

文章编号: 1001-3806(2013)01-0032-04

铁路机车限界激光检测仪及标定技术研究

李申高¹, 刘常杰^{1*}, 刘刚², 高福来²

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 铁道部 产品质量监督检验中心 机车车辆检验站, 北京 100015)

摘要: 为了实现铁路机车限界的高效率、高精度测量, 建立了一套基于激光扫描的限界检测仪。该检测仪通过固定在支撑框架四周的测距传感器来完成机车截面各部分扫描测量, 重点研究了现场高精度标定方法, 通过自行设计的标定卡规, 借助激光跟踪仪完成系统参量标定。由测距传感器测得结果, 结合系统参量标定数据, 解算出所有被测点在铁轨坐标系下的 3 维坐标, 进而求得截面轮廓到标准限界的距离, 完成限界测量。结果表明, 该系统测量效率高、测量精度达到 $\pm 0.5\text{mm}$, 满足限界测量需要。

关键词: 测量与计量; 铁路限界; 标定方法; 标准限界

中图分类号: TH741

文献标识码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.008

Research of laser detector for railway locomotive gauge and its field calibration technology

LI Shen-gao¹, LIU Chang-jie¹, LIU Gang², GAO Fu-lai²

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Locomotive and Vehicle Test Station, Products Quality Supervision and Test Center, Ministry of Railways, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to achieve the railway locomotive gauge measurement with high efficiency and high precision, a scanning laser-based gauge detector was designed. The cross-section scanning measurement was realized by fixing ranging sensors around the support frame. The field high-precision calibration method was focused. The system parameter was calibrated with the self-designed calibration card and the laser tracker. The system parameters, combined with the ranging sensor measurements, were used to calculate the 3-D coordinates of all the measured points in the rail coordinate system, and then the distance between the cross-sectional profile and the standard gauge was calculated so that the clearance was measured. Field experiments show that the system is in high efficiency and the system measurement accuracy of $\pm 0.5\text{mm}$ meets the need of bound detection.

Key words: measurement and metrology; railway clearance; calibration method; standard gauge

引 言

铁路机车进行安全运行前都必须由铁路检验部门严格按照标准限界进行检测^[1], 为铁路机车的运行安全提供保障。铁路机车限界是一个与铁路中心线垂直的横截面包络线, 是机车车辆在改造、设计时都必须严格遵循的基本轮廓尺寸。GB146.1-83 标准规定的机车车辆截面轮廓是可接受的机车最大理论极限尺寸, 不论静态还是动态轮廓都不得超越该尺寸, 否则就是超界, 将对机车车辆安全运行构成威胁。传统的机车车辆限界检测^[2], 首先通过人工直接量取车身截面关键点到固定限界架的距离, 再与允许偏差比较, 判断机车是否超界。

作者简介: 李申高(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电测试。

* 通讯联系人。E-mail: liuchangjie@tju.edu.cn

收稿日期: 2012-05-14; 收到修改稿日期: 2012-06-11

这个过程造成重复劳动量大、测量精度低、自动化程度低等问题。因此, 有必要设计一种自动高效、满足精度需要的检测系统来克服现有检测系统的不足。

1 系统设计

1.1 系统组成

铁路机车限界系统组成如图 1 所示。整个系统主要由门状支撑框架、激光传感器^[3] (6 个测量范围为 0.05m~200m、测量精度为 $\pm 0.5\text{mm}$ 的 1 维激光测距传感器)、运动平台 (6 个)、电机及丝杠导轨、测量工作站组成。各部分功能如下: 支撑框架用于支撑丝杠导轨; 运动平台在大小电机的驱动下带动激光传感器实现 2 维运动; 1 号和 2 号激光传感器实现机车底部的扫描测量; 4 号和 5 号激光传感器实现机车底部的扫描测量; 3 号和 6 号激光传感器分别实现机车两侧的扫描测量; 测量工作站通过可编程逻辑控制器

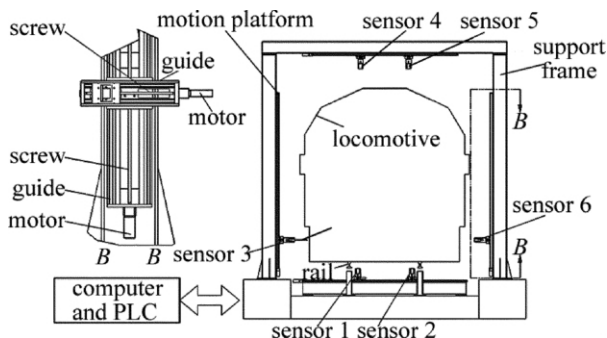


Fig. 1 System components

(programmable logic controller, PLC) 实现对激光传感器的运动控制^[4-5] 并控制测距传感器, 完成测量计算、显示功能。

1.2 工作原理

1.2.1 解算被测点 如图 2 所示, 系统要通过激光测距传感器^[6] 完成对机车一侧截面扫描测量并给出被测点的 3 维坐标值。首先通过控制小电机使传感器从初始位置沿第一运动方向进行扫描截面的对准微调, 再通过大电机使传感器沿第二运动方向运动并进行逐点测量, 然后综合第一、第二运动方向平移, 测距传感器测得被测点到激光光源点的距离及事先标定的传感器参量, 可以解算出被测点的 3 维坐标值:

$$P_1 = P_0 + s_1 \times e_1 + s_2 \times e_2 \quad (1)$$

$$P = P_1 + L + s_3 \times e_3 \quad (2)$$

式中 $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ P_1 和 P 分别为固定在传感器上端面的靶标座初始位置、靶标座当前位置和被测点 3 维坐标值, s_1 为测量时传感器沿第一运动方向平移量, e_1 为第一运动方向单位矢量, s_2 为测量时传感器沿第二运动方向的平移量, e_2 为第二运动方向单位矢量, L 为靶标座中心到激光光源点矢量(事先标定过的传感器参量), s_3 为测距传感器测量结果, e_3 为传感器光线方向矢量。

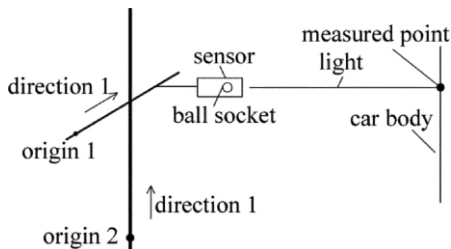


Fig. 2 System schematic

1.2.2 限界判别 一般情况下, 机车车辆限界检测是在一个 3 维空间内进行的^[7]。这样, 在上位机中要对测量得到的机车截面轮廓上的每一个点进行 3 维判断。但在工程实践中, 判断空间点和平面关系的计算会耗费大量的时间和上位机资源。为了简化到 2 维平面内的超限检测^[8], 以铁轨方向为轴向, 对系统建立一个 3 维坐标系。假设铁轨方向为所建坐标系的 x' 方向, y' 方向

和 z' 方向分别垂直于铁轨中垂面和上表面, 原点 O' 为铁轨坐标系的中心。对于 3 维空间中的任意点, 通过跟踪仪坐标系到铁轨坐标系变换, 都能够把它转化到所建铁轨坐标系中。在进行判断时, 就不用考虑 x' 方向坐标分量对系统测量结果的影响, 只需要在 $O'-y'-z'$ 平面内判断机车上的所有被测点是否在标准限界以内。

2 系统标定

为了得到铁轨坐标系下被测点的 3 维坐标值, 实现 2 维平面内的超界判断, 需要进行系统参量标定。整个标定过程在激光跟踪仪^[9] 下完成: 首先标定铁轨坐标系, 再进行跟踪仪坐标系到铁轨坐标系的转换, 最后在铁轨坐标系下标定上述 6 个传感器的靶标座初始位置 P_0 , 第一、第二运动方向单位矢量 e_1, e_2 , 传感器光线方向矢量 e_3 。考虑到 6 个传感器相互独立且工作原理相同, 本文中只以 6 号传感器的标定过程进行说明。

2.1 铁轨坐标系建立

按照如图 3 所示方式, 将一端有固定垂直位置关系, 另一端可调的标定卡规固定在平行铁轨上, 其下侧水平面与外侧垂直面分别与铁轨上端面 and 内侧面贴合, 先用激光跟踪仪测量出 4 个靶标座中心 3 维坐标值, 由事先标定过的标定卡规得出卡规固定端下侧面与外侧面方程, 再通过下侧面与外侧面计算出交线方程, 即铁轨上端面与内侧面的一条交线方程; 将标定卡规固定端换到平行铁轨另一侧固定, 用同样的方法确定铁轨上端面与内侧面的另一条交线方程; 由以上两条铁轨交线可确定铁轨上端面作为 $x-O-y$ 面, 同时确定两铁轨内侧面的中分面为 $x-O-z$ 面, 再将过任一传感器靶标座零点且与铁轨平面和铁轨中分面均垂直的第三平面为 $y-O-z$ 平面, 再由如下旋转矩阵^[10-11] 变换:

$$(x' y' z' 1) = (x y z 1) \cdot T(-x_0, -y_0, -z_0, 1) \cdot R \quad (3)$$

式中 $(x' y' z' 1)$ 为铁轨坐标系下任意点, $(x y z 1)$ 为激光跟踪仪跟踪仪坐标系下任意点, $T(-x_0, -y_0, -z_0, 1)$ 和 R 分别为激光跟踪仪坐标系到铁轨平面坐标系的平移矩阵和旋转矩阵, 通过以上计算, 进而得到铁轨平面坐标系。

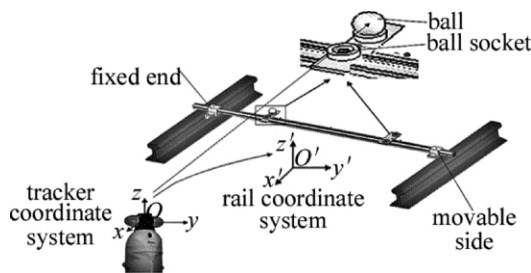


Fig. 3 Establishment of rail coordinate

2.2 系统现场标定

图4a~图4c中分别实现第一、第二方向及光线方向标定。按图示方式,首先用跟踪仪测量传感器位于初始位置时传感器上表面靶标座中心坐标,再通过上位机控制传感器分别沿着第一、第二运动方向运动(传感器沿第一运动方向运动时应保持其在第二运动方向静止,反之亦然),用跟踪仪获得整个行程且分布均匀6点~10点的传感器靶标座中心坐标,并由此分别做直线拟合,获得第一、第二运动方向单位矢量 e_1 和 e_2 。点亮传感器,使传感器能够持续发光并产生形状固定的光斑,用跟踪仪小球将跟踪仪光线引导至验证装置球座处(见图5),同时微调三脚架,使跟踪仪小球接收到传感器发出的光点并调节两光点在小球内重合,这样就能获取传感器光线上的第1点3维坐标。沿光线方向移动三脚架至下一处,同样的方法,利用跟踪仪获得传感器光线上6点~10点的坐标值,并从中选出最合适的若干点做直线拟合,由此可获得传感器光线方向矢量 e_3 。至此,完成系统参量标定,系统参量标定结果如表1所示。

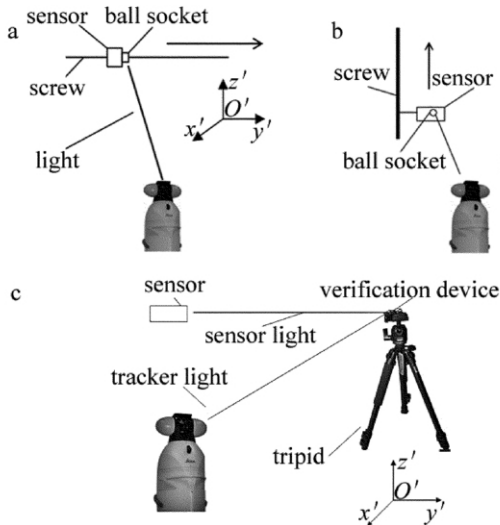


Fig. 4 Calibration of system parameters

Table 1 System parameters calibration

coordinate	x	y	z
starting point	-24.85mm	-1553.3mm	-261.81mm
direction 1	-0.006	0.001	1.000
direction 2	1.000	0.008	-0.005
light direction	0.013	-0.018	1.000

3 实验结果

现场实验验证主要完成系统重复性验证和系统精度验证两部分。

3.1 系统重复性验证

系统重复性验证的目的是确定系统多次连续工作

的重复性精度,包含机械运动、运动控制系统、激光测距传感器的可靠性。通过上位机控制,将传感器移动到指定合适位置,然后由系统测得当前点的3维坐标值(x, y, z),再将传感器移出测量点后返回,重复上述操作过程6次,得到传感器相同位置的6个点坐标,再计算各自相应的极差 R 和重复性标准差 σ ,以上数据记录如表2所示。

Table 2 System repeatability experiment

measurement points	x/mm	y/mm	z/mm
1	-66.13	-74.43	754.91
2	-66.13	-74.43	754.71
3	-66.13	-74.43	754.91
4	-66.14	-74.42	754.31
5	-66.15	-74.41	754.41
6	-66.13	-74.43	754.81
R	0.02	0.02	0.6
σ	0.01	0.01	0.26

3.2 系统精度验证

为了结合激光跟踪仪可靠验证系统精度,设计了如图5所示的验证装置,该装置采用简易的台阶立体构式,第一阶面制作两个用于放置激光跟踪仪小球的球座,第二阶面制作一个球座及贴上激光接收十字标记,用于接收传感器激光点。验证前用激光跟踪仪分别标定出图示球座中球心的3维坐标值以及标记处的3维坐标值,从而确定标记处与两球座中心的几何关系。系统精度验证时,将验证装置安装在可调三角架上,使其上端面标记处能准确接收激光测距传感器的激光点,然后通过上位机读取一次测量数据(x, y, z) (上位机不控制电机移动传感器),同时用跟踪仪获取验证装置3个球座中心处点的3维坐标值,再将验证装置分别沿光线方向移动20mm、40mm(保持标记处准确接收激光点),并读取一次相应点的测量数据及3个球座中心点3维坐标值。由事先标定的验证装置标记点与3个球座中心点的几何位置关系可确定由跟踪仪得到的标记点的3维坐标(x_0, y_0, z_0),数据记录于表3中。

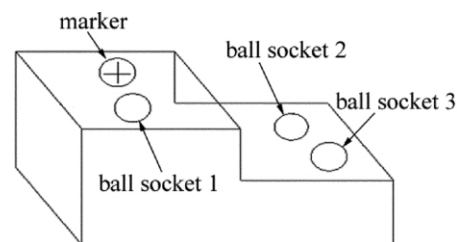


Fig. 5 Verification device

Table 3 System accuracy verification experiment

points number	x/mm			y/mm			z/mm		
	system	tracker	error	system	tracker	error	system	tracker	error
1	34.21	34.52	0.31	54.78	54.47	-0.32	720.89	720.63	-0.26
2	52.12	52.48	0.36	59.52	59.37	-0.15	463.26	462.98	-0.28
3	64.35	64.12	-0.23	114.03	114.51	0.48	243.05	243.41	0.36

由表2可以看出,系统实际重复性绝对误差小于1mm,且仅在一个方向影响重复性精度;由表3可以看出,系统精度验证绝对误差小于1mm,均达到了 $\pm 0.5\text{mm}$ 的测量精度,满足测量需求。

4 结论

在传感器上表面固定一个靶标座,使用事先标定过传感器参数的激光测距传感器作为外部测量仪器,完成铁轨坐标系建立及系统参量标定,最后设计了验证装置,实现系统测量数据与激光跟踪仪测量数据的比对。该系统及其标定方法有效消除了轨道平面与水平面偏差所引入的测量误差,以及机械安装误差。检测系统测量特征包括机车截面全局扫描测量和局部关键点测量,系统重复性标准差不大于0.3mm,测量精度可达 $\pm 0.5\text{mm}$,达到了机车车辆限界检测的要求。

参考文献

- [1] JU D M, GUO W H, HU A Z. Problems of rolling stock static gauge [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1997, 21(6): 625-628 (in Chinese).
- [2] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of The People's Republic of China. GB/T 16904. 2-2006 Checking of rolling stock clearance for standard gauge railways-Part 2: clearance treadle[S]. Beijing: China Standard Press 2007: 1-14 (in Chinese).
- [3] LIU P, GAO L M, YUE K D. Laser measurement system for rail linearity[J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 575-578 (in Chinese).
- [4] HU S S. Principles of automatic control [M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2007: 1-7 (in Chinese).
- [5] REN D H, YANG X Y, YE Sh H, et al. The distributed control system in autocar-body visual in spection station [J]. Opto-Electronic Engineering, 1996, 23(3): 24-29 (in Chinese).
- [6] YANG J W, YANG B. Design and realization of laser based detector for railway clearance infringements [J]. Sensors and Instrumentation, 2008, 24(2/1): 126-128 (in Chinese).
- [7] ZHANG Zh Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] ZHANG Y X, WANG J Q, WANG S, et al. Freight train gauge-exceeding detection based on large scale 3-D geometric vision measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1): 181-187 (in Chinese).
- [9] ZHANG B, PENG J. Laser tracker system for measurement [J]. Metrology & Measurement Technology, 2006, 26(4): 5-6 (in Chinese).
- [10] CRAIG J J. Introduction to robotics: mechanics and control [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 57-60, 64 (in Chinese).
- [11] LI H B, DUAN Zh X, ZHOU J L. Approach to static calibration based on coordination transformation for six-dimensions force sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies 2006, 25(3): 74-76 (in Chinese).