

火车车轮踏面外径激光测量传感器 位姿标定及误差分析*

南 昀¹, 唐晓娟², 尹爱勇¹, 赵美云¹

(1. 铜陵职业技术学院 机械工程系, 安徽 铜陵 244061; 2. 安徽工业大学 创新创业学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 基于激光测距的非接触式车轮踏面外径测量原理, 提出了4根激光线交汇于一点的对中方法. 采用标定指针、标定板和标定环对4个激光测量传感器的位姿进行标定, 其中, 位姿参数主要有水平面内激光线之间的夹角 θ 和激光器发射点到交汇点的距离. 在此基础上, 对激光线垂直面内的倾斜角 β 和水平面内的夹角 θ 进行了误差分析. 该测量方法能够测量 $\Phi 800\sim 1\ 300$ mm的车轮, 测量误差小于 ± 0.5 mm.

关键词: 车轮外径; 激光测量; 位姿标定; 误差分析

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.04.23.0003

中图分类号: U270.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)04-0506-07

引文格式: 南昀, 唐晓娟, 尹爱勇, 赵美云. 火车车轮踏面外径激光测量传感器位姿标定及误差分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(4): 506-512.

英文引文格式: NAN Yun, TANG Xiaojuan, YIN Aiyong, ZHAO Meiyun. Pose calibration and error analysis of laser measurement sensors for outer diameter of train wheel tread[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(4): 506-512.

Pose Calibration and Error Analysis of Laser Measurement Sensors for Outer Diameter of Train Wheel Tread

NAN Yun¹, TANG Xiaojuan², YIN Aiyong¹, ZHAO Meiyun¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tongling Polytechnic, Tongling Anhui 244061, China;

2. College of Innovation and Entrepreneurship, Anhui University of Technology, Maanshan Anhui 243032, China)

Abstract: Using the principle of non-contact wheel tread outer diameter measurement based on laser ranging, a method for aligning four laser lines intersecting at one point is proposed. The positions of four laser measurement sensors, which are based on the angle θ between laser lines in the horizontal plane and the distance from the laser emission point to the intersection point, are calibrated using a calibration pointer, a calibration board, and a calibration ring. Error analysis has been conducted by the inclination angle β of the laser line and the angle θ in the horizontal plane. This measurement method is capable of measuring $\Phi 800\sim 1\ 300$ mm wheels with a measurement error of less than ± 0.5 mm.

Key words: wheel outer diameter; laser gauge; pose calibration; error analysis

0 引言

在火车车轮轮箍成品检测线上, 一般通过手动测量车轮的踏面直径. 这不仅费时耗力, 且测量精度很难保证. 人工将测量数据输入计算机时, 校对工作相当繁琐且容易出错, 这严重影响了企业的自动化程度.

传统接触式测量会影响测量结果的精度和重复性^[1-3], 非接触式测量具有速度快、受干扰少、易于数据传输等优点. 以光电、摄像技术^[4-5]、红外测温^[5-6]、电容位移^[7]、超声波技术^[8]为基础, 陆续出现了激光测距法、图像识别、红外测温测距、超声波测距法等非接触测量技术.

* 收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 安徽省省级质量工程项目“模具设计与制造专业教学创新团队”(2023cxttd185); 铜陵职业技术学院重点教研项目“提高高职工科学生图学素质与技能的策略探索与实践”(tlpt2023jyzd008); 铜陵职业技术学院重点科研项目“基于CAE技术的复杂壳体件注塑成型工艺研究”(tlpt2022NK003).

作者简介: 南昀(1974—)女, 硕士, 讲师, 主要从事机械CAD/CAE/CAM与信息集成的研究, E-mail: 892638292@qq.com.

在零件外径测量技术方面, 大型锻件外径的非接触测量研究和应用较多^[9-15], 主要采用激光扫描技术或者激光传感器进行位移测量, 如文献[14]和[15]在相互平行的导轨上分别安装一对激光发射装置和激光接受装置, 通过步进电机驱动使得两台设备在导轨上同步运动, 记录接受装置信号通断位置来间接测量环形锻件的直径. 以上测量装置的激光传感器在工作时处于移动或者转动状态, 对驱动设备的精度要求高, 但在上述工作状态下标定不够准确、精度不易保证, 故本文直接选用精度高且性能稳定的激光测距传感器构建测量系统.

激光测距传感器是固定不动的, 一旦标定则其位姿将不会变化, 将激光器读数经过几何关系换算即可获得车轮外径, 相比上述非接触测量方法, 测量系统构建简单、精度高且性能稳定可靠. 本文在文献[16]的基础上, 进一步研究激光测距传感器的标定方法并分析了测量误差.

1 火车车轮踏面外径激光测量原理^[16]

所测车轮踏面外径为距离轮辋内侧面70 mm处的踏面圆的直径, 如图1所示^[16], 车轮踏面直径范围为Φ800~1 300 mm, 系统测量误差要求小于±0.5 mm.

车轮外径测量系统主要由激光测量装置、传送装置和控制系统三部分组成, 如图2所示, 4个激光测距传感器组件对称安装在接料台5的对角线角落处, 并且与其他设备无干涉. 激光测距传感器与数据采集卡通过信号线相连接, 控制器与数据采集卡、显示器和继电器通过电缆及信号线相连接, 本地数据库与MES服务器相连接, 完成指令的下达和信息的回传. 接料台上方的桁架式机械手用于实现车轮的取放. 4条激光线与接料台5的上表面平行且在同一平面内汇交于一点.

4个激光器标定完成后, 取下标定环和标定板, 机械手将车轮水平放置在固定接料台5上, 通过4个激光测距传感器可测得激光出发点到车轮踏面的距离为 l_a 、 l_b 、 l_c 、 l_d .

获得激光线与车轮踏面相交的四点 a 、 b 、 c 、 d 的坐标后, 由 a 、 b 、 c 三点, b 、 c 、 d 三点, c 、 d 、 a 三点和 d 、 a 、 b 三点定圆可分别求得火车车轮圆心坐标 $o_1(x_{01}, y_{01})$ 、 $o_2(x_{02}, y_{02})$ 、 $o_3(x_{03}, y_{03})$ 、 $o_4(x_{04}, y_{04})$, 由上述四个圆心坐标值取平均可得出最佳圆心 o_5 的坐标值, 再计算出最佳圆心到踏面上 a 、 b 、 c 、 d 点的距离值作为车轮踏面外径计算结果^[16], 即

$$D = \frac{ao_5 + bo_5 + co_5 + do_5}{2} \tag{1}$$

2 激光器位姿标定方法

为使4个激光测距传感器所发出的激光线尽量在同一平面且汇交于一点, 各激光测距传感器只需要在水平面内、垂直面的转动和垂直方向上移动, 即有三个自由度. 使用辅助工具标定指针(图3)与标定板(图4)对激光器位姿进行标定, 其中标定指针上刻有间隔1 mm的尺寸刻度线.

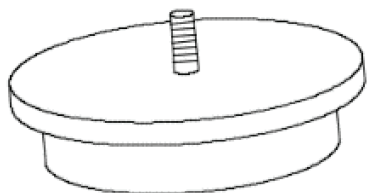


图 3 放大的标定指针

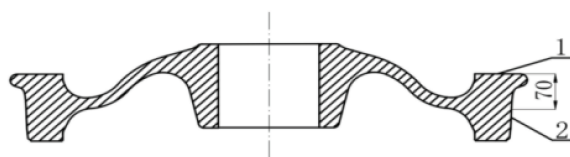


图 1 车轮示意图^[16]

注: 1为轮辋; 2为踏面

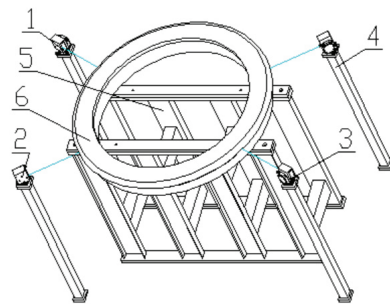


图 2 车轮外径测量示意图(根据文献[16]修改)

注: 1~4为四个激光测距传感器; 5为接料台; 6为被测车轮

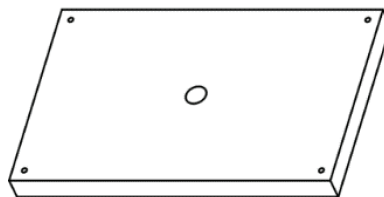


图 4 标定板

激光对标定如图5所示, 标定板2通过螺栓固定在接料台3上方正中央, 将顶端直径为 $\Phi 4$ mm (激光光斑直径为 $\Phi 3$ mm) 的标定指针1插进标定板2正中的标定孔中, 经过过渡配合, 4个激光测距传感器分别通过各自的一个串联高精度分度台对两个方向的角度微调, 使得4条激光线在同一平面内, 与接料台上表面平行且指向标定指针的中心 O , 指针的中心 O 即是标定孔中心^[16].

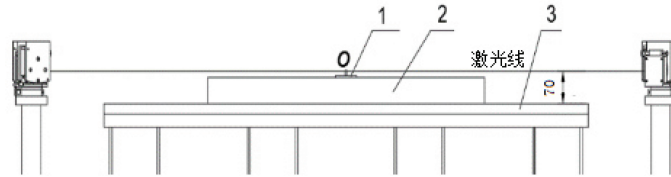


图5 激光对标定图(根据文献[16]修改)

注: 1为标定指针; 2为标定板; 3为接料台

根据车轮踏面直径的定义, 车轮踏面直径为距离车轮内侧面(轮缘处) 70 mm外圆直径, 调整时要求4个激光测距传感器底座的标高一致, 可用0.5 mm的垫片组调整高度。

2.1 激光线角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 标定

由于激光线是可见光, 4个激光测距传感器的位置调整好后, 可测量各激光线上不同点到标定板的垂直距离, 如果一致, 则认为激光线在同一平面内, 对车轮踏面外径测量转化为平面上的测量问题。

通过平面作图, 将4条激光线在标定板上的投影点记录下来, 将点连成线, 4条线的角度即可确定。以4#激光测距传感器的激光线为 x 轴, 过标定孔中心 O 作 x 轴的垂线为 y 轴, 其余3条激光投影线与 x 轴的夹角记为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 选取投影线上的点作 x 轴的垂线形成直角三角形, 通过游标卡尺获取两条直角边的长度参数 (x_i, y_i) , 该点可多次选取, 取平均值以减小误差, 令 n 为选取次数, 本文取10, 根据以下三角函数关系式可得到 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 的值, 即

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \arctan \left| \frac{y_i}{x_i} \right|, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (2)$$

2.2 激光测距传感器位置距离参数标定

由于标定指针的直径只有 $\Phi 4$ mm, 目标尺寸较小, 若激光测距传感器直接测量到标定指针的距离, 则超出了激光测距传感器的量程, 测量结果不可用。故本文采用如图6所示^[16]利用激光测距传感器测出激光发射点到标定环5表面距离的方案, 间接获得激光发射点到标定中心 O 的距离。该方案减小了直接测量所产生的误差。

距离参数具体标定步骤如下: 在激光线角度标定完成后, 去掉标定指针, 将已知直径为 d_0 的标定环5装

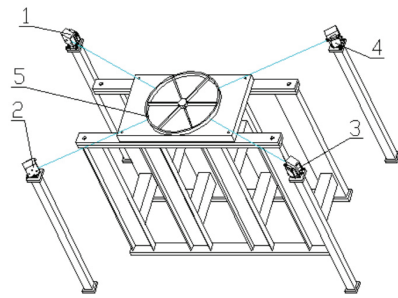


图6 激光测距传感器距离标定图(根据文献[16]修改)

注: 1~4为四个激光测距传感器; 5为标定环

在标定板正中的标定孔处, 即将标定环下方凸出的圆柱体插入标定板的标定孔中。如图6所示, 4个激光测距传感器发射点到标定环环面的距离可直接读出为 T_a 、 T_b 、 T_c 、 T_d , 激光测距传感器发射点到标定板正中的标定孔中心 O 的距离 L_{a0} 、 L_{b0} 、 L_{c0} 、 L_{d0} 为在读数 T_a 、 T_b 、 T_c 、 T_d 的基础上加 $d_0/2$ 后的值^[16]。

3 测量误差分析

所设计的测量装置不可避免的存在测量误差, 造成测量装置误差的原因主要有以下4个方面。

1) 激光测距传感器本身的测量误差: 根据工艺要求和被测车轮外径范围, 选择德国微米级SICK的OD5-500W200型, 量程0.3~0.7 m, 线性度0.1 mm, 重复精度0.3 mm, 体积小精致, 精度满足车轮外径测量要求, 性能稳定, 性价比高。

2) 安装误差: 测量装置可能存在制造或安装过程中的误差, 即便经过严格的安装和调试, 也难以达到理论上的理想状态, 从而影响测量精度。

3) 标定误差: 标定方法是否合理以及在标定时人为因素对测量精度均可能产生较大影响. 激光测距传感器安装和标定好后, 各激光测距传感器发出的激光线就固定不动了, 各激光线的位姿取决于其在垂直面内的倾斜角 β 和水平面内的相互夹角 θ . 至于4根激光线汇交于一点的测量基本要求, 通过对准标定中心 $\Phi 4$ mm的标定指针能够完成, 故汇交一点不做误差分析.

4) 测量环境影响: 测量装置工作环境中的温度、湿度、气压、磁场和电场等因素会影响测量的精度.

3.1 激光线倾斜角 β 标定误差分析

激光测距传感器标定过程中, 4个激光测距传感器发出的激光线不可能完全平行于被测车轮踏面圆所在平面, 即激光线与车轮踏面圆所在平面(水平面)存在夹角 β , 对应1#激光测距传感器发出的激光线夹角记为 β_1 , 如图7所示, 1#激光测距传感器发射点由 c 上升为 c' , 激光线与踏面交点由 a 上升为 a' , 1#激光测距传感器发射点 c 车轮踏面交点 a 的距离由 l_{a1} 变为 l'_{a1} .

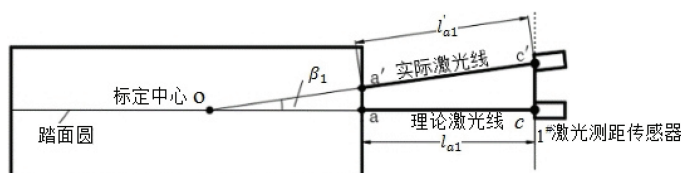


图 7 1#激光器激光线倾斜角 β 标定误差图

为了分析夹角 β 对车轮踏面直径测量结果的影响, 在Creo6.0三维软件中建立仿真测量模型, 将1#、2#、3#激光测距传感器的激光线与水平面形成的夹角 β 取相同值, 分别为 $20'$ 、 $40'$ 、 $60'$. 分别测量1#、2#、3#激光测距传感器发射点到车轮踏面交点的距离 l'_{a1} 、 l'_{b1} 、 l'_{c1} , 并将测量结果依次代入到式(1)中, 计算出对应夹角 β 的被测车轮直径 D , 式(1)计算正确的前提条件是所有 β 值均为0, 此时用 $\beta \neq 0$ 测得的数据进行计算, 观察其结果的偏差程度. 将这样计算出的 D 与所建模型实际直径 D_0 进行对比, 以获得夹角 β 对误差的敏感度^[17].

只考虑夹角 β 对测量误差的影响时, 对于 D_0 为 $\Phi 1\ 300$ mm的车轮(最大测量车轮模型直径), β 角引起的测量误差影响见表1, 其中 $\Delta D = D_0 - D$.

表 1 测 $\Phi 1\ 300$ mm车轮时夹角 β 引起的测量误差

β	l'_{a1}/mm	l'_{b1}/mm	l'_{c1}/mm	D/mm	$\Delta D/\text{mm}$
$20'$	467.415	428.225	436.063	1 299.986	0.014
$40'$	467.439	428.247	436.086	1 299.944	0.056
$60'$	467.478	428.283	436.122	1 299.869	0.131

只考虑夹角 β 对测量误差的影响时, 对于 D_0 为 $\Phi 800$ mm的车轮(最小测量车轮模型直径), β 角引起的测量误差影响见表2.

表 2 测 $\Phi 800$ mm车轮时夹角 β 引起的测量误差

β	l'_{a1}/mm	l'_{b1}/mm	l'_{c1}/mm	D/mm	$\Delta D/\text{mm}$
$20'$	718.131	678.388	686.736	799.979	0.021
$40'$	718.168	678.422	686.771	799.906	0.094
$60'$	718.228	678.479	686.830	799.796	0.204

由表1和表2可知, 实际激光线偏离理论激光线在竖直方向上形成的夹角 β 在一定范围内引起的误差不大, $\beta=60'$ 时, $\Phi 1\ 300$ mm车轮引起的最大误差为0.131 mm, $\Phi 800$ mm车轮引起的最大误差为0.204 mm. 当 β 为负值时, 重测 l'_{a1} 、 l'_{b1} 、 l'_{c1} 值与 β 为正值时的值一样, 故从略^[17].

要使 β 角足够小需调整激光测距传感器微调设备, 使各激光线终点打在标定指针的A点, 如图8所示. 在此前提下, 微调设备中L板与底座间垫片厚度, 使得激光测距传感器的激光发射点 C 尽量落在标定水平平面内. 但是 β 角并不会为零, 在标定板边缘用游标卡尺测量激光线上的B点到标定板的垂直距离. 当 β 角达到 $30'$ 时, BD 长度值为2.18 mm, 此值可在游标卡尺上清晰读出, 故 h 值达到2.18 mm时, 必须调整该激光测距传感器的垂直高度, 使 $\beta < 30'$, 从而使 β 引起的误差控制在0.1 mm内, 满足测量要求.

3.2 激光线夹角 θ 标定误差分析

以4#激光测距传感器的激光线为 x 轴,其余三条激光线与 x 轴的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 .以1#激光测距传感器为例,如图9所示,其激光线与 x 轴的夹角为 θ_1 (θ_2 、 θ_3 标定方法类似),从激光线上一点作垂线,直角边为 h_1 、 h_2 , θ_1 值与 h_1 、 h_2 的比例有关.由于 h_1 、 h_2 在标定过程中由人为量出,会使最终结果带有误差.

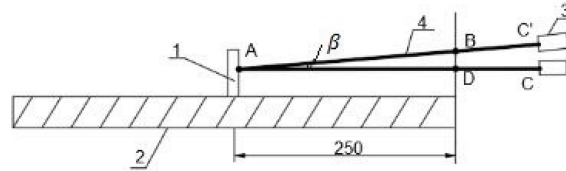


图8 调整激光测距传感器以减小 β 角

注:1为标定指针;2为标定板;3为激光测距传感器;4为激光线

在开展仿真测量过程中,选取激光线上的点作垂线时,选取点不能离标定中心太近,否则 h_1 、 h_2 值偏小会对夹角 θ_1 的计算误差影响较大.由于标定板2的宽度为500 mm(如图8所示),标定中心 O 位于标定板正中位置,该选取点应该在距离标定中心250 mm范围以内,故本节选取距离标定中心200 mm处的点作垂线.以标定中心 O 为圆心,做 $\Phi 400$ mm的圆与1#激光线、2#激光线、4#激光线相交于 a 、 b 、 d ,如图10所示^[16],在交点处作相对于 x 轴的垂线.

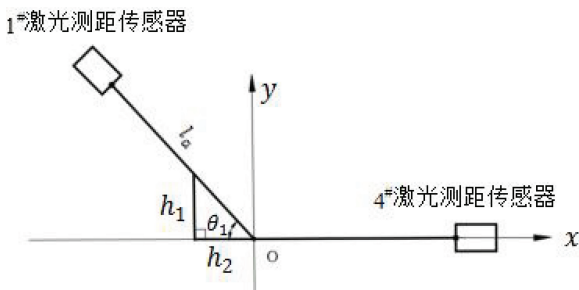


图9 夹角 θ_1 获取图

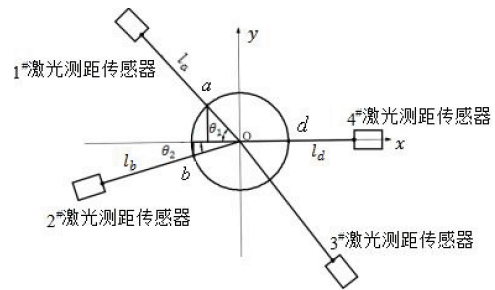


图10 激光线与 $\Phi 400$ mm圆交点作垂线^[16]

通过Creo6.0测量, θ_1 所对直角边 y 方向上的 $h_1=160.9$ mm, x 方向上的 $h_2=118.8$ mm, θ_2 所对直角边 y 方向上的 $h_3=78.9$ mm, x 方向上的 $h_4=183.8$ mm.在实际作图中,作图平面为标定板的上表面,将激光线在标定板上的投影点连成线来进行测量,利用游标卡尺读数来获取直角边 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 的大小,虽然可以通过多次计算取平均值,但考虑其人为操作,产生误差可能性较大.预设 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 作图和读数总误差在2 mm以内,对于角度 θ_1 ,手动测出 h_1 、 h_2 及 R ($R=200$ mm)后,可先验证是否满足 $h_1^2+h_2^2=R^2$,如果不满足,则重新测 h_1 、 h_2 及 R ,直到满足勾股定理,用此方法计算出的夹角 θ_1 误差较小.

以1#、2#、4#激光测距传感器进行三点定圆测量车轮外径为例,现假设人工测量的数据存在误差,考虑一条边大于理论值,一条边小于理论值,通过对理想值 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 加减2 mm和1 mm,代入式(2)中计算出夹角 θ'_1 、 θ'_2 ,仍以前述仿真测量模型中直径 D_0 为 $\Phi 800$ mm的车轮为对象,将夹角不同变化组合的 θ'_1 、 θ'_2 分别代入原有 θ 均为0的计算公式中,分析研究人为标定误差2 mm对所计算车轮踏面外径的影响,计算结果如表3所示.

由表3可知,人为作图所确定的边长 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 误差在2 mm时,对 $\Phi 800$ mm车轮测量的最大误差不超过0.160 mm.人工测量读数时,经多次测量验证,可将测量误差控制在小于1 mm范围内,因此,由激光线夹角标定误差引起的车轮外径测量误差相对较小,在实际情况下,通过多次取点作垂线求平均值并验证是否满足勾股定理的方法,可以大大减小激光线夹角标定误差的影响.

3.3 其他误差影响

1) 工作环境

火车车轮外径测量环境温度最大范围为 -8 $^{\circ}\text{C}$ ~ 40 $^{\circ}\text{C}$,本装置选用的激光测距传感器OD5-500W200工作温度为 -10 $^{\circ}\text{C}$ ~ 50 $^{\circ}\text{C}$,周围无热源、无强磁干扰,故工作环境对本测量基本无影响,能够保持精度测量的稳定性.

2) 被测物表面特性

被测物的表面过于光滑或过于粗糙都可能降低测量精度. 实验表明: 被测物表面粗糙度在 $1.6\ \mu\text{m}$ 至 $12.5\ \mu\text{m}$ 之间时, 激光测距传感器的性能表现最佳. 本文测量对象的被测车轮踏面粗糙度约为 $6.3\ \mu\text{m}$, 故对激光测距传感器的测量不会产生较大误差.

表 3 误差2 mm对所计算车轮直径 D 的影响

θ	h/mm	$\theta'_1/^\circ$	$\theta''_1/^\circ$	D/mm	$\Delta D/\text{mm}$
θ_1	① h_1+2, h_2-2	54.361 6	23.248 5	800.160	-0.160
	② h_1-2, h_2+2	52.759 2	23.248 5	799.858	0.142
θ_2	③ h_3+2, h_4-2	53.560 7	24.005 1	799.882	0.118
	④ h_3-2, h_4+2	53.560 7	22.500 0	800.143	-0.143
θ_1	① h_1+2, h_2-2	54.361 6	24.005 1	800.037	-0.037
θ_2	③ h_3+2, h_4-2				
θ_1	② h_1-2, h_2+2				
θ_2	④ h_3-2, h_4+2	52.759 2	22.500 0	799.987	0.013

4 结 语

采用标定指针、标定板和标定环对4个激光测距传感器的位姿进行标定, 激光发出点到标定中心的距离没有误差. 由于4根激光线不可能完全在一个平面内, 激光线相互之间的夹角标定存在误差. 三维模型环境下, 进行了仿真实验和误差分析, 结果表明, 测量装置中激光测距传感器高度方向的安装误差造成实际激光线偏离理论激光线在竖直方向上的夹角 β 小于 40° 时, 所引起的被测车轮直径计算误差小于 $0.1\ \text{mm}$. 对于获取激光线相互之间的夹角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 的人为测量值误差在 $\pm 2\ \text{mm}$ 以内时, 车轮直径计算误差小于 $0.160\ \text{mm}$. 综上所述, 综合误差会在 $\pm 0.5\ \text{mm}$ 以内, 满足车轮外径测量精度要求.

参考文献:

- [1] 韩伟, 郑力燊, 曹金娣. 一种钢管管端内外径测量设备的介绍[J]. 冶金设备, 2014(S1): 118-120.
HAN W, ZHENG L S, CAO J D. Introduction of a measurement equipment for pipe end inside and outside diameter[J]. Metallurgical Equipment, 2014(S1): 118-120. (in Chinese)
- [2] 龚敏明, 萨殊利. 铁路机车车轮对综合参数自动检测系统[J]. 内燃机车, 2001(4): 15-17.
GONG M M, SA S L. Automatic detecting systems of comprehensive parameters of railway locomotive wheel sets[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2001(4): 15-17. (in Chinese)
- [3] 许晔, 吴瑞琨, 金成国, 等. 直缝焊管管端直径及椭圆度的检测方法[J]. 物理测试, 2010, 28(2): 48-51.
XU Y, WU R M, JIN C G, et al. Measurement methods for outer diameter and ellipticity of the end of butt-welded pipe[J]. Physics Examination and Testing, 2010, 28(2): 48-51. (in Chinese)
- [4] 黄继雄, 莫易敏. 基于面阵CCD的二维几何尺寸非接触测量及其在CNC轮对车床中的应用[J]. 机械制造, 2005, 43(2): 30-32.
HUANG J X, MO Y M. Non-contact measurement of two-dimensional geometric dimension based on area array CCD and its application in CNC wheel-set lathe[J]. Machinery, 2005, 43(2): 30-32. (in Chinese)
- [5] 付献斌. 大型环筒类锻件锻造中外径和内径测量研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
FU X B. Research on the inner and outer diameter measurement of large ring cylinder forgings during forging[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
- [6] 张玉存, 付献斌, 马睿. 基于红外测温的筒形锻件内外径在线测量[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 14-18.
ZHANG Y C, FU X B, MA R. Online measuring of inner and outer diameter on barrel-type forgings based on the principle of infrared temperature measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 14-18. (in Chinese)
- [7] 常洪伟, 吴俊杰, 魏佳斯, 等. 三点法圆外径测量优化研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(3): 106-111.
CHANG H W, WU J J, WEI J S, et al. Research on optimization of three-point measurement of circle outer radius[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(3): 106-111. (in Chinese)
- [8] 姜继福, 王素青. 基于超声波测距的倒车雷达系统设计[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(12): 131-132+152.
JIANG W F, WANG S Q. Design of reversing radar system based on ultrasonic distance measurement[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(12): 131-132+152. (in Chinese)

- [9] 于鹏, 高峰, 郭为忠, 等. 新型大锻件尺寸在线测量系统的关键技术研究[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(3): 89-92.
YU P, GAO F, GUO W Z, et al. Research and development of a new large-size forging measurement system[J]. Machine Design & Research, 2008, 24(3): 89-92. (in Chinese)
- [10] 于鹏. 新型大锻件尺寸测量系统的关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
YU P. Study on key technology of a new large forging dimension measurement system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [11] 张玉存, 王智愚, 付献斌. 基于点云精简的大型环锻件外形尺寸测量方法[J]. 计量学报, 2023, 44(7): 1027-1032.
ZHANG Y C, WANG Z Y, FU X B. Measurement method of large ring forgings based on point cloud simplification[J]. Acta Metrologica Dinica, 2023, 44(7): 1027-1032. (in Chinese)
- [12] 李群, 刘原西, 张玉存, 等. 基于激光扫描的环形锻件径向尺寸测量方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(20): 2491-2496.
LI Q, LIU Y X, ZHANG Y C, et al. A measuring method for radial section sizes of ring forgings based on laser scanning[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(20): 2491-2496. (in Chinese)
- [13] 刘红轩, 曲兴华, 邢书剑, 等. 基于激光三角法的大内径测量系统[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(3): 506-508+515.
LIU H X, QU X H, XING S J, et al. Large-scale diameter measuring system based on laser triangulation[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(3): 506-508+515. (in Chinese)
- [14] 胡津, 魏青轩, 刘浩. 基于激光的非接触锻件直径在线测量的研究[J]. 大型铸锻件, 2019(3): 50-51+54.
HU J, WEI Q X, LIU H. Research on on-line measurement of non-contact forging based on laser[J]. Heavy Casting and Forging, 2019(3): 50-51+54. (in Chinese)
- [15] 张文文. 环形锻件外径尺寸测量方法的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
ZHANG W W. Research on the measurement method of the outer diameter dimensions of ring forgings[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. (in Chinese)
- [16] 乔中一, 王全先, 尚钱, 等. 基于激光测距的非接触式火车车轮踏面外径测量方法研究[J]. 机械研究与应用, 2023, 36(6): 44-47.
QIAO Z Y, WANG Q X, SHANG Q, et al. Research on measurement method for outer diameter of non-contact train wheel tread based on laser ranging[J]. Mechanical Research & Application, 2023, 36(6): 44-47. (in Chinese)
- [17] 郭健. 火车车轮内孔几何形状激光测量装置设计研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
GUO J. Design and research of laser measurement device for geometric shape of train wheel inner holes[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2017. (in Chinese)

责任编辑: 刘 敏