第 58 卷 第 23 期/2021 年 12 月/激光与光电子学进展 研究论文

激光与光电子学进展

基于双高斯结构与自由曲面照明的小畸变投影系统设计

樊润东[1]，赵会富[1*]，曾翌[1]，段文举[1]，郝影[2]

[1]长春理工大学光电工程学院，吉林 长春 130012；

[2]天津市生态环境监测中心，天津 300110

摘要 为了解决投影系统的畸变大、尺寸大和能量利用率低等问题，基于双高斯结构与自由曲面照明系统设计一个新型小畸变投影系统，主要针对自由曲面的建模方法与光路结构开展光学系统的设计。根据边缘光线理论与斯涅耳定律，采用数值迭代法来设计自由曲面照明系统。仿真结果表明，照明系统的照度均匀度可达87.86%，能量利用率可达94.38%。成像系统采用双高斯结构作为初始结构进行设计，投影系统经过非球面优化后的畸变为0.26%，光学传递函数在93 pl/mm的频率处大于0.8，35°边缘视场处大于0.6，而且该投影系统的成像质量高并且结构紧凑，镜片数量少。通过公差分析可知，Q5公差等级满足系统的性能要求，公差要求较低。

关键词 光学设计；投影系统；照明系统；双高斯结构；自由曲面

中图分类号 TN202 **文献标志码** A **doi:** 10.3788/LOP202158.2322001

Design of Small Distortion Projection System Based on Double Gaussian Structure and Freeform Surface Illumination

Fan Rundong[1], Zhao Huifu[1*], Zeng Yi[1], Duan Wenju[1], Hao Ying[2]

[1]*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin* 130012, *China;*

[2]*Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin* 300110, *China*

Abstract In order to solve the problems of large distortion, large size, and low energy utilization of the projection system, a new small distortion projection system based on the double Gaussian structure and freeform surface lighting system is designed. The optical system is designed mainly for the freeform surface modeling method and optical path structure. According to the edge ray theory and Snell's law, a numerical iterative method is used to design the freeform surface lighting system. The simulation results show that the illumination uniformity of the lighting system can reach 87.86%, and the energy utilization rate can reach 94.38%. The imaging system is designed with a double Gaussian structure as the initial structure. The distortion of the projection system after aspheric optimization is 0.26%, and the optical transfer function is greater than 0.8 at a frequency of 93 pl/mm, and greater than at the 35° edge field of view 0.6. The imaging quality of the projection system is high, the structure is compact, and the number of lenses is small. Through the tolerance analysis, it can be known that the Q5 tolerance level meets the performance requirements of the system, and the tolerance requirements are relatively low.

Key words optical design; projection system; illumination system; double Gaussian structure; freeform surface

OCIS codes 220.3620; 220.2945; 120.2040

收稿日期：2021-03-16；**修回日期**：2021-03-22；**录用日期**：2021-03-25

基金项目：国家自然基金(61703057)、吉林省发改委产业创新专项(2017C037-1)、吉林省科技发展计划(20200401058GX)

通信作者：*huifuzhao@163.com

1 引 言

随着投影技术的发展，投影系统已经应用于各个领域，如军事演习中使用投影系统投射地图，芯片制造中使用投影系统投射电路信息[1-7]等。投影系统的显示元件在一定程度上影响着投影质量，当前先进投影系统往往采用反射微镜（DMD）作为显示元件，通过驱动投影系统可以实现DMD芯片的高速偏转，从而在不同视场下输出不同对比度的图像。随着DMD芯片分辨率的提升，投影系统的清晰度也随之提升，如当前分辨率最高的DMD芯片，其分辨率为1920 pixel×1080 pixel，为此搭配DMD芯片的投影系统的性能也随之提升。对于投影系统而言，对照度均匀性、能量利用率、成像清晰度以及图像畸变等参数的控制十分重要，同时考虑产品的实用性与成本，系统的尺寸应尽量小且镜片数不宜过多。

对于光学系统设计而言，选取一个良好的设计结构作为起点是很有必要的，不但可以提升优化速度，还能够设计出性能更好的光学系统。对于现有的照明系统，屈碧香[8]利用斜率控制角度方案设计了准直透镜，DMD的能量利用率为78%；闫峰等[9-10]设计了一种椭球型反光碗和锥形光管，且照明光斑为圆形的方案，DMD的能量利用率为60%。目前，对于透射式投影系统的设计，卞殷旭等[11-14]采用了反远距结构的设计，反远距结构中的光阑大多位于后镜组中部，具有失对称性强和工作距离长等特点，但设计过程中难以对系统畸变与尺寸进行控制。

针对上述存在的问题，并且为了实现能量利用率高、成像清晰度高、畸变小与结构紧凑的投影系统，本文提出一个基于自由曲面照明[15-17]系统与双高斯结构[18-19]的设计思路，从而设计出高能量利用率和小畸变的投影系统。

2 自由曲面照明系统的设计

常见的投影系统的光路如图1所示，通过TIR（Total-Internal-Reflection）棱镜将照明系统与成像系统结合。由于DMD芯片多为矩形，因此需要设计与DMD芯片相匹配的矩形光斑，减少由光斑形状与DMD芯片不匹配造成的能量损失。

2.1 设计要求

表1为本系统的设计指标。照明系统需要在目标面DMD（尺寸为0.47 inch，1 inch=2.53 cm）上实现一个大小为13.576 mm×7.637 mm的矩形光斑，其照度均匀度大于85%，能量利用率大于90%。实验选用OSRAM LUW HWQP型号的光源，光通量为320 lm，芯片大小为1 mm×1 mm，发散半角为60°。

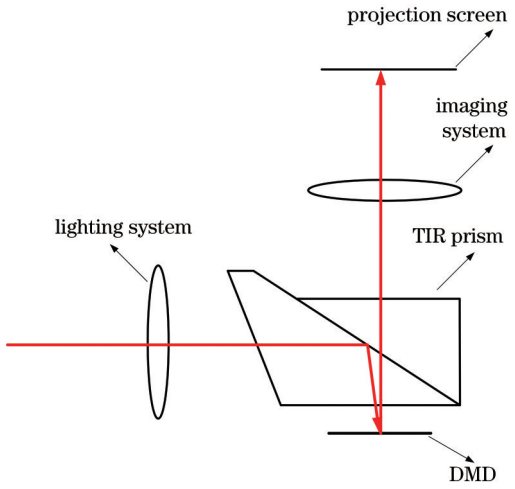

图1 系统总体结构示意图

Fig. 1 Schematic of overall system structure

表1 投影系统的相关参量与设计指标

Table 1 Relevant parameters and design indicators of projection system

Parameter	Value
Pixel size /(μm×μm)	5.4×5.4
Image circle /mm	15.606
Projector distance /mm	1250
F number	1.8
Focal length /mm	12.47
Field angle /(°)	70
Rear intercept /mm	>20
Total length of system /mm	<120
Optical distorting /%	<1
MTF(Modulation Transfer Function) at frequency of 93 lp·mm^{-1} (0-0.7 normalized field)	>0.8
MTF at frequency of 93 lp·mm^{-1} (0.7-1.0 normalized field)	>0.6
Illuminance /%	>85
Energy efficiency /%	>90

2.2 设计思路

照明系统为DMD投影系统提供具有一定入射角的入射光束，当照明系统的视场角与成像系统匹配时，能量利用率最高。照明光路如图2所示。光源发出的光线经过准直透镜后出射平行光，经过微透

镜阵列后会聚于各个微透镜的后焦面，即微透镜的后表面，此时可认为将照明光源分成了一系列等作用的点光源。光源经过后续中继透镜组后在DMD芯片上可实现均匀照明，其中中继透镜的出射光线与DMD靶面之间的夹角为40°。对于当前照明系统的设计，光源与准直透镜之间的距离较远，为此可将光源看作点光源。由于实验需要压缩系统尺寸，并且光源芯片与准直透镜之间的距离较近，为此不可将光源看作点光源。仅仅使用球面透镜或抛物面反光碗进行准直会导致轴外光线的平行度较差，故采用自由曲面方案对实际光源进行准直，可以使大多数光线得到有效控制，从而提高能量利用率与照度均匀性。实验过程中，配合具有匀光功能的矩形微透镜阵列并结合非球面中继透镜组，可以实现DMD的矩形均匀照明。

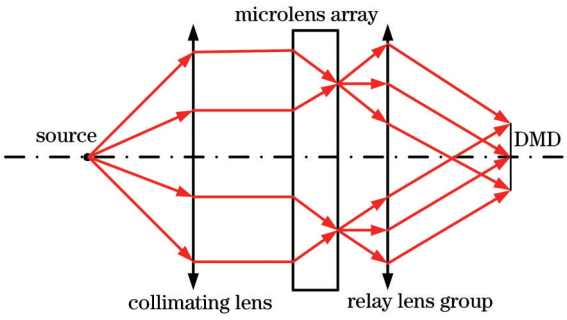

图2　照明光路的原理示意图

Fig. 2　Schematic of lighting lightpath

2.3　照明系统的设计

对于自由曲面的建模，采用空间斯涅耳定律与边缘光线方法来直接构建自由曲面。准直透镜的分析原理如图3所示，其中$\boldsymbol{A}'$和$\boldsymbol{A}$分别为出射光矢量与入射光矢量，Q为自由曲面上的数据点，θ为特征光线的入射角，$\boldsymbol{N}$为数据点所对应的表面法线，$\boldsymbol{T}$为数据点所对应的切线。对光源进行角度划分，将60°分为35°和25°，它们分别对应曲线C_1和C_2与边界所夹的角。根据边缘光线理论，光源的最大发散角对应自由曲面透镜的边缘，因此由各边对应的最大角度开始逆向设计便于控制透镜尺寸。入射光的单位矢量$\boldsymbol{I}=(\sin\theta_c, \cos\theta_c)$(其中$\theta_c$为第$c$条特征光线所对应的入射角)，因出射光为平行光，出射光的单位矢量$\boldsymbol{O}=(0, 1)$，通过斯涅耳定律来建立映射关系，表达式为

$$\boldsymbol{A}'=\boldsymbol{A}+p\boldsymbol{N}\ , \tag{1}$$

式中：p为表面法线系数；$\boldsymbol{N}$可表示为

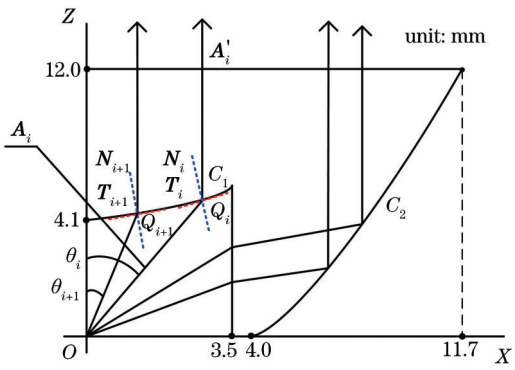

图3　准直透镜的分析原理示意图

Fig. 3　Schematic of analysis principle of collimating lens

$$\boldsymbol{N}=\left(\frac{-\sin\theta_c}{p}, \frac{1-\cos\theta_c}{p}\right)。\tag{2}$$

结合相邻离散点与切线的正交关系，通过数值迭代法和

$$\left(X_{i+1}-X_i, Z_{i+1}-Z_i\right)\cdot\left(N_x, N_z\right)=0 \tag{3}$$

来设计图3的曲线C_1。式中：X_i和X_{i+1}分别为第i个和第$i+1$个数据点所对应的横坐标；Z_i和Z_{i+1}分别为第i个和第$i+1$个数据点所对应的纵坐标；N_x和N_z分别为表面法线量所对应的横坐标分量以及纵坐标分量。联立(1)～(3)式和

$$n'=-n \tag{4}$$

来设计图3的曲线C_2。式中：n为物方折射率；n'为像方折射率。微透镜阵列的设计原理如图4(a)所示。当前表面的焦点位于后表面时，平行光经过微透镜的前表面后会聚于后表面，透镜的后表面可当作场镜。平行光入射不会产生轴外像差，不会影响光斑形状。通过多组单透镜阵列来构建矩形光斑，经过每组透镜的前表面后会聚的光源可当作等价点光源，通过叠加来达到匀光的目的。考虑可加工性，将微透镜设计为球面透镜，厚度为10 mm，因此微透镜的前表面焦距f'为10 mm，可表示为

$$f'=\frac{n'r}{n'-n}\ , \tag{5}$$

式中：r为微透镜的曲率半径。由(5)式可得微透镜的曲率半径r为3.33 mm，微透镜的焦距为6.7 mm。DMD的长宽比为16∶9，因此微透镜阵列的长宽比同样为16∶9，微透镜的个数为15×18，X方向的半宽为1.5 mm，Y方向的半宽为0.7 mm，模型如图4(b)所示，其中P和P'分别为微透镜的物方主平面与像方主平面，F'为微透镜前表面的后焦点，即微透镜的后表面。对于中继透镜组，由于球面透镜无法对所有等价点光源进行控制，故本文采用LT

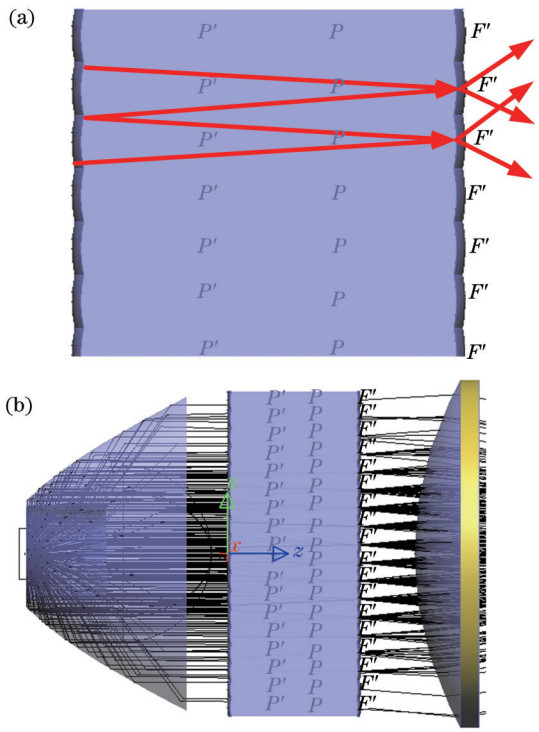

图 4　微透镜阵列的设计。(a)微透镜的设计原理示意图；(b)微透镜阵列的光线追迹示意图

Fig. 4　Design of microlens array. (a) Schematic of design principle of microlens; (b) schematic of ray tracing of microlens array

软件来辅助优化，使用非球面透镜组进行控制，具体光路如图 5 所示。

2.4　仿真分析

采用蒙特卡洛光线追迹法对照明系统进行仿真模拟，自由曲面透镜的准直效果如图 6 所示，照明系统中目标面的照度分布与不同方向的照度曲线

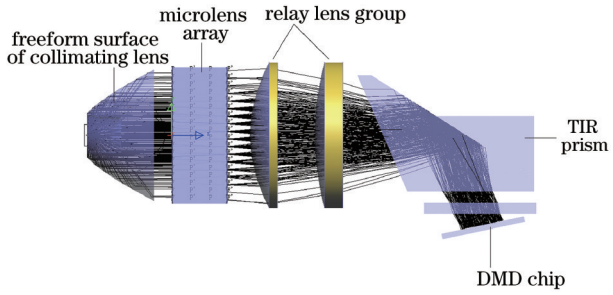

图 5　照明系统的结构示意图

Fig. 5　Structure diagram of lighting system

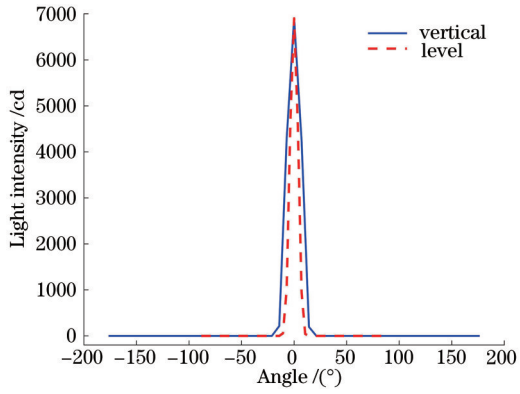

图 6　准直透镜的出射光强曲线

Fig. 6　Output light intensity curves of collimating lens

如图 7 所示。根据图 7 可知，目标面的平均照度为 28.22×10^6 lx，最大照度为 31.91×10^6 lx。照度均匀度的计算公式为

$$U=\frac{E_{\mathrm{ave}}}{E_{\mathrm{max}}}\times100\%\ ,\tag{6}$$

式中：E_{ave} 为目标面的平均照度；E_{max} 为目标面的最大照度。根据(6)式可以得到照度均匀度为

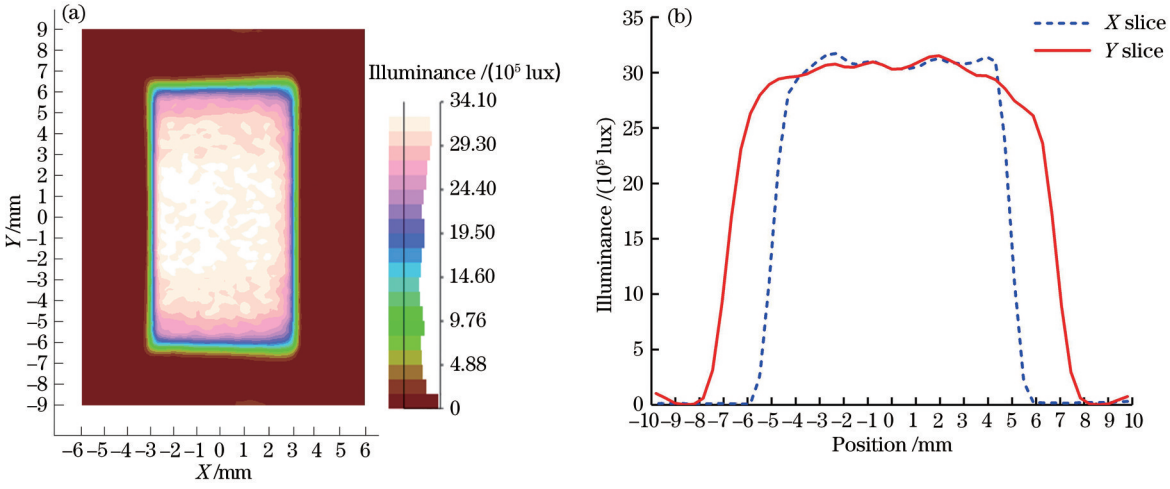

图 7　照明系统中目标面的照度。(a)平面分布示意图；(b)分布曲线示意图

Fig. 7　Illumination of target surface in lighting system. (a) Schematic of plane distribution; (b) schematic of distribution curve

87.86%，光源发出的总能量为 320 lm，目标面的接收能量为 302 lm。能量利用率的计算公式为

$$\eta=\frac{Q_t}{Q}\times 100\%, \tag{7}$$

式中：Q_t为目标面接收的能量；Q为光源发出的总能量。根据(7)式可以得到能量利用率为 94.38%。综上，此照明系统在目标面上实现了矩形均匀照明，而且光能利用率高。

3　双高斯结构成像系统的设计

3.1　设计思路

对于成像系统的设计，选择一个优良的结构作为设计起点是非常重要的。现有的投影系统多为反远距结构，反远距的原理如图 8 所示，其中 φ 为透镜的光焦度。反远距结构中前组为负透镜组，后组为正透镜组。当大视场光束进入负透镜组时可将视场缩小，当小视场光束进入负透镜组时可使后组透镜的孔径增大。反远距结构使用前组负透镜来缩小入射到后组透镜的视场，使用后组透镜来扩大口径，像方主面位于正透镜组的右侧可以使后工作距大于焦距，以便于后续元件的安装。反远距结构的光阑位于后组正透镜的中部，且前组负透镜远离光阑，轴外光线经过前组负透镜发散后投射的高度较高，这会引入较大的轴外像差。通过加入自由度更高的自由曲面可以平衡像差，但目前自由曲面的制造与面型的检测技术不完善，生产成本高，运用自由曲面对于常见透射式投影系统的设计可行性低。在不提升成本的情况下，减少系统畸变并提升系统的成像质量必须采用另一种对像差具有自校正功能的特殊结构进行设计，因此采用双高斯结构作为起点进行设计。

短焦、大视场系统必须校正轴外像差。系统中一个像面上各个像差分布系数的表达式为

$$S_{\mathrm{I}}=luni^{*}\times(i^{*}-i')\times(i'-u), \tag{8}$$

$$S_{\mathrm{II}}=S_{\mathrm{I}}\times\frac{i_z^{*}}{i^{*}}, \tag{9}$$

$$S_{\mathrm{III}}=S_{\mathrm{I}}\times\left(\frac{i_z^{*}}{i^{*}}\right)^2, \tag{10}$$

$$S_{\mathrm{IV}}=J^2\times\frac{n'-n}{nn'r}, \tag{11}$$

$$S_{\mathrm{V}}=\left(S_{\mathrm{III}}+S_{\mathrm{IV}}\right)\times\frac{i_z^{*}}{i^{*}}, \tag{12}$$

$$C_{\mathrm{II}}=luni^{*}\times\frac{\Delta dn}{n}\times\frac{i_z^{*}}{i^{*}}, \tag{13}$$

式中：S_{I}为球差分布系数；S_{II}为慧差分布系数；S_{III}为像散分布系数；S_{IV}为场曲分布系数；S_{V}为畸变分布系数；C_{II}为色差系数；i^{*}和i'分别为入射角与出射角；i_z^{*}为主光线入射角；u为孔径角；J为拉氏不变量；l为物距；j为系统中光学表面的总数量。根据(8)～(13)式可知，对称光学系统中光阑前后两部分的球差、像散和场曲的赛德和系数S_{I}、S_{III}和S_{IV}的数值与符号均相同，慧差、畸变和倍率色差的赛德和系数S_{II}、S_{V}和C_{II}的数值相等而符号相反，因此对称结构可通过抵消正负像差来自动校正垂轴像差。对于弯月形透镜而言，改变其厚度就能改变该透镜所产生的场曲值。在设计过程中，可改变弯月形透镜的厚度来校正场曲S_{IV}；改变系统中薄透镜的弯曲程度、采正负透镜的组合形式以及添加非球面以增大系统的自由度，可以依次校正球差S_{I}与其他轴外像差；在厚透镜中引入胶合面，采用火石与冕牌两种玻璃的组合可以校正色差C_{I}。

3.2　设计优化

本文从 ZEBASE 镜头库中选择一组双高斯结构，并通过焦距缩放法来得到本系统的初始结构，如图 9 所示。此结构为 4 组 6 片式结构，孔径光阑位

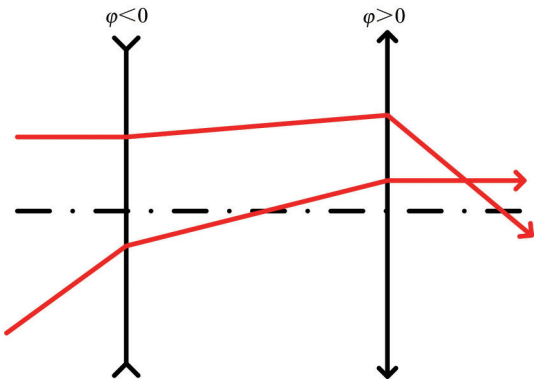

图 8　反远距的原理示意图

Fig. 8　Schematic of inverse telephoto principle

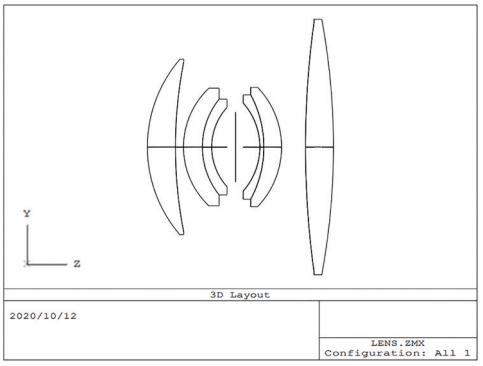

图 9　双高斯成像系统的初始结构

Fig. 9　Initial structure of double Gaussian imaging system

于系统中间。

双高斯结构经过焦距缩放法处理后的场曲与畸变如图 10 所示。从图 10 可以看到，焦距缩放后初始结构的相对畸变小于 1%，可见该结构的垂轴像差已得到较好的校正，说明此结构具有较高的优化潜力。双高斯结构的半部结构如图 11 所示。从

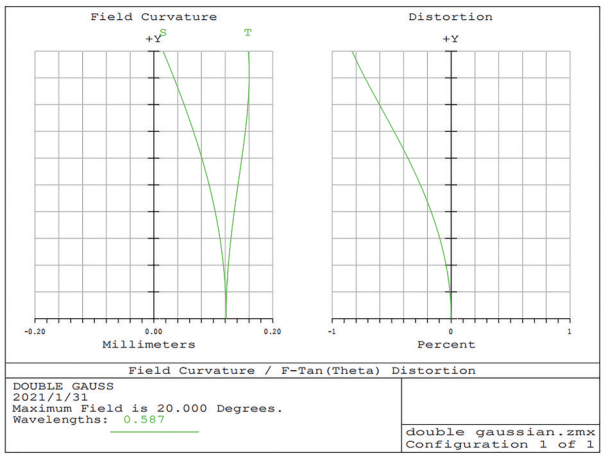

图 10　焦距缩放后双高斯结构的场曲与畸变

Fig. 10　Field curvature and distortion of double Gaussian structure after focal length scaling

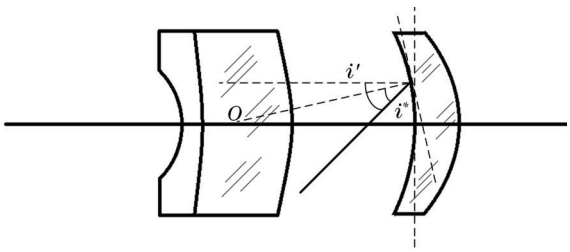

图 11　双高斯结构的半部结构

Fig. 11　Half structure of double Gaussian structure

图 11 可以看到，当薄透镜向后弯曲的角度越大且接近于平凸透镜时，所产生的球差越小，但此时轴外光束的入射角将增大至 i'，这会产生较大的像散。本文在光阑的前后面各添加一片单透镜以降低上述问题所产生的影响，其中前透镜采用具有高折射率、低阿贝数的材料，后透镜采用具有低折射率、高阿贝数的玻璃组合，这有利于校正色差，调整光阑位置可以优化慧差和畸变等像差。35°视场的点列图和场曲畸变如图 12 所示。从图 12 可以看到，增大视场后系统的畸变仍小于 1%，但弥散斑尺寸过大，为此存在较大的轴外剩余像差。将第 5、14 和 15 面设为偶次非球面并进行像差校正，面型表达式为

$$z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+\sum_{o=1}^{m}A_o r^{2o}\,,\quad(14)$$

式中：c 为表面曲率；k 为二次圆锥系数；z 为矢高；A 为非球面系数，m 为项数。考虑系统的可加工性，未对圆锥系数 k 以及 2 阶非球面系数 A_1 进行优化，而是从 4 阶非球面系数开始逐渐优化，直至优化至 10 阶非球面，此时系统的像质满足要求。为了降低加工成本以及提升系统的可加工性，第 8 片非球面透镜的材料选用聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）。相比于反远距结构，双高斯结构的不足之处在于后截距较短，不利于棱镜与 DMD 芯片的安装。设计过程中，将棱镜的厚度（13.43 mm）提前设计并调整出射光线的远心度以扩大后截距，同时手动控制光学系统的长度。将棱镜与 DMD 前的保护玻璃作为光路的一部分进行设计，并预留至少 2 mm 的空间进行装调。本系统的最终结构为 6 组 8 片式双高斯结构，详细结构如图 13 所示，后续将对系统的最终像质进行分析。

(a)　　(b)

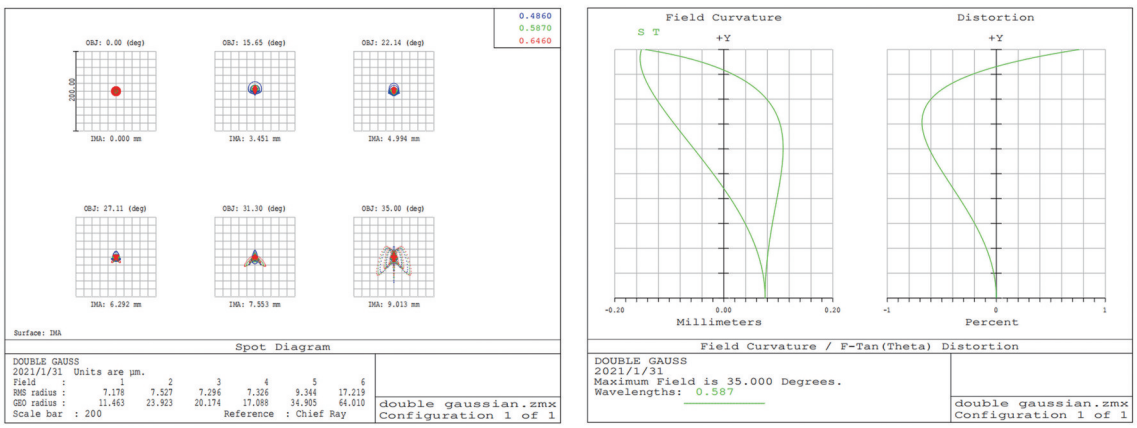

图 12　35°视场的点列图和场曲畸变。(a)点列图；(b)场曲畸变

Fig. 12　Point plot and field distortion of 35° field. (a) Point plot; (b) field distortion

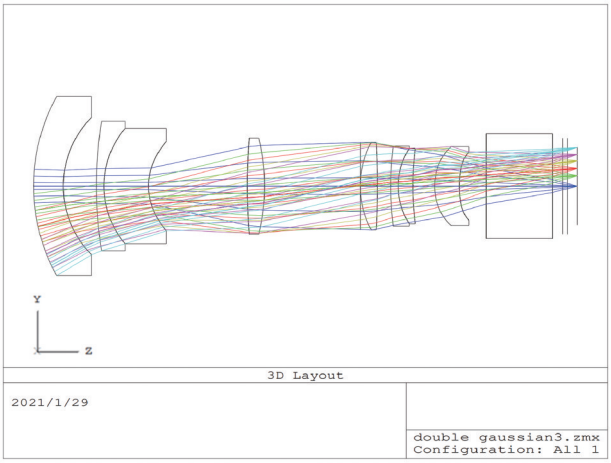

图 13　光线追迹示意图

Fig. 13　Diagram of ray tracing

3.3　像质分析

系统的光学传递函数以及重要的像差指标如图 14 所示。从图 14 可以看到，系统的光学传递函数值在中心视场（频率为 93 lp/mm）处为 0.81，边缘视场下在 93 lp/mm 频率处的传递函数值均为 0.6，全视场下在 93 lp/mm 频率处的传递函数值均大于 0.5，满足指标要求；系统在全视场下的场曲范围为 −0.007～0.049 mm，场曲小于 0.100 mm，最大相对畸变为 0.26%，相对畸变小于 0.5% 满足指标要求，该系统的倍率色差接近衍射极限；系统的后截距为 24.62 mm，系统的总长度为 103 mm，满足指标要求。综上，本系统在保留足够后截距的同时，有效降低了系统畸变。通过合理的结构变形可以较好地控制沿轴像差，使系统具有较好的成像质量。

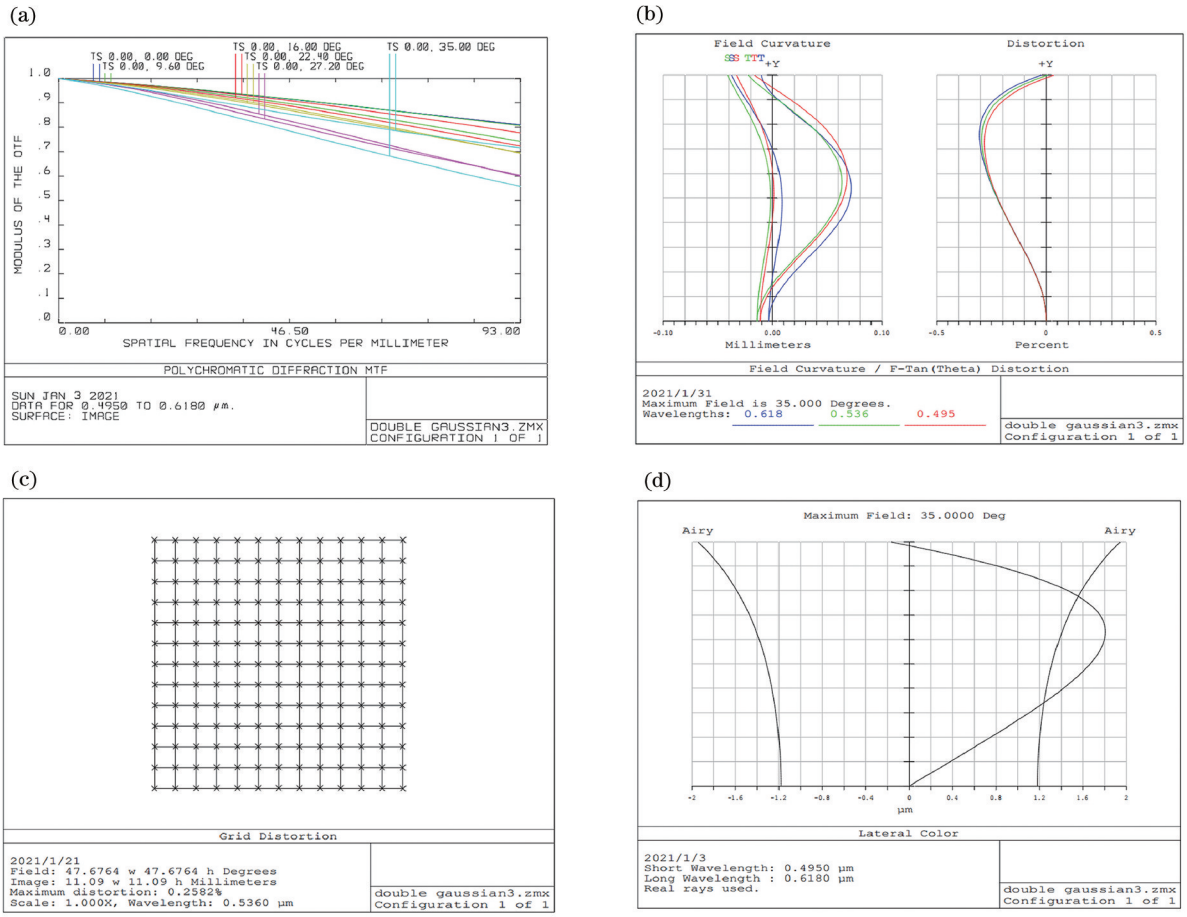

图 14　像质结果。(a)传递函数图；(b)场曲与畸变；(c)网格畸变；(d)垂轴色差

Fig. 14　Image quality results. (a) Transfer function diagram; (b) field curvature and distortion; (c) mesh distortion; (d) vertical axis chromatic aberration

3.4　公差分析

本文选用Q5公差等级对系统的参数灵敏度进行分析，将均方根半径作为评判标准，对系统影响较大的指标如表 2 所示，其中 TTHI 为系统中透镜的厚度或空气厚度要求，TEDY 为 Y 方向的偏心要求，TEDX 为 X 方向的偏心要求，TIND 为材料的折射率要求，数字表示透镜的第几面，“−”表示负方向，“+”表示正方向。从表 2 可以看到，第 8 片非球面透镜为

表2 对系统影响较大的生产装调指标

Table 2 Production and adjustment indicators that have a great impact on system

Type	Numerical /mm	Standard /mm	Change /mm
TTHI 14 15 (−)	−0.03750000	0.01020000	0.00540000
TTHI 14 15 (+)	0.03750000	0.00770000	0.00490000
TEDX 15 (+)	0.01000000	0.00530000	0.00240000
TEDY 15 (−)	−0.01000000	0.00520000	0.00240000
TEDY 15 (+)	0.01000000	0.00520000	0.00240000
TEDX 15 (−)	−0.01000000	0.00500000	0.00220000
TIND 9(−)	−0.00100000	0.00480000	0.00190000
TEDY 14 (+)	0.01000000	0.00420000	0.00130000
TEDY 14 (−)	−0.01000000	0.00410000	0.00130000
TEDX 14 (−)	−0.05000000	0.01652940	0.00551634

弯月形透镜，其厚度与偏心对系统光焦度的影响较大，即产生较大的慧差与球差，这对系统的像质影响最大，为此在注塑与装调的过程中需严格控制透镜厚度与元件偏心；第5片透镜的折射率对系统的影响较大，镜片磨制前必须进行玻璃材料的折射率检验。其他元件需按照Q5公差等级进行生产与装调，防止投影质量下降。为了考虑上述参数对系统的实际改变，本系统采用服从正态分布的蒙特卡洛算法来分析由系统参数变化引起的像质变化，分析结果如表3所示。根据表3可知，最优的均方根半径约为0.003 mm，最差约为0.012 mm，平均结果约为0.006 mm，并且90%的弥散斑半径小于0.006 mm，满足系统的指标要求，说明选用Q5公差等级评价系统合理。

表3 蒙特卡洛算法的分析结果

Table 3 Analysis results of Monte Carlo algorithm

Parameter	Value /mm
Nominal value	0.00282
Best value	0.00296
Worst value	0.01231
Average value	0.00569
Standard deviation	0.00229

4 结 论

根据能量映射理论及初级像差理论，本文设计一种双高斯结构与自由曲面照明系统相结合的投影系统。采用多次迭代设计的自由曲面对光线进行调控，从而提升能量利用率；成像系统利用双高斯结构的特性对垂轴像差进行补偿，可以利用更多变量对成像清晰度进行优化。仿真结果表明，自由曲面配光后，能量利用率为94.38%，照度均匀度为87.86%；双高斯投影系统的畸变为0.26%，光学传递函数值在93 pl/mm的频率处为0.81，边缘视场的光学传递函数值为0.6，全视场的场曲小于0.1 mm，系统的总长度为103 mm。相比于传统的投影系统，本系统的成像清晰度、系统畸变以及能量利用率均得到提高，透镜数量有所减少。在提高系统性能的同时有效降低系统畸变及非球面数量，从而降低加工成本，本系统在投影领域中具有实际的应用价值。

参 考 文 献

[1] Zhu X B, Qian L Y, Chen J, et al. Optical path design of LED and GRIN lens projection system[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(1): 62-69.
朱向冰, 钱立勇, 陈瑾, 等. LED和梯度折射率透镜投影系统光路设计[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(1): 62-69.

[2] Xie X R, Yang B, Pan S, et al. Design of catadioptric ultra-short focal length zoom projection lens[J]. Optical Technique, 2020, 46(1): 20-26.
谢欣茹, 杨波, 潘帅, 等. 折反式超短焦变焦投影镜头的设计[J]. 光学技术, 2020, 46(1): 20-26.

[3] Tang Z F, Mu D, Yang X, et al. Projection system design of fixed focus and variable magnification for digital lithography based on DMD[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(2): 52-56.
唐志方, 牟达, 杨旭, 等. 基于DMD的数字光刻定焦变倍投影系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 52-56.

[4] Yu B H. Research on key technology of ultra-short-focus projection objective system based on freeform surfaces[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
于百华. 基于自由曲面的超短焦投影物镜关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.

[5] Yu B H, Tian Z H, Su D Q, et al. Multi-fields optimization iterative design method for freeform

surface in ultra-short-focus projection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 0322001.
于百华, 田志辉, 苏东奇, 等. 超短焦投影系统中自由曲面的多视场优化迭代设计方法[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 0322001.

[6] Qian L Y, Zhu X B, Cui H T, et al. Design of optical path for miniature projection systems[J]. Laser Technology, 2018, 42(3): 385-389.
钱立勇, 朱向冰, 崔海田, 等. 微型投影系统光路设计[J]. 激光技术, 2018, 42(3): 385-389.

[7] Zhao H L, Liang Z Y, Shi X C, et al. The design of LED using in optical projector[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 244-246.
赵华龙, 梁志毅, 石兴春, 等. 利用LED的投影系统光源设计[J]. 光子学报, 2007, 36(2): 244-246.

[8] Qu B X. Optical design of the DLP projection system based on RGB LED lighting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
屈碧香. 基于RGB三色LED光源照明的DLP投影系统光路设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[9] Yan F, Wang S Y, Yin Y Z, et al. Illumination design of micro projection system based on LEDs[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2007, 23(6): 70-73.
闫峰, 王淑英, 尹燕宗, 等. LED微型投影系统的照明设计[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2007, 23(6): 70-73.

[10] Li X Y, Zhong B L, Wang L, et al. Design of LED illumination system in LCOS micro-projector[J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 751-753.
李晓艳, 钟伯亮, 王乐, 等. LCOS微型投影系统的LED照明设计[J]. 光学技术, 2007, 33(5): 751-753.

[11] Bian Y X, Wang H, Guo T Y, et al. Design of ultra-short throw ratio projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1222002.
卞殷旭, 王恒, 郭添翼, 等. 超短投影距的投影物镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1222002.

[12] Chen C, Li W S, Zhang Y, et al. Optical design of short focal digital projection lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(12): 1855-1859.
陈琛, 李维善, 张禹, 等. 短焦数字投影镜头的光学设计[J]. 光子学报, 2011, 40(12): 1855-1859.

[13] Liu X C, Chen C, Li W S, et al. Design of universal short-focus projection lens[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 907-912.
刘宵婵, 陈琛, 李维善, 等. 通用型短焦投影镜头的设计[J]. 应用光学, 2016, 37(6): 907-912.

[14] Zhang Y, Chen C, Liu X C, et al. Design of short-focus projection lens for LED digital projectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2760-2764.
张禹, 陈琛, 刘宵婵, 等. LED数字投影机短焦投影物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2760-2764.

[15] Chen X D, Lin J P, Liu Z J, et al. Aspheric surface lens for LED collimating illumination with low Fresnel loss[J]. Optical Review, 2017, 24(1): 62-71.

[16] Wang K, Han Y J, Li H T, et al. Design of high-compactness freeform optical surfaces via energy accumulating optimization[J]. Optics Express, 2016, 24(26): A1489-A1504.

[17] Wu R M, Chang S Q, Zheng Z R, et al. Formulating the design of two freeform lens surfaces for point-like light sources[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1619-1622.

[18] Liu J R, Li Y M. Complicated double Gs microscopical object lens design[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2011, 40(6): 13-15.
刘金荣, 李玉敏. 双高斯复杂化结构显微物镜设计[J]. 电子工业专用设备, 2011, 40(6): 13-15.

[19] Hu Y X, Zhou S X, Wang K Y. Camera lens with ultra-large aperture[J]. Optical Technology, 2002, 28(3): 226-227.
胡玉禧, 周绍祥, 王克逸. 超大孔径摄像镜头设计[J]. 光学技术, 2002, 28(3): 226-227.