

试验·研究

便携式双测头钢轨外形磨耗测量仪的研究

彭艳, 周文祥, 田文杰, 沈玉飞

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:介绍了研制的双测头T型五连杆钢轨外形测量仪的结构与测量模型。该测量仪可针对不同测量规格钢轨的需要,建立逆解模型对五连杆结构参数进行优化仿真。并用Matlab模拟编码器采样过程,对原理误差、编码器量化误差及各单因素误差进行了计算。理论分析与样机试验结果表明,该仪器能测量钢轨轨头和非工作面轨头下颚的外形,测量范围宽,为钢轨磨耗的研究提供可靠数据。

关键词:钢轨外形测量;双测头五连杆机构;参数优化;误差仿真

中图分类号: U213.4⁺2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-1820(2011)02-0001-05

1 引言

在轮对沿两条钢轨滚动行驶的过程中,轮对借助摩擦实现牵引、制动。轮轨特定的外形产生导向力,此时钢轨必产生磨耗,外形发生变化,强度也将逐步下降。精确测量钢轨轨头外形及垂向磨耗、侧面磨耗,与铁路安全运行和经济管理密切相关^[1]。

测量钢轨外形及磨耗的仪器虽然有采用非接触式的激光技术^[2],但是机械式电测方案因其方便、价廉仍占据较大市场。国外主要有丹麦GREEN WOOD公司于1991年研制的MINIPROF便携式外形曲线测量仪;国内主要有上海同济大学研制的便携式铁路钢轨轨头外形磨耗测量装置。两者的共同点是采用二连杆机构,在连架杆端部有光电编码器;手工测量需要的操作力较大,引起的弯曲变形直接导致角度测量误差;数据传输采用有线传输的方式,因而影响了测量的灵活性;依靠机

械定位,只能测量钢轨工作面,机械定位区域的杂质等对精度产生较大的影响^[3]。本文介绍一种可测量钢轨下颚及整个钢轨轨头的便携式双测头T型五连杆机构的钢轨外形磨耗测量仪,采用拟合曲线的数码定位。

2 仪器结构与测量模型

2.1 便携式双测头钢轨外形测量仪的组成

图1为测量仪的结构。仪器使用T型五连杆带动编码器滑过测量对象,可测量钢轨整个轨头及其非工作面轨头下颚,进而可依靠下颚和侧面数据,实现数字定位取代机械定位,简化仪器结构;数据采集盒采集编码器数据并通过蓝牙无线传输;PDA接收数据,并进行数据处理、存储和显示。仪器设计测量范围宽,精度要求为 <0.05 mm,重复性误差 <0.03 mm。

2.2 测量模型

为了能完全测量钢轨轨头断面和非工作面钢轨下颚,故采用了双测头五连杆。钢轨测量分为两段进行,利用T型五连杆的两个测头分别进行测量^[4]。

如图2所示,以与连杆 L_1 相连的编码器转轴

收修回稿日期: 2010-06-15

作者简介: 彭艳(1986—),女,四川成都人,硕士研究生。

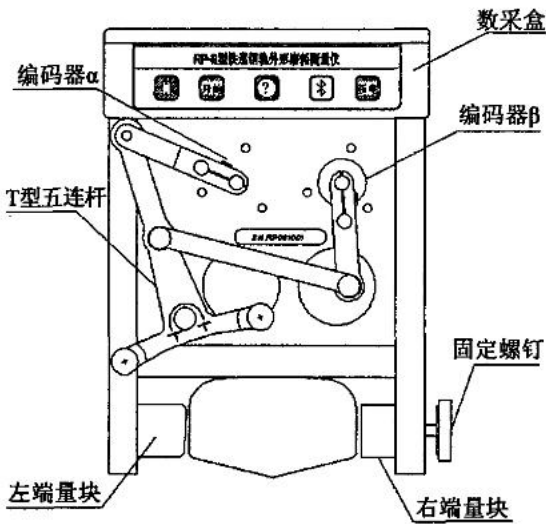


图1 仪器结构组成

轴心 O_1 为坐标原点建立坐标系。 L_1 、 L_6 和 L_4 为主测连杆； L_2 和 L_3 为辅助测量连杆； O_1 、 O_2 分别为两编码器轴心点； α 和 β 分别为 L_1 、 L_2 与横轴坐标的夹角。利用 T 型五连杆测头 L 测量钢轨非工作面一侧，即图 2 中 $M-N$ 段；利用测头 R 测量钢轨工作面一侧，即图 2 中 $P-Q$ 段。

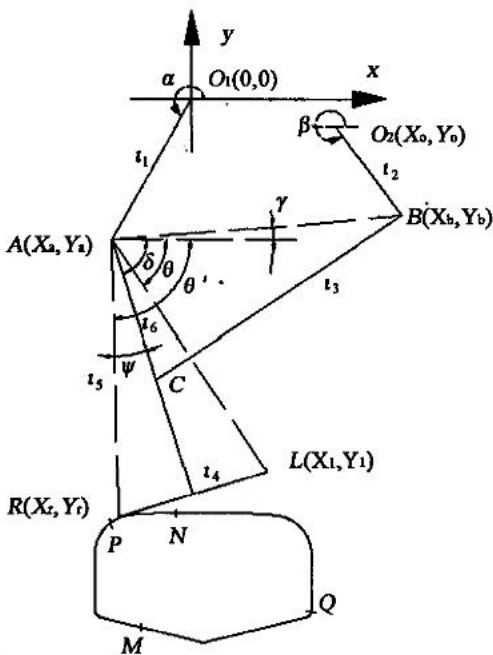


图2 仪器测量数学模型

(1) 钢轨非工作面一侧五连杆数学模型 (L 测头)

计算 A 、 B 点坐标：

$$\begin{cases} x_a = L_1 \cos \alpha \\ y_a = L_1 \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_b = L_2 \cos \beta + X_0 \\ y_b = L_2 \sin \beta + Y_0 \end{cases} \quad (2)$$

在 $\triangle ARL$ 中，

$$\begin{aligned} \psi &= \angle RAC = \angle CAL = \frac{1}{2} \angle RAL \\ &= \frac{1}{2} \arccos \frac{2l_5^2 - l_4^2}{2l_5^2} \end{aligned} \quad (3)$$

作辅助线 AB ， AB 长度为：

$$AB = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (4)$$

在 $\triangle ABC$ 中，

$$\delta = \angle BAC = \arccos \left(\frac{AB^2 + l_6^2 - l_3^2}{2ABl_6} \right) \quad (5)$$

AB 与 X 轴正方向的夹角：

$$\gamma = \arctan \left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \right) \quad (6)$$

AB 与 X 轴正方向的夹角：

$$\begin{aligned} \theta &= \delta - \gamma - \psi \\ &= \arccos \left(\frac{AB^2 + l_6^2 - l_3^2}{2ABl_6} \right) - \arctan \left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \right) - \\ &\quad \frac{1}{2} \arccos \frac{2l_5^2 - l_4^2}{2l_5^2} \end{aligned} \quad (7)$$

计算测量轮圆心 L 点坐标：

$$\begin{cases} x_l = L_5 \cos \theta + x_a \\ y_l = L_5 \sin \theta + y_a \end{cases} \quad (8)$$

(2) 钢轨工作面五连杆数学模型 (R 测头)

AR 与 X 轴正方向的夹角：

$$\begin{aligned} \theta' &= \delta - \gamma + \psi \\ &= \arccos \left(\frac{AB^2 + l_6^2 - l_3^2}{2ABl_6} \right) - \\ &\quad \arctan \left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \right) + \frac{1}{2} \arccos \frac{2l_5^2 - l_4^2}{2l_5^2} \end{aligned} \quad (9)$$

计算测量轮圆心 R 点坐标：

$$\begin{cases} x_r = L_5 \cos \theta' + x_a \\ y_r = L_5 \sin \theta' + y_a \end{cases} \quad (10)$$

利用 T 型五连杆的 R 测头测量钢轨的轨头 $P-Q$ 段， L 测头测量的 $M-N$ 段，一起组成对整个钢轨轨头和非工作面下颚的测量。

值得注意的是，以上求出的是测量轮轮心的坐标值，要得到实测曲线，需采用一定的测量轮轮径补偿算法，将轮心坐标转换成测量轮与被测对象实际接触点的坐标^[5]。

3 结构参数优化设计仿真

仪器测量对象为 38 kg、43 kg、50 kg、60 kg 以及 75 kg 钢轨外形,仪器的测量范围和误差跟双测头 T 型五连杆的参数密切相关。杆短,则不能达到需要的测量范围;杆长,则会放大误差。故需要对 T 型双测头五连杆杆长进行优化设计,使其不仅能完成对测量对象的测量,又要使误差最小。通过建立逆解模型,在给定的运动轨迹下,反求连杆转动的角度,再以此角度再现测头及各连杆的运动轨迹,可以在满足测量范围的情况下,优化杆长参数。

3.1 逆解模型

逆解模型如图 3 所示。在已知测头 R 的轮圆心坐标为 (x, y) 的前提下,连接 O_1C, O_1O_2, O_2C, O_1R ; $s_0 = \overline{O_1R}, s_1 = \overline{O_1C}, s_2 = \overline{O_2C}$;

$$\overline{O_1O_2} = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2} \quad (11)$$

$$s_0 = \sqrt{x_r^2 + y_r^2} \quad (12)$$

$$\delta = \arctan \frac{y_r}{x_r} \quad (13)$$

计算可得:

$$\begin{aligned} \alpha &= \pi - \delta - \angle AO_1R \\ &= \pi - \delta - \arccos \frac{l_1^2 + s_0^2 - l_5^2}{2l_1s_0} \end{aligned} \quad (14)$$

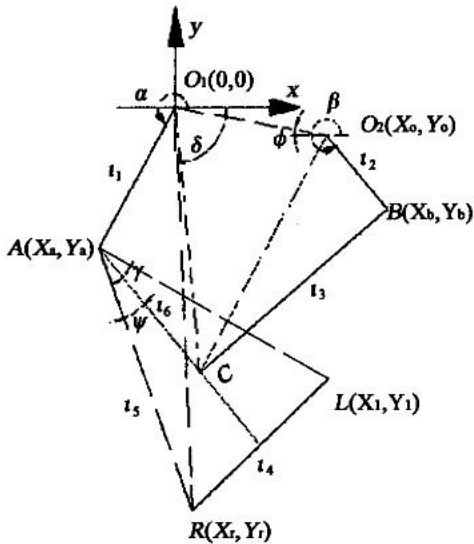


图3 逆解模型

在三角形 $\triangle ARL$, 公式(3):

$$\psi = \angle RAC = \angle CAL = \frac{1}{2} \angle RAL$$

$$= \frac{1}{2} \arccos \frac{2l_5^2 - l_4^2}{2l_5^2}$$

AR 与 X 轴正方向的夹角:

$$\gamma = \arctan \frac{y_r - y_a}{x_r - x_a} \quad (15)$$

由三角形关系,计算 C 点的坐标:

$$\begin{cases} x_c = x_a + L_6 \cos(\gamma - \psi) \\ y_c = y_a + L_6 \sin(\gamma - \psi) \end{cases} \quad (16)$$

O_1O_2 与 X 轴负方向的夹角:

$$\phi = \arccos \frac{X_0}{O_1O_2} \quad (17)$$

计算 β :

$$\begin{aligned} \beta &= \pi + \angle O_1O_2C + \angle CO_2B - \phi \\ &= \pi + \arccos \frac{\overline{O_1O_2}^2 + s_2^2 - s_1^2}{2O_1O_2s_2} + \\ &\quad \arccos \frac{l_2^2 + s_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} - \arccos \frac{X_0}{O_1O_2} \end{aligned} \quad (18)$$

将 (α, β) 代入式(1)~(6)、(9)、(10),可计算得到 x_{dr}, y_{dr} 。同理,可得出测头 L 所对应的非工作面(图 2 中 $M-N$ 段)五连杆的逆解方程,再代入式(1)~(8),计算相应的 x_{dl}, y_{dl} 。

3.2 参数优化仿真

仿真过程:(1)将测量对象轨迹离散成为一组坐标,表示为 (x_i, y_i) ;(2)建立如上述的逆解模型,即已知 (x_i, y_i) ,反求出对应的 (α_i, β_i) 值;(3)代入测量模型,即可再现 R、L 测头坐标和其他杆相接点的坐标。在此不一一列出各规格钢轨仿真的测量范围与杆长轨迹。以 60 kg 钢轨为例,杆长轨迹与覆盖轮廓线仿真结果如图 4 所示。

图 4 中,粗黑色轮廓线为仪器对钢轨测量的有效覆盖轨迹。可见:在此杆长参数值下,测头 R 和测头 L 一起能够完成对钢轨整个轨头和非工作面前面的测量。

4 误差仿真

测量模型是仪器的核心,测量模型的误差主要是测量模型中的几何参数与仪器结构的实际参数不同而引起的误差。模型误差是仪器的主要误差,其误差大小直接影响测量准确度,是仪器误差分析的重点。

由于测量模型包含反三角函数,其一阶全微方程相当复杂,经典的误差理论在此难以得到运用,为此借

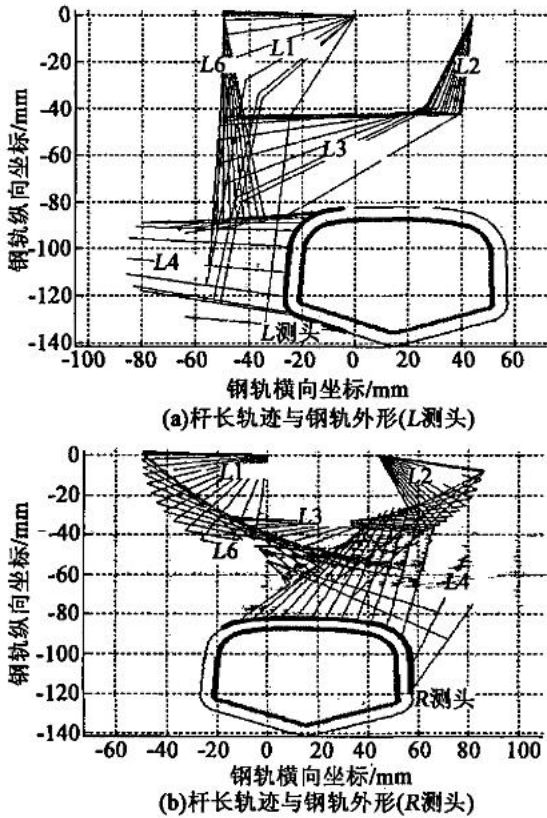


图4 仪器杆长轨迹与钢轨外形轮廓仿真结果

鉴机器人机构学的逆解分析方法进行仿真研究。其思路是:已知理想机构各结构参数真值,对其测轮轮心的真值 (x, y) 进行变化得到角度真值 α, β ^[4]。

4.1 原理误差与量化误差

在保证五连杆形态始终为凸多边形的前提下,其任意姿态始终与 (α, β) 保持一一对应的关系。设 (x, y) 为测量轮圆心的真实值,代入逆解方程(11)~(18)求出与之对应的 (α, β) ;再根据数学模型(1)~(10)计算出实际测量值 (x_d, y_d) :L测头测量值 (x_{dl}, y_{dl}) 或者R测头 (x_{dr}, y_{dr}) 。则L测头的原理误差: $er_{xl} = x_{dl} - x$, $er_{yl} = y_{dl} - y$;R测头的原理误差: $er_{xr} = x_{dr} - x$, $er_{yr} = y_{dr} - y$,计算可知道误差数量级为 10^{-13} ,可以忽略不计^[6]。

仪器在实际测量过程, α, β 的值由编码器捕获。由于编码器自身分辨率的原因,会对测量带来误差,故对编码器进行量化误差分析:

(1) 将测量对象轨迹离散成为一组坐标,表示为 (x_i, y_i) ,其中 i 为离散后点的个数。

(2) 根据逆解模型,求得 $(\alpha_{0i}, \beta_{0i})$,根据公式(19)、(20)转化成相应脉冲数 (N_{1i}, N_{2i}) :

$$N_{1i} = \alpha_{0i} M / 2\pi \quad (19)$$

$$N_{2i} = \beta_{0i} M / 2\pi \quad (20)$$

式中: M 为编码器的分辨率。对 (N_{1i}, N_{2i}) 进行四舍五入处理,取整后的脉冲数对式(19)、(20)作逆变换转化为角度值 (α_i, β_i) ,该值为模拟采样角度值。

(3) 将 (α_i, β_i) 代入测量模型,模拟计算得到的实测值 (x_{di}, y_{di}) [注:L测头为 (x_{dl}, y_{dl}) ,R测头为 (x_{dr}, y_{dr})]。

(4) 计算误差, $er_{xi} = x_{di} - x_i$ 、 $er_{yi} = y_{di} - y_i$ 。

图5为左右测头编码器量化误差。

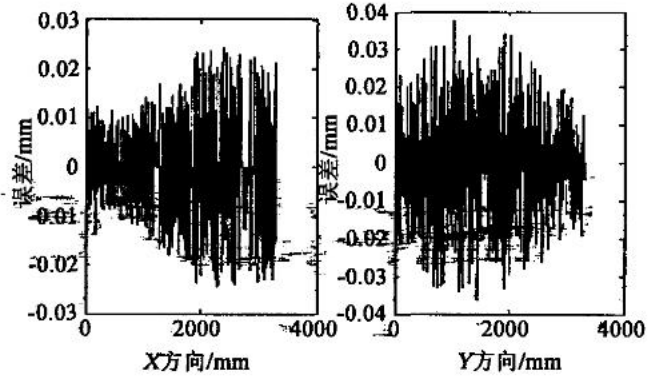


图5 编码器量化误差仿真

如图5可知编码器的量化误差对测量结果产生的影响,该影响可以通过提高编码器分辨率来减小,同时该误差属于随机误差,选用合适的滤波算法来减小。这样,即可满足仪器的误差要求,提高精度。

4.2 模型参数误差

模型参数误差主要由测量模型中的几何参数与仪器的实际参数不同而引起。在误差模型中引入各几何参数的误差,计算值与理论值之差即为相应因素影响下的测量模型误差。用千分尺(或影像仪)测量各杆件的长度,千分尺的极限误差 ± 0.003 mm,所以取 $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_3 = \Delta L_4 = \Delta L_5 = \Delta L_6 = 0.005$ mm,用千分尺测量两编码器的垂直方向的距离和水平方向的距离,其测量偏差不大于0.01 mm,所以取 $\Delta x_A = 0.01$ mm, $\Delta y_A = 0.01$ mm, $\Delta \alpha = \Delta \beta = 1 \times 3.14 / 7200$ rad(编码器分辨率为3600,并经过了四细分)^[4]。

表1为单因素误差作用仿真结果,由此可得出以下结论:

(1) 各误差因素引起的形状误差不超过0.05 mm,满足仪器设计的精度要求。

(2) 测量机构中,各连杆的长度误差和两编码器Y方向和X方向安装误差对测量轮坐标影响较小,传递系数较小。

(3) 两个角度参数 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 对测量轮坐标误差影响很大,传递系数大,这主要是由于与杆长相乘,在误差传递过程中误差被放大了。因此,在覆盖有效测量范围的情况下,尽量减小杆长,并且准确找出光电编码器转动时候的角度误差,对提高整个测量系统的准确度具有至关重要的意义。

表1 各误差因素单独作用引起的误差

误差因素	X方向		Y方向	
	误差区域/ μm	最大传递系数	误差区域/ μm	最大传递系数
ΔL_{s1}	-10.2 ~ -4.3	2.05	-13 ~ -1	2.6
ΔL_{s2}	-9.8 ~ -3.7	1.96	-11.6 ~ -2.2	2.33
ΔL_{s3}	-7.3 ~ -15.4	3.08	-5 ~ -16.3	3.25
ΔL_{s4}	1.4 ~ 2.5	0.49	0.9 ~ 2.3	0.45
ΔL_{s5}	-5.1 ~ -3.3	1.03	1.2 ~ 4.1	0.82
ΔL_{s6}	1.5 ~ 13	2.6	1.3 ~ 14	2.79
ΔY_0	-12.1 ~ 2.7	2.41	-13.4 ~ -1.4	2.67
ΔX_0	-15.4 ~ -5.1	3.08	-15.9 ~ -4.6	3.18
$\Delta\alpha$	-5.6 ~ 9.1	20.87	19.7 ~ 42.5	97.38
$\Delta\beta$	-46.5 ~ -19.8	106.67	-43.4 ~ 16.8	99.39

注: $\Delta L_{s1} = \Delta L_{s2} = \Delta L_{s3} = \Delta L_{s4} = \Delta L_{s5} = \Delta L_{s6} = 0.005 \text{ mm}$; $\Delta\beta = \Delta\alpha = 1 \times 3.14 / 7200 \text{ rad}$; $\Delta X_0 = \Delta Y_0 = 0.01 \text{ mm}$ 。

5 样机测试

实际仪器测量图如图6所示。首先进行各机械部件的组装,安装完成后,写入DSP数据采集程序;利用PDA作为上位机显示数据、被测钢轨轮廓曲线和测量参数结果;利用标准样板对仪器五连杆各参数进行标定。

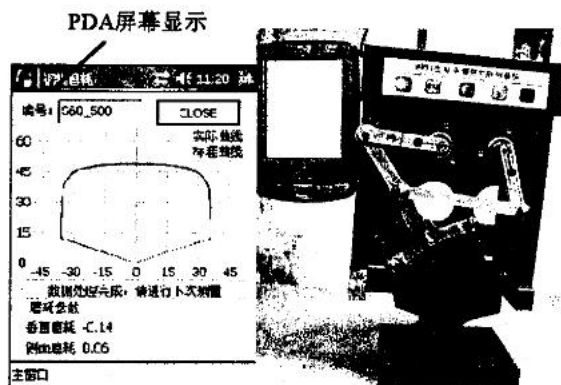


图6 钢轨外形磨耗测量仪

仪器样机使用时,利用T型五连杆右测头测量被测钢轨非工作面一侧的曲线;再利用左测头测量钢

轨轨面及另一侧曲线(见图6);利用影像仪测量图中钢轨块的垂直磨耗和侧面磨耗分别是 -0.1 mm 和 0.05 mm 。图7为该样机多次测量结果显示,因影像仪的精度为 $< 0.003 \text{ mm}$,该样机测量精度 $< \pm 0.05 \text{ mm}$,测量重复性 $< \pm 0.03 \text{ mm}$,满足设计的要求。

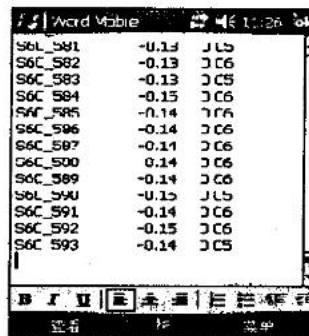


图7 样机多次测量数据结果

6 结论

理论分析与样机试验结果表明:(1)基于双测头T型五连杆机构的钢轨外形测量仪,优化五连杆参数后,能够测量铁路不同规格钢轨的轨头和非工作面轨头下颚,测量范围宽。(2)利用数字对位取代机械定位,简化仪器结构。数据传输采用蓝牙无线传输、利用PDA等手持设备接收处理数据,更适应野外作业和铁路现场各种工况。(3)对连杆及编码器安装位置等各因素进行了测量误差仿真,优化后的参数满足仪器的精度要求。

参考文献:

- [1] 练松良,孙琦,王午生. 铁路曲线钢轨磨耗及其减缓措施[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.
- [2] 孟佳,高晓蓉. 便携式钢轨磨耗自动检测系统[J]. 中国铁路,2005,(7):57—59.
- [3] 程文通. 钢轨磨耗测量器测量基准面的选择[J]. 铁道技术监督,1997,(5).
- [4] 周文祥,等. 铁路车轮外形曲线数字测量仪的研究[J]. 铁道学报,2005,(10):49—53.
- [5] 刘李莹. 便携式铁道车辆外形测量仪的准确度研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- [6] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [7] 祝宇虹,王丽平,丁庆勇. 平面五连杆高速高精度机械手[J]. 机械与电子,2005,(9):42—44.