

文章编号: 1672-8785(2018)07-0025-04

## 双层衍射光学元件在 0.4~0.9 $\mu\text{m}$ 宽波段 光学系统中的应用

杨亮亮

(盐城师范学院新能源与电子工程学院, 江苏 盐城 224007)

**摘 要:** 双层衍射光学元件能够在宽波段光谱范围内工作并具有较高的衍射效率。提出了工作在一定入射角范围内的双层衍射光学元件的复合带宽积分平均衍射效率的数学分析模型。设计了一种工作波段为 0.4~0.9  $\mu\text{m}$  的含有双层衍射光学元件的宽波段光学系统。其焦距为 28 mm,  $F/\#$  为 2, 视场达到  $18^\circ$ 。该系统采用 Petzval 物镜结构, 由四片透镜组成。在 60 lp/mm 处, 其调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 大于 0.67。所用双层衍射光学元件在 0.4~0.9  $\mu\text{m}$  波段内的带宽积分平均衍射效率高于 91%。系统中入射到衍射面上的角度为  $0^\circ\sim 8.62^\circ$ 。该双层衍射光学元件的复合带宽积分平均衍射效率为 97.36%。与传统的折射式宽波段光学系统相比, 含有双层衍射光学元件的宽波段光学系统的结构更简单, 分辨率更高。

**关键词:** 双层衍射光学元件; 衍射效率; 宽波段; 光学设计

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.07.005

## Application of Double-layer Diffractive Optical Elements in 400–900 nm Wide Waveband Optical System

YANG Liang-liang

(School of New Energy and Electronics, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China)

**Abstract:** Double-layer diffractive optical elements (DOEs) can work within a wide spectral band and have high diffraction efficiency. A mathematical analytic model of the polychromatic bandwidth integration average diffraction efficiency for double-layer DOEs in a certain incident angle range is proposed. A 0.4 to 0.9  $\mu\text{m}$  wide waveband optical system containing double-layer DOEs is designed. The optical system has a focal length of 28 mm, a  $F/\#$  of 2 and a field of view of  $18^\circ$ . It uses a Petzval objective structure consisting of four lenses. Its Modulation Transfer Function (MTF) is greater than 0.67 at 60 lp/mm. The bandwidth integration average diffraction efficiency of its double-layer DOEs is above 91% in the 0.4 to 0.9  $\mu\text{m}$  waveband. In the optical system, the incident angle upon the diffractive surface is within the range of  $0^\circ$  to  $8.62^\circ$ . The comprehensive bandwidth integration average diffraction efficiency of the double-layer DOEs is 97.36%. Compared with the

**收稿日期:** 2018-04-28

**基金项目:** 江苏省高校自然科学研究基金项目(16KJD140001); 2017 年大学生创新创业训练计划项目(省级指导 201710324008X)

**作者简介:** 杨亮亮(1986-), 女, 江苏盐城人, 博士, 讲师, 主要从事光学设计与聚光光伏系统设计研究。  
E-mail: yang\_liangliang@163.com

traditional refractive wide waveband optical system, this wide waveband optical system containing double-layer DOEs has a simpler structure and higher resolution.

**Key words:** double-layer diffractive optical element; diffraction efficiency; wide waveband; optical design

## 0 引言

目前很多公共场所都安装了监控系统,包括金融、保险、邮电等办公场地的安保系统、道路上的测速抓拍系统以及恶劣工作条件下代替人工监视的侦测系统等等。这些监控系统一般都采用现成的光学成像镜头,而常用的光学成像镜头又都采用可见光成像。在光照充足的情况下,这些镜头的成像质量尚佳;但是在黑暗以及能见度不佳的情况下成像模糊,导致监控摄像机的清晰度存在很大问题,给图像识别带来很大困难,容易造成错误判断。所以人们引入了夜视系统,但传统的折反射式夜视镜又因工作波段较宽而具有比较复杂的光学结构。

由于具有特殊的负色散性质,衍射光学元件可以在较宽的波段范围内很好地校正色差<sup>[1-4]</sup>。单层衍射光学元件的衍射效率会随着波长偏离设计值而下降很快,但双层衍射光学元件则可在较宽的光谱范围内实现很高的衍射效率<sup>[5-7]</sup>,所以本文采用双层衍射光学元件。

首先,针对工作在一定入射角度范围内的双层衍射光学元件,分析并给出了复合带宽积分平均衍射效率的数学表达式。然后,基于衍射光学元件特殊的负色散和零场曲等性质,设计了一种含有双层衍射光学元件的 Petzval 型的宽波段光学系统,其工作波段为  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$ ,视场为  $18^\circ$ ,  $F/\#$  为 2。与基于折射透镜的传统宽波段光学系统相比,该系统结构简单,尺寸小,重量轻。其中采用的双层衍射光学元件在工作入射角度范围内的复合带宽积分平均衍射效率为 99.36%。

## 1 双层衍射光学元件的衍射效率

衍射效率是评价衍射光学元件以及含有衍射光学元件的折衍射混合光学系统的重要指标之一<sup>[8]</sup>,其大小决定了衍射光学元件在折衍射

混合光学系统中应用的可行性以及工作波段<sup>[9-10]</sup>。

对于中间介质为空气的分离型双层衍射光学元件,在两个设计波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  处,双层衍射光学元件的位相延迟表达式满足以下方程<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} [n_1(\lambda_1) - 1] \times d_1 + [n_2(\lambda_1) - 1] \times d_2 = \lambda_1 \\ [n_1(\lambda_2) - 1] \times d_1 + [n_2(\lambda_2) - 1] \times d_2 = \lambda_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $n_1(\lambda)$  和  $n_2(\lambda)$  分别为两个谐衍射光学元件在波长  $\lambda$  处的折射率;  $d_1$  和  $d_2$  分别为两个谐衍射光学元件的微结构高度。从式(1)中可以看出,当双层衍射光学元件的材料确定之后,衍射光学元件的微结构高度就可求得,从而进一步得到双层衍射光学元件的第  $m$  级次的衍射效率:

$$\eta_{om} = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{[n_1(\lambda) - 1] \times d_1 + [n_2(\lambda) - 1] \times d_2}{\lambda} \right\} \quad (2)$$

第  $m$  衍射级次的带宽积分平均衍射效率为

$$\bar{\eta}_{om} = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{[n_1(\lambda) - 1] \times d_1 + [n_2(\lambda) - 1] \times d_2}{\lambda} \right\} d\lambda \quad (3)$$

式中,  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$  分别为工作波段内的最小波长和最大波长。用于光学成像系统的双层衍射光学元件的微结构表面的入射角度通常不是正入射,而是在一定的角度范围内。多层衍射光学元件第  $m$  衍射级次的带宽积分平均衍射效率与入射角度之间的关系如下<sup>[12]</sup>:

$$\bar{\eta}_m(\lambda) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \text{sinc}^2 \left\{ m - \sum_{i=1}^N \right.$$

$$d_i \left[ \frac{\sqrt{n_{i,j}^2(\lambda) - (n_{i,j}(\lambda) \sin \theta_{ij})^2} - \sqrt{n_{i,j}^2(\lambda) - (n_{i,j}(\lambda) \sin \theta_{ij})^2}}{\lambda} \right] d\lambda \quad (4)$$

对于工作在一定入射角度范围内的双层衍射光学元件, 其复合带宽积分平均衍射效率为

$$\bar{\eta}_{mc}(\theta) = \frac{1}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \bar{\eta}_m d\theta \quad (5)$$

式中,  $\theta_{\min}$  和  $\theta_{\max}$  分别为双层衍射光学元件在工作角度范围内的最小和最大入射角。

## 2 传统的折射式宽波段光学系统

为了便于对比分析, 本文设计了一种工作在  $0.4 \sim 0.9 \mu\text{m}$  波段的传统折射式光学系统。如图 1 所示, 该系统的焦距为 28 mm, 视场为  $18^\circ$ ,  $F/\#$  为 2。这种系统以 Petzval 物镜结构为基础, 共由六片透镜组成。由于该系统的工作波段较宽, 前组和后组分别进行了消色差。为了校正场曲, 在像面前添加了一片场镜。光学系统的总长为 43.7 mm。图 2 所示为传统折射式光学系统的调制传递函数曲线。在 50 lp/mm 处, MTF 值高于 0.3。

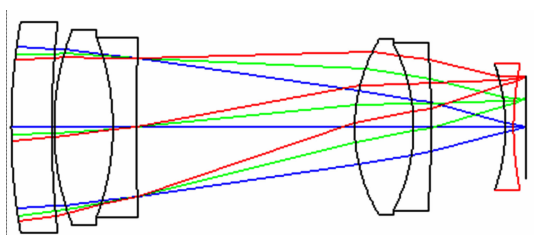


图 1 传统折射式光学系统的结构图

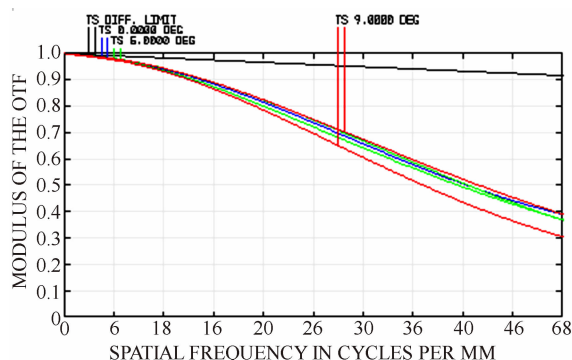


图 2 传统折射式光学系统的 MTF 曲线

## 3 含有双层衍射光学元件的宽波段光学系统

基于图 1 给出的传统折射式光学系统的结构, 利用衍射光学元件的特殊性质, 设计了图 3 所示的折衍射混合成像光学系统。为了在宽波段范围内较好地校正系统的色差及其它像差, 系统前组采用双层衍射光学元件, 后组则简化为一片正透镜, 并在像面前放置一个场镜。光学系统的总长减至 34.5 mm。图 4 所示为含有双层衍射光学元件的宽波段光学系统的调制传递函数曲线。在 60 lp/mm 处, MTF 值高于 0.67。与采用折射透镜的传统折射式宽波段光学系统相比, 含有双层衍射光学元件的折衍射混合成像光学系统的像差更小, 成像质量更好, 且光学系统结构更简单、重量更轻。

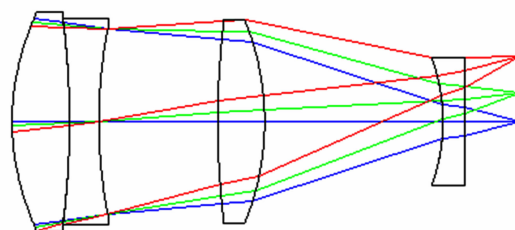


图 3 含有双层衍射光学元件的宽波段光学系统

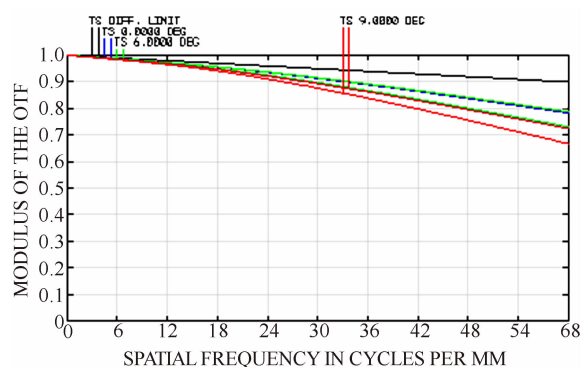


图 4 含有双层衍射光学元件的光学系统的 MTF 曲线

图 5 所示为含有双层衍射光学元件的光学系统的畸变。该系统的最大畸变为 0.78%。

## 4 带宽积分平均衍射效率分析

对于图 3 所示的折衍射混合光学系统中的分离型双层衍射光学元件, 其基底材料采用 E48R 和 Polycarb 光学塑料<sup>[13]</sup>。根据带宽积分

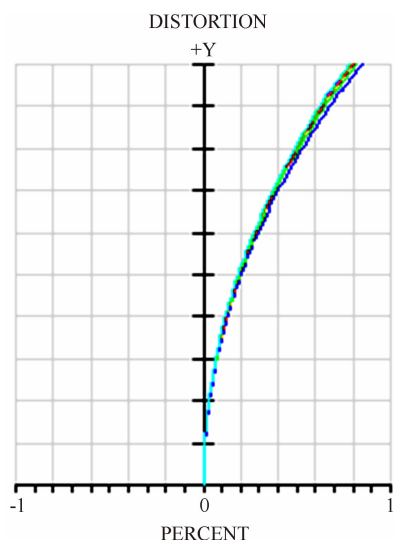


图 5 光学系统畸变

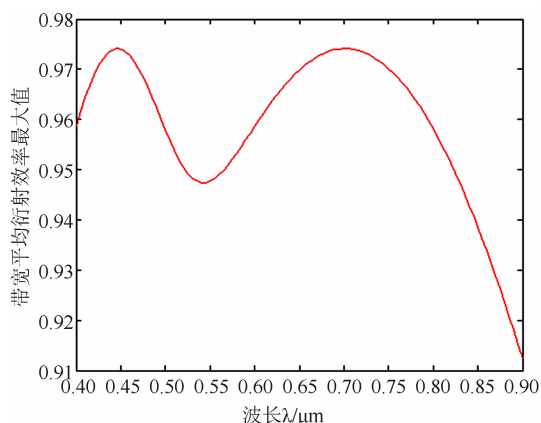


图 6 双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率。可以看出，最大带宽积分平均衍射效率为 97.41%，0.4~0.9  $\mu\text{m}$  整个波段内的带宽积分平均衍射效率在 91% 之上。

从光学系统结构图中可以看出，入射到双层衍射光学元件衍射面上的入射角范围为  $0^\circ \sim 8.62^\circ$ 。假设各个入射角度的权重系数相等，利用式(4)得到该双层衍射光学元件的复合带宽积分平均衍射效率为 97.36%。

## 5 结束语

由于具有负色散特性以及不产生场曲的特点，衍射光学元件可用于许多成像光学系统。对于工作在一定入射角范围内的双层衍射光学元件，本文提出了复合带宽积分平均衍射效率的表达式。然后，基于 Petzval 结构设计了一种工作在 0.4~0.9  $\mu\text{m}$  波段的传统折射式宽波段光学系统，其焦距为 28 mm， $F/\#$  为 2，视场为  $18^\circ$ ，MTF 值在 50 lp/mm 处高于 0.3。

在此基础上，设计了一种含有双层衍射光学元件的宽波段光学系统。在 60 lp/mm 处，其 MTF 值高于 0.67。所用双层衍射光学元件在 0.4~0.9  $\mu\text{m}$  整个工作波段内的带宽积分平均衍射效率高于 91%。光学系统中入射到双层衍射光学元件衍射面上的入射角度为  $0^\circ \sim 8.62^\circ$ ，相应的该双层衍射光学元件的复合带宽积分平均衍射效率为 97.36%。与传统的折射式宽波段光学系统相比，含有双层衍射光学元件的折衍射混合宽波段光学系统的分辨率更高，结构更简单，重量更轻。

## 参考文献

- [1] Stone T, George N. Hybrid Diffractive-refractive Lenses and Achromats [J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(14): 2962-2966.
- [2] Wood A P. Design of Infrared Hybrid Refractive-diffractive Lenses [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(13): 2256-2258.
- [3] 冷家开. 长焦距高分辨率折衍射混合光学系统的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [4] 冷家开, 崔庆丰, 裴雪丹, 等. 折衍射混合复消色差望远镜物镜中的色球差 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 981-987.
- [5] 薛常喜, 崔庆丰, 潘春艳, 等. 基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3016-3020.
- [6] 孙婷, 焦明印, 张玉虹. 单层与双层衍射元件的衍射效率对比分析 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 622-624.

(下转第 48 页)