

光学系统及显示装置

5 本申请要求于 2023 年 12 月 29 日递交的中国专利申请第 202311864589.5 号的优先权，在此全文引用上述中国专利申请公开的内容以作为本申请的一部分。

技术领域

本公开至少一个实施例涉及一种光学系统及显示装置。

10 背景技术

头戴显示技术（Head Mounted Display，HMD）是一种利用头戴显示光学系统将由计算机生成、图像源输出的数字化图像成像于使用者视野中，并以此来实现对特定环境进行重现的模拟仿真技术。

15 发明内容

本公开至少一个实施例提供一种光学系统，所述光学系统包括：镜片组件，包括至少两个镜片，所述至少两个镜片包括沿所述镜片组件的光轴方向依次排列的第一表面、第二表面、第三表面以及第四表面；偏振反射层，设置在所述第一表面远离所述第四表面的一侧；透反膜，设置在所述第四表面远离所述第三表面的一侧；相位延迟膜，设置在所述透反膜面向所述第一表面的一侧；其中，所述第一表面为凹面，所述第四表面为凸面；所述第二表面与所述第三表面均为菲涅尔面，且所述第二表面与所述第三表面的面型互补；所述至少两个镜片包括色散系数和折射率至少之一不同的镜片。

20 例如，根据本公开的至少一实施例，所述第二表面的曲率半径与所述光学系统的有效焦距的比值为-6~2。

25 例如，根据本公开的至少一实施例，所述第二表面的齿宽包括 0.3 毫米~1 毫米。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述第二表面为平面菲涅尔面或者曲面菲涅尔面。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述至少两个镜片包括沿所述光轴方向排列的第一镜片和第二镜片，所述第一镜片包括所述第一表面和所述第二表面，所述第二镜片包括所述第三表面和所述第四表面；其中，所述第一镜片的色散系数大于所述第二镜片的色散系数。

30 例如，根据本公开的至少一实施例，所述第一镜片的色散系数为 25~65，所述第二镜片的色散系数为 30~54。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述至少两个镜片包括沿所述光轴方向排列的第一镜片和第二镜片，所述第一镜片包括所述第一表面和所述第二表面，所述第二镜片包括所述

第三表面和所述第四表面；其中，所述第一镜片的折射率小于所述第二镜片的折射率。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述第一表面与所述第四表面的曲率半径的比值为1.2~1.7。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述第一表面的曲率半径与所述光学系统的有效焦距的比值为-3.5~-1.5，所述第一表面的圆锥系数为-10~-0.5。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述第四表面的曲率半径与所述光学系统的有效焦距的比值为-2.0~2.0，所述第四表面的圆锥系数为-10~-0.1。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述第一表面和所述第二表面与所述光轴相交的两个交点之间的距离为第一距离；所述第三表面和所述第四表面与所述光轴相交的两个交点之间的距离为第二距离；所述第一距离与所述第二距离的比值为2~4。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述第一距离与所述光学系统的有效焦距的比值为0.3~0.5，所述第二距离与所述光学系统的有效焦距的比值为0.1~0.3。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述至少两个镜片包括沿所述光轴方向排列的第一镜片和第二镜片，所述第一镜片包括所述第一表面和所述第二表面，所述第二镜片包括所述第三表面和所述第四表面；所述第一镜片的中心厚度与边缘厚度的比值大于1且小于3；所述第二镜片的中心厚度与边缘厚度的比值大于0.5且小于2。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述至少两个镜片包括沿所述光轴方向依次排列的第一镜片、第二镜片和第三镜片，所述第一镜片包括所述第一表面和所述第二表面，所述第二镜片包括所述第三表面，所述第三镜片包括所述第四表面；所述第二镜片还包括与所述第三表面相对的第五表面，所述第三镜片还包括位于所述第五表面和所述第四表面之间的第六表面；其中，所述第一镜片、所述第二镜片和所述第三镜片中的至少两者具有不同的色散系数。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述第五表面的曲率半径与所述第二表面的曲率半径的比值为0.9~1.1，所述第五表面和所述第六表面均为菲涅尔面，且所述第五表面和所述第六表面的面型互补。

例如，根据本公开的至少一实施例，所述第五表面为平面菲涅尔面或者曲面菲涅尔面。

本公开至少一个实施例提供一种显示装置，包括显示屏以及上述任一实施例所述的光学系统，其中，所述显示屏位于所述透反膜远离所述偏振反射层的一侧。

附图说明

为了更清楚地说明本公开实施例的技术方案，下面将对实施例的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅涉及本公开的一些实施例，而非对本公开的限制。

图1为本公开至少一个实施例中一示例所提供的光学系统的示意图。

- 图 2A 和图 2B 为本公开至少一个实施例中一示例的光线偏折示意图。
- 图 2C 为本公开至少一个实施例中另一示例的光线偏折示意图。
- 图 3 为本公开至少一个实施例中一示例所提供的显示装置的光路示意图。
- 图 4 为本公开至少一个实施例中一示例所提供的光学系统的示意图。
- 5 图 5A 为图 1 所示光学系统的点列图。
- 图 5B 为图 1 所示光学系统的弥散斑尺寸随视场角变化的曲线图。
- 图 5C 为图 1 所示光学系统的畸变图。
- 图 5D 为一种光学系统的垂轴色差图。
- 图 5E 为图 1 所示光学系统的垂轴色差图。
- 10 图 6 为本公开至少一个实施例中一示例所提供的光学系统的示意图。
- 图 7 为本公开至少一个实施例中一示例所提供的光学系统的示意图。

具体实施方式

- 为使本公开实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本公开实施例的附
- 15 图，对本公开实施例的技术方案进行清楚、完整地描述。显然，所描述的实施例是本公开的一部分实施例，而不是全部的实施例。基于所描述的本公开的实施例，本领域普通技术人员在无需创造性劳动的前提下所获得的所有其它实施例，都属于本公开保护的范围。

- 除非另外定义，本公开使用的技术术语或者科学术语应当为本公开所属领域内具有一般技能的人士所理解的通常意义。本公开中使用的“第一”、“第二”以及类似的词语并不表
- 20 示任何顺序、数量或者重要性，而只是用来区分不同的组成部分。“包括”或者“包含”等类似的词语意指出现该词前面的元件或者物件涵盖出现在该词后面列举的元件或者物件及其等同，而不排除其他元件或者物件。

- 本公开中使用的“垂直”、“平行”以及“相同”等特征均包括严格意义的“垂直”、“平行”、“相同”等特征，以及“大致垂直”、“大致平行”、“大致相同”等包含一定误差的情况，考虑到
- 25 测量和与特定量的测量相关的误差（也就是，测量系统的限制），表示在本领域的普通技术人员所确定的对于特定值的可接受的偏差范围内。本公开实施例中的“中心”可以包括严格的位于几何中心的位置以及位于几何中心周围一小区域内的大致中心的位置。例如，“大致”能够表示在一个或多个标准偏差内，或者在所述值的 10% 或者 5% 内。

- 头戴显示（又称为头显）光学系统的成像原理类似于放大镜，即，物（图片源或视频源）
- 30 位于光学透镜的物方焦面前（例如为一倍焦距以内），处于光学透镜另一侧的人眼通过光学透镜可以看到，在物同侧的远处会形成一正立放大虚像。头戴显示光学系统包括单片式或多片式厚透镜、菲涅尔透镜、折返式光学系统（又称为 Pancake）以及可变光焦度的液晶透镜和超透镜等。头戴显示光学系统在着眼于减薄减重，从而为使用者带来更好的佩戴体验的初

衷下, 仍需以满足成像光学性能为前提。例如, 头戴显示光学系统需要考虑清晰度、视场角、畸变、色差等基本指标。诸多光学指标需要在硬件设计阶段满足设计要求, 在光学加工制造装配阶段满足精度要求, 并结合后期的软件(图像)处理技术(例如针对提升清晰度的注视点渲染技术, 针对提升视场体验的非对称视场应用、反畸变图像处理、反色散图像处理), 从而给头戴显示光学系统的用户带来更好的体验。

在研究中, 本申请的发明人发现, 前述光学指标往往是相辅相成的, 也是相互对立的。例如, 低色散或低色差、无畸变的光学系统有利于提供更佳的清晰度, 然而, 大视场角带来了清晰度、畸变和色散的挑战。

以一些液晶显示屏为例, 液晶显示屏的尺寸(例如为对角线长度)超过 2 英寸~2.3 英寸, 头戴显示光学系统的光学透镜直径例如为 30 毫米~50 毫米(该直径尺寸随视场角的变化而不同), 屏幕的尺寸足够适配于光学透镜。例如, 屏幕和光学透镜的尺寸较为接近, 屏幕的光线到达光学透镜表面的入射角度很小, 不同波长的光线在经过折射反射后, 角度的偏差也相对较小, 同时, 屏幕单像素尺寸较大(例如, 单像素尺寸大于 20 微米), 因此, 不同波长光线在像面形成的高度差(垂轴色差)对成像质量的影响较小。

在采用硅基有机发光二极管(OLED)显示屏的头戴显示光学系统中, 受到工艺的限制, 屏幕尺寸通常为 1 英寸~1.4 英寸。该屏幕在与小口径(例如直径为 25 毫米)的光学透镜相匹配时, 匹配的难度相对较小。小口径的光学透镜对应了较小的视场角, 为了适配于一定的佩戴误差, 使用者最终获得的视场大多不超过 90°。若要增大视场角, 则需要相应地增大光学透镜的口径。在将大口径的光学透镜与小尺寸的屏幕相适配时, 发明人发现, 屏幕边缘大视场的光线在光学透镜上的入射角度偏大, 导致了垂轴色差随之增大。此外, 由于硅基 OLED 屏幕的像素尺寸小于 10 微米级, 对于垂轴色差的容限远比液晶显示屏严苛。因此, 在采用英寸级别高清显示器的大视场头戴显示光学系统中, 对于色差的校正难度较大。

本公开至少一个实施例提供一种光学系统, 光学系统包括镜片组件、偏振反射层、透反膜和相位延迟膜。镜片组件包括至少两个镜片, 至少两个镜片包括沿镜片组件的光轴方向依次排列的第一表面、第二表面、第三表面以及第四表面。偏振反射层设置在第一表面远离第四表面的一侧。透反膜设置在第四表面远离第三表面的一侧。相位延迟膜设置在透反膜面向第一表面的一侧。第一表面为凹面, 第四表面为凸面。第二表面与第三表面均为菲涅尔面, 且第二表面与第三表面的面型互补。至少两个镜片包括色散系数和折射率至少之一不同的镜片。

本公开至少一个实施例提供一种显示装置, 包括显示屏以及上述任一实施例的光学系统, 显示屏位于透反膜远离偏振反射层的一侧。

本公开至少一个实施例提供的光学系统及显示装置, 通过设置至少两个镜片的镜片组件, 为偏振反射层、透反膜和相位延迟膜提供了贴附位置, 以通过偏振反射层和透反膜实现光线

的折返。同时，将第二表面和第三表面设置为菲涅尔面，并将至少两个镜片设置为色散系数和折射率至少之一不同，有利于通过菲涅尔面提高设计自由度，从而与至少两个镜片相配合而校正色差，使得光学系统的视场更大、清晰度更高且更为轻薄。

下面结合附图并通过一些实施例对光学系统及显示装置进行说明。

5 图 1 为本公开至少一个实施例中一示例所提供的光学系统的示意图。参考图 1，本公开至少一个实施例提供一种光学系统，光学系统包括镜片组件 100、偏振反射层 200、透反膜 300 和相位延迟膜 400。镜片组件 100 包括至少两个镜片。例如，如图 1 所示，镜片组件 100 可以由镜片 110 和镜片 120 这两片镜片组合而成。

10 如图 1 所示，至少两个镜片包括沿镜片组件 100 的光轴 OA 方向依次排列的第一表面 101、第二表面 102、第三表面 103 以及第四表面 104。例如，第一表面 101 远离第四表面 104 的一侧为光学系统的出光侧。例如，在光学系统应用于显示装置时，显示屏位于光学系统的第四表面 104 远离第一表面 101 的一侧，显示屏出射的光线从第四表面 104 进入并从第一表面 101 射出。

15 如图 1 所示，偏振反射层 200 设置在第一表面 101 远离第四表面 104 的一侧，透反膜 300 设置在第四表面 104 远离第三表面 103 的一侧，相位延迟膜 400 设置在透反膜 300 面向第一表面 101 的一侧。例如，在光学系统应用于显示装置时，显示屏位于光学系统的透反膜 300 远离偏振反射层 200 的一侧。例如，经透反膜 300 的透射后入射到镜片组件 100 的光线被配置为在透反膜 300 与偏振反射层 200 之间折返，并从偏振反射层 200 出射，从而通过偏振反射层 200、透反膜 300 和相位延迟膜 400 形成了折叠光路。

20 如图 1 所示，至少两个镜片包括色散系数和折射率至少之一不同的镜片。由于同一透明介质对不同波长的光存在折射率的差异，而白光又是由不同波长的各色光组成的，因此透明物质在折射白光时会发生色散现象。色散系数（又称阿贝数）是用以表示透明介质色散能力的指数，用以衡量透明介质的光线色散程度。一般来说，介质的折射率越大，色散越严重，阿贝数越小；反之，介质的折射率越小，色散越轻微，阿贝数越大。

25 如图 1 所示，第一表面 101 为凹面，第四表面 104 为凸面。例如，第一表面 101 为非球面。例如，第四表面 104 为非球面。例如，透反膜 300 设置在凸面远离凹面的一侧。例如，偏振反射层 200 和相位延迟膜 400 均设置在凹面远离凸面的一侧。

30 如图 1 所示，第二表面 102 与第三表面 103 均为菲涅尔面。菲涅尔面是指菲涅尔透镜相对的两个表面中非光滑的一侧表面。菲涅尔透镜（Fresnel lens）又称为螺纹透镜，菲涅尔透镜的一侧表面为光面，菲涅尔透镜的另一侧表面划分有多个同心圆纹路（也即菲涅尔带），通过这些纹路能够改变光线折射的曲折程度，使得菲涅尔透镜在短焦距的情况下，有效地减小透镜的厚度。

例如，参考图 1，第一表面 101 与第二表面 102 为镜片 110 的两个表面，第三表面 103

与第四表面 104 为镜片 120 的两个表面，镜片 110 与镜片 120 均为菲涅尔透镜。例如，镜片 110 为凸透镜，镜片 120 为凹透镜。

如图 1 所示，第二表面 102 与第三表面 103 的面型互补。互补是指在将第二表面 102 与第三表面 103 相贴合（或者通过光学胶粘贴）后，第二表面 102 与第三表面 103 之间基本不存在间隙。例如，第二表面 102 的面型与第三表面 103 的面型互为正负形。例如，第二表面 102 与第三表面 103 相对应的位置处，两个菲涅尔面上的齿形结构能够彼此互补。

本公开至少一实施例提供的光学系统，通过设置包括至少两个镜片的镜片组件 100，为偏振反射层 200、透反膜 300 和相位延迟膜 400 提供了贴附位置，以通过偏振反射层 200 和透反膜 300 实现光线的折返。将第二表面 102 和第三表面 103 设置为菲涅尔面，并将至少两个镜片设置为包括色散系数和折射率至少之一不同的镜片，有利于通过菲涅尔面提高设计自由度，从而与至少两个镜片相配合而校正色差，使得光学系统的视场更大、清晰度更高且更为轻薄。

图 2A 和图 2B 为本公开至少一个实施例中一示例的光线偏折示意图。下面，以入射光学系统的光线发生一次折射为示例，对色差校正进行说明。

图 2A 示意出了在镜片组件中镜片 L1 和镜片 L2 具有不同的折射率和色散系数时，光线在光学系统中发生偏折的情况。如图 2A 所示，以远离目标面 S0 的一侧为入光侧，也即光线从图 2A 的左侧进入镜片组件，并在经过折射后从镜片组件出射至目标面 S0 上。在白光（如图 2A 所示的实线）入射镜片组件后，白光发生色散，分解为波长不同的单色光。图 2A 以短划线示意波长较长的红光 R，以点线示意波长较短的蓝光 B。通过将镜片 L1 和镜片 L2 设置为不同的折射率、不同的色散系数，使得红光 R 和蓝光 B 的偏折角度发生变化，最终使得红光 R 和蓝光 B 能够在目标面 S0 上会聚。

例如，参考图 2A，镜片 L1 为凸透镜，镜片 L2 为凹透镜，且镜片 L1 的色散系数大于镜片 L2 的色散系数，镜片 L1 的折射率小于镜片 L2 的折射率。在入射光线进入表面 S1 发生色散后，波长相对更短的蓝光 B 相比红光 R 更偏向光轴 OA。通过表面 S2 和表面 S3 折射后，由于镜片 L1 的色散系数大于镜片 L2 的色散系数，光线从镜片 L1 进入镜片 L2 后均向远离光轴 OA 的方向偏折，且波长相对更短的蓝光 B 偏折程度更大，因此红光 R 与蓝光 B 逐渐靠近。在光线经过表面 S4 出射后，光线继续朝向远离光轴 OA 的方向偏折，且波长相对更短的蓝光 B 偏折程度更大，使得红光 R 与蓝光 B 在目标面 S0 上会聚，从而达到校正色差的目的。

图 2B 将图 2A 所示的两个镜片简化为两个相对放置的光楔，两个镜片的接触面的倾斜程度即为该面的斜率。如图 2B 所示，在白光进入光楔 1 后发生色散，分解为波长不同的单色光。图 2B 以短划线示意波长较长的红光 R，以点线示意波长较短的蓝光 B。在红光 R（短划线）和蓝光 B（点线）进入光楔 2 后，红光 R 的偏折程度与蓝光 B 的偏折程度均发

生改变，从而使得红光 R 与蓝光 B 能够在出射至目标面 S0 上后会聚。

图 2C 为本公开至少一个实施例中另一示例的光线偏折示意图。图 2C 与图 2B 的区别在于，两个光楔相接触的表面的斜率不同。

结合图 2C 和图 1 所示，图 2C 将图 1 所示的镜片 110 和镜片 120 简化为两个相对放置的光楔。图 2C 示意出了在镜片组件中两个镜片具有不同的折射率和色散系数，且两个镜片相接触的两个表面是互为正负形的菲涅尔面（图 2C 中未示出，例如可参考图 1）时，光线在光学系统中发生偏折的情况。如图 2C 所示，在白光进入光楔 1 后发生色散，分解为波长不同的单色光。图 2C 以短划线示意波长较长的红光 R，以点线示意波长较短的蓝光 B。如图 2C 所示，由于两个光楔的接触面为菲涅尔面，与连续的非球面曲面相比，可离散化处理

10 处理的菲涅尔面的斜率更大，从而能够提高对光线的偏折能力，使得红光 R（短划线）和蓝光 B（点线）能够在更近的目标面 S0' 上会聚，进而使得光学系统的结构更为紧凑。因此，参考图 1，通过将第二表面 102 和第三表面 103 设置为菲涅尔面，并将至少两个镜片设置为色散系数和折射率至少之一不同，能够共同校正色差，使得光学系统的视场更大、清晰度更高且更为轻薄。

15 例如，参考图 1，偏振反射层 200 的功能如下：膜层平面内存在一个光轴 OA 方向，入射光平行于该光轴 OA 方向的偏振分量（如 s 线偏振光）的透过率大于垂直于该光轴 OA 方向的偏振分量（如 p 线偏振光）的透过率，且平行于该光轴 OA 方向的偏振分量（如 s 线偏振光）的反射率小于垂直于该光轴 OA 方向的偏振分量（如 p 线偏振光）的反射率。例如，平行于偏振反射层 200 的光轴 OA 方向的偏振光的透过率不小于 85%，如不小于 90%，如不

20 小于 95%，如不小于 98%；垂直于偏振反射层 200 的光轴 OA 方向的偏振光的反射率不小于 85%，如不小于 90%，如不小于 95%，如不小于 98%。

例如，参考图 1，偏振反射层 200 配置为反射一种特性的线偏振光，透射另一种特性的线偏振光；偏振反射层 200 设置在第一表面 101 远离第四表面 104 的一侧，相位延迟膜 400 设置在偏振反射层 200 与透反膜 300 之间。例如，偏振反射层也可以称为偏振分束膜。例如，

25 偏振反射层还可以包括多层膜反射式偏光片（Advanced Polarizer Film, APF）。例如，偏振反射层还可以包括 IQPS（Image Quality Polarizer Standard）膜或 IQPE（Image Quality Polarizer Enhanced）膜。

例如，偏振反射层为胆甾型液晶层（图中未示出），相位延迟膜设置在胆甾型液晶层远离透反膜的一侧。例如，胆甾型液晶能够反射圆偏振光、透射圆偏振光。参考前述折叠光路原理，胆甾型液晶层设置在相位延迟膜与透反膜之间。位于第二镜片远离第一镜片一侧的显示屏的显示面侧可以设置波片，从显示屏出射的图像光经过波片后转换为右旋圆偏振光，右旋圆偏振光入射到透反膜，右旋圆偏振光经过透反膜的透射后偏振状态不变。该右旋圆偏振光经过胆甾型液晶层后被反射回透反膜，此处发生第一次反射；该右旋圆偏振光在透反膜处

30

被反射，此处发生了第二次反射。由于半波损失，反射的光由右旋圆偏振光变为左旋圆偏振光，该左旋圆偏振光经过胆甾型液晶层的透射后到达相位延迟膜，并被相位延迟膜转变为 s 偏振光，然后该 s 线偏振光经过线偏振膜透射后射向人眼。

例如，参考图 1，透反膜 300 被配置为透射部分光线，反射另一部分光线。例如，透反膜 300 的透射率可以为 50%，反射率可以为 50%。例如，透反膜 300 的透射率可以为 60%，反射率可以为 40%。例如，透反膜 300 的透射率可以为 65%，反射率可以为 35%。本公开提供的光学系统不限于此，透反膜的透射率和反射率可以根据产品需求进行设置。例如，透反膜 300 可以镀在第四表面 104 上。

例如，参考图 1，相位延迟膜 400 被配置为使得透过光实现圆偏振状态和线偏振状态之间的转换。例如，相位延迟膜 400 可以为  $1/4$  波片。例如，相位延迟膜 400 具有以下特征：膜层平面内存在折射率最低的一个方向和折射率最高的一个方向，分别为快轴和慢轴，平行于慢轴的偏振光在经过相位延迟膜 400 后的相位比平行于快轴的偏振光在经过相位延迟膜 400 后延迟了  $1/4$  波长。例如，相位延迟膜 400 的慢轴与偏振反射层 200 的光轴 OA 之间的夹角为  $45^\circ$ 。

例如，参考图 1，相位延迟膜 400 的材料可以包括液晶聚合物。由于液晶聚合物材料的相位延迟膜 400 是一种聚合物，其膜厚相对更薄，可达  $1\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 。更薄的相位延迟膜 400 对于曲面的适应程度也就更高，能够更为容易地根据曲面的面型塑形，降低了与曲面贴合时产生褶皱而影响相位延迟精度和光学性能的可能性。而且，液晶聚合物材料的相位延迟膜 400 贴附在曲面后发生的光学偏移更小。液晶聚合物为交联体系，分子间由化学键连结，模量较高，在将该材料的相位延迟膜 400 贴合后受到拉伸的情况下，仅发生弹性形变，而不会发生分子的伸展、重排等强烈光学各向异性的效应。因此，采用液晶聚合物材料的相位延迟膜 400 适合于小曲率半径的面型的贴合。如此的曲率半径自由度也更易于满足清晰度、畸变、色散等的指标要求，有利于光学系统得到更佳的像质。

图 3 为本公开至少一个实施例中的一示例所提供的显示装置的光路示意图。本公开至少一个实施例提供一种显示装置，显示装置包括显示屏 10 以及光学系统，显示屏 10 位于透反膜 300 远离偏振反射层 200 的一侧。例如，参考图 3，折叠光路原理如下：位于第四表面 104 远离第一表面 101 的一侧的显示屏 10 的显示面 11 的出光侧可以设置波片，从显示面 11 出射的图像光经过波片后转换为右旋圆偏振光，右旋圆偏振光经过透反膜 300 的透射后偏振状态不变。该光线进入镜片组件 100 中，且经镜片组件 100 透射后到达相位延迟膜 400，入射到相位延迟膜 400 的右旋圆偏振光转换为 p 线偏振光，p 线偏振光被偏振反射层 200 反射回相位延迟膜 400，此处发生了第一次反射。而后，p 线偏振光经过相位延迟膜 400 后转换为右旋圆偏振光，该右旋圆偏振光经过镜片组件 100 透射后到达透反膜 300，并在透反膜 300 处被反射，此处发生了第二次反射。由于半波损失，反射的光由右旋圆偏振光变为左旋圆偏振

光。左旋圆偏振光经镜片组件 100 透射后到达相位延迟膜 400，在透过相位延迟膜 400 后变成 s 线偏振光，然后该 s 线偏振光经过偏振反射层 200 透射后射向出射光瞳，如人眼。

上述折叠光路可以改变在偏振反射层 200 和透反膜 300 之间传播的光线的偏振态，实现光线的折叠，使得原本该光学系统的焦距因为设置上述偏振反射层 200、相位延迟膜 400 以及透反膜 300 而增加的例如两次反射而被折叠，从而大大压缩了人眼与光学系统之间所需的  
5 空间，从而使光学系统体积更小更轻薄。

例如，光学系统还包括线偏振膜 500，线偏振膜 500 设置在偏振反射层 200 远离透反膜 300 的一侧。例如，线偏振膜 500 可以为线偏振片或起偏器。例如，线偏振膜 500 的光轴与偏振反射层 200 的光轴重合，如线偏振膜 500 可以用于进一步过滤其他杂光，只允许通过线  
10 偏振膜 500 的偏振光（如 s 线偏振光）进入人眼。例如，线偏振膜可以采用三层叠层结构，三层叠层结构中的中间层可以为添加了二向色性分子的聚乙烯醇（PVA），三层叠层结构中位于中间层两侧的至少一层可以为三醋酸纤维酯（TAC）。例如，线偏振膜 500 朝向空气的表面做抗反射处理。例如，线偏振膜 500 朝向空气的表面可以贴合蛾眼膜。

在一些示例中，参考图 1，第二表面 102 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以  
15 为-6~2。例如，第二表面 102 可以为曲面菲涅尔面，第二表面 102 的曲率半径是指曲面菲涅尔面的曲率半径。例如，第二表面 102 的曲率半径是指包括有齿形结构的菲涅尔面的曲率半径。例如，第二表面 102 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-5~1.5。例如，第二表面 102 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-4~0。例如，第二表面 102 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-3~-1。例如，第二表面 102 的曲率半径与光学系  
20 统的有效焦距的比值可以为-2。

例如，参考图 1，可将菲涅尔面的第二表面 102 近似为一光滑无齿的球面或非球面，该球面或该非球面即为菲涅尔面的基面，该球面或该非球面的曲率即为菲涅尔面的曲率。例如，可以将第二表面 102 和第三表面 103 的齿宽或齿高假设为无限小。例如，基面的曲率为-0.01~-0.04。例如，基面的曲率为-0.02~-0.03。由此，能够防止菲涅尔面上的齿形结构与在光轴 OA  
25 上位于菲涅尔面（例如为第二表面 102 和第三表面 103）的两侧的表面（例如为第一表面 101 或第四表面 104）相接触。

图 4 为本公开至少一个实施例中一示例所提供的光学系统的示意图。图 4 所示光学系统与图 1 所示光学系统的不同之处在于，图 4 所示光学系统中的第二表面 102 与图 1 所示光学系统中的第二表面 102 不同。当然，图 4 所示光学系统与图 1 所示光学系统还可以存在有其他不同之处，如镜片组件包括的镜片的数量等，本公开对此不做限制。例如，图 4 所示光学系统中的镜片数量可以与图 1 所示光学系统中的镜片数量不同，也可以相同。图 4 所示光学系统中的偏振反射层 200、透反膜 300、线偏振膜 500 可以与图 1 所示光学系统中的偏振反  
30 射层 200、透反膜 300、线偏振膜 500 具有相同的特征，在此不再赘述。

在一些示例中，第二表面 102 为平面菲涅尔面或者曲面菲涅尔面。例如，如图 1 所示，第二表面 102 为曲面菲涅尔面；如图 4 所示，第二表面 102 为平面菲涅尔面。可以理解的是，第二表面 102 既可以为凸面，也可以为凹面，还可以为平面。例如，可以将一个连续曲面进行离散化处理，得到基面为平面的平面菲涅尔面（例如，参考图 4）。例如，可以将一个连续曲面进行离散化处理后，再叠加一个离散化处理的球面曲率或非球面曲率，从而得到基面为曲面的曲面菲涅尔面（例如，参考图 1）。由此，在光学系统中的菲涅尔面的曲率半径具有较大的调整空间，从而能够更好地对色散的光线进行偏折会聚。由此，通过菲涅尔面的斜率可调，增强了第二表面 102 和第三表面 103 对于光线的偏折能力，既能够实现超短焦，还能够提升对色差的校正效果，提高清晰度。

例如，参考图 1，第二表面 102 与第三表面 103 均向远离第一表面 101 的一侧弯曲，也即第二表面 102 与第三表面 103 均为凸面，从而使得第一镜片 110 的中心厚度与边缘厚度差距较小，并使得第二镜片 120 的中心厚度与边缘厚度差距较小，降低加工难度。此外，曲面菲涅尔还能够使得第二表面 102 和第三表面 103 的面型更容易与第一表面 101 和第四表面 104 相配合，从而减小镜片组件 100 在光轴 OA 方向上的厚度，从而控制光学系统的光学总长。

在一些示例中，如图 1 所示，第一表面 101 与第四表面 104 的曲率半径的比值可以为 1.2~1.7。例如，第一表面 101 与第四表面 104 的曲率半径的比值可以为 1.3~1.6。例如，第一表面 101 与第四表面 104 的曲率半径的比值可以为 1.4~1.5。

在一些示例中，如图 1 所示，第一表面 101 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-3.5~-1.5，第一表面 101 的圆锥系数可以为-10~-0.5。例如，第一表面 101 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-3~-2。例如，第一表面 101 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-2.5。例如，第一表面 101 的圆锥系数可以为-9~-1。例如，第一表面 101 的圆锥系数可以为-8~-2。例如，第一表面 101 的圆锥系数可以为-7~-3。例如，第一表面 101 的圆锥系数可以为-6~-4。例如，第一表面 101 的圆锥系数可以为-5。

在一些示例中，如图 1 所示，第四表面 104 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值为-2.0~2.0，第四表面 104 的圆锥系数为-10~-0.1。例如，第四表面 104 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-1.8~1.8。例如，第四表面 104 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-1.5~1.5。例如，第四表面 104 的曲率半径与光学系统的有效焦距的比值可以为-1~1。例如，第四表面 104 的圆锥系数可以为-9~-1。例如，第四表面 104 的圆锥系数可以为-8~-2。例如，第四表面 104 的圆锥系数可以为-7~-3。例如，第四表面 104 的圆锥系数可以为-6~-4。例如，第四表面 104 的圆锥系数可以为-5。

例如，曲面菲涅尔面的面型可以近似为非球面的面型，如可以用下列数值公式表示：

$$z = \frac{CY^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)C^2Y^2}} + \sum_{i=2}^N \alpha_i Y^{2i}$$

例如，上述公式中非球面沿垂直于光轴的方向的高度是  $Y$ ，从非球面顶点到非球面上高度为  $Y$  处在光轴上的投影之间的距离是  $z$ ，即， $z$  是沿光轴方向的坐标； $C$  是曲率（曲率半径  $R$  的倒数）， $k$  是圆锥系数（Conic Constant）， $\alpha_i$  是各高次项的系数， $2i$  是非球面的高次方（the order of Aspherical Coefficient）。

在实际优化镜片组件各参数的合理配置时，将镜片组件中各镜片的曲率半径、圆锥系数、高度以及非球面系数等值放入上述数值公式中，通过光学模拟计算以得到能够校正镜片组件中各镜片的像差的各个优化参数。通过优化过程得到镜片组件中各镜片的曲率半径、沿光轴的厚度、有效口径以及圆锥系数的优选值。

例如，如图 1 所示，第二表面 102 和第三表面 103 的圆锥系数可以为 0，以提高对菲涅尔面进行优化的效率。例如，第二表面 102 和第三表面 103 的圆锥系数可以小于 0。例如，第二表面 102 和第三表面 103 的圆锥系数可以大于 0。

结合前述示例，例如，第一表面 101 的高次项系数满足： $\alpha_4=-1.0E-05$ ， $\alpha_6=1.5E-07$ ， $\alpha_8=1.1E-09$ ， $\alpha_{10}=6.0E-12$ 。例如，第二表面 102 的高次项系数满足： $\alpha_4=-3.0E-05$ ， $\alpha_6=-3.0E-08$ ， $\alpha_8=0.0E+00$ ， $\alpha_{10}=0.0E+00$ 。例如，第三表面 103 的高次项系数与第二表面 102 的高次项系数完全相同。例如，第四表面 104 的高次项系数满足： $\alpha_4=-0.00003$ ， $\alpha_6=-3.7E-08$ ， $\alpha_8=6.0E-12$ ， $\alpha_{10}=-2.0E-14$ 。

在一些示例中，如图 1 所示，第二表面 102 的齿宽包括 0.3 毫米~1 毫米。例如，第二表面 102 包括齿形结构，齿形结构由多个同心设置的齿圈组成，齿宽也即是相邻两个齿圈之间的间距。例如，多个齿圈中，相邻两个齿圈之间的间距均相等。例如，第二表面 102 的齿宽包括 0.4 毫米~0.9 毫米。例如，第二表面 102 的齿宽包括 0.5 毫米~0.8 毫米。例如，第二表面 102 的齿宽包括 0.6 毫米~0.7 毫米。通过将齿宽设置为 0.3 毫米~1 毫米，能够使得第二表面 102 的齿形疏密得当，不仅能够降低加工误差、提高光学效率，还有利于在注塑加工时齿部的成型及拔模。

例如，光线在光学系统中发生折返时，光线每次经过菲涅尔面，都需要考虑菲涅尔面上的齿部对光线的影响，以防止出现漏光或光线阻挡，进而减少杂散光，提高成像的对比度。例如，在本公开中一实施例的一示例中，如图 3 所示，入射光线在镜片组件 100 中折返的过程中，先后三次经过第二表面 102 和第三表面 103，可以分别根据每次经过第二表面 102 或第三表面 103 时光线的偏折角度，通过光学模拟计算以得到菲涅尔面的齿高和拔模角。

在一些示例中，如图 1 所示，至少两个镜片包括沿光轴 OA 方向排列的第一镜片 110 和第二镜片 120，第一镜片 110 包括第一表面 101 和第二表面 102，第二镜片 120 包括第三表面 103 和第四表面 104。第一镜片 110 的色散系数大于第二镜片 120 的色散系数。例如，第

一镜片 110 为凸透镜，第二镜片 120 为凹透镜，通过将第一镜片 110 的色散系数设置为大于第二镜片 120 的色散系数，有利于不同波长的光线的偏折，从而能够更好地校正色差。

在一些示例中，如图 1 所示，第一镜片 110 的色散系数可以为 25~65，第二镜片 120 的色散系数可以为 30~54。例如，第一镜片 110 的色散系数可以为 30~60。例如，第一镜片 110 的色散系数可以为 35~55。例如，第一镜片 110 的色散系数可以为 40~50。例如，第一镜片 110 的色散系数可以为 45。例如，第二镜片 120 的色散系数可以为 35~50。例如，第二镜片 120 的色散系数可以为 40~45。例如，第一镜片 110 的色散系数可以为 55~65，第二镜片 120 的色散系数可以为 30~40。例如，第一镜片 110 的色散系数可以为 55~57，第二镜片 120 的色散系数可以为 49~51。例如，第一镜片 110 的色散系数可以为 56，第二镜片 120 的色散系数可以为 50。可以理解的是，本公开仅示例出了第一镜片 110 的色散系数和第二镜片 120 的色散系数，第一镜片 110 的色散系数和第二镜片 120 的色散系数既可以较为相近也可以相差较大，只要第一镜片 110 的色散系数大于第二镜片 120 的色散系数，本公开对于数值的组合均不作限定。

在一些示例中，如图 1 所示，至少两个镜片包括沿光轴 OA 方向排列的第一镜片 110 和第二镜片 120，第一镜片 110 包括第一表面 101 和第二表面 102，第二镜片 120 包括第三表面 103 和第四表面 104。第一镜片 110 的折射率小于第二镜片 120 的折射率。例如，折射率与色散系数之间大致呈反比。例如，折射率越小，色散系数相对越大。例如，色散系数越小，折射率相对越大。例如，第一镜片 110 为凸透镜，第二镜片 120 为凹透镜，通过将第一镜片 110 的折射率设置为小于第二镜片 120 的折射率，有利于不同波长的光线的偏折，从而能够更好地校正色差。

例如，如图 1 所示，第一镜片 110 的折射率可以为 1.4~1.7。例如，第一镜片 110 的折射率可以为 1.5~1.6。例如，第二镜片 120 的折射率可以为 1.4~1.7。例如，第二镜片 120 的折射率可以为 1.5~1.6。例如，第一镜片 110 的折射率可以为 1.55，第二镜片 120 的折射率可以为 1.59。可以理解的是，本公开仅示例出了第一镜片 110 的折射率和第二镜片 120 的折射率，第一镜片 110 的折射率和第二镜片 120 的折射率既可以较为相近也可以相差较大，只要第一镜片 110 的折射率小于第二镜片 120 的折射率，本公开对于数值的组合均不作限定。

例如，如图 1 所示，第一镜片 110 与第二镜片 120 可以选择不同的材料，以使第一镜片 110 的色散系数不同于第二镜片 120 的色散系数，且第一镜片 110 的折射率不同于第二镜片 120 的折射率。例如，可以将第一镜片 110 和第二镜片 120 分别注塑成型后，通过弹性胶将第一镜片 110 和第二镜片 120 胶合在一起。例如，可以在将第一镜片 110 注塑成型后，采用浇铸（Casting）工艺，将液体光学材料灌注于第一镜片 110 与模具之间并固化成型，从而加工形成第二镜片 120。例如，通过选择液体光学材料，固化后的第二镜片 120 的材料可以为硬质的聚合物，也可以为具有弹性的光学硅胶。例如，硬质的聚合物可以为单体聚合物，折

射率为 1.554, 色散系数为 39.3。例如, 具有弹性的光学硅胶可以为硅橡胶。例如, 光学硅胶的折射率为 1.41, 色散系数为 52。例如, 光学硅胶的折射率为 1.41, 色散系数为 50。例如, 可以先注塑加工第二镜片 120, 再通过浇铸工艺, 将液体光学材料灌注在第二镜片 120 与模具之间并固化成型, 从而加工形成第一镜片 110。

5 例如, 图 1 示意性的示出各膜层对镜片组件的不同表面之间的距离的影响, 如各膜层的厚度较薄时, 可以忽略膜层厚度。

在一些示例中, 如图 1 所示, 第一表面 101 和第二表面 102 与光轴 OA 相交的两个交点之间的距离为第一距离 D1。例如, 第一距离 D1 为第一镜片 110 的中心厚度。如图 1 所示, 第三表面 103 和第四表面 104 与光轴 OA 相交的两个交点之间的距离为第二距离 D2。例如,  
10 第二距离 D2 为第二镜片 120 的中心厚度。第一距离 D1 与第二距离 D2 的比值可以为 2~4 (2:1~4:1)。例如, 第一距离 D1 与第二距离 D2 的比值可以为 2.5~3.5。

在一些示例中, 如图 1 所示, 第一距离 D1 与光学系统的有效焦距的比值可以为 0.3~0.5。例如, 第一距离 D1 与光学系统的有效焦距的比值可以为 0.35~0.45。例如, 第一距离 D1 与光学系统的有效焦距的比值可以为 0.4。在一些示例中, 第二距离 D2 与光学系统的有效焦距  
15 的比值可以为 0.1~0.3。例如, 第二距离 D2 与光学系统的有效焦距的比值可以为 0.15~1.25。例如, 第二距离 D2 与光学系统的有效焦距的比值可以为 0.2。

在一些示例中, 如图 1 所示, 至少两个镜片包括沿光轴 OA 方向排列的第一镜片 110 和第二镜片 120, 第一镜片 110 包括第一表面 101 和第二表面 102, 第二镜片 120 包括第三表面 103 和第四表面 104。在一些示例中, 第一镜片 110 的中心厚度与边缘厚度的比值大于 1  
20 且小于 3。例如, 第一镜片 110 的中心厚度与边缘厚度的比值大于 1.5 且小于 2.5。在一些示例中, 第二镜片 120 的中心厚度与边缘厚度的比值大于 0.5 且小于 2。例如, 第二镜片 120 的中心厚度与边缘厚度的比值大于 1 且小于 1.5。通过对上述各镜片的中心厚度与边缘厚度的比例关系进行设置, 有利于保证各镜片的注塑成型。

结合前述示例, 图 5A 为图 1 所示光学系统的点列图。图 5B 为图 1 所示光学系统的弥散斑尺寸随视场角变化的曲线图。  
25

参考图 5A, 点列图是指由一点发射出的许多光线经光学系统之后, 因像差使其与像面的交点不再集中于同一点, 而形成了一个散布在一定范围的弥散图形, 可用于评价光学系统的成像质量。图 5A 中, 以左侧纵向上的第一组数值为例, 0.00 表示的是 X 方向归一化视场, 1.00 表示的是 Y 方向归一化视场, 0.000 表示的是 X 方向视场角度, 47.50 表示的是 Y 方向  
30 视场角度。图 5A 中, 以右侧纵向上的第一组数值为例, RMS 表示的是弥散斑的弥散点到弥散斑质心 (或者为弥散斑中心) 的半径的均方根, 100% 表示的是弥散斑的直径。图 5A 通常用于评价该光学系统的全视场清晰度, 即当人眼瞳孔处于光轴上入瞳位置处且注视透镜中心 (即零视场) 时, 余光所能覆盖到的全视场范围的成像清晰度, 也称为瞬态模式。除了要考

虑在瞬态模式下的全视场清晰度，对于例如佩戴头戴显示器的佩戴者而言，注视点清晰度是更为重要的光学指标之一。注视点清晰度是指眼睛上下左右转动时，所能直接看到（而非余光看到）的某一角度范围内的画面清晰度。

在注视点模式下，眼球转动一定角度，瞳孔偏离光轴中心，其在光轴在 Z 方向和 Y 方向有一定偏离，且通过瞳孔中心的主光线与 Z 轴有一定夹角。例如，该夹角的范围为 $\pm 35$ 度，该夹角的范围设定考虑到人眼的观测习惯，为看清超出人眼中心 35 度范围以上的前方物体，人会主动转头而非费力转动眼球。参考图 5B，图 5B 示出了注视点清晰度和注视角度之间的关系，中心视场的弥散斑远小于一个像素，人眼转动到 20 度时的弥散斑直径小于 15 微米。由图 5B 可知，本申请的光学系统的弥散斑较小，光学系统的分辨率较高。综上可知，本公开至少一个实施例提供的光学系统能够清晰成像。

图 5C 为图 1 所示光学系统的畸变图。参考图 5C，畸变图反应的是不同视场成清晰像的像面位置差异，参见图 5C 所示，最大畸变绝对值在 50% 以内。由此可知，本公开至少一实施例提供的光学系统能够较好地校正畸变，满足高质量成像要求。另外，畸变校正可以在软件中预先处理。

图 5D 为一种光学系统的垂轴色差图。图 5E 为图 1 所示光学系统的垂轴色差图。

参考图 5D 和图 5E，垂轴色差图表示各波长相对于中心波长在成像面上不同像高处的高度差值，横轴表示各波长相对中心波长的垂轴色差值，纵轴表示归一化视场角。如图 5D 和图 5E 所示，F 光为青光，C 光为红光，D 光为黄光，C 光和 F 光位于人眼敏感区两端，D 光则位于其中接近人眼最敏感的谱线。参考图 5D，图 5D 为一种单片式光学系统的垂轴色差结果，从图中可以看出，F 光与 C 光的垂轴色差的绝对值大致在 0.1 毫米以内，F 光与 D 光的垂轴色差的绝对值大致在 0.06 毫米以内。从图 5E 中则可以看出，F 光与 C 光的垂轴色差的绝对值控制在 0.035 毫米以内，且 F 光与 D 光的垂轴色差的绝对值控制在 0.025 毫米以内。通过将图 5E 与图 5D 相比可知，本公开提供的如图 1 所示的光学系统，相较于单片式光学系统，垂轴色差在最大视场可降低至 1/3，色差可降低至 1/6，说明例如图 1 所示的光学系统能够极好地矫正边缘视场的色差以及整个像面的二级光谱。

图 6 为本公开至少一个实施例中一示例所提供的光学系统的示意图。图 6 所示光学系统与图 1 所示光学系统的不同之处在于，图 6 所示光学系统中的镜片数量与图 1 所示光学系统中的镜片数量不同。当然，图 6 所示光学系统与图 1 所示光学系统还可以存在有其他不同之处，如至少一个镜片的面型等，本公开对此不做限制。例如，图 6 所示光学系统中第一表面 101 至第四表面 104 的面型参数可以与图 1 所示光学系统中第一表面 101 至第四表面 104 的面型参数不同，也可以相同。图 6 所示光学系统中的偏振反射层 200、透反膜 300、线偏振膜 500 可以与图 1 所示光学系统中的偏振反射层 200、透反膜 300、线偏振膜 500 具有相同的特征，在此不再赘述。

5 在一些示例中，如图 6 所示，至少两个镜片包括沿光轴 OA 方向依次排列的第一镜片 011、第二镜片 012 和第三镜片 013，第一镜片 011 包括第一表面 101 和第二表面 102，第二镜片 012 包括第三表面 103，第三镜片 013 包括第四表面 104。第二镜片 012 还包括与第三表面 103 相对的第五表面 105，第三镜片 013 还包括位于第五表面 105 和第四表面 104 之间的第六表面 106。第一镜片 011、第二镜片 012 和第三镜片 013 中的至少两者具有不同的色散系数。例如，第一镜片 011 与第二镜片 012 具有不同的色散系数，第二镜片 012 与第三镜片 013 具有相同的色散系数。例如，第一镜片 011 与第三镜片 013 具有不同的色散系数，第一镜片 011 与第二镜片 012 具有相同的色散系数。例如，第二镜片 012 与第三镜片 013 具有不同的色散系数，第一镜片 011 与第三镜片 013 具有相同的色散系数。例如，第一镜片 011、  
10 第二镜片 012 和第三镜片 013 分别具有不同的色散系数。

例如，在第一镜片 011、第二镜片 012 和第三镜片 013 的其中二者为同种光学材料时，可考虑例如光谱透过率、折射率、阿贝数等光学特性，还可考虑例如材料的流动性、热收缩率、应力、成本等可加工性。例如，可采用光学级聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）、聚碳酸酯（PC）、环烯烃共聚物（COC）、环烯烃均聚物（COP）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）等材料。  
15 料。

在一些示例中，如图 6 所示，第五表面 105 的曲率半径与第二表面 102 的曲率半径的比值为 0.9~1.1。例如，第五表面 105 与第二表面 102 的面型较为相似。第五表面 105 和第六表面 106 均为菲涅尔面，且第五表面 105 和第六表面 106 的面型互补。互补是指在将第五表面 105 与第六表面 106 相贴合（或者通过光学胶粘贴）后，第五表面 105 与第六表面 106 之间基本不存在间隙。例如，第五表面 105 的面型与第六表面 106 的面型互为正负形。例如，  
20 第五表面 105 与第六表面 106 相对应的位置处，两个菲涅尔面上的齿形结构能够彼此互补。

图 7 为本公开至少一个实施例一中示例所提供的光学系统的示意图。图 7 所示光学系统与图 6 所示光学系统的不同之处在于，图 7 所示光学系统中的面型参数与图 6 所示光学系统中的面型参数不同。当然，图 6 所示光学系统与图 1 所示光学系统还可以存在有其他不同之处，如镜片组件包括的镜片的数量等，本公开对此不做限制。例如，图 7 所示光学系统中的  
25 镜片数量可以与图 6 所示光学系统中的镜片数量不同，也可以相同。图 7 所示光学系统中的偏振反射层 200、透反膜 300、线偏振膜 500 可以与图 6 所示光学系统中的偏振反射层 200、透反膜 300、线偏振膜 500 具有相同的特征，在此不再赘述。

在一些示例中，如图 6 和图 7 所示，第五表面 105 为平面菲涅尔面或者曲面菲涅尔面。  
30 例如，如图 6 所示，第五表面 105 和第六表面 106 均为曲面菲涅尔面。例如，如图 7 所示，第五表面 105 和第六表面 106 均为平面菲涅尔面。可以理解的是，第五表面 105 既可以为凸面，也可以为凹面，还可以为平面。例如，第二表面 102 和第五表面 105 均向远离第一表面 101 的一侧弯曲，使得第二镜片 02 的中心厚度与边缘厚度差距较小，并使得第三镜片 03 的

中心厚度与边缘厚度差距较小，从而降低加工难度。

例如，如图 7 所示，第一镜片 01 的第二表面 102 为平面菲涅尔面，第二镜片 02 的第三表面 103 和第五表面 105 为平面菲涅尔面，第三镜片 03 的第六表面 106 为平面菲涅尔面。

例如，如图 7 所示，第二表面 102 和第三表面 103 的面型互补，第五表面 105 和第六表面 106 的面型互补。

例如，参考图 7，可以将一个连续曲面进行离散化处理，得到平面菲涅尔面。例如，参考图 6，可以将一个连续曲面进行离散化处理后，再叠加一个离散化处理的球面曲率，从而得到曲面菲涅尔面。由此，在光学系统中的菲涅尔面的曲率半径具有较大的调整空间，从而能够更好地对色散的光线进行偏折会聚。由此，通过菲涅尔面的斜率可调，增强了第五表面 105 和第六表面 106 对于光线的偏折能力，既能够实现超短焦，还能够提升对色差的校正效果，提高清晰度。

例如，参考图 1 和图 3，光学系统的光学总长（TTL）与有效焦距的比值为 0.85~1。例如，光学系统的光学总长与有效焦距的比值为 0.9~0.95。光学总长是指光学系统中镜片组件 100 的第一表面 101 上的最高点沿光轴 OA 到显示屏 10 的中心之间的距离。第一表面 101 上的最高点包括镜片组件 100 在第一表面 101 所在侧的边缘矢高。

例如，如图 1 和图 3 所示，光学系统的视场角大于 90°。例如，视场角为全视场角。例如，光学系统的视场角可以但不限于为 90°、92°、94°、96°、98°、100°。例如，以能够达到视场角为 100°的有效口径进行计算，得到双目镜片的重量大约为 20g。

例如，如图 1 和图 3 所示，光学系统的出瞳距离（EPD）为 12 毫米~20 毫米。例如，出瞳距离为自光学系统最后一面顶点到出瞳平面与光轴交点的距离。例如，出瞳距离为 14 毫米~18 毫米。例如，出瞳距离为 15 毫米。本公开提供的光学系统具有较大的出瞳距离，可满足近视用户佩戴眼镜使用。

参考图 3，本公开至少一个实施例提供一种显示装置，包括显示屏 10 以及上述任一实施例的光学系统。显示屏 10 位于第四表面 104 远离第一表面 101 的一侧。由于根据本公开实施例的显示装置包括至少一个上述光学系统，因此，也具有相应的有益技术效果，这里不再赘述。可以理解的是，图 3 所示的显示屏 10，配合如图 1、图 4、图 6 和图 7 中的光学系统可以形成不同的显示装置。

例如，如图 3 所示，显示屏 10 的显示面 11 位于光学系统的入光侧的焦平面。

例如，如图 3 所示，镜片组件 100 的有效口径与有效焦距的比值 2.2~2.4。上述镜片组件 100 的有效口径指有效通光口径，如光线能够经过镜片组件 100 的最大口径，该口径是以镜片组件 100 的最大光通量确定的。例如，有效口径与有效焦距的比值为 2.3。

例如，如图 3 所示，光学系统中的光阑（如人眼）与第一表面 101 在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 0.7~1.5。例如，光阑与第一表面 101 在光轴 OA 上的距离与有效焦距的

比值为 0.8~1.4。例如,光阑与第一表面 101 在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 0.9~1.3。例如,光阑与第一表面 101 在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 1~1.2。例如,光阑与第一表面 101 在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 1.1。

例如,如图 3 所示,光阑的有效口径为 4 毫米。例如,光学系统中物面与光阑在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值在-80 以下。例如,光学系统中像面的有效口径与有效焦距的比值为 1.5。

例如,如图 3 所示,显示屏 10 的显示面 11 与像面在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 0.03~0.12。例如,显示屏 10 的显示面 11 与像面在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 0.06~0.09。例如,显示屏 10 的显示面 11 与像面在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 0.08。

例如,如图 3 所示,第四表面 104 与显示屏 10 的显示面 11 在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 0.05~0.3。例如,第四表面 104 与显示屏 10 的显示面 11 在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 0.06~0.2。第四表面 104 与显示屏 10 的显示面 11 在光轴 OA 上的距离与有效焦距的比值为 0.1。

例如,如图 3 所示,显示屏 10 可以为任何类型的显示屏,例如液晶显示屏、有机发光二极管显示屏、无机发光二极管显示屏、量子点显示屏、投影仪(例如 LCOS 微型投影机)等。

例如,如图 3 所示,显示屏 10 为液晶显示屏,像素尺寸大约为二十几微米。例如,显示屏为有机发光二极管显示屏,像素尺寸大约为几微米。

例如,显示装置可以为虚拟现实显示装置。例如,虚拟现实显示装置可以为采用超短焦折叠光路的显示装置。

例如,该显示装置可以为近眼显示装置,该近眼显示装置可以为可穿戴 VR 头盔、VR 眼镜等,本公开实施例不限于此。

有以下几点需要说明:

(1) 本公开的实施例附图中,只涉及到与本公开实施例涉及到的结构,其他结构可参考通常设计。

(2) 在不冲突的情况下,本公开同一实施例及不同实施例中的特征可以相互组合。

以上所述仅是本公开的示范性实施方式,而非用于限制本公开的保护范围,本公开的保护范围由所附的权利要求确定。

权利要求书

- 1、一种光学系统，包括：  
镜片组件，包括至少两个镜片，所述至少两个镜片包括沿所述镜片组件的光轴方向依次  
5 排列的第一表面、第二表面、第三表面以及第四表面；  
偏振反射层，设置在所述第一表面远离所述第四表面的一侧；  
透反膜，设置在所述第四表面远离所述第三表面的一侧；  
相位延迟膜，设置在所述透反膜面向所述第一表面的一侧；  
其中，所述第一表面为凹面，所述第四表面为凸面；所述第二表面与所述第三表面均为  
10 菲涅尔面，且所述第二表面与所述第三表面的面型互补；  
所述至少两个镜片包括色散系数和折射率至少之一不同的镜片。  
2、如权利要求 1 所述的光学系统，其中，所述第二表面的曲率半径与所述光学系统的有效焦距的比值为-6~2。  
3、如权利要求 1 或 2 所述的光学系统，其中，所述第二表面的齿宽包括 0.3 毫米~1 毫  
15 米。  
4、如权利要求 1-3 任一项所述的光学系统，其中，所述第二表面为平面菲涅尔面或者曲面菲涅尔面。  
5、如权利要求 1-4 任一项所述的光学系统，其中，所述至少两个镜片包括沿所述光轴方向排列的第一镜片和第二镜片，所述第一镜片包括所述第一表面和所述第二表面，所述第二  
20 镜片包括所述第三表面和所述第四表面；  
其中，所述第一镜片的色散系数大于所述第二镜片的色散系数。  
6、如权利要求 5 所述的光学系统，其中，所述第一镜片的色散系数为 25~65，所述第二镜片的色散系数为 30~54。  
7、如权利要求 1-4 任一项所述的光学系统，其中，所述至少两个镜片包括沿所述光轴方  
25 向排列的第一镜片和第二镜片，所述第一镜片包括所述第一表面和所述第二表面，所述第二镜片包括所述第三表面和所述第四表面；  
其中，所述第一镜片的折射率小于所述第二镜片的折射率。  
8、如权利要求 1-7 任一项所述的光学系统，其中，所述第一表面与所述第四表面的曲率半径的比值为 1.2~1.7。  
30 9、如权利要求 8 所述的光学系统，其中，所述第一表面的曲率半径与所述光学系统的有效焦距的比值为-3.5~-1.5，所述第一表面的圆锥系数为-10~-0.5。  
10、如权利要求 8 或 9 所述的光学系统，其中，所述第四表面的曲率半径与所述光学系统的有效焦距的比值为-2.0~2.0，所述第四表面的圆锥系数为-10~-0.1。

11、如权利要求 1-10 任一项所述的光学系统，其中，所述第一表面和所述第二表面与所述光轴相交的两个交点之间的距离为第一距离；

所述第三表面和所述第四表面与所述光轴相交的两个交点之间的距离为第二距离；

所述第一距离与所述第二距离的比值为 2~4。

5 12、如权利要求 11 所述的光学系统，其中，所述第一距离与所述光学系统的有效焦距的比值为 0.3~0.5，所述第二距离与所述光学系统的有效焦距的比值为 0.1~0.3。

13、如权利要求 1-4 任一项所述的光学系统，其中，所述至少两个镜片包括沿所述光轴方向排列的第一镜片和第二镜片，所述第一镜片包括所述第一表面和所述第二表面，所述第二镜片包括所述第三表面和所述第四表面；

10 所述第一镜片的中心厚度与边缘厚度的比值大于 1 且小于 3；

所述第二镜片的中心厚度与边缘厚度的比值大于 0.5 且小于 2。

14、如权利要求 1-4 任一项所述的光学系统，其中，所述至少两个镜片包括沿所述光轴方向依次排列的第一镜片、第二镜片和第三镜片，所述第一镜片包括所述第一表面和所述第二表面，所述第二镜片包括所述第三表面，所述第三镜片包括所述第四表面；

15 所述第二镜片还包括与所述第三表面相对的第五表面，所述第三镜片还包括位于所述第五表面和所述第四表面之间的第六表面；

其中，所述第一镜片、所述第二镜片和所述第三镜片中的至少两者具有不同的色散系数。

15、如权利要求 14 所述的光学系统，其中，所述第五表面的曲率半径与所述第二表面的曲率半径的比值为 0.9~1.1，所述第五表面和所述第六表面均为菲涅尔面，且所述第五表面和所述第六表面的面型互补。

20 16、如权利要求 15 所述的光学系统，其中，所述第五表面为平面菲涅尔面或者曲面菲涅尔面。

17、一种显示装置，包括显示屏以及权利要求 1-16 任一项所述的光学系统，其中，所述显示屏位于所述透反膜远离所述偏振反射层的一侧。

25