

基于形态学小波包降噪的管母挠度监测方法*

唐贵基¹, 邓飞跃¹, 何玉灵¹, 彭涛², 冯奇³

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院 保定, 071003) (2. 国网通用航空有限公司 北京, 100000)

(3. 齐齐哈尔超高压局 齐齐哈尔, 161000)

摘要 为了实现对管型母线挠度进行监测, 确保其能够正常连接, 提出了一种非接触式的管母挠度实时监测方法。首先, 通过建立计算机双目视觉测量体系, 拍摄靶标确定摄像机的内、外参数; 然后, 基于形态学小波包变换对拍摄的管型母线原始图像进行降噪, 并进行二值化处理; 最后, 对二值化后的图像进行测量点提取, 恢复其三维坐标, 通过最小二乘法模拟管型母线的挠度曲线, 完成对管型母线挠度的实时监测。将该方法应用于某一 500 kV 变电站简支架支撑的管形母线挠度测量, 得出了该管母的最大挠度和挠度曲线。实践结果表明, 该方法能够有效对管型母线挠度进行测量, 并进行实时监测。

关键词 管型母线; 挠度; 图像降噪; 双目视觉; 坐标恢复

中图分类号 TM75

引言

管型母线是一种取代传统的矩形、槽形、棒形母线和软导线的全新导体, 主要应用于电网输电导线与变电站变压器之间的导体连接, 对输变电系统及电力设备的安全、可靠运行起着至关重要的作用。随着我国国民经济的发展, 330, 500 和 750 kV 的超高压输电以及特高压输电得到了迅猛发展, 这对管型母线的安全性提出了更高要求。现实中, 某一 500 kV 变电站的部分管型母线由于跨度和自重较大, 且由于受到风力和温差等环境条件的影响, 在运行过程中出现了母线下沉、挠度增大的现象。如果母线挠度进一步增大会严重破坏输电线路的安全, 因此有必要实现对管型母线挠度的实时监测。

近年来, 对输电线路弧垂监测已有诸多研究。文献[1]在耐张塔和绝缘子之间串联应力传感器, 通过实时测量该塔相邻两耐张段的导线应力直接计算弧垂。文献[2]基于有限长线电荷建立导线的工频电场三维模型, 根据电场实时测量数据的遗传算法反演计算最大弧垂。文献[3]提出实时监测输电线路温度和应力的变化, 通过相应的物理模型间接计算弧度。上述方法都实现了对输电线路弧垂的直接

或间接测量, 但是管型母线的半径和自重较大, 布置形式和材料构成与输电线路有较大的区别。到目前为止, 鲜有专门针对管型母线挠度实时监测的研究。

鉴于此, 笔者提出了一种非接触式的管型母线挠度实时监测方法。首先, 建立计算机双目视觉测量体系, 通过拍摄靶标完成对摄像机内、外参数的标定, 采用形态学小波包图像降噪理论和灰度图像二值化处理方式对管型母线原始图像进行降噪处理; 然后, 通过计算机程序自动对图像中标示的测量点进行提取, 恢复其三维坐标; 最后, 完成管型母线挠度的实时监测。

1 双目视觉坐标系及摄像机内、外参数标定

1.1 双目视觉坐标系的建立

双目视觉坐标系中需要建立 3 个坐标系: 世界坐标系(x_w, y_w, z_w)、摄像机坐标系(x_c, y_c, z_c)和图像坐标系(包括像素坐标系(u, v)和物理坐标系(x, y)), 如图 1 所示。世界坐标系原点为空间任意位置。摄像机坐标系原点是摄像机镜头的光心, 与图像平面水平平行的轴为 x_c 轴, 竖直平行于图像平面

* 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(2014XS83); 河北省自然科学基金资助项目(E2014502052); 国家自然科学基金资助项目(51307058)

收稿日期: 2013-08-01; 修回日期: 2013-10-10

的轴为 y_c 轴,垂直于图像平面的轴为 z_c 轴。像素坐标系以图像左上角为原点, u 轴为图像像素的行数, v 轴为图像像素的列数,单位为像素个数。物理坐标系以摄像机的光轴与图像平面的交点为原点, x 和 y 轴分别平行于 u 和 v 轴,坐标系单位为 mm。

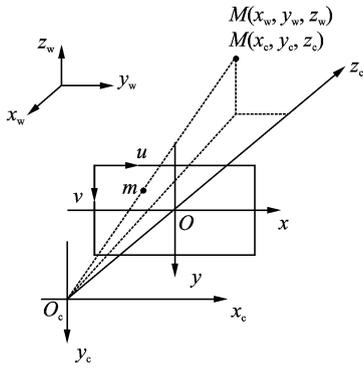


图 1 坐标系布置

Fig.1 Arrangement of coordinate system

1.2 双目视觉坐标系之间的转换

世界坐标系与摄像机坐标系的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: \mathbf{T} 为三维平移向量,是世界坐标系原点在摄像机坐标系中的坐标;矩阵 \mathbf{R} 为 3×3 正交单位矩阵。

在摄像机坐标系下,某一点的坐标与该点在图像物理坐标系中的坐标之间满足如下关系

$$\begin{cases} x = fx_c/z_c \\ y = fy_c/z_c \end{cases} \quad (2)$$

其中: (x, y) 为管型母线上某点在图像物理坐标系下的坐标; (x_c, y_c, z_c) 为该点在摄像机坐标系中的坐标; f 为摄像机镜头的焦距。

齐次坐标表示为

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

设物理坐标系中心坐标在像素坐标系中的坐标为 (u_0, v_0) , d_x, d_y 为像素在 x 轴与 y 轴方向上的物理尺寸,则物理坐标系与像素坐标系转换关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

联立式(1)~(4)^[4],得

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f/d_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $[u \ v]^T$ 为点的像素坐标; $[x_w \ y_w \ z_w]^T$ 为点的实际坐标。

1.3 摄像机内、外参数标定

令

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_2 = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}] \quad (7)$$

则式(5)改写为

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: \mathbf{M}_1 为摄像机的内参数矩阵,取决于摄像机内部结构; \mathbf{M}_2 为摄像机外参数矩阵,取决于世界坐标系的选取和摄像机放置方式。

令 $\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2$,通过摄像机标定可以确定 \mathbf{M} 中 $3 \times 4 = 12$ 个分量的值,进而确定摄像机图像像素位置与空间场景点位置之间的关系^[5]。摄像机标定通过拍摄靶标(棋盘格)图像完成,靶标图像如图 2 所示。

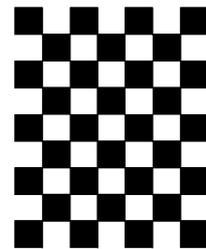


图 2 靶标

Fig.2 Target

首先,在靶标表面选取任意角点作为原点建立世界坐标系, x_w 和 y_w 分别平行于靶标的两边, z_w 垂直背离靶标平面;然后,在靶标表面标出若干个角点 $P_i (i=1, 2, \dots, n; n \geq 6)$ 作为测试点,确定各个测试点的世界坐标 $P(x_{iw} \ y_{iw} \ z_{iw})$ 和在靶标图像中的像素坐标 (u_i, v_i) ,代入式(8),得到关于 \mathbf{M} 矩阵中 12 个分量的 N 个方程 ($N > 2n$);最后,利用最小二乘法求解得到矩阵 \mathbf{M} 中各个分量,进而求出左、右摄像机的内外参数,结果如表 1 所示。

表1 左、右摄像机的内外参数

Tab.1 Intrinsic parameter and extrinsic parameter of left and right cameras

标定结果	左侧摄像机	右侧摄像机
等效焦距	[676.250 5 676.611 7]	[683.707 4 685.746 9]
主点坐标	[306.112 5 200.288 5]	[302.428 3 210.395 6]
旋转矩阵	$\begin{bmatrix} -0.155 3 & 0.987 6 & -0.023 8 \\ 0.548 7 & 0.066 2 & -0.833 7 \\ -0.821 4 & -0.142 5 & -0.552 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.999 8 & -0.010 0 & -0.019 0 \\ 0.010 4 & 0.550 1 & -0.835 0 \\ 0.018 8 & -0.835 0 & -0.549 9 \end{bmatrix}$
平移向量	[-45.58 71.14 953.88]	[137.96 109.43 944.31]

2 形态学小波包变换降噪的图像处理

摄像机直接拍摄的管型母线原始图像中含有噪声,对测量点的提取带来较大困难,笔者采用形态学小波包变换方法对图像进行降噪处理。

2.1 形态学滤波器设计

数学形态学的基本思想是用具有一定形态的结构元素去量度和提取图像中的对应形状以达到对图像分析和识别的目的^[6],主要包括腐蚀、膨胀、开运算、闭运算、击中、细化和粗化等。

集合 A 被集合 B 腐蚀,定义为

$$A \ominus B = \{x; B + x \subset A\} \quad (9)$$

集合 A 被集合 B 膨胀,定义为

$$A \oplus B = [A \ominus (-B)]^c \quad (10)$$

图像 B 对图像 A 作开运算,定义为

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (11)$$

图像 B 对图像 A 作闭运算,定义为

$$A \cdot B = [A \oplus (-B)] \ominus (-B) \quad (12)$$

开运算是先腐蚀后膨胀的过程,能去除图像中孤立的小点、毛刺和小桥(即连通两块区域的小点),消除小物体、平滑较大物体的边界。闭运算过程与开运算过程相反,用来填充物体内细小空洞,连接邻近物体,平滑其边界。

定义形态学开-闭滤波器为

$$F_1 = (A \circ B) \cdot B \quad (13)$$

形态学闭-开滤波器为

$$F_2 = (A \cdot B) \circ B \quad (14)$$

形态学开-闭滤波器和闭-开滤波器可以同时去除图像的正负脉冲噪声,但是开运算的收缩性会导致开-闭滤波器输出较小,闭运算的扩张性会导致闭-开滤波器输出较大,两者会不同程度的对滤波器的噪声抑制产生影响^[7-8]。这里形态学滤波器采用

的是边长为3的正方形结构元素,利用开-闭和闭-开滤波器的组合,对原始图像进行多结构复合形态滤波,具体表示如下

$$F = F_2 + F_2 = (A \circ B) \cdot B + (A \cdot B) \circ B \quad (15)$$

2.2 小波包变换降噪

小波包变换降噪相比小波变换降噪能为信号提供一种更为精细的分析方法,可以对图像的高频和低频部分进行进一步的细分,增强信号中的有用部分,抑制无用部分。其基本思想是对含有噪声的图像进行小波包变换,后将变换后的小波包系数进行阈值处理,最后进行小波包重构达到降噪目的^[9-10]。

小波包变换降噪步骤如下:a.选择小波并确定其分解层次,进行小波包分解;b.通过给定熵标准,计算最优树,确定最优小波包基;c.选择恰当阈值对小波包分解系数进行量化;d.降噪处理后的系数进行小波包重构。

笔者选用'db4'小波进行小波包3层分解与重构,实现降噪滤波。通过全局阈值选择,采用软阈值处理方式对图像进行降噪处理,在降噪过程中对低频系数进行放大,对高频系数进行抑制,有效区分了信号中的突变部分和噪声。

2.3 图像二值化处理和仿真实验

选取实地拍摄的一幅管型母线灰度图像,在管母中间位置用红油漆标示有两个挠度测量点 O_1 和 O_2 ,采用中值滤波、小波变换、小波包变换和本研究方法对图像进行降噪处理,如图3所示。图像降噪的目的是为更准确地捕捉管母上标示的挠度测量点,因此选取适当的阈值对灰度图像进行二值化处理,使整个图像呈现明显的黑白效果^[11],尽可能地消除选取测量点时图像中其他背景元素的影响,以利于程序更准确地自动选取测量点的像素坐标。

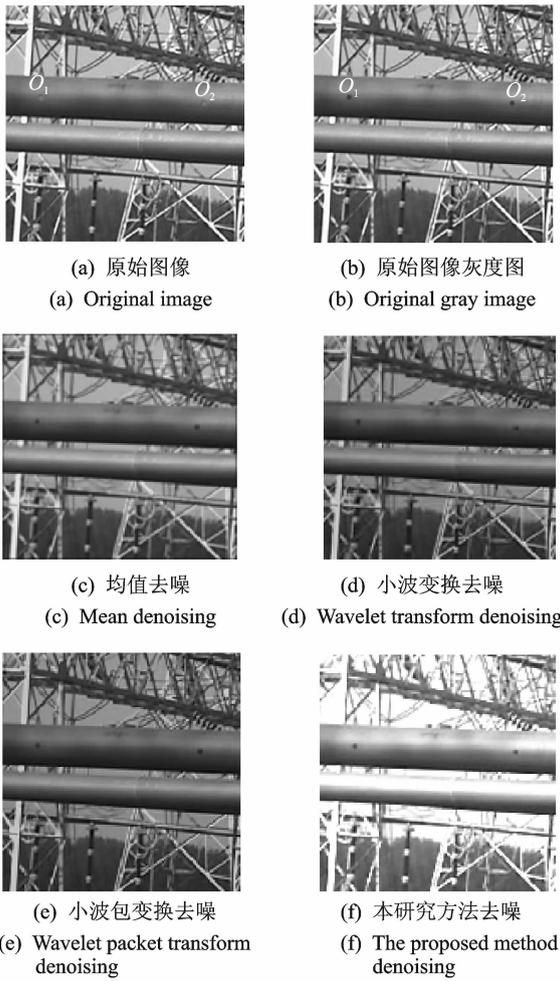


图 3 管母图像和降噪效果图

Fig. 3 Mage of tube busbar and result of de-noising

首先,通过程序自动选取确定图 3 原始图像中测量点 O_1 和 O_2 的灰度值为 51,以此作为灰度图像二值化处理的阈值;然后,将管母灰度图像(b)中所有灰度值 ≤ 51 的像素点灰度值重置为 0,其余点灰度值重置为 255,使灰度图呈现为明显的黑白效果。灰度图二值化处理后的图像如图 4 所示。可以看出,原始图像、均值去噪、小波变换降噪和小波包变换去噪后的二值化处理的图像中,测量点和图中背景元素出现融合,较难分辨,而本研究方法降噪后二值化图像中可以较为清楚地分辨出测量点 O_1 和 O_2 。

表 2 为在原始图像和各个降噪方法处理后的图像中,灰度值 ≤ 51 的像素点总数占图像像素点总数的比例。可以看出,相比原始图像而言,4 种降噪方法的所占比例都有不同程度的降低,但本研究方法灰度值 ≤ 51 的像素点总数占图像像素点总数的比例远低于其他方法。这说明本研究方法最大程度地增大了管母上标示的挠度测量点与其他点的灰度差

值,淡化了图中其他元素对提取测量点时的影响,提高了灰度图像的二值化处理的效率。

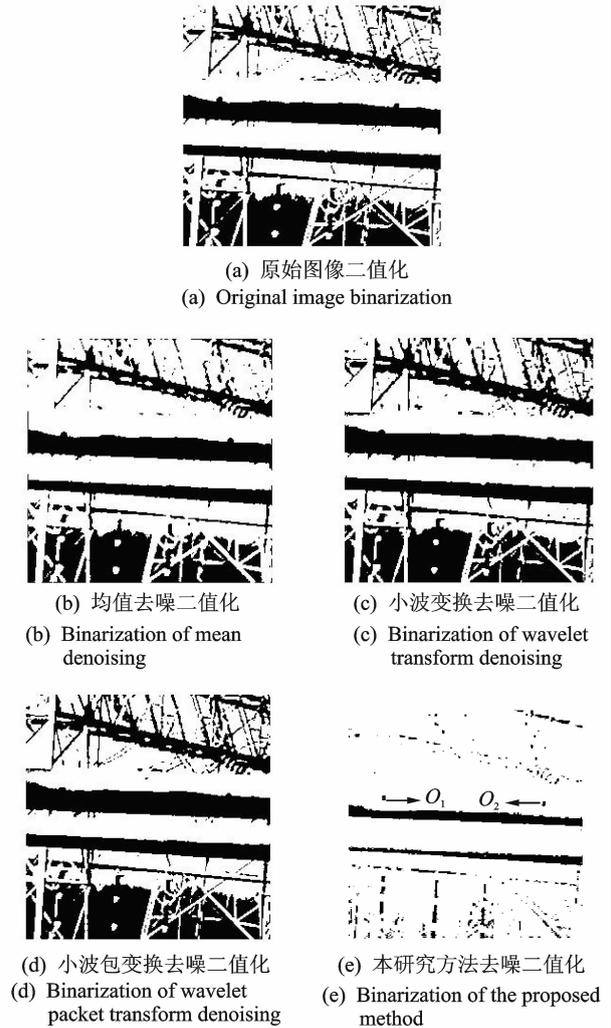


图 4 二值化图像

Fig. 4 Binarization processing mage

表 2 小于二值化阈值的像素点所占比例

Tab. 2 The proportion of pixel less than threshold of binarization processing

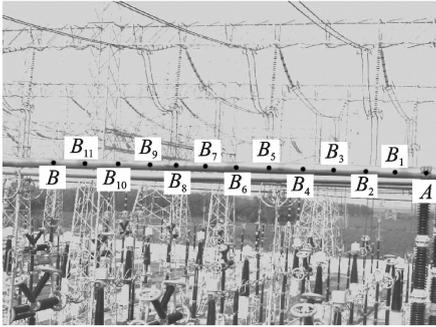
降噪方法	灰度值 ≤ 51 点数	像素点总数	所占比例/%
原始图像	25 059	256 * 256	38.23
均值降噪	23 475	342 * 342	16.31
小波变换	28 498	342 * 342	19.79
小波包变换	28 951	342 * 342	20.11
本研究方法	5 931	342 * 342	4.12

3 管型母线挠度的实时监测

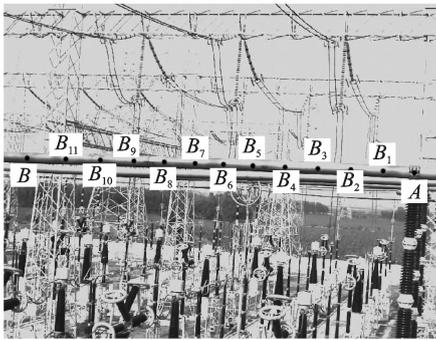
3.1 测量点提取

拍摄前,在管型母线中间位置上用红色油漆标记挠度测量点,如图 3(a)所示。图 5 为拍摄的齐齐

哈尔滨市变电站某一管型母线经过降噪滤波后的灰度图像。图中:点 A 为管型母线支撑处位置,是基准点;点 B 和 B₁, B₂, …, B₁₁ 共 12 点为布置在管型母线上的测量点, B 点为这一管型母线的中间点。为保证各个点尽量在一条直线上,在母线的中间位置标记测量点。由于管型母线跨度较大,为达到更好的拍摄效果,摄像机不能拍摄这一母线的全部,只拍摄了母线的一半。



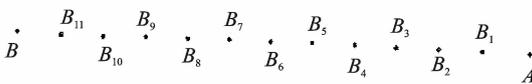
(a) 左侧图像
(a) The left image



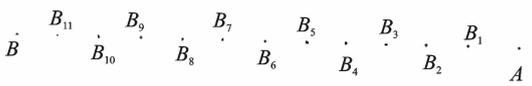
(b) 右侧图像
(b) The right image

图 5 降噪后管型母线灰度图

Fig. 5 Gray level image of Tube Busbar of de-noising



(a) 左侧图像
(a) The left image



(b) 右侧图像
(b) The right image

图 6 管型母线测量点二值化图

Fig. 6 Binarization processing mage of Tube Busbar measurement point

3.2 空间三维坐标恢复

双目成像获得了同一场景的两幅不同图像,根

据同一点在两副图像中的平面坐标获得其在世界坐标系中坐标。对于空间物体表面任意一点 P, 确定左摄像机图像上的点 P₁ 与右摄像机图像上的点 P₂ 是空间同一点 P 的图像点, 则 P 点的空间位置可由过两点的两条直线的交点唯一确定。

表 3 测量点的像素坐标

Tab. 3 Pixel co-ordinate of measurement point

左侧图像		右侧图像	
测量点	像素坐标	测量点	像素坐标
A 点(基准点)	(834, 334)	A 点(基准点)	(860, 349)
B ₁ 点	(768, 331)	B ₁ 点	(790, 346)
B ₂ 点	(709, 328)	B ₂ 点	(733, 344)
B ₃ 点	(650, 325)	B ₃ 点	(679, 344)
B ₄ 点	(592, 323)	B ₄ 点	(624, 343)
B ₅ 点	(533, 319)	B ₅ 点	(571, 340)
B ₆ 点	(476, 318)	B ₆ 点	(515, 339)
B ₇ 点	(419, 316)	B ₇ 点	(458, 337)
B ₈ 点	(361, 314)	B ₈ 点	(402, 336)
B ₉ 点	(303, 311)	B ₉ 点	(346, 334)
B ₁₀ 点	(246, 311)	B ₁₀ 点	(289, 333)
B ₁₁ 点	(187, 308)	B ₁₁ 点	(233, 331)
B 点(中间点)	(126, 305)	B 点(中间点)	(178, 330)

已知空间点 P 的二维图像像素坐标 P(u, v), 则式(8)为关于 x_w, y_w, z_w 以及 z_c 的两个极线方程。设左、右两摄像机的成像公式分别为

$$z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

联立式(16)和式(17), 得到

$$\begin{bmatrix} u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1 u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1 u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1 v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1 v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1 \\ u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2 u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2 u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2 \\ v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2 v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2 v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

求解式(18), 可得点 P 的三维坐标 (x_w, y_w, z_w)^[12]。

3.3 挠度值测量

通过空间三维坐标恢复,得到管型母线上各个测量点的世界坐标值,测量结果如表 4 所示。管型母线在中间值挠度值最大,为基准点 A 与中间点 B 的 Y_w 值差 $r = 825.918\ 2 - 718.266\ 2 = 107.652\ \text{mm}$ 。通过各个测量点的世界坐标值,由于管型母线左右对称,通过最小二乘法模拟管型母线的挠度曲线如图 7 所示,完成对管型母线挠度的实时监测。

表 4 挠度测量结果

Tab. 4 Result of deflection measurement

测量点	世界坐标值
A 点(基准点)	[30 307.096 6 825.918 2 478.665 3]
B_1 点	[29 312.416 7 817.124 4 461.3116]
B_2 点	[28 307.001 6 808.458 2 443.422 3]
B_3 点	[27 313.006 6 799.008 2 425.872 2]
B_4 点	[26 306.115 4 790.564 2 399.378 5]
B_5 点	[25 317.231 1 782.000 2 375.566 9]
B_6 点	[24 303.658 4 773.551 2 354.557 2]
B_7 点	[23 315.895 6 763.881 8 335.411 9]
B_8 点	[22 314.440 2 754.911 2 313.238 5]
B_9 点	[21 314.550 1 745.915 7 288.004 6]
B_{10} 点	[20 306.786 9 736.125 6 267.476 9]
B_{11} 点	[19 311.096 6 727.918 2 242.466 9]
B 点(中间点)	[18 302.519 7 718.266 2 217.750 2]

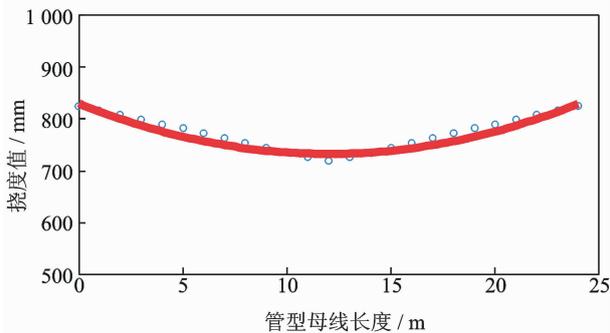


图 7 管型母线挠度曲线

Fig. 7 Deflection curve of tube busbar

4 结束语

基于计算机双目视觉理论建立了管型母线挠度

的测量体系,提出了一种非接触式的管型母线挠度实时监测方法。将该方法应用于某一 500 kV 变电站筒支架支撑的管形母线挠度测量上,得到管母的最大挠度值,并通过最小二乘法模拟出管母的挠度曲线。结果表明,该方法可以有效测量管型母线的挠度,能够对管型母线挠度进行实时监测。

参 考 文 献

[1] Nexans: CAT-1 transmission line monitoring system specification[EB/OL]. Paris: NEXANS, 2007[2010-07-30]. http://www.nexans.us/eservice/USen-US/navigate-234993/CAT_1_Transmission_Line_Monitoring_System.html#top.

[2] 陈楠,文习山,蓝磊,等. 基于电场逆运算的输电线路弧垂计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 121-127.
Chen Nan, Wen Xishan, Lan Lei, et al. Novel algorithm for transmission line sag calculation based on electrical field invert arithmetic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 121-127. (in Chinese)

[3] 陈绍鑫,吴培胜,孙云涛,等. 输电线路温度和弧垂在线监测装置应用研究[J]. 华北电力技术, 2008, 3: 14-15.
Chen Shaoxin, Wu Peisheng, Sun Yuntao, et al. Application of on-line temperature and sags monitoring device of transmission line[J]. North China Electric Power, 2008, 3: 14-15. (in Chinese)

[4] 孙楠,张丽艳,叶南,等. 基于十字靶标的双目立体测量系统标定[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 1-9.
Sun Nan, Zhang Liyan, Ye Nan, et al. Calibration of binocular stereo measurement system based on calibration cross[J]. Acta Optic Sinica, 2012, 32(4): 1-9. (in Chinese)

[5] 高贵,杨洗陈,张海明. 激光再制造机器人双目视觉系统标定研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1868-1872.
Gao Gui, Yang Xichen, Zhang Haiming. Study of binocular vision system calibration in laser remanufacturing robot[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1868-1872. (in Chinese)

[6] 沈长青,朱忠奎,孔凡让,等. 形态学滤波方法改进及其在滚动轴承故障特征提取中的应用[J]. 振动工程学报, 2012, 25(4): 468-473.
Shen Changqing, Zhu Zhongkui, Kong Fanrang, et al. An improved morphological filtering method and its application in bearing fault feature extraction[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(4): 468-473.

(in Chinese)

[7] Zheng Wei, Zhou Xichao, Xu Honglei, et al. Partial discharge signal obtain based on adaptive wavelet with mathematical morphology [J]. International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering, 2012, 24: 912-917.

[8] 李兵, 张培林, 米双山, 等. 齿轮故障信号多重分形维数的形态学计算方法 [J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 450-453.

Li Bing, Zhang Peilin, Mi Shuangshan, et al. Mathematical morphology based on multifractal dimensions for gear fault diagnosis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 450-453. (in Chinese)

[9] 孙伟, 熊邦书, 黄建萍, 等. 小波包降噪与 LMD 相结合的滚动轴承故障诊断方法 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(18): 153-156.

Sun Wei, Xiong Bangshu, Huang Jianping, et al. Fault diagnosis of a rolling bearing using wavelet packet de-noising and LMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(18): 153-156. (in Chinese)

[10] 蒋玲莉, 刘义伦, 李学军, 等. 小波包去噪与改进 HHT 的微弱信号特征提取 [J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5): 510-513.

Jiang Lingli, Liu Yilun, Li Xuejun, et al. Feature extraction of weak signal using wavelet packet denoising and improved hilbert-huang transformation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(5): 510-513. (in Chinese)

[11] 吴锐, 黄剑华, 唐降龙. 基于灰度直方图和谱聚类的文本图像二值化方法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2460-2461.

Wu Rui, Huang Jianhua, Tang Jianglong, et al. Method of text image binarization processing using histogram and spectral clustering [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(10): 2460-2461. (in Chinese)

[12] 马林. 基于双目视觉的图像三维重建 [D]. 济南: 山东大学, 2008.



第一作者简介:唐贵基,男,1962年10月生,教授。主要研究方向为机械结构动特性、振动与噪声控制、状态监测与故障诊断。曾发表《应用小波包和包络分析的滚动轴承故障诊断》(《振动、测试与诊断》2009年第29卷第2期)等论文。

E-mail: tanggjk@ncepubd.edu.cn

欢迎参加 第 11 届压电材料及其在作动器上的应用国际研讨会 暨第 9 届能量收集国际研讨会

第 11 届压电材料及其在作动器上的应用国际研讨会、第 9 届能量收集国际研讨会 (IWPMA & EHW, 2014) 将于 2014 年 9 月 22 日至 25 日在中国苏州召开。会议由 IWPMA 学术委员会和 EHW 学术委员会共同主办, 由南京航空航天大学 and 苏州大学承办。会议涵盖的研究热点包括压电材料、压电作动器、超声技术、能量收集及应用等。届时将有众多国内外知名专家参会, 并做大会报告。详细信息参见 <http://www.iwpma2014.net>

欢迎相关领域的老师、学生踊跃参加!

