

文章编号:1002-2082(2015)03-0376-05

广角大相对孔径 $f-\theta$ 透镜光学设计

苏 阳, 安志勇, 李 琦, 徐 淼

(长春理工大学, 吉林 长春 132000)

摘 要:激光扫描系统中 $f-\theta$ 透镜是必不可少的部件, 针对目前国内激光扫描系统工作面小、测量速度慢、测量精度低等缺点, 设计出一种大视场大相对孔径 $f-\theta$ 透镜以改善以往系统的不足, 提高工作效率。设计中透镜是一种负畸变透镜, 属于像方远心光路, 预期参数为 $2\omega=60^\circ$, $D=120\text{ mm}$, $f=500\text{ mm}$ 。经过计算后, 利用 Zemax 软件对 $f-\theta$ 透镜模型进行了优化设计, 得到艾里斑直径 $3.514\text{ }\mu\text{m}$, 扫描范围为 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$, 相对孔径为 $6/25$ 的大工作面大相对孔径的 $f-\theta$ 透镜, 成像清晰, 优化结果达到了预期的设计指标。

关键词:光学设计; 大相对孔径; 大视场; 激光扫描; $f-\theta$ 透镜

中图分类号: TN249; TH703

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201536.0301007

Optical design of wide-angle large-relative-aperture $f-\theta$ lens

Su Yang, An Zhiyong, Li Qi, Xu Miao

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: The $f-\theta$ lens is an important essential component in laser scanning systems. For the shortcomings of current domestic laser scanning systems such as small working surface, slow measuring speed, low measurement accuracy, a large field of view (FOV) $f-\theta$ lens was designed with large relative aperture to improve the working efficiency. The designed lens is a negative distortion lens with the image space telecentric optical path. Expected parameters are as follows: $2\omega=60^\circ$, $D=120\text{ mm}$, $f=500\text{ mm}$. After calculation, the Zemax software was used to optimize the design for $f-\theta$ lens model. Finally, a large-working-area large-relative-aperture $f-\theta$ lens was obtained with an Airy disk diameter of $3.514\text{ }\mu\text{m}$, a scanning range of $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ and an aperture of $6/25$. The image is clear, the optimization results achieve the expected design target.

Key words: optical design; large relative aperture; large FOV; laser scanning; $f-\theta$ lens

引言

随着激光扫描应用范围的进一步扩展, 对 $f-\theta$ 透镜提出了更高的要求, 目前国内外专利、期刊报导中的 $f-\theta$ 透镜的入瞳直径一般均在 10 mm 左右。F 数特别大, 导致系统分辨率不高, 而且 $f-\theta$ 透镜大部分都是小工作面积的透镜, 虽然有大工

作面 $f-\theta$ 透镜, 但这些透镜都是通过提高透镜焦距来增大工作面的, 因此 $f-\theta$ 透镜总长受到限制。世界主要生产商 LINOS, CVI 等所生产的 $f-\theta$ 透镜都是基于大 F 数的小相对孔径结构。目前激光扫描系统中的 $f-\theta$ 透镜设计仅满足于对现有小工件的测量, 大型设备零件参数的确定及其精度问题

收稿日期: 2014-11-11; 修回日期: 2015-01-06

作者简介: 苏阳(1989—), 男, 吉林省吉林人, 硕士研究生, 主要从事光电测控技术与仪器方面的研究。E-mail: 529293883@qq.com

导师简介: 安志勇(1943—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向为光学工程和光电测控技术与仪器。

并没有得到很好地解决。大视场超大工作面 $f\theta$ 透镜的需求量加大,所以需要设计一款便于市场化,低成本,结构简单,且达到企业要求的高分辨率 $f\theta$ 透镜。因此本文设计的 $f\theta$ 透镜非常有现实意义。增大工作面的途径有两种:一种是通过提高镜头的相对孔径,另一种是增加视场角。本文采用增大镜头的相对孔径的方法来增大工作面,利用目镜结构,设计了广角大相对孔径 $f\theta$ 透镜,大大提高了系统分辨率与工作面积。

1 设计思路与参数确定

本文研究的是广角大相对孔径 $f\theta$ 透镜光学系统,增大镜头的口径到 120 mm 来增大工作面,提高系统分辨率,从而实现对大工件的精确扫描。同时因为视场越大畸变越大,给系统优化带来困难,因而视场不宜做得过大。

用于激光扫描系统中的 $f\theta$ 透镜是一种常用的具有特殊要求的透镜系统,它具有以下几个特性:

1) 由于光源一般为 CO_2 激光或 YAG 激光,因此工作波长为单色光,像质要求波像差要小于 $\lambda/4$,而且要求整个像面成平面且像质一致,无渐晕存在。如果想要得到平像面且像质一致的话,就需要校正系统的场曲,这样才可能使轴外和轴上达到像质一致,还能提高照明均匀性。校正场曲的条件:

$$\sum \frac{\Phi_k}{n_k} = 0 \quad (1)$$

式中: n_k 表示第 k 块透镜材料的折射率, Φ_k 表示第 k 块透镜的光焦度。由上式可知,场曲的校正需要正负透镜彼此分离。

2) 所设计的激光扫描系统属于像方远心光路。扫描器置于 $f\theta$ 透镜的物方焦点处,从而使扫描器扫描后的光束经 $f\theta$ 透镜平行射出。

3) 为了实现等速扫描,应使透镜产生一定的负畸变,从而实现线性扫描。此时产生的负畸变量为

$$\Delta Y = f \tan \theta - f \theta = f(\tan \theta - \theta) \quad (2)$$

相对畸变,即偏离程度须满足:

$$q = (Y - f\theta) / f\theta < 0.5\% \quad (3)$$

扫描系统原理图如图 1 所示,是一种典型的旋转多面体扫描器。多面体一般为正六面体,在电机带动下匀速旋转,经过调制有一定光斑图形

的激光束经过 $f\theta$ 透镜扫过待测物件的边缘,通过光强的相位突变实现对物件边缘的精确测量。电机工作时,多面体的每个反射表面在接收屏上产生的扫描线都是按 X 轴正方向移动的,如果想在 Y 轴方向获得扫描效果,屏本身可以按图中 Y 轴方向以给定的速度匀速移动。目前在非接触式测量系统中几乎都采用多面体旋转的扫描方式。

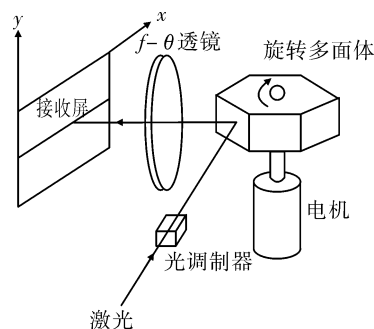


图 1 旋转多面体扫描器

Fig. 1 Rotating polygon scanner

为了满足扫描大工作面(如 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$)工件的需要,设计了筒长为 280 mm 的 $f\theta$ 透镜,视场角为 $\pm 30^\circ$,由成像公式 $Y = f \times \theta$ 可得镜头焦距约为 500 mm。为了获得优良的扫描效果,一般要求镜头具有衍射极限的性能。该 $f\theta$ 透镜的 F 数约为 2,工作波长为可见光,达到衍射极限的艾里斑半径 α 为 $\alpha = 1.22\lambda \times F$,经计算得 α 约为 $5 \mu\text{m}$ 。

表 1 系统设计参数

Table 1 System design parameters

参数	数值
工作距离/mm	280
视场角/(°)	± 30
焦距/mm	500
口径/mm	120
扫描面积/mm	500×500
艾里斑半径/ μm	5

2 初始结构的选取

光学系统根据焦距与相对孔径的大小确定一个类似目镜结构,一般目镜结构焦距为 25 mm 左右,入瞳直径为 4 mm~8 mm。为了简单,在计算初始结构时,假设系统为一个相应的目镜结构。

在优化设计过程中可通过进行等比例的缩放,放大 10 倍左右来满足扫描大工作面的设计要求,如图 2 所示。

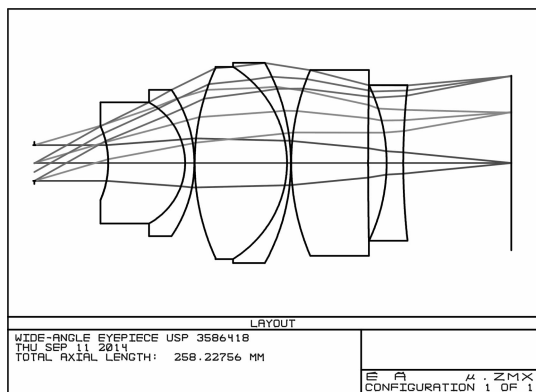


图 2 目镜初始结构

Fig. 2 Initial structure of eyepiece

$f\theta$ 透镜组的优点在于像高和视场角成线性关系, $f\theta$ 透镜组中的 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的工作面积决定了 $f\theta$ 透镜组的像高尺寸,根据像高和视场角的关系 $\tan \omega = y/f'$ 可知, $f\theta$ 透镜组的像高约为 288 mm。系统的光源波长为近红外的 $0.808\text{ mm} \sim 1.024\text{ mm}$ 波段。根据以上参数选择初始 $f\theta$ 透镜组。该透镜组是一个 6 片式的透镜组,在采用 Zemax 软件设计 $f\theta$ 透镜组的过程中,优化过程是一个很关键的步骤。因此,应同时满足以下 3 点要求:

- 1) 从 $f\theta$ 透镜组出射的光束要尽量与像平面垂直,这样才能保证扫描出射光束在经过玻璃样品的透射和高反射镜的反射后,依然能沿原光路传输。
- 2) 扫描光束在待测样品上形成的光斑要在艾里斑衍射极限以内。
- 3) $f\theta$ 透镜组的畸变像差和像散像差需满足一定的条件。

对于上述 3 点基本要求,分别通过在设计过程中添加不同的优化函数来解决。

3 像差分析及校正

在初始结构已经确定与基本结构满足的前提下,对系统像差进行分析,反复添加操作数进行优化,得到最终优化结果。由于目镜的视场角较大,一般应校正好轴外点像差。

整个系统的像差校正,是在各组透镜分别校正像差的基础上再进行综合平衡。若要同时校正更多种像差,须增加光学系统的可变参量,方法之

一是通过适当地复杂化系统,使前、中、后组均由 2 块透镜组成,借助 Zemax 软件的功能,建立合理的品质函数,设置合理的约束条件进行优化。

本透镜的基本构成:整个透镜的物方焦点 F 处置有光栏。从物方起依次分为:第 1 组、第 2 组、第 3 组。

第 1 组是由负、负的胶合透镜组成,且有 $\phi_1 < 0$ 。

第 2 组是由正、负的双胶合组成,且有 $\phi_2 > 0$ 。

第 3 组是由其余部分构成,且有 $\phi_3 < 0$ 。

由于本透镜是一远心系统,通过第 2 组的主光线离光轴较远,总是要产生极端畸变像差、像散。第 2 组分担的光焦度较大,通过此面的主光线向光轴方向的折射被增强,就要产生较大畸变像差。光焦度过大或过小时,像散校正也更加困难。

其次讨论第 3 组。如果第 3 组负的光焦度变弱,由于通过它的主光线离开光轴的程度变小,使畸变像差校正不足。反之,第 3 组负的光焦度变强,由于通过它的主光线过分地离开光轴,要控制高级畸变像差就变得困难了。计算表明控制 ϕ_3 在 $-1.7/f'$ 到 $-1.4/f'$ 之间为宜。

最后讨论第 1 组。经计算,令其光焦度 ϕ_1 控制在 $-1.9/f'$ 到 $-1.1/f'$ 之间。一旦超过上限,这个透镜的负的匹兹瓦尔和的绝对值变小,场曲就会校正不足。此时如果用增大第 3 组光焦度的绝对值的办法去改善,正象前述的那样,第 3 组产生较大的畸变像差校正就很困难,反之要在下限以外,第 1 组的负的匹兹瓦尔和的绝对值就变得过大,场曲就会校正过头。

随后分析各个面球差,通过设置操作数 SPHA 和 LONA,继续校正球差,并相应针对各个面加大权重,在满足其他条件的前提下,分析赛德尔图和点列图继续优化,设置相应的操作数,经过反复的分析与优化,直到使数值达到球差公差的范围,最终获得能够满足设计指标参数以及性能要求的系统。

总之,此系统设计主要是设法控制高级本征、衍生像差,由于利用 2 组胶合透镜,消去了色差。同时使各种像差均得到较好的平衡,成功地减少了由胶合透镜带来的高级像差。

4 设计结果

根据设计指标与要求,计算光学系统的初始结构,通过像差分析校正,不断优化传函曲线与点

列图,结合公差系统理论,调整评价函数,添加焦距、系统总长操作数,将镜片曲率、厚度设置为变量,经过反复优化,最终达到系统参数要求,结果如图3~图5所示。焦距为500 mm,视场角为 $2\omega=60^\circ$,口径为120 mm,艾里斑直径 $3.514\ \mu\text{m}$ 扫描面积 $500\ \text{mm}\times 500\ \text{mm}$,符合设计结果。综合使用双胶合透镜所造成的像质影响,对像质进

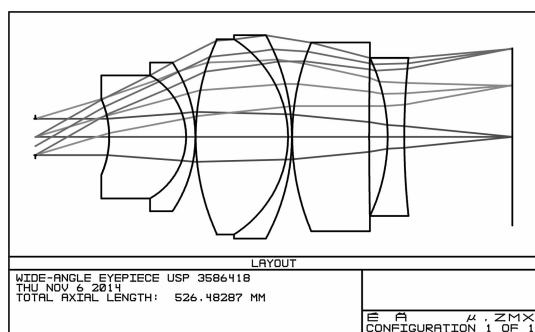


图3 最终结构示意图

Fig. 3 Final structure diagram

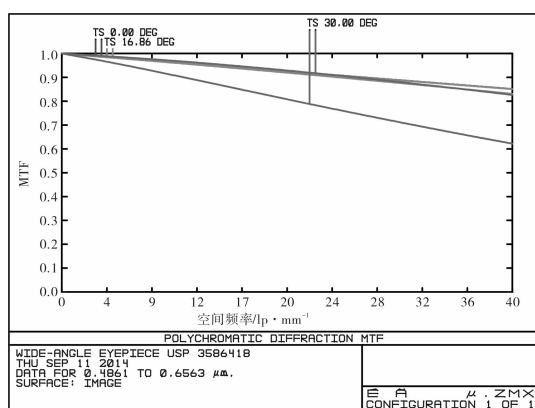


图4 MTF 曲线图

Fig. 4 MTF curves

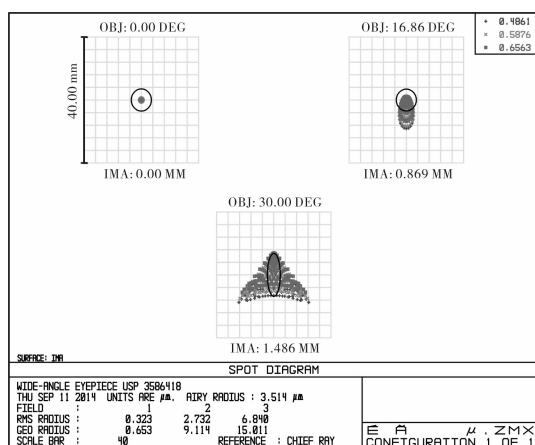


图5 系统点列图

Fig. 5 System spot diagram

行了更加实际的评价。结果表明,设计系统结构紧凑,公差均根据国标而定,方便生产加工。

从MTF传递函数曲线上可看出,仪器受衍射限制最高可能达到的频率为:40 lp/mm,MTF均在0.43以上。各视场的子午和弧矢重合较好,且均接近衍射极限,有较好的成像质量。

全部弥散斑大小也非常接近艾里斑直径,说明系统有很好的分辨率,成像质量良好,这样就排除由于弥散斑过大,受杂光影响,导致分辨率不高的因素。

像差曲线很小,如图6所示。从图6可以看出畸变小于0.5%。

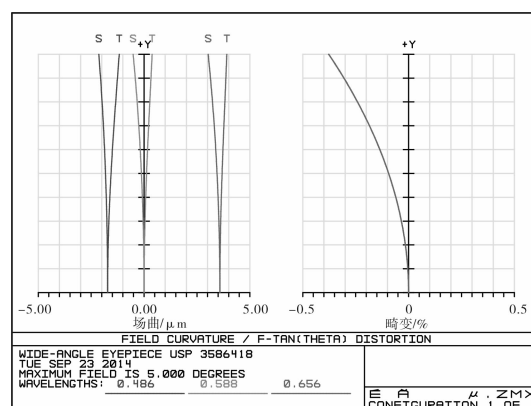


图6 像差曲线

Fig. 6 Aberration curves

根据设计结果,在焦距为500 mm、相对孔径为 $6/25$ 、视场角为 $2\omega=60^\circ$ 时,从像差和传递函数曲线均可看到:上述设计结果获得了接近衍射极限的成像性能,根据MTF曲线可见, $f\theta$ 透镜特别要求整个视场成像的一致性,而本设计结果恰恰在这点上得到很好满足,轴上轴外都校正得十分理想。随着视场的增加,弥散斑几乎没有增大,各视场的MTF曲线都几乎为一条仅受衍射极限影响的理想系统的MTF曲线,PTF也很小,光点最亮部位移动可以忽略。

5 结论

本文利用Zemax光学设计软件,设计了广角大相对孔径 $f\theta$ 透镜光学系统。在设计中,分析了高分辨率 $f\theta$ 透镜的像差特点,通过调整优化结构的权重,增减优化操作数,可以引导和建立一个优秀的光学结构。最终得到扫描范围为 $500\ \text{mm}\times 500\ \text{mm}$ 、焦距500 mm、相对孔径 $6/25$ 的 $f\theta$ 透镜。设计的透镜不仅成像质量优良,且结构简单紧凑,成本

不高,加工可行性强,具有很大的市场前景。

参考文献:

- [1] Zhang Yimo. Applied optical[M]. Beijing:China Machine Press, 1982:120-295.
张以谟. 应用光学[M]. 北京:机械工业出版社,1982:120-295.
- [2] Qi Yuansui. Design of $f\theta$ lens[J]. Journal of Applied Optics, 1989,10(6):6-10.
戚元燧. $f\theta$ 透镜设计初探[J]. 应用光学,1989,10(6):6-10.
- [3] Cui Guihua. Design of large diameter ultra-wide angle $f\theta$ lens[J]. Journal of Applied Optics,1993, 14(3):13-15.
崔桂华. 超广角大口径 $f\theta$ 透镜设计[J]. 应用光学,1993,14(3):13-15.
- [4] Ji Yiqun,Liu Hongjun,Shen Weimin. Optical design of $f\theta$ lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2007,36(1):73-75.
季轶群,刘红军,沈为民. $f\theta$ 透镜的光学设计[J]. 光子学报,2007,36(1):73-75.
- [5] Li Lin. Modern optical design method[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2009.
李林. 现代光学设计方法[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
- [6] Wang Zhijiang, Gu Peisen. Modern optical application technical manuals[M]. Beijing: China Machine Press,2010.
王之江,顾培森. 现代光学应用技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [7] Fotwicz P. Jablonski R. Laser scanning system for measurement of optical fiber diameter [J]. SPIE, 1987,859:245-248.
- [8] Meggitt B T. Gemetrical measurement of fiber-optic starter tubes using a novel optical technique[J]. Optic & Laser Technology, 1989,21(5):343-345.
- [9] Fuse K, Okada T, Ebata K. Diffractive/refractive hybrid F-theta lens for laser drilling of multilayer printed circuit boards[J]. SPIE,2002,4830:95-100.