

# 通过式车轮踏面滚动圆直径测量算法的设计

代晨曦

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 轮对的滚动圆直径是评价轮对能否继续服役的重要指标。采取激光位移检测法, 设置 2 个激光位移传感器, 并将其按照规定安装到相关轨道处。当列车轮对行驶通过此装置后, 可检测到列车轮对的轮廓外形数据。通过 Origin 绘制出轮对的外形图, 选择轮对基点处的数据进行曲线拟合得到 2 条轮对滚动圆曲线。采用 MATLAB 设计算法得到轮对滚动圆的实际坐标点, 通过最小二乘法对数据点进行拟合求圆, 从而得到列车滚动圆的直径。将测出的轮对滚动圆直径与真实的轮对滚动圆直径进行对比, 验证该测量方法的可行性。

**关键词:** 列车轮对; 滚动圆直径; 激光位移检测法; 曲线拟合; 最小二乘法

**中图分类号:** TH122    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2023)03-0164-04

## Design of Measurement Algorithm for Rolling Circle Diameter of Passing Wheel Tread

DAI Chenxi

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Rolling circle diameter of wheelset is an important indicator of evaluating wheelset's continuity of service. The laser displacement detection method is adopted to set up two laser displacement sensors and install them to the relevant track according to regulations. When the train wheelset passes the device, the data of the train wheelset can be detected. With Origin, the outline drawing of the wheelset is drawn, wheelset base point data is selected for curve fitting to obtain 2 two rolling circle curves. MATLAB is used to design algorithm, and the actual coordinate points of the wheel set rolling circle are obtained. By the least square method, the data points are fitted to obtain the circle, thus the radius of the train rolling circle being gained. The measured wheelset rolling circle diameter is compared with the real one, which verifies the feasibility of the measurement method.

**Keywords:** train wheelset; rolling circle diameter; laser displacement measurement method; curve fitting; least square method

## 0 引言

我国的铁路运营里程不断提高, 人们对交通运输的需求量越来越大, 在载人、载物的同时保证运输安全愈发显得重要<sup>[1]</sup>。列车在运行过程中, 轮对的状况直接关系到车辆的运行质量和运行安全, 但轮对会面临众多的损耗, 比如雨水风沙的侵蚀、正常的磨耗、轮对的冲击等。这些损耗会破坏轮对的结构, 因此查明轮对的踏面情况, 根据需要进行及时的维修显得尤为重要。

轮对检测分为手动检测和自动检测<sup>[2-3]</sup>。最早的轮对尺寸检测全部为手动检测, 不仅会耗费大量的人力、物力与财力, 而且其检测结果还会受其他外界因素的影响, 导致不同的操作人员会得出不同的结果, 存在较大的误差。随着科技的发展, 逐渐出现自动检测装置, 本文采取激光位移检测法。

激光位移传感器基本测试原理为激光三角反射原理, 激光发射器的发射激光通过被测物体表面的漫反射光线经透镜折射到 CCD 上, 通过不同的位置输出相应的模拟信号(图 1)所示, 之后通过控制器与采集器相连, 再接入计

算机, 使用相应软件转换为数字信号, 并记录存储<sup>[4]</sup>。

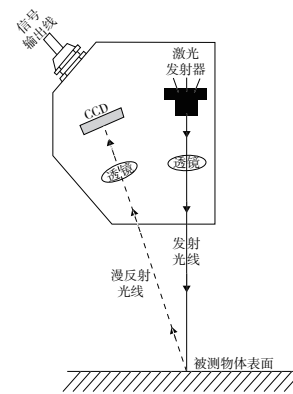


图 1 激光位移传感器测量原理

当列车轮对通过激光位移传感器时, 会得到有一定距离差的轮对轮廓外形数据。对数据进行绘图, 得到轮对的外形, 选取滚动圆处的数据进行拟合处理, 即可得到轮对的滚动圆直径。

本装置无需卸下轮对, 在保证列车正常运行的同时即

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61960206010)

**作者简介:** 代晨曦(1998—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向为车辆系统动力学。

可自动检测出列车轮对数据,从而判断其轮对是否需要维修,具有操作简单、快速、高效的特点,可以满足未来轮对检测装置的要求。本装置在西南交通大学牵引动力国家重点实验室进行试验,放置于实验室相关轨道,控制转向架使轮对匀速通过该装置,最终的处理结果与真实的轮对滚动圆直径进行比对,结果验证了本装置的可行性。

## 1 问题分析与方法改进

目前常用的轮对滚动圆直径自动检测分为光截图像法和激光位移测量法<sup>[5]</sup>。光截图像法通过激光传感器打出线激光,利用摄像机拍摄光截曲线图像,从而获得车轮踏面外形。但该装置比较复杂,需用到较多的激光传感器,造价昂贵,性价比很低。激光位移测量法通过特定条件下的传感器布置,对数据进行相关算法的分析处理,得到滚动圆半径。此测量方法较为简单,且布置比较方便,具有很强的经济性。比如利用2个位移传感器和涡流位移传感器相结合的激光位移测量法<sup>[6]</sup>以及利用3个位移传感器获取轮对滚动圆直径的激光位移测量法。这两种测量装置虽然比较简单,但采集的数据不够多,误差较大,且对环境的要求比较高。为此,本文提出了一种新的测量方法。

选取2个激光位移传感器,将2个传感器固结在一起,保证2个传感器打出的光线在 $x$ 方向永远相差1个固定值。之后将其放置于轨道内侧,当轮对行驶到传感器的位置,前面的传感器率先发射激光打到轮对上生成数据,当第二个传感器检测到轮对并生出数据时,与第一个传感器生成的数据存在一定的高度差,选取轮对基点处的数据,利用此高度差可拟合出2条轮对曲线,其 $x$ 方向的差值为2个传感器摆放位置的固定值,通过这2条曲线即可算出轮对滚动圆直径。此方法获得的数据量较大,可很大程度上消除测量误差,同时对环境的要求比较低,造价便宜,可大批量生产。

具体的工作流程为:

- 1) 选取数据,将计算需要用到的数据提取出来;
- 2) 将取出的数据导入程序中,进行点的曲线拟合,得到2条拟合曲线,将此拟合曲线仅纵坐标为列车滚动圆实际坐标值;
- 3) 对2条拟合曲线进行算法处理,得到列车滚动圆上一部分点的实际坐标值;
- 4) 对这些实际坐标值进行最小二乘法拟合求圆,得到列车滚动圆直径。

## 2 算法设计

由于测量装置固结在同一水平线上,且彼此之间有一定的距离差值 $b$ ,故当列车行驶到第一个激光位移传感器时,该传感器检测到轮对的相关数据,但第二个传感器仍处于未检测到轮对状态;当列车行驶到第二个激光位移传感器时,该传感器检测到轮对的相关数据,此时将第二个传感器检测到的数据与第一个传感器检测到的数据记录下来,两者在曲线上的纵坐标均表示此时轮对距离各自传

感器的垂向距离。选取轮对基点处的数据,将第一个传感器的数据值定义为 $y_1$ ,第二个传感器的数据值定义为 $y'_1$ ,虽然不知道其横坐标具体的值,但两者的横坐标值正好相差 $b$ ,如图2所示。

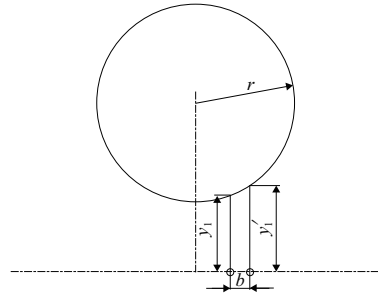


图2 轮对通过传感器示意图

在MATLAB中求出2条拟合曲线的表达式,并在第1条曲线中求出当 $y=y_1$ 时 $x$ 的值,此时求出的值为2个,选取较小的那一个,规定其为 $x_1$ 。之后将第一条曲线正常显示,第二条曲线横坐标统一增加 $x_1$ ,即第二条曲线最前端对应第一条曲线的 $(x_1, y_1)$ ,2条曲线在MATLAB图像中水平距 $x_1$ ,但在真实的轮对上相距 $b$ 。

选取第一条曲线的第一个点 $(x_0, y_0)$ 作为第一对数据,第二个点 $(x_1, y_1)$ 作为第二对数据,以 $(x_1, y_1)$ 为基点画一条直线 $y=y_1$ ,求该直线与第二条曲线最近的一个交点,交点的横坐标定义为 $x_2$ ,并求出当 $x=x_2$ 时第一条曲线上的 $y$ 坐标 $y_2$ ,即可求出第三对数据 $(x_2, y_2)$ ,如图3所示。以此类推,求出所有满足条件的坐标点。

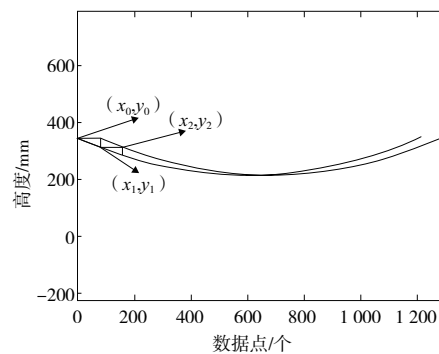


图3 轮对的两条曲线

由于2条曲线在真实的轮对上相距为 $b$ ,所以测出的数据点真正的坐标应为 $(0, y_0), (b, y_1), (2b, y_2)$ 等等。

最后使用最小二乘法对数据点进行拟合求圆,先假设某个点坐标为 $(x, y)$ ,拟合圆的圆心坐标为 $(x_0, y_0)$ ,其计算表达式为:

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=r^2 \quad (1)$$

$$-2xx_0-2yy_0+x_0^2+y_0^2-r^2=-x^2-y^2 \quad (2)$$

接着将表达式展开为矩阵形式,具体形式为

$$[x \ y \ 1] \begin{bmatrix} -2x_0 \\ -2y_0 \\ x_0^2+y_0^2-r^2 \end{bmatrix} = -x^2-y^2 \quad (3)$$

当存在多组数据时,矩阵可表示成 $Ax=B$ 的形式, $A$ 、

$x$ 、 $B$  的具体表述为

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2x_0 \\ -2y_0 \\ x_0^2 + y_0^2 - r^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1^2 - y_1^2 \\ -x_i^2 - y_i^2 \\ -x_n^2 - y_n^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过矩阵求解  $x=A/B$ , 即可求出行列式  $x$  的具体数值, 进而得到拟合圆的圆心坐标和半径值。

$$x_0 = -0.5 x_1 \quad (5)$$

$$y_0 = -0.5 y_1 \quad (6)$$

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - x_3} \quad (7)$$

### 3 现场试验

本测量装置在西南交通大学牵引动力国家重点实验室进行试验, 该实验室有标准铁路轨道, 且存在一个完好的转向架。

将设置好的测量装置安装于轨道内侧, 保证测量装置摆放平稳, 2 个激光位移传感器在同一水平线上, 不存在高度差。打开传感器开关, 观察两道激光线是否垂直于轨道面且彼此平行, 若不满足要求, 需对其进行调整。

测量装置安装完毕, 开启设备拖动转向架运行, 使轮对保持匀速通过该装置, 首先使激光器简单采集一定数量的数据, 导入 Origin 软件中进行检测, 若检测出的数据无任何问题, 则证明激光位移传感器工作正常, 之后再次开启设备拖动转向架运行, 使激光器采集完整的数据。

### 4 数据采集与计算

将第一次采集的验证数据导入 Origin 中, 如图 4 所示, 数据完整, 不存在缺失等问题, 证明激光位移传感器工作正常。

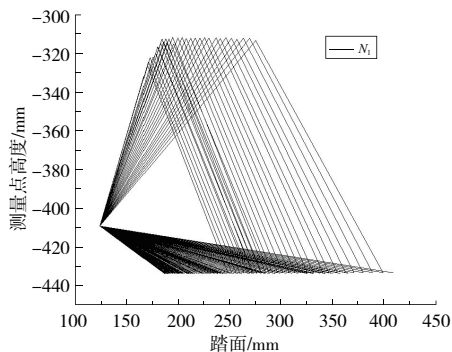


图 4 验证数据图

将第二次测量的完整数据导入 Origin 中, 相关数据表如图 5 所示。第一列数据表示第一个激光器检测到的车轮踏面激光点横向位移, 第二列数据表示第一个激光器检测到的车轮踏面激光点距离激光孔的垂直距离, 第三列数据表示第二个激光器检测到的车轮踏面激光点横向位移, 第四列数据表示第二个激光器检测到的车轮踏面激光点距离激光孔的垂直距离。第一列和第二列数据生成的图像如图 6 所示。

位置	A1(X1)	B1(Y1)	A2(X2)	B2(Y2)
1	-411.50602	113.44370	-412.04047	114.1105
2	-411.53109	113.777	-412.03117	114.2027
3	-411.57467	113.87336	-412.00352	114.30904
4	-411.59723	114.00919	-412.17089	114.47173
5	-411.56609	114.12847	-412.12495	114.60059
6	-411.58649	114.27833	-411.83791	114.89478
7	-411.47184	114.41512	-411.58186	114.98174
8	-411.48488	114.53652	-412.23036	114.99084
9	-411.51578	114.84723	-411.80752	115.25687
10	-411.51878	114.77172	-411.89822	115.43395
11	-411.42903	114.95453	-411.95085	115.37127
12	-411.40581	115.04386	-411.92744	115.75863
13	-411.40643	115.19055	-411.83390	115.88419
14	-411.43864	115.36389	-411.95191	115.88994
15	-411.47084	115.41487	-411.99028	116.00023
16	-411.50085	115.52587	-412.04419	116.21255
17	-411.49233	115.62529	-411.92542	116.46649
18	-411.37714	115.80597	-411.88889	116.58429
19	-411.37711	115.90587	-411.92640	116.72227
20	-411.38291	116.0017	-411.92071	116.82475
21	-411.37821	116.10044	-411.86587	116.86853
22	-411.30936	116.32178	-411.89413	117.23151
23	-411.34807	116.40807	-411.93613	117.24817
24	-411.33286	116.48389	-411.84886	117.24817

图 5 测量数据表

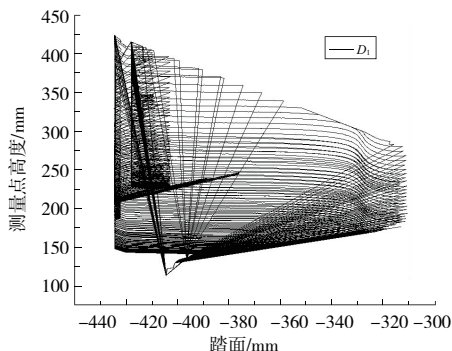


图 6 传感器检测到的车轮外形

轮对是车辆最重要的运动部件, 车轮与钢轨的接触部分称为踏面。踏面上距离车轮内侧面 70 mm 处为基点, 通过基点且垂直于车轴形成的圆为滚动圆, 滚动圆的直径即车轮踏面直径<sup>[7-8]</sup>, 如图 7 所示。

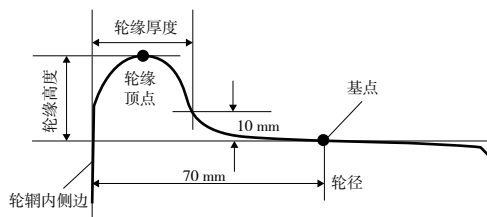


图 7 轮对主要几何参数

由于激光位移传感器检测到车轮内侧面在  $x$  方向的位置为  $[-433, -432]$ , 故选取在  $[-373, -372]$  处的数据, 以此计算列车车轮对滚动圆直径。

接着将选取的数据导入 MATLAB 中, 进行点的图像拟合, 最初的散点图与拟合出的曲线图如图 8 所示(本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

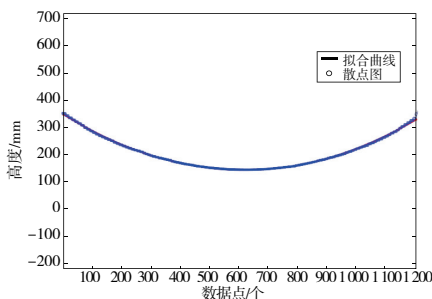


图 8 数据散点图与拟合曲线图

将另外一个传感器测量得出的数据同样拟合出曲线,此时2条曲线的纵坐标即表示列车轮对行驶过程中传感器打到轮对上的激光点到传感器的垂直距离,横坐标总长度为传感器测量数据的总点数,即每一个数据代表1个坐标。

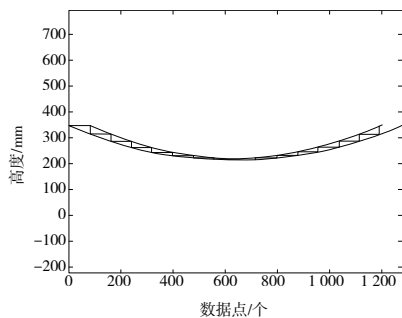


图9 求满足条件的坐标点

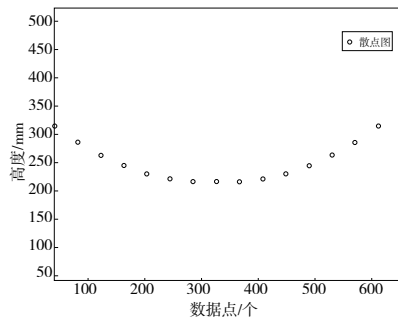


图10 数据点的散点图

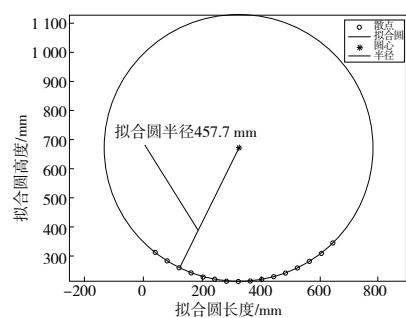


图11 拟合求圆

拟合圆的半径值为 457.7 mm,即求出的轮对踏面滚动圆半径值为 457.7 mm,直径值为 915.4 mm。列车轮对标准滚动圆直径为 915 mm,误差为+0.4 mm,可以满足误差要求。由于本次车轮已在实验室摆放一段时间,且几乎无保护措施,存在一定的受损,其滚动圆不是一条完美的圆形,有些许的误差;测量装置的摆放虽有保护设施,但仍易受轮对滚动、冲击、轨道环境等因素的影响出现两端高度、角度不对齐的情况<sup>[9]</sup>;除此之外还存在着传感器测量误差、定位误差等等,可针对这些误差,进一步完善测量装置,以提高测量精度。

## 5 结语

本文设计了一种基于激光位移传感器的通过式车轮踏面滚动圆直径测量装置。首先简要介绍了该测量装置的工作原理、需要用到的测量参数以及相关的流程图;然后介绍了数据产生的原理和处理数据的算法;接着通过试验采集数据,并根据相关算法计算得到滚动圆直径;最后将测量结果与实际值进行对比,并提出需要改进的地方,方便之后的二次开发和提高精度。通过本次的试验表明,该装置可以满足对列车轮对踏面滚动圆直径的测量需求,有很好的经济适用性,可以大规模生产。

通过上述算法的处理,得到实际意义上的轮对点坐标,如图9所示,之后将轮对点坐标提取出来,数据组成的散点图如图10所示。最后按照最小二乘法对数据进行圆的拟合,得到的计算结果如图11所示。

## 参考文献:

- [1] 聂天琦. 国外铁路交通事故调查现状综述及对我国的启示[J]. 中国安全科学学报,2018,28(增刊1):149-154.
- [2] 黄玉霖,杨凯,王黎,等. 便携式机车车辆踏面轮廓检测装置的发展[J]. 中国铁路,2005(2):24-26.
- [3] HE L. Health research of wheel-set based on data mining[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [4] 张海洋,王平,钱丽华. 激光测距仪在高速道岔钢轨断面测试中的应用研究[J]. 铁道建筑,2009,49(4):102-103.
- [5] 冯其波,杨婧,郑发家,等. 列车轮对几何参数与缺陷动态测量[J]. 计测技术,2018,38(3):120-129.
- [6] GAO Y, FENG Q B, CUI J Y. A simple method for dynamically measuring the diameters of train wheels using a one-dimensional laser displacement transducer[J]. Optics and Lasers in Engineering,2014,53:158-163.
- [7] 高岩. 轮对几何尺寸自动与动态在线测量方法的研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [8] 张志峰. 轮对几何参数在线动态测量方法与系统的研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
- [9] 刘章红,黎洋,付文强,等. 轮对扁疤动态冲击激励对车辆垂向振动特性的影响[J]. 机车电传动,2019(6):28-32.

收稿日期:2021-12-17