

高速列车动态包络线测量系统

郭 寅¹ 刘常杰^{1*} 郑继贵¹ 刘 刚² 高福来² 叶声华¹

(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 动态包络线是制定动态限界的主要依据, 准确得到动态包络线是车辆设计过程中的一项重要内容, 也是安全行车的重要保障。针对当前车辆动态包络线的获取主要通过计算手段这一情况, 设计了高速列车动态包络线测量系统。系统基于双目视觉测量原理, 利用大功率激光瞬时光源构造测量特征, 通过高速采集、处理、解算能反映列车动态偏移的被测信息, 得到高速列车行驶过程中的动态包络线。提出了一种现场系统校准方法, 快速、有效地建立双相机之间的位置关系、轨道中心坐标系及其与测量系统坐标系之间的转换关系。实验结果表明, 系统测量精度可达 ± 0.5 mm, 实现了高速列车动态包络线的真实可靠测量, 为高速列车动态限界的制定提供数据支持。

关键词 测量; 机器视觉; 动态包络线; 动态限界; 高速列车; 校准

中图分类号 TN247; U270.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0208002

Measurement System for Dynamic Envelope Curve of High-Speed Train

Guo Yin¹ Liu Changjie¹ Zhu Jigui¹ Liu Gang² Gao Fulai² Ye Shenghua¹

¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and 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 Dynamic envelope curve is one of the key factors to be considered when defining the dynamic gauge. To accurately obtain the dynamic envelope curve is one big step in design vehicle and also an insurance against dangers in driving. Since the major way to obtain dynamic envelope curve now is by enormous calculation, a measurement system is designed for measuring dynamic envelope curve of high-speed train. Based on binocular vision, the system produces the feature using high power pulse laser, and obtains the dynamic envelope curve of the high-speed train by high-speed acquisition, process and calculation of information that reflects the excursion of train. One field calibration method is proposed to build quickly and efficiently both the position relationship between the two cameras and the transformation between center coordinate system of railway and coordinate system of measurement system. It is proved by experimental results that the measurement precision of the system can reach up to ± 0.5 mm, and that the measurement of the dynamic envelope curve of high-speed train is accomplished with high reliability, which can provide useful statistics for the definition of dynamic gauge of high-speed train.

Key words measurement; machine vision; dynamic envelope curve; dynamic gauge; high-speed train; calibration

OCIS codes 150.3040; 140.3430; 330.1400; 150.6910; 150.1488

1 引 言

动态限界是以轨道线路中心线和轨面为基准的

一个轮廓, 规定列车安全行驶过程中无论发生多大偏移, 都必须始终处于该轮廓范围以内。动态包络

收稿日期: 2012-09-19; 收到修改稿日期: 2012-10-19

基金项目: 国家 863 计划(2012AA041205)、国家“十二五”科技支撑计划(2011BAF13B04)和高等学校博士学科点专项科研基金(20090032110048)资助课题。

作者简介: 郭 寅(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事激光及光电测试技术方面的研究。E-mail: yin_guo@tju.edu.cn

导师简介: 叶声华(1934—), 男, 教授, 博士生导师, 工程院院士, 主要从事激光及光电测试技术方面的研究。

E-mail: shhuaye@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liuchangjie@tju.edu.cn

线定义为车辆运行过程中受各种不利因素影响所导致的最大极限轮廓。动态包络线是制定动态限界的主要依据,准确得到动态包络线不仅是车辆设计、制造、运用过程中的一项重要内容,更是安全行车的重要保障。目前国内外普遍采用计算的方法求取动态包络线,计算过程中所涉及的参数多为主观取值,且无法将所有随机因素考虑在内,计算结果不能真正客观地反映实际情况。

随着高铁运营速度的不断提高,安全问题日益突出,通过传统的计算手段获得动态包络线已无法满足当前的应用需求,精确地测量高速列车动态包络线成为当务之急^[1~3]。此外,更加合理准确的动态限界为缩小建筑接近限界提供理论依据,在保证安全性的同时不必像过往那样设置较大的安全裕量,可创造较大的经济效益和社会效益。

为此,中国铁道科学研究院提出建设机车车辆及动车组动态限界检测仪项目,要求系统能满足车体 500 km/h 运行速度下的实时测量,且精度优于 ±2.5 mm。针对这一需求,本文设计了高速列车动态包络线测量系统,系统使用大功率线激光瞬时光源构造能反映列车动态偏移的测量特征,采用两台高速相机作为图像采集单元,基于双目视觉测量原理,通过现场系统校准方法,高速采集、处理、解算测量特征,实现高速列车动态包络线的实时测量。

2 测量系统介绍

整列高速列车可视为由一系列与轨道线路中心线相垂直的截面组成,根据动态包络线的定义,若能获得高速列车运行过程中车体每一个截面的外轮

廓,便可求出动态包络线,而每一个截面外轮廓又可视为由一系列空间点构成,因此测量动态包络线的问题可转变为测量空间点三维坐标的问题。

由于高速列车动态包络线测量具有测量速度快、精度要求高等特点,传统的测量方法已无法满足上述需求,视觉测量具有快速、非接触、高精度等优点,是解决在线实时测量的主要技术手段。

2.1 测量原理

系统基于双目视觉测量原理^[4],利用空间点在两个相机像平面上成像点的坐标求取空间点的三维坐标。

如图 1 所示,设 $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 为相机 1 坐标系,像平面坐标系为 $O_1-X_1Y_1$,有效焦距为 f_1 ; $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 为相机 2 坐标系,像平面坐标系为 $O_2-X_2Y_2$,有效焦距为 f_2 ,将相机 1 坐标系作为测量系统坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$,根据相机透视投影模型及双相机位置关系,空间点的三维坐标可表示为

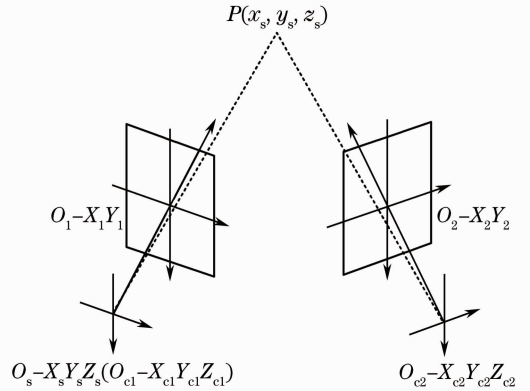


图 1 双目视觉测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of stereo vision measurement

$$\begin{cases} x_s = z_s X_1 / f_1, \\ y_s = z_s Y_1 / f_1, \\ z_s = \frac{f_1 (f_2 t_1 - X_2 t_3)}{X_2 (r_{31} X_1 + r_{32} Y_1 + f_1 r_{33}) - f_2 (r_{11} X_1 + r_{12} Y_1 + f_1 r_{13})} = \\ \frac{f_1 (f_2 t_2 - Y_2 t_3)}{Y_2 (r_{31} X_1 + r_{32} Y_1 + f_1 r_{33}) - f_2 (r_{21} X_1 + r_{22} Y_1 + f_1 r_{23})}, \end{cases} \quad (1)$$

用 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$, $\mathbf{T} = [t_1 \quad t_2 \quad t_3]^T$, 分别

表示相机 2 坐标系到相机 1 坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。由(1)式可知,只需获取有效焦距 f_1 、 f_2 和被测点在两相机像平面上的精确图像坐标 X_1 、 Y_1 、 X_2 、 Y_2 , 以及旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} , 即可求解空

间点在测量系统坐标系下的三维坐标。旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 通过现场双相机位置关系校准求得,将在后面内容中论述,剩余参数可通过相机内参校准获得^[5~12]。

2.2 测量方案

利用线激光光源投射出能覆盖整个车身高度的光条于车身一侧,构造能反映车体动态偏移的测量

特征,通过图像处理分解为一系列点,根据前述测量原理解算每个点的三维坐标,得到被测截面其中一侧的外轮廓。在线路两侧各布置一套测量系统,分别对各自一侧的车身外轮廓进行测量以求取整个截

面的外轮廓,融合所有被测截面的外轮廓数据,即可求得动态包络线。测量系统组成及布局如图 2 所示。

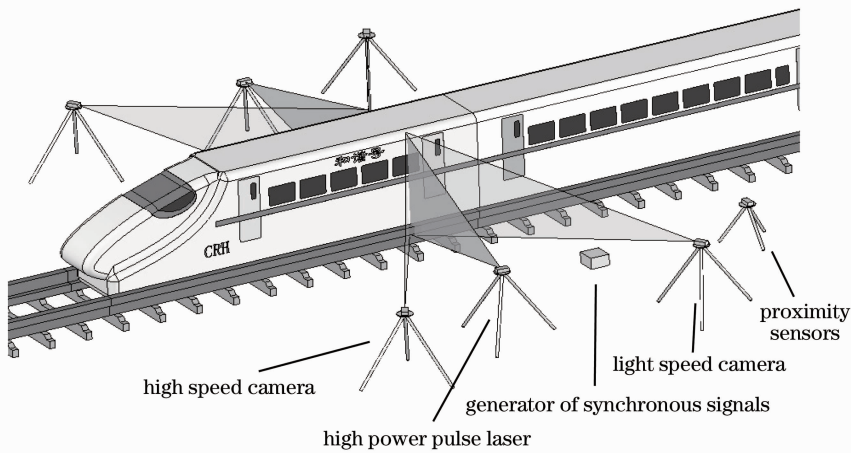


图 2 测量系统结构图

Fig.2 Structure diagram of measurement system

整个系统主要由两台高速相机、大功率线激光瞬时光源、位置传感器、同步信号发生器、图像处理单元等部分组成,其中高速相机和大功率线激光瞬时光源这两个最核心单元的选取分别基于以下两方面原因:

1) 为满足以 500 km/h 速度运行的高速列车动态包络线实时测量,其最小曝光时间应达到微秒量级,拍摄帧速应高于 500 frame/s,选用具有合适参数的高速相机即可满足上述需求。

2) 由于高速相机只在很短的曝光时间内采集线激光光源构造的测量特征,考虑到工作效率和成本的原因,选择瞬时光源,另外,根据高铁安全运行的相关要求,同时也为了避免振动对测量带来的影响,测量系统布置在离列车将近 10m 的位置,为保证图像中测量特征的清晰度,光源需要较大的功率,因此系统选用大功率线激光瞬时光源。

2.3 工作过程

系统对高速通过的列车进行实时测量,具体工作过程为:

- 1) 位置传感器检测到高速列车进入测量区域,产生触发信号;
- 2) 同步信号发生器受触发信号控制产生三路同步信号,分别控制两台高速相机与大功率线激光瞬时光源开始工作;
- 3) 大功率线激光瞬时光源在车身表面投射光条以构造测量特征,高速相机进行同步采集;
- 4) 图像处理单元对所有被测图像进行三维解

算,求出所有被测截面其中一侧的外轮廓;

5) 融合线路两侧系统的测量数据,得到高速列车动态包络线。

3 现场校准技术

由系统测量原理可知,相机内参校准和双相机位置关系校准是实现测量功能的前提条件,前者可通过多种方法在实验室条件下提前完成,后者需根据现场情况选择最合适的方法。另外,动态包络线定义中的最大极限轮廓以轨道线路中心线和轨面为基准,测量数据只有统一到这个基准下才具有现实意义,因此建立基准坐标系及其与测量系统坐标系的转换关系也是完成动态包络线测量的关键环节。

将基准坐标系命名为轨道中心坐标系,规定轨道中心面与轨面的交线(轨道线路中心线)为坐标系的 X 轴,在 X 轴上任取一点作为原点,Z 轴取轨面法矢量方向,Y 轴在轨面上,满足右手定则,如图 3 所示,就一套系统而言,现场校准的两个环节:双相机位置关系校准和建立轨道中心坐标系及其与测量系统坐标系的转换关系,该转换关系分别对应 T_1 、 T_2 。

按照铁路部门的相关规定,出于人身安全和车辆运行安全考虑,测量系统的现场布局及校准只能在维修天窗期间进行,由于校准时需要进入到运行线路中,因此在要求保证校准精度的同时还对校准时间做了严格的限制,从而对校准设备的便携性和校准方法的快速性都提出了很高的要求。

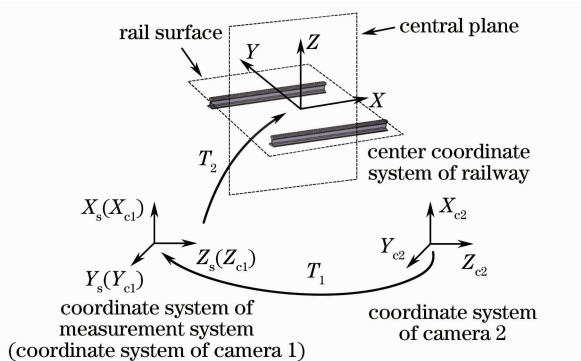


图 3 现场校准示意图

Fig. 3 Schematic of field calibration

3.1 双相机位置关系校准

当相机内参数已知时,完成双相机位置关系校准:求取双相机间旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} ,即可解算空间点在测量系统坐标系下的三维坐标。

由(1)式可得到

$$\begin{aligned} (f_2 t_1 - X_2 t_3) \cdot (r_{21} X_1 + r_{22} Y_1 + f_1 r_{23}) - \\ (f_2 t_2 - Y_2 t_3) \cdot (r_{11} X_1 + r_{12} Y_1 + f_1 r_{13}) = \\ (Y_2 t_1 - X_2 t_2) \cdot (r_{31} X_1 + r_{32} Y_1 + f_1 r_{33}). \end{aligned} \quad (2)$$

根据相机布局可知 $t_1 \neq 0$, 设 $\mathbf{T}' = a\mathbf{T}$, $a = 1/t_1$, 则有 $\mathbf{T}' = (1 \quad t'_2 \quad t'_3)^T$, (2) 式转化为含有 11 个未知数的非线性方程, 用函数 $f(x) = 0$ 来表示, 其中, $\mathbf{x} = (t'_2, t'_3, r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33})$. 由 $r_{11} \sim r_{33}$ 构成的旋转矩阵 \mathbf{R} 具有正交性, 满足 6 个正交约束方程, 利用(2)式和正交约束方程构造含有 5 个独立变量的无约束最优目标函数, 当 $n \geq 5$ 时即可利用数学优化方法^[13~16] 求解 \mathbf{x} 。

校准时双相机对不同位置下一个已知精确长度的基准尺进行测量, 提取基准尺两端目标点坐标求取 \mathbf{x} 。同时, 假设基准尺物理空间长度为 L , 在包含比例因子 a 的测量系统坐标系空间长度为 L' , 则有

$$L'^2 = a^2 L^2. \quad (3)$$

通过(3)式求解 a , 其符号由坐标选取法决定, 由 a 和 \mathbf{x} 即可得到旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} , 整个校准过程方便、快捷。

3.2 建立轨道中心坐标系及其测量系统坐标系的转换关系

3.2.1 校准靶标设计

轨道中心坐标系定义中主要包含两个元素: 轨道线路中心线和轨面, 校准靶标围绕这两个元素进行设计。如图 4 所示, 铝制校准靶标一端可与轨面及内轨面紧密贴合, 称为校准端, 另一端仅与轨面贴合。校准端上部内外侧各分布一个 LED 光源, 下部有磁铁用做辅助定位, 靶标与铁轨接触的各面通过

精密加工保证精度, 当靶标与铁轨紧密贴合时, 可认为校准端的 M 、 N 两面分别与所处一侧铁轨轨面、内轨面重合。

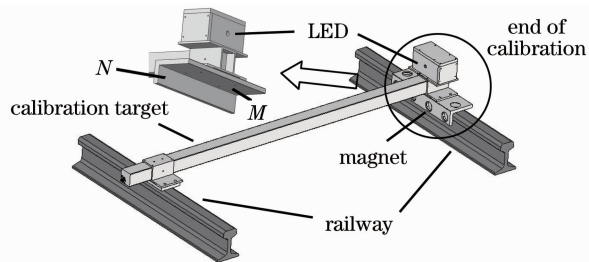


图 4 校准靶标

Fig. 4 Calibration target

采用其他高精度校准设备校出两侧 LED 光源与 M 、 N 两面的位置关系, 当校准靶标置于铁轨上时, 则可视 LED 光源与轨面、内轨面的位置关系为已知条件。

3.2.2 建立轨道中心坐标系

按图 5 所示位置依次放置校准靶标, 并同时使用双相机提取 LED 光源坐标, 校准原理图如图 6 所示, π 代表轨面, A 、 B 、 C 、 D 分别表示校准靶标的 4 个 LED 光源的位置点, 测量得到各点在测量系统坐标系下的坐标, l_1 、 l_2 为轨面与内轨面的交线, l_3 为 B 、 C 、 D 三点所拟合的直线, 与 l_1 、 l_2 近似平行, 过点 A 作 l_3 的垂线交于点 P , A 、 P 两点间的距离可通过计算得到, 设为 d_0 。

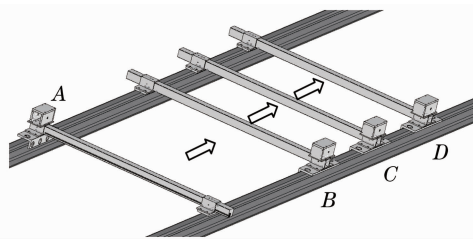


图 5 校准操作示意图

Fig. 5 Schematic of calibration operation

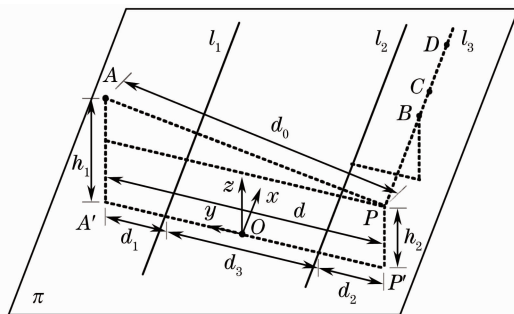


图 6 校准原理图

Fig. 6 Schematic diagram of calibration

提前校准可获得靶标两侧 LED 光源与 M 、 N

两面的位置关系,由于点 P 与点 B 同在直线 l_3 上,可认为点 P 到轨面及近侧内轨面的距离与点 B 相同。假设点 A 到轨面及近侧内轨面的距离分别为 h_1 、 d_1 ,点 P 到轨面及近侧内轨面的距离分别为 h_2 、 d_2 ,则 A 、 P 在轨面上的投影 A' 、 P' 两点间的距离 d 及轨距 d_3 可分别为

$$d = \sqrt{d_0^2 - (h_1 - h_2)^2}, \quad (4)$$

$$d_3 = \sqrt{d_0^2 - (h_1 - h_2)^2} - d_1 - d_2. \quad (5)$$

点 O 位于线段 $A'P'$ 上并平分轨距,以点 O 为原点, OA' 为 y 轴正方向,直线 l_3 矢量方向为 x 轴方向,取 BD 方向为正向,根据右手坐标系确定 z 轴,由此建立起轨道中心坐标系。

设点 A 在轨道中心坐标系下的坐标为 (x, y, z) ,由图 6 中几何关系可得

$$\begin{cases} x = 0, \\ y = \frac{\sqrt{d_0^2 - (h_1 - h_2)^2} + d_1 - d_2}{2}, \\ z = h_1. \end{cases} \quad (6)$$

同理可得点 B 、 C 、 D 在轨道中心坐标系下的坐标。

3.2.3 建立转换关系

测量系统坐标系到轨道中心坐标系的转换关系可由旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 表示:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{R}\mathbf{M}_i + \mathbf{T}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{P}_i 中为公共点在轨道中心坐标系下的坐标, \mathbf{M}_i 为公共点在测量系统坐标系下的坐标。 \mathbf{P}_i 、 \mathbf{M}_i 的质心坐标为

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{P}} = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i / n, \\ \bar{\mathbf{M}} = \sum_{i=1}^n \mathbf{M}_i / n. \end{cases} \quad (8)$$

质心之间同样存在如下关系:

$$\bar{\mathbf{P}} = \mathbf{R}\bar{\mathbf{M}} + \mathbf{T}. \quad (9)$$

联立(7)式与(9)式,可得

$$\mathbf{P}_i - \bar{\mathbf{P}} = \mathbf{R}(\mathbf{M}_i - \bar{\mathbf{M}}). \quad (10)$$

令 $\mathbf{P}'_i = \mathbf{P}_i - \bar{\mathbf{P}}$, $\mathbf{M}'_i = \mathbf{M}_i - \bar{\mathbf{M}}$, \mathbf{P}'_i 、 \mathbf{M}'_i 为 \mathbf{P}_i 、 \mathbf{M}_i 质心化后的坐标,建立最优目标函数:

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{P}'_i - \mathbf{R}\mathbf{M}'_i\|^2 = \sum_{i=1}^n (\mathbf{P}'_i{}^T \mathbf{P}'_i + \mathbf{M}'_i{}^T \mathbf{M}'_i - 2\mathbf{P}'_i{}^T \mathbf{R}\mathbf{M}'_i). \quad (11)$$

要使 F_{\min} 取最小值, $\sum_{i=1}^n \mathbf{P}'_i{}^T \mathbf{R}\mathbf{M}'_i$ 应取最大值,令

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^n \mathbf{M}'_i \mathbf{P}'_i{}^T, \quad (12)$$

则有

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{P}'_i{}^T \mathbf{R}\mathbf{M}'_i = \text{tr}(\mathbf{R} \sum_{i=1}^n \mathbf{M}'_i \mathbf{P}'_i{}^T) = \text{tr}(\mathbf{R}\mathbf{H}), \quad (13)$$

式中 tr 是矩阵求迹运算,对 \mathbf{H} 进行奇异值分解^[17]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \times \mathbf{S} \times \mathbf{V}^T, \quad (14)$$

通过求 $\sum_{i=1}^n \mathbf{P}'_i{}^T \mathbf{R}\mathbf{M}'_i$ 的最大值,可以得到旋转矩阵的最优解:

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{U}^T. \quad (15)$$

将 \mathbf{R} 代入(9)式可计算得到平移矩阵 \mathbf{T} ,从而建立起轨道中心坐标系与测量系统坐标系的转换关系。

4 实验及数据分析

使用两台 Mikrottron 公司 MotionBLiTZ Eosens Cube6 高速相机作为高速列车动态包络线测量系统的图像获取单元,其最大拍摄帧速可达 83500 frame/s,最小曝光时间可达 $2 \mu\text{s}$,实际使用过程中,根据高速列车的运行速度设置拍摄帧速,曝光时间通常取 $10 \mu\text{s}$ 即可保证图像清晰。

4.1 测量系统精度验证实验

由于暂无其他设备能实现高速列车动态包络线的高精度测量,因而无法与该系统在实际动态测量中的精度进行对比,这里设计静态模拟实验对系统精度进行验证。

利用一个简单的阶梯形标准件验证测量系统精度,如图 7 所示,标准件经过精密加工制作而成,各相邻表面相互垂直,两个前端面之间的距离 d 为 200 mm。由于实际测量中将相机布置在离列车将近 10 m 的位置,且被测车身高度将近 4 m,因此选取距离相机 10 m 处的一点,在以该点为中心的 4 m

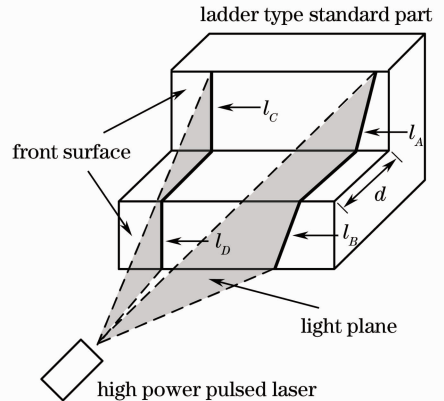


图 7 精度验证实验示意图

Fig. 7 Schematic diagram of verification of precision

(宽度)×4 m(高度)×4 m(深度)空间范围内任意摆放阶梯型标准件并对其进行测量。

实验过程为：

1) 通过精密调整手段,保证光平面与前端面垂直,测量光平面在前端面投射得到的光条 l_A 、 l_B ;

2) 变换光平面在标准件上的投射位置,同样确保光平面与前端面垂直,测量光条 l_C 、 l_D ;

3) 对测量得到的光条 l_A 、 l_C 上的所有点进行平面拟合,计算光条 l_B 、 l_D 上所有点到拟合平面的距离;

4) 移动标准件的位置,重复 1~3 的实验步骤。

重复 20 次上述过程,得到如表 1 所示的数据。

表 1 精度验证实验结果

Table 1 Results of experiment

No.	Experimental result /mm	Maximum deviation /mm
1	199.75	0.25
2	199.88	0.12
3	200.09	-0.09
4	199.67	0.33
5	200.43	-0.43
6	199.81	0.19
7	199.73	0.27
8	200.17	-0.17
9	199.78	0.22
10	199.81	0.19
11	200.31	-0.31
12	199.96	0.04
13	199.79	0.21
14	199.56	0.44
15	199.61	0.39
16	200.28	-0.28
17	200.14	-0.14
18	199.89	0.11
19	199.80	0.20
20	200.25	-0.25

表 1 中的最大偏差为光条 l_B 、 l_D 上所有点到拟合平面的距离与理论距离 d 的最大偏差值,实测距离为产生最大偏差时所对应的点到拟合平面的距离。从表 1 中数据可以看出,系统静态测量精度可达 ± 0.5 mm。

由于所使用高速相机的曝光时间可达微秒级,设为 $10 \mu s$,同时假设高速列车时速为 500 km/h,则在高速相机曝光时间内列车通过的距离仅为 1.39 mm。根据高速列车的制造工艺可知,在 1.39 mm 的范围内,列车表面各处截面方向的尺寸基本不变,且在 $10 \mu s$ 的曝光时间内,列车车身偏移

也不会发生突变,因此可认为系统的动态测量精度与静态测量精度一致。

4.2 现场实验

根据《高速动车组整车试验规范》的相关要求^[18],选择京津城际铁路永乐站作为实验场地,受现场及设备条件限制,仅对 CRH3-059C 号动车组一侧的动态包络线进行测量,判断其通过高度为 1250 mm 站台时是否满足限界要求。如图 8(a)为动车组侧面实物图,图 8(b)为高速相机采集到的测量特征图像。



图 8 现场实验图片。(a)动车组侧面图;(b)测量特征图像

Fig. 8 Picture of field experiment. (a) Train side; (b) feature

实验现场环境条件:温度为 $22.1 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度(RH)为 71.6%,大气压为 100.8 kPa,风速为 0.3 m/s,动车组分别以 240 km/h 和 300 km/h 时速通过,测量系统对其进行测量,得到如图 9(a)和

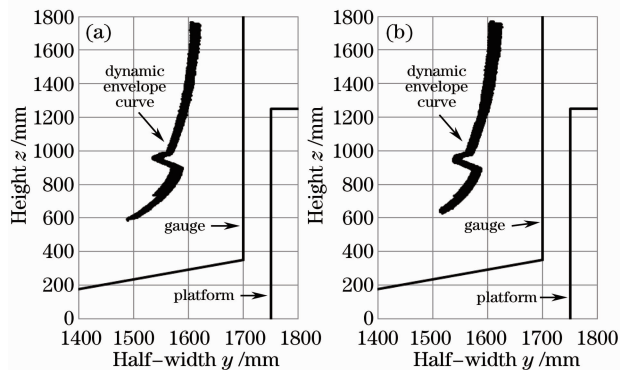


图 9 动车组在不同时速下的动态包络线。(a)240 km/h 时速;(b) 300 km/h 时速

Fig. 9 Dynamic envelope curve of electric multiple unit at different speeds. (a) Speed at 240 km/h; (b) speed at 300 km/h

(b)所示的结果。

由图9(a)和(b)可知,在现场实验条件下,动车组分别以240 km/h和300 km/h时速运行过程中的动态包络线满足高速铁路机车车辆限界和站台的限界要求。

定义动态偏移量为动态包络线在同一高度下的最大值与最小值之差,测量数据显示动车组在240 km/h和300 km/h时速下的最大动态偏移量分别为17.65 mm和25.41 mm,测量结果可反映出动车组在高速运行过程中比较平稳。

5 结 论

设计了一种高速列车动态包络线测量系统,填补了我国在这一领域的空白。

1) 基于双目视觉测量原理,通过大功率线激光光源构造测量特征,利用高速相机实时获取被测图像,实现动态三维测量;

2) 提出一种快速、适用于现场的系统校准方法,可高效建立双相机之间的位置关系及轨道中心坐标系,并将测量数据统一到轨道中心坐标系;

3) 实验结果证明,系统测量精度在 ± 0.5 mm以内,切实有效地实现了高速列车动态包络线的真实测量;

4) 系统测量结果反映的是高速列车在各种因素综合影响之后形成的实际动态包络线,因此,也为列车交汇、穿梭隧道等特殊复杂情况下的动态包络线测量提供了一种可行的解决方案。

参 考 文 献

- 1 UIC505-1. Railway Transport Stock-Rolling Stock Construction Gauge[S]. International Union of Railways, 2006
- 2 Han Mei, Han Boling, Li Hongyan *et al.*. Calculation method of the distance between railway out-of-gauge goods and structure gauge[J]. *China Railway Science*, 2011, **32**(1): 122~126
韩梅, 韩伯领, 李红艳等. 铁路超限货物限界距离计算方法[J]. *中国铁道科学*, 2011, **32**(1): 122~126
- 3 Teng Wanxiu, Cheng Yajun. Comparative study on computation methods for dynamic car profiles[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2009, **22**(4): 40~45
滕万秀, 程亚军. 车辆限界计算方法对比研究[J]. *都市快轨交通*, 2009, **22**(4): 40~45
- 4 Zhu Jigui, Yu Zhijing. The Principle of Vision Metrology[M]. China Machine Press, 2011
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 机械工业出版社, 2011
- 5 Joaquim Salvi, Xavier Armangué, Joan Batlle. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation[J]. *Pattern Recognition*, 2002, **35**(7): 1617~1635
- 6 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 7 I. Miyagawa, H. Arai, H. Koike. Simple camera calibration from a single image using five points on two orthogonal 1-D objects[J]. *IEEE Trans. Actions on Image Processing*, 2010, **19**(6): 1528~1538
- 8 Guo Tao, Da Feipeng, Fang Xu. Camera calibration under small field of view[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0808001
郭涛, 达飞鹏, 方旭. 小视场环境下的摄像机标定[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0808001
- 9 Xue Junpeng, Su Xianyu, Dou Yunfu. A concentric circles and wedge grating-based camera self-calibration method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0308002
薛俊鹏, 苏显渝, 窦蕴甫. 基于同心圆光栅和楔形光栅的摄像机自标定方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0308002
- 10 Hu Hao, Liang Jin, Tang Zhengzong *et al.*. Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(2): 369~378
胡浩, 梁晋, 唐正宗等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(2): 369~378
- 11 Tian Zhen, Zhang Qi, Xiong Jiulong *et al.*. Calibration method for large field of view camera based on infinite homography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0415001
田震, 张玘, 熊九龙等. 基于神经网络的大范围空间标定技术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0415001
- 12 Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu *et al.*. Calibration method for large field of view camera based on infinite homography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0715002
苑云, 朱肇昆, 张小虎等. 基于无穷单应的大视场摄像机标定方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0715002
- 13 Zhou Weihua, Ding Lei, Wang Yawei *et al.*. Application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(4): 852~857
周维虎, 丁蕾, 王亚伟等. 光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(4): 852~857
- 14 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1872~1876
郝继贵, 郭磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1872~1876
- 15 V. Indelman. Bundle adjustment without iterative structure estimation and its application to navigation [C]. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 2012. 748~756
- 16 Yongkai Yin, Xiang Peng, Ameng Li *et al.*. Calibration of fringe projection profilometry with bundle adjustment strategy[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 542~544
- 17 Lin Jiarui, Zhu Jigui, Guo Yin *et al.*. Establishment of precise three-dimensional coordinate control network in field large-space measurement[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, **48**(4): 6~11
林嘉睿, 郝继贵, 郭寅等. 现场大空间测量中精密三维坐标控制网的建立[J]. *机械工程学报*, 2012, **48**(4): 6~11
- 18 The Ministry of Railways of The People's Republic of China. Testing of High-Speed Electric Multiple Unit on completion of Construction[S]. Beijing, 2008
中华人民共和国铁道部. 高速动车组整车试验规范[S]. 北京, 2008