DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412516

刚性接触网磨耗动态检测系统视觉标定方法研究*

占 栋,高仕斌,于 龙

(西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

摘 要:接触线磨耗是综合反映接触网服役性能的重要指标。针对接触线空间布置范围大,磨耗检测精度要求高,人工检测效 率低的难题,提出综合运用激光三角和沙姆成像原理,研究构建基于线结构光测量技术的车载接触线磨耗主动视觉检测方法。 提出采用高斯-牛顿非线性最小二乘优化方法,对像平面与光平面单应性矩阵、镜头畸变参数进行交叉迭代求解,建立面向接 触线磨耗动态检测的大视场、高精度视觉模型及其参数标定方法,解决接触线磨耗检测系统视觉建模及参数标定难题。立足现 场实际需求,研制接触线磨耗车载检测装置,分步开展室内静态标定实验和现场动态检测试验。结果表明,实验室标定重投影 误差控制在 0.083 mm 以内,与传统模型相比提高 53.1%。接触线磨损宽度、磨损深度及磨损面积动态检测数据与人工静态测 量数据相比,RMS 误差分别控制在 0.119 mm,0.115 mm,0.788 mm² 以内。

关键词: 刚性接触网;接触线;摩擦磨损;相机标定;动态检测

中图分类号: TH873.7 U226.5 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.2040

Research on wear dynamic inspection for rigid catenary and corresponding vision modeling

Zhan Dong, Gao Shibin, Yu Long

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Contact wire wear (CWW) is an important and comprehensive indictor to represent the catenary servicing performance. Due to large spatial range, high accuracy and high efficiency requirements of CWW measurement, a visual method with active structured-light is proposed for the application of CWW onboard monitoring based on the triangulation and Scheimpflug principles. To solve the vision modeling and calibration problems, the Gaussian-Newton nonlinear least square method is investigated. The parameters of homograph matric between image plane and structured-light plane, the coefficients of lens distortions are extracted simultaneously by the cross-interactive numerical optimization approach. The camera calibration for the CWW measurement is established with large field of view and high accuracy, and the corresponding onboard monitoring equipment is developed to meet the field demand. The experimental studies of static calibration and field dynamic test are both carried out. It's found that the calibration re-projection root-mean-square (RMS) errors of the proposed imaging model is 0.083 mm, which improves the accuracy of 53.1% compared to the traditional imaging model. Meanwhile by the comparing the onboard test and manual results, the RMS errors of CWW width, depth and area are within 0.119 mm, 0.115 mm and 0.788 mm², respectively.

Keywords: rigid catenary; contact wire; tribology behavior; camera calibration; dynamic inspection

0 引 言

接触网是轨道交通沿线架设的重要基础设施,担负 着源源不断地为列车输送电能的重任,其性能直接关乎 牵引供电安全。相比干线铁路柔性接触网,刚性接触网 具有结构简单、无张力、载流大、维修少、节省隧道净空等 特点,为有效控制地铁建设和运营成本,提高供电可靠性 发挥了显著作用,是我国地铁最主要的牵引供电方式。 接触线作为刚性接触网的关键载流部件,借助汇流排、绝 缘子及支持装置进行固定,并与受电弓滑板构成摩擦副, 实现弓网机械、电气与几何匹配。接触线是接触网系统

收稿日期:2024-02-23 Received Date: 2024-02-23

^{*}基金项目:国家自然科学基金(52372401)、四川省自然科学基金(2023NSFSC0487)项目资助

中与受电弓碳滑板直接接触的部件,长期承载受电弓高 速摩擦、弓网振动和各种环境激扰带来的机械磨损、电气 磨损和物理磨损,是所有供电类导线中工作环境最恶劣 的一种。接触线磨损不规则,形貌复杂,在高速弓网动态 耦合作用下,极可能诱发剧烈的弓网冲击,造成弓网关系 恶化,甚至危及运行安全。如何对接触线磨损进行快速 精确测量,并及时掌握接触线服役性态,是进行接触线寿 命评估及维修更换面临的重要技术难题,也是提高接触 网维修效率和保障牵引供电系统可靠运行所必须解决的 现场难题。

国内外学者围绕刚性接触网载流摩擦磨损机理、磨耗 演变及寿命预测开展了大量研究。Koyama 等^[1-2]通过研 究接触线表面状态与受电弓动态耦合关系,发现受电弓 动态性能是接触线波浪形磨耗的主要诱因。李先航等^[3] 建立了弓网1:1有限元摩擦自激振动模型,使用复特征 值法探明弓网系统参数对接触线磨耗的影响机制。 Giuseppe 等^[4]综合考虑弓网接触界面的力-电-热效应. 构建了接触线磨耗通用数值仿真计算方法,揭示了接触 线不平顺对磨耗的影响规律。Mei 等^[5-7]、付文明等^[8]、 范杰等^[9]、黄之元等^[10]先后利用弓网载流摩擦磨损实验 台,通过长期实验获取弓网滑动摩擦因数、滑板温度、电 流、电压、电弧、滑板磨损量的关键特征参数[11],构建不 同条件下接触线磨耗分布与预测模型,探明了接触线磨 耗随摩擦因数与载流量的动态变化规律。上述研究主要 依赖理论建模或模拟实验,实际地铁弓网动态耦合过程 极为复杂,牵涉因素众多,理论分析和模拟实验所得结论 与实际往往存在较大偏离。为此,邹栋等^[12]综合考虑接 触副结构特征、磨损现象时空属性,结合弓网异常磨损防 治实际需求,通过现场实测进一步验证接触力、速度、电 流、环境温度与接触线磨耗的关联分析模型[13],得到弓 网受流质量随接触线磨耗的退变规律[14]。在此基础上, 为解决接触线磨耗动态检测难题,方岩等^[15]、 占栋等[16-17]、王延华等[18]、游诚曦等[19-20]等先后提出采 用图像识别、空间坐标变换等算法,基于单目面阵、双目 线阵主动摄像测量技术,对接触网几何参数及磨耗进行 动态检测。上述检测方法主要利用接触光带图像的灰度 梯度特征,对接触线工作面宽度进行识别,通过弦长与半 径等效换算得到磨耗深度,但无法获取磨耗断面的完整 轮廓信息。针对接触线磨耗检测效率、实时性与精度问 题,盛良等^[21-22]专门针对刚性悬挂汇流排结构特点,通过 激光三角测量原理和轮廓配准方法,实现了磨耗宽度和 偏磨量检测。

综上所述,既有研究主要侧重于揭示弓网摩擦磨损 机理,而面向现场运维亟需的接触线磨耗高精高效动态 检测方法较少述及。事实上,接触线底面接触光带、磨损 形态、磨耗区域及区间分布蕴含着丰富的弓网匹配信息, 是综合反映弓网受流质量和评判接触线维修更换的重要 依据。针对接触线磨耗高速动态检测实际问题,提出一 种基于 Scheimpflug 定律的线结构光视觉测量方法,通过 车载动态检测切实解决接触线磨耗现场高速动态测量 难题。

1 接触线磨耗检测原理

地铁隧道内刚性接触网系统空间布置及接触面局部 放大,如图1所示,接触线与受电弓滑板长期接触,表面 形成不均匀磨耗及明暗相间的接触光带,光带不良进一 步加剧接触线磨耗,并对弓网受流质量产生不利影响。 本节首先对接触线磨耗光学检测原理进行研究。



图 1 地铁刚性接触网系统及接触线磨损照片

Fig. 1 Metro rigid catenary system and contact wire

1.1 接触线标准廓形

接触线与汇流排装配关系、120 mm² 接触线截面尺 寸如图 2(a)、(b)所示^[23]。为保证耐磨性、导电性及抗 拉强度,接触线通常采用铜、铜银或铜镁合金材质,并在 左右两侧设有对称沟槽,接触线与 π 形汇流排通过沟槽 夹持固定,确保受电弓碳滑板与接触线连续顺畅接触。



and conductor-rail

1.2 车载检测原理

采用线结构光视觉测量技术进行接触线磨耗测量, 车载接触线磨耗检测原理如图3所示。设置于车顶上方 的视觉传感器由高速摄像机与线结构光投射器构成。视 觉传感器检测视角须覆盖接触线工作范围,水平和垂直 方向分别对应接触线高度和拉出值。结构光平面与接触 线相交,形成包含接触线轮廓信息的光条曲线。摄像机 与光平面保持一定角度拍摄光条曲线,图像处理设备采 用光条中心提取算法,获取接触线光条图像的亚像素坐 标。图像坐标经车载局域网络传输至综合处理计算机, 通过几何标定换算得到接触线磨耗值,结合车载里程计 空间同步,实现沿线接触线磨耗动态检测。



(a) 接触网检测车(a) The contact wire wear inspection vehicle



(b) The onboard measurement principle

图 3 接触线磨耗车载检测原理



1.3 光学检测系统设计

线结构光视觉传感器光路参数设计是决定接触线磨 耗测量分辨力与精度的重要步骤。传统相机成像模型, 景深范围与光圈值、焦距、焦平面距离、容许弥散圆直径 有关^[24]。理论上,光圈值越大,焦距越大,景深越小;拍 摄距离越远,景深越大。立体空间经光学系统成像时,只 有与像平面共轭的物平面才能清晰成像于像平面,其他 非共轭平面上的物点在像平面上只能得到相应光束的截 面,即弥散斑。由图 4 中透镜高斯成像原理可知,空间点 $B_1 和 B_2$ 位于物平面 A 以外,像点 B'_1 和 B'_2 也在像平面 A'以外,像平面上得到的是这两点的成像光束的截面 Z'_1 和 Z'_2 ,他们分别与物空间中的相应光束在 A 平面上的截 面 Z_1 和 Z_2 共轭。此时, Z'_1 和 Z'_2 是空间点 B_1 和 B_2 在平 面上的像,它们的位置由空间点的主光线和像平面的交 点决定,显然,他们的大小与入瞳大小和空间点至共轭平 面 *A* 的距离有关。图 4 中前景深、后景深及完整景深,分 别如式(1)~(3)所示。



图 4 镜头景深光路 Fig. 4 The lens depth of field illustration

前景深:

$$\Delta_1 = \frac{F\delta l^2}{f^2 + F\delta l} \tag{1}$$

后景深:

$$\Delta_2 = \frac{F\delta l^2}{f^2 - F\delta l} \tag{2}$$

景深:

$$\Delta d = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{2f^2 F \delta l^2}{f^4 - F^2 \delta^2 l^2}$$
(3)

式中: F 为镜头光圈值;δ 为弥散圆直径;f 为镜头焦距;l 为待测物距离。减小光圈可一定程度提高景深,但会降 低光通量,从而降低图像亮度和增大图像噪声。

传统光学成像检测原理如图 5(a)所示。线结构光 高速动态检测,若光平面与景深范围 Δd 交叉设置,空间 上二者无法完全重叠,必然导致部分区域图像模糊。为 提高图像清晰度,通常减少光圈,为维持光圈减小后光通 量不变,一般采用的措施是延长曝光时间和增加主动补 光,这样会导致图像拖影和增加光源设备。显然,减小光 圈不利于提升高速动态下的图像清晰度,无法从根本上 解决大景深检测难题。

沙姆定律指出,当待测目标范围锁定后,通过相机、 镜头、待测目标的合适光路与恰当角度设计,可有效避免 图像景深受限及图像模糊问题^[25]。基于沙姆定律的移 轴相机,不必依赖缩放光圈,可较好解决景深分布问题, 在手持式三维激光扫描仪^[26-27],线结构光^[24,28],立体视 觉^[29],医学手术^[30]领域广泛应用。将沙姆定律应用到接 触线磨耗动态检测,对于提高景深范围和检测精度具有 重要意义,具有广阔的应用前景。

沙姆定律证明,当成像面、透镜面以及焦平面相交于 同一条直线时,倾斜的待测平面理论上可完整清晰成像。 仔细分析不难发现,对于任意给定的成像面和透镜面,存 (4)

在无数个待测平面满足 3 个平面相交于同一直线的条件,显然这无数个待测平面不可能都能清晰成像。仅沙姆定律难以实现该功能,须增加铰链定律作为约束条件,对于任意给定的移轴相机,由沙姆定律和铰链定律共同确定唯一的清晰聚焦平面^[24]。铰链定律可看作经典的薄透镜高斯公式在沙姆定律下的一种应用。如图 5(b)所示,PTF(parallel to film)平面位于透镜的前节点且平行于像平面的假设平面。铰链定律要求 PTF 平面、聚焦平面以及透镜的前焦平面应相交于同一直线,即 Hinge线。同时,铰链定律给出了透镜倾斜角度计算公式:

 $\alpha = \arcsin(f/J)$

式中:f为透镜焦距;J为透镜的前节点到 Hinge 线的距离。当且仅当移轴成像系统满足沙姆定律和铰链定律时,待测平面方可清晰成像。







2 接触线磨耗检测系统视觉建模

2.1 沙姆相机成像模型

采用沙姆定律对接触线磨耗进行高精度测量,前 提需要对视觉传感器进行高精度标定^[31]。因此,基于 沙姆定律的结构光传感器内、外参数高精度标定是开 展高精度测量任务的基础。由于成像模型不同, Philippe 等^[32]、Hu 等^[33]、Zhang 等^[34]等指出,当倾斜角 较大时,传统的相机标定方法表现乏力,现有成熟方法 难以直接应用。

移轴相机标定模型如图 6 所示, $P_{W}(x_{W}, y_{W}, z_{W})$ 为 三维空间世界坐标系中任意点, O_{c} 为光心, $O_{c}X_{c}Y_{c}Z_{c}$ 为摄像机坐标系,平面 S 和平面 P 分别表示沙姆相机移 轴成像面以及垂直于光轴的理想正视成像面,由于理 想像面可以任意布置,可令平面 S 与平面 P 坐标系原点 重合。



图 6 沙姆相机标定模型 Fig. 6 Illustration of Scheimpflug camera calibration

 P_w 与光心 O_c 连线交平面S和平面P分别于 P_s 、 P_{Po} (m,n)为平面S内的基向量,向量m位于坐标轴 X_c 和坐标轴 Z_c 所确定的平面内,向量n垂直于m且与坐标 轴 Y_c 的夹角为 α 。根据文献[31]中定义,令 $m = (\cos\beta, 0, \sin\beta)$,向量n可表示为:

$$n = (-\sin\alpha\sin\beta, \cos\alpha, \sin\alpha\cos\beta)$$
(5)
向量 *m*,*n* 满足 *m*^T*n*=0,*m*^T 为 *m* 的转置。
线段 *P*_wO_c 所在直线方程如下:

$$A P_{W} = \lambda \left(X_{W}, Y_{W}, Z_{W} \right) \tag{6}$$

线段 $P_w O_c$ 所在直线与像面 P、像面 S 的交点分别为:

$$\boldsymbol{P}_{P} = (P_{P_{X}}, P_{P_{Y}}, f)^{\mathrm{T}}$$

$$(7)$$

$$\boldsymbol{P}_{s} = (0, 0, f)^{\mathrm{T}} + P_{sx}\boldsymbol{m} + P_{sy}\boldsymbol{n}$$
(8)

整理式(7)和(8),得:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{P_{x}} \\ \boldsymbol{P}_{P_{y}} \\ f \end{bmatrix} = \boldsymbol{\lambda} \times \begin{bmatrix} \cos \boldsymbol{\beta} & -\sin \alpha \sin \boldsymbol{\beta} & 0 \\ 0 & \cos \alpha & 0 \\ \sin \boldsymbol{\beta} & \sin \alpha \cos \boldsymbol{\beta} & f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{s_{x}} \\ \boldsymbol{P}_{s_{y}} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(9)

其中, $\lambda = f/(P_{Px}\sin\beta + P_{Py}\sin\alpha\cos\beta + f)$, 由式(9) 可得像面 *P* 与像面 *S* 的像点坐标转换关系。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{f} K R_{s} K_{s}^{-1} \begin{bmatrix} u_{s} \\ v_{s} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(10)

其中,(u, v), (u_s, v_s) 分别为像面 P 和像面 S 上的 像点坐标。

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} f/dx & 0 & C_{Px} \\ 0 & f/dy & C_{Py} \end{bmatrix}$$
(11)

$$\boldsymbol{K}_{s} = \begin{bmatrix} 1/\mathrm{d}x & 0 & C_{sx} \\ 0 & 1/\mathrm{d}y & C_{sy} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(12)

$$\boldsymbol{R}_{s} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\alpha\sin\beta & 0\\ 0 & \cos\alpha & 0\\ \sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & f \end{bmatrix}$$
(13)

 (C_{P_x}, C_{P_y}) 、 (C_{s_x}, C_{s_y}) 分别为像面 P 与像面 S 的主 点坐标, (d_x, d_y) 为摄像机像元尺寸, 以标定靶标平面作 为世界坐标系 $O_w - x_w y_w$ 平面, 则对该平面中任意点 $z_w = 0$, 即:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = sK[r_1 \quad r_2 \quad T] \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ 1 \end{bmatrix}$$
(14)

式中:*s*为比例因子;*K*为对应于正射像面 *P*的内参数矩 阵;*r*₁,*r*₂为其姿态矩阵 *R*的前两列;*T*为平移向量。综 合式(10)和(14)可得:

$$\boldsymbol{\lambda} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_{s} \\ \boldsymbol{v}_{s} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{w} \\ \boldsymbol{y}_{w} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1} & h_{2} & h_{3} \\ h_{4} & h_{5} & h_{6} \\ h_{7} & h_{8} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{w} \\ \boldsymbol{y}_{w} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(15)

式中, $H = fK_s R_s^{-1}[r_1r_2T]$,H为描述标定靶标平面与成像 平面的单应性矩阵; λ' 为非零比例因子。由式(15)可 知,当沙姆角为0时,移轴成像模型退化为传统相机成像 模型。实际镜头存在非线性畸变,式(10)不再严格成 立,引入镜头畸变补偿:

$$\begin{cases} u_d - du = u \\ v_d - dv = v \end{cases}$$
(16)

其中,(*u_d*, *v_d*)为像面上实际成像点,(*u*, *v*)为理想 像点,而(δ*u*, δ*u*)表示镜头畸变因子^[35]。高精度测量任 务要求对镜头畸变进行精确建模,镜头畸变模型如下:

$$\begin{cases} \delta u = k_1 u r^2 + k_2 u r^4 + p_1 (3u^2 + v^2) + p_2 (2uv) + s_1 r^2 \\ \delta v = k_1 v r^2 + k_2 v r^4 + p_2 (3v^2 + u^2) + p_1 (2uv) + s_2 r^2 \end{cases}$$
(17)

式中: $r^2 = u^2 + v^2$; $k_1 \ k_2$ 为径向畸变系数; $p_1 \ p_2$ 为薄棱畸变 系数; $s_1 \ s_2$ 为偏心畸变系数^[36]。将式(16)中(u_d, v_d)代 替式(14)中的(u, v),再代入式(15)、(16)中,即可得 到像平面与标定平面的单应性关系函数如下:

$$\begin{cases} f_u(x_w, y_w, u, v) = h_1 x_w + h_2 y_w + h_3 - (h_7 x_w + h_8 y_w + 1) \cdot (u + k_1 ur^2 + k_2 ur^4 + p_1 (3u^2 + v^2) + p_2 (2uv) + s_1 r^2) \\ f_v(x_w, y_w, u, v) = h_4 x_w + h_5 y_w + h_6 - (h_7 x_w + h_8 y_w + 1) \cdot (v + k_1 vr^2 + k_2 vr^4 + p_2 (3v^2 + u^2) + p_1 (2uv) + s_2 r^2) \end{cases}$$
(18)

其中, f_u , f_v 为关于标定参数(h_1 , h_2 ,…, h_8 , k_1 ,…, s_2) 的目标函数。线结构光传感器标定,即建立世界坐标系 中距离坐标(x_w , y_w)与畸变后的图像像素坐标(u_d , v_d) 的对应关系。联合式(17)、(18),可建立(x_w , y_w)与 (u_d , v_d)数学模型。通过求解模型系数(h_1 , h_2 ,…, h_8 , k_1 ,…, s_2),可完成模型参数标定。通常,实验室标定数据 对个数*i*一般远大于待标定参数(h_1 , h_2 ,…, h_8 , k_1 ,…, s_2) 个数,因此,可建立关于标定参数(h_1 , h_2 ,…, h_8 , k_1 ,…, s_2)

$$\phi(h_1, h_2, \dots, h_8, k_1, \dots, s_2) = \min \sum_{i=1}^{n-1} f_{ui}^2 + f_{vi}^2 \qquad (19)$$

2.2 模型标定及求解

若要同时求取(h₁,h₂,…,h₈,k₁…,s₂),式(19)为非 线性方程组,线性最小二乘法无法直接求出。因此,需采 用非线性最优化计算方法,通过分段线性化及逐步迭代, 求取模型待定参数。

一般,畸变参数 (k_1, \dots, s_2) 较小,将 (k_1, \dots, s_2) 初值 设为 0,求取 (h_1, h_2, \dots, h_8) ;再将得到的 (h_1, h_2, \dots, h_8) 作为已知数代回式(19) 求取 (k_1, \dots, s_2) ,具体步骤 如下。

第1步:将 $(h_1,h_2,\dots,h_8,k_1,\dots,s_2)$ 分成两组参数 (h_1,h_2,\dots,h_8) 和 (k_1,\dots,s_2) ,分别采用线性最小二乘 法,求取 (h_1,h_2,\dots,h_8) 和 (k_1,\dots,s_2) 初值。

第2步:根据第1步得到的(h₁,h₂,…,h₈,k₁,…,s₂) 初值,建立式(19)的高斯-牛顿最优化计算模型。

第3步:采用高斯-牛顿迭代算法,逐步搜索最优值。 高斯-牛顿法求解公式如下:

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{u1}}{\partial a_1} & \frac{\partial f_{u1}}{\partial a_2} & \cdots & \frac{\partial f_{u1}}{\partial s_1} & \frac{\partial f_{u1}}{\partial s_2} \\ \frac{\partial f_{v1}}{\partial a_1} & \frac{\partial f_{v1}}{\partial a_2} & \cdots & \frac{\partial f_{v1}}{\partial s_1} & \frac{\partial f_{v1}}{\partial s_2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{un}}{\partial a_1} & \frac{\partial f_{un}}{\partial a_2} & \cdots & \frac{\partial f_{un}}{\partial s_1} & \frac{\partial f_{un}}{\partial s_2} \\ \frac{\partial f_{vn}}{\partial a_1} & \frac{\partial f_{vn}}{\partial a_2} & \cdots & \frac{\partial f_{vn}}{\partial s_1} & \frac{\partial f_{vn}}{\partial s_2} \end{bmatrix}$$
(20)

$$\mathbf{\bar{H}} \stackrel{\mathbf{P}}{=} \mathbf{X}^{(n+1)} = \mathbf{X}^n + \mathbf{P}_{\mathbf{v}} \mathbf{P}_{\mathbf{v}} \stackrel{\mathbf{h}}{\to} \mathbf{K} \stackrel{\mathbf{h}}{\to} \mathbf{K} \stackrel{\mathbf{h}}{\to} \mathbf{K}$$

 $\boldsymbol{P}_{k} = -(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G})^{-1}\nabla \boldsymbol{S}(\boldsymbol{x}_{k}), \nabla \boldsymbol{S}(\boldsymbol{x}_{k}) = \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}(f_{u},f_{v})^{\mathrm{T}} \circ \text{ id} \text{id} \text{if} 1$

步中($h_1, h_2, \dots, h_8, k_1, \dots, s_2$)初值计算,目标函数接近二次函数,因此,高斯-牛顿迭代算法具有较好的收敛速度。

3 标定实验

3.1 实验布置

如图 7 所示,采用海康威视 MV-CH120-15TM 型号相 机,分辨率为 1 200 万像素级(宽度 4 096 pixel,高度 3 000 pixel),相机芯片型号为 Sony IMX253,理论像元尺寸 为 3.45 µm,采用万兆以太网接口,最大传输距离 100 m,满 足车载接触网磨耗检测车顶与车内数据传输需要。镜头 采用 MVL-KF2528M-12MP 型号镜头,理论焦距为 25 mm。



图 7 相机及镜头 Fig. 7 The measurement camera and lens

为了验证沙姆相机检测性能,实验室设置两组用 于接触线磨耗检测的光学系统。第1组采用主光轴垂 直于像平面的传统成像模型^[37],第2组采用主光轴偏 移像平面的沙姆成像模型。根据接触线与车顶检测设 备空间位置关系,沙姆成像模型镜头设计偏移 2°,并结 合调整装置,确保光平面、像平面、镜头平面相交于同 一条直线^[38]。

采用本文方法同时对传统成像模型和沙姆成像模型 进行标定。为控制外部误差干扰,两套系统同时通过高 精度电机运动控制平台及针形靶标获取标定数据点对。 标定位移台及实物如图 8 所示。激光平面与导轨运行方 向平行设置,导轨位移方向与垂直导轨设置的一维针形 靶标共同构成标定平面 0_w - x_wy_w,通过一维针形靶标与 位移台运动配合,获取标定平面内坐标数据。



(a) 位移标定台 (a) Diagram of the displace table

(b) 标定台实物图 (b) Illustration of camera calibration

标定实验台采用松下伺服电机控制,导轨最大行程 1000 mm,针形靶标随滑块在导轨上方自由移动,滑块通 过光栅尺与电机进行位移闭环控制,行程范围内精度控 制在 0.01 mm。针形靶标在位移台的不同位置标定图像 如图 9(a)所示,采用灰度重心法提取靶标图像亚像素坐 标^[39],控制软件自动读取针形靶标距离坐标。提取后的 图像坐标和距离坐标分别如图 9(b)、(c)所示。



Fig. 9 The coordinates of pin-shape target points

3.2 实验结果分析

两套测量系统在同一平台下采用相同的方法进行标定,采用文中的标定方法,分别求解沙姆相机和传统相机 成像模型待标定参数(h₁,h₂,…,h₈,k₁,…,s₂)。

传统相机、沙姆相机成像模型待标定参数 (h₁,h₂,…,h₈,k₁,…,s₂)迭代求解过程曲线,如图 10 所 示(归一化后曲线)。图 10(a)中,采用传统相机模型, (h₁,h₂,…,h₈,k₁,…,s₂)的不同参数标定曲线在迭代前 20步一致性较差,收敛速度较慢,跌代至 60 步后才收 敛。图 10(b)中沙姆相机成像模型标定参数迭代曲线动 态一致性较好。对比图 10(a)和(b)可知,迭代收敛速度 较传统成像模型快。这表明沙姆成像模型相比传统成像 模型,可增加景深,有利于标定图像噪声抑制,并加快标 定曲线收敛。

传统相机、沙姆相机成像模型待标定参数 $(h_1,h_2,\dots,h_8,k_1,\dots,s_2)$ 最终标定结果如表1所示。采 用标定数据重投影,对传统相机模型和沙姆相机模型标 定精度进行统计。传统相机模型重投影误差 RMS 值为 1.265 82×10⁻¹,沙姆相机模型重投影误差 RMS 值为 8.319 61×10⁻²。采用沙姆相机模型,重投影误差 RMS 值 相比传统成像模型降低 53.1%。



Fig. 8 The experimental calibration principle and equipment





图 10 沙姆相机和传统相机模型标定参数收敛曲线

Fig. 10 The convergence curves of calibration parameters for different imaging models

	表	1	标定结果	Ļ
Fable	1	Ca	libration	results

类型	参数	传统模型	沙姆模型
线性参数	h_1	2.912 86×10 ¹	2. 938 56×10 ¹
	h_2	-7.120 16×10 ⁻¹	-7.325 64×10 ⁻¹
	h_3	2.359 24×10 ²	2. 476 98×10^2
	h_4	5.441 26×10 ⁻¹	5.553 23×10 ⁻¹
	h_5	3.642 41×10 ¹	3. 493 81×10 ¹
	h_6	1.92207×10^{2}	1.678 37×10^2
	h_7	4.388 73×10 ⁻⁴	4. 376 92×10 ⁻⁴
	h_8	3.626 45×10 ⁻⁵	3.767 54×10 ⁻⁵
非线性 参数	k_1	-8.47364×10^{-8}	-8.542 31×10 ⁻⁸
	k_2	1.117 13×10 ⁻¹³	1.865 89×10 ⁻¹³
	p_1	4.577 40×10 ⁻¹⁰	4.832 19×10 ⁻¹⁰
	p_2	-1.24548×10^{-10}	-1.34287×10^{-10}
	s_1	1.525 86×10 ⁻¹⁰	1.784 67×10^{-10}
	s_2	-4.151 56×10 ⁻¹¹	-4.127 65×10 ⁻¹¹
	RMS	1.265 82×10^{-1}	8. 319 61×10 ⁻²

4 动态检测试验

将第3节标定后的沙姆相机光学检测系统安装于广 州地铁2号线接触网综合检测车,通过接触线磨耗车载 动态检测现场试验,验证系统检测精度及方法的有效性。

4.1 动态检测试验条件

刚性接触网一般每间隔 6~8 m 设置定位点,接触线 与汇流排通过绝缘子和支持装置固定于隧道壁。接触网 长期服役,定位点处接触线及零部件是接触网应力集中 环节,容易导致接触线在定位点处形成弓网接触硬点,造 成接触线异常磨损现象,因此定位点处接触线磨耗检测 是接触网现场运营维护的重点。

采用基于沙姆定律研制的具有接触线磨耗检测功能 的接触网综合检测车,如图 11 所示,车顶检测设备、汇流 排和接触线的结构光图像分别如下。



图 11 车载接触线磨耗检测

Fig. 11 The onboard measurement principle of contact wire wear

刚性接触网沿线呈"S"形布置,接触线在拉出值的 横向边界区域和锚段关节的纵向分段区域,通常存在侧 磨、偏磨或电弧烧蚀现象。接触线非规则磨损导致底面 磨损宽度、深度和磨损截面非线性分布。为精确反映接 触线磨损形态特征以及便于现场人工测量及精度对比, 接触线磨耗参数包括磨损宽度 w、磨损深度 h、磨损面 积 s,现场采用以上 3 项参数进行接触线磨耗综合评估。 接触线磨损参数示意如图 12 所示。



图 12 接触线磨损宽度、深度、面积 Fig. 12 Wear width, depth, area of the in-service contact wire

采用图 11 中接触线磨耗车载检测系统进行现场实测,得到的接触线断面轮廓如图 13 所示。图 13(a)中, 包含接触线及汇流排基准轮廓和测量轮廓,通过汇流排 与接触线非磨耗区域的固有结构特征,基于廓形匹配算 法将测量轮廓与基准轮廓进行旋转平移对齐。测量轮廓 与基准轮廓对齐后的接触线工作面对比如图 13(b)、(c) 所示,通过图 13(c)即可得到磨损宽度、深度和磨损 面积。



4.2 动态检测结果分析

对广州地铁2号线南浦站K2+283至飞翔公园站 K19+087区段进行接触线磨耗动态检测。该区段总长 16.804 km,合计2010个定位点,系统通过动态触发功 能及综合定位软件对每个定位点磨耗进行巡检。接触 线磨损深度、磨损宽度、磨损面积动态检测波形如图14 所示。

由图 14 可见,接触线磨损宽度、磨损深度及磨损面



Fig. 14 The dynamic inspection results of contact wire wears

积,在检测区间均存在剧烈的动态变化。接触线在磨损 初始阶段,磨损宽度灵敏度较高,随着服役时间增加,磨 损宽度和深度变化速率趋于一致,当服役时间进一步增 加时,磨损宽度基本保持稳定。接触线沿线架设,隧道内 工作环境恶劣,非均匀磨损为接触线巡查带来困难,开展 接触线车载动态巡检对于掌握接触线服役状态具有较大 意义。

图 14 中,接触线最大磨损宽度为 12.20 mm,最小磨 损宽度 1.94 mm;接触线最大磨损深度 3.78 mm,最小磨 损深度 0.51 mm;接触线最大磨损面积 43.31 mm²,最小 磨损面积 1.31 mm²。

为验证车载接触线磨耗动态检测系统精度,结合人 工现场通过手持式设备对接触线磨损参数静态测量,通 过静态数据与动态数据对比分析,验证动态检测系统数 据的不确定度。

分别在 K3~K19 整公里标附近的 17 个定位点进行 人工静态检测,通过静态检测数据与动态数据对比,进一 步验证检测系统动态精度。

接触线磨耗动静态误差曲线如图 15 所示。17 组数 据统计结果分别如下:磨耗宽度 RMS 误差为 0.119 mm, 磨耗深度 RMS 误差为 0.114 5 mm,磨损面积 RMS 误差 为 0.787 6 mm²。







5 结 论

针对接触线磨耗动态检测现场需求,综合运用激光 三角和沙姆成像原理,构建基于线结构光测量技术的车 载接触线磨耗主动视觉检测方法。提出了高斯-牛顿非 线性最优化迭代算法,建立了面向接触线磨耗动态检测 的大视场、高精度视觉模型参数标定方法,解决了接触线 磨耗检测系统视觉标定及参数标定难题。研制了接触线 磨耗检测系统,设计了基于针形靶标与直线导轨相结合 的接触线磨耗检测系统标定平台,分别对传统与沙姆成 像模型进行标定,验证了沙姆模型重投影精度较传统模 型提高 53.1%。通过现场动态检测试验及与动静态数据 对比分析,进一步验证了接触线磨耗检测系统的有效性。

接触线磨耗蕴含着丰富的弓网匹配信息,既有连续 周期分量(波浪形磨耗),也有离散随机分量(侧磨、偏 磨、电弧烧蚀等不规则磨耗)。借助本文接触线磨耗检测 方法及实测数据,可进一步深入开展不同类型磨耗下的 弓网关系匹配细致研究,对于丰富和完善弓网载流摩擦 磨损理论具有重要参考价值,相关工作有待持续开展。

参考文献

- [1] KOYAMA T, ABOSHI M. Mechanism of undulating wear formation of overhead rigid conductor line related to dynamic characteristics of pantographs [J]. Journal of System Design and Dynamic, 2012, 78(789): 1617-1631.
- [2] KOYAMA T, ABOSH M. Formation mechanism of undulating wear on overhead conductor rails due to dynamic characteristics of pantographs [J]. Quarterly Report of RTRI, 2013, 54(1): 18-23.
- [3] 李先航,陈光雄,梅桂明,等. 刚性弓网系统参数对接触线波磨的影响研究[J]. 振动与冲击,2023,42(5):
 122-126,149.

LI X H, CHEN G X, MEI G M, et al. Effects of

pantograph-rigid catenary system parameters on contact wire corrugation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(5): 122-126,149.

- [4] BUCCA G, COLLINA A. Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model [J]. Tribology International, 2015, 92: 47-56.
- [5] MEI G M. Tribological performance of rigid overhead lines against pantograph sliders under DC passage [J]. Tribology International, 2020, 151: 106538-106546.
- [6] MEI G M, FU W M, CHEN G X, et al. Effect of highdensity current on the wear of carbon sliders against Cu-Ag wires[J]. Wear, 2020, 452/453: 203275-203281.
- MEI G M, FAN J, LIU D Y. Long-sliding distance experiment and heuristic model prediction of the electrical sliding abrasion of an overhead wire/current collector[J]. Tribology International, 2023, 180: 108212-108221.
- [8] 付文明,武云龙,刘力,等. 大电流对碳滑板/铜银合金 接触线载流摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2017,42(9):52-56.

FU W M, WU Y L, LIU L, et al. Effect of high-current on friction and wear behavior of carbon strip/Cu-Ag Alloy contact wire with electric current [J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(9): 52-56.

 [9] 范杰,刘达毅,董丙杰,等. 地铁刚性弓网系统接触线 磨损特性试验研究[J]. 润滑与密封,2022,47(6): 45-51.

FAN J, LIU D Y, DONG B J, et al. Experimental study on the wear characteristics of contact wire of metro rigid pantograph-catenary systems [J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(6): 45-51.

- [10] 黄之元,陈光雄,夏晨光. 组装式滑板对地铁接触线型 削磨损的影响[J]. 润滑与密封,2021,46(2):24-30.
 HUANG ZH Y, CHEN G X, XIA CH G. Effect of assembled strip on plough wear of metro contact wire[J].
 Lubrication Engineering, 2021, 46(2): 24-30.
- [11] 梅桂明. 刚性接触网-受电弓载流磨损性能的试验研究[J]. 西南交通大学学报,2021,56(6):1305-1310.
 MEI G M. Experimental study on wear performance of rigid catenary-pantograph system with direct current[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1305-1310.
- [12] 邹栋,钟舜聪,耿妍,等. 城轨交通弓网系统异常磨损

现状分析与防治技术研究[J]. 机械工程学报,2023, 59(10):152-178.

ZOU D, ZHONG SH C, GENG Y, et al. Status analysis and prevention-treatment technology study of abnormal wear of pantograph catenary system in urban rail transit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(10): 152-178.

- [13] WEI X K, MENG H F, HE J H, et al. Wear analysis and prediction of rigid catenary contact wire and pantograph strip for railway system [J]. Wear, 2020, 442/443: 203118-203132.
- [14] SONG Y, WANG H R, LIU ZH G. An investigation on the current collection quality of railway pantographcatenary systems with contact wire wear degradation [J].
 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3078530.
- [15] 方岩,曾明,王文凤. 京津城际铁路接触线磨耗分析[J]. 电气化铁道,2019,31(4):1-3.
 FANG Y, ZENG M, WANG W F. Wear analysis of Beijing-Tianjin intercity railway contact line [J].
 Electrified Railway, 2019, 31(4): 1-3.
- [16] 占栋,于龙,肖建,等. 接触网几何参数高速动态视觉测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8):1852-1859.

ZHAN D, YU L, XIAO J, et al. Study on high-speed and dynamic vision measurement approach for overhead catenary system geometric parameter inspection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1852-1859.

- [17] ZHAD D, JING D Y, WU M L, et al. An accurate and efficient vision measurement approach for railway catenary geometry parameters [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67 (12): 2841-2853.
- [18] 王延华,李腾. 基于双目视觉的接触网磨耗在线检测研究[J]. 计算机工程与应用,2018,54(5):242-246.
 WANG Y H, LI T. Research on on-line measurement of contact wire wear based on binocular vision [J].
 Computer Engineering and Applications, 2018, 54(5): 242-246.
- [19] 游诚曦. 电气化铁路接触线磨耗动态检测系统研究[J]. 电气化铁道,2019,30(S1):61-65.

YOU CH X. Research on contact wire wear dynamic

detection system of contact line of electrified railway[J]. Electrified Railway, 2019, 30(S1): 61-65.

- [20] CHENG X Y. A study on dynamic measurement system of contact wire wear in electrified railway [J]. Procedia Computer Science, 2019, 154: 210-220.
- [21] 盛良.基于近距检测的刚性悬挂接触线磨耗连续测量 装置研制[J].中国铁路,2022,6:106-112.
 SHENG L. Development of continuous measuring device for wear of rigid suspension contact wire based on shortdistance inspection[J]. China Railway, 2022, 6: 106-112.
- [22] 盛良,张文轩,汪海瑛. 刚性悬挂接触线载流磨损特征 分析[J]. 中国铁路,2017,10:21-27,32.
 SHENG L, ZHANG W X, WANG H Y. Analysis of current carrying wear at rigid-suspension contact wire[J]. China Railway, 2017,10: 21-27,32.
- [23] 国家铁路局. TB/T 2809—2017 电气化铁路用铜及铜 合金接触线[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
 National Railway Administration of the People's Republic of China. TB/T 2809—2017 copper and copper alloy contact wires for electric railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [24] ZHANG Y, QIAN Y CH, LIU SH L, et al. Real-time line-structured light measurement system based on Scheimpflug principle [J]. Optical Review, 2021, 28(4):471-483.
- [25] SUN C, LIU H B, JIA M N, et al. Review of calibration method for Scheimpflug camera [J]. Journal of Sensor, 2018, 2018(1): 3901431-3901445.
- [26] CHEN X, JIANG Y M, YAO Q K, et al. Inelastic hyperspectral Scheimpflug LIDAR for microalgae classification and quantification [J]. Applied Optics, 2021, 60(16): 4778-4786.
- [27] SHAO M W. Calibration methods for a camera with a titled lens and a three-dimensional laser scanner in the Scheimpflug condition[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(7): 1076-1082.
- [28] MEI Q, GAO J, LIU H, et al. Structure light telocentric stereoscopic vision 3D measurement system based on Scheimpflug condition [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86: 83-91.
- [29] GRAIG W D, HANSEN R S, JARRETT S R, et al. Stereo digital image correlation with improved depth of

field using tilt-shift photography [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(12): 1-14.

- [30] LI T J, TIAN L, WANG L K, et al. Correction on the distortion of Scheimpflug imaging for dynamic central corneal thickness [J]. Journal of Biomedical Optics, 2015, 20(5): 56006-56014.
- [31] 柳升龙,孙聪,刘海波,等. 一种新的移轴相机两步标 定方法[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(8): 836-844.

LIU SH L, SUN C, LIU H B, et al. A new two-step method for tilt/shift camera self-calibration[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48 (8): 836-844.

- [32] CORNIC P, ILLOUL C, CHEMINET A, et al. Another look at volume self-calibration: Calibration and selfcalibration within a pinhole model of Scheimpflug cameras[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(9): 1-15.
- [33] HU Y, LIANG ZH W, FENG SH J, et al. Calibration and rectification of bi-telecentric lenses in Scheimpflug[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 149: 1-16.
- [34] ZHANG Y, WANG Y F, QIAN Y CH, et al. Improved 3D reconstruction method based on the Scheimpflug principle[J]. Optical Review, 2020, 27(3): 283-289.
- [35] WENG J, CDHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [36] WANG J H, SHI F H, ZHANG J, et al. A new calibration model of camera lens distortion [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(2): 607-615.
- [37] ZHANG Z. A flexible new technique for camera

calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1344.

- [38] ZHANG X, ZHOU T. Generic Scheimpflug camera model and its calibration [C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2015: 2264-2270.
- [39] CUI B, FU Q W, SUN H, et al. Cross-point calibration method for the Scheimpflug measurement system [J].
 Applied Optics, 2020, 59(28): 8618-8627.

作者简介



占栋,2016年于西南交通大学获得博士 学位,现为西南交通大学电气工程学院教师,主要研究方向为接触网智能检测监测及 基础设施服役性能。

E-mail:15198281626@163.com

Zhan Dong received his Ph. D. degree in 2016 from Southwest Jiaotong University. Now he is a teacher in Southwest Jiaotong University. His main research interests include railway overhead catenary intelligent dynamic detection, monitoring and infrastructure service performance estimation.



高仕斌(通信作者),西南交通大学教授、博士生导师,国家轨道交通电气化与自动化工程技术研究中心主任,主要从事智能 牵引供电理论与工程应用研究。

E-mail:gao_shi_bin@ 126. com

Gao Shibin (Corresponding author) is a professor and Ph. D. supervisor in Southwest Jiaotong University. He is also the director of National Rail Transit Electrification and Automation Engineering Technology Research Center. His main research interests include railway intelligent traction power supply theory and engineering applications.