

# 基于摄像视觉的锅炉蒸汽管道宏观位移在线测量方法

李文胜<sup>1</sup>, 宋继湘<sup>2</sup>, 樊绍胜<sup>2</sup>, 王伟<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 锅炉蒸汽管道是锅炉汽水管道系统中承受蒸汽温度和压力的重要部件之一, 高温高压造成蒸汽管道蠕变产生宏观位移, 同时导致弹性支吊架产生形变, 影响火电机组的安全运行。本研究针对弹性支吊架与锅炉蒸汽管道的结构关系, 提出一种间接在线测量管道位移的方法。该方法先在弹簧支吊架下节选取两个标志点, 再以锅炉管道中心线为  $Y$  轴建立世界坐标系, 利用 2 个平行安置的高清摄像机实时在线采集图像, 通过双目视觉获取标志点在所建坐标系中的空间坐标, 由这两点建立弹簧支吊架下节所在直线的直线方程, 联立蒸汽管道的圆柱体曲线方程, 得到二者的交点, 根据该交点坐标的变化实时计算出管道在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向的宏观位移。利用试验对测量方法进行了验证。试验结果表明, 该方法获得的管道在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向宏观位移数据的不确定度分别为  $u_x = 0.10$ ,  $u_y = 0.09$ ,  $u_z = 0.12$ , 不确定度越小, 表明测量的位移越准确, 且实现该方法的系统装置易于安装。

**关键词:** 双目视觉; 三维坐标测量; 锅炉管道; 宏观位移  
中图分类号: TK223.1+1 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.08.015

## 引言

随着系统容量和规模的扩大, 电力设备失效给人们的生产和现代生活所带来的影响越来越大, 电力用户对系统的安全运行和可靠供电也提出了越来越高的要求。这使得电力系统安全可靠性问题变得越来越突出, 因此, 保障火电机组安全稳定运行, 提高电力系统可靠性, 是电力企业现代化管理的一项重要内容。蒸汽管道作为锅炉汽水管道系统中承受蒸汽温度和压力参数最高的部件之一, 也是对超温最为敏感的部件之一。由于常处于高温状态下运行, 管道会发生蠕变, 造成支吊架形变, 同时管道产生宏观位移, 使火电机组在带缺陷的情况下运行<sup>[1-2]</sup>, 故为了保证火电机组安全稳定运行, 需要对锅炉蒸汽管道的蠕变及宏观位移进行监测。

传统的蒸汽管道位移测量方法需要在机组停运下实施, 管道蠕变靠人工检测完成, 周期长, 同步性差, 尤其在电厂出现紧急情况时, 不能及时连续完成数据采集, 难以适时监控和评估蒸汽管道的安全状况, 安全监测的资料整理分析和信息的反馈都存在严重的滞后<sup>[1-2]</sup>。目前, 有人提出先剥开管道绝热层, 用窄铁皮包裹形状特殊物体的方式固定在管道外壁, 通过激光技术来测量管道宏观位移, 但该方法安装不方便, 且剥开绝热层对管道的运行寿命有影响。

针对上述问题, 本研究拟通过在支吊架上选取 2 个标志点, 利用双目视觉求取标志点的三维坐标, 从而间接获得锅炉管道宏观位移的在线变化, 该方法精确度高, 且易于安装实现。

## 1 锅炉管道宏观位移测量方法

锅炉主蒸汽管道通过若干弹性支吊架悬吊, 弹性支吊架可以简化为上下两节刚性杆和中间一节弹簧, 各节之间通过活性关节相连, 支吊架实物图如图 1 所示。当高温高压造成蒸汽管道蠕变产生宏观位移时, 因支吊架与管道的相互作用, 支吊架会发生形变, 同时支吊架各节之间会形成夹角, 因此蒸汽管道因蠕变产生的宏观位移可等效为支吊架与管道交点的空间坐标的变化量。

根据支吊架与蒸汽管道的关系建立锅炉主蒸汽管道实际宏观位移计算方法, 如图 2 所示,  $A_1$  和  $A_2$  是焊接在支吊架下节的标志点,  $B$  是蒸汽管道蠕变前支吊架延长线与管道外壁的交点, 当蒸汽管道发生蠕变后, 标志点位置变为  $A'_1$  和  $A'_2$ , 支吊架延长线与管道的交点移动到  $B'$  位置, 则  $B'$  与  $B$  两点在

收稿日期: 2015-09-17; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技基金资助项目(K-GD2013-0497)

作者简介: 李文胜(1984-), 男, 湖南湘乡人, 广东电网有限责任公司高级工程师。

通讯作者: 王伟(1983-), 男, 广东电网有限责任公司高级工程师。

X、Y、Z 方向的坐标差即为锅炉主蒸汽管道在这 3 个方向的宏观位移。以锅炉主蒸汽管道中心线为 Y 轴，弹性支吊架为 Z 轴，二者延长线的交点为原点，建立世界坐标系  $X_w Y_w O_w Z_w$ ，以上述所建坐标系为例，则各点在所建世界坐标系中的坐标可分别设为  $A_1(0, 0, z_1)$ 、 $B(0, 0, r)$ 、 $A_2(0, 0, z_2)$ 、 $A'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ 、 $A'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ 、 $B'(x, y, z)$ 。

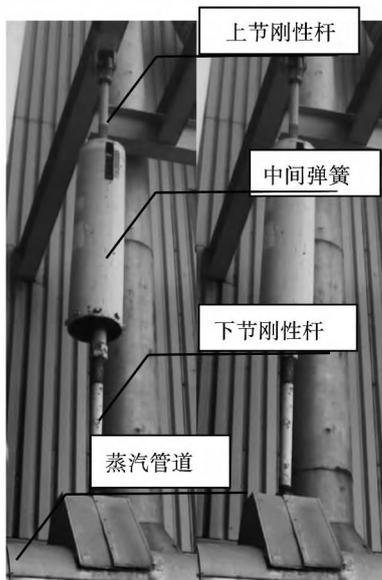


图 1 现场图  
Fig. 1 Real scene

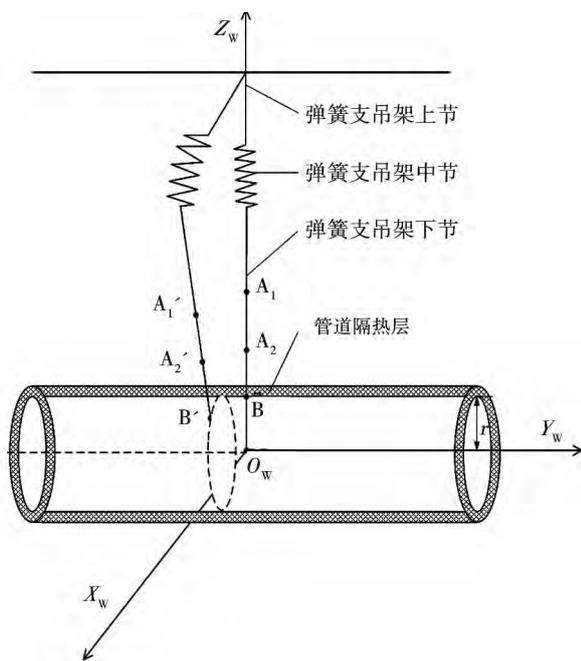


图 2 锅炉主蒸汽管道宏观位移计算方法示意图  
Fig. 2 Schematic of calculating method

由  $A'_1$  和  $A'_2$  两点可得到弹性支吊架下节直线  $l_1$  在所建世界坐标系中直线方程式：

$$\frac{x - x'_1}{x'_2 - x'_1} = \frac{y - y'_1}{y'_2 - y'_1} = \frac{z - z'_1}{z'_2 - z'_1} \quad (1)$$

又已知锅炉主蒸汽管道在所建坐标系中的曲线方程是圆柱体，即：

$$x^2 + z^2 = r^2 \quad (2)$$

结合直线  $l_1$  方程与锅炉主蒸汽管道的曲线方程，可以得到它们的交点 B' 的 X、Z 坐标为：

$$x = \frac{t \sqrt{(r^2 - a^2)(t^2 + 1) + t^2 a^2} + 1}{t^2 + 1} \quad (3)$$

$$z = \frac{t \sqrt{(r^2 - a^2)(t^2 + 1) + t^2 a^2} - ta}{t^2 + 1} \quad (4)$$

式中： $t = \frac{x'_2 - x'_1}{z'_2 - z'_1}$ ， $a = x'_1 - \frac{x'_2 - x'_1}{z'_2 - z'_1} z'_1$ ，将 x、z 坐标代入直线  $l_1$  方程，即可求得 Y 坐标，即

$$y = \left( \frac{t \sqrt{(r^2 - a^2)(t^2 + 1) + t^2 a^2} + 1}{t^2 + 1} - x''_1 \right)$$

$$\frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1} + y'_1 \quad (5)$$

因 B' 点是由图 2 中点 B(0, 0, r) 管道蠕变后所得，因此，锅炉主蒸汽管道因高温蠕变在 X、Y、Z 三个方向的宏观位移为：

$$dx = \left| \frac{k \sqrt{(r^2 - a^2)(t^2 + 1) + t^2 a^2} + 1}{t^2 + 1} \right| \quad (6)$$

$$dy = \left| \left( \frac{k \sqrt{(r^2 - a^2)(t^2 + 1) + t^2 a^2} + 1}{t^2 + 1} - x'_1 \right) \right.$$

$$\left. \frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1} + y'_1 \right| \quad (7)$$

$$dz = \left| \frac{k \sqrt{(r^2 - a^2)(t^2 + 1) + t^2 a^2} - ta}{t^2 + 1} - r \right| \quad (8)$$

根据上述方法，求取管道宏观位移的关键问题就是求取标志点的三维坐标，本研究通过选取如图 3 所示的圆柱体，镶嵌在黑色方形金属块上，并将此方形金属块焊接在支吊架下节作为标志点，每个支吊架下节焊接 2 个标志圆，则这 2 个标志圆的圆心就代表了图 1 中的 2 个标志点  $A_1$ 、 $A_2$ ， $A'_1$  和  $A'_2$  则代表了管道发生蠕变后  $A_1$ 、 $A_2$  所在位置。这些点的三维坐标可通过双目视觉测量所得，标志点三维坐标双目视觉算法的工作流程图如图 3 所示。

得到各点三维坐标后，代入式(6)~式(8)即可

求得蒸汽管道各方向的宏观位移。



图 3 标志点  
Fig. 3 Marker

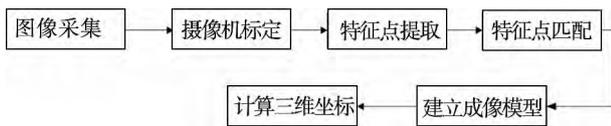


图 4 双目视觉测量的工作流程  
Fig. 4 Flow chart of binocular vision

## 2 视觉检测算法

### 2.1 摄像机标定

摄像机标定是为了建立空间点世界坐标与图像像素坐标之间的一种对应关系,通过这 2 个标志圆的圆心在左右摄像机的像素坐标可以得出标志圆圆心的世界坐标。该测量系统通过 2 个摄像机采集图像,设定好两个摄像机之间的距离,用摄像机同时采集安置在摄像机前的标定物。标定物选用 10 × 7 的黑白方格图,每个方格的大小为 25 mm × 25 mm,如图 5 所示。

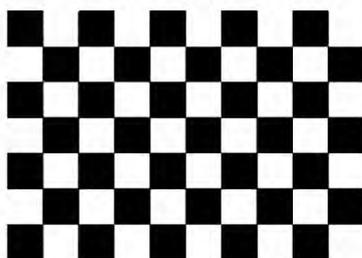


图 5 标定板规格  
Fig. 5 Specification of calibration board

摄像机采用针孔成像模型,空间某点 P 的世界坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)^T$  与该点的像素坐标  $(u, v)^T$  间的对应关系为<sup>[3-5]</sup>

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \ T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中  $T = [t_x, t_y, t_z]^T$  为平移矩阵,  $R = (r_{ij})_{3 \times 3}$  是正交旋转矩阵,代表 2 个摄像机的相对位置(即右摄像机坐标系可由左摄像机坐标系三维平移  $T$  和旋转  $R$  所得),  $f_x, f_y, c_x, c_y$  是摄像机内参数,  $s$  是点在摄像机坐标系下的  $z$  坐标。左右摄像机平行放置,二者相距 200 mm,改变标定物的摆放位置,同时采集多幅图像,可得到标定结果如下:

$$M_L = \begin{bmatrix} 1754.51 & 0 & 449.58 \\ 0 & 1754.35 & 345.47 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_R = \begin{bmatrix} 1735.92 & 0 & 563.43 \\ 0 & 1745.95 & 376.55 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

外参数为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0038 & -0.0040 \\ 0.0038 & 1 & 0.0026 \\ 0.0040 & -0.0026 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 200.4809 \\ -2.4336 \\ 3.32 \end{bmatrix}$$

### 2.2 图像预处理

由于受白天、黑夜、下雨等各种复杂环境的影响,摄像机获取的视频流图像质量不是很好,从而影响后续的图像处理,为了改善图像质量,增强图像细节,通过如下方法对获取的图像进行预处理。

将原始视频图像截取为 RGB(RGB 是代表 R、G、B 三个通道的颜色,R 代表红色通道,G 代表绿色通道,B 代表蓝色通道)彩色图像,并进行灰度转换,其转换公式为:

$$\text{Gray} = |B - G - R| \quad (10)$$

上式中 Gray 代表灰度图像的灰度值,图 6 是摄像机采集的图像,图 7 是按公式(10)转化后的灰度图像。

### 2.3 标志圆提取及匹配

左右摄像机标定后,提取左右图像中的标志圆轮廓,通过霍夫变换检测标志圆并进行匹配,图6是左右摄像机采集的图像,使用Canny算法对图像进行边缘检测<sup>[6-8]</sup>,初步得出图像中标志圆的轮廓,如图8所示。

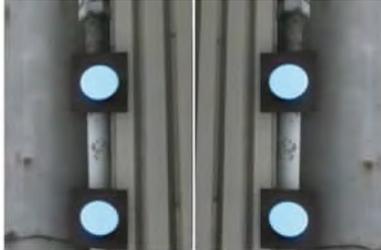


图6 左右摄像机采集的图像

Fig. 6 Pictures captured simultaneously by the binocular camera

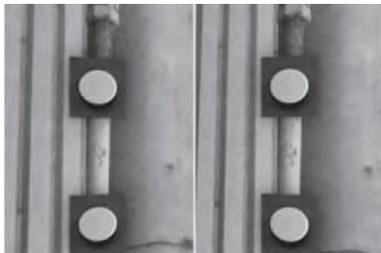


图7 左右图像灰度处理

Fig. 7 Gray-scale processing

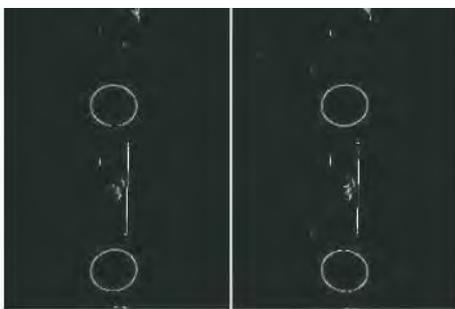


图8 左右图像边缘提取

Fig. 8 Edge extraction

对左右摄像机采集的图像提取出标志圆的轮廓后,使用霍夫变换检测标志圆并重绘标志圆,如图9所示,然后使用Brisk算法进行图像匹配<sup>[9-12]</sup>,如图10所示。在该过程中能够得到2个标志圆圆心在左右摄像机的图像像素坐标  $A_{LT}(251,387)$ 、 $A_{RT}$

$(243,387)$ 、 $A_{LU}(243,707)$ 、 $A_{RU}(251,709)$ 。

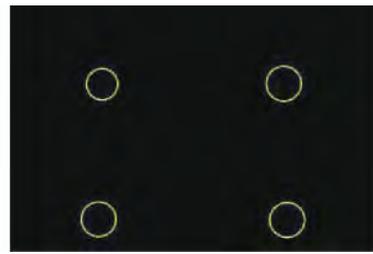


图9 标志圆检测

Fig. 9 Sign detection

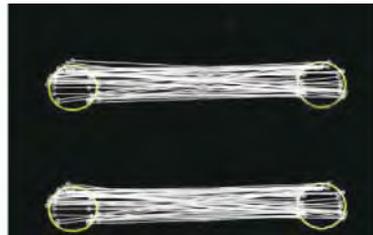


图10 标志圆匹配

Fig. 10 Sign matching

将得到的标志圆圆心在左右摄像机的像素坐标结合上述摄像机标定所获得的摄像机内外参数代入式(9)即可求得2个标志圆的三维世界坐标。

### 3 试验系统与试验结果

为了验证上述方法的可行性,本研究在电厂1号机组上搭建了试验系统,根据机组锅炉管道的管系布置及变形特点,选取19个监测点,如图11所示,MSXX表示监测点编号。所搭建试验系统结构包括数据采集部分、数据传送部分、数据处理部分,其中,数据采集部分包括图像捕捉标志点、2个高清摄像机,数据传送部分包括网桥、发射网桥、接收网桥,数据处理部分包括上位机软件和服务器,系统结构、流程如图12、图13所示。

控制室计算机获得视频流图像,并对视频流中的每帧图像按上述方法进行处理,获取2个标志点的空间坐标,以视频流中第一帧图像为基准图,之后每帧图像与第一帧图像比较,计算蒸汽管道在X、Y、Z 3个方向的宏观位移,并存入数据库。

表1为该系运行一段时间后各监测点在X、Y、Z 3个方向所获得的宏观位移数据与同时段人工

检测数据的比较。

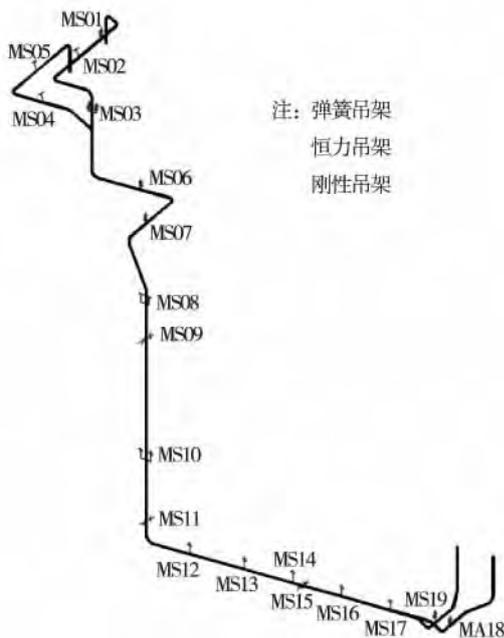


图 11 主蒸汽管道单线立体图

Fig. 11 Stereogram of the single line from the main pipe

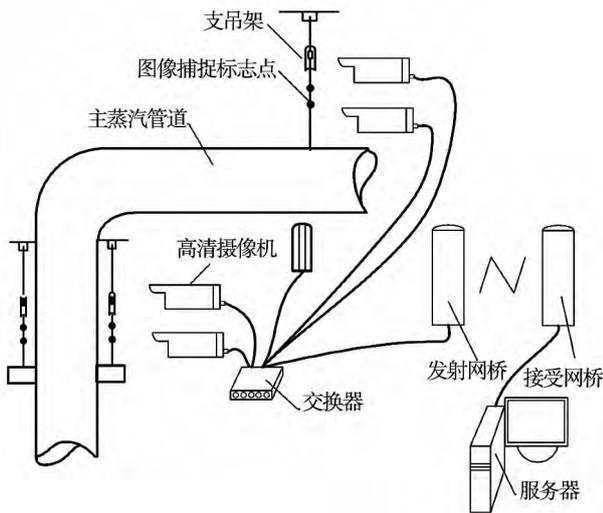


图 12 系统整体安装示意图

Fig. 12 System assembly

从表 1 中可以看出,该系统运行一段时间后所获得的管道位移数据与人工检测所获得的管道位移数据相比二者误差很小,为了进一步验证该系统方法长期运行的准确性,我们获取了一个月的系统所测数据与人工监测数据,以监测点 MS05 为例,数据

曲线如图 14 所示。

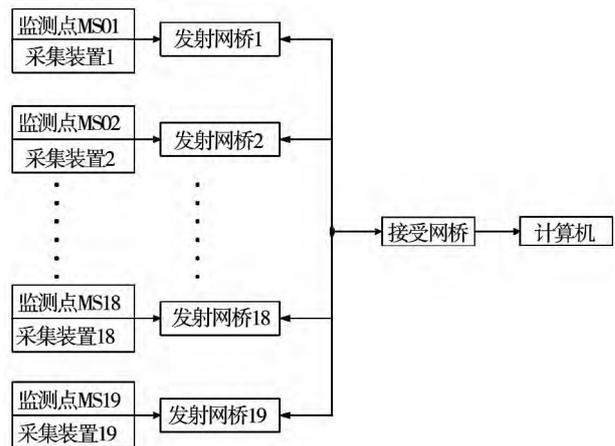


图 13 系统流程图

Fig. 13 System flowchart

表 1 蒸汽管道各测量点在 X、Y、Z 方向的宏观位移

Tab. 1 Deformations of the marked points in all X, Y and Z directions

支吊架 编号	系统测量热位移/mm			人工检测热位移/mm		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
MS01	-4.2	8.3	-5.5	-4.4	8.5	-5.6
MS02	-51.0	0	-27.2	-51.0	0	-27.0
MS03	-88.2	0	-12.5	-87.0	0.2	-11.9
MS04	-120.6	0.1	30.2	-119.8	0	30.5
MS05	-5.6	12.0	-6.3	-5.8	12.1	-6.4
MS06	34.2	-2.5	133.1	33.2	-3	132.5
MS07	25.0	56.5	208.6	25.8	55.5	206.8
MS08	-5.0	0	197.0	-5.5	0.2	196.2
MS09	0	-33.2	147.5	0.2	-32.8	146.0
MS10	4.5	-152.6	-62.7	4.2	-151.5	-63.2
MS11	0	-208.6	-131.5	0.5	-209.5	-132.7
MS12	-34.2	-240.0	-101.6	-34.8	-240.5	-100.2
MS13	-75.4	-218.6	-50.0	-74.2	-217.0	-49.5
MS14	-105.6	-177.5	-5.0	-106.5	-178.2	-5.0
MS15	-108.7	-172.0	0.4	-107.2	-172.8	0
MS16	-123.2	-126.5	42.2	-124.0	-127.2	42.0
MS17	-119.3	-75.4	88.2	-119.3	-75.6	89.1
MS18	-49.5	-51.3	81.4	-49.3	-51.5	81.7
MS19	-54.4	-61.4	89.3	-54.2	-61.7	89.9

根据这些位移数据计算得到二者在 X、Y、Z 3 个方向的均方差分别为:  $\delta_x = 0.44$ ,  $\delta_y = 0.42$ ,  $\delta_z =$

0.51 本文所提出的测量方法在 X、Y、Z3 个方向获得的宏观位移的不确定度为:  $u_x = 0.10$   $\mu_y = 0.09$  ,  $u_z = 0.12$  不确定度的计算公式如下:

$$u = \frac{\text{样本均方差 } \delta}{\sqrt{\text{样本数 } N}} \quad (11)$$

表明该方法能够精确的得到管道的宏观位移。

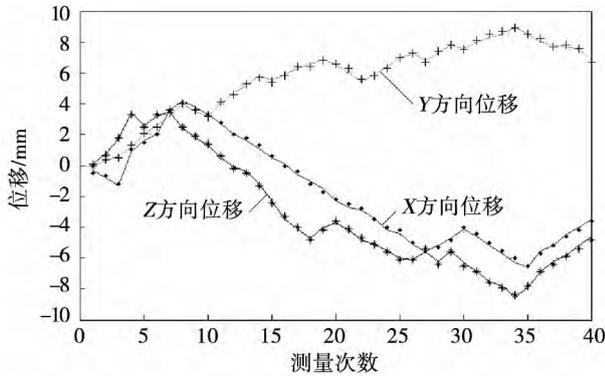


图 14 系统检测管道位移和人工检测位移对比曲线图

Fig. 14 Comparison of deformation detected by system detection and human measurement

#### 4 结 论

本文提出了一种锅炉主蒸汽管道宏观位移的非接触式实时测量方法,并进行了现场试验,试验结果表明,该方法获得的管道在 X、Y、Z 3 个方向宏观位移数据的不确定度分别为  $u_x = 0.10$   $\mu_y = 0.09$   $\mu_z = 0.12$  与不确定越小,表明测量的位移越准确,因此该方法完全能够取代人工监测,实现宏观位移实时监测,对精简监管队伍,减少发电厂机组非计划停机,保障电力系统安全稳定运行,具有显著的经济和社会效益。

#### 参考文献:

[1] DL/T616-2006,火力发电厂汽水管路与支吊架维修调整导则[S].  
DL/T616-2006. Maintain & adjusting guide for thermal power plant steam-water pipes and support-hangers [S].

[2] 李国斌,张书俊,刘玉春.支吊架零部件重量及吊零方式对弹簧选型和管道应力分析的影响[J].锅炉制造,2008(1):73-80.

LI Guo-bin ,ZHANG Shu-jun ,LIU Yu-chun. Influence of hanger component weight and load design method to spring selection and pipe stress analysis[J]. Boiler Manufacturing 2008( 1) : 73 - 80.

[3] 罗世民,李茂西.双目视觉测量中三维坐标的求取方法研究[J].计算机工程与设计 2006 27( 19) : 3622 - 3624.  
LUO Shi-min ,Li Mao-xi. Research on how to get object's 3D coordinate on two CCD camera measure system [J]. Computer Engineering and Design 2006 27( 19) :3622 - 3624.

[4] CHAPERON T ,DROULEZ J ,THIBAUT G. Reliable camera pose and calibration from a small set of point and line correspondences: a probabilistic approach [J]. Computer Vision and Image Understanding 2011 ,115( 5) : 576 - 585.

[5] 高如新,王俊孟.双目立体视觉求取三维坐标方法研究[J].计算机仿真 2014 31( 10) : 296 - 300.  
GAO Ru-xin ,WANG Jun-meng. Study on some methods of 3D coordinate calculation of binocular vision [J]. Computer Simulation 2014 31( 10) : 296 - 300.

[6] WANG J ,et al. Research on object recognition of intelligent robot base on binocular vision [J]. Applied Mechanics and Materials , 2012 ,127: 300 - 304.

[7] 张 梁,徐锦法.基于双目视觉的无人飞行器目标跟踪与定位[J].计算机工程与应用 2014 50( 24) : 27 - 31.  
ZHANG Liang ,XU Jin-fa. Target tracking and locating for UAV based on binocular stereo vision [J]. Computer Engineering and Applications 2014 50( 24) : 27 - 31.

[8] ALAAHI A ,ORTIZ R ,FREAK V P. Fast retina keypoint [C]. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition ( CVPR) 2012: 263 - 286.

[9] YABUTA Y ,MIZUMOTO H ,ARII S. Binocular robot vision with active viewpoint for sphere measurement [J]. Key Engineering Materials 2012 516: 343 - 348.

[10] 吴一全,沈毅,陶飞翔.基于 NSCT 和 SURF 的遥感图像匹配[J].遥感学报 2014 18( 3) : 625 - 630.  
WU Yi-quan ,SHEN Yi ,TAO Fen-xiang. Remote sensing image matching based on non-subsampled contourlet transform and speed up robust features [J]. Journal of Remote Sensing 2014 , 18( 3) : 619 - 624.

[11] 卫 星,樊绍胜,高山,等.基于 BRISK 的图像快速匹配与变换算法[J].电子测量技术 2015 38( 3) : 43 - 47.  
WEI Xing ,FAN Shao-sheng ,GAO Shan ,et al. Rapid matching and transform algorithm of images based on the BRISK [J]. Electronic Measurement Technology 2015 38( 3) : 43 - 47.

[12] STEFAN L ,MARGARITA C ,ROLAND Y S. BRISK: binary robust invariant scalable keypoints [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision( ICCV) 2011: 2548 - 2555.

( 姜雪梅 编辑)

A three-dimensional SCR reactor model of 660 MW coal fired unit was established by using Fluent coupled detailed reaction kinetics. The effects of different ammonia injection methods and the specific surface area of catalyst on the De-NO<sub>x</sub> reaction were studied by the model. The results show that when the catalyst is newly put into operation ,De-NO<sub>x</sub> reaction is mainly accomplished in the first layer catalyst ,while the second layer catalyst mainly plays a role in the absorption of ammonia. The De-NO<sub>x</sub> effectiveness is the same for both 30 and 10 area ammonia injection method. After the catalyst is operated for a period of time ,the De-NO<sub>x</sub> efficiency is reduced and the escape of ammonia is increased as the first catalyst suffers from clogging and wear. At this point ,the De-NO<sub>x</sub> effectiveness of the 30 area ammonia injection method is slightly better than that of 10 area ammonia injection method. **Key words:** selective catalytic reduction ,detailed reaction kinetics ,specific surface area ,ammonia injection method

基于机器视觉的锅炉蒸汽管道宏观位移在线测量方法 = **An Indirect Online Measuring Method for Boiler Steam Pipe Deformations based on Machine Vision** [刊 ,汉] LI Wen-sheng ( Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. ,Ltd. ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510080) ,SONG Ji-xiang ,FAN Shao-sheng ( Changsha University of Science and Technology ,Changsha ,China ,Post Code: 410004) ,WANG Wei ( Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. ,Ltd. ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510080) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 8) . -87 ~92

As a vital component of the steam-water piping system ,the steam pipes of the boiler usually work in an extreme environment of high temperature and pressure ,which can result in deformation and affect the safe operation of the thermal power unit. Additionally ,the spring hanger used to hang the pipe can also generate deformations. In this paper ,an indirect method of measuring the deformations of the main steam pipes was proposed based on the binocular stereo vision measurement theory. By selecting two representative points from the second part of the spring hanger and setting the midline of the steam pipe as the Y-axis ,a world coordinate system was created firstly. Then two high-definition cameras arranged in parallel were used for the real-time image acquisition. According to the theory of binocular stereo vision measurement ,the world coordinates of the two marked points can be obtained ,thus a straight line joining these two marked points can be made. Solving the system of equations consisting of pipe contour surface and the straight line yields the intersection point. Then the displacement of the pipe in all X ,Y and Z direction can be calculated by real-time monitoring the world coordinate of the intersection point. The results show that the macroscopic displacement of the boiler pipe can be accurately measured by this method and the device for realizing this method is also easy to be installed. **Key words:** binocular vision ,3D coordinates calculation ,boiler pipe ,macroscopic displacement

LNG 运输船独立液罐焊接残余应力分析 = **Welding Residual Stresses Analysis of LNG Tanks Used in LNG Carrier** [刊 ,汉] HUANG Feng-yu ( School of Energy and Power Engineering ,Wuhan University of Technology ,Wuhan ,Hubei ,China ,Post Code: 430063) ,Zhou Yong ( Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion ,Wuhan ,Hubei ,China ,Post Code: 430064) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 8) . -93 ~98