



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

大变倍比中波红外连续变焦系统设计

作者姓名: 强子豪

指导教师: 武力 副研究员

中国科学院西安光学精密机械研究所

学位类别: 工程硕士

学科专业: 光学工程

培养单位: 中国科学院西安光学精密机械研究所

2019 年 6 月

Design of Large Zoom Ratio Medium Wave Infrared Continuous
Zoom System

A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Engineering
In Optical Engineering

By

Qiang Zihao

Supervisor : Professor Wu Li

Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics,
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: 强子豪
日期: 2019年5月20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: 强子豪
日期: 2019年5月20日

导师签名: 庄力
日期: 2019年5月20日

科研道德声明

秉承研究所严谨的学风与优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中所引用的内容都已给予了明确的注释和致谢。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 强子豪 日 期： 2019年5月20日

知识产权声明

本人完全了解中科院西安光学精密机械研究所有关保护知识产权的规定，即：研究生在所攻读学位期间论文工作的知识产权单位系中科院西安光学精密机械研究所。本人保证离所后，发表基于研究生工作的论文或使用本论文工作成果时必须征得产权单位的同意，同意后发表的学术论文署名单位仍然为中科院西安光学精密机械研究所。产权单位有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；产权单位可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名： 强子豪

日 期： 2019年5月20日

导师签名： 王力

日 期： 2019年5月20日

摘 要

因为红外变焦光学系统较强的抗干扰能力、环境适应能力、隐蔽性好、可以全天候工作等独特的优点，因此在防空预警、战场跟踪探测等军事领域和安防、医疗等生活领域越来越受到重视。另外有别于传统的定焦红外镜头和换挡式的红外变焦镜头，红外连续变焦镜头既可以实现大视场的搜索探测，又能实现小视场的跟踪观察，同时不会造成目标的丢失。随着应用场景的不断拓展，对红外连续变焦镜头有了越来越高的要求，不仅要求系统的成像质量良好，而且要求系统具有更高的变倍比，更大的变焦范围，同时做到小型化与轻量化，使得系统的设计难度增大。

基于此，本文首先回顾了近年来国内外各种红外连续变焦系统的研究成果，分析对比了几种变焦结构的优劣，再结合了变焦距系统的理论基础，分析推导了连续变焦系统的微分方程，并求出了高斯解。通过研究对比各种设计方案和理念，选取了一种改良型的双组联动变焦补偿结构，最终设计了一套制冷型红外中波大变倍比连续变焦光学系统。本系统的变焦范围为 $15\text{mm}\sim 550\text{mm}$ ，工作波段为 $3.7\mu\text{m}\sim 4.8\mu\text{m}$ ，F 数固定为 4，视场范围为 $44.58^\circ\sim 1.28^\circ$ ，所用探测器为 640×512 制冷凝视焦平面型探测器，像元尺寸为 $15\mu\text{m}$ 。通过引入一定的非球面提高了像质，将探测器的冷光阑作为系统的孔径光阑以达到 100% 的冷光阑效率，同时使用二次成像技术压缩透镜口径。像质分析结果表明，系统在所有焦距的全视场范围内，MTF 曲线在奈奎斯特频率处均不低于 0.25，且接近衍射极限，点列图弥散斑在一个像元尺寸以内，畸变小于 5%，像质优良。

最后，本文对系统进行了冷反射分析和公差分析，采用后组调焦补偿的方法消除了系统因温度变化产生的离焦，针对凸轮曲线的优化，本文提出一种凸轮曲线优化设计思路，采用分段处理的方式，在曲线较陡的区间内，利用四次多项式划分横坐标间距，使其弧长（旋转角度）逐渐增大；在曲线较缓的区间内均分弧长，并对本系统的凸轮曲线进行优化分析，结果表明可以显著改善凸轮曲线，减小曲线压力角，优化后的曲线平滑无拐点，变焦流畅，可以有效改善凸轮的整体性能。最终设计的系统像质良好，结构紧凑，满足设计要求。

关键词：中波红外，连续变焦，大变倍比，凸轮曲线

Abstract

Because the infrared zoom optical system has strong anti-jamming ability, environmental adaptability and good concealment, so it can work all-weather and have other unique advantages, it has attracted more and more attention in military areas such as air defense early warning, battlefield tracking and detection, security, medical and other life fields. In addition, unlike the traditional fixed-focus infrared lens and shift-type infrared zoom lens, infrared continuous zoom lens can not only realize the search and detection of large field of view, but also realize the tracking and observation of small field of view without causing the loss of target. With the development of application scenarios, there are more and more requirements for infrared continuous zoom lens. It requires not only good imaging quality of the system, but also higher zoom ratio and larger zoom range. Miniaturization and lightweight make the design of the system more difficult.

Based on this situation, this paper first reviews the research results of various infrared continuous zoom systems at home and abroad in recent years, analyses and compares the advantages and disadvantages of several zoom structures, and then combines the theoretical basis of zoom system, deduces the differential equation of continuous zoom system, and obtains the Gauss solution. By studying and comparing various design schemes and concepts, an improved two-group linkage zoom compensation structure is selected. Finally, a refrigerated medium-wave large zoom ratio continuous zoom optical system is designed. The zoom range of the system is 15mm~550mm, the working band is 3.7 μ m~4.8 μ m, the F number is fixed to 4, the field of view is 44.58°~1.28° and the detector used is 640×512 refrigerated staring focal plane detector with the pixel size of 15 μ m. The image quality is improved by introducing some aspheric surfaces. The detector's cold diaphragm is used as the aperture diaphragm of the system to achieve 100% cold diaphragm efficiency. At the same time, the secondary imaging technology is used to compress the aperture of the lens. The image quality analysis results show that the MTF curve is not less than 0.25

at Nyquist frequency in all focal lengths of the system, and it is close to the diffraction limit. The dot array scattered spot is within one pixel size, and the distortion is less than 5%. The image quality is excellent.

Finally, the cold reflection analysis and tolerance analysis of the system are carried out. The defocusing caused by temperature change is eliminated by using the method of post-group focusing compensation. Aiming at the optimization of cam curve, this paper proposes an optimal design idea of cam curve. In the steeper section of the curve, the arc length (rotation angle) of cam curve is gradually increased by dividing the abscissa space with quadratic polynomial, and the arc length is evenly divided in the slower section of the curve. The cam curve of the system is optimized and analyzed. The results show that the cam curve can be significantly improved, the pressure angle of the curve can be reduced, the optimized curve is smooth without inflection point, the zoom is smooth, and the overall performance of the cam can be effectively improved. The final design system has good image quality, compact structure and meets the design requirements.

Key Words: mid-wave infrared, continuous zoom, large zoom ratio, cam curve

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 红外变焦系统国内外研究现状.....	2
1.2.1 变焦距系统的发展历史.....	2
1.2.2 红外变焦系统国外发展现状.....	4
1.2.3 红外变焦系统的国内发展状况.....	8
1.3 论文的研究内容及结构安排.....	12
1.3.1 论文的研究内容.....	12
1.3.2 论文的结构安排.....	13
第二章 变焦系统基础理论	14
2.1 变焦系统基本概念和类型.....	14
2.2 变焦系统的分类.....	18
2.2.1 光学补偿式变焦距系统.....	19
2.2.2 机械补偿式变焦距系统.....	19
2.2.3 双组联动式变焦系统.....	20
2.2.4 全动型变焦系统.....	21
2.3 机械补偿系统及其变焦方程.....	21
2.4 变焦微分方程的分析讨论.....	23
2.5 本章小结.....	27
第三章 红外光学系统特点	28
3.1 红外辐射基本理论.....	28
3.2 红外探测器与 100%冷光阑效应	29
3.3 二次成像系统的设计.....	30
3.4 红外材料.....	31
3.5 无热化理论.....	33
3.5.1 无热化理论概述.....	33
3.5.2 无热化的几种方法.....	34

3.6 冷反射理论.....	35
3.6.1 冷反射的概念和产生条件.....	35
3.6.2 冷反射表征量 YNI 与 $I/IBAR$	35
3.7 红外变焦系统的设计方法.....	36
3.8 本章小结.....	37
第四章 变焦系统优化设计	38
4.1 光学系统技术指标的确定.....	38
4.2 补偿方式的和结构形式的选取.....	39
4.2.1 传统补偿方式的特点.....	39
4.2.2 改良型双组联动机械补偿法.....	41
4.3 初始结构确定.....	41
4.4 优化设计.....	42
4.5 像质评价.....	44
4.5.1 光学传递函数(MTF).....	44
4.5.2 点列图.....	45
4.5.3 畸变.....	46
4.6 本章小结.....	47
第五章 系统性能分析	49
5.1 环境适应性分析.....	49
5.1.1 系统在两个极端温度下的成像质量.....	49
5.1.2 温度补偿之后成像质量.....	52
5.2 冷反射分析.....	54
5.3 公差分析.....	55
5.4 凸轮曲线的研究.....	57
5.4.1 凸轮曲线高斯算法.....	57
5.4.2 凸轮曲线的拟合算法.....	59
5.5 本章小结.....	60
第六章 总结与展望	61
6.1 工作总结.....	62
6.2 工作展望.....	62

参考文献.....	63
致谢.....	67
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	69

图目录

图 1.1	变焦镜头实物图.....	3
图 1.2	不同焦距处系统结构图.....	6
图 1.3	不同焦距处系统结构图.....	6
图 1.4	300 倍变焦镜头实物.....	7
图 1.5	300 倍变焦系统结构图.....	8
图 1.6	不同焦距下月球图片.....	8
图 1.7	不同焦距处系统结构图.....	9
图 1.8	系统整体结构图.....	10
图 1.9	折射式变倍系统光路.....	11
图 1.10	变焦系统原理图.....	11
图 1.11	连续变焦系统图.....	12
图 2.1	物像交换原则图.....	15
图 2.2	物像交换位置之间的像面位移.....	16
图 2.3	共轭距关系图.....	17
图 2.4	共轭距 L 与 β 的关系	18
图 2.5	光学补偿式变焦距系统示意图.....	19
图 2.6	机械补偿式变焦距系统.....	20
图 2.7	双组联动型变焦系统.....	21
图 2.8	像移补偿图.....	22
图 2.9	变焦补偿关系示意图.....	24
图 2.10	系统换根图.....	26
图 2.11	正组补偿系统的最速变焦路线.....	26
图 3.1	电磁波谱.....	28
图 3.2	杜瓦瓶.....	29
图 3.3	冷光阑效率示意图.....	30
图 3.4	二次成像图.....	30

图 4.1	系统原理图.....	41
图 4.2	系统初始结构参数.....	42
图 4.3	连续变焦系统结构图.....	43
图 4.4	系统在不同焦距处的 MTF 曲线	44
图 4.5	系统在不同焦距时的点列图.....	46
图 4.6	畸变图.....	47
图 4.7	系统在不同焦距处的畸变曲线.....	47
图 5.1	系统不同焦距在-40℃时的 MTF 曲线	50
图 5.2	系统不同焦距在 60℃时的 MTF 曲线	51
图 5.3	系统不同焦距在-40℃时的 MTF 曲线	53
图 5.4	系统不同焦距在 60℃时的 MTF 曲线	54
图 5.5	80 次蒙特卡洛分析叠加的几何 MTF 结果	57
图 5.6	机械补偿式变焦距系统.....	58
图 5.7	变焦距系统凸轮曲线.....	59

表目录

表 1.1	光学系统指标.....	4
表 1.2	光学系统指标.....	9
表 3.1	红外材料特性.....	33
表 4.1	各变焦距系统的优缺点.....	40
表 5.1	变焦系统在-40℃时的离焦量	50
表 5.2	变焦系统在 60℃时的离焦量.....	51
表 5.3	长焦冷反射分析.....	54
表 5.4	短焦冷反射分析.....	55
表 5.5	公差等级表.....	56

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

自第二次世界大战起,当时的纳粹德国率先在战争中使用了红外夜视仪,从此各国均掀起了研究红外成像技术的浪潮。不同于可见光,红外成像技术利用的是物体本身辐射的红外线,可以利用目标物体和背景物体的红外辐射强度之间的差异来侦查目标,因此可以识别一些肉眼难以发现的隐藏目标;较长的波长使其具有良好的穿透能力,可以绕过大气中的尘埃、烟雾等,这种特点也决定了它抗干扰能力较强,工作时可以抵御环境中一些不利因素的影响,基本可以实现全天候工作。因为红外成像的特点,使其在军事侦查跟踪、防空预警、精确制导等方面有了广泛的应用,尤其近几年,红外成像技术在现代军事战争、航空航天等领域中,显现出了举足轻重的地位^[1]。红外探测器作为红外成像系统的核心部件,也在不断地发展进步,近年来广泛使用的第三代凝视焦平面探测器已具有良好的成像效果,目前正在发展中的第四代红外成像技术,具有更高的分辨率和更宽工作波段,势必会引领红外成像技术的再一次飞跃,在这种环境下,各国均已加大研发力度,抢占技术制高点。

由于红外成像技术的不断发展,它的应用领域也在不断的拓广。民用领域如小区的安防监控、疾病的诊断预防、工业无损检测、农作物胁迫检测等,尤其近年来在机载光电吊舱领域,同样取得了很多成果^[2]。传统的定焦镜头和换挡式的红外变焦镜头已不能满足人们的需求,定焦系统视场固定不变,容易受到外界客观环境的影响;而换挡式的红外变焦系统虽然可以实现视场的切换,但是在换挡的过程中极易造成目标物体的丢失,而连续变焦的红外镜头恰好可以克服这种问题,它可以实现大视场下搜索目标,然后连续稳定的变焦到小视场以观测目标详细信息,变焦过程中像面稳定^[3]。基于红外连续变焦系统的不断发展和应用领域的拓展,追求更大变倍比,更宽的变焦范围成为人们的关注目标,大的变倍比意味着更大的视野,长焦意味着可以监测更远的目标,这一切都会在未来战争中帮助我们快速准确地获取敌方信息,取得战争的主动权。此外,随着各种红外材料和透镜面型的诞生,红外变焦系统也逐步向小型化、轻量化发展,以便于各种场

合的携带和安装，同时，追求更高的成像质量依然是不变的主题^[4]。由此可见，对于大变倍比红外变焦系统的研究是一种必然趋势。

1.2 红外变焦系统国内外研究现状

1.2.1 变焦距系统的发展历史

变焦距系统的研究起源于 19 世纪的英国，数学家彼得巴洛将一块负透镜安装在伸缩式望远镜的镜组内，发现望远镜的放大倍率发生了改变，自此大大激发了人们对变焦距镜头的研究兴趣。到 19 世纪末期，欧洲已经出现了可变望远镜头，并且具备了一定的变焦能力，但同时也存在诸多问题。比如，镜头放大率改变的同时，相机需重新对焦；当放大倍率改变，即焦距发生变化时，镜头的有效光圈值也会不断变化，使得系统出现曝光过度或者不足，像质会大幅降低。20 世纪初期，美国的一位光学专家 Allen 在世界范围内首次利用“物像交换原则”设计了一款变焦镜头，它可以保证在最短和最长焦两个极限位置时，像面稳定；中间位置存在一定的像面漂移，但尚在可接受范围内。此后近 30 年的时间里，变焦镜头没有取得实质性的突破，自 30 年代起，因为电影行业的蓬勃发展，为了解决实际拍摄和放映中的许多实际问题，人们再次对变焦镜头产生了兴趣，设计了可用于实际的变焦镜头，此时的变焦镜头多为光学补偿变焦镜头，不具备连续变焦能力，只能在若干个焦距处获得稳定清晰的像面，限制了它的使用和推广。1932 年德国、英国、美国均已有成型并进入实用阶段的变焦镜头，因为变焦镜头镜片较多，在当年没有镀膜技术的前提下，镜头的整体透光率很低，像质比较差。

二战结束以后，电视的兴起真正的拉开了变焦镜头发展的帷幕，1958 年，被誉为“变焦镜头之父”的美国“Zoomar”公司创始人弗兰克·巴克为德国的福伦达公司设计了一款变焦镜头，该镜头利用光学补偿法实现了 36-82mm 的变焦，F 数为 2.8，这款变焦镜头是世界上第一款摄影用的变焦镜头，在当时引起了很大轰动。下图为这款镜头的实物图。

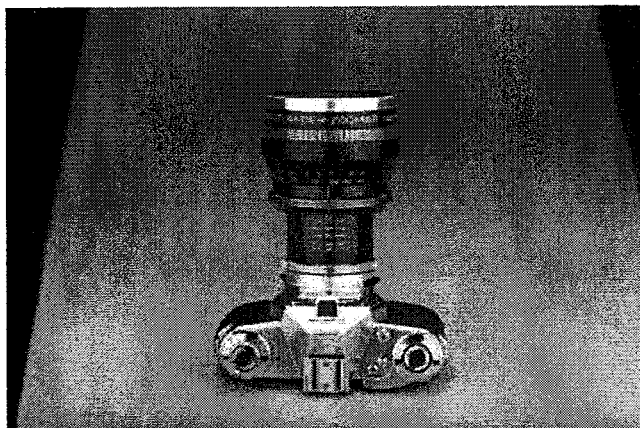


图 1.1 变焦镜头实物图

Figure 1.1 Physical picture of zoom lens

进入到 20 世纪 60 年代，整个社会的生产水平都得到了快速的发展，光学镀膜技术的提升大大提高了透镜的透光率，机械加工工艺和数控加工技术的提升，使制造加工复杂的凸轮机构变为可能，同时出现了新型的光学材料和非球面技术，均大大推动了变焦镜头的进一步发展，机械补偿法变焦镜头慢慢获得了人们的重视。1963 年尼康推出了一款大众化的机械补偿式相机变焦镜头，变焦范围为 43-86mm，相对孔径 1/2.8，这款镜头设计轻盈，便于携带，可以满足体育赛事的摄影要求，但成像质量与定焦镜头相比，依然有较大差距。1971 年出现了以光学补偿法和机械补偿法相结合的新型变焦形式——双组联动，这种变焦方式同时具有以上两种补偿方式的运动特点，并首次应用在了电视变焦系统上，在当时取得了较好的效果，同年，我国出版了《电视摄影物镜光学设计》一书，填补了国内在变焦系统领域的技术空白。自 80 年代初期到 90 年代初期，变焦镜头经历了快速发展的黄金十年，机械补偿式由单变倍单补偿，逐渐发展为多镜组全动型系统，同时，由于非球面加工工艺技术的提升，减少了系统中的透镜数量，提升了成像质量，使变焦镜头向小型化与轻量化发展。1985 年，以松下和美能达为首的公司先后推出了应用于照相和摄像的变焦镜头，美能达推出了 AF35-70mm 变焦距照相镜头，包含一片非球面透镜在内，全系统仅包含了 6 片透镜，相比同一时期的其他镜头，质量较轻。松下则推出了变焦范围为 6.7-40mm 的摄像物镜，该镜头共 9 片透镜，包含两片玻璃模压型非球面透镜。这两款透镜均采用了非球面技术，像质较过去的变焦镜头有了较大的提高，镜片数量也减少很多，镜头的结构尺寸也有了较大的压缩简化。

与此同时，变焦镜头的设计波段也从可见光区域延伸到了紫外光波段和红外光波段，红外变焦系统的历史距今大约 50 年，最早可以追溯到 1971 年的欧洲，世界上第一台红外变焦镜头亮相于一个论坛会议上，自此引发了人们对红外变焦系统的关注和探索。但当时受制于探测器、材料等因素的影响，红外变焦系统并没有获得良好的发展空间，直到红外成像技术和探测器不断取得新的突破，红外变焦系统才逐渐发展起来。21 世纪以后，军用战争和民用安防等领域对变焦镜头的需求量大增，同时也对系统的成像质量、变倍比、稳定性等有了较高的要求，这也进一步促进了变焦系统的繁荣发展。如今，在我们生活当中已随处可见变焦系统的身影，大到航天航空的探索记录，小到手机摄影，均有变焦镜头的出现，为我们的生活提供了极大地便利。变焦历史发展的轨迹告诉我们，今后的变焦系统注定走向大变倍比、大相对孔径、大视场方向，变焦形式也会不断创新，疏系玻璃等新型光学材料、非球面透镜和衍射光学元件的应用，使变焦镜头的像质也有了大的飞跃，与此同时，变焦镜头也有了向小型化与轻量化发展的趋势，性能的提升加速了变焦镜头的应用与普及，在今后的社会变焦镜头将有更大作为。

1.2.2 红外变焦系统国外发展现状

红外变焦系统起源于欧洲，它利用了目标物体的红外辐射特性和背景红外辐射特性之间的差异，来探索识别目标。因为红外光谱极强的穿透性，所以红外变焦系统能够在烟雾、尘埃等恶劣环境下工作，因而广泛应用于航空吊舱、箭载摄像装置、无人机系统中，随着第三代凝视焦平面探测器的发展，计算机自动设计等水平的不断提高，红外变焦系统受到了国内外诸多学者和设计人员的关注，下面将介绍几套国外的红外变焦系统，了解并研究国外的红外变焦系统发展状况，对于我们提高自己的设计水平将有许多借鉴意义^[5]。

（1）韩国 20X 中波红外变焦系统

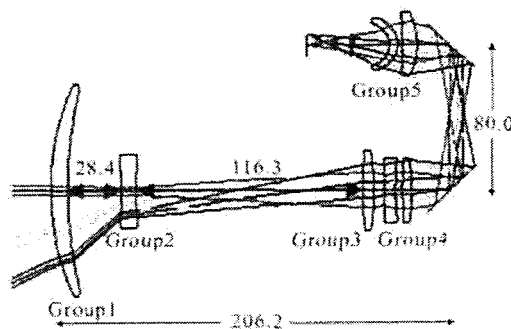
韩国的 Hyum Sook Kim 等人设计了一款 20X 的红外中波变焦镜头，该系统可实现从 13.75mm 到 275mm 范围内的变焦，F 数为固定值 2.5^[6]。如表 1.1 为该变焦系统的详细设计指标。

表 1.1 系统指标

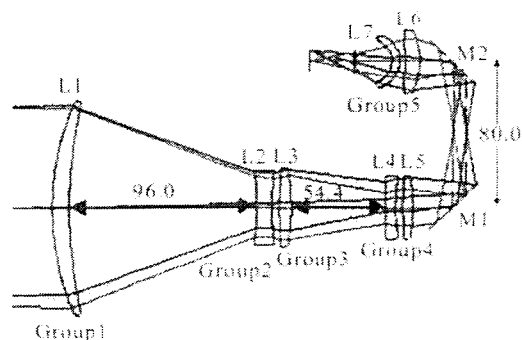
Table 1.1 System index

Item	Value
Wavelength/ μm	3.7-4.8
Zoom ratio	20 $\times$
<i>F</i> -number	2.5
Image plane diagonal/mm	12
Pixel size/ μm	30
Transmission	>70%

考虑到色差的影响，因此在变焦系统中要通过合理的搭配材料来校正。该系统变倍组采用的是有较高色散系数的锗，其余各组均选用色散系数相对较低，价格相对较低的硅。系统采用了二次成像技术来保证了 100%冷光阑效率，并且压缩了前固定组的口径至 110mm，通过非球面的引入，更好的校正了像差，减少了镜片数量，提高了像质。为了防止系统整体尺寸过大，使用了两个反射镜对光路进行折叠，最终，使系统的尺寸压缩为 240mm $\times$ 130mm $\times$ 200mm，此外，为了进一步做到小型化与轻量化，便于携带，没有设置专门的调焦组，在变倍的过程中利用变倍组和补偿组的移动来消热差，最后保证了整机的质量不超过 6kg。下图为该镜头在长焦和短焦处的结构图。



(a)短焦



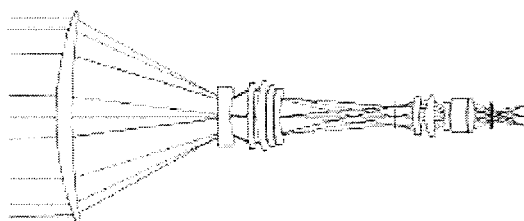
(b)长焦

图 1.2 不同焦距处系统结构图

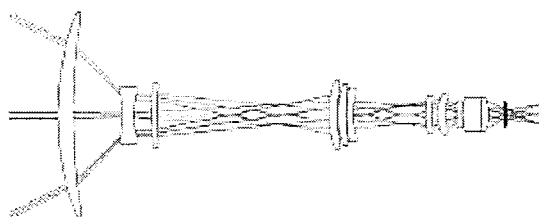
Figure 1.2 Structural charts of systems at different focal lengths

(2) 美国 30X 中波红外变焦镜头

美国光学专家 Mark C. sanson 在 2011 年设计了一款 30 倍的中波制冷变焦镜头^[7]。该镜头的设计波段为 3-5 μm ，变焦范围为 15.25mm 到 456mm，F 数为 4.5，系统采用了 320 $\times$ 240 制冷型探测器，像元尺寸为 30 $\times$ 30 μm ，如图 1.3 所示为系统的具体结构形式示意图。



(a)长焦



(b)短焦

图 1.3 不同焦距处系统结构图

Figure 1.3 Structural charts of systems at different focal lengths

从图中可以看出，系统一次像面之间仅有三个组元，分别为前固定组、变焦组、和补偿组，因为系统变倍比较大，焦距较长，所以该系统采用了三次成

像技术，将第一片透镜的口径压缩到了 120mm，为了能更好校正像差和色差，系统共使用了 8 个非球面，外加一个衍射面。虽然这样会增加一定的成本和加工难度，但最终保证了系统的 100%冷光阑效率，系统总长控制在 355mm，尽量做到了小型化、轻量化，同时拥有较高的成像质量。

(3) 美国 5×长波红外变焦系统

位于美国新罕布什尔州的 Optics 1 公司曾受美国军方所托，经设计了一款 5 倍的长波红外变焦系统，已应用到美国海军的飞机上。它的工作波长范围为 $8\mu\text{m}$ - $12\mu\text{m}$ ，变倍组由正负光焦度两个透镜组成，采用了硒化锌用以校正色差，其余镜片材料均选用了锗。并通过设置适当数量的非球面来减少透镜数量，控制系统尺寸，提升成像质量。

(4) 美国 300×红外连续变焦系统

2005 年，美国两位光学专家设计了一款变倍比高达 300 倍的红外变焦镜头，它的焦距变化范围为 7mm-2100mm，图 1.4 为该系统的实物图。

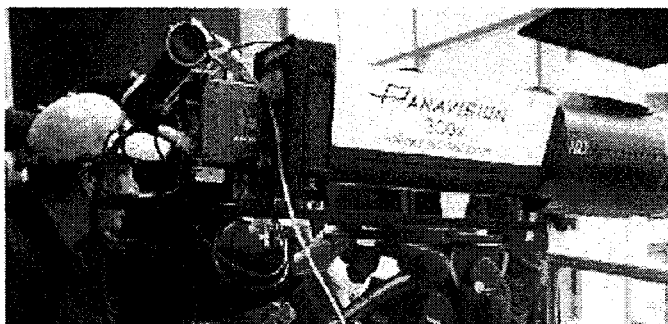


图 1.4 300 倍变焦镜头实物

Figure 1.4 300-fold zoom lens

因为变倍比过大，系统采用了复合式变焦结构，即用两个小变倍比的子系统，通过光路串联在一起来实现大的变倍比。如图 1.5 所示为这款变焦镜头的示意图，它由两个模块组成，分别为前端的 20 倍变焦模块，和后端 15 倍的变焦模块，两个模块通过中间像面巧妙的拼接在一起，实现了超大变倍比的效果。

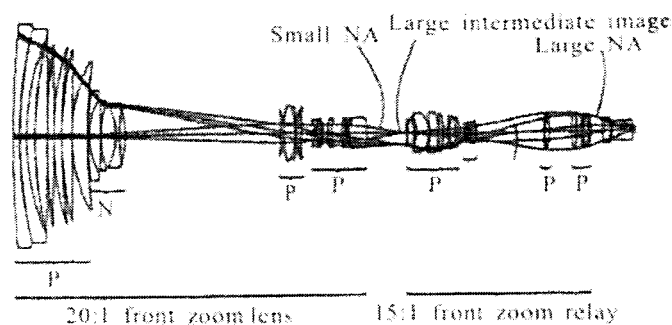


图 1.5 300 倍变焦系统结构图

Figure 1.5 Structure chart of 300-fold zoom system

当用这款变焦镜头观察月球时，仍然获得了较好的效果，图 1.6 为不同焦距下拍摄的月球画面。

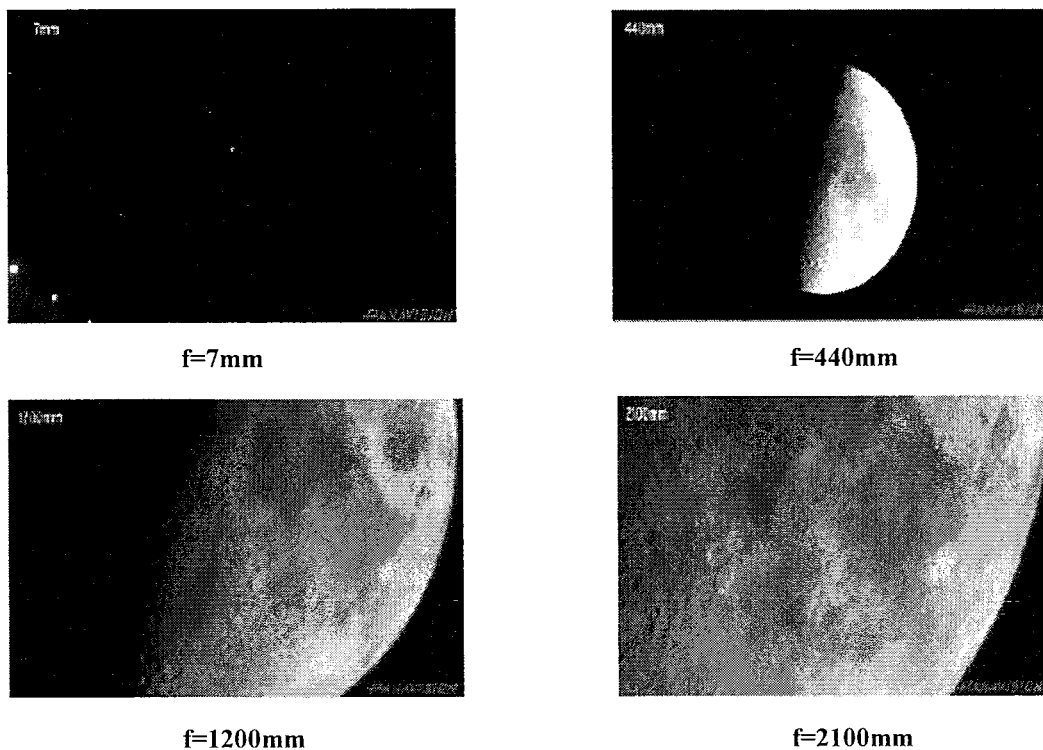


图 1.6 不同焦距下月球图片

Figure 1.6 Pictures of the moon at different focal lengths

1.2.3 红外变焦系统的国内发展状况

我国的红外变焦技术起源于 80 年代，因为起步较晚，因此和国外先进水平有一定的差距，但是经过无数科研人员的努力，我们依然在红外变焦领域取得了一定的成就，无论加工工艺方面还是设计水平均得到了快速的发展。下面将

介绍国内一些科研单位和个人设计的几套红外变焦系统。

(1) 18 倍中波红外连续变焦系统

2010 年, 中科院长春光机所的杨为锦等人设计了一套变焦范围为 11mm-200mm 的中波红外变焦系统^[8], 系统采用了 320×240 凝视焦平面制冷型探测器。F 数为 3, 设计波段为 $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$, 为了消除杂散光的影响, 以达到 100% 冷光阑效率, 采用了二次成像技术来实现, 将探测器的冷光阑作为系统的孔径光阑。整个系统共 8 片透镜, 其中包含 2 个非球面, 用反射镜折叠光路使系统结构紧凑, 最终尺寸为 $320\text{mm} \times 200\text{mm} \times 180\text{mm}$, 整个系统像质良好, 分辨率高, 图 1.7 为系统的结构示意图。

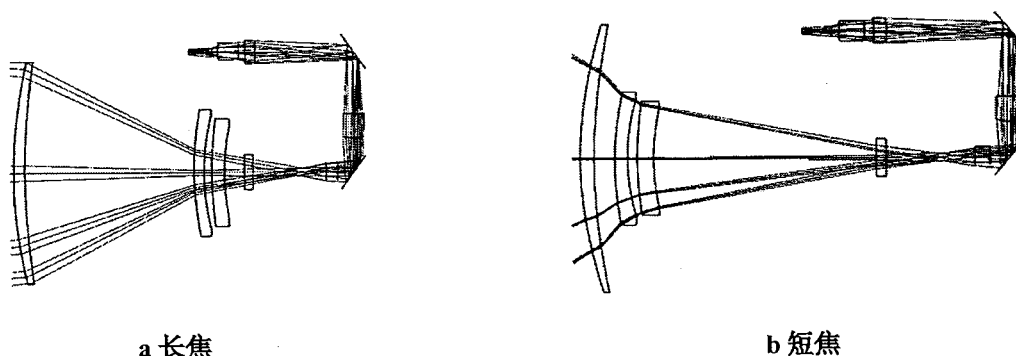


图 1.7 不同焦距处系统结构图

Figure 1.7 Structural charts of systems at different focal lengths

(2) 折反式三组元连续变焦系统

2015 年, 中科院长光所李宏壮等人针对大口径望远镜做了一套连续变焦系统^[9]。它的口径达到 1.2m, 变倍比为 3 倍, 焦距范围为 2m-6m, 下表为该系统的设计参数。

表 1.2 系统指标

Table 1.2 System index

Parameter	Value
Focal length/ μm	2000-6000
D/f	1/1.67-1/5
Field of view/($^\circ$)	0.335° - 0.114°
Wavelength/nm	500-800

续表 1.2

Parameter	Value
Back work distance/mm	>50
Pixel size/ μm	10×10
Pixel number	1024×1024

整个系统分了两部分设计，前端采用了卡塞格林式望远系统，后端为常规的三组元的机械补偿连续变焦系统，同样采用了二次成像方式，为了抑制杂散光对系统像质的影响，在一次像面处设置了视场光阑。系统结构如图 1.8 所示。

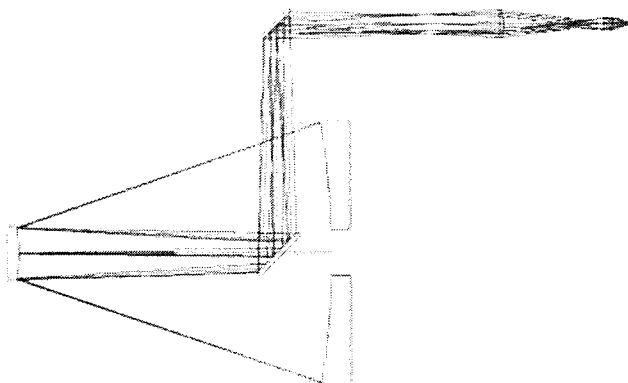


图 1.8 系统整体结构图

Figure 1.8 Whole structure of system

系统变倍比不大，前段反射式系统没有产生色差，减小了后端变焦系统的校正压力和设计难度。卡塞格林系统主镜为抛物面，次镜为双曲面，间隔 1450mm，为更好衔接后端的变倍系统，在第一像面之后设置了一块场镜，这样可以控制轴外光线的高度，从而减小后面透镜的孔径，变焦部分前固定组采用了一块双胶合透镜，采用了特殊的色散材料 TF3 来减轻二级光谱的影响，补偿组为三片单透镜和一片双胶合透镜，最终设计的系统结构紧凑，像质优良。如下图所示为变倍系统的光路图。

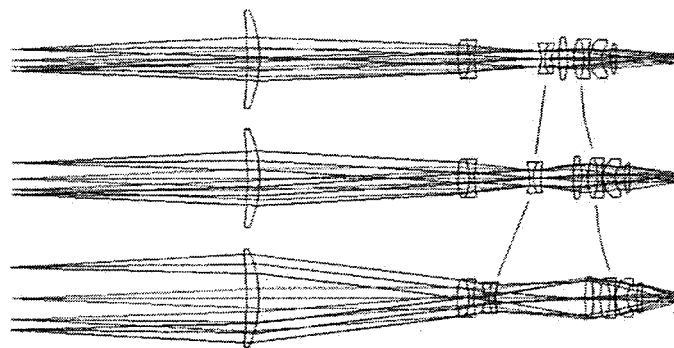


图 1.9 折射式变倍系统光路

Figure 1.9 Structure of refractive zoom system

(3) 25 倍中红外变焦系统

2012 年, 周昊等人设计了一款 25 倍的中红外连续变焦镜头^[10]。该镜头的变焦部分采用了两个子变焦系统, 即两个机械补偿式变焦系统串联在一起作同步运动的方式, 变倍组之间具有相同的运动轨迹, 且间距固定, 两个补偿组之间同样固连在一起做同步运动。如图 1.12 所示为变焦系统原理图, 其中 X_1 , X_2 , X_3 为固定组; M_1 , M_2 为变倍组; C_1 , C_2 为补偿组。

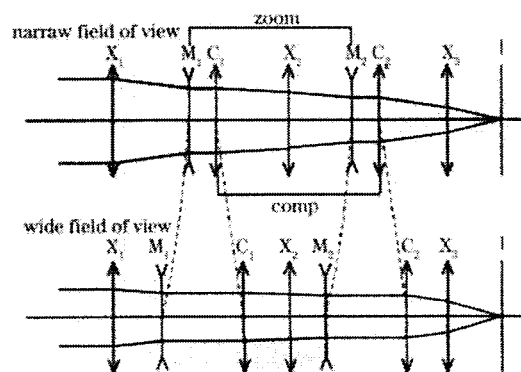


图 1.10 变焦系统原理图

Figure 1.10 Principle diagram of zoom lenses

该镜头可以实现 12mm-300mm 的连续变焦, F 数 2.5。利用二次成像技术压缩了物镜口径且满足了 100%冷光阑效率。系统共使用了十片透镜, 共引入 4 个非球面, 仅使用了硅和锗两种材料, 像质良好, 变焦平滑。如图 1.11 为系统结构图。

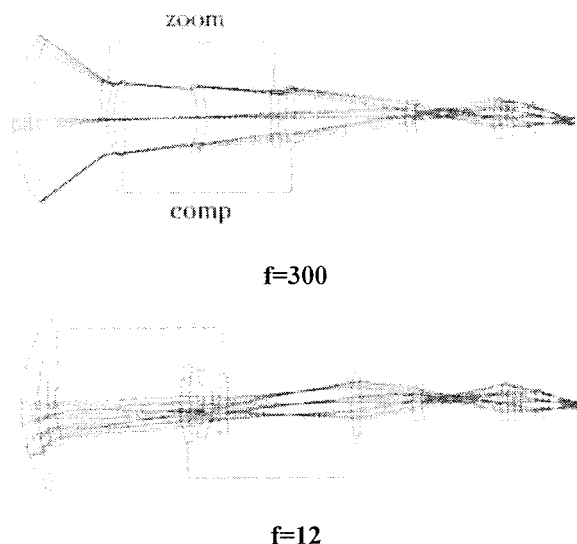


图 1.11 连续变焦系统图

Figure 1.11 Schematic of continuous zoom optical system

除上述介绍的系统以外，我国各院校和科研单位同样取得不少的研究成果，浙江大学设计了一款 3 倍的长波红外变焦系统，可以实现 32mm-96mm 的连续变焦，设计波段为 8-12 μm ，F 数为 2，整个系统共 5 组透镜，采用了机械补偿的方法来补偿像面的漂移，前固定组口径 94mm，系统总长 159mm，像质良好。在红外变焦领域，西安光机所，华中光电技术研究所，南开大学，长春理工大学等也有各种研究成果相继产生，综合国内外各种红外变焦系统的研究成果可以看出，红外变焦系统已经受到广泛的重视，随着光学冷加工等技术的不断提升，新型红外材料的发掘，透镜面型的改进，红外变焦镜头正朝着小型化、轻量化发展，同时成像质量也会越来越好^[1]。

1.3 论文的研究内容及结构安排

1.3.1 论文的研究内容

本文主要的研究方向为大变倍比中波红外连续变焦系统，配合使用 640 $\times$ 512 制冷型探测器。研究分析了几种常见补偿形式的变焦系统，指出了变焦系统中一些重要的原则定理。以机械正组补偿为例，分析了变焦方程的解和几种特殊情况，并对红外光学系统的特点进行了说明，指出了它与可见光系统之间的差异，总结了红外变焦系统的设计方法。经过分析与研究，选取了一种改良的双组联动补偿形式作为本系统的补偿结构，利用二次成像技术，最终设计出

了 15~550mm 的红外中波变焦系统，系统共采用九片透镜，使用了硅和锗两种材料，系统在各焦距处像质良好，可以满足 -40°C ~ 60°C 的环境温度要求，凸轮曲线平滑无拐点，变焦流畅。

1.3.2 论文的结构安排

本论文一共分为六个章节，每个章节的具体内容安排如下：

第一章 绪论：本章从红外变焦镜头的背景与意义出发，接着回顾了变焦系统国内外的历史渊源和发展历程，并对国内国外比较典型的几款红外变焦系统进行了总结与分析，对比了它们之间的一些特点，了解了变焦系统的发展过程。

第二章 变焦系统基础理论：本章从变焦系统的理论入手，阐述了变焦系统中遵循的几个规律，介绍了四种不同的补偿形式，并分析了他们之间的优点与不足，以机械正组补偿为例，建立了变焦微分方程，并推导分析了它的高斯解。

第三章 红外光学系统特点：本章首先阐述了红外辐射的基本理论和波长的划分，介绍了几种常见的红外材料，并解释了制冷型探测器的工作特点以及它特有的冷光阑效率，介绍了为满足 100%冷光阑效率所采用的二次成像技术。论述了无热化的几种方法和它们的特点，冷反射效应的产生和定量的表征方法，最后总结了红外变焦系统的设计步骤。

第四章 变焦系统优化设计：本章计算并确定了系统的技术参数和指标，分析了常见的几种补偿方式的特点，并介绍了一种改良的联动型补偿方式，确立了初始结构并对其进行了分析优化，设计出一款 36 倍的红外中波变焦系统，经过分析，系统在全焦段成像质量良好，满足要求。

第五章 系统性能分析：本章基于无热化的理论，依据航天相机的工作温度环境，分析了系统在高温（ 60°C ）和低温（ -40°C ）下的成像质量，发现系统有离焦且成像质量较差，采用机电后组补偿的方式后，像质有了大幅的提升，然后对系统进行了冷反射分析和凸轮曲线的拟合，得到的凸轮曲线平滑无拐点，变焦流畅。

第六章 总结与展望：总结了本文的研究内容和取得的成果，分析了系统目前仍待解决的问题，指出了系统的改进方向。

第二章 变焦系统基础理论

2.1 变焦系统基本概念和类型

变焦系统是指焦距可以在一定范围内连续变化，而像面位置却保持稳定不变，像质良好的光学系统^[12]。相比定焦系统可以实现大视场范围内搜索和小视场内跟踪，变焦过程中不需要更换镜头，目标不易丢失的优点。焦距变化的过程中，变焦到最两端的位置时会出现最长焦距和最短焦距两个极值点，我们把长焦焦距与最短焦距的比值称为“变倍比”或者“倍率”。公式如下所示：

$$M = \frac{f'_{\max}}{f'_{\min}} \quad \dots (2.1)$$

通常认为当系统变倍比小于等于 10 时，称其为低变倍比变焦距系统，反之则为高变倍比变焦系统。根据几何光学可知，如果系统由 k 个透镜组成，则系统的合成焦距为：

$$f' = f'_1 m_1 m_2 \cdots m_k \quad \dots (2.2)$$

即系统最终合成焦距为第一个透镜的焦距值，与第二个到最后一个透镜的各垂轴放大率乘积。从而可知，欲改变系统的总焦距实现变焦的目的，实质即为变焦系统中各组元垂轴放大率的改变。设 $m_2 m_2 \cdots m_k$ 为短焦时各组元垂轴放大率乘积， $m'_2 m'_3 \cdots m'_n$ 为任意位置时各组元垂轴放大率乘积，根据式 (2.1) 则系统的变倍比可表示为：

$$M = \frac{m'_2 m'_3 \cdots m'_k}{m_2 m_2 \cdots m_k} \quad \dots (2.3)$$

依据几何光学中牛顿公式可知，光学系统的放大率可表示为：

$$m = \frac{f'}{x} \quad \dots (2.4)$$

上式中 f 为系统焦距值， x 表示物方焦点到物点的距离。在光学系统的实际应用当中，要想实现大视场范围内搜索和小视场内跟踪观察，就要适时改变光学系统的放大率 m ，通过上式我们可以看出，光学系统的放大率由两个因素决定，系统焦距和物距^[13]。对于一个固定焦距值的光学系统，在拍摄的时候，我们可以通过人为的移动，改变镜头与被摄物体之间距离的方法，从而改变系统的放大率 m ，但是这种方法有很大的局限性，因为被摄物体和镜头之间若存在某种障碍物，导致镜头无法自由靠近或远离被摄物体，则会对拍摄效果产生一

定的影响，无法达到预期的拍摄目标。此外，我们还可以通过更换镜头来改变系统的焦距，从而实现放大率的改变，但这种方式同样存在问题，在更换镜头的过程中，因为操作的间断性，会导致画面的不连续，造成目标的丢失。变焦镜头的出现极大地改善了这种状况，通过连续改变系统的焦距即可以实现放大率的连续改变，满足不同的拍摄需求，相当于在一个变焦镜头上集成了多个定焦镜头，便于携带和使用^[14]。

变焦系统在变焦过程中，满足以下几个规律：

(1) 物像交换原则

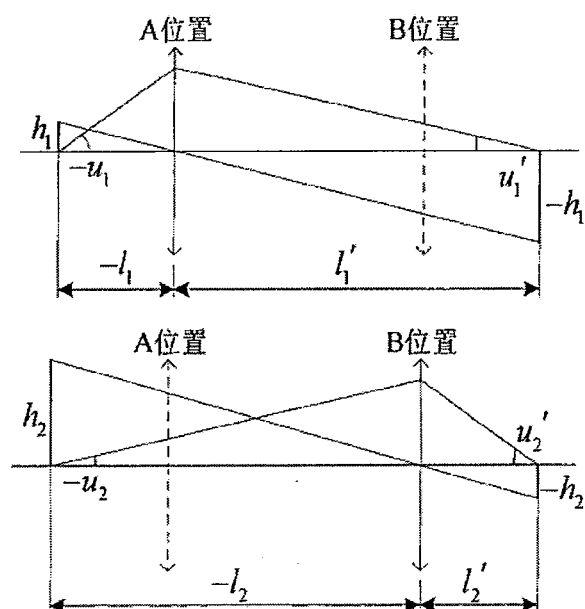


图 2.1 物像交换原则图

Figure 2.1 The object-image transform principle

如图 2.1 所示为物像交换原则的原理图，当透镜处于 A 位置时候， h_1 ， h_1' 分别为此时的物高和像高；物距和像距分别为 l_1 和 l_1' ；像方和物方孔径角分别为 u_1 和 u_1' ，依据几何光学可知，此时的垂直放大率为：

$$m_1 = \frac{h_1'}{h_1} = \frac{l_1'}{l_1} = \frac{u_1}{u_1'} \quad \dots (2.5)$$

如上图所示，当透镜处于 B 位置时，系统各个参量变为 h_2 ， h_2' ， l_2 ， l_2' ， u_2 ， u_2' 。则此时的垂直放大率为

$$m_2 = \frac{h_2'}{h_2} = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{u_2}{u_2'} \quad \dots (2.6)$$

在这两个位置上，系统的共轭距相等，A 位置的物距和 B 位置的像距相等，即 $l'_1 = -l_2$ ， $l_1 = -l'_2$ ，A 位置的垂直放大率可表示为：

$$m_1 = \frac{l'_1}{l_1} = \frac{-l_2}{-l'_2} = \frac{1}{m_2} \quad \dots (2.7)$$

系统的变倍比即为透镜在 A 位置和 B 位置时垂轴放大率的比值：

$$\Gamma = \frac{m_1}{m_2} = \frac{m_1}{\frac{1}{m_1}} = m_1^2 \quad \dots (2.8)$$

上述例子表明，透镜从位置 A 移动到位置 B 的时候，其共轭距没有发生变化，表示系统的物面和像面没有发生移动，倍率从 m_1 变为 $1/m_1$ ，两个位置的放大倍率互为倒数，此即相当于我们把物面和像面作了交换，这就是物像交换原则^[15]。

(2) 变焦系统的焦距改变是通过移动透镜改变组元间距从而改变焦距的

假设系统由两个组份组成，其光焦度分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 ，间隔为 d ，依据高斯光学可知，系统的总光焦度为：

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2 \quad \dots (2.9)$$

ϕ_1 和 ϕ_2 作为固定值，在透镜加工好之后便不可更改，所以，想达到改变系统焦距的目的，只能通过改变透镜之间的空气间隔 d ，即组份之间的间隔来实现^[16]。

(3) 系统像面始终保持稳定^[17]。

对于单个透镜，除了前文分析过的物像交换位置以外，单个透镜的移动均会带来共轭距的改变，如图 2.2 所示：

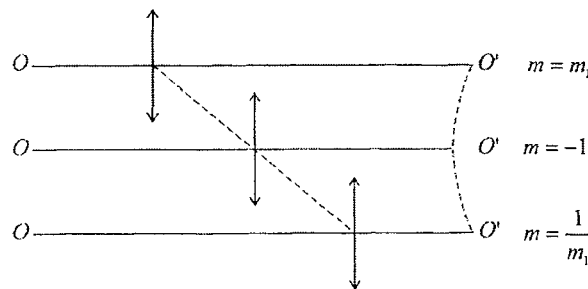


图 2.2 物像交换位置之间的像面位移

Figure 2.2 shift of image plane between exchange place

由此可知，透镜的移动会带来像面位置的改变，为了保证像面位置不发生

变化，则需要另一块透镜做相应的移动对其进行补偿，使系统运动组元的共轭距改变量之和为零（如图 2.3 所示），公式表示为：

$$\sum_i \Delta L_i = 0 \quad \dots (2.10)$$

式中 ΔL_i ---各运动组元共轭距的改变量。

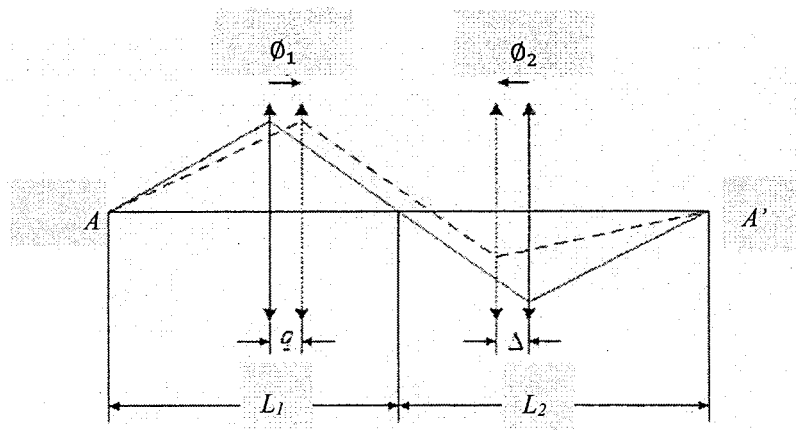


图 2.3 共轭距关系图

Figure 2.3 Conjugate distance diagram

(4) 当系统运动组份处于 $m = -1$ 的位置时，对变焦系统具有特殊的意义。

由几何光学物像公式有：

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad \dots (2.11)$$

从上式中可以求得：

$$l = f' \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \quad \dots (2.12)$$

$$l' = f'(1 - m) \quad \dots (2.13)$$

系统的共轭距为：

$$L = l' - l = f'(1 - m) - f' \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \quad \dots (2.14)$$

$$\text{可得:} \quad L = f' \left(2 - \frac{1}{m} - m \right) \quad \dots (2.15)$$

由上式可知，共轭距的变化是三条曲线共同作用的结果，分别为 $L = 2f'$ ，平行于横轴的直线； $L = -f'm$ 过原点的斜线； $L = -f' \frac{1}{m}$ 双曲线。

由几何光学可知，当物点位于物方无穷远时，光线会聚集在在透镜后焦点

上，此时的共轭距为无穷大。当物点位于透镜的前焦点上时，最终成像于像方无穷远处，此时共轭距和前一种情况一样为无穷大。

欲得到共轭距的最小值，可对上式求导让其等于零，有：

$$L' = \frac{1}{m^2} - 1 = 0 \quad \dots (2.16)$$

可得 $m = \pm 1$ ，又因为 $m = +1$ 没有实际意义，不予讨论，所以 m 最终取值为-1。将 $m = -1$ 代入到上式中，可得 L 的最小值：

$$L = 4f' \quad \dots (2.17)$$

合成曲线图 2.4 所示：

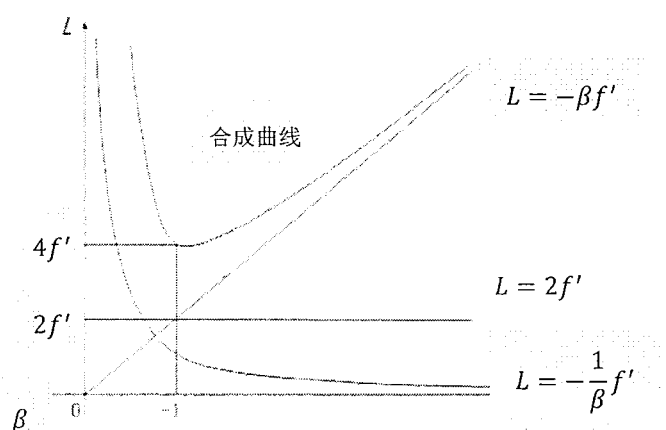


图 2.4 共轭距 L 与 β 的关系

Figure 2.4 The relationship between conjugate distance L and β

也可以从另一个角度解释，当 $m = -1$ 时候，此时物体位于透镜物方二倍焦距处，像的位置在透镜像方二倍焦距处，系统成倒立等大的实像，此时的共轭距恰好为 $4f'$ ，即为一个组元所提供的最小共轭距^[18]。

2.2 变焦系统的分类

对于变焦系统中的各个透镜组来说，在加工完成之后，它的材料，曲率半径，阿贝数等参数均已固定，各透镜本身的焦距不可再更改，只有通过按一定规律移动透镜组，改变透镜组之间的间距，来实现变焦操作。从前文可知，透镜在移动的过程中，难免会产生像面的漂移，所以必须设置一个专门的透镜组来补偿变倍过程中产生的像移。根据补偿方式的不同来划分，变焦系统一般被分为两大类：光学补偿法变焦距系统和机械补偿法变焦距系统^[19]。

2.2.1 光学补偿式变焦距系统

光学补偿法是将系统中运动组份固连在一起作线性移动，所以各运动组分的运动方式为同向等速，通过这种方式来减小像面的漂移。系统的划分根据组元数目而定，计算方法是从最后一组固定组元往前计数，包括固定组和移动组在内，有几个镜组，就是几组元系统，就有几个完全补偿点^[20]。光学补偿法只有在这几个有限的特殊焦距位置上，才可以消除像移从而保证像面的稳定，在其他焦距位置时，系统无法实现像面的重合，无法实现连续变焦，严重影响成像质量^[21]。因此，光学补偿法多用于换挡型的变焦距系统中，应用面较窄。如图 2.5 所示为一个四组元光学补偿法变焦系统示意图。

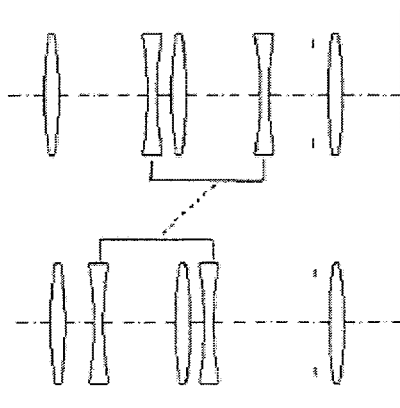


图 2.5 光学补偿式变焦距系统示意图

Figure 2.5 Optical compensation zoom system diagram

2.2.2 机械补偿式变焦距系统

机械补偿法一般由四部分组成，从左到右依次为前固定组、变倍组、补偿组和后固定组^[22]。前后固定组保持不动，通过移动变倍组改变透镜之间间距，从而改变系统的焦距，补偿组相对于变倍组的作微量移动以补偿变倍组移动带来的像面离焦，补偿组的光焦度可以为正，也可以负，如果为正则称为正组补偿，为负则称为负组补偿。变倍组和补偿组的运动关系通过凸轮控制，它们之间运动方式和方向均不一样，这样就对凸轮的精度有了很高的要求，凸轮设计的好坏在变焦系统中往往起到关键的作用^[23]。机械补偿法因为可以进行连续变焦，在系统任何位置均可以保持像面的稳定，所以在实际中应用广泛。图 2.6 所示为机械补偿系统示意图。

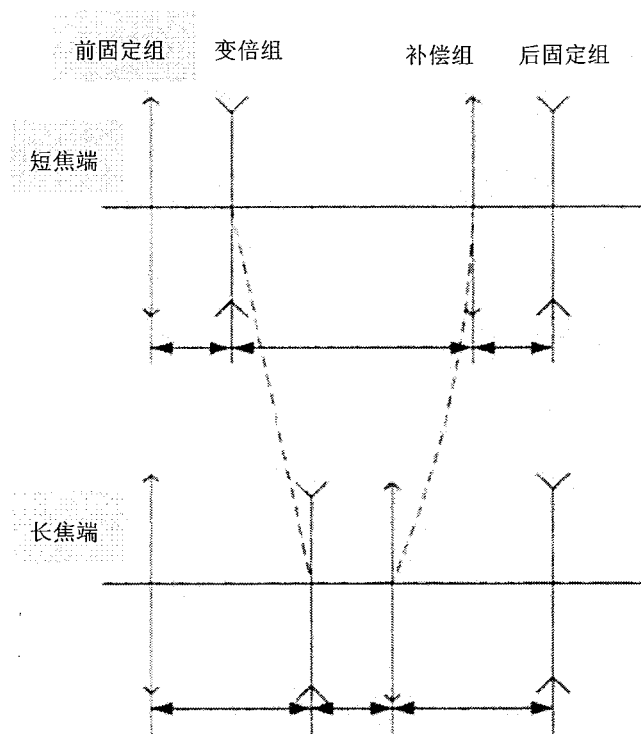


图 2.6 机械补偿式变焦距系统

Figure 2.6 Mechanically compensated zoom system

2.2.3 双组联动式变焦系统

双组联动变焦系统根据光学补偿法和机械补偿法的理论基础发展而来，结合了两种型式的变焦特点，它是将两个变倍组固连在一起作线性联动，类似于光学补偿法中的移动组运动的方式，而补偿组则以机械补偿法的形式作非线性运动，以补偿两个变倍组变焦过程中所产生的像移，补偿组一般设置在两变倍组之间，两个变倍组可以更好的分担光焦度，从而产生较小的像移，减轻了补偿组的负担，这种形式的变焦系统可实现较大变倍比，可以控制系统总长不使其过大^[24]。双组联动系统的结构型式如图 2.7 所示。

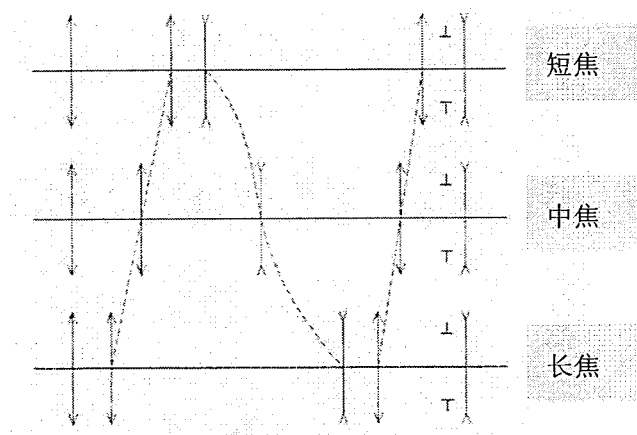


图 2.7 双组联动型变焦系统

Figure 2.7 Double linkage zoom system

2.2.4 全动型变焦系统

全动型变焦系统没有特定的变倍组和变倍组，所有组份均有其自己最佳的运动规律，每个组份都具有变倍和补偿的双重作用，像差可以得到更好的校正，更容易实现超大变倍比^[25]。因为每个组份都可以运动，所以在实现系统小型化方面，全动型变焦系统具有相当大的优势，带来优势的同时也带来了难点，多组全动的运动方式在初始结构建立时难度较大，系统的运动方式复杂，设计难度大，同时后期的装配调试工作也存在很多困难，所以目前仍未推广使用。

2.3 机械补偿系统及其变焦方程

一般的机械补偿变焦系统都有四个组份：前固定组 ϕ_1 、变倍组 ϕ_2 、补偿组 ϕ_3 、后固定组 ϕ_4 ，变焦过程中前固定组和后固定组都保持不动，只分析运动组份 ϕ_2 和 ϕ_3 。

为了计算过程的方便，现规定符号如下：移动组元沿光轴向右移动时为正，向左移动为负。另外设变倍组的垂轴放大率为 m_2 ，焦距为 f'_2 ；补偿组的垂轴放大率为 m_3 ，焦距为 f'_3 。

如图 2.8 所示，变焦过程中，当变倍组 ϕ_2 向右移动距离 dq ，物点固定不动，则像点同样向右移动一小段距离 $d\varepsilon$ ，则有：

$$d\varepsilon = (1 - m_2^2)dq \quad \dots (2.18)$$

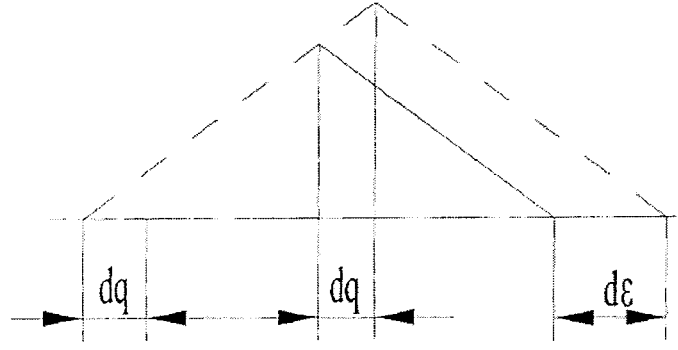


图 2.8 像移补偿图

Figure 2.8 Compensation for Image Plane Moving

由变倍组移动所引起的整个系统的像面移动量为:

$$m_3^2(1 - m_2^2)dq \quad \dots (2.19)$$

补偿组相应向左移动 $d\Delta$ 的微小距离, 引起整个系统的像面移动量为:

$$(1 - m_3^2)d\Delta \quad \dots (2.20)$$

如果要使变焦过程中系统的像面保持稳定, 则必须保证变倍组 ϕ_2 和补偿组 ϕ_3 移动所引起的像面移动量之和为零, 即:

$$m_3^2(1 - m_2^2)dq + (1 - m_3^2)d\Delta = 0 \quad \dots (2.21)$$

两边同时除以 m_3^2 整理可得:

$$(1 - m_2^2)dq + \frac{(1 - m_3^2)}{m_3^2}d\Delta = 0 \quad \dots (2.22)$$

用运动组分的放大倍率来表示各自的移动量, 将上式变为以 m 为自变量的微分方程, 对于变倍组 ϕ_2 , 物距的改变引起了 m_2 的改变, 对其牛顿物像公式左右两边同乘 l_2 , 可得:

$$\frac{1}{m_2} - 1 = \frac{l_2}{f_2'} \quad \dots (2.23)$$

两边微分, 并将 $-dl_2 = dq$ 代入, 可得:

$$dq = \frac{f_2'}{m_2^2}dm_2 \quad \dots (2.24)$$

对于补偿组 ϕ_3 , 同理可得:

$$d\Delta = f_3'dm_3 \quad \dots (2.25)$$

将上式代入于是可得:

$$\frac{(1 - m_2^2)}{m_2}f_2'dm_2 + \frac{(1 - m_3^2)}{m_3^2}f_3'dm_3 = 0 \quad \dots (2.26)$$

上式就是机械补偿变焦系统的微分方程，描述了变焦过程中，变倍组和补偿组之间对应的运动关系，对其进行积分即可进一步分析变焦过程。

2.4 变焦微分方程的分析讨论

1.由上式可知，无论变焦过程中变倍组和补偿组的位置如何，无论变焦系统形式如何，各运动组份均是以 $\frac{(1-m^2)}{m^2} f' dm$ 出现在方程中。

由前文可知，任意组元的共轭距为：

$$L = l' - l = f' \left(2 - \frac{1}{m} - m \right) \quad \dots (2.27)$$

对上式进行微分可得：

$$dL = \frac{(1-m^2)}{m^2} f' dm \quad \dots (2.28)$$

所以变焦系统的微分方程实际可表示为：

$$\sum_i dL_i = 0 \quad \dots (2.29)$$

说明在任何变焦时刻，任意变焦位置，因为各运动组元移动所引起的共轭距的改变量之和为零^[26]。设 $U(m_2, m_3)$ 为全微分方程的原函数，于是可得：

$dU(m_2, m_3) = 0$ 。则方程的通解为：

$$U(m_2, m_3) = f'_2 \left(\frac{1}{m_2} + m_2 \right) + f'_3 \left(\frac{1}{m_3} + m_3 \right) = C(\text{常数}) \quad \dots (2.30)$$

2.设系统长焦时候为初始位置，此时变倍组和补偿组此时的放大倍率为：

$$m_2 = m_{2l} \quad \dots (2.31)$$

$$m_3 = m_{3l} \quad \dots (2.32)$$

将其代入上式，可得：

$$f'_2 \left(\frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} \right) + f'_3 \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) = C(\text{常数}) \quad \dots (2.33)$$

两式相减消去常数 C，可得：

$$f'_2 \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + f'_3 \left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3l}} + m_3 - m_{3l} \right) = 0 \quad \dots (2.34)$$

上式表明了 m_2 ， m_3 的制约关系，可将其改写成如下形式：

$$m_3^2 - b m_3 + 1 = 0 \quad \dots (2.35)$$

其中：

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad \dots (2.36)$$

求解方程可得：

$$m_{31} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2}, m_{32} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad \dots (2.37)$$

从式 2.37 可以看出 m_3 的两个根互为倒数，即 $m_{31} = 1/m_{32}$ ，所以，对于一个 m_2 ，必定同时存在两个 m_3 ，都可以实现像面的补偿，如图 2.9 所示：

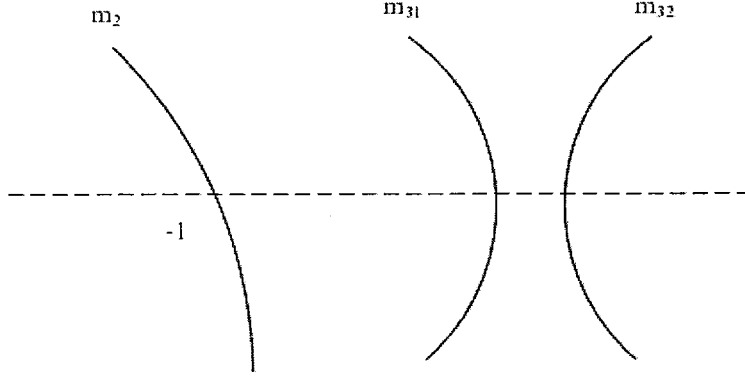


图 2.9 变焦补偿关系示意图

Figure 2.9 Schematic diagram of zoom compensation relationship

从前文的分析可知，变焦过程可以理解为一个连续微分的过程，对式进行积分，并注意到变倍组的移动量从 0 积分到 q ，放大率由 m_2 积到 m_{2l} ，可得：

$$q = f'_2 \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} \right) \quad \dots (2.38)$$

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} - \frac{q}{f'_2}} \quad \dots (2.39)$$

由式 2.39 可知，给出任意一个变倍组的移动量 q ，都可以求出对应的放大倍率 m_2 ；根据上式可以求出系数 b ，从而可以求出补偿组 ϕ_3 的两个倍率 m_{31} 和 m_{32} ，再对上式进行积分，可以得出变倍组移动距离 q 时，补偿组相对应的两个补偿量 Δ_1 和 Δ_2 。

$$\Delta_1 = f'_3(m_{31} - m_{3l}) \quad \dots (2.40)$$

$$\Delta_2 = f'_3(m_{32} - m_{3l}) \quad \dots (2.41)$$

3. 系数 b

将式 2.35 改写，可得：

$$b = \frac{1}{m_3} + m_3 \quad \dots (2.42)$$

由上式可知， b 的正负与 m_3 相关，所以，对于正组补偿系统， $m_3 < 0$ ，则 $b < 0$ ；对于负组补偿系统， $m_3 > 0$ ，则 $b > 0$ 。根据方程有解的条件，必须满

足 $b^2 - 4 \gg 0$ ，方程才有解，此时 $|b|$ 的最小值为 2。

4. m_3 解和极值的讨论

对式进行微分并令其等于零可得：

$$\frac{dm_3}{dm_2} = \frac{\frac{(1-m_2^2)}{m_2} f_2'}{\frac{(1-m_3^2)}{m_3^2} f_3'} = 0 \quad \dots (2.43)$$

解得：

$$m_2^2 = 1 \quad \dots (2.44)$$

从而可知：

$$m_2 = \pm 1 \quad \dots (2.45)$$

变倍组具有一定的光焦度，所以不考虑 $m_2 = 1$ 的情况，只取 $m_2 = -1$ ，此时 m_3 具有极值。根据前文的分析可知，当 $m_2 = -1$ 时，变倍组的共轭距为极小值，可知，在 $m_2 = -1$ 这个点上，变倍组和补偿组的对应点是唯一的。根据式 $m_3^2 - bm_3 + 1 = 0$ 可知，当 $|b| > 2$ 时，系统有解，如果 $|b| < 2$ ，这说明变倍组 ϕ_2 提供给补偿组 ϕ_3 的前后截距总和小于 $2|f_3'|$ ，换句话说就是要求补偿组的共轭距小于 $4|f_3'|$ ，上文分析可知，这是无法做到的，所以无解。

5. 换根情况

由前面的分析可知， $m_2 = -1$ 时， m_3 取极值，且具有两个根 m_{31} ， m_{32} ，一般情况下，这两个根对应的补偿曲线并不相交，为相互分离状态。当选择合适的初始值使得 $|b| = 2$ 时，可知此时 m_3 的两个根 m_{31} ， m_{32} 均为 -1，即说明此时的两条补偿曲线在 $m_2 = -1$ 处相切，有了这个切点，两条曲线便可以在这个公共点实现换根。曲线 m_{31} 可以从切点处换根到曲线 m_{32} 上，反之亦然。这样就保证了曲线延某一方向的单调变化，提高了系统的变倍效率。

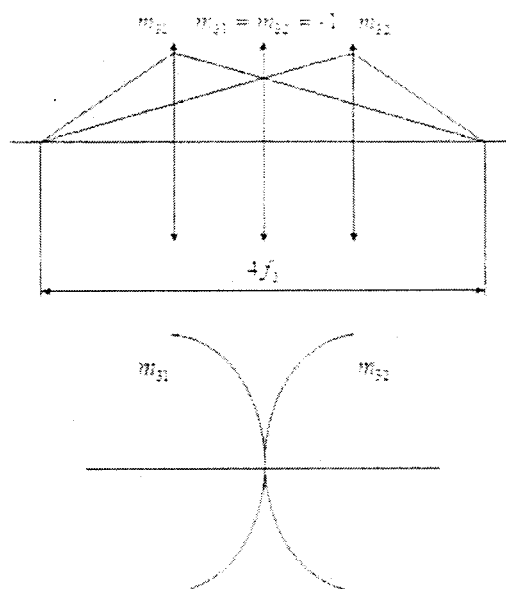


图 2.10 系统换根图

Figure 2.10 Root-Changing graphs of systems

6. 最速变焦路线

最速变焦路线即使组元间距改变最快的路线，选择最速变焦路线，既可以提高变焦效率，实现快速变焦，又能使像面稳定，成像良好。对于正组补偿系统来说有 $b < 0$ ， $|m_{31}| < 1$ ， $|m_{32}| > 1$ 。补偿曲线从 m_{31} 的上半段，在经过切点 $m_{31} = m_{32} = -1$ 时，换根到补偿曲线 m_{32} 的下半段，这条曲线就是它的最速变焦曲线，如图 2.11 所示。

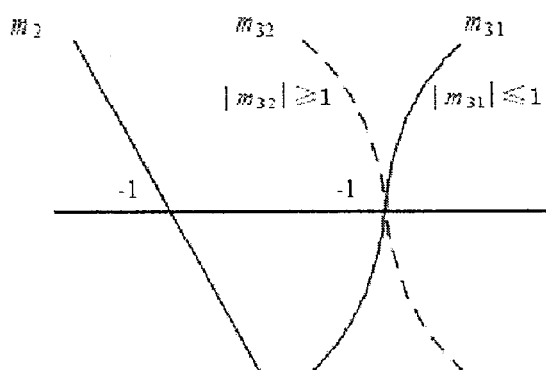


图 2.11 正组补偿系统的最速变焦路线

Figure 2.11 The maximum speed zoom route of the positive compensation system

2.5 本章小结

本章从理论出发，介绍了变焦系统的基本概念和变焦原理，然后阐述了变焦系统中遵循的几条重要的规律，分析对比了四种不同的变焦结构，并总结了他们各自的优势与不足。以机械补偿法变焦系统为例，运用微分的思想建立了变焦系统的变焦微分方程，对方程的解做了详细的推导计算，分析讨论了机械正组补偿方式解的一些特殊情况，并分析了换根、最速变焦路线等问题。本章为变焦系统设计的理论依据，为后面的设计优化奠定了基础。

第三章 红外光学系统特点

相比可见光成像技术，红外成像技术虽然起步较晚，但发展迅猛，红外变焦光学系统由于接收的是目标物体的热辐射，具有良好的环境适应性，可以全天候工作，近年来已在军事、医疗、航天等方面取得了广泛的应用。了解红外光学辐射特性，掌握红外系统的设计要点，可以为设计红外变焦系统打下良好的基础。

3.1 红外辐射基本理论

通常所说的红外线即为红外辐射，自然界中所有的温度高于绝对零度的物体（无论其有无生命），都在向周围不断地辐射红外线^[27]。其实红外线和可见光、紫外线等一样，同样属于电磁波，如图 3.1 所示为电磁波谱。

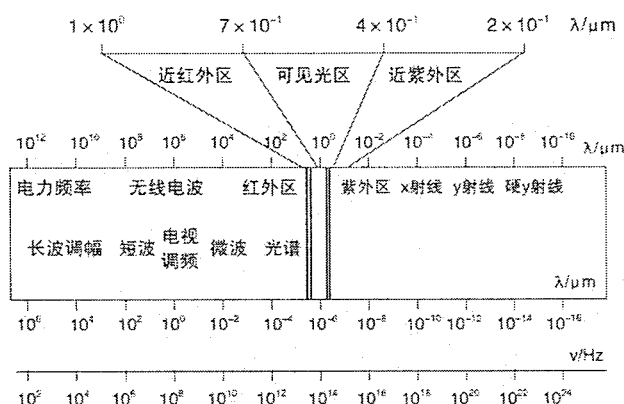


图 3.1 电磁波谱

Figure 3.1 Electromagnetic spectrum

按照波长或者频率的高低顺序，可将所有电磁波进行排序，如上图。红外线即为波长 $0.75\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 的电磁波，拥有极强的热效应，根据红外辐射产生的机理，可进一步将其划分为 $0.75\text{--}3\mu\text{m}$ 的近红外、 $3\text{--}40\mu\text{m}$ 的中红外、 $40\text{--}1000\mu\text{m}$ 的远红外，然而并非所有波长的红外线均能应用到红外成像技术，大部分波段的红外线经过大气的吸收、反射和散射以后都所剩无几，仅留下三个波段可以让红外线通过，分别为 $1\text{--}3\mu\text{m}$ 、 $3\text{--}5\mu\text{m}$ 和 $8\text{--}13\mu\text{m}$ ，称这三个波段为大气窗口，军事上也称这三个波段为近红外波段、中红外波段和远红外波段^[28]。

3.2 红外探测器与 100%冷光阑效应

目前常用的红外探测器为凝视型焦平面式，这种探测器的特点是大面阵，无需使用传统的扫描摆镜来探测目标，它把红外探测器有效的封装于焦平面，从而提高了光学系统的空间分辨率。红外探测器的核心工作方式就是将入射到探测器靶面的光能辐射信号转换成电信号^[29]。适用于红外波段的探测器一般分为两大类，一类是需要较低环境温度的制冷型焦平面阵列探测器，另一类是常温工作环境的非制冷型焦平面阵列探测器，这两种探测器各有优缺点，总体来说制冷型探测器比一般的非制冷型探测器灵敏度高，响应速度快，所以大部分红外光学系统，尤其是航天、军工等领域，均采用的是制冷型探测器，但制冷型探测器因为需要制冷装置，所以体积大，比较笨重，造价昂贵。为了满足红外探测器的工作温度，一般让探测器工作在“杜瓦瓶”当中，通过装满液氮的冷指对探测器进行降温，杜瓦瓶前端的玻璃起到密封的作用，同时能够透过光线^[30]。如图 3.2 所示。

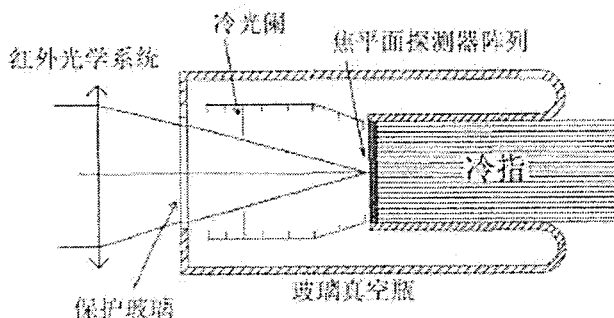
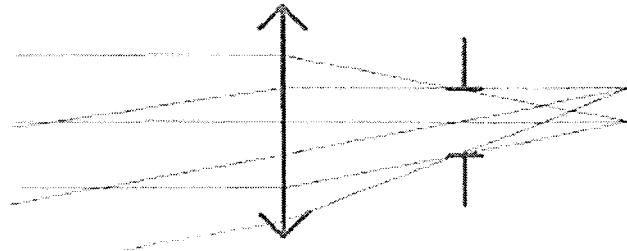


图 3.2 杜瓦瓶

Figure 3.2 Dewar flask

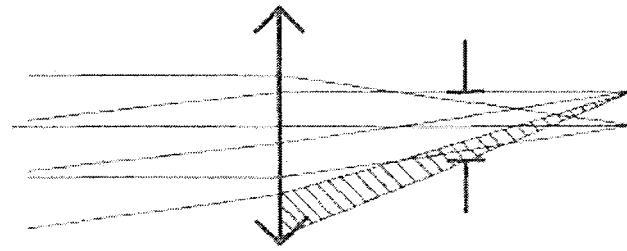
上图可以看出，制冷型探测器的杜瓦瓶中有一部件为冷光阑，如果探测器只接收到来自目标物体的红外辐射能量，则称该系统具有 100%冷光阑效率。

（如图 3.3 所示）为了实现 100%冷光阑效率，本文中选择利用二次的成像方法，将探测器的冷光阑作为整个系统的孔径光阑来考虑^[31]。



(a) 100%冷光阑效率

(a) A system has 100% cold shield efficiency



(b) 非 100%冷光阑效率

(b) A system does not has 100% cold shield efficiency

图 3.3 冷光阑效率示意图

Figure 3.3 Illustration of the cold shield efficiency

3.3 二次成像系统的设计

二次成像系统位于整个变焦系统之后，杜瓦瓶之前，且使前部分变焦系统的像最终成像到探测器靶面上，前面光学系统的出瞳为二次成像系统的入瞳，从而在满足成像要求的情况下，实现 100% 的冷光阑效应^[32]。如图 3.4 所示为简单的二次成像系统原理图：

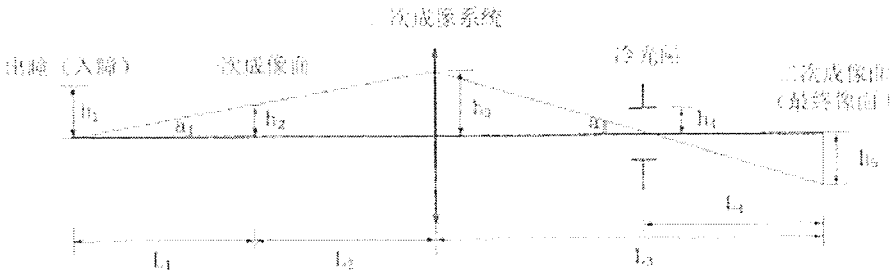


图 3.4 二次成像图

Figure 3.4 Secondary imaging

上图为主光线的光路图，设二次成像系统的焦距为 f ，垂轴放大倍率为 M 。
根据几何光学计算公式有：

$$L_3 = (M + 1)f \quad \dots (3.1)$$

$$L_2 = \frac{f}{M} + f \quad \dots (3.2)$$

$$L_3 = ML_2 \quad \dots (3.3)$$

另外由图示的三角形关系可知：

$$\tan \alpha_1 = \frac{h_2}{L_1} \quad \dots (3.4)$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{h_5}{L_4} \quad \dots (3.5)$$

$$A = \frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} \quad \dots (3.6)$$

$$h_3 = (L_3 - L_4) \tan \alpha_2 \quad \dots (3.7)$$

$$h_3 = (L_1 + L_2) \tan \alpha_1 \quad \dots (3.8)$$

$$h_3 = L_2 \tan \alpha_1 + \frac{h_5}{M} \quad \dots (3.9)$$

联立上式可解得：

$$L_3 = \frac{-ML_4A - \frac{h_5}{\tan \alpha_1}}{1 - MA} \quad \dots (3.10)$$

式中： L_1 表示变焦系统的出瞳到一次像面的距离； L_2 为一次成像面到二次成像透镜的距离； L_3 表示从二次成像透镜到探测器靶面的距离； L_4 为探测器到冷光阑的距离； h_1 为入瞳半口径； h_2 为第一像面的半高度； h_3 为主光线在二次成像透镜上的高度； h_4 为冷光阑口径的半高度； h_5 为二次成像面的半高度。

由上式便可求出 f ， L_1 ， L_2 。当变焦系统的变倍比较大，或者长焦较长的时候，利用二次成像的方法可以有效压缩物镜的口径，有利于系统实现小型化与轻量化^[33]。

3.4 红外材料

红外光学材料是指能够透过红外辐射的一类材料，相比较可见光系统来说，红外材料的种类比较少。红外光学材料通常被用于制作光学系统中的透镜和棱镜等^[34]。本节我们将从几种常见的红外光学材料中，挑选出适合本系统的红外材料，设计一套光学系统，材料的选取也是一个关键的环节，如何选择合适的红外材料，一般遵循以下几个规则：

(1) 符合设计指标的波段要求。即所选用的材料在要求的光谱波段内具有良好的透过率，以便光线在经过多片透镜之后，依然具有较大的能量。

(2) 针对不同的设计要求，或者不同的使用场景，应该考虑材料的硬度，熔点，抗腐蚀能力等因素，在实际的应用过程中，这些因素会对系统的精度有较大的影响。为了校正色差等其他像差，也要综合考虑材料的折射率和色散。

(3) 从经济的角度看，在满足设计要求的情况下，尽量选择价格便宜的材料，降低成本。

材料不同化学性质也会有一定的差异，红外光学材料在大方向上一般可以分为三类：晶体，玻璃和塑料，本文将简单介绍三种材料的特征^[35]。

(a) 晶体材料

在晶体材料的大类下又可以细分为单晶材料和多晶材料两种，制备技术也比较成熟，另外晶体的折射率和色散度变化范围要比其他材料更加多样，所以目前应用较为广泛。

(b) 玻璃材料

红外玻璃又可以细分为氧化物玻璃和硫属化合物玻璃两种类别。不管哪种玻璃都易于熔铸，可以制作成样式丰富的形状及尺寸，制备技术成熟且价格相对便宜，但是大部分红外玻璃光谱范围比较窄，仅能透过可见光与近红外波段，应用时候要根据具体的要求选择。

(c) 塑料材料

塑料是一种高分子聚合物，一些塑料在某些红外波段同样具有良好的透过率，目前已应用于安防等领域，由于塑料分子结构的原因，塑料材料一般密度小，高温环境下容易融化变形。常见的有聚四氟乙烯，聚乙烯，聚丙烯等红外塑料，但是在中红外波段，大部分红外塑料材料透过率并不是很高。

整体看来适用于各个波段的红外材料不在少数，如表 3.1 所示，给出了常见的几种红外材料的各项参数^[36]。

表 3.1 红外材料特性

Table 3.1 Characteristics of Infrared Materials

材料	折射率(4 μm)	折射率(10 μm)	密度 g/cm^3	$dn/dt/^\circ\text{C}$
硅	3.4255	3.4179	2.33	0.00015
锗	4.0243	4.0032	5.35	0.000396
硫化锌	2.2524	2.2005	4.09	0.000043
硒化锌	2.4331	2.4065	5.27	0.00006
氟化镁	1.3526	-	3.14	0.00002
氟化钙	1.4097	-	3.18	0.00001

上表中“-”表示材料在此波长下不透过

上表所列的几种红外材料，都可以透过 3-5 μm 的中红外波段，其中氟化钙如果在空气中长期使用，会在表面产生一层氧化膜，在一定程度上影响了它的使用^[37]。硅和锗均属于优良的红外半导体单晶材料，二者均具有金刚石结构且化学性质稳定,由上表给出的数据可知，硅和锗相比于其他红外材料，环境温度变化对其造成的影响较小，且从经济成本的角度考虑，硅和锗的价格比其他材料要低，而硅的成本比锗还要低很多，所以本系统中选用硅和锗作为主要的透镜材料。

3.5 无热化理论

3.5.1 无热化理论概述

平常我们所设计的成像光学系统，尤其是可见光、民用领域的光学系统，通常默认为是在常温（即 20 $^\circ\text{C}$ ）下工作的，不考虑外界温差对它产生的影响。但我们知道，任何物体都有热胀冷缩的效应，同样地，光学系统中的透镜、镜桶等材料也会随着温度的改变有一些微小的结构变化，当外界温度发生较大变化时，会对系统的成像质量产生较大影响，尤其是红外系统^[38]。因为红外材料的热膨胀系数普遍比可见光材料高 1-2 个数量级，因此对温度的变化比可见光要更加敏感，在航天和制导等领域，一般要求工作温度范围为-40 $^\circ\text{C}$ ~+60 $^\circ\text{C}$ ，大的温度变化会导致镜片的曲率半径、折射率、厚度等几何尺寸发生变化，引起离焦，从而影响系统的成像质量，对系统的稳定性产生较大影响^[39]。因此，在

红外系统设计的时候，就必须研究温度变化对系统造成的影响，使用一定的手段消除和补偿温度引起的像面离焦，即为无热化。

3.5.2 无热化的几种方法

一般来讲，根据实现原理的不同，光学系统的无热化技术可以归结为三种办法。

(1) 光学被动式

光学被动式是利用材料之间的特性差异，即折射率温度变化系数或线膨胀系数等，把变焦系统的色差与热差一同引入到像差中，通过搭配光焦度、材料等综合优化，来消除系统的像移，可以在一定温度范围内实现消热差。这种方式的优点是不用增加额外的电机等调焦设备，减轻系统的重量，且系统成本较低，一般应用于红外导引头光学系统^[40]。理论上，要实现系统的无热化，要满足下列几个条件：

$$\sum_{i=1}^j \varphi_i = \varphi \quad \dots (3.11)$$

$$\sum_{i=1}^j \frac{\varphi_i}{v_i} = 0 \quad \dots (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^j \frac{d\varphi_i}{dT} + \partial\varphi = 0 \quad \dots (3.13)$$

式中 ∂ 为壳体线膨胀系数。

(2) 机械被动式

机械被动式消热差主要利用了镜桶机械材料的热膨胀来补偿离焦量，利用光机材料随温度变化时产生的膨胀、缩小等变化，带动镜片之间的间隔变化，从而补偿像面产生的位移。这种补偿方式可靠性一般，对镜桶材料要求较高，会增加系统整体重量^[41]。

(3) 电机主动式

电机主动式有专门的调焦镜组，通过电机带动使其产生移动，从而实现消热差。在工作时，首选通过温度传感器测得环境的温度，然后将信息传送到控制器并计算出温度变化产生的像移量，控制器通过预存的数据来驱动电机，从而带动补偿镜片做定量的移动，最终实现消热差。这种补偿方式比较可靠，但会增加仪器的尺寸和重量^[42]。

3.6 冷反射理论

3.6.1 冷反射的概念和产生条件

冷反射是红外系统杂散光的一种，因为航天领域对像质和性能的追求，红外光学系统一般均选用探测度更高的制冷型探测器，而制冷型探测器需要极低的工作温度，所以通常将其放置在杜瓦瓶中冷却，这部分低温环境与镜筒产生了强烈的温差，从而导致了冷反射的产生^[43]。可以理解为，探测器自身发出的“冷光线”，经前面红外系统的镜片表面反射回来，重新聚焦在焦平面上，使探测器接收到了自己的图像，即为冷反射效应。可以看出，冷反射现象仅是红外制冷型探测器的特有现象^[44]。

从以上冷反射的基本概念可知，冷反射的产生有以下几个先决条件：首先探测器必须为制冷型探测器，使得前部的光学系统与后面的杜瓦瓶中的探测器产生一定的温差；其次，探测器之前的光学系统可以反射回探测器发出的冷光线，且反射回的冷光线最终能够重新落在探测器上。分析上述的冷反射产生条件，为了降低冷反射效应，我们可以在制冷探测器的周边设置几组反射镜，阻止冷光线汇集到探测器焦平面上；第二种办法是在前面的光学系统折射面上镀增透膜，以此来减小冷光线的反射，从而减弱冷反射效应^[45]。

杜瓦瓶和光学镜筒之间巨大的温差使得红外系统的冷反射效应成为一个重要的成像缺陷，过强的冷反射信号会严重干扰到探测器的成像质量。在红外定焦系统中，冷反射信号稳定不变，通常可以采用非均匀校正的方法来消除冷反射信号。在红外变焦系统当中，由于变焦过程中系统自身的透镜位置、视场等改变，导致冷反射信号的强弱也在不断变化，针对定焦系统的校正方法将不再适用。综上所述，分析制冷型红外连续变焦的冷反射效应非常有必要。

3.6.2 冷反射表征量 YNI 与 $I/IBAR$

现有的光学软件中，如 Code V 或 ZEMAX 中，通常用 YNI 来定量的描述系统的冷反射强弱。具体公式如下：

$$YNI = y_j n_j i_j \quad \dots (3.14)$$

上式中： y_j 为近轴光线在第 j 个面的入射高度；

n_j 表示第 j 个面的折射率；

i_j 表示边缘入射光线在第 j 个反射面的入射角。

从上式可以看出，当探测器发出的冷光线在透镜的反射面上入射高度为零，或者入射角度为零时， $YNI = 0$ 。即表示冷光线经透镜表面反射以后，又全部返回到探测器焦平面上，完全被探测器所接受，显然，这种情况下冷反射最强，对系统成像质量将造成极大危害。因此，在光学设计当中，可以考虑增大冷光线入射角或者提高其入射高度来增大 YNI 的值，减小冷反射信号的强度。

除上述表征方法以外，还可用 $I/IBAR$ 来描述系统的冷反射强度，公式如下：

$$I/IBAR = i_j/i_{zj} \quad \dots (3.15)$$

上式中， i_{zj} 表示近轴主光线在第 j 个面上的入射角；

i_j 表示边缘入射光线在第 j 个反射面的入射角；

上式表示的是冷反射信号的强弱与视场的关系，当 $I/IBAR$ 的绝对值大于1的时候，表示视场将不再影响冷反射的强度，若此时有 YNI 绝对值小于1，即有冷反射现象产生，依然可以将冷反射信号作为直流噪声过滤掉；当 $I/IBAR$ 的绝对值小于1的时候，表示此时冷反射受视场变化影响比较明显，且其值越小，影响越显著^[46]。此时可提高 YNI 的值来减弱冷反射的影响。

可以归纳为：反射面 YNI 和 $I/IBAR$ 的绝对值，都小于1，则认为其冷反射较强，需要进一步分析；有一个或两个都大于1时，认为冷反射现象不明显，对系统影响较小。

3.7 红外变焦系统的设计方法

相比于定焦镜头，在初始结构的求解，像差的校正等方面红外变焦镜头要更加复杂，因为温度变化对材料的影响，还要进行无热化设计，经过查阅大量文献总结分析，现将红外变焦系统的设计步骤总结为以下几点：

(1) 根据系统的设计要求，计算并确定系统的技术指标。通常为工作波段、变焦范围、相对孔径、探测器尺寸和像元尺寸等，然后依据指标的变倍比大小等条件，分析系统适合正组补偿还是负组补偿，确定系统的补偿方式。

(2) 初始结构的确定。光学设计中确定系统的初始结构一般有两种方法，

一种是根据变焦理论和像差理论，结合设计参数计算求解初始结构参数。还有一种是从已有的专利和镜头库中，寻找与本系统指标参数相近的结构，然后对其修改优化，以满足本系统的设计要求。

(3) 系统优化与像差校正。初始结构确定好了以后，利用计算机软件（ZEMAX 或者 Code V）设置变量与约束条件进行反复优化，并对系统传递函数、点列图等进行分析，评价系统的像质情况。

(4) 冷反射分析和无热化设计。制冷型探测器需对系统进行冷反射效应分析，以确定探测器发出的冷光线对系统像质的影响。通过无热化设计，消除温度变化造成的离焦，以适应各种环境温度。

(5) 凸轮曲线拟合。依据变倍组和补偿组之间移动量的对应关系，拟合出变焦凸轮曲线，使得曲线平滑，变焦流畅。

3.8 本章小结

本章首先介绍了红外辐射的基本概念和波段划分，对红外辐射有了初步的了解，然后介绍了目前常用的探测器种类，并着重讲解了制冷型探测器的工作方式和其产生的冷光阑效率，以及实现 100%冷光阑效率所使用的二次成像技术。接着阐述了无热化理论和冷反射理论，分析比较了系统无热化几种方法的优劣，最后，总结了红外变焦系统的设计方法，为后面的系统设计打好了理论基础。

第四章 变焦系统优化设计

经过前面的分析讨论，结合航天相机的性能要求，本章从确定系统的参数指标出发，对本红外变焦系统进行优化设计和像质评价。

4.1 光学系统技术指标的确定

(1)设计指标

工作波段：3.7~4.8 μm ；

焦距范围：15-550mm；

$F\#$ ：4；

制冷型探测器：640 $\times$ 512；

像元尺寸：15 μm ；

温度范围：-40 $^{\circ}\text{C}$ ~+60 $^{\circ}\text{C}$ ；

畸变：小于 5%

(2)性能参数：

a)像高

系统像高可由探测器尺寸和像元尺寸共同求得，可知探测器靶面横向尺寸为：

$$y'_1 = 640 \times 15\mu\text{m} = 9.6\text{mm} \quad \dots (4.1)$$

纵向尺寸为：

$$y'_2 = 512 \times 15\mu\text{m} = 7.68\text{mm} \quad \dots (4.2)$$

可知探测器靶面尺寸为 9.6 $\times$ 7.68mm，因此半像高为：

$$y' = \sqrt{9.6^2 + 7.68^2}/2 = 6.15\text{mm} \quad \dots (4.3)$$

b)视场角

视场角的大小由镜头焦距和成像尺寸共同决定。视场角越大，视野就越大，越有利于发现和观测目标。当像高大小固定不变时，视场角与焦距有关，焦距越长则视场角越小；反之焦距越短则视场角越大。

$$\text{短焦半视场: } w_s = \arctan \frac{L/2}{f_s} = \arctan \frac{6.15}{15} = 22.29^{\circ} \quad \dots (4.4)$$

$$\text{长焦半视场: } w_l = \arctan \frac{L/2}{f'_l} = \arctan \frac{6.15}{550} = 0.64^\circ \quad \dots (4.5)$$

c) 系统入瞳大小

整个变焦过程中光学系统的 F 数保持不变为 4, 根据公式 $F = \frac{f'}{D}$ 可以计算出:

$$\text{短焦入瞳: } D_s = \frac{f'_s}{F} = \frac{15}{4} = 3.75 \quad \dots (4.6)$$

$$\text{长焦入瞳: } D_L = \frac{f'_L}{F} = \frac{550}{4} = 137.5 \quad \dots (4.7)$$

d) 探测器截止频率

探测器截止频率为 2 倍的像元大小的倒数, 用公式表示为:

$$\nu = \frac{1}{2d} = \frac{1}{2 \times 15 \times 10^{-3}} = 33.3 \text{ lp/mm} \quad \dots (4.8)$$

e) 艾里斑半径

光线经过光学系统时, 受光阑、镜框等孔径的影响会产生衍射现象, 在焦平面上形成具有一定能量分布的衍射斑, 称为艾里斑, 半径公式为:

$$\gamma = 1.22\lambda \frac{f'}{D} = 1.22\lambda F \quad \dots (4.9)$$

λ 取中波红外的中心波长为 $4.2\mu\text{m}$, 则 $\gamma = 1.22\lambda F = 1.22 \times 4.2 \times 4 = 20.496\mu\text{m}$

4.2 补偿方式的和结构形式的选取

4.2.1 传统补偿方式的特点

根据前文所述, 变焦系统依据补偿方式的不同可以分为光学补偿变焦系统、机械补偿变焦系统、双组联动系统和全动型系统, 其中, 机械补偿系统又可依据光焦度的正负分为正组补偿系统和负组补偿系统。在选择系统补偿方式和结构形式之前, 应该深刻了解各种补偿方式和变焦结构的优势和不足之处, 结合系统的技术指标、参数等, 在满足系统性能要求的前提下, 选择合适的补偿方式和结构。另外基于加工和成本方面的考虑, 应该尽量选取体积小, 结构简单的形式。现对几种常见变焦结构总结如表 4.1 所示:

表 4.1 各变焦距系统的优缺点

Table 4.1 The advantages and disadvantages of each zoom system

补偿方式	像面稳定情况	变倍比	机械结构	系统长度	成像质量
光学补偿式	个别位置才能实现像面稳定	小	线性运动无凸轮	长	像质一般
机械补偿式	完全稳定	大	一组线性，一组非线性，需要凸轮	一般	良好
双组联动型	完全稳定	大	两组线性，一组非线性，需要凸轮	较短	良好
全动型	完全稳定	大	线性与非线性混合，需多组凸轮	短	良好

可以看出，光学补偿法只能在变焦过程中实现有限个间断位置的像移补偿，无法实现连续变焦，而本文所要设计的变焦系统，要求实现 36 倍的连续变焦，所以光学补偿法不予考虑。双组联动和全动型结构均可以实现较大的变倍比，系统也相对比较紧凑，也可以获得较好的成像质量，但是从表中也可以看出，这两种结构的运动组份都比较多，计算量大，全动结构运动规律复杂，甚至需要多组凸轮来调节各组之间的运动关系，这势必会造成系统机械结构的复杂化，从而在之后的加工、装配、调试等环节造成诸多问题，对于本课题研究的系统并不适用。机械补偿式变焦距系统可以实现连续变焦，较大的变倍比，系统长度适中，像质较好，机械结构相比较双组联动和全动型比较简单，可以满足大部分变焦系统的性能要求，机械补偿变焦系统根据补偿组的光焦度可分为正组补偿变焦系统和负组补偿变焦系统，一般来讲，对于大视场，长焦焦距长，变倍比较大的系统，宜采用正组补偿法；对于视场较小、对系统光阑球差和二级光谱要求不高的系统，宜采用负组补偿法。

考虑到本文的焦距变化范围比较大，长焦较长，如果采用传统的机械补偿变焦系统，势必会导致系统具有过多复杂的透镜组，影响光线的透过率，增加了设计难度，同时不利于系统的小型化与轻量化。在查阅大量文献资料后，本系统选取了一种改良的双组联动机械正组补偿型变焦结构，作为本系统变焦补偿结构，下面对此结构进行阐述。

4.2.2 改良型双组联动机械补偿法

有别于传统机械补偿型和双组联动型，这种补偿结构拥有四个移动组，其中包含两个变倍组（ Z_1 、 Z_3 ）和两个补偿组（ Z_2 、 Z_4 ），相当于两个机械补偿变焦系统的组合^[48]。为简化透镜组的移动规律，将两个变倍组固连在一起，它们之间的间距保持不变，让其做相同的移动。补偿组同样采用此方式。原理如图 4.1 所示。

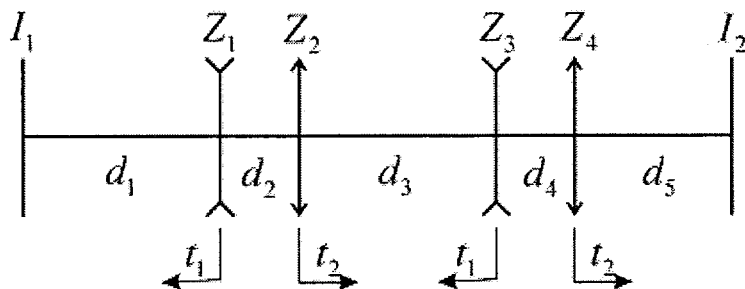


图 4.1 系统原理图

Figure 4.1 The schematic diagram of the system

这种变焦方式具有较好的成像质量，两个补偿组可以更好的补偿像移，各运动组份可以以较短的行程来实现大的变倍比。

4.3 初始结构确定

变焦系统的初始结构选取十分关键，选择一个合适的初始结构可以大大降低设计难度，且更容易获得理想的像质。初始结构的确定通常有两种方法：一是根据变焦系统的各项参数、指标要求等，结合初级像差理论，来求解变焦系统各组元的光焦度及各组元之间的距离，通过反复的计算得到初始结构后，还需在此基础上做进一步的修改完善，最终方可获得成像良好的光学系统。二是通过查找现有的光学文献资料、专利资料、镜头数据库，找到与设计指标相近的初始结构，然后以这个初始结构为起点进行优化设计。两种方法都可以获得初始结构，各有优势与不足，计算的方法比较有针对性，通过反复、精密的计算，一般会找到一个系统的最优解，但是对于超大变倍比，或者镜组较多且结构复杂的系统，计算过程会变得相当繁琐，从而耗费设计人员大量的时间和精力。查找专利的方法恰恰可以避开大量的计算过程，利用光学设计软件，修改初始结构的各项参数以平衡像差，将大部分精力集中在系统的优化上面，节省

了设计时间。这种方法的关键点就在于初始结构的选取，如果对系统的结构和性能理解不充分，选取的初始结构不太合理，同样也会耗费大量的时间去优化这个系统，事倍功半。

根据本系统的设计指标，查阅了大量相关的文献专利，找到了一款与本文的技术指标相近的专利镜头，该结构的 F 数为 2，焦距范围为-10mm~

300mm，波长范围为 $3.7\mu\text{m}\sim 4.8\mu\text{m}$ ，如图 4.2 为变焦系统的初始结构参数。

Surf.Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Semi-Diameter	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6	2nd Order Term	4th Order Term	6th Order Term
0 OBJECT	Standard	Infinity	Infinity			0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
1 (aper)	Standard	146.260000 V	15.000000	SILICON		75.297516 M	0.000000	75.297516	0.000000	0.000000			
2 (aper)	Standard	197.650000 V	66.830000 V			72.333529 M	0.000000	75.297516	0.000000	0.000000			
3 (aper)	Standard	172.800000 V	8.500000	GERMANIUM		39.408195 M	0.000000	39.408195	0.000000	0.000000			
4 (aper)	Standard	81.410000 V	28.170000 V			35.713593 M	0.000000	39.408195	0.000000	0.000000			
5 (aper)	Even Asphere	112.800000 V	8.500000	SILICON		37.734799 M	0.000000	37.734799	1.245000 V		0.000000	-1.075000E-07 V	-1.797000E-11 V
6 (aper)	Standard	202.020000 V	168.260000 T			36.763617 M	0.000000	37.734799	0.000000	0.000000			
7 (aper)	Standard	751.600000 V	6.000000	GERMANIUM		16.330090 M	0.000000	16.330090	0.000000	0.000000			
8 (aper)	Standard	187.120000 V	33.270000 T			16.164787 M	0.000000	16.330090	0.000000	0.000000			
9 (aper)	Even Asphere	139.870000 V	7.000000	SILICON		18.824407 M	0.000000	18.824407	9.186000 V		0.000000	-5.314000E-07 V	-2.012000E-10 V
10 (aper)	Standard	1487.500000 V	66.500000 T			18.559458 M	0.000000	18.824407	0.000000	0.000000			
11 (aper)	Even Asphere	33.270000 V	7.000000	GERMANIUM		8.344829 M	0.000000	8.344829	0.662000 V		0.000000	-2.976000E-07 V	-4.546000E-10 V
12 (aper)	Standard	30.130000 V	87.450000 V			8.631373 M	0.000000	8.344829	0.000000	0.000000			
13 (aper)	Standard	50.700000 V	6.500000	SILICON		11.019679 M	0.000000	11.019679	0.000000	0.000000			
14 (aper)	Standard	90.870000 V	11.850000 V			10.427427 M	0.000000	11.019679	0.000000	0.000000			
15 (aper)	Even Asphere	27.880000 V	5.000000	GERMANIUM		9.599937 M	0.000000	9.599937	-0.744000 V		0.000000	2.525000E-06 V	6.664000E-10 V
16 (aper)	Standard	30.130000 V	9.550000 V			8.330578 M	0.000000	9.599937	0.000000	0.000000			
17 (aper)	Standard	Infinity	1.000000	SILICON		0.086025 M	0.000000	0.086025	0.000000	0.000000			
18 (aper)	Standard	Infinity	3.750000			6.010165 M	0.000000	6.086025	0.000000	0.000000			
19 STOP	Standard	Infinity	15.800000 V			5.005051 M	0.000000	5.005051	0.000000	0.000000			
20 IMAGE	Standard	Infinity				0.275395	0.000000	0.275395	0.000000	0.000000			

图 4.2 系统初始结构参数

Figure 4.2 Initial structural parameters of the system

4.4 优化设计

基于上面的初始结构，在 ZEMAX 中进行如下优化操作：

(1) 取五个变焦位置，在多重结构编辑器里用五组结构将五个变焦位置（-300mm、-165mm、-83.90mm、-35.50mm 和-10.00mm）表示出来，由于该初始结构没有设置像面尺寸，我们对它设置一个像面尺寸（像高 6.15 mm），然后进行优化，使用 EFFL 和 DIMX 操作数对 5 组结构下的焦距和最大畸变（ $\leq 5.0\%$ ）分别进行控制；使用 MNCA、MXCA 和 MNEA 来分别控制透镜间的最小中心间距、最大中心间距和透镜间的最小边缘空气间隔；使用 MNCG、MXCG 和 MNEG 来分别控制透镜的透镜最小中心厚度、透镜最大中心厚度和透镜最小边缘厚度，以避免透镜厚度和间隔出现负值，同时修改系统 F 数为 4，设置波长。

(2) 采用缩放法设计镜头，即将初始结构的尺寸按比例放大 K 倍，其中 $k = 550/300$ ，此时，系统中所有的透镜被放大，距离被等比例拉长，像高也被放大，修改像高参数，同时将“评价函数编辑器”里五个结构的焦距纠正为

目标系统的：-550mm、-375mm、-225mm、-150mm 和-15mm 五个特殊焦距。

(3) 优化过程中为确保像面和系统结构的稳定，应约束总长以确保变焦过程中在任何焦距处系统总长不变。

(4) 优化过程中如果某个面的曲率半径和厚度对系统的像质有很大的影响，可将其设为非球面以增加设计自由度，控制透镜数量，增强成像质量

经过反复修改变量和优化函数，不断迭代尝试，最终得到的大变倍比中波红外连续变焦系统如图 4.3 所示，该结构共使用 8 片透镜和 1 片平板保护玻璃，镜片材料采用硅（SILICON）或锗（GERMANIUM）。在 8 片透镜中，共设计了 4 个偶次非球面；其中，前 6 片为变焦分系统，第 7 片和第 8 片构成了二次成像分系统；第 2 片和第 4 片透镜的间距为固定值，它们具有相同的运动轨迹，可使用机械结构将它们固定在一起构成移动组一；第 3 片和第 5 片透镜的间距也为固定值，它们具有相同的运动轨迹，因此可使用机械结构将它们固定在一起构成移动组二；通过机械联动结构实现联动补偿型变焦。

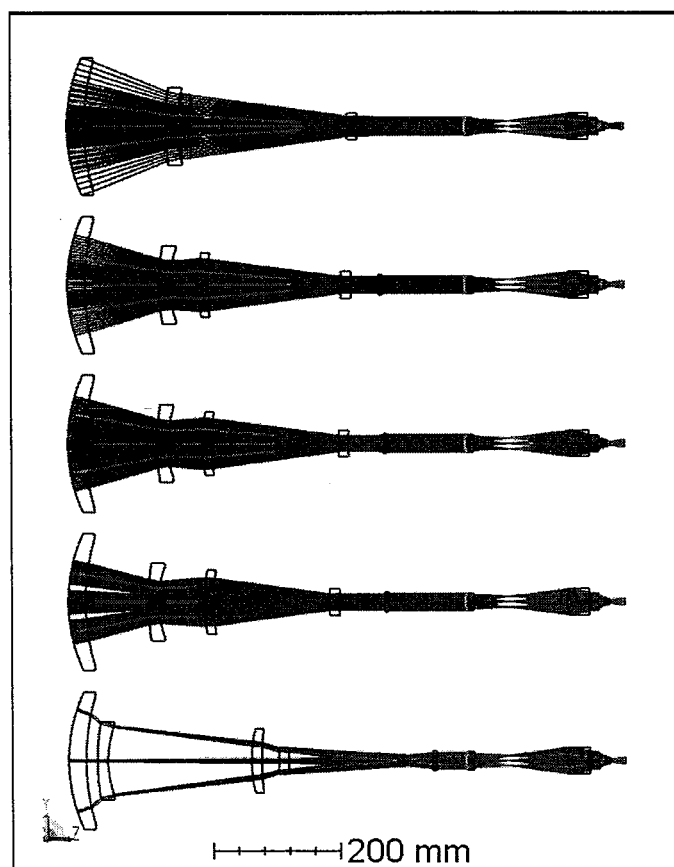


图 4.3 连续变焦系统结构图

Figure 4.3 Continuous zoom system structure

4.5 像质评价

4.5.1 光学传递函数(MTF)

光学系统的成像质量通常是用光学传递函数(MTF)来评价的, 探测器像元为 $15\mu\text{m}$ 系统截止频率为 2 倍的像元大小的倒数, 即 $\nu = \frac{1}{2d} = \frac{1}{2 \times 15 \times 10^{-3}} = 33.3 \text{ lp/mm}$, 一般用 MTF 曲线与坐标轴围成的面积来表示成像质量的好坏, 面积越大表示成像质量越好; 截止频率处的 MTF 值越大表示成像质量越好。图 4.4 所示为光学系统在各焦距位置处的光学传递函数曲线。

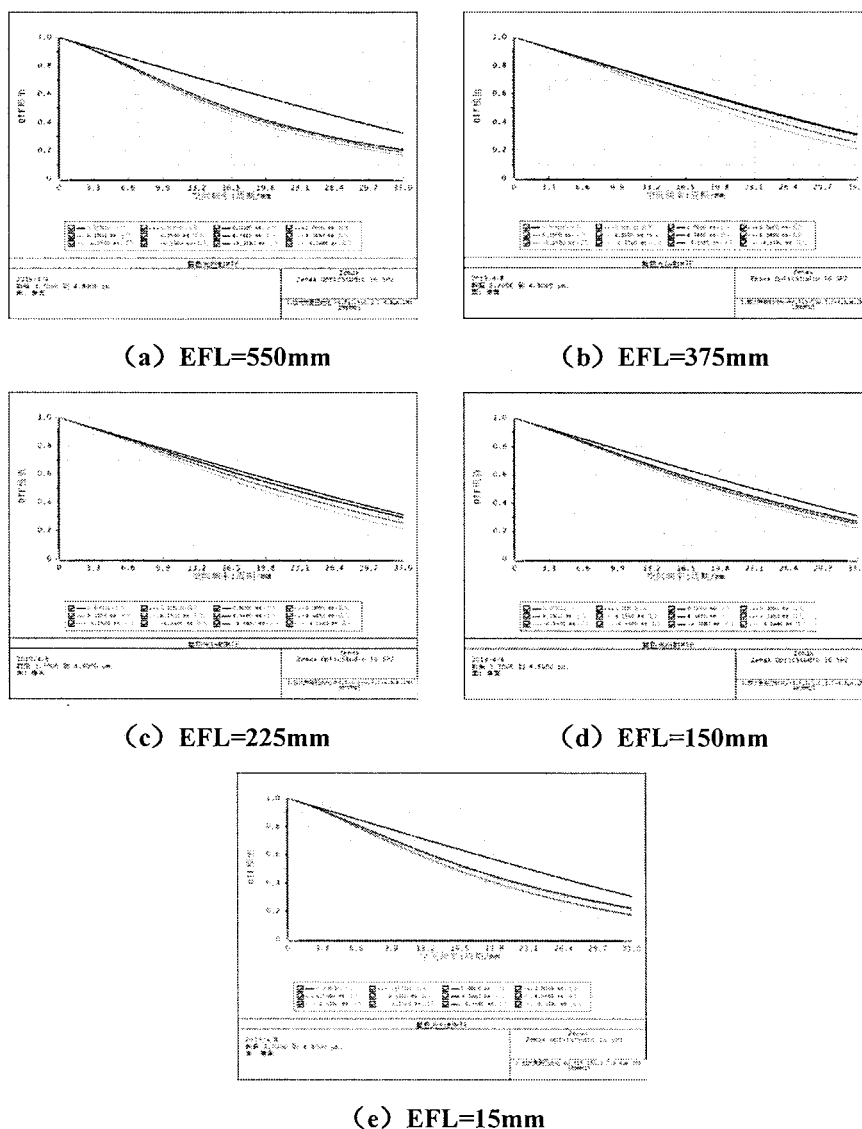
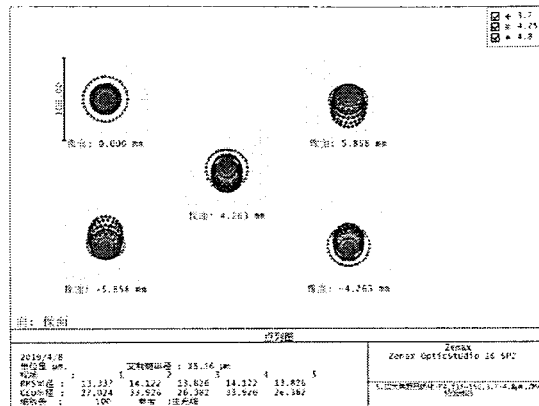


图 4.4 系统在不同焦距处的 MTF 曲线

Figure 4.4 The MTF curves of the system at different focal lengths



(e) EFL=15mm

图 4.5 系统在不同焦距时的点列图

Figure 4.5 The spot diagram of zoom system

上图为 5 个变焦位置全视场的点列图，从图中可以看出，在各个焦距处的所有视场内的光线所形成的弥散斑均小而且密集，说明系统在全焦段无明显色差。尤其在中间焦距处，弥散斑的均方根直径均在像元尺寸 $15\mu\text{m}$ 的范围内，具有良好的能量集中性，更加说明了该光学系统具有良好的成像质量，符合系统技术指标的要求。

4.5.3 畸变

不同于其他像差，畸变并没有影响成像的清晰度，而仅影响物与像的几何相似性，这种像差称为畸变。可以用实际主光线与高斯像面的交点高度 y'_2 和理想像高 y' 之比表示：

$$q = \frac{y'_2 - y'}{y'} \times 100\% \quad \dots (4.10)$$

畸变的存在使得轴外直线成为曲线像，从形状上又可分为枕形畸变（正畸变）：垂轴放大率随视场角的增大而增大；桶形畸变（负畸变）：垂轴放大率随视场角的增大而减小。如图 4.6(a)所示为枕形畸变，图 4.6(b)所示为桶形畸变

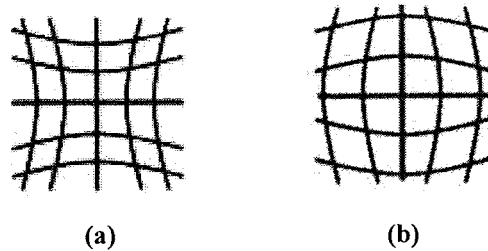


图 4.6 畸变图

Figure 4.6 Distortion schematic

本系统在不同焦距处场曲畸变曲线如图 4.7 所示。

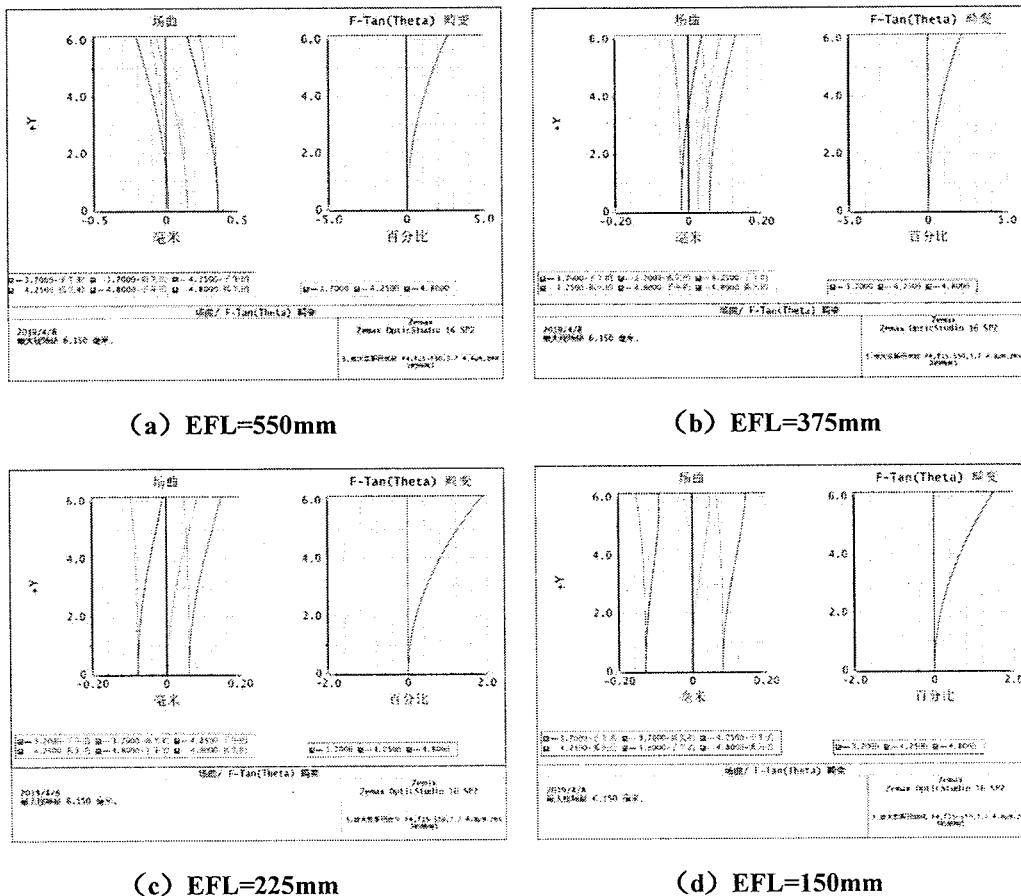


图 4.7 系统在不同焦距处的畸变曲线

Figure 4.7 Distortion curves of zoom system

由上图可以看出，系统在所有焦距处畸变不超过 3%，像质良好，满足设计要求。

4.6 本章小结

本章首先根据系统的设计指标，计算出了像高、视场等系统参数，然后对

几种传统的补偿方式的特点进行了阐述，分析了它们的优缺点以及适用的场合，介绍了一种改良的双组联动型机械补偿结构。通过研究分析并结合本系统的设计参数，确定了初始结构，然后对系统进行了反复的修改优化，得到了最终的红外变焦系统，最后分析了本系统在所有焦距全视场处的 MTF、点列图、畸变，发现系统成像质量良好，弥散斑小而密集，满足设计要求。

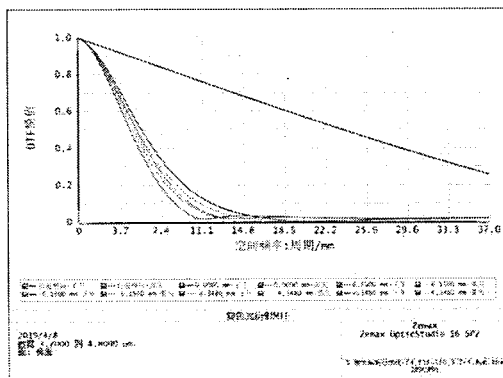
第五章 系统性能分析

5.1 环境适应性分析

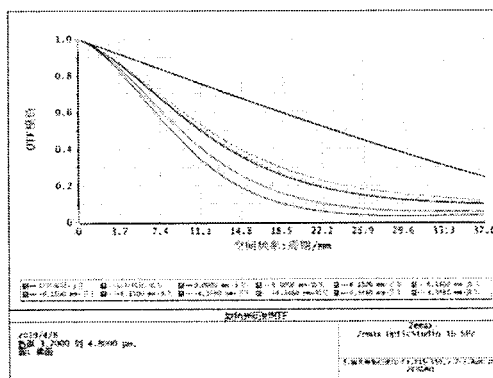
经前文分析可知, 红外材料对温度的变化十分敏感, 从而导致温度对红外变焦系统的影响也十分显著, 本文设计至此一直是在常温(20℃)下进行, 然而在实际的应用当中, 例如航天等特殊场合, 温度变化的范围很广, 势必会对系统像质有很大的影响, 因此, 分析并消除环境温度对系统的影响具有非常重要的意义。

5.1.1 系统在两个极端温度下的成像质量

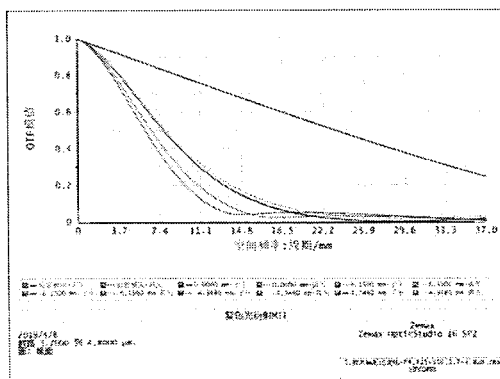
本系统设计要求工作温度范围为-40℃~+60℃, 分别在 ZEMAX 中模拟-40℃温度下和+60℃温度下, 不同焦距处的系统成像情况。当系统温度处于-40℃时, 系统的 MTF 曲线如图 5.1 所示。



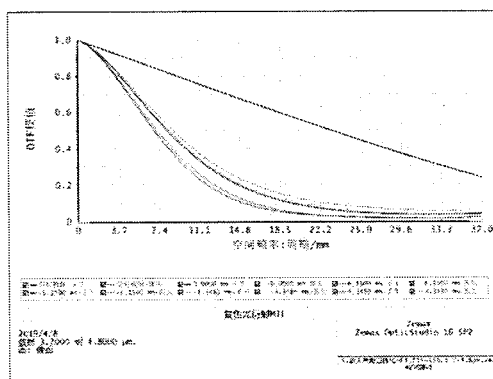
(a) EFL=550mm



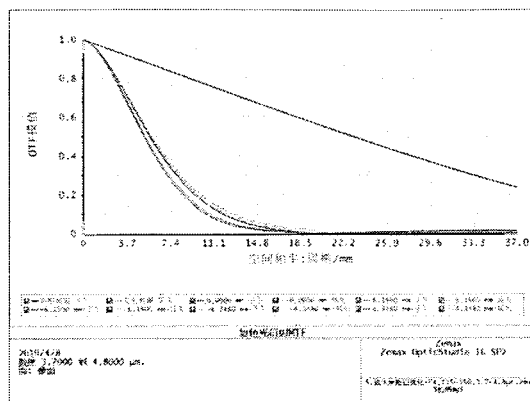
(b) EFL=375mm



(c) EFL=225mm



(d) EFL=150mm



(e) EFL=15mm

图 5.1 系统不同焦距在-40℃时的 MTF 曲线

Figure 5.1 The MTF curve of system at -40°C

由图 5.1 可以看出，当系统温度处于-40℃，在所有焦距处系统的 MTF 曲线都变的十分差，可以看出，因为温度的大幅变化，对红外材料的厚度、曲率半径、折射率温度变化系数等性质产生了巨大的影响，从而造成了系统像质的下降和离焦。如表 5.1 所示，为系统在-40℃时的离焦量。

表 5.1 变焦系统在-40℃时的离焦量

Table 5.1 The defocus amount of the zoom system at -40 C

20℃焦距/mm	-40℃时焦距/mm	离焦量/mm
15	14.4302	-0.5698
150	149.776	-0.2240
225	225.1760	0.1760
375	375.5635	0.5635
550	550.8650	0.8650

如表 5.1 所示为系统在-40℃时，不同焦距处的离焦量，可以看出系统产生了较大的离焦，需要校正。

当系统处于+60℃时，高温同样会对系统像质造成极大地影响，如图 5.2 所示为系统在长焦、短焦和中焦处高温下的 MTF 曲线图。

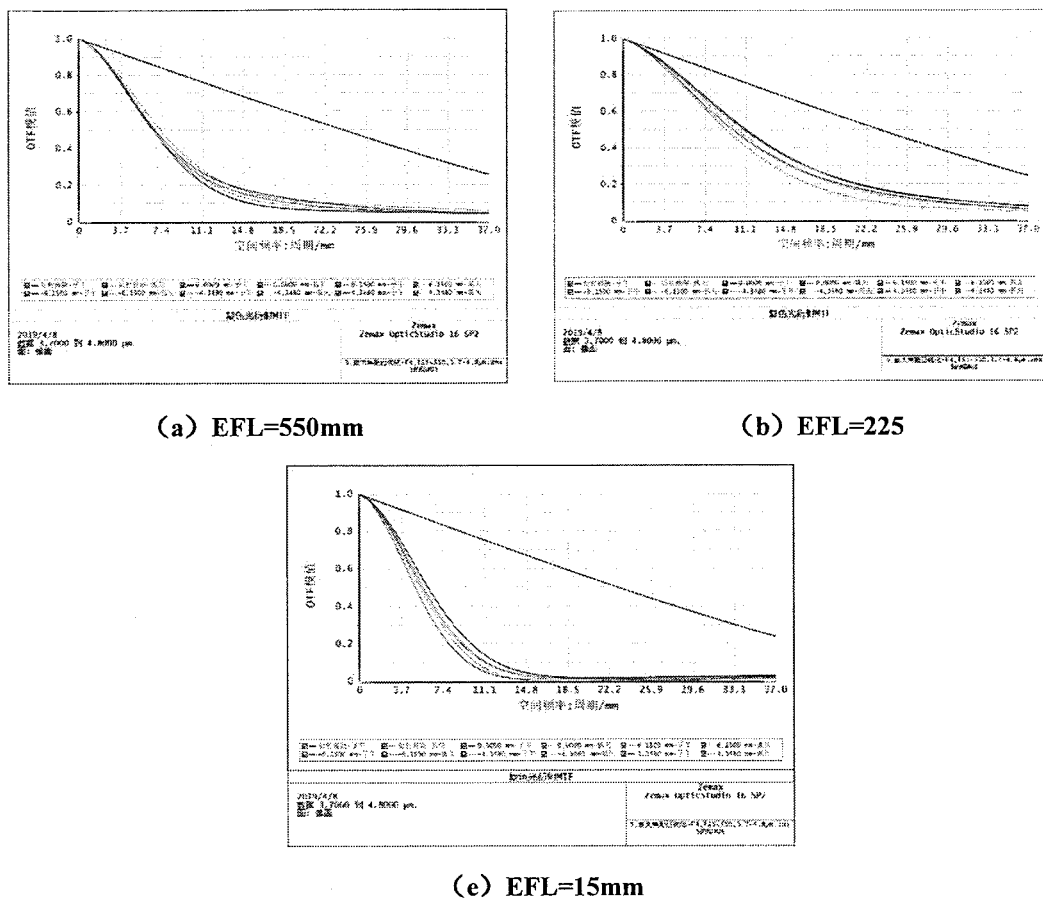


图 5.2 系统不同焦距在+60℃时的 MTF 曲线

Figure 5.2 The MTF curve of system at +60°C

同样可以看出，系统在高温下成像质量变的极差，需要对系统进行温度补偿。如表 5.2 所示为

表 5.2 变焦系统在+60℃时的离焦量

Table 5.2 The defocus amount of the zoom system at +60°C

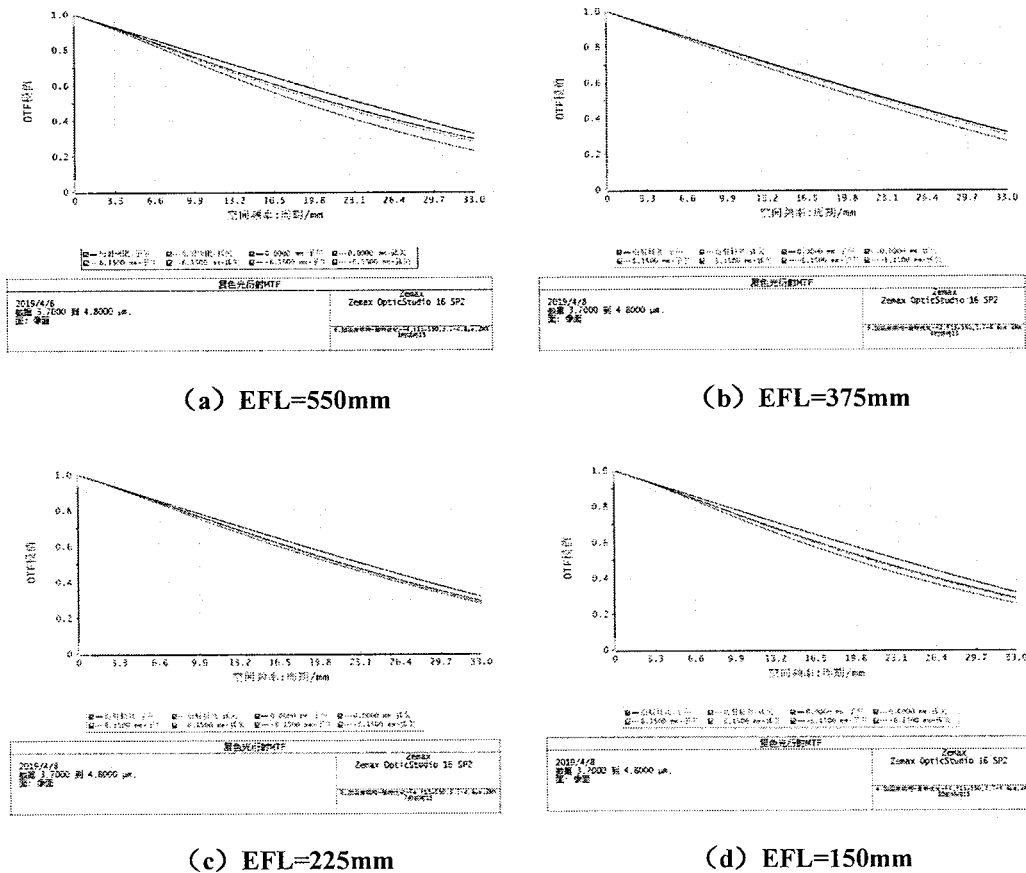
20℃焦距/mm	+60℃时焦距/mm	离焦量/mm
15	14.1244	-0.8756
150	149.6898	-0.3102
225	225.2296	0.2296
375	375.5964	0.5964
550	550.9836	0.9836

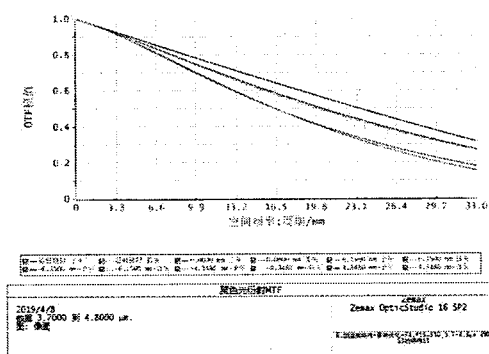
由以上分析可知，在-40℃和+60℃高低温环境下，已超过了材料的可容许的环境温度变化范围，需要对系统消热差以弥补温度变化造成的离焦。

5.1.2 温度补偿之后成像质量

通过第二章的分析可知,无热化技术根据补偿方式的不同大体分为三种:光学被动式,机械被动式和机电主动式。本系统变倍比较大,若采用光学被动式或者机械被动式补偿,对系统材料和结构的要求过高,要想实现全焦段的无热化比较困难,因此本文选取机电主动补偿式来消除热差,经过分析,决定选取系统的后固定组来补偿离焦。即温度传感器首先探测到外界温度的变化,然后计算出温度变化所产生的离焦量,再向控制器发出指令,通过电机带动后固定组做微量移动来补偿离焦^[50]。

当系统温度处于 -40°C ,经过温度补偿后系统的成像质量如图 5.3 所示。





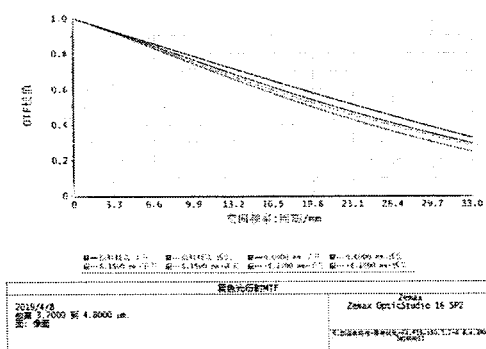
(e) EFL=15mm

图 5.3 系统不同焦距在-40℃时的 MTF 曲线

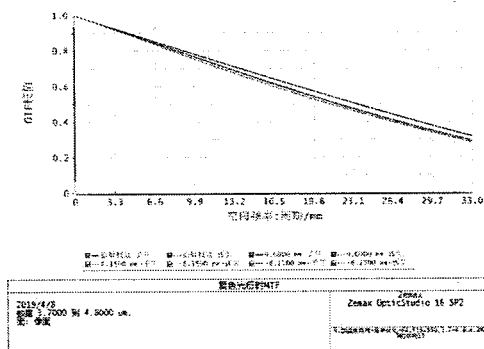
Figure 5.3 The MTF curve of system at -40°C

从上图可以看出，经过温度补偿以后，系统在-40℃环境下像质有了明显的改善，MTF 值在截止频率 33 lp/mm 处除短焦以外均大于 0.22，且接近衍射极限，MTF 曲线平缓，各焦距处成像质量良好，表明系统可以在-40℃低温条件下使用。

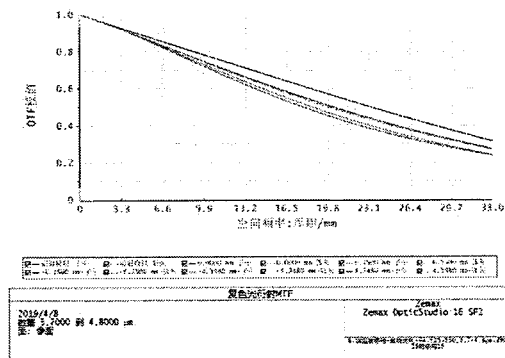
系统温度补偿后+60℃成像质量如图 5.4 所示，可以看出，经过温度补偿以后，系统在+60℃环境下像质有了明显的改善，系统在截止频率 33 lp/mm 处均大于 0.22，且接近衍射极限，MTF 曲线平缓，各焦距处成像质量良好，表明系统可以在+60℃高温条件下使用。



(a) EFL=550mm



(b) EFL=225



(e) EFL=15mm

图 5.4 系统不同焦距在+60℃时的 MTF 曲线

Figure 5.4 The MTF curve of system at +60°C

5.2 冷反射分析

由本文第三章关于冷反射的理论知识可知，本文所设计的制冷型连续变焦系统必会有冷反射现象的产生，因此要对本系统进行冷反射分析以便对系统的像质有进一步的评价，如表 5.3 所示为系统在长焦位置处的两个表征量 YNI 与 $I/IBAR$ 值，表 5.4 所示为系统在短焦位置处的两个表征量 YNI 与 $I/IBAR$ 值。

表 5.3 长焦冷反射分析

Table 5.3 Narcissus analysis at long focal length

surface	1	2	3	4	5	6	7	8	9
YNI	18.663	-2.7818	-4.4287	10.232	8.7979	0.3750	-1.4535	1.4119	1.5666
$I/IBAR$	1.736	1.740	1.888	1.898	1.913	1.925	9.475	10.926	14.530
surface	10	11	12	13	14	15	16	17	18
YNI	-1.2441	0.3577	0.2188	1.8307	-1.2478	0.1012	-0.1739	-0.4750	-0.4658
$I/IBAR$	15.908	0.853	1.806	0.776	0.870	0.933	0.995	1.657	1.749

由上表中的数据可以看出，仅有第 11、15、16 面的 YNI 与 $I/IBAR$ 同时小于 1，可知这三个面的冷反射现象比较明显，可调整其参量作进一步优化。

表 5.4 短焦冷反射分析

Table 5.4 Narcissus analysis at short focal length

surface	1	2	3	4	5	6	7	8	9
YNI	1.3882	-0.2069	-0.3361	1.2187	1.5965	0.0930	-0.3826	1.5974	1.0367
I/IBAR	1.592	1.680	5.808	1.701	-14.327	-11.525	2.094	2.290	4.430
surface	10	11	12	13	14	15	16	17	18
YNI	-1.0094	0.3256	0.0921	1.7924	-0.2499	0.3289	-0.3389	-0.4588	-0.4679
I/IBAR	4.202	4.739	3.598	3.226	1.688	1.599	1.607	1.695	2.186

由上表可知，在短焦位置处所以面的 YNI 与 I/IBAR 绝对值不同时小于 1，冷反射现象不明显，对系统像质影响较小。

5.3 公差分析

一般由软件设计得到的光学系统，只是一个理想情况下的系统，没有考虑加工和装调带来的误差，而这些微小的误差叠加在一起，将会对系统的像质产生比较大的影响。公差分析的过程首先是为了模拟实际生产制造中可能出现的各种误差对系统最终结果的影响；其次通过对误差的评估，推算出系统中光学加工、装配允许的公差范围以便进行实际生产制造。

Zemax 中用到的公差分析方法为，①敏感度分析：单独公差的影响对评价方法的影响；②逆敏感度分析：由公差容限反推回系统允许的最大公差；③蒙特卡洛分析：模拟实际生产。

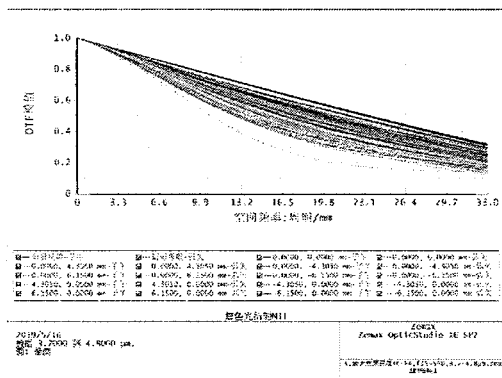
在公差分析之前首先要给出各个制造公差的范围，这个范围的给出是和整个镜头要求的装配精度有关的。表 5.5 为不同的公差等级。

表 5.5 公差等级表

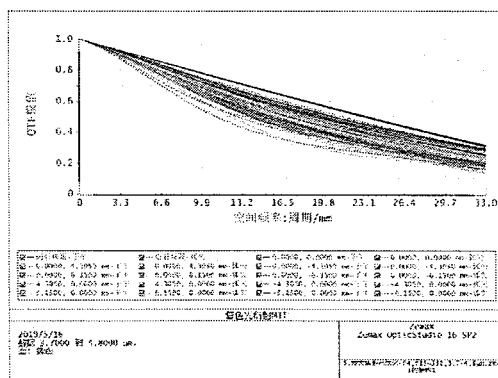
Table 5.5 Tolerance scale

等级	折射率	光圈数	厚度/mm	不规则度	透镜楔角/(°)	阿贝误差/%	透镜倾斜/(°)	透镜偏心/mm	镜组位置/mm	镜组倾斜/(°)	镜组偏心/mm
Q1	0.0001	0.5	0.01	0.1	0.17	0.01	0.17	0.001	0.01	0.17	0.001
Q2	0.0003	1	0.01	0.1	0.3	0.03	0.3	0.003	0.01	0.3	0.003
Q3	0.0005	1	0.0125	0.25	0.5	0.05	0.5	0.005	0.0125	0.5	0.005
Q4	0.0008	2	0.025	0.25	0.8	0.08	0.8	0.008	0.025	0.8	0.008
Q5	0.001	2	0.0375	0.5	1	0.1	1	0.01	0.0375	1	0.01
Q6	0.003	3	0.05	0.5	1.5	0.3	1.5	0.03	0.05	1.5	0.03
Q7	0.008	3	0.075	1	2	0.5	2	0.05	0.075	2	0.05
Q8	0.008	3	0.1	2	3	0.8	3	0.08	0.1	3	0.08

本系统在公差分析时采用的是 Q4 等级的公差，Q4 等级公差对加工来说相对容易，装配难度小。系统采用的评价标准为几何 MTF，系统经过 80 次蒙特卡洛分析，长焦处名义 MTF 为：0.25860805，预计变化：-0.04496261，预计 MTF：0.21364544。中焦名义 MTF：0.21412289，预计变化：-0.02608457，预计 MTF：0.18803831。短焦名义 MTF：0.17125917，预计变化：-0.01245748，预计 MTF：0.15880169。根据以往的设计经验可知，本系统设计合理，可以保证加工装调以后的像质良好。图 5.5 为进行 80 次蒙特卡洛分析叠加的几何 MTF 结果。



(a) EFL=550mm



(b) EFL=225



Figure 5.5 Geometric MTF Results of 80 Monte Carlo Analysis

凸轮是变焦镜头中的一个核心部件，变焦系统的变焦过程依靠变倍组和补偿组之间相互对应的移动来实现，而变倍组和补偿组的移动则是依靠凸轮的驱动，来改变镜组的相对位置，从而实现焦距的连续变化。由此可见，凸轮在变焦系统中的作用至关重要。平滑的凸轮曲线会保证整个变焦过程流畅无卡死现象，从而实现像面稳定，像质良好的要求^[52]。

光学系统中变倍组和补偿组均是依靠凸轮带动,保证按照要求连续不断的改变变倍组和补偿组的位置,以及他们和前后固定组之间的间距。使物镜的组合焦距连续改变,从而实现倍率的改变,在整个变焦过程中,影像始终清晰地成在一个固定的平面。

设短焦时，变倍组对轴上入射的平行光线的理想像距 l'_2 、补偿组对此光线的理想像距 l'_3 、变倍组的焦距 f'_2 、补偿组的焦距 f'_3 、以及变倍组与补偿组在短焦时的间隔 d_{s23} ，如图 5.6 所示，

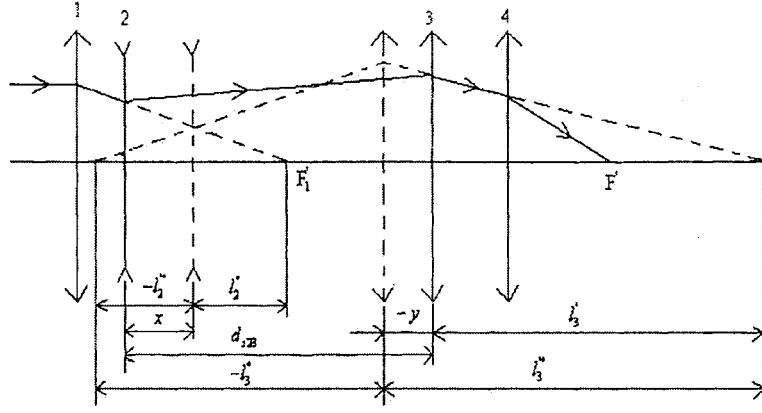


图 5.6 机械补偿式变焦距系统

Figure 5.6 Mechanically compensated zoom system

上图中按序号标注, 1 为前固定组, 2 为变倍组, 3 为补偿组, 4 为后固定组。

由式:

$$l_2 = f_2' - d_{s12} \quad \dots (5.1)$$

$$\frac{1}{l_2'} - \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_2'} \quad \dots (5.2)$$

可得 l_2' , 同理可求出 l_3' , l_4' 。设变倍组移动距离 x , 为了补偿变倍组移动带来的像移, 则补偿组的位移量 y 可按下式求得:

$$\frac{1}{l_2 - x} + \frac{1}{f_2'} = \frac{1}{l_2'^*} \quad \dots (5.3)$$

$$\frac{1}{l_2'^* + x - d_{s23} - y} + \frac{1}{f_3'} = \frac{1}{l_3' - y} \quad \dots (5.4)$$

或者:

$$ay^2 + by + c = 0 \quad \dots (5.5)$$

式中:

$$a = l_2 + f_2' - x \quad \dots (5.6)$$

$$b = (l_3' - l_2 + d_{s23} + x)x - (l_2 + f_2')(l_3' - d_{s23}) - f_2'l_2 \quad \dots (5.7)$$

$$c = [(d_{s23} + l_2 - x)(l_3' - f_3') - l_3'f_3']x \quad \dots (5.8)$$

它的两个根是:

$$y_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \dots (5.9)$$

5.4.2 凸轮曲线的拟合算法

凸轮曲线的高斯算法因为过于理想化，在实际工程当中并不常用，比较常见的算法就是多点拟合成凸轮曲线的方法。系统优化时一般对多个焦距位置同时平衡像质，通常的做法是先优化长，中，短三个位置的像质，待这三个位置的像质满足要求之后再插入其他焦距，在光学软件中同时进行优化，当点数较多时，可利用 MATLAB 等其它数据处理软件进行数据拟合，计算机根据拟合曲线方程可以算出任意位置的参数，使这几个位置都达到理想的像质^[55]。利用此方法当插入足够多的位置时，便可以将其拟合为一条平滑的曲线，如果曲线有拐点则需反复修改，直到曲线变的平滑为止。

针对凸轮曲线斜率（压力角）过大的问题，本文采用了分段处理的思路，在凸轮曲线斜率较大的区间段内，建立四次多项式划分横坐标（旋转角度或弧长）之间的间距，使其间距逐渐增大，保证纵坐标即变倍组和补偿组的移动距离不变，从而可以使凸轮曲线的斜率逐渐减小；在凸轮曲线斜率较小的区间段内均分旋转角度（弧长），这样可保证凸轮曲线呈平滑状态。利用此种方法对本设计的凸轮曲线进行优化分析，在 MATLAB 中编程实现，最终得到凸轮曲线如图 5.7 所示。

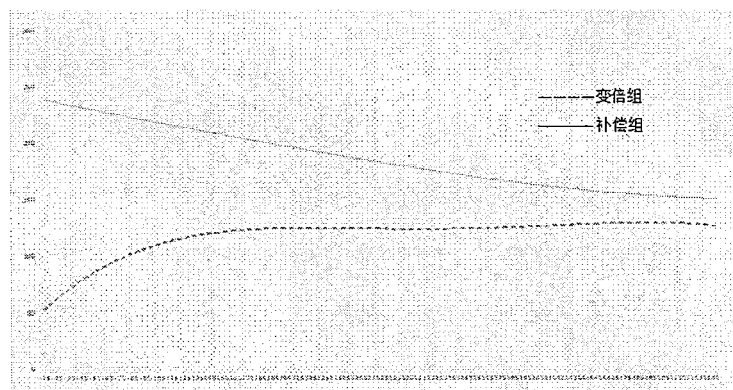


图 5.7 变焦距系统凸轮曲线

Figure 5.7 The zoom curve of zoom system

本系统有两个变倍组（第二片透镜和第四片透镜），具有相同的运动轨迹，行程 81.91mm，两个补偿组（第三片透镜和第五片透镜），具有相同的移动轨迹，行程为 107mm。曲线平滑无拐点，斜率较小。

5.5 本章小结

本章首先针对-40℃和+60℃环境温度下的成像质量进行了测试分析，发现各焦距处的成像质量相比常温下降非常大，有一定的离焦现象，采取了机电主动补偿式的方法消除了温度对系统的影响，温度补偿后系统 MTF 曲线接近衍射极限，点列图弥散斑密集，像质有较大的改善。然后基于冷反射分析的理论，对系统进行了冷反射分析。最后介绍了凸轮曲线的高斯算法和拟合算法，运用分段处理的方法优化了本系统的凸轮曲线，结果表明凸轮曲线平滑、变焦流畅。

第六章 总结与展望

6.1 工作总结

由于红外变焦系统极强的环境适应能力和抗干扰能力，同时兼备了变焦系统的搜索和识别的优势，因此在航天、军事、制导、医疗等方面应用越来越广泛，可以看出，研究大变倍比的红外变焦系统具有极高的实用意义。

本文首先介绍分析了国内外多种结构形式的红外变焦系统，并比较了它们之间的特点，对红外变焦系统有了定性的认识。然后从变焦基础理论出发，以机械正组补偿为例建立了变焦微分方程并推导了它的高斯解，对方程的解、换根等特殊问题做了详细说明。然后，以红外辐射的理论为出发点，介绍了目前常用的红外材料的性能，引出了制冷与非制冷两种红外探测器，并对制冷型探测器的冷光阑效率进行了阐述，详细分析了为实现 100%冷光阑效率采用的二次成像技术。阐述了无热化和冷反射理论，并对三种无热化方式的特点进行了分析。

基于以上的理论基础，本文针对 640×512 制冷型探测器，结合设计指标，选取了硅和锗两种材料，这两种材料均具有较低折射率温度变化系数，利用二次成像技术，设计了一款变焦范围为 15~550mm 的大变倍比红外中波变焦系统，系统 F 数为 4。分析可知，在奈奎斯特频率处(33lp/mm)，系统在全焦段所有视场处的 MTF 曲线均接近衍射极限，点列图弥散斑小且密集，畸变最大不超过 3%，系统像质良好，达到设计要求。

最后，对系统进行了冷反射分析和温度分析，发现系统在在高温（+60℃）和低温（-40℃）情况下，MTF 曲线下降严重，像质变的很差，经过分析验证，采用机电后组补偿式方法可以很好的校正因为温度引起的像面离焦情况，经过分析验证，在温度变化的同时，各焦距处像质良好且稳定。利用 MATLAB 软件编写程序拟合并优化了凸轮曲线，可知曲线平缓，变焦流畅。

6.2 工作展望

至此，本系统已经设计完毕，达到设计要求，但依然有以下几点有提高和发展的空间：

(1) 材料方面。本系统仅选用了折射率温度变化系数较低的硅和锗，维持了较低的成本，但在校正像差时候就比较困难，后期可以尝试硫系玻璃等其他新型红外材料。

(2) 通常情况下用不同材料不同光焦度透镜组合的办法来消除色差，但会增加系统的高级像差，衍射元件具有负色散特性，且色差系数仅与表面参数有关，因此可以很好校正色差，也可以使光学设计具有多元化。本文可以考虑增加衍射面以提高像质。

(3) 像质方面，本文实现了 15~550mm 的焦距范围内的连续变焦，经过分析，绝大部分焦距处的像质良好，满足设计要求，但在长焦 550mm 处和短焦 15mm 处，像质相对较差，有待改善。