

含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜光学设计

王军华 卢景红 徐敏

(复旦大学光科学与工程系超精密光学制造工程研究中心, 上海 200433)

摘要 介绍了含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜的设计方法。系统工作波段为 $0.486 \sim 0.656 \mu\text{m}$, 视场角为 116.2° , 光学系统总长为 2.4 mm 。另外, 设计了含有 3 个球面透镜的胶囊内窥镜和含有非球面的单片式胶囊内窥镜, 并和含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜进行了比较。结果表明, 含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜可以达到含有 3 个球面透镜的胶囊内窥镜的成像质量, 外形结构和含有非球面的单片式胶囊内窥镜一样简单。系统在频率 40 lp/mm 处的调制传递函数大于 0.6 。

关键词 光学设计; 胶囊内窥镜; 谐衍射; 衍射光学元件; 单点金刚石车削

中图分类号 O435.2 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.122203

Optical Design of the Single-Chip Capsule Endoscopy with Harmonic Diffraction Surface

Wang Junhua Lu Jinghong Xu Min

(Shanghai Ultra-Precision Optical Manufacturing Engineering Center, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract A design method of the single-chip capsule endoscope with harmonic diffraction surface is introduced with the system working band of $0.486 \sim 0.656 \mu\text{m}$ and the field-of-view angle of 116.2° . And the total length of the optical system is 2.4 mm . Additionally, a capsule endoscope with three spherical lenses and a single-chip capsule endoscope with aspherical surface are designed, and a comparison is made between them and the single-chip capsule endoscope with harmonic diffraction surface. It is found that the single-chip capsule endoscope with harmonic diffraction surface can achieve the image quality of the capsule endoscope with three spherical lenses. and its construction is as simple as the single-chip capsule endoscope with aspherical surface. Its modulation transfer function is greater than 0.6 at the frequency of 40 lp/mm .

Key words optical design; capsule endoscope; harmonic diffraction; diffractive optical element; single-point diamond turning

OCIS codes 220.3620; 170.2150; 050.1970; 220.1920

1 引言

胶囊内窥镜能扩展消化道检查的视野, 能清楚观察到胃镜、肠镜无法到达的小肠, 可作为消化道疾病尤其是小肠疾病诊断的首选方法^[1]。胶囊内窥镜具有大视场、高分辨率、后工作距离大等特点^[2]。其光学结构属于反远距类型, 故一般都需采用 3 片以上不同材料的球面透镜才能达到很好的像质^[3]。虽然单片式非球面胶囊内窥镜的结构简单, 但无法消除色差, 成像质量不高^[4]。胶囊内窥镜由于其自身体积和结构的限制, 在满足成像要求时, 希望镜头的尺寸小、质量轻、易集成。本文采用反远距的结构形式设计了单片式胶囊内窥镜, 并在胶囊内窥镜的前表面上应用谐衍射面型进行优化设计, 使其在承担一定光焦度的同时也能实现消色差。

收稿日期: 2012-07-30; 收到修改稿日期: 2012-09-02; 网络出版日期: 2012-10-19

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX02402)和上海市引进技术的吸收与创新项目(2010CH-007)资助课题。

作者简介: 王军华(1980—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 11210720091@fudan.edu.cn

导师简介: 徐敏(1959—), 男, 研究员, 主要从事光学设计、先进光学制造与光电测量等方面的研究。

E-mail: minx@fudan.edu.cn

2 设计理论基础

2.1 衍射光学元件特殊的色散性质

衍射光学元件在本质上是一种变周期光栅,对不同波长的光具有分光作用,与折射光学元件相比表现出强烈的色散性质。这种色散性质是由工作波段决定的,与衍射光学元件的基底材料无关。衍射光学元件的等效阿贝数 $\nu_d = \frac{\lambda_M}{\lambda_L - \lambda_S}$, 式中 $\lambda_M, \lambda_L, \lambda_S$ 分别为中心波长和长、短波长。当取可见光波段的 d、F、C 谱线时,可计算出 $\nu_d = -3.46$ 。可见衍射光学元件具有独特的负色散特性,可以结合折射光学元件构成混合光学系统,以常规的折射光学元件提供大部分的聚焦功能,以基底上的连续浮雕结构校正色差和其他像差^[5]。

2.2 衍射光学元件相位分布性质

成像光学系统中通常使用旋转对称式衍射面型,其相位方程为

$$\phi(r) = m \frac{2\pi}{\lambda} (\beta_2 r^2 + \beta_4 r^4 + \beta_6 r^6 + \dots + \beta_{2n} r^{2n}), \quad (1)$$

式中 r 为衍射光学元件的径向坐标; $\beta_2, \beta_4, \beta_6, \dots, \beta_{2n}$ 为各项系数; m 为衍射级次, $m = 1$ 时为普通衍射, $m > 1$ 时为谐衍射。

旋转对称式衍射面型的焦距为

$$f_d = -\frac{1}{2m\beta_2}. \quad (2)$$

旋转对称式连续浮雕衍射面型的方程为

$$z_{\text{DOE}} = \frac{\lambda_M}{n_M - 1} \left\{ \frac{1}{2\pi} \phi(r) - \text{int} \left[\frac{1}{2\pi} \phi(r) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中 λ_M 为设计的主波长, n_M 为对应主波长的折射光学元件的折射率, int 为取整函数。

2.3 谐衍射光学元件的特性

如图 1 所示,谐衍射微结构区别于普通衍射之处在于其表面上微结构所产生的光程差不再是普通衍射的 λ_M , 而是 $p\lambda_M$, 其微结构环带位置也增加了 p 倍,从而降低了微细结构加工的难度。对于谐衍射光学元件而言,相当于设计波长为 $p\lambda_M$, 焦距为 f_0 的普通衍射光学元件。若使用波长为 λ 的 m 级次成像,其焦距为 $f_{m,\lambda} = \frac{p\lambda_M}{m\lambda} f_0$ 。要

求 $f_{m,\lambda}$ 与设计焦距 f_0 重合,可得 $\lambda = \frac{p\lambda_0}{m}$ 。由此可知,选取

满足条件的整数 m , 所对应的谐振光波将会会聚到共同焦点 f_0 处,可以在一定的光谱范围内实现消色差成像^[6]。在用 Zemax 光学软件进行仿真时,软件默认为 $p = m$, 当 $p = m \leq 3$ 时,在可见光波段并没有相匹配的谐振光波,谐衍射光学元件的色散和普通衍射光学元件相一致。

2.4 反远距光学结构

反远距光学结构的前组具有负光焦度,后组具有正的光焦度,这使其后工作距离比具有同样焦距的其他类型镜头大得多,这正好符合胶囊内窥镜的特点。反远距光学结构的轴外物点的光束在通过前组发散后,其像方视场角 ω' 比物方视场角 ω 小得多,从而有利于后续组元的光学设计,易使全系统达到优良的像差校正^[7]。

3 胶囊内窥镜的光学设计

3.1 设计指标

从表 1 所示项目要求的视场角和像高分析可知,其系统焦距大致为 1 mm,轴上像差的数值都很小,在光学设计中很容易得到校正。项目要求的视场角为 116.2° ,属于超广角镜头,大的视场角造成了轴外像差

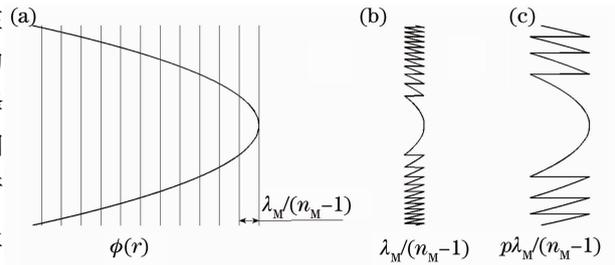


图 1 相位与衍射微结构。(a) 相位; (b) 普通衍射; (c) 谐衍射

Fig. 1 Phase and diffraction microstructure. (a) Phase; (b) ordinary diffraction; (c) harmonic diffraction

校正的困难,采用单片非球面进行优化设计,不能达到很好的成像质量。在设计中应着重考虑轴外像差的校正。经过大量的设计案例分析,认为其原因主要是前表面和后表面的光焦度分配得不合理,不能使轴上光线和轴外光线的像差同时得到校正。为了解决这个问题,我们在其前表面上采用易于通过单点金刚石车削的谐衍射面型进行设计,用谐衍射面型的光焦度去解决光焦度分配不合理的问题,同时校正像差。由 2.4 节知采用反远距结构有利于超广角镜头的轴外像差校正,这样就要求前表面提供一个负的光焦度,后表面提供一个正的光焦度,其中前组的光焦度越小,轴外光线通过前表面发散后,其与光轴的夹角变小,从而越有利于后表面的设计,易于使全系统达到优良的像差校正。把光阑放置于胶囊内窥镜的前表面外部,这样有利于系统的像差校正。

表 1 项目设计要求参数

Table 1 Parameters required by the project design

Field of view / (°)	F number	Image height / mm	Wave band / μm	$\lambda_M / \mu\text{m}$
116.2	5	1.2	0.486~0.656	0.587

3.2 求解初始结构

含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜的结构形式可以简化为一个衍射光学元件和一个折射光学元件,其中折射光学元件的前后表面可以分别简化为一个平凹透镜和平凸透镜,如图 2 所示。这样的简化有利于光焦度的求解。

光焦度要求为

$$\varphi_{\text{Total}} = \varphi_{12} + \varphi_3 - d\varphi_{12}\varphi_3, \quad (4)$$

消色差要求为

$$\frac{\varphi_1}{\nu_d} + \frac{\varphi_{23}}{\nu_1} = 0, \quad (5)$$

式中 φ_{Total} 为光学系统的光焦度; φ_1 为谐衍射面型的光焦度; φ_2 和 φ_3 分别为平凹透镜和平凸透镜的光焦度; $\varphi_{12} = \varphi_1 + \varphi_2$ 为谐衍射面型和平凹透镜的复合光焦度; $\varphi_{23} = \varphi_2 + \varphi_3 - d\varphi_2\varphi_3$ 为折射光学元件的光焦度, d 为折射光学元件前表面和后表面之间的距离; ν_1 为折射光学元件的阿贝数; ν_d 为衍射光学元件的等效阿贝数。

由于采用了反远距结构, $|\varphi_{12}|$ 越小,轴外光线通过前表面发散后,其与光轴的夹角越小,从而越有利于后表面的设计,易于使全系统达到优良的像差校正。由 $\varphi_2 < 0$, 得出 $0 < \varphi_1 < |\varphi_2|$ 。在求解初始结构时,可以假设 $\varphi_{12} = 0 \text{ mm}^{-1}$, 即 $\varphi_1 = -\varphi_2$, 同时根据(4)式可以推出 $\varphi_3 = \varphi_{\text{Total}}$ 。设 $\varphi_{\text{Total}} = 1 \text{ mm}^{-1}$, $d = 0.9 \text{ mm}$, 采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为折射光学元件的材料,其阿贝数 $\nu_1 = 57.32$, 衍射光学元件的等效阿贝数 $\nu_d = -3.46$ 。把以上参数代入(5)式, 易知 $\varphi_1 = -\varphi_2 = 0.06 \text{ mm}^{-1}$ 。考虑到 $0 < \varphi_1 < |\varphi_2|$, 更改 φ_2 , 令 $\varphi_2 = -0.061 \text{ mm}^{-1}$, 这时 $\varphi_{12} = -0.001 \text{ mm}^{-1}$ 。由平凹透镜 φ 和 r 之间的关系 $\varphi = \frac{n_M - 1}{r}$, 可知 $r_2 = -8.18 \text{ mm}$;

由平凸透镜 φ 和 r 之间的关系 $\varphi = -\frac{n_M - 1}{r}$, 可知 $r_3 = -0.491 \text{ mm}$; 由(2)式, 取 $m = 3$ 可知 $\beta_2 = -0.01$;

由 Zemax 相位系数关系 $p_{2n} = \frac{2\pi}{\lambda_M} r_0^{2n} \beta_{2n}$, 其中 r_0 为归一化半径, $r_0 = 1$, 可知 $p_2 = -106.93$ 。

3.3 优化过程

把上述初始结果输入 Zemax 光学设计软件进行优化设计。在优化的过程中不断增加前后表面的非球面方程系数和前表面相位方程系数, 逐步使 F 数和视场角满足设计要求, 接着进行焦距的缩放, 使像高满足设计要求。再对像差进行优化设计, 先校正球差, 再校正色差, 然后校正场曲和畸变, 逐步提高成像质量。在优化过程中使用操作数 REAY 控制像面的高度, 使用操作数 DIMX 控制其畸变, 使用操作数 ETGT 控制其边缘厚度。其边缘厚度值大于 0.4 mm , 这样在采用单点金刚石车削时不易变形, 可达到很好的加工精度。

3.4 设计结果和像质分析

为了证明将谐衍射面型应用在胶囊内窥镜上的优越性, 下面将含有 3 个球面透镜的胶囊内窥镜和含有非球面的单片式胶囊内窥镜、含有谐衍射面单片式胶囊内窥镜的光路图和调制传递函数(MTF)进行分析。

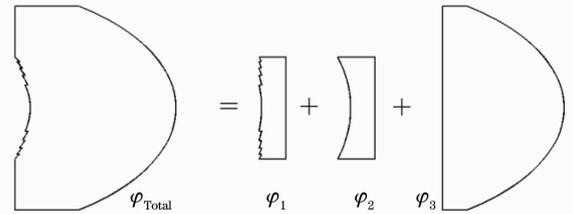


图 2 光学结构简化

Fig. 2 Simplified optical structure

其中含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜的设计结构参数如表 2 所示,对应的非球面和衍射面系数如表 3 和表 4 所示。3 种内窥镜的光路图和 MTF 曲线如图 3~5 所示。

表 2 含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜的结构参数

Table 2 Configuration parameters of single-chip capsule endoscope with harmonic diffraction surface

Surface	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glasscat
OBJ	Standard	Infinity	5	
1	Standard	6.7	0.5	PMMA
2	Standard	6.2	3.165	
STO	Standard	Infinity	0.11	
4	Binary 2	-1.1497	0.9	PMMA
5	Even asphere	-0.4995	0.87	
6	Standard	Infinity	0.42	C3
7	Standard	Infinity	0.1	
IMA	Standard	Infinity		

表 3 非球面系数

Table 3 Asphere coefficients

Type	Conic	4th order term	6th order term	8th order term
Binary 2	0	0.204141	-40.669098	-198.840992
Even asphere	0	0.459869	-1.131350	3.206401

表 4 衍射面型系数

Table 4 Diffraction coefficients

Diffraction order	Maximum term number	Norm radius /mm	p_2	p_4	p_6
3	3	1	-639.35	5170.05	-41496

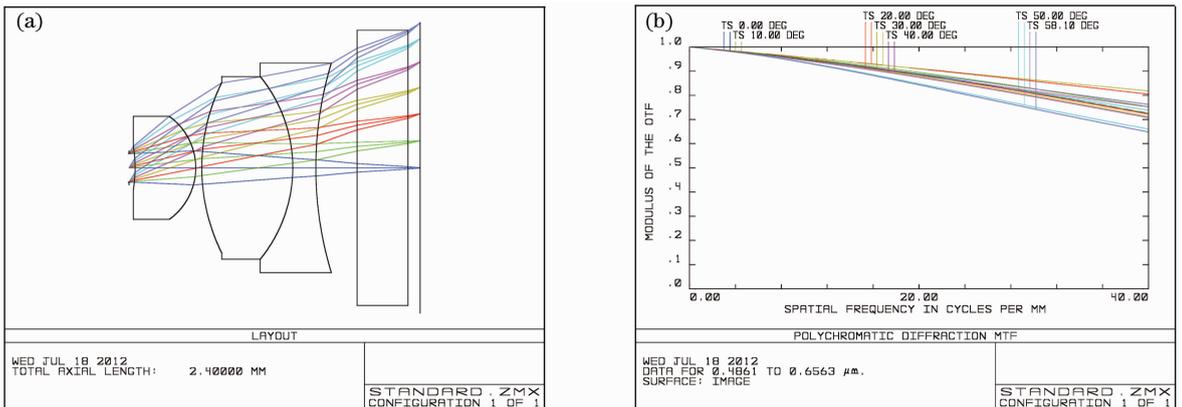


图 3 含有 3 个球面透镜的胶囊内窥镜。(a)光路图;(b) MTF 曲线

Fig. 3 Capsule endoscope with three spherical lenses. (a) Layout; (b) MTF curve

最终设计结果中,前表面的光焦度 $\varphi_{12} = -0.072 \text{ mm}^{-1}$,后表面的光焦度 $\varphi_3 = 0.971 \text{ mm}^{-1}$,基本上符合设计时前后组的光焦度分配,从而证明假设 $\varphi_{12} = 0 \text{ mm}^{-1}$ 是可行的,光学系统的像差得到了很好的校正。从优化后的参数来看,其前表面的半径和衍射相位系数与初始结构的解有很大的差别,这主要是由于在优化的过程中非球面系数和相位系数参与了像差的校正,对其光焦度进行了重新分配的结果。在优化过程中发现,把光阑设置到谐衍射光学元件外部有利于轴外像差的校正,光阑远离前表面也会使谐衍射光学元件的通光口径变大,导致光线溢出。不断优化光阑位置,最终把光阑设置在透镜前 0.11 mm 处,光学系统的像差都得到了很好的校正,同时光学元件也易于加工。

将图 3 和图 5 进行对比,可以看出含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜比含有 3 个球面透镜的胶囊内窥

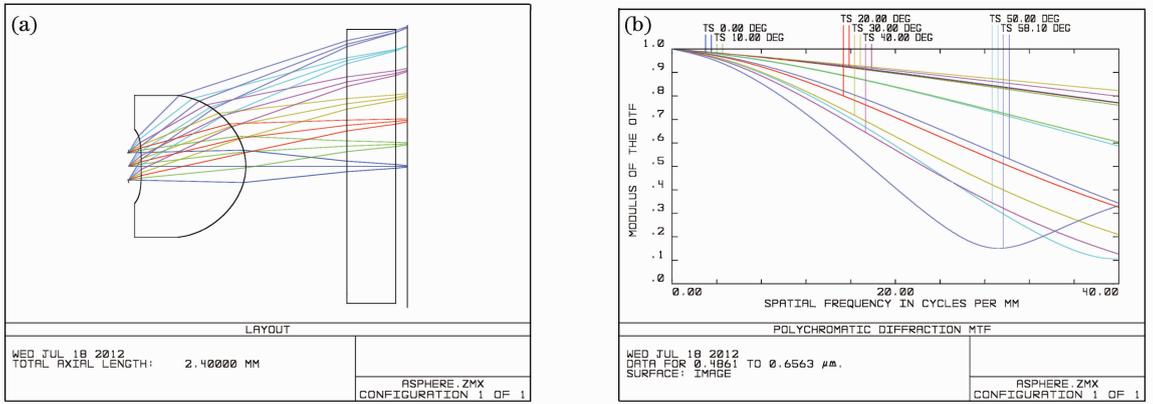


图 4 含有非球面的单片式胶囊内窥镜。(a)光路图；(b) MTF 曲线

Fig. 4 Single-chip capsule endoscope with aspherical surface. (a) Layout; (b) MTF curve

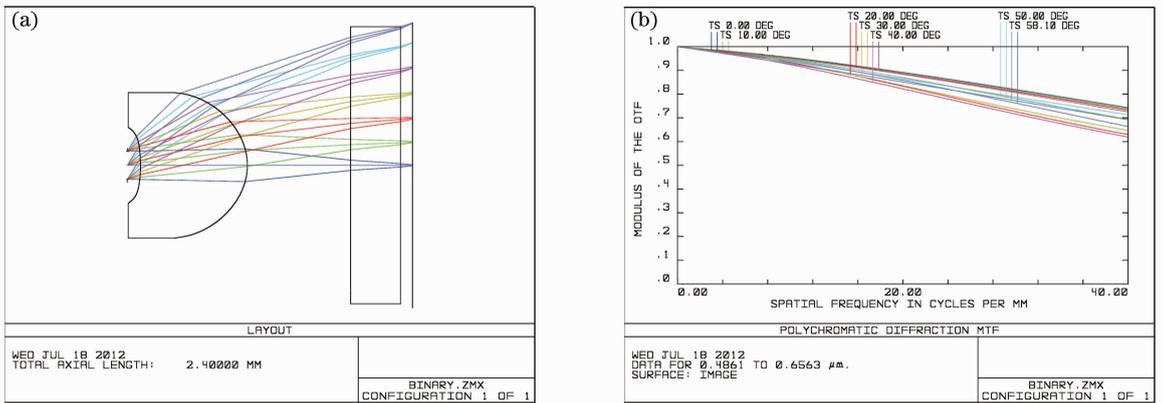


图 5 含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜。(a) 光路图；(b) MTF 曲线

Fig. 5 Single-chip capsule endoscope with harmonic diffraction surface. (a) Layout; (b) MTF curve

镜结构简单,只用单片式就达到了和含有 3 个球面透镜的胶囊内窥镜一样的成像质量,两者 MTF 基本一致,各个视场的 MTF 在频率 40 lp/mm 处均大于 0.6。含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜的成像质量只和其加工精度有关,而含有 3 个球面透镜的胶囊内窥镜不仅和透镜的加工精度有关,还与其装配精度有关。因此,含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜在简化结构、减低加工和装配成本、提高成像质量上的优势十分明显。

对比图 4 和图 5,可以看出含有谐衍射面的单片式胶囊内窥镜和含有非球面的单片式胶囊内窥镜在结构上基本一致,前者的 MTF 更好,各个视场的 MTF 基本一致,保证了在整个视场内都有很好的像质。而含有非球面的单片式胶囊内窥镜,边缘视场的 MTF 很低,导致其边缘处成像模糊,总体成像质量较差,在追求高品质成像质量的胶囊内窥镜中是不宜使用的。

图 6 为谐衍射面的特征参量曲线,从中可以得知谐衍射环带的最小周期线宽为 $35.7 \mu\text{m}$,可以采用单点金刚石车床进行车削。若采用半圆刀进行加工,可以达到更高的面型精度,确保胶囊内窥镜的成像质量^[8]。

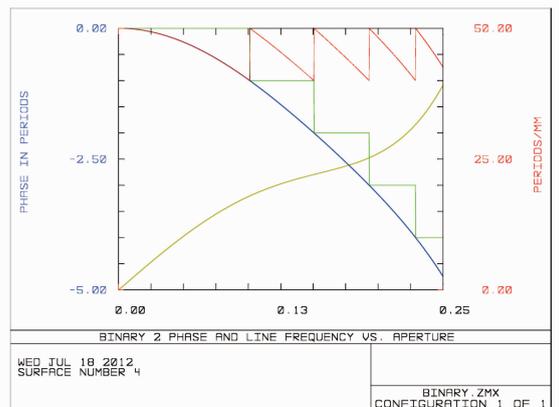


图 6 谐衍射面特征参量曲线

Fig. 6 Characteristic parameter curve of the diffraction surface

4 结 论

通过对胶囊内窥镜设计指标的分析,利用谐衍射光学元件的特性,使其在承担光焦度的同时校正色差,建立了求解初始结构的方程组,最终优化出像质优良的

光学系统。从设计结果上看衍射面对简化胶囊内窥镜的结构、提高成像质量、减轻重量、减低制作成本等方面有着十分大的优势,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Gavriel Iddan, Gavriel Meron, Arkady Glukhovskiy. Wireless capsule endoscopy[J]. *Nature*, 2000, **405**(6785): 417
- 2 Zhang Yanhui, Huang Zhanhua. The research progress and discussion about wireless capsule endoscope[J]. *China Medical Devices*, 2011, **26**(8): 60~62
张艳辉, 黄战华. 无线胶囊内窥镜的研究进展和讨论[J]. *中国医疗设备*, 2011, **26**(8): 60~62
- 3 Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang. Micro video lens design for hidden color CCD cameras[J]. *Optical Technique*, 1999, **6**(3): 22~24
胡玉禧, 周绍祥. 隐秘型 CCD 微摄像头光学设计[J]. *光学技术*, 1999, **6**(3): 22~24
- 4 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. 123~125
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. 123~125
- 5 Cui Qingfeng. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 12~15
崔庆丰. 衍射混合成像光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(1): 12~15
- 6 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 195~200
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 195~200
- 7 Wang Yongzhong. Fisheye Lens Optics[M]. Beijing: Science Press, 2006. 14~18
王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 14~18
- 8 Liang Xu, Wang Junhua, Xu Min *et al.*. Single-point diamond turning and testing of hybrid diffractive-refractive optical lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(3): 032203
梁 旭, 王军华, 徐 敏 等. 折-衍光学镜片的单点金刚石车削与检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(3): 032203