遗传算法的概念，对由树组成的群体进行遗传处理，最终可以得到性能较好的计算机程序。

2.1.3 算法描述

生物的进化过程—从简单到复杂，从低级到高级，是一个自然的、并行发生的、稳健的优化过程。这一进化过程的目标是对环境的自适应性。生物种群通过“优胜劣汰”以及“遗传突变”来达到进化（优化）的目的。

遗传算法正是模拟这种自然进化发展起来的一种优化技术，它的常用形式是由 Goldberg 提出的。和传统搜索算法不同的是，遗传算法是从一组随机产生的称为“种群”的初始解开始的搜索算法。种群中的每个个体是问题的一个解，称为“染色体”。染色体被编码成为一串符号，例如二进制字符串，所有的字符串组成一代。在每一代中，使用“适度函数值”来评价染色体的好坏。生成的下一代染色体称为“后代”。后代是对前一代进行选择、杂交和突变形成的。新一代的形成中，根据适度函数值的大小来选择部分后代，淘汰部分后代，从而保持种群的数目是常数。经过若干代以后，算法收敛于最好的染色体，它可能就是问题的最优解或者近似最优解。遗传算法的流程图如图 2-1 所示，遗传算法的一般描述如下^{[10][57]}：

Begin

给进化的代数 t 赋初值 $t=0$;

初始化种群 $P(t)$;

编码种群;

评价 $P(t)$;

While 不满足算法的结束条件 do

Begin

从 t 代中选择染色体;

对选择的染色体进行杂交突变产生新代 $P(t+1)$;

$t=t+1$;

End

解码优化所得的种群;

End

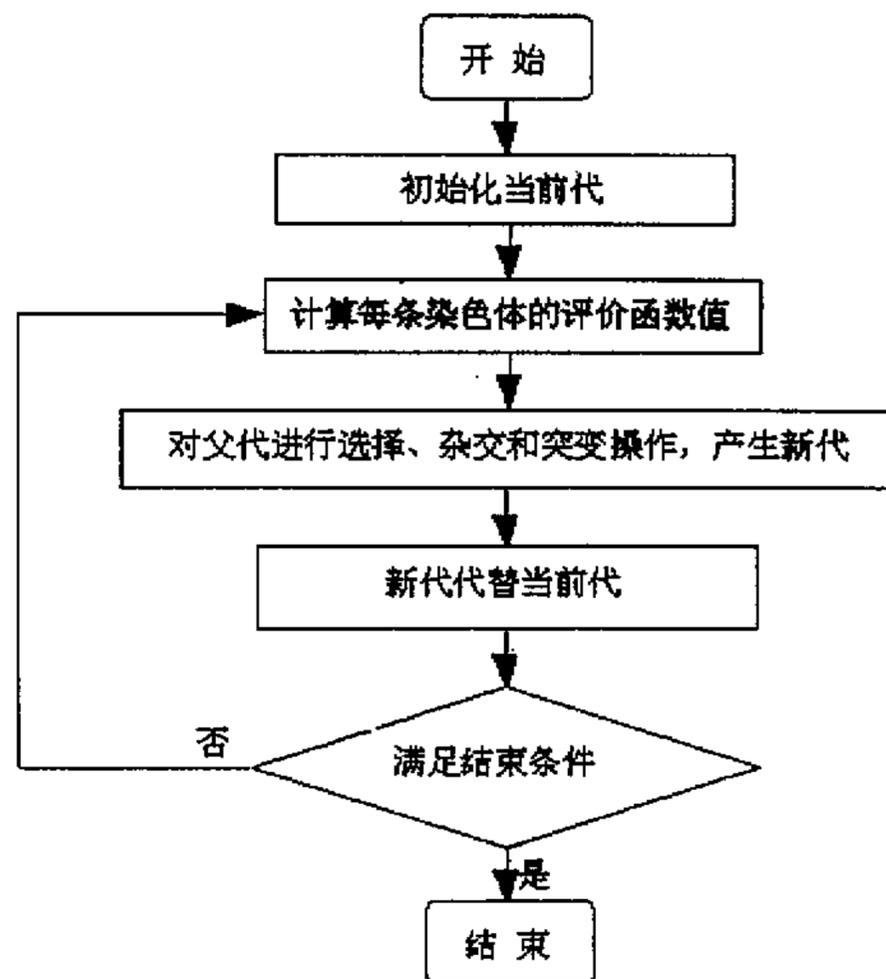


图 2-1 遗传算法的一般描述

2.1.4 遗传算法的特点

人们提出了各种各样的优化算法来解决各种优化计算问题, 例如单纯形法、梯度法、复合形法、阻尼最小二乘法^{[58][59]}等。这些优化算法各有各

的使用范围，各有各的长处，当然也各有各的限制。作为一种新型的优化算法，遗传算法受到了广泛的注意。与其他的优化算法相比，它主要有以下几个特点^{[45][47][60]}：

(1)遗传算法以优化变量的编码作为运算对象。遗传算法不像传统的优化算法那样直接利用优化变量的实际值来进行优化运算，而是将优化变量某种形式的编码作为运算变量，这样在优化过程中可以模拟生物进化的机理，借鉴生物学中基因和染色体的概念，使得我们可以很方便地应用遗传算子。

(2)遗传算法以目标函数值变化所得的适度函数值作为搜索信息。传统的优化算法在优化过程中不仅需要目标函数值，往往还需要目标函数的导数值等一系列的辅助信息才能够确定算法的搜索方向，而遗传算法仅仅使用目标函数变换而来的适度函数值，就可以确定算法的搜索方向。这个特点对于那些难以求导的函数、不存在导数的函数或者是多目标函数的优化问题，非常方便。同时利用目标函数变换后的适度函数值，可以把搜索范围集中到适度函数值较高的搜索空间中去，从而提高了搜索效率。

(3)遗传算法使用概率搜索方法。在传统的优化算法中，往往使用确定性的搜索方法，即一个搜索点到另一个搜索点的转移方法和转移关系是确定的，这样有可能永远达不到目标函数的最优点，因而限制了算法的应用范围。而遗传算法是一种自适应的概率搜索技术，其选择、杂交和突变的过程都是以一种概率的方法进行的。虽然它的这种特性会在优化过程中产生出一些适度值不高的个体，但随着优化过程的进行，总会在群体中产生出更多的优良个体。实践和理论证明，在一定的条件下，遗传算法总是以概率 1 收敛于问题的最优解。当然杂交率和突变率的选择会影响到搜索效率，因此要在实践过程中合理地选择杂交率和突变率等遗传参数。

(4)遗传算法对所求解的优化问题没有太多的数学要求。由于遗传算法的进化特性，它在最优解的搜索过程中，不需要了解问题的内在性质。遗传算法可以处理任意形式的目标函数和约束，无论是线性的还是非线性的，离散的还是连续的，甚至可以是混合的搜索空间。

(5)遗传算法可以同时使用多个搜索点的搜索信息。传统的优化算法大多数是从一个初始搜索点开始，寻找目标函数的最优解。但是单个的搜索点提供的信息毕竟不多，所以搜索的效率不高，有时候还会陷入局部最优

解而停滞不前，当然可以发展全局优化算法来解决这个问题。遗传算法则是从很多个体组成的初始种群开始搜索最优解，在优化过程中对这群个体进行选择、杂交和突变操作产生出新的种群，这些种群包含了很多的群体信息，可以避免搜索一些不必要的点，实际上是搜索了更多的点，所以具有一种隐含的并行性。传统的优化算法和遗传算法的比较如图 2-2 所示。

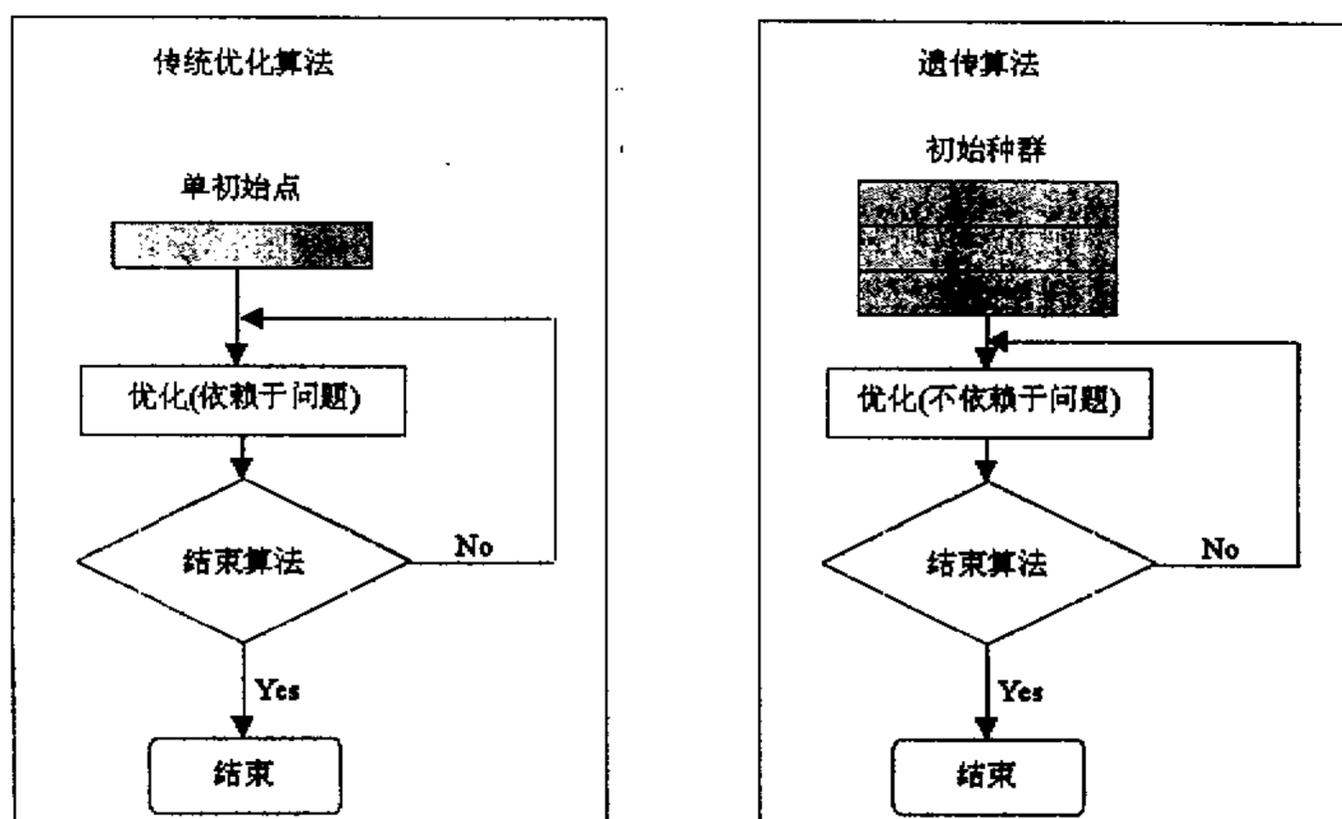


图 2-2 传统优化算法与遗传算法的比较

2.1.5 遗传算法的应用步骤和要解决的问题

由算法描述可知，遗传算法模拟自然界物种的遗传和进化原理，对种群反复地进行选择、杂交和突变操作，最终得到问题的最优解或者是近似最优解。遗传算法不依赖于要解决问题的领域和种类，提供了一种求解复杂系统优化的通用框架。对需要优化的实际应用问题，一般可以按照以下的步骤来构造遗传算法求解问题的最优解或者是接近最优解的解^{[60][61]}（见图 2-3 所示）：

- (1) 确定问题中的各种优化变量和它们的约束条件；
- (2) 建立要优化问题的数学模型，即：确定要优化问题的目标函数类型及其数学描述形式；
- (3) 确定种群中的个体—染色体的编码方法和解码方法；
- (4) 确定染色体的适度函数，即：如何评价个体染色体的优劣；

(5)设计出遗传规律，即：如何对种群进行选择、杂交和突变操作；

(6)确定遗传算法中涉及的运行参数，例如种群的数目、杂交率和突变率等。

从上述的应用步骤可以看出，如何构造可行的编码方法和设计合理的遗传策略（包括选择、杂交和突变策略）是遗传算法需要考虑的两个主要问题，也是设计的遗传算法是否可行的关键步骤。

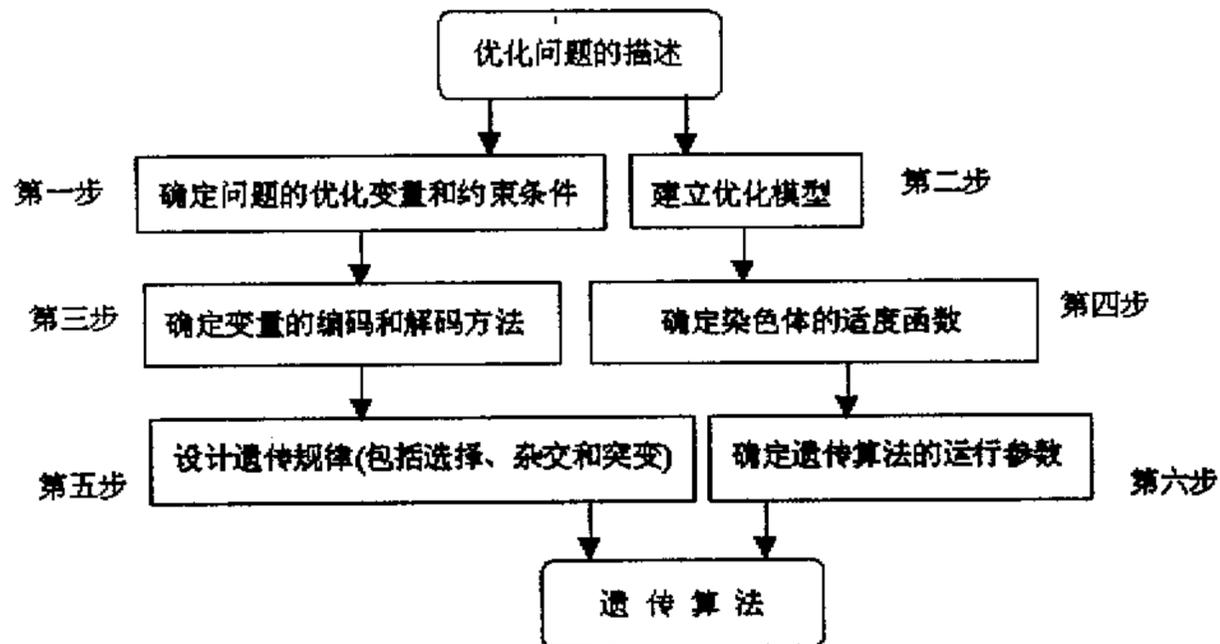


图 2-3 遗传算法主要构造过程示意图

2.2 遗传算法应用于光学系统优化设计的基本原理

2.2.1 概述

当前大多数光学 CAD 软件中采用的优化算法包括局部优化算法和全局优化算法。目前采用的局部优化算法有阻尼最小二乘法或适应法^{[1][2]}，这些算法在找到解空间中某一局部极小值后就停滞不前，结束优化过程，得到局部最优而非全局最优的设计结果。为了解决局部极小值问题，提出了各种全局优化算法。全局搜索和模拟退火等全局优化算法^{[3][4][5]}解决了优化过程中的局部极小值问题，但是这些算法具有耗用优化时间随变量数量的增加而呈指数性增长以及由于随机抽样而容易得到一些无法实现的系统（如出现负边、负中心厚度等）等缺点。日本的 M. Isshiki^{[6][7]}提出的逃逸函数全局优化算法，可以实现自动跳出局部极小值继续寻找其它极小值的目的，克服了全局搜索和模拟退火的缺点。以上提到的光学设计优化算法（包括全局和局部优化算法）都是在选定了初始光学结构的基础上，只是

对光学结构参数进行优化，在优化过程中不能自动改变光学面数，其自动设计的智能化程度还不是很高。

将遗传算法应用于光学系统优化设计中，理论上可以实现光学面的自动增减。但一段时间内该算法在智能化光学系统设计中并未达到实用化。本章将阐述将遗传算法移植于光学设计的优化过程，包括构造数学模型和算法的编程实现等，并通过实验证实该算法是提高光学系统设计智能化程度的一种有效工具。

2.2.2 遗传算法应用于光学系统优化设计的原理

在遗传算法中，许多的光学系统组成一个种群，将被优化种群中的个体—每个光学系统结构，称为一条染色体，每条染色体采用二进制编码的方式，编码成为一个二进制字符串，若干条染色体组成一代，第一代是根据某些给定的光学条件随机初始化生成的。下一代是通过使用遗传算子选择、杂交和突变当前代字符串产生的。这个过程重复进行，直到满足遗传算法的结束条件。下面给出遗传算法在光学系统优化实现过程中涉及到的几个细节问题的描述。

(1) 编码和解码方法

编码方法是遗传算法中各种遗传操作的基础。它除了决定个体染色体排列形式之外，也影响到选择、杂交和突变等遗传算子的运算过程。因此，编码方法的合适与否在很大程度上决定了如何进行群体的遗传进化操作以及遗传进化算法的效率。一个好的编码方法，可以使得选择、杂交和突变等操作变得简单，易于操作；反之如果编码方法不合适，就会影响选择、杂交和突变等遗传操作的执行，从而大大影响遗传算法的效率。随着遗传算法的广泛应用，人们提出了许多遗传算法的编码方法。总的说来，可以分为三大类：二进制编码方法、浮点数编码方法和符号编码方法^{[45][47][61]}。其中的二进制编码方法是最常用的一种编码方法，它使用的编码符号集是由二进制符号 0 和 1 组成的，具有编码与解码操作简单易行、杂交与突变等操作便于实现等优点，因而得到了广泛的应用。但是对于一些多维、高精度的连续函数优化问题，使用二进制编码，会存在以下缺点：二进制编码存在着连续函数离散化时的映射误差；不便于开发针对专门问题的遗传

算子, 人们在经典优化算法研究中的经验无法加以利用等。所以人们提出了浮点数编码方法。它可以克服二进制编码的上述缺点。后来又提出了适用于解决特定问题的符号编码方法^[62]。例如, 在使用遗传算法解决旅行商问题中就采用了符号编码方法。

在光学系统设计中, 其编码采用了二进制编码方法。首先定义一组零光焦度算子, 选择了要优化的透镜类型以后, 从定义的算子中选择一组适用于该透镜类型的算子, 选择的算子包含在二进制字符串 $A = a_1 a_2 \dots a_n$ 中, 其中 A 称为染色体, n 代表选择的算子个数, a_i ($i=1, 2, \dots, n$) 称为算子, 取值为 1 或 0。若值取为 1, 则代表第 i 个算子起作用; 反之, 则第 i 个算子不起作用。解码时, 在选定的初始光学结构基础上, 依据算子每个二进制位的取值和算子对应的关学元件添加规则, 加入到初始光学结构中去, 生成新的光学结构。

(2) 适度函数 (Fitness Function)

在遗传算法中使用适度来衡量群体中各个个体在优化计算中有助于找到系统最优解的优良程度。适度较高的个体有较高的机率被遗传到下一代, 反之, 个体遗传到下一代的机率相对小一些。度量适度的函数就称为适度函数, 它提供了评价每个个体染色体的机制。如果适度函数在遗传算法的计算过程中保持一成不变, 那么容易在算法运行的初级阶段出现早收敛现象; 在算法运行的后期阶段, 会出现个体的适度差别不大, 无法对某些重点区域进行重点搜索的缺点, 从而影响算法的运行效率。因此需要在算法的运行过程中, 对个体的适度进行适当的扩大和缩小, 称之为“适度尺度变换”。目前常用的适度尺度变换方法主要有: 线性尺度变换、乘幂尺度变换和指数尺度变换等^{[45][46][47]}。

适度函数 f 在光学系统的优化中提供了评价每个光学结构的机制。适度函数有多种取法, 通常取 $f=1/\phi$, ϕ 为光学系统优化中经常采用的评价函数 (MF-Merit Function)。评价函数的定义如下:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i^2 \quad (2-1)$$

此处每个 f_i 与像差有关, 是系统结构参数的函数。系统结构参数可以是光学面的曲率半径、各面之间的间隔以及介质的折射率及阿贝数等。 ω_i 为权因子, 若优化光线像差时, ω_i 可以设为统一值, 也可以在要求孔径权

重的情况下设为有效通光孔径的函数。若 f_i 为波像差, 则 ω_i 为一系列预设的系数以使得评价函数能代表与衍射有关的标准。

(3) 选择机制

自然界的生物进化和遗传过程遵循“优胜劣汰”的规律。模拟这个过程, 遗传算法使用选择算子来对群体中的个体进行优胜劣汰操作: 适度较高的个体有较大的机率被选择遗传到下一代, 而适度较低的个体被选择遗传到下一代的机率则相对较小。遗传算法中的选择操作就是确定如何从上一代群体中、按照何种方法、选择哪些个体遗传到下一代的一种遗传操作, 主要目的是为了 避免基因流失、提高全局收敛性和计算效率。选择操作建立在对个体适度进行评价的基础之上。早期的遗传算法使用的都是按适度比例选择算子。这种算子根据个体适度与当前群体平均适度的比值确定该个体遗传给下一代的样本个数期望值。为了在进化过程中保持相对恒定的竞争压力, 还需要在选择前对个体适度进行比例变换。为了省却适度变换带来的麻烦, 前人提出了多种依据个体适度的相对大小赋予个体不同繁衍机会的选择算子。常用的这类算子有排队选择 (Rank-based Model)、随机联赛选择 (Stochastic Tournament Model)、无回放随机选择 (Expected Value Model) 和无回放余数随机选择 (Remainder Stochastic Sampling with Replacement) 等^{[46][61]}。

在使用遗传算法对光学系统进行优化时, 对一些性能较好的染色体(光学结构)进行选择 and 复制。通过选择, 保留了较好的染色体, 一些不是很好的染色体被消除。一般情况下, 可以使用按比例选择的方法。其基本思想是: 各个个体被选中的概率与其适度值的大小成比例。按比例选择的方法描述如下:

设群体大小为 M , 个体 i 的适度值为 F_i , 则个体 i 被选中的概率 P_i 为:

$$P_i = F_i / \sum_{i=1}^M F_i \quad (2-2)$$

由上式可以看出, 适度值越高的个体染色体被选中的机率也越大; 反之, 适度值越低的个体被选中并遗传到下一代的机率也越小。

(4) 杂交机制

继选择之后, 进行杂交操作, 它是遗传算法的关键操作。遗传算法中

的杂交操作是指两个互相配对的染色体按照某种方式交换部分基因片断, 结合二者的特性产生新后代的遗传操作。它是遗传算法的关键操作之一, 其作用主要是用来产生新的个体, 是遗传算法区别于其它进化算法的重要特征。在杂交操作过程中, 必须先对群体中的个体进行配对。目前常用的配对方法是随机配对: 即群体中的 M 个个体按照随机的方式配对成 $\lfloor M/2 \rfloor$ 组个体组。杂交操作就是在这些配对的个体组中进行的。

杂交操作的一般步骤为:

① 随机选择杂交的配对个体组;

② 按照某种方式在两个个体的编码字符串中随机地设置一个或者多个杂交点;

③ 随机地产生一个 $[0,1]$ 内的数, 如果大于 p_c (其中 p_c 称作杂交率, $p_c \in (0, 1)$), 遗传算法对选择的配对染色体进行杂交, 产生两个新的个体。

常用的适合于二进制编码个体的杂交方法有: 单点杂交、双点杂交、多点杂交和均匀杂交方法等^[45]。适用于浮点数编码个体的杂交方法有算术杂交等方法^{[45][62]}。

当对光学系统进行优化时, 从要进行杂交的染色体二进制字符串中随机选择数对, 当随机产生的 $r_i \in (0, 1)$ 大于杂交率 p_c 时, 遗传算法对选择的染色体进行杂交, 产生新的光学结构。因为在光学设计中, 使用的是二进制编码方式, 因此可以采用单点杂交、两点杂交和多点杂交的方式。单点杂交的重要特点是: 如果相邻的基因位之间的关系能提供较好的个体特性和较高个体适应度的话, 则单点杂交操作破坏这种个体特性和降低适应度的可能性最小。需要说明的是, 一般情况下不太使用多点杂交的方法, 因为它有可能破坏一些好的模式。事实上, 随着杂交点数目的增多, 个体结构被破坏的可能性也逐渐地增大, 这样就很难有效地保存较好的模式, 从而在一定程度上大大影响遗传算法的性能。

(5) 突变机制

在遗传算法中, 所谓的突变操作就是将个体染色体编码串中的某些基因位上的基因值使用该基因位上的其它等位基因值来代替, 从而产生出一个新个体的操作。对于二进制编码的个体, 突变会引起染色体字符串位的偶发性变化。位的突变即位位的反转: 0 变成 1 或 1 变成 0。对于浮点数编码的个体, 突变操作就是将个体突变点处的基因值用基因值取值范围内的

一个随机值来代替。对于符号编码，突变操作就是使用字符集中一个随机指定的与要突变的基因值不同的符号来代替突变点上的符号。遗传算法中，将突变作为第二位的算子，它的作用是恢复丢失的基因物质。例如，假定在二进制编码的一个种群中，所有字符串在一个给定的位置收敛到 0，而优化方案是：在这个位置为 1。杂交不可能在这个位置重新产生 1，而突变可以做到这一点。所以当结果很快地收敛或者停滞收敛时，就对字符串的某些位进行随机性地突变。

突变操作的一般步骤为：

- ① 随机地选择需要突变的个体；
- ② 按照某种方式随机地选择需要突变的个体染色体的突变位；
- ③ 随机地产生一个 $[0,1]$ 内的数，如果大于 p_m （其中 p_m 称作突变率， $p_m \in (0, 1)$ ），遗传算法对选择的染色体在突变位上进行突变，产生新的个体。

常用的适合于二进制编码和浮点数编码的突变方法有：基本位突变、均匀突变、边界突变、非均匀突变和高斯突变等^[61]。

因为在光学设计中引入遗传算法时主要是使用二进制编码，所以可以采用基本位突变的方法进行光学系统的突变。其主要思想就是前述染色体基因位的反转—0 变成 1 或 1 变成 0。如前所述，杂交率 p_c 控制杂交的机率，类似地，突变率 p_m 控制一个位进行突变的机率。突变的作用是将丢失的性能较好的光学结构重新产生出来。

(6) 结束条件

遗传算法的运行过程就是算法为减小搜索结果与实际极值点的偏移量而不断进行计算的过程。判断算法是否应该停止运行，就应该从继续运行的利与弊两方面来综合考虑。当偏移量减小所带来的益处不足以抵消继续计算所消耗的时间代价的时候，就应该停止算法的运行。虽然群体进化一代所消耗的时间不难计算出，但是估计下一代搜索结果的偏移量，就需要根据进化过程中各代群体的实际组成来预测下一代群体中个体的分布情况，这是一个非常繁琐的过程，在实际计算中不易普遍采用。一些简化的方法包括^{[45][47][61]}。

- ① 适度界限法：当群体中个体的适度值大于给定的适度极限值后，就结束算法的运行；

② 时间界限法：产生了指定数目的后代，就停止算法的运行；

③ 改进可能性界限法：种群中的所有字符串有一定程度的同种性，即大量字符串在大多数位置有相同位，无法发现更优解，就结束算法的运行。

在光学系统优化中可以将上述的三种结束条件变换如下：

① 优化进行了指定的时间；

② 找到了满足给定条件的光学结构；

③ 大量字符串对应的光学结构有一定程度的同种性或近似的适度函数值。

2.3 遗传算法的数学建模

根据遗传算法应用于光学系统优化的基本原理，对遗传算法建立数学模型如下：

(1)首先定义一个正单透镜作为基准透镜，然后定义了 8 个零光焦度的算子（如表 2-1 和表 2-2 所示），即每个字符串的长度为 8。

表 2-1 定义的零光焦度算子

编号	名称	描述
1	内侧厚校正透镜	位于基准透镜后的弯月形透镜，凸面朝向基准透镜
2	内侧厚校正透镜	位于基准透镜后的弯月形透镜，凸面朝向像面
3	外侧厚校正透镜	位于基准透镜前的弯月形透镜，凸面朝向基准透镜
4	外侧厚校正透镜	位于基准透镜前的弯月形透镜，凸面朝向像面
5	翻转	所有的透镜绕中心翻转
6	分裂	将一个厚透镜分裂成两个薄透镜
7	胶合	用阿贝数不同的两种玻璃组成的双胶合透镜代替基准透镜
8	光阑位置	改变光阑面所在的位置

(2)在此处，我们取适度函数 $f=1/\phi$ ， ϕ 为评价函数，其定义见公式(2-1)所示。在 t 代中，设 f_i 代表第 i 个光学结构的适度函数值， \bar{f} 代表适度函数的平均值，则第 i 个光学结构被选择用来产生新光学结构的次数为 f_i/\bar{f} 。

可以看出，我们使用的是按比例选择的方法来产生后代。

表 2-2 基准透镜和定义的零光焦度算子的示意图

基准透镜		
定义的零光焦度算子		
编号	名称	描述
1	内侧厚校正透镜	
2	内侧厚校正透镜	
3	外侧厚校正透镜	
4	外侧厚校正透镜	
5	翻转	
6	分裂	
7	胶合	
8	光阑位置	

(3)对于杂交过程，我们使用单点杂交和两点杂交的方法对选择的光学结构字符串进行杂交。

• 单点杂交

在单点杂交方法 $c1$ 中，假定 l 是字符串的长度， t 代中的一对染色体 $\{x_i, x_j\}$ 从 $(1, l)$ 内随机地选择一个杂交点，将两个染色体杂交点的前后两部分进行交换，形成两个新的字符串，从而产生一对后代。其过程如下所示：

$$\begin{cases} x_i^{t+1} \\ x_j^{t+1} \end{cases} = c1 \begin{cases} x_i^t \\ x_j^t \end{cases} = \begin{cases} \left[\underbrace{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,k}}_k, \underbrace{x_{i,k+1}, x_{i,k+2}, \dots, x_{i,l}}_{l-k} \right]^i \\ \left[\underbrace{x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,k}}_k, \underbrace{x_{j,k+1}, x_{j,k+2}, \dots, x_{j,l}}_{l-k} \right]^j \end{cases} \quad (2-3)$$

其中: $i, j, p, p+1 \in [1, 2, \dots, n]; i \neq j, k < l$ 。

• 两点杂交

对两点杂交方法 $c2$ ，一对染色体在 $(1, l)$ 内的两个随机的位置分成三个字符串片段，然后通过交换字符串片段来进行。其过程如下所示：

$$\begin{cases} x_i^{t+1} \\ x_j^{t+1} \end{cases} = c2 \begin{cases} x_i^t \\ x_j^t \end{cases} = \begin{cases} \left[\underbrace{x_{i,1}, \dots, x_{i,k1}}_{k1}, \underbrace{x_{j,k1+1}, \dots, x_{j,k2}}_{k2-k1}, \underbrace{x_{i,k2+1}, \dots, x_{i,l}}_{l-k2} \right]^i \\ \left[\underbrace{x_{j,1}, \dots, x_{j,k1}}_{k1}, \underbrace{x_{i,k1+1}, \dots, x_{i,k2}}_{k2-k1}, \underbrace{x_{j,k2+1}, \dots, x_{j,l}}_{l-k2} \right]^j \end{cases} \quad (2-4)$$

其中: $i, j, p, p+1 \in [1, 2, \dots, n]; i \neq j, k1, k2 < l; k1 < k2$ 。

(4)对于突变操作，我们使用了基本位突变的方法。即：当随机产生的 $r_i \in (0, 1)$ 小于突变率 p_m 时，则对随机选择的字符串位进行位值变反的操作：0 变成 1，1 变成 0。采用的结束条件为：找到了满足给定条件的光学结构。

2.4 设计实例

采用上节的数学模型，我们编制了遗传算法软件。使用该算法，设计了一个光学特性参数如下的照相物镜：

焦距 $f'=100\text{mm}$ ；相对孔径 $D/f'=1/3$ ；视场角 $2\omega=50^\circ$ 。

选定的基准透镜如图 2-4 所示。表 2-3 和表 2-4 分别是初始化种群和经过对其选择、杂交与突变后产生的第一代种群所对应的字符串与其适度函数值。图 2-5 是初始化种群中第 20 个字符串所对应的光学结构。初始化种群经过 500 次迭代，可以得到 3 个性能相对较好的系统。其光学结构图和对应的 MTF 曲线图如图 2-6(a)，2-6(b)，2-6(c)所示。由设计实例可以看出：使用遗传算法对光学系统进行优化，能够实现从一个基准透镜开始，通过对代表光学结构的染色体字符串进行选择、杂交和突变得不同光学面数的结构，即可以根据需要实现光学面的自动增减。

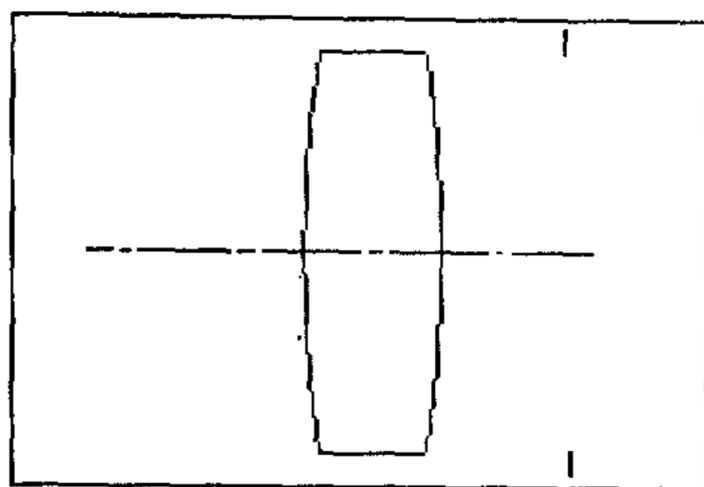


图 2-4 初始透镜

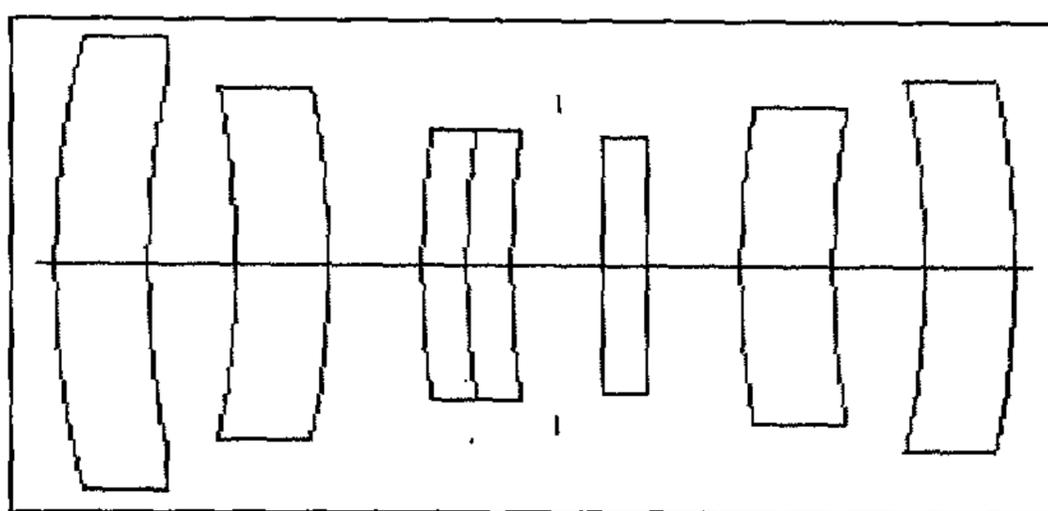
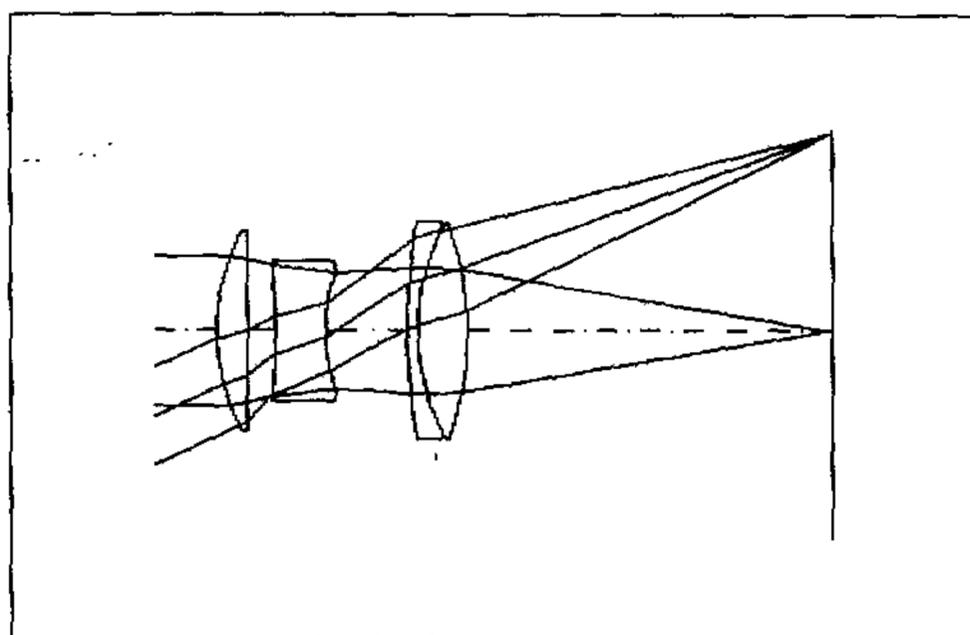
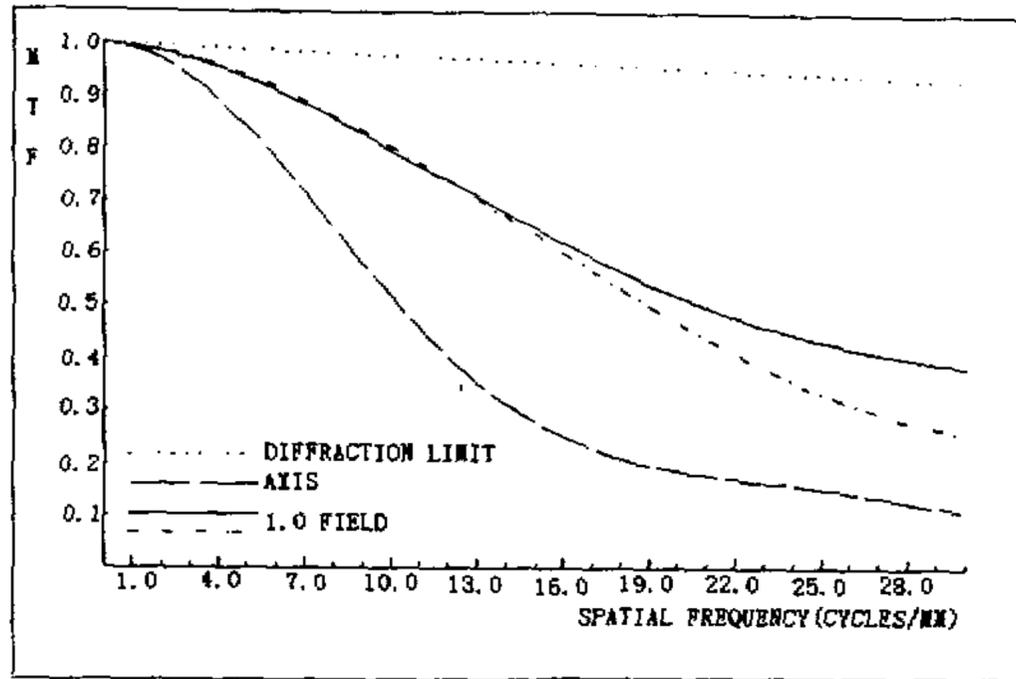
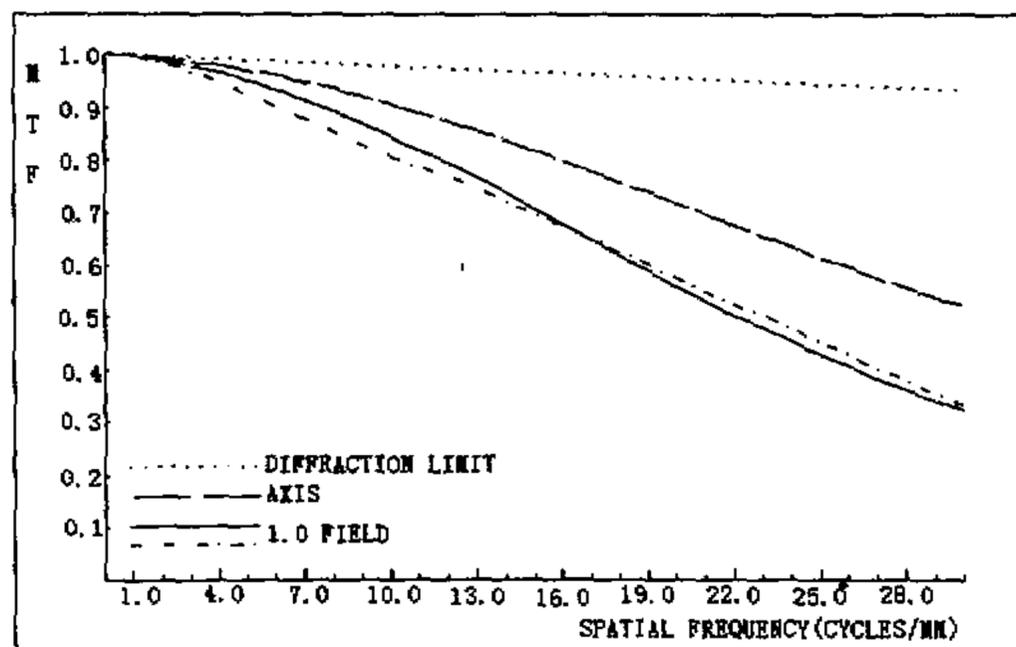
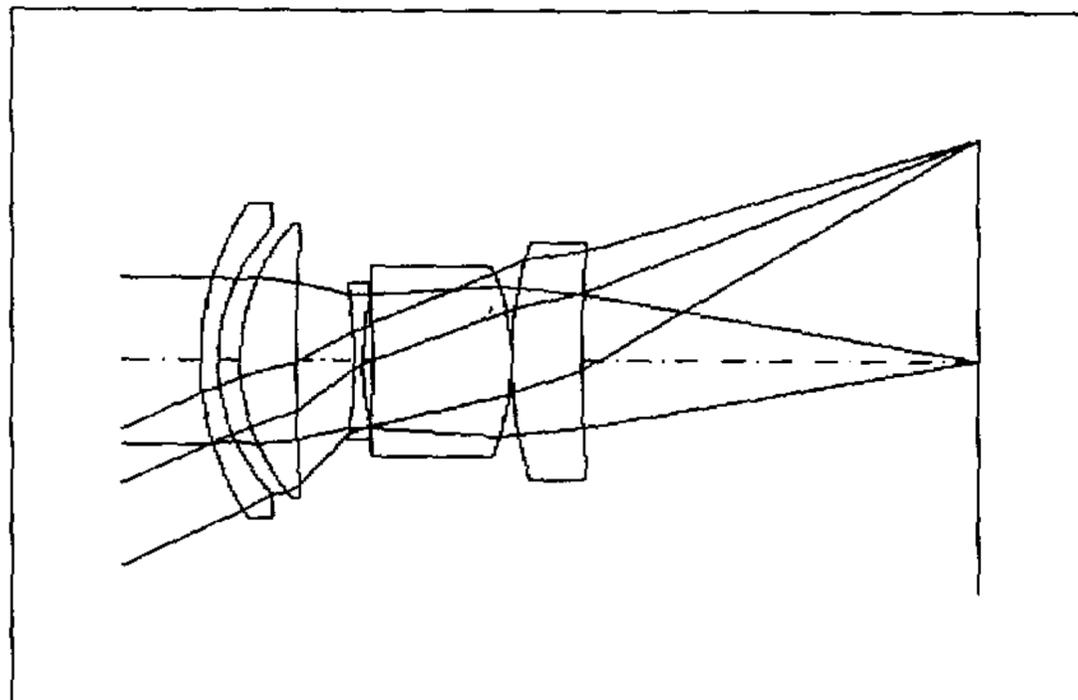


图 2-5 初始化种群中第 20 个字符串对应的光学结构

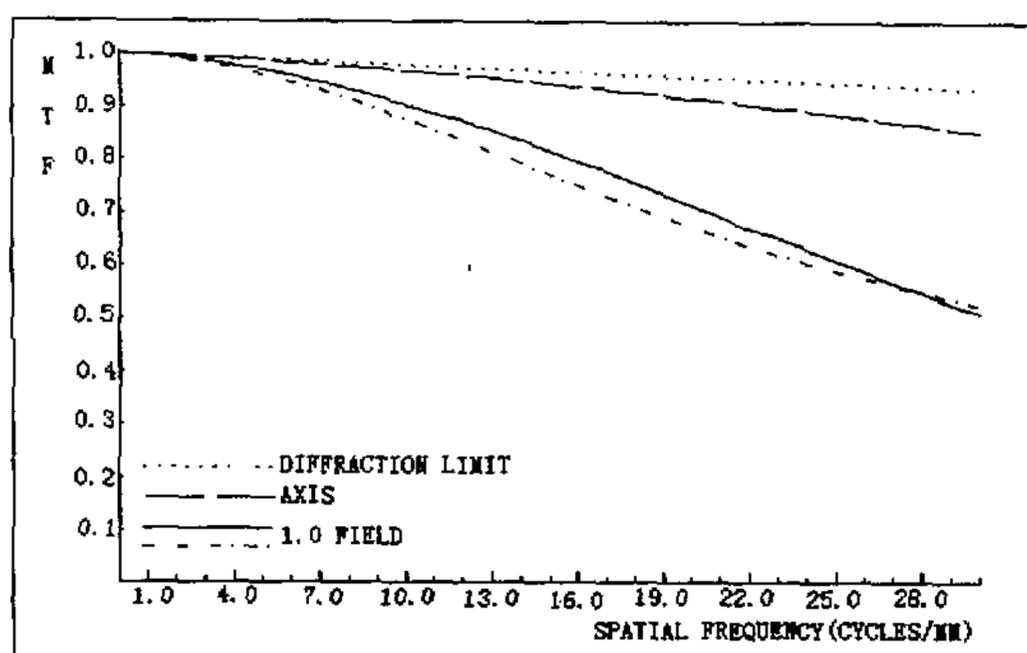
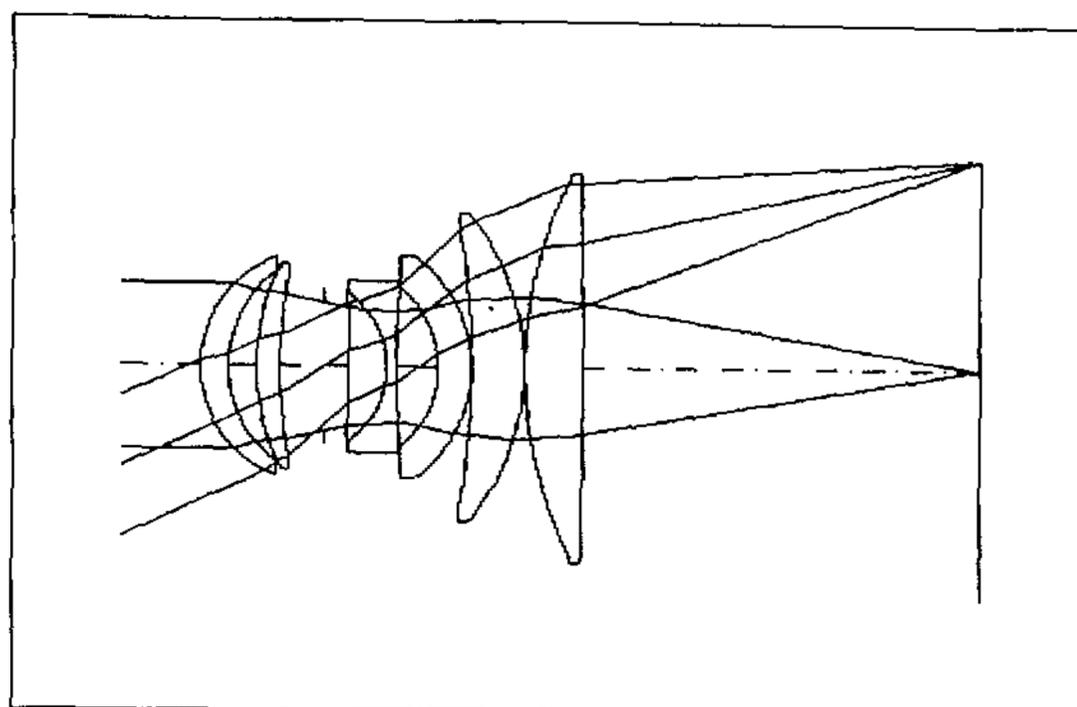




(a)



(b)



(c)

图 2-6 优化得到的不同片数的光学系统

表 2-3 初始化种群所对应的字符串和相应的适应函数值

No.	Strings	Fitness function value	Selected times
1	00000000	.000450	0
2	00010101	.010774	0
3	10011001	.002261	0
4	11100100	.952381	1
5	11110111	6.329114	6
6	00110000	.023930	0

7	10000011	.000017	0
8	01100101	.292997	0
9	01000011	.016805	0
10	10111110	2.283105	2
11	00010110	.038794	0
12	10001111	.066542	0
13	10010101	.648929	1
14	11001111	.369413	0
15	10010111	.176087	0
16	10000010	.010757	0
17	11100000	.432339	0
18	11111110	3.496503	3
19	10111001	.516796	1
20	11110111	6.329114	6

表 2-4 第一代种群所对应的字符串和相应的适度函数值

No.	Strings	Fitness function value	Selected times
1	11110101	1.420455	0
2	11110111	6.329114	2
3	11111111	2.320186	1
4	11110111	6.329114	2
5	11110111	6.329114	2
6	11100111	.140924	0
7	11110111	6.329114	2
8	11110111	6.329114	2
9	11110111	6.329114	2
10	11110111	6.329114	2
11	11110011	3.861004	1

12	11100111	.140924	0
13	11111110	3.496503	1
14	10111110	2.283105	0
15	11111110	3.496503	1
16	10111110	2.283105	0
17	10111110	2.283105	0
18	11100100	.952381	0
19	10010101	.648929	0
20	11110111	6.329114	2

2.5 小结

本章主要介绍了遗传算法的发展历史、遗传算法的应用和遗传算法的特点，叙述了遗传算法在光学系统优化过程中的基本原理和算法流程，介绍了遗传算法在光学设计过程中的数学建模，最后列举了实例说明了遗传算法在光学设计优化过程中的应用。

遗传算法将需要优化的光学结构编码成为二进制字符串组成一代，然后对当前代进行选择、杂交和突变来产生下一代，并重复进行直至筛选出最优结构。这种算法克服了以往优化算法不能实现光学面自动增减的缺点，提高了光学系统设计的智能化程度。实验证明遗传算法是一种有效的光学设计优化算法。但在遗传算法中，运算量比较大，杂交率和突变率不易控制，下一步的工作是设法解决这些问题，提高遗传算法的运行效率。

第三章 变焦距系统高斯光学参数的求解

3.1 变焦距系统概述

3.1.1 变焦距系统的发展概况

变焦距系统是一种焦距可以连续变化而像面保持稳定并且在变焦过程中像质保持良好的系统，由于它的焦距可以在一定范围内以不同的速度不间断地进行改变，因此它能在拍摄点不变的情况下，获得不同比例的像，从而产生强烈的真实感和艺术上的不同表现力。尤其在新闻采访、影片摄制和电视转播等方面，使用特别方便^{[23][63][64]}。

变焦距系统的使用，最早可以追溯到 1930 年左右，那时在电影放映镜头上有使用变焦距物镜的，当时的变焦距镜头主要采用光学补偿法变焦距系统，目的是为了避开凸轮加工精度和加工工艺落后引起的像面位移等缺陷，但是它的成像质量非常差，因此并没有得到广泛的应用。四十年代末五十年代初，出现了真正意义上的光学补偿法变焦距系统，由于它的机械加工工艺相对来说比较简单，所以曾经风靡一时。1940 年~1960 年，机械补偿法变焦距系统开始得到应用，这一时期变焦距系统的镜片数目比较少，变倍比比较小，成像质量也比较差，所以应用也不够广泛。1960 年以后，电子计算机在光学设计中得到了较多的应用，此时出现了高精度机床来加工凸轮曲线，光学补偿法变焦距系统就越来越少了，取而代之的是较高成像质量的机械补偿法变焦距系统。1960 年~1970 年这一时期的机械补偿法变焦距系统一般只有两个运动组元，不过所用的镜片数目比以往明显增加了，大大提高了镜头的成像质量。这个阶段变焦距系统的变倍比不高，但在电影电视中开始广泛使用。1970 年以后，除了计算机自动设计技术的普及，以及多层镀膜技术的开发和使用外，可以利用高精度数控技术来加工变焦距系统的复杂凸轮机构，同时还可以利用新型材料和非球面技术，不但大大改进了二运动组元变焦距系统，还大力开发了多运动组元变焦距系统，包括光学补偿和机械补偿相结合的变焦距系统。1980 年，小西六公司展出了 5 组同时移动的 EFL28-135/F4.0-6.0 高倍广角变焦距系统样品，1983 年正式出售，从而揭开了全动型高倍率变焦距系统的序幕。随着对高变倍比、高像质变焦距系统需求的不断增加，随着加工技术的进步和加工精度的提高，近年来国际上出现了对多组元全动型变焦距系统的研

究, 并且成为发展趋势。这种系统通过允许系统中各个组元在变焦过程中运动而充分发挥它们的变倍和像差补偿能力, 从而可以较好地实现系统的小型化^{[23][65]-[71]}。

3.1.2 变焦距系统的分类及其特点

变焦距系统在变焦过程中, 随着透镜组的移动, 其焦距改变, 一般说来像面是伴随着有位移的, 于是要求像面稳定时, 便需要加以补偿。根据变焦补偿方式的不同, 变焦距系统可分为光学补偿法变焦距系统和机械补偿法变焦距系统, 以及这两种类型基础上发展起来的其它一些类型的变焦距系统, 如光学机械补偿混合变焦距系统和机械补偿全动型变焦距系统等^{[23][64][67]}。光学补偿法变焦距系统各透镜组必须移动到某些特殊的位置, 才能得到稳定清晰的像面, 而且在高变倍比时, 像面漂移量较大, 因而在使用中受到了许多限制, 在现代变焦距系统中已经很少使用; 传统的机械补偿法变焦距系统通常由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组等几个透镜组构成, 其补偿量是对变焦方程进行精确求解而得到的, 能够保证像面稳定, 适用于各种变倍比^{[67][72]}。随着对高变倍比、高像质变焦距系统需求的不断增加, 近年来国际上的发展趋势为多组元全动型^[73], 这种类型的变焦距系统正是本课题的研究内容之一。下面, 将对各种不同类型的变焦距系统逐一作一下介绍。

(1) 光学补偿法变焦距系统

光学补偿法变焦距系统是在焦距变化的过程中, 使用几组透镜组作线性运动来实现系统的变焦, 各透镜组的移动同向等速。在各透镜组的移动过程中, 各个组元共同完成系统的变倍和补偿任务, 使像面达到稳定状态。但是在实际的变焦运动过程中, 光学补偿法变焦距系统只能在某些点做到像面稳定, 所以在整个变焦范围内, 系统的像面有一定的漂移。正是由于这个方面的原因, 纯粹的光学补偿法变焦距系统目前已经很少使用。图 3-1 是一个双组元连动光学补偿法变焦距系统。

光学补偿法变焦距系统的特点是^{[67][74]}: ①它只是要求一个线性的运动来实现系统的变焦功能, 避免了机械补偿法中曲线运动所需要的复杂凸轮结构; ②这类系统的组成次序是依次交替的固定组元和可动组元, 而且固

定组元和可动组元的光焦度反号，在系统内部没有实像；③如果不考虑后固定组，像面稳定的个数与组元个数正好相等。

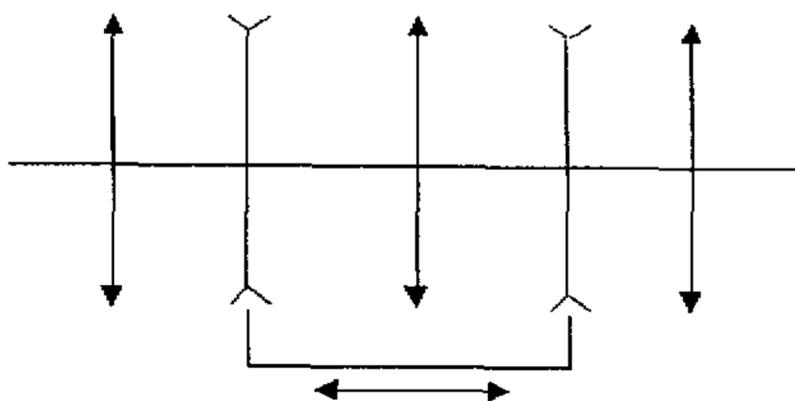


图 3-1 双组连动光学补偿法变焦距系统

(2)机械补偿法变焦距系统

传统的机械补偿法变焦距系统通常由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组等几个透镜组构成，它们的名称和作用分别是^{[63][64]}：

① 前固定组：它的作用是给系统提供一个固定的像，通常情况下它是固定不动的，但在近距离摄影时，也可以通过移动前固定组整体或者它的一部分来达到变焦的目的；

② 变倍组：在变焦距系统的运动过程中，变倍组通过凸轮的带来运动，其运动规律理论上可以是任何运动，但是为了凸轮曲线设计的方便，实际上通常作线性运动，担负着系统的变倍作用；

③ 补偿组：当变倍组在凸轮的带动下作线性或者是非线性运动时，为了实现系统的变焦和像面的稳定，补偿组通过一定的曲线轨迹运动来补偿变倍组在运动过程中所产生的像面位移，并且在运动过程中有时也对变倍做出贡献；

④ 后固定组：它的作用是将补偿组所成的像转化为系统的最后实像，调整系统的合成焦距值，设置孔径光阑，保证在变焦系统的运动过程中，整个系统的相对孔径不变，补偿前三组透镜产生的像差。

机械补偿法变焦距系统的变倍组一般是负透镜组，而补偿组可以是正透镜组也可以是负透镜组。若补偿组是正透镜组，则称为正组补偿变焦距系统，反之，则称为负组补偿变焦距系统，它们的结构示意图分别如图 3-2 和图 3-3 所示。

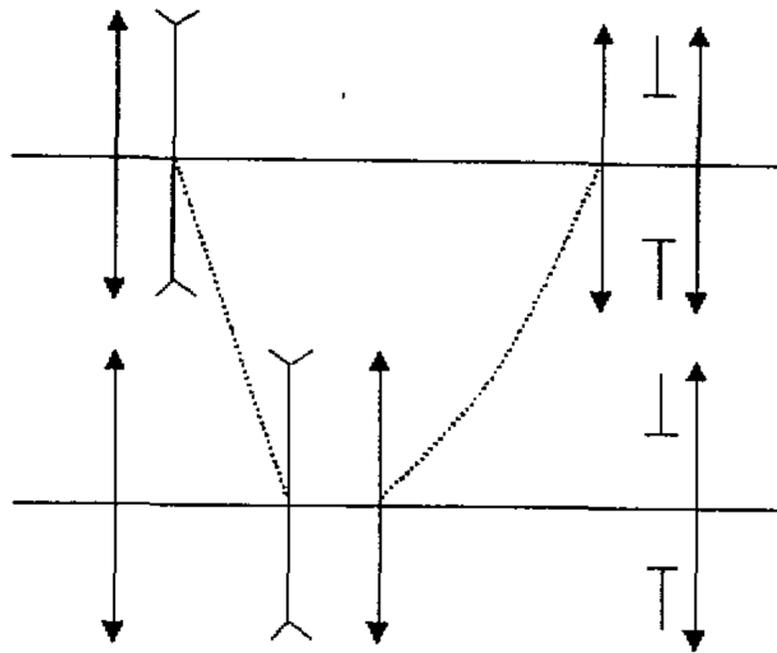


图 3-2 正组补偿变焦距系统

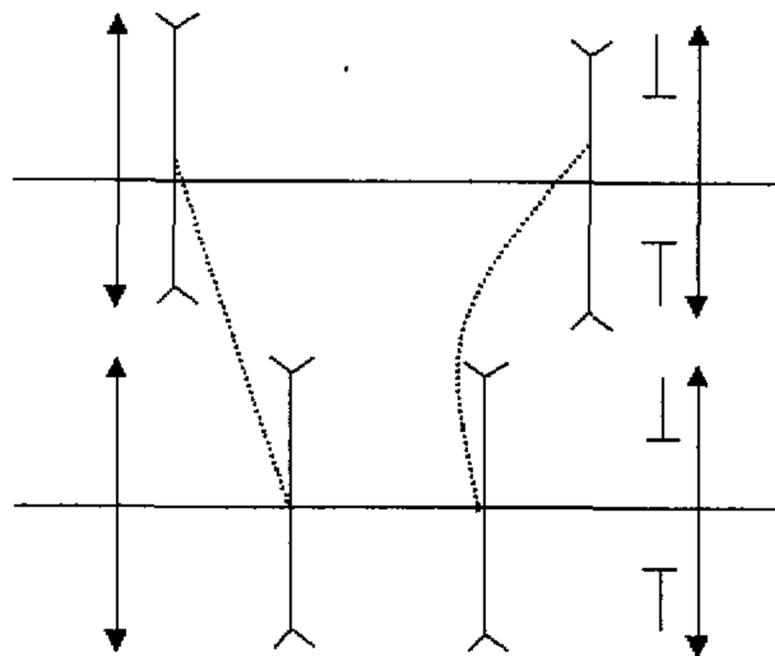


图 3-3 负组补偿变焦距系统

机械补偿法变焦距系统的变倍组与补偿组的合成共轭距，在变焦距过程中是一个常量，理论上像点是没有漂移的，而且各个组元分担的职责比较明显，整体结构看起来也比较简单。近年来，随着加工技术的发展和加工工艺的提高，机械补偿法变焦距系统的凸轮曲线加工已不象过去那么困难，加工精度也越来越高，所以得到了越来越广泛的应用。

(3) 光学机械补偿混合变焦距系统

这种类型的变焦距系统是在光学补偿法变焦距系统的基础上发展起来的，由于光学补偿法变焦距系统在变焦过程中存在着一些像面的位移，为了补偿这些像面位移，可使用其中的另外一组元作适当的非线性移动来加以补偿，这样的系统就是光学机械补偿混合变焦距系统，也称之为机械补

偿双组连动变焦距系统，其典型结构如图 3-4 所示。

光学机械补偿混合变焦距系统由几个透镜组连动来实现变倍的目的，另外有一组元作非线性运动来补偿像面的位移，使得像面严格的稳定；各个移动的透镜组分工不是非常明确，在有的情况下，由另一组元执行变倍的功能，而双组连动仅仅起到像面补偿的作用；它的光焦度分配比较均匀，对像差的校正比较有利；各个组元的光焦度交替出现正负，系统内部无实像^{[63][66][75]}。

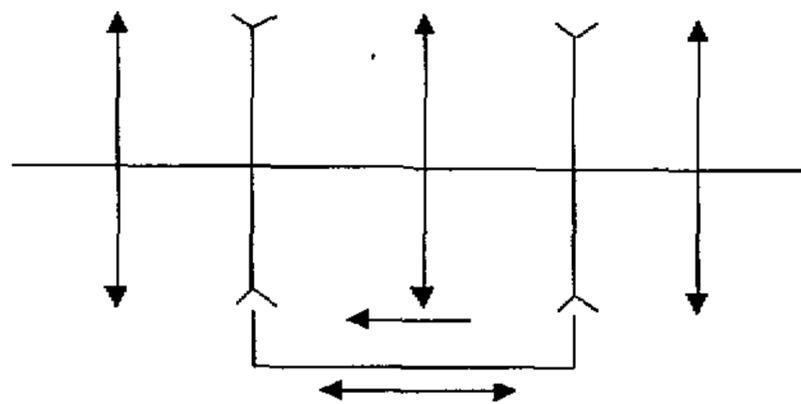


图 3-4 光学机械补偿混合变焦距系统

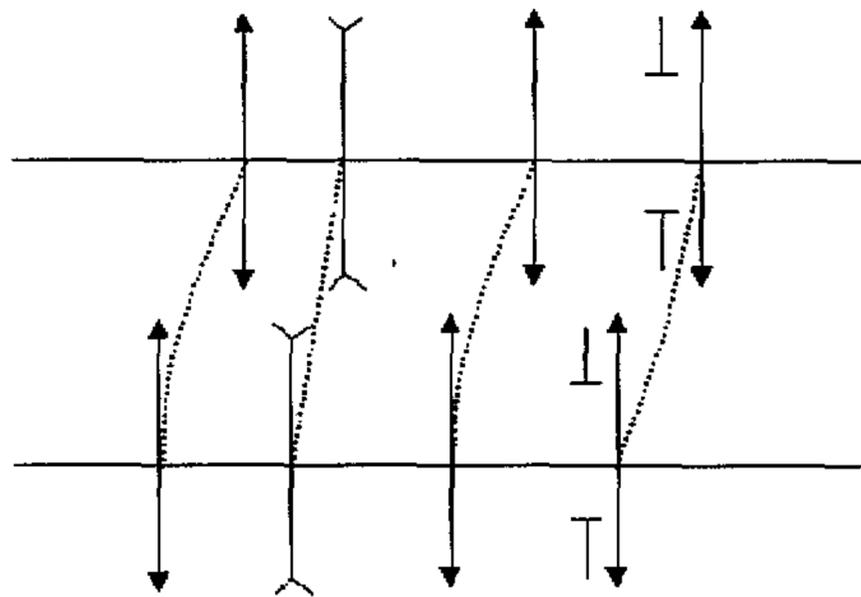


图 3-5 机械补偿全自动型变焦距系统

(4)全自动型变焦距系统

全自动型变焦距系统在变焦运动的过程中，各个组元均按照一定的曲线或者直线规律运动。如果按照其功能来划分的话，可以认为第一组元为补偿组，其它各个组元为变倍组。全自动型变焦距系统有以下一些特点^[67]：①它摆脱了系统内共轭距为常量的约束条件，使各个组元按照最有利的方式移动，以达到最佳的变焦效果；②第一组元用于调焦，其余的组元对变倍比均有贡献；③像差的校正必须全系统同时进行；④光阑一般放置在最后

一个组元之前；⑤由于担负变倍功能的组元比较多，可以选择四组或者五组的结构，所以各个组元倍率的变化可以比较小，各个组元的光焦度分配可以比较均匀；⑥它的镜筒设计要比以上几种类型的变焦距系统复杂，不过随着加工工艺和精度的提高，设计的困难性会降低。图 3-5 是一个典型的全动型变焦距系统的结构示意图。

在某些情况下，可以在全动型的基础上加一个后固定组元，使得全动型变焦距系在变焦过程中保持相对孔径不变，而且在校正像差的过程中，可以先使得前面若干组元的像差趋向于一致，然后再利用后固定组元产生的与前面若干组元符号相反的像差来进行整个系统的像差校正。

3.1.3 变焦距系统的性能指标以及相应的措施

从变焦距系统的发展趋势来看，一个光学性能较好的变焦距系统往往从下面几个方面提出要求^{[66][67][76]}：

(1)高成像质量。主要包括：在任意的焦距位置上都能够校正像差；最大焦距时的二级光谱色差要小；变焦时尽可能地消除像面的位移；分辨率要高；要能够消除杂光。

(2)高变倍比；大孔径；大视场。

(3)其它方面的要求。结构尽量简单、紧凑、轻巧，成本低廉；使用方便，操作简单；可换性要强；透光率高，彩色还原纯正。

针对上述变焦距系统的性能指标，可以采取以下相应的措施^{[65][66][75]}：

(1)为了达到高的成像质量，可以采取以下的措施：利用计算机提高设计水平；采用高精度数控机床加工凸轮曲线；采用多层增透膜；使用特殊材料，改善二级光谱色差；使用非球面镜；采用可变动光阑等。

(2)要提高变焦距系统的变倍比，除了上述提高成像质量的措施外，还可以采用以下的措施：采用多组变焦形式；采用新型光学玻璃材料和人造晶体；利用透镜的不同组合等。

(3)要提高系统的孔径，主要可以通过采用新型玻璃、人造晶体和非球面技术等措施来实现。

(4)要提高变焦距系统的视场，可以采取以下的措施：固定组复杂化，增加一些负透镜组；采用非球面技术等等。

以上的这些要求不可能全部同时达到，它们是相互制约的，因此在设

计过程中要注意这些性能指标的相互平衡折衷。同时在变焦距系统设计的初级阶段对系统进行选型和确定其高斯光学参数时应该注意以下几方面的问题^{[76][77]};

(1)在技术指标能够满足的前提下,尽量选择简单结构;

(2)在变焦距系统各个组元不相互碰撞的前提下,取较小间隔,以便缩短系统的长度;

当然以上只是说明了进行变焦距系统设计的一般情况,在实际设计过程中,还要具体情况具体分析,根据具体的问题来寻求最适合的设计解决方案。

3.2 变焦距系统高斯光学的一些定义和预备公式

在变焦距系统的设计中高斯光学参数的求解至关重要,直接影响最后的成像质量。在以往的研究中,利用高斯括号^{[78][79]}和连分数法^[80]已经给出了光学补偿法全补偿点分布与系统高斯光学参数之间的关系;对机械补偿法,变倍组和补偿组数目的多少直接影响参数求解的难易程度。过去的研究^{[81]-[91]}基本上是在已知变倍组变化规律的情况下,求解补偿组的移动规律。陶纯堪以组元的倍率为中间参数对几种简单的变焦距系统做了研究^[92];王琦等人^[72]提出了一种适用于多组元全动型变焦距系统高斯光学参数求解的方法,但在求解过程中,组元的焦距是作为已知量给出并且在优化过程中固定不变,同时在求解过程中没有考虑组元 F 数的取值问题,从而大大地限制了优化取值范围,而且可能出现某组元因 F 数过小而无法实现的情况。

求解变焦距系统高斯光学参数的过程,实际上就是在满足整个系统焦距按照一定规律变化和像面稳定的条件下求解各个组元的焦距、间隔以及各个组元的位移量等参数的过程。求解简单变焦距系统的高斯光学参数,可以选择系统中各个组元的垂轴放大率 β_i ($i=1,2,\dots,n$)作为自变量,因为使用垂轴放大率作为自变量可以表示出系统以及系统内部各个组元的其它参数,形式比较规则,从而便于分析。但是对于多组元全动型变焦距系统,采用上述方法,其方程非常复杂,不易求解。所以对于多组元变焦距系统,不再区分变倍组与补偿组的概念,在求解过程中统一将变焦距系统运动组元的移动距离和焦距作为变量,同时在求解过程中限制组元的 F 数

在一个合理的范围内变化，提出了一种能同时求解多组元全动型变焦距系统在每个变焦位置高斯光学参数的新型计算方法。在此节中将讨论求解变焦距系统高斯光学参数过程中的一些定义和预备公式。

(1) “变倍比”的概念

在变焦距系统中，变焦范围的两个极限焦距分别称为长焦距和短焦距，它们的比值称为“变倍比”或者是“变焦比”^{[63][64]}。其定义使用公式表示如下：

$$M = \frac{f_L}{f_S} \quad (3-1)$$

其中 M 表示系统的变倍比。下标 L 表示长焦状态， S 表示短焦状态。

(2) “物像交换原则”的概念

在上节变焦距系统的分类中曾经提到：在机械补偿变焦距系统中，如果补偿组是正透镜组，则称为正组补偿变焦距系统，反之称为负组补偿变焦距系统。无论是正组补偿还是负组补偿，都可以分为物像交换原则和非物像交换原则。

物像交换原则可以用图 3-6 来说明，如果变倍组的两个共轭点都是实点或者是虚点，则总可以找到透镜的两个不同位置，其共轭距（从物点到像点的距离）彼此相等，而垂轴放大率互为倒数。如果是负透镜组，以上的光学关系仍然成立，只不过物点、像点都是虚点。满足上述条件的物、像关系称为物像交换原则，反之称为非物像交换原则^{[23][63]}。在变焦距系统的设计中，物像交换原则的特点是补偿组在系统短焦和长焦时处于同一位置，所以它对总焦距的影响是一样的。

(3) 变焦距系统焦距的倍率表示

如图 3-7 所示，可以得到三个系统的合成焦距为：

$$f' = \frac{h_1}{u_3} = \frac{h_1}{u_1} \cdot \frac{u_1}{u_2} \cdot \frac{u_2}{u_3} = f_1' \beta_2 \beta_3 \quad (3-2)$$

设变焦距系统共有 n 个组元组成，组元的焦距分别为 f_1', f_2', \dots, f_n' 。 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 表示组元的垂轴放大率。那么系统的焦距可以写为：

$$f' = f_1' \beta_2 \beta_3 \dots \beta_n \quad (3-3)$$

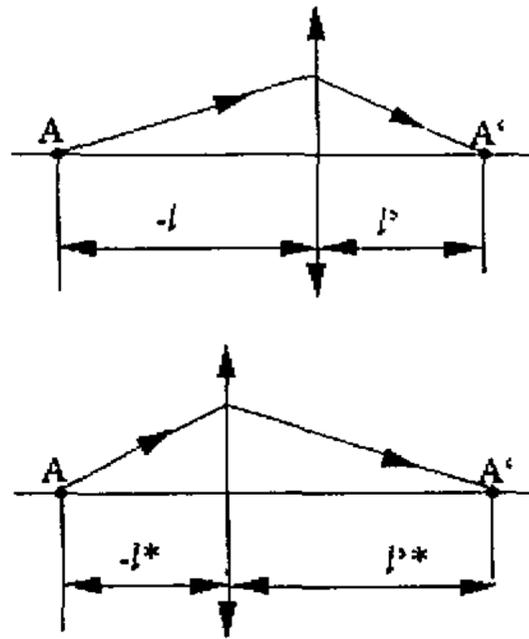


图 3-6 物像交换原则示意图

由上式可知，变焦距系统的合成焦距 f' 为前固定组焦距 f_1' 和其后各个组元垂轴放大率的乘积。 f' 的变化，就是 $\beta_2\beta_3\dots\beta_n$ 乘积的变化。所以系统的变倍比可以写为：

$$M = \frac{f_L'}{f_S'} = \frac{\beta_2^* \beta_3^* \dots \beta_n^*}{\beta_2 \beta_3 \dots \beta_n} = \frac{B}{\beta_2 \beta_3 \dots \beta_n} \quad (3-4)$$

式中 $\beta_2\beta_3\dots\beta_n$ 为初始状态时各个组元垂轴放大率的乘积。 $B = \beta_2^*\beta_3^*\dots\beta_n^*$ 为满足变倍比要求时各个组元在新位置的垂轴放大率的乘积。

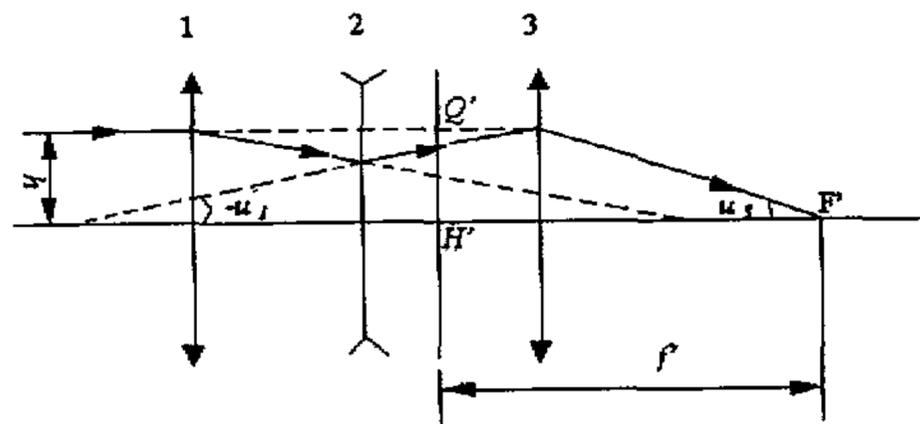


图 3-7 三透镜组合图

3.3 二组元机械补偿法变焦距系统高斯光学参数的求解

如前所述，变焦距系统高斯光学参数的求解在系统的设计中起着非常重要的作用，因此必须建立合适的变焦方程，来求解变焦距系统的高斯光学参数。在给定初始结构参数的基础上为了保证变焦方程有解，需要首先对变焦系统的运动过程分析一下。以往的研究中，采用了高斯括号和连分

数法进行分析，但是这些方法非常繁杂，不直观。在此处我们采用数学解析的方法来进行分析。

3.3.1 高斯光学

以变倍组和补偿组这两个组元同时运动实现变焦的系统是机械补偿法变焦距系统中通常采用的方法。它的高斯光学问题就是如何确定前固定组、变倍组和补偿组的焦距 f_1, f_2, f_3 以及它们的初始状态（包括变焦的位置，以及组元之间的初始间隔），如何保证整个系统变焦过程的实现等等，如图 3-8 所示。

首先来分析一下变焦运动过程。系统由变倍组和补偿组的移动（即改变它们之间的空气间隔）来实现焦距的连续变化和像面稳定。如图 3-9 所示，(a)是正组补偿变焦距系统，(b)是负组补偿变焦距系统。图 3-9 中点 A 表示变倍组的物点， A' 表示物点 A 经变倍组和补偿组后的像点。

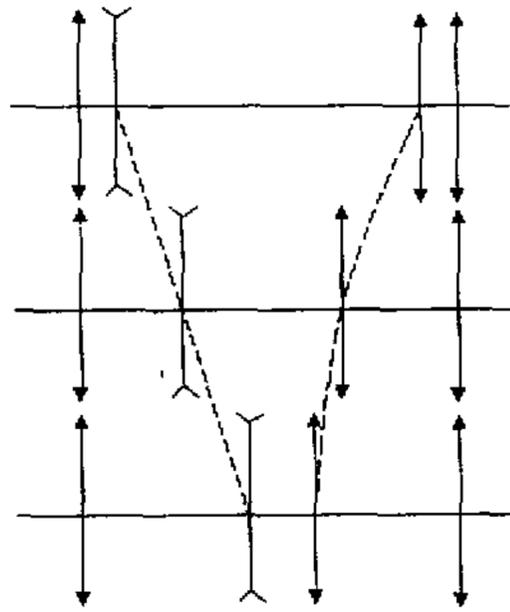


图 3-8 变焦过程示意图

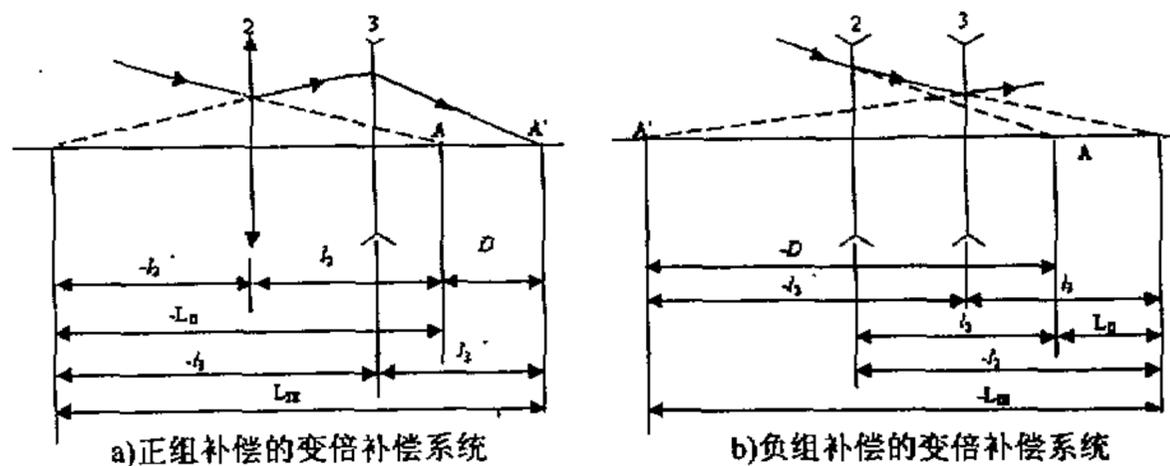


图 3-9 变倍补偿系统

为了实现变焦的目的，变倍组 2 需要沿着光轴作移动（此处假设作线

性移动), 设其垂轴放大率由 β_2 变化为 β_2^* , 此时像点 A' 移动了, 为了保证像点 A' 不动的要求, 补偿组 3 需要作相应的沿轴运动, 从而使得补偿组的垂轴放大率由 β_3 变化为 β_3^* 。由公式(3-4)可知系统的变倍比为:

$$M = \frac{\beta_2^* \beta_3^*}{\beta_2 \beta_3} = \frac{B}{\beta_2 \beta_3} \quad (3-5)$$

为了满足像点位置不变, 则需要图 3-9 中的物像共轭距 D 保持为常量。

由图 3-9 可知:

$$D = L_{III} + L_{II} = l_3' - l_3 + l_2' - l_2 \quad (3-6)$$

由几何光学可得:

$$l = f' \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3-7)$$

$$l' = f' (1 - \beta)$$

将(3-7)式代入(3-6)经整理可得变焦前的物像共轭距为:

$$D = f_2' \left(\beta_2 + 2 - \frac{1}{\beta_2} \right) + f_3' \left(\beta_3 + 2 - \frac{1}{\beta_3} \right) \quad (3-8)$$

同理可得变焦后的物像共轭距为:

$$D = f_2' \left(\beta_2^* + 2 - \frac{1}{\beta_2^*} \right) + f_3' \left(\beta_3^* + 2 - \frac{1}{\beta_3^*} \right) \quad (3-9)$$

利用式(3-5)和式(3-9)可以求得变倍组移动到新位置的垂轴放大率:

$$\beta_2^* = \frac{-[D - 2(f_2' + f_3')] \pm \{[D - 2(f_2' + f_3')]^2 - 4(f_2' + \frac{f_3'}{B})(f_2' + f_3'B)\}^{1/2}}{2(f_2' + \frac{f_3'}{B})} \quad (3-10)$$

其中的 D 是变焦前系统的物像共轭距。

(3-8)式与(3-9)式相减可得保持系统像面稳定应该满足的方程式:

$$f_3' \left(\frac{1}{\beta_3^*} + \beta_3^* - \frac{1}{\beta_3} - \beta_3 \right) + f_2' \left(\frac{1}{\beta_2^*} + \beta_2^* - \frac{1}{\beta_2} - \beta_2 \right) = 0 \quad (3-11)$$

式(3-11)表示了为实现变焦过程中 β_2^* 和 β_3^* 之间的制约关系, 将上式改写为如下的形式:

$$\beta_3^{*2} - b\beta_3^* + 1 = 0 \quad (3-12)$$

$$\text{其中 } b = -\frac{f_2'}{f_3'} \left(\frac{1}{\beta_2^*} + \beta_2^* - \beta_2 - \frac{1}{\beta_2} \right)$$

解之得：

$$\beta_3^* = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (3-13)$$

其根号前正负号的确定如下：初始状态时，令 $\beta_3 = \beta_3^*$ ；在变焦过程中，根号前正负号随着 b 的正负号的改变而改变。

由式(3-13)可以看到， β_3^* 的两个根互为倒数，因此对应着一个 β_2^* ，必然同时存在着两个 β_3^* ，都可以实现像面的稳定。

可以把变焦过程理解为一个连续的微分过程。设在变焦过程中，变倍组和补偿组偏离初始状态的位移量分别为 x ， y 。其符号规定如下：组元自左向右运动，则位移量为正，反之为负。对(3-7)式求导可得：

$$\begin{aligned} dl &= f' d\left(\frac{1}{\beta}\right) \\ dl' &= -f' d\beta \end{aligned} \quad (3-14)$$

因此，变倍组偏离初始状态的位移量可由下式求得：

$$x = -dl_2 = -f_2' \left(\frac{1}{\beta_2^*} - \beta_2 \right) = f_2' \left(\beta_2 - \frac{1}{\beta_2^*} \right) \quad (3-15)$$

同理可以得到补偿组相对于初始位置的位移量为：

$$y = -dl_3 = f_3' (\beta_3^* - \beta_3) \quad (3-16)$$

式中的 β_2 和 β_3 可由三个焦距 f_1' 、 f_2' 和 f_3' 以及组元之间初始状态的间隔 d_{s12} 和 d_{s23} 来确定，由高斯光学物像公式可得：

$$\beta_2 = \frac{f_2'}{f_2' + l_2} = \frac{f_2'}{f_2' + f_1' - d_{s12}} \quad (3-17)$$

$$\beta_3 = \frac{f_3'}{f_3' + l_3} = \frac{f_3'}{f_3' + f_2' (1 - \beta_2) - d_{s23}} \quad (3-18)$$

当变倍组移动距离 x 时，补偿组的相应移动距离为 y 。移动过程中除了满足变倍比 M 的要求外，还应该满足组元不相互碰撞的要求。即：

$$d_{s23}^* = d_{s23} - x + y > 0 \quad (3-19)$$

由以上推导可知，根据不同的变倍比要求，在满足系统像面位置稳定的情况下，可以求得变倍组和补偿组的移动规律。现将求解过程总结如下：

(1) 在焦距变化范围内，设定若干个变焦位置。

(2)求得变倍组的初始放大倍率。 $\beta_2 = \frac{f_2'}{f_2' + f_1' - d_{s12}}$

(3)求得补偿组的初始放大倍率。 $\beta_3 = \frac{f_3'}{f_3' + f_2'(1 - \beta_2) - d_{s23}}$

(4)求某个变焦位置与它前一个变焦位置的焦距之比。 $M = \frac{f'}{f_s}$

(5)求得此变焦位置系统总焦距为 f' 时变倍组的倍率。

$$\beta_2^* = \frac{-[D - 2(f_2' + f_3')] \pm \{[D - 2(f_2' + f_3')]^2 - 4(f_2' + \frac{f_3'}{B})(f_2' + f_3'B)\}^{1/2}}{2(f_2' + \frac{f_3'}{B})}$$

其中: $B = M\beta_2\beta_3$ $D = 2(f_2' + f_3') - f_2'(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2) - f_3'(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3)$

(6)求得补偿组的倍率。 $\beta_3^* = \frac{B}{\beta_2^*}$

(7)求得变倍组的位移。 $x = f_2'(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_2^*})$

(8)求得补偿组的位移。 $y = f_3'(\beta_3^* - \beta_3)$

(9)求得前固定组与变倍组之间的间隔。 $d_{s12}^* = d_{s12} + x$

(10)求得变倍组与补偿组之间的间隔。 $d_{s23}^* = d_{s23} - x + y$ 。

重复以上步骤, 就可以计算出各个焦距位置变倍组与补偿组的移动距离和组元之间的间隔, 从而设计出凸轮曲线。

3.3.2 设计实例

已知 $f_1' = 86.53996$; $f_2' = -21.66924$; $f_3' = 25.89964$; $d_{s12} = 6.48439$; $d_{s23} = 61.01071$ 。系统的五个变焦距位置为 12.53139; 25.4; 32.96; 50.21; 74.9。通过软件计算可以得出变倍组和补偿组在不同焦距位置时的移动距离 x , y (如表 3-1 所示)。

3.3.3 程序实现

程序的运行效果如图 3-10 所示。

输入的参数包括：

组元的初始间隔 d_{s12} , d_{s23} ;

组元的焦距 f_1, f_2, f_3 ;

系统的变倍比和计算组元移动距离的焦距位置。

输出参数包括：

系统在每个焦距位置的变倍比；

变倍组与补偿组在每个焦距位置的垂轴放大率；

变倍组与补偿组在每个焦距位置相对于初始位置移动的距离；

组元在每个焦距位置的间隔；

每个焦距位置对应的系统焦距。

表 3-1 二组元机械补偿法变焦距系统的计算结果 (单位: mm)

F/mm	12.53139	25.4	32.96	50.21	74.9
x/mm	0	18.00804	23.18114	30.266039	36.377289
y/mm	0	-4.157437	-6.063227	-9.621063	-12.966776
d_{12}/mm	6.48439	24.492435	29.665535	36.750434	42.861684
d_{23}/mm	61.01071	38.845234	31.766342	21.123607	11.666646

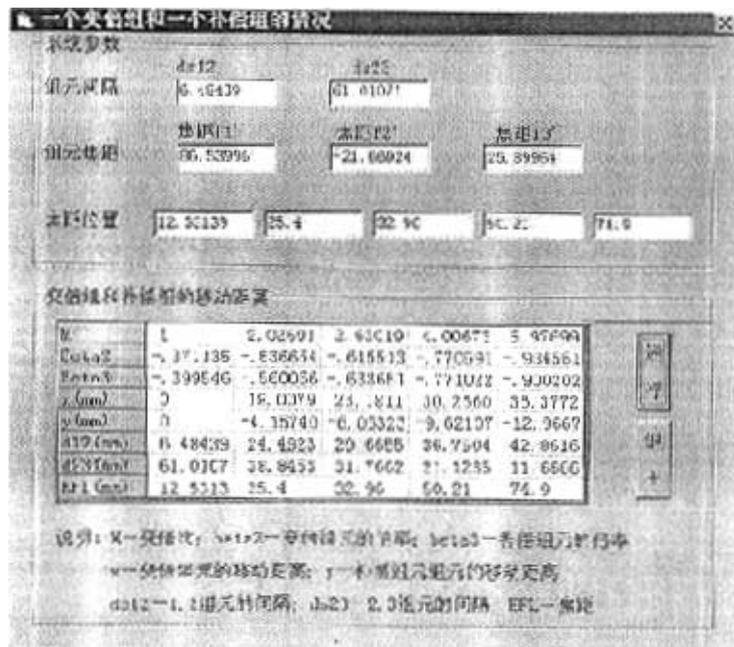


图 3-10 二组元机械补偿法变焦距系统的程序实现图

3.4 双组连动变焦距系统高斯光学参数的求解

3.4.1 高斯光学参数的求解公式

由本章第一节的介绍可知，双组连动变焦距系统基于光学补偿的原理，从典型的光学补偿系统演变而来的。它一般是两个组元采取连动的方式（习惯上称之为变倍组），即两个变倍组元的运动同向等速，另一运动组元作相应的运动来达到连续变倍过程中的像面稳定。图 3-11 是一个常见的双组连动变焦距系统。其实这种系统也是机械补偿变焦距系统的一种，它与上一节讨论的二组元变焦距系统的特性非常相似。所以这里直接给出了双组连动变焦距系统高斯光学参数的求解公式。

(1) 由变焦距系统近轴微分方程^[92]可得：

$$f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 \right) + f_3' \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 \right) + f_4' \left(\frac{1}{\beta_4} + \beta_4 \right) + \Delta = 0 \quad (3-20)$$

$$\text{其中： } \Delta = -f_2' \left(\frac{1}{\beta_{2s}} + \beta_{2s} \right) - f_3' \left(\frac{1}{\beta_{3s}} + \beta_{3s} \right) - f_4' \left(\frac{1}{\beta_{4s}} + \beta_{4s} \right)$$

(2) 由两个变倍组移动距离相同可得：

$$f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_{2s}} \right) = f_4' (\beta_{4s} - \beta_4) \quad (3-21)$$

(3) 由变倍比的公式 $M = \frac{\beta_2 \beta_3 \beta_4}{\beta_{2s} \beta_{3s} \beta_{4s}}$ ，可得补偿组的放大倍率：

$$\beta_3 = \frac{BM}{\beta_2 \beta_4}, \text{ 其中 } B = \beta_{2s} \beta_{3s} \beta_{4s} \quad (3-22)$$

(3-22)式代入(3-20)式化简得：

$$f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 \right) + f_3' \left(\frac{\beta_2 \beta_4}{BM} + \frac{BM}{\beta_2 \beta_4} \right) + f_4' \left(\frac{1}{\beta_4} + \beta_4 \right) + \Delta = 0 \quad (3-23)$$

$$(4) \text{ 由公式(3-20)得： } \frac{1}{\beta_4} = \frac{f_4' \beta_2}{-f_2' + \Delta_1 f_4' \beta_2}, \quad \Delta_1 = \beta_{4s} + \frac{f_2'}{f_4' \beta_{2s}} \quad (3-24)$$

(5) (3-24)式代入(3-23)式化简得：

$$\beta_2^2 + \frac{-f_2' \Delta_2 + f_4'^2 + \Delta_1 \Delta_2 f_4'}{\Delta_1 \Delta_2 f_4'} \beta_2 + \frac{f_3' f_4' BM - f_2' \Delta_3}{\Delta_1 \Delta_2 f_4'} = 0 \quad (3-25)$$

$$\text{其中， } \Delta_2 = f_2' + \frac{f_3' \beta_{4s}}{BM} + \frac{f_2' f_3'}{f_4' \beta_{2s} BM}; \quad \Delta_3 = -\frac{f_2' f_3'}{f_4' BM} + f_4' \Delta_1 + \Delta$$

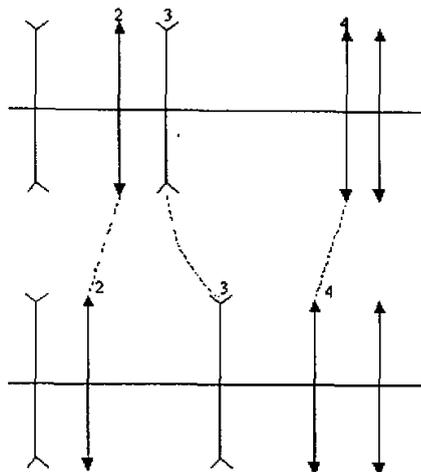


图 3-11 双组连动变焦距系统

(6)由(3-25)式可求得 β_2 ，由(3-22)式可求得 β_3 。

(7)由以下的公式可求得变倍组与补偿组的移动距离 x ， y 。

$$x = (\beta_4 - \beta_{4s})f_4' \quad (3-26)$$

$$y = \left(\frac{1}{\beta_{2s}} - \frac{1}{\beta_2} + \beta_{2s} - \beta_2\right)f_2' + \left(\frac{1}{\beta_{3s}} - \beta_3\right)f_3' \quad (3-27)$$

(8)由以下的公式求得各个组元间的间隔：

$$d_{12} = d_{12s} + x; \quad d_{23} = d_{23s} - x + y; \quad d_{34} = d_{34s} - y + x; \quad d_{45} = d_{45s} - x \quad (3-28)$$

重复以上计算步骤，可以得出对应于系统各个焦距时，变倍组与补偿组的移动距离以及组元之间的间隔。

3.4.2 设计实例

已知各个组元的焦距为 $f_1' = -71.716$ ； $f_2' = 66.267$ ； $f_3' = 49.092$ ； $f_4' = 49.092$ 。组元间隔为 $d_{s12} = 64.9891$ ； $d_{s23} = 29.6482$ ； $d_{s34} = 72.8791$ ； $d_{s45} = 119.4124$ 。系统的五个变焦位置为 20.6；41.2；61.8；80.4 和 96.82。使用编制的软件，可以计算出变倍组与补偿组在不同焦距位置的移动距离和组元间隔（如表 3-2 所示）。

3.4.3 程序实现

程序的运行效果如图 3-12 所示。

输入的参数包括:

组元的初始间隔 d_{s12} , d_{s23} , d_{s34} , d_{s45} ;

组元的焦距 f_1, f_2, f_3, f_4 ;

系统的变倍比和计算组元移动距离的焦距位置。

输出参数包括:

系统在每个焦距位置的变倍比;

变倍组与补偿组在每个焦距位置的垂轴放大率;

变倍组与补偿组在每个焦距位置相对于初始位置移动的距离;

组元在每个焦距位置的间隔。

表 3-2 双组连动变焦距系统的计算结果 (单位: mm)

F/mm	20.6	41.2	61.8	80.4	96.82
x/mm	0	18.00804	23.18114	30.266039	36.377289
y/mm	0	-4.157437	-6.063227	-9.621063	-12.966776
d_{12}/mm	64.9891	56.3793	50.9232	46.8897	44.6184
d_{23}/mm	29.6482	53.4583	66.3505	75.3990	80.5211
d_{34}/mm	72.8794	49.0689	36.1761	27.1281	22.0061
d_{45}/mm	119.412	128.022	133.478	137.511	139.783



图 3-12 双组连动变焦距系统的程序实现图

3.5 多组元全动型变焦距系统高斯光学参数的求解

3.5.1 多组元全动型变焦距系统高斯光学

在本章第二节曾经提到过：求解简单变焦距系统的高斯光学参数，可以选择系统各个组元的垂轴放大率 $\beta_i (i=1, 2, \dots, n)$ 作为自变量，因为使用 β_i 形式比较规则，便于分析。但是对于多组元全动型变焦距系统，采用上述的方法，其方程非常复杂，不易求解。所以对于多组元全动型变焦距系统，采用直接将系统组元的移动距离和(或)组元焦距作为变量进行优化的新方法来分析。下面将分析全动型变焦距系统在变焦过程中应该满足的一些条件和高斯光学参数的求解方法。

设变焦距系统有 n 个运动组元，系统焦距变化范围为 $f'_{\min} < f'_s < f'_{\max}$ 。将区间 $[f'_{\min}, f'_{\max}]$ 均匀地分为 m 等份，即系统在每个变焦位置的焦距为 $f'_s = f'_{\min} + k(f'_{\max} - f'_{\min})/(m-1)$ ， $k=0, 1, 2, \dots, m-1$ 。设 n 个运动组元的焦距分别为 f'_1, f'_2, \dots, f'_n ，每个运动组元在每个焦距位置相对于组元初始位置的移动距离为 $x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ ，其符号规定如下：若组元相对于初始优化结构位置自左向右运动，则 x_{ij} 的符号为正；反之为负。为了实现变焦，运动组元的运动曲线和组元的焦距应该满足以下的条件：

(1)系统的焦距按照指定的规律变化（一般为线性），即：

$$f'_s(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{nm}; f'_1, f'_2, \dots, f'_n) = f'_{\min} + k(f'_{\max} - f'_{\min})/(m-1) \quad (3-29)$$

其中 $k=0, 1, 2, \dots, m-1$ 。

(2)为避免组元的碰撞，同时易于结构设计，对组元的空气间隔 d_j 进行了控制，即：

$$d_j(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{nm}) > d_j, \quad d_j > 0 \quad (3-30)$$

其中， d_j 是空气间隔的最小值，是由组元的 F 数和焦距来确定的： F 数越大，组元的实际透镜组成型式越复杂，则此时的 d_j 需要大一些，以保证设计实际透镜时组元之间不会碰撞；反之，则 d_j 小一些。式(3-30)包含了对系统后截距的要求：在多组元全动型变焦距系统中，所有组元均作为运动组元，随着最后一个组元的运动，后截距也是变化的，在优化中通过控制最后一个组元到像面的距离来满足系统对后截距长度范围的要求，而像面的稳定性则需要通过控制凸轮的加工精度来保证。

(3)为了凸轮曲线设计的方便, 每条曲线应尽量平直, 可以用以下的条件实现:

$$-\delta \leq \mu_{ij} = x_{ij}''(f_{sj}') / [1 + x_{ij}'^2(f_{sj}')]^{3/2} \leq \delta \quad (3-31)$$

其中 δ 是一个指定的很小的正数, $x_{ij}'(f_{sj}')$ 和 $x_{ij}''(f_{sj}')$ 分别为 $x_{ij}(f_{sj}')$ 的一阶和二阶导数, $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$ 。为了保证能够找到满足上述要求的解, 我们将(3-31)式重新表述为让所有位移曲线的曲率平方之和最小:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_{ij}^2 = \text{Min} \quad (3-32)$$

这样上述问题就转化为求式(3-32)在式(3-29)和式(3-30)限制下的最小值问题, 可以用下面所述的序列二次规划(SQP)算法进行求解。

3.5.2 计算方法

将系统焦距变化区间 $[f_{\min}', f_{\max}']$ 均匀地分成 m 等份, 则焦距的变化步长为 $\Delta f_s' = (f_{\max}' - f_{\min}') / (m-1)$ 。当步长增量 $\Delta f_s'$ 很小时, (3-31)式曲率表达式中的微商可以用差商来代替。所以,

$$x_{ij}'(f_{sj}') = (x_{ij} - x_{i(j-1)}) / \Delta f_s'; \quad x_{ij}''(f_{sj}') = (x_{ij}' - x_{i(j-1)}') / \Delta f_s' = (x_{ij} - x_{i(j-2)}) / \Delta f_s'^2 \quad (3-33)$$

代入(3-31)式, 化简得:

$$\mu_{ij} = x_{ij}''(f_{sj}') / [1 + x_{ij}'^2(f_{sj}')]^{3/2} = \frac{x_{ij} - x_{i(j-2)}}{\Delta f_s'^2} / [1 + (\frac{x_{ij} - x_{i(j-1)}}{\Delta f_s'})^2]^{3/2} \quad (3-34)$$

将 μ_{ij} 的表达式代入(3-32)式, 化简可得:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_{ij}^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=3}^m (\frac{x_{ij} - x_{i(j-2)}}{\Delta f_s'^2})^2 / [1 + (\frac{x_{ij} - x_{i(j-1)}}{\Delta f_s'})^2]^3 = \text{Min} \quad (3-35)$$

利用序列二次规划算法可以得出(3-35)式在(3-29)式和(3-30)式约束下的非线性最小二乘问题。在以下叙述中, X 定义为 $X = (x_{ij})_{n \times (m+1)}$, 其中

$x_{i(m+1)}$ ($i=1,2,\dots,n$)是 f_1', f_2', \dots, f_n' ; Hesse 矩阵的定义为 $B = (\frac{\nabla^2 E(X)}{\partial x_i \partial x_j})_{p \times p}$, 其中 p

是变量 X 的维数, 即 $p = n \times (m+1)$; $F(X)=0$ 代表(3-29)式中的等式约束;

$F(X)=0$ 和 $d(X)=0$ 分别代表(3-29)式与(3-30)式中的等式约束; Lagrange 函

数的定义为 $L(X, \lambda, \gamma) = E(X) - \sum_{i=1}^m \lambda_i F(X) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} d_{ij}(x_{ij})$ 。序列二次规划算法

1931 1953 的步骤表述如下:

(1) 给出初始的点 $X^0 \in R^{n \times (m+1)}$, 初始的 Hesse 正定矩阵 $B_0 \in R^{m \times m}$, 终止迭代的控制常数 $\varepsilon > 0$, 其中的 $R^{n \times (m+1)}$ 表示 $n \times (m+1)$ 维实数空间。令 $k=0$;

(2) 求解二次规划

$$z^T \nabla E(X^k) + \frac{1}{2} z^T B_k z = \text{Min}$$

$$\begin{aligned} \text{满足条件} \quad & F(X^k) + \frac{\partial F(X^k)}{\partial X} z = 0 \\ & d(X^k) + \frac{\partial d(X^k)}{\partial X} z > 0 \end{aligned} \quad (3-36)$$

所得的解以及相应的 Lagrange 乘子依次记为 z^{k+1} , λ^{k+1} 和 γ^{k+1} , 其中 $z^{k+1} = (X^* - X^k)$, X^* 表示方程的解, z^T 是矩阵 z 的转置;

(3) 若 $\|z^{k+1}\| < \varepsilon$, 就令 $X^* = X^k$, 并终止迭代;

(4) 构造辅助函数

$$\phi_k(X) = E(X) + r_k \sum_{i=1}^m |F(X)| + r_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\text{Min}(0, d_{ij})| \quad (3-37)$$

$$\text{其中 } r_k \text{ 的选取应使得 } r_k \geq \sum_{i=1}^m |\lambda_i^{k+1}| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\gamma_{ij}^{k+1}|$$

确定 α_{k+1} , 使得 $0 < \alpha_{k+1} < 1, \phi_k(X^k + \alpha_{k+1} z^{k+1}) < \phi_k(X^k)$ 。

(5) 令 $X^{k+1} = X^k + \alpha_{k+1} z^{k+1}$, $k=k+1$ 。

(6) 令 $\bar{r}_k = \nabla_X L(X^k, \lambda^k, \gamma^k) - \nabla_X L(X^{k-1}, \lambda^{k-1}, \gamma^{k-1})$

更新 Hesse 矩阵为: $B_k = B_{k-1} + \frac{\bar{r}_k (\bar{r}_k)^T}{(\bar{r}_k)^T m^k} - \frac{B_{k-1} m^k (B_{k-1} m^k)^T}{(m^k)^T B_{k-1} m^k}$, 返回步骤(2)。

得到每个运动组元的离散点移动量 $x_{11}(f_s'), x_{12}(f_s'), \dots, x_{nm}(f_s')$ 后, 可以求出运动组元之间的间隔 $d_{11}(f_s'), d_{12}(f_s'), \dots, d_{nm}(f_s')$ 。利用自由边界条件的三次样条插值法就可以给出运动组元在不同焦距位置的移动距离曲线。

3.5.3 设计实例

焦距为 28-109mm 的单反照相机变焦距镜头。共有四个运动组元, 即 $n=4$, 所对应的光学结构示意图如图 3-13 所示。组元的初始焦距分别为 f_i

$=75.16700\text{mm}$; $f_2'=-15.42200\text{mm}$; $f_3'=41.16120\text{mm}$; $f_4'=53.00770\text{mm}$ 。组元之间的初始间隔取为 $d_{1,2}=7.7477\text{mm}$; $d_{2,3}=16.58259\text{mm}$; $d_{3,4}=26.40744\text{mm}$; $d_{4,5}=25.65977\text{mm}$ 。初始结构对应的系统焦距为 $f_s'=35.15305\text{mm}$ 。将系统焦距变化区间划分为 10 等份, 即 $m=10$, 所以 $\Delta f_s'=9\text{mm}$ 。将运动组元相对于初始位置的移动距离和组元的焦距作为变量, 采用上述序列二次规划算法对系统进行优化, 为了保证运动组元运动曲线的单调性, 在优化过程中对其导数进行了控制。得到运动组元的移动距离后, 可以使用以下的公式求得组元间的间隔:

$$\begin{aligned} d_{12}(j) &= -x(1, j) + d_{s12} + x(2, j); d_{23}(j) = -x(2, j) + d_{s23} + x(3, j) \\ d_{34}(j) &= -x(3, j) + d_{s34} + x(4, j); d_{45}(j) = -x(4, j) + d_{s45} \end{aligned} \quad (3-38)$$

其中 $j=1, 2, \dots, m$ 。

最后得到不限制 F 数和限制 F 数情况下的组元间隔和组元焦距结果如表 3-3~表 3-6 所示。在变焦过程中各个运动组元相对于初始位置的移动距离曲线如图 3-14 和图 3-15 所示。

从优化结果可以看出: 在限制了 F 数变化范围的情况下, 优化所得的各组元焦距更趋向于合理, 更适用于实际的设计制造工艺过程, 各组元的移动距离曲线更加平滑。

表 3-3 优化所得无 F 数限制时的组元间隔

f_s'/mm	d_{12}/mm	d_{23}/mm	d_{34}/mm	d_{45}/mm
28.0000	12.2028	21.1194	27.6869	51.9730
37.0000	15.7263	17.5959	24.7593	54.9006
46.0000	18.2792	15.0430	22.8110	56.8490
55.0000	20.3708	12.9515	21.7996	57.8603
64.0000	22.2451	11.0332	21.7996	57.8603
73.0000	23.6573	9.1149	21.7996	57.8603
82.0000	24.7595	7.1966	21.7996	57.8603
91.0000	25.6436	5.2783	21.7996	57.8603
100.0000	25.6436	4.0677	18.8349	60.8250
109.0000	25.6436	3.2235	16.0326	63.6274

表 3-4 优化所得无 F 数限制时每个组元的焦距

No. of lens group i	1	2	3	4
Focal length of lens group f_i' (mm)	46.1993	-12.5000	60.5009	38.8471

表 3-5 优化所得有 F 数限制时的组元间隔

f_i'/mm	d_{12}/mm	d_{23}/mm	d_{34}/mm	d_{45}/mm
28.0000	10.7782	20.7177	28.0887	51.9730
37.0000	16.0453	15.4505	25.2529	54.8088
46.0000	19.7832	11.7126	23.0322	57.0295
55.0000	22.7439	8.7520	21.3799	58.6818
64.0000	25.3610	6.1348	20.4033	59.6584
73.0000	27.9768	3.4837	20.4033	59.6584
82.0000	27.9768	2.0918	17.0120	63.0497
91.0000	27.9768	1.3393	13.7445	66.3172
100.0000	27.9768	1.0198	10.5880	69.4737
109.0000	27.9768	1.0000	7.5319	72.5298

表 3-6 优化所得有 F 数限制时每个组元的焦距

No. of lens group i	1	2	3	4
Focal length of lens group f_i' (mm)	66.5781	-20.0000	133.2330	35.6076

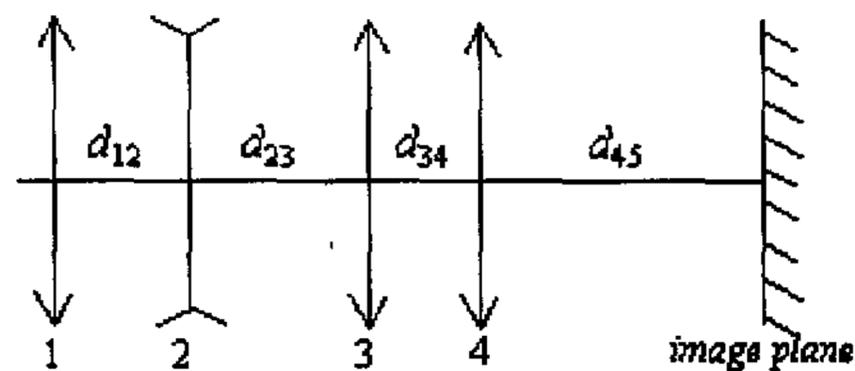
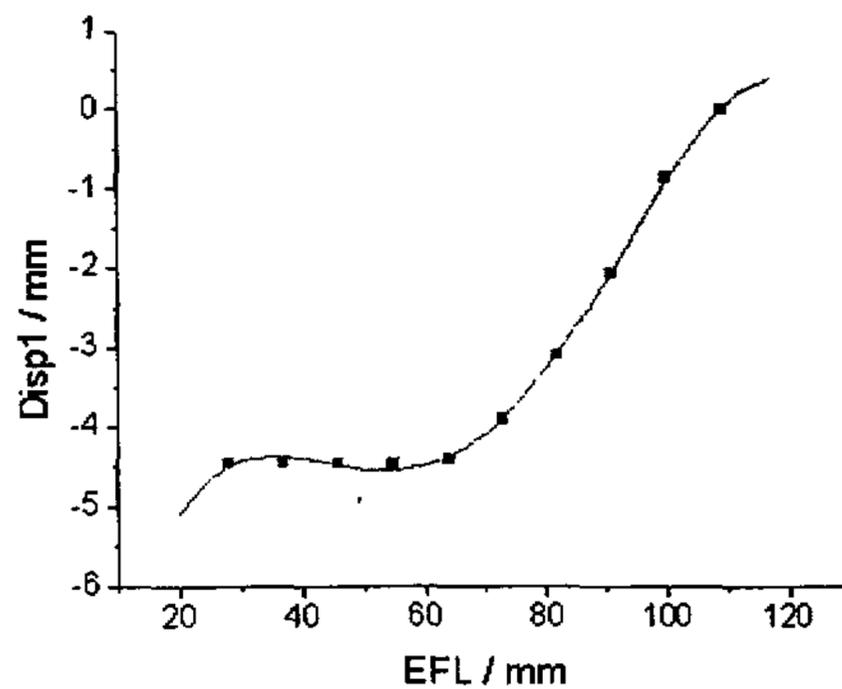
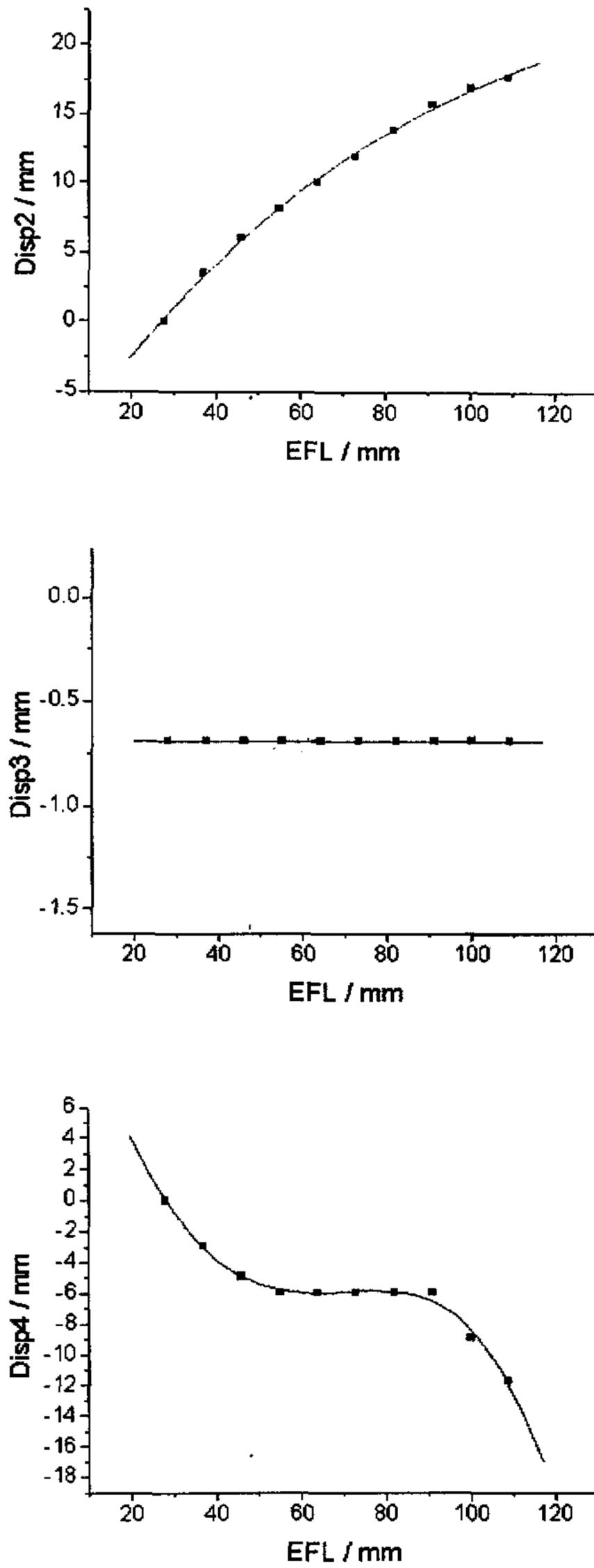
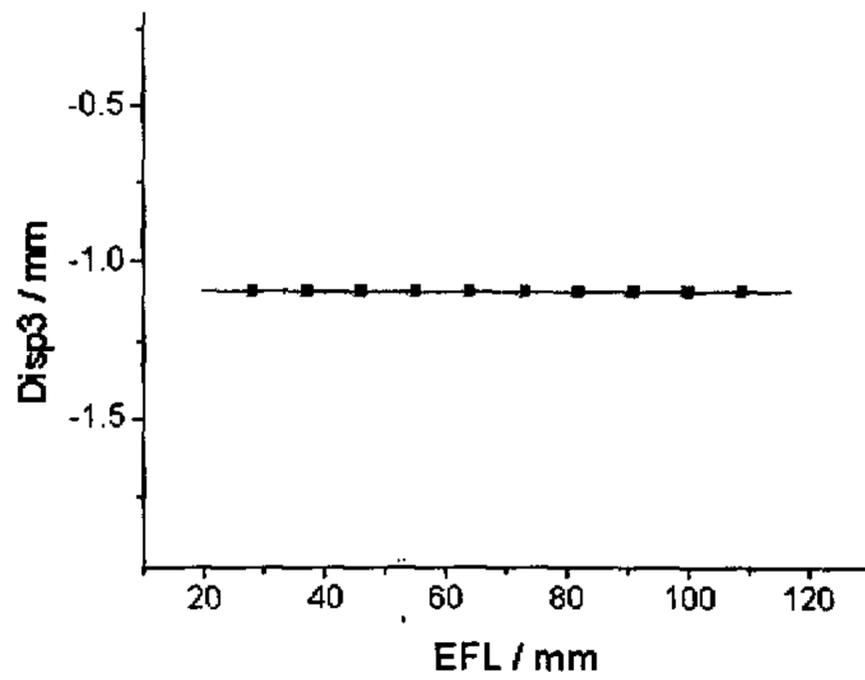
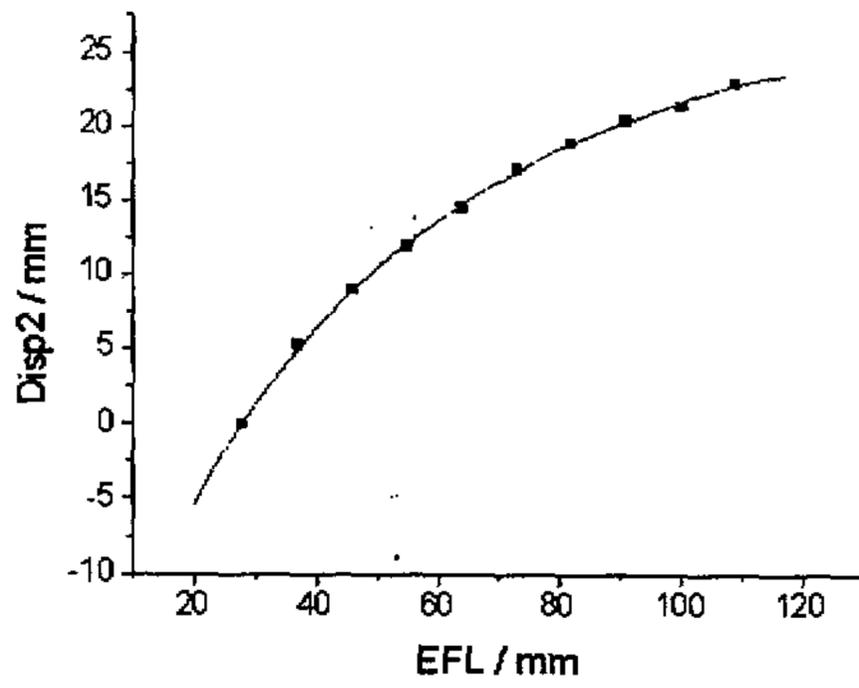
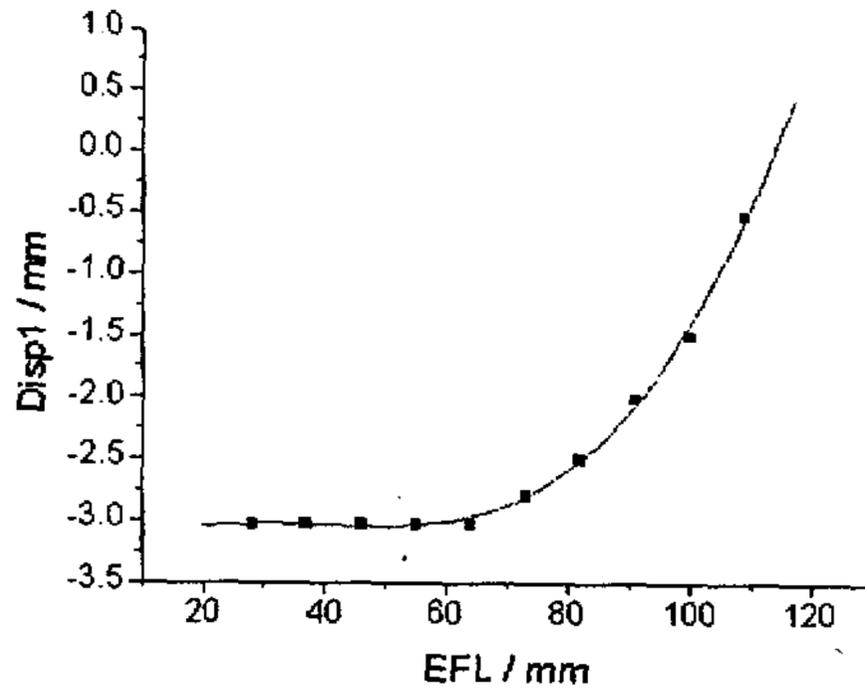
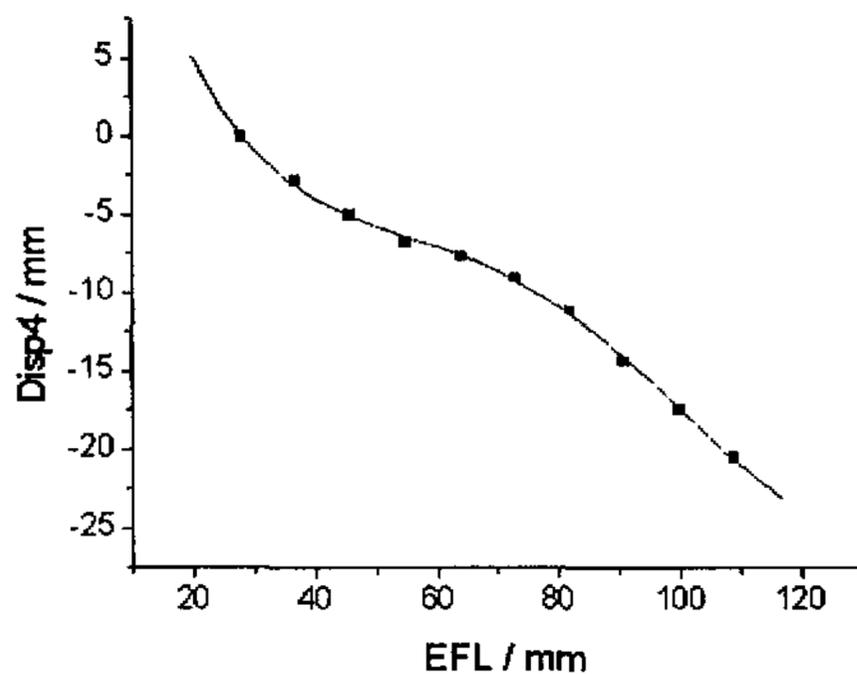


图 3-13 光学结构示意图



图 3-14 无 F 数限制下运动组元的移动距离



图 3-15 有 F 数限制下运动组元的移动距离

3.6 小结

本章对二组元机械补偿和双组连动等简单变焦距系统高斯光学参数的求解公式进行了推导和总结；对于多组元全动型变焦距系统，将运动组元的移动距离和组元焦距作为变量，在满足系统焦距变化规律和组元间隔要求的条件下，提出了一种同时求解多组元全动型变焦距系统在每个焦距位置高斯光学参数的新型方法，并编程实现，给出了设计实例，证明了该方法的可行性。

第四章 变焦距系统初始结构的自动求解

4.1 方法概述

第三章讨论了变焦距系统高斯光学参数的求解方法，目的是为变焦距系统初始结构的形成做好准备，而形成变焦距系统的初始结构是最终完成变焦距系统设计的基础。所以这一章将讨论变焦距系统初始结构的求解方法。

要求解一个变焦距系统的初始结构，应该包括如下步骤^{[23][63][70]}：

(1)根据变焦距系统变倍比和系统短焦数值的要求选择适合于该系统的变焦方式；

(2)选定了变焦距系统的变焦方式以后，求解变焦距系统的高斯光学参数和组元的运动轨迹曲线，使之满足系统变焦比以及运动曲线光滑和曲率小的要求。这个问题已经在第三章高斯光学参数的求解过程中得到了初步的解决；

(3)求解各组元可能的最大光线入射高和最大入射角，在初级像差范围内基本消除初级色差并使之在将来的实际像差计算中产生较小的高级像差，由此确定各组元的初始结构参数；

(4)将各组元的初始结构按初始位置的主面间隔安装成一个整体变焦距镜头，然后在初级像差及少量实际像差范围内校正整个系统。

在以上各个步骤中都有自身的难点，这个过程可能会反复的从步骤(1)到步骤(3)调整，然后对步骤(4)进行反复的迭代优化。

首先变焦方式是多种多样的，按随心所欲的方式给出组元焦距分配及其运动轨迹曲线本身就是一个较为复杂的数学优化问题，尤其目前流行一种多组元全动型变焦方式，要做出一个完整的处理必须有一个从简到繁再到优的过程；其次从高斯光学参数到结构参数的确定，这是一个既有连续变量又有离散变量的多种约束的数学优化问题。经典的数学方法很多，但必须恰当有效地处理好实际问题。

在变焦距镜头高斯光学参数确定之后，应该给出各组元的结构参数，即各折射面的球面半径间隔及介质的玻璃牌号。首先，确定光阑的位置，通常光阑取在所有运动组元之后，或在某一固定组元前后。其次，要选定几个固定的变焦位置，通常取定两个端点焦距位置，再取中间一到两个最

多三个中间位置，将来就以这几个位置上的像差情况共同评价组元像差的优劣。

对于选定的这几个变焦位置，按每个位置所具有的系统总的焦距值，按相对孔径要求求出各位置的近轴光线在轴上的最大入射高度 \tilde{h} 和相应的入射角 \tilde{u} ，按总的理想像高要求求出轴外最大视场近轴主光线入射高 \tilde{h}_p 和相应入射角 \tilde{u}_p 。然后对各变焦位置都计算上述参数。对每个组元得到的数据，纪录每个组元轴上理想光线入射高度 h_j 及相应的入射角 u_j ，以及轴外主光线的入射角 h_{pj} 及相应入射高 u_{pj} ，其中 j 表示所论的第 j 个变焦位置， $j=1,2,\dots,p$ ， p 为变焦位置个数，下面就从这些光线出发确定每个组元的结构参数。

现在假设某个组元的结构参数已经确定，我们考察一下这些参数应该满足哪些条件。设该组元的某个折射面半径为 r ，该折射面前后介质对中间光波长的折射率分别是 n 和 n' ，与下一个折射面的间隔为 d 。那么，对具有入射高为 h 和入射角为 u 的近轴光线通过下列公式可算出光线在折射面上关于半径向量的折射面物方入射角 i 及像方出射角 i' 以及折射光线在像方关于光轴的出射角 u' [63][64]：

$$i = \frac{h}{r} - u \quad i' = \frac{n}{n'} i \quad u' = u + i - i' \quad (4-1)$$

$$\text{转面公式为 } h_2 = h_1 - d_1 u_1' \quad u_2 = u_1' \quad (4-2)$$

如此，追迹 $(h,u)=(1,0)$ 的近轴光线(4-1)和(4-2)，可计算出该组元的焦距值 f' ，它应该等于相应的目标值 f'' 。为了将来对整个系统作实际像差校正时该组元不产生过多的高级像差，应该限制由追迹近轴光线 (h_j, u_j) 和光线 (h_{pj}, u_{pj}) 在各折射面上产生的折射面入射 i 和出射角 i' 等参量，使之不超过一定的范围：

$$|i| \leq a \quad |i'| \leq a \quad |i_p| \leq b \quad |i_p'| \leq b \quad (4-3)$$

其中 a 和 b 是某一指定的正数。另外为了保障未来实际色差的校正，每个组元应该尽量消除自身产生的初级位置色差。为此，还要对另外两种消色差光波 F 和 C 分别追迹近轴光线以便得到轴向色差 $l_F' - l_C'$ 。使之尽量小，或达到某一目标值。还有组元镜片正透镜的边缘不能过薄，负透镜的中心厚度也不能过薄，计算一条子午实际光线可以算出镜片边缘厚度值。

由于初级像差或三级像差对成象质量的表达并不直接，而当今对实际

像差的计算及其数值分析的技巧又相当成熟,所以我们宁愿追迹少量实际光线直接表现实际成象效果,而不从初级像差出发作复杂的定性分析。对于固定组元,取轴上实际光线与理论光线在轴向方向上的偏差参与评价该组元的成象质量,而对轴外主光线,同时以轴向偏差和纵向偏差共同参与评价。对于运动组元,包括物点和像点不固定的固定组元,参与评价的像差只是实际光线对理想光线在轴向上的偏差。轴向像差包括各变焦位置上的球差 $L_d' - l_d'$, 以及另外两种色光的轴向色差 $l_F' - l_C'$ 。纵向像差包括畸变、垂轴色差 $Y_F' - Y_D'$ 和 $Y_C' - Y_D'$ 、子午场曲 x_i' 以及弧矢场曲 x_i' 等。以上每种像差都取遍 p 个变焦位置。这些实际像差的数值基本上反映了该组元的成象质量。这些像差连同轴向球差 $l_F' - l_D'$ 及 $l_C' - l_D'$ 都应该尽量小或接近于它们各自的目标值。

4.2 设计实例

此处设计的是 Ef124-85/F3.5-4.5 照相机变焦距系统。设计需要满足的条件为:

- (1) 光学系统最后一面至像面的最小距离在 38-41 之间;
- (2) 总玻璃片数尽量不大于 15 片;
- (3) 镧玻璃片数应小于 3 片;

变焦距系统可分为两类。一类是电影、电视摄影机变焦距系统,一类是照相机变焦距系统。本节的设计实例是一个照相机变焦距系统,所以首先介绍一下照相机变焦距系统的特点,然后介绍初始结构参数的求解方法和过程,最后给出设计结果和设计系统的像质评价。

4.2.1 照相机变焦距系统的特点

与电影、电视变焦距系统相比,照相机变焦距系统有其自身的特点。首先,照相机要求便于携带,使用方便灵活,而且在多数情况下是手持使用,因此要求它本身的体积、重量比较小。

其次,不同的电影、电视摄影机和照相机,它们的像面尺寸是一定的,见表 4-1 所示^[96]。由表中可以看到,照相机的像面尺寸比电影、电视摄像机的像面尺寸大。根据无限远物体的理想像高公式^[64]:

$$y' = -f' \operatorname{tg} \omega \quad (4-4)$$

当像高一定的时候，视场角 ω 将随着焦距 f' 的改变而改变。从表 4-1 中可以看到，它们的视场角都随着焦距的减小而增大，但是照相机系统在任一焦距下都比电影、电视摄像机系统相应的视场角大。

表 4-1 照相机与电影、电视摄像机像面尺寸、视场角的比较

	16mm 电影 摄影机	35mm 电影 摄影机	1 吋电视摄 影机	135#照相机	120 照相机
像面尺寸 (mm^2)	10.4×7.5	22×16	20×15	36×24	55×55
像高(y')	6.57	13.6	12.5	21.63	38.89
视场角 2ω ($f'=6\text{mm}$)	95°	132°	128.7°	149°	162°
视场角 2ω ($f'=10\text{mm}$)	66.6°	107°	103°	130°	151°
视场角 2ω ($f'=20\text{mm}$)	36.4°	68°	64°	94.5°	125.6°
视场角 2ω ($f'=25\text{mm}$)	29°	57°	53°	82°	114.5°
视场角 2ω ($f'=85\text{mm}$)	8.8°	18°	16.7°	28.5°	49°
视场角 2ω ($f'=150\text{mm}$)	5°	10.4°	9.5°	16.4°	29°

虽然目前设计一个广角或者是超广角的定焦距系统已经不太困难的事情，但对变焦距系统来说，因为它要求在变焦范围内的各个焦距位置都要达到好的像质，这就为校正像差带来了困难，在某个焦距位置下校正了像差，并不一定在其它的焦距位置下达到好的像质。所以对应 135#变焦距相机，视场角 2ω 在广角区域以上 (82°)，已经不容易设计，此时对应的焦距为 25mm ，所以要设计短焦距比 25mm 更小的照相机变焦距系统就更加困难了。

由于照相机变焦距系统外形尺寸和重量的限制，也决定了它的变焦特性。为了使得照相机变焦距系统的体积不致太大，而且保证优良的成像质量，它的变焦范围一般不是太大。根据经验，采用二组元变焦方式的照相机变焦距系统，其变倍比不应超过 3 倍。对更高变倍比系统，而且其短焦较小的系统，需要采用两组以上的变焦方式，一般采用多组元全动型的变焦方式，使用多个运动组元做相对较小的移动，来代替一个变倍组作较大的运动，这样对校正像差和减小外形尺寸都有帮助，可以提高系统的变倍比。

不论采用哪种变焦方式，各个组元焦距一定时，要提高变焦距系统的变倍比，就意味着运动组元运动范围的加大，这样变焦范围内各个焦距位置的像差就越来越不容易达到一致，因此变倍比越高的照相机变焦距系统越不容易校正。而且，运动组元运动范围的加大对缩小整个系统的长度和减小口径都不利。

根据上述的讨论，由于照相机的像面尺寸大，相应的视场角也大，所以在同等的条件下，照相机变焦距系统的像差设计比电影、电视摄像机变焦距系统困难。而且由公式(4-4)可知：在像高 y' 一定的条件下，焦距越短的系统，视场角越大，其轴外像差越不易校正。所以广角端的焦距越小，越不易设计。

长焦位置的焦距越长，其轴向像差和色差越不易校正。因为如果使得焦距加大，则为了达到要求的相对孔径，入射光束的口径就会加大。同样确定了变焦范围的照相机变焦距系统，对相对孔径的要求越高，其高级像差越难以校正，需使结构复杂化。

综上所述，由于照相机小型化的要求，要想达到较高的变倍比和广角要求，其外形尺寸的限制就成了设计上的主要矛盾。所以在设计照相机变焦距系统时，选择合适的变焦方式，采用合适的方法来求得其高斯光学参数就变得非常重要。最新出现的全动型变焦方式的照相机变焦距系统，就是在尽可能多的变量中选择既满足变倍比要求又尽可能小型化的解。

4.2.2 高斯光学参数求解

所要设计的照相机变焦距系统为 Ef124-85/F3.5-4.5，它的最大半视场角 ω 按公式(4-4)计算，达到了：

$$\omega = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{y'}{f_s'}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\sqrt{24^2 + 36^2}/2}{24}\right) = 42.03^\circ$$

视场角 2ω 达到了 $42.03 \times 2 = 84.06^\circ$ ，属于广角镜头。

系统的变倍比为：

$$M = \frac{f_l'}{f_s'} = \frac{85}{24} = 3.542$$

属于广角中倍变焦距系统。由上一节的分析可以知道，二运动组元变焦距系统可用于变倍比大约在 3 倍或者 3 倍以下的照相机变焦距系统，对更高变倍比的系统，需要采用两组以上的变焦方式，一般采用多组元全动的变焦方式，在设计实例中将采用上一章中介绍的多组元全动型变焦距系统。

使用上一章计算多组元全动型变焦距系统高斯光学参数的求解方法可以得到其在选定焦距位置的高斯光学参数如表 4-2 和表 4-3 所示。

表 4-2 优化所得的系统组元间隔 (单位: mm)

f_s'	d_{12}	d_{23}	d_{34}	$d_{s-ImagePlane}$
24.0076	8.1000	36.7100	21.5427	51.2630
39.2444	15.8280	24.9875	14.0625	62.7212
54.4422	22.6580	20.2370	8.3467	68.6252
69.7529	28.0780	17.3865	2.3467	71.6550
85.1385	32.1980	14.9450	0.2000	73.8098

表 4-3 优化所得的组元焦距 (单位: mm)

组元代号 i	1	2	3	4
组元焦距 f_i'	76.3359	-17.8571	53.1915	58.8235

4.2.3 像差设计的原理与方法

(1) 变焦过程中光束特点的分析

计算平行入射光束口径 H_1 只与所需求的相对孔径 F 和系统总焦距 f_s' 有关，它们之间有下列公式成立^[64]：

$$\frac{1}{F} = \frac{2H_1}{f_s'} \quad (4-5)$$

所以在相对孔径不变的情况下，随着系统总焦距 f_s' 的增加， H_1 单调的增加。即在相对孔径要求一定时，在变焦过程中，随着焦距的增大，轴向入射光束口径逐步增大，所以说短焦位置时轴向入射光束口径最小，长焦位置时的轴向入射光束口径最大。

根据公式(4-4)可得半视场角为：

$$\omega = \lg^{-1}\left(\frac{y'}{f_s'}\right) \quad (4-6)$$

由式(4-6)可知：在像面尺寸一定的条件下，在变焦过程中，随着系统焦距 f_s' 的增加，入射视场角单调降低，所以短焦时视场角是最大的，达到 $2\omega = 84.06^\circ$ 。在从短焦到长焦位置的变化过程中，视场角逐步减小，长焦时视场角为 $2\omega = 28.554^\circ$ ，系统的视场角最小。

对所设计的照相机变焦距系统进行半视场角 ω 和光束入射口径 H_1 的计算，其结果列于表 4-4，可以看出它们的数值满足上述的关系。

表 4-4 视场角和轴向入射光束口径的变化

$y' = 21.63\text{mm}$ $F = 3.5 \sim 4.5$		
$f(\text{mm})$	$H_1(\text{mm})$	$\omega(^{\circ})$
24.00	3.43	42.03
32.92	5.23	33.31
45.16	6.81	25.59
61.96	8.21	19.24
85.00	9.44	14.28

(2) 变焦过程中的像差特点

通过上述对变焦过程中光束分布的讨论可知，在不同的焦距位置下，系统的像差各有其特点：系统处于短焦位置时，视场角最大，而轴向光束口径最小，因此它的像差特点是轴外视场像差最大，轴上像差最小；当系统处于长焦位置时，它的视场角最小，而轴向光束口径最大，因此它的像

差特点是，轴上像差最大，轴外像差最小。在从短焦到长焦的变化过程中，视场角由大到小变化，轴向光束口径由小到大变化，因此轴外像差由大到小变化，轴向像差由小到大变化。正是由于变焦距系统在任意焦距位置下的像差各有其特点，所以要想在整个变焦距过程中校正像差是非常不容易的，这也是变焦距系统比定焦距系统在校正像差方面的困难之处。

对 Ef124-85 这样一个短焦很短采用多组元全动型的系统而言，首先它没有后固定组，所以对它进行像差校正时，不仅要让它在整个变焦范围内的像差达到一致，而且要在变焦范围内，使得所有的变焦位置都要达到好的像质。这样，对该变焦距系统的像差校正是有一定困难的，往往在某个焦距位置下达到了好的像质，而在另外的一个焦距位置下的像差可能变得很差。其次，按照相对孔径 $F=3.5$ 计算，则系统在长焦位置时，轴向入射光束在前组的投射高为 $85/(3.5 \times 2) = 12.14$ ，这个数值与短焦时的轴向光束口径相比 ($24/(3.5 \times 2) = 3.43$) 相差太远，本身的数值也比较大。同时相对孔径的大小也影响到系统的尺寸，一方面使得口径增大，另一方面使得系统的结构复杂、系统长度加大。所以在设计过程中，在长焦时，取 $F=4.5$ ，则 $H_1 = 85/(4.5 \times 2) = 9.44$ ，比 12.14 小得多。

(3) 设计原理

由于在变焦过程中，入射光束口径以及视场角等的变化，使得整个系统的像差在各个焦距位置上各具特点。上述分析使我们对变焦距系统的像差特点有了一定的了解。但变焦距系统的像差设计一般都是分组设计的，即各组基本上都是独立校正像差，因此在寻找设计方案前，需要了解各组元在变焦过程中的像差变化特点。

由于系统的入射光口径以及视场角也即是前组的口径以及视场角，因此整个系统的像差特性也即是前组的像差特性，即在短焦位置时入射光束视场角最大，主要校正轴外像差，如场曲、像散、畸变和垂轴色差等；而在长焦位置时，轴向入射光束口径最大，主要校正的是轴上和近轴像差，如球差、正弦差、轴向色差等。随着系统焦距的增加，轴外像差逐渐减小，而轴向像差逐步增大，因此在对前透镜组进行设计时，可让它在这样一种光学特性下校正像差：它的视场角取短焦位置时的视场角（这时视场角是变焦范围内最大的），它的轴向光束口径取长焦位置下的轴向光束口径（这

时轴向光束口径是变焦范围内最大的), 而光阑距前组的距离按照短焦时光阑的位置计算(这时光阑距前组的距离是变焦范围内最远的)。这样前组处于一个最难校正像差的光学特性位置, 因此, 如果在这样的光学特性下对像差给予了校正, 则其它位置下的像差也就得到了校正。在实际的设计中, 往往在这一光学特性位置下完全校正像差是有一定困难的, 一般是尽可能好地校正像差, 留待个别不能完全校正的像差, 在以后组元组合起来的整个系统设计中进行校正和补偿。

后面几组的像差特点不如前组那样明显, 如果在一个位置下校正了像差, 则在其它焦距位置下的像差改变不是很大。不过后面几组的选择必须合适, 产生的像差和前组像差的变化方向相反, 以补偿前组不能校正的像差。尤其是最后一组的结构有可能比较复杂, 以便补偿前面几组产生的高级像差。

按照上述设计方法分别对每个组元进行像差校正, 然后将它们组合起来, 在各个焦距位置进行总体校正, 以达到优良的成像质量。

这种设计方法有很大的优越性: 它使得变焦距系统的设计能固定在某个位置下进行, 而这一位置代表了整个变焦过程中各个焦距位置下的像差特性, 在这一光学特性位置下满足像差要求时, 则在其它焦距位置下的像差一般不会改变太大, 这样, 大大减小了变焦距系统设计的盲目性, 使得一个变焦距系统的设计成为一个定焦距系统的设计。而这样设计, 使得整个变焦过程中的像差都能够得以校正。

4.2.4 程序实现与设计结果

从变焦距系统高斯光学参数确定到最终给出整个系统的初始结构参数, 其间需要注意以下问题并做适当处理: (1)各组元最初的结构参数如何给出; (2)各组元结构参数作了基本优化之后, 当按主面间隔安装成一个变焦距系统时发现组元间有碰撞, 或者对整个系统基本优化后, 在诸如整体尺寸和相对孔径等要求不能满足时应该如何处理。

对于初始结构参数的确定, 以前多采用求解 $P-W$ 方程的方法^{[2][23]}给出。但是该方法繁琐而且实际效果不尽理想, 不如根据经验对现成的组元结构直接进行半径缩放, 再对玻璃做适当调整的做法好, 这样既简明又迅速。我们在程序设计过程中, 将这种人工经验数学化和程序化, 形成一种

智能化的设计方法。具体过程如下：

按从简到繁的次序建立一个组元结构参数文件。在文件中按统一方式给出每个组元结构的全部信息，包括折射面个数、最大轴上入射高、最大半视场角、光阑位置、各面的半径、间隔及玻璃牌号等数据。按照每个组元的焦距等参数，程序自动选择满足条件的透镜来作为组元的初始结构。对于选择好的组元结构按照定焦距镜头自动或半自动设计的方法对初级像差和少数必要的实际像差作像差校正。

如果组元在变焦过程中中间位置相碰，说明整个系统的高斯光学参数不尽合理，应该从头改变变焦方式。当系统安装好并做初步优化之后，如果某些整体要求不令人满意时，应该回到最开始重新选择变焦方式或最初高斯光学参数的求解。程序应该提供若干组数据供选择。

按照上述设计原理使用编制的程序对实例进行设计。使用程序自动匹配组元，每个组元采用的结构形式如图 4-1~图 4-4 所示。将各个组元组合起来，优化后的系统结构图如图 4-5 所示，结构数据如表 4-5 所示。它的 MTF 曲线如图 4-6(a)~4-6(e)所示。从它的结构数据和 MTF 曲线可以看到，所设计的系统满足要求的条件，其像质达到了变焦距系统的一级标准，成像质量良好。

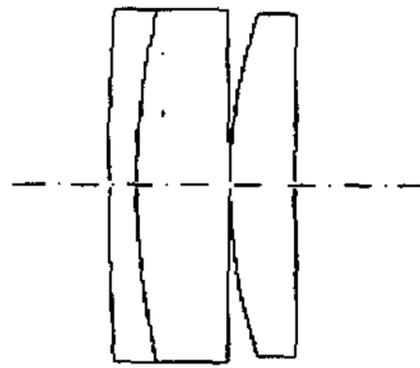


图 4-1 组元 1 的结构图

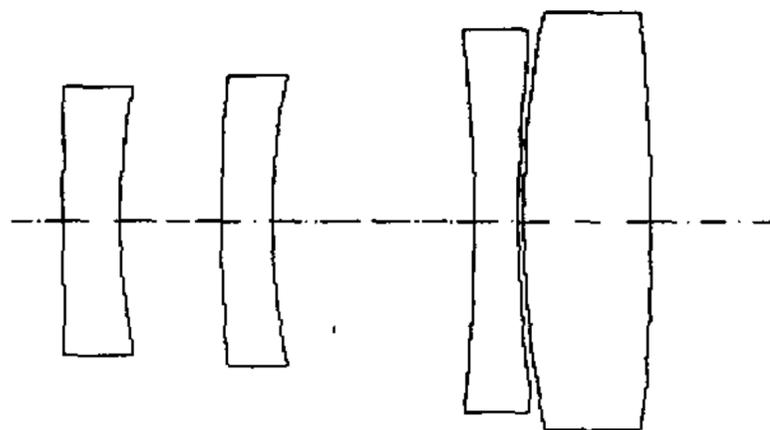


图 4-2 组元 2 的结构图

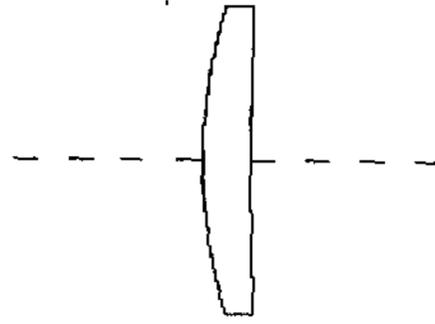


图 4-3 组元 3 的结构图

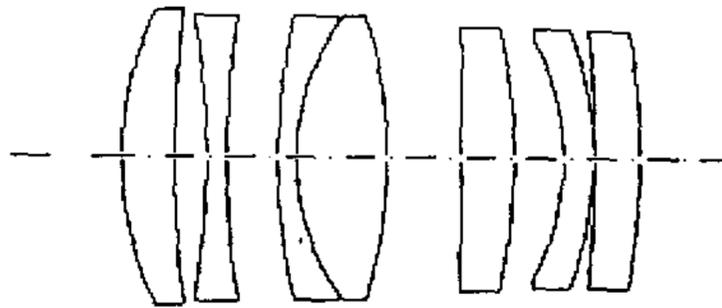


图 4-4 组元 4 的结构图

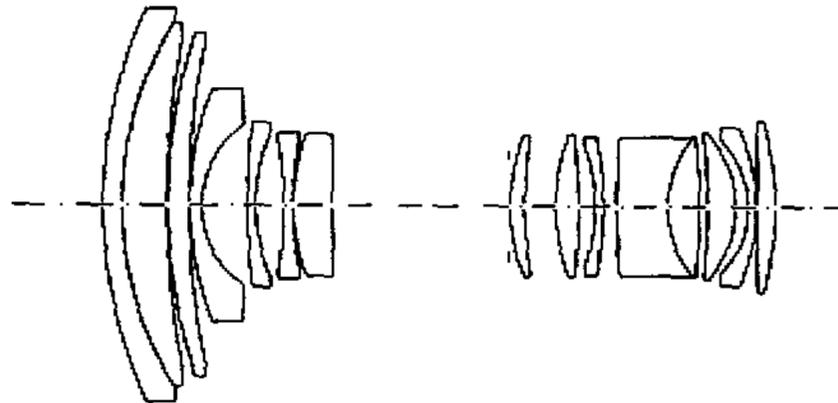
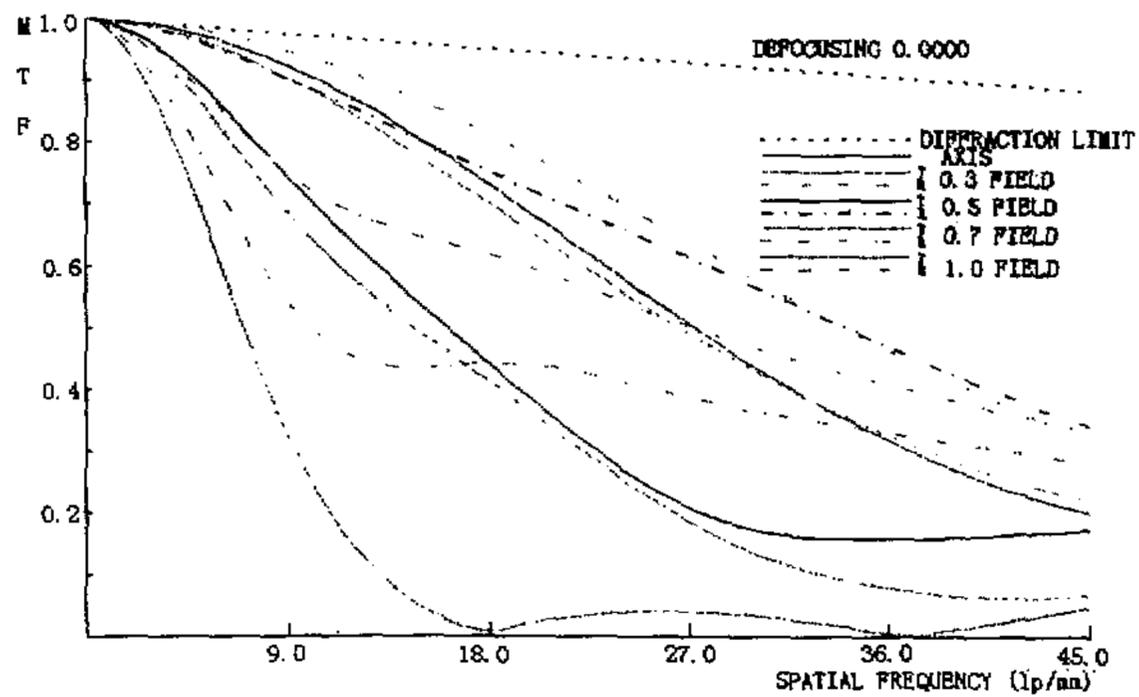
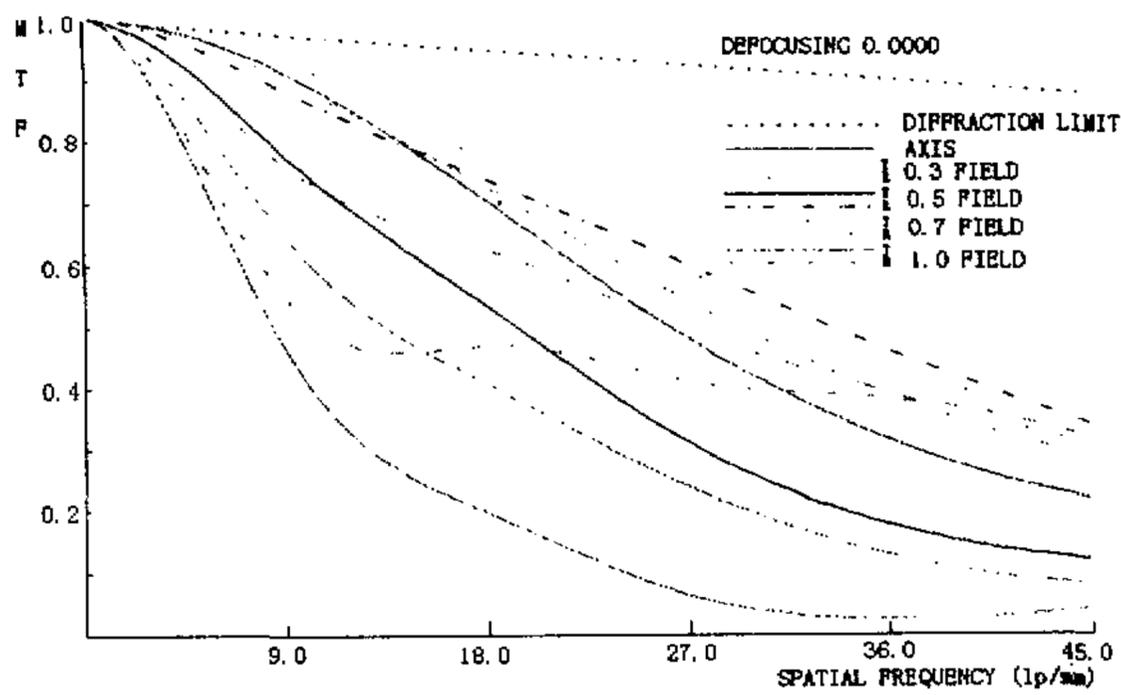


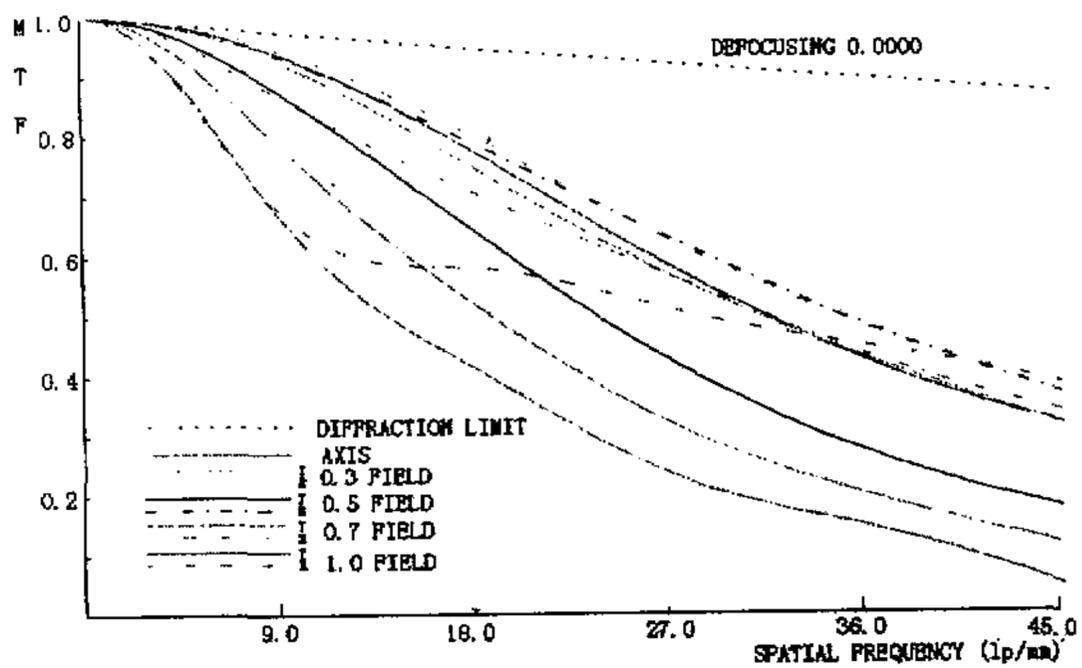
图 4-5 系统结构图



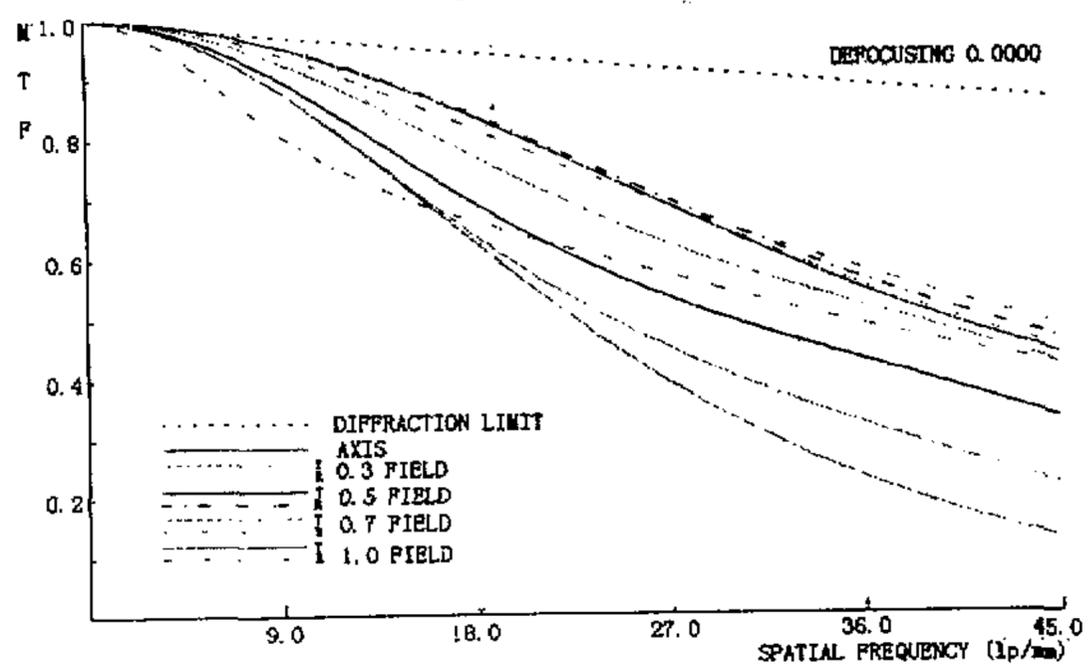
(a)



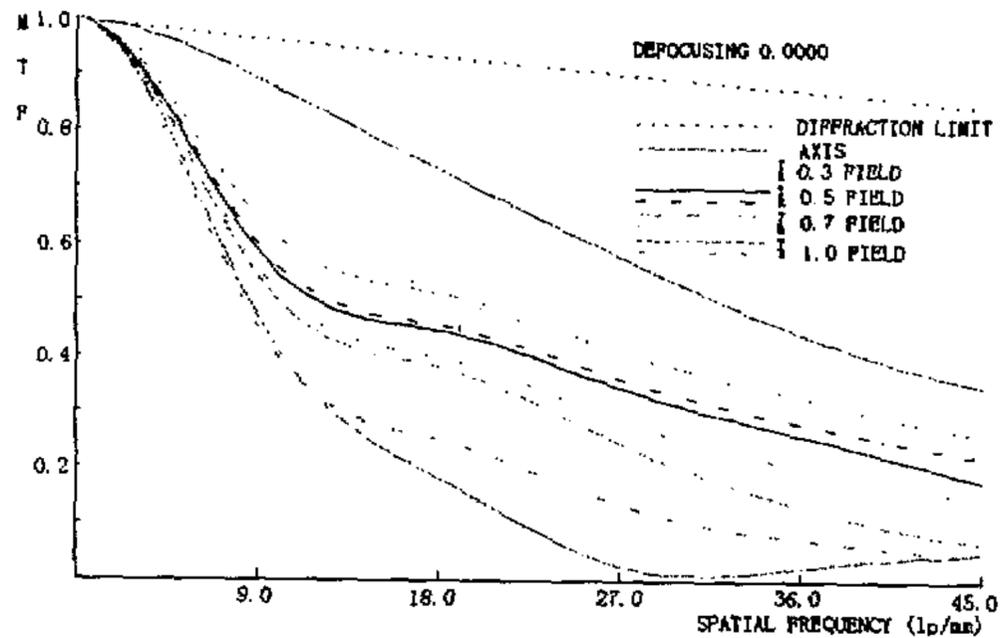
(b)



(c)



(d)



(e)
((a),(b),(c),(d),(e)分别为系统焦距等于 24.0000,39.2500,54.5000,
69.7500,85.0000 时的 MTF 曲线)

图 4-6 系统的 MTF 曲线

表 4-5 变焦距系统的结构参数

面序号	半径(mm)	间隔(mm)	玻璃牌号
1	88.87413	3.500000	ZF7
2	65.92329	8.081941	ZK9
3	173.71777	0.200000	
4	105.89285	3.774588	ZBAF20
5	152.45897	0.200000	
6	59.70881	2.200000	LAF3
7	18.83655	8.331284	
8	122.56861	1.500000	LAF3
9	33.31806	5.160493	
10	-86.24930	1.500000	ZK9
11	55.18737	0.200000	
12	37.61849	7.085670	ZF7
13	2594.99474	32.527166	
STO	INFINITY	0.200000	
15	33.81683	2.715818	ZK3
16	70.71251	5.674249	
17	36.38025	4.267462	ZBAF5
18	-122.22456	2.945408	
19	-36.04044	1.500000	ZF2
20	-75.04326	2.472590	
21	137.04739	9.458935	ZF6
22	20.36698	5.862169	QK3
23	-146.45365	1.533379	
24	-146.50803	5.203156	QK3
25	-21.37418	2.327843	
26	-18.31097	1.500000	LAF3
27	-37.22223	0.200000	
28	15296.54369	3.242119	ZF6
29	-64.74701	41.000000	

4.3 小结

要得到一个变焦距系统的初始结构，一般需要经过以下四个步骤的反复迭代和优化：(1)确定变焦距系统的变焦方式，(2)采用合适方法求解系统的高斯光学参数；(3)确定每个组元的合适结构形式，求解每个组元的初始结构参数；(4)将各组元的初始结构按初始位置的主面间隔安装成一个整体变焦距镜头，然后校正整个系统。在本章中按照求解变焦距系统初始结构参数的四个步骤编制了相应的软件，使用自动匹配组元参数，然后整体优化的方法设计了 Efl24-85/F3.5-4.5 的照相机变焦距系统。从其 MTF 曲线可知，成像质量良好。

同时在本章中还介绍了求解变焦距系统初始结构的一些基本方法、照相机变焦距系统的像差特点以及设计中需要注意的一些问题等。

第五章 光学系统的热效应分析

5.1 温度变化对光学系统成像质量的影响

温度变化对光学系统的影响主要表现在两个方面。一方面是温度变化将会引起光学系统中光学元件的曲率半径、厚度和空气间隔的变化,从而使得光线的光程改变^{[26][27]}。这一方面的影响用介质的线形膨胀系数 X_g 来表征,线性膨胀系数定义为^{[96][97][98]}:

$$X_g = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \quad (5-1)$$

在一定的温度范围内, X_g 是常数, 随介质的不同而不同。

温度变化对光学系统的另一个影响是: 温度变化将会引起介质折射率(包括空气的折射率)的变化, 从而使得通过光学系统光线的光程发生变化^{[26][27]}。定义温度折射率系数 B_g 来表征这一影响, B_g 的定义如下^{[28][96]}:

$$B_g = \frac{dn}{dt} \quad (5-2)$$

在一个很大的温度范围内, 对特定波长的光线, B_g 是一个常数, 即使温度变化范围很大, 对有些介质而言, B_g 只是有些微小的变化, 甚至没有变化, 所以 B_g 也是一个和介质有关的系数。

不同温度环境下的温度变化对光学系统的热效应影响有着显著的不同。通常把环境温度分为均匀温度变化和具有径向温度梯度分布两种情况。下面分别推导两种温度分布下光学系统成像质量的变化。

5.1.1 均匀温度变化对光学系统成像质量的影响

均匀温度场^{[26][27]}是指经过一瞬间以后, 从一个稳定的温度状态变化到另一个稳定的温度状态。在均匀温度场中, 光学系统各元件的结构参数将发生如下变化:

曲率半径	$R \rightarrow R + dR = R * (1 + X_g * dt)$
元件厚度	$D \rightarrow D + dD = D * (1 + X_g * dt)$
空气间隔	$L \rightarrow L + dL = L * (1 + X_m * dt)$
元件折射率	$n \rightarrow n + dn = n + B_g * dt$
空气折射率	$n_{air} \rightarrow n_{air} + dn_{air} = n_{air} + B_{air} * dt$

其中 X_m 是装配材料的热膨胀系数, B_{air} 是空气的温度折射率系数。在均匀温度场中一般使用温度焦距位移系数 X_f (简称温度焦移系数) 来表示光学系统成像质量的变化。可以推导出, 对单个透镜来说,

$$X_f = \frac{Bg}{n-1} - X_g \quad (5-3)$$

实际的光学系统通常是由多个透镜组成的。对双透镜, 定义温度焦移系数为:

$$X_f = \frac{f}{f_1} X_{f_1} + \frac{f}{f_2} X_{f_2} \quad (5-4)$$

其中 f_1 和 f_2 是两个透镜的焦距, f 为组合焦距。可以推出, 对 n 个薄透镜组成的系统, 其温度焦移系数为:

$$X_f = \frac{f}{f_1} X_{f_1} + \frac{f}{f_2} X_{f_2} + \frac{f}{f_3} X_{f_3} + \dots + \frac{f}{f_n} X_{f_n} \quad (5-5)$$

(5-5)式表明: 在均匀温度场中, 光学系统中各个元件的焦距位移之和等于系统总的焦距位移。

5.1.2 径向梯度分布温度对光学系统成像质量的影响

径向温度场^{[99][100]}是指从一个环境突然变化到另一个环境, 或是在一个稳定的外界热平衡条件下, 热量以对流的方式从光学元件的表面流入, 由于光学玻璃的低导热性, 在光学元件的内部, 形成从中心到边缘的径向梯度温度分布。在径向温度场中, 根据传热学理论, 有下面的贝塞尔型偏微分方程成立 (如图 5-1 所示):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T}{dR^2} + \left[\frac{1}{d} \frac{dd(R)}{dR} + \frac{1}{R} \right] \frac{dT}{dR} - \frac{\alpha_r}{\lambda r d} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dp_1}{dR} \right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{dp_2}{dR} \right)^2} \right) T(R) \\ = -\frac{\alpha_r}{\lambda r d} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{dp_1}{dR} \right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{dp_2}{dR} \right)^2} \right] T_\mu \end{aligned} \quad (5-6)$$

其中 $p_1(R)$, $p_2(R)$ 为弧矢量; $d(R)$ 为厚度函数; λ_T 为热导率, α_T 为热传输系数; T_μ 为外界环境温度。

当用平板玻璃代替透镜时, $dp_1(R)/dR$ 、 $dp_2(R)/dR$ 和 $dd(R)/dR$ 都变成了零, 所以有下面的简化结果:

$$\frac{d^2 T}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dT}{dR} - \frac{2\alpha_r}{\lambda r d_0} T = -\frac{2\alpha_r}{\lambda r d_0} T_\mu \quad (5-7)$$

解之得到：

$$T(R) = T_0 + (T_0 - T_\mu) \cdot I_0 \sqrt{-\frac{2\alpha r}{\lambda r d_0}} R \quad (5-8)$$

其中 T_0 —光轴处的温度； I_0 —零阶贝塞尔型函数； T_μ —外界环境温度。

将零阶贝塞尔型函数展开，加以简化得到：

$$T(R) \approx T_0 + \rho R^2 \quad (5-9)$$

$$\text{其中 } \rho = \frac{T_0 - T_\mu}{8} \cdot \frac{\alpha r}{\lambda r d_0} \quad (5-10)$$

$$\text{当 } R=R_1 \text{ 时, } \rho = \frac{T(R) - T_0}{R_1^2} = \frac{\Delta T(R_1)}{R_1^2} \quad (5-11)$$

式(5-9)表明，对平板玻璃而言，温度分布与半径的平方成线性关系。系数 ρ 可以通过(5-10)式得出，但式中参数不易确定，故 ρ 由(5-11)式来计算得出。

由(5-9)式可见：在径向温度场中，旋转对称的光学元件在轴心和边缘间的温度梯度分布近似地按平方规律分布。

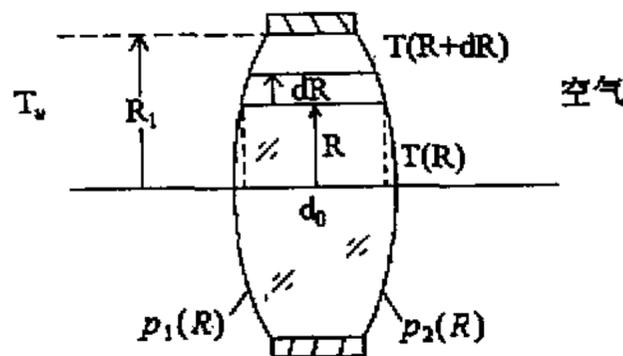


图 5-1 径向梯度温度分布

单个透镜的光程函数如下^[99]：

$$E = -(n-1) \cdot d_0 + \frac{R^2}{2(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} + \frac{R^4}{8(n-1)\left(\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3}\right)} \quad (5-12)$$

对光瞳的径向半径微分得：

$$\frac{dE}{dR} = -\frac{d[(n-1)d_0]}{dT} \cdot \frac{dT}{dR} + (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + R^2 A \frac{dT}{dR} + \dots \quad (5-13)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \frac{dE_0}{dT} &= \frac{d[(n-1)d_0]}{dT} = d_0 \frac{d(n-1)}{dT} + (n-1) \frac{dd_0}{dT} \\ &= d_0(n-1) \left[\frac{1}{n-1} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{d_0} \frac{dd_0}{dT} \right] = d_0(n-1) \left(\frac{B_g}{n-1} + X_g \right) \end{aligned} \quad (5-14)$$

$$\text{令 } \Gamma_g = \frac{Bg}{n-1} + X_g$$

从 Γ_g 的表达式可以看出，它是一个只和光学材料有关的重要温度参数，称为热光系数。将 Γ_g 和 (5-14) 式代入 (5-13) 式，可以得到：

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dT} &= -\frac{d[(n-1)d_0]}{dT} \cdot \frac{dT}{dR} + (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + R^2 A \frac{dT}{dR} + \dots = -\frac{dE_0}{dT} \frac{dT}{dR} + (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\ &+ R^2 A \frac{dT}{dR} + \dots = -d_0(n-1) \Gamma_g \frac{dT}{dR} + (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + R^2 A \frac{dT}{dR} + \dots \end{aligned} \quad (5-15)$$

将 (5-15) 式代入 (5-13) 式得：

$$\frac{dE}{dR} = \phi_0 R - d_0(n-1) \Gamma_g \frac{dT}{dR} + R^2 A \frac{dT}{dR} + \dots \quad (5-16)$$

$$\text{其中 } \phi_0 = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

由 (5-9) 式得： $\frac{dT}{dR} = 2\rho R$ ，代入 (5-16) 式可以得到：

$$\frac{dE}{dT} = \phi_0 R - 2d_0(n-1) \rho \Gamma_g R + 2\rho R^3 A + \dots \quad (5-17)$$

$$\text{积分得到： } E = \frac{1}{2} \phi_0 R^2 - d_0(n-1) \Gamma_g \rho R^2 + \text{四次和更高次项} \quad (5-18)$$

(5-18) 式中的第一项，对应高斯光焦度为 ϕ_0 的无扰动球面波的光程，和温度无关，表征的是初始温度时的高斯像点。第二项表征的是由于径向温度导致的波像差 W_{20} ，即

$$W_{20} = -d_0(n-1) \Gamma_g \rho R^2 \quad (5-19)$$

(5-18) 式中的四次项和更高次项对应的波像差比 W_{20} 波像差的离焦量要小 10 倍，可以忽略不计。

假设在一个带有很小空气间隔的薄透镜系统中，所有光学元件轴上和边缘温度差相同，根据 (5-19) 式对每个元件的 W_{20} 叠加，就得到了整个系统的波像差 $W_{20\max}$ ：

$$W_{20\max} = -\sum (n_i - 1) d_{0i} \Gamma_{gi} \rho_i R_i^2 = -\Delta T \sum (n_i - 1) d_{0i} \Gamma_{gi} \quad (5-20)$$

根据离焦量和波像差的关系 $\Delta f' = \frac{-2W_{20} f'^2}{h_1^2}$, 可得:

$$\Delta f' = \frac{2\Delta T f'^2}{h_1^2} \sum (n_i - 1) d_{0i} \Gamma_{gi} \quad (5-21)$$

其中 h_1 为系统入瞳直径。

5.2 光学系统的无热设计

所谓无热技术 (Athermalization) 是指通过一定的补偿技术, 使光学系统在一个较大的温度范围内保持焦距不变或变化很小^{[101][102]}。从以上分析可知, 温度变化对光学系统最直接的影响是使系统产生焦移, 从而使成像质量变差。目前所采用的无热技术可分为三类: 机械被动式无热设计、机械(电子)主动式无热设计和光学被动式无热设计。三种无热技术的比较如表 5-1 所示^{[24][29][102]~[104]}。通过比较, 可以看出: 在三种无热技术中, 光学被动式无热技术的综合效率最高, 而且由于具有重量轻、无须供电、可靠性高等优点, 尤其适用于空间探测系统。因此本部分将着重研究光学被动式无热系统的设计。

表 5-1 三种无热技术的比较

名称	实现方法	性能	可靠性	重量	成本	是否需供电	环境稳定性	可维护性
机械被动式系统	1 用高膨胀率的材料补偿; 2 利用高膨胀率的塑性材料补偿; 3 利用形状记忆材料补偿	好	一般	重	相当低	否	好	好
机械主动式系统	利用热传感器、反馈电路、电机和预先存储的温度-位移对照表进行精确控制	好	依赖于子元件	笨重	高	是	不能承受严酷的环境	一般
光学被动式系统	利用具有不同热参数的材料之间的互相补偿来减小焦移	好	极好	很轻	低	否	取决于所选的光学材料, 通常很好	很好

5.2.1 均匀温度变化下的无热透镜设计

如上所述, 均匀温度变化对光学系统成像质量的影响来自两个方面: 一是温度变化使得装配材料热胀冷缩, 从而引起焦移; 二是温度变化使得光学材料的光学特性发生变化从而引起焦移。我们解决问题也是从这两方面入手, 可以通过它们之间的相互补偿来减小温度变化对系统焦距的影响。如果不考虑装配材料的影响, 则可以直接利用光学材料间温度焦移系数 X_f 的互补性, 仅仅通过不同材料的适当组合, 来消除系统的热效应影响。

一般可以通过两种方式消除光学系统的热效应, 一种是选择装配材料的 X_m 值与光学材料的 X_f 相匹配, 一种是选择光学材料的 X_f 值与装配材料的 X_m 值相匹配。考虑到光学材料的数目远远大于装配材料, 而且有众多特性参数用以调整 X_f , 采用后一种方法更为实用。例如, 一个 BaK7 玻璃和 SF11 组合的双消色差透镜, 求出它的 X_f 值为 $8.51 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 采用前一种方法来寻找匹配的装配材料, 那么最佳的匹配结果将会是钛这样一种昂贵的金属。而如果采用后一种方法, 我们选择 Al 作为装配材料, 希望找到一对玻璃和铝壳匹配设计一个双消色差透镜。Al 的 X_m 值大约为 $23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 我们选择 K5 和 LaSFN3 的组合, 它们的 X_f 值大约为 $22.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。对一个焦距为 100mm 的此类系统, 在 10°C 均匀温度变化下, 只有一个 $12.4 \times 10^{-4}\text{mm}$ 的离焦量。

严格地说, 消除温度变化的影响只能针对某一波长, 但通过选择合适的匹配材料, 在整个可见光范围内, 都可以实现我们的热设计目标。

下面是一个设计实例来验证上述的理论。

根据 X_f 的值, 我们选择 SK5/SF5 来设计一个消色差物镜。表 5-2 是它们的热特性参数。图 5-2 给出了该物镜的结构参数图。

作为对比, 我们同时给出了同一孔径、焦距相同的传统消色差物镜 (KzFSN4/PK50) 的校正结果。图 5-3 是对应的结构参数。

图 5-4 说明了两种消色差物镜高斯像面位置、相对焦距变化以及离焦量与温度关系。显然, 经过热设计的 SK5/SF5 组合具有更大的优势。计算表明, 对普通的消色差物镜 KzFSN4/PK50, 相对焦距变化 $\Delta f'_T / f'_0$ 是 $3.3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 而对消色差物镜 SK5/SF5 来说, 相对焦距变化 $\Delta f'_T / f'_0$ 为 $10^{-7}/^\circ\text{C}$, 它们的绝对离焦量 $\Delta f'_T$ 分别为 $0.15\text{mm}/^\circ\text{C}$ 和 $4.9 \times 10^{-4}\text{mm}/^\circ\text{C}$, 消热的 SK5/SF5 组合其焦距变化量要比普通的 KzFSN4/PK50 组合小 330 倍。

表 5-2 SK5/SF5 消色差物镜的热特性参数

玻璃	n_d	v	$B_g \times 10^6$	$X_g \times 10^6$	$X_f \times 10^6$
SK5	61.03	1.5914	3.8	5.5	-0.93
SF5	31.96	1.6776	6.2	8.2	-0.95

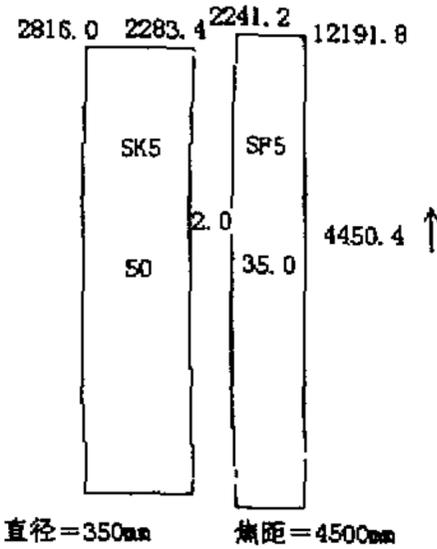


图 5-2 SK5/SF5 消色差物镜的结构参数图

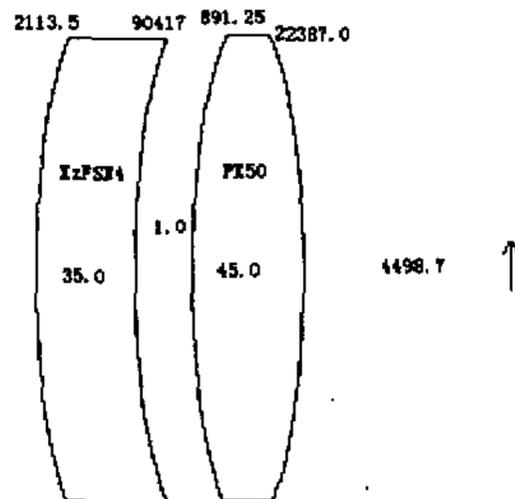


图 5-3 KzFSN4/PK50 消色差物镜的结构参数图

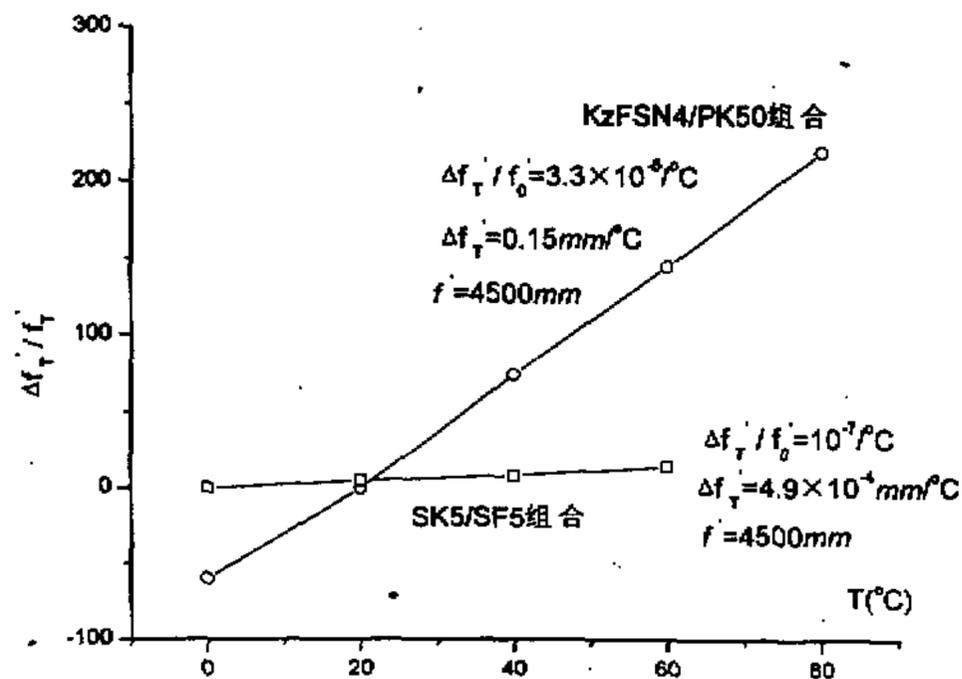


图 5-4 均匀温度变化下高斯像面的位置变化

5.2.2 径向梯度温度分布下的无热设计

由前面梯度温度分布对光学系统成像质量影响的讨论可以看出：在由多个透镜组成的光学系统中，热波像差的校正可以由多个分立透镜元件互相补偿。

随着光学设计和光学工艺的发展，以及光学系统热设计重要性的逐步增强，一些光学材料生产厂家研制出专门用于光学热设计的玻璃。肖特和迈恩公司研制的新型玻璃，其热光系数 Γ_g 值可以相当小，甚至可以忽略为零。这些光学玻璃的出现，为消除有径向梯度分布温度影响的消色差物镜的设计提供了可能的光学材料。表 5-3 列出了六种 Γ_g 值较小的光学玻璃的热特性参数^[96]。

表 5-3 一些光学玻璃的热特性参数

玻璃牌号	ν	$X_g \times 10^7$	$\Gamma_{rel} \times 10^6$	$\Gamma_{abs} \times 10^6$	n_c	$X_f \times 10^6$
FK51	85	136	0.27	-2.4	1.4876	-26.9
PK51	76	147	-1.0	-4.26	1.5340	-30.4
FK6	67.2	112	2.3	-0.63	1.4479	-20.1
3036	65	113	1.87	-0.69	1.5833	-20.6
3038	53.8	121	-0.60	-2.98	1.6320	-24.7
3136	42.6	103	4.4	2.08	1.4479	-16.3

我们可以尝试 FK51 和 3038 这样的组合来实现透镜的无热设计。从上表看，六种材料都具有比较高的线性膨胀系数，其值在 100×10^{-7} 到 150×10^{-7} 之间。这么高的 X_g 值，正是补偿热光系数 Γ_g 表达式中的 $B_g/(n-1)$ 项所需要的。由于有这么高的热膨胀系数，在非均匀温度场中，光学元件受热也不均匀，这样就会出现热应力。这些热应力引起附加热波像差和应力热条纹。当温度梯度达到光学成像系统所不期望的数值时，这种现象就需要特别注意。这些无热玻璃的热膨胀系数大致同钢的热膨胀系统接近，这一点恰好符合和装配材料相匹配的条件，避免了由于装配材料的热膨胀引起的应力。

下面我们计算 FK51 和 3038 组合，焦距 4500mm，孔径为 350mm 的消

色差物镜。由前面的计算可以知道，SK5/SF5 组合的消色差物镜对均匀温度有着较强的校正作用，在 20°C 的温度变化下，其绝对离焦量为 $20 \times 4.9 \times 10^{-4} = 0.01\text{mm}$ ，而普通的消色差物镜 KzFSN4/PK50 的离焦量是 SK5/SF5 组合的 300 多倍。现在我们来考察一下它在径向梯度温度分布时的情况。

图 5-5 是在轴上和边缘温度差为 1.53°C 的径向温度梯度分布的情况下，对上述 SK5/SF5 组合系统光线追迹的结果。可以算出 $\rho = \frac{1.53}{175^2} = 5 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}^2$ 。曲线 1 代表的是均匀温度变化的情形；曲线 2 是离焦量为 1.63mm 位置的波像差，大约 0.5λ ；曲线 3 是原始位置的波像差，大约为 2λ 。事实上，曲线 1 和曲线 2 之间的差异对应大约 0.23λ 的球差。这表明由径向温度梯度引起的离焦量要比均匀温度变化引起的离焦量大得多。

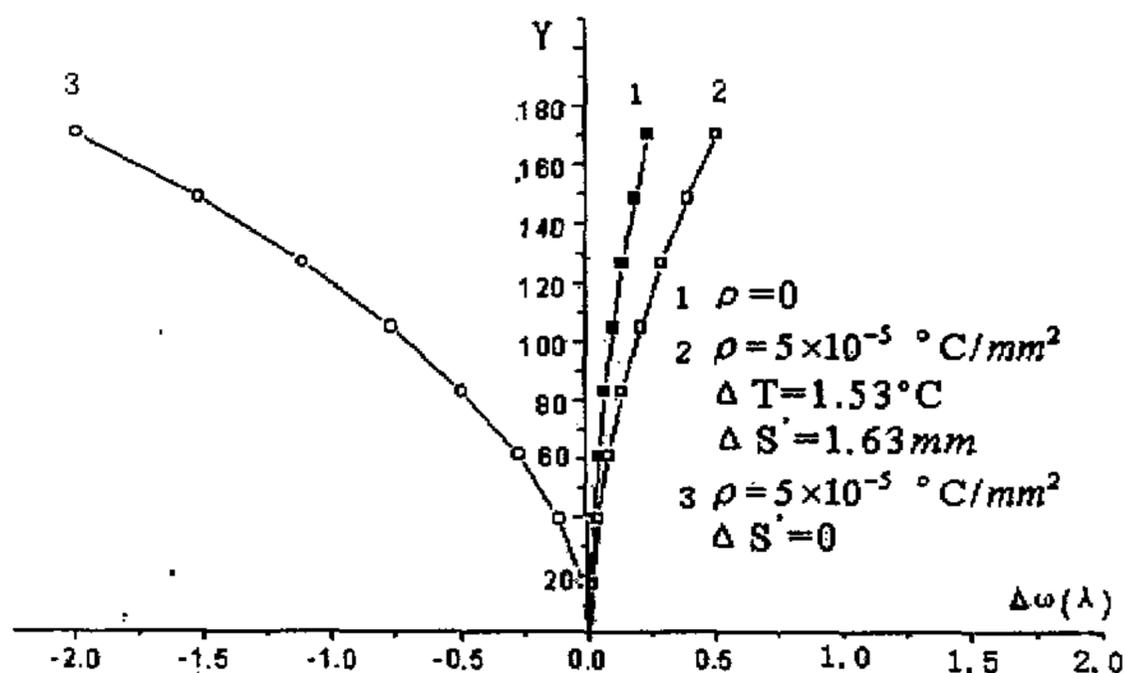


图 5-5 消色差物镜 SK5/SF5 的波像差

图 5-6 是 FK51/3038 组合消色差物镜的结构参数图。图 5-7 是 FK51/3038 组合的波像差，其中，抛物线温度常数 ρ 按照上述 SK5/SF5 组合的两倍来选定，即： $\rho = 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}^2$ ，可以得出此时轴上和边缘的温度差是 3.05°C 。由图 5-7 可以看出，曲线 1 是均匀温度变化时离焦量像面位置的波像差，曲线 2 是新的离焦像面位置的波像差，而曲线 3 是初始像面位置的波像差。曲线 2 和曲线 3 重合，都有 0.1λ 的波像差，而均匀温度变化时的曲线却有 0.23λ 的波像差。曲线 1 和 2、3 之间的差对应着温度梯度引起的像差

变化。经过计算，在固定像面和最佳像面之间的离焦量是 0.003mm，比用 SK5/SF5 组合的消色差物镜的离焦量小 500 多倍，而 SK5/SF5 组合恰好是均匀温度场中的优化组合结果。

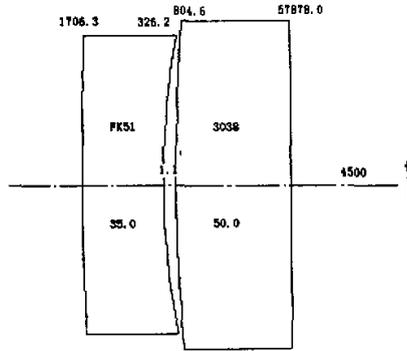


图 5-6 FK51/3038 消色差物镜的结构参数图

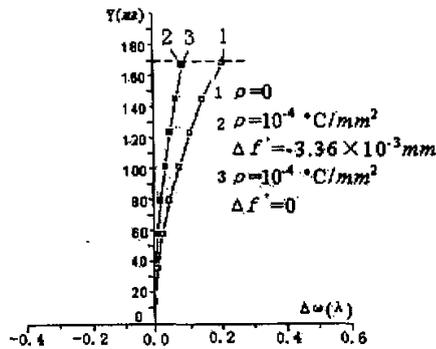


图 5-7 消色差物镜 FK51/3038 组合的波像差

5.3 程序实现和设计实例

在上述讨论的基础上，编制了光学系统热效应分析软件。它具有以下功能：

- 输入光学系统数据；
- 修改光学系统数据；
- 察看光学系统数据；
- 输入光学系统热特性参数；
- 查询玻璃的热特性参数；
- 对光学系统进行光线追迹，计算光学系统的像差。

本节对一个简单的光学系统进行计算分析。表 5-4 是这个光学系统的原始结构数据。表 5-5 是温度均匀变化 80°C 后光学系统的结构参数。图 5-8~图 5-11 是程序运行的一些界面。

表 5-4 原始结构数据

$\omega = 5^{\circ}$ $h=15$ $Ncolor=3$						
Lens data						
Surf	Type	Radius	Thickness	n_a	n	n_b
Stop	Sph	0.00	0.0000	1.00000	1.00000	1.00000
1	Sph	139.62	0.0000	1.56880	1.57597	1.56582
2	Sph	-121.58	10.0000	1.71720	1.73468	1.71037
3	Sph	-535.90	4.0000	1.00000	1.00000	1.00000
Reference Wavelength = 656.28 589.30 486.13						

表 5-5 均匀温度变化 80°C 后的系统结构数据

$\omega = 5^{\circ}$ $h=15$ $Ncolor=3$						
Lens data						
Surf	Type	Radius	Thickness	n_a	n	n_b
Stop	Sph	0.00	0.0000	1.00021	1.00021	1.00024
1	Sph	139.62	0.0000	1.56941	1.57660	1.56618
2	Sph	-121.58	10.0043	1.71800	1.73553	1.71104
3	Sph	-535.90	4.0020	1.00021	1.00021	1.00024
Reference Wavelength = 656.28 589.30 486.13						



图 5-8 程序运行的主界面

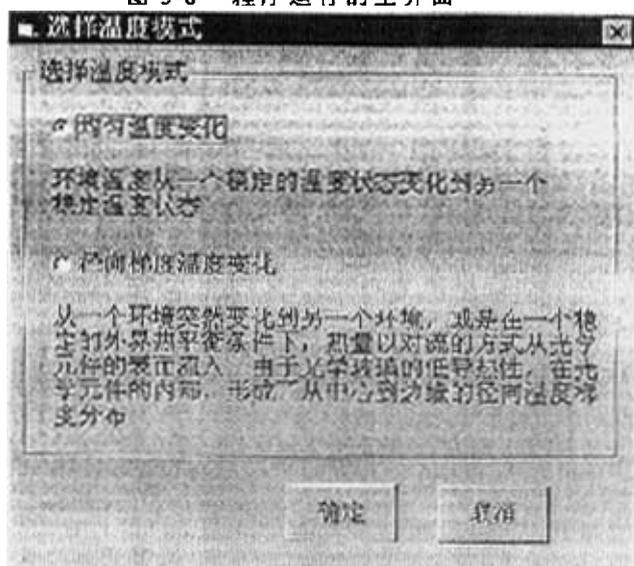


图 5-9 选择温度模式

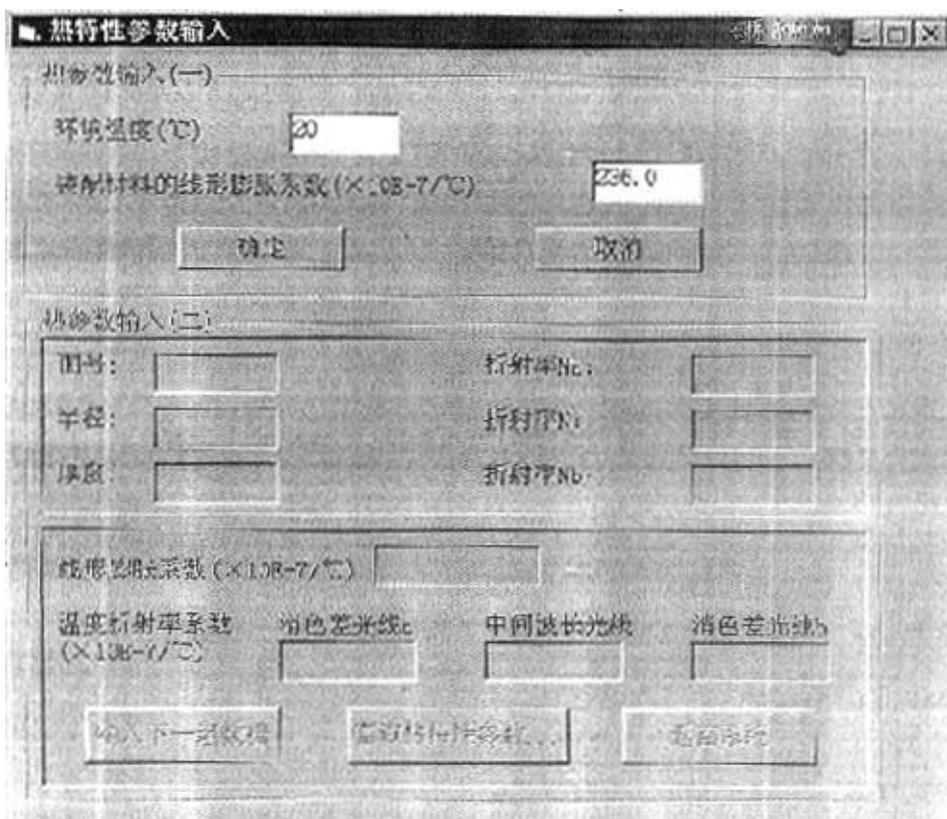


图 5-10 热特性参数输入

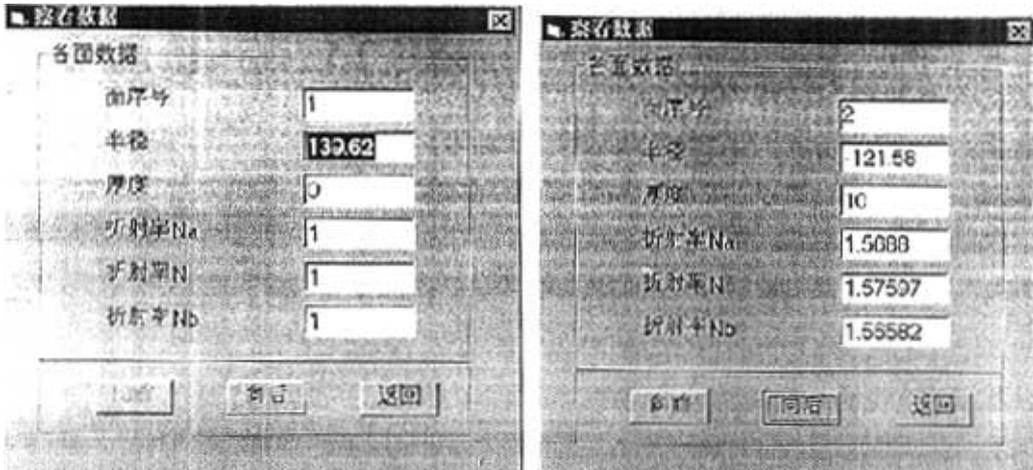


图 5-11 察看系统数据

5.4 小结

本章主要讨论了两种温度分布—均匀温度分布和径向梯度温度分布对光学系统成像质量的影响，以及光学系统的无热设计技术，即如何补偿温度变化对光学系统的影响等方面的内容，给出了设计实例说明了补偿过程，并编制了相应的程序。

第六章 研究总结与工作展望

6.1 研究总结

本课题包含几个相对独立的研究项目, 对它们进行研究的目的是为了
提高计算机辅助光学设计软件的智能化程度。本论文主要包括以下内容:
将遗传算法应用于光学系统的优化设计, 实现了光学系统优化过程中光学
结构面数(元件)的自动增减; 提出了一种同时求解多组元全动型变焦距
系统组元焦距和组元间隔等高斯光学参数的新方法, 并应用新方法设计出
光学系统的初始结构; 研究了光学系统的热效应问题, 讨论了温度变化对
光学系统结构参数的影响和补偿这些影响的方法(光学系统的无热设计问
题), 并编程实现。

具体说来, 在研究过程中, 本课题主要取得了以下几个方面的成果与
创新:

(1)将遗传算法移植于光学系统的优化设计中, 构造了相应的数学模
型, 并编程实现了算法。该方法克服了以往优化算法(包括局部优化算法
和全局优化算法)中光学面(元件)无法自动增减的缺点, 首次实现了光
学面的自动增减, 提高了光学系统优化设计的水平。

遗传算法在优化过程中将需要优化的光学结构编码成为二进制字符串
组成一代, 然后对当前代进行选择、杂交和突变来产生下一代, 并重复进
行直至筛选出满足条件的光学结构。这种算法克服了以往优化算法(包括
局部优化算法和全局优化算法)不能实现光学面自动增减的缺点。设计实
例证明遗传算法是一种有效的光学设计优化算法。

(2)对简单变焦距系统高斯光学参数的求解方法进行了推导和总结, 对
多组元全动型变焦距系统, 提出了一种新型的求解其高斯光学参数的方
法, 并应用新方法设计出光学系统的初始结构。

这种新方法在求解多组元全动型变焦距系统高斯光学参数的过程中,
不再区分变倍组与补偿组的概念, 统一将变焦距系统运动组元的移动距离
和焦距作为变量, 并将组元的 F 数作为约束条件, 提出了一种能同时求解
多组元全动型变焦距系统在每个变焦位置高斯光学参数的计算方法, 并给
出了设计实例, 证明了算法的可行性。

(3)系统地研究了变焦距系统初始结构的求解方法, 分析了变焦距系统

的像差特点和设计原理,在此基础上结合求解变焦距系统高斯光学参数的过程,编制了相应的软件并设计了实例,实现了自动匹配组元参数,然后将组元组合起来整体优化的功能,提高了光学系统设计的智能化程度。

(4)研究了光学系统的热效应问题,讨论了温度变化对光学系统的影响和补偿这些影响的方法即光学系统的无热设计方法,并编程加以实现。

通常设计的光学系统,都只考虑在常温、常压下光学材料的特性,在此基础上对成像质量进行评估。对于在正常条件下使用的光学系统来说,这样的处理方法是可行的。而对于处在空间环境下的光学系统,它们所承受的温度与地面相差极大,光学材料的特性(折射率、厚度等参数)都将发生变化,从而引起成像质量的变化。因此在地面上设计好的系统,如果不考虑空间环境中温度等因素变化所带来的影响,就会给系统工作的稳定性带来很大的波动。所以本部分主要研究了两种温度分布—均匀温度分布和径向梯度温度分布对光学系统成像质量的影响,以及光学系统的无热设计技术,即如何补偿温度变化对光学系统的影响,并给出了设计实例说明了补偿过程。

以上的研究成果发表了如下论文:

(1)投往 Intenational Optical Design Conference 2002 的《Method of determining Gaussian parameters for zoom systems with multiple moving lens groups》;

(2)将于《计算物理》2002年刊出的《变焦距镜头初始结构智能化设计方法》;

(3)将于《光学学报》2002年 Vol.22, NO.7 上刊出的《多组元全动型变焦距透镜高斯光学参数的求解方法》;

(4)将于《光学学报》2002年 Vol.22, NO.3 上刊出的《基因算法在光学系统优化中的应用》;

(5)于《光学技术》2000年 Vol.26, No.5 刊出的《逃逸函数算法及其在光学设计中的应用》;

(6)于《北京理工大学学报》2000年 Vol.20, No.1 刊出的《光学系统热效应及分析软件研制》。

6.2 工作展望

本论文在完成上述工作的同时，对于所研究的内容还存在以下需要改进的方面：

(1)研究遗传算法应用于光学系统的优化设计时，在建立数学模型的过程中，只是针对照相机系统，其通用性还不够；在遗传算法的编程实现过程中，运算量比较大，杂交率和突变率不易控制，下一步的工作是设法解决这些问题，提高遗传算法的优化效率。

(2)求解变焦镜头初始结构过程中，自动化设计的程度还有待进一步的提高。

(3)在光学系统热效应研究过程中，讨论了均匀温度变化和径向梯度温度分布变化对光学系统成像质量的影响，并提出了无热设计的方法来补偿这种影响。但在软件实现过程中，只能计算温度变化对光学系统成像质量的影响，还不能够自动进行系统的无热设计，只能手动匹配光学材料来消除光学系统的热效应，软件还有待进一步完善。

参 考 文 献

- [1] 袁旭沧. 光学设计. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [2] 袁旭沧. 现代光学设计方法. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [3] Brixner B. Lens design and local minima. *Applied Optics*, 1981, 20: 384-387.
- [4] Weller S. W. Simulated Annealing: What good is it?. *Proceeding of Current Developments in Optical Engineering II*. SPIE, 1987, 818: 264-275.
- [5] Forbes G., Jones A. Towards global optimization with adaptive simulated annealing. *Proc. SPIE*, 1990, 1354: 144-153.
- [6] Isshiki M., Ono H., Hiraga K., Ishikawa J., Nakadate S. Lens Design: Global Optimization with Escape Function. *Optical Review*, 1995, 2(6): 463-470.
- [7] Isshiki M., Ono H., Nakadate S. Lens Design: An Attempt to Use 'Escape Function' as a Tool in Global Optimization. *Optical Review*, 1995, 2(1): 47-51.
- [8] 张丽琴, 王涌天, 郝群, 李林, 一色真幸. 逃逸函数算法及其在光学设计中的应用. *光学技术*. 2000, 26(5): 432-434.
- [9] Betensky E. Postmodern lens design. *Opt. Eng.*, 1993, 32(8): 1750-1756.
- [10] Xiaogang Chen and Kimiaki Yamamoto. An experiment in genetic optimization in lens design. *Journals of Modern Optics*, 1997, 44 (9): 1693-1702.
- [11] Holland J. H., Reitman J. S. *Cognitive Systems Based on Adaptive Algorithm*. In: Waterman D. A. & Hayes - Roth F Eds. *Pattern Directed Inference Systems*, New York: Academic Press, 1978, 313-329.
- [12] Srinivas M, Patnaik L M. Genetic algorithm: a survey. *IEEE Computer Magazine*. 1994, 17-26.
- [13] Martin S, Rivory J, Schoenauer M. Simulated Darwinian evolution of homogeneous multi-layer systems: a new method for optical coatings design. *Optics Communications*, 1 September, 1994: 503-506.
- [14] Saha D, Purkayastha M D, Mukherjee A. An approach to wide area WDM optical network design using genetic algorithm. *Computer Communications*, 1999, 22 :156-172.
- [15] Kuper T. G., Harris T. I., Hilbert R. S. Practical lens design using a global method. *Proc. Optical Society of America*, 1994, 22: 46-51.
- [16] Xiaogang Chen and Dajian Lin. Generalized simulated annealing and local minimum. *Proc. Sino-Japan Symposium on Engineering Optics*, 1992, 90-92
- [17] Hisashi Wada. Optical design and current fabrication of high magnification zoom lens. *Optical and Electro-Optical Engineering Contact*, 1998, 36(10): 26-32.

- [18] Mann A. Infrared zoom lenses in the 1990s. *Optical Engineering*, 1994, 33: 109-115.
- [19] Meyers M. M. Diffractive optics at Eastman Kodak Co. *Proc. SPIE*, 1996, 2689: 228-254.
- [20] *Proc. SPIE (Zoom Lenses)*, Vol. 2539, 1995
- [21] Session on Zoom Optics, *Proc. SPIE*, 1998, 3482: 202-252.
- [22] 王涌天. 变焦镜头的智能化设计方法研究: 国家自然科学基金会申请书, 1999.
- [23] 电影镜头设计组. 电影摄影物镜光学设计. 北京: 中国工业出版社, 1971.
- [24] Thomas H Jamieson. Thermal effects in optical systems. *Optical Engineering*, 1981, 20(2): 156-160.
- [25] Down S Garcia-Nunez, David Michikal. The design of athermal infrared optical systems. *SPIE*, 1989, 1049: 82-85.
- [26] 李林, 王焯. 环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望. *光学技术*, 1997(5): 26-29.
- [27] 李林, 王焯, 张丽琴, 张波. 光学系统热效应及分析软件研制. *北京理工大学学报*, 2000, 20(1): 112-114.
- [28] 马继光. 温度变化对空间光学系统成像质量的影响: [学位论文]. 北京: 北京理工大学光电工程系, 1993.
- [29] 王焯. 环境温度对光学系统影响的研究及环境温度分析软件的研制: [学位论文]. 北京: 北京理工大学光电工程系, 1998.
- [30] Paul Benham, Michael Kidger. Optimization of athermal systems. *SPIE*, 1990, Vol.1354.
- [31] Optical Research Associates. Code V Reference Manual, 1998.
- [32] Lambda Research Corporation. The OSLO software and Optics Reference, 1998.
- [33] 北京理工大学技术光学教研室. 微机用光学设计软件包 SOD88 使用说明书, 1990
- [34] 王涌天,何定,张思炯. GOLD—新一代复杂光学系统分析优化软件. *光学工程*, 1997, 24(3): 42-48.
- [35] Fraser, A. Simulation of genetic systems bu automatic digital computers: I. introduction. *Australian Journal of Biological Science*, 1957, 10: 484-491.
- [36] Fraser, A. Simulation of genetic systems by automatic digital computers: VI. *Australian Journal of Biological Science*, 1960, 13: 150-162.
- [37] Fraser, A. Simulation of genetic systems. *Journal of Theoretical Biology*, 1962, 2: 329-346.
- [38] Holland J. H. *Adaptation in Nature and Artificial Systems*. MIT Press, 1992.
- [39] Bageley J. D. The Behaviour of Adaptive System which Employ Genetic and Correlation Algorithm. *Dissertation Abstracts International*, 1967, 28(12).

- [40] De Jong K. A. An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems: [Ph.D Dissertation Abstracts]. University of Michigan, No.76-9381, 1975.
- [41] Goldberg D. E. Genetic algorithm in search optimizing & machine learning. Addison Wesley, Reading, MA, 1989.
- [42] Davis L. Handbook of Genetic Algorithm. Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [43] Koza J. R. Genetic Programming, on the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT Press, 1992.
- [44] Koza J. R. Genetic Programming II, Automatic Discovery of Reusable Programs. MIT Press, 1994.
- [45] 陈国良. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [46] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理与应用. 北京: 国防出版社, 1999.
- [47] [日]玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计. 北京: 科学出版社, 2000.
- [48] 刘勇. 非数值并行算法(二)—遗传算法. 北京: 科学出版社, 1995.
- [49] 王忆峰. 多传感器数据融合技术. 红外技术, 1997, 19(2): 34-36.
- [50] 闫祥福. 多光谱实时图像融合系统配准的研究: [硕士学位论文]. 北京理工大学, 1999.
- [51] 吴立德. 计算机视觉. 上海: 复旦大学出版社, 1993.
- [52] Michalewicz Z. Genetic Algorithm and Optimal Control Problem. In: Proc. of 29th IEEE Conf. on Decision and Control, 1990, 1664-1666.
- [53] 席裕庚, 柴天佑, 恽为民. 遗传算法综述: 控制理论与应用. 1996, 13(6): 697-708.
- [54] 周明, 孙树栋, 彭炎午. 基于遗传模拟退火算法的机器人路径规划. 航空学报, 1998, 19(1): 118-120.
- [55] 周明, 孙树栋, 彭炎午. 用遗传算法规划移动机器人路径. 西北工业大学学报, 1998, 16(4).
- [56] 孙树栋, 曲彦宾. 遗传算法在机器人路径规划中的应用研究. 西北工业大学学报, 1998, 16(2).
- [57] 张丽琴, 王涌天, 李林, 程雪岷. 基因算法在光学系统优化中的应用. 光学学报, 2002 (已录用, 待发)
- [58] 何献忠等. 优化技术及其应用. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [59] 韦鹤平. 最优化技术应用. 上海: 同济大学出版社, 1987.
- [60] 张文修, 梁怡编 遗传算法的数学基础. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [61] 邹燕明. 小生境遗传算法的研究与应用. [博士论文], 北京理工大学, 1999.
- [62] Jomikow C. Z, Michalewicz Z. An Experimental Comparison of Binary and Floating Point Representation in Genetic Algorithm. In Proc. of 4th Int. Conf. on genetic algorithm, Morgan Kaufmann, 1991, 31-36.

- [63] 张以谟. 应用光学. 天津: 机械工业出版社, 1988.
- [64] 胡玉蹊, 安连生. 应用光学. 合肥: 中国科技大学出版社, 1996.
- [65] Pahomov I I. Zoom systems. Beijing: National defense press. 1980, 104-141
- [66] 刘崇进, 史光辉. 机械补偿法变焦距镜头三个发展阶段的概况和发展方向. 应用光学, 1992(2): 1-5.
- [67] 张波. 变焦距镜头高斯光学研究: [学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2001.
- [68] 余之江, 项敏达. 变焦距照相物镜. 光学设计论文集, 1985(7): 33-38.
- [69] Hisayuki Masumoto. Development of zoom lenses for camera and Technical topics, SPIE, 1998, 3482: 202-212.
- [70] 孙惟. 135^{*}照相机变焦距物镜设计的研究—以 $f/28-85$ 为例: [学位论文]. 北京: 北京理工大学, 1989.
- [71] 叶雷. 光学系统 CAD 专家系统 135 相机照相物镜部分: [学位论文]. 北京: 北京理工大学, 1990.
- [72] 王绮, 吴强, 黄惠杰等. 多组元全动型变焦距物镜高斯光学. 光学学报, 1999, 19(6): 830-834.
- [73] 张丽琴, 王涌天, 李林. 多组元全动型变焦距透镜高斯光学参数的求解方法. 光学学报, 2002 (已录用, 待发)
- [74] 苗苞. 变焦距镜头. 应用光学, 1975(2): 59-63.
- [75] 周武亨. 机械补偿型变焦镜头的分类及新型变焦镜头的近轴分析. 应用光学, 1984(2): 23-30.
- [76] 王书泽, 李元康. 谈谈变焦距物镜的高斯光学设计问题. 电影光学, 1978(2): 22-36.
- [77] 刘肖民. 变焦距物镜的小型化. 电影光学, 1982(6): 8-14.
- [78] Bergstein L. General theory of optically compensated varifocal systems. J. Opt. Soc. Am., 1958, 48(3): 154-171.
- [79] Pegis R. J, Peck G. First order design theory for linearly compensated zoom systems. J. Opt. Soc. Am., 1962, 52(8): 905-911.
- [80] Jamieson T. H. Thin-lens theory of zoom systems. Opt. Acta, 1970, 17(8): 565-584.
- [81] Andrey V. Ivanov. Automatic computation of displacements of zoom lens movable. SPIE Conference on Optical Design and Analysis Software, 1999, Vol. 3780, pp 191-198.
- [82] Robert. E. Aldrich. Three elements infrared optically compensated two-position zooms for commercial FLIRs. SPIE Conference, 1987, vol. 2539, pp87-107.
- [83] R. Barry-Johnsom, Chen Feng. Zoom lenses with a single moving element. SPIE Conference on International lens design. 1990, 1354: 676-683.
- [84] 扬荣仙. 变倍目镜光学设计. 光学技术, 1992, 18(6): 19-25.

- [85] Chuang F. M., Chang M. W. Solution areas of three-component afocal zoom system. *Optik*, 1995, 101(1): 10-16.
- [86] Walther A.. Zoom lenses and computer algebra. *Journals of Optical Society of America A*. 1999, 16(1): 198-204.
- [87] 崔军, 何国雄. 全动型变焦距物镜光焦度分配及倍率选段的优化规范. *光子学报*, 1994, 23(1): 59-63.
- [88] Neil, I. A. Optimization glitches in zoom lens design. *SPIE*, 1997, 3129: 158-80.
- [89] B. Barry Johnson, James B. Hadaway, Tom Burleson, Bob Watts, Ernest D. Park. All-reflective four-element zoom telescope design and analysis. *SPIE Conference on international lens design conference*, 1990, 1354: 669-675.
- [90] Robert M. Malone, Brent C. Frogget, David A. Grafton, Frank R. Mitchell. Design of a twenty-element long focal zoom lens. *SPIE Conference on Current Developments in Optical Engineering IV*, 1990, 1334: 43-48.
- [91] Kazuo Tanaka. Gaussian beam zoom converter consisting of movable three-component. *Optik*, 1999, 110(10): 483-486.
- [92] 陶纯堪. 变焦距光学系统变焦方程. *科学通报*, 1977, 22(4,5): 207-213.
- [93] 陈开明. 非线性规划. 上海: 复旦大学出版社. 1987, 282-307.
- [94] 陈宝林. 优化理论与算法. 北京: 清华大学出版社. 1989, 508-532.
- [95] 施阳, 李俊, 王惠刚等. *MATLAB 语言工具箱—TOOLBOX 实用指南*. 西安: 西北工业大学出版社. 1998, 100-121.
- [96] 李仕贤, 李林. *光学设计手册(修订版)*. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [97] Tryggve Baak. Thermal Coefficient of Refractive Index of Optical Glasses. *Journal of Optical Society of American*, 1959, 59(7): 851-857.
- [98] HONGYuan, Deyin Zhang, Wen Liu, Wenzhi Chen, Guofang Zhang, Ge Zhang, And Wenxiong Lin. Measurement of refractive indices and thermal refractive-index coefficients of 7.5-mol% Nb:K₂TiOPO₄ crystal. *APPLIED OPTICS*, 1999, 38(6): 987-990.
- [99] 乔亚天. *梯度折射率光学*. 北京: 科学出版社, 1991.
- [100] 张思炯, 傅瑞斯, 王涌天. 梯度折射率介质的近轴光线追迹. *云光技术*, 1996, 28(3): 1-4.
- [101] Kimball Straw. *Control of thermal focus shift in plastic-glass lenses*. *SPIE*, 1980, 237.
- [102] David S Gray. Athermalization of Optical Systems. *Journal of Optical Society of American*, 1948, 38(6): 542-546.

- [103] 张丽琴. 光学系统智能化设计的研究: 开题报告. 1999.
- [104] Veronics Povey. Athermalization Techniques in Infrared Systems. SPIE, 1986, 655: 142-153.
- [105] 冯耀霖. Microsoft Fortran PowerStation V4.0 入门. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [106] 张宏. Visual Basic 5.0 简明参考手册. 北京: 电子工业出版社, 1998.

致 谢

本文是在我的导师王涌天研究员和李林教授的悉心指导和严格要求下完成的。在课题的研究过程中，他们及时提出指导意见，帮助解决各种疑难问题，为课题的研究和论文的顺利书写提供了良好的学习和工作环境。他们严谨的治学态度和对科学不懈追求的精神给了我极大的教育和影响，将会使我受益终生。在此对他们表示衷心的感谢和崇高的敬意！

在课题的研究过程中，我还得到了教研室安连生教授以及 421 教研室各位老师的热心指导和帮助，在此对他们表示衷心的感谢。

教研室的哈涌刚博士在课题的研究过程给予了大力的帮助和支持，在此一并对他表示感谢。特别感谢程学岷博士在光学系统初始结构设计等方面给予的帮助和支持。

感谢我的爱人李世鹏博士在生活、学习上给予的支持和帮助。在我遇到困难和挫折时，他的鼓励和支持使得我有信心继续进行课题的研究。

最后我要感谢我远方的父母、亲人对我漫长求学路上给予的支持和关心，他们从来都是默默地理解、支持我。正是有了他们的理解和支持，我才能够顺利的完成学业和课题的研究。

攻读博士学位期间发表的主要论文

1. Method of determining Gaussian parameters for zoom systems with multiple moving lens groups. Intenational Optical Design Conference 2002
2. 变焦距镜头初始结构智能化设计方法. 计算物理, 2002(录用待发)
3. 多组元全动型变焦距透镜高斯光学参数的求解方法. 将在光学学报 Vol.22, NO.7, 2002 上发表
4. 基因算法在光学系统优化中的应用. 将在光学学报 Vol.22, NO.3, 2002 上发表
5. 逃逸函数算法及其在光学设计中的应用. 光学技术. Vol.26, No.5, Sept. 2000.
6. 光学系统热效应及分析软件研制. 北京理工大学学报, Vol.20, No.1, Feb. 2000.