

光学学报

长焦镜头光学系统设计及无热化研究

张丽芝^{1,2*}, 陆秋萍², 段帆琳², 戴幸², 乔大勇^{1,3}¹西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072;²宁波永新光学股份有限公司, 浙江 宁波 315048;³西北工业大学宁波研究院, 浙江 宁波 315103

摘要 为满足车载激光雷达接收光学系统在复杂环境实际应用中的温度适应性要求,本文基于一种将长焦镜头与线阵探测器相结合,通过局部图像级成像显著提高激光雷达系统探测分辨率的方案,设计了一款轻小型无热化的四片式全玻璃长焦镜头,研究了其在不同温度下的像面漂移。分析结果表明,所设计的长焦镜头在整个 $-40\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内焦移量为 0.021 mm ,小于焦深 0.074 mm ,在 30 lp/mm 处各视场调制传递函数(MTF)均大于 0.5 ,全视场内光斑半径在 $7\text{ }\mu\text{m}$ 以下,水平及垂直角分辨率为 $0.045^{\circ}(\text{H})\times 0.045^{\circ}(\text{V})$ 。此长焦接收光学系统结构简单、成像质量高、环境适应性强,在车载激光雷达领域具有良好的应用前景。

关键词 车载激光雷达; 长焦光学系统; 光学设计; 无热化

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231926

1 引言

激光雷达是一种主动感知环境的技术,具有测量范围广、距离远等优势^[1-3]。激光雷达可通过提供车辆周边环境信息来实现盲区监测等功能^[4],在车载领域具有广阔的应用前景。随着配套硬、软件的发展,对车载激光雷达的要求越来越高,如高的探测精度、稳定的环境适应性、丰富的数据信息采集、快速的响应计算等。

接收光学系统的成像质量对于激光雷达的品质保证和广泛应用十分关键。相比于会聚透镜单点探测,长焦镜头视角小、焦距长,可准确捕捉远处目标并放大细节,将其与线阵探测器组合,可达到图像级成像清晰度,从而大幅提高接收光学系统的分辨率。然而,长焦镜头通常结构复杂、体积较大,难以满足车载小型化、低成本的要求。同时,车载激光雷达实际工作环境复杂,如季节性的长时间极限温度、室内外的高低温度快速变化等,这些温度变化将引起镜头内部光学件和结构件的变化,导致像面漂移、成像质量降低^[5]。对于长焦镜头,随着环境温度的变化,其像面漂移将更明显^[6]。因此,有必要采用无热化设计的方法降低像面温漂,提高长焦镜头的环境适应性。文献[7-8]采用机械被动无热化法,利用两种不同热膨胀系数的材料构成内套筒来驱动透镜轴向移动,补偿因温度变化造成的像面

位移。文献[9-12]考虑光学被动无热化法,利用光学材料热特性之间的差异进行合理组合消温漂,实现了 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的无热化设计。文献[13]证明了混合被动无热化技术可实现低成本、高性能的无热化效果。然而,上述文献存在多层套筒导致的结构复杂、体积较大,或引入衍射元件、非球面透镜增加生产成本,且无热化温度范围较窄的问题,难以适应车载产品复杂环境的实际应用。

本文将长焦镜头与线阵探测器进行组合来提高分辨率,并采用光学系统总长小于焦距的远摄结构,压缩长焦接收光学系统的体积,满足车载激光雷达轻小型化和高分辨率的需求。针对长焦镜头易受温度影响的问题,改进光学被动结合机械被动的双组补偿设计方法,最大限度上使光学件光焦度变化与结构件热胀冷缩带来的热差相抵消,降低像面漂移,以实现长焦镜头的无热化。最终,所设计的镜头在 $-40\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温度变化范围内像面漂移量小于焦深,有利于确保镜头的成像质量,并且所设计的结构制备工艺简单,易于工程化生产。

2 光学系统设计

2.1 成像方案

长焦镜头结合线阵探测器的整体方案如图1所示,主要包括垂直腔面发射激光器(VCSEL)、反射镜、

收稿日期: 2023-12-13; 修回日期: 2024-01-29; 录用日期: 2024-01-31; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(U21B2035, 62074128)

通信作者: *zlj@yxopt.com

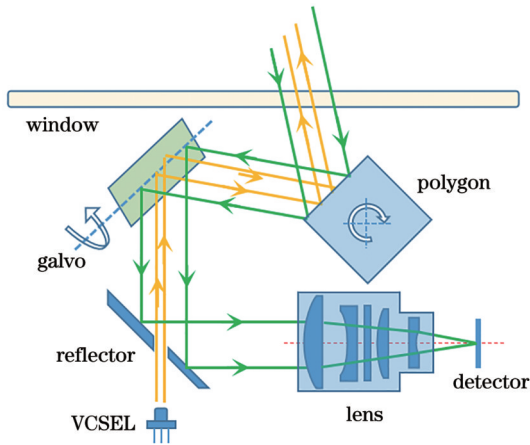


图 1 激光雷达的工作原理图
Fig. 1 Schematic diagram of LiDAR

长焦镜头、振镜(galvo)、转镜(polygon)、窗口镜以及线阵探测器,其中长焦镜头与线阵探测器是优化扫描策略后的结果。半固态转镜式激光雷达产品通常使用半导体激光器、会聚镜头与阵列探测器的搭配,分辨率较低,水平及垂直角分辨率为 $0.2^\circ(\text{H}) \times 0.2^\circ(\text{V})$,但是技术成熟、所需成本低。在此基础上,保留半导体激光器,将成像镜头代替会聚镜头作为提升成像结果分辨率的突破点,同时实现低成本和高质量的激光雷达成像方案。

上述成像方案的扫描策略为:VCSEL发出的光束经过一系列器件后,在探测目标上形成一个照亮面阵区域。当galvo和polygon转动时,光束在探测面进行一行一行的扫描,完成扫描的光束携带目标信息返回探测器。当点探测器变为线探测器时,探测目标面上的照亮面阵区域被细分为多行,探测器接收到的不再是一行信息,而是多行信息,使得最终成像的分辨率提高。长焦镜头在其中的作用则是保证探测器每个像素得到的信息尽可能真实且还原。

光学系统的设计参数如表 1 所示。本文选择 Fortsense 公司的线阵探测器 FSL 3516,像元阵列数为 1×16 ,像元大小为 $60 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。该探测的像元短边为 $15 \mu\text{m}$,因此将镜头各视场的弥散斑均方根(RMS)半径限制在 $7.5 \mu\text{m}$ 之内。长焦镜头的工作波段和环境温度与激光雷达保持一致,分别为 905 nm 和 $-40 \sim 100^\circ\text{C}$;镜头焦距控制在 $200 \sim 300 \text{ mm}$ 之间,全视场角为 0.85° ,对车辆周边情况进行成像探测;该视场角中,边缘有一部分作余量,实际使用的视野为 0.72° ,经过线阵探测器的分割后,可达到 $0.045^\circ(\text{H}) \times 0.045^\circ(\text{V})$ 的角分辨率;同时镜头的长度需要控制,设置光学总长与焦距的比值即远摄比 $k \leq 0.5$ 。

2.2 方案设计

2.2.1 长焦光学系统设计

远摄光学系统是长焦光学系统的一种,一般由一正一负两个光组构成,如图 2 所示。这种结构使得光

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of optical system

Item	Data
Operating wavelength /nm	905
Working temperature / $^\circ\text{C}$	$-40 \sim 100$
RMS radius of diffuse spot / μm	≤ 7.5
Field of view /($^\circ$)	0.85
Focal length /mm	$200 \sim 300$
k	≤ 0.5

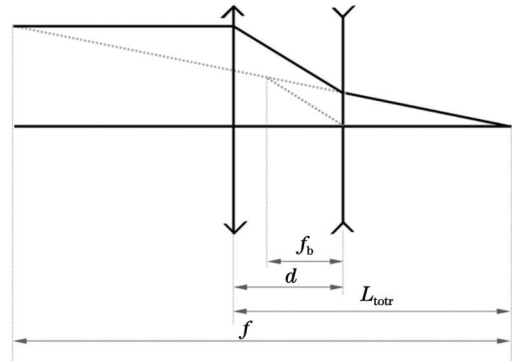


图 2 远摄光学系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of telephoto optical system

学系统的总长小于焦距,可以用来设计体积相对较小的长焦镜头,从而减少空间占据。远摄光学系统的远摄比 k 定义为光学总长 L_{totr} 与焦距 f 的比值。

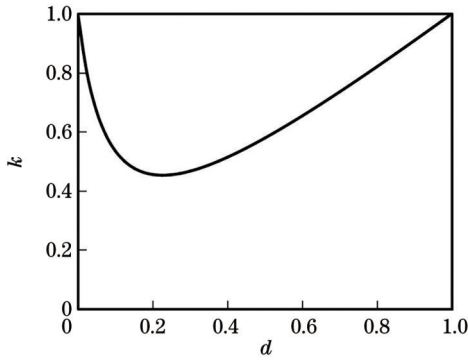
在成像方案与设备已确定的情况下,设定光阑在前组上,得到:

$$\begin{cases} k = 1 + (1 - d\varphi) \frac{d\varphi_b}{1 - d\varphi_b} \\ \varphi_f = \frac{\varphi - \varphi_b}{1 - \varphi_b d} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: φ 为系统的总光焦度,即焦距 f 的倒数; d 为前组与后组的间隔; φ_f 和 φ_b 分别为前组和后组的光焦度,即前后组焦距 f_f 和 f_b 的倒数。以 d 为变量,由图 2 可知 $|\varphi| < |\varphi_b|$,因此当 d 越小时, k 也越小。首先设定 $d = 0.375$,此时后组的相对孔径负担较小^[14]。当 φ 归一化为 1、 $k = 0.5$ 时,前组和后组光焦度分别为 2.3334 和 -10.6667 ;维持后组光焦度不变,当 d 缩短为 0.25 时, k 下降到 0.454,处于一个波谷的位置(图 3)。为了使 k 下降更多,需要进一步减小后组光焦度,并再次改变 d 以得到更小的远摄比 k 。

2.2.2 无热化光学系统设计

长焦镜头光学系统对温度的变化较为敏感,易导致最佳像面偏移、成像质量降低,因此在优化过程中有必要进行相应的温度补偿设计。光学系统中主要存在两种热差。光学透镜的折射率、表面曲率半径以及厚度等参数会随着工作环境温度的改变而变化,导致透

图 3 间隔 d 与远摄比 k 的关系Fig. 3 Relationship between distance d and telephoto ratio k

镜光焦度随之改变,同时带来额外的像差,这种由温度变化带来的成像差异可用热差系数 T_s 来表示^[7]。当工作环境温度改变时,相邻透镜的空气间隔随着隔圈或镜筒结构件的热胀冷缩发生变化,其变化程度与材料的热膨胀系数(TCE)和长度有关,带来的热差系数可用 T_m 来表示。总的来说,光学系统须满足无热化设计方程:总光焦度方程、色差方程、热差方程,如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^q h_i \varphi_i = \varphi \\ \left(\frac{1}{h_1 \varphi} \right)^2 \sum_{i=1}^q h_i^2 C_i \varphi_i = 0 \\ \left(\frac{1}{h_1 \varphi} \right)^2 \sum_{i=1}^q h_i^2 T_i \varphi_i = T_s = T_m = \sum_{n=1}^p \alpha_n L_n \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, q$, 表示第 i 个透镜; h_i 为第一近轴光线的入射高度, φ_i 为第 i 个透镜的光焦度; T_i 为第 i 个透镜的热差系数, 定义为单位光焦度透镜在单位温度变化后的光焦度变化; C_i 为第 i 个透镜的色差系数, 定义为单位光焦度透镜在单位波段变化后的光焦度变化; $n=1, 2, 3, \dots, p$, 表示第 n 个结构件; α_n 为第 n 个结构件的热差系数; L_n 为第 n 个结构件在常温下的轴向长度; 最后一个结构件在常温下的有效轴向长度为 L_p , 其作用是控制最后一个光学元件与芯片的距离。对于其中的消色差公式, VCSEL 工作波长随温度漂移的变化为线性关系^[15], 即使温度变化范围较大, 带来的波长变化仍然较小; 同时光学系统最终接收的波段为单色光, 色差对像质的影响较小, 因此在求解各镜片光焦度时可暂时忽略该公式。由于未知量光焦度的数量大于方程数, 所以求得的解不唯一:

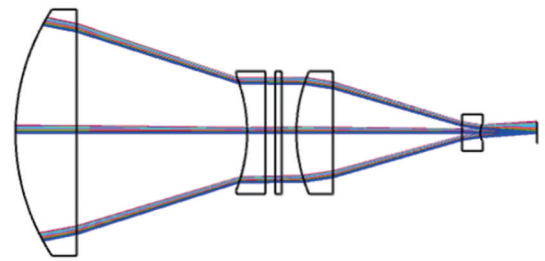
$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-O + PT_2' + Q}{T_2' - T_1'} \\ \frac{O - PT_1' - Q}{T_2' - T_1'} \\ \varphi k_1 \\ \varphi k_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为可自由设置的第三片和第四片透镜的光焦度比值; 当光学系统为分离透镜组时, 热差系数 $T_i' = h_i T_i$, O, P, Q 则代表更复杂的式子:

$$\begin{cases} O = h_1^2 \varphi^2 \sum \alpha_n L_n \\ P = h_1 \varphi - \varphi k_1 - \varphi k_2 \\ Q = \varphi k_1 T_3' + \varphi k_2 T_4' \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出, 第一片与第二片透镜的光焦度正负相反, 数值大小与材料相关。结合上述温度引起的光学元件参数的变化, 消热差的基本原理是通过选择不同的光学材料组合和光焦度分配, 搭配不同 TCE 的结构件, 使光学系统的 T_s 与 T_m 相互补偿, 实现系统的无热化设计, 从而提高光学系统的成像质量。在 ZEMAX 软件热分析功能中可快速计算出高低温下光学系统最佳像面的焦移方向和大小, 然后就光学系统中透镜对温度的不同敏感度进行优化, 替换折射率温度系数不同的透镜, 合理分配各个透镜的光焦度。

上述设计参数涉及到长焦距、宽温度工作范围的要求, 因此拟选用受温度变化影响较小的玻璃透镜。考虑到滤光片存在“蓝移”现象, 当光束倾斜入射滤光片时, 其中心波长发生漂移, 探测器接收到的光能量有所损耗, 因此需要尽可能使光束垂直入射滤光片。同时为了减少透镜数量, 本初始结构设计拟参考已有的调焦式激光测距接收光学系统^[16], 设置滤光片的物侧及像侧各为两个透镜。然后利用 ZEMAX 软件设置评价函数对光学系统参数进行优化设计, 使设计结果能够达到设计指标, 从而保证成像质量。为了降低制造成本、确保可加工性及组装简单, 选择球面透镜且多使用平面, 以便后续工程化生产。经光学被动无热化设计后的四片式全玻璃透镜光学系统如图 4 所示。

图 4 光学被动无热化光学系统^[17]Fig. 4 Passive optical athermalization system^[17]

本文使用 $T'-C'$ 图将选择结果可视化。为了体现各透镜材料的色差特性, 仅选择材料在 904~906 nm 波段范围内的色差系数。为了减小像差, 控制各透镜的光焦度值尽量小, 即控制光焦度解的分母尽量大, 在 $T'-C'$ 图中体现为各坐标点尽可能远, 如图 5 所示。

本设计的透镜定位方式选择体积小、材料搭配灵活的隔圈结构件。如图 6 所示, 该四片式全玻璃透镜光学系统共依靠 4 个隔圈定位, 分别为隔圈 1、2、3、4。如上所述, 为了减少滤光片的“蓝移”问题, 前组与后组

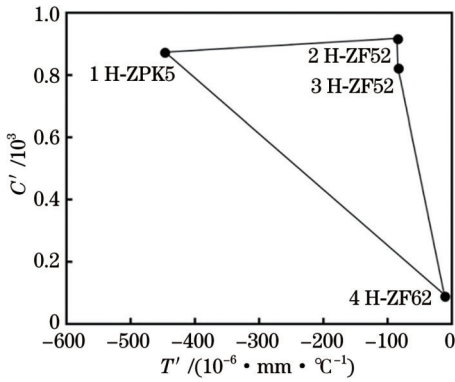
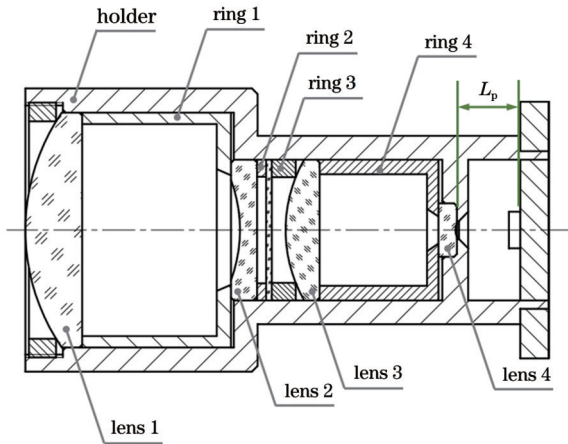
图 5 近红外波段无热 T' - C' 图Fig. 5 Athermal T' - C' chart in near infrared wavelength band

图 6 光学被动结合机械被动无热化光学系统

Fig. 6 Passive optical and mechanical athermalization system

之间设计为平行光。经系统化的公差分析,发现镜头后焦对此处空气间隔的变化不敏感,于是将隔圈 2、3 的材料限定为最常用的材料铝 (Al), 可以大大减少光学设计的难度。观察发现透镜 1 的口径相对较大,在其轴向设置机械被动调节结构会增大系统的光学总长,并且需要充分考虑工作温度差异较大引起材料膨胀对其造成的挤压破坏。因此,较大口径的透镜 1 轴向隔圈 1 拟选择 TCE 相对较小的铜材料 (Cu, $17.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)。确定选择对光学系统整体外形包络影响较小的隔圈 4 作为热差补偿材料,驱动透镜 3 和透镜 4 的轴向移动,从而适应不同工作温度。同样利用 ZEMAX 软件多重结构设置,对热差补偿材料隔圈 4 进行调整,替换不同 TCE 的隔圈,以补偿光学透镜随温度变化产生的热差。

观察图 6 所示的光学系统结构图,探测器芯片平板与镜筒 (holder) 底部的突出部分相连。当温度变化时,holder 热胀冷缩使其有效轴向长度 L_p 随之改变,会导致传感器探测面位置变化。因此,holder 可进一步作为热差补偿材料,配合光学透镜和隔圈热胀冷缩引起的焦面偏移,使最佳像面偏移量在一个焦深范围内,以保证镜头成像清晰。因 holder 可选作热差补偿材

料,为了尽可能减小接收光学系统的质量以满足小型化的要求,尝试单独将隔圈 1,或者将隔圈 1 及隔圈 4 的材料均替换为 TCE 略大于 Cu 但密度更小、更易于加工的 Al ($23.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$),然后对这 3 种方案分别进行无热化设计。利用 ZEMAX 软件多重结构设置进行无热化设计时,对结构件材料 TCE 范围进行了约束,以降低透镜在不同工作温度中受到结构件材料热胀冷缩的应力影响。

2.3 设计结果

经上述光学设计,优化的光学系统结构为:第一个正透镜收集光束,选择低折射率的重磷冕玻璃 H-ZPK5,以减小边缘光束偏转程度,降低后续镜片消像差的难度;第二个负透镜选择高折射率的重火石玻璃 H-ZF52,作用是扩大光束传播角度,使得光束垂直出射,前组光焦度一正一负的两个透镜设计可减小球差;第三个正透镜选择与第二个负透镜相同材料的高折射率的重火石玻璃 H-ZF52,以降低镜片加工成本;第四个负透镜选择折射率更高的重火石玻璃 H-ZF62,增大系统的焦距的同时还能够减小系统光学总长,使得到的接收光学系统远摄比为 0.38。

上述光学被动结合机械被动无热化过程涉及 3 种设计方案,不同隔圈的材料搭配如表 2 所示对应的 3 种结果。其中,选作热差补偿材料的隔圈 4 和 holder 根据无热化设计得到的 TCE 数值匹配与其接近的真实结构件材料。表 2 中液晶高分子聚合物 (LCP) 的 TCE 与 Cu 和 Al 相比较,为 $46 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,是常用的密度较小的结构件材料之一。

表 2 无热化设计后结构件的材料搭配

Table 2 Material matching of structure components under athermalization design

Result	Ring 1	Ring 2	Ring 3	Ring 4	Holder
1	Cu	Al	Al	LCP	LCP
2	Al	Al	Al	LCP	Cu
3	Al	Al	Al	Al	LCP

在未考虑 holder 的热胀冷缩效应时,将上述透镜及 3 种结果对应隔圈材料得到的长焦镜头设计方案在不同温度下进行仿真。为方便描述,将上述 3 种无热化设计结果对应的镜头分别命名为镜头 1、2、3。以 20°C 时的焦面位置作为零点,焦面远离镜头时焦移量为正,焦面靠近镜头时焦移量为负,并且在下文的讨论中,只讨论镜头焦移量的数值大小。从图 7 中可以看出,当温度从 20°C 降低到 -40°C 或者从 20°C 升高至 100°C 时,随着温度的变化,所有镜头的焦移量均逐渐增大。其中,镜头 1 随着温度变化焦移量始终最小,当温度升高至 100°C 时,像面漂移量为 0.075 mm ;其次是镜头 2,其焦移量 0.254 mm 是镜头 1 的 3.4 倍;镜头 3

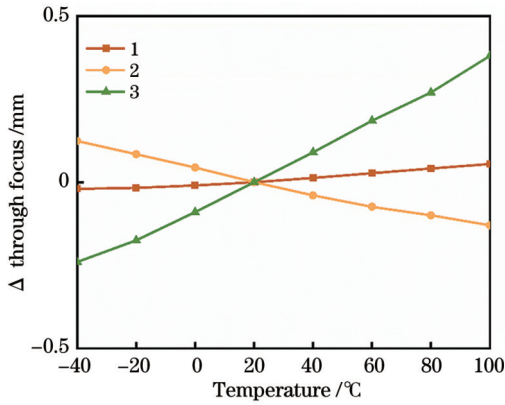


图 7 3 种设计方案的镜头在不同温度下的焦移量

Fig. 7 Through focus changes of three designs at different temperatures

的焦移量高达 0.62 mm, 超过镜头 1 的 6.5 倍, 初步判断不符合无热化光学系统的要求。仔细分析图 7 可以发现, 镜头 1 和镜头 3 的焦面漂移方向随温度升高而远离镜头, 镜头 2 的焦面漂移方向随温度升高而靠近镜头。

考虑 holder 的热胀冷缩效应, 将其作为补偿热差

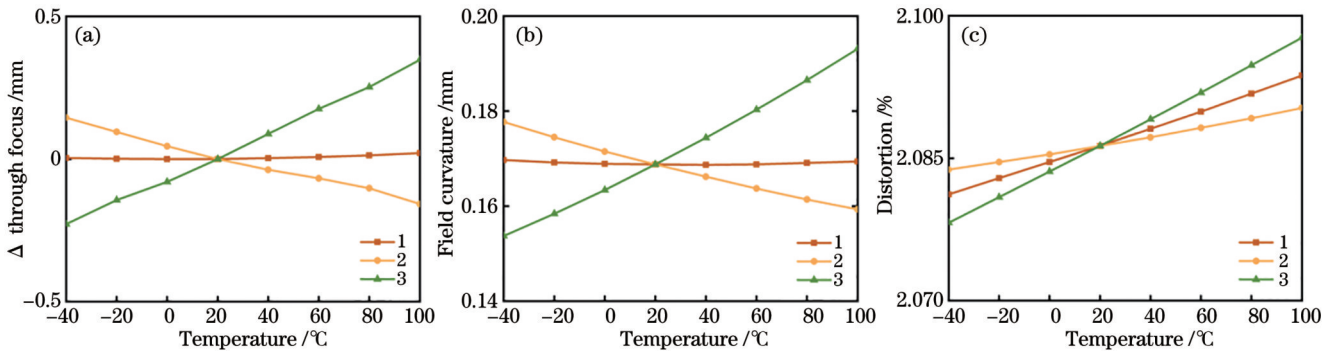


图 8 3 种设计方案搭配 holder 材料的镜头在不同温度下的变化。(a) 焦移; (b) 场曲; (c) 畸变

Fig. 8 Changes of three designs with holder materials at different temperatures. (a) Through focus; (b) field curvature; (c) distortion

表 3 长焦光学系统结构参数

Table 3 Structure parameters of telephoto optical system

Surface	Radius / mm	Thickness / mm	Material	TCE / (10 ⁻⁶ /°C)
0	infinity	infinity	—	—
1	36.6126	10.0000	H-ZPK5	12.4
2	infinity	27.8210	Cu	17.5
3	-25.2046	3.0000	H-ZF52	8.8
4	infinity	1.6117	Al	23.2
5	infinity	1.0000	H-ZK10	6.5
6	infinity	2.4158	Al	23.2
7	23.1118	6.0000	H-ZF52	8.8
8	infinity	20.9733	LCP	46.0
9	infinity	3.0000	H-ZF62	6.4
10	3.0681	9.2395	LCP	46.0
11	infinity	—	—	—

材料, 以使传感器探测面始终位于像面。同样将上述透镜及 3 种结果对应隔圈及 holder 材料得到的长焦镜头设计方案在不同温度下进行仿真。如图 8(a) 所示, 在镜头内部镜片和隔圈材料已经选定的情况下, holder 材料对焦面漂移的改善十分有限, 确认排除镜头 2 及镜头 3 对应的接收光学系统设计方案。图 8(b) 和 8(c) 分别为光学系统的场曲和畸变变化, 均表现为镜头 1 的成像质量更好。在 -40~100 °C 的宽温度范围内, 随着温度的变化, 镜头 1 选定的光学件及结构件材料得到的接收光学系统几乎没有发生明显的焦移, 即使温度高至 100 °C, 其焦移量仅为 0.021 mm, 小于其在常温下的焦深 (0.074 mm), 有利于确保镜头成像品质。镜头焦深 ΔL_0 可根据下式计算得到:

$$\Delta L_0 = 2\lambda \left(\frac{f}{d_{EPD}} \right)^2, \quad (5)$$

式中: λ 为镜头工作波长; d_{EPD} 为入瞳直径。最终得到的长焦接收光学系统参数如表 3 所示。该镜头的总长为 78 mm, 口径为 46 mm, 包含四片光学透镜, 加上结构件后理论质量为 178 g; 并且镜片面型多为球面和平面, 加工难度和成本有所降低。

3 光学系统像质分析

3.1 仿真结果

无热化光学系统的仿真结果如图 9~11 所示 (其中 OTF 表示光学传递函数), 以焦移量曲线变化趋势相反的镜头 2 和镜头 3 作为对照组。从图 9 可以看出, 相较于镜头 2 和镜头 3 在低温或高温时调制传递函数 (MTF) 显著降低的表现, 镜头 1 在 20、-40、100 °C 时的 MTF 曲线均表现良好, 在 30 lp/mm 处各视场的 MTF 都大于 0.5, 说明设计的镜头在 -40~100 °C 宽温度变化范围内可以保持良好的成像质量。

无热化光学系统的离焦情况如图 10 所示。第一列为镜头 1 的离焦曲线, 在 20、-40、100 °C 时焦面偏移情况均较小。镜头 2 和镜头 3 的离焦曲线随温度变化较大, 漂移程度明显, 对成像质量的影响较大。

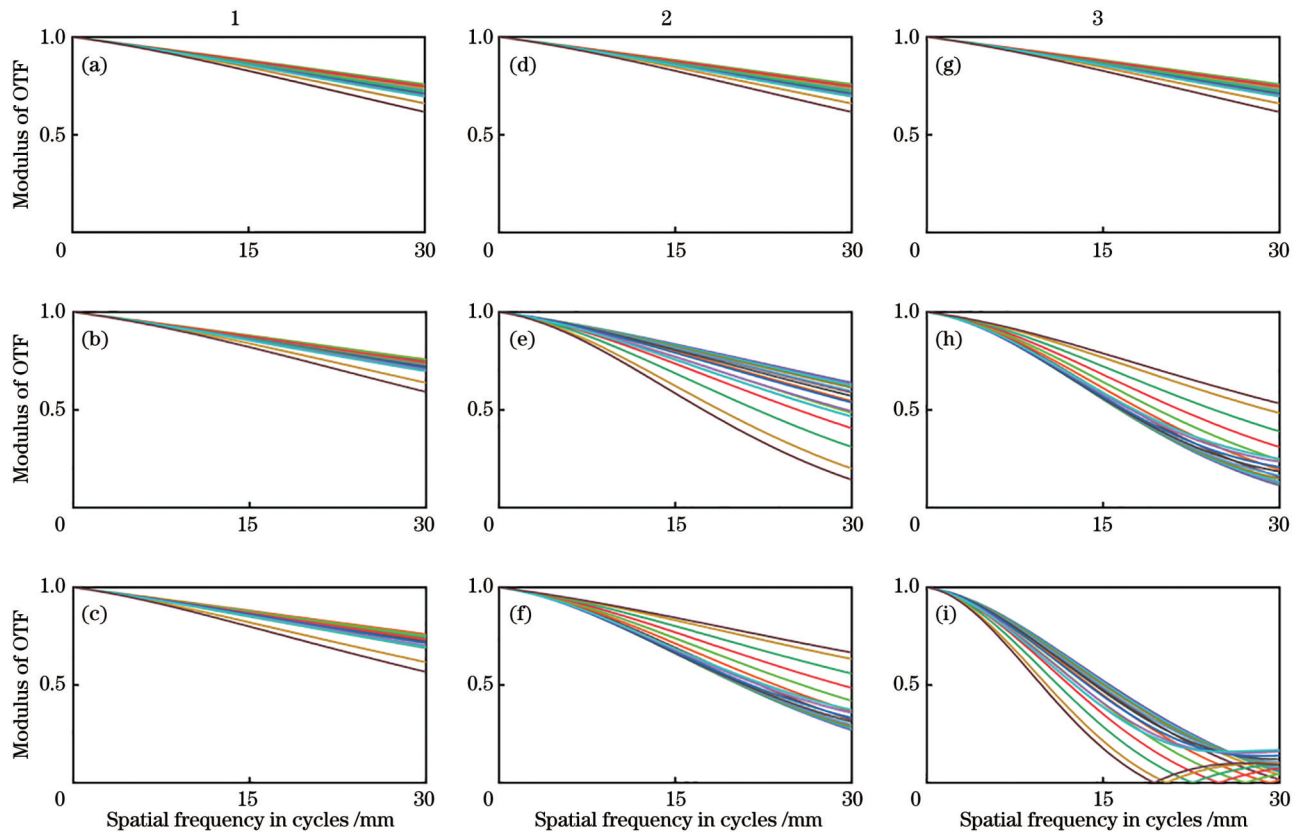


图 9 镜头 1、2、3 在不同温度下的成像 MTF 的对比。(a)、(d)、(g) 20 °C；(b)、(e)、(h) -40 °C；(c)、(f)、(i) 100 °C

Fig. 9 Comparison of imaging MTF of lens 1, 2, and 3 at different temperatures. (a), (d), (g) 20 °C; (b), (e), (h) -40 °C; (c), (f), (i) 100 °C

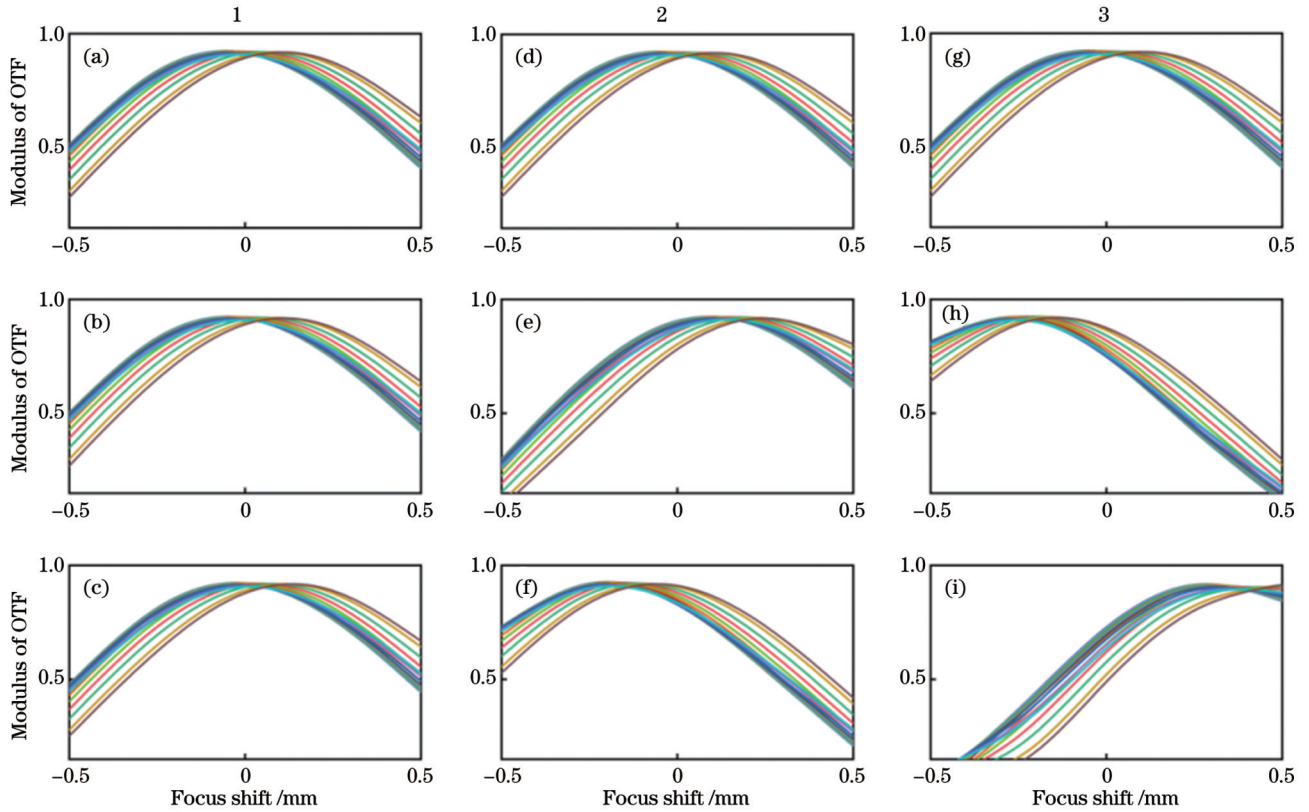


图 10 镜头 1、2、3 在不同温度下的离焦 MTF 的对比。(a)、(d)、(g) 20 °C；(b)、(e)、(h) -40 °C；(c)、(f)、(i) 100 °C

Fig. 10 Comparison of through focus MTF of lens 1, 2, and 3 at different temperatures. (a), (d), (g) 20 °C; (b), (e), (h) -40 °C; (c), (f), (i) 100 °C

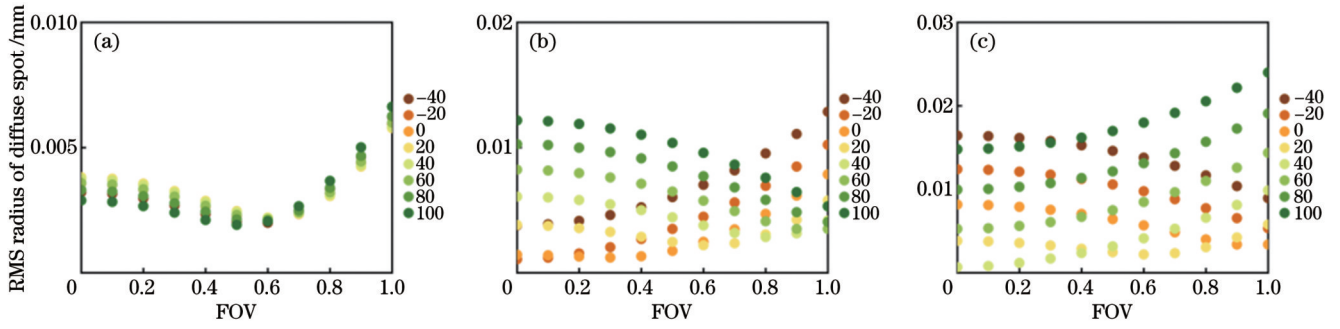


图 11 不同温度下镜头不同视场的光斑半径 RMS 值对比。(a)镜头 1;(b)镜头 2;(c)镜头 3

Fig. 11 Comparison of RMS radius of diffuse spot of lens with different fields at different temperatures. (a) Lens 1; (b) lens 2; (c) lens 3

无热化光学系统的光斑 RMS 值如图 11 所示,图 11(a)为镜头 1 的示意图,全视场内光斑半径在 $7\ \mu\text{m}$ 以下,说明镜头焦移受温度影响小。镜头 2 和镜头 3 的光斑尺寸明显偏大,说明镜头焦移极易受温度影响,不适用于车载激光雷达的实际工作环境。以上结果证明,经过上述无热化处理矫正热差后,镜头的成像品质和温度适应性可以得到保障。

3.2 实测结果

为了说明上述设计的可行性,对实际镜头在不同温度下的焦移情况进行测试。测试一使用陶瓷加热环对镜头进行加热,使用的直流电源参数为 $31\ \text{V}$ 限流 $1\ \text{A}$;使用华盛昌 DT-982H 红外热成像仪测量镜头实时温度,热灵敏度 $<0.06\ ^\circ\text{C}$;使用全欧传递函数测量

仪 HR 的 Through Focus 功能测量镜头焦移量,测量精度为 $\pm 5\ \mu\text{m}$;镜头实际组装后质量为 $180\ \text{g}$ 。具体操作是将一陶瓷加热环贴在镜头侧壁,通电加热后,记录镜头温度和焦移情况。

测试一的测试结果如图 12(a) 所示,随着温度升高,镜头焦移先大幅增加随后降低,变化趋势与仿真结果不一致,焦移量最大高达 $0.173\ \text{mm}$,超出镜头的焦移设计值 $0.021\ \text{mm}$ 和焦深 $0.074\ \text{mm}$,推测是陶瓷加热环的设定电流过大、镜头升温过快导致的。如图 12(b) 所示,镜头的升温曲线呈反正切函数趋势,在温度达到 $80\ ^\circ\text{C}$ 之前,随着加热时间持续,镜头温度变化迅速;当温度超过 $80\ ^\circ\text{C}$ 时,镜头温度变化减缓。

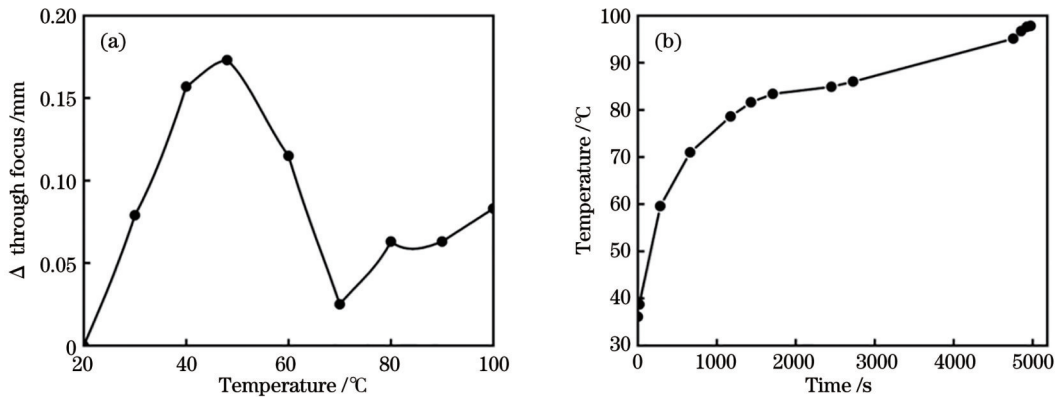


图 12 测试一的镜头数据示意图。(a)镜头的焦移量;(b)镜头的温度-时间曲线

Fig. 12 Schematic diagram of lens data in test 1. (a) Through focus changes of lens; (b) temperature-time curve of lens

为避免单个加热环加热过快、加热不均匀造成的不利影响,测试二选择控制陶瓷加热环的设定电流,使镜头温度达到稳定后再测量焦移;且使用两个陶瓷加热环,对称贴放于镜头两侧。测试时,加热环电流从 $0.35\ \text{A}$ 开始,之后逐渐加大电流,使得镜头每次升温 $10\ ^\circ\text{C}$ 左右并能保持稳定;使用 HR 的平行光管和十字靶面来使镜头成像。

测试二的测试结果如图 13(a) 所示,在 $20\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 的范围内,镜头焦移量相对较小 ($\pm 0.025\ \text{mm}$); $90\ ^\circ\text{C}$ 时,镜头焦移量为 $0.064\ \text{mm}$,超出设计值,但是仍在焦深 $0.074\ \text{mm}$ 的范围内。相比于测试一,测试二与设计

值的变化趋势较为接近,可能是因为镜头的实时温度得到保证。如图 13(b)、13(c) 所示,镜筒温度能保持在 $70\ ^\circ\text{C}$ 且相对的两侧温度差值仅在 $0.8\ ^\circ\text{C}$ 左右。然而当镜头继续升温至 $100\ ^\circ\text{C}$ 时,镜片与镜筒存在明显的温度差,大于 $10\ ^\circ\text{C}$,如图 13(d)、13(e) 所示,导致焦移量远远大于设计值。图 13(f) 中心的明亮十字为十字靶面,图 13(g)~(k) 展示了镜头对靶面的成像结果,在 $20\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 范围内十字线条较清晰;在 $100\ ^\circ\text{C}$ 时线条较模糊。镜头成像结果的变化趋势基本可与不同温度下镜头焦移对应。由于设备受限,未能验证镜头在 $20\ ^\circ\text{C}$ 以下的实际表现,后续研究可针对镜头在高低温测试

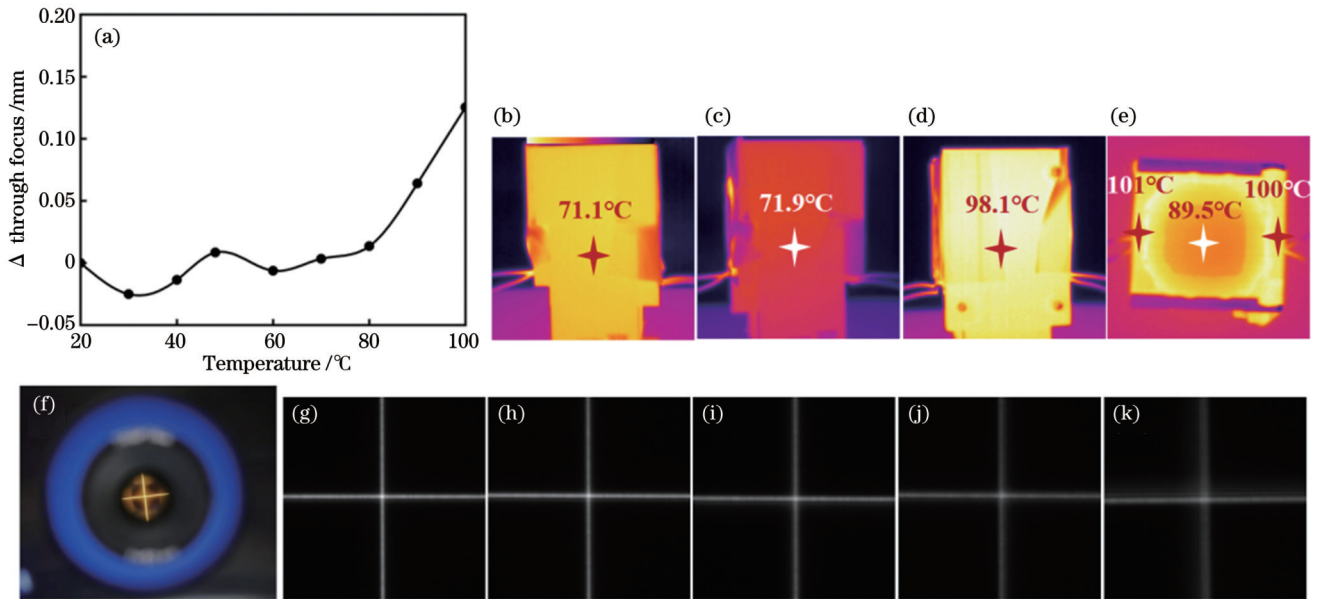


图 13 测试二的镜头数据示意图。(a)镜头的焦移量;(b)、(c)镜头 70 $^{\circ}\text{C}$ 时的两侧热成像;(d)镜头 100 $^{\circ}\text{C}$ 时的一侧热成像;(e)镜头 100 $^{\circ}\text{C}$ 时的上方热成像;(f)十字靶面实物;(g)~(k)镜头分别在 20、40、60、80、100 $^{\circ}\text{C}$ 时对十字靶面成像
Fig. 13 Schematic diagram of lens data in test 2. (a) Through focus changes of lens; (b), (c) thermal imaging on two sides of lens at 70 $^{\circ}\text{C}$; (d) thermal imaging on one side of lens at 100 $^{\circ}\text{C}$; (e) thermal imaging of upper side of lens at 100 $^{\circ}\text{C}$; (f) cross target; (g)~(k) imaging of cross at 20, 40, 60, 80, and 100 $^{\circ}\text{C}$, respectively

箱中的使用效果性能测试。可以推测,如果测试条件能满足镜头光学件与结构件的温度变化一致,实际的镜头焦移情况极大可能与设计值变化一致。

长焦镜头结合激光雷达扫描及探测系统成像效果如图 14 所示,图 14(a)为目标车辆,图 14(b)为激光雷达系统在常温下对目标车辆进行拍摄的结果,车辆成像清晰、外轮廓等特征区域明显,但在不同工作温度下

成像效果略有差异,如图 14(c)和 14(d)所示。常温 20、60、100 $^{\circ}\text{C}$ 下,车门部分点云密度分别为 0.22、0.19、0.09 个每平方厘米。点云成像效果能充分显示目标物形状轮廓,点云色度能清晰反馈不同漫反射率的目标区域,说明将无热化的长焦镜头与线阵探测器结合,可以通过局部图像级成像显著提高激光雷达系统的探测分辨率。

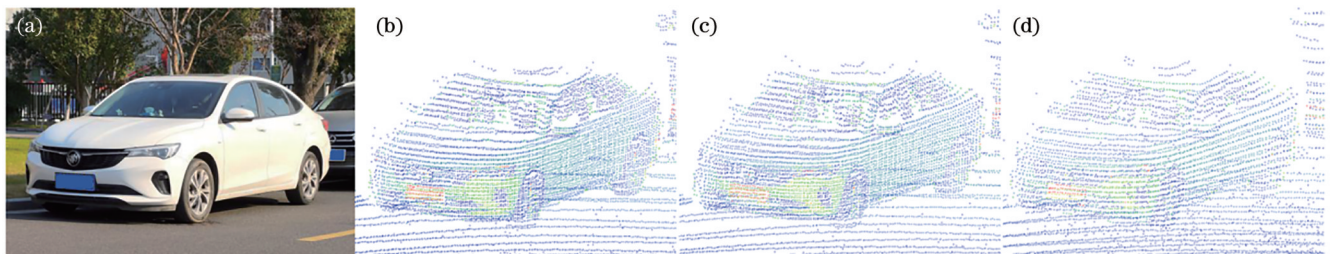


图 14 长焦镜头结合激光雷达的成像效果。(a)目标汽车;(b)20 $^{\circ}\text{C}$ 成像;(c)60 $^{\circ}\text{C}$ 成像;(d)100 $^{\circ}\text{C}$ 成像
Fig. 14 Imaging effect of telephoto lens combined with LiDAR. (a) Target car; (b) imaging at 20 $^{\circ}\text{C}$; (c) imaging at 60 $^{\circ}\text{C}$; (d) imaging at 100 $^{\circ}\text{C}$

4 结 论

本文利用长焦镜头焦距长、视场小的特点来细分扫描区域,并将其与线阵探测器结合达到图像级成像效果。基于远摄结构光学系统总长小于焦距的特点设计了远摄比为 0.38 的接收光学系统,满足车载激光雷达高分辨、轻小型的要求。针对激光雷达工作环境温差大、长焦镜头存在像面漂移的问题,对长焦镜头

进行光学被动结合机械被动的无热化设计,确认合理组合的多平面球面玻璃透镜及结构件。最终,设计了结构简单、在 $-40\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温度范围内焦移为 0.021 mm (小于焦深 0.074 mm) 的四片式长焦镜头光学系统,在 30 lp/mm 处各视场的 MTF 都大于 0.5,全视场内光斑半径在 7 μm 以下,角分辨率为 $0.045^{\circ}(\text{H})\times 0.045^{\circ}(\text{V})$,对车辆的成像清晰,车辆外轮廓等特征区域明显,实现了无热化的效果,具有良好的环境适应性。

参 考 文 献

- [1] 赵一鸣, 李艳华, 商雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-22.
Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, et al. Application and development direction of lidar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 4-22.
- [2] 阳琴, 陈孝林, 曾诚, 等. 硅基片上激光雷达技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(16): 1600002.
Yang Q, Chen X L, Zeng C, et al. Overview of LiDAR technology on silicon substrate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(16): 1600002.
- [3] Marinov E, Martins R J, Youssef M A B, et al. Overcoming the limitations of 3D sensors with wide field of view metasurface-enhanced scanning lidar[J]. Advanced Photonics, 2023, 5(4): 046005.
- [4] 王家恩. 基于视觉的驾驶员横向辅助系统关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 2-4.
Wang J E. Research on key technology of lateral driver assistant system based on vision[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013: 2-4.
- [5] 朱国宜. 用于 MEMS 激光雷达的大视场接收光学系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 1-8.
Zhu G Y. Research on large field of view receiving optical system for MEMS lidar[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 1-8.
- [6] 刘丽伟, 赵子君, 朱绪康, 等. 面向温度变化的相机光学系统参数模型研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 180-185.
Liu L W, Zhao Z J, Zhu X K, et al. Study on the parameter of optical system based on temperature variation[J]. Computer Simulation, 2021, 38(3): 180-185.
- [7] 陈鹏. 机械无热化红外镜头结构设计[J]. 中国高新技术, 2023(16): 96-98.
Chen P. Structural design of mechanical non thermal infrared lens [J]. China High and New Technology, 2023(16): 96-98.
- [8] 陈塑淇, 吕博, 刘伟奇, 等. 用于电晕检测的日盲紫外成像系统设计[J]. 光子学报, 2022, 51(9): 0922001.
Chen S H, Lü B, Liu W Q, et al. Design of a solar-blind ultraviolet imaging system for corona detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9): 0922001.
- [9] 聂怀乐, 毛珊, 赵建林. 制冷型衍射混合双波段红外光学系统无热化设计[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822025.
Nie H L, Mao S, Zhao J L. Athermalization design of cooled refractive-diffractive hybrid dual-band infrared optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822025.
- [10] 林志强, 吴羽婷, 王敏. 一款大靶面消热差鱼眼镜头设计[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 736-741.
Lin Z Q, Wu Y T, Wang M. Design of fish eye lens with large target surface and heat dissipation difference[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 736-741.
- [11] 冯丽军, 李训牛, 陈洁, 等. 大相对孔径大面阵长波红外光学无热化镜头的设计[J]. 红外技术, 2022, 44(10): 1066-1072.
Feng L J, Li X N, Chen J, et al. Design of long-wavelength infrared athermalization lens with large relative aperture for large-array detectors[J]. Infrared Technology, 2022, 44(10): 1066-1072.
- [12] 闫阿奇, 崔雯, 董森. 大变倍比光学被动半无热化变焦系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0422001.
Yan A Q, Cui W, Dong S. Optical design of optical passive half-athermalization zoom lens with high zoom ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0422001.
- [13] 周晓斌, 张衡, 文江华, 等. 长波红外光学系统混合被动无热化设计[J]. 红外技术, 2021, 43(9): 836-839.
Zhou X B, Zhang H, Wen J H, et al. LWIR optical system design by passive athermalization[J]. Infrared Technology, 2021, 43(9): 836-839.
- [14] 高铎瑞, 付强, 赵昭, 等. 摄远型红外 8~12 μm 波段消热差物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3837-3842.
Gao D R, Fu Q, Zhao Z, et al. Athermalized telephoto objective design for 8-12 μm infrared wavelength[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3837-3842.
- [15] 张星, 张建伟, 宁永强, 等. 高功率人眼安全波段垂直腔面发射激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(19): 1901008.
Zhang X, Zhang J W, Ning Y Q, et al. Vertical-cavity-surface-emitting laser with high power in eye-safe band[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(19): 1901008.
- [16] 刘柯, 朱浩, 宋金城, 等. 一种调焦式激光测距接收光学系统: CN108008372B[P]. 2021-10-22.
Liu K, Zhu H, Song J C, et al. A focusing laser ranging receiving optical system: CN108008372B[P]. 2021-10-22.
- [17] 张丽芝, 陆秋萍, 段帆琳, 等. 一种低温漂激光雷达的长焦接收光学系统: CN116299982A[P]. 2023-06-23.
Zhang L Z, Lu Q P, Duan F L, et al. A long focus receiving optical system for low temperature drift lidar: CN116299982A [P]. 2023-06-23.

Optical System Design and Athermalization of Telephoto Lens

Zhang Lizhi^{1,2*}, Lu Qiuping², Duan Fanlin², Dai Xing², Qiao Dayong^{1,3}¹MOE Key Laboratory of Micro & Nano Systems for Aerospace, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;²Ningbo Yongxin Optics Co., Ltd., Ningbo 315048, Zhejiang, China;³Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315103, Zhejiang, China

Abstract

Objective The actual working environment of vehicle-mounted LiDAR is complex, including seasonal long-time limit temperature and rapid changes in indoor and outdoor high and low temperatures. These temperature variations possibly change the internal optics and structure of the lens, which results in image plane drift and reduces imaging quality. For telephoto lenses, the image plane drift can be more obvious with the ambient temperature changes. The current passive

athermalization design method has the problems of complex structure and large volume caused by multi-layer lens barrels, or the introduction of diffractive elements and aspheric lenses to increase the production cost, and the narrow temperature range of thermal-free, which is difficult to adapt to the practical applications in the complex environment of vehicle-mounted LiDAR. Therefore, it is necessary to reduce the image plane temperature drift and improve the environmental adaptability of telephoto lenses with an advanced athermal design method.

Methods The telephoto lens which can accurately capture distant targets and magnify the details is integrated with a line array detector to improve the resolution. Meanwhile, based on the fact that the total length of the optical system of the telephoto structure is smaller than the focal length, the volume of the telephoto receiving optical system is compressed to a certain extent to realize the requirements of lightweight miniaturization and high resolution of the vehicle-mounted LiDAR. Aiming at the problem that the telephoto lens is susceptible to temperature, we improve the two-group compensation design method of the passive optical and mechanical athermalization to maximally offset the optical focal length change of the optical parts from the thermal difference brought by thermal expansion and contraction of the structural parts, and to reduce the image plane drift, thus realizing the athermalization of the telephoto lens. Finally, the image plane drift of the as-designed lens is less than the depth of focus over a wide temperature variation range from -40 to 100 °C. This is conducive to ensuring the imaging quality of the lens, and the designed structure has a simple preparation process and is easy to engineer and produce.

Results and Discussions Different combinations of optical materials and optical focal length distributions are determined, structural components of different thermal expansion coefficients (TCEs) are matched, and the thermal difference of the optical system compensates for each other, with the system athermalization design achieved. Without the thermal expansion and contraction of the barrel holder taken into account, the focal shift of the lens with temperature change is always minimized and the image plane drift is 0.075 mm when the temperature increases to 100 °C (Fig. 7). The thermal expansion and contraction of the barrel holder is considered as a material to compensate for thermal aberration to make the sensor detecting surface always in the image plane. In the wide temperature range from -40 to 100 °C, with the temperature change, the receiving optical system obtained from the selected optics and structural component materials has almost no significant focal shift, even when the temperature is as high as 100 °C, and meanwhile the amount of focal shift is only 0.021 mm, smaller than its depth of focus at room temperature (0.074 mm), and the field curvature and distortion of this optical system have small changes (Fig. 8). The MTF at 30 lp/mm is all larger than 0.5 for each field of view (FOV), and the focal plane shifts are all small, which indicates that the designed lenses can maintain sound image quality over a wide range of temperatures from -40 to 100 °C (Figs. 9 and 10). The diffuse spot radius in the full FOV is smaller than 7 μm , which reveals that the focal shift of the lens is little affected by temperature (Fig. 11). The results of photographing vehicles traveling on the road show clear imaging of the vehicles and obvious feature areas such as the outer contours of the vehicles (Fig. 14). The above results prove that the imaging quality and temperature adaptability of the lens can be guaranteed by the above athermalization design to compensate the system thermal difference.

Conclusions We employ the telephoto lens with a long focal length and small FOV to subdivide the scanning area and integrate a line array detector to achieve an image-level imaging effect. Based on the characteristic that the total length of the optical system of telephoto structure is smaller than the focal length, a receiving optical system with a telephoto ratio of 0.38 is designed, which has a smaller lens length and lower cost and meets the requirements of vehicle-mounted LiDAR in terms of high resolution, light weight, and small size. Given the large temperature difference in the working environment of vehicle-mounted LiDAR and the image plane drift of the telephoto lens, a passive optical and mechanical athermalization is implemented to confirm the reasonable combination of multi-plane spherical glass lens and structural components. Finally, a four-piece telephoto lens optical system with a simple structure and a focal shift of 0.021 mm less than the depth of focus of 0.074 mm over a wide temperature range from -40 to 100 °C is designed. The MTF of each FOV at 30 lp/mm is larger than 0.5 and the diffuse spot radius in the full FOV is smaller than 7 μm . The vehicle imaging is clear, and the outer contour of the vehicle and other characteristics of the area are obvious, which achieves athermalization and shows favorable environmental adaptability.

Key words vehicle-mounted LiDAR; telephoto optical system; optical design; athermalization