

文章编号: 1005-5630(2015)02-0154-06

光纤熔接机高清显微物镜光学系统设计

陈丽娜, 刘巧玲, 柯华恒, 余华恩, 彭家忠, 梁秀玲

(福建师范大学 光电与信息工程学院 福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 在光纤熔接过程中, 为了实现光纤高质量熔接, 需要一个高清显微物镜来确保纤芯的准确对准。运用 Zemax 软件设计一款用于光纤纤芯对准的显微物镜, 该物镜由 6 片透镜组成, 放大率为 8 倍, 数值孔径为 0.25, 工作距为 13.4 mm, 共轭距为 85 mm, 以 CCD 作为图像接收器件。显微物镜采用正向光路进行优化设计, 正向光路设计的显微物镜更能贴近实际使用状态, 能够更加清晰准确地检测到纤芯位置。该物镜工作波长为 486~656 nm, 具有工作距离长、共轭距短、精度高等特点。

关键词: 光学设计; 显微物镜; Zemax; 正向光路; 长工作距离

中图分类号: TH 74 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.02.014

Optical system design of high-resolution microscope objectives for optical fiber fusion splicer

CHEN Lina, LIU Qiaoling, KE Huaheng, YU Huaen, PENG Jiazhong, LIANG Xiuling

(Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: According to the requirement of high-quality fiber fusion in the process of optical fiber fusion, a microscope objective for detecting the fiber core is designed to determine the position of the optical fiber core, which is optimized through the optical system design software Zemax. The designed system consists of six lenses. The magnification is eight. The object space NA is 0.25. The working distance is 13.4 mm. The conjugate distance is 85 mm and image receiver is a CCD. The optical lens is optimized through the method of forward optical path with the spectral range of 486~656 nm. Forward optical path design of the microscope objective is practical to detect the fiber core position more clearly and accurately. It has long working distance, short conjugate distance and high accuracy.

Keywords: optical design; microscope objective; Zemax; forward optical path; long working distance

引 言

随着光纤通信技术的广泛应用,越来越多的光纤线路需要维护和熔接接续。为了获得低熔接损耗的光纤,

收稿日期: 2014-08-29

基金项目: 福建省科技厅工业科技重点资助项目(2012H0020)

作者简介: 陈丽娜(1989—),女,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: nanachen001@126.com

通信作者: 梁秀玲(1970—),女,高级工程师,主要从事光学设计与光学检测方面的研究。E-mail: xliang@fjnu.edu.cn

需要对光纤纤芯进行高精度对准。因此,设计一款适用于光纤熔接机的高质量显微物镜具有重要的意义。

显微物镜是用于观察近距离物体,其像距大于物距,这样才起到放大的作用。光学设计一般从长距离方向计算,因此为了便于后续的像差优化,根据光路可逆原理,传统的设计方法均是采用逆向光路进行优化设计。采用逆向光路设计时,物镜的放大率为正向光路设计时的倒数 $1/\beta$ (β 为正向光路设计时物镜的放大率),像差经过物镜后缩小,像差校正容易,但是逆向光路设计的光学系统其几何像差调制传递函数(MTF)、星点图等体现的是物面处的成像质量。而显微物镜在实际使用中都是采用正向光路,且正向光路设计的光学系统其几何像差、MTF、星点图等能够直观体现 CCD 接收靶面处的成像质量,因此正向光路设计的显微物镜更能贴近实际使用状态。本文中的显微物镜是按正向光路进行设计,它能够更加清晰呈现光纤的纤芯位置,提高光纤熔接机的对准精度,从而达到降低光纤熔接损耗的目的。

1 设计思路

光纤纤芯对准系统的基本结构示意图如图 1 示,图中: l 为物距; l' 为像距; L 为共轭距。像面接收器采用 CCD,待熔光纤的直径为 $125\ \mu\text{m}$ (即物高 y 为 $0.125\ \text{mm}$),纤芯直径为 $9\ \mu\text{m}$ 。当光纤在 CCD 的像面宽度上成像为 $1\ \text{mm}$ (即像高 y' 为 $1\ \text{mm}$)左右时,能够较理想地实现光纤纤芯的高清晰对准,且光纤所成的像为倒像。因此可得该系统的放大率为

$$\beta = \frac{y'}{y} = -8 \quad (1)$$

此外,为了便于光纤的装夹、调节、对准、熔接等机构的安装,显微物镜的工作距离不能太小。拟定显微物镜的工作距离(即物距)为 $13.4\ \text{mm}$,长工作距离便于熔接操作。当工作距离为 $13.4\ \text{mm}$ 时,根据放大率公式

$$\beta = \frac{nl'}{n'l} \quad (2)$$

式中 n 和 n' 为空气的折射率,可得该系统的共轭距 $L = l' - l = 120.6\ \text{mm}$ 。

该系统在正常情况下其共轭距 L 将超过 $120\ \text{mm}$ 。为了缩短整个光路,将共轭距控制在 $85\ \text{mm}$ 以内,这为将来仪器的小型化设计提供了可靠的前提保证。

本文中的显微物镜是按正向光路进行设计,纤芯和包层经过显微物镜放大后,其直径分别为 $0.072\ \text{mm}$ 和 $1\ \text{mm}$ 。由于光纤熔接时主要是检测断裂处纤芯的准确位置,光纤成像的最大视场在 0.8ω (ω 为物镜的视场角)处(如图 2 示),因此,系统只需校正 0.8ω 以内的像差即可满足设计要求。为了采集到高质量的光纤图像,显微物镜的数值孔径设置为 0.25 。系统拟采用高亮度的白光 LED,设计光谱为 $486\sim 656\ \text{nm}$ 。

2 优化设计

2.1 优化过程

为了缩短光学总长,镜头采用摄远型初始结构,由正透镜组和负透镜组组成,如图 3 所

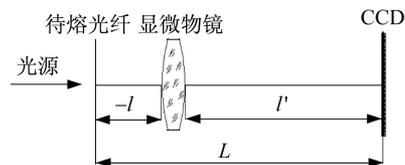


图 1 纤芯对准系统的结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of fiber core alignment system

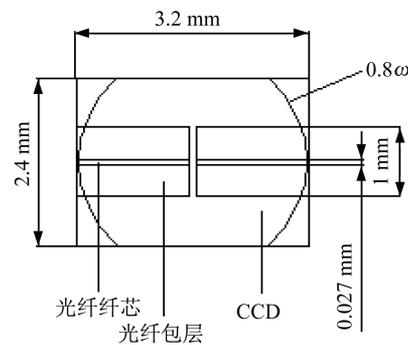


图 2 包层和纤芯在 CCD 上的实际大小
Fig. 2 Real size of the cladding and fiber core in the CCD

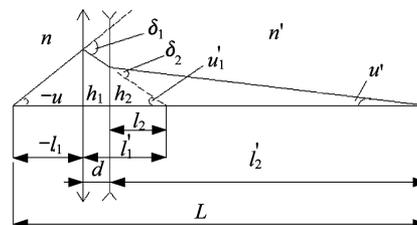


图 3 摄远型初始结构
Fig. 3 Initial structure of telephoto

示。根据理论公式可以粗略计算出正负透镜组的基本参数,显微物镜的物距即正透镜组的物距 l_1 为 13.4 mm,由于该显微物镜的共轭距为 85 mm,拟定其像距即负透镜组的像距 l'_2 为 65 mm,正负透镜组间隔 d 为 6.6 mm。

显微物镜数值孔径及角度放大率表达式分别为

$$NA = n \sin(-u) \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{u'}{u} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta} \quad (4)$$

式中: n 为物方折射率; n' 为像方折射率; u 为透镜组的入射孔径角; u' 为透镜组的出射孔径角。已知显微物镜的数值孔径 NA 为 0.25,放大率 β 为 -8,将值代入式(3)、式(4)可得: $\sin(-u)=0.25$, $\sin u'=0.03125$ 。

由摄远型初始结构图中的几何关系可知

$$\tan u'_1 = \frac{h_1 - h_2}{d} = \frac{-l_1 \times \tan(-u) - l'_2 \times \tan u'}{d} = 0.2163 \quad (5)$$

式中: u'_1 为正透镜组的出射孔径角; l_1 为正透镜组的物距; l'_2 为负透镜组的像距; h_1 和 h_2 分别为光线在正负透镜组上的入射高度。计算出 $\sin u'_1=0.2114$, $l'_1 = \frac{h_1}{\tan u'_1} = 15.9958$ mm, $l_2 = l'_1 - d = 9.3958$ mm。

再根据高斯公式及透镜组的光焦度 φ 的表达式为

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (6)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 \quad (7)$$

式中: φ_1 为正透镜组的光焦度; φ_2 为负透镜组的光焦度。可计算出正负透镜组的焦距值及显微物镜的组合焦距值分别为: $f'_1=7.2939$ mm, $f'_2=-10.9890$ mm, $f'=7.7882$ mm。

由此可得,光纤经过显微物镜成像时可理解为经过了两次角度变化,即 $u = -14.4775^\circ \rightarrow u'_1 = 12.2044^\circ \rightarrow u' = 1.7908^\circ$ 。正负透镜组所承担的偏向角 δ_1 、 δ_2 分别为 26.6819° 和 10.4136° (见图 3)。根据初始像差及其光学设计的经验,一般情况下,每个光学镜头承担的偏向角不要太大,单透镜承担的偏角为 $6^\circ \sim 9^\circ$,双胶合承担的偏角为 $11^\circ \sim 14^\circ$ 。这是因为光线的偏角越大,该表面的相对孔径也越大,会产生较大的高级像差,优化时很难达到像差平衡。本文显微物镜的正透镜组采用一片单透镜和一组双胶合透镜的透镜组合,而负透镜组则采用三片分离的单透镜组合,共有六片透镜组成。正透镜组剩余的偏折角可由负透镜组来承担。

根据前面得到的正负透镜组结构参数,结合几何光学公式可得出每个透镜的焦距值及透镜间的空气间隔,如表 1 所示。

显微系统的照明光源为白光 LED,图像接收器件为 CCD,为了能在 CCD 上得到 0.8 视场内的清晰像,要求显微物镜是平场消色差物镜。由于所设计的显微物镜是一个长工作距离、小视场的系统,有较小的场曲,因此主要校正其轴上像差,即球差和轴向色差,还要考虑彗差。显微物镜是按正向光路进行优化设计,球差、轴向色差等像差经过系统后被放大,这将增加其校正难度。为了得到优良的成像质量,系统的球差可通过正负透镜组合来进行校正。

彗差的校正。系统主要存在子午彗差,根据其定义,添加操作数 TRAY,控制像平面上光线与像面交点到主光线的垂轴距离。对同一视场,不同孔径设置操作数 TRAY,令其两者之和为零,可有效减小子午彗差。正向光路设计的显微系统像差放大,因此在优化过程中需要加重相应优化操作数的权重。

表 1 透镜组的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the lens group

组名	形式	焦距/mm	空气间隔/mm
正透镜组	单透镜	16	—
	空气	—	1
	双胶合	12.57	—
	空气	—	3.6
负透镜组	单透镜	-15.60	—
	空气	—	1
	单透镜	34	—
	空气	—	1
	单透镜	-17.12	—

轴向色差的校正。对于薄透镜系统,其轴向色差系数为 $\Sigma C_1 = \Sigma h^2 \frac{\varphi}{\nu}$ (其中 h 为光线的人射高度, φ 为光焦度, ν 为阿贝常数),系统在结构上采用双胶合和有空气隙的正负分离透镜组合。在优化过程中,适当地选择 φ , ν 及 h 值,使轴向色差系数尽可能小或为零。系统采用冕牌玻璃与火石玻璃的搭配亦可达到减小轴向色差的目的。

2.2 设计结果

镜头优化后的外形结构和系统参数分别如图 4、表 2 所示。该系统由 6 片透镜组合而成,其中有一组双胶合透镜,两片双凸透镜,两片弯月形透镜。所选玻璃第一片来自肖特玻璃库,其余五片均来自成都玻璃库,其中玻璃材料从第一片到最后一片依次为: N-PK52、H-ZK6、ZF5、H-ZF4、BAF3、H-LAK4L。冕牌玻璃与火石玻璃的搭配有利于校正色差。

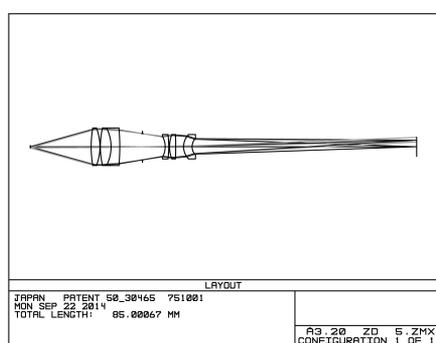


图 4 显微物镜的布局

Fig. 4 Layout of the microscope objective

表 2 显微物镜的系统参数

Tab. 2 System parameters of the microscope objective

名称	值
物方数值孔径 NA	0.25
有效焦距/mm	6.738 307
总长/mm	71.600 55
像方数值孔径 NA	0.032 286 71
近轴像高/mm	2
近轴放大率	-7.992 895
入瞳直径/mm	23.482 99
出瞳直径/mm	3.545 373

图 5 为显微物镜的 MTF 曲线,从 MTF 曲线可以看出,在空间频率为 50 lp/mm 处,全视场以内的调制传递函数 MTF 值均大于 0.3,接近衍射极限,具有较高的分辨率。

图 6 为显微物镜的点列图,由图可以看出,该系统各视场的成像弥散斑均方根半径均小于爱里斑半径,能量较集中,符合设计要求。

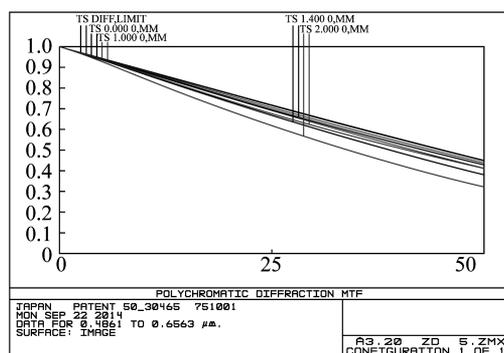


图 5 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curve

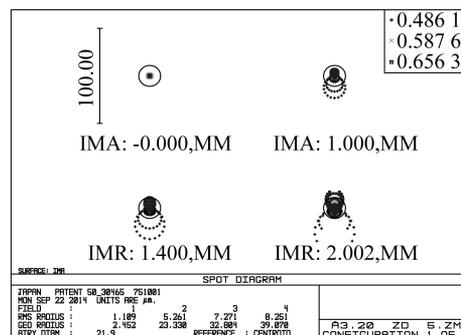


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

显微物镜的像差公差用波像差来衡量,要求光学系统的波像差小于 $\lambda/4$ 。显微物镜的几何像差分析如下:

(1) 球差

由于该显微物镜的孔径较大,因此存在高级球差。该系统的边光球差容限值和剩余球差容限值分别为

$$\delta L'_m \leq \frac{\lambda}{n' \sin^2 U'_m} = \frac{0.5876 \times 10^{-3}}{1 \times 0.0327^2} \text{ mm} = 0.5495 \text{ mm} \quad (8)$$

$$\delta L' \leq \frac{6\lambda}{n' \sin^2 U'_m} = \frac{6 \times 0.5876 \times 10^{-3}}{1 \times 0.0327^2} \text{ mm} = 3.2971 \text{ mm} \quad (9)$$

图 7 为显微镜的球差曲线,由图可知,该系统主波长的实际球差最大值为 0.1099 mm,在边光球差和剩余球差容限范围内,满足设计要求。

(2) 轴向色差

该系统的轴向色差容限值为

$$\Delta L'_{FC} \leq \frac{\lambda}{n' \sin^2 U'_m} = \frac{0.5876 \times 10^{-3}}{1 \times 0.0327^2} \text{ mm} = 0.5495 \text{ mm} \quad (10)$$

由图 7 可看出,该系统的实际轴向色差最大值为 0.0336 mm,在容限范围内,符合要求。

(3) 其他像差

图 8 为显微镜的畸变图,由图可看出,系统的场曲、像散和畸变都很小,该系统主波长的实际子午场曲最大值为 0.0277 mm,弧矢场曲最大值为 0.0224 mm,实际像散最大值为 0.0052 mm,畸变值为 0.24%,都满足设计要求。

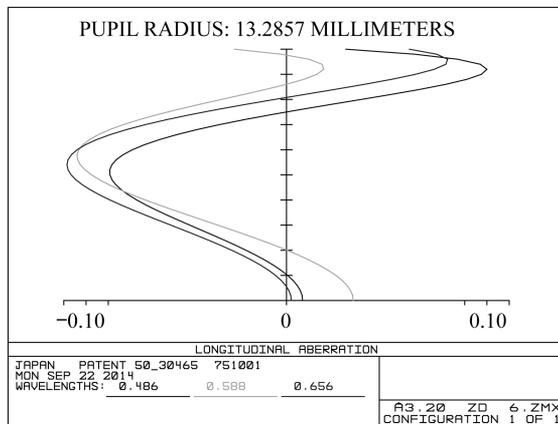


图 7 球差曲线

Fig. 7 Longitudinal aberration curve

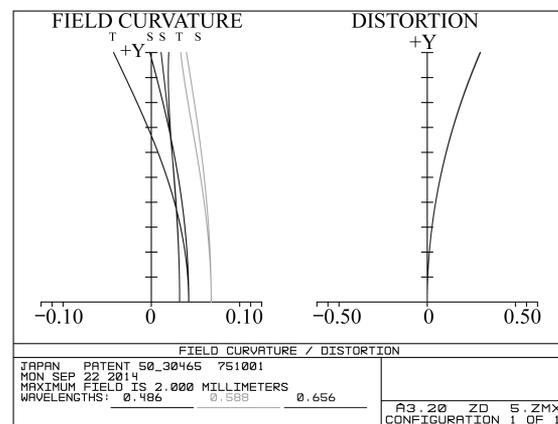


图 8 畸变曲线

Fig. 8 Distortion curve

3 公差分析

3.1 公差分配原则

系统在加工与装调过程中都将产生误差,使最终结果偏离设计结果。为了提高其成像质量,光学系统内所有参数都需要分配可变公差。如果系统对某一参数的变化很敏感,那么对该组公差要有较严的要求,反之则可以采用较为宽松的公差。

显微镜系统对成像质量有较高的要求,且该显微镜各透镜的半径和厚度值均很小,因此对光学元件公差的要求相对较严。运用 Zemax 软件中的公差计算与分析程序计算光学系统内各参数性能下降的敏感度,即分析所有元件的加工、装调公差,确定敏感度。公差参数包括半径、光学元件厚度、空气间隔、偏心等。

3.2 公差分配结果

运用 Zemax 光学设计软件,通过灵敏度分析、反转灵敏度分析及蒙特卡罗分析得到显微镜合理的公差分配。通过计算分析每一公差参数在 Nyquist 空间频率 50 lp/mm 处的 MTF 下降情况,最终确定合适的公差。灵敏度公差、蒙特卡罗公差分析结果分别如表 3、表 4 所示。蒙特卡罗公差分析结果显示该显微镜系统 90% 以上的蒙特卡罗样本 $MTF \geq 0.166385252$,每个样本为一个模拟加工、装调后的光学

系统。

对显微物镜公差灵敏度的分析表明,元件的半径、厚度和偏心为敏感公差,其敏感公差主要位于元件 3,4,5(表 5 所示)。因此,需要严格保证这些元件的加工与装调公差,确保最终实现光学系统的高精度、高性能要求。

表 3 灵敏度的公差分析结果

Tab. 3 Analysis of sensitive tolerance sensitivity

类型	表面序号	公差	MTF 改变量
半径公差	1	+4 光圈数	-0.050 733 329
		-4 光圈数	-0.051 019 096
表面偏心公差	7	±0.008 mm	-0.051 884 756
表面倾斜公差	7	±0.008 mm	-0.052 259 487
半径公差	9	+3 光圈数	-0.054 000 761
		-3 光圈数	-0.056 068 687
表面偏心公差	12	±0.005 mm	-0.063 947 077

表 4 蒙特卡罗公差分析结果

Tab. 4 The result of the analysis using Monte Carlo method

蒙特卡罗样本百分比	MTF 值
90%	≥0.166 385 252
50%	≥0.203 524 689
10%	≥0.329 780 993

表 5 显微物镜的公差要求

Tab. 5 Tolerance demands of the microscope objective

元件序号	半径公差/ 光圈数	厚度公差/ mm	偏心公差/ mm	折射率 公差	阿贝常数 公差/%
1	±4	±0.03	±0.015	±0.001 0	1
	±5	±0.03	±0.015		
2	±5	±0.03	±0.015	±0.000 8 ±0.001 0	1
	±5	±0.03	±0.015		
3	±3	±0.03	±0.008	±0.001 0	1
	±4	±0.03	±0.015		
4	±3	±0.03	±0.008	±0.001 0	1
	±4	±0.03	±0.015		
5	±2	±0.03	±0.005	±0.001 0	1
	±2	±0.005	±0.005		

4 结 论

所设计的光纤熔接机的显微物镜具有高放大率、高分辨率、结构简单、装配方便、成本低、适合大批量投产等特点。能够实现更高精度的光纤图像纤芯对准,提高图像识别精度,较为准确地定位纤芯位置,提高光纤熔接的质量。在本系统之后的研究中,将进行显微系统的机械结构和装调技术的研制,使生产过程中安装调节显微物镜简便且易操作,从而降低生产成本。

参考文献:

- [1] 郝沛明,丁厚明,查来宾,等. 目视观察和 CCD 探测两用显微物镜[J]. 量子电子学报,1997,14(5):464-469.
- [2] 庄振锋,王敏,陈荣. 0.25×高分辨力视频显微镜设计[J]. 光学仪器,2008,30(1):63-65.
- [3] 毕卫红,许睿,付广伟,等. 40 倍长工作距离 PCF 熔接系统显微物镜设计[J]. 光电工程,2013,40(1):44-50.
- [4] 孙晶露,李湘宁,吴宇昊. 用于光纤熔接系统的纤芯检测镜头设计[J]. 光学技术,2010,36(6):816-819.
- [5] 刘雨沁,张孟伟. 变焦光学系统的公差分析[J]. 光学仪器,2013,35(2):42-45.
- [6] 王红,田铁印. 三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1444-1450.
- [7] 李晓彤,岑兆丰,范世福. 几何光学·像差·光学设计[M]. 2 版. 杭州:浙江大学出版社,2007:180-181.
- [8] 毛文炜. 光学镜头的优化设计[M]. 北京:清华大学出版社,2009:128-148.

(编辑:张 磊)