



(21) 申请号 202210258041.5

(22) 申请日 2022.03.16

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114578552 A

(43) 申请公布日 2022.06.03

(73) 专利权人 长春理工大学

地址 130022 吉林省长春市朝阳区卫星路  
7186号

(72) 发明人 刘智颖 余浩然 黄蕴涵 秦齐

(74) 专利代理机构 北京中理通专利代理事务所

(普通合伙) 11633

专利代理师 刘慧宇

(51) Int. Cl.

G02B 27/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 110989167 A, 2020.04.10

CN 112526747 A, 2021.03.19

US 2012085895 A1, 2012.04.12

US 2015022873 A1, 2015.01.22

US 5526181 A, 1996.06.11

US 5946143 A, 1999.08.31

US 6313951 B1, 2001.11.06

WO 2022090385 A1, 2022.05.05

审查员 郝宾宾

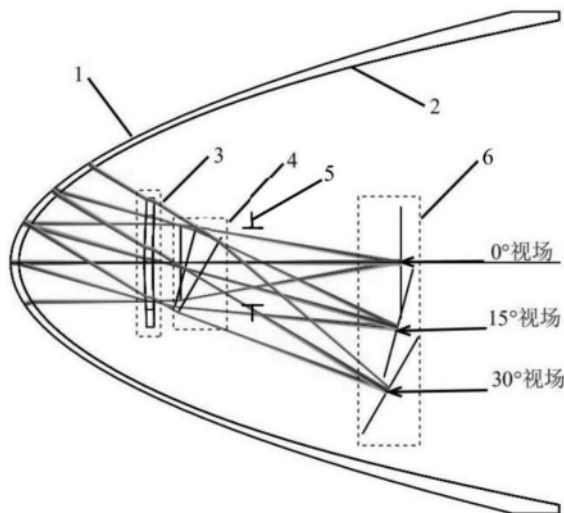
权利要求书2页 说明书4页 附图4页

(54) 发明名称

用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定  
校正器及设计方法

(57) 摘要

用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法,包括以下步骤:建立外表面为抛物面或其他复杂表面的共形头罩光学系统,分析其动态Zernike像差,确立基于Zernike系数的优化原则并初步优化共形头罩内表面;推导抛物面共形头罩的Wassermann-Wolf方程并简化其实现形式,建模并求解固定校正器的初始面型,确定初始面型是否满足对于0°视场像差的校正,如果满足,在共形系统中代入初始面型;否则,重新确定合理参数求解初始面型,直至满足校正设计要求;并在扫描视场进行动态视场下的分布迭代像差校正优化设计,确定能够有效校正抛物面共形头罩动态像差的固定校正器最终结构。本发明具有系统结构简单、像差校正效果优越、适应复杂共形头罩外表面面型。



1. 用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法,其特征是:该方法由以下步骤实现:

步骤一、建立共形头罩外表面(1)为抛物面或其他复杂曲面的共形头罩的光学模型,即抛物面头罩共形光学系统,并分析所述共形光学系统的Zernike像差,初步优化共形头罩内表面(2),实现抛物面共形头罩的初步像差校正;

所述初步优化共形头罩内表面(2),具体指:以控制Zernike系数的Z4-Z9项为优化原则,共形头罩内表面(2)最高次项系数的由各次项多次优化结果的对比得出,其结果对于抛物面共形头罩的动态像差校正会产生初步校正,校正幅度在40%-70%;

步骤二、推导基于共形头罩外表面(1)的Wassermann-Wolf方程,简化其实现形式,并根据简化方程建模求解固定校正器(3)的初始面型,确定所述固定校正器(3)的初始面型是否满足对于0°凝视视场像差的校正,如果满足,则在所述抛物面头罩共形光学系统中代入初始面型;否则,重新确定参数求解所述固定校正器(3)的初始面型,直至满足设计要求;

所述Wassermann-Wolf方程的化简结果为:

$$\frac{dZ}{dy} = \left( \frac{n_0 R \cos U_1 - n R_z}{n_0 R \sin U_1 - n R_y} + \tan U_1 \right)^{-1} \left( \frac{dH_1}{dy} - Z \frac{d}{dy} (\tan U_1) \right)$$

$$\frac{dZ'}{dy} = \left( \frac{n_0 R - n R_z}{-n R_y} \right)^{-1} \frac{dH_2}{dy}$$

通过对入瞳直径下40组点的直接代入,模拟了 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $\sin U_1$ 、 $\cos U_1$ 和 $\tan U_1$ 相对于自变量y的直接函数关系,代入求解了Wassermann-Wolf方程,摒除了传统的方程转换过程,其中, $U_1$ 指入射光线与光轴的夹角,也就是孔径角; $H_1$ 指入射光线与固定校正器的前表面S1的切平面的交点高度; $H_2$ 指出射光线与固定校正器的后表面S2的切平面的交点高度;

步骤三、在扫描视场下,对步骤二获得的固定校正器(3)的初始面型进行分步迭代优化;确定所述固定校正器(3)的曲面轮廓,并结合固定校正器(3)的结构参数进行优化,实现对抛物面共形头罩所引入动态像差的校正;

对所述固定校正器的初始面型在扫描视场下进行分布迭代优化的具体过程为:

步骤三一、分解视场,根据扫描视场大小划分优化视场,确定以5°-10°为间隔的多重结构;

步骤三二、迭代优化,拉伸固定校正器(3)的面型轮廓,沿用Zernike系数Z4-Z9项控制原则,以设置的多重结构为依据,对整体视场进行分步循环优化;具体为:

首先,设置抛物面共形头罩的凝视视场;

然后,从0°视场的结构开始,对固定校正器(3)的面型轮廓进行拉伸优化,每重结构优化时遵循从中心视场到边缘视场的优化顺序,上一重结构优化结束后,判断此时瞬时视场是否达到扫描视场,如是,则迭代优化结束,反之则添加下一重结构再次进行多重结构的固定校正器整体面型轮廓的拉伸优化,并最终完成整体视场上所有多重结构的初步整体优化;

步骤三三、综合调整优化;

在确定所述固定校正器(3)的面型轮廓的基础上,针对此时共形头罩的Zernike像差,进行整体的扫描视场优化,调整固定校正器(3)的多项式参数、位置、材料及厚度,或者加入

共形头罩内表面(2)进行整体的优化,获得最终的固定校正器动态像差校正结构。

2.根据权利要求1所述的用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法,其特征在于:步骤三中,所述固定校正器(3)的结构参数包括圆锥系数、厚度和折射率。

3.根据权利要求1所述的用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法,其特征在于:在扫描视场中,固定校正器(3)与抛物面共形头罩的位置保持相对固定,经抛物面共形头罩射出的光线由固定校正器(3)折射后由成像系统(4)进行扫描成像至像面(6)。

4.一种共形光学成像系统,其特征是:该光学成像系统由权利要求1-3任意一项所述的用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法设计的固定校正器(3),抛物面共形头罩,成像系统(4),光阑(5)和像面(6)组成;

经抛物面共形头罩射出的光线入射至固定校正器(3),经所述固定校正器(3)校正后的光线依次经后续成像系统(4)和光阑(5)后在像面(6)上成像。

## 用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器及设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种共形光学头罩像差校正和红外成像导引头光学系统设计领域,具体涉及一种用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器及设计方法。

### 背景技术

[0002] 现代军事技术的发展对精确制导武器的射程、速度和灵活打击能力的发展提出了更高的要求,因此提升红外导引头光学头罩的空气动力学性能极为关键。而共形光学头罩的设计在于追求良好的空气动力学性能的同时实现对空气动力学性能和光学成像性能的平衡。相对于目前常用的椭球形共形头罩,以抛物面或者其它复杂面型为外表面的共形头罩具有更加优越的空气动力学性能,但其引入的校正难度远高于椭球形共形头罩的动态像差也成为了制约其应用和发展的瓶颈,为此需要针对以抛物面为代表的复杂面形进行动态像差校正设计。

[0003] 共形头罩的像差校正设计方法较多,而固定型像差校正器是指所设计像差校正系统的光学元件在共形光学头罩和成像系统之间的位置是固定的,当导引头的光学成像系统进行扫描成像时,固定型校正器相对于共形头罩的位置是固定不变的。固定型像差校正器对于共形头罩所引入的动态像差的像差校正过程中主要是依靠其光学元件本身的光学传递属性和表面面形来校正动态像差,其校正效果主要由校正器的初始结构和设计自由度所决定。因此,根据设计时校正器的初始结构、表面类型和光学传递属性等的不同,也会产生固定型像差校正器的多种形式,如利用材料折射率变化的校正设计和利用表面面型的固定校正器的设计等。

[0004] 固定校正器的动态像差校正主要是基于透镜的表面面型参数进行像差校正,不需要复杂的机械运动结构,结构相对简单,能够有效控制共形光学系统的整体体积及重量,其对共形光学系统动态像差校正效果明显、稳定性高、可靠性强。

[0005] 目前设计固定校正器的方法较少,且多针对于动态像差相对较小的椭球形共形头罩设计,对于复杂曲面的适应能力较差,校正能力有限,对于固定校正器的设计缺乏系统性和普适性。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法,其给出的针对抛物面等复杂面型的共形头罩动态像差校正时固定校正器的实用设计方法,能够有效解决由共形头罩空气动力学性能更优越的外表面——抛物面及其他复杂面型所引入动态像差的校正难题,使得整体共形光学系统的成像质量得到有效提升。

[0007] 用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法,该方法由以下步骤实现:

[0008] 步骤一、建立共形头罩外表面为抛物面或其他复杂曲面的共形头罩的光学模型,即抛物面头罩共形光学系统,并分析所述共形光学系统的Zernike像差,初步优化抛物面共

形头罩内表面,实现抛物面共形头罩的初步像差校正;

[0009] 步骤二、推导基于共形头罩外表面的Wassermann-Wolf方程,简化其实现形式,并根据简化方程建模并求解固定校正器的初始面型,确定所述固定校正器3的初始面型是否满足对于 $0^{\circ}$ 凝视视场像差的校正,如果满足,则在所述抛物面头罩共形光学系统中代入初始面型;否则,重新确定参数求解所述固定校正器3的初始面型,直至满足设计要求;

[0010] 步骤三、在扫描视场下,对步骤二获得的固定校正器的初始面型进行分步迭代优化;确定所述固定校正器的曲面轮廓,并结合固定校正器的结构参数进行优化,实现对抛物面共形头罩所引入动态像差的校正。

[0011] 本发明中,还包括一种共形光学成像系统,该光学成像系统由所述用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法设计的固定校正器,抛物面共形头罩,成像系统,光阑和像面组成;经抛物面共形头罩射出的光线入射至固定校正器,经所述固定校正器校正后的光线依次经后续成像系统和光阑后在像面上成像。

[0012] 本发明的有益效果:

[0013] 本发明针对空气动力学性能更优越但像差更大的抛物面等共形头罩外表面复杂面型进行设计,有效的提升了红外导引头光学头罩的空气动力学性能,其性能相对于同长径比下常用的椭球形共形头罩能够提升约1/3,相对于传统的球形头罩能够提升约60%-75%。

[0014] 本发明简化了传统的Wassermann-Wolf方程求解的方程转换形式,直接使用数值代入求解并利用曲线拟合简化Wassermann-Wolf方程的建模形式,在实际使用中确立了Wassermann-Wolf方程的函数关系可以直接通过数值模拟近似建立的结论,突破了Wassermann-Wolf方程的函数关系不能直接通过数值模拟建立的瓶颈;

[0015] 本发明中基于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器的设计,大大降低了由共形光学头罩复杂外表面面型所引入的动态像差,并大大提升了红外共形光学系统的成像质量,使得实际共形光学系统的光学调制传递函数MTF接近了衍射极限,实现了空气动力学性能和光学成像性能的平衡。

## 附图说明

[0016] 图1为本发明的用于抛物面共形头罩动态像差校正固定校正器在扫描视场下的校正作用示意图;

[0017] 图2为固定校正器初始面型求取设计光路原理图;

[0018] 图3为扫描视场下固定校正器的优化设计流程图;

[0019] 图4为用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器所参与的共形光学成像系统实例图;

[0020] 图5为抛物面共形头罩光学系统在 $0^{\circ}$ 视场下的光学调制传递函数MTF示意图;

[0021] 图6为抛物面共形头罩光学系统在 $15^{\circ}$ 视场下的光学调制传递函数MTF;

[0022] 图7为抛物面共形头罩光学系统在 $30^{\circ}$ 视场下的光学调制传递函数MTF;

[0023] 图中,1-共形头罩外表面/抛物面共形头罩外表面,2-共形头罩内表面/抛物面共形头罩内表面,3-固定校正器,4-后续成像系统(图1、2中为理想透镜,图4为由两组正负透镜组成的实际光学成像系统),5-孔径光阑,6-像面。

## 具体实施方式

[0024] 本发明中一种用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法,包括以下步骤:

[0025] 步骤一、建立共形头罩外表面1为抛物面或其他复杂曲面的共形头罩的光学模型,分析其Zernike像差,并初步优化内表面实现初步像差校正;

[0026] 如图1所示,将一片非球面透镜3作为固定校正器,所述非球面透镜承接前组抛物面共形头罩的光线,并通过折射进入后续成像系统4,最终成像至像面5。所述非球面透镜3前后表面皆为高次非球面,能够对扫描视场下的抛物面共形头罩的动态像差进行校正;

[0027] 步骤二、推导基于共形头罩外表面的Wassermann-Wolf方程,并简化其实现形式,建模并求解固定校正器的初始面型,确定初始面型是否满足对于 $0^\circ$ 视场像差的校正效果,如果满足,在共形系统中代入初始面型;否则,重新确定合理参数(标记量 $H_0$ 的取值规律、多项式系数、厚度和折射率等)求解初始面型,直至满足设计要求;

[0028] 如图2所示,S和S'是固定校正器3的两个相邻的非球面,为待求的固定校正器初始面型。再引入两组笛卡尔坐标系Y0Z和Y'O'Z',其坐标原点O和O'分别位于S和S'与光轴的交点处,距离记为 $d_0$ 。在该成像系统中,轴上无穷远处物点(设为P点)发出的入射光线经过抛物面头罩折射后的折射光线 $\vec{S}_1$ 到达S面,其与头罩外表面交点高度记为 $H_0$ 。而 $\vec{S}_1$ 经过非球面S和S'折射后转化为出射光线 $\vec{S}_2$ ,记 $\vec{S}_1$ 与Y轴交点高度记为 $H_1$ ,与Z轴夹角记为 $U_1$ , $\vec{S}_2$ 与Y'轴交点高度记为 $H_2$ ,与Z'轴夹角为 $U_2$ 。 $\vec{S}_2$ 通过近轴透镜折射到达像点Q,此时折射光线与光轴的夹角记为 $U'$ 。 $n_0$ 与 $n$ 分别为红外光波在空气和非球面S和S'之间的折射率。在非球面S和S'的折射光线记为 $\vec{S}_0$ ,分别交两面于点T、T',记作 $(0,Y,Z)$ 、 $(0,Y',Z')$ 。

[0029] 步骤三、在初始结构的基础上,进行扫描视场下的分布迭代优化,确定固定校正器的曲面轮廓,并结合具体的透镜结构参数优化实现对抛物面共形头罩所引入动态像差的校正,即Zernike像差系数接近于零。

[0030] 本实施方式所述的步骤一中,所述共形头罩外表面1面型为抛物面或空气动力学性能相对抛物面更具优越性的复杂面型;共形头罩内表面2面型为高次非球面,内表面的初步像差校正设计重点控制泽尼克条纹系数Z4-Z9项的优化原则,内表面最高次项的确定由各次项多次反复优化结果的比较得出,选择优化效果相对最好且光学加工的成本和技术难度相对较低的结果;其对于抛物面共形头罩的动态像差校正会产生初步校正,校正幅度在40%-70%。

[0031] 本实施方式所述的步骤二中,实现形式的简化主要包括对实际方程的化简,以及简化传统的Wassermann-Wolf方程求解的方程转换形式,直接使用数值代入求解并利用曲线拟合简化Wassermann-Wolf方程的建模形式;即:直接使用数值代入求解 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $\sin U_1$ 、 $\cos U_1$ 和 $\tan U_1$ 具体数值集合并由此拟合其相对于自变量 $y$ 的函数,突破Wassermann-Wolf方程的函数关系不能直接通过数值模拟建立的瓶颈。

[0032] 本实施方式中,步骤三的具体过程为:

[0033] S3-1、分解视场,根据扫描视场大小划分优化视场,确定以 $5^\circ$ - $10^\circ$ (FOVp)为间隔的多重结构;

[0034] S3-2、迭代优化,拉伸固定校正器的面型轮廓,沿用Zernike系数控制原则,以设置好的多重结构为依据,对整体视场进行分步循环优化。首先设置抛物面共形头罩的凝视视场(也称瞬时视场)。然后从0°视场的结构开始,对固定校正器的面型轮廓进行拉伸优化,每重结构优化时遵循从中心视场到边缘视场的优化顺序。优化结束后,判断此时瞬时视场(FOV)是否达到扫描视场(FOR),如是,则迭代优化结束,反之则添加下一重结构再次进行多重结构的固定校正器整体面型轮廓的拉伸优化,并最终完成整体视场上所有多重结构的初步整体优化;

[0035] S3-3、综合调整优化,在确定基本的固定校正器的面型轮廓的基础上,针对共形头罩光学系统的Zernike像差表现,有选择地进行整体的视场优化,调整固定校正器的多项式参数、位置、材料及厚度,或者更进一步的加入内表面进行整体的优化,最终得出所求的固定校正器动态像差校正结构;

[0036] 本实施方式中,Wassermann-Wolf方程的化简结果为:

$$[0037] \quad \frac{dZ}{dy} = \left( \frac{n_0 R \cos U_1 - n R_z}{n_0 R \sin U_1 - n R_y} + \tan U_1 \right)^{-1} \left( \frac{dH_1}{dy} - Z \frac{d}{dy} (\tan U_1) \right)$$

$$[0038] \quad \frac{dZ'}{dy} = \left( \frac{n_0 R - n R_z}{-n R_y} \right)^{-1} \frac{dH_2}{dy}$$

[0039] 本实施方式中通过对入瞳直径下40组点的直接代入,模拟了 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $\sin U_1$ 、 $\cos U_1$ 和 $\tan U_1$ 相对于自变量 $y$ 的直接函数关系,代入求解了Wassermann-Wolf方程,摒除了传统的方程转换过程。

[0040] 本实施方式中,经过固定校正器的动态像差校正后,固定校正器前后均为偶次非球面,扫描视场为 $\pm 30^\circ$ ,凝视视场为 $1^\circ$ ,对抛物面共头罩的动态像差校正幅度接近99%,各项泽尼克系数均处于 $\pm 0.3$ 区间内;

[0041] 本实施方式中,在扫描视场下,非球面透镜3与抛物面共形头罩的位置保持相对固定,由后续成像系统4进行扫描成像至像面6;在扫描视场中成像时,系统的光阑5位于后续成像系统4与像面6之间,保证光学系统的出瞳面与导引头红外探测器冷光阑重合,实现100%冷光阑效率。

[0042] 本实施方式中,共形头罩口径为180mm,外表面为抛物面,内表面为偶次非球面,后续成像系统由两组正负硅锗正负透镜组成,光阑位于设定探测器保护窗口之后0.5mm。

[0043] 本实施方式中,还包括一种共形光学成像系统,该光学成像系统由所述用于抛物面共形头罩动态像差校正的固定校正器设计方法设计的固定校正器,抛物面共形头罩,成像系统,光阑和像面组成;经抛物面共形头罩射出的光线入射至固定校正器,经所述固定校正器校正后的光线依次经后续成像系统和光阑后在像面上成像。

[0044] 所述共形光学成像系统的最终成像质量如图5-图7所示,在红外探测器奈奎斯特频率下,0°视场MTF大于0.78,30°视场MTF大于0.67,系统在整体扫描视场下的MTF均接近于衍射极限,成像质量完全达到良好。

[0045] 综上所述,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并非用于限定本发明的保护范围。凡在本发明所述方法的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。





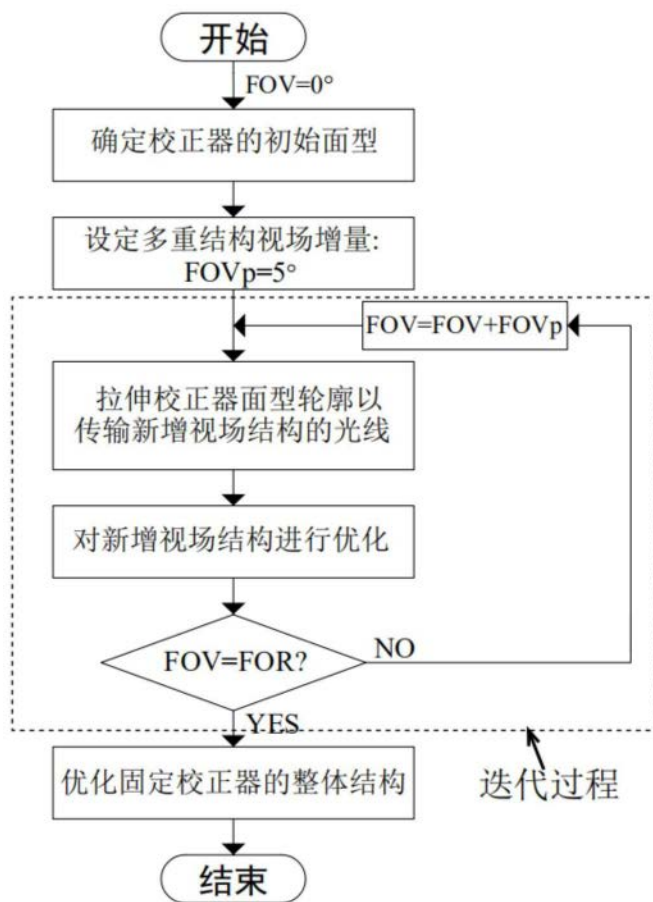


图3

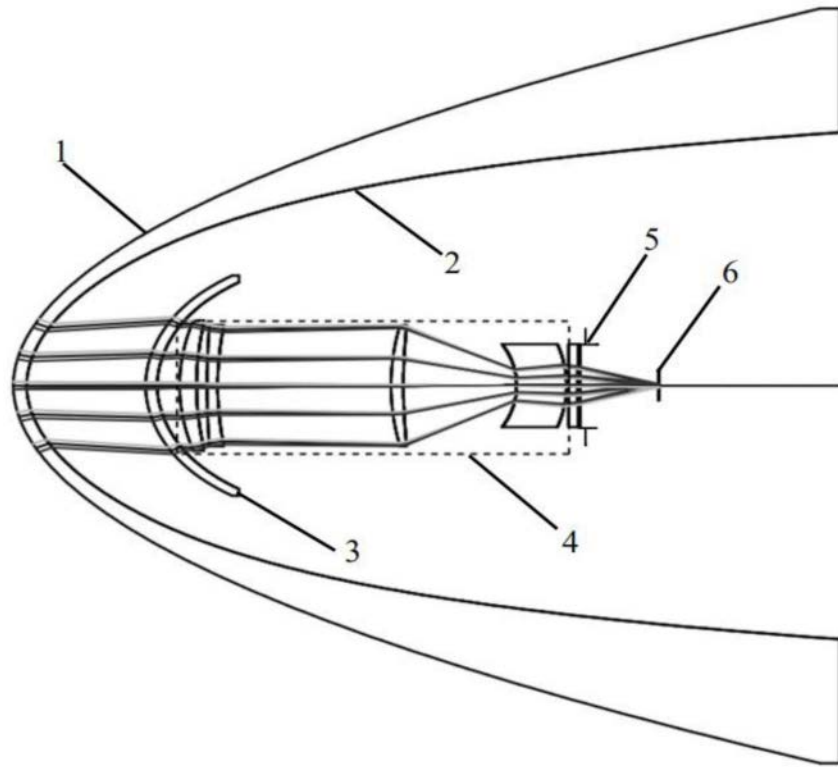


图4

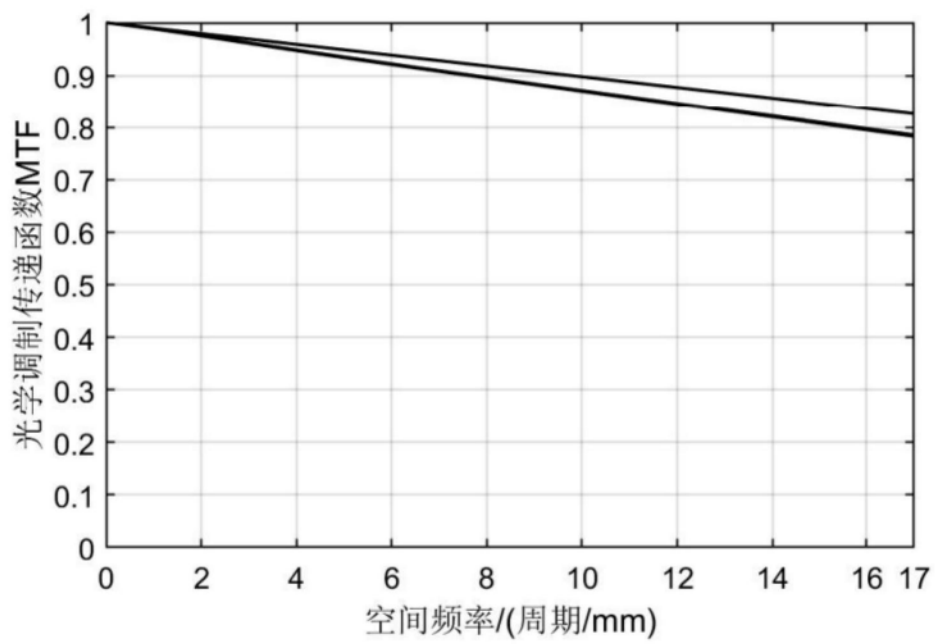


图5

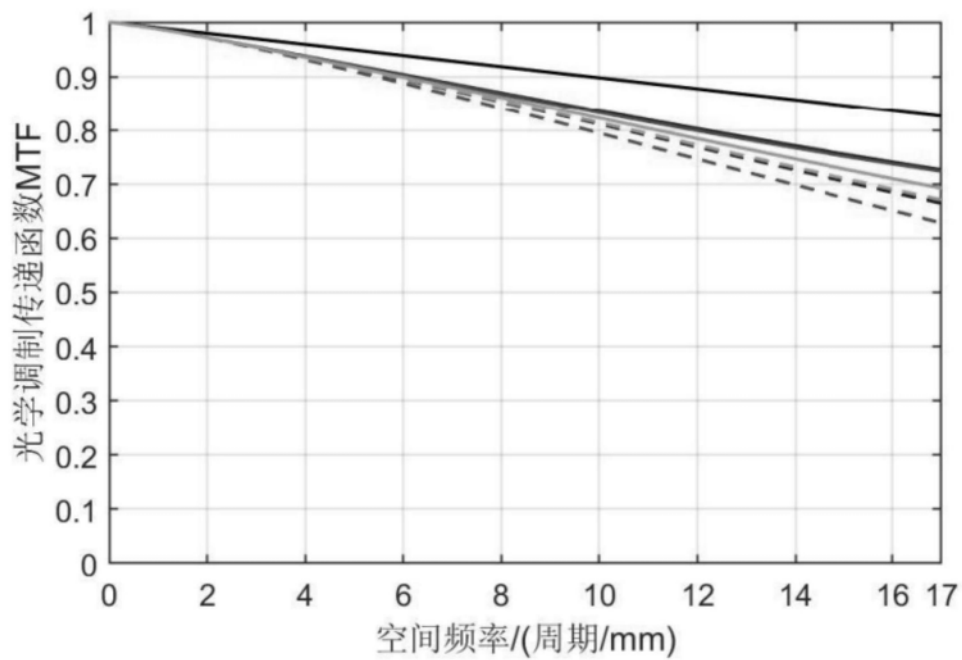


图6

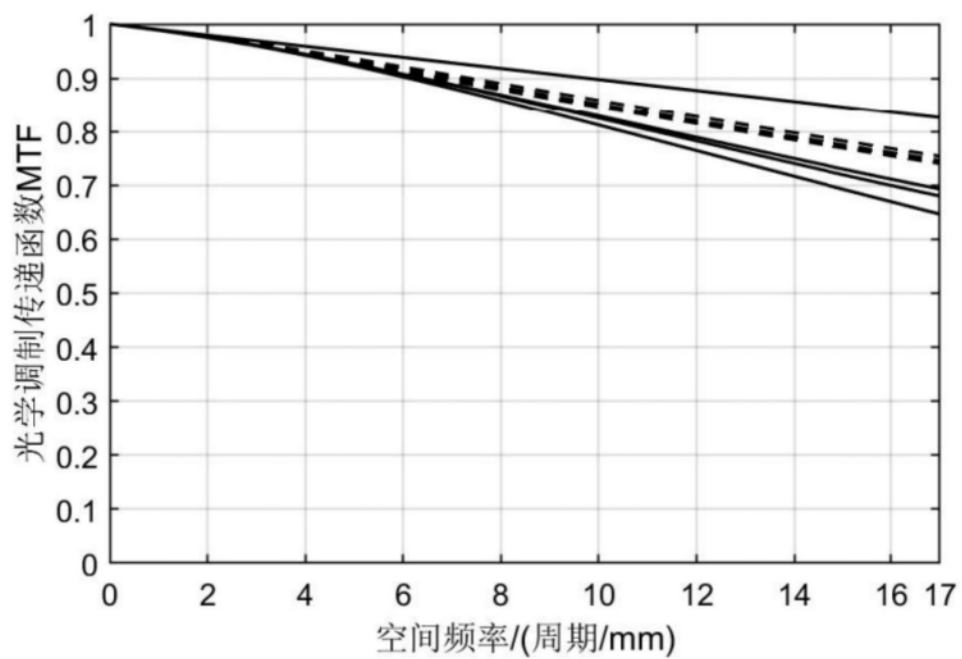


图7