

doi:10.3788/gzxb20184701.0122002

浸没式光刻照明系统中非球面变焦系统设计

李美萱^{1,2}, 王丽¹, 董连和¹

(1 长春理工大学, 长春 130000)

(2 长春理工大学光电信息学院, 长春 130000)

摘 要:设计了一种非球面变焦光学系统,解决了 NA 1.35 浸没式光刻照明技术中内外相干因子调节、能量利用率不足、模块使用寿命短的问题,所设计的非球面变焦系统包括三个镜组、光阑面和像面.系统入瞳直径 42 mm,视场角 1.89°,实现焦距范围 700 mm~1 830 mm,变倍比 2.61,共使用七片透镜,并在三个凹面表面采用了非球面设计.设计结果表明,该系统成像质量优良,点列图均方根直径均小于 40 μm ,畸变均小于 0.5%,设计结果满足浸没式光刻照明系统的使用要求.

关键词:光学设计;变焦光学系统;非球面;浸没式光刻;照明系统

中图分类号:0436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)01-0122002-7

Design of Aspherical Zoom Optical System in Immersion Lithography Lighting System

LI Mei-xuan^{1,2}, WANG Li¹, DONG Lian-he¹

(1 Changchun University of Science and Technology, Jilin, 130000, China)

(2 College of Optical and Electronical Information Changchun University of Science and Technology, Jilin 130000, China)

Abstract: An aspherical zoom optical system is designed to solve the problems of adjustment of internal and external coherence factors, lack of energy utilization and short life of module of NA 1.35 immersion lithography system. This zoom optical system consists of both three lenses groups and the stop as well as the image plane. The system consists of 7 pieces of lenses with pupil diameter of 42 mm, view angle of 1.89°, which can realize the focal length of 700 mm~1 830 mm, zoom ratio of 2.16, and the three aspheric surfaces are all designed in concave surfaces of optical elements. The design results show that the system is with good imaging quality of RMS diameter less than 40 μm and distortion less than 0.5%, which can satisfy the usability requirements of the immersion lithography lighting system.

Key words: Optical design; Zoom optical system; Aspheric surface; Immersion lithography; Illumination system

OCIS Codes: 220.4830; 220.1250; 120.4640; 310.6805; 310.6860

0 引言

照明系统是投影光刻曝光光学系统的重要组成部分,其功能是为掩模面提供高均匀性照明、控制曝光剂量以及实现不同的照明模式^[1].随着光刻分辨率的不断提高,对照明系统的要求也越来越高;然而光刻机光源的波长不断变短,数值孔径不断增大,相应的物镜最大口径和系统总长也不断随之增大,镜片数量逐渐增

基金项目:国家自然科学基金(Nos.91338116, 11474037)资助

第一作者:李美萱(1984—),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为先进光学系统设计与制造技术、微结构光学元件与薄膜波导术、光纤通信技术等.Email:limeixuannuc@163.com

导师(通讯作者):董连和(1953—),男,教授,博导,主要研究方向为先进光学系统设计与制造技术,微细加工理论与工艺技术、微光学与应用等.Email:custdong@126.com

收稿日期:2017-06-16;录用日期:2017-10-19

<http://www.photon.ac.cn>

多,系统复杂程度和加工制造难度也随之加大,照明系统的要求和系统的复杂程度是互相矛盾的。

传统照明系统采用球面镜设计而成,结构复杂体积笨重.2004年,日本 Nikon 公司首次在 NA 0.85 光刻镜头中引入非球面元件,降低了镜头总长度和镜头口径.近年来,由于准分子激光器的发展,将其作为浸没式 (NA>1,最小波长为 193 nm) 光刻系统中的照明光源,能够克服传统照明系统的照度和均匀性不足的缺点,减少半影效应产生的曝光视场边缘模糊的缺点.国外对于 193 nm 浸没式光刻机进行研究的单位主要有荷兰的 ASML 公司、日本的 Nikon 公司和 Canon 公司^[2-5].而我国对浸没式光刻系统的设计多选用球面系统,且技术远落后于国际先进水平^[6].因此,浸没式 ArF 光刻技术的研究具有重要意义。

在 NA 1.35 浸没式光刻照明系统中,变焦系统是相干因子调节系统的一个核心单元模块,能够同比例改变内、外相干因子,从而改变照明环带宽度;此外,非球面的应用能够在提高系统光学性能的基础上减小照明系统体积,减少镜片数量.本文设计了 193 nm 浸没式光刻机(NA 1.35)照明系统,系统采用 7 片透镜,用非球面技术对变焦系统进行优化,考虑到非球面加工和检测,将三个非球面设计在凹面上.该变焦系统结构简单,能量透过率高,RMS 直径小于 40 μm ,畸变小于 0.5%.通过光学材料的选择和系统优化,保证变焦系统具有良好的使用性能并延长使用寿命.此外,采用机械式凸轮廓线实现焦距在 700 mm~1 830 mm 变化。

1 浸没式光刻机中的照明系统

浸没式光刻机光学系统模型见图 1,照明系统由光束整形单元、照明模式变换单元、匀场单元以及耦合光组等部件组成.衍射光学元件、变焦光组与锥镜棱镜镜组构成照明模式变换单元.变焦系统能够实现同比例改变内、外相干因子,从而实现环带宽度的改变。

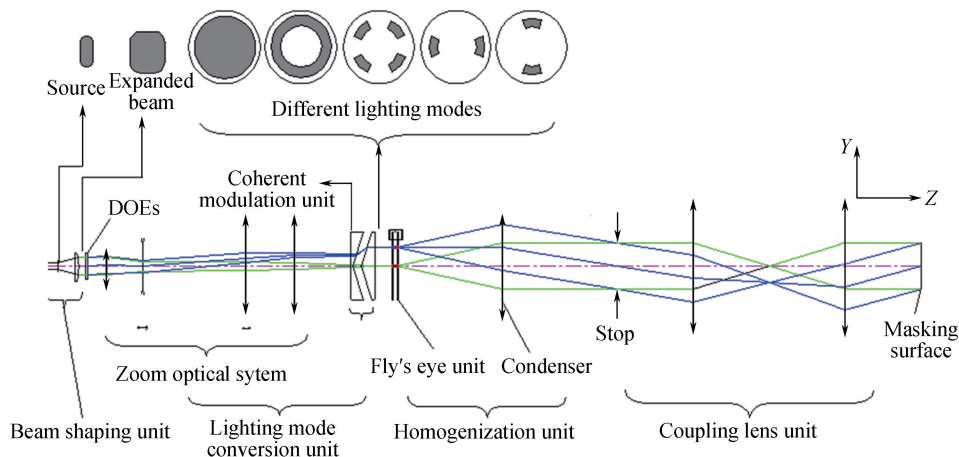


图 1 光学系统结构

Fig.1 Schematic diagram of the optical system

如图 1 所示,假设内、外相干因子初始值分别为 σ_{outer} 和 σ_{inner} ,变焦倍率为 G ,则焦距变化后,内、外相干因子分别变为 $G \cdot \sigma_{\text{outer}}$ 和 $G \cdot \sigma_{\text{inner}}$,环带宽度也为原来的 G 倍.通过改变锥镜组的相对距离可以在保持环带宽度不变的情况下,使内、外相干因子同时增加或减小相同的数值 $\Delta\sigma$.通过变焦系统和锥镜组系统两个模块的联动实现不同照明模式和相干因子的调节.根据浸没式光刻照明系统的总体设计要求,掩模面的光束数值孔径 NA、掩模尺寸和衍射元件的尺寸是已知的.于是,从掩模面的要求出发,分析和计算耦合光组、匀场照明光学组件(复眼和复眼会聚镜)、照明模式变换组件以及扩束整形各部分之间的相互关系,最终给出变焦光组的设计要求。

2 变焦系统的设计原理

变焦系统的设计是指通过改变透镜之间的间隔,实现像面位置上图像倍率连续改变并保持像面位置稳定^[7].变焦光学系统的实现包括光学补偿和机械补偿两大类.机械补偿采用变倍组和补偿组两个组元的相对运动实现焦距在一定范围内可以连续改变,并且保证光学系统的成像质量稳定良好.机械补偿变焦系统的补偿原理如图 2 所示,图中镜组分别代表变焦光学系统的前固定组、变倍组和补偿组,图 2(a)为短焦成像位置,图 2(b)为长焦成像位置。

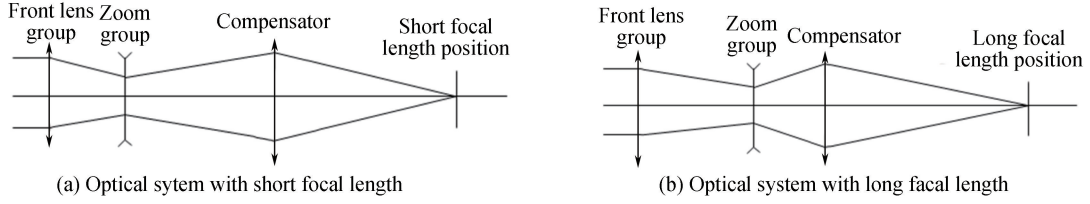


图 2 机械补偿变焦系统光学原理

Fig.2 Principle of the mechanical compensation zoom system

图 2 中,通过变倍组和补偿组之间的线性移动能够实现光学系统连续变换的要求,而非线性移动能够实现对象面的补偿.变焦系统的设计包括高斯求解过程和设计优化过程^[8-10].根据高 NA 1.35 浸没式光刻照明系统的设计要求,对各个镜组的焦距和透镜组之间的距离进行高斯计算,并对光学材料进行选择.

在初始位置处,变倍组和补偿组的放大倍率可以表示为

$$\beta_2 = \frac{f'_2}{f'_2 + f'_1 - d_{s12}} \quad (1)$$

$$\beta_3 = \frac{f'_3}{f'_3 + f'_2(1 - \beta_2) - d_{s23}} \quad (2)$$

变焦光学系统的变倍组的倍率可以表示为

$$\beta'_2 = \frac{-[D - 2(f'_2 + f'_3)] \pm [D - 2(f'_2 + f'_3)^2 - 4(f'_2 + f'_3/M\beta_2\beta_3)(f'_2 + f'_3M\beta_2\beta_3)]}{2(f'_2 + f'_3/M\beta_2\beta_3)} \quad (3)$$

式中, $D = 2(f'_2 + f'_3) - f'_2(\beta_2 + 1/\beta_2) - f'_3(\beta_3 + 1/\beta_3)$

在某一变焦位置处,光学系统的补偿组的倍率可以表示为

$$\beta'_3 = M\beta_2\beta_3/\beta'_2 \quad (4)$$

变倍组的位移表达式为

$$x = f'_2 \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta'_2} \right) \quad (5)$$

补偿组的位移可以表示为

$$y = f'_3(\beta_3 - \beta'_3) \quad (6)$$

前固定组和补偿组之间的间隔可以表示为

$$d'_{s12} = d_{s12} + x \quad (7)$$

变倍组和补偿组之间的间隔可以表示为

$$d'_{s23} = d_{s23} - x + y \quad (8)$$

式中, f'_i 代表第 i 个镜组的焦距, β_i 为第 i 个镜组在初始位置的放大率, β'_i 为第 i 个镜组在某个变焦位置处对应的放大率, d_{sij} 代表初始位置各个组员之间的距离, d'_{sij} 为第 i 个镜组在某个变焦位置处各个组员之间的距离, M 为变焦光学系统的变倍比, x 为变焦光学系统中变倍组的轴向移动距离, y 为变焦光学系统中变倍组的轴向移动距离后导致的补偿组的轴向移动距离.其中, $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$.

非球面对于校正与视场相关的像差如像散、高阶场曲、畸变和物方远心度等具有很大优势^[11-12].通过约束控制非球面的拐点程度和非球面度等参数,可使非球面具有更好的可加工性和可检测性^[13-14].在 YZ 平面内,非球面的数学表达式为

$$Z = \frac{y^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(1/r)^2 y^2}} + \sum_{j=2}^n A_{2j} y^{2j} \quad (9)$$

式中, r 为非球面的曲率半径, A_{2j} 为非球面 $2j$ 阶系数, j 的取值范围为 $2 \leq j \leq 10$, k 为非球面二次系数.

3 变焦系统的设计

3.1 变焦光学系统设计结果

首先根据变焦系统的设计理论^[15],可以计算得到该光学系统的外形结构,然后采用 CODEV 光学设计软件对系统进行像差校正,最终优化系统.

该浸没式光刻照明系统中照明光源的工作波长为 193.368 nm,将孔径光阑置于非球面变焦系统的第一正透镜前表面顶点前 10 mm 处,光线经过第一透镜组折射后进入第二透镜组,第二透镜组两片正透镜为该非球面系统的运动件,通过调节第 8 面、第 10 面和第 12 面的空气间隔,来保证输出不同的焦距.第二透镜组的出射光线经过第三透镜组和平面反射镜折转后到达像面.

图 3 为该非球面变焦光学系统结构,由三个镜组、光阑面和像面组成,共由 7 片透镜和一片反射镜组成,前六片透镜材料为氟化钙,第七片透镜材料为熔石英,光学材料的选择能够保证变焦系统具有良好的使用性能,并延长其使用寿命;反射镜的使用能够使折转光路更加紧凑.该光学系统包含 3 个非球面,光学系统入瞳直径为 42 mm,视场角为 1.89° ,变焦范围为 700 mm~1 830 mm,变倍比为 2.61,光学系统的 F 数的变化为 16.7~43.57.因此,采用非球面变焦系统,对整个光刻曝光光学系统的高均匀性照明以及性能提高都起着至关重要的作用.

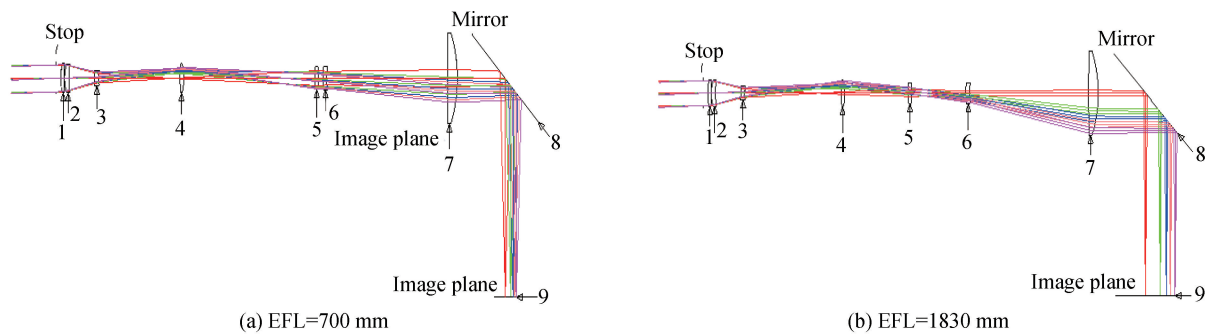


图 3 光学设计结果

Fig.3 Result of the optical design

变焦光学系统中,各个透镜组内的透镜顺次排列且同光轴,用透镜外框上的机械组件固定它们之间的相对位置.第一透镜组透镜包括第一正透镜、第二正透镜、第一负透镜,第二正透镜后表面为非球面.第二透镜组透镜包括第三正透镜和第四正透镜,第三正透镜和第四正透镜为变焦系统中的两个运动透镜.第三透镜组透镜包括第二负透镜和第五正透镜,第二负透镜后表面为非球面.第一透镜组、第二透镜组和第三透镜组通过透镜外框上的机械组件按一定间距固定连接,通过反射镜将光路 90° 折转来压缩光路长度,提高了照明系统空间利用率.该变焦光学系统的设计结果如表 1 所示.优化设计后的的三个非球面对应系数如表 2 所示.表 2 中, K 表示二次曲面常数, A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 H 、 I 分别表示二次项、四次项、六次项、八次项、十次项、十二次项、十四次项、十六次项、十八次项和二十次项系数.

表 1 光学系统的设计结果

Table 1 Parameters of the zoom optical system

| Surface | Radius of curvature/mm | Thickness/mm | Glass | Comments |
|---------|------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| OBJ | ∞ | ∞ | | |
| 1 | ∞ | 10 | | Aperture stop |
| 2 | 116.051 | 6.835 | Fused Silica | |
| 3 | ∞ | 0.500 | | |
| 4 | 57.652 | 9.000 | Fused Silica | |
| 5 | 139.964 | 53.866 | | Aspherical surface |
| 6 | -114.916 | 8.000 | Fused Silica | |
| 7 | 29.955 | 155.505 | | Aspherical surface |
| 8 | ∞ | 15.000 | | Short focal interval |
| | | 49.000 | | Long focal interval |
| 9 | 186.293 | 7.786 | Fused Silica | |
| 10 | -75.026 | 273.271 | | Short focal interval |
| | | 133.689 | | Long focal interval |
| 11 | 128.225 | 8.000 | Fused Silica | |
| 12 | -185.349 | 9.056 | | Short focal interval |
| | | 114.643 | | Long focal interval |
| 13 | 146.640 | 7.400 | Fused Silica | |
| 14 | 62.672 | 252.744 | | Aspherical surface |
| 15 | 2438.783 | 20.483 | Fused Silica | |

表 2 非球面系数设计结果

Table 2 Aspheric coefficient results for aspheric surfaces

| Surface | 5 | 7 | 14 |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
| K | 0 | 0 | 0 |
| A | -7.261 346 636E-08 | -1.954 861 865E-09 | 1.387 294 143E-08 |
| B | 1.427 080 662E-11 | 1.289 044 470E-13 | -9.706 669 466E-13 |
| C | -5.524 176 230E-15 | -3.407 175 819E-17 | 5.289 781 709E-17 |
| D | 2.680 124 469E-18 | 4.096 662 574E-21 | -8.411 089 288E-21 |
| E | -3.892 182 748E-22 | -2.310 553 616E-25 | 7.498 209 417E-25 |
| F | 4.288 048 761E-26 | 2.125 503 654E-30 | -2.780 555 645E-29 |
| G | -1.183 962 447E-31 | 1.443 185 625E-34 | 1.159 764 082E-35 |
| H | 5.384 130 431E-35 | 1.202 128 319E-38 | 5.894 696 917E-41 |
| I | -6.504 596 506E-39 | -7.103 188 297E-43 | -5.199 523 500E-44 |

传递函数的是光学系统的主要评价指标.采用 CODEV 光学设计软件进行优化设计后,在短焦和长焦位置处光学系统的点列图和场曲畸变分别如图 4 和图 5 所示.

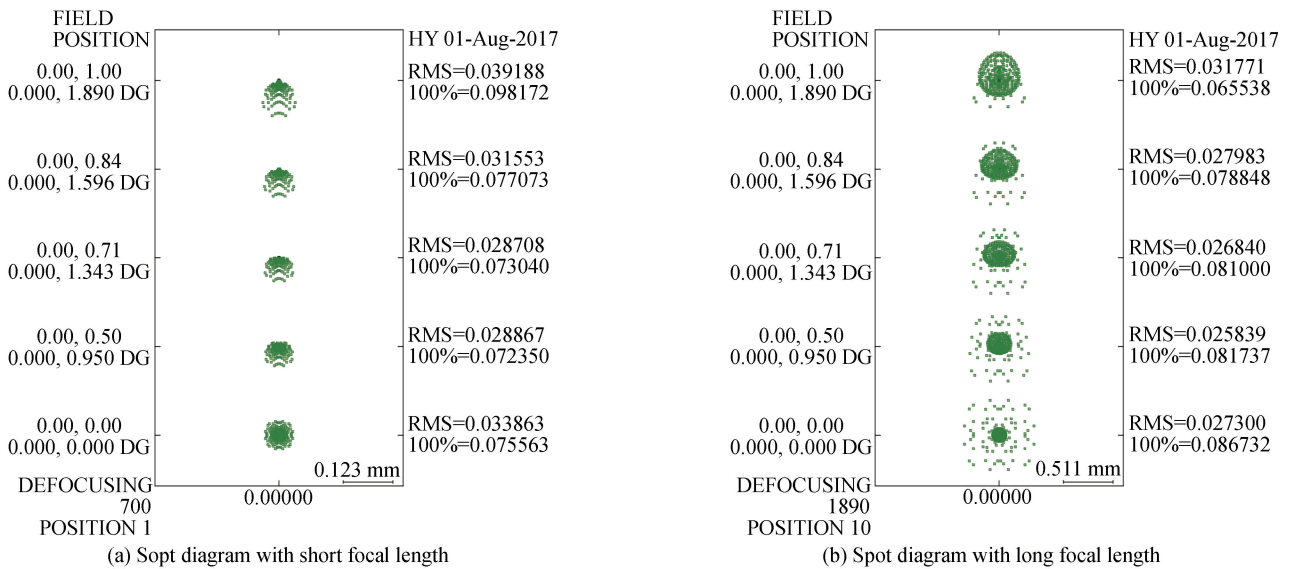


图 4 点列图
Fig.4 Spot diagram

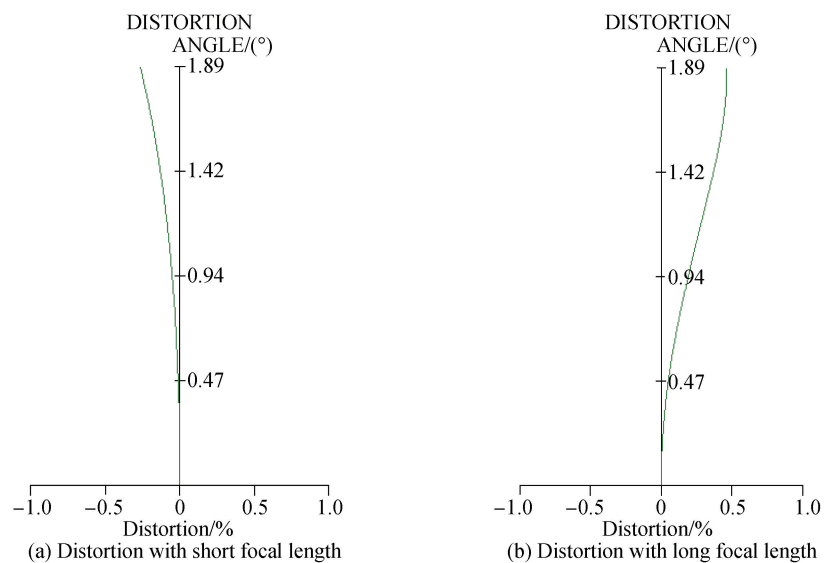


图 5 畸变图
Fig.5 Distortion diagram

从图4和图5可以看出,该非球面变焦系统的点列图均方根直径均小于 $40\ \mu\text{m}$,最大视场位置处的畸变均小于 0.5% ,系统具有良好的质量,能满足光学设计的要求。

3.2 变焦结构设计结果

该变焦光学系统采用机械式变焦方式,即采用凸轮曲线实现焦距在 $700\ \text{mm}\sim 1\ 830\ \text{mm}$ 范围的连续变化.如图3所示,非球面变焦系统共有两片动镜,第4片透镜为动件1,第5片透镜为动件2.凸轮曲线的设计结果如图6所示,最短焦至最长焦,动件1(第4片透镜)的移动行程为 $25.36\ \text{mm}$,动件2(第5片透镜)的移动行程为 $89.62\ \text{mm}$,两片动镜的凸轮曲线均接近线性,利于机械设计。

4 结论

本文提出了一种应用于浸没式光刻照明系统中的变焦光学系统设计模型,解决了 $\text{NA}\ 1.35$ 浸没式 ArF 光刻照明系统结构复杂、体积较大和能量利用率不足等问题,采用非球面技术完成了变焦光学系统的设计,满足系统入瞳直径 $42\ \text{mm}$,视场角 1.89° ,焦距范围 $700\ \text{mm}\sim 1\ 830\ \text{mm}$,变倍比 2.61 , F 数的变化范围为 $16.7\sim 43.57$,变焦全程点列图均方根直径均小于 $40\ \mu\text{m}$ 和最大视场位置处的畸变均小于 0.5% 的设计要求;另外,在该光学系统中,折叠光路的设计,使光学系统的结构更加紧凑.最后,采用机械式变焦方式,使系统两片动镜的凸轮曲线均接近线性,也便于机械加工设计.本文的设计结果能够满足 $\text{NA}\ 1.35$ 浸没式 ArF 光刻照明系统结构紧凑、分辨率高和能量利用率高等要求,在工程上具有一定的可实现性,对我国浸没式光刻技术的研究具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] ZHAO Yang, GONG Yan. Methods of enhancing uniformities of output beams from beam expanding unit for illumination system of deep-ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0822004.
赵阳, 巩岩. 提高深紫外光刻照明系统扩束单元光束均匀性的方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0822004.
- [2] ZHAN Ping-ping, LIU Wei-guo. Development of extreme ultraviolet lithography[J]. *Science & Technology information*, 2011, **21**(2): 44-45.
占平平, 刘卫国. EUV光刻技术进展[J]. *科技信息*, 2011, **21**(2): 44-45.
- [3] HARRY J LEVINSON. Principles of Lithography, third edition[C]. SPIE, 2010, **2467**: 321-322.
- [4] BERNHARD K, PAUL G. Catadioptric lens design: the breakthrough to hyper-NA optics[C]. SPIE, 2006, **6154**: 615420.
- [5] VMBERTO I, MICHIEL K, ELIO D. Laser bandwidth effect on overlay budget and imaging for the 45 nm and 32 nm technology nodes with immersion lithography[C]. SPIE, 2010, **7640**: 76402B.
- [6] PENG Hai-feng, SUN Zhen. Design and analysis of a precision axial adjusting mechanism for optical elements in lithographic lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0422005.
彭海峰, 孙振. 光刻物镜中光学元件精密轴向调整机构的设计与分析[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0422005.
- [7] HONG Yong-feng, ZHANG Xue-ming, CHENG Xin. Miniaturization design of aerial zoom lenses[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(3): 61-65.
洪永丰, 张学明, 程欣. 航天变焦镜头的小型化设计[J]. *光电工程*, 2010, **37**(3): 61-65.
- [8] MIKS A, NOVAK J. Three-component doubleconjugate zoom lens system from tunable focus lenses [J]. *Applied Optics*, 2013, **53**(4): 862-865.
- [9] FAN Zeng-ming, LI Zhou, QIAN Li-xun. Aspherical lens laser beam shaping system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2): 353-357.
范增明, 李卓, 钱丽勋. 非球面透镜组激光光束整形系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(2): 353-357.
- [10] FORBES G W, ROBUS T. Efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(19): 19700-19712.
- [11] ZHANG L, LIU D, SHI T, et al. Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in non-nullinterferometric testing[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(35): 8501-8511.

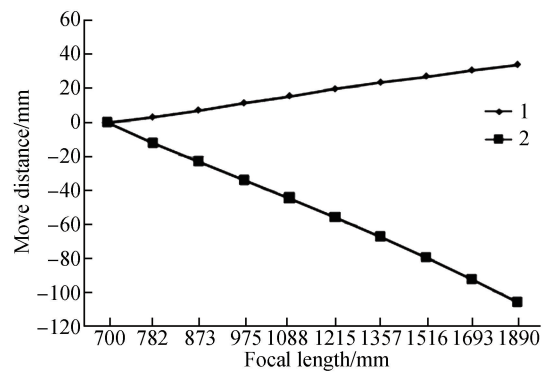


图6 焦距随动件移动距离变化曲线

Fig.6 Relationship between focal length and moving distance

- [12] MA Ying-jun, ZHANG Bao, HONG Yong-feng. Aberration automatic design of continuous zoom optical system[J]. *Acta Optical Sinica*, 2015, **33**(8): 0822003.
马迎军,张葆,洪永丰. 连续变焦光学系统的像差自动校正[J]. *光学学报*, 2015, **33**(8): 0822003.
- [13] LI Lin, WANG Yong-tian, ZHANG Li-qin, *et al.* An approach on the calculation of gaussian parameters of zoom lenses [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, **23**(4): 424-427.
李林,王涌天,张丽琴,等. 变焦距物镜高斯光学参数的求解[J]. *北京理工大学学报*, 2003, **23**(4): 424-427.
- [14] 陶纯勤. 变焦距光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,1988:11-16.
- [15] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2006:28-30.