

应用于划痕检测的白光共聚焦色散物镜设计

张进 向阳 黄雷 窦艳红

Design of dispersive objective of chromatic confocal for scratch detection

ZHANG Jin, XIANG Yang, HUANG Lei, DOU Yanhong

引用本文:

张进, 向阳, 黄雷, 等. 应用于划痕检测的白光共聚焦色散物镜设计[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 992–997. DOI: 10.5768/JAO202344.0501007

ZHANG Jin, XIANG Yang, HUANG Lei, et al. Design of dispersive objective of chromatic confocal for scratch detection[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 992–997. DOI: 10.5768/JAO202344.0501007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于机器视觉的手机屏幕表面划痕检测研究

Surface scratch detection of mobile phone screen based on machine vision

应用光学. 2020, 41(5): 984–989 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0502008>

一种紧凑型光纤显微物镜的设计

Design of compact fiber microscope objective

应用光学. 2021, 42(5): 802–809 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501007>

大孔径长焦距摄远物镜光学系统设计

Optical system design of large aperture and long focal length telephoto objective lens

应用光学. 2020, 41(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201007>

30 mm~300 mm轻型变焦物镜光学系统设计

Optical system design of 30 mm~300 mm light weight zoom objective

应用光学. 2019, 40(1): 51–57 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101009>

基于LD激发荧光粉白光光源的窄光束照明光学系统设计

Design of narrow beam illumination optical system based on LD excitation phosphor white light source

应用光学. 2020, 41(3): 469–476 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301006>

红外折衍混合摄远光学系统无热化设计

Athermalization design of infrared refractive–diffractive telephoto objective

应用光学. 2017, 38(1): 12–18 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0101003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-0992-06

应用于划痕检测的白光共聚焦色散物镜设计

张进¹, 向阳¹, 黄雷², 窦艳红²

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林省计量科学研究院 吉林省计量测试仪器与技术重点实验室, 吉林 长春 130103)

摘要: 白光共聚焦位移传感器在机车轮轴划痕深度测量中有很好的适用性, 色散物镜是决定传感器检测范围与分辨率的关键器件。根据检测需求, 结合白光共聚焦原理和线性色散条件选择合适的初始结构, 利用 Zemax 光学设计软件对初始结构进行优化与分析, 设计了一款高线性度短共轭距色散镜头, 测量范围为 1 mm, 工作光谱范围为 400 nm~700 nm, 镜头球差小于 1.7 μm , 系统轴向位移分辨率为 0.615 μm , 色散线性判定系数 R^2 为 0.997 5, 共轭距为 104 mm, 使镜头小型化的同时具有高分辨率和高线性度的优点。

关键词: 划痕检测; 色散物镜; 光学设计; 白光共聚焦

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0501007

Design of dispersive objective of chromatic confocal for scratch detection

ZHANG Jin¹, XIANG Yang¹, HUANG Lei², DOU Yanhong²

(1. School of Electro-optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Jilin Key Laboratory of Measuring Instrument and Technology, Jilin Institute of Metrology, Changchun 130103, China)

Abstract: The chromatic confocal displacement sensor has good applicability in the measurement of the scratch depth of the locomotive wheel axle, and the dispersive objective is the key device that determines the detection range and resolution of the sensor. According to the detection requirements, combined with the chromatic confocal principle and linear dispersion conditions, an appropriate initial structure was selected. The Zemax optical design software optimized and analyzed the initial structure, and designed a high-linearity and short-conjugate dispersion lens. The measurement range is 1 mm, the operating spectral range is 400 nm~700 nm, and the spherical aberration of the lens is less than 1.7 μm . The axial displacement resolution of the system is 0.615 μm , the dispersion linearity determination coefficient R^2 is 0.997 5, and the conjugate distance is 104 mm, which makes the lens miniaturized and has the advantages of high resolution and high linearity.

Key words: scratch detection; dispersion objective; optical design; chromatic confocal

引言

划痕检测是机车轮轴检验中一项重要的检测项目, 对于环境的适应性、抗干扰能力和检测精度与速度的要求都十分精密^[1]。近年来, 应用越发广泛的白光共聚焦位移传感器, 相对于传统的利用光切法、激光三角法检测划痕深度的传感器有着高精度、高适应性、非接触、可动态检测等诸多优

点, 对于被测表面的粗糙度、杂质等影响因素有很大的容限, 在有一定倾斜角度的情况下也能够进行精确测量^[2], 同时白光共聚焦位移传感器的滤光系统能够最大限度地消除外界杂光的影响, 非常适用于非实验室环境下机车轮轴划痕检测的要求。

色散物镜是白光共聚焦位移传感器最重要的光学器件, 是衡量位移传感器质量的关键元件, 近

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2023-01-04

基金项目: 中央引导地方科技发展资金吉林省基础研究专项 (202002059JC)

作者简介: 张进 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计和光学测量研究。E-mail: zhangjin_mbx@163.com

通信作者: 向阳 (1968—), 男, 硕士, 教授, 主要从事光学设计、光学测量和生物医学工程研究。E-mail: xyciom@163.com

年来国内外学者对色散物镜的设计与优化都进行了研究。RUPRECHT A K等^[2]设计了两种微型白光共聚焦传感器色散镜头,在200 nm光谱范围内产生了50 μm 轴向色散,采用的衍射元件产生了较大球差和较大的光能损失。SHAFIR E等^[3]设计了一种多路光纤传感共聚焦系统,利用非球面色散物镜在532 nm~1 531 nm波长范围内产生可调整的大范围低线性色散。国内刘乾等^[4]设计了工作波长范围为500 nm~700 nm、量程为1 mm的色散物镜,物镜的共轭距长,轴向色散与波长的判定系数 R^2 为0.88。武芑樾等^[5]设计的色散镜头工作波段为486.13 nm~656.27 nm,测量范围较小,约为91 μm 。田雨等^[6]在400 nm~700 nm波长范围内,设计了测量范围为150.34 μm 的色散镜头,轴向色散与波长之间的线性判定系数 R^2 达0.997,但存在测量范围较小、应用有局限性的问题^[6]。在系统结构选择中,国内学者选用的分光镜结构能够较容易地降低系统球差,但存在共轭距长、元件多、结构复杂等缺点,不便应用到实际测量环境中。在光学元件选择中,衍射元件加入色散物镜能够较好地控制色散线性度,但是衍射元件在宽波段中的衍射效率很难提高,并存在加工困难、引入过大球差等诸多问题^[7],因此很难应用到实际检测中。

在机车轮轴划痕检测中,传感器需要在轮轴上移动,检测是否有划痕大于某一阈值,以便对轮轴进行修复或报废处理。本文根据检测0~1 mm深度划痕的需求,设计了一种短共轭距、高线性白光共聚焦传感器色散物镜,该物镜色散线性度高,分辨率优于0.615 μm ,色散镜头使用的光学元件全部由球面玻璃组成,结构简单,具有良好的可加工性。

1 白光共聚焦位移传感器原理

传统的分光镜式白光共聚焦传感器由光源、分光棱镜、色散镜头、滤波小孔和光谱仪等组成^[2],光源发出的光产生轴向色散,把光信号转换成位置信号,最终通过光谱仪分析完成波长到距离的转化,其原理如图1(a)所示。从图1(a)可以看出,白光光源产生的 $\lambda_F \sim \lambda_C$ 波段的复色光经过色散镜头,由于镜头对不同波长的光会聚能力不同,波长越短,在光轴上的会聚点与镜头之间距离越近,波长越长,距离越远,此时 λ_F 与 λ_C 的会聚点轴向距离称为该镜头产生的轴向色散,即白光共聚焦传感器的测量范围。当检测轴向位置处于检测面时,该位置对应的波长 λ 经过检测面反射返回色散

镜头中,再通过分光镜进入光谱分析仪,最终通过检测到的波长信息完成对位置的标定。实际位移测量中,首先要对轴向位置与波长进行线性拟合,得到关系式 $y = a + b\lambda$,其中 y 表示轴向位置, λ 表示光谱仪接收到的波长, a 、 b 为常数。当产生位移时,通过光谱仪波长的变化量 $\Delta\lambda$ 得到位移变化 $\Delta y = a + b\Delta\lambda$ 。由于反射到光谱仪中的光还包括部分杂光,这些杂光一部分是检测面反射的光源发出的其余波段的部分复色光,一部分是环境杂光,此时需要在光谱仪前设置一滤波小孔^[8],与检测点近似共轭,通过调整小孔大小阻隔掉大部分非检测面信息光,起到滤波作用。

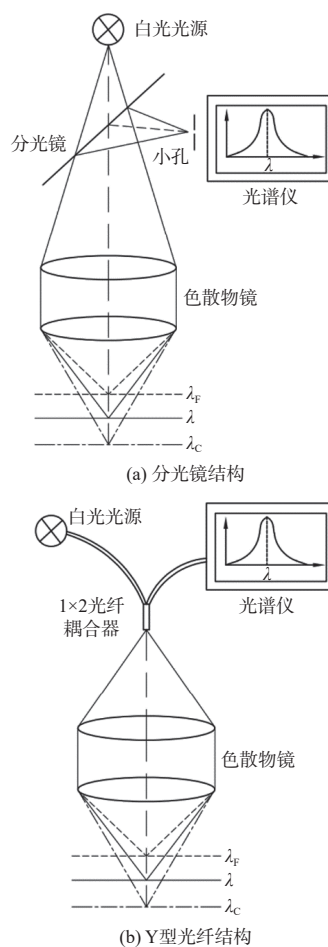


图1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of system

为了使传感器探头更加便携与小型化,可将分光镜和滤波小孔替换为Y型光纤,系统结构如图1(b)所示。从图1(b)可以看出,光源通过Y型光纤发出复色光,Y型光纤的分支处起到分光作用,将反射光传输进入光谱仪,选择细纤芯直径的光纤口代替小孔起到滤波作用。这种结构的位移传感器光学系统共轭距短,探头内部结构简单、易

于加工、方便携带,非常适用于机车轮轴划痕检测的操作环境,使测量更加简单方便。

2 光学设计

在色散镜头光学设计中,需要注重色散范围控制、色散线性度控制和球差控制3个方面^[9]。色散范围直接影响位移传感器的测量范围,与普通镜头在设计过程中都要进行消色差控制不同,色散镜头需要产生较大色差,以便进行测量。色散线性度的控制能够在测量范围内,将不同波长的光均匀地会聚在轴向方向上,这样在光谱仪分析过程中可使各个波段灵敏度相同,提升分辨率和精度^[10]。球差的存在会使传感器系统中单色光球差对共焦轴向响应宽度分辨率下降,从而影响传感器的整体分辨率和精度^[11]。

2.1 线性色散条件

当色散物镜产生的轴向色散在 $\lambda_F \sim \lambda_C$ 波段范围内,且满足会聚点轴向位置与波长呈线性关系时,其满足条件为^[12]

$$\sum_{i=1}^N \frac{R_{li}}{v_{di}} \varphi_{di} = 0 \quad (1)$$

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (2)$$

式中 R_{li} 为定义的一个线性色散系数,可表示为

$$R_{li} = \frac{n_{li} - n_{Ci}}{n_{Fi} - n_{Ci}} - \frac{\lambda - \lambda_C}{\lambda_F - \lambda_C} \quad (3)$$

色散范围满足:

$$\delta s'_{CF} = -f'^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_{di}}{v_{di}} \quad (4)$$

式中: φ_{di} 表示第*i*个透镜在*d*光下的光焦度; v_{di} 表示第*i*个透镜玻璃材料的阿贝数; n_{li} 表示第*i*片透镜在 λ 光下的折射率; f 表示镜头的整体焦距。

由式(1)可知,单一玻璃材料的色散镜头不能使色散呈线性关系,需要通过多种玻璃材料组合来实现。考虑到成本控制和计算简便,选用H-QK3L、H-ZF5、H-BAK7三种成都光明系材料作为色散镜头的初始玻璃材料,再通过后续光焦度分配来满足线性色散条件。

由式(4)可知,在材料确定情况下,色散范围与焦距正相关,所以通过设定合理的色散物镜焦距来控制色散范围。在口径确定情况下,焦距的设定既要满足数值孔径与光线角分配的合理性,又要考虑到机车轮轴体积大、质量大,在检测过程中

不可移动的情况,因此尽量缩短共轭距,使传感器探头小型化,以增加其便携性。

2.2 初始结构的选择

在色散镜头设计中,根据各镜片不同的功能,通常将前组透镜称为色散组,后组称为聚光组,色散组的作用是使光源发出的光色散增大,再通过聚光组将色散光会聚到轴向位置上,同时消除镜头的球差^[13]。对于前后两组透镜的选择,还需要考虑到适当地增大像方数值孔径和物方数值孔径,像方数值孔径与光纤孔径角相匹配,这样可以使色散镜头将光纤出射光全部接收,从而提高光源效率。增大物方数值孔径能够使物镜增大出射光和接收反射光的光线角度,可以适当缩短光程和工作距离^[14],减少环境杂光的影响,允许被测表面倾斜角度更大。常用的白光照明光纤数值孔径为0.22,为提高光能利用率,留出余量,将色散镜头的像方数值孔径设置为0.25;将物方数值孔径也设置为0.25,能获得30°左右的孔径角,满足实际测量中使用要求。

在色散组的选择中,为了既产生纵向色差又能纠正球差,双胶合透镜是较好的选择。双胶合透镜第1片透镜使用低折射率、低色散材料H-QK3L,第2片透镜使用高折射率、高色散材料H-ZF5^[13]。聚光组承担色散物镜大部分球差,选用两片齐明透镜组作为初始结构,将两片H-BAK7透镜设置为同心,接到色散组后组成镜头的初始结构。在优化过程中,物方数值孔径要求色散组承担较大的数值孔径,导致双胶合透镜曲率增大,这样会使球差很难控制。为了降低双胶合透镜的曲率,在光源前增加一片H-BAK7玻璃透镜作为场镜,其作用是降低入射至双胶合透镜的边缘光线的光线角,分担双胶合透镜承担的数值孔径,从而降低光学系统的球差。

在光焦度分配中,遵循线性色散条件,对各个镜片的光焦度进行控制,最终得到的初始结构如图2所示。

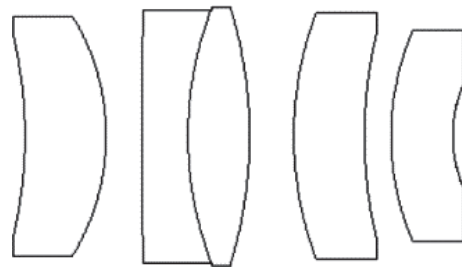


图2 物镜初始结构

Fig. 2 Initial structure of objective lens

2.3 光学系统优化

本文使用光学设计软件 Zemax 对初始结构进行优化,其中光学参数设置如表 1 所示。光学系统总长设置为 120 mm 以下,缩短了光源与测量面之间的共轭距,能够满足传感器探头小型化的要求。将工作距离设置为小于 40 mm,光源到第 1 片镜片的距离设置为 40 mm 左右,将其与镜片通光口径比例固定,能够较好限制像方与物方的孔径角。

表 1 光学系统参数设置

Table 1 Parameter settings of optical system

参数	指标
光学总长/mm	<120
焦距/mm	30~40
工作距离/mm	<40
像方NA	>0.25
物方NA	>0.25
口径/mm	<30
波长/nm	400~700
色散范围/mm	1

在 Zemax 优化过程中,使用多重结构将系统波长设置为 400 nm、500 nm、600 nm、700 nm 等间隔排列,设置评价函数中光斑半径作为默认评价标准。在评价函数栏添加操作数 LONA、SPHA 控制系统球差,使用 DIFF、EQUA 等数学操作数控制轴向色散范围与波长和色散之间的线性关系。为了得到极小的球差,最后使用 REAY 追迹光线在像面上的成像高度,将其限制为 0,使系统弥散斑最小。关键操作数设置如表 2 所示。

表 2 关键操作数设置

Table 2 Key operand settings

操作数序号	类型	参数设置		目标	权重
10	LONA	Surf 0	Zone 1	0	1
11	SPHA	Surf 0	Wave 1	0	1
21	DIFF	Op#19	Op#16	0.34	1
25	EQUA	Op#21	Op#22	0	1
33	REAY	Wave 1	Py 1	0	1.00E+004

由于在初始结构色散线性度条件限制计算中,使用了近似计算,忽略了光焦度公式中透镜间距对光焦度的影响,因此,为了获得更高的色散线性度,需要对透镜材料进一步优化。参考色散组对材料的选择,将成都光明系列玻璃在玻璃图上依照折射率和阿贝数的不同分为 G_I 、 G_{II} 、 G_{III} 、 G_{IV}

4 个区域^[13],如图 3 所示。分别将场镜和聚光组 3 片透镜的材料设置为优化变量,通过优化过程中各片材料折射率与阿贝数的变化趋势,确定材料选择的最优区域,最终确定这 3 片透镜玻璃材料的最优解均在 G_I 区域。

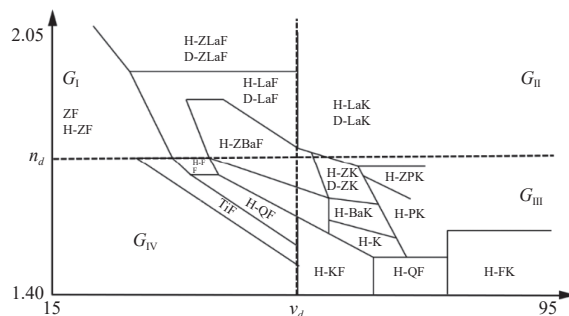


图 3 成都光明光学玻璃 n_d / v_d 图

Fig. 3 Diagram of CDGM optical glass n_d / v_d

在 Zemax 中将 G_I 区域所有玻璃建立一个单独的玻璃库,使用锤形优化方式进行全局优化,替换玻璃材料,以找到最优的玻璃解。由于各个玻璃厂商使用的玻璃材料,即使在牌号相同情况下,折射率和阿贝数也会有细微的区别,因此在后续优化过程中,在自建玻璃库中加入肖特玻璃库中 G_I 区域材料,继续进行锤形优化,以达到严格控制色散线性度的目的。最终得到的镜片参数如表 3 所示。

表 3 色散物镜镜片参数

Table 3 Dispersive objective lens parameters

镜片序号	材料	前表面曲率/mm	后表面曲率/mm	厚度/mm	光焦度
1	H-ZLAF55F	-570.34	-40.00	21.61	0.020 6
2	LASF35	793.96	32.66	3.05	-0.012 5
3	H-ZK9B	32.36	-70.00	7.98	-0.004 1
4	H-ZLAF2A	32.27	-206.52	9.25	0.029 3
5	H-ZLAF72	-78.89	454.28	13.73	-0.014 5

3 设计结果与分析

3.1 设计结果

根据光学设计与优化结果,得到一短共轭距高线性色散镜头。镜头光学口径 26 mm,像方、物方数值孔径 0.25,在 500 nm 波长光下焦距为 30.4 mm,共轭距 104 mm,在 400 nm~700 nm 波段内产生了 1.0 mm 的轴向色散,并具有良好的线性度和较小的球差,达到了设计指标要求。系统结构如图 4 所示。

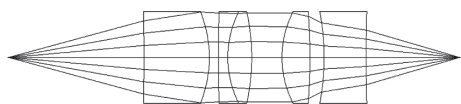


图4 光学系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of optical system

各个波长下的点列图如图5所示。RMS半径

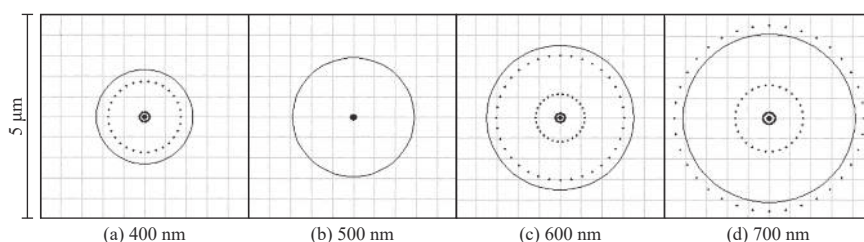


图5 各波长点列图

Fig. 5 Spot diagram of each wavelength

共聚焦位移传感器系统分辨率与传感器系统光谱范围、测量范围以及光谱仪分辨率有如下关系^[9]:

$$\frac{\Delta d}{\sigma_d} = \frac{\Delta \lambda}{\sigma_\lambda} \quad (5)$$

式中: Δd 为位移传感器位移测量范围; σ_d 为镜头轴向位移分辨率; $\Delta \lambda$ 为传感器系统光谱范围; σ_λ 为光谱仪分辨率。实验室使用分辨率为0.18 nm的光纤光谱仪,则由式(5)计算得到色散镜头分辨率为0.615 μm ,符合对0~1 mm深度划痕检测要求,在波长范围内也具有较好的色散线性度。

3.2 线性度分析与公差分析

在对色散镜头线性度判定中,将Zemax中波长的多重组态取消,在单一组态下将波长设置为400 nm~700 nm连续光谱,通过色散-移焦关系得到120组波长与轴向色散距离的数据,利用最小二乘法进行线性拟合,拟合结果如图6所示。对该组数据进行一元线性回归分析,使用判定系数 R^2 对镜头的线性度做出评价。 R^2 公式为

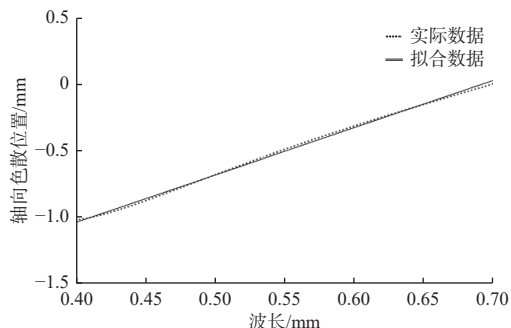


图6 轴向色差与波长关系

Fig. 6 Relationship between axial chromatic aberration and wavelength

又称为均方根半径,反映了系统实际光斑大小,RMS半径小,说明光线会聚度高、球差小。该色散物镜所有波长下RMS半径均小于1.2 μm ,小于各波长下1.3 μm ~2.1 μm 的艾里斑半径,镜头球差小于1.7 μm ,表明色散得到了很好地控制,聚焦效果良好。

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中: $\hat{y}_i$ 表示第*i*组数据中实际轴向距离数据; $\bar{y}$ 表示所有实际距离数据的平均值; y_i 表示第*i*组拟合后的距离数据。 R^2 越接近1,说明镜头的线性度越好,由式(6)计算得到本文优化设计后镜头 $R^2=0.9975$,表明优化效果良好。

为评定加工公差对镜头球差的影响,使用软件对系统公差进行分析。为确保镜头的可加工性,使加工需求较为宽松,采用光机系统通用的Q3公差等级^[15],以RMS光斑半径为评价标准进行蒙特卡罗分析。由于色散物镜受阿贝数和折射率影响较大,阿贝数公差在生产时较难控制,故将折射率公差收紧为0.000 2。在公差分析与修正过程中,将影响较为严重的厚度公差设置为0.01 mm,透镜和镜组偏心公差设置为0.016 7°,最终结果如表4所示。由表4可知,各个波长下RMS半径小于艾里斑半径的概率在80%以上,具有较好的良品率。

表4 公差分析结果

Table 4 Tolerance analysis results

波长/nm	艾里斑半径/ μm	RMS半径/ μm (80%蒙特卡罗分析结果)
400	1.260	1.213
500	1.458	1.321
600	1.762	1.535
700	2.103	1.490

4 结论

本文结合实际机车轮轴划痕检测使用需求,设计了一款短共轭距、高线性白光共聚焦色散镜

头。该款镜头测量范围为 1.0 mm, 系统工作光谱范围为 400 nm~700 nm, 镜头球差小于 1.2 μm , 系统轴向位移分辨率为 0.615 μm , 色散线性判定系数 R^2 为 0.997 5, 具有高线性和短共轭距的优点, 能够适用比较复杂的测量环境且方便携带。镜头在加工和装配公差范围内良品率达 80%, 具有良好的可加工性, 各项指标满足轮轴划痕检测要求。

参考文献:

- [1] 迟歆妍, 杨璐, 黄雷. 白光共聚焦式机车轮对测量装置的研制[J]. 计量技术, 2020, 551(7): 27-31.
CHI Xinyan, YANG Lu, HUANG Lei. Development of measuring device for white light confocal locomotive wheelset[J]. Measurement Technique, 2020, 551(7): 27-31.
- [2] RUPRECHT A K, PRUSS C, TIZIANI H J, et al. Confocal micro-optical distance sensor: principle and design[J]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*, 2005, 5856: 128-135.
- [3] SHAFIR E, BERKOVIC G. Expanding the realm of fiber optic confocal sensing for probing position, displacement, and velocity[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(30): 7772-7777.
- [4] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2473-2479.
LIU Qian, YANG Weichuan, YUAN Daocheng, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2473-2479.
- [5] 武芃樾, 袁道成. 光谱共焦位移传感器镜头设计研究[J]. *工具技术*, 2012, 46(2): 81-83.
WU Pengyue, YUAN Daocheng. Research of design of lenses used for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Tool Engineering*, 2012, 46(2): 81-83.
- [6] 田雨, 刘宾. 光谱共焦位移传感器色散镜头设计[J]. *光学技术*, 2018, 44(3): 381-384.
TIAN Yu, LIU Bin. Design of dispersion lens for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(3): 381-384.
- [7] 王继凯, 向阳, 王培芳. 红外双层衍射光学元件衍射效率研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(2): 25-29.
WANG Jikai, XIANG Yang, WANG Peifang. Study on diffraction efficiency of infrared double-layer diffractive optical element[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2016, 39(2): 25-29.
- [8] 罗刚银, 王弼陡, 缪鹏, 等. 激光共聚焦近红外荧光扫描系统光学设计[J]. *应用光学*, 2015, 36(1): 29-34.
LUO Gangyin, WANG Bidou, MIAO Peng, et al. Optical design of near infrared fluorescence confocal laser scanning system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(1): 29-34.
- [9] 梁青, 薛丹, 伍星昱. 光谱共焦位移传感器镜头设计[J]. *光学技术*, 2019, 45(6): 653-659.
LIANG Qing, XUE Dan, WU Xingyu. Lens design for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(6): 653-659.
- [10] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜中色散物镜材料的优化选择[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 111-117.
LIU Qian, YANG Weichuan, YUAN Daocheng, et al. Optimization and selection of materials for dispersive objective of chromatic confocal microscope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(8): 111-117.
- [11] 闫凯. 光谱共焦厚度检测系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
YAN Kai. Research of thickness detection system based on spectral confocal[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [12] NOVAK J, MIKS A. Hyperchromats with linear dependence of longitudinal chromatic aberration on wavelength[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2005, 116(4): 165-168.
- [13] ZHANG Z L, LU R S. Initial structure of dispersion objective for chromatic confocal sensor based on doublet lens[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 139: 160424.
- [14] 郁晓晖, 高志山, 袁群. 宽光谱长工作距离弱荧光信号检测显微物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1588-1595.
YU Xiaohui, GAO Zhishan, YUAN Qun. Design of board spectrum and long work distance microscope objective for weak fluorescence signal detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1588-1595.
- [15] 刘雨沁, 张孟伟. 变倍光学系统的公差分析[J]. *光学仪器*, 2013, 35(2): 42-45.
LIU Yuqin, ZHANG Mengwei. Tolerance analysis of switch-in-group zoom optical system[J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(2): 42-45.