

# LED式三维表面测量传感器在汽车底盘几何参数测量中的应用研究

田常青

(上海申克机械有限责任公司, 上海 200444)

**【摘要】**为提高车辆底盘几何参数检测系统的精度、稳定性及灵活性,以立体摄影测量技术为基础,使用结构化发光二极管(LED)光源,基于车轮侧表面和轮罩边缘形成空间测量区,设计了由LED式三维表面测量传感器组成的汽车底盘几何参数测量系统,动态获得车轮的点云数据,结合x-line软件建立轮毂三维模型,分析并计算底盘前束角、外倾角的线性度和重复性,结果表明,该测量系统的线性度误差为 $1.528'$ ,前束角、外倾角的重复性测量误差分别为 $\pm 0.03'$ 、 $\pm 0.05'$ ,具有稳定性和可靠性。

**关键词:** 三维表面测量传感器 立体摄影测量 结构化LED光源

**中图分类号:** U467.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240220

## Research on Application of LED x-3Dsurface Measuring Technology in Vehicle Chassis Geometric Parameter Measurement

Tian Changqing

(Schenck Shanghai Machinery Corp. Ltd., Shanghai 200444)

**【Abstract】**In order to improve the accuracy, stability and flexibility of the vehicle chassis geometric parameter detection system, a vehicle chassis geometric parameter measurement system consisting of LED type 3D surface measurement sensors is designed based on stereo photogrammetry, using a structured LED light source to form a "spatial measurement area" based on the entire wheel side surface and wheel cover edge. By using 3D photography technology to obtain point cloud data under dynamic measurement, and combining with x-line software, a 3D wheel hub model is established to analyze and calculate the front toe camber angle of the chassis, the linearity and repeatability of the measurement system. The results show that linearity error of this measurement system is  $1.528'$ , repeatability error of front toe angle and camber angle are  $\pm 0.03'$  and  $\pm 0.05'$  respectively, verifying stability and reliability of the measurement system.

**Key words:** x-3Dsurface measuring technology, Stereophotogrammetric measurement, Structured LED light

**【引用格式】**田常青. LED式三维表面测量传感器在汽车底盘几何参数测量中的应用研究[J]. 汽车工程师, 2024(12): 21-27.

TIAN C Q. Research on Application of LED x-3Dsurface Measuring Technology in Vehicle Chassis Geometric Parameter Measurement[J]. Automotive Engineer, 2024(12): 21-27.

## 1 前言

底盘参数是车辆下线前的必检项,一般在四轮定位台上完成,主要检测参数包括前、后轮的前束角、外倾角、主销内倾角等<sup>[1-2]</sup>。

目前,国内外较前沿的底盘参数测量方法是在四轮定位台上集成三维激光及双目立体摄影测量技术,由激光发射器发出20~40道激光束到车轮,形成矩形

激光覆盖区域,激光发射器上方和下方的双目相机对激光束区域内轮胎的同一个点进行拍照,通过多位置取点,搭建车轮立体模型,建立车辆底盘坐标系统,得到前、后轮的前束角、外倾角,并计算出主销外倾角<sup>[3-6]</sup>。程旭等<sup>[5]</sup>提出在四轮定位仪上采用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机与激光传感器相结合的测量技术,但由于激光发射的环境稳定性差、测量范围受限<sup>[6-15]</sup>,立体表面激光测量传感器的采购和维

护成本均较高,提高了车辆下线检测成本<sup>[16-17]</sup>。

基于以上背景,本文提出一种基于发光二极管(Light Emitting Diode, LED)式三维表面测量技术的汽车底盘几何参数方法,采用LED光源代替激光束,配合立体摄影测量技术<sup>[8-10]</sup>,开发动态测量条件下的径向取点建模方式并搭建三维轮毂模型,实现底盘几何参数的稳定、可靠测量。

## 2 LED式三维表面测量传感器原理

### 2.1 传感器结构

LED式三维表面测量基于面测量技术,通过将结构化LED光源投射到车辆轮毂上,结合立体照相测量技术,利用2个照相机对轮胎上同一点进行拍照并获得该点的空间坐标,积累大量的点云数据后,可以获得车轮空间测量表面,进而搭建三维轮毂模型。LED式三维表面测量传感器由LED光投射仪(内置集成评价单元)、上部照相机及下部照相机组成,如图1所示。

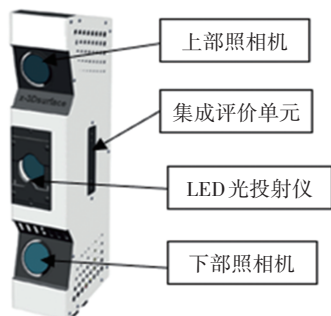
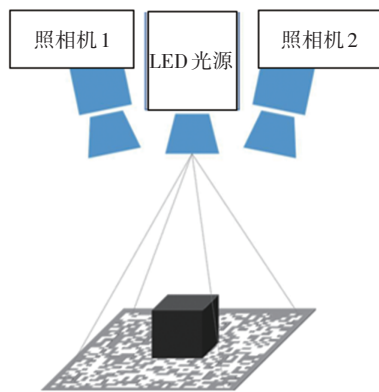
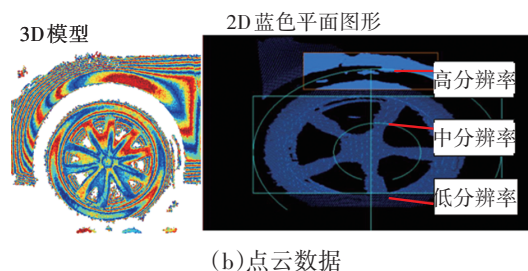


图1 LED式三维表面测量传感器

测量在车轮的侧表面进行,相较于激光束测量方式可获得大量数据信息,并可根据对测量范围的关注程度调整所需分辨率。针对轮胎胎面的凸起,可提高点云密度以提升轮胎轮廓测量的准确度。其工作原理如图2a所示,由获得的点云搭建的三维轮胎模型和二维轮胎胎图形如图2b所示。



(a)工作原理示意



(b)点云数据

图2 LED式三维表面测量传感器工作原理示意

沿轮胎中心截面进行测量,胎面上的截面轮廓线在整个车轮上均为圆形且轮胎的径向截面相同,因此,可以沿轮胎圆周采用相同的算法精确地确定胎面最高点。系统可通过自适应调节满足13~24英寸(330.2~609.6 mm)轮毂的测量需求。测量和评估用径向线如图3所示。

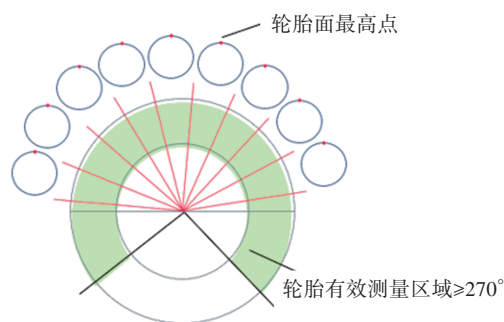


图3 径向线测量原理

轮罩边缘评估通过选择轮胎表面数据中关注的边缘区域完成,局部点云也可加密。该方法测量精确,尤其是对于复杂车身形状和车轮轮罩,无需增加额外的硬件。

### 2.2 传感器测试原理

车辆底盘几何参数计算可由测试系统自动完成,前束角、外倾角的计算原理如图4所示。其中, $\alpha_{FL}$ 、 $\alpha_{FR}$ 、 $\alpha_{RL}$ 、 $\alpha_{RR}$ 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮前束值, $\alpha_{FL\_cal}$ 、 $\alpha_{FR\_cal}$ 、 $\alpha_{RL\_cal}$ 、 $\alpha_{RR\_cal}$ 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮前束角计算值, $\alpha_{DRC}$ 为车辆行驶轴角度校正值, $\alpha_{SC}$ 为转向角的校准值, $\beta_{FL}$ 、 $\beta_{FR}$ 、 $\beta_{RL}$ 、 $\beta_{RR}$ 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮外倾角, $\beta_{FL\_cal}$ 、 $\beta_{FR\_cal}$ 、 $\beta_{RL\_cal}$ 、 $\beta_{RR\_cal}$ 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮外倾角计算值, $\theta_{SD}$ 为底盘对称轴角度校正值。前束角、外倾角测量完成后,测试系统自动进行轮胎高度测量(即测量轮罩边缘相对于车轮中心的高度)。相关计算方法如下:

a. 底盘对称轴角度为车辆行驶方向与其对称平面之间的角度,其计算方法为:

$$\theta_s = \theta_{SD} = \arctan\left\{\frac{(Y_{RL\_cal} + Y_{RR\_cal}) - (Y_{FL\_cal} + Y_{FR\_cal})}{2b_w}\right\} \quad (1)$$

式中: $\theta_s$ 为底盘对称轴角度, $Y_{RL\_cal}$ 、 $Y_{RR\_cal}$ 分别为左、右

后轮轮毂中心点Y坐标的校正值,  $Y_{FL\_cal}$ 、 $Y_{FR\_cal}$  分别为左、右前轮轮毂中心点Y坐标的计算值,  $b_w$  为轮距。

b. 车辆行驶轴角度定义为后轮对称平面与底盘对称平面的夹角, 其计算方法为:

$$\alpha_{DR} = \alpha_{DRC} = (\alpha_{RL} - \alpha_{RR}) / 2 \quad (2)$$

式中:  $\alpha_{DR}$  为车辆行驶轴角度。

c. 车辆行驶方向的计算方法为:

$$\alpha_{DF} = (\alpha_{FL} - \alpha_{FR}) / 2 \quad (3)$$

式中:  $\alpha_{DF}$  为前轴行驶方向角。

d. 转向角校正值的计算方法为:

$$\alpha_{SC} = \alpha_s / r \quad (4)$$

式中:  $\alpha_s$  为转向角,  $r$  为转向比。

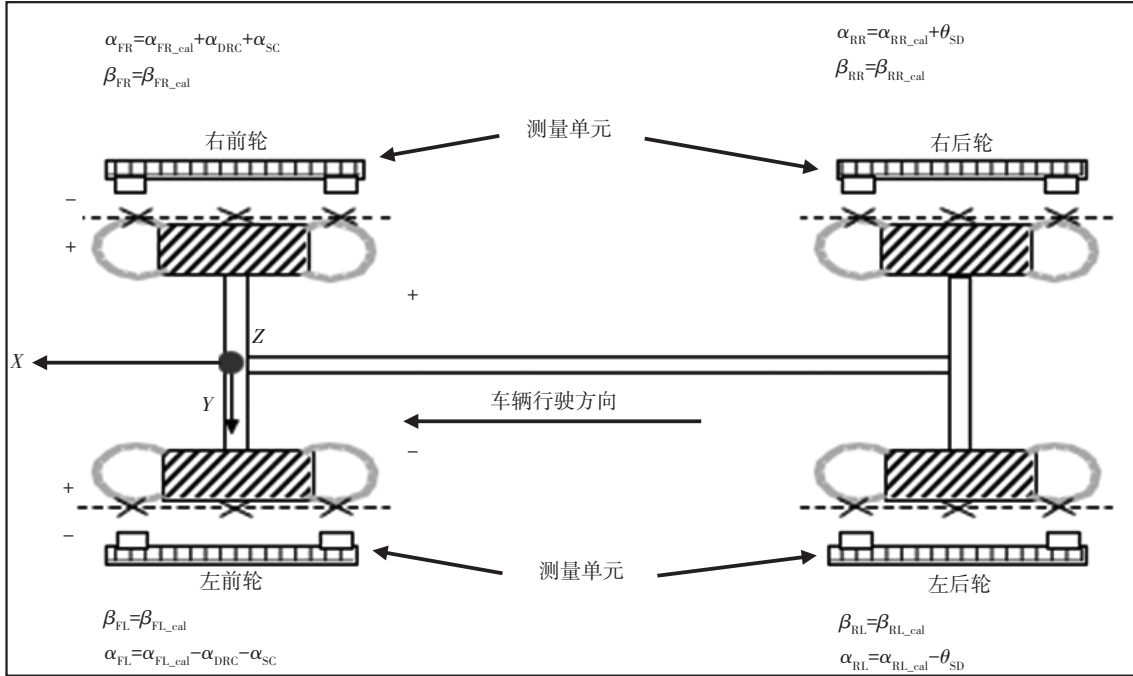


图4 车辆底盘几何参数计算原理

测试过程由杜尔公司测试试验台及装有 x-line 软件的计算机共同执行, 其中, x-line 可对图像进行处理和分析, 对得到的轮毂三维模型进行定幅修剪、二值化处理、轮毂轮廓边缘提取及相应像素值计算等。LED式三维表面测量系统的控制系统如图5所示。

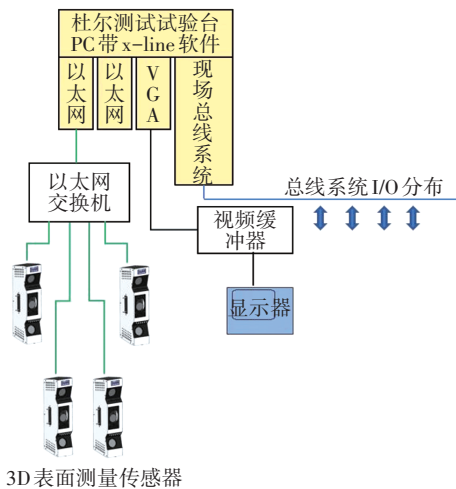


图5 LED式三维表面测量系统的控制系统

### 3 系统测试流程及数据分析

#### 3.1 测量系统线性度分析

标准量规是三维表面测量系统中的标定装置, 用于精度验证, 由铝合金焊接而成, 可描述系统在理想环境(即车辆行驶轴无偏差)条件下的测量能力。本文使用的标准量规已经高精度测量机(如三坐标测量仪)校准, 刚性满足所应用领域的环境要求, 可用于对测量系统进行线性度分析并保证测试结果的准确性。标准量规的样式如图6所示。

标准量规具有基准坐标系及已知的测量点、测量平面, 使用这些测量点分别为每个三维表面传感器计算并存储6个变换参数(3个旋转参数、3个平移参数), 校准后, 传感器的所有测量值均可变换至基本坐标系。变换参数由每个传感器的单个量规辅板上的特定轮廓(即图6中3个特定角度组成的辅板)确定。标准量规的校正精度及重复性参数如表1所示。

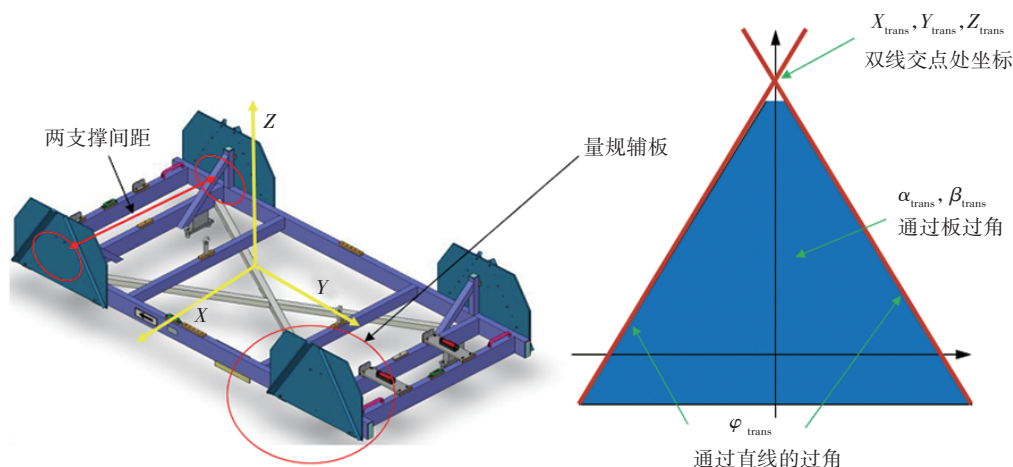


图6 标准量规的样式

表1 标准量规的校正精度及重复性参数

参数		取值
前束角/(°)	重复性(静态测试)	<0.2
	重复性(动态测试)	<0.4
	精度	<1
外倾角/(°)	重复性(静态测试)	<0.4
	重复性(动态测试)	<0.8
	精度	<2
车轮中心高度/mm	重复性	<0.1
	精度	<1
轮眉高度/mm	重复性	<0.2
	精度	<1

标准量规测试系统基于测量系统分析(Measurement Systems Analysis, MSA)方法,即每个测量系统或设备的系统、程序和特定值都相同。只有当系统以高斯方式运行时,MSA方法才有效<sup>[18-20]</sup>。

使用特定值表示测量系统最重要的2个特性:重复性,如标准量规、测量系统的重复性精度 $C_g$ 、 $C_m$ ,以及测量程序的重复性精度 $C_p$ ;准确性,如标准量规、测量系统的准确性 $C_{gk}$ 、 $C_{mk}$ ,以及测量程序的准确性 $C_{pk}$ 。

一次校正流程必须包含至少25个单独的值/测量,所有验证测量系统能力的程序都以相同的方式工作,对每个测量值(测量次数 $N>25$ 次)进行一系列测量,所有测量值均可并行记录,然后计算平均值 $\bar{M}_v$ 、标准偏差 $\sigma$ 和计算范围 $R$ :

$$\bar{M}_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_{vi} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (\bar{M}_v - M_{vi})^2} \quad (6)$$

$$R = \max\{M_{vi}\} - \min\{M_{vi}\} \quad (7)$$

式中: $M_{vi}$ 为第 $i$ 次测量的平均值。

考虑到标准量规是一个理想的测量目标,本文提出的LED式三维表面测量系统取10次数据进行分析,并将所有公差除以10。具体数值为:

$$C_g = 0.1T/3\sigma \quad (8)$$

$$C_{gk} = (0.1T - |\mu - \bar{M}_v|)/3\sigma \quad (9)$$

式中: $T$ 为公差,即允许的测量值与标准值间的绝对偏差。

将标准量规放置在集成有三维表面测量传感器测试系统的四轮定位试验台上,启动三维表面测量传感器完成测量,如图7所示。

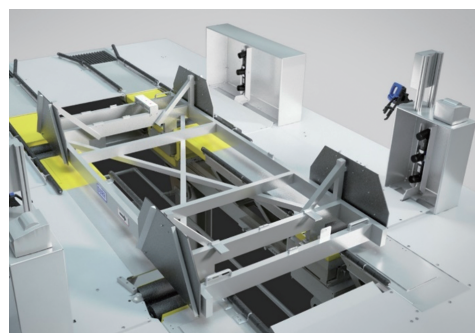


图7 标准量规在四轮定位台上的布置方式

以后轴底盘几何参数测量为例,测量结果如图

8所示。

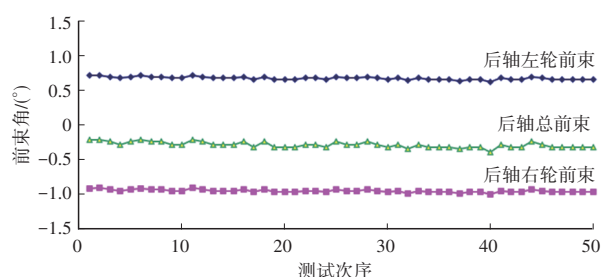


图8 后轴前束角测试结果

根据表1中标准量规前束角测量精度要求,将误差约为 $0.1'$ 的标准量规放置于测量系统中进行系统校准,按照标准量规重要点(量规支架的安装孔位)的间隙误差均处于允许误差的最大值的情况计算,即校准量规支架中 $Y$ 方向的间隙(适用于H7/g6,  $\Phi 20$  mm)为 $\pm 0.02$  mm,校准量规支撑点之间的最小距离为900 mm,此间隙对应的角度误差为 $0.153'$ 。

行业标准对螺栓配合公差的要求为 $\pm 0.2$  mm,因此,假设车轴螺栓连接间隙为 $\pm 0.2$  mm,后轴支撑点之间的 $Y$ 向距离为900 mm,此间隙对应的角度误差为 $1.528'$ 。

由上述间隙角度误差计算可得测量系统的总误差为 $1.535'$ 。

标准量规支撑点间的间隙误差将导致 $1.528'$ 的总间隙,与整个测试过程相比,这一误差可忽略不计。由此可判断三维表面测量传感器组成的测量系统具有较为理想的线性度,线性度误差为 $1.528'$ 。

### 3.2 测量系统重复性精度验证

对于测量结果的重复性精度验证,可通过同一辆车在同一测试系统下多次测量进行比较。车辆在不同条件下的对中精度不同、轮胎气压浮动变化、现场照度变化等会对测量结果产生影响,为解决此类问题,可采用加工精度高、依据标准尺寸设计制作的转动样架模拟实际样车进行试验。转动样架需通过三坐标测量仪测量,考虑到轮胎制造公差对外倾角测量的影响、轮辋宽度对轮胎高度测量的影响,该测量应在转动样架未安装轮胎的条件下开展。转动样架样式如图9所示,其技术参数如表2所示,其中前束、外倾参数以转动样架的行驶方向为基准。



图9 转动样架样式

采用MSA方法,利用下线车辆在测量系统中的实测公差计算 $C_m$ 和 $C_{mk}$ ,对测量系统进行评估, $C_m$ 和 $C_{mk}$ 必须分别大于1.67和1.33(可以使用75%的公差)。测量数据的正态分布曲线如图10所示。

表2 转动样架技术参数

参数	取值
结构	焊接钢
轴距/mm	2 500
前、后轴坐标	固定
前轮距/mm	1 550
后轮距/mm	1 550
车轮轮毂材质	铝合金
轮胎型号	225/45 R17
前轮前束角/(°)	+10(左), +20(右)
后轮前束角/(°)	-10(左), -20(右)
前轮外倾角/(°)	+20(左), +20(右)
后轮外倾角/(°)	-90(左), -90(右)
高度测量表面	固定

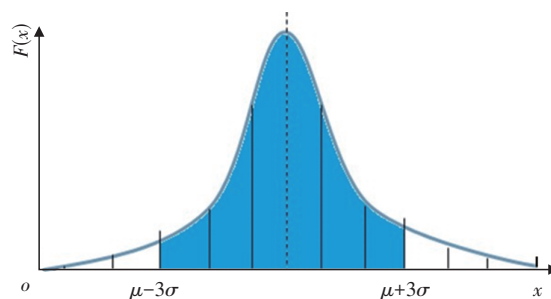


图10 标准正态分布曲线

按照正态分布取值,正态分布概率如表3所示。

表3 正态分布概率

公差范围	范围内概率/%	范围外概率/%
$\pm 1\sigma$	68.27	31.73
$\pm 2\sigma$	95.45	4.55
$\pm 3\sigma$	99.73	0.27
$\pm 4\sigma$	99.993 7	0.006 3
$\pm 5\sigma$	99.999 943	0.000 057
$\pm 6\sigma$	99.999 999 8	0.000 000 2

$C_m$ 、 $C_{mk}$ 的计算公式为:

$$C_m = T/3\sigma \quad (10)$$

$$C_{mk} = (T - |\mu - \bar{M}_v|)/3\sigma \quad (11)$$

式中: $\mu$ 为测量结果在正态分布下的平均值。

杜尔测量系统中, $C_m=1.67$ 时,60%的公差数据可使用, $C_{mk}=1.33$ 时,75%的公差数据可使用。

任意取常见的标准尺寸轮胎安装在转动样架上,并测得该转动样架前束、外倾参数作为标准,测量公差如表4所示。

表4 转动样架的前束、外倾等参数

测量参数	测量公差
总前束值/(')	$\pm 1.50$
总外倾值/(')	$\pm 3.00$
车轮中心到轮眉高度/mm	$\pm 1.50$
车身高度/mm	$\pm 1.50$
以车身高度测量与直接测量车轮中心到轮眉距离的误差差异/mm	2.50

在控制软件 x-line 中执行转动样架重复性测试,对样架按顺时针方向转动测量 25 次,测试结果如图 11 所示。

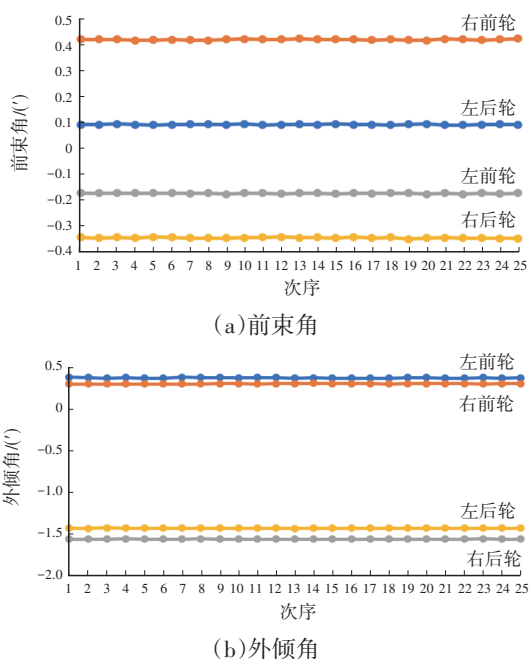


图 11 转动样架顺时针方向转动 25 次测量结果

由图 11 可知,前束角的重复性测量误差为  $\pm 0.03'$ ,外倾角的重复性测量误差为  $\pm 0.05'$ ,根据表 1,标准量规在动态测量条件下,前束角的重复性测量精度为  $\pm 0.4'$ ,外倾角的重复性测量精度为  $\pm 0.8'$ ,由此可知,测量系统重复性精度较高。

轮眉高度测量结果如图 12 所示,车轮中心高度重复性测量误差为  $\pm 1.5$  mm。测量系统体现了较高的重复性和精度。

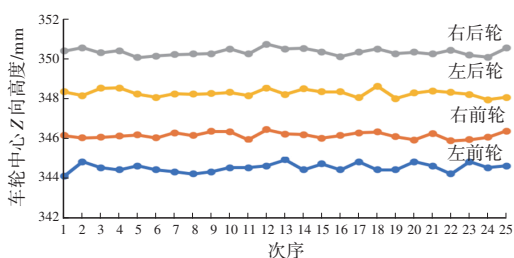


图 12 轮眉高度重复 25 次测量结果

## 4 结束语

本文提出一种由 LED 式三维表面测量传感器组成的测量系统,用于进行汽车底盘几何参数测量,为验证系统可靠性和稳定性,通过使用标准量规,利用 x-line 软件搭建三维车轮模型,对前束、外倾和轮眉高度进行测量,分析可知,测量系统具有较为理想的线性度。对转动样架在四轮定位设备上的前束和外倾测量结果表明,测试系统具有较高的测试精度和重复性精度。

### 参考文献

- [1] 詹天乐. 汽车检测的意义及提高检测水平的途径分析[J]. 机械管理开发, 2019(1): 228-229.  
ZHAN T L. Significance of Automobile Detection and the Analysis of Ways to Improve the Testing Level[J]. Mechanical Management and Development, 2019(1): 228-229.
- [2] 卫明. 浅析汽车底盘的检测与故障诊断[J]. 汽车实用技术, 2018(19): 267-268.  
WEI M. Analysis on the Detection and Fault Diagnosis of Car Chassis[J]. Automobile Applied Technology, 2018(19): 267-268.
- [3] 周子鹏. 汽车底盘坐标视觉测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
ZHOU Z P. Research on Visual Measurement Technology for Automotive Chassis Coordinates[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] BI S L, GU Y G, ZOU J Q, et al. High Precision Optical Tracking System Based on Near Infrared Trinocular Stereo Vision[J]. Sensors, 2021, 21(7).
- [5] 程旭, 程景胜, 姜晓军. 一种新型激光四轮定位的智能检测系统[J]. 电子制作, 2021(3): 40-41+59.  
CHENG X, CHENG J S, JIANG X J. A New Intelligent Detection System for Laser Four-Wheel Alignment[J]. Practical Electronics, 2021(3): 40-41+59.
- [6] SULAIMAN M H, SAPARON A, SULAIMAN S. Wheel Alignment Parameters Based on Laser Angle of Reflection with TCP/IP Protocol[C]// 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering: ICAEES 2016. Putrajaya, Malaysia: IEEE Computer Society, 2016: 233-236.
- [7] 朱良生. 浅析汽车四轮定位检测的准备与应用[J]. 汽车实用技术, 2020(4): 207-209.  
ZHU G S. Preparing and Application of Four Wheel Positioning Testing for Automobile[J]. Automobile Applied Technology, 2020(4): 207-209.

- [8] 赵楠. 双目立体视觉系统的研究与应用[J]. 电子技术与软件工程, 2021(5): 118-119.  
ZHAO N. Research and Application of Binocular Stereoscopic Vision System[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021(5): 118-119.
- [9] 崔恩坤, 滕艳青, 刘佳伟. 立体视觉测量系统标定误差补偿[J]. 应用光学, 2020(6): 1174-1180.  
CUI E K, TENG Y Q, LIU J W. Calibration Error Compensation Technique of Stereoscopic Vision Measurement System[J]. Journal of Applied Optics, 2020 (6): 1174-1180.
- [10] 董大卫, 陶翰中, 宁业衍, 等. 基于双目视觉的汽车尺寸检测技术研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2021(12): 41-44+51.  
DONG D W, TAO H Z, NING Y Y, et al. Research on Vehicle Size Detection Technology Based on Binocular Vision[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021(12): 41-44+51.
- [11] 戴凤新, 杨文武. 四轮定位仪校准装置及测量技术研究[J]. 中国计量, 2018(5): 76-78.  
DAI F X, YANG W W. Research on Calibration Device and Measurement Technology of Four Wheel Alignment Instrument[J]. China Metrology, 2018(5): 76-78.
- [12] 刘全攀, 贺敬良, 杨文武, 等. 四轮定位仪检定装置及其控制系统研究[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2017(1): 60-64.  
LIU Q P, HE J L, YANG W W, et al. Study on Verification Mechanism and Control System of Four-Wheel Aligner[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University (Science and Technology Edition), 2017(1): 60-64.
- [13] 张起勋, 邵承会, 张忠元, 等. 3D四轮定位仪校准装置关键检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2014(9): 1979-1989.  
ZHANG Q X, SHAO C H, ZHANG Z Y, et al. Research on the Key Detection Technology of 3D Four-Wheel Alignment Calibration Device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014(9): 1979-1989.
- [14] 马娇. 基于双目视觉汽车定位参数测量系统研发[D]. 西安: 西京学院, 2019.  
MA J. Research and Development of a Binocular Vision Based Vehicle Positioning Parameter Measurement System[D]. Xi'an: Xijing University, 2019.
- [15] 张吉璇. 基于激光投影图像分析的四轮定位检定技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.  
ZHANG J X. Research on Four Wheel Alignment Verification Technology Based on Laser Projection Image Analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [16] 王秋. 基于计算机视觉的四轮定位技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
WANG Q. Research on Four Wheel Alignment Technology Based on Computer Vision[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [17] 徐志军. 车轮几何参数检测及误差分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
XU Z J. Geometric Parameter Detection and Error Analysis of Wheels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [18] 许珂, 袁畅, 吕新科. 浅谈测量系统分析(MSA)在质量管控中的应用[J]. 科技创新导报, 2019(31): 52-54+56.  
XU K, YUAN C, LÜ X K. Application of Measurement System Analysis (MSA) in Quality Control[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019(31): 52-54+56.
- [19] 董祺. 测量系统分析方法的研究及应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.  
DONG Q. Research and Application of Measurement System Analysis Methods[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2011.
- [20] 马逢时. 六西格玛管理统计指南[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2018.  
MA F S. Six Sigma Management Statistical Guidelines[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2018.

(责任编辑 白夜)

修改稿收到日期为2024年7月29日。