

doi:10.3788/gzxb20144310.1022002

# 高分辨 PAL 成像系统的设计研究

李劲松,冯科

(中国计量学院 光电学院,杭州 310018)

**摘 要:**基于全景环形透镜的成像技术是全景成像中的一种最具潜力的成像方式,具有高分辨率的长焦距全景环形透镜成像系统光学结构较复杂,结构设计是首要解决的问题.本文根据全景环形透镜成像系统的光路结构及成像特性,详细讨论了全景环形透镜和转像透镜组两部分的设计方法,分别设计了单块全景环形透镜和复杂化全景环形透镜,并对它们的像差特性做了对比,分析了它们之间的光路衔接条件和像差补偿方案.该设计采用小尺寸 CCD 离轴扫描接收环形像,同时分析了这种扫描机构的可行性.系统要求在 300 m 处需分辨 250 mm 大小的物体,通过计算合理地选择了系统焦距和 CCD 型号并制定了一套技术指标.最终设计出了焦距 8 mm,  $F/\#$  3.2, 侧向视场  $40^\circ\sim 100^\circ$  的高分辨全景环形透镜成像系统,系统由三胶合结构的全景环形透镜和 8 片 6 组的转像透镜组构成,所有表面均为球面.该系统全视场的调制传递函数在 80 lp/mm 处均高于 0.5,最大视场像面的相对照度高于 0.95,全视场  $f-\theta$  畸变在  $\pm 3\%$  以内,该设计很好地满足了使用要求.

**关键词:**全景成像;镜头设计;高分辨;全景环形透镜; $f-\theta$  畸变;光路衔接;像差补偿

中图分类号:O435;TH706

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)10-1022002-6

## Research on Design of High Resolution PAL-based Panoramic Imaging System

LI Jin-song, FENG Ke

(College of Optics and Electronics, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Imaging technology based on Panoramic Annular Lens (PAL) is the most potential imaging method, PAL-based imaging system with long focus and high resolution has complicated optical structure, structural design is the primary problem. On the basis of optical path structure and imaging properties of the PAL-based imaging system, the design method of PAL and relay lens was discussed in detail, single PAL and complicated PAL were modeled, the aberration characteristics between them were compared, and the optical path connection condition and aberration compensation project between them was analysed. In this design, image was received by CCD with small size through off-axis scanning, meanwhile, the feasibility of the scanning mechanism was stated. According to the requirement of distinguishing 250 mm object at 300 m, system focus and CCD type were chosen reasonably by calculating, and a set of technical parameters were determined. A high resolution PAL-based imaging system whose focal length was 8 mm, relative aperture is  $F/\#$  3.2, lateral field is  $40^\circ\sim 100^\circ$  has been designed finally, which consisted of three agglutination PAL and relay lens of 8 pieces and 6 groups, all surfaces were spherical and all field MTF at 80 lp/mm were higher than 0.5, illumination uniformity of image was higher than 0.95,  $f-\theta$  distortion of all field was within  $\pm 3\%$ , the design meets the usage requirement well.

**Key words:** Panoramic imaging; Lens design; High resolution; Panoramic annular lens;  $f-\theta$  distortion; Optical path connection; Aberration compensation

**OCIS Codes:** 220.0220; 220.1000; 220.2740; 220.3620

基金项目:国家自然科学基金(No. 61379027)资助

第一作者:李劲松(1969-),女,副教授,博士,主要研究方向为光学信息处理与光学设计. Email: lijinsong@cjl. edu. cn

通讯作者:冯科(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学系统设计. Email: fengke1989@126. com

收稿日期:2014-01-21;录用日期:2014-06-16

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

对于全方位 360° 目标的信息获取, 传统的广角成像镜头已经无法满足要求, 于是全景成像技术应运而生. 全景成像是指采用特殊的成像装置获得水平和垂直方向大于 180° 的半球视场或者水平方向 360°、垂直方向一定角度的视场<sup>[1]</sup>, 这种成像方式能够提供环境和目标的全方位信息. 该技术起源于 80 年代美国国防部对大视场全天候军事目标探测的需求, 并且最先在军事领域得到了应用.

全景环形透镜 (Panoramic Annular Lens, PAL) 成像因其结构紧凑、集成度高等特点已成为全景成像技术中最具发展潜力的一种全景成像方式. 目前, PAL 成像技术已在安防监控、机器视觉<sup>[2]</sup>、医用内窥和管道探测<sup>[3]</sup>等诸多领域有重要应用. 在实现全景成像的同时, 分辨率也是成像系统的一个重要的光学性能参数, 系统拥有高分辨率就能够识别更远的距离和更小的物体. 目前大部分民用及工业领域的 PAL 成像系统的设计与应用已很成熟<sup>[4-6]</sup>, 但其分辨率较低, 在某些高分辨场合, 例如远景监测、远距离目标探测, 则需要高分辨的 PAL 成像系统来实现, 高分辨意味着长焦距, 系统的结构通常比较复杂, 系统设计难度较高. 在某些高端应用场合, 高分辨 PAL 成像系统的光学结构设计具有重要意义<sup>[7]</sup>. 本文设计了单块 PAL 和复杂化 PAL, 对它们的像差特性做了对比, 分析了它们之间的光路衔接条件和像差补偿方案.

## 1 PAL 成像系统的光学结构

图 1 给出了 PAL 的光学结构及成像光路<sup>[8]</sup>. 图中物平面 (管道内壁) 一物点  $Q$  发出的光束经过 PAL 和中继转像透镜的成像光路, 其中 PAL 包含四个表面, 1 和 4 是折射面, 2 和 3 是反射面, 光束依次通过 1、2、3、4 四个表面, 从表面 4 出射后在 PAL 后方形成虚像  $Q'$ .

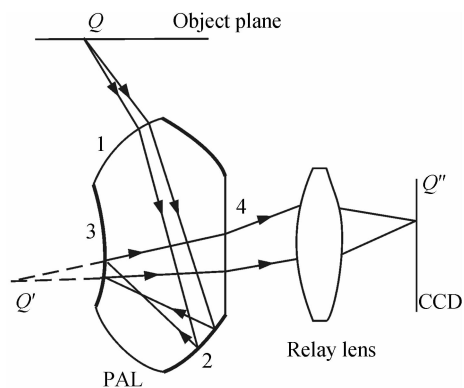


图 1 PAL 的光学结构及成像光路

Fig. 1 Optical structure and imaging path of PAL

$Q'$ , 该虚像再通过中继转像透镜变换成实像  $Q''$ , 接着被位于像面的 CCD 所接收.

PAL 成像方式为平面圆柱投影成像<sup>[9]</sup>, 即将周围 360°, 侧向一定角度的圆柱形视场景物映射到二维平面上, 得到的图像是一个环形像. 用这种成像方式的 PAL 成像系统, 通常都满足  $f-\theta$  成像特性<sup>[10]</sup>, 这样得到的环形图像能够方便地复原成矩形图像<sup>[11]</sup>. 另外, PAL 成像光路一般都满足准远心结构<sup>[12]</sup>, 所以其像面照度均匀性较高是其一大特点.

## 2 PAL 成像系统设计方法

对于短焦距的 PAL 成像系统, 系统像差不难校正, 通常采用单块 PAL 就能把系统像质校正到满意的结果, 系统像差校正主要由后面的转像透镜组来承担. 而 PAL 成像系统的焦距较长时, 色差、二级光谱、像散和场曲将会变得很大, 像差校正难度加大, 单块 PAL 已经无法使系统获得满意的像质, 这时需将 PAL 复杂化, 让 PAL 承担更多的像差校正量. 在长焦光学系统里, 二级光谱是阻碍成像质量提高的一个重要因素, 如果像质需要达到衍射极限, 则二级光谱就必须完全消除, 目前只有采用萤石等特殊玻璃或衍射光学元件才能达到该目的<sup>[13]</sup>. 本文光学系统采用的是 CCD 来接收光学影像, 属于光学系统采样受限 (即非衍射极限光学系统), 光学系统的像质只需满足 CCD 的分辨率即可, 二级光谱是一种单项几何像差, 其大小间接地反映在系统点列图半径和 MTF 中, 通常光学系统的 MTF 在 CCD 奈奎斯特极限频率处的值高于 0.5 即可认为是像质优良的, 所以本系统对二级光谱只是尽量减小, 使系统像质达到指定的要求, 因此系统中无需采用昂贵的萤石.

### 2.1 PAL 的设计

图 2 给出了单块 PAL 和复杂化 PAL 的光学结构图, 其中复杂化 PAL 是在单块 PAL 中插入一胶合面, 把出射面做成平面, 再胶合一个平凸透镜而得到的.

经过 Zemax 仿真与优化可知, 对于单块 PAL, 第 1 面的半径主要用来校正  $f-\theta$  畸变, 通过优化  $f-\theta$  畸变可控制在  $\pm 2\%$  以内. 第 2 面的半径是四个面中最小的, 对场曲和  $f-\theta$  畸变的影响很大, 但因其还影响着光束在第 3、4 面的正常投射以及内边缘视场的光束在第 1 面的正常入射, 所以该面半径变化范围不大, 其和第 4 面的半径是一起变化的, 用来校正部分场曲和  $f-\theta$  畸变. 第 3 面半径对像散和慧差影响最大, 对场曲影响也很大, 精确地调整该面半径可以大大减小像散和慧差. 另外, 长焦距 PAL 的大出瞳直径导致出射面到光阑的距离很短, 如果增大光阑距离, 则部分光线将会被第 2 面阻拦, 所以这里不把光阑距离作为优化变量.

根据折射面的初级场曲公式  $S_{IV} = J^2 (n' - n) /$

$n'nr$ 和反射面的初级场曲公式  $S_{IV} = 2J^2/nr$  可知,第 1、3、4 面产生正的  $S_{IV}$ ,第 2 面产生负的  $S_{IV}$ .单块 PAL 存在正的  $S_{IV}$ ,对应着很大的负向 Petzval 场曲  $x'_p$ ,这也是影响像质最重要的像差.单块 PAL 无法校正轴向色差和垂轴色差,只能选用色散小的玻璃来减小这两种像差.

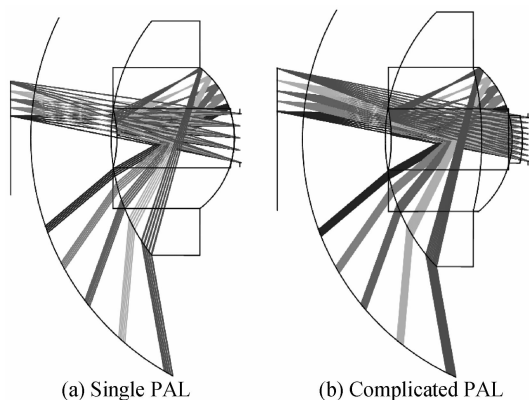


图 2 单块 PAL 和复杂化 PAL 的光学结构

Fig. 2 Optical structure of single PAL and complicated PAL

对于长焦 PAL 成像系统,单块 PAL 的像差很大,需要将其复杂化,目的是增加设计自由度、减小像差并改变像差符号,达到预定的像差校正状态,便于和转像透镜组进行像差补偿.

转像透镜组是正光组,可以把它看做一个薄透镜系统.对于正光焦度的薄透镜系统,通常具有负向 Petzval 场曲和轴向色差.当 PAL 光路正向追迹,转像透镜组光路反向追迹,两者轴向像差是叠加的<sup>[14]</sup>.所以像差补偿时 PAL 的 Petzval 场曲应该弯向右侧,而轴向色差应为正值,且色差值最好不超过 0.2 mm.对于慧差、像散、垂轴色差,则希望两个光组先尽量各自校正到最小.

对于图 2 中的复杂化 PAL,根据 Zemax 中的赛德尔像差系数分布,第一面、出射面和两个胶合面对垂轴色差有影响,第二面(第一反射面)、第三面(第二反射面)和出射面对像散的影响最大.采用 F2、ZK7 和 LAF3 这三种玻璃,其中 F2 和 ZK7 折射率相近、色散差较大,根据初级垂轴色差公式  $n'u'\Delta y_{FC}' = -\sum hh_z\varphi/\nu$ ,改变胶合面两边光焦度分配,即可改变垂轴色差,即弯曲两者之间的胶合面可以减小系统垂轴色差;ZK7 和 LAF3 存在较大折射率差,可引入一定的像散来减小整个系统的像散.出射面对场曲和像散均有较大影响,弯曲出射面能使像散被校正的同时 Petzval 场曲也大大减小.

图 3 给出了由 Zemax 模拟得到的与图 2 对应的单块 PAL 和复杂化 PAL 的场曲曲线图,该图是在尽量减小像散的情况下得到的场曲曲线特性图,同时也反映了两种结构校正场曲和像散的可能性.图中单块

PAL 和复杂化 PAL 的  $\Delta l_{FC}$ (近轴轴向色差)分别为  $-0.6$  mm 和  $0.1$  mm,相比之下复杂化 PAL 的  $\Delta l_{FC}$  减小了很多,且正的  $\Delta l_{FC}$  有利于像差补偿.单块 PAL 场曲弯向左侧,边缘视场存在  $-3.4$  mm 的子午场曲和  $-2$  mm 的像散;复杂化 PAL 的场曲弯向右侧,在  $0.7$  视场处消像散,最大视场的场曲为  $0.4$  mm,相比单块 PAL 场曲减小了很多,同时场曲的弯向有利于像差补偿.

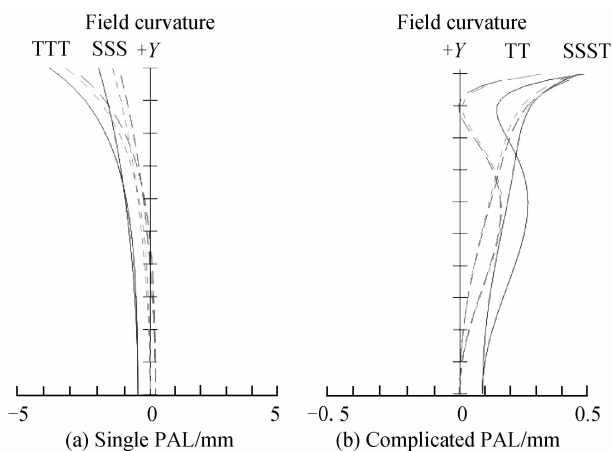


图 3 单块 PAL 和复杂化 PAL 的场曲

Fig. 3 Field curve of single PAL and complicated PAL

## 2.2 光路衔接

图 4 给出了 PAL 和转像透镜组的光路衔接示意图.图中, $D$  和  $D'$  分别为 PAL 的入瞳直径和出瞳直径,

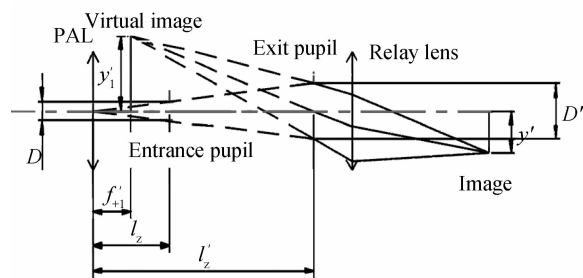


图 4 PAL 与转像透镜组的光路衔接

Fig. 4 Optical path connection between PAL and relay lens group

$l_z$  和  $l'_z$  分别为入瞳和出瞳到 PAL 主面的距离, $y'_1$  和  $y'$  分别为 PAL 虚像的像高和系统实像的像高, $f_1$  为 PAL 的焦距.PAL 的焦距为正,按照近轴高斯光学,其像方主面在其虚像的左方,两者距离等于其焦距.PAL 的入瞳与出瞳满足物像共轭关系,即

$$\frac{1}{l'_z} - \frac{1}{l_z} = \frac{1}{f_1} \quad (1)$$

由式(1)可得

$$l'_z = -\frac{l_z f_1}{l_z - f_1} \quad (2)$$

此时,PAL 的光瞳放大率为

$$\beta_z = \frac{l'_z}{l_z} = \frac{l_z - f_1}{f_1} \quad (3)$$

PAL 和转像透镜组之间的光路衔接需满足光瞳匹配、光束孔径匹配和成像视场匹配三个条件。

光瞳匹配是指 PAL 模块的出瞳位置应和转像透镜组的入瞳位置一致。由于长焦 PAL 的出瞳距离很短,这就表明孔径光阑通常是转像透镜组的第一面。

光束孔径匹配指转像透镜组的光束孔径应和 PAL 的相同,对于转像透镜组来说,物在有限远,光束孔径用物方数值孔径 NA 表示,它与 PAL 入瞳直径之间的关系为

$$NA = \frac{D'}{2(l'_z - f'_1)} = \frac{\beta_z \cdot D}{2(l'_z - f'_1)} = \frac{D}{2f'_1} \quad (4)$$

成像视场匹配指的是转像透镜组的物方视场角应和 PAL 的像方视场相同,因此 PAL 和转像透镜组的物方视场角  $\theta$  和  $\theta'$  之间的关系为

$$\tan \theta' = \frac{y'_1}{l'_z - f'_1} = \frac{f'_1 \cdot \theta}{l'_z - f'_1} = \frac{f'_1}{d'_z} \cdot \theta \quad (5)$$

式中  $d'_z = l'_z - f'_1$ , 为 PAL 出瞳到 PAL 虚像面的距离。

### 2.3 转像透镜组的设计

要设计转像透镜组,首先应该确定其技术参数,包括焦距、视场、孔径、放大倍率、物距等。PAL 设计完成后,其焦距是已知的,根据式(4)和(5),转像透镜组的光束孔径和视场就可以确定下来。

PAL 和整个 PAL 成像系统都是满足  $f\theta$  成像的,所以当 PAL 焦距确定后,转像透镜组的放大倍率是个定值,即

$$\beta = \frac{y'_1}{y_1} = \frac{f'_1 \theta}{f_1 \theta} = \frac{f'_1}{f_1} \quad (6)$$

式中  $f'$  为 PAL 成像系统的焦距。

根据双光组的焦距合成公式,  $f'$ 、 $f_1$  和转像透镜组的焦距  $f'_2$  之间满足

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1}\right) \quad (7)$$

式中  $d$  为 PAL 主面到转像透镜组主面的距离。分析式(7)可知,  $f'$  和  $f_1$  确定后,  $f_2$  并不是唯一的,它随着  $d$  的增大而增大,不同的  $d$  对应不同的  $f_2$ 。而  $d = l'_z + d_{sr}$ , 其中  $d_{sr}$  为孔径光阑到转像透镜组主面的距离,由此可知  $f_2$  的取值由  $d_{sr}$  决定。

在选择  $d_{sr}$  大小时,需要考虑像面照度和系统总长两个因素。

像面照度随着像方视场角余弦的四次方下降,当引入像差渐晕,照度则随着视场三次方下降<sup>[15]</sup>。在实例设计中发现,转像透镜组的最大物方视场角在  $16^\circ$  左右,最大像方视场角只要不超过  $13^\circ$ ,像面的最小相对照度就不低于 0.9。所以,  $d_{sr}$  对像面照度的均匀性影响不大,经过 Zemax 软件模拟与计算,  $d_{sr}$  只要大于  $1/3$  的  $f'_2$  就能满足像面照度均匀性的要求,系统并不需要严格设计成像方远心。另外,转像透镜组的共轭距与  $f'_2$  成正比,  $f'_2$  越大,共轭距就越长,系统总长也会越

长。因此,在确保像面照度均匀性的前提下,选取较小的  $d_{sr}$  有利于缩短系统总长。

确定了转像透镜组的技术指标后,就应该根据视场、孔径等选取性能相近的专利镜头做初始结构。但是光阑在第一面且相近性能的物镜结构很少见,经过分析,转像透镜组的作用和反摄远物镜的后组相同,前组压缩视场角,生成虚像,后组将虚像转换成缩小的实像,因此其初始结构也可参照反摄远物镜的后组结构。

## 3 设计实例

### 3.1 确定技术指标

本文设计的 PAL 成像系统需要在 300 m 内分辨出 250 mm 大小(人头部的宽度)的物体,即系统单线角分辨率须满足

$$\omega = \frac{\sigma}{f} \leq \frac{d_{\text{head}}}{l} = \frac{250 \text{ mm}}{300 \text{ m}} = 0.833 \text{ mrad} \quad (8)$$

式中  $d_{\text{head}}$  为人体头部的宽度,  $l$  为目标到成像系统的距离,  $\sigma$  为 CCD 的最小像元直径,  $f$  为 PAL 成像系统的焦距。根据式(8)可知,为提高光学系统的角分辨率,可以减小  $\sigma$  或增大  $f$ 。但是  $\sigma$  受到 CCD 工艺条件的限制,不可能太小;而  $f$  太大,光学系统设计难度会很大而且结构很复杂。综合考虑取  $\sigma = 6.45 \mu\text{m}$ , 取  $f = 8 \text{ mm}$ ,  $F/\#$  取 3.2。此时入瞳直径  $D$  即为 2.5 mm, 系统角分辨率  $\omega = 0.8 \text{ mrad}$ 。

根据光学系统衍射极限角分辨率公式  $\delta\theta = 1.22\lambda/D$ ,  $\lambda$  取主波长  $0.587 \mu\text{m}$ , 可求得该系统  $\delta\theta$  为  $0.286 \text{ mrad}$ , 对应的单线角分辨率为  $0.143 \text{ mrad}$ 。即使考虑到实际设计以及加工因素的影响,镜头成品也很容易获得  $0.8 \text{ mrad}$  的角分辨率。

所设计的 PAL 成像系统,其侧向视场范围为  $40^\circ \sim 100^\circ$ , 由于满足  $f\theta$  成像,像高与视场角成正比,由此可计算得出最小视场像高  $y'_{\text{min}}$  为 5.585 mm, 最大视场的像高  $y'_{\text{max}}$  为 13.963 mm, 环形像的径向宽度为  $13.9635 - 5.585 = 8.378 \text{ mm}$ 。如果 CCD 与系统光轴同轴放置接收环带像的话,则 CCD 的短边长度应大于  $2 \times 13.963 = 27.926 \text{ mm}$ , 需要使用超大尺寸的 CCD 来接收环带像。而超大尺寸的 CCD 价格昂贵,所以这里考虑采用小尺寸 CCD 离轴放置接收环带像,具体放置如图 5。CCD 在不同方位接收若干张图像,再通过拼接形成完整的全景图像。从图中可知, CCD 的长边  $h$  应大于环带像的径向宽度。

为提高扫描效率,可以使用多个 CCD 对称放置扫描,例如将 3 个 CCD 按照  $120^\circ$  的间隔扇形对称放置,将 3 片 CCD 集成在一块电路板上,构成扫描板。采用高性能电机和控制器带动和控制扫描板的旋转,电机可执行反复的启停操作。额外采用数字编码器输出脉冲信号来精确计算位置和速度,电机控制器集成位置、

速度和电流控制功能,可以驱动数字编码器来控制电机.根据 CCD 相邻拍摄位置的旋转角度和 CCD 帧率来设置电机的启停周期和转速.采用高性能嵌入式 DSP 处理器完成电机控制、图像采集、数据传输和图像处理.

已经计算得出理论上的环带像径向宽度为 8.378 mm,而 2/3 inch 的 CCD 对角线为 11 mm,长边为 8.8 mm,刚好能够覆盖环带像的径向宽度.

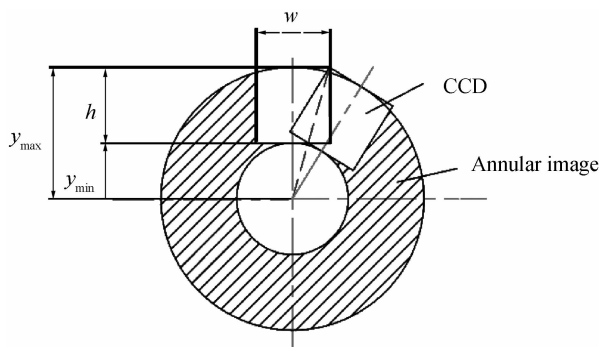


图 5 CCD 与环带像的位置关系

Fig. 5 The location relationship between CCD and annular image

根据分析比较,采用了大恒光电的一款 CCD,型号为 DH-ITS1410G,大小为 2/3 inch,像素数为  $1\,392 \times 1\,024$ ,最小像元尺寸为  $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$ .该款 CCD 的奈奎斯特极限频率为  $1\,000 / (2 \times 6.45) = 78 \text{ lp/mm}$ ,这里取  $80 \text{ lp/mm}$  作为极限频率的评价标准,对于像质优秀的镜头,全视场的 MTF 在极限频率处应高于 0.5.

综上,得出了系统的各项技术指标,如表 1.

表 1 光学系统技术指标

Table 1 Parameters of optical system

Working waveband	Visible light
Focus/mm	8
F/#	3.2
Field	$(40^\circ \sim 100^\circ) \times 360^\circ$
CCD size	2/3 inch
MTF of all field(80lp/mm)	$>0.5$
Back working distance/mm	$>20$
Relative illumination	$>0.9$
F- $\theta$ distortion	$\pm 3\%$ 以内

### 3.2 设计结果分析

图 6 为高分辨 PAL 成像系统的最终设计结果,采用 Zemax 光学软件完成.该系统光学总长(系统第一面到像面距离)为 141.55 mm,后工作距离为 26.292 mm,较长的后工作距离保证了其它零件的安装空间.系统光路为准远心光路,像方主光线最大入射角为  $3.7^\circ$ .

系统的 PAL 由三片透镜胶合而成,其中第二个胶合面为平面,方便加工.该 PAL 有两个反射面区域,分别是第一片透镜左表面的中心区域和第二片透镜右表面的非中心区域,而其他表面均为折射面,其中反射面

镀反射膜,折射面镀增透膜.光阑位于转像透镜组之前,转像透镜组由 8 片透镜构成,含 2 个双胶合透镜.

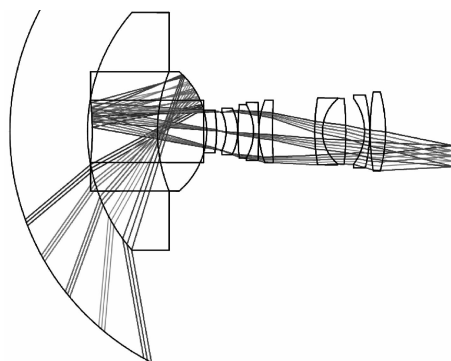


图 6 光学系统结构

Fig. 6 Optical system structure

图 7 为系统 MTF 曲线,图中黑色曲线为衍射极限 MTF 曲线,其它颜色曲线分别代表各视场子午方向和弧矢方向的 MTF 曲线.由图可知,各视场的 MTF 曲线非常集中,其在  $80 \text{ lp/mm}$  处的 MTF 值均高于 0.5,且 MTF 值的一致性在 0.1 以内,像质良好.

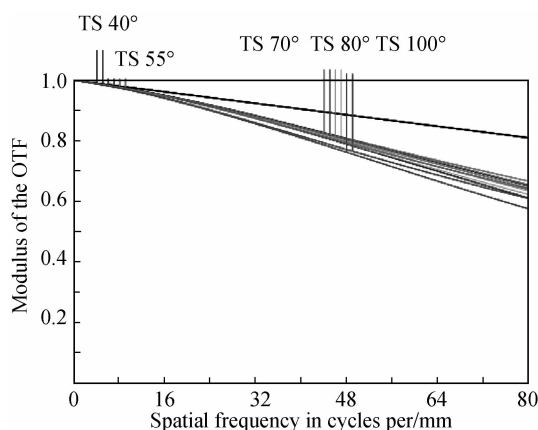


图 7 系统 MTF 曲线

Fig. 7 System MTF Curve

图 8 为系统的点列图.由图可知,最大视场处的弥

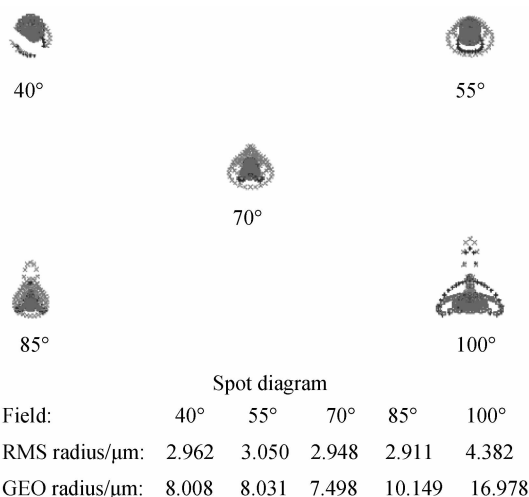


图 8 系统点列图

Fig. 8 System spot diagram

散斑 RMS 半径为  $4.382 \mu\text{m}$ , 在一个像元直径之内, 成像质量良好。

另外, 系统在  $84^\circ$  视场时有最大  $f\theta$  畸变值  $-2.8\%$ , 在所要求的  $\pm 3\%$  以内。像面相对照度在最大视场处的值为 0.95, 高于指标。因此,  $f\theta$  畸变和像面照度均匀性均满足指标。

## 4 结论

本文主要对高分辨 PAL 成像系统的光学结构设计做了研究, 分别研究了长焦 PAL 和转像透镜组两部分的设计方法。对两者初始结构的建模与优化做了分析, 并对两者之间的像差补偿和光路衔接做了说明。根据远距离高分辨的使用要求, 制定了一套满足使用要求的技术指标, 完成了焦距 8 mm, 侧向视场  $40^\circ \sim 100^\circ$ ,  $F/\# 3.2$ , 工作在可见光波段的高分辨 PAL 成像镜头的实例设计。经过反复优化, 最终得到的系统像质优良, 全视场 MTF 在 80 lp/mm 处均高于 0.5, 系统像面照度均匀且  $f\theta$  成像特性良好。

### 参考文献

- [1] ZHI Huang, JIAN Bai, XI Yun-Hou. Design of panoramic stereo imaging with single optical system[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(6):6085-6096.
- [2] BAI Jian, NIU Shuang, YANG Guo-guang. Panoramic optical annule staring imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(3):331-335.  
白剑, 牛爽, 杨国光. 全景光学环带凝视成像技术[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(3):331-335.
- [3] ZHAO Lie-feng, FENG Hua-jun, BAI Jian, *et al.* Panoramic optical annular staring inspection system for evaluating the inner surface of a pipe[C]. Proc. SPIE 6838, Optoelectronic Devices and Integration II, 68381P, 2008.
- [4] DERRIEN S, KONO L K. Approximating a single viewpoint in panoramic imaging devices[C]. IEEE, 2000, 3931-3938.
- [5] FANG Qi-yin, JAMAL DEEN M, ARMSTRONG D, *et al.* Development of a catadioptric endoscope objective with forward and side views[J]. *J Biomed Optics*, **16**(6):066015.
- [6] SOLOMATIN V A. A panoramic video camera[J]. *Optical Technology*, 2012, **74**(12):815-817.
- [7] NIU Shuang, BAI Jian, HOU Xi-yun, *et al.* Design of a panoramic annular lens with a long focallength[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(32):7850-7857.
- [8] MA Tao, YU Jing-chi, and LIANG Pei, Design of a freeform varifocal panoramic optical system with specified annular center offield of view[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(5):3843-3853.
- [9] WANG Dao-yi, HUANG Dao-wei, WU Min-xian, *et al.* Principles and characteristics of panoramic annular lens[J]. *Optical Technology*, 1998, **1**(1):10-12.  
王道义, 黄大为, 邬敏贤, 等. 全景环形透镜原理与特点剖析[J]. 光学技术, 1998, **1**(1):10-12.
- [10] JIANG Lun, HUANG Wei, XU Wei-cai. Panoramic lens for full view monitoring[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(1):1-4.  
江伦, 黄玮, 许伟才. 周视监控全景镜头设计[J]. 应用光学, 2012, **33**(1):1-4.
- [11] HOU Hui-jie, BAI Jian, YANG Guo-guang. The research on 2D plane unfold algorithm of panoramic annular lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11):1686-1688.  
侯慧杰, 白剑, 杨国光. 全景环形透镜二维平面成像展开算法研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(11):1686-1688.
- [12] HUI Dong, ZHANG Mei, GENG Zheng, *et al.* Design for high performance PAL-based imaging systems [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(21):5310-5317.
- [13] QU En-shi, YANG Zhen, WANG Gang, *et al.* Combining binary optics with achromats to revise secondary spectrum [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11):2274-2278.  
屈恩世, 杨正, 汪岗, 等. 利用二元光学和消色差复合透镜组合校正二级光谱色差[J]. 光子学报, 2008, **37**(11):2274-2278.
- [14] 袁旭沧. 光学设计[M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 1988:164-166.
- [15] LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-duo, LIU Xin-yue, *et al.* Optical design of a wide spectral fish-eye lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11):1312-1316.  
李宏壮, 张振铎, 刘欣悦, 等. 一款宽光谱鱼眼镜头的设计[J]. 光子学报, 2012, **41**(11):1312-1316.