

文章编号: 1005-5630(2023)03-0074-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.003.010

用于 MEMS 振镜激光扫描的显微物镜设计

王兴宇¹, 杨照清¹, 薛 萌¹, 郭汉明^{1,2}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 上海理工大学 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘要: 为满足微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)二维激光扫描系统对显微物镜小入瞳直径、大入射角度、大视场的要求, 利用光学设计软件 Zemax 设计了一款入瞳直径为 1.1 mm, 可匹配 MEMS 二维振镜 $\pm 18^\circ$ 大扫描角度的近红外无限共轭微型显微物镜。该物镜总长小于 23 mm, 数值孔径为 0.4, 分辨率为 1.26 μm , 工作距为 900 μm , 各项像差校正良好, 满足使用需求。设计结果表明, 该微型显微物镜可满足便携式皮肤检测仪器的 MEMS 二维振镜激光扫描系统的应用要求。

关键词: 光学设计; 显微物镜; 近红外; 大视场; MEMS 振镜
中图分类号: TH 742 **文献标志码:** A

Design of microscope objective for laser scanning of MEMS galvanometer

WANG Xingyu¹, YANG Zhaoqing¹, XUE Meng¹, GUO Hanming^{1,2}

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to meet the requirements of micro-electro-mechanical system (MEMS) two-dimensional laser scanning system for microscope objective with small entrance pupil diameter, large incident angle and large field of view, a near-infrared infinite conjugate microscope objective with an entrance pupil diameter of 1.1 mm and a large scanning angle of $\pm 18^\circ$ is designed by using optical design software Zemax. The total length of the objective lens is less than 23 mm. The numerical aperture reaches 0.4 and the resolution is 1.26 μm . The working distance is 900 μm . The aberration correction is good. The designed microscope objective can meet the needs of use. The results show that the microscope objective can meet the requirements of MEMS two-dimensional galvanometer laser scanning system for portable skin detection instruments.

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: 上海市地方能力建设项目 (21010502900)

第一作者: 王兴宇 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光学仪器设计。E-mail: wxy738737728@163.com

通信作者: 郭汉明 (1977—), 男, 教授, 研究方向为超分辨光学显微成像和光谱技术。
E-mail: hmguo@usst.edu.cn

Keywords: optical design; microscope objective; near infrared; large field of view; MEMS galvanometer

引言

显微物镜作为光学扫描系统的重要部件,很大程度上决定着光学扫描系统的成像性能^[1-2]。近年来,随着科学技术的发展,基于微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)二维振镜的光学扫描系统被广泛应用在便携式皮肤成像仪、共聚焦内窥镜等小型化、高光学分辨率、高成像速度的医疗检测仪器中^[3-6]。这些光学扫描系统要求体积小、易集成、高像质,相应的显微物镜则必须符合小尺寸、高分辨率、低像差、小入瞳直径的设计要求^[7-9]。国内外研究人员已对相关显微物镜进行了一定的研究^[10-13],在此基础上针对HAMAMATSU公司生产的S13989-01H系列MEMS二维振镜设计了一款与之配合使用的近红外无限共轭微型显微物镜,以MEMS二维振镜的相关性能参数作为光学系统初始条件,通过全视场点列图、MTF曲线图等参数评估其成像质量。设计结果可与S13989-01H系列MEMS二维振镜配合,应用于便携式皮肤成像仪中。

1 设计指标分析

基于MEMS二维振镜的光学扫描系统通常由激光光源、准直镜组、MEMS二维振镜、显微物镜等几部分组成,其扫描光路结构如图1所示。在整个扫描系统中,显微物镜的主要作用是对MEMS二维振镜出射的光束聚焦成像到物体表面进行扫描,是对系统的光学分辨率及成像质量影响最大的结构,其部分设计指标需要按照MEMS二维振镜的相关参数制定。

与本文所设计的显微物镜配合使用的HAMAMATSU公司生产的S13989-01H系列MEMS二维振镜的反射镜尺寸、扫描角度、扫描频率等相关参数见表1。S13989-01H系列振镜的快轴扫描频率达到29.3 kHz,可满足便携式

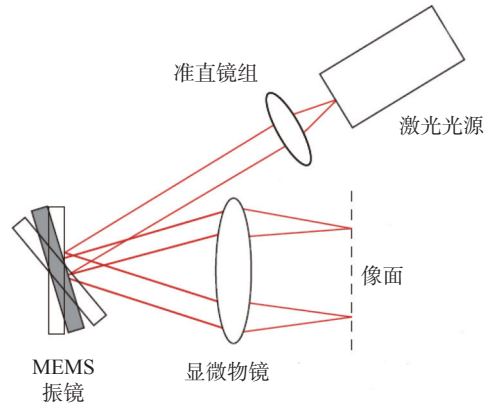


图1 扫描光路图

Fig. 1 Optical scanning path

皮肤成像仪对高扫描频率的要求,同时其整体尺寸为28.60 mm×20.42 mm,可满足便携式皮肤成像仪器集成化、小型化的需求。

表1 MEMS振镜的相关参数

Tab. 1 Related parameters of MEMS galvanometer

参数名称	指标
波段范围	400~1800 nm
扫描角度(快轴)	±18°
扫描频率(快轴)	29.3 kHz
反射窗尺寸	Φ1.23 mm
整体尺寸	28.60 mm×20.42 mm

入射到MEMS二维振镜的光束尺寸应小于反射窗尺寸,同时反射窗出射的光束需尽量充满显微物镜的入瞳,从而保证系统能充分利用显微物镜的性能,满足光学扫描系统的光学分辨率与成像质量要求。显微物镜的像方视场角需按照MEMS二维振镜的扫描角度来制定。研究表明,生物组织在近红外区域存在两个生物窗口:一个是700~900 nm的波长范围;另一个是1000~1400 nm的波长范围^[14]。其中第一个可探测窗口也被称为诊断窗口,组织在波长为800 nm左右时成像,体液的吸收系数达到最小值^[15]。同时考虑到光源波长对显微物镜分辨率的影响,本设计选择的光源是中心工作波长为830 nm的半导体激光器。物方数值孔径是影响显微物镜光学分辨率的重要参数。为了在成像时

能够分辨出皮肤的单个细胞结构，显微物镜的分辨率要达到微米量级，即要求实现 1~2 μm 的分辨率，分辨率的高低也会影响显微物镜物方视场的大小。为避免高数值孔径带来的优化与加工装配困难等问题，同时保证一定的物方视场大小，显微物镜的数值孔径确定为 0.4，此时显微物镜的分辨率为 1.26 μm，可满足与 S13989-01H 振镜在便携式皮肤成像仪器中配合使用的需求。根据以上分析，综合考虑实际使用中存在的问题，显微物镜的具体设计指标如表 2 所示。

表 2 物镜设计指标
Tab. 2 Objective design criteria

参数	指标
入瞳直径	1.1 mm
像方视场角	±18°
工作波段	800~860 nm
数值孔径	0.4
分辨率	1.26 μm
物方半视场	>0.4 mm
工作距	>0.8 mm
最大外径	<5 mm
总长	<25 mm

2 显微物镜光学设计

2.1 初始结构

根据缩放法，通过查阅光学设计手册及国内外设计专利等相关资料，对显微物镜的数值孔径、视场角、入瞳直径等设计指标进行对比分析，确定无限共轭微型显微物镜的初始结构如图 2 所示。

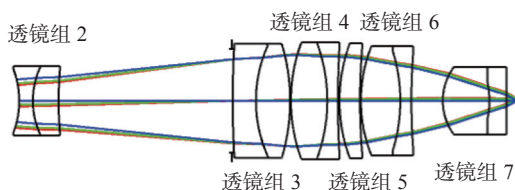


图 2 物镜初始结构

Fig. 2 Initial structure of objective lens

2.2 设计方法

光学系统的像差与光束经过每一个折射面时

的偏角有关，偏角越小，像差越小。为了减少光学系统的总体像差，在进行设计时，通常使物方发出的光束通过多个光学元件缓慢地折射后抵达像方。配合 S13989-01H 系列 MEMS 二维振镜使用的显微物镜需满足小尺寸要求，同时保证相对较大的像方视场角，为了保证光束经过每一个折射面时的偏角较小，需要用到多组双胶合透镜，结构较为复杂。优化过程中的困难主要来源于在合理平衡各像差间关系的同时，还需要注意总像差与结构尺寸间的平衡。

优化过程为：在 Zemax 光学设计软件中输入显微物镜的初始结构；根据相关设计指标设置入瞳直径、视场角、工作波段等起始参数；将透镜的厚度、曲率、元件间的间距等设为变量后，设置评价函数对像差进行优化。使用 TRAY 操作数配合 SUMM、PROD 等数学计算操作数对系统的球差、彗差等像差进行约束。DIMX 用于控制系统的最大畸变。通过边界条件操作数与 OPGT、OPLT 等数学操作数配合使用，对显微物镜的总长、工作距、透镜的中心厚度与边缘厚度进行约束，使显微物镜的结构设计合理。合理的结构可以在一定程度上降低显微物镜的加工与装配难度。最终得到的显微物镜结构如图 3 所示，此结构与初始结构相比，增加了一组双胶合透镜以匹配 MEMS 二维振镜 ±18° 的扫描角度。

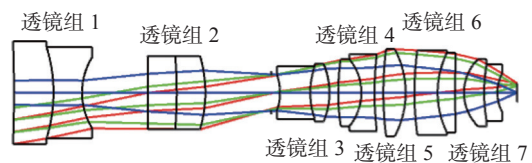


图 3 物镜最终结构

Fig. 3 Final structure of objective lens

由于设计的显微物镜系统结构较为复杂且存在多片弯月形透镜，因此在设计时要注意控制其机械定心系数 $Z \geq 0.05$ ，降低加工与装配难度。透镜的机械定心系数 Z 定义为

$$Z = \frac{1}{4} \left[\frac{D_1}{R_1} \pm \frac{D_2}{R_2} \right] \quad (1)$$

式中： D_1 、 D_2 分别为透镜前后折射面的口径； R_1 、 R_2 分别为透镜前后折射面的曲率半径；当透镜两折射面均为凹或凸时，取正号，当透镜两折射面为一凸一凹时，取负号。

2.3 设计结果

显微物镜的各透镜参数设计结果与初始结构中各透镜参数的对比如表3所示。透镜组1至透镜组7是对显微物镜中不同透镜组从左至右的编号, 其中透镜组1是为了匹配S13989-01H系列振镜扫描角度在初始结构中增加的一组双胶合透镜。该显微物镜系统的入瞳直径为1.1 mm, 总长为22.92 mm, 最大外径为4.64 mm, 焦距为1.37 mm, 工作距达到900 μm , 物方半视场为431 μm , 数值孔径为0.4, 分辨率为1.26 μm , 各项设计指标均满足预定要求。

表3 透镜数据
Tab. 3 Data of lens

透镜组	初始结构曲率 半径/mm	优化曲率 半径/mm	优化结构 材料
透镜组1		-62.26	H-ZF3
		-6.84	H-BAK7A
		3.01	
透镜组2	-8.46	-70.40	H-ZF62
	7.55	-20.12	H-ZLAF90
	36.60	-5.75	
透镜组3	91.85	-2.45	H-ZF3
	12.64	3.46	H-BAK7A
	-18.58	-3.31	
透镜组4	15.83	10.03	D-FK61A
	-15.71	-2.36	H-ZF11
	93.06	14.76	
透镜组5	15.40	15.48	H-LAK10
	60.69	-4.09	
透镜组6	13.76	13.96	H-QF8
	-15.72	4.03	H-ZLAF69
	61.41	60.11	
透镜组7	5.36	2.11	H-ZLAF68C
	-8.21	7.35	ZF4
	707.26	1.82	

3 成像质量分析

显微物镜属于轴对称式光学系统, 可只对其

像方半视场进行成像质量的分析。图4(a)~(c)所示, 分别为显微物镜在0视场、0.707视场、1视场情况下的点列图, 分别对应 0° 、 12.73° 、 18° 的像方视场角。通过图4可以查看系统的艾里斑半径与各视场弥散斑的均方根(root mean square, RMS)半径, 直观了解到光学系统的像差校正情况。图中黑色圆环所示为艾里斑的大小, 圆环内即为理想物点由于像差等原因在像面上形成的弥散斑, 不同波长的光源形成的弥散斑在点列图中的颜色不同。从图4可以看出: 显微物镜系统的艾里斑半径为1.259 μm , 满足设计指标要求; 全视场情况下的RMS半径均小于艾里斑半径; 球差、彗差等像差均校正良好, 接近衍射极限。同时, 不同波长的弥散斑高度重合证明了系统的色差校正良好。图中0视场、0.707视场、1视场的像差校正情况均衡, 弥散斑差别不大, 说明在全视场范围内, 显微物镜的成像质量相近。

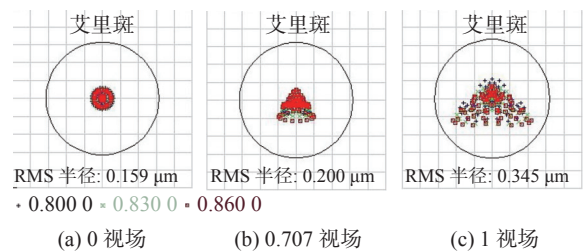


图4 显微物镜的点列图

Fig. 4 Spot diagram of microscope objective

显微物镜系统0视场、0.707视场、1视场的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)曲线如图5所示。MTF曲线的低频部分反映物体轮廓传递情况, 中频部分反映物体层次传递情况, 高频部分反映物体的细节传递情况。图中最上方曲线为衍射极限MTF曲线, 其下方实线与虚线分别代表子午与弧矢方向上的MTF曲线。可以看出, 系统在瑞利判据条件下的截止频率为794.3 lp/mm时, 全视场弧矢MTF曲线接近衍射极限, 子午方向除1视场外的MTF曲线也接近衍射极限, 这说明系统的结构合理, 像差校正良好, 在全视场范围内成像质量近似, 在物体成像的轮廓、层次、细节方面的表现良好。

图6所示为显微物镜系统中心工作波长的场曲与畸变, 纵坐标为归一化的视场, 实线与虚线

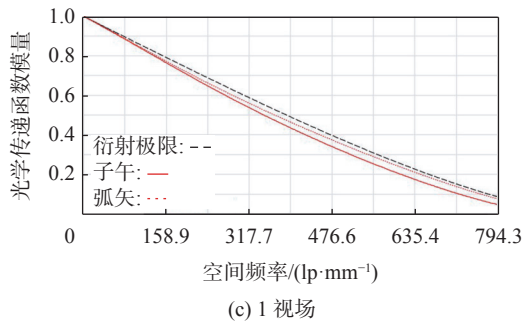
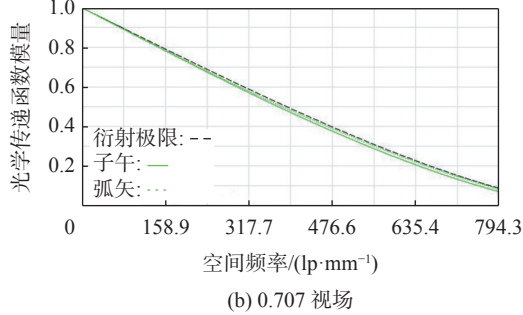
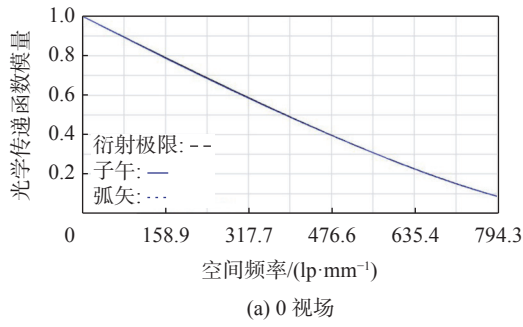


图 5 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves

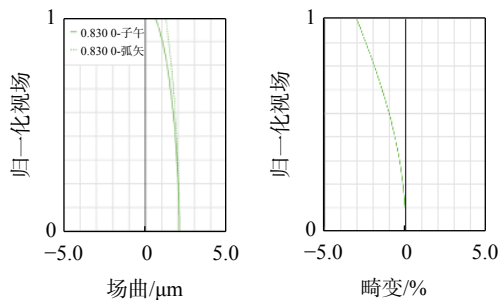


图 6 场曲畸变曲线

Fig. 6 Field curves and distortion curves

分别代表子午与弧矢场曲，其中心工作波长的最大子午场曲为 $1.5 \mu\text{m}$ ，最大弧矢场曲为 $0.8 \mu\text{m}$ ，全视场范围内子午场曲与弧矢场曲的曲线接近，最大仅相差 $0.7 \mu\text{m}$ ，系统的场曲与初级像散得到了一定的校正。显微物镜在最大视场处产生的

最大畸变为 3%，满足成像质量要求。

系统圈入能量分布图可以显示一个光学系统随着光斑的变大，所圈入能量的增加程度。图 7 中，最上方虚线为衍射极限曲线，可以看出显微物镜全视场 90% 的能量都集中在一个半径为 $1.9 \mu\text{m}$ 的包围能量圆中，不同视场间能量集中度相差很小，均接近衍射极限，证明光斑能量向外扩散得较慢，在全视场范围内光斑的聚焦效果与能量的集中度都很好。

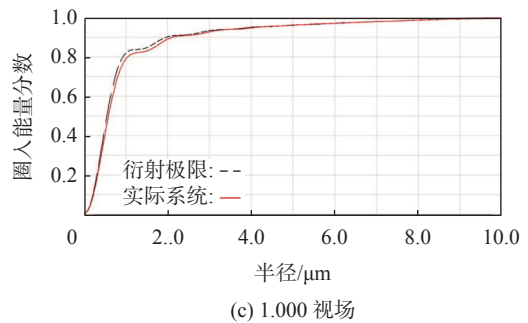
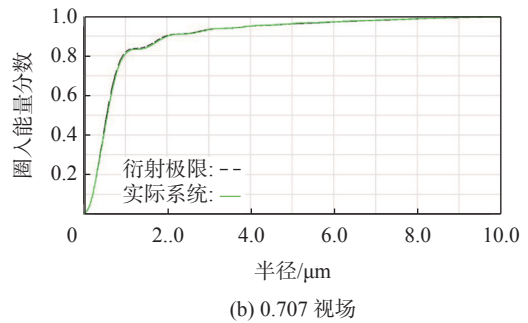
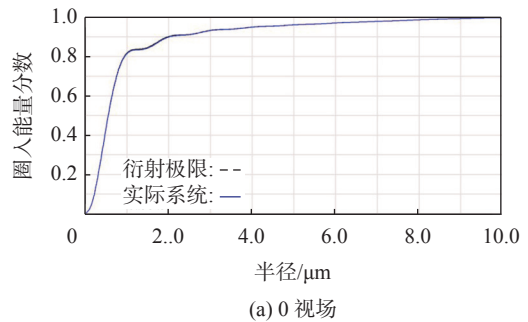


图 7 包围能量分布曲线

Fig. 7 Encircled energy distribution curves

4 结 论

本文基于 Zemax 软件设计了一款配合特定 MEMS 二维振镜使用的近红外无限共轭显微物镜，给出了整体光学结构，并对成像质量进行

优化分析, 其总长为 22.92 mm, 入瞳直径为 1.1 mm, 最大透镜外径尺寸为 4.64 mm, 分辨率达到 1.26 μm 。该微型显微物镜满足各项设计要求, 像差校正良好, 全视场范围内成像质量相近, 可与 S13989-01H 系列 MEMS 二维振镜在小型化、高光学分辨率、高成像速度的便携式皮肤成像仪器中配合使用, 也可以为相关显微物镜的设计提供参考, 具有一定的实用价值。同时, 本设计也存在一些不足, 主要是显微物镜尺寸较小, 结构较为复杂, 为显微物镜的镜片加工和调试工作带来了一定困难, 后续可以通过采用非球面透镜与球面透镜组合的方式来加以解决。

参考文献:

- [1] LI G M, LI H J, DUAN X Y, et al. Visualizing epithelial expression in vertical and horizontal planes with dual axes confocal endomicroscope using compact distal scanner[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2017, 36(7): 1482 – 1490.
- [2] 喻超. 二维振镜式扫描系统在激光扫描成像中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [3] 范娜娜, 王懋, 温少聪, 等. 基于二维 MEMS 振镜的激光雷达系统的光学设计[J]. *光学技术*, 2020, 46(3): 290 – 294.
- [4] MA J. Advanced MEMS-based technologies and displays[J]. *Displays*, 2015, 37: 2 – 10.
- [5] 李启坤, 邱琪. 基于 2D 微电子机械系统 (MEMS) 镜全向激光雷达光学系统设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 460 – 465.
- [6] TAUSCHER J, DAVIS W O, BROWN D, et al. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics[C]// Proceedings Volume 7594, MOEMS and Miniaturized Systems IX. San Francisco, California, United States: SPIE, 2010: 75940A.
- [7] LIU J T C, MANDELLA M J, RA H, et al. Miniature near-infrared dual-axes confocal microscope utilizing a two-dimensional microelectromechanical systems scanner[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(3): 256 – 258.
- [8] 钟义晖, 龚强, 朱天凤. 基于 MEMS 高速光学扫描系统[J]. *应用激光*, 2021, 41(2): 391 – 394.
- [9] LIANG C, SUNG K B, RICHARDS-KORTUM R R, et al. Design of a high-numerical-aperture miniature microscope objective for an endoscopic fiber confocal reflectance microscope[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4603 – 4610.
- [10] FLUSBERG B A, NIMMERJAHN A, COCKER E D, et al. High-speed, miniaturized fluorescence microscopy in freely moving mice[J]. *Nature Methods*, 2008, 5(11): 935 – 938.
- [11] BARRETTO R P J, MESSERSCHMIDT B, SCHNITZER M J. *In vivo* fluorescence imaging with high-resolution microlenses[J]. *Nature Methods*, 2009, 6(7): 511 – 512.
- [12] PIYAWATTANAMETHA W, RA H, LOEWKE K E, et al. *In vivo* near-infrared dual-axis confocal microendoscopy in the human lower gastrointestinal tract[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(2): 021102.
- [13] WU T Y, GMTRO A F, ROUSE A R. An achromatized miniature objective for microendoscopy [C]//International Optical Design Conference 2014. OSA Technical Digest Series. Kohala Coast, Hawaii, United States: Optical Society of America, 2014: IW4A. 2.
- [14] 王懋. 近红外荧光扫描共聚焦显微系统[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [15] ASWATHY R G, YOSHIDA Y, MAEKAWA T, et al. Near-infrared quantum dots for deep tissue imaging[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2010, 397(4): 1417 – 1435.

(编辑: 李晓莉)