



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102509416 A

(43) 申请公布日 2012. 06. 20

(21) 申请号 201110352620. 8

G01J 5/06 (2006. 01)

(22) 申请日 2011. 11. 09

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路
3888 号

(72) 发明人 孙强 姜洋 刘英 刘殿双

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 王淑秋

(51) Int. Cl.

G08B 17/12 (2006. 01)

G02B 13/14 (2006. 01)

G02B 13/18 (2006. 01)

G02B 7/00 (2006. 01)

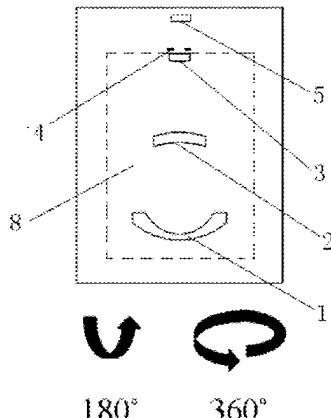
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 5 页

(54) 发明名称

大视场凝视型红外成像森林防火预警系统

(57) 摘要

本发明涉及一种大视场凝视型红外成像森林防火预警系统，该系统包括红外成像光学镜头和红外制冷探测器；光线经由红外成像光学镜头成像于红外制冷探测器的焦平面阵列上；所述红外成像光学镜头采用反远距结构，且红外成像光学镜头成像像点的位置与物体空间方位信息符合 $y' = f \theta$ 物像关系；其中 y' 为物体在红外制冷探测器焦平面阵列上所成的像的像高， f 为红外成像光学镜头的焦距， θ 为视场角。本发明采用凝视成像，没有机械扫描结构，增强了系统稳定性；拥有超大视场，达到 180 度，可以实现周边全区域实时成像，不存在盲区，能够有效防止漏警情况的发生，还可以同时发现并监测多个着火点。



180°

360°

1. 一种大视场凝视型红外成像森林防火预警系统, 其特征在于包括红外成像光学镜头(8)和红外制冷探测器(5); 光线经由红外成像光学镜头(8)成像于红外制冷探测器(5)的焦平面阵列上; 所述红外成像光学镜头(8)采用反远距结构, 且红外成像光学镜头(8)成像像点的位置与物体空间方位信息符合 $y' = f \theta$ 物像关系; 其中 y' 为物体在红外制冷探测器(5)焦平面阵列上所成的像的像高, f 为红外成像光学镜头(8)的焦距, θ 为视场角。

2. 根据权利要求1所述的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统, 其特征在于所述红外成像光学镜头(8)采用一个弯月负透镜(1)作为反远距结构的前组。

3. 根据权利要求2所述的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统, 其特征在于所述红外成像光学镜头(8)采用第一、第二正透镜(2、3)作为反远距结构的后组。

4. 根据权利要求1所述的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统, 其特征在于还包括一个冷光阑(4); 冷光阑(4)位于红外成像光学镜头(8)与红外制冷探测器(5)之间。

5. 根据权利要求3所述的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统, 其特征在于所述弯月负透镜(1)的前表面(11), 第一正透镜的前表面(21)、后表面(22), 及第二正透镜的前表面(31)、后表面(32)均为球面; 弯月负透镜(1)的后表面(12)为偶次非球面, 并在偶次非球面上加入衍射结构; 所述偶次非球面方程为:

$$z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 R^2}} + a_1 R^2 + a_2 R^4 + a_3 R^6 + a_4 R^8 + a_5 R^{10} \quad (1)$$

式(1)中, z 为矢高, c 为顶点处曲率, k 为圆锥曲线常数, R 为垂直光轴方向的径向距离, $a_1 = 0$, a_2, a_3, a_4, a_5 为偶次非球面高次项系数;

所述衍射结构的相位分布函数为:

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 \quad (2)$$

式(2)中, r 为归一化半径, A_1, A_2, A_3 为衍射结构的位相系数。

6. 根据权利要求3所述的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统, 其特征在于所述弯月负透镜(1)的前表面(11)、第一正透镜的后表面(22)和第二正透镜的前表面(31)为球面; 弯月负透镜(1)的后表面(12)、第一正透镜的前表面(21)和第二正透镜的后表面(32)为偶次非球面; 所述偶次非球面方程为:

$$z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 R^2}} + a_1 R^2 + a_2 R^4 + a_3 R^6 + a_4 R^8 + a_5 R^{10} \quad (1)$$

式(1)中, z 为矢高, c 为顶点处曲率, k 为圆锥曲线常数, R 为垂直光轴方向的径向距离, $a_1 = 0$, a_2, a_3, a_4, a_5 为偶次非球面高次项系数。

7. 根据权利要求3所述的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统, 其特征在于所述弯月负透镜(1)的前表面(11)、第一正透镜的后表面(22)和第二正透镜的前表面(31)为球面; 弯月负透镜(1)的后表面(12)、第一正透镜的前表面(21)和第二正透镜的后表面(32)为偶次非球面, 并且弯月负透镜(1)的后表面(12)加入衍射结构; 所述偶次非球面方程为:

$$z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 R^2}} + a_1 R^2 + a_2 R^4 + a_3 R^6 + a_4 R^8 + a_5 R^{10} \quad (1)$$

式(1)中, z 为矢高, c 为顶点处曲率, k 为圆锥曲线常数, R 为垂直光轴方向的径向距离, $a_1 = 0$, a_2, a_3, a_4, a_5 为偶次非球面高次项系数; 所述衍射结构的相位分布函数为:

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 \quad (2)$$

式(2)中, r 为归一化半径, A_1, A_2, A_3 为衍射结构的位相系数。

大视场凝视型红外成像森林防火预警系统

技术领域

[0001] 本发明属于光学技术领域,涉及一种大视场凝视型红外成像光学系统,用于森林防火预警。

背景技术

[0002] 我国森林资源覆盖面积大,现今主要防火方法以瞭望塔、地面巡护、和卫星探测为主,东北、西南林区还进行航空监测。每年都需要投入大量的人力物力进行火灾防护。近几年还出现了利用可见光摄像头进行图像识别监测的方法,但是光线环境复杂多变干扰因素较多,实际应用效果并不理想。

[0003] 自然界中绝对零度以上的物体都会不停地向外辐射红外线,不同温度的黑体也有不同的辐射谱线分布。木材燃烧火焰的辐射波长在 $3\text{--}5\mu\text{m}$,自然景物的红外辐射波段在 $8\text{--}14\mu\text{m}$,红外成像系统可以利用火焰与背景间的红外辐射差异获取着火点目标图像。可以在黑夜或浓厚的烟幕、云雾中远距离观测目标,迅速找到火点。抗干扰能力强,不受天气和光照条件的限制。

[0004] 由于红外光学材料选择较少与大视场光学系统的光阑像差等众多设计问题,使大视场红外成像系统发展缓慢。随着光学设计软件的不断完善,和光阑像差理论的提出,大视场光线追迹得以解决。衍射结构制造加工技术不断发展,使二元光学技术越来越多的应用于实际红外光学系统中,广泛应用于安全监控,军事侦测等领域。近年来大面积红外制冷焦平面阵列的发展也促使大视场凝视型红外成像系统成为可能。目前用于森林防火等领域的红外光学系统一般只能监测 30 度以下的小范围区域,光学系统仅能获取图像;需要依靠机械扫描机构实现搜索;对着火点的位置无法精确定位;稳定性和精度都要受到机械结构限制。而通常情况下林区的监控范围较大,每个监测点需负责 360 度全方位视觉覆盖,若使用常规系统监测覆盖范围有限需要多套系统协同工作。

[0005] 随着光学设计软件的不断完善和进步,光学设计思想可以更好地通过软件实现,我们可以通过软件实现上万条光线追迹与镜片面型优化。光学系统的主光线像差表现为图像畸变,并且和视场的三次方成正比,视场越大畸变越大。对于大视场光学系统的畸变,一直是光学设计中很难克服的问题。

[0006] 衍射元件是基于光波的衍射理论,利用计算机辅助设计,在传统光学元件表面刻蚀多个台阶深度的浮雕结构,形成纯相位、同轴再现、具有极高衍射效率的一类光学元件。它不仅可以增加光学设计的自由度,而且在改善系统像质,减小体积和降低成本等多方面都表现出传统光学系统无法比拟的优势。

发明内容

[0007] 本发明要解决的技术问题是提供一种采用凝视型结构,可对周边水平方向 360 度区域、竖直平面内下方 180 度区域目标实时成像,并且实现火点定位,稳定性较强的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统。

[0008] 为了解决上述技术问题,本发明的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统包括红外成像光学镜头和红外制冷探测器;光线经由红外成像光学镜头成像于红外制冷探测器的焦平面阵列上;所述红外成像光学镜头采用反远距结构,且红外成像光学镜头成像像点的位置与物体空间方位信息符合 $y' = f \theta$ 物像关系;其中 y' 为物体在红外制冷探测器焦平面阵列上所成的像的像高, f 为红外成像光学镜头的焦距, θ 为视场角。

[0009] 本发明为同轴旋转对称结构,红外成像光学镜头成像像点的位置与物体空间方位信息符合 $y' = f \theta$ 物像关系,光线进入红外成像光学镜头最终成像于红外制冷探测器的焦平面阵列(焦平面阵列)上,由焦平面阵列上像点位置即可获得目标方位信息,实现物像对应的定位功能。红外成像光学镜头采用反远距结构,使包含了红外成像光学镜头和红外制冷探测器的光学系统的后主面向后移出最后一片物镜(即距离红外制冷探测器最近的透镜),这样后工作距离即可大于系统焦距,以便放置红外制冷探测器。本发明采用凝视成像,没有机械扫描结构,增强了系统稳定性;拥有超大视场,达到 180 度,可以实现周边全区域实时成像,不存在盲区,能够有效防止漏警情况的发生,还可以同时发现并监测多个着火点。

[0010] 所述红外成像光学镜头采用一个弯月负透镜作为反远距结构的前组。

[0011] 所述红外成像光学镜头采用第一、第二正透镜作为反远距结构的后组。

[0012] 光线经由红外成像光学镜头的前组发散后进入后组,被后组成像在红外制冷探测器的焦平面阵列上。

[0013] 本发明采用弯月负透镜作为反远距结构的前组,轴外光线经过弯月负透镜后产生较大偏折,和光轴的夹角显著减小,可以提高轴外点照度,同时避免光线在透镜的第二表面发生全发射。同时,弯月负透镜引入大量的光阑像差有效解决了大视场成像系统像面照度均匀性问题。

[0014] 本发明还可以包括一个冷光阑;冷光阑位于红外成像光学镜头与红外制冷探测器之间,用于阻挡成像区域外的杂散热辐射。

[0015] 本发明由红外成像光学镜头与红外制冷探测器组成。红外制冷探测的工作波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,光学系统工作波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

附图说明

[0016] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细说明。

[0017] 图 1a、1b 是本发明的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统安装位置示意图。

[0018] 图 2 是本发明物像关系示意图。

[0019] 图 3 是本发明实施例 1 结构示意图。

[0020] 图 4 是本发明实施例 2、3 的结构示意图。

[0021] 图 5 是本发明实施例 2 的 F-θ 校准畸变曲线图。

[0022] 图 6 是本发明实施例 3 的 F-θ 校准畸变曲线图。

[0023] 图 7 是本发明实施例 3 的系统光学传递函数曲线图。

[0024] 图 8 是本发明实施例 3 的相对照度曲线图。

[0025] 图 9 是本发明实施例 3 的能量集中度曲线图。

[0026] 图 10 是本发明实施例 3 的 RMS 直径点列图。

具体实施方式

[0027] 如图 1a 所示,本发明的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统 6 可以安置在瞭望塔 7 下方,红外成像光学镜头 8 对准方向竖直向下。可对周边 360 度,下半球区域实时监测。

[0028] 如图 1b 所示,本发明的大视场凝视型红外成像森林防火预警系统包括红外成像光学镜头 8、冷光阑 4 和红外制冷探测器 5;所述红外成像光学镜头 8 采用反远距结构,用一个弯月负透镜 1 作为反远距结构的前组,第一、第二正透镜 2、3 作为反远距结构的后组。光线经由前组发散后进入后组,被后组成像在红外制冷探测器 5 的焦平面阵列上。冷光阑 4 位于第二正透镜 3 与红外制冷探测器 5 之间,用于阻挡成像区域外的杂散热辐射。

[0029] 红外成像光学镜头 8 的弯月形负透镜 1 弯向光阑,轴外光线经过此透镜后产生较大偏折,和光轴的夹角显著减小。可以提高轴外点照度,同时避免光线在透镜的第二表面发生全发射。此透镜引入大量的光阑像差有效解决了大视场成像系统像面照度均匀性问题。

[0030] 如图 2 所示,视场角为 θ 方向的光线,经红外成像光学镜头 8 成像于红外制冷探测器焦平面阵列 51 上的 y' 点。在红外成像光学镜头 8 的焦距 f 一定的情况下,像点的位置与物体空间方位信息符合 $y' = f \theta$ 物像关系,物像点一一对应,并且相同视场角的光线在焦平面阵列 51 上所成的像距焦平面阵列中心的径向距离相等。

[0031] 实施例 1

[0032] 如图 3 所示,红外成像光学镜头 8 包括弯月负透镜 1,第一、第二正透镜 2、3,冷光阑 4 和红外制冷探测器 5。弯月负透镜 1 的前表面 11,第一正透镜的前表面 21、后表面 22,及第二正透镜的前表面 31、后表面 32 均为球面;弯月负透镜 1 的后表面 12 为偶次非球面,并在偶次非球面上加入衍射结构。像点的位置与物体空间方位信息符合 $y' = f \theta$ 物像关系,物像点一一对应,并且相同视场角的光线在焦平面阵列 51 上所成的像距焦平面阵列中心的径向距离相等。其中 y' 为物体在红外制冷探测器焦平面阵列上所成的像的像高, f 为红外成像光学镜头的焦距, θ 为视场角。所述偶次非球面方程为:

$$[0033] z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 R^2}} + a_1 R^2 + a_2 R^4 + a_3 R^6 + a_4 R^8 + a_5 R^{10} \quad (1)$$

[0034] 式(1)中, z 为矢高, c 为顶点处曲率, k 为圆锥曲线常数, R 为垂直光轴方向的径向距离, $a_1 = 0$, a_2, a_3, a_4, a_5 为偶次非球面高次项系数;

[0035] 所述衍射结构的相位分布函数为:

[0036]

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 \quad (2)$$

[0037] 式(2)中, r 为归一化半径, A_1, A_2, A_3 为衍射结构的位相系数。

[0038] 实施例 2

[0039] 如图 4 所示,红外成像光学镜头 8 包括弯月负透镜 1,第一、第二正透镜 2、3,冷光阑 4 和红外制冷探测器 5。弯月负透镜 1 的前表面 11、第一正透镜的后表面 22 和第二正透镜的前表面 31 为球面;弯月负透镜 1 的后表面 12、第一正透镜的前表面 21 和第二正透镜的后表面 32 为偶次非球面。

[0040] 光线经弯月负透镜 1、第一正透镜 2、第二正透镜 3,最终成像于红外制冷探测器的

焦平面阵列 51, 成像像点位置与物空间方位信息符合 $y' = f \theta$ 物像关系, 其中 y' 为物体在红外制冷探测器焦平面阵列上所成的像的像高, f 为红外成像光学镜头的焦距, θ 为视场角。所以我们可以通过图像处理分析的方法 (利用 y' 、 f 计算 θ), 对着火点的图像信号位置进行准确的空间定位。

[0041] 第一正透镜后表面 12、第二正透镜前表面 21、第三正透镜后表面 32 选用旋转对称的偶次非球面 (even asphere), 描述方程为 :

$$[0042] z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 R^2}} + a_1 R^2 + a_2 R^4 + a_3 R^6 + a_4 R^8 + a_5 R^{10} \quad (1)$$

[0043] 式 (1) 中, z 为矢高, c 为顶点处曲率, k 为圆锥曲线常数, R 为垂直光轴方向的径向距离, $a_1 = 0$, a_2, a_3, a_4, a_5 为偶次非球面高次项系数。

[0044] 偶次非球面的高次项表示其与圆锥曲面的偏离量, 正比于 r^4, r^6, r^8, r^{10} 。

[0045] 本系统设计偶次非球面高次项只用到 r^4, r^6, r^8, r^{10} 四项。第一正透镜后表面 12、第二正透镜前表面 21、第三正透镜后表面 32 选用旋转对称的偶次非球面, 有利于大视场离轴像差、像散和彗差的校正。使用偶次非球面校正像差还可以减少元件数量, 减小由于材料吸收而引起的辐射能量损失。

[0046] 图 5 为本实施例的 $f - \theta$ 畸变图, 由图可看出, 畸变量达 3%, 只用球面与偶次非球面不能很好的控制畸变, 无法满足实现精确定位。

[0047] 实施例 3

[0048] 如图 4 所示, 如图 4 所示, 红外成像光学镜头 8 包括弯月负透镜 1, 第一、第二正透镜 2、3, 冷光阑 4 和红外制冷探测器 5。弯月负透镜 1 的前表面 11、第一正透镜的后表面 22 和第二正透镜的前表面 31 为球面; 弯月负透镜 1 的后表面 12、第一正透镜的前表面 21 和第二正透镜的后表面 32 为偶次非球面。并且弯月负透镜 1 的后表面 12 加入衍射结构。

[0049] 弯月负透镜 1 的后表面 12、第二正透镜前表面 21、第三正透镜后表面 32 选用旋转对称的偶次非球面 (even asphere), 描述方程为 :

$$[0050] z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 R^2}} + a_1 R^2 + a_2 R^4 + a_3 R^6 + a_4 R^8 + a_5 R^{10} \quad (1)$$

[0051] 式 (1) 中, z 为矢高, c 为顶点处曲率, k 为圆锥曲线常数, R 为垂直光轴方向的径向距离, $a_1 = 0, a_2, a_3, a_4, a_5$ 为偶次非球面高次项系数。

[0052] 偶次非球面的高次项表示其与圆锥曲面的偏离量, 正比于 r^4, r^6, r^8, r^{10} 。本系统设计偶次非球面高次项只用到 r^4, r^6, r^8, r^{10} 四项。弯月负透镜 1 的后表面 12、第二正透镜前表面 21、第三正透镜后表面 32 选用旋转对称的偶次非球面, 有利于大视场离轴像差、像散和彗差的校正。使用偶次非球面校正像差还可以减少元件数量, 减小由于材料吸收而引起的辐射能量损失。

[0053] 在弯月负透镜 1 的后表面 12 加入衍射结构, 用来校正系统色差与轴外像差。第一正透镜 2 为 ZnS 材料的正透镜。第二正透镜 3 为折射率较小的 Si 正透镜, 用来补偿弯月负透镜 1 产生的负像散, 同时起到校正色差的作用。

[0054] 弯月负透镜后表面 12 加入衍射结构, 可以实现波前的位相调制, 其相位分布函数为 :

[0055]

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 \quad (2)$$

[0056] 式(2)中, r 为归一化半径, A_1, A_2, A_3 为衍射结构的位相系数。其中 A_1 决定衍射面的光焦度, 用来校正色差, A_2, A_3 用来校正系统的初、高级单色像差。

[0057] 当冷光阑 4 远离弯月负透镜时, 可以推导出含衍射面的薄透镜系统的初级畸变和数为:

[0058]

$$S_v = \sum \left(\frac{h_z^3}{h} P \right) - 3J \sum \left(\frac{h_z^2}{h^2} W \right) + J^2 \sum \left[\frac{h_z}{h} (3\varphi + \mu_r \varphi_r) \right] \quad (3)$$

[0059] \bar{y} 为主光线与透镜交点到光轴的距离, y 为边缘光线与透镜的交点到光轴的距离, $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_v$ 为初级像差系数, 其中,

$$[0060] S_I = \frac{y^4 \Phi_D^3}{4} (1 + T^2 + 4TC + 3C^2) - 8mA_2 y^4$$

[0061] $\Phi_D = \varphi = -2A_1 m \lambda$ 为衍射元件光焦度, B 为透镜弯曲系数, C 为透镜共轭参数, 其中 $T = \frac{B}{n-1}$ 。

[0062] 可以看出 S_v 与 S_I 相关, 而 S_I 与衍射面位相系数 A_1 和 A_2 相关。通过优化衍射面参数可以达到控制畸变的目的。在偶次非球面上加入衍射结构, 这样单一面同时具有折射和衍射两种性质, 不需要增加额外透镜, 增加了光学设计的自由度。通过优化衍射面参数可以达到控制畸变的目的。

[0063] 物体在无限远时的理想像高公式为 $y' = f \tan \theta$ 。在视场角较小时, 物像关系满足上述公式, 为相似成像、物像关系为一一对应的映射关系, 进入光学系统的光线在像面位置上的偏差表现为系统畸变, 最直接的表现为图像形状失真。在视场较大时, 物像关系不再符合理想像高公式, 并且像点偏差量随视场非线性增长。本发明利用衍射面控制像面畸变 $y' = f \theta$ 大小至合理可接受的误差范围内, 校准后的畸变能达到 0.3% 以下, 从而实现物像对应的精确定位功能。

[0064] 衍射面不同于折射元件, 在某一表面刻划浮雕结构即能实现波前位相调制, 通过改变衍射面的位相系数控制系统畸变, 可以使其满足预订的物像关系。衍射光学元件可以等效于折射率无限大的薄透镜, 几何光学的相关理论对衍射成像的初级像差同样适用。

[0065] 图 6 为本实施例的 $f-\theta$ 畸变图, 畸变大小控制在 3% 以内, 能够满足使用需求。

[0066] 图 7 是本实施例的光学传递函数曲线图, 边缘视场传递函数在 0.5 以上。

[0067] 图 8 是本实施例的相对照度曲线图, 边缘视场相对照度达 85% 以上。

[0068] 图 9 是本实施例的能量集中度曲线图, $30 \mu m$ 直径范围内能量集中度在 89% 以上, 能够保证成像质量;

[0069] 图 10 是本实施例直径点列图, 点斑 RMS 直径小于 $18 \mu m$, 保证了成像质量, 各项指标均能达到的使用要求。

[0070] 红外成像光学镜头 8 采用反远结构, 弯月负透镜 1 作为负光焦度前组, 第一正透镜 2、第二正透镜 3 构成正光焦度的后组, 这种结构可以获得较大的后工作距, 留有足够的空

间安装制冷探测器。本发明后工作距为 22.79mm。距焦平面 20mm 处设置冷光阑 4，阻挡成像区域外的杂散热辐射，冷光阑效率 100%。

[0071] 实施例 3 的衍射面位相系数： $A_1 = 0.7069$; $A_2 = 1.8549e-6$; $A_3 = 7.7597e-7$ 。

[0072] 本发明可以通过光学系统优化设计使红外成像光学镜头 8 满足 $f-\theta$ 成像关系 ($y' = f\theta$ 物像关系)，即相同的视场角在像面上对应着相等的径向距离。可以实时获取目标方位信息，不需要其他的机械结构辅助定位，减小了定位误差。

[0073] 本发明不限于上述实施方式，凡是采用反远距结构的红外成像光学镜头，使光线经由红外成像光学镜头成像于红外制冷探测器的焦平面阵列上，且红外成像光学镜头成像像点的位置与物体空间方位信息符合 $y' = f\theta$ 物像关系的，都在本发明意图保护范围之内。

[0074] 实施例 2 的透镜参数

[0075]

透镜表面附图标记	曲率半径 c(mm)	面间距厚度 (mm)	圆锥曲线常数 k	偶次非球面系数				
				a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
11	50.133	(11 与 12 之间的距离) 2.978						
12				-0.171	0	2.38e-08	-8.81e-10	-2.75e-13
21	-59.778	(21 与 22 之间的距离) 63.514		7.179	0	-3.84e-8	-6.30e-10	3.79e-12
22								
31	40.744	(31 与 32 之间的距离) 49.079						
32								
焦平面阵列		(32 与焦平面阵列之间的距离) 22.789		4.637	0	2.21e-11	4.72e-9	5.35e-11

[0076] 实施例 3 的透镜参数

[0077]

透镜 表面 附图 标记	曲率半 径 $c(\text{mm})$	面间距厚 度 (mm)	圆锥曲 线常数	偶次非球面系数				
				a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
11	45.729	(11 与 12 之间的距 离) 3.987						
12				-0.17	0	2.38e-8	-8.81e-10	-2.75e-13
21	-55.258	(12 与 21 之间的距 离) 64.520		7.18	0	-2.93e-8	-6.21e-11	3.85e-12
22								
31	33.744	(21 与 22 之间的距 离) 6.501						
32								
焦平 面阵 列		(22 与 31 之间的距 离) 46.078						
		(31 与 32 之间的距 离) 5.077						
		(32 与 焦 平面阵列 之间的距 离) 22.789		5.214	0	3.14e-9	4.57e-12	5.23e-11
								-3.57e-10

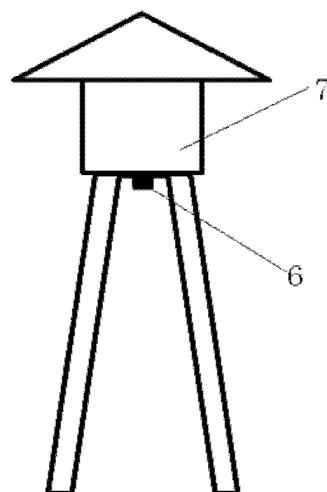


图 1a

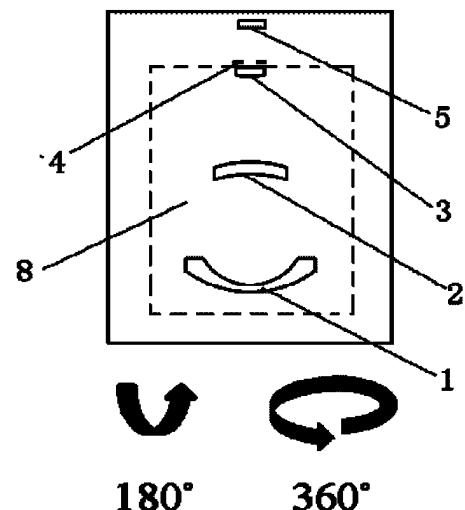


图 1b

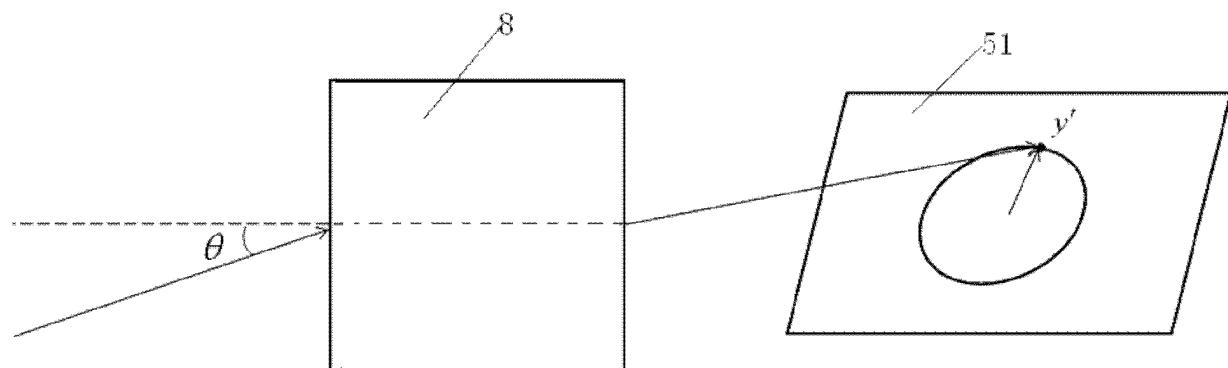


图 2

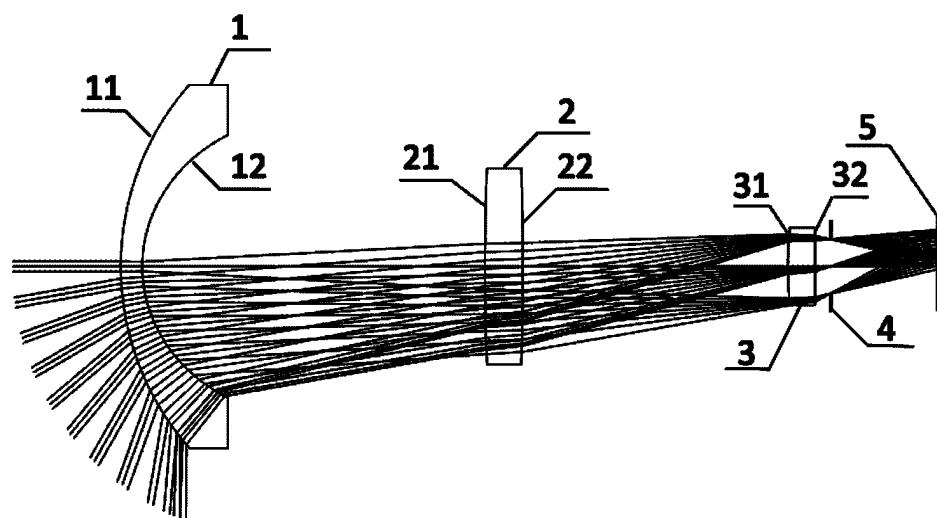


图 3

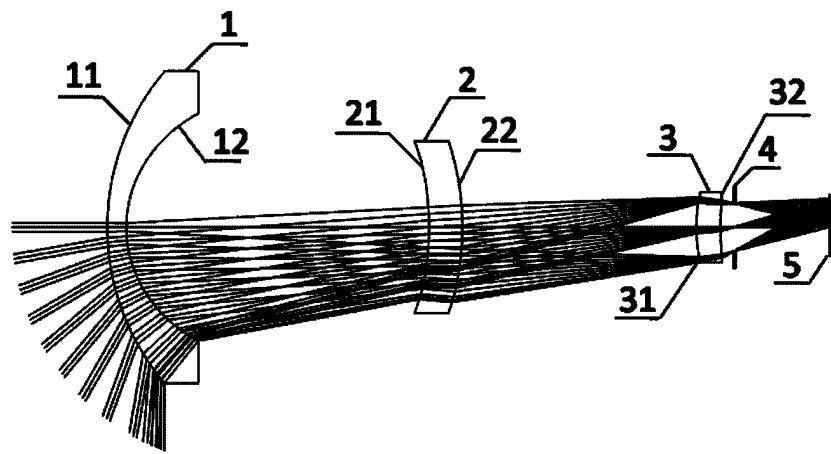


图 4

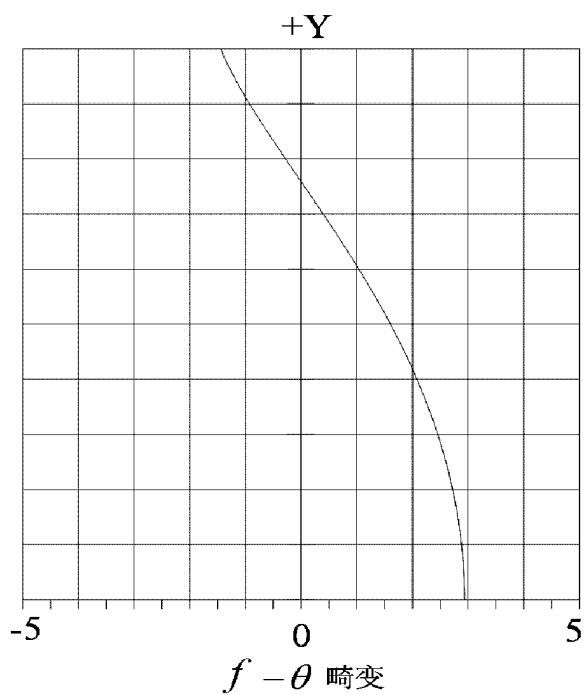


图 5

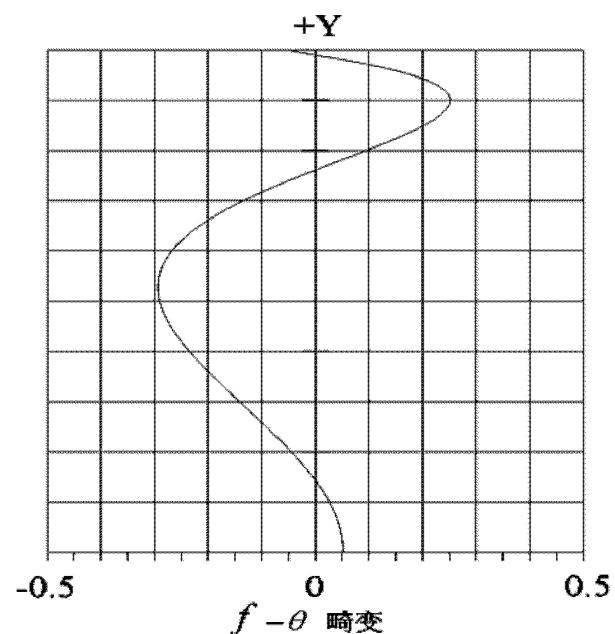


图 6

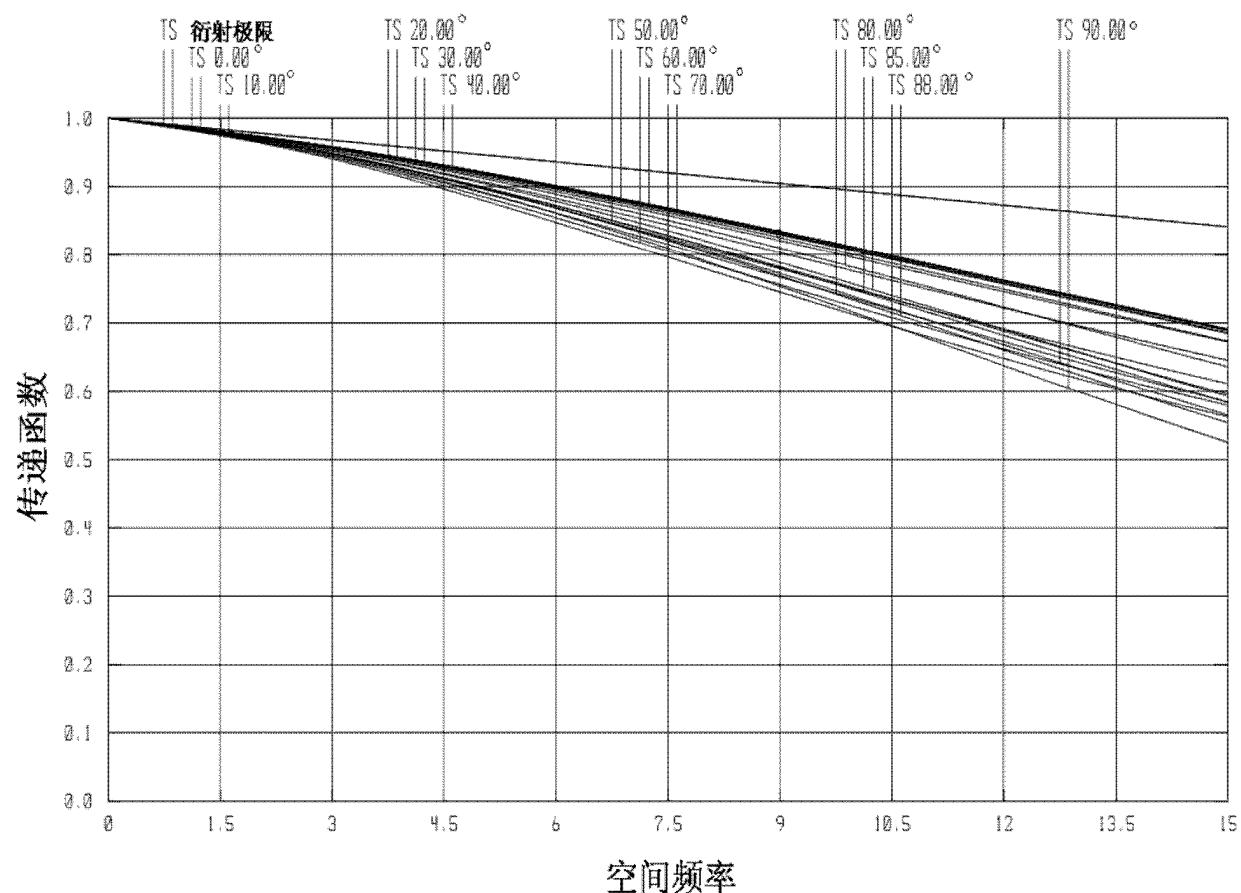


图 7

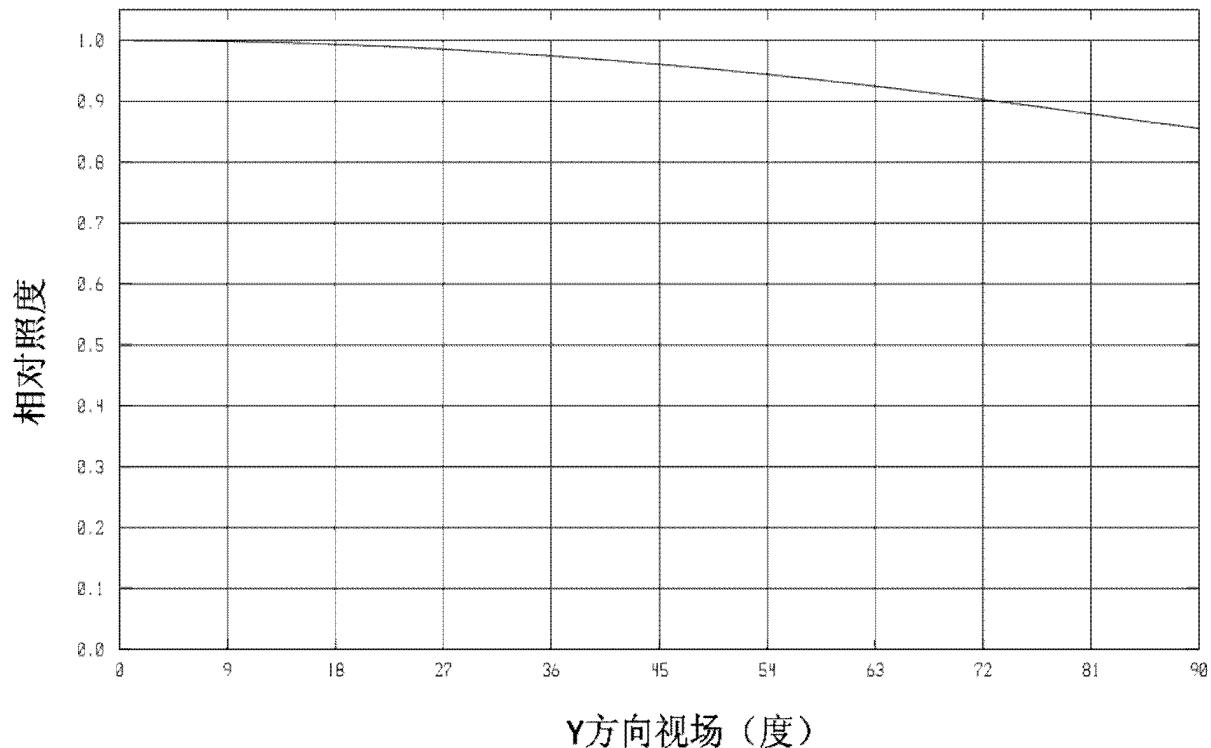


图 8

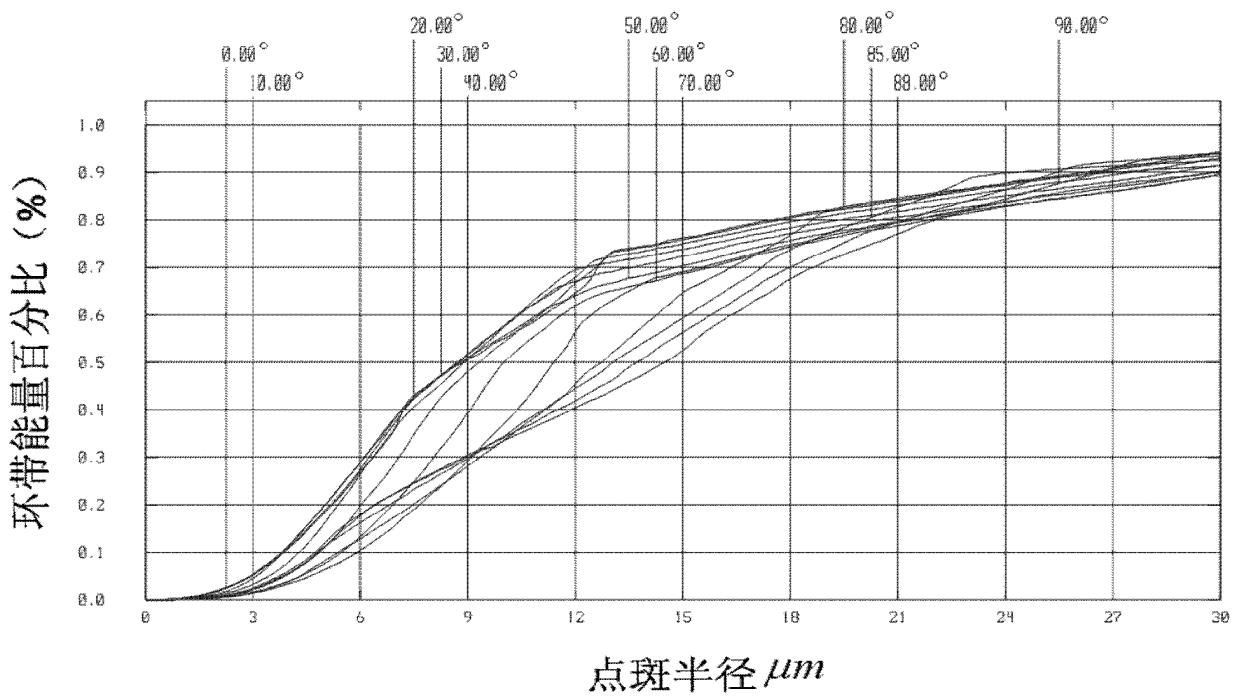


图 9

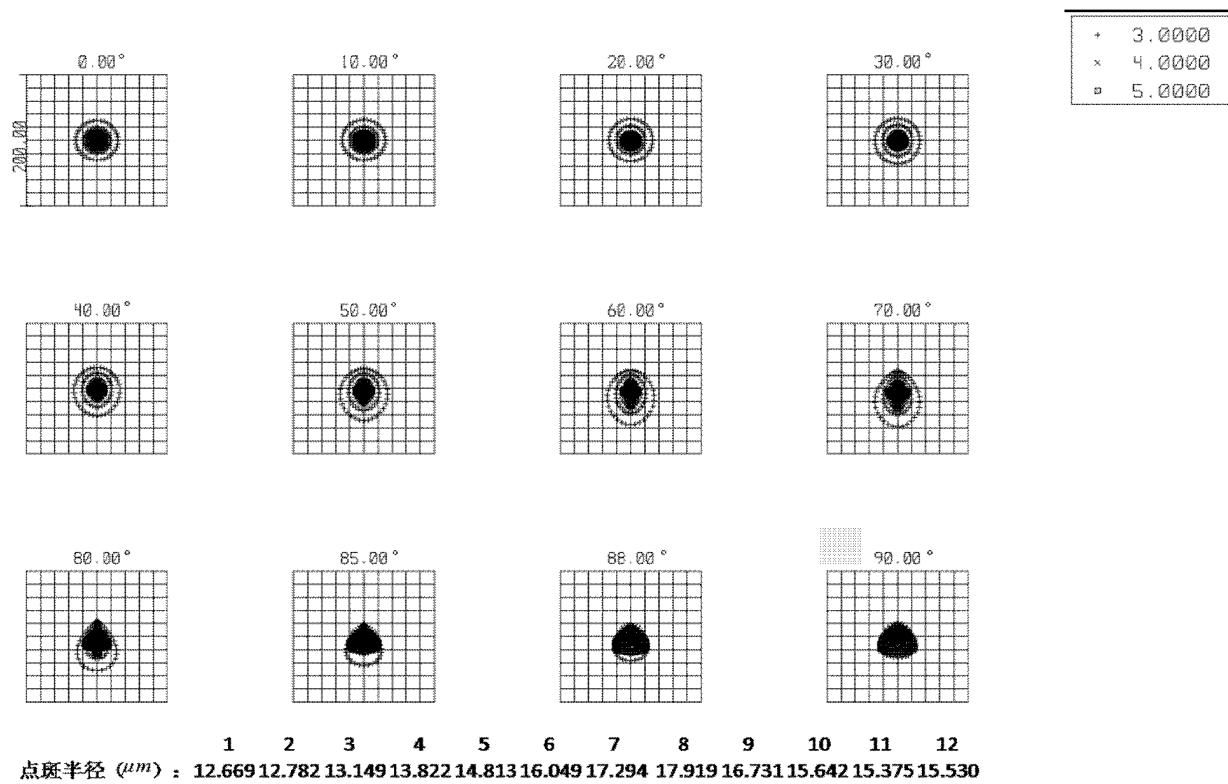


图 10