

文章编号: 1001-2486(2001)05-0130-01

一种超大数值孔径折反式光学系统的设计与应用*

唐凤兰, 唐波, 易明

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 介绍一种超大数值孔径光学系统的设计研究, 其中包括设计的难点、研究思路、解决方法及实际结果。这个系统与传统的折反式光学系统相比较, 具有超大数值孔径和二次非球面尺寸大等显著特点。该光学系统将主要用于对大地样品进行探测、分析。

关键词: 光学设计; 超大数值孔径; 二次非球面尺寸大

中图分类号: TN741 **文献标识码:** A

The Design of a Ultra-high numerical Aperture Catadioptric Optical System and it's Application

TANG Feng-Lan, TANG Bo, YI Ming

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The optical design of an optical system of an ultra-high numerical aperture is introduced. The introduction includes the point difficulties, the design considerations, the solutions and the final results. Comparing to the past optical system, it has two noted characters, that is ultra-high numerical aperture and larger quadratic aspherical surface. The optical system will be used to detect and analyze the samples of the earth or soils.

Key words: Optical Design; Ultra-high numerical aperture; Large quadratic aspherical surface

在传统的折反式光学系统设计中, 即使运用现代化的设计手段, 要想设计出超大数值孔径的光学系统也决非易事。通常, 大数值孔径的照相物镜需要六个透镜组元方可使其数值孔径 NA 达 $0.4 \sim 0.5 (n=1)$; 在油浸显微镜中, 需用十个透镜组元方可使 NA 接近 $1.35 (n=1.52)^{[1]}$ 。本文所研究系统采用球面与非球面的相互配合, 可在真空中收聚由受激样品发出的 2π 立体角内的全部光辐射, 并聚焦于 CCD 摄谱仪上, 可使 NA 达到 $1.0 (n=1)$ 。从而, 凭借简单的装置实现了在真空中超大数值孔径的光学系统的设计。

系统采取的设计方案如图 1 所示, 它同时利用了光的折射和反射两种特性, 综合应用了球面与非球面等光学元件, 具有独特的耐高温性能和极高的聚光能力。因而, 这个系统能够突破传统折反式光学系统的诸多方面的局限。

1 聚光系统光学设计的难点

聚光系统要接收来自受激样品发出的 2π 立体角内的光辐射, 并把它聚焦到 CCD 摄谱仪上。其设计的难点在于: 由于受整套仪器设备的限制, 待设计的光学系统的外形尺寸必然受到一定的约束。在明确这个系统的外形尺寸和确定利用二次旋转椭球面的内表面来全反射大角度光线后, 如何确定椭球面方程? 截取椭球面的哪一部分最好? 这都是设计中的难点问题, 尤其是后者, 它不仅关系到椭球面的强度和收聚光辐射的范围, 同时还关系到各光学元件的加工难度和系统的设计资金等多方面的因素。

除二次旋转椭球面所涉及到的设计和加工难点之外, 本系统的装配也不是轻而易举的事。譬如, 为使椭球腔内的聚光折射子系统能收聚小角度范围内光辐射, 并聚焦于同一 CCD 摄谱仪上, 务必保证折反两子系统共轴并齐焦。

2 系统设计方法和步骤

2.1 系统结构形式的确定

这个系统设计目的是能收聚由受激样品发出的 2π 立体角内的光辐射。若单纯用一透镜折射系统, 由于折射系统光能反射和吸收损失较高, 则势必会导致该系统的数值孔径较小和系统光能量透过率低; 若单纯用一二次旋转非球面来作全反射面, 尽管反射镜镀膜后具有很高的反射率, 如对于镀金的金属反射镜, 反射率几乎为 100%, 但会给加工及装配带来相当大的困难, 同时对红外光线会产生冷反射效应。经综合考虑, 采用球面与非球面相互配合的方法来设计本系统。使用被截取的部分椭球腔的内表面经镀膜后做全反射面来收聚大角度光线, 用三透镜组成的聚光照明系统来收聚小角度范围内的光辐射。

2.2 旋转椭球面的设计

确定选用二次旋转椭球腔的内表面镀膜后作全反射面, 并根据整套设备对这个光学系统外形尺寸的需要, 可初步确

* 收稿日期: 2001-03-30
作者简介: 唐凤兰(1977-), 女, 硕士生。

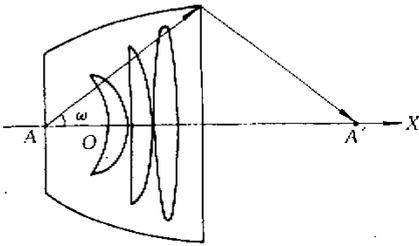


图1 光学系统示意图

Fig.1 Sketch map of Optical

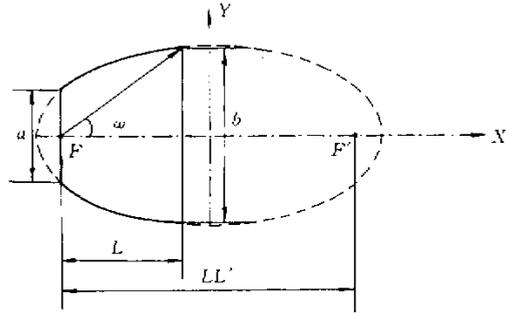


图2 椭球腔结构示意图

Fig.2 Sketch map of Oval Structure

定被截取的部分椭球腔的下底为78mm,上底不应超过160mm,且椭球两焦点之间的距离 $2c = 397.4\text{mm}$,亦即为该光学系统的共轭距离,同时,为兼顾考虑降低系统的加工难度、材料成本及减轻腔内折射子系统的负担,我们设计的椭球腔如上图2所示。

2.3 透镜折射系统的设计

由上图2可知,椭球腔所收敛光辐射的最小角度为 ω ,从而腔内的聚光照明系统的物方孔径角为 $U = \omega$,在使用光线折射作图法^[2]时,采用三透镜系统,并使每一个面的偏转角采取平均分配的方法,经过反复作图分析,最后确定像方孔径角 U' ,沿着光线的行进方向各透镜的曲率半径及间距依次如表1所示。其中 R 球面半径值, D 透镜口径值, T 透镜中心厚度值, d 各透镜间隔值。

表1 折射子系统初始结构参数

Tab.1 Primary Structure Parameters of Refractive Subsystem

	$R(\text{mm})$	$D(\text{mm})$	$T(\text{mm})$	$H(\text{mm})$
1	-79	55	12	0.3
2	-29.5			
3	860	66.2	12	
4	-51			
5	126.5	76.5	13	
6	-100			

2.4 优化初始结构参数

通过光学自动设计软件^[3]将求得的初始结构稍加优化即可得最终各项结构参数。

2.5 系统设计结果

(1) 椭球在二维平面上的投影为： $\frac{x^2}{218^2} + \frac{y^2}{92.25^2} = 1$ 。

(2) 被截取椭球的两弦长分别为 a 和 b ,高为 L ,椭球腔内表面收敛光辐射的立体角从 ω 到 $\pi/2$ 。

优化后折射系统各球面的参数值、各透镜间距及折、反两个子系统工作在“齐焦”的状态下的物象共轭距离 LL' 。

3 系统设计结果分析与应用

系统已投入了制造加工阶段。该系统不仅能很好地减小轴向误差,加上大尺寸非球面的应用,使得垂轴方向上的误差同样有了一定的改善。尤其是这个光学系统工作于真空环境时,其 $N.A$ 值达到1.0。象这种具有超大数值孔径的光学系统在国内尚未见报导。

中科院某所曾从英国引进了一套用于检测岩层的先进仪器,但该仪器中的光学系统数值孔径太小,不能接收来自受激样品的全部光辐射,从而不能获取对待测样品的成分、“年龄”及成因等更多信息。于是,我们协作研制了上述光学系统和相应结构。由于要兼顾原进口仪器的外形尺寸及功能匹配,自动最优化设计受到很严的边界约束,以致给设计、制造、检测、调校带来一系列新的困难。我们认为,本仪器在激光泵浦、石油开采、矿物勘探及土样分析等方面将会有广泛的应用前景。

参考文献：

- [1] Pablo Benítez and Juan C. Miñano. Ultrahigh-numerical-aperture imaging concentrator. [J]. Opt. Soc. Am. A., 1997, 14(8):1988-1997.
- [2] 袁旭沧等. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] 王永仲. 新光学系统的计算机设计[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

