

文章编号 1004-924X(2010)03-0638-08

管线钢管 JCO 精确弯曲成形技术

李 建^{1,2}, 赵 军¹, 马 瑞¹

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 一重集团 大连设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116600)

摘要: 为了减小管线钢管 JCO 成形工艺中成形管坯的椭圆度, 基于塑性弯曲工程理论和机器视觉测量技术提出了管线钢管 JCO 精确弯曲成形工艺。在管坯首道次成形过程中, 采用两次预弯法, 识别出板材的弹复规律, 结合管坯目标成形角, 预测出精确的压制行程; 在后续成形道次中, 利用误差补偿技术循环补偿上一道次的成形误差, 实现管坯每道次精确弯曲成形。确定了适合管坯端面的图像处理算法、图像处理流程和直线检测算法, 提出了采用正三角形作为标定模板求解摄像机外部参数的标定方法, 由单幅图片快速、高精度地标定出摄像机的外部参数, 建立了将图像角转换为管坯真实成形角的数学模型。实验结果表明, 管坯成形角监测误差在 0.2° 以内, 可控制成形管坯的椭圆度在 1.5% 以内, 减小了成形管坯的椭圆度, 改变了成形管坯的椭圆度控制依赖于操作者经验的现状。

关键词: 管线钢管; 精确弯曲; 机器视觉; 直线检测; 椭圆度

中图分类号: TG457.6; TP242.6 **文献标识码:** A

Precise bending pipeline steel pipes with JCO forming

LI Jian^{1,2}, ZHAO Jun¹, MA Rui¹

(1. *College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*
2. *Dalian Design & Research Institute Co., Ltd., Dalian 116600, China*)

Abstract: To reduce the ellipticity of the steel pipes processed by JCO forming, a precise bending technology was presented based on plastic bending engineering theory and machine vision technology. In the first bending step, the prescribing two-bend was used to obtain the springback law, then using the springback law and considering the aimed bend angle, the exact punch displacement to determine the forming angle in each bending step was predicted. In the succedent bending steps, the bending process was carried out with the exact punch displacement predicted above. The angle error in each bending step was calculated by comparing the actual forming angle with the aimed bend angle, and each precise bending process was realized by compensating for the last angle error in the next bending step. Furthermore, the image processing and line detecting algorithms suitable for the image of the steel pipe end plane were proposed by a machine vision system. A calibration method was presented to calculate the exterior parameters of the CCD camera, which employed an equilateral triangle as the calibration board and only needs to capture one image. A mathematical model was derived to convert the angle in the image into the actual forming angle. Experimental results show that the measuring error of the forming angle is less than 0.2° and the ellipticity of the formed pipe is less than 1.5% . Employing the precise bending technology, the high-quality pipes can be manufactured without depending on worker's

收稿日期: 2009-04-30; 修订日期: 2009-07-27.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 50805126)

operating experiences.

Key words: pipeline steel pipe; precise bending; machine vision; line detection; ellipticity

1 引 言

管线钢管 JCO 成形是一种典型的大口径直缝焊管生产工艺,该工艺首先在成形机上将预弯边后的钢板的一半通过多道次步进弯曲,压成“J”形;随后将钢板的另一半同样弯曲,压成“C”形;最后成形为开口的“O”形管坯,后续进行合缝焊接、机械扩径和质量检查^[1]。我国目前正在建设和已经投产的大口径直缝焊管 JCO 生产线共有 6 条,合计生产能力为 1.2×10^6 t/a, 约占我国大口径直缝焊管年生产总量的 40%^[2]。

椭圆度是衡量管线钢管成形质量的一个重要技术指标,按美国制管协会 API Spec 5L 标准,成形管坯的椭圆度不应超过钢管公称直径的 3.0%,制品椭圆度不应超过钢管公称直径的 1.6%^[3]。在管坯 JCO 成形工艺中,管坯每道次成形角的精度直接制约着成形管坯的椭圆度,进而影响机械扩径后制品的椭圆度。弯曲回弹现象的存在以及板材性能的波动,都会使得管坯每道次成形角很难达到或接近目标成形角,导致成形后的管坯椭圆度较大,不仅严重影响机械扩径后制品的椭圆度,而且有时直接导致后续预焊或机械扩径工艺无法进行。目前,JCO 厂家一般采用与钢管规格半径相等的靠模来定性检测管坯成形质量,并结合操作者的经验不断地调整压制行程参数,存在着调整误差大、操作人员工作强度大和管坯质量波动大等现实情况。

本文以减小成形管坯的椭圆度为目标,利用塑性弯曲工程理论和机器视觉测量技术,开展了管坯 JCO 精确弯曲成形技术研究。提出了管坯 JCO 精确弯曲成形工艺,建立了机器视觉测量技术中角度转换数学模型,开发了适合管坯端面的图像处理算法和直线检测算法。为验证采用机器视觉的管坯成形角测量精度以及精确弯曲成形工艺的可行性,进行了管坯 JCO 成形实验。实验结果表明,采用机器视觉技术能够实现管坯成形角的快速、高精度测量;采用管坯 JCO 精确弯曲成

形技术,能够有效地减小成形管坯的椭圆度,获得圆度性较好的成形管坯。

2 管坯 JCO 精确弯曲成形原理

管坯 JCO 成形为小曲率自由弯曲成形过程,属于渐进式模压自由弯曲成形工艺。文献[4]表明,采用塑性弯曲工程理论对小曲率弯曲成形及弹复过程进行分析是合理的,能够保证分析精度。本文基于塑性弯曲工程理论对管坯 JCO 成形及弹复过程进行了理论解析和实验研究,如图 1 所示。对解析和试验结果进行线性回归分析,结果表明成形角 α' (弯曲弹复后板坯直边夹角的补角) 随弯曲角 α (弯曲后板坯直边夹角的补角) 在较大的范围内呈近似线性规律变化,相关系数 R 平方值最小为 0.9986。

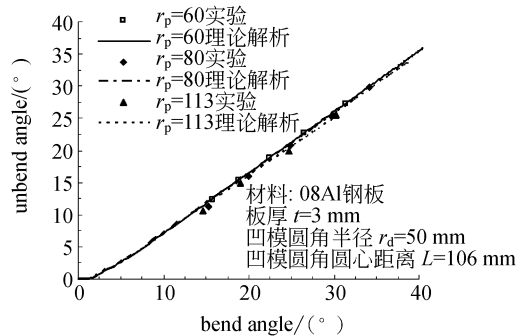


图 1 成形角随弯曲角变化曲线

Fig. 1 Relationship between unbend angle and bend angle

采用线性函数描述成形角 α' 和弯曲角 α 之间的关系,为

$$\alpha' = k\alpha + b, \quad (1)$$

从式(1)中可以看出,仅需确定该直线上的两个点坐标即可计算出参数 k 和 b ,进而识别出板材的回弹规律。精确弯曲成形的目的就是使得管坯每道次成形角达到或接近目标成形角 α_0 ,根据式(1)可以计算出弹复后弯曲角等于目标成形角 α_0 (预期达到的管坯成形角)时的板料需要弯曲的角度 α_f 为:

$$\alpha_i = (\alpha_0 - b) / k, \quad (2)$$

由几何关系得到压制行程为:

$$h_i = \frac{L}{2} \tan \frac{\alpha_i}{2} + (r_p + r_d + t)(1 - \sec \frac{\alpha_i}{2}), \quad (3)$$

式中, h_i 为压制行程; L 为凹模跨距; r_p 为凸模圆角半径; r_d 为凹模圆角半径; t 为板料厚度。

一般来说, 管坯成形角的直边长度约为 20 mm, 相邻道次成形时间间隔不到 3 s, 因此需要寻求一种精确、快速的管坯成形角测量方法。机器视觉测量作为一种无损检测技术, 具有非接触、实时和高可靠性等优点, 使得其在产品质量检测、尺寸测量等领域具有广泛的应用背景^[5]。本文作者在管坯 JCO 成形及弹复理论解析基础上, 应用机器视觉技术, 提出了如图 2 所示的管坯 JCO 精确弯曲成形工艺。

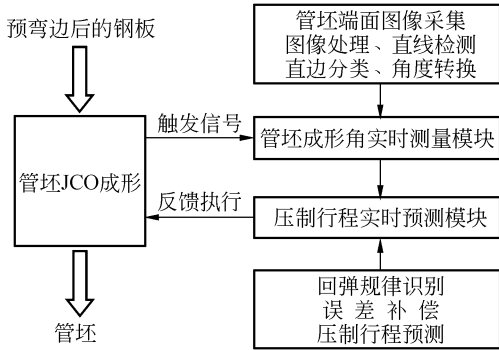


图 2 管坯 JCO 精确弯曲成形工艺

Fig. 2 Precise bending steel pipes with JCO forming

管坯 JCO 精确弯曲成形技术主要由管坯成形角实时测量模块和压制参数实时预测模块构成。测量模块采用面阵 CCD 作为传感元件, 实现管坯端面的图像采集, 将采集到的图像通过图像采集卡转换成数字信号传递到计算机中, 进行数字图像处理、直线检测及直边分类, 随后利用角度转换数学模型将图像角转换成管坯真实成形角。采用 PCI 1761 总线数据采集卡循环采集成形机发出的信号, 触发 CCD 进行图像采集。将测量模块获取的管坯成形角和根据压制行程计算出的弯曲角传递给压制行程预测模块, 实时识别出板坯的弹复规律, 根据弹复规律和管坯目标成形角预测精确的压制行程。在后续成形道次中, 利用误差补偿技术循环补偿上一道次的成形误差, 实时调整压制行程并反馈给成形机完成下一道次的弯曲成形。

板坯之间的性能差异对弯曲角的弹复值影响很大。利用线下试验获得的板材定量弹复规律所预测的压制行程参数难以保证弹复量的精确控制, 为此必须在线实时预测当前被加工板坯的定量弹复规律。本文作者提出了“两次预弯法”, 以精确识别板坯的定量弹复规律。即以 3 次弯曲完成首道次成形过程, 对前 2 次预弯得到的成形角和弯曲角数据进行线性拟合, 预测出第 3 次弯曲的弯曲角 α_i 和压制行程 h_i , 随后以压制行程 h_i 完成第 3 次弯曲成形过程, 再次测量管坯成形角, 最后将获得的 3 组数据进行最小二乘法拟合, 计算出优化的压制行程。随后以优化的压制行程参数完成剩余道次的弯曲成形, 实时测量管坯每道次成形角并计算与目标成形角的误差, 在下一道次中补偿上一道次的成形误差, 不断地优化压制行程, 直至完成所有成形道次。

3 角度转换数学模型

根据几何光学原理, 当面阵 CCD 光轴与被测量的管坯端面不垂直时, 图像中识别出的弯曲角与管坯真实成形角不相等。图 3 为采用面阵 CCD 测量管坯成形角的示意图, 管坯端面与 CCD 光轴呈一定的偏角, 因此需对管坯端面进行平面标定, 建立将图像角转换成管坯真实成形角的数学模型。

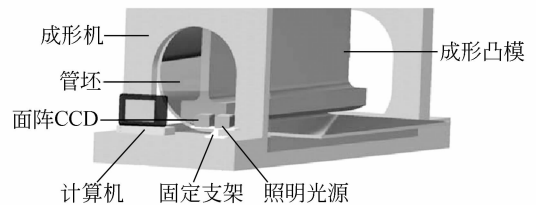


图 3 管坯成形角测量示意图

Fig. 3 Sketch map of measuring unbend angle

摄像机模型是光学成像几何关系的简化, 最简单的模型为针孔模型 (pin-hole model), 它是一种理想状态模型, 未考虑摄像机畸变, 简单实用而不失准确性^[6]。图 4 为管坯端面与 CCD 光轴具有一定偏角的摄像机模型, 约定 $o_c x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系, o_c 点为摄像机光心, (x, y) 表示以 mm 为单位的图像坐标系的坐标, (u, v) 表示以 pixel 为单位的图像坐标系的坐标, o 点为 CCD 光轴与

像面的交点,像面平行于 $x_c o_c y_c$ 平面,两平面之间的距离为摄像机的焦距 f 。

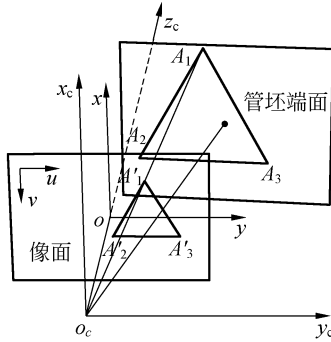


图4 管坯端面与 CCD 光轴具有一定偏角的成像模型
Fig.4 Camera model with small angle between the CCD axis and the end plane of unfinished pipe

用齐次坐标和矩阵描述像素在 uv 和 xoy 坐标系下的转换关系,为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

矩阵中 s_x, s_y 为像面上单位距离的像素数 (pixels/mm); (u_0, v_0) 为 CCD 光轴与图像平面的交点坐标。这些参数为摄像机内参数,目前已有多种内参数计算方法^[7]。

假设空间一点 A 在摄像机坐标系下的坐标为 (x_c, y_c, z_c) , 其投影点 A' 的坐标为 (x, y) , 其变换矩阵如下:

$$\mathbf{z}_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (5)$$

联立式(4)和式(5),得到点 A 的空间坐标与

$$\begin{aligned} \left(\frac{dm_2}{n_2+cf} - \frac{dm_1}{n_1+cf}\right)^2 + \left(\frac{dn_2}{n_2+cf} - \frac{dn_1}{n_1+cf}\right)^2 + \left(\frac{df}{n_2+cf} - \frac{df}{n_1+cf}\right)^2 &= L^2 \\ \left(\frac{dm_3}{n_3+cf} - \frac{dm_1}{n_1+cf}\right)^2 + \left(\frac{dn_3}{n_3+cf} - \frac{dn_1}{n_1+cf}\right)^2 + \left(\frac{df}{n_3+cf} - \frac{df}{n_1+cf}\right)^2 &= L^2 \\ \left(\frac{dm_3}{n_3+cf} - \frac{dm_2}{n_2+cf}\right)^2 + \left(\frac{dn_3}{n_3+cf} - \frac{dn_2}{n_2+cf}\right)^2 + \left(\frac{df}{n_3+cf} - \frac{df}{n_2+cf}\right)^2 &= L^2, \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $m_i = (u_i - u_0) / s_x, n_i = (v_i - v_0) / s_y$ 。

整理并简化方程(11)前两项,得参数 c 的一元四次方程,为

$$p_1 c^4 + p_2 c^3 + p_3 c^2 + p_4 c + p_5 = 0, \quad (12)$$

像素坐标之间的变换矩阵,为:

$$\mathbf{z}_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fs_x & 0 & u_0 \\ 0 & fs_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (6)$$

定义管坯端面在摄像机坐标系下的平面方程为:

$$\mathbf{LX}^T = d, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{L} = [a \ b \ c], \mathbf{X} = [x_c \ y_c \ z_c]$ 。

从图3中可以看出,管坯端面始终与成形机台面垂直。为简化标定过程,可将面阵 CCD 水平安装在成形机台面上,管坯端面与摄像机坐标系的轴平行,此时管坯端面与 CCD 光轴具有一定的偏角,可令 \mathbf{L} 矩阵中 $a=0, b=1$ 。

联立式(6)和式(7),得到如下三个方程

$$\begin{cases} z_c u = fs_x x_c + u_0 z_c \\ z_c v + fs_y y_c + v_0 z_c = d \\ y_c + cz_c = d \end{cases}, \quad (8)$$

解方程式(8)可得点 A 的空间坐标,为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{d(u - u_0)}{v - v_0 + cs_y f} \cdot \frac{s_y}{s_x} \\ y_c = \frac{d(v - v_0)}{v - v_0 + cs_y f} \\ z_c = \frac{ds_y f}{v - v_0 + cs_y f} \end{cases}, \quad (9)$$

假定在管坯端面上放置一个边长为 L 的正三角形标定板,通过图像处理和直线检测,可计算出三角形投影点 $A_i'(i=1, 2, 3)$ 坐标,利用式(9)求解出顶点 A 在摄像机坐标系下的空间坐标。根据正三角几何属性,有如下方程成立:

$$|A_1 A_2| = |A_1 A_3| = |A_2 A_3| = L, \quad (10)$$

联立式(9)和式(10),得:

其中, $p_j (j=1, 2, \dots, 5)$ 为方程的系数,仅包含摄像机内参数、镜头焦距以及像素坐标。

采用二分法编程求解方程(12),可得参数的一组解。求解 c 的过程中只用到了方程(12)中的

前两项,取方程后两项和第一、三项同样可以解出参数 c 的另外两组解,三组解中分别应有一个实根是相等的,该实根即为 c 值。取三个实根的平均值来减少标定误差,然后根据式(11)计算出值。求解出管坯端面在摄像机坐标系下的平面方程后,利用图像处理及直线检测算法,确定管坯直边在像面中的投影像素,根据式(9)计算管坯直边上各点的空间坐标,然后利用空间直线夹角计算方法求解管坯真实成形角。

采用正三角形标定方法求解摄像机外部参数,仅需单幅图片即可完成标定过程。该标定方法操作简单、快捷、标定精度高,克服了传统标定方法的标定过程繁琐,需高精度标定参照物的不足,适合现场使用。

4 实 验

4.1 管坯成形角测量精度

在试验和结果比较基础上,确定了适合管坯端面的图像处理算法和处理流程,并基于 VC 编程软件平台,开发了管坯端面图像处理程序,处理结果如图 5 所示,图(a)、(b)、(c)、(d)、(e)依次为管坯原始图像、线性变换增强后的图像、迭代法分割后的图像、小面积区域消除后的图像以及 Robert 算子边界识别图像。从边界识别效果来看,确定的图像处理算法和处理流程能够获得清晰、完整的管坯边界信息,保证了后续直线检测精度及角度识别精度。

测量管坯成形角首先要进行直线检测,常用的直线检测方法有 Hough 变换直线检测和最小二乘法直线拟合两种算法。Hough 变换直线检测具有较强的抗干扰能力,能很好地抑制噪声。但图像采集过程中,由于物镜存在像差,致使管坯



(a) 管坯端面原始图像

(a) Original image of steel pipe end plane



(b) 线性变换增强后的图像

(b) Image after linear enhancement



(c) 迭代法分割后的图像

(c) Image after cutting by iterative method



(d) 小面积区域消除后的图像

(d) Image after removing small area



(e) Robert 算子边界识别图像

(e) Image after boundary detection by Robert factor

图 5 管坯端面图像处理

Fig. 5 Image processing for steel pipe end plane

直边在像面上发生了不同程度的弯曲,此时用 Hough 变换检测直线就不能得到准确的结果^[8]。

最小二乘法^[9]是一种数学优化技术,它沿用平方逼近的数学思想,通过最小化误差的平方和,找到一组数据的最佳函数匹配,进而得到精确的直线参数。因此本文将 Hough 变换与最小二乘法相结合,对管坯直边进行检测,最后根据角度转换数学模型将图像角转换成管坯真实成形角。具体实现步骤如下:

(1)基于 Hough 变换直线检测原理及实现方法,粗识别出图像中 m 条模糊直线参量 $k_j, b_j, j=1, 2, \dots, m$;

(2)用 V_j 表示符合距离阈值 Δd 要求的第 j 条模糊直线附近的点集。计算图像中每个像素 P_i 到模糊直线的距离 d_{ij} ,若 $d_{ij} \leq \Delta d$,则点 $P_i \in V_j$,否则删除,剩余像素即为管坯直边在像面上的投影像素。

(3)根据式(9)计算投影像素的空间坐标,采用最小二乘法对归类后的 m 个点集进行直线拟合,得到精确的直线参量 k_j 和 b_j ;

(4)根据空间直线夹角计算方法求解管坯真实成形角。

在实验室完成摄像机内参数标定后,利用正三角形标定板对 AVT 公司 PIKE 系列 F-505B 型面阵 CCD 进行现场标定,标定板为边长 120 mm 的激光打印机打印的正三角形,标定过程如图 6 所示。

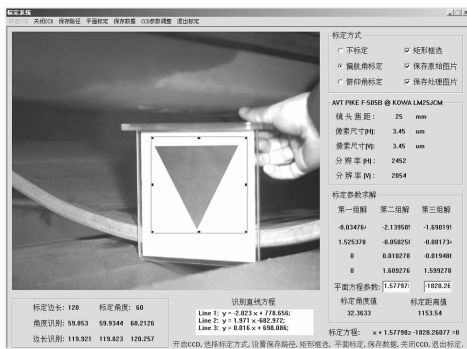


图 6 现场标定程序界面

Fig. 6 Program interface of CCD camera calibration

分别采用便携式三坐标测量机和角度测量模块测量管坯每道次成形角,表 1 列出了采用两种方法的部分管坯成形角的测量结果。实验结果表明,开发的角测量模块能够快速、高精度地测量出管坯成形角,测量精度达 0.2° ,测量时间少于 0.3 s 。

表 1 管坯成形角测量精度

Tab.1 Accuracy of measuring forming angles

编号	采用机器视觉 角度测量值/ $(^\circ)$	采用三坐标机 角度测量值/ $(^\circ)$	误差 / $(^\circ)$
1	166.18	166.06	0.12
2	166.21	166.18	0.03
3	166.08	165.99	0.09
4	166.15	165.99	0.16
5	166.32	166.17	0.15
6	166.24	166.09	0.15
7	166.87	166.72	0.15
8	166.42	166.3	0.12

4.2 管坯成形精度

图 7 为管坯 JCO 精确弯曲成形技术的工业应用现场,对规格为 $\phi 1067\text{ mm} \times 19.1\text{ mm}$ 的 X70 管坯进行精确弯曲成形,采用便携式三坐标测量机测量预焊后的管坯截面几何尺寸,如图 8 所示。表 2 和表 3 分别列出了采用精确弯曲成形技术和根据经验生产出的部分管坯的最大直径、最小直

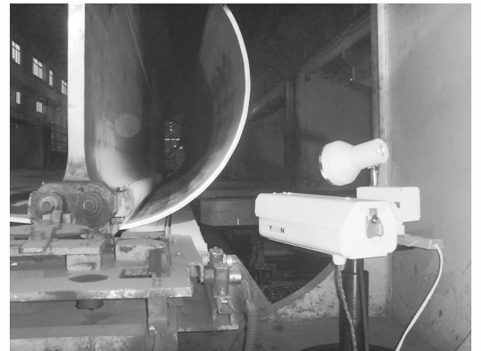


图 7 管坯 JCO 精确弯曲成形技术的工业应用

Fig. 7 Industrial application of precise bending unfinished pipe with JCO forming



图 8 采用便携式三坐标测量机测量管坯椭圆度

Fig. 8 Measuring ellipticity of welded pipes by flexible coordinate measuring machine

径和椭圆度。

管坯椭圆度计算公式如下：

$$\delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100\% , \quad (13)$$

式中, δ 为管坯椭圆度; D_{\max} 为管坯最大直径; D_{\min} 为管坯最小直径; D 为管坯公称直径。

表 2 采用精确弯曲技术成形的 X70 管坯的椭圆度

Tab. 2 Ellipticity of X70 welded pipes formed by precise bending technology

管坯编号	管坯最大直径	管坯最小直径	椭圆度
	/mm	/mm	/(%)
1	1 062.2	1 046.9	1.4
2	1 061.5	1 047.6	1.3
3	1 061.4	1 047.7	1.3
4	1 059.8	1 049.3	1.0
5	1 062.3	1 046.8	1.5
6	1 060.7	1 048.4	1.2
1 060.9	1 048.2	1.2	8
1 061	1 048.1	1.2	

表 3 根据经验成形的 X70 管坯的椭圆度

Tab. 3 Ellipticity of X70 welded pipes formed by operating experience

管坯编号	管坯最大直径	管坯最小直径	椭圆度
	(mm)	(mm)	(%)
1	1 068.7	1 040.3	2.7
2	1 070.4	1 038.6	3.0
3	1 067.3	1 041.7	2.4
4	1 069.0	1 040.0	2.7
5	1 067.8	1 041.3	2.5
6	1 069.9	1 039.1	2.9
7	1 064.4	1 044.7	1.8
8	1 071.7	1 037.3	3.2

表 2 中,采用精确弯曲成形技术的管坯最大椭圆度为 1.5%,最小椭圆度为 1.0%,平均椭圆度为 1.3%,低于技术要求的 3.0%的椭圆度。表 3 中,根据经验成形的管坯椭圆度分布不均,最大椭圆度为 3.2%,最小椭圆度为 1.8%,平均椭圆

度为 2.7%。虽然平均椭圆度低于技术要求的 3.0%,但是随着材料性能的波动,操作人员无法实时调整压制行程,出现了管坯椭圆度逐渐减小但突然变大的现象,也就是说当板料性能波动较大时,根据操作人员的经验,很难获得椭圆度较为一致的管坯。采用精确弯曲成形技术精确成形每一道次管坯成形角,并在下一道次中及时补偿上一道次成形误差,不断优化压制参数,尤其对于材料性能参数波动较大的板料,采用精确弯曲成形技术能够有效地减小成形管坯的椭圆度,可控制成形管坯的椭圆度在 1.5%以内。

5 结 论

为减小成形管坯的椭圆度,本文基于塑性弯曲工程理论和机器视觉测量技术,提出了管坯 JCO 精确弯曲成形工艺,可在板坯性能未知的情况下实现管坯的精确成形。提出了板坯定量弹复规律识别的首道次成形“两次预弯法”,并在 3 次弯曲完成首道次成形的同时,对弹复规律进一步修正,从而保证了后续压制行程的准确预测。提出了适合管坯端面的图像处理算法和处理流程,针对管坯 JCO 成形工艺特点,提出了最小二乘法和 Hough 变换相结合的直线检测原理。首先采用 Hough 变换粗识别直线,并设定距离阈值将粗识别直线附近的点集进行归类,剔除干扰点和噪声,然后利用最小二乘法对归类后的点集进行直线拟合,提高了直线检测精度。提出了适合现场使用的正三角形标定方法,由单幅图片快速、高精度地标定出摄像机的外部参数,克服了传统标定方法的标定过程繁琐,需高精度标定参照物的不足,可实现管坯成形角监测误差在 0.2° 以内。将精确弯曲技术应用到管坯 JCO 成形工艺中,结合道次间误差补偿技术,可控制成形管坯的椭圆度在 1.5%以内,显著地减小了成形管坯的椭圆度,改变了成形管坯的椭圆度控制依赖于操作者经验的现状。

参考文献:

[1] YANG Z Z, TIAN W, MA Q R, *et al.*. Mechanical properties of longitudinal submerged arc welded

steel pipes used for gas pipeline of offshore oil [J]. *Acta Metall, Sin.*, 2008, 21(2): 85-93.

[2] 杨秀琴. 关于我国钢管行业发展战略的思考(上) [J]. *钢管*, 2006, 35(1): 12-18.

- YANG X Q. Proposal for development of domestic steel tube-making industry (Part I) [J]. *Steel Pipe*, 2006,35(1):12-18. (in Chinese)
- [3] 郭宝峰. 管线钢管机械扩径工艺的数值模拟与实验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2001:109-110.
GUO B F. *Fem simulation and experimental study on mechanical expanding process of line-pipe*[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2001:109-110. (in Chinese)
- [4] 余同希,张亮焱. 塑性弯曲理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1992,45-86,181-187.
YU T X, ZHANG L C. *Plastic Bending Theory and Application* [M]. Beijing: Science Press, 1992,45-86,181-187. (in Chinese)
- [5] 伍济钢,宾鸿赞. 机器视觉的薄片零件尺寸检测系统[J]. *光学精密工程*, 2007,15(1):124-130.
WU J G, BIN H Z. Dimensional inspection system of thin sheet parts based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (1): 124-130. (in Chinese)
- [6] 马颂德,张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1997:52-53.
MA S D, ZHANG Z Y. *Computer Vision—Calculating Theory and Algorithms Foundation* [M]. Beijing: Science Press, 1997:52-53. (in Chinese)
- [7] 姜大志,郁倩,王冰洋,等. 计算机视觉中的设备标定和三维图形重构综述[J]. *计算机工程与应用*, 2001,13:53-55.
JIANG D Z, YU Q, WANG B Y, et al.. Overview of camera calibration and 3D reconstruction for computer vision [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2001,13:53-55. (in Chinese)
- [8] 周云燕,杨坤涛. 基于RHT-LSM直线检测方法的研究[J]. *光电工程*, 2007,34(1):55-58.
ZHOU Y Y, YANG K T. Method for line detection based on RHT-LSM[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007,34(1):55-58. (in Chinese)
- [9] 李红. 数值分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2003:53-82.
LI H. *Numerical Analysis* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2003: 53-82. (in Chinese)

作者简介:



李 建(1981—),男,江苏泗阳人,博士,工程师,2003年、2009年分别于燕山大学获得学士、博士学位,主要从事管线钢管成形工艺的研究。E-mail: lijian@ysu.edu.cn



马 瑞(1978—),男,河北沧州人,博士,副教授,2000年、2006年分别于燕山大学获得学士、博士学位,主要从事板材成形及其智能化控制技术的研究。E-mail: mar@ysu.edu.cn

导师简介:



赵 军(1957—),男,四川重庆人,教授,博士生导师,1981年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1985年于吉林工业大学获得硕士学位,1999年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事板材成形及其智能化控制技术的研究。E-mail: zhaojun@ysu.edu.cn