

· 光学设计 ·

## 转折式高分辨率小孔径镜头设计

王雷

(公安部第一研究所, 北京 100048)

**摘要:** 为辅助小型机器人的双目视觉系统, 对中距离目标进行识别与定位, 设计了一种安装在机械臂等狭窄空间内的小孔径镜头。在镜头光阑与第一个镜片之间加入反射镜将光路进行 $90^\circ$ 转折后可以使镜头的主光路与开孔表面平行以便于镜头的固定与安装。这种转折式小孔镜头的焦距长 $12\text{ mm}$ , 最终设计结果的光学性能分析表明, 其 $MTF$ 在 $110\text{ lp/mm}$ 的空间频率处满足要求, 是一款能够与 $720\text{ p}$ 高清芯片相匹配的高分辨率小孔镜头。

**关键词:** 光学设计; 小孔镜头; 转折式; 高分辨率

中图分类号: O657.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-01-0022-04

## Design of Periscopic High Resolution Pinhole Lens

WANG Lei

(The First Research Institute of Ministry of Public Security, Beijing 100048, China)

**Abstract:** For assisting a binocular visual system of a small robot to recognize and locate the targets in middle distance, a pinhole lens installed in narrow space such as mechanical arms is designed. The stop is located in front-end of pinhole lens, and a piece of mirror is added behind the stop to turn the optical path to  $90^\circ$ , so the main optical path of the lens is parallel to the surface of the aperture and the lens is easy to be fixed and installed. The focal length of the periscopic aperture lens is  $12\text{ mm}$ . Optical characteristic analysis results of the final design show that the requirements can be met when  $MTF$  is at  $110\text{ lp/mm}$  space frequency. And it is a high resolution aperture lens matching  $720\text{ p}$  high resolution sensor.

**Key words:** optical design; pinhole lens; periscopic; high resolution

针对小型机器人的双目视觉系统要求设计了一种对中距离目标进行观察与识别的小孔镜头。普通小孔镜头的焦距非常短, 一般只有几毫米。而对于需观察中距离的情况, 如距离为 $10\text{ m}$ 的目标, 普通小孔镜头的焦距就显得不够长了。但是, 加长小孔镜头焦距的同时会使镜头的光学长度变长, 体积增大, 对镜头在小型设备中的安装极为不便。因此, 参考一种微型数码相机里摄影镜头的设计方法<sup>[1]</sup>, 如图1所示。将小孔镜头设计成转折式结构, 即将镜头的主光路转折 $90^\circ$ 。这样, 小孔镜头的主要光学长度都集中在与入光孔表面平行的方向, 从而使应用这种长焦小孔镜头的设备能够做的更薄, 便于安装。



图1 数码相机里的转折式摄影镜头

### 1 光学系统设计

#### 1.1 小孔镜头的主要特点

小孔镜头光学结构上的最大特点是光阑位于系

统最前端且直径非常小<sup>[3]</sup>。光阑完全位于一侧的结构使得镜头的垂轴像差,如慧差、垂轴色差、畸变等非常难以消除,是一种增大设计难度的光学结构<sup>[4]</sup>。小孔镜头的光阑直径很小,一般不会超过2 mm,有的行业甚至规定其直径不能超过1.2 mm,也因此将这种小光阑在机械结构上称为“小孔”。此外,又因为小孔镜头的相对孔径也都比较小,所以为了增强小孔镜头的弱光探测能力而增大相对孔径的方法只有减小镜头焦距一种途径,这也是为什么小孔镜头的焦距普遍较短的原因之一。所以设计虽然是针对中远距离目标的小孔镜头设计,但其焦距也不会像传统意义上的长焦镜头一样达到百毫米。由以上分析可见,小孔镜头的主要特点都体现在其光阑上,其经典光学结构如图2所示。

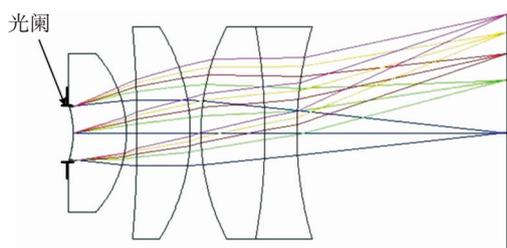


图2 小孔镜头的经典光学结构

## 1.2 转折式高清小孔镜头的设计指标

镜头的指标可分为基本指标与成像指标两大类。基本指标包括镜头的焦距、入瞳直径、相对孔径、视场角等几何参数。成像指标是指对镜头成像质量的要求,一般情况下使用镜头的 $MTF$ (调制传递函数)与畸变来表征,前者反映了镜头的成像分辨率,后者体现了画面的变形程度。

镜头的主要指标由与其配合使用的探测器芯片的规格来确定。以著名探测器芯片厂商豪威科技公司(OmniVision)提供的一款支持720 p高清视频信号的芯片为例,其型号为OV2715,感光靶面长5.856 mm,宽3.276 mm。镜头的视场用像面尺寸表征,对应为芯片的靶面对角线长度,为6.7 mm。根据对中距离目标进行观察与拍摄的应用需求,要求该镜头对10 m距离处人物所成的像占据整个像面的比例为2/3,再结合芯片的靶面尺寸,可计算出镜头的焦距为12 mm。镜头的光阑直径取2 mm,以得到较大的相对孔径。另外,镜头的体积不宜过大,要求其直径小于10 mm。光阑与第一片透镜之间应当有足够的距离用于放置反射镜,这一距离称为镜头的前截距,通

过视场角,镜片直径与前截距之间的关系换算,可以得到前截距值约为12 mm。最后,根据720 p的像素规格与靶面尺寸,计算得出镜头 $MTF$ 的特征频率为110 lp/mm。镜头的畸变值以人眼不能明显感觉到图像有形变为基准,不得大于4%<sup>[5]</sup>。转折式小孔镜头的所有指标列出如下:

波段:400~700 nm;外形直径:<10 mm;焦距:12 mm;入瞳直径:2 mm;视场:6.7 mm;前截距:12 mm;光路转折角度:90°; $MTF$ :0视场, $MTF$ 在110 lp/mm处不小于0.3,在55 lp/mm处不小于0.5;0.7视场, $MTF$ 在30 lp/mm处不小于0.5;畸变:<4%。

## 1.3 设计过程

由于平面反射镜在光学系统中并不引入任何像差,所以在实际设计中,这种光路90°转折的结构都需要展开。即首先在没有光路转折的情况下将镜头设计好,使其符合设计指标,然后在光路的适当位置加入反射镜,完成最终结构。

具有一定前截距长度的小孔镜头,其结构与目镜的倒置形式相同,所以应在目镜的镜头库中选取一种最紧凑的样式作为设计的初始结构。以著名光学设计软件研发商Radiant Zemax公司提供的镜头资料库中的一款目镜为初始结构<sup>[6]</sup>,将其主要参数按倒置的形式输入至软件Zemax中作为优化的初始结构。这款目镜的焦距长于小孔镜头焦距,所以在设计时首先应将焦距进行缩放,使其与设计指标相符。视场按照芯片靶面对角线长度直接在软件中设置为像高即可。目镜的像差校正以轴外像差为主,主要校正像散与垂轴色差,而场曲一般不会加以校正<sup>[7-8]</sup>。与目镜不同,以电子成像为主要应用的小孔镜头需对全部七种像差都要校正,即使因结构不对称而无法得以消除的慧差、垂轴色差以及畸变等垂轴像差,也要加以控制使其不会过于影响成像效果<sup>[9]</sup>。由以上分析得出的像差校正策略与优化步骤如下:

(1)输入初始结构的各项结构参数以及波段、视场、入瞳直径、前截距等基本参量,设置镜片曲率半径、厚度等项为变量,配置焦距、各视场成像光斑均方根半径等项为评价函数,运行软件优化程序。

(2)增加后截距、玻璃型号、空气层厚度为变量,删除上一步设置的评价函数,设置焦距、各像差、各视场 $MTF$ 为评价函数,再次运行优化程序。

(3)在系统光阑与第一个镜片之间加入反射镜,

将光路进行90°转折,设置适当的反射镜与光阑以及第一个镜片之间的距离,得到最终结构。

若步骤(2)后得到的结果不符合成像指标,可修改评价函数中影响成像的各像差或 $MTF$ 的权重,反复运行步骤(1)与步骤(2),直至得出最佳结果。步骤(3)中反射镜前后两段间距的设置需要考虑机械结构的合理设计,分析如图3所示。

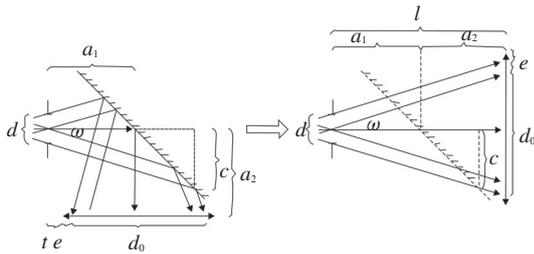


图3 反射光路及展开图

光线经光阑后由反射镜转折90°落在第一个镜片上,其光路与展开结构如图3所示。图3中各符号的含义分别是: $l$ 为前截距; $d$ 为光阑直径; $d_0$ 为第一个镜片的有效孔径; $\omega$ 为半视场角; $a_1$ 为反射镜与光阑之间的距离; $a_2$ 为反射镜与第一个镜片之间的距离; $c$ 为光线落在反射镜最下方的位置与中心轴线之间的最大距离; $e$ 为镜片预留的压边宽度; $t$ 为镜筒壁的厚度。根据光学装配的一般经验,此处镜片的压边宽度不宜小于0.5 mm,可直接假设 $e$ 的值为0.5 mm。镜筒壁的厚度设置既要考虑其两端连接螺纹所占据的宽度,同时也要考虑镜头安装在其他腔体中时光阑设在外部零件上的可能,所以 $t$ 的值不宜小于1.5 mm。另外一个很显然的关系是 $c$ 的值应大于第一个镜片有效孔径的一半,即 $d_0/2$ ,防止反射镜碰撞到镜片上。根据以上分析可得到限制反射镜位置的两个关系,如式(1)所示

$$\begin{cases} t > 1.5 \\ c < d_0/2 \end{cases} \quad (1)$$

根据光路图以及展开图中各参数的几何关系,可得以下等式

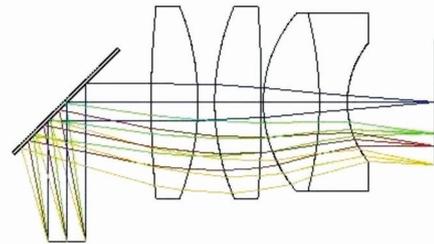
$$\begin{cases} a_1 = t + e + d_0/2 \\ (c + a_1)\tan\omega + d/2 = c \\ d_0 = d + 2l\tan\omega \end{cases} \quad (2)$$

视场角按像面尺寸与镜头焦距计算,像面尺寸 $h=6.7$  mm,焦距 $f'=12$  mm

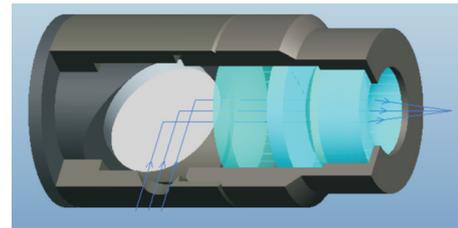
$$\tan\omega = \frac{h}{2f'} = 0.28 \quad (3)$$

已知 $l=12$  mm, $e=0.5$  mm, $d=2$  mm,再按式(1)与

式(2),求得 $a_1$ 的取值范围: $6.36$  mm $< a_1 < 7.64$  mm。即可以认为,反射镜距离光阑的距离在6.36 mm与7.64 mm之间时,光学结构与机械结构不会产生矛盾。设计选择了7.5 mm作为反射镜与光阑的实际距离,镜头的最终设计结果如图4所示。



(a)光学结构



(b)外形示意

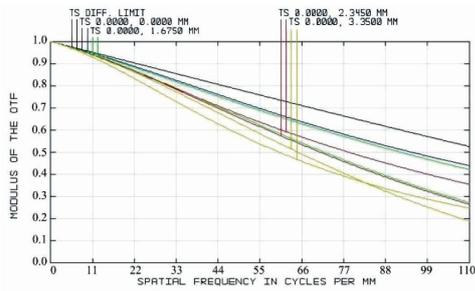
图4 转折式小孔镜头最终结构图

## 2 性能分析

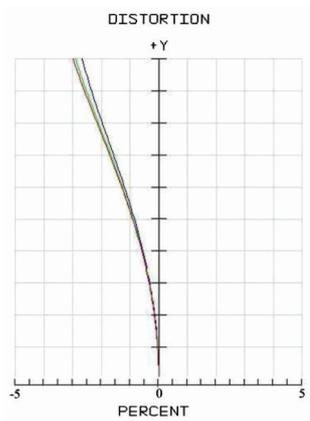
对小孔镜头设计结果的性能分析以像质评价与公差分析为主。镜头的像质用 $MTF$ 与畸变来体现, $MTF$ 表征镜头的成像分辨率,畸变反映了镜头成像画面的变形情况,二者的设计指标均已在第1节中给出。另外,还应在现有加工工艺的前提下对设计结果进行公差分析以确定其是否具有可实现性,而如果公差过紧则即使该设计成像质量再高也应当认为是失败的。

### 2.1 像质评价

图5给出了设计结果的 $MTF$ 曲线与畸变曲线。从 $MTF$ 曲线中可以读出:镜头在0视场时, $MTF$ 于110 lp/mm的空间频率处为0.44,于55 lp/mm处为0.7;0.7视场时, $MTF$ 于30 lp/mm的空间频率处为0.8。从畸变曲线中可以读出,镜头在全视场全波段下的最大畸变量为3%。两个像质评价参数的值均符合设计指标。



(a) MTF



(b) 畸变

图5 设计结果的像质评价

### 2.2 公差分析

对镜头进行公差分析的前提条件是有一组相对准确的光学零件各技术参数公差值,这些技术参数包括镜片表面的光圈、局部光圈、偏心差、零件的厚度、偏心以及材料的折射率、色散系数<sup>[10-11]</sup>。根据光学与机械零件加工厂商、光学材料供应商提供的数据,现将各参数允许的公差值以表格方式列出如表1所示。

表1 光学零件各参数允许的公差值

参数	符号	公差值
光圈	$N$	2
局部光圈	$\Delta N$	0.2
厚度/mm	$t$	0.05
表面偏心/mm	$c$	0.025
零件偏心/mm	$c_c$	0.025
零件倾斜/(°)	$\chi_c$	0.05
材料折射率	$\Delta n_d$	0.001
材料色散系数/(%)	$\Delta \nu_d$	1

注:表中公差值均为正值

以像面至最后一个光学表面之间的距离作为公差运算时的补偿参数,以蒙特卡罗法模拟所有参数扰动对系统的影响,优化的评价函数设为0视场的MTF。图6绘出了依蒙特卡罗法模拟的20种结果的MTF曲线分布情况,图表中的数据显示0视场110 lp/mm处的MTF值90%大于0.35,仍然高于设计指标。由此可见本设计的公差并不严格,具有非常好的可实现性。

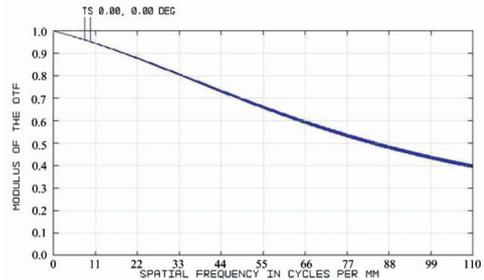


图6 20种结果的MTF曲线分布

### 3 结论

设计了一种用于对中远距离目标进行观察拍摄的小孔镜头。该镜头采用了转折式光学结构,既具有小孔镜头的普遍特点又缩短了镜头开孔表面法向光路的长度,从而可以方便地安装在比较薄的腔体中。最终设计结果显示镜头的焦距为12 mm,小孔直径为2 mm,MTF在110 lp/mm空间频率处的设计值满足需求,畸变值小于4%。ZEMAX软件对镜头的公差分析验证了其可实现性,对成像质量的分析表明镜头可与720 p的高清芯片相匹配,是一款实用性较强的高分辨率小孔镜头。

### 参考文献

- [1] 范路桥,蒋梁中.排爆机器人双目立体视觉系统的研究与开发[J]. 计算机工程,2007,33(7):207-209.
- [2] 黄城,温同强,路建华,等. 2.5倍光学变焦内置式手机摄像镜头的设计[J]. 光学制造,2009:47-52.
- [3] 梁来顺.变焦距针孔镜头设计与应用[J]. 警察技术,1995(4):2-3.
- [4] Joseph M Geary. Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples [M]. Richmond: Willmann-Bell, Inc, 2002.
- [5] 中国广播电视设备工业协会应用电视专业协会.应用电视-设备原理与工程实践[M]. 北京:电子工业出版社,1992:64-69.

(下转第48页)

- [2] 龚涵,陈浩宇.微弱光信号检测电路的设计与实现[J].机械与电子,2007(27):85-87.
- [3] 江文杰,施建华.光电技术[M].北京:科学出版社,2009.
- [4] 秉时.光敏电阻的种类、原理及工作特性[J].红外,2003(11):48.
- [5] 周红,杨卫群,沈学浩,等.光敏电阻基本特性测量实验的设计[J].物理实验,2003(11):9-11.
- [6] 王紫婷,王瑞峰,严天峰.智能液体点滴速度监控仪[J].自动化与仪器仪表,2004(5):48-50.
- [7] 全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编[M].北京:北京理工大学出版社,2003.
- [8] Dickens Roberts, Ridley Allan. Ultrasonic detection of bubbles in fluids. American Society of Mechanical Engineers, Bioengineering Division (Publication) BED, 2001,50: 727-728.
- [9] Aworek A, Krupa A, Trela M. Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2004,15(5):317-327.
- [10] 张强.随机信号分析的工程应用[M].北京:国防工业出版社,2009.

(上接第25页)

- [6] ZEMAX Development Corporation. ZEBASE Optical Design Database 6.0 [Z]. USA: ZEMAX Development Corporation, 2007:48-50.
- [7] Harvey M Spence. Eyepiece design simplification through the use of aspherics [J]. Proceedings of SPIE, USA, 2004: 592-598.
- [8] Eyepiece designs with radial and spherical polymer gradient-index optical elements [J]. Optical Engineering, 2013, 52(11): 112102 (1-8).
- [9] 萧泽新.工程光学设计(2版)[M].北京:电子工业出版社,2008: 73-80.
- [10] 李士贤,李林.光学设计手册(修订版)[M].北京:北京理工大学出版社,1996: 159-169.
- [11] 舒朝濂.现代光学制造技术[M].北京:国防工业出版社,2012:351-362.

(上接第31页)

- [6] 刘钧,刘欣.微光夜视仪中物镜光学系统的小型优化设计[J].应用光学,1999,29(6):519-523.
- [7] 宋波,刘钧,高明.头盔式微光夜视仪中折-衍混合物镜的设计[J].电光与控制,2008,15(2):78-82.
- [8] 张慧娟,王肇圻,卢振武.折/衍混合微光夜视头盔显示器光学系统设计[J].光学学报,2004,24(10):1393-1397.
- [9] 高明,强西林.头盔式双目微光夜视仪研制[J].西安工业大学学报,2001,21(4):300-305.
- [10] 刘钧,尚华.头盔式单目微光夜视仪中非球面物镜系统的设计[J].应用光学,2006,27(4):308-312.

(上接第42页)

- [5] 寇瑾.薄色谱法检验喷墨打印机墨水的种类[J].光谱实验室,2009,36(3):689-691.
- [6] 秦玉红.中文笔记特征因子结构分析的研究[J].科技世界,2012(5):30-31.
- [7] 高正荣.国外文件制成时间检验技术概况[J].甘肃科技,2006,22(11):166-168.
- [8] 高正荣.我国文件制成时间检验技术概况[J].甘肃科技纵横,2006,35(6):115-116.
- [9] 涂岩恺,陈庆虎,邓伟.计算机打印文档鉴别与检索[J].电子与信息学报,2011,33(2):499-508.
- [10] 李军.激光打印字迹人为热老化表现特征研究[J].河北北方学院学报,2012,28(5):86-89.
- [11] 蒋立琴,黄甦.墨粉的结构及鉴别方法研究进展[J].信息记录材料,2010,11(5):44-46.
- [12] 黄越,王冬,段佳,等.近红外光谱成像分析技术的应用进展[J].现代仪器,2011,17(5):13-18.