

〈微光技术〉

塑料非球面与折/衍面混合微光夜视物镜设计

刘 钧¹, 李 珂¹, 赵文才²

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所检测中心, 吉林 长春 130033)

摘要: 将衍射面和塑料非球面元件引入到传统的 Petzval 型球面系统中, 设计了含有 1 个衍射面和 1 个塑料非球面元件的 5 片单管双目式微光夜视物镜, 并分析了塑料元件的热效应影响, 计算了衍射面的加工工艺参数。该物镜具有长焦距、大相对孔径、小畸变的特点; 在物距 $L=\infty$ 和 $L=10\text{ m}$ 、空间频率为 40 lp/mm 时, 轴上传递函数 ≥ 0.70 , 轴外传递函数 ≥ 0.50 , 全视场畸变 $\leq 0.40\%$; 光学总长由传统物镜系统的 128 mm 缩短为 110 mm, 重量仅为 190 g, 减少为传统物镜的 62.5%, 适用于夜间瞄准与测量。

关键词: 微光夜视仪; 光学设计; 衍射面; 塑料非球面

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2010)11-0666-06

Design of Hybrid Refractive-Diffractive and Plastic Aspherical Surfaces Objective Lens for Low-Light-Level Night Vision

LIU Jun¹, LI Ke¹, ZHAO Wen-cai²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The diffractive surfaces and plastic aspherical elements are introduced into the design of conventional Petzval spherical system. A five-element objective of single tube binocular containing a diffractive surface and a plastic aspherical surface is designed. The thermal effects of the plastic elements are analyzed. The manufacturing parameters of the diffractive surface are calculated. The objective has a long focal length, large relative aperture, small distortion. When the object distance is infinity or 10 m, and the spatial frequency is 40 lp/mm, the on-axis MTF is not less than 0.70 and off-axis MTF is not less than 0.50. The distortion of TFOV is less than 0.40%. Compared with a conventional spherical objective with equivalent performance, the total track of the optical system reduces from 128 mm to 110 mm, and the weight reduces to 62.5% of the conventional objective, i.e. 190 g. This objective is suitable for accurately measuring and aiming during nighttime.

Key words: low-light-level night vision, optical design, hybrid refractive-diffractive system, aspherical plastic surfaces

引言

单管双目式微光夜视仪是一种供观察者在夜间或低亮度环境下使用的微光夜视成像系统, 可以将人眼不能或不易察觉到的极微弱星光、月光、大气辉光

等变成人眼易看到的光谱和亮度, 有效地改善人眼的视觉性能。单管式物镜结构口径较大, 采用传统的球面玻璃材料设计时, 系统结构型式复杂, 体积、重量偏大, 不适宜使用者长期佩戴。同传统球面系统相比, 衍射面以其任意的相位分布、特殊的负色散性质、平

收稿日期: 2010-09-27; 修订日期: 2010-10-31.

作者简介: 刘钧(1964-), 女, 教授, 主要从事光学系统设计理论及设计研究工作。E-mail: junliu1990@163.com.

基金项目: 基础预研项目(编号: B2220061084)。

像场性质及较高的衍射效率等优势,使得折/衍混合成像系统越来越多的应用于夜视仪器设计中。同时随着光学塑料非球面注射成型技术和检测水平的提高,塑料非球面元件以其重量轻、形状易变、设计自由度高、高级像差小等优点,使之代替球面透镜成为一种趋势。文献[1]在投影式头盔系统中引入衍射光学面,设计了焦距 20 mm,视场 50°,畸变 $<2.5\%$ 的 4 片式光学系统。文献[2]则将塑料非球面元件引入头盔 3D 显示系统中,设计了长度 24 mm,重量 39 g 的 3 片式全塑料非球面目镜系统。可以看出,衍/射面和塑料非球面的引入,突破了传统球面系统的许多局限性,使得夜视设备正在向着小型化、轻量化、结构简单化的方向发展。

针对微光夜视物镜所具有的特点,本文利用塑料非球面和衍射面元件在简化系统结构、缩小体积、减轻重量方面的优势,设计了塑料非球面和折/衍面混合的光学成像系统。塑料非球面元件的引入,使得无热化设计后的物镜系统质量仅为传统物镜的 62.5%,为夜视系统的减重提供了一个新的设计思路;而且成像特性有较大改善,在空间频率为 40 lp/mm 时,系统轴上传递函数达到 0.70,满足于夜间精确瞄准与测量的要求。

1 折/衍混合物镜系统设计

单管双目式微光夜视仪由一个微光物镜、一个像增强器、转像系统和两个目镜组成。物镜将目标成像在位于其焦面处的像增强器阴极面上,然后目标像被分成两条光路并成像在无穷远处供人眼观察^[3],因此该类物镜需具有较大的相对孔径和通光口径。为了满足夜视系统对不同距离处目标的视距探测需求,微光物镜应具有一定的调焦范围。据此选择一种具有大相对孔径光学特点的 Petzval 型初始结构,采用外调焦形式以满足对不同视距的探测要求。所选的超二代像增强器阴极面有一片材料为 QK3、厚度为 5.55 mm 的保护玻璃,这块玻璃平板也参与了物镜系统成像,设计时需要加入该元件。

传统的 Petzval 型球面物镜结构,其大相对孔径可以获得大的像面照度,有利于提高微光下的信噪比性能,提高成像清晰度;但大相对孔径必将带来较大的像差,彗差、高级球差量和高级色差等像差校正比较困难。衍射元件作为一种独特的成像光学元件,可以通过改变元件位置、表面面型、环带数目与周期等参数产生任意波面,为校正系统像差提供了更多的设计自由度,比如:衍射元件的光焦度与光波长成正比,具有强烈的负色散作用,同折射元件组合可以很好的

校正系统的色差;其高次非球面相位系数可以校正系统的单色像差,衍射元件的这些性质可以被用来简化系统结构、减轻重量、缩小体积和改善成像质量^[4-6],实现许多传统成像光学元件所不能达到的目标。因此考虑在传统球面系统中引入衍射面,实现对色差和单色像差的校正并保持系统总光焦度不变。图 1 给出了优化后的光学系统图。除像面保护玻璃外,系统含有 5 片镜片,衍射面位于透镜的第 1 个面上;系统总长 113 mm,重量 250 g。图 2(a)、(b)给出了该系统在 $L=\infty$ 和 $L=10\text{ m}$ 的光学传递函数和场曲/畸变曲线,可知在空间频率为 40 lp/mm 时,系统的传递函数轴上最低为 0.80,轴外最低为 0.50;全视场畸变 $\leq 0.73\%$ 。

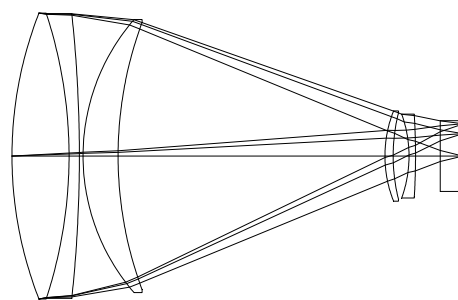


图 1 一个衍射面的物镜光学系统

Fig.1 The 2-D layout of objectives with a diffractive surface

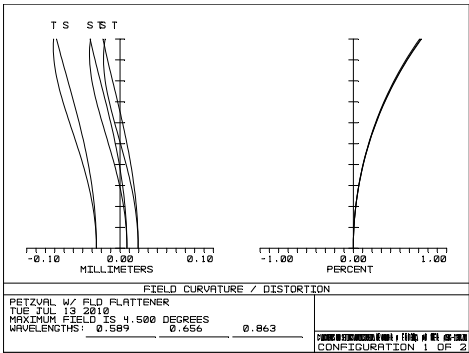
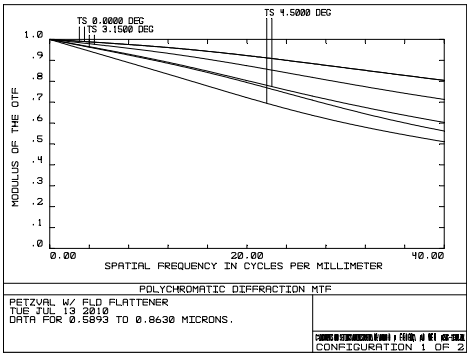
2 塑料非球面与折/衍面混合物镜系统设计

现代化的微光夜视装备越来越向着成像质量高、轻量化、结构简单化的方向发展,衍射面的引入使传统物镜系统的成像质量、结构、重量及体积得到了显著的改善。为了更进一步减轻系统的重量,靠优化系统的结构已经十分困难,必须选用轻质的光学材料辅助设计。光学塑料元件密度仅为玻璃的 1/2~1/4,重量较轻;成形成容易,可以设计非常复杂的形状,便于批量低成本生产^[7-8];同时利用注射成型方法加工的塑料非球面还具有非球面的优点,比如:设计自由度高、高级像差小、可以产生较大负像差^[9],因此在许多领域玻璃和塑料非球面混合系统正在替代某些纯玻璃元件的光学系统。设计过程中我们引入 1 片塑料非球面元件,替代折/衍结构中的第 3 片球面透镜,经过多次优化和调整后,将折/衍系统重量进一步减少为 190 g,仅为传统物镜系统的 62.5%。图 3(a)、(b)给出了该系统的光学传递函数和场曲/畸变曲线,可知在空间频率为 40 lp/mm 时,系统的传递函数轴上最低为 0.82,轴外最低为 0.52;全视场畸变 $\leq 0.49\%$ 。其塑料非球面元件特性参数如表 1 所示。

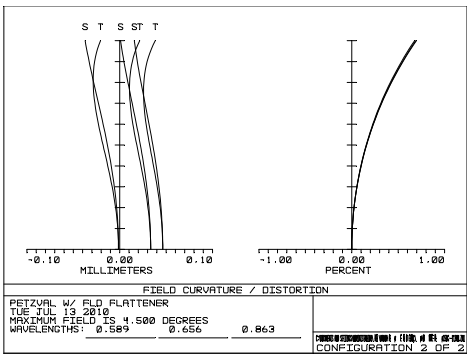
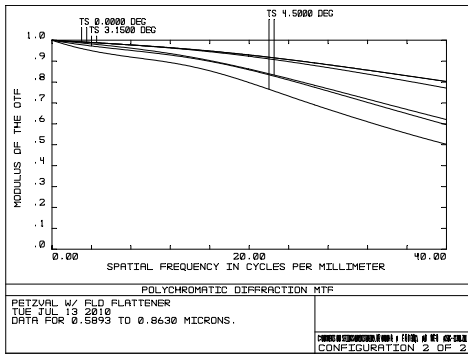
塑料非球面元件的引入,使得折/衍混合系统在成像质量得到提高的同时,获得了更进一步的减重效

果。但是光学塑料对温度和湿度等环境变化较为敏感，折射率温度系数约是玻璃的 50 倍，热膨胀系数约是玻璃的 10 倍。微光夜视系统的使用温度是 $-30\sim+50^{\circ}\text{C}$ ，当系统工作温度偏离正常设计温度（ 20°C ）很大时，因环境变化引起光学元件的曲率半径、厚度、间隔及光焦度变化将使得系统产生热离焦，导致成像质量急剧下降。本文分析了含有塑料非球面元件的折/衍混合系统，在 $L=\infty$ 、温度分别为 -30°C 和 $+50^{\circ}\text{C}$ 时温度变化对系统光学传递函数的影响，如图 4(a)、(b)所示。可以看出，系统在温度 -30°C 和 $+50^{\circ}\text{C}$ 时成像质量严重恶化，因此在系统中必须考虑加入主动或

被动补偿机构，以补偿温度变化造成像面移动所引起的系统性能降低。解决方法是在系统中让玻璃元件主要承担光焦度，塑料非球面元件做成弱光焦度的补偿透镜作为辅助，通过对系统进行整体无热化设计，被动地补偿系统因温度变化产生的离焦量和球差、慧差、畸变等像差，保证系统具有较好的可靠性与稳定性。图 5(a)、(b)、(c)、(d)分别给出了整体无热化设计后不同视距、温度条件下的光学传递函数曲线，比无热化校正前有较大改善，在空间频率为 40 lp/mm 时，系统传递函数轴上最低为 0.70，轴外最低为 0.50，全视场畸变 $\leq 0.40\%$ ，成像质量良好。



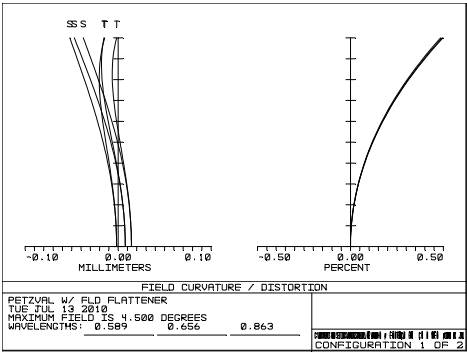
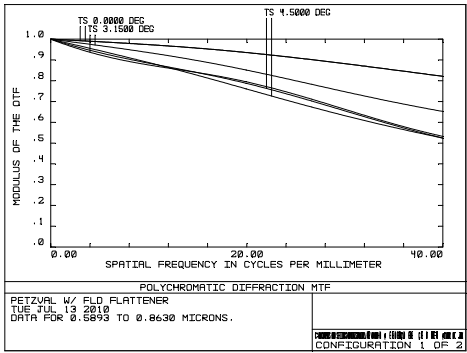
(a) MTF and field curvature/distortion as $L=\infty$



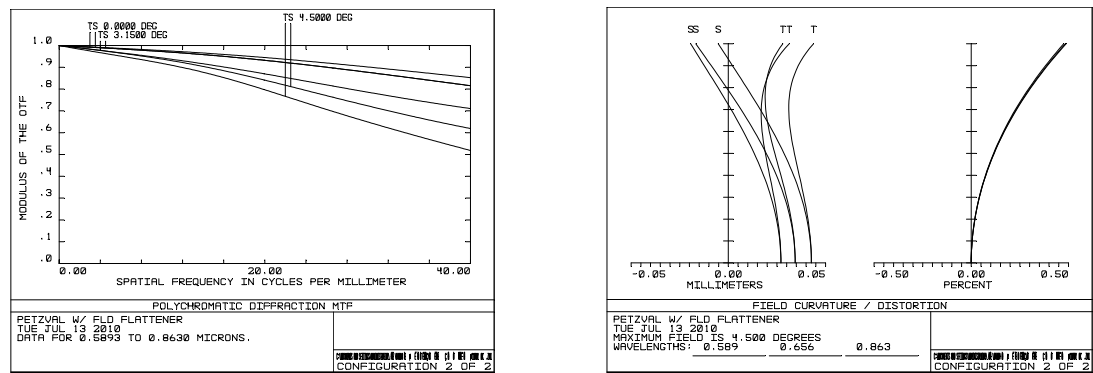
(b) MTF and field curvature/distortion as $L=10\text{ m}$

图 2 不同视距时折/衍系统特性图

Fig.2 Performances of refractive/diffractive systems at different distances



(a) MTF and field curvature/distortion as $L=\infty$



(b) MTF and field curvature/distortion as $L = 10\text{ m}$

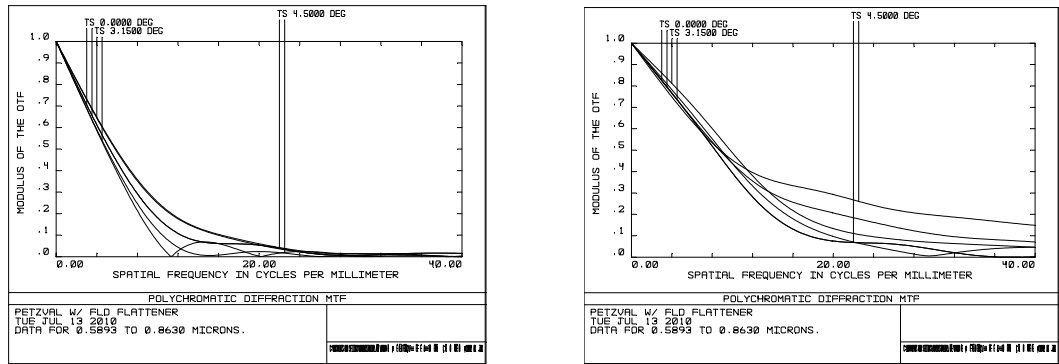
图3 不同视距时折/衍与塑料混合系统特性图

Fig.3 Performances of refractive/diffractive and plastic systems at different distances

表1 塑料非球面元件特性参数

Table 1 Characteristic parameters of aspherical plastic surface

参数	面数	Conic	材料	折射率 (550 nm/25℃)	阿贝数 (550 nm/25℃)
塑料非球面	4	-0.097940	E48R	1.5311	56

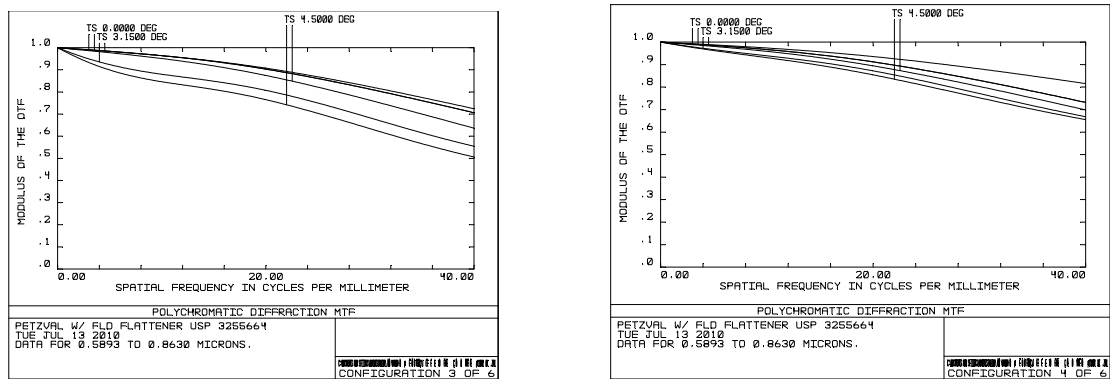


(a) MTF of hybrid system at -30°C

(b) MTF of hybrid system at $+50^{\circ}\text{C}$

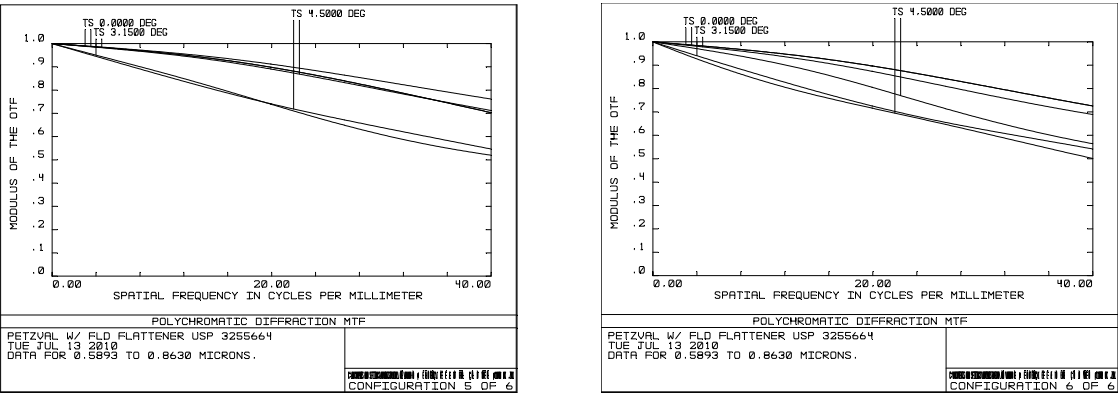
图4 折/衍与塑料混合系统 MTF 图

Fig.4 MTF of hybrid of refractive/diffractive and plastic sy stems



(a) MTF at $L = \infty$, -30°C

(b) MTF at $L = \infty$, $+50^{\circ}\text{C}$



(c) MTF at $L=10\text{ m}$ 、 -30°C (d) MTF at $L=10\text{ m}$ 、 $+50^{\circ}\text{C}$

图5 不同视距、温度条件下MTF图

Fig.5 MTF of different distances and temperature

3 讨论

为便于分析比较,将传统球面、折/衍混合和含塑料非球面的无热化折/衍混合物镜系统的性能参数列于表2。可以看出,三种系统的成像质量均符合设计要求,在空间频率为40 lp/mm时,轴上传递函数 ≥ 0.60 ,轴外 ≥ 0.40 ;全视场畸变 $\leq 0.73\%$ 。衍射面和塑料非球面元件的引入,使得传统的6片式物镜系统在结构、重量、长度及像质方面均得到了显著的改善,尤其是无热化设计后的折/衍与塑料非球面混合物镜系统,在保证成像质量的前提下,系统重量得到了进一步减轻。

衍射面采用Zemax软件自带的binary2面,将Zemax宏指令PHASES生成的衍射面径向坐标代入位相变化 2π 时的参数式(1)^[10],计算得出的待加工面位

相系数见表3。

$$m\lambda_0 = \sum C_n r^{2n} \tag{1}$$

式中: $m(1, 2, 3 \cdots)$ 为区间数, λ_0 是中心波长, r 为径向坐标, C_n 是高位相系数。其中重要的关系为:

$$C_2 = -1/(2f) \tag{2}$$

式中: f 为衍射面的焦距。 C_2 的符号表明了衍射面位相轮廓的方向,负号意味着焦距为正且位相面的方向朝向透镜基面,正号则反之。

图6给出了该衍射面线频率和周期随径向坐标的变化曲线,总环带数为64,衍射面最高周期频率为3.12 periods/mm,对应的最小周期线宽为320.5 μm 。

表2 不同物镜系统的参数比较

Table 2 Parameters comparison of different objectives			
参数	传统物镜系统	折/衍混合物镜系统	含塑料非球面的无热化折/衍物镜系统
焦距	99.5 mm		
视场	$2\omega=9^{\circ}$		
相对孔径	$D/f=1/1.42$		
波长	589.3~863 nm	$\lambda_0=656.3\text{ nm}$	
透镜片数	6	5	5
重量/g	304	250	190
长度/mm	128	113	110
40 lp/mm 轴上传函 (MTF)	0.60	0.80	0.70
40 lp/mm 轴外传函 (MTF)	0.41	0.50	0.50
畸变/%	0.49	0.73	0.40

表3 折/衍与塑料混合物镜衍射面相位系数

Table 3 Diffractive phase coefficients of refractive/diffractive and plastic objectives			
面数	C_2	C_4	C_6
1	3.852974×10^{-5}	$-5.131207 \times 10^{-10}$	$-1.755840 \times 10^{-12}$

而衍射元件每 2π 位相转换处的环带深度 d 为：

$$d=\lambda_0/n-1 \tag{3}$$

式中： n 为衍射面基底材料的折射率，经计算，环带深度 $d=1.3205\mu\text{m}$ 。因此，可采用单点金刚石车削方法，利用半球形刀具直接加工此衍射面，制成的连续浮雕结构与多台阶浮雕结构相比，衍射效率较高，遮挡效应小且制作成本低。

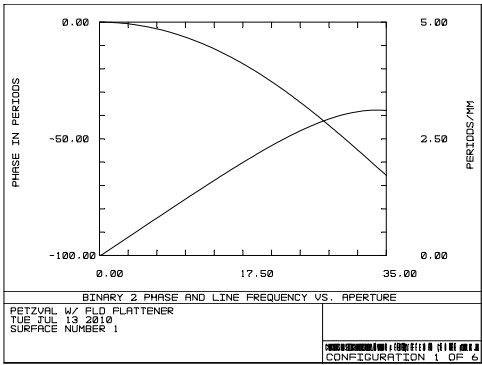


图 6 衍射面线频率和周期随径向坐标的变化曲线

Fig.6 Line frequency and phase vs. aperture of the diffractive surface

采用超精密金刚石车床加工软件 DIFFSYS 模拟的衍射面如图 7 所示。

4 结论

本文设计了一种塑料非球面与折/衍面混合的单管双目式微光夜视仪物镜系统。文中通过对衍射面加工工艺参数进行计算，在确定单点金刚石车削加工方案的基础上，模拟了衍射面的加工轮廓图。考虑到塑料元件对温度变化较为敏感，对初始设计的混合系统进行了消热差设计，使塑料元件尽可能少的负担光焦度，以减少温度变化带来的影响。设计结果表明，经过无热化设计后的折/衍与塑料非球面混合物镜系统，在空间频率 40 lp/mm、 $-30^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 的使用温度条件下系统成像质量良好，相对于具有同样性能的传统物镜系统，总长缩短为 110 mm，重量 190 g，仅为传统物镜的 62.5%，整个系统设计很好地适应现代夜视

仪器的发展方向。

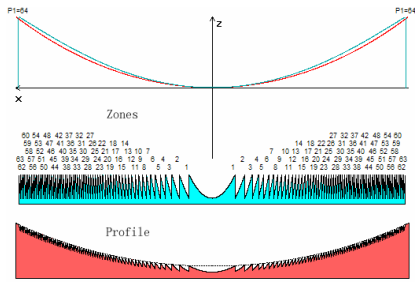


图 7 衍射面轮廓模拟图

Fig.7 Profile simulated diagram of the diffractive surface

参考文献：

[1] Zhang Yang. Design of Hybrid Refractive-Diffractive Objective Lens of Head-Mounted Projective Displays[J]. *Optical Design and Testing III*, 2007, **6834**: 68340H1-68340H6.

[2] SUN Qiang, LIU Rong, PU Ren-guan, et al. Application of plastic aspherical elements in Head Mounted 3D display[J]. *Optics and Presion Engineering*, 2005, **13**(1): 47-52.

[3] 高明, 强西林, 陈智利, 等. 头盔式双目微光夜视仪研制[J]. *西安工业学院学报*, 2001, **21**(4):300-303.

[4] Andrew P Wood, Philip J Rogers. Diffractive Optics in Modern Optical Engineering[J]. 2005, **5865**: 58650B1-58650B14.

[5] 张慧娟, 王肇圻, 赵秋玲, 等. 折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 121-124.

[6] 吴海青, 王学进, 孙强, 等. 头盔显示器中折射/衍射塑料光学系统设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2243-2245.

[7] 辛企明. 光学塑料非球面技术的发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2009(12): 11-16.

[8] 杨胜杰. 含高次塑料非球面的头盔微光夜视物镜设计[J]. *电光与控制*, 2009, **16**(1): 80-83.

[9] Wen-Shing Sun,Chuen-Lin Tien,Ching-Cherng Sun, et al. Ophthalmic lens design with the optimization of the aspherical coefficients[J]. *Opt.Engineering*, 2000, **39**(4): 978-988

[10] 农文捷, 金宁. 二元光学工艺参数计算[J]. *红外技术*, 2004, **26**(6): 13-16.