

# 紫外工业检测光学系统设计及公差分析

何丽鹏<sup>\*\*</sup>, 林峰<sup>\*</sup>

福建师范大学光电与信息工程学院福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007

**摘要** 为满足紫外波段对产品的检测与识别需求,设计出一套宽光谱、较大视场、较大光圈、结构紧凑的紫外工业检测光学系统,要求紫外工业检测镜头的工作波长为240~320 nm,全视场角为40°,系统焦距为15 mm, $F$ 数为3,系统总长小于60 mm。该系统采用MS20-UV型紫外电荷耦合器件(CCD),其分辨率为1920 pixel $\times$ 1080 pixel,像元尺寸为5.48  $\mu\text{m}\times$ 5.48  $\mu\text{m}$ 。从成本及像质方面综合考虑,最后采用全球面透射式且非胶合方案。该系统采用反摄远物镜为初始结构,利用Zemax光学软件进行设计;结合工艺要求对设计结果进行公差分析,确定公差误差的来源,并进行相关结构的优化,给出优化前后的蒙特卡罗模拟结果;最终设计出全视场调制传递函数(MTF)在100 lp/mm范围内均大于0.5,场曲小于0.1 mm,畸变小于1.3%的紫外镜头。与其他紫外系统相比,设计的系统具有成像质量高、分辨率高、畸变低、焦距短、结构紧凑的优点。

**关键词** 光学设计; 工业检测; 紫外; 光学系统; 色差; 公差分析

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.102201

## Design and Tolerance Analysis of UV Industrial Inspection Optical System

He Lipeng<sup>\*\*</sup>, Lin Feng<sup>\*</sup>

*Fujian Provincial Key Laboratory of Photonic Technology, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China*

**Abstract** In order to meet the detection and identification requirements of products in the ultraviolet (UV) band, we design a set of UV industrial inspection optical system with wide spectrum, large field of view, large aperture and compact structure. Its design requirements are: UV industrial inspection lens with working wavelength of 240-320 nm, full field of view angle of 40°, system focal length of 15 mm,  $F$  number of 3, and total system length of less than 60 mm. The system uses MS20-UV type UV charge coupled device (CCD) with a resolution of 1920 pixel $\times$ 1080 pixel, pixel size of 5.48  $\mu\text{m}\times$ 5.48  $\mu\text{m}$ . Considering the cost and image quality, the design adopts the global transmissive and non-glued solution. The system uses an anti-telescopic objective lens as the initial structure and uses Zemax optical software to design. The tolerance analysis is performed on the design results to determine the source of the tolerance error in combination with the requirements of the process requirement. And the relevant structure is optimized. Monte-Carlo simulation results before and after optimization are compared. Finally, the UV lens is designed with the modulation transfer function (MTF) of full field of view of more than 0.5 in the range of 100 lp/mm, the field curvature of less than 0.1 mm and the distortion of less than 1.3%. Compared with other UV systems, this system has the advantages of high image quality, high resolution, low distortion, short focal length and compact structure.

**Key words** optical design; industrial inspection; ultraviolet; optical system; chromatic aberration; tolerance analysis

**OCIS codes** 220.4830; 120.4820

## 1 引言

目前,波长在可见光和红外波段的工业镜头产

品很多,而在紫外(UV)波段的产品较少。相对于可见光和红外波段而言,紫外波段具有更短的波长,更有可能击中原子和分子。因而,与普通镜头相比,

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-04-01; 录用日期: 2018-04-06

\* E-mail: lfeng127@hotmail.com; \*\* E-mail: 2209748668@qq.com

紫外镜头更能看清一些潜在的、反差微弱的或受背景干扰的物体表面细节,如表面的划痕、焊伤或者遗留手印等<sup>[1-3]</sup>,非常适合工业化生产过程中对产品的检测和识别。随着紫外技术的发展<sup>[4-6]</sup>,紫外镜头的运用必将越来越广泛。

在紫外材料限制的情况下,对色差的校正较为困难,因此,传统的紫外系统一般采用反射式结构。但考虑到反射系统的通光量较小,其视场通常小于折射系统,且经常会遇到直接或间接到达最终传感器的视场杂散光问题,装配难度和工艺难度大大提高。经典的卡塞格伦系统就是一个典型例子,它需要适当遮挡,以抑制在两个反射镜口径外直接通过的有害杂散光。反射系统一般应用在长焦距、小视场的物镜中,难以同时实现大的相对口径和大视场。目前,也有为了实现大视场而采用离轴反射结构的系统<sup>[7-9]</sup>,但由于中心遮挡口径过大,从而影响了系统的通光效率和像质。当折射系统直接起作用,没有任何中心遮拦时,可以获得较高的通光效率,不存在与中心遮拦相关的像质下降的问题;而且,折射系统可以通过增加一定的元件来获得具有大视场、大相对孔径和良好像质的结构,从而可以避免非球面加工费用高昂的问题,大大降低了设计制造成本及难度。Eijiroh等<sup>[10]</sup>公布了一款8片4组的折射式系统,虽然它的 $F$ 数可以达到2.3,但视场只有 $5^\circ$ ,靶面也比较小;石恩涛等<sup>[11]</sup>设计了一款10片4组的紫外羽流系统,其视场虽然达到了 $40^\circ$ , $F$ 数为2,但其焦距较长,镜片数也较多,成像质量较差。

目前,国内的紫外波段镜头主要应用在电路电晕检测、大气臭氧含量监测、军事导弹、公安侦查等方面。这类紫外镜头的特点是焦距长、视场小、相对口径大、总长长,不适合用于工业产品的检测。为了满足工业产品的检测要求,本文针对工业产品检测设计出一款紫外检测系统。与其他的紫外系统<sup>[4,12-13]</sup>相比,本系统突破传统利用反射式及非球面系数校正色差的复杂初始结构,根据消色差理论,通过合理分配光焦度进行色差校正,并针对工艺要求进行公差分析。结果发现:与其他的紫外系统相比,本文设计的紫外系统的光学间隔变化更敏感。通过蒙特卡罗分析对10个最大影响因素进行分析,并通过追踪关键光线路径进行调整及优化,最后设计出一款结构紧凑、像质良好、满足工艺制造的紫外系统。

## 2 系统设计

### 2.1 设计思想

目前,关于紫外光学系统设计研究的相关文献较少,且目前所查文献中并没有短焦距紫外系统的相关介绍。综合考虑色差、相对口径、焦距,选择Alreht的反摄远物镜作为本设计的初始结构,其初始结构如图1所示。处于 $240\sim 320\ \mu\text{m}$ 紫外光谱的光学材料有氟化物、熔石英、UBK10玻璃和蓝宝石,考虑其透射性质,最终采用熔石英、氟化钙作为光学材料。但这两种材料的阿贝数相差小,热膨胀系数相差大,色差校正难度较大。在整个结构设计过程中,考虑到多数晶体材料的理化性能不良,其胶合工艺比普通光学玻璃的胶合更复杂;而且有机胶层对紫外光线有强烈的吸收作用,会影响像质,因此本系统不宜采用胶合型的透镜。由于氟化钙在空气中容易潮解,因此需要慎重考虑系统第一片镜片和最后一片镜片材料的选择。可见,为了得到高像质的紫外成像系统,必须合理地分配光焦度及匹配材料。

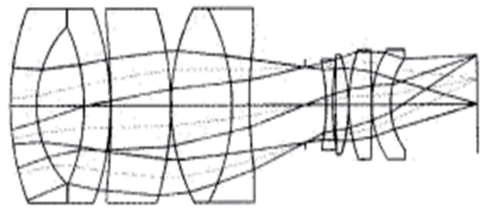


图1 初始结构

Fig. 1 Initial structure

### 2.2 系统设计参数

表1列出了所设计的紫外光学系统的主要设计指标,如表1所示(MTF为调制传递函数,TTL为光学总长)。

表1 光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system

System parameter	System index
Display type	MS20-UV
Wavelength /nm	240-320
Field of view /( $^\circ$ )	40
Image format /mm	$6.6\times 8.8$
TTL /mm	$<60$
Focal length /mm	15
Sensor pixel	$1920\times 1080$
Sensor pixel size / $\mu\text{m}$	$5.48\times 5.45$
MTF	$\geq 100\ \text{lp/mm}@0.5$
Distortion /%	$<2$

### 2.3 设计结果与像质评价

图 2 是经过光学软件设计及优化后的光学系统结构图。由图 2 可知,系统采用 9 片 3 组的结构,前三片镜片构成第一组,中间三片镜片为第二组,最后三片为第三组。这三组都是库克三片式的变形,对于每一组,其自身都具有校正像差的性质。在第二组与第三组中引入对称结构,可对整个系统轴外像差的校正起到至关重要的作用。三组都采用了分离物镜的原则,对整个系统具有校正色差的作用。双胶合透镜无法同时校正带区与边缘球差,将分离双透镜的空气间隔作为额外自由度就可以实现这个目标。通过逐渐增大空气间隔来减小(由过校正五级球差造成)欠校正带球差<sup>[10]</sup>。由于正光焦度元件的欠校正球差容易使边缘光线比带光线偏折得更厉害,所以增大空气间隔会影响带球差。因此,当增大空气间隔时,边缘光线在过校正的正负光焦度元件处的偏折要比带光线偏折的角度大,结果在边缘光线的球差校正大于带光线的球差校正,因此校正边缘像差可以重新调整零件形状。

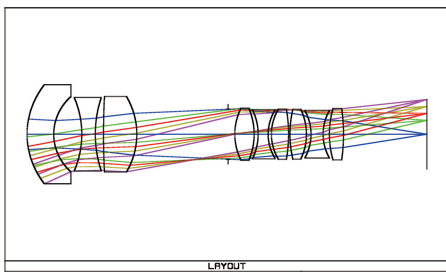


图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of optical system

图 3 为光学系统经过优化后的 MTF 曲线,该曲线反映了光学系统的分辨率。由图 3 知,在全视场范围内,光学系统的 MTF 值在 100 lp/mm 时均高于 0.5,而且曲线的下降趋势较为平缓,满足高成像质量的要求。图 4 是光学系统经过优化后的全视场星点图(SPT),星点图利用几何方法衡量光学系统能量密集分布的情况。从图 4 的星点图中可以看出弥散斑均方根(RMS)直径最大为 4.445  $\mu\text{m}$ ,小于 5.48  $\mu\text{m}$ ,满足成像质量要求。图 5 为紫外光学系统经过优化后的场曲与畸变图,从图中可知场曲小于 0.1 mm,畸变小于 1.3%,可以满足成像要求。图 6 为衍射能量分布图,反映了光斑能量的集中程度。图 6 表明该系统的探测器像元尺寸在 4.5  $\mu\text{m}$  以内,能量集中度大于 93%,能量比较集中。

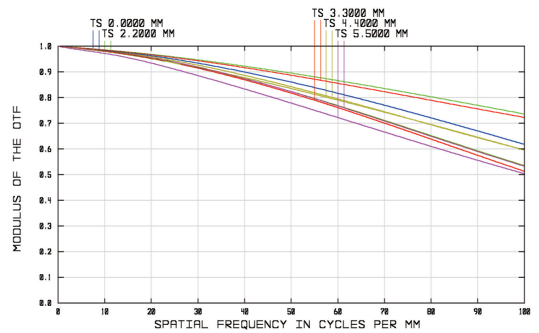


图 3 光学系统的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves of optical system

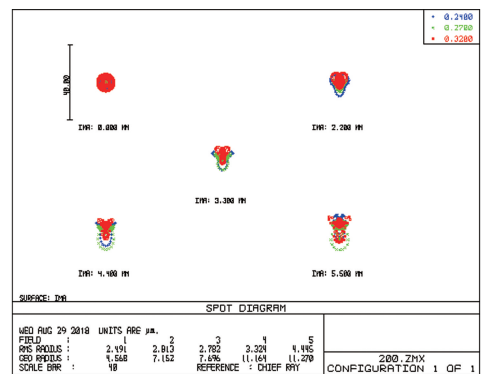


图 4 光学系统的星点图

Fig. 4 Spot diagram of optical system

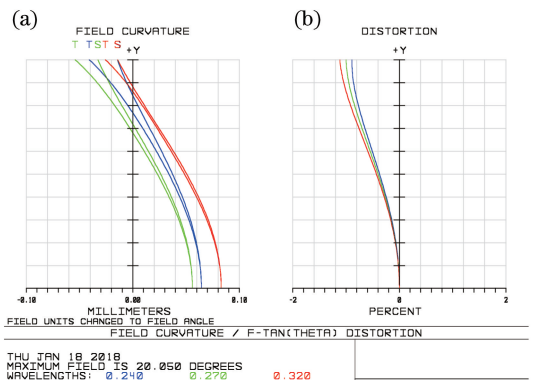


图 5 光学系统的(a)场曲与(b)畸变图

Fig. 5 (a) Field curvature and (b) distortion curves of optical system

### 3 公差分析

与设备有关的加工误差和镜头的装配公差往往会改变和降低理论设计的性能水平,因此制定公差分析是十分必要的。公差分配整个系统中所有光学元件及尺寸的制造公差,并对其进行预算,以确保系统以合理的成本达到所要求的性能水平。

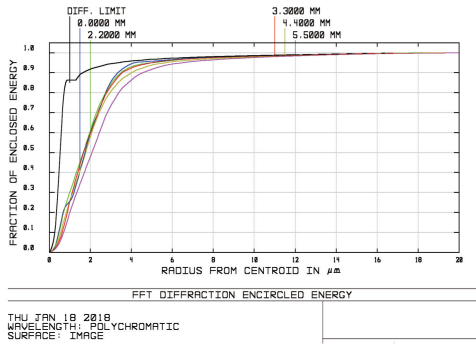


图6 衍射能量分布图

Fig. 6 Diffraction energy distribution diagram

### 3.1 公差分析与解决

在公差分析过程中需对所有光学和机械元件进行分配公差,数值分配如图7所示。公差分配方案为:表面光圈数为3,厚度公差为 $\pm 0.02$  mm,透镜表面的倾斜为 $\pm 0.0075$  mm,透镜元件的倾斜为 $\pm 0.0075$  mm,折射率公差为0.001,阿贝常数公差为1%。在Zemax软件中运行200次蒙特卡罗计算,分析在100 lp/mm处的MTF变化,最后得到200个蒙特卡罗分析结果。在蒙特卡罗的初次公差分析中发现,与其他类型的镜头相比,紫外镜头的公差更加敏感,即镜片的曲率、空气间隔的微小改变都会对像质产生很大影响。表2是首次公差分析中蒙特卡罗分析的结果,从表中可以知道其结果不满足加工工艺要求。通过查阅相关资料发现,光学设计中如果存在较大入射角和高级像差,镜片间的空气间隔就会对系统公差极为敏感。之后发现第5镜片、第8镜片的入线角度相对较大,因此利用Zemax宏语言追踪其角度的变化,得到一个比较好的孔径角范围,利用操作数控制孔径角的大小,最后对第4片与第5片以及第7片与第8片镜片的间距进行控制。通过反复尝试,最后找到了相对合适的数据来确保性能与工艺的合理性。

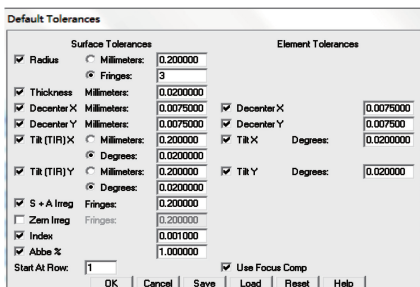


图7 光学系统的公差分配

Fig. 7 Tolerance distribution of optical system

表2 首次蒙特卡罗分析结果

Table 2 First Monte-Carlo analysis results

Monte-Carlo analysis	MTF value
$\geq 90\%$	0.077
$\geq 80\%$	0.106
$\geq 50\%$	0.131
$\geq 20\%$	0.162
$\geq 10\%$	0.191

### 3.2 公差评价

对紫外光学镜头进行蒙特卡罗公差分析。图8中的参数是蒙特卡罗分析中影响最大的参数,由图8可以知道,系统最为敏感的公差是镜头厚度公差(TTHI),通过图片数据可以知道在类胶合的镜片间,由于间隔较小,空气间隔的变化对系统的光学性能十分敏感。因此,可以通过合理地调整其间隔来减小公差敏感度。表3是在满足工艺装配的情况下,最后的蒙特卡罗分析结果:90%的镜头在100 lp/mm处的MTF值大于0.161,符合系统成像质量的要求。对比首次分析的蒙特卡罗结果可知,优化后,90%的镜头在100 lp/mm处的MTF值提高了2/3,说明入线角度相对较大,对镜头公差较为敏感。再结合表2的公差数值可以知道,此系统满足加工、装配工艺要求,并且可以保证光学系统的成像质量。

Worst offenders:

Type	Value	Criterion	Change
TTHI 10 11	-0.02000000	0.23871220	-0.38444430
TTHI 9 11	-0.02000000	0.23992156	-0.38323494
TTHI 17 19	0.02000000	0.24572855	-0.37742795
TTHI 15 17	-0.02000000	0.24591452	-0.37724197
TTHI 9 11	0.02000000	0.24602713	-0.37712937
TTHI 10 11	0.02000000	0.24873921	-0.37441729
TTHI 17 19	-0.02000000	0.25275703	-0.37039947
TTHI 16 17	-0.02000000	0.26542153	-0.35773497
TTHI 15 17	0.02000000	0.26755007	-0.35560643
TTHI 16 17	0.02000000	0.28162760	-0.34152890

图8 最敏感的公差分析结果

Fig. 8 Results of the most sensitive tolerance analysis

表3 最终的蒙特卡罗分析结果

Table 3 Final Monte-Carlo analysis results

Monte-Carlo analysis	MTF value
$\geq 90\%$	0.161
$\geq 80\%$	0.185
$\geq 50\%$	0.249
$\geq 20\%$	0.320
$\geq 10\%$	0.382

## 4 结论

本课题组将光学设计与工艺要求相结合,采用反摄远物镜作为初始结构,利用光焦度分配的原理对大视场、大口径的反摄远物镜的镜片位置及结构

进行改造及调整,设计出波长为 240~320 nm、焦距为 15 mm、相对孔径为 1/3、全视场为 40°的折射紫外系统。在只使用熔石英、氟化钙两种材料且非胶合的情况下,仅用 9 片式球面透镜就可以达到指标要求,在满足工艺要求的情况下降低了工业制造成本和调试成本。像质分析及公差分析表明:该系统结构简单紧凑,成像质量良好,可以满足工艺要求,适合当代工业产品检测系统的光学设计要求。

### 参 考 文 献

- [1] Jin G P, Pang Q C. The key points of UV imaging and detecting system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(3): 294-297.  
靳贵平, 庞其昌. 紫外成像检测技术 [J]. *光子学报*, 2003, 32(3): 294-297.
- [2] Teng H S. UV imaging technology and its application [J]. *Optoelectronic Technology*, 2001, 21(4): 294-297.  
滕鹤松. 紫外成像技术及其应用 [J]. *光电子技术*, 2001, 21(4): 294-297.
- [3] Jin G P, Pang Q C. Development of UV fingerprint detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 198-202.  
靳贵平, 庞其昌. 紫外指纹检测仪的研制 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2): 198-202.
- [4] Chang Z, Wang Y, Si F Q, *et al.* Design and implementation of ultraviolet imaging system based on scientific grade CCD [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0804002.  
常振, 王煜, 司福祺, 等. 基于科学级 CCD 的紫外成像系统设计及实现 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0804002.
- [5] Liu H P, Yin D Y, Zhang R J, *et al.* Feasibility analysis and verification of high speed reentry target on ground ultraviolet detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1211004.  
刘火平, 尹达一, 张荣杰, 等. 地面紫外探测高空高速再入目标分析与验证 [J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1211004.
- [6] Jia Hui, Shi L S, Liang Z, *et al.* Research on the development of ultraviolet photodetectors [J]. *Jiangxi Science*, 2017, 35(2): 296-300.  
贾辉, 石璐珊, 梁征, 等. 紫外光电探测器的发展研究 [J]. *江西科学*, 2017, 35(2): 296-300.
- [7] Yu L, Lin G Y, Yu X Y. Optical system of far ultraviolet imaging spectrometer for space-based upper atmosphere remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122001.  
于磊, 林冠宇, 于向阳. 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统 [J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122001.
- [8] Wei X X, Xu F, Yu J J. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0416002.  
韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0416002.
- [9] Zhu Y, Zhang X, Wu Y X, *et al.* Optical design and stray light analysis for ultraviolet board width off-axis four mirrors optical system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0216001.  
朱杨, 张新, 伍雁雄, 等. 紫外宽幅离轴四反光学系统设计及其杂散光分析 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0216001.
- [10] Eijiroh T, Li F. Ultraviolet imaging system: US7057804B2 [P]. 2006-06-06.
- [11] Shi E T, Wang Y M, Fu L P. Optical system design of plume ultraviolet radiation monitor unit [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 112202.  
石恩涛, 王咏梅, 付利平. 羽流紫外辐射监视单元光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 112202.
- [12] Zhang H J, Ma J, Zhu H Y, *et al.* Design of "solar blind" ultraviolet zoom optical system used in corona detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 102201.  
张鸿佳, 马军, 朱海宇, 等. "日盲"紫外电晕检测变焦光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 102201.
- [13] Li B. Optical design of target range UV telescope system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1016001.  
李博. 靶场紫外望远系统光学设计 [J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1016001.