

用于炮膛检测的内窥镜光学系统设计

于璐 向阳 姜伯文 袁晓涵 白宁 向铮

Optical system design of endoscope for artillery gun bore inspection

YU Lu, XIANG Yang, JIANG Bowen, YUAN Xiaohan, BAI Ning, XIANG Zheng

引用本文:

于璐, 向阳, 姜伯文, 等. 用于炮膛检测的内窥镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 1–9. DOI: 10.5768/JAO202647.0101001

YU Lu, XIANG Yang, JIANG Bowen, et al. Optical system design of endoscope for artillery gun bore inspection[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 1–9. DOI: 10.5768/JAO202647.0101001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0101001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种2k分辨率内窥镜光学系统设计

Design of endoscopic optical system with 2k resolution

应用光学. 2024, 45(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201001>

一次性硬膜外腔内窥镜光学系统设计

Design of optical system for disposable epidural endoscope

应用光学. 2024, 45(5): 896–902 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501003>

医用输尿管内窥镜光学系统设计

Design of optical system for medical ureteroscope

应用光学. 2024, 45(5): 916–922 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501005>

超细内窥镜光学系统设计

Design of ultra-fine endoscope optical system

应用光学. 2025, 46(5): 958–965 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0501001>

小口径大视场工业内窥镜光学系统设计

Optical system design of small-caliber and large-field industrial endoscope

应用光学. 2023, 44(1): 17–23 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101003>

紧凑型连续大变倍比枪瞄镜光学系统设计

Design of compact continuous high zoom-ratio gun sighting telescope optical system

应用光学. 2021, 42(3): 423–428 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0001-09

引用格式: 于璐, 向阳, 姜伯文, 等. 用于炮膛检测的内窥镜光学系统设计 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 1-9.

YU Lu, XIANG Yang, JIANG Bowen, et al. Optical system design of endoscope for artillery gun bore inspection[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 1-9.



在线阅读

用于炮膛检测的内窥镜光学系统设计

于 璐, 向 阳, 姜伯文, 袁晓涵, 白 宁, 向 铮

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 内窥镜具有工作长度长、口径小及刚度好等优点, 可用于小口径火炮身管内壁的疵病检测, 进而达到对炮膛质量进行评估的目的。针对 $\Phi 30 \sim \Phi 85$ mm 小口径火炮, 设计了一种侧视式双光路、大景深内窥镜光学系统。加入了共用式直角棱镜, 最终实现单光路内窥镜光学系统全视场 68° , 工作距离 1 099 mm, 可在 12 mm~40 mm 景深范围内有效成像, 有效通光口径小于 4.5 mm, 最大场曲 -0.37 mm, 最大畸变值为 -14.6% , 在空间频率 45 lp/mm 处各组态全视场调制传递函数大于 0.2, 且接近衍射极限。分析结果表明: 设计的双光路内窥镜光学系统具有较好的成像质量, 观察范围符合视差要求, 满足炮膛疵病三维测量的需求。

关键词: 光学设计; 内窥镜; 长工作距离; 炮膛检测

中图分类号: TN202; TH745

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0101001

Optical system design of endoscope for artillery gun bore inspection

YU Lu, XIANG Yang, JIANG Bowen, YUAN Xiaohan, BAI Ning, XIANG Zheng

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract: Due to its advantages of long working length, small aperture, and good rigidity, the endoscope can be employed for the defect detection within the inner walls of small-caliber artillery tubes, thereby achieving the purpose for inspecting and evaluating the quality of the internal chamber. This paper presents the design of a side-viewing dual-optical-path large-depth-of-field endoscope optical system tailored for small-caliber artillery ranging from $\Phi 30$ mm to $\Phi 85$ mm. By incorporating a shared right-angle prism, the final design achieves a full field of view (FOV) of 68° for the single-optical-path endoscope optical system, with a working distance of 1 099 mm, enabling effective imaging within a depth of field ranging from 12 mm to 40 mm. The effective aperture for light transmission is less than 4.5 mm, exhibiting a maximum field curvature of -0.37 mm and a maximum distortion value of -14.6% . The optical transfer function across the full FOV exceeds 0.2 at a spatial frequency of 45 lp/mm for all configurations, approaching the diffraction limit. The observation range of the dual-optical-path endoscope optical system meets the requirements for parallax generation. The design results demonstrate that this endoscope optical system possesses superior imaging quality, fulfilling the needs for three-dimensional measurement of defects within artillery chambers.

Key words: optical design; endoscope; long working distance; artillery chamber detection

收稿日期: 2024-09-24; 修回日期: 2024-11-28

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20240408007FG)

第一作者: 于璐, E-mail: 1349883517@qq.com

通信作者: 向阳, E-mail: xyciom@163.com

引言

火炮身管是衡量火炮威力的关键部件,炮管内膛质量与火炮使用过程中的可靠性及安全性密切相关^[1]。经过数次射击后,炮管内壁承受着火药气体的烧蚀和弹丸对膛线的多次磨损,难免会发生如裂纹和局部阳线断裂等毛病,故射击前需要检查炮管内膛的质量^[2]。谢洪波等人^[3]设计了一套偏心结构内窥系统,可对直径小至 $\Phi 35\text{ mm}$ 的炮膛进行成像检测,但此系统是由多套成像子系统对 360° 环面进行分割后拼接成像的,成本较高。赵栋等^[4]提出了一种“锥形反射镜+凸透镜”的方案,其中 45° 锥形反射镜可实现整个圆周膛线一次成像,但由于锥形镜自身的形状问题会导致成像失真,且锥面表面光洁度不易达标,不利于疵病的观察与计算。张光伟^[5]设计了一款三维工业内窥镜,可检测 $\Phi 80\text{ mm}$ 口径火炮炮膛的膛线深度,但采用的是非侧视的观察方式,需倾斜镜体进行观测,不适用于探入小口径火炮。赵媛媛等人^[6]设计了一款广角内窥镜头,可实现对 $\Phi 76\text{ mm}\sim\Phi 155\text{ mm}$ 口径范围内炮膛的全景成像,用于确定内壁疵病位置,此镜头的光学系统轴线垂直于炮膛轴线,总长虽小于 30 mm ,但不够短,无法留出足够观察较小口径火炮内膛的物距,故不适用于观测小口径火炮炮膛。本文设计了一种侧视式双光路大景深内窥镜光学系统,优点是工作距离长、景深大,可在 $12\text{ mm}\sim 40\text{ mm}$ 景深范围内有效成像,能够对 $\Phi 30\text{ mm}\sim\Phi 85\text{ mm}$ 小口径火炮炮膛内壁的疵病进行三维测量。本文选取 $\Phi 30\text{ mm}$ 、 $\Phi 37\text{ mm}$ 、 $\Phi 57\text{ mm}$ 、 $\Phi 76\text{ mm}$ 和 $\Phi 85\text{ mm}$ 5种口径的火炮炮管作为设计对象,基于双目立体模型确定了双光路的基线距离,计算出各口径下的物距、视场角等参数。选取合适的物镜结构、中继结构、转接光学镜组,分别对各部分结构进行局部优化及内窥镜的整体优化,完成单光路内窥镜的光学系统设计,并进行了像质分析。分析结果表明,设计的双光路内窥镜光学系统满足炮膛内壁疵病三维测量的需求。

1 设计原理及参数确定

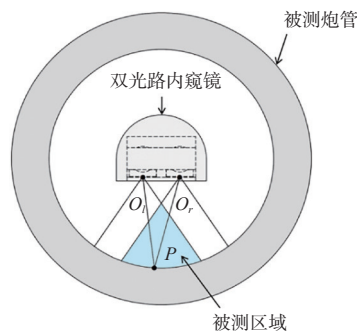
1.1 原理分析

为了对炮膛内壁疵病进行三维测量,需要设计双光路光学系统模拟平行双目模型,以摄取左、右2幅分离图像,从而获取疵病的三维信息。目前,三维测量工业内窥镜产品的光学系统主要有2种

技术方案:双镜头双图像传感器方案^[7]和双镜头单图像传感器方案^[8]。若选用双传感器方案,在确定两光路基线距离后,考虑到双图像传感器自身体积大小的问题,2个芯片中心间距会大于两光路光轴间距,需要引用反射棱镜将两光轴分开一定的距离,才能使2个图像传感器分别记录左、右路光学系统的像^[7],但增加反射次数会影响光学系统的稳定性。本文采用双镜头单探测器分区域成像的设计方案,使两光路所成的像左、右均匀分布在同一图像传感器上。此外,为了追求结构简单,双光路内窥镜的光学系统设计一般会引入共光路结构,如共物镜分瞳式结构、双物镜共中继系统式结构等,这些结构虽使光学结构更为简易,但双光路共用同一结构时光线的汇聚必然会引入杂散光,影响成像质量。因此,本文采用分离式双光路结构,只在直角棱镜处使用共光路设计,因为此处两光路的光线不会相交。内窥镜在炮筒内的检测示意图如图1(a)所示。图1(a)中蓝色区域为两光路视场重叠部分,即被测区域。使用双镜头观测该区域可以产生双目立体视觉,通过光轴平行的双镜头拍摄被测物体的左、右分离图像,再经过后续计算2幅图像像素点间的位置偏差,即可获取此区域内被观测点的三维坐标信息^[9],从而达到三维测量的目的。

双目立体成像原理^[10]如图1(b)所示。图1(b)中, $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 为炮膛内壁中的实际待测点, $P_l(x_l, y_l)$ 和 $P_r(x_r, y_r)$ 分别为点 P 在左图像和右图像的成像点; O_l 和 O_r 分别为左右镜头光心,左镜头光心为世界坐标系的原点,基线 B 为左右镜头光心的连线距离; f 为内窥镜焦距。在平行双目立体视觉模型下, $y_l=y_r$,记 $y_l=y_r=y$ 。由相似三角形原理可得:

$$\begin{cases} x_l = f \frac{X_w}{Z_w} \\ x_r = f \frac{X_w - B}{Z_w} \\ y = f \frac{Y_w}{Z_w} \end{cases} \quad (1)$$



(a) 内窥镜在炮筒内检测示意图

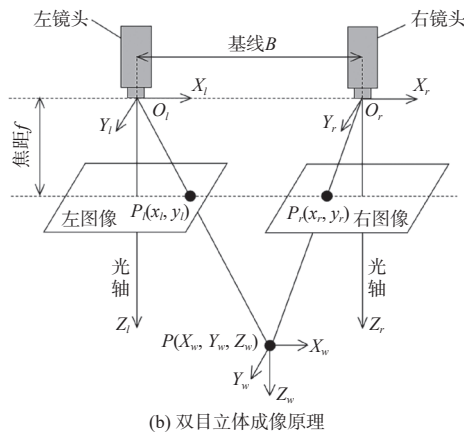


图1 双光路内窥镜工作原理示意图

Fig. 1 Diagram of working principle of dual-optical-path endoscope

炮膛内壁实际待测点 P 在左右图像平面中的视差 D 为 x 方向上像素坐标之差^[1], 即:

$$D = x_l - x_r \quad (2)$$

根据式 (1) 和式 (2) 计算待测点 P 的三维坐标为

$$\begin{cases} X_w = B \frac{x_l}{D} \\ Y_w = B \frac{y_l}{D} \\ Z_w = B \frac{f}{D} \end{cases} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 为了获得待测点 P 的三维坐标, 需要确定基线距离 B 、焦距 f 以及双镜头的视差 D 。其中, 视差可在后期的立体匹配时得到^[12]。在设计双光路内窥镜光学系统时需要确定基线距离与焦距。根据式 (3) 可得 $D = Bf/Z_w$, 视差 D 与基线距离 B 成正比, 基线距离越大, 视差越大, 立体视觉越强, 但在相同的物距条件下, 两条光路视野重叠区域越小, 可观测范围也就越小, 因此需要选取合适的基线距离。为了保证内窥镜的刚性, 在后期设计内窥镜的机械结构时加入内管和外管两层镜筒, 设定内管和外管镜筒的壁厚均为 0.1 mm。留出内管及外管的机械结构余量后, 还应在左、右 2 个外管镜筒之间留出 0.1 mm 的空间余量, 以方便外层双光路机械外壳的设计, 如图 2 所示。最终确定两条光路间距为 0.5 mm, 两条光路光心间隔为 5 mm, 即基线距离为 5 mm。在该距离条件下可获得足够的观测空间, 获取具有视差的左、右 2 幅图像, 以便进行后续的三维测量。

1.2 系统参数计算

设计光学系统时设置 5 个组态 (对应 $\Phi 30$ mm、 $\Phi 37$ mm、 $\Phi 57$ mm、 $\Phi 76$ mm、 $\Phi 85$ mm) 模拟内窥

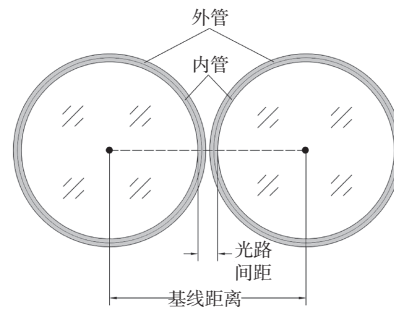


图2 双光路间距示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the double-light path spacing

镜在不同口径炮膛中的工况, 每个口径对应的物距如表 1 所示。由于侧视观察可使镜体自身占据一定的观察距离, 为了留出镜体自身口径的余量, 表 1 中物距均小于身管口径半径。观测时需要保证视野重叠区域至少含有 2 条阳线 and 1 条阴线, 当被测对象为 $\Phi 30$ mm 口径时物方视场角最大, 观测范围最大, 选择此视场角进行系统设计, 可满足各组态下的观测区域都至少包含两条阳线和一条阴线的需求。当两条光路光心间距 5 mm, 单光路半物高为两条阳线和一条阴线的宽度之和时, 双光路视场重叠部分大于单光路半视场, 可满足观测需求。

表1 不同口径对应物距

Table 1 Object distances corresponding to different apertures

口径/mm	30	37	57	76	85
物距/mm	12.3	15.8	25.9	35.4	39.9

首先以 30 mm 口径为对象计算出系统视场角。已知阳线宽度和阴线宽度, 通过计算可得单光路内窥镜半物高 y 为 8.4 mm。已知 30 mm 口径下物距 $l = 12.3$ mm, 代入 (4) 式, 可得半视场角 $\omega = 34^\circ$, 全视场角 $2\omega = 68^\circ$ 。

$$\tan \omega = \frac{y}{l} \quad (4)$$

设单光路光学系统全像高为 4 mm。系统放大倍率关系式为

$$\beta = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{y'}{y} \quad (5)$$

式中: σ' 为光学系统像方分辨率; σ 为光学系统物方分辨率; y' 为像高; y 为物高。由相似三角形原理可求得 39.9 mm 物距下半物高为 27.2 mm。已知物高 y 和像高 y' , 可求得系统放大倍率 β 为 0.07~0.23。选择 2/3" 图像传感器进行成像, 像元尺寸 5.5 μm ,

像元数 1920 pixel×1080 pixel, 有效区域尺寸为 10.56 mm×5.94 mm。当单光路光学系统的全像高为 4 mm, 双光路 2 个像的中心相距 5 mm 时, 可知 2 个像能够均匀地分布在传感器上。采用 2 像元合并采样的方式^[13], 计算可得像元合并后截止频率为 45 lp/mm, 故光学系统的 MTF 值在 45 lp/mm 处大于 0.2 即可。已知系统放大倍率 β 为 0.07~0.23, 像方最小可分辨线对距离为 22 μm , 则物方最小可分辨线对距离为 0.1 mm~0.3 mm^[14]。

设定双光路内窥镜外径不超过 11 mm, 去除机械零件尺寸后, 可得单光路实际口径为 4.5 mm。由于火炮身管长度较长, 30 mm 口径身管长度为 1 000 mm, 故内窥镜工作距离大于 1 000 mm。内窥镜拟定的基本光学参数为: 视场角 68°, 长度大于 1 000 mm、有效通光口径小于 4.5 mm。

2 光学系统设计

2.1 物镜系统

物镜系统位于内窥镜的最前端, 用于获取被测点的光学信息。设计物镜时, 首先以 12.3 mm 作为物距进行初步设计, 得到成像质量较好的物镜结构后, 再通过多重结构设置 5 个组态进行大景深系统设计。已知物镜半视场角 $\omega=34^\circ$, 全像高 $y_o'=2.5$ mm, 将 y_o' 和半视场角 ω 代入 (6) 式, 可得物镜焦距为 1.85 mm。

$$f'_o = \frac{y'_o}{2 \tan \omega} \quad (6)$$

成像系统 F 数越小, 镜头通光量越大, 而像面的成像质量也会越差。为了获得大景深, 光学系统需要较大的 F 数^[15], 故设定物镜的 F 数为 10 进行设计优化。物镜具体设计指标如表 2 所示。

表 2 内窥镜物镜设计指标

Table 2 Design requirements for objective lens of endoscope

参数	指标
F 数	10
全视场角/(°)	68
波长/nm	486~656
焦距/mm	1.85
像高/mm	2.5
物距/mm	12.3~39.9

物镜系统采用反远距像方远心结构。第一个负透镜的作用是使系统具有大视场。由于系统没

有目视要求, 不需考虑后期像的正反问题, 故选择使用直角棱镜对光线进行反射转向, 优化中使用平行平板替代。平行平板后的物镜组采用正透镜加 2 组双胶合透镜的结构, 其中正透镜使光束会聚, 再通过双胶合透镜矫正像差。双胶合透镜为冕牌玻璃和火石玻璃的组合, 利用 2 种类型玻璃的色散属性, 使得色散相互补偿, 从而达到消色差的目的。控制第一负透镜与平行平板的通光口径, 确保使用直角棱镜转向后物镜的口径不超过 4.5 mm。同时, 还需控制物镜像面各视场的光线远心度, 以保证后续接入中继系统后的成像质量。设置 0、0.707 和 1 视场进行观察, 通过多重结构改变物距, 优化 5 种物距条件下的物镜, 所得成像质量较好。最终设计的物镜结构如图 3 所示。但由于物镜镜片数量较少, 可优化变量较少, 故可通过后面加入中继系统增加优化空间, 再进行优化, 进一步满足大景深需求。

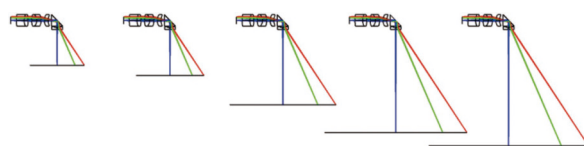


图 3 物镜系统光学结构图

Fig. 3 Optical structure diagram of the objective lens system

2.2 中继系统

中继系统也称转像系统, 一般由多个相同的棒镜组序列排列组成, 采用双远心结构, 作用是将物镜所成像等比传输至中继系统像面, 同时加长工作距离, 也可以消除前面物镜系统所剩余的像差。传统的 Hopkins 三胶合棒透镜结构如图 4 所示, 由两组对称的三胶合棒镜组成。由于棒镜组是垂轴对称式结构, 故不产生畸变和正弦差等垂轴像差, 但如球差、轴向色差、像散和场曲的轴向像差等则会较大^[16]。弥散现象是小口径内窥镜最严重的问题之一, 而棒状镜可以使主光束被限制在光轴附近, 减少光线在透镜间空气对光的发散作用, 从而降低弥散斑大小。

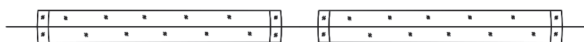


图 4 传统 Hopkins 三胶合棒透镜结构图

Fig. 4 Structural diagram of conventional Hopkins triple-bonded rod lens

本文设计了单棒镜-三胶合-单棒镜的新型中继结构, 棒镜组整体为对称式结构。由于内窥镜

工作距离大于 1 000 mm, 因此, 在保证棒镜组口径小于 4.5 mm 的同时, 尽量增大其长度。其中左、右 2 个棒镜均选用高折射率玻璃, 尽量降低光线高度, 保证光线传播距离较长。三胶合透镜使用低-高-低折射率的对称透镜组合, 可消除残余色差。设计棒镜组时, 孔径值设置选择物方 NA , 其值为物镜系统的像方 NA 。使用 RAID 等操作数严格控制像面光线的远心度, 使用 TOTR 等操作数保证棒镜组总长, 使用 DMVA、PMAG 等操作数使像高与物高一致, 以保证棒镜组的垂轴放大倍率为 1, 使用 MNCA、MXCA 等操作数控制空气间隔, 保证空气间隔不会过小, 以免产生牛顿环, 也便于装配^[17]。最终优化得到的棒镜组结构如图 5 所示。棒镜组全像高为 2.5 mm, 垂轴放大倍率为 -1, 单个棒镜组光学长度为 177 mm。

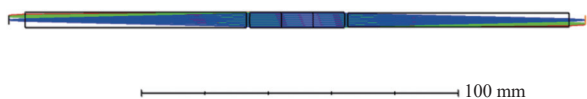


图 5 棒镜组设计结果

Fig. 5 Design results of lens rod group

2.3 转接光学镜组

传统的硬性内窥镜多用于医学方面, 有目视的需求, 故中继系统后接有目镜。用于炮膛检测的工业内窥镜不需要进行目视观察, 也无需获得正像。转接光学镜组, 是将传统医用硬性内窥镜的目镜与适配器进行一体化整合设计所得的结构^[18]。

前转接镜组设计思路与传统内窥镜目镜相似, 需要进行倒置设计。为了与中继系统匹配, 选择像方远心结构。设计时, 入瞳位于光学系统第一面, 入瞳直径取 2 mm, 视场设置选择像高, 其值为中继系统最终全像高 2.5 mm。控制前转接镜组的焦距 $f_t = 15$ mm, 最终设计的倒置前转接镜组如图 6(a) 所示。

转接光学镜组的垂轴放大倍率计算公式为

$$\beta_t = \frac{y_t'}{y_t} = \frac{f_t'}{f_t} \quad (7)$$

式中: β_t 为转接光学镜组的垂轴放大倍率; y_t' 为后组像高; y_t 为前组像高; f_t 为前组焦距。根据式(7)可得后组焦距 f_t' 为 24 mm, 即可进行后组设计。后组采用简单的双胶合透镜, 视场设置为物高, 其值为前组入瞳值的 1/2。设计时使用操作数控制后组焦距在 24 mm 左右, 控制后组全像高为 4 mm。最终设计的后转接镜组如图 6(b) 所示。将前、后组

进行连接后, 像质会有所下降, 需要进一步优化。优化后的转接光学镜组如图 7 所示, 其垂轴放大倍率为 1.6。

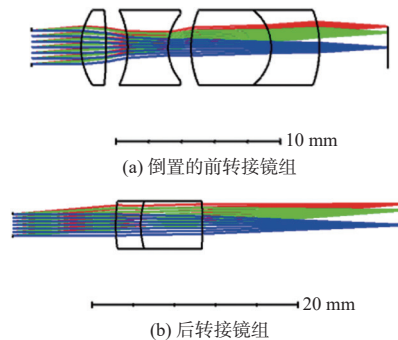


图 6 转接光学镜组前后组设计结果

Fig. 6 Results of front and rear group design of transfer optical lens group

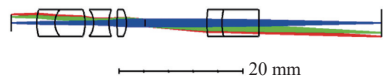


图 7 转接光学镜组一体化设计结果

Fig. 7 Results of integrated design of transfer optical mirror set

2.4 内窥镜整体光学系统

单光路内窥镜整体光学系统将物镜系统、中继系统、转接光学镜组依次进行连接。尽管每个部分在单独设计时成像质量都较好, 调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 也均接近衍射极限, 但在依次连接后成像质量会有所下降。因此, 物镜与中继系统连接后、物镜中继系统与转接光学镜组连接后都需要进行局部优化, 设置局部变量严格控制系统中像面的像高与光线远心度等参数, 以保证像质。在此基础上, 再优化系统整体像差, 通过微调整体系统来提高成像质量。

12.3 mm 物距下内窥镜整体光学系统结构图如图 8 所示。使用 5 组棒镜组成中继系统, 可增

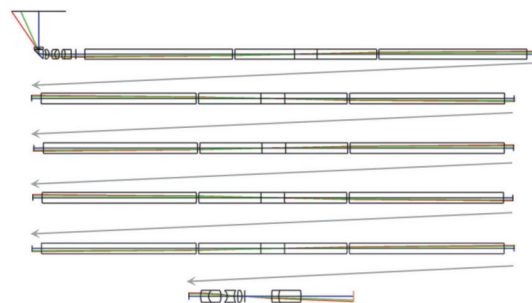


图 8 内窥镜整体光学系统结构图

Fig. 8 Structural diagram of endoscope overall optical system

加内窥镜整体工作距离,经过整体优化后中间像面变动较小,光线聚焦情况良好。最终设计的单光路内窥镜光学系统长度为1 099 mm, F 数为20,全像高为4 mm,实际口径为4.5 mm,满足设计要求。

2.5 双光路内窥镜光学系统

本文采用侧视式双光路单图像传感器的设计方案。若双光路中分别放置2个直角棱镜,装配时2个棱镜可能会产生相对旋转,导致双镜头的物镜端接收的光线不是平行状态,无法获得有效的左、右2幅分离图像。因此,本文加入了双光路共用式直角棱镜,既保证了2个光路物镜端所接收的光线是相互平行状态,又降低了装配难度,其效果如图9所示。

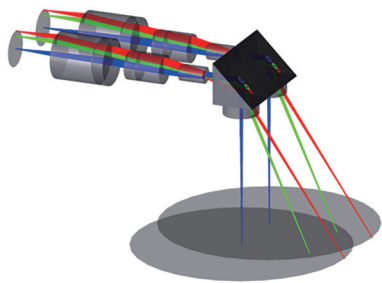


图9 双光路物镜3D模拟图

Fig. 9 3D simulation of the dual-optical-path objective lens

根据前文确定的基线距离等参数进行双光路内窥镜光学系统的搭建,如图10所示。从图10可以看出,双光路2个像能够均匀地分布在 $2/3$ "图像传感器上,满足双光路成像的条件。图像传感器捕获的2张图像对应于同一场景的不同视角,形成了典型的双目图像对。为了完成三维测量工作,首先对双光路内窥镜进行相机标定,确定内部参数和外部参数,并进行畸变校正。经过滤波去噪等图像预处理后,通过立体匹配算法得到视差图。再根据三角测量原理,通过已知的相机参数和视差图,将图像中每个匹配点的视差信息转换

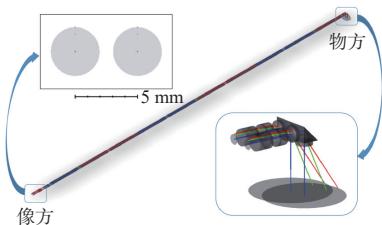


图10 双光路内窥镜光学系统3D模拟图

Fig. 10 3D simulation diagram of dual-optical-path endoscope optical system

为三维空间中的坐标,即完成了三维重建工作,可以对疵病尺寸进行测量。

3 光学系统像质评价

MTF能体现光学系统的分辨本领。图11(a)~11(e)分别为各组态的MTF曲线。从图11可以看出,在空间频率45 lp/mm处5种组态各视场MTF值均大于0.2,且MTF曲线均接近衍射极限,表明内窥镜成像质量较好。

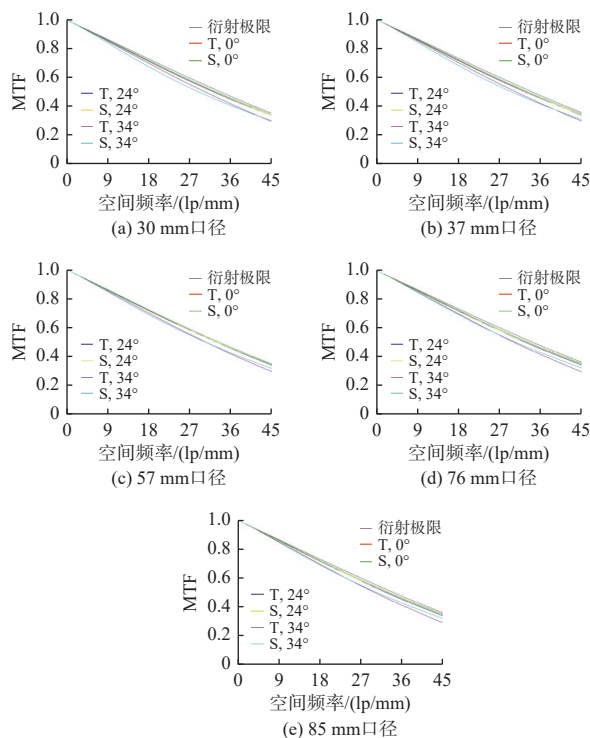


图11 各组态MTF曲线

Fig. 11 MTF curves for each configuration

各组态场曲畸变图如图12所示。从图12可以看出,光学系统的最大场曲为 -0.37 mm。当视场为 68° 时,系统畸变达到最大,为 -14.6% ,系统中心视场畸变较小,边缘视场畸变较大,可在后期算法中进行畸变校正^[19]。各组态点列图如图13所示。从图13可以看出,5组态各视场光斑大多集中在艾里斑之内。图14为横向像差图,横坐标为归一化入瞳坐标,纵坐标为光线在像面偏离主光线的值。从图14可以看出,曲线较为平缓,说明球差校正较好,而D光与F光、C光曲线未趋近重合,说明存在一定的色差。查看垂轴色差曲线可知,所有波长的垂轴色差在 $3.3\ \mu\text{m}$ 范围内。在轴向色差曲线中,孔径边缘处F光、C光的轴向色差为 $7.3\ \mu\text{m}$,孔径中心处色差为 $38.2\ \mu\text{m}$,均小于1倍焦深。

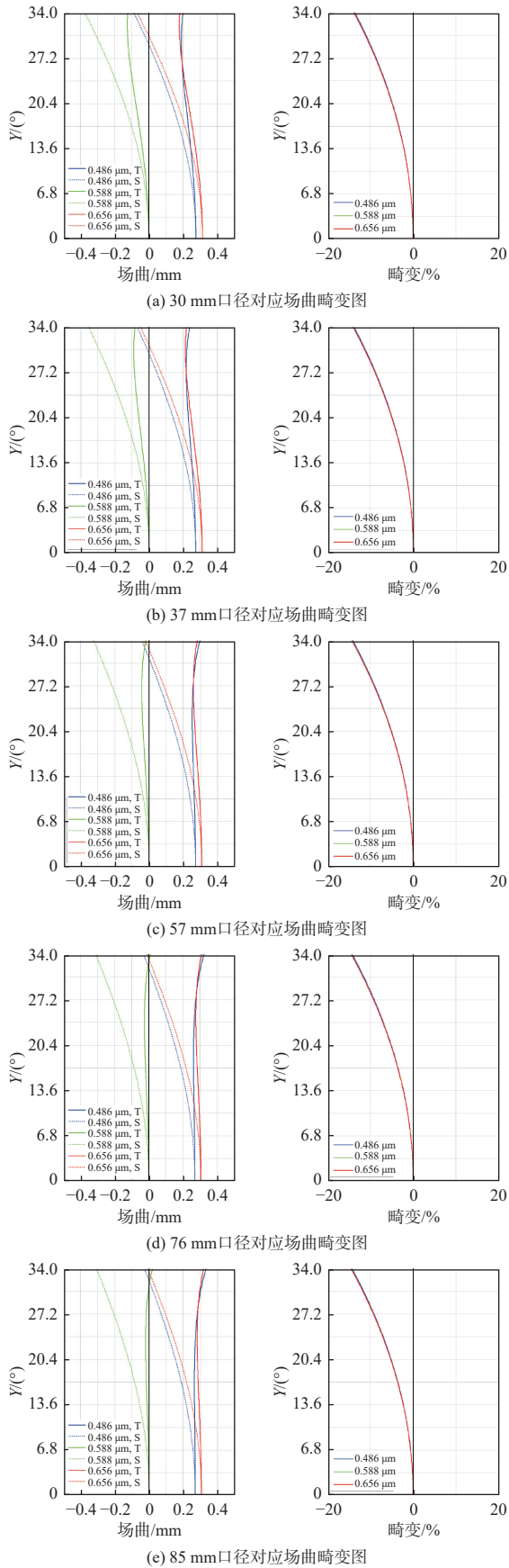


图 12 场曲畸变图

Fig. 12 Field curvature and distortion diagram

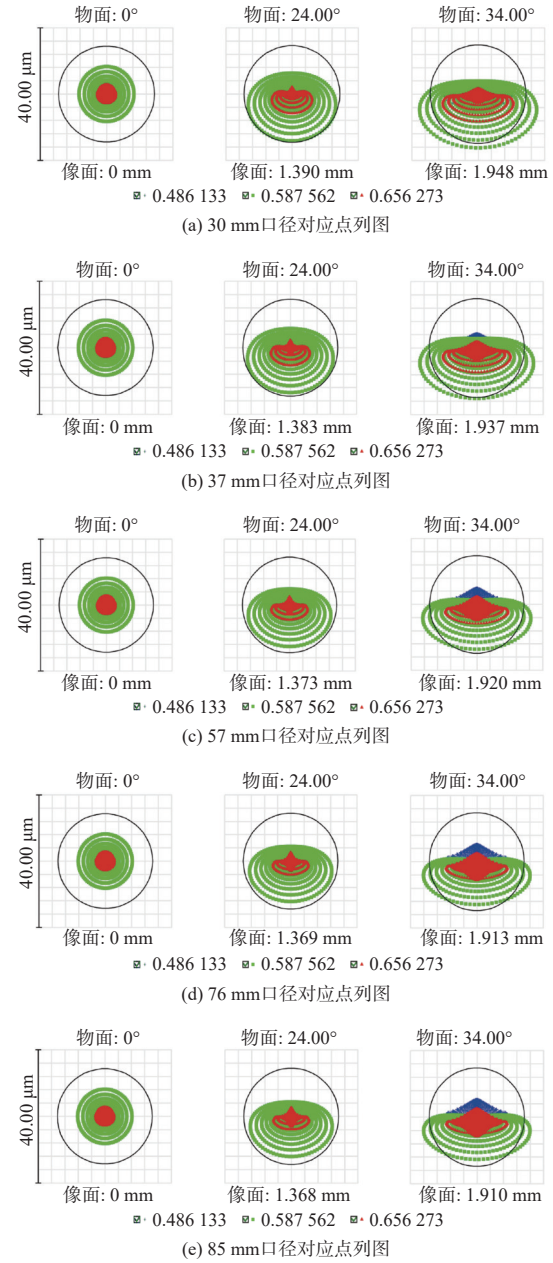


图 13 点列图

Fig. 13 Spot diagram

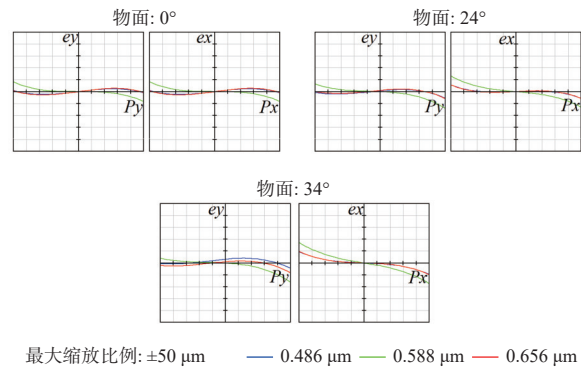


图 14 横向像差图

Fig. 14 Horizontal aberration map

4 公差分析

利用 Zemax 软件对内窥镜光学系统进行公差分析,可以模拟加工误差、材料误差以及装调误差。公差分析参数一般包括光学元件的光圈、厚度、偏心、倾斜、折射率、阿贝误差、不规则度等,给定的公差容限值如表3所示。在特征频率 45 lp/mm 处进行 100 次蒙特卡罗分析,分析结果如表4所示。从表4可知,80% 系统 MTF 大于 0.16, 50% 系统 MTF 大于 0.19, 成像质量下降较小,符合加工要求。

表3 公差容限值

Table 3 Tolerance values

公差	数值
曲率半径/rings	2
厚度/mm	0.01
表面偏心/mm	0.01
元件偏心/mm	0.01
表面倾斜/(°)	0.005
元件倾斜/(°)	0.005
折射率	0.001
阿贝数	0.01
不规则度	0.2

表4 公差分析结果

Table 4 Tolerance analysis results

蒙特卡洛样本百分比/%	MTF值
90	0.138 682 70
80	0.160 097 30
50	0.192 551 98
20	0.214 293 44
10	0.227 733 48

5 结论

基于内窥镜成像原理,分析了双光路内窥镜检测炮膛内壁疵病的方案,设计了一种可用于 $\Phi 30\sim\Phi 85$ mm 口径炮膛检测的侧视式双光路、大景深内窥镜光学系统。针对 $\Phi 30$ mm、 $\Phi 37$ mm、 $\Phi 57$ mm、 $\Phi 76$ mm 和 $\Phi 85$ mm 5种口径的火炮身管设置5种组态,依次对物镜系统、中继系统和转接光学镜组进行局部优化,再连接各部分系统进行整体优化。最终像质评价结果表明,光学系统各组态、各视场 MTF 在空间频率 45 lp/mm 处均大于 0.2, 成像质量较好,可在 12 mm~40 mm 景深范围内有效成像。搭建的双光路内窥镜光学系统加入了共用式直角棱镜,避免了2个棱镜单独装配时的相对旋转问题且便于装配,而且系统观察范围满

足视差产生要求。综上所述,设计的双光路内窥镜光学系统满足 $\Phi 30$ mm~ $\Phi 85$ mm 小口径火炮炮膛疵病三维测量的要求。

参考文献:

- [1] 王晨庄. 炮管内壁瑕疵图像检测系统研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
WANG Chenzhuang. Research on image detection system for defects on the inner wall of gun barrels [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.
- [2] 高雪峰. 炮膛全景图展开和拼接技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
GAO Xuefeng. Research on unfolding and stitching techniques for panoramic images of gun chambers [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [3] 谢洪波, 张春慧, 宋伟铭, 等. 小口径炮膛视觉检测系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2006(S2): 16-20.
XIE Hongbo, ZHANG Chunhui, SONG Weiming, et al. Optical design of a small aperture gun bore visual inspection system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006(S2): 16-20.
- [4] 赵栋, 程远增, 辛兵. 基于 CCD 的小口径炮膛质量检测系统[J]. 兵工自动化, 2008(9): 79-80.
ZHAO Dong, CHENG Yuanzeng, XIN Bing. A CCD-based quality inspection system for small-caliber gun chambers[J]. Ordnance Industry Automation, 2008(9): 79-80.
- [5] 张光伟. 立体内视测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
ZHANG Guangwei. Research on in-body stereo measurement technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
- [6] 赵媛媛, 于洵, 李敏, 等. 炮管内壁疵病信息检测系统设计[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(1): 52-59.
ZHAO Yuanyuan, YU Xun, LI Min, et al. Design of a detection system for defects on the inner wall of gun barrels[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2024, 22(1): 52-59.
- [7] 杨东林, 卢栋, 冯大伟. 基于图像处理的三维工业内窥镜研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1285-1289.
YANG Donglin, LU Dong, FENG Dawei. Research on three-dimensional industrial endoscope based on image processing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

- 2009, 30(6): 1285-1289.
- [8] 于波, 王立鼎. 一种双目分时显微立体成像系统的研制[J]. 光学精密工程, 1997(4): 50-53.
- YU Bo, WANG Liding. Development of a binocular time-sharing microscopic stereo imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 1997(4): 50-53.
- [9] 杨倩兰. 工业双目内窥镜三维重建方法研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- YANG Qianlan. Research on three-dimensional reconstruction methods for industrial binocular endoscopes [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2021.
- [10] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- ZHANG Guangjun. Machine vision [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [11] 周科杰. 双目视觉三维测量技术研究与应用[D]. 成都: 中国科学院大学: 中国科学院光电技术研究所, 2019.
- ZHOU Kejie. Research and application of binocular vision three-dimensional measurement technology[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [12] 李森. 基于双目立体视觉的测量技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- LI Miao. Research on measurement technology based on binocular stereo vision [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023.
- [13] 张璐, 李博, 李寒霜, 等. 超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪设计[J]. 中国光学, 2022, 15(5): 1029-1037.
- ZHANG Lu, LI Bo, LI Hanshuang, et al. Hyperspectral resolution ultraviolet dual channel common optical path imaging spectrometer[J]. Chinese Optics, 2022, 15(5): 1029-1037.
- [14] 杨凯明, 向阳, 王鑫, 等. 大靶面、长工作距高清工业内窥镜设计[J]. 光学学报, 2022, 42(22): 150-157.
- YANG Kaiming, XIANG Yang, WANG Xin, et al. Design of a high-definition industrial endoscope with large target surface and long working distance[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 150-157.
- [15] 阳结根, 胡枫, 丁伟, 等. 大景深胶囊内窥镜光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(20): 87-93.
- YANG Jiegen, HU Feng, DING Wei, et al. Optical system design of a capsule endoscope with large depth of field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(20): 87-93.
- [16] 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- LI Lin. Modern optical design methods [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- [17] 王鑫, 向阳, 冯大伟, 等. 鼻黏膜纤毛显微内窥镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(4): 174-183.
- WANG Xin, XIANG Yang, FENG Dawei, et al. Optical system design of a micro-endoscope for nasal mucociliary imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(4): 174-183.
- [18] 何旭舟, 林峰, 谢忠鑫, 等. 一种 2k 分辨率内窥镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 276-281.
- HE Xuzhou, LIN Feng, XIE Zhongxin, et al. Design of an optical system for a 2k resolution endoscope[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 276-281.
- [19] 张春明, 解永春, 王立, 等. 一种基于共轭节面的图像畸变分析方法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 91-97.
- ZHANG Chunming, XIE Yongchun, WANG Li, et al. An image distortion analysis method based on conjugate sectional planes[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 91-97.