

文章编号: 1003-1995(2018)02-0134-04

一种铁路桥梁线路偏心 and 道砟厚度的测量方法

李添悦¹ 程子默¹ 陈子乾¹ 李元军²

(1. 广西大学 物理科学与工程技术学院 广西 南宁 530004; 2. 大秦铁路股份有限公司 科学技术研究所 山西 太原 030013)

摘要 铁路桥梁线路偏心 and 道砟厚度是否达标关系到高速列车运行的安全性。本文分析了桥梁线路偏心 and 道砟厚度的测量原理,提出了一种采用光学图像技术的测量方法,并据此研制了一台含有智能手机的样机。该样机可被安装在铁路桥上线路的左侧钢轨上,使用手机前后摄像头对放置于左右两侧挡砟墙和右侧钢轨上的专用条码标尺拍照,通过内嵌于智能手机内的图像处理和计算软件,可实时获得 3 个条码标尺的空间距离和测量零位偏差,经计算得到桥梁线路偏心 and 道砟厚度。为了获取手机摄像头的主要光学技术参数,消除非线性畸变,提高测量精度,研制过程中需对其内方位元素和非线性畸变采用光线束自检校平差解法进行检校,采用软件进行修正。现场试验表明该方法可快速准确地测量桥梁线路偏心 and 道砟厚度。

关键词 铁路桥梁; 桥梁线路偏心; 道砟厚度; 光学图像测量; 内方位元素; 非线性畸变

中图分类号 U216.3 **文献标识码** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.02.33

铁路桥梁线路偏心超限原因主要有施工误差、运营线路的横移变化、墩台倾斜、支座病害等^[1]。由于桥梁线路偏心对梁体的承载力有较大的影响,可能造成横隔板扭曲折断,因此在铁路施工过程中及运营维护中需每季度进行一次检测。《铁路桥隧建筑物大修维修规则》(铁运[1999]146号)第 3.1.2 条要求桥上线路中线与梁跨设计中线的偏差:钢梁不得大于 50 mm,圪工梁不得大于 70 mm。超过偏差限值时,应进行检算。第 3.1.8 条要求轨底高出挡砟墙顶不应小于 0.02 m;枕下道砟厚度不小于 0.25 m,也不得超过 0.45 m^[2]。现行的桥梁线路偏心 and 道砟厚度测量方法,各工务段均采用不同结构形式的测量尺^[3-4]进行人工读数量测,使用这些测量工具有的需要在梁端扒砟,有的需要在梁缝中心事先埋设观测桩、刨坑等,作业时间长(5 min)、设备体积较大(长 1 400 mm,宽 60 mm,高 700 mm)、不易携带等,特别是随着列车提速和行车密度的增大,对桥上检测人员的安全构成较大威胁。本文基于光学图像测量技术,探索一种测量铁路桥梁线路偏心 and 道砟厚度的新方法。

1 桥梁线路偏心 and 道砟厚度测量原理

铁路桥梁线路偏心为桥上线路中线与梁跨(梁体)中线的偏差。道砟厚度为轨枕底面至梁体托盘顶面的石砟厚度。桥梁线路偏心 and 道砟厚度的测量原理如图 1 所示。 a 为左轨到左侧挡砟墙距离; b 为轨距; c 为左轨到右侧挡砟墙距离; d 为轨枕的理论高度,采用 60 kg/m 钢轨和 II 型轨枕时 d 取 386 mm; h 为道砟理论厚度,取 300 mm; k 为被测标尺的测量零位高度,取 386 mm; g 为挡砟墙理论高度,取 300 mm; Δy 为道砟厚度的变化量,亦为测量零位的高度变化量。则桥梁线路偏心 $e_{\text{实}} = (a+b-c)/2$,道砟厚度 $h_{\text{实}} = k+g+\Delta y-d = h+\Delta y$,其中 $k+g=h+d$ 。

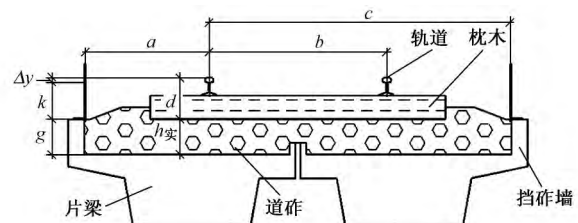


图 1 桥梁线路偏心 and 道砟厚度测量原理

根据上述计算公式,要得到桥梁线路偏心 and 道砟厚度,需要获取距离和高度参数。这些参数除了采用传统的机械测量方法,还可采用光学图像测量方法。

收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2018-01-29

基金项目: 广西回国人员重点基金(20150954); 广西大学“大学生创业创新计划”项目(201710593067)

第一作者: 李添悦(1996—),男。

E-mail: leos4a@163.com

通信作者: 陈子乾(1964—),男,研究员。

E-mail: czq8676@Hotmail.com

2 光学图像测量法

光学图像测量法基于理想光学系统的成像原理^[5] 如图 2 所示。设透镜中心到空间物点的距离(简称物距)为 s , 物方焦距为 f , 图像平面到透镜中心的距离(简称像距)为 s' , 像方焦距为 f' , 物高 y 和像高 y' 可由 CCD 或 CMOS 光电耦合器件测得。

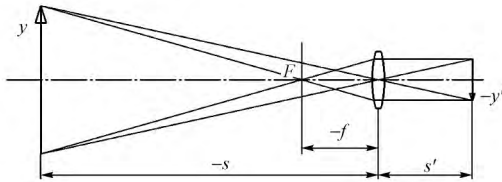


图 2 透镜成像原理

对于位于空气中的光学系统 $f' = -f$ 。根据高斯物像公式^[6] 物距 s 、像距 s' 和像方焦距 f' 之间满足

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} \tag{1}$$

一般地 $s \gg f$, 即 $s \rightarrow \infty$, 所以 $s' \approx f'$, 则像距与像方焦距相近。

根据垂轴放大率 β 公式

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \tag{2}$$

物距 s 可表示为

$$s = y \cdot \frac{s'}{y'} = y \cdot \frac{f'}{y'} \tag{3}$$

物高 y 亦可表示为

$$y = y' \cdot \frac{s}{f'} \tag{4}$$

像方焦距 f' 为光学镜头的内方位元素之一, 可采用光学放大率法精确测量^[7], 也可采用相机光线束自检校平差解法同时解算 3 个内方位元素(主点坐标 (x_0, y_0) 和像方焦距 f')^[8]。

3 原理及方法的实现

光学图像测量法可以实现对物距和物高的测量。根据桥梁线路偏心 and 道砟厚度测量原理, 将 2 个光学相机放置在一侧钢轨上, 对准左右侧挡砟墙和另一侧钢轨上的目标成像, 即可得到相应的距离和高度。智能手机恰好具有前后 2 个摄像头, 摄像头包含有 1 组光学镜头、CMOS 图像传感器等。智能手机自带了集成的图像处理器和开发软件, 具有良好的经济性和可行性。基于智能手机的测量方法如图 3 所示。

在左右侧挡砟墙和右轨上放置相同的具有特征条

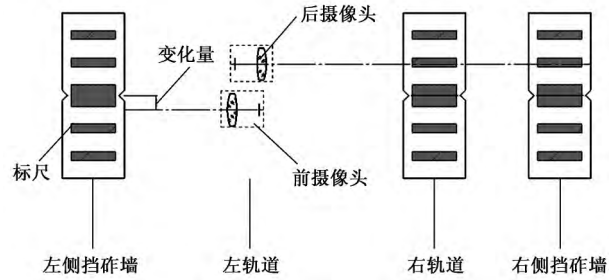


图 3 基于智能手机的测量方法

码的标尺。该标尺由 5 个黑色条码组成, 在 1 个宽条码的两侧对称布置了 2 个窄条码, 窄条码宽度均为 10 mm, 宽条码宽度为 25 mm, 各黑色条码之间的白色间隔宽度均为 10 mm, 宽条码中心是测量零位, 如图 1 所示。标尺的测量零位高度 $k = h + d - g$ 。

物高 y 对应于标尺条码宽度, 像高 y' 对应于标尺条码宽度在相机 CMOS 图像传感器上的成像高度。其中: $y' = np$, n 为成像像元个数, p 为相机 CMOS 感光器件像元尺寸。

物距 s 对应于摄像头到条码标尺的距离。式(3)可表示为

$$s = y \cdot \frac{f'}{y'} = y \cdot \frac{f'}{np} \tag{5}$$

5 个物方的黑色条码由摄像头相机成像, 可得到 5 个对应的像方高度 $y_1' \sim y_5'$, 经相机 CMOS 图像传感器处理后, 可计算得到 5 个距离值 $s_1 \sim s_5$, 取平均值作为最或然值。这样就计算得到了摄像头到左右侧挡砟墙距离值 a, c 和轨距 b 。

如图 1 所示, 当道砟厚度为理论值时, 依据水准测量原理^[9], 摄像头水平视线对准标尺测量零位, 其变化量 Δy 为 0, 成像在相机主点坐标 (x_0, y_0) y 向偏差为 0。当道砟厚度发生高低升降变化, 变化量 Δy 与其在相机 CMOS 图像传感器 y 向偏差 $\Delta y'$ 的关系式可由式(4)微分得到。

$$\Delta y = \Delta y' \cdot \frac{s}{f'} = (\Delta n \cdot p) \cdot \frac{s}{f'} \tag{6}$$

式中: Δy 为测量零位的高度变化量, $\Delta y'$ 为对应的像方高度变化量。 $\Delta y' = \Delta n \cdot p$, Δn 为测量零位像点相较于主点坐标 (x_0, y_0) 在 y 向偏差的像元个数。

4 内方位元素和非线性畸变的检校

相较于理想光学系统, 手机摄像头对目标的成像存在非线性畸变, 手机摄像头的内方位元素(主点坐标 (x_0, y_0) 和像方焦距 f') 也是未知的, 在实际应用中这些参数需要加以检校, 以提高测量精度。

采用 10 参数模型来确定摄像头的内方位元素和

非线性畸变(Δx Δy)^[10-12]。

非线性畸变可用公式表达为

$$\begin{cases} \Delta x = (x - x_0) (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \\ p_1 [r^2 + 2(x - x_0)^2] + \\ 2p_2 (x - x_0) (y - y_0) + \\ b_1 (x - x_0) + b_2 (y - y_0) \\ \Delta y = (y - y_0) (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \\ p_2 [r^2 + 2(y - y_0)^2] + \\ 2p_1 (x - x_0) (y - y_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$; k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数; p_1, p_2 为偏心畸变系数; b_1, b_2 为像平面内畸变参数。

根据光线束自检校平差解法来解算各内方位元素,需建立平面标定场,如图4所示,在墙面布置42个目标和5个编码点,精确测定各编码点间距离。

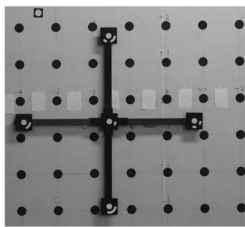


图4 标定场及目标分布

手机摄像头到标定场目标的拍摄距离大致为2 m,分别在9个位置(左上/左中/左下/中上/正中/中下/右上/右中/右下)拍摄 9×21 张像片。通过光线束自检校平差解法,得到内方位元素和非线性畸变值。

光线束自检校平差解法求解步骤为:

1) 对每张像片识别目标并定位其中心;对所有像片识别同名像点。

2) 确定内方位元素的初始值。10参数模型中主点坐标(x_0, y_0)初始值设置为摄像头CMOS图像传感器的中心像元坐标,像方焦距 f' 初始值设置为一近似值,畸变参数的初始值设置为0。

3) 根据各同名像点的坐标,采用连续像对的相对定向算法,求解各像片的外方位元素。再根据精确测定的各编码点间距离,对外方位元素进行缩放,以此作为各像片的外方位元素初始值。

4) 将内外方位元素的初始值、各编码点间距离以及各同名像点的坐标代入摄影测量共线条件方程式,迭代求解内方位元素的精确值和畸变参数。

前后摄像头分别检校。检校后手机摄像头性能参数见表1。

表1 手机摄像头性能参数

摄像头	焦距/ mm	像元数	像元尺寸/ μm	CMOS尺寸 (长×宽)/mm
前摄像头	3.82	3 840×2 160	1.37	5.29×2.97
后摄像头	2.76	1 920×1 080	1.86	3.57×2.00

5 样机研制与现场试验

依据上述原理,以智能手机为核心测量单元,研制了一台试验样机,外形尺寸为160 mm(长)×108 mm(宽)×172 mm(高),质量1.2 kg。其主要结构组成见图5。

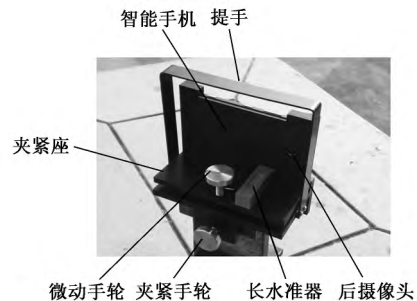


图5 样机主要结构组成

样机研制包含了嵌入式软件的开发,计算公式中带入了摄像头内方位元素值,非线性畸变亦进行了校正。当长水准器水泡居中时,镜头中心与主点构成的摄像头光轴水平误差 $<10''$ 。

试验现场见图6。将包含有智能手机的试验样机安装在左侧钢轨上,3个条码标尺分别安装在左右侧挡砟墙和右侧钢轨上。用长水准器将摄像头光轴调整为水平状态,启动嵌入式软件程序,点击手机屏幕界面按键,使用手机前后摄像头分别对3个条码标尺拍照,嵌入式软件对获取的图片进行实时处理,获得摄像头到左右侧挡砟墙距离 a, c 和轨距 b ,以及道砟厚度的变化量 Δy 。根据桥梁线路偏心 $e_{\text{实}} = (a+b-c)/2$,道砟厚度 $h_{\text{实}} = h + \Delta y$,软件可计算并显示实际的桥梁线路偏心和道砟厚度,将实测值与采用精密钢尺测量的标准值进行比对,桥梁线路偏心和道砟厚度变化量的测量误差(见表2)均值分别为1.1 mm和0.2 mm,完全满足厘米级的测量要求。一个测回包括对3个标尺的拍照、图像处理及显示,耗时20 s。

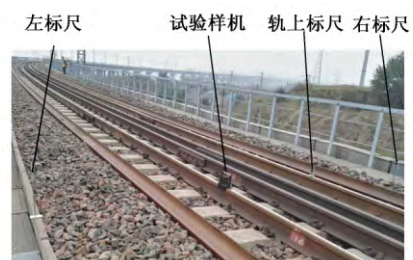


图6 试验现场

表2 桥梁线路偏心 and 道砟厚度变化量的测量误差 mm

测回	测量值			误差	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$e_{实}$	Δy
1	1 173.2	1 436.6	2 607.4	1.2	1.3
2	1 174.4	1 436.5	2 607.6	1.6	-1.6
3	1 173.6	1 437.6	2 612.8	-0.8	1.5
4	1 173.5	1 436.3	2 610.7	-0.4	1.3
5	1 174.6	1 436.2	2 608.1	1.3	0.7
均值	1 173.8	1 436.6	2 609.3	1.1	0.2

6 结语

本文提出了一种基于光学图像技术用于测量铁路桥梁线路偏心 and 道砟厚度的方法,并据此研制了一台试验样机,进行了现场试验和对比测试。结果表明:试验样机体积小,质量轻,携带方便,一次测回耗时 20 s,桥梁线路偏心 and 道砟厚度变化量测量误差均值分别为 1.1 mm 和 0.2 mm。与传统机械测量方法相比,该项技术不需要做在梁端扒砟、在梁缝中心事先埋设观测桩、刨坑等繁杂的准备工作,也不需要使体积庞大的检测尺,避免了长时间操作、设备携带不便等不利因素,降低了操作难度,减少了人力和作业时间。该项技术不但在各项指标方面有很大提高,而且实现了测量过程的自动化处理和数字化存储。

参 考 文 献

- [1] 蔺勇. 桥线偏心病害整治实践[J]. 工程技术, 2017, 21(4): 268-270.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁运[1999]146号 铁路桥隧建筑物大修维修规则[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [3] 北京中铁丰实科技开发有限公司. 铁路线路桥梁偏心、道砟厚度检测尺[R]. 北京: 北京中铁丰实科技开发有限公司, 2009.
- [4] 杨瑞, 王玉龙, 侯茂盛, 等. 直角式桥梁偏心及道砟厚度测量尺: 中国, CN203440721U [P]. 2014-02-19.
- [5] 安连生. 应用光学[M]. 3版. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [6] 姚启钧. 光学教程[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [7] 沙定国. 光学测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [8] 冯其强, 李广云, 李宗春. 数字工业摄影测量技术及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2013.
- [9] 杨俊志, 李恩宝, 温殿忠. 数字水准测量[M]. 北京: 测绘出版社, 2009.
- [10] 邱茂林, 马松德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.
- [11] 冯文灏, 商浩亮, 侯文广. 影像的数字畸变模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(2): 99-10.
- [12] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量理论、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

A Measuring Method for Eccentricity of Railway Bridge Line and Thickness of Ballast

LI Tianyue¹, CHENG Zimo¹, CHEN Ziqian¹, LI Yuanjun²

(1. School of Physical Science and Engineering Technology, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China;

2. Science and Technology Research Institute, Daqin Railway Limited by Share Ltd, Taiyuan Shanxi 030013, China)

Abstract Whether the eccentricity of railway bridge line and the thickness of ballast reaches the standard or not is related to the safety of high speed trains operation. The measuring principle for the eccentric of bridge line and the thickness of ballast was analyzed, a measuring method using optical image technology was proposed, and a prototype with intelligent mobile phone was developed. The prototype can be installed on the left rail of the railway bridge line, the photos of special bar code scale placed on both sides of the ballast retaining wall and the right rail could be taken by front and the rear cameras of the mobile phone, the space distance and deviation of measurement zero position can be obtained through three bar code scales in real time by image processing and computing software embedded in intelligent mobile phones, and the eccentric of bridge line and the thickness of ballast was concluded by calculation. In order to obtain the main optical technical parameters of the mobile phone camera, eliminate the nonlinear distortion and improve the measurement accuracy, the calibration for the inner orientation elements and the nonlinear distortion was made by using light beam self-calibration adjustment method in the process of development, which could be modified by software. Field test shows that this method can measure the eccentric of bridge lines and the thickness of ballast quickly and accurately.

Key words Railway bridge; Eccentricity of railway bridge line; Thickness of ballast; Optical image measurement; Elements of interior orientation; Nonlinear distortion

(责任编辑 葛全红)