

文章编号: 1005-5630(2014)05-0416-04

一种长工作距视频显微镜光学系统设计

高 健, 向 阳, 尹志东, 周 丹

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 视频显微镜随着 CCD 探测器的发展得到了广泛应用。但其工作距离受以往折射式光学系统的限制, 工作距离较短, 影响了其应用范围。分析了长工作距视频显微镜的像差特点, 并结合其长工作距离, 利用光学设计软件 Zemax 进行光学成像效果的仿真, 给出了工作距 84.5 mm, 数值孔径 0.16, 光学放大倍率 5 倍, 物方线视场 1.2 mm, 分辨率 7.7 μm 的折反射式显微镜光学系统的设计结果。

关键词: 视频显微镜; 长工作距; 光学设计; 折反射式

中图分类号: TB 133 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2014.05.010

The optical system design of long working distance video microscope

GAO Jian, XIANG Yang, YIN Zhidong, ZHOU Dan

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The video microscope has been widely used in many applications with the development of CCD detector. The working distance of the video microscope is short due to the limitation of the catadioptric configuration and it affects its application. In this paper, we focus on the analysis of aberration characteristics which is influenced by the long working distance. At last, we use optical design software Zemax to simulate the optical effectiveness and give design results of cassegrain system where the working distance is 84.5 mm, the numerical aperture is 0.16, the optical magnification is 5, the field number is 1.2 mm and the resolution is 7.7 μm .

Key words: video microscope; long working distance; optical design; catadioptric configuration

引 言

视频显微系统是将观测物通过高清晰视频显微镜成像在 CMOS 或 CCD 靶面上, 并将视频信号转换成数字信号储存在计算机中或将图像显示在监视器上。结合测量软件, 可对观测物进行定量检测, 从而代替人眼, 以便长时间观察^[1]。

视频显微镜与传统的显微镜相比, 具有工作距离长、分辨率高、视场大、景深大、清晰度高等特点, 在检测领域及工业生产中得到了广泛的应用。由于视频显微镜是高清晰工业显微系统的重要组成部分, 因此, 视频显微镜具有较大的市场需求量。然而, 国内视频显微镜头的发展较落后, 产品规格少, 大多数产品存在着视场小、分辨率低、工作距离短等缺点。例如: 在 MA1045-Z 系列视频显微系统中, 最长的工作距只有 45 mm,

收稿日期: 2014-03-26

作者简介: 高 健(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事现代光学技术与工程应用的研究。E-mail: 396285627@qq.com

通讯作者: 向 阳(1969-), 男, 教授, 主要从事现代光学技术与工程应用的研究。E-mail: xyciom@163.com

而在特殊场合需要有更长工作距的显微系统。因此,研究长工作距视频显微镜具有重要的现实意义。

1 光学系统特点

1.1 折射式光学系统特点

由于该系统具有较小的视场,因此有较小的垂轴像差。但因系统的工作距离和数值孔径较大,所以会对轴向像差产生较大的影响,故应对该系统的轴向像差进行校正。

(1)球差和位置色差的校正。系统采用不同材料的正负透镜组合来校正球差和位置色差,其正透镜光焦度为 Φ_1 ,负透镜光焦度为 Φ_2 ,初级色差系数为 $\sum C_1 = \frac{h_1^2}{\nu_1} \Phi_1 + \frac{h_2^2}{\nu_2} \Phi_2$ 。由于 Φ_1 与 Φ_2 符号相反,所以组合系统的位置色差要比单一透镜组的位置色差小,并且正负透镜的色散系数差别越大,越有利于对其校正。

(2)场曲的校正。由于视频显微镜是由前组正透镜与后组负透镜组成,故其光焦度为正、负光焦度分离,分别为 Φ_1 和 Φ_2 。设其间距为 d ,则总体光焦度 $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2$ 。若假设两个透镜组的折射率相同,则其初级场曲系数 $\sum S_{IV} = j_2(\Phi_1 + \Phi_2)/n = j_2(\Phi + d\Phi_1\Phi_2)/n$ 。由于 Φ_1 与 Φ_2 符号相反,所以组合系统的场曲要比单一透镜组的场曲小^[2]。

(3)像散的校正。在选择初始结构时,使正组中存在双胶合或双分离透镜系统,并且正透镜在前负透镜在后。从而可产生符号相反的像散,来抵消系统的原有像散。但同时可能会产生一些高级像差,为了使高级像差减少,可以选择玻璃折射率差和色散差尽量大的胶合透镜^[3]。

1.2 反射式光学系统特点

(1)反射式系统像差。反射式系统不存在色差和二级光谱的问题。对于球面反射镜,当光阑处于球心时,系统没有色差、彗差、像散和畸变,只存在球差和场曲。

(2)中心遮拦。中心遮拦问题是反射式光学系统尤其是卡式系统中最常见的问题,中心遮拦对反射式成像系统的影响较大。在低频时,存在中心遮拦会使MTF(调制传递函数)下降;在高频时,存在中心遮拦会使MTF上升。此外,中心遮拦还对光学系统的分辨率和光能量分布有影响。中心遮拦越大,衍射斑越小,分辨本领越高,但图像的对比度会下降。

(3)需要非球面。由于反射系统(如卡式系统)中仅存在两个表面,表面的个数较少,对于像差的控制数量是不够的,所以在卡式系统中,绝大多数需使用非球面。

(4)视场小。反射系统的视场通常比折射系统的视场小。

1.3 折反射式光学系统特点

折反射物镜在增大视场、增大数值孔径、定中心精度和降低中心遮拦等方面优越于纯反射物镜。

消色差的近于无光焦度透镜组常用来作为提高数值孔径的前置补偿器。它的球差曲线可与反射镜的球差曲线相互抵消。

在显微镜中使用反射或折反系统的情况主要有两种。

一种情况是用于近红外或紫外的系统。由于能够透过近红外或紫外的光学材料较少,因此较难设计出高性能的光学系统,故需要使用反射或折反射系统。在这些系统中起会聚作用的主要是反射系统。为了补偿反射面的像差,需加入一定数量的补偿透镜,组成折反射系统。

使用折反射系统的另一种情况是为了增加显微镜的工作距离。由于反射镜能折叠光路,因此能够组成一种倍率高、筒长小而工作距离长的显微物镜系统。

本文主要应用折反射系统可增加显微镜的工作距离的特点,进行光学设计^[4]。

2 优化设计

2.1 光学设计指标

光学系统设计指标为:工作距离 84.5 mm,视场直径 1.2 mm,主波长 587 nm,工作波段 486~656 nm,数值孔径 0.16,放大倍率 5 倍。

2.2 CCD 参数

(1) CCD 尺寸

由于像高 $2y' = 2y\beta = 6 \text{ mm}$, 因此 CCD 靶面对角线尺寸应为 6 mm , 故应选择 1/3 英寸的面阵 CCD。它的靶面尺寸为: $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$, 对角线 6 mm 。

(2) CCD 像元尺寸及像素

由光学设计指标可知, 光学系统的分辨率为 $\sigma = \frac{0.61\lambda}{NA} = 2.24 \mu\text{m}$, 则 $2\Delta \leq \beta\sigma$, 故 CCD 的像元对角线尺寸 $\Delta \leq 5.6 \mu\text{m}$, 因此本设计采用 CCD 像元尺寸为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$, 像素为 $1\,280 \times 960$ 。

按上述 CCD 参数进行查阅, 一款与之相符的 CCD 型号为 Prolisica Gc1290 型 CCD, 其主要指标参数如表 1 所示。

2.3 折射式光学系统设计

综合考虑工作距离的长短、透镜边缘厚度、面型加工的难易之后, 经过反复优化, 最后完成 5 倍视频显微镜光学系统。图 1 是设计结果光学系统示意图。该系统的特征是在镜座内设置有 5 片物镜和一固定光阑。从物方数起, 第一片物镜和第二片物镜组合为一胶合透镜, 使轴外光束经胶合透镜后与主轴斜角大大地减小, 物镜 3、5 均为弯月负透镜, 物镜 4 为双凸透镜, 光阑位于物镜 4 与物镜 5 之间。

2.4 折反射式光学系统设计

考虑到系统的总长不宜过长, 将图 1 中的第五片透镜换成卡塞格林系统, 设计结果光学系统示意图如图 2 所示, 系统的总长比图 1 中总长减小了近 100 mm ^[5]。

球差特性曲线如图 3 所示, 可以看出, 各视场的球差和色差均很小。

点列图如图 4 所示, 各视场的弥散斑尺寸均接近爱里斑半径。

表 1 Prolisica Gc1290 型 CCD

Tab. 1 Prolisica Gc1290 CCD

参数	值
像素	1 280×960
靶面尺寸	4.8 mm×3.6 mm
像元尺寸	3.75 μm×3.75 μm
工作温度	0~+50 °C



图 1 光学系统外形图

Fig. 1 Layout of the optical system



图 2 带卡塞格林光学系统的系统图

Fig. 2 Layout of the optical system with Cassegrain's

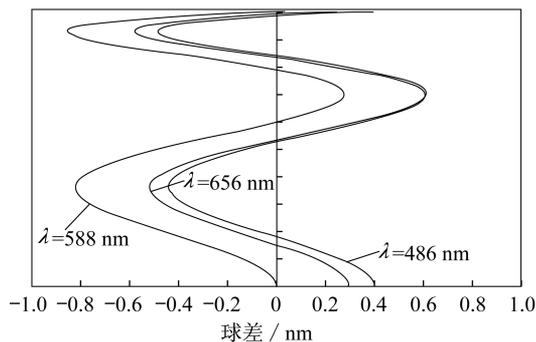


图 3 球差特性曲线

Fig. 3 Longitudinal aberration

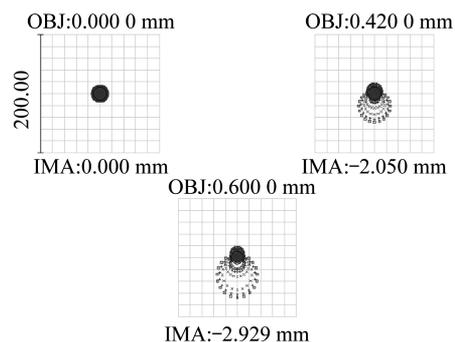


图 4 点列图

Fig. 4 Spot diagram

光学系统的调制传递曲线如图 5 所示。曲线接近衍射极限, 在 140 lp/mm 处截止, 在 50 lp/mm 处 MTF 均大于 0.32 , 分辨率可达 $7.7 \mu\text{m}$, 而且从该图可以看出各视场的子午和弧矢重合非常好, 都有较好的成像质量。

目前,已完成该光学系统的结构设计和镜头的试制,用该显微镜观测到的细胞如图6所示,观测结果较清晰。

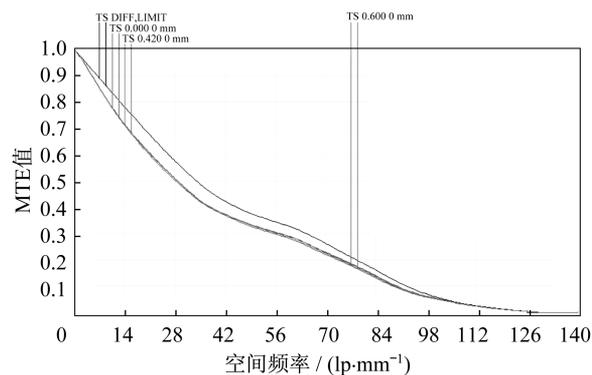


图5 调制传递函数

Fig. 5 Transfer function of the modulation

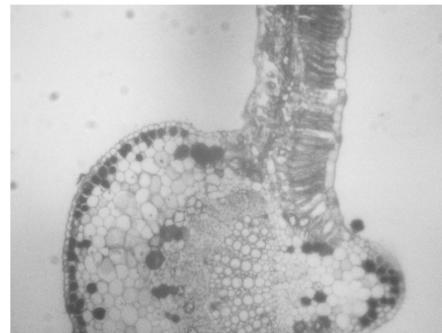


图6 细胞观测图

Fig. 6 Observation of cells

4 结论

分析了长工作距视频显微镜的像差特点,并提供了设计指标、CCD 参数及设计实例。通过合理的结构选型和优化设计,并考虑加工工艺和结构成本要求,获得了一种长工作距视频显微镜镜头,其结构简单、加工成本低、成像质量好以及具有较高的分辨率。目前,已完成该光学系统的结构设计工作和镜头的试制,若样机性能指标达到预期的要求,有望在长工作距离的观察中得到广泛应用。

参考文献:

- [1] 张 斌. 大视场显微镜的设计[J]. 光学仪器, 2003, 25(4): 81-83.
- [2] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 284-289.
- [3] 王文生. 应用光学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 183-188.
- [4] 王之江, 顾培森. 现代光学应用技术手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 290-295.
- [5] 刘 钧, 高 明. 光学设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 120-121.

(上接第 415 页)

参考文献:

- [1] MELOZZI M, PEZZATI L. Interferometric testing of annular aperture specification and measurement of optical systems[J]. *SPIE*, 1992, 1781: 241-248.
- [2] 侯 溪, 伍 凡, 杨 力, 等. 中心遮拦干涉图的圆泽尼克拟合对计算赛德尔像差的影响分析[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 54-60.
- [3] TATIAN B. Aberration balancing in rotationally symmetric lenses[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64(8): 1083-1091.
- [4] MAHAJAN N V. Zernike annular polynomials and optical aberrations of systems with annular pupils[J]. *Supplement to Applied Optics*, 1994, 33(34): 8125-8132.
- [5] DAI G M, MAHAJAN N V. Zernike annular polynomials and atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, 24(1): 139-155.
- [6] MALACARA D. Optical shop testing[M]. 3rd ed. 2007: 525-539.
- [7] 何湘艳, 陈莹花, 廖文哲, 等. 基于 Zemax 的简单连续变倍显微物镜设计[J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 41-45.
- [8] 胡肖彦, 吕丽军. 基于平面对称光学系统像差理论的折反射全景成像系统优化设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(1): 45-49.
- [9] 李 利, 吴 平, 马 鹤. 大相对孔径折射式复消色差天文望远镜物镜设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(3): 29-32.