文章编号　1004-924X(2018)02-0316-09

双视场无盲点全景成像仪

王晓恒[1,2]，薛庆生[1]，韩　官[1,2]，张　刘[3*]，于　磊[1]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院，吉林 长春 130061)

摘要：折返式全景成像技术作为一种新型的成像技术是光学设计领域近十几年的研究热点，但该技术有一个重大缺陷——在镜头的正前方存在观测盲区。本文设计了一种拥有双观测模式的新型全景成像仪。相比于传统的折返式全景成像仪，该仪器可以同时对前向视场 360°×(0°～55°)和环形视场 360°×(55°～95°)进行观测。其中，前向视场很好地补充了折返式光学系统的中央观测盲区，并增加了 CCD 探测器的面积利用率。该成像仪光学系统由前置透镜组、全景环形透镜和中继转像系统三部分组成。所有的透镜表面均为球面，具有易加工、低成本的特点。最后针对这种光学系统设计了对应的机械结构，从而为以后成像仪的加工、装调服务。该成像仪设计为折返式全景成像技术提供了一个新思路。

关　键　词：光学系统设计；双视场；无盲点；前向视场；环形视场；全景环形透镜；机械结构

中图分类号：TH744　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20182602.0316

Panoramic imagers with two fields of view and non-blind area

WANG Xiao-heng[1,2], XUE Qing-sheng[1], HAN Guan[1,2], ZHANG Liu[3*], YU Lei[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun* 130061, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhangliu@jlu.edu.cn*

Abstract: Aiming at the well known drawback of the catadioptric panoramic imaging technology, which has an observation blind area in front of the optical system, a new panoramic imager which has dual observation modes was designed in this paper. Compared with the traditional catadioptric panoramic imager, the instrument proposed could observe the forward 360°×(0°—55°) field of view and ring 360°×(55°—95°) field of view simultaneously. The forward field of view was a good complement to the central observation blind spot in ring field of view, which increased the utilization of CCD detector. The imaging instrument optical system consisted of a front lens group, a panoramic annular lens and a relay imaging system, and all surfaces of the optical system were spherical. The mechanical

收稿日期：2017-07-07；**修订日期**：2017-09-14.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 41575023)；国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFB0500300，No. 2016YFB0500301，No. 2016YFB0500302，No. 2016YFB0500303，No. 2016YFB0500304，No. 2016YFB0501003)；吉林省科技厅青年项目(No. 20160520096JH)；上海市科委重点项目(No. 16DZ1120400)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

structure of the new optical system was designed as well. This paper provides a new design method for the catadioptric panoramic imaging technology.

Key words: optical system design; two fields of view; non-blind area; forward field of view; ring field of view; panoramic annular lens; mechanical structure

1　引　言

随着信息化社会的到来，人们希望对周围空间有一个整体认识，从而更全面地掌握空间环境的信息。全景成像技术可以在成像仪周围 360° 方位上探测成像，因此全景成像技术被广泛地应用在机器人视觉、全方位遥感、无人汽车、全景深度检测等诸多领域[1-3]。全景技术又分为扫描型全景和直视型全景。扫描型全景指的是通过机械部件带动成像仪转动，对周围环境进行扫描，获得不同方位的图像，再通过图像拼接融合技术，将不同方位的图像组合起来，从而获得周围的全景信息[4]。直视型全景指的是通过特殊的全景镜头，同时对超大视场空间进行一次性投影成像。相比于扫描型全景成像，直视型全景成像拥有成像速度快，不需要机械运动部件，抗干扰能力强，无需后期处理，成本低廉等诸多优势。

直视型全景镜头分为两种，一种是采用中心投影方式的鱼眼镜头，一种是采用平面圆柱投影方式的新型折返式全景镜头。相比于传统的鱼眼镜头，折返式全景镜头更容易获得大视场，并且结构也更加紧凑，从而受到研究人员的青睐，成为近十几年的研究热点[5-6]。但折返式全景成像系统有一个很大的缺陷，这种成像系统在正前方存在观测盲区。因此，在 CCD 探测器上存在一个较大的中心黑斑，成像区域为一个包围着黑斑的圆环，无法实现真正意义上的全景[7-9]。

针对折返式全景成像技术的这种特点，一些科研人员尝试使用自由曲面、二向色型元件等特殊光学元件去尽可能地缩小观测盲区。其中，复旦大学徐敏团队采用自由曲面压缩了中央黑斑[10]。浙江大学白剑团队采用二向色型光学元件进行双波段探测，消除了部分盲区，这种光学系统在紫外波段的半视场角为 0～10°，可见光波段的半视场角为 30°～90°[11]。不过这两种方法均无法完全消除盲区，并且存在难以加工、检测的问题[12-13]。本文结合传统的中心投影方式和新型的平面圆柱投影方式，设计了一种拥有双观测模式的全景成像仪。该成像仪拥有 360°×(0°～55°) 的前向视场和 360°×(55°～95°) 的环形视场。其中，前向视场采用中心投影模式，环形视场采用平面圆柱投影模式，最终在焦面上所成的像为一个中心亮斑和一个包围着亮斑的圆环。中心亮斑对应着前向视场的观测数据，包围亮斑的圆环对应着环形视场的观测数据。这两种观测模式互为补充，完全消除了普通折返式成像探测仪的观测盲区，不会在 CCD 探测上形成黑斑，增大了 CCD 的面积利用率，实现了真正的全景成像。

2　成像原理与设计方案

传统的成像仪采用图 1 所示的中心投影法则，这种投影关系和人眼的视觉模型是一致的。从图 1 可以看出，相同尺寸的物体，如果和成像仪之间的距离小，则在焦面上所成像的尺寸大；反之，如果和成像仪之间的距离大，则在焦面上成像的尺寸小。

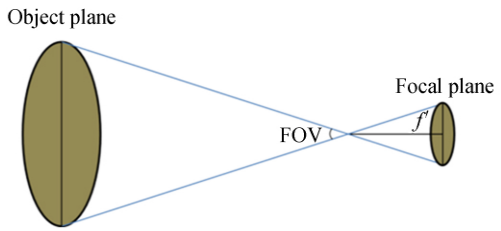


图 1　中心投影示意图

Fig. 1　Schematic diagram of center projection

相比于中心投影，平面圆柱投影可以更容易地得到大视场。如图 2 所示，平面圆柱投影在光轴两侧 α 角范围内为观测盲区，而在 α～β 视场内可以观测成像。由于成像系统绕光轴具有旋转对称性，所以其成像视场角为 360°×(α～β)。最终，可探测视场内的景物经光学系统后，在焦面上形成一个包围着黑斑的环形图像。其中环形图像对应着系统的可观测区域，中心黑斑对应系统的观测盲区。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

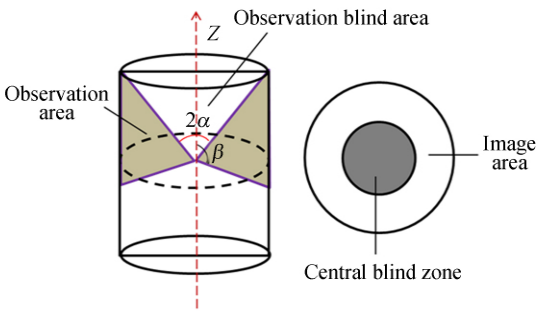


图 2 平面圆柱投影示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flat cylindrical projection

为了能观测到全面的外界环境，成像系统不能存在观测盲区，但只利用平面圆柱投影的方式无法完全消除盲区。本文结合中心投影方式和平面圆柱投影方式，提出了拥有双观测模式的成像方式，如图 3 所示。该成像系统同时拥有位于光学系统正前方的前向视场和两侧的环形视场。其中，前向视场采用中心投影模式，可在 360°×(0°～α)视场范围内成像；环形视场采用平面圆柱投影模式，可在 360°×(α～β)视场内成像。双视场的光束分别从不同区域的入瞳进入光学系统，最终同时成像于 CCD 像面上。

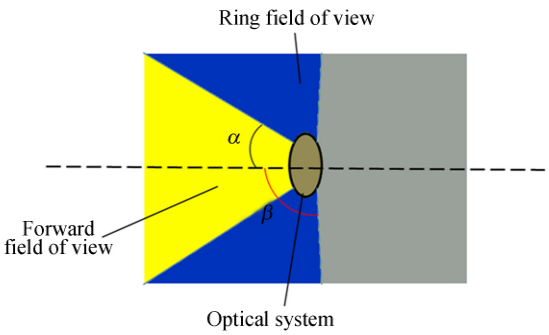


图 3 双视场观测模式示意图

Fig. 3 Observation mode of double fields of view

为实现上述的双视场观测功能，本文采用如图 4 所示的光学结构。该系统由前置透镜组、全景环形透镜和中继透镜组组成。对于环形视场，光束不经过前置透镜组，直接从全景环形透镜的透射面 1 进入光学系统。在环形透镜内，光束在反射面 2、3 上发生两次反射之后，穿过透射面 4 离开全景环形透镜，接着经中继转像系统成像于焦面上。对于前向视场，光束首先经过前置透镜组压缩光束的口径和入射角，使到达全景环形透镜的前向光束拥有较小的横截面积，从而通过面 3 的中心区域进入全景环形透镜。接着通过透射面 4 离开环形透镜，并经中继转像系统成像于像面上。可以看出，前向视场的光束在全景环形透镜中并没有发生反射，所以对于前向视场，全景环形透镜相当于一个厚透镜。

综上所述，面 3 的两侧区域对于光束具有反射作用，中心区域具有透射作用。为了在同一表面实现这两种不同的功能，可以在面 3 的整个区域镀半透半反膜，也可以只在面 3 的两侧区域镀反射膜。考虑到半透半反膜会造成光能损失，并会引入杂光等问题，选择只在两侧区域镀反射膜的方案。

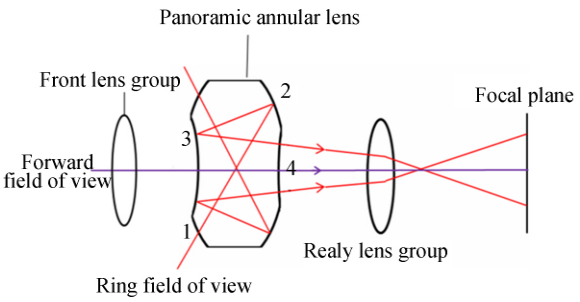


图 4 双视场观测光学结构示意图

Fig. 4 Observation optical structure of double fields of view

全景成像仪光学系统的双视场分别采用中心投影模式和平面圆柱投影模式，则系统的像面分布为一个中心亮斑和一个包围着亮斑的圆环(图 5)。亮斑和圆环的半径由两个视场的焦距和视场角决定。

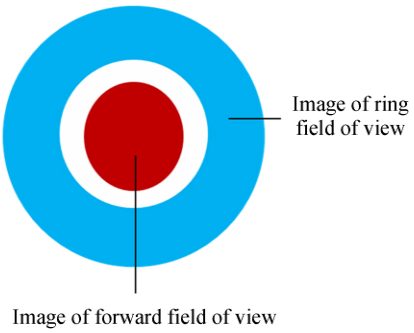


图 5 光学系统像面分布图

Fig. 5 Image-plane distribution of optical structure

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　光学系统设计

3.1　设计指标

一般的成像系统采用正切投影关系，即：

$$y = f' \cdot \tan\theta, \tag{1}$$

式中：y 为理想像高，f' 为系统焦距，θ 为光学系统的半视场角。考虑到实际应用，全景成像仪需要对周围环境进行全方位的成像探测，所以光学系统必须拥有较大的视场角。预设光学系统的半视场角为 95°，此时 θ 的正切值为无穷大，这种情况下，正切投影关系失去意义，因此必须采用等距离投影关系，即：

$$y = f' \cdot \theta. \tag{2}$$

为了使整个系统无观测盲区，前向视场和环形视场的视场角需要衔接上，即前向视场的最大半视场角和环形视场的最小半视场角必须一致。为了能在焦面上将前向视场和环形视场的像分开，环形视场的最小像高必须大于前向视场的最大像高，所以环形观测结构的焦距要大于前向观测结构的焦距。选择前向视场焦距为 4 mm，环形视场的焦距为 −5.7 mm，则双视场所成的像在焦面上不会交叉重叠。拟使用像元尺寸为 13 μm 的 CCD 作为光学系统的探测器，因此，系统的 Nyquist 频率为 38.5 lp/mm。此外，作为成像系统，畸变必须控制在合理的范围内。综合考虑，成像仪的主要设计指标如表 1 所示。

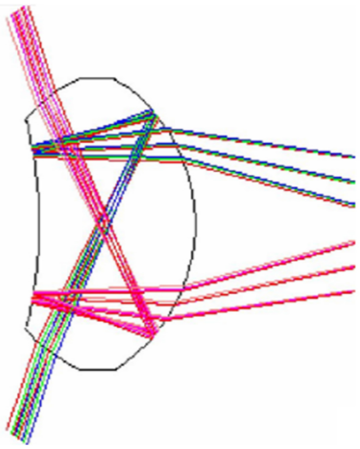
表 1　全景成像仪的主要设计指标

Tab. 1　Main specifications of panoramic imager

Parameter	Forward field of view	Ring field of view
Focal length/mm	4	−5.7
FOV	360°×(0°～55°)	360°×(55°～95°)
MTF/(lp·mm^{-1})	≥0.45@38.5	≥0.40@38.5
Distortion/%	≤3	≤3
Band of image	Visible band	Visible band

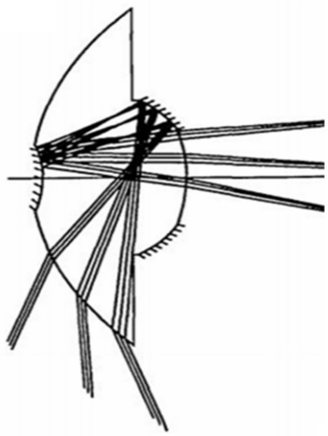
3.2　全景环形透镜

环形视场和前向视场的光束都需要经过全景环形透镜，因此，全景环形透镜关系着整个光学系统的设计成败。如图 6 所示，全景环形透镜一般由三种或四种不同曲率的表面组成[14-15]，即环形透镜的透射面和反射面拥有不同的曲率。这种由多种曲率表面构成的环形透镜虽然在一定程度上改善了像质，但难以加工制作，加工公差要求较高。本文设计了一种只有两种曲率表面组成的环形透镜，通过在透镜的不同区域镀不同膜层的方式改变透镜的折返特性。这种设计降低了环形透镜的加工难度，从而减少了该全景成像仪的使用成本。



(a)三种面型的结构

(a)Structure consists of three curvature surfaces



(b)四种面型的结构

(b) Structure consists of four curvature surfaces

图 6　全景环形透镜

Fig. 6　Panoramic annular lenses

全景成像仪的环形视场角为 360°×(55°～95°)，对于这种超大视场的成像光学系统，匹兹伐场曲 P 是衡量成像质量的重要参量。为获得良好的成像质量，光学系统的匹兹伐场曲和必须为零，即：

$$P = \sum_{i=1}^{m} P_i = 0. \tag{3}$$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

一般来说，中继透镜组的匹兹伐场曲大于零，则要求全景环形透镜的匹兹伐和小于零。成像仪光学系统的匹兹伐和可由式(4)进行估算[16]：

$$P=\sum_{i=1}^{m}P_i=J^2\sum_{i=1}^{m}\frac{n_i'-n_i}{n_i'n_i}c_i\ , \qquad (4)$$

其中：J 为拉格朗日常量，n_i 和 n_i' 分别为第 i 个面前后的折射率，c_i 为第 i 个面的曲率。对于反射面，取 $-n_i=n_i'$。

为了降低加工难度，组成全景环形透镜的不同曲率表面越少越好。为了能够和中继转像系统进行匹配，必须保证全景环形透镜的场曲为负值。预设全景环形透镜为两面式结构，对于环形视场，入射面与第二反射面的曲率为 c_1、出射面和第一反射面的曲率为 c_2。则由式(4)可知，由全景环形透镜产生的匹兹伐和为：

$$P_1=J^2\frac{n-1}{n}c_1+2J^2\frac{1}{n}c_2-2J^2\frac{1}{n}c_1-J^2\frac{n-1}{n}c_2=\frac{J^2}{n}(c_1-c_2)(n-3). \qquad (5)$$

由式(5)可知，只要保证 (c_1-c_2) 大于零，则满足全景环形透镜匹兹伐和小于零的条件。同时考虑到环形透镜第一个表面要具备压缩环形超大视场光束的功能，选择 $c_1>0$，$c_2<0$，则全景环形透镜的形状如图 7 所示。其中，$c_1=0.016\ \mathrm{mm}^{-1}$，$c_2=-0.047\ \mathrm{mm}^{-1}$，透镜厚度为 29.79 mm，口径为 51.48 mm。

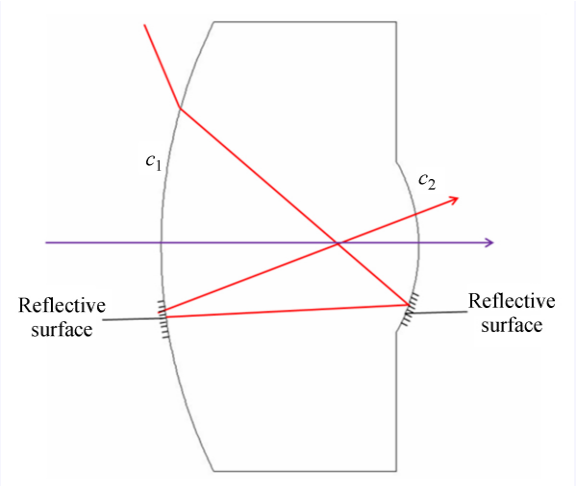


图 7 全景环形透镜

Fig. 7 Panoramic annular lens

对于前向视场，全景环形透镜的匹兹伐和 P_2 为：

$$P_2=J^2\frac{n-1}{n}c_1+J^2\frac{1-n}{n}c_2=\frac{J^2}{n}(c_1-c_2)(n-1). \qquad (6)$$

由式(6)可知，在 (c_1-c_2) 大于零时，P_2 始终大于零，不满足 P_2 小于零的条件。因此，必须有前置透镜组对系统的场曲进行校正。

3.3 环形视场观测结构

中继透镜组承担转像和像差校正的功能，具有大相对孔径，中等视场的特点。采用如图 8 所示的转像系统，与全景环形透镜进行拼接。可以看出，中继转像系统拥有类似于目镜的结构，孔径光阑相当于目镜的入瞳。

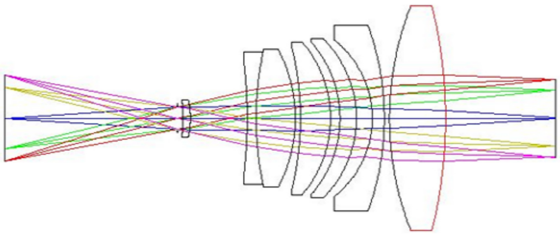


图 8 中继转像透镜组

Fig. 8 Layout of relay lens group

系统完成拼接后，对光学系统进行优化。在优化过程中，首先对中继透镜组进行优化。接着在保证光线不会溢出的条件下，对全景环形透镜进行优化。最后，将全景环形透镜和中继透镜组作为整体来优化，以得到较好的像质。环形观测的总体结构如图 9 所示，其焦距为 −5.7 mm，F 数为 6.5，系统总长为 60.28 mm。该结构可以在 360°×(55°～95°)视场内观测成像。

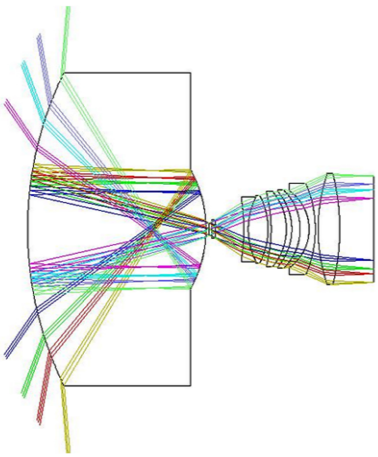


图 9 环形视场观测结构

Fig. 9 Observation structure of ring field of view

3.4 前向视场观测结构

前向视场的光束必须从全景环形透镜的中心透光区域折射通过全景环形透镜，但前向半视场

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

角达到了 55°，因此必须对前向视场的光束入射口径和入射角进行压缩。同时，前向透镜组还承担着校正光学系统像差的任务。采用反远距型的光学结构与已经设计好的环形观测结构进行拼接。拼接时必须保证系统的光瞳匹配，即前组的出瞳和后组的入瞳一致。

在对前向观测结构进行优化的过程中，要保证全景环形透镜和中继转像系统不变，只对前置透镜组进行优化，前向视场的观测结构如图 10 所示。使用该结构可以在 360°×(0°～55°)视场内观测成像。

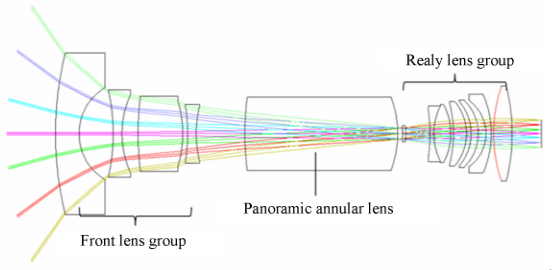


图 10　前向视场观测结构

Fig. 10　Observation structure of forward field of view

3.5　全景成像仪光学系统总体结构

将以上两个观测结构结合起来，使用 ZEMAX 软件的多重结构优化功能同时优化前向视场光路和环形视场光路，使环形视场和前向视场均获得良好的成像质量，优化结果如图 11 所示。利用该光学系统可以同时观测前向 360°×(0°～55°)视场和环形 360°×(55°～95°)视场，从而实现无盲区的全景成像。

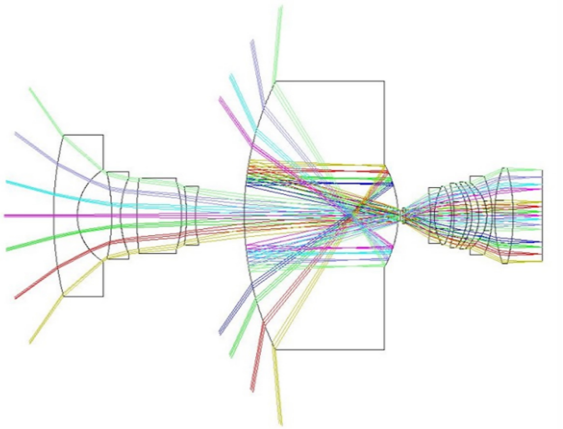


图 11　全景成像仪的总体光学结构

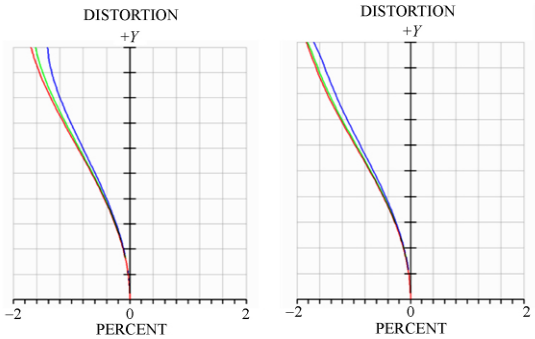
Fig. 11　Overall structure of panoramic imager

4　像质评价

成像质量是衡量光学系统实际意义的根本指标[17]。一般来说，大视场成像系统往往具有较大的畸变。该成像仪的前向半视场角为 55°，环形半视场角为 95°，这两个视场都比较大。但作为成像仪器，畸变必须控制在合理范围内。光学系统的 F-θ 畸变为：

$$f\text{-}\theta_{\text{distortion}}=\frac{y'-y}{y}\cdot 100\%, \tag{7}$$

其中：y'为实际成像高度，y 为理想高度。该光学系统的畸变如图 12 所示，可以看出，这两个视场的畸变均控制在 2%以内，畸变得到了良好的校正。



(a)前向视场　　(b)环形视场

(a)Forward field of view　　(b)Ring field of view

图 12　光学系统的畸变

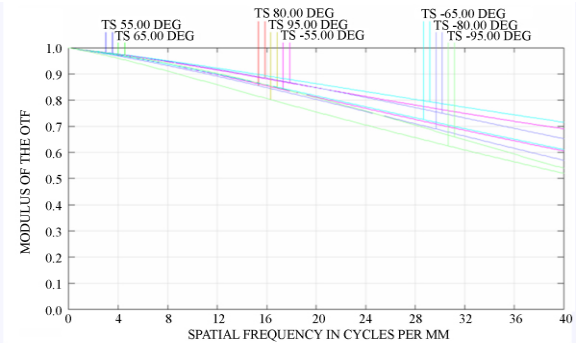
Fig. 12　Distoration of optical structure

光学传递函数(Modulation Transfer Function，MTF)是空间频率、相对孔径、工作波长和视场角的函数，它反映着系统的成像质量[18]。如图 13 所示，该成像仪前向视场在 40 lp/mm 处的 MTF 高于 0.55，优于 0.45@38.5 lp/mm 的设计指标；环形视场在 40 lp/mm 处的 MTF 高于 0.50，优于 0.40@38.5 lp/mm 的设计指标。综上，该成像仪具有良好的成像质量。

5　机械结构设计

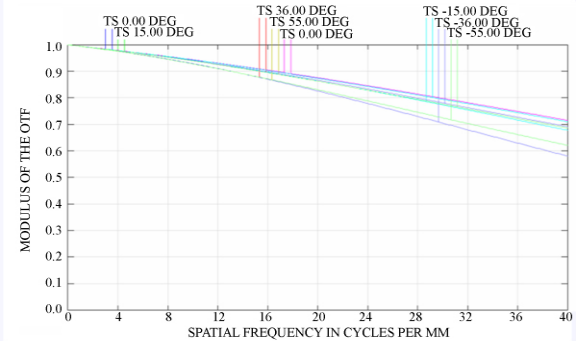
该成像仪的光学系统由两个结构组成，可以对双视场进行观测，其中前向视场和环形视场共用全景环形透镜和中继转像镜组。由于光学系统的特殊性，不能使用一般的镜筒结构。本文针对该成像仪的特点，设计了与之对应的机械结构，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)前向视场的传递函数

(a)MTF of forward field of view



(b)环形视场的传递函数

(b)MTF of ring field of view

图 13 光学系统的 MTF

Fig. 13 MTFs of optical system

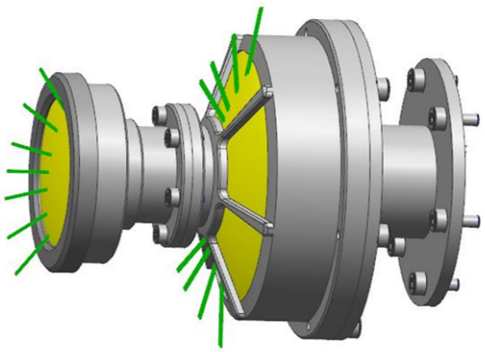


图 14 镜筒机械结构

Fig. 14 Mechanical structure of lens cone

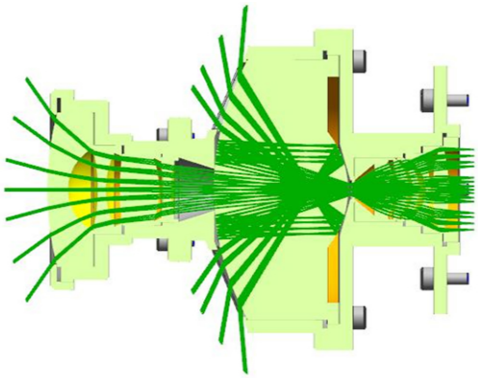


图 15 镜筒剖视图

Fig. 15 Section view of lens cone

如图 14 所示。镜筒分为 3 部分，分别装有前置透镜组、全景环形透镜、中继转像镜组，三部分之间用螺钉连接。为了不遮挡环形视场，装有环形透镜的镜筒一侧采用框架式结构与前置透镜组连接。镜筒的剖视图如图 15 所示，采用这种结构的镜筒，可以完成全景成像仪的装调。

6 结 论

本文结合中心投影和平面圆柱投影模式，设计了一种拥有双视场观测模式的全景成像仪。该成像仪的前向视场为 360°×(0°～55°)，环形视场为 360°×(55°～95°)，其中前向视场很好地弥补了折返式全景成像技术存在中央盲区的缺陷。该成像仪由前置透镜组、全景环形透镜、中继转像系统组成。系统所有的镜片均为球面镜，其中全景环形透镜仅由两个不同曲率的表面组成，通过在特定区域镀反射膜的方式改变透镜的折返特性，不存在难以加工的问题。对该光学系统进行了优化和仿真，结果显示，双视场的成像畸变均小于 2%，前向视场的 MTF 大于 0.55@40 lp/mm，环形视场的 MTF 大于 0.50@40 lp/mm，具有良好的成像质量。针对这种特殊的光学系统，设计了与之对应的机械结构。这种新型的全景成像仪可以应用于空间 3D 再现、无人化作业、军事侦察和虚拟环境导航等诸多领域，具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 周向东. 超大视场高分辨率全景环带光学系统设计[D]. 杭州：浙江大学，2016.

ZHOU X D. *Super Wide Angle High-resolution Panoramic Annular Lens Design*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

[2] 白剑，牛爽，杨国光，等. 全景光学环带凝视成像

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

技术[J]. 红外与激光工程，2006，35(3)：331-335.
BAI J，NIE SH，YANG G G，*et al*.. Panoramic optical annular staring imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2006，35(3)：331-335.（in Chinese）

[3] 白剑，黄治，侯西云. 单光学系统全景环带立体成像技术[J]. 红外与激光工程，2012，41(12)：3342-3348.
BAI J，HUANG ZH，HOU X Y. Design of panoramic stereo imaging with single optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2012，41(12)：3342-3348.（in Chinese）

[4] 李明磊，高欣圆，李广云，等. 地面三维激光扫描仪与外架数码相机间安置参数的高精度标定[J]. 光学 精密工程，2016，24(9)：2158-2166.
LI M L，GAO X Y，LI G Y，*et al*.. High accuracy calibration of installation parameters between 3D terrestrial laser scanner and external-installed digital camera[J]. *Opt. Precision Eng.*，2016，24(9)：2158-2166.（in Chinese）

[5] LU L J，HU X Y，SHENG C Y. Optimization method for ultra-wide-angle and panoramic optical systems[J]. *Applied Optics*，2012，51(17)：3776-3786.

[6] 李劲松，冯科. 高分辨 PAL 成像系统的设计研究[J]. 光子学报，2014，43(10)：1022002.
LI J S，FENG K. Research on design of high resolution PAL-based panoramic imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*，2014，43(10)：1022002.（in Chinese）

[7] HE Y，WANG L X，CAI Y. Monocular catadioptric panoramic depth estimation via caustics-based virtual scene transition[J]. *Journal of the Optical Society of America A*，2016，33(9)：1872-1879.

[8] PERNECHELE C. Hyper hemispheric lens[J]. *Optics Express*，2016，24(5)：5014-5019.

[9] 薛庆生. 星载多谱段双视场紫外大气探测仪[J]. 光学 精密工程，2016，24(9)：2101-2108.
XUE Q SH. Spaceborne multiband UV atmospheric sounder with two fields[J]. *Opt. Precision Eng.*，2016，24(9)：2101-2108.（in Chinese）

[10] WANG J H，LIANG Y CH，XU M. Design of panoramic lens based on ogive and aspheric surface[J]. *Optics Express*，2015，23(15)：19489-19499.

[11] LUO Y J，BAI J，ZHOU X D，*et al*.. Non-blind area PAL system design based on dichroic filter[J]. *Optics Express*，2016，24(5)：4913-4923.

[12] 张磊，刘东，师途，等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. 中国光学，2017，10(3)：283-299.
ZHANG L，LIU D，SHI T，*et al*.. Optical free-form surfaces testing technologies[J]. *Chinese Optics*，2017，10(3)：283-299.（in Chinese）

[13] 王孝坤. 大口径离轴凸非球面系统拼接检验技术[J]. 中国光学，2016，9(1)：130-136.
WANG X K. Measurement of large off-axis convex asphere by systemic stitching testing method[J]. *Chinese Optics*，2016，9(1)：130-136.（in Chinese）

[14] POWELL L. Panoramic lens[J]. *Applied Optics*，1994，33(1)：7356-7361.

[15] MARTYNOV V N，JAKUSHENKOVA T I，URUSOVA M V. New constructions of panoramic annular lenses：design principle and output characteristics analysis[J]. *SPIE*，2008，7100：71000.

[16] ZHOU X D，BAI J，WANG CH，*et al*.. Comparison of two panoramic front unit arrangements in design of a super wide angle panoramic annular lens[J]. *Applied Optics*，2016，55(12)：3219-3225.

[17] 田志辉，苗静，毛新越，等. LED 显示屏相机采集的渐晕校正[J]. 发光学报，2016，37(8)：1008-1013.
TIAN ZH H，MIAO J，MAO X Y，*et al*.. Calibration of camera vignetting surface on LED display screen[J]. *Chinese Journal of Luminescence*，2016，37(8)：1008-1013.（in Chinese）

[18] 夏春秋，钟兴，刘春雨，等. 高分辨率 4*f* 传像系统分辨率的影响因素分析[J]. 光学 精密工程，2016，24(7)：1573-1581.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

XIA CH Q, ZHONG X, LIU CH Y, *et al*.. Analysis of influence factors of resolution in high-resolution 4*f* imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1573-1581. (in Chinese)

作者简介：

王晓恒(1993－)，**男，山东济宁人，硕士**，2015**年于聊城大学获得学士学位，主要从事光学设计、检测及加工方面的研究**。E-mail: wangxiaoheng0013@163.com

通讯作者：

张 刘(1978－)，**男，安徽蚌埠人，博士，教授**，2001**年**、2003**年**、2007**年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位，主要从事卫星姿态测量与控制、空间对接测量技术与空间遥感成像系统设计与仿真技术等方面的研究**。E-mail: zhangliu@jlu.edu.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net