



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110161663 B

(45)授权公告日 2020.04.03

(21)申请号 201910325255.8

G02B 13/00(2006.01)

(22)申请日 2019.04.22

G02B 13/18(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110161663 A

(43)申请公布日 2019.08.23

(73)专利权人 中国科学院西安光学精密机械研究所

地址 710119 陕西省西安市高新区新型工业园信息大道17号

(72)发明人 曲锐 杨明洋 陈卫宁 曹剑中 赵岳

(74)专利代理机构 西安智邦专利商标代理有限公司 61211

代理人 董娜

(51)Int.Cl.

G02B 13/06(2006.01)

G02B 1/00(2006.01)

(56)对比文件

- CN 204302561 U, 2015.04.29,
- CN 103995344 A, 2014.08.20,
- CN 102778747 A, 2012.11.14,
- CN 104049343 A, 2014.09.17,
- CN 105467560 A, 2016.04.06,
- CN 105527695 A, 2016.04.27,
- CN 2735365 Y, 2005.10.19,
- CN 105759404 A, 2016.07.13,
- CN 109188656 A, 2019.01.11,
- CN 105044887 A, 2015.11.11,
- US 2009212219 A1, 2009.08.27,
- JP 特开2019-47237 A, 2019.03.22,
- WO 2018/065508 A1, 2018.04.12,
- CN 105911676 A, 2016.08.31,

审查员 褚金雷

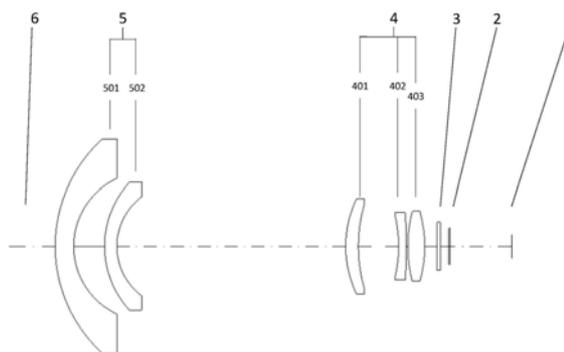
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统

(57)摘要

本发明提供了一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,解决现有鱼眼光学系统极易受环境温度变化的影响,发生离焦,降低成像质量的问题。该系统包括从物面到焦面依次排列固联的前固定镜组、像差校正组、探测器和光阑;像差校正组、探测器和光阑的中心轴线同轴;前固定镜组由两个透镜构成,从物面至焦面光轴方向依次同轴为第一负透镜和第二负透镜;像差校正组包括从物面至焦面光轴方向依次同轴的第一正透镜、第三负透镜和第二正透镜;光阑与探测器冷阑位置重合;设第二正透镜的规化热差系数为T, T通过以下公式计算: $T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g$, T应满足条件: $T < 5$; 其中, n为透镜材料的折射率, dn/dt为透镜材料的折射率/温度系数; α_g 为透镜材料的膨胀系数。



CN 110161663 B

1. 一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:包括从物面(6)到焦面(1)依次排列固联的前固定镜组(5)、像差校正组(4)、探测器和光阑;所述像差校正组(4)、探测器和光阑的中心轴线同轴;

所述前固定镜组(5)由两个透镜构成,从物面(6)至焦面(1)光轴方向依次同轴为第一负透镜(501)和第二负透镜(502);

所述像差校正组(4)由三个透镜构成,从物面(6)至焦面(1)光轴方向依次同轴为第一正透镜(401)、第三负透镜(402)和第二正透镜(403);

所述探测器包括从物面(6)至焦面(1)光轴方向依次排列的探测器保护窗(3)和探测器冷阑(2),所述光阑与探测器冷阑(2)位置重合;

设所述第二正透镜(403)的规化热差系数为T;

所述T通过以下公式计算:

$$T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g$$

T应满足条件:T<5;

其中,n为透镜材料的折射率,dn/dt为透镜材料的折射率/温度系数; α_g 为透镜材料的膨胀系数;

所述前固定镜组(5)的焦距为 f_f ,所述红外鱼眼光学系统焦距为 f_L , f_f 和 f_L 满足条件:

$$|f_f/f_L| < 3.6。$$

2. 根据权利要求1所述的一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:所述前固定镜组(5)、像差校正组(4)、探测器和光阑中心轴线同轴。

3. 根据权利要求1所述的一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:还包括设置在前固定镜组(5)和像差校正组(4)之间的反射镜(7);

所述前固定镜组(5)位于反射镜(7)的入射光轴上,像差校正组(4)、探测器和光阑依次位于反射镜(7)的反射光轴上。

4. 根据权利要求1或2或3所述的一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:所述第一负透镜(501)的材料为硅,第二负透镜(502)的材料为锗。

5. 根据权利要求4所述的一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:所述第一正透镜(401)的材料为硅,第三负透镜(402)的材料为锗;

所述第二正透镜(403)的材料为硒化锌或硫系玻璃。

6. 根据权利要求5所述的一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:

所述像差校正组(4)的焦距为 f_c , f_c 和 f_L 满足条件:

$$5.6 < |f_c/f_L|。$$

7. 根据权利要求6所述的一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:前固定镜组第一负透镜(501)的后表面到前固定镜组(5)第二负透镜(502)的前表面之间的距离为10mm;

前固定镜组第二负透镜(502)的后表面到像差校正组(4)第一正透镜(401)的前表面之间的距离为74.2mm;

像差校正组第一正透镜(401)的后表面到像差校正组第三负透镜(402)的前表面之间

的距离为13.03mm;

像差校正组第三负透镜(402)的后表面到像差校正组第二正透镜(403)的前表面之间的距离为0.5mm;

像差校正组第二正透镜(403)的后表面到探测器保护窗(3)的前表面之间的距离为4mm;

探测器保护窗(3)的后表面到探测器冷阑(2)的前表面之间的距离为2.85mm。

8. 根据权利要求7所述的一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:

所述第一负透镜(501)的厚度为6mm,其前表面为球面,曲率半径为47.1mm,后表面为球面,曲率半径为24.24mm;

所述第二负透镜(502)的厚度为4mm,其前表面为球面,曲率半径为30.56mm,后表面为球面,曲率半径为20.12mm。

9. 根据权利要求8所述的一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特征在于:

所述第一正透镜(401)的厚度为4.09mm,其前表面为球面,曲率半径为36.04mm,后表面为球面,曲率半径为49.15mm;

所述第三负透镜(402)的厚度为2.5mm,其前表面为非球面,曲率半径为-47.03mm,后表面为球面,曲率半径为-182.11mm;

所述第二正透镜(403)的厚度为5.5mm,其前表面为球面,曲率半径为44.79mm,后表面为非球面,曲率半径为-37.51mm。

一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统

技术领域

[0001] 本发明属于一种红外光学系统,特别是涉及一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,具备光学被动消热差功能。

背景技术

[0002] 鱼眼镜头具有大视场,可实现全方位成像,特别是,红外波段的鱼眼镜头在管道检测、森林防火、公安边防、区域监控等方面占有重要而不可替代的地位,尤其是用于中波和长波红外波段的红外热像鱼眼镜头,因其能够实现全空域包容和全时域实时信息的获取,在现代信息获取技术中得到广泛应用。

[0003] 但红外鱼眼镜头的大视场角导致光学系统轴外像差校正困难,像面边缘照度降低,而且,为了保证整个系统的光阑效率,适配制冷型红外探测器的鱼眼镜头要求与探测器冷阑匹配,实现优良的杂光抑制效果。

[0004] 另一方面,由于红外光学材料较大的温度折射率系数,使得红外光学系统性能极易受环境温度变化的影响,发生离焦,降低成像质量。

[0005] 现有一些文献资料公开的制冷型红外鱼眼光学系统,例如,美国专利US5502592,公开了一种具有超半球视场的红外鱼眼光学系统,针对中波红外和长波红外不同波段,视场角可达 270° ,但不具备无热化功能。另美国专利US6989537 B2和US 2009/0212219 A1也给出了类似鱼眼光学系统,也未实现无热化。

[0006] 中国专利CN 105044887 B,公开了一种制冷型大相对孔径超广角红外光学系统,采用反摄远结构,一定程度上压缩了光学系统体积尺寸,光学系统F数为2.0,全视场角约 120° ,但未实现无热化。

[0007] 因此为了降低温度变化对成像质量的影响,需对红外光学系统进行无热化设计,或称为消热差设计。因而,迫切需要设计出具有较小F数($F\#$ 即为光圈数,是入瞳口径与焦距之比的倒数,即 $F=f/D$),且具有无热化功用的制冷型红外鱼眼光学系统,以满足成像质量可靠性高的要求。

发明内容

[0008] 为了解决现有鱼眼光学系统极易受环境温度变化的影响,发生离焦,降低成像质量的问题。本发明提供了一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统。

[0009] 为实现上述目的,本发明提供的技术方案是:

[0010] 一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,其特殊之处在于:包括从物面到焦面依次排列固联的前固定镜组、像差校正组、探测器和光阑;所述像差校正组、探测器和光阑的中心轴线同轴;所述前固定镜组由两个透镜构成,从物面至焦面光轴方向依次同轴为第一负透镜和第二负透镜;所述像差校正组由三个透镜构成,从物面至焦面光轴方向依次同轴为第一正透镜、第三负透镜和第二正透镜;所述探测器包括从物面至焦面光轴方向依次排列的探测器保护窗和探测器冷阑,所述光阑与探测器冷阑位置重合;

[0011] 设所述第二正透镜的规化热差系数为T;

[0012] 所述T通过以下公式计算:

$$[0013] \quad T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g$$

[0014] T应满足条件:T<5;

[0015] 其中,n为透镜材料的折射率,dn/dt为透镜材料的折射率/温度系数; α_g 为透镜材料的膨胀系数。

[0016] 进一步地,所述前固定镜组、像差校正组、探测器和光阑中心轴线同轴。

[0017] 进一步地,还包括设置在前固定镜组和像差校正组之间的反射镜;所述前固定镜组位于反射镜的入射光轴上,像差校正组、探测器和光阑依次位于反射镜的反射光轴上。

[0018] 进一步地,所述第一负透镜的材料为硅,第二负透镜的材料为锗。

[0019] 进一步地,所述第一正透镜的材料为硅,第三负透镜的材料为锗;所述第二正透镜的材料为硒化锌或硫系玻璃。

[0020] 进一步地,所述前固定镜组的焦距为 f_f ,所述红外鱼眼光学系统焦距为 f_L , f_f 和 f_L 满足条件:

$$[0021] \quad |f_f/f_L| < 3.6。$$

[0022] 进一步地,所述像差校正组的焦距为 f_c , f_c 和 f_L 满足条件:

$$[0023] \quad 5.6 < |f_c/f_L|。$$

[0024] 进一步地,沿物面至焦面光轴方向;

[0025] 前固定镜组第一负透镜的后表面到前固定镜组第二负透镜的前表面之间的距离为10mm;

[0026] 前固定镜组第二负透镜的后表面到像差校正组第一正透镜的前表面之间的距离为74.2mm;

[0027] 像差校正组第一正透镜的后表面到像差校正组第三负透镜的前表面之间的距离为13.03mm;

[0028] 像差校正组第三负透镜的后表面到像差校正组第二正透镜的前表面之间的距离为0.5mm;

[0029] 像差校正组第二正透镜的后表面到探测器保护窗的前表面之间的距离为4mm;

[0030] 探测器保护窗的后表面到探测器冷阑的前表面之间的距离为2.85mm。

[0031] 进一步地,所述第一负透镜的厚度为6mm,其前表面为球面,曲率半径为47.1mm,后表面为球面,曲率半径为24.24mm;

[0032] 所述第二负透镜的厚度为4mm,其前表面为非球面,曲率半径为30.56mm,后表面为非球面,曲率半径为20.12mm。

[0033] 进一步地,所述第一正透镜的厚度为4.09mm,其前表面为非球面,曲率半径为36.04mm,后表面为非球面,曲率半径为49.15;

[0034] 所述第三负透镜的厚度为2.5mm,其前表面为非球面,曲率半径为-47.03mm,后表面为非球面,曲率半径为-182.11mm;

[0035] 所述第二正透镜的厚度为5.5mm,其前表面为非球面,曲率半径为44.79mm,后表面为非球面,曲率半径为-37.51mm。

[0036] 与现有技术相比,本发明的优点是:

[0037] 1、本发明光学系统的前固定镜组能够保证光学系统的大视场和大孔径化,并且能有效压缩后续光学元件的外径,实现光学系统的小型化,像差校正镜组能够保证对与大视场和大孔径化相伴而生的像差良好地进行校正,特别是能对红外鱼眼光学系统中的像散和场曲更好地进行校正,实现光学系统的无热化,光学系统成像品质高、稳定性好。

[0038] 2、本发明光学系统的前固定镜组、像差校正组、探测器和光阑中心轴线同轴,镜片总数采用5片,采用两面非球面(第三负透镜的前表面、第二正透镜的后表面),可实现大于半球视场的成像范围,光学系统结构紧凑,体积较小。

[0039] 3、本发明可在前固定镜组、像差校正组之间设置反射镜,减小整个系统的体积。

[0040] 4、本发明光学系统中透镜采用了硒化锌ZnSe或硫系玻璃材料、锗和硅三种材料配合,均为普通红外光学材料,保证技术的成熟度和延续性。

[0041] 5、本发明采用类对称的结构设计,并结合消除波段间色差和消各自波段内色差能力较强的材料配对组合,使得光学系统具有较好畸变特性及色差校正特性。

[0042] 6、本发明的透镜采用与镜筒材料线膨胀系数相匹配的材料组合和 $-45^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$ 全温度范围内光学被动补偿的消热差方式,补偿了因镜筒材料温度变化造成的热胀冷缩而导致的离焦。

附图说明

[0043] 图1为本发明制冷型无热化红外鱼眼光学系统实施例一透镜结构的示意图;

[0044] 图2为本发明制冷型无热化红外鱼眼光学系统实施例一的光路图;

[0045] 图3为本发明制冷型无热化红外鱼眼光学系统实施例二的光路图;

[0046] 其中,附图标记如下:

[0047] 1-焦面,2-探测器冷阑,3-探测器保护窗,4-像差校正镜组,401-第一正透镜,402-第三负透镜,403-第二正透镜,5-前固定镜组,501-第一负透镜,502-第二负透镜,6-物面,7-反射镜。

具体实施方式

[0048] 以下结合附图和具体实施例对本发明的内容作进一步详细描述。

[0049] 一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,包括从物面6到焦面1依次排列固联的前固定镜组5、像差校正组4、探测器和光阑;像差校正组4、探测器和光阑的中心轴线同轴;前固定镜组5由两个透镜构成,从物面6至焦面1光轴方向依次同轴为第一负透镜501和第二负透镜502;像差校正组4由三个透镜构成,从物面6至焦面1光轴方向依次同轴为第一正透镜401、第三负透镜402和第二正透镜403;探测器包括从物面6至焦面1光轴方向依次排列的探测器保护窗3和探测器冷阑2,所述光阑与探测器冷阑2位置重合,设第二正透镜403的规化热差系数为T,T通过以下公式计算:

$$[0050] \quad T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g$$

[0051] T应满足条件: $T < 5$;

[0052] 其中,n为透镜材料的折射率,dn/dt为透镜材料的折射率/温度系数; α_g 为透镜材

料的膨胀系数。

[0053] 实施例一

[0054] 如图1、图2和表1所示,本实施例提供的光学系统,采用2组5片式结构,光学系统全系统的焦距=3.9mm, $F/\# = 2$, $F\#$ 即为光圈数是入瞳口径与焦距之比的倒数,即 $F = f/D$,工作波段:3 μm ~5 μm ,全视场: $\pm 102^\circ$ 。

[0055] 一种制冷型无热化红外鱼眼光学系统,包括沿光轴方向从左向右依次同轴且位置固定的前固定镜组5、像差校正镜组4、探测器和光阑,前固定镜组5的左侧为物面6,探测器的右侧为焦面1,前固定镜组5由两个透镜构成,从左至右依次为第一负透镜501和第二负透镜502;像差校正组由三个透镜构成,从左至右依次为第一正透镜401、第三负透镜402和第二正透镜403;第一负透镜501、第二负透镜502、第一正透镜401、第三负透镜402和第二正透镜403均采用光学晶体或光学玻璃材料,共同构成制冷型红外鱼眼光学系统。

[0056] 光学系统光阑设置在第二正透镜403靠近像方侧,与制冷型探测器冷阑2位置重合;其中,第一负透镜501采用硅材料,对大视场入射的光束宽度进行压缩;第二负透镜502采用锗材料,校正第一负透镜501因与大视场入射相伴引入的色差,并对经第一负透镜501压缩的光束宽度进一步进行压缩;第一正透镜401、第三负透镜402和第二正透镜403共同构成像差校正镜组4,对由经前固定镜组5压缩引入的像散、场曲、畸变和色差进行校正,并控制剩余球差,最终光线经第二正透镜403进一步会聚,经探测器保护窗3和冷阑,入射于焦面1上完成成像。

[0057] 前固定镜组5包括自左向右中心轴线同轴排列的第一负透镜501和第二负透镜502。在光学系统的最靠物面6侧,能够配置具有大负光焦度且具有负折射力的前固定镜组5,有利于光学系统的大视场化。

[0058] 前固定镜组5具有负光焦度,设前固定镜组5的焦距为 f_f ,设红外鱼眼光学系统焦距为 f_L , f_f 和 f_L 满足以下条件式:

$$[0059] \quad |f_f/f_L| < 3.6; \quad (1)$$

[0060] 前固定镜组5能够保证光学系统的大视场和大孔径化,并且能有效压缩后续光学元件的外径,实现光学系统的小型化。

[0061] 条件式(1)是对前固定镜组5的焦距范围进行限定的式子。通过满足该条件式(1),能够保证光学系统的大视场与大孔径化,并能够实现光学系统的小型化。在条件式(1)中若超过其上限,则前固定镜组5的光焦度变小,不能对大视场化相伴的光束宽度进行压缩,无法实现光学视场的超半球化。

[0062] 此外,像差校正镜组4包括自左向右中心轴线同轴排列的第一正透镜401、第三负透镜402和第二正透镜403,设像差校正镜组4的焦距为 f_c , f_c 和 f_L 满足以下条件式:

$$[0063] \quad 5.6 < |f_c/f_L|; \quad (2)$$

[0064] 条件式(2)是对像差校正镜组4的焦距范围进行限定的式子。通过满足该条件式(2),能够保证对与大视场和大孔径化相伴而生的像差良好地进行校正,特别是能对红外鱼眼光学系统中的像散和场曲更好地进行校正。条件式(2)中若低于其下限,则像差校正镜组4的光焦度增大,对光学系统小型化有利,但特别是光学系统中像散和场曲的校正变得困难,光学性能劣化,影响成像质量。

[0065] 第二正透镜403采用硒化锌ZnSe或硫系玻璃材料,设第二正透镜403的规化热差系

数为T, 规化热差系数 $T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_g$; n为透镜材料的折射率, dn/dt为透镜材料的折射率/温度系数; α_g 为透镜材料的膨胀系数, 第二正透镜403的规化热差系数T满足中以下条件式:

$$[0066] \quad T < 5; \quad (3)$$

[0067] 条件式(3)是对第二正透镜403的消热性能进行限定的式子。通过满足该条件式(3), 能够保证对与大视场和大孔径化相伴而生的色差和热差良好地进行校正, 实现光学系统的无热化。条件式(3)中若高于其上限, 则第二正透镜403消热性能下降, 无法实现光学系统的无热化, 影响成像质量。

[0068] 本实施的制冷型红外鱼眼光学系统, 通过满足上述各条件, 能够实现体积小, 结构紧凑, 实现光学被动无热化, 并具有超半球成像视场的红外鱼眼光学系统。通过同时多个满足上述各条件, 能够得到更优良的光学性能。

[0069] 本实施例光学系统共五个镜片, 从物面6到焦面1依次排列固联具有负折射力的第一负透镜501、具有负折射力第二负透镜502、具有正折射力的第一正透镜401、具有负折射力第三负透镜402和具有正折射力的第二正透镜403、探测器保护窗3、探测器冷阑2, 在成像面配置焦平面探测器的受光面。

[0070] 本实施例的光学系统全系统的焦距=3.9mm, $F/\# = 2$, F#即为光圈数是入瞳口径与焦距之比的倒数, 即 $F = f/D$, 工作波段: $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$, 全视场: $\pm 102^\circ$, 以下表1和表2表示与实施例所涉及的制冷型无热化红外鱼眼光学系统相关的各种数值数据。

[0071] 表1本实施例光学系统各透镜的具体参数(单位:mm)

组	序号	表面类型	曲率半径(r)	厚度(d)	折射率(nd)
前固定镜组	501	球面	47.1	6	Silicon
		球面	24.24	10	
	502	球面	30.56	4	Germanium
		球面	20.12	74.2	
像差校正镜组	401	球面	36.04	4.09	Silicon
		球面	49.15	13.03	
	402	非球面	-47.03	2.5	Germanium
		球面	-182.11	0.5	
	403	球面	44.79	5.5	ZNSE
		非球面	-37.51	4	
探测器保护窗	3	/	INF	1	Silicon
		/	INF	2.85	-
探测器冷阑	2	/	INF	0.3	Silicon
		/	INF	20	
焦面	1	/	INF	0	

[0072] 表2本实施例光学系统的参数值

条件	参数值
$ f_f/fL $	2.7
$ f_c/fL $	7
T	3.77

[0073] 本实施例中,光阑置于探测器冷阑2上,保证了100%的冷阑效率,本发明适用于各类军警民用监控、搜索与跟踪瞄准、态势感知等用途。

[0074] 本实施例中,安装光学系统的镜筒材料采用线膨胀系数为 $236 \times 10^{-7}/K$ 的铝合金材料,与组成各镜组的材料配合,在周围环境温度变化时可以通过手动或机电主动的方式控制调焦镜组进行调焦,无需其它热膨胀系数更低的镜筒材料。当然,采用其它热膨胀系统更低或更高的镜筒材料,本光学结构对镜片的曲率半径、厚度、镜片间隔和镜片非球面系数等进行修改,则可在高低温下获得与本发明相近或更为优良的光学性能。

[0075] 本发明通过弯曲关键表面与镀制外减反膜的方法,使得光学系统在不同视场下都具有较好的冷反射特性。

[0076] 本实施例的透镜采用与镜筒材料线膨胀系数相匹配的材料组合和 $-45^{\circ}C \sim 65^{\circ}C$ 全温度范围内光学被动补偿的消热差方式,补偿了因镜筒材料温度变化造成的热胀冷缩而导致的离焦。

[0079] 本实施例中,采用的硒化锌ZnSe或硫系玻璃材料可由其他规化热差系数相近的光学玻璃或晶体材料替换,此时只需对本光学结构中各镜片的曲率半径、厚度、镜片间隔等进行修改,即可在高低温下获得与本发明相近或更为优良的光学性能。

[0080] 本实施例将该光学设计结构应用于制冷型焦平面探测器上,像元数为 640×512 ,单个像元尺寸为 $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$,探测器焦平面对角线长度为12.32mm。

[0081] 本实施例中,从第一正透镜401靠近物面6一侧的面到焦面1的总长小于148mm,各透镜最大口径约66mm,焦距约3.9mm。采用光圈数F#2。具有较小的体积、较轻的重量和较大的相对孔径。

[0082] 实施例二

[0083] 如图3所示,与实施例一不同在于还包括设置在前固定镜组5和像差校正组4之间的反射镜7,相应地,对像差校正组4、探测器和光阑的位置进行调整,前固定镜组5位于反射镜7的入射光轴上,像差校正组4、探测器和光阑依次位于反射镜7的反射光轴上,反射镜7改变光束的传输方向,可压缩整个光学系统的体积,进一步满足体积要求严格环境下的应用要求。

[0084] 以上仅是对本发明的优选实施方式进行了描述,并不将本发明的技术方案限制于此,本领域技术人员在本发明主要技术构思的基础上所作的任何公知变形都属于本发明所要保护的技术范畴。

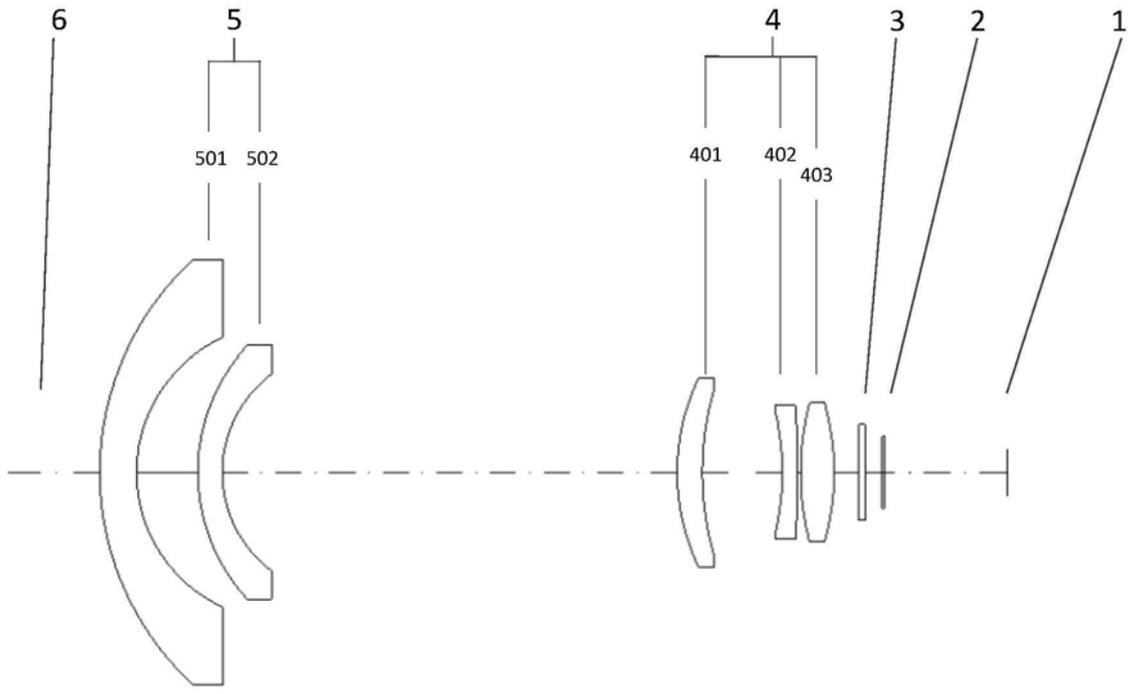


图1

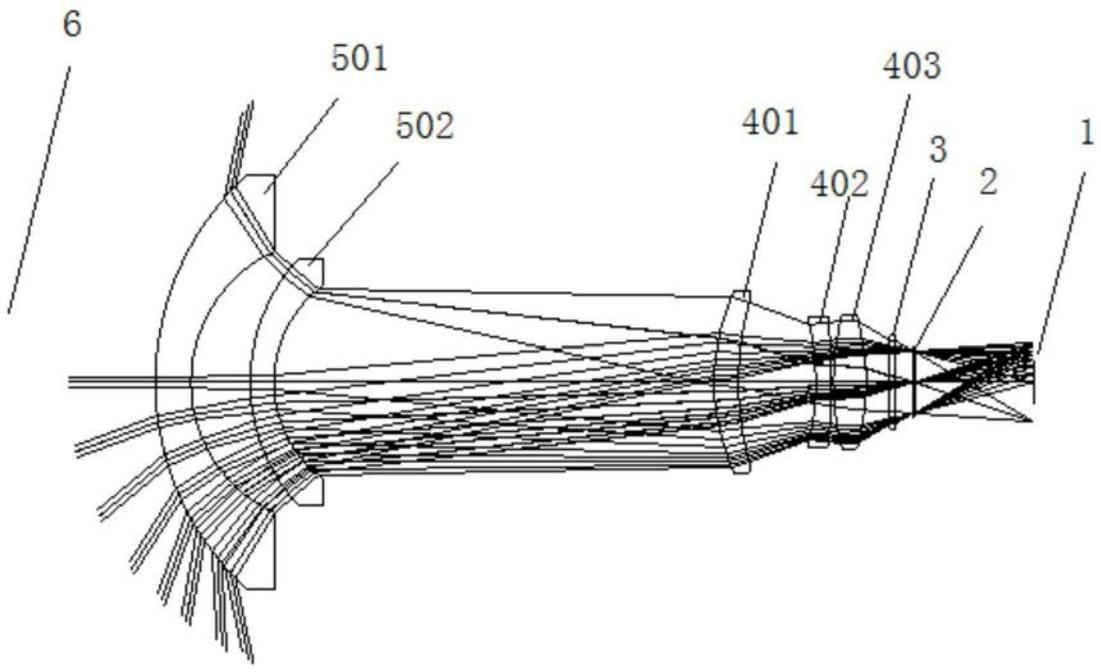


图2

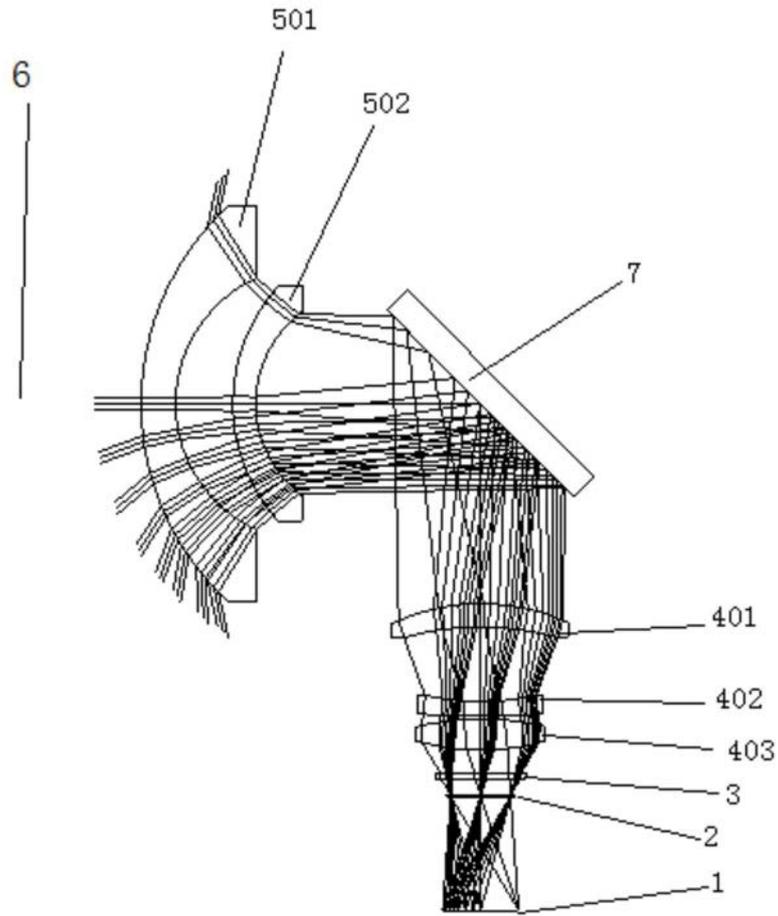


图3