

立体手术显微镜连续变焦大物镜设计

杨利华^{1,2}, 赵侃², 于双双², 徐大维², 韩星², 孟军合^{1,2}

(1. 航天海鹰光电信息技术有限公司, 天津 300192; 2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: 手术显微镜是显微外科手术中不可或缺的工具, 大物镜是整个手术显微镜的关键部位之一。针对手术过程中工作距和系统放大倍率需根据不同的使用情况进行调整, 设计了一套连续变焦大物镜。所设计的连续变焦大物镜由正、负透镜组组成, 选用机械变焦补偿形式, 通过沿光轴方向移动正透镜组, 实现术面观察范围 $\Phi 20\text{ mm} \sim \Phi 125\text{ mm}$ 、工作距 $150 \sim 350\text{ mm}$ 、焦距 $230 \sim 400\text{ mm}$, 可同时满足连续变焦和工作距可调, 并给出正、负透镜组间隔与变焦位置的采样曲线, 导程量较小。

关键词: 手术显微镜; 大物镜; 工作距; 连续变焦

中图分类号: V7 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0118008

Design of continuous zoom object lenses for tridimensional operating microscope

Yang Lihua^{1,2}, Zhao Kan², Yu Shuangshuang², Xu Dawei², Han Xing², Meng Junhe^{1,2}

(1. Aerospace Haiying Photoelectric Information Technology Co., Ltd, Tianjin 300192, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technial Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: Operating microscope is a necessary tool in microscope surgical operation, and the object lens is one important part of the operating microscope. The working distance and magnification in the operation should be adjusted to meet the needs of different users, thus a continuous zoom object lens was designed. The continuous zoom object lens is consisted of a set of double agglutinate positive lenses and negative lenses, which is zoomed by mechanical compensation and moves axially. The operating area of the continuous zoom object lens is from $\Phi 20\text{ mm}$ to $\Phi 125\text{ mm}$, the working distance is from 150 mm to 350 mm , and the focus is from 230 mm to 400 mm . The interval between the positive and negative lenses and the curve of zoom position was also put forward.

Key words: operating microscope; object lens; working distance; continuous zoom

收稿日期: 2015-05-14; 修订日期: 2015-06-20

作者简介: 杨利华(1984-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事光学设计与分析方面的研究。Email: yanglh8358@163.com

0 引言

手术显微镜自 20 世纪 60 年代起就应用于医学领域,是显微外科手术的必备光学仪器,显微外科使过去不能进行的外科手术在显微镜下可以顺利完成,从而大大提高了手术的精确性和安全性。随着医学的不断发展,手术的精细程度不断提高,手术显微镜也随之得以大幅发展,高端立体手术显微镜分辨力及各种功能不断提高^[1]。

手术显微镜可分为大物镜型和小物镜型两种形式,高端立体手术显微镜一般选用大物镜型。大物镜又分为定焦式和变焦式两种,相对于定焦式,采用变焦式大物镜手术显微镜工作距可调,手术中可因实际需要调换不同焦距的大物镜,缩短手术时间,并可降低由于更换物镜带来的交叉感染。文中设计的大物镜可同时满足连续变焦和景深可调。连续变焦系统是一种焦距可以连续变化,而在变焦过程中术面保持稳定且像质保持良好的系统,可得到不同大小的视场角、不同大小的影像和不同景物范围,在视场转换过程中能够保持图像的连续性;景深决定显微镜的工作距离,大物镜景深可调,其通过沿光轴移动系统中特定光学透镜组来实现手术显微镜工作距的连续可调,使手术操作更准确,对手术中不同深浅的部位处理更精准^[2]。

1 设计原理

1.1 基本组成

手术显微镜光学系统将被观察的病灶放大成像于人或 CCD,其具体成像光路如图 1 所示,其中 1 为手术显微镜大物镜,2 为伽利略变倍系统(简称变倍系统),3 为带有转像棱镜的接目物镜,4 为目镜。位于手术显微镜物方焦面上的物体发出的光经过大物镜变为平行光,该平行光分别进入左右变倍系统;平行光进入变倍系统,再以平行光出射,通过改变变倍系统中移动组 $2a$ 和补偿组 $2b$ 的位置来达到改变出射光束口径的目的;该平行光接着进入带有转像棱镜的接目物镜系统,该系统中的棱镜实现调整瞳距和正像的目的,接目物镜将入射光束汇聚到目镜的焦平面上,进而通过目镜出射平行光,从而进入观察者眼中^[3]。综上所述,大物镜可将光线聚焦在手术

区域并为后续光学系统提供准直光束,具有长焦距和长工作距特性,其余部分在此统称为后续光学系统。

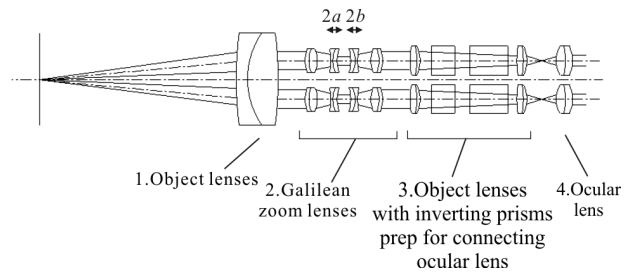


图 1 立体手术显微镜构成图

Fig.1 Structure of tridimensional operating microscope

1.2 补偿形式

变焦系统要改变焦距,而每个组份焦距一经设计与加工之后就是固定不变的,要变焦只能改变各组份之间的间隔。改变组份之间的间隔,系统的像面随之移动。为了消除像面的有害移动,需要有的组份作抵消像面移动的补偿运动,从而产生了不同的补偿形式。几个运动组份固连在一起做同方向的移动,达到在变焦的同时能减小像面移动,这种系统叫做光学补偿系统。各个运动组份按不同的运动规律做较复杂的移动,达到完全防止像面移动,这种系统叫做机械补偿系统^[4]。它需要用机械加工的办法加工成准确的凸轮,保证运动组份的准确移动,从而有效防止有害的像面移动。由于光学补偿只能做低变倍比、小相对孔径的变焦距系统,而且焦距仅是几个离散值,因而在使用中受到很多限制,而采用机械补偿法的变焦系统的焦距能够在一定范围内连续改变,机械加工水平完全有保证,使其得到广泛的应用。

机械补偿又分为正组补偿和负组补偿两种,正组补偿细而长,负组补偿短而粗,负组补偿二级光谱和光阑球差均比正组补偿大。对于小视场和对光阑球差、二级光谱要求较低的光学系统,可选负组补偿;对于大视场光学系统,或焦距较长的大倍率光学系统,考虑需要的镜头通光口径和二级光谱小,采用正组补偿较好。此设计属于长焦大视场系统,选用正组补偿。

1.3 工作距与焦距的关系

连续变焦大物镜光路示意如图 2 所示,由正、负透镜组组成,通过移动正透镜组改变正、负透镜组间隔实现连续变焦。光学设计时需先确定该种结构形式下变焦大物镜的工作距与其焦距的关系。

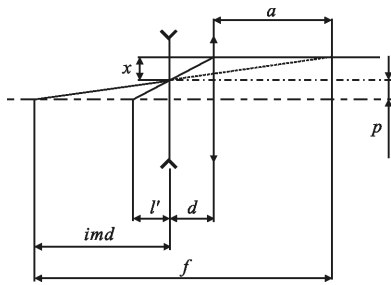


图 2 变焦大物镜理想光学结构

Fig.2 Ideal structure of continuous zoom object lens

设物面到负透镜组的距离为 imd ，经负透镜后其像距为 l' ，光焦度为 φ_1 ，光线偏折的垂直距离为 x ，两透镜组之间的间隔为 d ，光轴横向偏移为 p ，正透镜组距焦点的距离为 a 。根据几何光学成像理论和几何知识，则有：

$$-\frac{1}{l'} + \frac{1}{imd} = \varphi_1 \quad (1)$$

$$\frac{p}{l'} = \frac{x}{d} \quad (2)$$

$$\frac{a}{imd} = \frac{x}{p} \quad (3)$$

$$f = imd + d + a \quad (4)$$

由公式(1)~(4)可得：

$$f = (1 - d\varphi_1)imd + 2d \quad (5)$$

所设计的大物镜焦距范围为 230~400 mm，则光焦度 φ_1 的范围为 0.0025~0.0044，正、负透镜组间隔 d 为变量，随着焦距由小到大变化，正负透镜组间隔在 21.0~1.0 mm 之间变化，因此 $d\varphi_1$ 值范围为 0.0044~0.0525，远小于 1，可以忽略不计。即理想情况下，变焦大物镜的工作距变化多少，其焦距变化数值大致相同。因此在系统优化过程中，工作距变化间隔与系统焦距变化间隔大致相同。

1.4 像差校正

变焦系统的像差平衡与定焦系统的像差平衡基本一致。变焦大物镜的像差校正可以分为两步：第一步考虑初级像差的校正，然后再考虑初级像差与高级像差的平衡。长焦时，第一辅助光线在负组上的高度最高，所以负组对长焦距的球差、正弦差贡献最大，同时像散贡献也较大，因此可利用负组的参数来校正长焦距的轴上像差；短焦时，第二辅助光线在正组上的高度最高，故利用正组的参数校正短焦距位置的倍率色差和畸变等^[5]。

2 设计实例

2.1 主要指标

目前较为先进的神经外科手术显微镜其调焦物镜物面观察范围为 $\Phi 16.5 \text{ mm} \sim \Phi 180 \text{ mm}$ ，可实现工作距 150~450 mm 范围内连续可调，避免手术中更换大物镜带来的不便，缩短手术时间，减少由于更换大物镜带来的交叉感染。根据实际需要，制定立体手术显微镜连续变焦大物镜的主要设计指标如下：

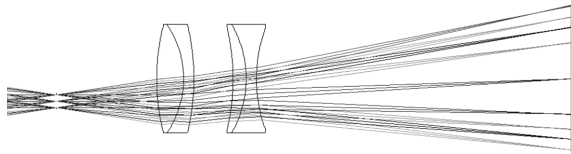
- (1) 光谱范围为 465.6~642.7 nm；
- (2) 焦距为 230~400 mm；
- (3) 工作距为 150~350 mm；
- (4) 术面观察范围为 $\Phi 20 \text{ mm} \sim \Phi 125 \text{ mm}$ ；
- (5) 光阑直径为 $\Phi 6.4 \text{ mm} \sim \Phi 17 \text{ mm}$ ；
- (6) 系统总长为 58 mm。

2.2 大物镜设计

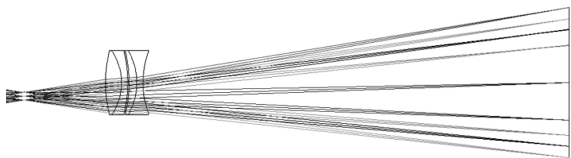
大物镜与后续光学系统要瞳孔对接，因此需要在后续光学系统的设计基础上进行大物镜设计。手术显微镜一般双目成像，后续光学系统由两路组成，单光路光轴与大物镜光轴存在一定的偏移量。大物镜光学系统由负透镜组和正透镜组组成，使用机械补偿法来补偿像面位移，通过移动正透镜组实现连续变焦。设计时根据系统要求通过高斯光学的计算来确定系统的初始参数，选定初始形式后，首先把整个变焦范围按等比级数取出 3~5 个不同的焦距位置；由于后续光学系统为变焦形式，为实现瞳孔对接，设计时还需找出 3~5 个后续光学系统的入瞳(位置和直径不同)设置光阑。设计中采用了实用性很强的多重结构设计法，共设置了 15 个多重结构，其中设置了 5 个不同焦距，3 个不同光阑位置和直径。

详细设计时大物镜一般反向设计，平行光入射，光线在术面成像，根据实际需要该设计光阑偏移量取 11 mm。按照变焦系统的像差校正步骤，通过高斯光学的计算来确定系统的初始参数，采用 Code V 光学辅助设计软件对其进行像差优化设计。最终设计的连续变焦大物镜由正透镜组和负透镜组组成(均采用双胶合形式)，采用“正/负”光焦度配比形式，焦距分别为 96.55 mm 和 -112.19 mm，这种形式易产生一个大的变焦范围，可有效控制系统入瞳位置，缩短变焦组及补偿组的运动行程。为校正二级光谱，增加工作距离，采用特殊色散玻璃材料，透镜材料分别为 ZLAF68、ZPK1、ZF62、QF6；并在负透镜组胶合面引

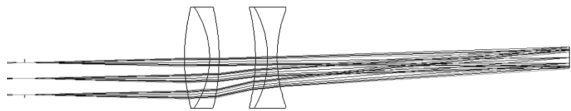
入了一个非球面来校正像差、提高像质、减少透镜数量,使系统具有更高的透过率,提高系统对目标的识别能力。图 3 列出了 4 个不同焦距、工作距、入瞳直径和入瞳距的光路图。



(a) 焦距 230 mm,工作距 150 mm,光阑直径 $\Phi 6.4$ mm,入瞳距 55 mm
(a) Focus 230 mm,working distance 150 mm,diameter of entrance pupil $\Phi 6.4$ mm, distance of entrance pupil 55 mm



(b) 焦距 400 mm,工作距 350 mm,光阑直径 $\Phi 6.4$ mm,入瞳距 55 mm
(b) Focus 400 mm, working distance 350 mm, diameter of entrance pupil $\Phi 6.4$ mm, distance of entrance pupil 55 mm



(c) 焦距 230 mm,工作距 150 mm,光阑直径 $\Phi 17$ mm,入瞳距 86 mm
(c) Focus 230 mm, working distance 150 mm, diameter of entrance pupil $\Phi 17$ mm, distance of entrance pupil 86 mm



(d) 焦距 400 mm,工作距 350 mm,光阑直径 $\Phi 17$ mm,入瞳距 86 mm
(d) Focus 400 mm, working distance 350 mm, diameter of entrance pupil $\Phi 17$ mm, distance of entrance pupil 86 mm

图 3 连续变焦大物镜光路

Fig.3 Optical path of continuous zoom big object lens

2.3 变焦曲线拟合

光学系统的焦距由组成该系统的各组元光焦度及其间隔所决定,而各组元的焦距是不能连续变化的。因此,光学系统焦距的连续变化取决于各组元透镜间隔的连续变化。连续变焦大物镜设计中各组元透镜间隔发生连续变化的同时,系统的像面位置随之改变,即工作距发生变化^[6]。在 Code V 软件中采用宏命令进行系统优化,得出正、负透镜组间隔与变焦位置的采样曲

线如图 4 所示,正组行程为 20 mm,变焦曲线平滑无拐点,接近线性^[7],保证了系统变焦的可行性。

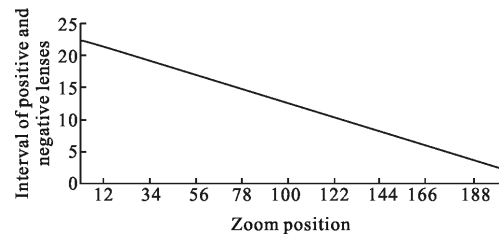


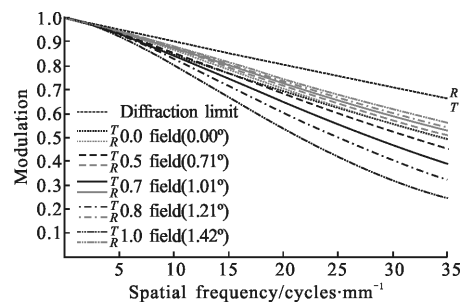
图 4 正、负透镜组间隔与变焦位置曲线

Fig.4 Interval of positive and negative lenses vs curve of zoom position

3 像质评价

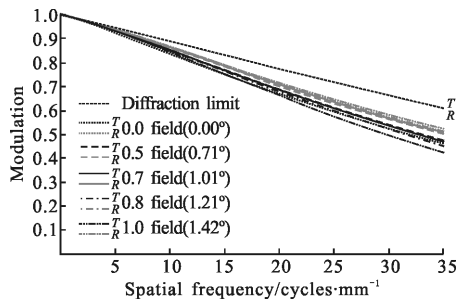
任何一个实际光学系统的实际成像总与理想成像存在差异,实际成像不可能绝对的清晰和没有变形,因此需要进行像质评价^[8]。在光学设计软件中常用几何像差、瑞利判断、分辨率、点列图和光学传递函数五种方法评价光学系统的成像质量,其中前四种是基于把物体看做是发光点的集合,并以一点成像时的能量集中程度来表征光学系统的成像质量的,而光学传递函数是基于把物体看做是由各种频率的谱组成的,也就是把物体的光强分布函数展开成傅里叶级数或傅里叶积分的形式。光学传递函数既与光学系统的像差有关,又与光学系统的衍射效果有关,故用它来评价光学系统的成像质量具有客观和可靠的优点,并能同时运用于小像差光学系统和大像差光学系统,是一种最常见的像质评价方法^[7]。

连续变焦大物镜系统用光学传递函数曲线(以下简称 MTF 曲线)评价像质时,不同焦距对应不同的 MTF 曲线,如图 5 所示,医生最为关注的是高倍率像质的优劣,低倍率主要用于捕获病变部位^[7],其



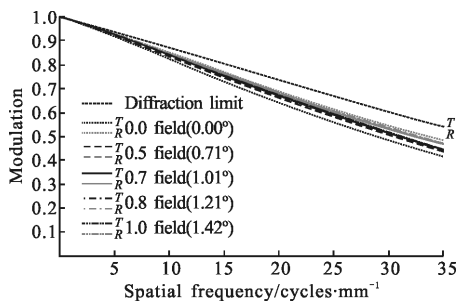
(a) 焦距 230 mm,工作距 150 mm

(a) Focus 230 mm, working distance 150 mm



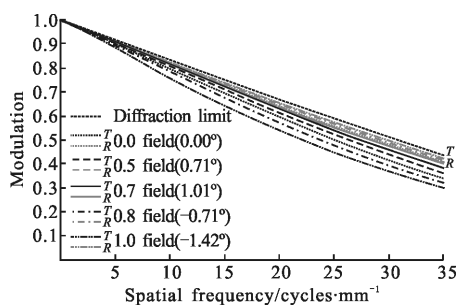
(b) 焦距 275 mm, 工作距 200 mm

(b) Focus 275 mm, working distance 200 mm



(c) 焦距 320 mm, 工作距 260 mm

(c) Focus 320 mm, working distance 260 mm



(d) 焦距 400 mm, 工作距 350 mm

(b) Focus 400 mm, working distance 350 mm

图 5 高倍率大物镜 MTF 曲线

Fig.5 MTF of high magnification object lens

分辨率可以适当降低,在此重点考察大物镜高倍率(焦距 400 mm)的成像质量,可以看出全视场 MTF @35 lp/mm ≥ 0.3,接近衍射极限,说明高倍率大物镜具有较好的成像质量,满足实际使用要求。

4 结论

文中介绍了立体手术显微镜的基本组成和变焦系统补偿形式的选择,公式推导了连续变焦大物镜工作距与焦距的关系,按照变焦系统的像差校正步

骤设计出连续变焦和景深可调的大物镜,二级光谱得到了很好的校正,整体结构简单紧凑,最后在 Code V 软件中优化出正、负透镜组间隔与变焦位置的采样曲线,导程量较小,为高端立体手术显微镜的研究与设计提供了依据。

参考文献:

- [1] Zheng Fuqiang. General situation and new evolvement of operating microscope [J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2004(6): 48-49. (in Chinese)
郑富强. 手术显微镜概况及新进展 [J]. 医疗卫生装备, 2004(6): 48-49.
- [2] Yu Qilian. Medicine Optical Instrument[M]. Tianjin: Science and Technology Press, 1988: 78-95. (in Chinese)
虞启琰. 医用光学仪器[M]. 天津: 科学技术出版社, 1988: 78-95.
- [3] Guo Yujun. Basic configuration and use maintainability of operating microscope[J]. *Medical Equipment*, 2001(1): 31. (in Chinese)
郭玉军. 手术显微镜的基本结构与使用保养 [J]. 医疗装备, 2001(1): 31.
- [4] Tao Chunkan. Zoom Lens Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 153-163. (in Chinese)
陶纯堪. 变焦距光学系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 153-163.
- [5] Wang Ziyu. Geometrical Optics and Optical Design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1989: 55-62. (in Chinese)
王子余. 几何光学和光学设计 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989: 55-62.
- [6] Meng Junhe, Zhang Zhen, Sun Xingwen. Cam optimization of a zoom lensn [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(1): 51-54. (in Chinese)
孟军和, 张振, 孙兴文. 变焦距镜头的凸轮优化设计[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(1): 51-54.
- [7] Zhang Yimo. Applied Optics [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1987: 576-596. (in Chinese)
张以谟. 应用光学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1987: 576-596.
- [8] Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 276-280. (in Chinese)
袁旭仓. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 276-280.