

基于自准直原理的紧凑型激光位移传感器光学系统设计

张欣婷 吴倩倩 亢磊

Optical system design of compact laser displacement sensor based on auto-collimation principle

ZHANG Xinting, WU Qianqian, KANG Lei

引用本文:

张欣婷, 吴倩倩, 亢磊. 基于自准直原理的紧凑型激光位移传感器光学系统设计[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 720–725. DOI: 10.5768/JAO202344.0401003

ZHANG Xinting, WU Qianqian, KANG Lei. Optical system design of compact laser displacement sensor based on auto-collimation principle[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 720–725. DOI: 10.5768/JAO202344.0401003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计

Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range

应用光学. 2019, 40(1): 33–38 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101006>

大口径超长焦距紧凑型光学系统设计

Design of compact optical system with large aperture and ultra long focal length

应用光学. 2018, 39(5): 638–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501008>

紧凑型自由曲面离轴三反系统设计

Design of compact freeform off-axis three-mirror system

应用光学. 2018, 39(6): 780–784 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601003>

基于硫系玻璃的紧凑型大相对孔径长波红外光学系统无热化设计

Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses

应用光学. 2021, 42(5): 790–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0720-06

基于自准直原理的紧凑型激光位移传感器光学系统设计

张欣婷¹, 吴倩倩¹, 亢磊²

(1. 长春电子科技学院, 吉林 长春 130012; 2. 中国中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)

摘要: 分析传统直射式和斜射式激光位移传感器的特性, 结合两者的优势, 设计了一种基于自准直原理的紧凑型激光位移传感器。在结构上, 利用直线结构取代了大三角的光路布局, 形成自准直式光路结构。引入分光比 50% 的分束镜, 与光轴成 45° 角放置, 将会聚透镜和成像透镜合为一枚, 并使聚光镜、分束镜和光电探测器共轴, 简化了系统结构, 减小了仪器体积, 同时, 推导了符合自准直原理的 Scheimpflug 条件。利用光学设计软件 Zemax 对光学系统进行仿真, 系统采用单透镜的结构形式, 前表面为 Forbes 非球面, 入瞳直径 $D = 4\text{ mm}$, 视场角 $2\omega = 4^\circ$, 总长 $L = 20\text{ mm}$, 成像质量和系统尺寸均达到最佳。该系统具有测量范围大、分辨率高、结构尺寸小、光能损失小等特点, 通过实验与 Keyence 激光位移传感器比较, 该系统能够保证测头分辨率 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、综合检测精度 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 的技术指标。

关键词: 光学设计; 激光位移传感器; 自准直; Scheimpflug 条件; 紧凑型

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0401003

Optical system design of compact laser displacement sensor based on auto-collimation principle

ZHANG Xinting¹, WU Qianqian¹, KANG Lei²

(1. Changchun Institute of Electronic Science and Technology, Changchun 130012, China; 2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: The characteristics of traditional direct and oblique laser displacement sensor were analyzed. Combined with their advantages, a compact laser displacement sensor based on auto-collimation principle was designed. In the structure, the linear structure was used to replace the optical path layout of the large triangle, and the auto-collimation optical path structure was formed. A beam splitter with a splitting ratio of 50% was introduced and placed at an angle of 45° with the optical axis to combine the focusing lens and imaging lens into one, and made the condenser, beam splitter and photo-detector coaxial, which simplified the system structure and reduced the volume of the instrument. At the same time, the Scheimpflug condition conforming to the auto-collimation principle was derived. The optical design software Zemax was used to simulate the optical system. The system adopts the structure of single lens, the front surface is Forbes aspheric surface, the entrance pupil diameter D is 4 mm, the field angle 2ω is 4°, the total length L is 20 mm, and the imaging quality and system size are the best. The system has the characteristics of large measurement range, high resolution, small structure size and small light energy loss. Compared with the experiments of Keyence laser displacement sensor, the system can ensure the technical indexes of probe resolution $1\text{ }\mu\text{m}$ and comprehensive detection accuracy $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$.

收稿日期: 2022-12-06; 修回日期: 2022-12-26

基金项目: 吉林省科技厅重点科技攻关项目 (20150204044G X)

作者简介: 张欣婷 (1984—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师。主要从事光学设计、光学检测和光电仪器等研究。

E-mail: luoyiwuhens@163.com

Key words: optical design; laser displacement sensor; auto-collimation; Scheimpflug condition; compact type

引言

作为非接触式激光位移传感器,由于采用新的光电扫描技术和新型光电探测器件,配以相应的控制系统和数据采集系统得到了快速发展与广泛应用,其光学系统大多为激光三角法,在保证高精度的前提下,可实现非接触和高效率的光学测量。在众多激光位移传感器产品中,国外以日本 Keyence、美国 MIT、德国 Micro Epsilon 等公司的产品占据优势,国内自主研发的产品较少,在测量精度、分辨率等参数方面与国外产品有一定的差距^[1-2]。近年来,实验室一直购置 Keyence 公司的激光位移传感器进行各类实验测量,使用效果较好。本文设计的目的是,在精度与 Keyence 相仿的前提下,能够在体积、成本等方面有所突破^[3-4]。

激光位移传感器的核心光学系统是激光三角测头。激光三角测头的成像系统需要满足激光三角法原理,即会聚透镜、成像透镜和探测器三者呈三角形布局,因此会聚透镜和成像透镜是激光三角法中的重要部件^[5-6],决定着系统的成像质量,进而影响测量精度,其装调比较困难。本文设计了一种新型自准直式激光三角测头,将会聚透镜和成像透镜合为一枚,呈直线型光路,在保证成像质量和测量精度的前提下,实现了结构紧凑。

1 激光三角测头特性比较

激光三角测头是光学测量中使用比较普遍的仪器,多年来一直在直射式和斜射式两种之间进行选择,测量原理分别如图1和图2所示。两者的结构和原理大致相同,即当被测件表面发生微位

移时,不同位置的反射光投射到光电探测器上,光斑的位置也会发生相应的微小位移,光电探测器上像的微小位移可以通过测量得到,进而计算出被测件表面的微小位移^[7-9]。两种不同结构都可以测量物体表面存在的微小位移,并且属于非接触式测量,提高了测量精度,可实现实时在线测量。下面我们对两种方法进行分析比较,以便根据不同的测量需求,准确地选取光路形式。

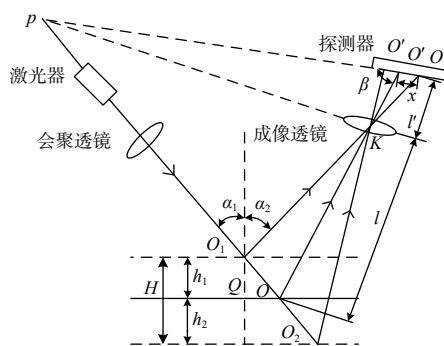


图2 斜射式激光三角法

Fig. 2 Oblique laser triangulation

直射式测量方法对被测件表面微位移的计算公式为

$$h_1 = O_1 O = \frac{OK \cdot O' O'_1 \cdot \sin \beta}{KO' \cdot \sin \alpha + O' O'_1 \cdot \sin(\alpha + \beta)} = \frac{l \cdot x \cdot \sin \beta}{l' \cdot \sin \alpha + x \cdot \sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

斜射式测量方法对被测件表面微位移的计算公式为

$$h_1 = O_1 Q = \frac{O' O'_1 \cdot \sin \beta \cdot OK \cdot \sin \alpha}{KO' + O' O'_1 \cdot \cos \alpha} = \frac{l \cdot x \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha}{l' + x \cdot \cos \beta} \quad (2)$$

两种方法的放大倍率不同,可以通过对上述公式(1)和公式(2)中 h_1 求导得到:

$$\beta_{\text{直射式}} = \frac{l \cdot l' \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha}{[l' \cdot \sin \alpha + x \cdot \sin(\alpha + \beta)]^2} \quad (3)$$

$$\beta_{\text{斜射式}} = \frac{l \cdot l' \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha}{(l' + x \cdot \cos \beta)^2} \quad (4)$$

当直射式和斜射式中 α, β 相同时,则公式(3)和公式(4)之比为

$$\frac{\beta_{\text{斜射式}}}{\beta_{\text{直射式}}} = \left[\frac{l' \cdot \sin \alpha + x \cdot \sin(\beta + \alpha)}{l' + x \cdot \cos \beta} \right]^2 \quad (5)$$

由于在成像过程中,与系统其他参数相比,探测器位移 x 极小,可近似忽略,则公式(5)变成:

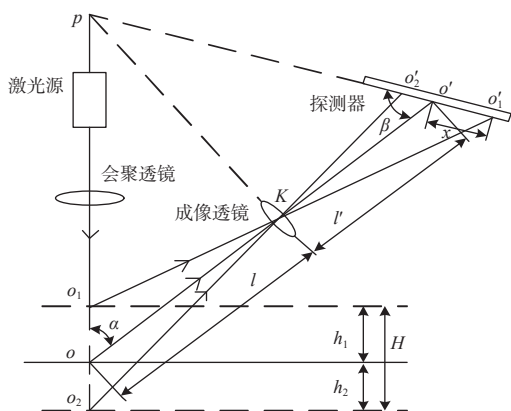


图1 直射式激光三角法

Fig. 1 Direct laser triangulation

$$\frac{\beta_{\text{斜射式}}}{\beta_{\text{直射式}}} = (\sin \alpha)^2 \quad (6)$$

因为公式 (6) 中 $\sin \alpha < 1$, 所以 $\frac{\beta_{\text{斜射式}}}{\beta_{\text{直射式}}} < 1$, 即 $\beta_{\text{直射式}} > \beta_{\text{斜射式}}$ 。

通过对直射式激光三角测头和斜射式激光三角测头进行全面分析, 发现两者各有优缺点, 两者的对比^[10-12] 结果如表 1 所示。

表 1 直射式和斜射式激光三角测头对比

Table 1 Comparison of direct and oblique laser triangular probe

	直射式	斜射式
测量范围	大	小
分辨力	低	高
结构尺寸	小	大
光能损失	大	小
被测对象	表面较粗糙、散射性好	表面高反射率

2 自准直激光三角测头光学系统设计

2.1 自准直激光三角测头 Scheimpflug 条件

通过上述分析可知, 直射式和斜射式激光三角测头各有优劣, 本文结合两者的优势, 提出了一种新型激光三角测头。该设计摒弃了传统直射式和斜射式大三角的光学结构^[13-14], 将会聚透镜和成像透镜合二为一, 在保证系统精度的前提下, 简化系统结构、减小仪器尺寸。由于其结构形式与自准直原理相似, 故命名为自准直激光三角测头, 原理如图 3 所示。

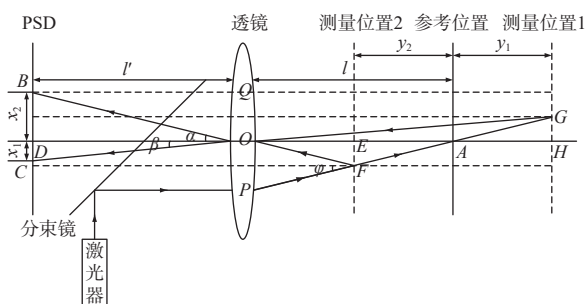


图 3 自准直激光三角测头原理

Fig. 3 Schematic diagram of auto-collimation laser triangular probe

图 3 中与光轴成 45° 角放置一枚分束镜, 分光比为 50%。激光器出射光经分束镜后, 平行于光轴入射到透镜, 出射光到达测量位置后返回, 再次经过透镜和分束镜入射到位置敏感探测器 PSD 上,

通过识别 PSD 光斑重心位置的变化, 可求取被测位置变化量。图 3 中 φ 为测量位置 1 和测量位置 2 的入射光线与光轴的夹角, α 和 β 分别为测量位置 2 和测量位置 1 的出射光线与光轴的夹角, x_1 和 x_2 分别为测量位置 1 和测量位置 2 在 PSD 上成像的光斑位置。现以测量位置 2 为例, 推导符合自准直激光三角测头的 Scheimpflug 条件。

在 $\triangle AOP$ 中,

$$\tan \phi = \frac{OP}{l} \quad (7)$$

在 $\triangle BOQ$ 中,

$$\tan \alpha = \frac{OQ}{l'} \quad (8)$$

因为 $OP = OQ$, 所以有:

$$\tan \phi = \frac{l'}{l} \cdot \tan \alpha \quad (9)$$

公式 (9) 即为自准直激光三角测头的 Scheimpflug 条件。此外, 还需推导被测物位移与 PSD 光斑位置变化之间的关系。在 $\triangle OCD$ 中,

$$\tan \beta = \frac{x_1}{l'} \quad (10)$$

在 $\triangle OGH$ 中,

$$\tan \beta = \frac{GH}{l + y_1} \quad (11)$$

在 $\triangle AGH$ 中,

$$\tan \phi = \frac{GH}{y_1} \quad (12)$$

联立式 (10)、式 (11)、式 (12) 得:

$$x_1 = \frac{\tan \phi \cdot y_1}{l + y_1} \cdot l' \quad (13)$$

同理可得:

$$x_2 = \frac{\tan \phi \cdot y_2}{l - y_2} \cdot l' \quad (14)$$

2.2 光学系统设计

目前, 在位移传感器领域比较突出的是 Keyence 公司。通过分析各类型激光三角测头的参数和精度, 以精度相仿但体积占优为主旨, 给出了具体技术指标, 如表 2 所示。

表 2 主要技术指标

Table 2 Main technical indicators

主要技术参数	指标
成像波段/nm	650
入瞳直径/mm	4
视场角/(°)	40
系统总长/mm	20
分辨力/ μm	1
综合检测精度/ μm	± 2

从图3所示的自准直激光三角测头外型来看, 较传统的直射式和斜射式激光三角测头小巧、结构简单, 因此其光学系统使用的透镜片数尽可能少, 本设计使用1片单透镜来实现成像质量与结构双优。

为了实现结构紧凑, 可采用单透镜或者双胶合的结构形式, 本设计选取单透镜来实现结构最小化, 光学系统结构图如图4所示。但由于单透镜只有2个表面, 校正像差的能力有限, 因此系统引入非球面解决像质方面的问题。在Zemax软件中, 利用宏语言ZPL编程, 将透镜前表面设计成Forbes非球面(也称Q-type非球面), 能够获得最佳成像效果。Forbes非球面方程如下:

$$u = \rho / \rho_{\max} \quad (15)$$

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2\rho^2}} + u^4 \sum_{m=0}^M a_m Q_m(u^2) \quad (16)$$

式中: K 为二次曲面系数; c 为曲率半径的倒数; ρ 为垂直光轴方向的径向坐标; $\rho_{\max}$ 为元件边缘到光轴的距离; a_m 为多项式系数; Q_m 为方程中各个多项式; u 为孔径角。

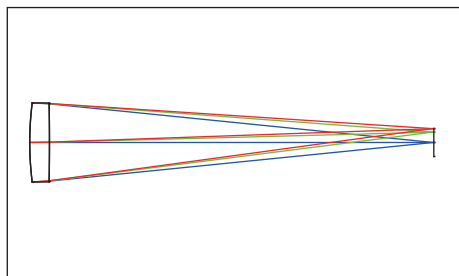


图4 光学系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of optical system

本文设计的系统中各级次非球面系数如表3所示。

表3 非球面系数

Table 3 Aspheric coefficients

级数	非球面系数 a_m/mm
0	2.370×10^{-3}
1	1.985×10^{-3}
2	6.450×10^{-3}
3	3.328×10^{-4}
4	4.057×10^{-5}

图5为光学系统的MTF曲线。从图5可以看出, 在Nyquist频率80 lp/mm时, 除边缘视场的子午传递函数曲线高于0.5之外, 其他MTF值均高

于0.6, 接近衍射极限, 且曲线集中, 完全满足设计要求。

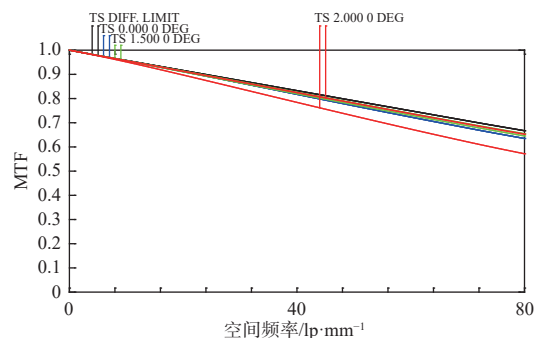


图5 MTF曲线

Fig. 5 Modulation transfer function curves

图6为光学系统点列图。从图6可以看出, 所有视场的点列图均在艾里斑之内, 成像质量较好, 尽管0.707带和边缘带存在略微的像散, 但不影响整体成像质量。

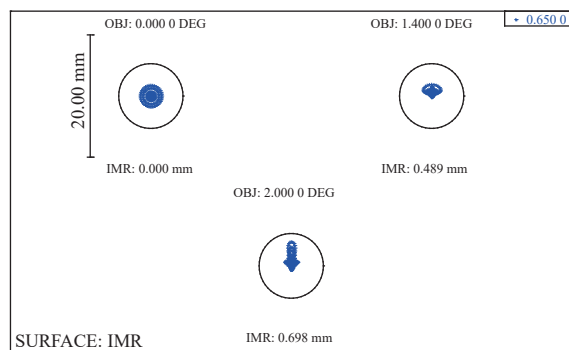


图6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

图7为光学系统纵向像差曲线。由于该系统属于大口径、小视场系统, 理论上应该校正球差和位置色差, 但本系统光源为激光, 因此只考虑球差即可, 系统球差曲线如图7所示。当边缘带球差校正为0时, 在0.707带有最大的球差值, 大约为0.02 mm左右, 完全符合消球差系统要求。

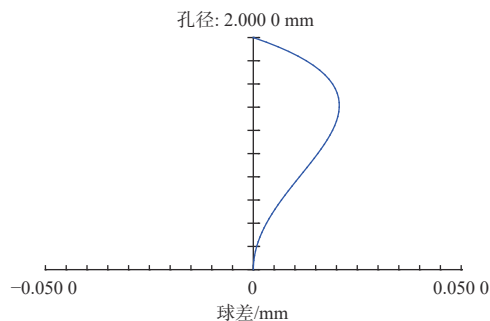


图7 球差曲线

Fig. 7 Spherical aberration curve

通过上述设计,系统可在波长 $\lambda = 650\text{ nm}$,焦距 $f' = 20\text{ mm}$,入瞳直径 $D = 4\text{ mm}$,视场角 $2\omega = 4^\circ$ 时,实现系统总长 20 mm ,满足激光三角测头紧凑性设计要求。

3 实验验证

根据测头分辨力 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、综合检测精度 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 的系统技术指标要求,对轴的圆跳动、全跳动、圆度、圆柱度等参数和误差展开测量,实验装置如图 8 所示。本文以检测 $\Phi 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 圆柱体圆柱度为例进行实验验证。

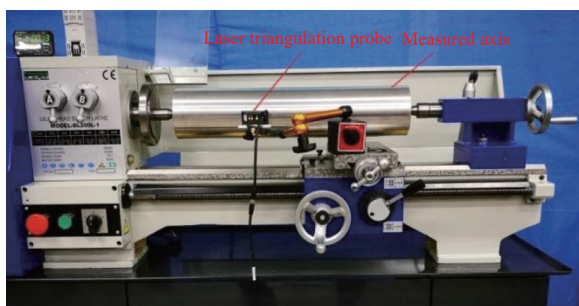


图 8 实验装置图

Fig. 8 Physical drawing of test device

实验选取 10 个不同回转角度和不同轴向行程的位置进行测量,以日本基恩士^[15-16]激光三角测头的实验数据为真值进行标定,其测量结果如表 4 所示。

表 4 圆柱度误差测量结果

Table 4 Cylindricity error measurement results

序号	回转 角度/ $(^\circ)$	轴向 行程/mm	测量值/mm	真值/mm	标准差/mm
1	0	50	0.039	0.039	0.001 05
2	40	100	0.041	0.040	
3	80	150	0.040	0.040	
4	120	200	0.041	0.040	
5	160	250	0.041	0.039	
6	200	300	0.039	0.040	
7	240	350	0.040	0.041	
8	280	400	0.041	0.040	
9	320	450	0.039	0.039	
10	360	500	0.041	0.040	

通过对上述 10 次测量数据进行算术平均值和残差计算,利用贝塞尔公式求得标准差,即:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.001\ 05\text{ mm}$$

该测量值的标准差为 $0.001\ 05\text{ mm}$,满足测量精度 0.002 mm ,即 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 技术指标要求。

同时,本文进行了大量的实验,对比了 Keyence 激光三角测头 and 自准直激光三角测头的结构与精度,结合表 1 的各项指标,得到的结论如表 5 所示。前者系统总长均大于 40 mm ,后者系统总长 20 mm 。当被测距离小于 40 mm 时,两者精度相仿;当被测距离大于 40 mm 时,Keyence 激光三角测头的精度占优。此外,成本方面,目前在售的 Keyence 激光位移传感器的价位在 $5\ 000\text{ 元} \sim 15\ 000\text{ 元}$ 之间,而本设计的成本主要取决于激光器和 PSD,透镜加工方面的技术比较成熟,成本上优于 Keyence 激光位移传感器。

表 5 Keyence 和自准直激光三角测头参数比较

Table 5 Parameter comparison of Keyence and auto-collimation laser triangular probe

主要技术参数	Keyence 激光 三角测头	自准直激光 三角测头
结构尺寸(系统总长)/mm	>40	20
测量范围(被测距离)/mm	60	<40 >40
分辨力/ μm	0.1	0.1 1
综合检测精度/ μm	1	1 2

4 结论

本文以激光位移传感器的紧凑性为切入点,分析了直射式激光位移传感器和斜射式激光位移传感器的特性,结合两者的优势,提出了一种自准直激光三角测头,并推导了该结构下的 Scheimpflug 条件。通过光学设计软件 Zemax 对光学系统进行仿真,得到了入瞳直径 $D = 4\text{ mm}$ 、视场角 $2\omega = 4^\circ$ 、系统总长 $L = 20\text{ mm}$ 的单透镜光学结构。该系统使用一个非球面,一个分束镜,在保证成像质量的前提下,做到了系统简单、结构紧凑。

本文设计的紧凑型激光位移传感器采用位置敏感探测器 PSD 作为光电接收器,通过实验,对轴的圆跳动、全跳动、圆度、圆柱度等参数和误差展开测量,能够保证测头分辨力 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、综合检测精度 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 的技术指标。

参考文献:

- [1] KOULAKEZIAN A, OHANNESSIAN R, DENKIKIAN H. Wireless sensor node for real-time thickness measurement and localization of oil spills[C]. Xi'an: IEEE/ASME

- International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008: 631-636.
- [2] REDDYHOFF T, KASOLANG S, DWYER-JOYCE R S. The phase shift of an ultrasonic pulse at an oil layer and determination of film thickness[J]. A.P. I. Mech. Eng. J.: Journal of Engineering Tribology, 2005, 219(6): 387-400.
- [3] 沈本兰, 徐先峰, 姚磊, 等. 大量程激光位移传感器的成像系统设计[J]. 应用光学, 2022, 43(3): 386-391.
SHEN Benlan, XU Xianfeng, YAO Lei, et al. Design of imaging system for large range laser displacement sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(3): 386-391.
- [4] 汪琛. 便携式单镜头激光三角测厚仪研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
WANG Chen. Research on portable single lens laser triangulation thickness gauge[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [5] VILACA J L, FONSECA J C, PINHO A M. Non-contact 3D acquisition system based on stereo vision and laser triangulation[J]. Machine Vision and Applications, 2010, 21(3): 341-350.
- [6] 闫加俊. 小型激光三角探头光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
YAN Jiajun. The optical system design of a miniaturization laser triangulation probe[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [7] 刘玉杰. 便携式短距离激光测距仪的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015.
LIU Yujie. Research on portable short distance laser rangefinder[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.
- [8] 王丹丹. 大型回转体形位误差非接触测量系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
WANG Dandan. Study on non-contact measurement system for shape and position errors of large scale rotary body[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- [9] 何晓敏. 高精度激光三角测量距离系统的研究与设计[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
HE Xiaomin. Researches and design of laser triangulation distance measurement system with high accuracy[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [10] 韩冰. 具有自准功能的激光三角传感头设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
HAN Bing. Design of self-collimation laser triangulation sensor[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [11] 杨小伟. 利用分光镜实现的单透镜激光三角测量系统[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
YANG Xiaowei. The study of the laser triangulation measuring system based on single lens[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [12] 杜华娜, 杨铁牛, 胡金洲, 等. 基于激光三角法的内径测量不确定度分析[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2021, 35(1): 42-48.
DU Huana, YANG Tieniu, HU Jinzhou, et al. An uncertainty analysis of inner diameter measurement based on laser displacement triangulation[J]. Journal of Wuyi University(Natural Science Edition), 2021, 35(1): 42-48.
- [13] 张欣婷, 亢磊, 安志勇, 等. 基于PSD的单透镜激光三角测头设计[J]. 光子学报, 2018, 47(7): 77-84.
ZHANG Xinting, KANG Lei, AN Zhiyong, et al. Design of a single lens laser triangulation probe based on PSD[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(7): 77-84.
- [14] 张欣婷, 亢磊, 安志勇, 等. 改进型激光三角测头设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 305-309.
ZHANG Xinting, KANG Lei, AN Zhiyong, et al. Improved laser triangulation probe design[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 305-309.
- [15] 韩迪. 列车车轴多参数非接触检测系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
HAN Di. Research on non-contact detection system for multi-parameter of train axles[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- [16] 姜蕾. 双光路对称补偿的激光三角法位移测量系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
JIANG Lei. Laser triangulation displacement measuring system with compensation of dual symmetrical optical path[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.