(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109353372 A
(43)申请公布日 2019.02.19

(21)申请号 201811009880.3

(22)申请日 2018.08.31

(71)申请人 南京理工大学
地址 210094 江苏省南京市孝陵卫200号

(72)发明人 李柄奎 邢宗义

(74)专利代理机构 南京理工大学专利中心 32203
代理人 薛云燕

(51)Int.Cl.
B61K 9/12(2006.01)

权利要求书3页 说明书11页 附图4页

(54)发明名称

一种有轨电车轮对尺寸在线监测系统及方法

(57)摘要

本发明公开了一种有轨电车轮对尺寸在线监测系统及方法。该系统包括沿两轨道中心线位置对称布置的第一～第七激光位移传感器R1～R7和第八～第十四激光位移传感器L1～L7。方法为:首先采集车轮踏面数据,并进行车轮数据分段;以第一～第五激光位移传感器R1～R5入射光线交点为原点,建立直角坐标系xoy,且x轴平行于轨道方向,y轴垂直于轨道方向,拟合圆并确定圆心和车轮直径D,计算车辆运行速度v,确定三组最佳踏面;最后计算轮缘参数,实现有轨电车车轮直径、轮缘宽度、轮缘厚度和轮缘高度的监测。本发明有轨电车轮对尺寸在线监测系统及方法,具有检测精度高、快速简便的优点。



CN 109353372 A

1.一种有轨电车轮对尺寸在线监测系统,其特征在于,包括沿两轨道中心线位置对称布置的第一～第七激光位移传感器(R1～R7)和第八～第十四激光位移传感器(L1～L7);

所述的第一～第五激光位移传感器(R1～R5)沿轨道方向依次均匀排列在电车行进方向轨道右侧的圆弧表面,且各激光位移传感器入射光线沿圆弧法线方向排列,各激光位移传感器所在圆弧表面与车轮圆周表面共面;第一激光位移传感器(R1)和第五激光位移传感器(R5)关于第三激光位移传感器(R3)对称安装,第二激光位移传感器(R2)和第四激光位移传感器(R4)关于第三激光位移传感器(R3)对称安装;第一激光位移传感器(R1)和第二激光位移传感器(R2)的水平距离为d_1,第二激光位移传感器(R2)和第三激光位移传感器(R3)的水平距离为d_2,第三激光位移传感器(R3)和第四激光位移传感器(R4)水平距离为d_3,第四激光位移传感器(R4)和第五激光位移传感器(R5)水平距离为d_4,第一～第五激光位移传感器(R1～R5)的激光投射角与水平面的夹角分别为α_1、α_2、α_3、α_4和α_5,第一～第五激光位移传感器(R1～R5)距离轨道的高度分别为h_1、h_2、h_3、h_4、h_5;第一～第五激光位移传感器(R1～R5)与轨道的垂直距离分别为d_5、d_6、d_7、d_8、d_9,且$d_5=d_6=d_7=d_8=d_9$;

所述的第六激光位移传感器(R6)和第七激光位移传感器(R7)对称分布在右侧轨道两侧,距离轨道的垂直距离分别为d_{10}和d_{11},且$d_{10}=d_{11}$;第六激光位移传感器(R6)和第七激光位移传感器(R7)的偏转角β_6和β_7分别为第六激光位移传感器(R6)和第七激光位移传感器(R7)的三角有效探测区域中心线与铅垂线的夹角,且$\beta_6=\beta_7$;

所述第八～第十四激光位移传感器(L1～L7)分别设置在与第一～第七激光位移传感器(R1～R7)关于轨道中心线对称的左侧。

2.根据权利要求1所述的有轨电车轮对尺寸在线监测系统,其特征在于,所述的第一～第五激光位移传感器(R1～R5)、第八～第十二激光位移传感器(L1～L5)为一维激光位移传感器,第六激光位移传感器(R6)、第七激光位移传感器(R7)、第十三激光位移传感器(L6)和第十四激光位移传感器(L7)为二维激光位移传感器。

3.一种有轨电车轮对尺寸在线监测方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,采集车轮踏面数据,并进行车轮数据分段;

步骤2,以第一～第五激光位移传感器(R1～R5)入射光线交点为原点,建立直角坐标系xoy,且x轴平行于轨道方向,y轴垂直于轨道方向,拟合圆并确定圆心和车轮直径D;

步骤3,计算车辆运行速度v;

步骤4,确定三组最佳踏面;

步骤5,计算轮缘参数,实现有轨电车车轮直径、轮缘宽度、轮缘厚度和轮缘高度的监测。

4.根据权利要求3所述的有轨电车轮对尺寸在线监测方法,其特征在于,步骤1所述的采集车轮踏面数据,并进行车轮数据分段,具体如下:

当列车经过系统检测区域时,第一～第五激光位移传感器(R1～R5)采集车轮踏面数据,当五个激光位移传感器均能有效采集车轮踏面数据时,则判定该组数据有效;当有至少一个激光位移传感器无法采集车轮踏面数据时,则判定该组数据无效。

5.根据权利要求3所述的有轨电车轮对尺寸在线监测方法,其特征在于,步骤2中所述的车轮直径D,通过以下公式确定:

车轮直径D为:

$$D=2R=\sqrt{a^2+b^2+4\cdot\frac{\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)+a\sum_{j=1}^{5}x_j+b\sum_{j=1}^{5}y_j}{5}}$$

其中，(x_1,y_1)、(x_2,y_2)、(x_3,y_3)、(x_4,y_4)和(x_5,y_5)分别为第一～第五激光位移传感器(R1～R5)入射光线与车轮踏面的交点t_1～t_5的坐标；

R为车轮半径，变量a和b由下式求得：

$$\begin{cases}a=\dfrac{CE-BF}{B^2-AE}\\ b=\dfrac{AF-BC}{B^2-AE}\end{cases}$$

$$A=5\sum_{j=1}^{5}x_j^2-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}x_j$$

$$B=5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}y_j$$

$$C=5\sum_{j=1}^{5}x_j^3+5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j^2-\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)\sum_{j=1}^{5}x_j$$

$$E=5\sum_{j=1}^{5}y_j^2-\sum_{j=1}^{5}y_j\sum_{j=1}^{5}y_j$$

$$F=5\sum_{j=1}^{5}x_j^2y_j+5\sum_{j=1}^{5}y_j^3-\sum_{j=1}^{5}(x_j{}^2+y_j^2)\sum_{j=1}^{5}y_j。$$

6.根据权利要求3所述的有轨电车轮对尺寸在线监测方法，其特征在于，步骤3所述的计算车辆运行速度v，具体如下：

车轮运行速度v为：

$$v=\frac{1}{n-1}\sum_{i=2}^{n}(p_i-p_{i-1})/\Delta t=\frac{f}{n-1}\sum_{i=2}^{n}(p_i-p_{i-1})$$

其中，n表示车轮直径有效检测的次数，p_i和p_{i-1}分别为i和i-1时刻车轮圆心横坐标，f为激光位移传感器采样频率，Δt表示车轮移动时间间隔。

7.根据权利要求3所述的有轨电车轮对尺寸在线监测方法，其特征在于，步骤4所述的确定三组最佳踏面，具体如下：

车轮圆心O_i到第七激光位移传感器(R7)激光光线的距离d_i为：

$$d_i=\frac{\left|\tan\alpha_7\cdot x_{O_i}-y_{O_i}\right|}{\sqrt{\tan^2\alpha_7+1}}$$

其中，α_7为第七激光传感器与水平面的夹角，$\left(x_{O_i},y_{O_i}\right)$为车轮圆心$O_i$的位置坐标；

选取距离d_i最小的三组车轮踏面轮廓作为最佳车轮踏面轮廓。

8.根据权利要求3所述的有轨电车轮对尺寸在线监测方法，其特征在于，步骤5所述的计算轮缘参数，实现有轨电车车轮直径、轮缘宽度、轮缘厚度和轮缘高度的监测，具体如下：

步骤5.1，坐标旋转；

将第六激光位移传感器(R6)和第七激光位移传感器(R7)采集的车轮踏面轮廓原始数据点分别进行坐标旋转,得到坐标系$u^{(6)}o^{(6)}v^{(6)}$、$u^{(7)}o^{(7)}v^{(7)}$下的坐标;

步骤5.2,踏面数据融合;

将第七激光位移传感器(R7)坐标系$u^{(7)}o^{(7)}v^{(7)}$作为基准坐标系uov,将第六激光位移传感器(R6)坐标系$u^{(6)}o^{(6)}v^{(6)}$融合到基准坐标系uov中;

步骤5.3,分段点曲线拟合;

将第六激光位移传感器(R6)和第七激光位移传感器(R7)经坐标旋转和踏面数据融合后,所得的车轮踏面轮廓离散数据点列进行曲率计算,并提取拐点、曲率极大值点和折痕点作为初始分段点,得到折痕点、拐点、曲率极值点;在车轮踏面轮廓曲线上确定基点,根据基点横坐标所处的区间,对该区间内车轮踏面轮廓离散数据点进行多项式曲线拟合,得到曲线拟合方程;

步骤5.4,特征点提取并计算轮缘参数。

9.根据权利要求8所述的有轨电车轮对尺寸在线监测方法,其特征在于,步骤5.4中所述的计算轮缘参数,包括轮缘宽度F_w、轮缘厚度F_t和轮缘高度F_h:

$F_w=u_l-u_a$

$F_t=u_b-u_a$

$$F_h=v_o-\overline{v_h}$$

式中,u_a为特征点a的横坐标值,u_b为特征点b的横坐标值,u_l为车轮内端面基准线l横坐标均值,$\overline{v_h}$为轮缘顶部纵坐标均值;车轮踏面轮廓线上与车轮内侧面基准线l相距57mm的点称为踏面基点,特征点a和b为车轮踏面轮廓线上与踏面基点垂直距离10mm处直线相交的点。

一种有轨电车轮对尺寸在线监测系统及方法

技术领域

[0001] 本发明属于城市轨道有轨电车轮对尺寸监测技术领域，特别是一种有轨电车轮对尺寸在线监测系统及方法。

背景技术

[0002] 轮对几何尺寸参数是衡量车轮状态好坏的重要指标，关系到有轨电车能否安全运行。车轮踏面磨耗不均匀导致的车轮多边形或不圆度会对轨道形成冲击，破坏轨道表面，并将轮轨冲击力传递给车厢，降低旅客乘坐舒适度。轮缘磨耗使轮缘宽度和轮缘厚度逐渐减小，车辆通过道岔或弯道时可能会出现轮缘崩裂缺损，造成脱轨事故。因此，及时有效准确掌握轮对状态对列车安全运行具有重要意义。为及时掌握轮对运行状态，有轨电车运营公司需要安排工人每天对轮对表面进行目视检测，每月对轮对进行几何尺寸参数检测。

[0003] 正常情况下，在车轮直径监测系统中，只需要通过采用三个传感器采集车轮数据。但由于车轮在运行过程中轮轨磨耗不均匀，导致车轮存在不圆度或多边形，圆上某个测量点存在畸变影响整个车轮直径测量准确性。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种方法简单、实时性好、精度高的有轨电车轮对尺寸在线监测系统及方法。

[0005] 实现本发明目的的技术解决方案是：一种有轨电车轮对尺寸在线监测系统，包括沿两轨道中心线位置对称布置的第一～第七激光位移传感器R1～R7和第八～第十四激光位移传感器L1～L7；

[0006] 所述的第一～第五激光位移传感器R1～R5沿轨道方向依次均匀排列在电车行进方向轨道右侧的圆弧表面，且各激光位移传感器入射光线沿圆弧法线方向排列，各激光位移传感器所在圆弧表面与车轮圆周表面共面；第一激光位移传感器R1和第五激光位移传感器R5关于第三激光位移传感器R3对称安装，第二激光位移传感器R2和第四激光位移传感器R4关于第三激光位移传感器R3对称安装；第一激光位移传感器R1和第二激光位移传感器R2的水平距离为d_1，第二激光位移传感器R2和第三激光位移传感器R3的水平距离为d_2，第三激光位移传感器R3和第四激光位移传感器R4水平距离为d_3，第四激光位移传感器R4和第五激光位移传感器R5水平距离为d_4，第一～第五激光位移传感器R1～R5的激光投射角与水平面的夹角分别为α_1、α_2、α_3、α_4和α_5，第一～第五激光位移传感器R1～R5距离轨道的高度分别为h_1、h_2、h_3、h_4、h_5；第一～第五激光位移传感器R1～R5与轨道的垂直距离分别为d_5、d_6、d_7、d_8、d_9，且$d_5=d_6=d_7=d_8=d_9$；

[0007] 所述的第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7对称分布在右侧轨道两侧，距离轨道的垂直距离分别为d_{10}和d_{11}，且$d_{10}=d_{11}$；第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7的偏转角β_6和β_7分别为第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7的三角有效探测区域中心线与铅垂线的夹角，且$\beta_6=\beta_7$；

[0008] 所述第八～第十四激光位移传感器L1～L7分别设置在与第一～第七激光位移传感器R1～R7关于轨道中心线对称的左侧。

[0009] 进一步地，所述的第一～第五激光位移传感器R1～R5、第八～第十二激光位移传感器L1～L5为一维激光位移传感器，第六激光位移传感器R6、第七激光位移传感器R7、第十三激光位移传感器L6和第十四激光位移传感器L7为二维激光位移传感器。

[0010] 一种有轨电车轮对尺寸在线监测方法，包括以下步骤：

[0011] 步骤1，采集车轮踏面数据，并进行车轮数据分段；

[0012] 步骤2，以第一～第五激光位移传感器R1～R5入射光线交点为原点，建立直角坐标系xoy，且x轴平行于轨道方向，y轴垂直于轨道方向，拟合圆并确定圆心和车轮直径D；

[0013] 步骤3，计算车辆运行速度v；

[0014] 步骤4，确定三组最佳踏面；

[0015] 步骤5，计算轮缘参数，实现有轨电车车轮直径、轮缘宽度、轮缘厚度和轮缘高度的监测。

[0016] 进一步地，步骤1所述的采集车轮踏面数据，并进行车轮数据分段，具体如下：

[0017] 当列车经过系统检测区域时，第一～第五激光位移传感器R1～R5采集车轮踏面数据，当五个激光位移传感器均能有效采集车轮踏面数据时，则判定该组数据有效；当有至少一个激光位移传感器无法采集车轮踏面数据时，则判定该组数据无效。

[0018] 进一步地，步骤2中所述的车轮直径D，通过以下公式确定：

[0019] 车轮直径D为：

[0020] $$D=2R=\sqrt{a^2+b^2+4\cdot\frac{\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)+a\sum_{j=1}^{5}x_j+b\sum_{j=1}^{5}y_j}{5}}$$

[0021] 其中，(x_1,y_1)、(x_2,y_2)、(x_3,y_3)、(x_4,y_4)和(x_5,y_5)分别为第一～第五激光位移传感器R1～R5入射光线与车轮踏面的交点t_1～t_5的坐标；

[0022] R为车轮半径，变量a和b由下式求得：

[0023] $$\begin{cases}a=\dfrac{CE-BF}{B^2-AE}\\ b=\dfrac{AF-BC}{B^2-AE}\end{cases}$$

[0024] $$A=5\sum_{j=1}^{5}x_j^2-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}x_j$$

[0025] $$B=5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}y_j$$

[0026] $$C=5\sum_{j=1}^{5}x_j^3+5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j^2-\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)\sum_{j=1}^{5}x_j$$

[0027] $$E=5\sum_{j=1}^{5}y_j^2-\sum_{j=1}^{5}y_j\sum_{j=1}^{5}y_j$$

[0028] $$F=5\sum_{j=1}^{5}x_j^2y_j+5\sum_{j=1}^{5}y_j^3-\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)\sum_{j=1}^{5}y_j$$ 。

[0029] 进一步地，步骤3所述的计算车辆运行速度v，具体如下：

[0030] 车轮运行速度v为：

[0031] $$v=\frac{1}{n-1}\sum_{i=2}^{n}(p_i-p_{i-1})/\Delta t=\frac{f}{n-1}\sum_{i=2}^{n}(p_i-p_{i-1})$$

[0032] 其中，n表示车轮直径有效检测的次数，p_i和p_{i-1}分别为i和i-1时刻车轮圆心横坐标，f为激光位移传感器采样频率，Δt表示车轮移动时间间隔。

[0033] 进一步地，步骤4所述的确定三组最佳踏面，具体如下：

[0034] 车轮圆心O_i到第七激光位移传感器R7激光光线的距离d_i为：

[0035] $$d_i=\frac{\left|\tan\alpha_7\cdot x_{O_i}-y_{O_i}\right|}{\sqrt{\tan^2\alpha_7+1}}$$

[0036] 其中，α_7为第七激光传感器与水平面的夹角，$\left(x_{O_i},y_{O_i}\right)$为车轮圆心$O_i$的位置坐标；

[0037] 选取距离d_i最小的三组车轮踏面轮廓作为最佳车轮踏面轮廓。

[0038] 进一步地，步骤5所述的计算轮缘参数，实现有轨电车车轮直径、轮缘宽度、轮缘厚度和轮缘高度的监测，具体如下：

[0039] 步骤5.1，坐标旋转；

[0040] 将第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7采集的车轮踏面轮廓原始数据点分别进行坐标旋转，得到坐标系$u^{(6)}o^{(6)}v^{(6)}$、$u^{(7)}o^{(7)}v^{(7)}$下的坐标；

[0041] 步骤5.2，踏面数据融合；

[0042] 将第七激光位移传感器R7坐标系$u^{(7)}o^{(7)}v^{(7)}$作为基准坐标系uov，将第六激光位移传感器R6坐标系$u^{(6)}o^{(6)}v^{(6)}$融合到基准坐标系uov中；

[0043] 步骤5.3，分段点曲线拟合；

[0044] 将第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7经坐标旋转和踏面数据融合后，所得的车轮踏面轮廓离散数据点列进行曲率计算，并提取拐点、曲率极大值点和折痕点作为初始分段点，得到折痕点、拐点、曲率极值点；在车轮踏面轮廓曲线上确定基点，根据基点横坐标所处的区间，对该区间内车轮踏面轮廓离散数据点进行多项式曲线拟合，得到曲线拟合方程；

[0045] 步骤5.4，特征点提取并计算轮缘参数。

[0046] 进一步地，步骤5.4中所述的计算轮缘参数，包括轮缘宽度F_w、轮缘厚度F_t和轮缘高度F_h：

[0047] $F_w=u_l-u_a$

[0048] $F_t=u_b-u_a$

[0049] $$F_h=v_o-\overline{v_h}$$

[0050] 式中，u_a为特征点a的横坐标值，u_b为特征点b的横坐标值，u_l为车轮内端面基准线l横坐标均值，$\overline{v_h}$为轮缘顶部纵坐标均值；车轮踏面轮廓线上与车轮内侧面基准线l相距57mm的点称为踏面基点，特征点a和b为车轮踏面轮廓线上与踏面基点垂直距离10mm处直线相交

的点。

[0051] 本发明与现有技术相比，其显著优点是：(1)实现了有轨电车轮对尺寸在线监测，能够全天候在线监测；(2)降低了车轮不圆度和传感器随机测量误差带来的影响，测量数据更为精确；(3)检测方法简单易行。

附图说明

[0052] 图1为本发明有轨电车轮对尺寸监测系统中各激光位移传感器布设图。

[0053] 图2为本发明第一～第五激光位移传感器R1～R5布置示意图。

[0054] 图3为本发明一种有轨电车轮对尺寸监测方法的流程示意图。

[0055] 图4为本发明中车轮直径计算原理图。

[0056] 图5为本发明中不同时刻车轮圆心到第七激光位移传感器R7激光光线的距离图。

[0057] 图6为本发明中激光位移传感器坐标旋转示意图。

[0058] 图7为本发明中车轮外形踏面轮廓曲线图。

具体实施方式

[0059] 下面结合附图对本发明作进一步的详细说明。

[0060] 结合图1～2，本发明一种有轨电车轮对尺寸监测系统，包括沿两轨道中心线位置对称布置的第一～第七激光位移传感器R1～R7和第八～第十四激光位移传感器L1～L7；

[0061] 所述的第一～第五激光位移传感器R1～R5沿轨道方向依次均匀排列在电车行进方向轨道右侧的圆弧表面，且各激光位移传感器入射光线沿圆弧法线方向排列，各激光位移传感器所在圆弧表面与车轮圆周表面共面；第一激光位移传感器R1和第五激光位移传感器R5关于第三激光位移传感器R3对称安装，第二激光位移传感器R2和第四激光位移传感器R4关于第三激光位移传感器R3对称安装；第一激光位移传感器R1和第二激光位移传感器R2的水平距离为d_1，第二激光位移传感器R2和第三激光位移传感器R3的水平距离为d_2，第三激光位移传感器R3和第四激光位移传感器R4水平距离为d_3，第四激光位移传感器R4和第五激光位移传感器R5水平距离为d_4，第一～第五激光位移传感器R1～R5的激光投射角与水平面的夹角分别为α_1、α_2、α_3、α_4和α_5，第一～第五激光位移传感器R1～R5距离轨道的高度分别为h_1、h_2、h_3、h_4、h_5；第一～第五激光位移传感器R1～R5与轨道的垂直距离分别为d_5、d_6、d_7、d_8、d_9，且$d_5=d_6=d_7=d_8=d_9=120mm$；

[0062] 所述的第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7对称分布在右侧轨道两侧，距离轨道的垂直距离分别为d_{10}和d_{11}，且$d_{10}=d_{11}$；第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7的偏转角β_6和β_7分别为第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7的三角有效探测区域中心线与铅垂线的夹角，且$\beta_6=\beta_7=40.5°$；

[0063] 所述第八～第十四激光位移传感器L1～L7分别设置在与第一～第七激光位移传感器R1～R7关于轨道中心线对称的左侧。

[0064] 进一步地，所述的第一～第五激光位移传感器R1～R5、第八～第十二激光位移传感器L1～L5为一维激光位移传感器，第六激光位移传感器R6、第七激光位移传感器R7、第十三激光位移传感器L6和第十四激光位移传感器L7为二维激光位移传感器。

[0065] 结合图3，本发明有轨电车轮对尺寸监测方法，包括以下步骤：

[0066] 步骤1，采集车轮踏面数据，并进行车轮数据分段；

[0067] 当列车经过系统检测区域时，第一～第五激光位移传感器R1～R5采集车轮踏面数据，当五个传感器均能有效采集车轮踏面数据时，则判定该组数据有效；当有至少一个传感器无法采集车轮踏面数据时，则判定该组数据无效。

[0068] 步骤2，以第一～第五激光位移传感器R1～R5入射光线交点为原点，建立直角坐标系xoy，且x轴平行于轨道方向，y轴垂直于轨道方向，拟合圆并确定圆心和车轮直径D；

[0069] 结合图4，以第一～第五激光位移传感器R1～R5入射光线交点为原点，建立直角坐标系xoy，且x轴平行于轨道方向，y轴垂直于轨道方向；t_1～t_5分别为第一～第五激光位移传感器R1～R5入射光线与车轮踏面的交点，l_1～l_5分别为第一～第五激光位移传感器R1～R5到车轮踏面基点的距离，α_1～α_5分别为第一～第五激光位移传感器R1～R5激光投射角，且$\alpha_1=\alpha_5$，$\alpha_3=90°$，$\alpha_2=\alpha_4=0.25\pi+0.5\alpha_1$。记第一～第五激光位移传感器R1～R5在当前坐标系的坐标分别为(x_{R1},y_{R1})、(x_{R2},y_{R2})、(x_{R3},y_{R3})、(x_{R4},y_{R4})和(x_{R5},y_{R5})，记第一～第五激光位移传感器R1～R5入射光线与车轮踏面的交点t_1～t_5坐标为(x_1,y_1)、(x_2,y_2)、(x_3,y_3)、(x_4,y_4)和(x_5,y_5)，则点t_1～t_5的坐标可以分别表示为：

[0070] $$\begin{cases} x_1 = x_{R1} + l_1\cos\alpha_1 \\ y_1 = y_{R1} + l_1\sin\alpha_1 \end{cases} \quad (1)$$

[0071] $$\begin{cases} x_2 = x_{R2} + l_2\cos\alpha_2 \\ y_2 = y_{R2} + l_2\sin\alpha_2 \end{cases} \quad (2)$$

[0072] $$\begin{cases} x_3 = x_{R3} + l_3\cos\alpha_3 \\ y_3 = y_{R3} + l_3\sin\alpha_3 \end{cases} \quad (3)$$

[0073] $$\begin{cases} x_4 = x_{R4} - l_4\cos\alpha_4 \\ y_4 = y_{R4} + l_4\sin\alpha_4 \end{cases} \quad (4)$$

[0074] $$\begin{cases} x_5 = x_{R5} - l_5\cos\alpha_5 \\ y_5 = y_{R5} + l_5\sin\alpha_5 \end{cases} \quad (5)$$

[0075] 通过已知圆上五点(x_1,y_1)、(x_2,y_2)、(x_3,y_3)、(x_4,y_4)和(x_5,y_5)，使用最小二乘拟合圆求解车轮圆心和车轮半径：

[0076] 设拟合圆的一般方程为：

[0077] $x^2+y^2+ax+by+c=0$ (6)

[0078] 因此圆心为$(-\frac{a}{2},-\frac{b}{2})$，半径$R=\frac{1}{2}\sqrt{a^2+b^2-4c}$；

[0079] 点t_j到车轮圆心O_1距离d_j的平方与车轮半径的平方差值δ_j为：

[0080] $$\delta_j = d_j^{\,2} - R^2 = (x_j-(-\frac{a}{2}))^2 + (y_j-(-\frac{b}{2}))^2 - R^2 = x_j^2 + y_j^2 + ax_j + by_j + c \quad (7)$$

[0081] 记Q(a,b,c)为δ_j平方之和，则推导圆的一般方程就转化为求取变量a、b和c的值，使函数Q(a,b,c)最小：

[0082] $$Q(a,b,c) = \sum_{j=1}^{5}\delta_j^2 = \sum_{j=1}^{5}(x_j^2 + ax_j + y_j^2 + by_j + c)^2 \quad (8)$$

[0083] 对函数Q(a,b,c)中变量a、b和c分别求偏导，且Q(a,b,c)取极值时满足以下等式：

[0084] $$\frac{\partial Q(a,b,c)}{\partial a}=\sum_{j=1}^{5}2(x_j^2+ax_j+y_j^2+by_j+c)x_j=0 \quad (9)$$

[0085] $$\frac{\partial Q(a,b,c)}{\partial b}=\sum_{j=1}^{5}2(x_j^2+ax_j+y_j^2+by_j+c)y_j=0 \quad (10)$$

[0086] $$\frac{\partial Q(a,b,c)}{\partial c}=\sum_{j=1}^{5}2(x_j^2+ax_j+y_j^2+by_j+c)=0 \quad (11)$$

[0087] 为了消除变量c，将式(9)*5-(11)*$\sum_{j=1}^{5}x_j$化简可以得到：

[0088]
$$\left(5\sum_{j=1}^{5}x_j^2-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}x_j\right)a+\left(5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}y_j\right)b+5\sum_{j=1}^{5}x_j^3+5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j^2-\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)\sum_{j=1}^{5}x_j=0 \quad (12)$$

[0089] 将式$(10)*5-(11)*\sum_{j=1}^{5}y_j$化简可以得到：

[0090]
$$\left(5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}y_j\right)a+\left(5\sum_{j=1}^{5}y_j^2-\sum_{j=1}^{5}y_j\sum_{j=1}^{5}y_j\right)b+5\sum_{j=1}^{5}x_j^2y_j+5\sum_{j=1}^{5}y_j^3-\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)\sum_{j=1}^{5}y_j=0 \quad (13)$$

[0091] 设定：

$$A=5\sum_{j=1}^{5}x_j^2-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}x_j$$

$$B=5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j-\sum_{j=1}^{5}x_j\sum_{j=1}^{5}y_j$$

[0092] $$C=5\sum_{j=1}^{5}x_j^3+5\sum_{j=1}^{5}x_jy_j^2-\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)\sum_{j=1}^{5}x_j \quad (14)$$

$$E=5\sum_{j=1}^{5}y_j^2-\sum_{j=1}^{5}y_j\sum_{j=1}^{5}y_j$$

$$F=5\sum_{j=1}^{5}x_j^2y_j+5\sum_{j=1}^{5}y_j^3-\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)\sum_{j=1}^{5}y_j$$

[0093] 联立式(12)～(14)，可列出关于变量a和b的二元一次方程为：

[0094] $$\begin{cases}Aa+Bb+C=0\\Ba+Eb+F=0\end{cases} \quad (15)$$

[0095] 求解式(15)可得：

[0096] $$\begin{cases}a=\dfrac{CE-BF}{B^2-AE}\\b=\dfrac{AF-BC}{B^2-AE}\end{cases} \quad (16)$$

[0097] 因此，车轮直径D为：

[0098] $$D=2R=\sqrt{a^2+b^2+4\cdot\frac{\sum_{j=1}^{5}(x_j^2+y_j^2)+a\sum_{j=1}^{5}x_j+b\sum_{j=1}^{5}y_j}{5}} \quad (17)$$

[0099] 步骤3,计算车辆运行速度v;具体如下:

[0100] 根据计算的车轮直径所在圆圆心和直径,结合图5车轮圆心在不同时刻移动示意图,O_1、O_2和O_3分别为不同时刻车轮圆心坐标,记O_1、O_2和O_3的坐标分别为(p_1,q_1)、(p_2,q_2)和(p_3,q_3),车轮移动时间间隔Δt由激光位移传感器采样频率决定,因此,车轮运行速度v可以通过$v=(p_1-p_2)/\Delta t=(p_1-p_2)\cdot f$或$v=(p_2-p_3)\cdot f$计算得到,将车轮速度多次检测结果取均值,车轮运行速度:

[0101] $$v=\frac{1}{n-1}\sum_{i=2}^{n}(p_i-p_{i-1})/\Delta t=\frac{f}{n-1}\sum_{i=2}^{n}(p_i-p_{i-1}) \quad (18)$$

[0102] 式中,n表示车轮直径有n次有效检测,p_i和p_{i-1}分别为i和i-1时刻车轮圆心横坐标,f为激光位移传感器采样频率。

[0103] 步骤4,确定三组最佳踏面;

[0104] 结合图5,车轮圆心O_i到第七激光位移传感器R7激光光线的距离d_i为:

[0105] $$d_i=\frac{\left|\tan\alpha_7\cdot x_{O_i}-y_{O_i}\right|}{\sqrt{\tan^2\alpha_7+1}} \quad (19)$$

[0106] 其中,α_7为第七激光传感器与水平面的夹角,$\left(x_{O_i},y_{O_i}\right)$为车轮圆心$O_i$的位置坐标;

[0107] 车轮圆心O_i到第七激光位移传感器R7激光光线的距离d_i越小,说明车轮圆心越接近激光光线,通过取距离d_i最小的三次车轮踏面轮廓作为最佳车轮踏面轮廓。

[0108] 步骤5,计算轮缘参数,实现有轨电车车轮直径、轮缘宽度、轮缘厚度和轮缘高度的监测,具体如下:

[0109] 步骤5.1,坐标旋转;

[0110] 结合图6的激光位移传感器坐标旋转示意图,由于第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7基于自身坐标系采集车轮踏面轮廓数据,因此需要通过坐标旋转实现激光位移传感器自身坐标系xoy到基准坐标系uov的转换。将第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7采集的车轮踏面轮廓原始数据点分别按照式(20)和(21)进行坐标旋转:

[0111] $$\begin{cases}u_n^{(6)}=\sqrt{(x_n^{(6)})^2+(y_n^{(6)})^2}\sin(\beta_6+\theta_6)=x_n^{(6)}\cos\beta_6+y_n^{(6)}\sin\beta_6\\ v_n^{(6)}=\sqrt{(x_n^{(6)})^2+(y_n^{(6)})^2}\cos(\beta_6+\theta_6)=y_n^{(6)}\cos\beta_6-x_n^{(6)}\sin\beta_6\end{cases} \quad (20)$$

[0112] $$\begin{cases}u_n^{(7)}=\sqrt{(x_n^{(7)})^2+(y_n^{(2)})^2}\sin(\theta_7-\beta_7)=x_n^{(7)}\cos\beta_7-y_n^{(7)}\sin\beta_7\\ v_n^{(7)}=\sqrt{(x_n^{(7)})^2+(y_n^{(7)})^2}\cos(\theta_7-\beta_7)=x_n^{(7)}\sin\beta_7+y_n^{(7)}\cos\beta_7\end{cases} \quad (21)$$

[0113] 式中,β_6和β_7分别为第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7的偏转角,均为正值,$(x_n^{(6)},x_n^{(6)})$和$(x_n^{(7)},x_n^{(7)})$分别为第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7采集的车轮踏面轮廓原始数据点在自身坐标系下的坐标,n表示激光位移传感器采集的某一帧数据的第n个点,$(u_n^{(6)},v_n^{(6)})$为第六激光位移传感器R6采集的车轮踏面轮廓原始数据点经

坐标旋转后在坐标系$u^{(6)}o^{(6)}v^{(6)}$下的坐标，$(u_n^{(7)},v_n^{(7)})$为第七激光位移传感器R7采集的车轮踏面轮廓原始数据点经坐标旋转后在坐标系$u^{(7)}o^{(7)}v^{(7)}$下的坐标。

[0114] 步骤5.2，踏面数据融合；

[0115] 将第七激光位移传感器R7坐标系$u^{(7)}o^{(7)}v^{(7)}$作为基准坐标系uov，将第六激光位移传感器R6坐标系$u^{(6)}o^{(6)}v^{(6)}$融合到基准坐标系uov中，踏面数据融合公式为：

[0116] $$\begin{aligned} u_n &= u_n^{(7)} \qquad u_n = u_n^{(6)} + \Delta u \\ v_n &= v_n^{(7)} \qquad v_n = v_n^{(6)} + \Delta v \end{aligned} \tag{22}$$

[0117] 式中，(u_n,v_n)为车轮踏面数据融合后基准坐标系上的点，Δu为第六激光位移传感器R6坐标系$u^{(6)}o^{(6)}v^{(6)}$相对于基准坐标系uov沿u轴的偏移量，Δv为第六激光位移传感器R6坐标系$u^{(6)}o^{(6)}v^{(6)}$相对于基准坐标系uov沿v轴的偏移量。

[0118] 步骤5.3，分段点曲线拟合；

[0119] 1)初始分段点提取

[0120] 第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7采集的车轮踏面轮廓离散数据点经过坐标旋转和踏面数据融合后，得到基准坐标系下车轮踏面数据点$\{z_1,z_2,z_3,\cdots z_m\}$，其中m为第六激光位移传感器R6与第七激光位移传感器R7采集的点数之和。根据圆弧估算法计算车轮踏面数据点$\{z_1,z_2,z_3,\cdots z_m\}$离散曲率为$\{k_1,k_3,\cdots k_m\}$。

[0121] $$k_i = \frac{2S_{\Delta z_{i-1}z_iz_{i+1}}}{l_{i1}l_{i2}l_{i3}} \tag{23}$$

[0122] 式中，l_{i1}为点z_{i-1}与点z_i之间的长度，l_{i2}为点z_i与点z_{i+1}之间的长度，l_{i3}为点z_{i-1}与点z_{i+1}之间的长度，S为点z_{i-1}、z_i和z_{i+1}构成的三角形的有向面积，且当点z_{i-1}、z_i和z_{i+1}顺时针排列为负，逆时针排列为正。

[0123] (a)拐点提取

[0124] 第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7踏面数据融合后的离散数据点z_i及其周边的点的离散曲率需同时满足以下条件：

[0125] ①$k_ik_{i+1}<0$；

[0126] ②k_{i-1}和k_i同号，k_{i+1}和k_{i+2}同号；

[0127] 若$|k_i|\leqslant|k_{i+1}|$，则z_i为拐点，若$|k_i|>|k_{i+1}|$，则z_{i+1}为拐点。

[0128] (b)曲率极值点提取

[0129] 选取车轮踏面轮廓离散数据点列$\{z_1,z_2,z_3,\cdots z_m\}$中离散曲率最大点$z_{i0}$作为曲率极值点的备选点，以$z_{i0}$点为中心点对周边的点进行聚类，将与$z_{i0}$点水平距离为3mm以内且与$z_{i0}$点离散曲率同号的点作为$z_{i0}$的凝聚点集。若该凝聚点集有1～3点，则判定$z_{i0}$点为曲率极值点，否则将该点去除，判定该点为无效分段点。

[0130] 同理，选取车轮踏面轮廓离散数据点列中$\{z_1,z_2,z_3,\cdots z_m\}$离散曲率最小点$z_{i1}$作为极值点的备选点，将与$z_{i1}$点水平距离为3mm以内且与$z_{i1}$点离散曲率同号的点作为$z_{i1}$的凝聚点集。若该凝聚点集有1～3点，则判定$z_{i1}$点为曲率极值点，否则将该点去除，判定该点为无效分段点。

[0131] (c)折痕点提取

[0132] 第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7踏面数据融合后的离散数据点

z_i及其周边点的曲率满足以下条件之一：

[0133] ①$|k_{i-2}|$、$|k_{i-1}|$和$|k_i|$都小于0.01，$|k_{i+1}|$、$|k_{i+2}|$和$|k_{i+3}|$都大于0.01；

[0134] ②$|k_{i-2}|$、$|k_{i-1}|$和$|k_i|$都大于0.01，$|k_{i+1}|$、$|k_{i+2}|$和$|k_{i+3}|$都小于0.01；

[0135] 若$|k_i| \leqslant |k_{i+1}|$，则$z_i$为折痕点，若$|k_i| > |k_{i+1}|$，则$z_{i+1}$为折痕点。

[0136] 将提取的拐点、曲率极值点和折痕点作为初始分段点。

[0137] 2)曲线拟合

[0138] 以较小初始分段点作为分段区间左值，较大初始分段点作为分段区间右值，对区间内的车轮踏面轮廓离散数据点进行最小二乘多项式拟合，n次多项式表达式如下：

[0139] $p_n(u) = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + \cdots + a_n u^n$ (24)

[0140] 式中，$a_0, a_1, a_2 \cdots a_n$为多项式各项系数。

[0141] 最小二乘多项式拟合原理是找到多项式各项系数$a_0, a_1, a_2 \cdots a_n$使得式(24)最小，进而得到多项式拟合方程$p_n(u)$。

[0142] $$Q = \sum_{i=1}^{m} (p_n(u_i) - v_i)^2 \quad (25)$$

[0143] 3)精确分段点提取

[0144] 以较小初始分段点作为分段区间左值，较大初始分段点作为分段区间右值，对区间内的车轮踏面轮廓数据点进行曲线拟合，但由于车轮磨耗的不确定性和复杂性，拟合的效果有时并不是很理想，此时需要根据拟合优度对曲线拟合的效果进行评价。拟合优度R^2定义如下：

[0145] $$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (26)$$

[0146] 式中，SSE为残差平方和，SST为总离差平方和。SSE和SST定义如下：

[0147] $$SSE = \sum_{i=1}^{m} (p(u_i) - v_i)^2 \quad (27)$$

[0148] $$SST = \sum_{i=1}^{m} (p(u_i) - \bar{v})^2 \quad (28)$$

[0149] R^2大小越接近1表示曲线拟合效果越好，R^2大小越接近0表示曲线拟合效果越差。假定拟合优度阈值为ξ，则将拟合优度R^2与ξ比较，若R^2大于ξ，则确定该初始分段点为精确分段点，若R^2小于ξ，则当前分段区间的右初始分段点不是精确分段点，则将右分段点向前移动δ，则移动后的右分段点为初始分段点。

[0150] 4)完整车轮踏面轮廓曲线拟合

[0151] 将第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7经坐标旋转和踏面融合后的车轮踏面轮廓离散数据点列进行曲率计算，并提取拐点、曲率极大值点和折痕点作为初始分段点，得到折痕点、拐点、曲率极值点。根据多次现场实验分析，拟合优度阈值ξ设为0.95、移动距离δ设为0.5能够满足车轮踏面轮廓曲线拟合自动分段点要求。

[0152] 由于车轮端面在轮轨磨耗时极少发生变化，因此在进行车轮踏面曲线拟合时先对车轮内端面基准线l进行提取，提取点列$\{z_1, z_2, z_3, \cdots z_m\}$中横坐标满足式(29)的点。

[0153] $|u_{i+1} - u_i| \leqslant 0.05$ (29)

[0154] 将点列$\{z_1, z_2, z_3, \cdots z_m\}$中所有满足式(29)的点的横坐标取均值记为q，则车轮内

端面基准线l方程为：

[0155] $u=q$ (30)

[0156] 根据轮对尺寸定义，在车轮踏面轮廓曲线上距离车轮内端面基准线57mm处确定基点，则根据基点横坐标所处的区间，对该区间内车轮踏面轮廓离散数据点进行多项式曲线拟合，获得曲线拟合方程。

[0157] 步骤5.4，特征点提取并计算轮缘参数。

[0158] 结合图7，根据分段点自动提取的车轮踏面曲线拟合方法获得车轮踏面轮廓曲线，并由轮对尺寸几何关系提取轮缘特征点a和b的横纵坐标、车轮内端面基准线l直线方程以及轮缘顶部纵坐标均值，进而计算得到轮缘宽度F_w、轮缘厚度F_t和轮缘高度F_h：

[0159] $F_w=u_l-u_a$ (31)

[0160] $F_t=u_b-u_a$ (32)

[0161] $$F_h=v_o-\overline{v_h} \quad (33)$$

[0162] 式中，u_a为特征点a的横坐标值，u_b为特征点b的横坐标值，u_l为车轮内端面基准线l横坐标均值，$\overline{v_h}$为轮缘顶部纵坐标均值。车轮踏面轮廓线上与车轮内侧面基准线l相距57mm的点称为踏面基点，特征点a和b为车轮踏面轮廓线上与踏面基点垂直距离10mm处直线相交的点。

[0163] 实施例1

[0164] 本实施例采用的是某地铁公司有轨电车在线监测系统，在列车运行速度为3km/h、第六激光位移传感器R6和第七激光位移传感器R7采样频率为100Hz以及车轮有效采集帧数为10帧情况下，第一～第七激光位移传感器R1～R7所输出的数据，其中二维传感器选择基恩士ly7300，一维激光位移传感器选择OPTIMESS。按照本发明有轨电车轮对尺寸在线监测方法对得到的车轮踏面轮廓数据进行计算，计算得到19组车轮直径。根据车轮圆心到第七激光位移传感器R7激光光线距离最小值获取第9组、第10组和第11组作为最佳车轮踏面轮廓数据，并通过轮缘参数监测算法计算得到车轮轮缘宽度、轮缘厚度和轮缘高度，车轮直径结果如表1所示，轮缘参数仿真验证结果如表2所示。

[0165] 表1车轮直径仿真验证结果(mm)

[0166]

组数	1	2	3	4	5	6	7
车轮直径	600.007	600.006	600.005	600.004	600.005	600.004	600.004
组数	8	9	10	11	12	13	14
车轮直径	600.005	600.004	600.004	600.006	600.006	600.007	600.005
组数	15	16	17	18	19		
车轮直径	600.006	600.005	600.007	600.007	600.008		

[0167] 表2轮缘参数仿真验证结果(mm)

[0168]

组数	9	10	11
轮缘宽度	20.505	20.504	20.506
轮缘厚度	18.835	18.834	18.836
轮缘高度	22.006	22.002	22.007

[0169] 对表1中19组车轮直径取均值得到最终计算的车轮直径为600.006mm，对

[0170] 表2中第9组、第10组和第11组三组最佳车轮踏面计算得到的轮缘参数取均值，得到最终的轮缘宽度为20.505mm、轮缘厚度为18.835mm、轮缘高度为22.005mm，与标准车轮车轮直径600mm、轮缘宽度20.5mm、轮缘厚度18.83mm和轮缘高度22mm相比，本发明有轨电车轮对尺寸在线监测系统及方法能够实现有轨电车轮对尺寸精确检测。

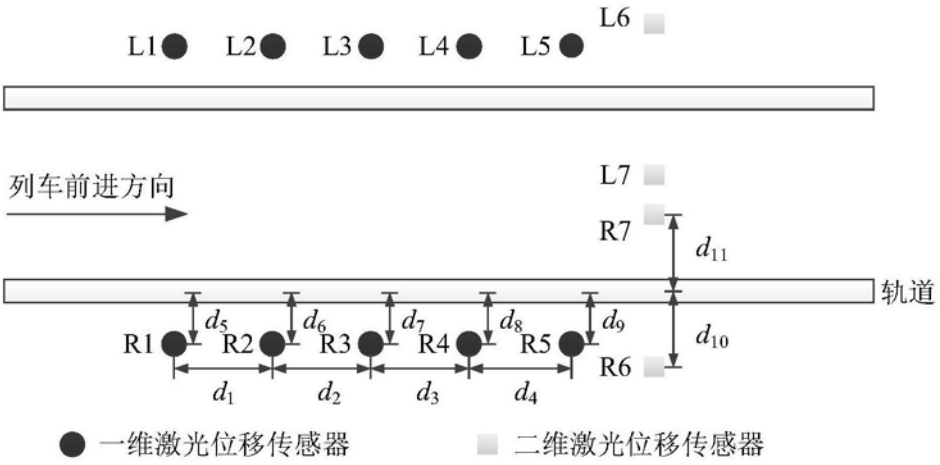

L1
L2
L3
L4
L5
L6
L7
R7
列车前进方向
轨道
R1
R2
R3
R4
R5
R6
d_1
d_2
d_3
d_4
d_5
d_6
d_7
d_8
d_9
d_{10}
d_{11}
一维激光位移传感器
二维激光位移传感器

图1

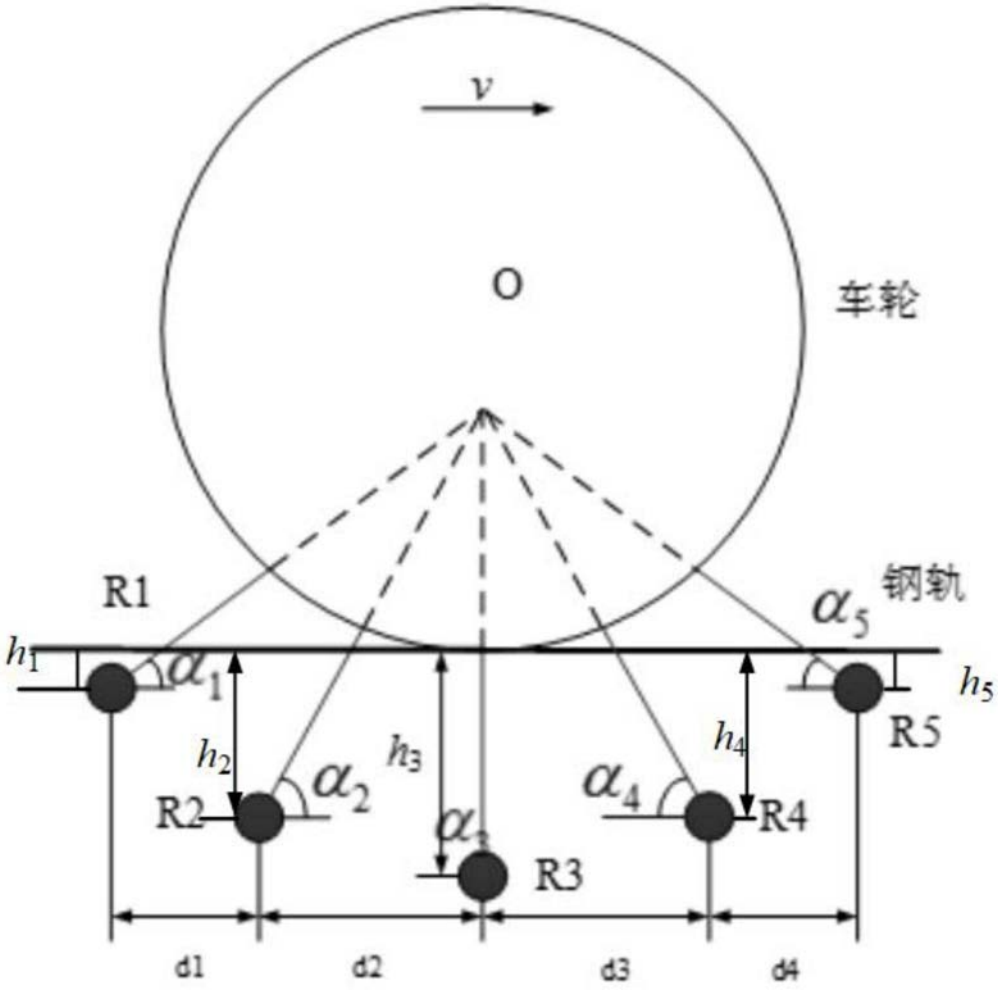

v
O
车轮
钢轨
R1
R2
R3
R4
R5
h_1
h_2
h_3
h_4
h_5
α_1
α_2
α_3
α_4
α_5
d1
d2
d3
d4

图2

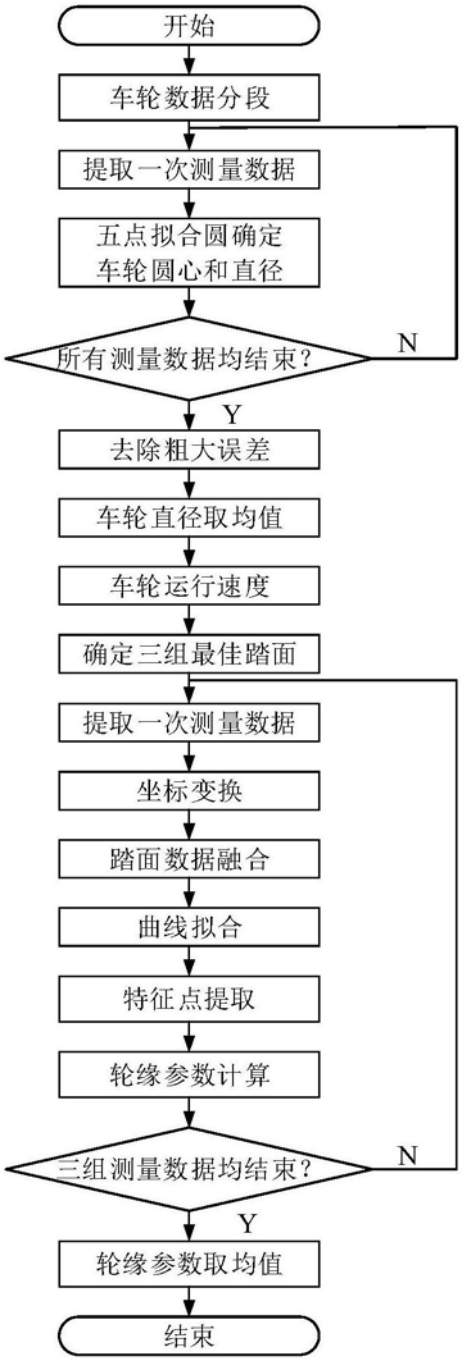

开始
车轮数据分段
提取一次测量数据
五点拟合圆确定
车轮圆心和直径
所有测量数据均结束?
N
Y
去除粗大误差
车轮直径取均值
车轮运行速度
确定三组最佳踏面
提取一次测量数据
坐标变换
踏面数据融合
曲线拟合
特征点提取
轮缘参数计算
三组测量数据均结束?
N
Y
轮缘参数取均值
结束

图3

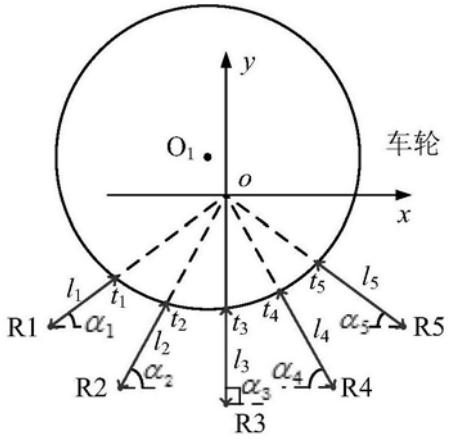

y
O1
车轮
o
x
l1
t1
t5
l5
R1
α1
t2
t3
t4
l4
α5
R5
l2
l3
R2
α2
α4
R4
α3
R3

图4

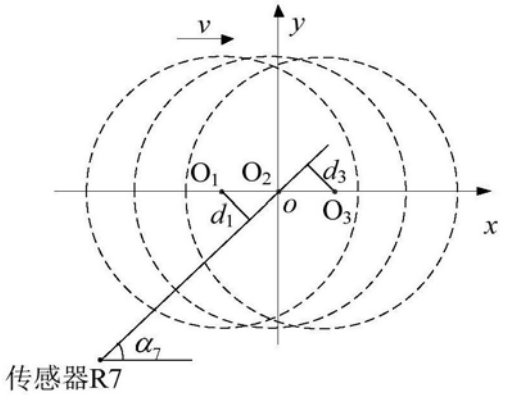

v
y
O1
O2
d3
d1
o
O3
x
α7
传感器R7

图5

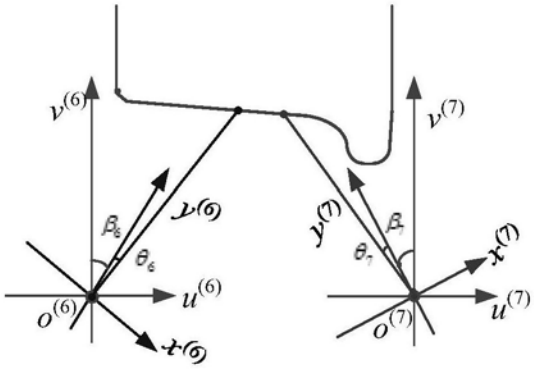

v(6)
v(7)
β6
θ6
β7
θ7
u(6)
u(7)
o(6)
o(7)

图6

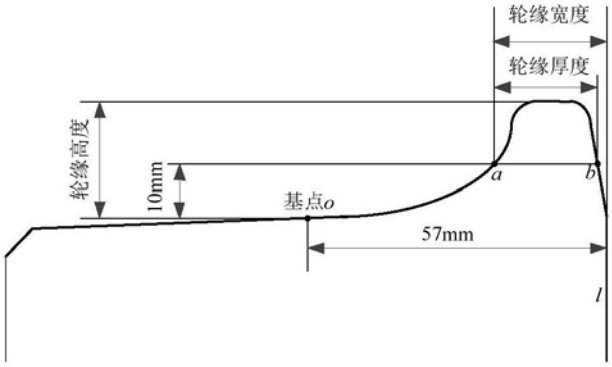


图7