

# 可连续变倍双远心系统设计及其凸轮曲线分析

叶文炜<sup>1,2\*\*</sup>, 黄锦媛<sup>1,2</sup>, 周天福<sup>1,2</sup>, 林峰<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 福建师范大学光电与信息工程学院福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007;

<sup>2</sup> 福建师范大学光电与信息工程学院医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007

**摘要** 为满足机器视觉系统对可变倍双远心系统的需求,设计了一款可实现连续变倍的双远心镜头。该系统的放大倍率为 $-0.50\times$ 至 $-0.20\times$ ,物方视场可观测的直径范围为 $22\sim 55\text{ mm}$ ,可满足低畸变(各倍率段均小于 $0.1\%$ )、高分辨率( $77.5\text{ lp/mm}$ 处均大于 $0.30$ )、高远心度(各倍率段均小于 $0.1^\circ$ )等设计要求,在使用过程中同时具有对物面、像面位移不敏感和可连续变倍检测的优点。重点介绍两种求解变倍凸轮曲线的方法,并进行相互验证,验证结果表明了凸轮曲线数据的准确性,这对变倍系统的后期生产加工具有重要作用。

**关键词** 光学设计; 机器视觉; 变倍双远心系统; 凸轮曲线

中图分类号 TN391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.052201

## Design of Continuous Zoom Double Telecentric System and Analysis of Cam Curve

Ye Wenwei<sup>1,2\*\*</sup>, Huang Jinxuan<sup>1,2</sup>, Zhou Tianfu<sup>1,2</sup>, Lin Feng<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Fujian Key Laboratory of Photonics Technology, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Medical Optoelectronic Science and Technology, Ministry of Education, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

**Abstract** In order to meet the machine vision system's demand on the zoom double telecentric system, we design a double telecentric lens that can achieve continuous zoom. The system magnification is from  $-0.50\times$  to  $-0.20\times$ , and the observable diameter range of the object field of view is from  $22\text{ mm}$  to  $55\text{ mm}$ . The designed system meets the design requirements of low distortion (less than  $0.1\%$  for all multiplications), high resolution (higher than  $0.30$  at  $77.5\text{ lp/mm}$ ), and high telecentricity (less than  $0.1^\circ$  for all multiplications), and has the advantages of being insensitive to object surface and image plane displacement as well as continuous zoom detection. Two methods to solve the variable cam curve are introduced and used to verify each other. The verification indicates the accuracy of the cam curve data, which plays an important role in the subsequent production and processing of the variable magnification system.

**Key words** optical design; machine vision; zoom double telecentric system; cam curve

**OCIS codes** 220.3260; 330.7338; 100.5200

## 1 引言

机器视觉工业检测中待测工件的种类繁多,尺寸大小各不相同,检测视野范围大小和要求检测精度也不一样<sup>[1]</sup>。传统的工业检测系统通常使用单一倍数的远心镜头,当测量不同尺寸的工件时需要更换不同

的镜头及光学组件。对于使用者来说,这不仅会造成使用不便,还会拖延生产进度,导致生产成本增加<sup>[2]</sup>。

目前,远心镜头被广泛应用在机器视觉、工业测量和光刻等领域<sup>[3]</sup>。远心镜头的主要优点在于镜头的景深范围较大,放大倍率不随物体的离焦而变化等。远心镜头可以分为物方远心镜头、像方远心镜

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-08-13; 录用日期: 2019-08-27

基金项目: 福建省科技厅高校产学研合作重大项目(2018H6006)

\* E-mail: lfeng127@163.com; \*\* E-mail: yww\_dyx@163.com

头及物像双远心镜头<sup>[4]</sup>。与前两种镜头相比,物像双远心镜头结构更复杂,而且价格较为昂贵。但是,随着现在加工、测试水平的不断提高,物像双远心镜头也慢慢地被投入到日常的工业测量中。对于物像双远心镜头,即便物体或者像面的位置发生变化,镜头的放大倍率依然保持恒定<sup>[5]</sup>。物方远心特性使得镜头的物方景深加大,便于对大横纵比的零件进行三维测量;像方远心特性的优点在于能比较方便地提供均匀照明,并且可以降低对成像芯片定位精度的要求。目前,关于变倍远心镜头的设计多停留在普通的物方远心变倍镜头<sup>[6]</sup>上,对于变倍物像双远心镜头的设计关注较少。鉴于此,本文设计了一款物像双远心系统,介绍了该系统凸轮曲线的求解方案并得出了准确的凸轮曲线,为后期加工提供支持。

## 2 设计指标分析及初始结构

系统适配索尼公司 ICX285A 成像芯片,其主要参数如表 1 所示。

表 1 成像芯片参数  
Table 1 Imaging chip parameters

Optical size /mm	Resolution	Pixel size / ( $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$ )	Effective area /( $\text{mm}\times\text{mm}$ )
11	1392×1040	6.45×6.45	8.80×6.60

系统在物方同一工作平面上可观测的直径范围为 22~55 mm,像方成像直径为 11 mm。设计中选取的 3 个不同的物体高度为 22,33,55 mm。放大率为

$$\beta = y'/y, \quad (1)$$

式中: $y'$ 为像方视场大小; $y$ 为物方视场大小。根据(1)式,系统可实现从 $-0.2\times$ 至 $-0.5\times$ 连续变倍。

因为采用的 CMOS 像元尺寸为  $6.45\ \mu\text{m}$ ,根据奈奎斯特采样定理,物点经光学系统后必须覆盖至少 2 个传感器像元才能被分辨,即

$$\alpha = 2 \times \sigma'/\beta, \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为检测精度; $\sigma'$ 为 CMOS 像元大小; $\beta$ 为系统放大倍率。根据(2)式,可计算出系统的检测精度范围为  $0.025\sim 0.064\ \text{mm}$ 。其他相关技术指标如表 2 所示。

根据表 2 中相关技术指标的要求,选取图 1 所示双远心系统作为初始结构。该系统物方视场可观测的直径范围为 60 mm,工作距离为 150 mm,放大倍率为 $-0.18\times$ 。

## 3 优化过程及像质分析

设计系统为连续变倍系统,在变倍范围内选取 3 个放大倍率( $-0.20\times$ 、 $-0.33\times$ 和 $-0.50\times$ )进行

表 2 系统设计参数指标

Table 2 System design parameters

Parameter	Value
Magnification	$-0.5\times$ to $-0.2\times$
Object field of view /mm	22 to 55
Image field of view /mm	11
Working distance /mm	130
Distortion	$<0.1\%$
Telecentricity	$<0.1^\circ$

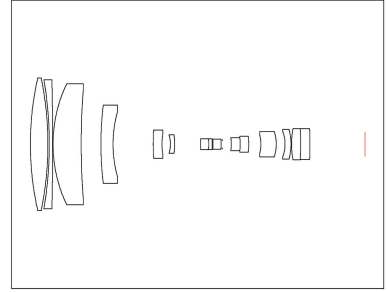


图 1 系统初始结构示意图

Fig. 1 Diagram of initial system structure

优化。根据经验,先优化中间倍率段,再使用光学设计软件 Zemax 的多重结构功能将 $-0.20\times$ 与 $-0.50\times$ 的倍率加入系统同时进行优化。软件中多重结构的设置参数如表 3 所示。

表 3 多重结构操作数设置

Table 3 Multiple structure operand settings

Active	Config 1	Config 2	Config 3
APER	0.010	0.015	0.025
YFIE	27.500	16.500	11.000
THIC 10	23.000	14.000	1.200
THIC 14	12.000	3.700	0.650
TSP2 19	64.720	64.720	64.720

APER 为设定不同倍率段的系统数值孔径;YFIE 为设定不同倍率段的物体高度;THIC 为变倍组、补偿组的间隔;TSP2 的作用是保证系统前固定组到后固定组之间的距离不变。

在优化过程中,除了需要校正球差、彗差、畸变和色差等基本像差外,还需着重优化系统的远心度<sup>[7]</sup>。在设计过程中,Zemax 软件可以开启物方远心功能,保证系统物方为绝对远心,还可以通过设置操作数来控制像方远心度的大小,也可以通过控制系统出瞳位置来控制系统远心度的大小。根据远心系统的定义,若系统为像方远心时,其出瞳位置应在无穷远处。通过控制系统的出瞳位置大于一个很大的数值可以间接控制系统的远心度,也可以通过控制主光线与像面的角度来控制系统的远心度。通过操作数直接控制不同视场的出射光线与光轴的角

度,使用 RANG 操作数(指定视场真实光线与 Z 轴的角度)设置 0.3 视场、0.5 视场、0.8 视场和全视场 4 个视场位置,使系统出射光束垂直入射到像面上,以达到较好的远心度。

考虑到后期镜片的可加工性,优化过程中除了校正像差外还需要注意把控各个镜片的定心系数。机械定心系数为

$$K = \frac{1}{4} \left| \frac{D_1}{R_1} - \frac{D_2}{R_2} \right|, \quad (3)$$

式中: $D_1$ 、 $D_2$  为镜片前后表面对应的孔径值; $R_1$ 、 $R_2$  为镜片前后表面的曲率半径值。 $K > 0.15$  时,定心稳定,可加工性好; $0.15 > K > 0.10$  时,定心效果较差; $K < 0.10$  时,无法定心。优化过程中可以通过添加优化操作数的办法,实时监控各个镜片的定心系数  $K$  的大小,对定心效果差的镜片进行修整。

最终优化完成的结构光路如图 2 所示。

调制传递函数(MTF)曲线图可反映镜头在不同频率下传递物方信息的能力。优化后双远心系统的调制传递函数曲线如图 3~5 所示。奈奎斯特频率为

$$N = \frac{1000}{2\sigma'} = 77.5. \quad (4)$$

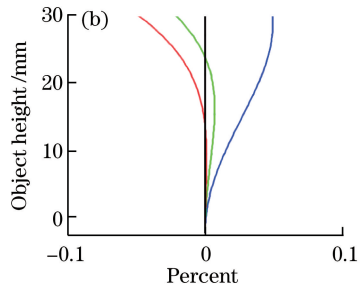
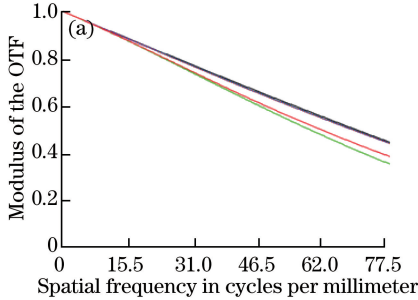


图 3  $-0.20\times$  时的 MTF 和畸变曲线。(a) 系统 MTF 曲线;(b) 系统畸变曲线

Fig. 3 MTF and distortion curves at  $-0.20\times$ . (a) MTF curve of the system; (b) distortion curve of the system

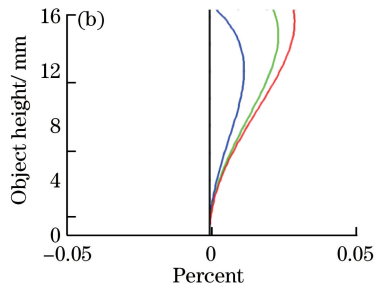
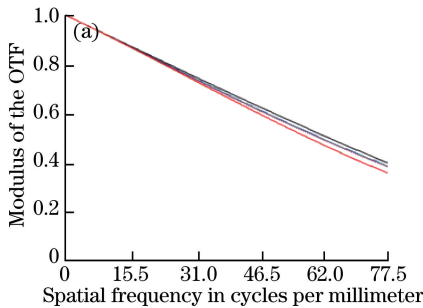


图 4  $-0.33\times$  时的 MTF 和畸变曲线。(a) 系统 MTF 曲线;(b) 系统畸变曲线

Fig. 4 MTF and distortion curves at  $-0.33\times$ . (a) MTF curve of the system; (b) distortion curve of the system

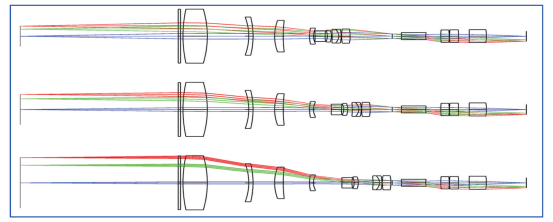


图 2 光学系统外形图

Fig. 2 Outline drawing of the optical system

由(2)式可知适配的 CMOS 的单单元尺寸大小为  $6.45 \mu\text{m}$ ,由(4)式计算得到系统的奈奎斯特频率为  $77.5 \text{ lp/mm}$ 。

由图 3~5 可以看到该系统在所选择的 3 个放大倍率结构处的 MTF 在奈奎斯特频率处都大于 0.3,表明其像质良好。

远心系统通常被应用于精密测量领域,镜头畸变是造成测量误差的重要原因之一,它不影响系统成像的清晰度,但会使物体成像发生变形<sup>[8]</sup>。因此必须将畸变限制在一定范围内,由图 3~5 可以看到该系统在所选择的 3 个结构处的畸变均小于 0.1%,符合设计指标。

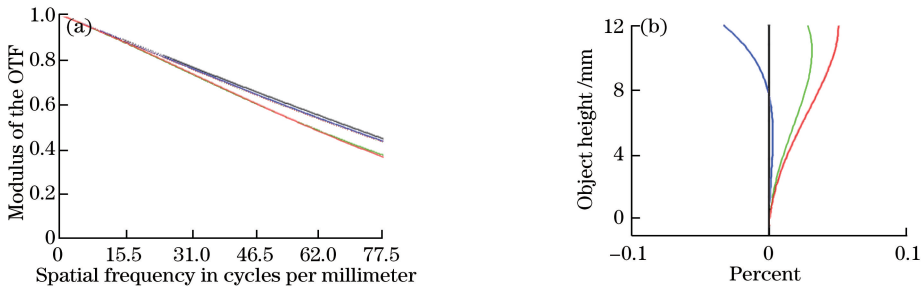


图5  $-0.50\times$ 时的 MTF 和畸变曲线。(a)系统 MTF 曲线;(b)系统畸变曲线

Fig. 5 MTF and distortion curves at  $-0.50\times$ . (a) MTF curve of the system; (b) distortion curve of the system

## 4 系统凸轮曲线分析

绘制凸轮曲线是变倍光学系统后期生产的一个重要步骤,传统的变焦光学系统凸轮设计是在几个焦距位置校正像差后,用插值法大致计算凸轮曲线的各个数据点,不仅计算繁琐,还存在一定的误差,需要对凸轮曲线的拐点位置再次作细致验算<sup>[9]</sup>。只有沿着准确的凸轮曲线来控制变倍系统的运动部分,才能确保像质的稳定性。出于生产方面的考虑,本文系统将光阑尺寸大小设为定值,在变倍过程中,物面尺寸不断变化,通过光学系统的光束尺寸也在不断变化,即系统数值孔径的大小在不断变化。考虑到该系统的这一特性,提出两种不同的求解凸轮曲线的方法,并进行相互验证。

### 4.1 基于 Zemax 软件的凸轮曲线分析

#### 4.1.1 工作原理及流程

Zemax 中的宏语言是光学设计中的一个重要工具。利用软件自带的宏语言编写分析程序

BIANBEL.zpl,控制变倍系统中的变倍组移动指定距离,移除系统的所有变量,仅将补偿组的前后距离设为变量。调用优化函数优化光学系统,软件将自动找到最佳的补偿组位置使得系统的像质最好。记录变倍组的步进距离和相对应的补偿组的最佳位置即可得到系统的凸轮曲线<sup>[10]</sup>。

程序工作流程如图 6 所示,在 Zemax 中移除所有变量后,需要人为输入的数据为变倍组和补偿组在系统中的位置、变倍组的线性步进距离(步进距离越小,数据点越多,凸轮曲线越精确)、变倍组在变倍过程中的移动导程。程序可以自动判别当前的光阑尺寸是否合理,若不合理,通过调整系统数值孔径的大小进行校正;若合理则进入优化步骤,调用系统设定好的优化函数,在其边界条件约束下程序将自行找到最佳的补偿组位置。每前进一个步进距离,将补偿组的最佳位置导出到 MATLAB 中,以步进距离作为横坐标、补偿组移动距离作为纵坐标绘图,即可得到系统的凸轮曲线。

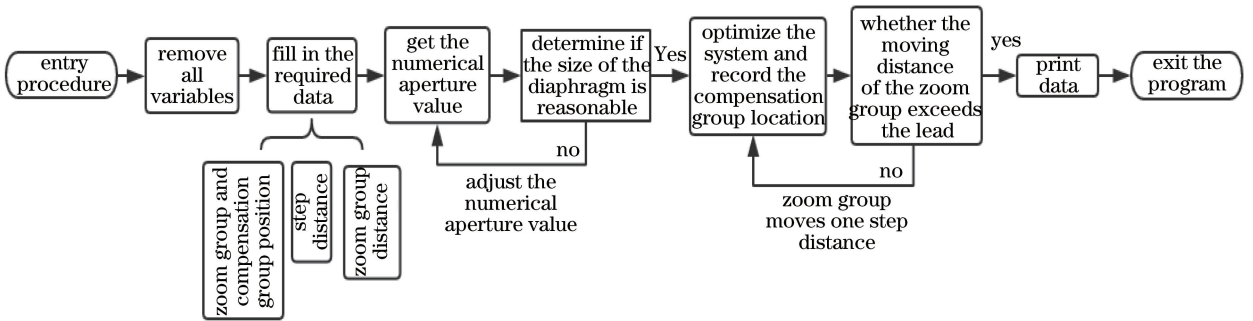


图6 Zemax 宏语言编程法工作流程图

Fig. 6 Flow chart of Zemax macro language programming method

#### 4.1.2 分析结果

实例中变倍组的移动导程为 22 mm,设置的步进距离为 0.1 mm。表 4 列出了部分采样点数据( $Q_1$  为变倍组移动距离, $Q_2$  为补偿组移动距离),对这些数据进行拟合就可得到图 7 所示凸轮曲线。由图 7 可以看到,补偿组的移动总距离约为 34 mm,

前 25 mm 内补偿组与变倍组的移动关系基本呈线性关系,凸轮曲线平滑无拐点。

## 4.2 应用动态光学理论求解凸轮曲线

### 4.2.1 工作原理及流程

动态光学采用光学理论推导变焦时的像移补偿公式,一般将变倍组视为线性运动,从而推导出补偿

表4 采用软件法得到的部分采样点数据

Table 4 Partial sampling point data obtained by software method

Parameter	Value										
$Q_1$	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	...	21.700	21.800	21.900	22.000	22.100
$Q_2$	0.112	0.227	0.336	0.449	0.561	...	31.834	32.199	32.592	33.028	33.509

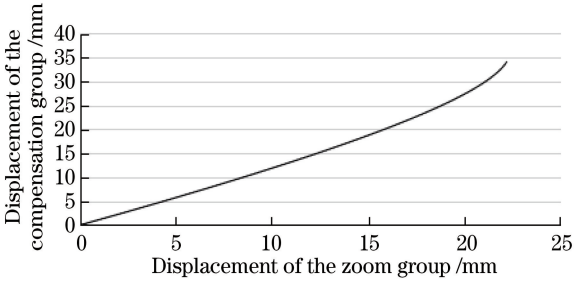


图7 Zemax宏语言编程法求得的凸轮曲线

Fig. 7 Cam curve obtained by Zemax macro language programming

$$Q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (7)$$

(6)式中的  $f_1$ 、 $f_2$  分别为前固定组、变倍组的焦距,  $f'_1$ 、 $\beta^1$  分别为变倍组的焦距和垂轴放大率,  $f'_2$ 、 $\beta^2$  分别为补偿组的焦距和垂轴放大率。其中  $f'_1$ 、 $\beta^1$ 、 $f'_2$ 、 $\beta^2$  为求得的已知量,再输入系统变倍组的移动导程,即  $Q_1$  的移动范围,即可求出补偿组的移动距离  $Q_2$ ,其解有两个不同的值,每次都选取较小的一个值作为最佳解。将  $Q_1$ 、 $Q_2$  的数据导入到 MATLAB 软件中即可拟合出凸轮曲线。

组与变倍组的运动关系<sup>[11]</sup>为

$$AQ_2^2 + BQ_2 + C = 0, \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} A = (f_1 - B_1 Q_1) \beta_2 \\ B = \beta_1 \beta_2 Q_1^2 + [f_2 (1 - \beta_2^2) \beta_1 - f'_1 (1 - \beta_1^2) \beta_2] Q_1 - f'_1 f'_2 (1 - \beta_2^2) \\ C = \beta_2^2 f'_2 [\beta^1 Q_1 - f'_1 (1 - \beta_1^2)] Q_1 \end{cases} \quad (6)$$

解得

如图8所示,变倍系统分为前固定组、变倍组、补偿组和后固定组( $f_3$ 、 $f_4$  分别为补偿组和后固定组的焦距,  $H$ 、 $H'$  为各镜组的物方主面和像方主面)。为求得上述所需参数,将系统简化等效为4组厚透镜,其中每组厚透镜中包含若干个透镜。根据光学系统多透镜的组合规律分别求出各个等效厚透镜的焦距值、主点位置和厚度等。已知系统物距为130 mm,根据上述参数即可求出初始位置时变倍组与补偿组的放大倍率。将这些已知量代入(7)式,即可求得系统补偿组的位移曲线。

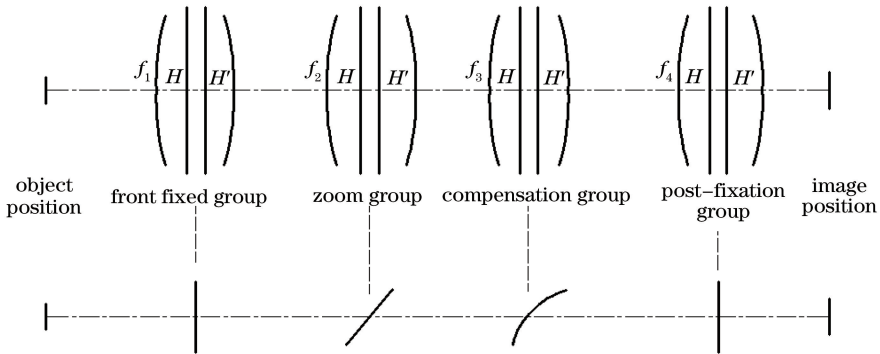


图8 变倍系统的分组模型

Fig. 8 Grouping of zoom systems

4.2.2 分析结果

动态光学法求解的部分凸轮数据点如表5所示。为了方便比较,设置变倍组的移动导程为

22 mm,步进距离为0.1 mm,拟合得到图9所示凸轮曲线。由图9可以看到,凸轮曲线与Zemax软件宏语言编程求解出的凸轮曲线差别极小。

表5 采用动态光学法得到的部分采样点数据

Table 5 Partial sampling point data obtained by dynamic optics theory

Parameter	Value										
$Q_1$	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	...	21.700	21.800	21.900	22.000	22.100
$Q_2$	0.112	0.225	0.337	0.450	0.563	...	31.932	32.304	32.704	33.148	33.648

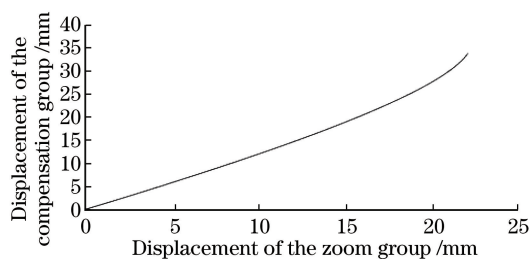


图9 动态光学理论法求得的凸轮曲线图

Fig. 9 Cam curve obtained by dynamic optics theory

### 4.3 两种凸轮曲线求法的分析比较

采样点数据差值如图10所示。由图10可以看到,两组补偿组的数据相差很小,最大的数据差值在变倍组的最大位移处,最大差值为0.138 mm,其原因是两种方法的原理不同。Zemax宏语言编程法所得到的凸轮曲线是综合系统各个视场像差后的结果,其判定补偿组位置是否合理的依据是该位置在保持像面位置不变的前提下,使得系统的综合像差最小。所以其结果与设计人员提前设定的评价函数密切相关。由于该方法在Zemax环境中求解,因此在求解凸轮曲线的时候能够实时了解该光学系统综合像质的变化情况。例如点列图或者MTF曲线在变倍过程中的变化均可以通过软件实时输出并记录,这一点为设计人员提供了很大的便利。动态光学理论求解法属于高斯光学范畴,该方法将成像光学系统抽象为理想光学系统,并用基点和基面表示,从而得出其静态成像特性<sup>[12]</sup>。动态光学理论求得的解为该系补偿组位置的高斯近轴解,其求解过程计算量较大,但能够推导出一系列准确的数学公式,并可以此建立一套完整的数学模型,该模型不仅适用于本系统,而且对所有的四组元变倍系统皆适用。本文以Zemax软件的宏语言编程法为主,以动态光学理论法为辅,验证了Zemax宏语言编程法所得结果的正确性。两种解法得出的凸轮曲线相差很小也恰恰说明了本文系统像差得到了较好的校正,在变倍过程中凸轮曲线平滑稳定,各个位置的成像质量良好。

## 5 结论

设计了一款从 $-0.5\times$ 至 $-0.2\times$ 连续变倍的双远心系统,主要用以解决当前市面上远心系统更换不同倍数镜头时过程复杂、影响测量精度等问题。介绍了其选型、优化等过程,从其像质评价结果中可以看到该系统像质良好,满足系统的指标要求。给出了两种求解该系统凸轮曲线的方法,精确得出变

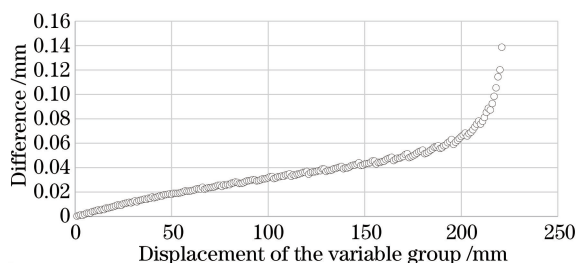


图10 两个解法求得的数据点的差值

Fig. 10 Difference between solution data points obtained by two methods

倍系统的凸轮曲线。本文以Zemax宏语言编程法为要求解凸轮曲线的手段,以动态光学理论法为辅助手段,验证了Zemax宏语言编程法所得结果的正确性,得出的凸轮曲线平滑无拐点,可为后期加工生产提供重要支持。

## 参考文献

- [1] Guo J M, Xiang Y, Li Q, et al. Optical design of zoom double telecentric system for industrial measurement[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(6): 31-35.  
郭金明, 向阳, 李琦, 等. 用于工业测量中变倍双远心光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(6): 31-35.
- [2] Zhou F, Huang F L, Deng C K, et al. A double magnification double telecentric lens: 201320610858.0[P]. 2014-04-23.  
周峰, 黄芳林, 邓崇凯, 等. 一种双倍放大倍数双远心镜头: 201320610858.0[P]. 2014-04-23.
- [3] Zhang J K. A study on meso-scale part metrology with variable field of view using structured light micro stereo vision method[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015: 16-17.  
张金凯. 介观尺度零件变视场结构光显微立体视觉测量方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 16-17.
- [4] Yang K. Design of several industrial camera based on machine vision [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013: 1-3.  
杨康. 基于机器视觉的工业镜头的设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2013: 1-3.
- [5] Chen Z L, Liu Y Z, Fei M M, et al. Design of industrial double telecentric optical lens with large field of view [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2018, 38(5): 444-450.  
陈智利, 刘雨昭, 费芒芒, 等. 大视场双远心工业镜

- 头光学系统设计[J]. 西安工业大学学报, 2018, 38(5): 444-450.
- [6] Zeng Z H, Lin J M, Lu S L. A telecentric lens that can be continuously multiplied: 201910031815.9[P]. 2019-04-16.  
曾振煌, 林佳敏, 卢盛林. 一种可连续变倍的远心镜头: 201910031815.9[P]. 2019-04-16.
- [7] Luo D. Study on optimal design of aspheric telecentric system based on ZEMAX [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018: 45-48.  
罗迪. 基于 ZEMAX 的非球面远心系统优化设计研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018: 45-48.
- [8] Gao X Y, Chen P B, Li M F, et al. Design of wide angle wide depth double telecentric system[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 182-186.  
高兴宇, 陈朋波, 李明枫, 等. 大视场宽景深双远心系统的设计[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 182-186.
- [9] Cao H Q. 3-unit cam design program for zoom systems based on ZEMAX [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2011, 9(3): 31-34.  
曹红曲. 基于 ZEMAX 软件的三组元变焦系统凸轮曲线设计程序[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(3): 31-34.
- [10] Lin M F, Yu X F. Optimum design of the cam curve of two-variable-unit zoom system based on ZEMAX [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(4): 60-63.  
林明发, 余晓芬. 基于 ZEMAX 二组运动变焦系统凸轮曲线优化[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 60-63.
- [11] Wang C Y, Wang Z J, Zhou Q C. Solving the cam curve of the compensating group about zoom lens using dynamic optical theory[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 891-894.  
王春艳, 王志坚, 周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮曲线[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 891-894.
- [12] Gao T Y. Study on the structure design and test for sub-aperture stitching optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 15-16.  
高天元. 子孔径拼接成像系统结构设计及装调方法的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012: 15-16.