

文章编号: 1000-8241(2019)10-1165-05

# 基于机器视觉的管道通径内检测技术

李华<sup>1</sup> 刘阳<sup>2</sup> 孟祥鹏<sup>2</sup> 张文学<sup>3</sup> 金俞鑫<sup>2</sup>1. 中国石油管道科技研究中心·油气管道输送安全国家工程实验室;  
2. 中国石油管道公司; 3. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院

**摘要:** 管道通径内检测可以提前发现管道安全隐患,在确保管道安全运行方面发挥着重要作用。在机器视觉技术的基础上,将视觉测量技术中的 Radon 变换应用于激光光源投射成像方法中,提出了基于视觉的管道通径测量计算方法。该方法利用激光发生仪投射与管道内部形状完全吻合的激光环,由相机采集管壁上的光环图像,并将其进行边缘检测和细化处理,最终获得管道的截面轮廓曲线。通过 Radon 变换得到两条反映管道内径信息的光带,经细化处理提取光带中心线,进而根据中心线之间的距离计算得到管道在所有方向角上的内径数据。研究表明:该测量计算方法高效快捷,能够一次性获取管道截面在所有方向角上的内径信息,具有很高的实际应用价值。(图 7,参 21)

**关键词:** 管道; 内检测; 机器视觉; 图像处理; Radon 变换

中图分类号: TE973

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.10.014

## A pipeline internal diameter detection technology based on machine vision

LI hua<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, MENG Xiangpeng<sup>2</sup>, ZHANG Wenxue<sup>3</sup>, JIN Yuxin<sup>2</sup>

1. PetroChina Pipeline R &amp; D Center//National Engineering Laboratory for Pipeline Safety; 2. PetroChina Pipeline Company; 3. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)

**Abstract:** The pipeline internal diameter (ID) detection technology plays an important role in discovering pipeline hazards in advance and ensuring safe operation of pipelines. In this paper, a vision-based pipeline ID measurement and calculation method was developed by applying the Radon transform of vision measurement technology to the laser-source projection imaging method based on the machine vision technology. In this method, the laser transmitter is used to produce a ring which is completely in line with the internal shape of the pipeline. The image of the laser ring on the wall of the pipeline is collected by a camera and then transmitted to the computer for edge detection and refining treatment. And eventually, the cross section profile of the pipeline is obtained. What's more, two optical bands which reflect the information of pipeline ID are acquired by virtue of the Radon transform, and their center lines are extracted by means of refining treatment. And then, the pipeline ID data at all directional angles are calculated according to the distance between the center lines. It is indicated that this vision-based pipeline diameter measurement and calculation method is efficient and fast with high value of practical application, and it can obtain the information of pipeline ID at all directional angles at one time. (7 Figures, 21 References)

**Key words:** pipeline, internal detection, machine vision, image processing, Radon transform

目前,中国在役油气管道总里程已累计超过  $13 \times 10^4$  km,基本形成了连通海外、覆盖全国、横跨东西、纵贯南北的油气资源战略通道<sup>[1-2]</sup>。随着管道建设持续保持高速发展,管道检测等隐患排查工作日益重要。油气管道在服役过程中,受化学侵蚀、地质运动等因素的影响容易产生裂纹、变形等缺陷。为保证油气管道正常运行,需要定期对其进行变形检测,避免因

管道失效而导致的油气泄漏、火灾、环境污染等安全事故。通过管道检测和安全评估,可以有效减少事故发生率,避免不必要的管道维修和更换,从而获得较大的经济效益和社会效益<sup>[3-6]</sup>。

管道通径内检测大体可分为接触式内检测和非接触式内检测两种<sup>[7]</sup>。利用接触式内检测方法对管道进行长距离探测过程中,由于测量元件与管壁直接接触,

存在划伤管道内涂层的风险,且测量元件的磨损会造成一定误差,导致测量精度降低。非接触式内检测又称管道无损检测,主流的无损检测方法包括涡流检测、超声检测、漏磁检测等<sup>[8]</sup>。非接触式内检测方法所使用的传感器大多覆盖面小,需要沿周向布置多个传感器才能实现管道的全部覆盖,对于一些内径尺寸较大的管道,用于管道检测的传感器多达几十个<sup>[9]</sup>,整个检测设备比较笨重,在作业过程中会对管道造成很大的振动和冲击。

机器视觉技术在诸多领域得到了广泛应用<sup>[10-14]</sup>,结合机器视觉和数字图像处理技术对管道通径检测方法进行研究,将视觉测量技术中的 Radon 变换应用于管道通径内检测技术中,快速提取管道截面内径数据,并通过试验对该检测方法进行验证。

## 1 检测原理

### 1.1 系统组成

基于视觉的管道通径内检测系统(图1)主要由管道机器人、激光发生仪、CCD(Charge Coupled Device)像机组成。在实际作业过程中,检测系统以管道机器人作为移动平台沿管道运动<sup>[15-16]</sup>。激光发生仪发射的激光束沿垂直方向投射在管道内壁上,管道机器人搭载 CCD 相机以相同的微小时间间隔对管道上的激光环图案进行采集,获取一系列包含管径信息的图像。计算机对采集到的图像进行处理得到管道截面在各个方向角上的内径数据,根据这些数据就能对管道变形进行定量分析和评估。

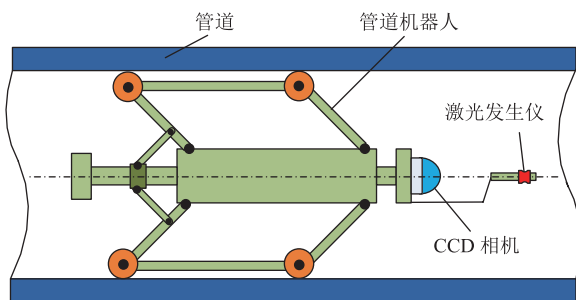


图1 基于视觉的管道通径内检测系统示意图

### 1.2 图像细化处理

灰度图像是每个像素只有一个采样颜色的图像,图像上每个像素点用一个灰度值表示该点的亮度,并以字节为单位进行存储,便于计算机寻址。相机拍摄得到的彩色图像通过灰度转换得到灰度图像  $G(x, y)$ ,

利用图像二值化方法进行边缘检测,将目标轮廓和背景图像分隔开,得到二值化图像  $f(x, y)$ 。

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, G(x, y) > T \\ 0, G(x, y) < T \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T$  为图像的全局阈值。

图像细化指二值图像的骨架化,通过一层层的剥离,从原图像轮廓边缘中去掉一些点,提取出形状和结构特征与原图形一致、宽度为一个像素的轮廓骨架。图像细化算法能提取图像特质,同时不会破坏图形的连通性。图像细化处理得到的轮廓骨架能够准确反映被测目标的边界轮廓和拓扑结构,方便图像的后续处理。

### 1.3 Radon 变换

Radon 变换作为积分几何学的重要基石,具有简单易实现、抗干扰能力强、几何解析性明显等优点,广泛应用于医学、地球物理、无损检测等领域<sup>[17-20]</sup>。Radon 变换定义为  $n$  维空间域在  $n-1$  维超平面上的积分,对  $n$  维模型函数  $f(x)$  在给定路径  $L$  上进行积分,若路径  $L$  满足:

$$L(x, \rho) = \{x | L(x, \rho) = 0\} \quad (2)$$

则广义 Radon 变换表示为:

$$R(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \delta[L(x, \rho)] dx \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为积分路径参数,  $\delta$  为狄雷克函数。

在二维空间中, Radon 变换是函数图像在一组平行线上沿指定方向上的积分,这些平行线的间隔为一个像素,图像  $f(x, y)$  沿任意指定角度  $\theta$  变换后的新坐标为  $(x', y')$ , Radon 变换表示为:

$$R_{\theta}(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy' \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (5)$$

Radon 变换实际是图像  $f(x, y)$  上每一点在直线上的积分,也可以通俗理解为将图像  $f(x, y)$  沿顺时针旋转  $\theta$  角度后在  $x$  轴上的投影。由任意角度 Radon 变换的几何关系(图2)可知,任意规则和不规则的圆形图像在给定角度上进行 Radon 变换后,得到的图像在投影坐标轴上的有效长度( $l_{OA}$  和  $l_{OB}$ ),即为该方向角上的内径尺寸。若以单位旋转角度为间隔,将 Radon 变换定义在  $[0, 179^\circ]$ ,则计算结果反映了整个图像在所有方向角上的内径信息,根据这一原理可以快捷的对圆图像任意方向角上的内径进行计算。

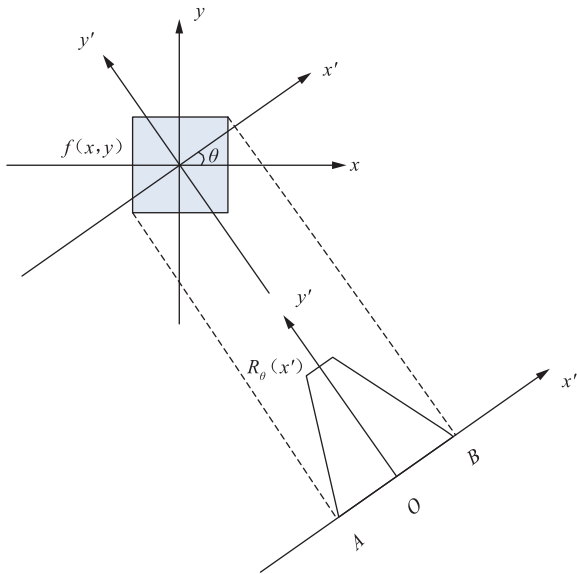


图2 任意角度 Radon 变换的几何关系图

## 2 检测试验

试验采取对一段内径为 120 mm 的管道进行内径测量(图 3),测量前首先根据式(6)采用圆识别法对测量系统进行标定,确定测量系统在当前拍摄环境下图像像素点对应物体的实际物理尺寸。标定的具体过程为:选取一个已知尺寸的标准圆形模板,将其放置于摄像机同一水平轴线上,保证相机和标定板二者距离与实际测量系统中相机和激光发生仪的距离相等,实验测得自标定系数  $K$  为 0.58 mm/pixel。

$$K = \frac{R}{G} \quad (6)$$

式中: $R$  为标定板直径的实际尺寸, mm;  $G$  为图像上标定板直径的像素, pixel。

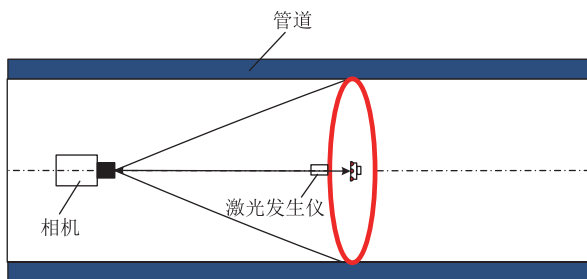


图3 管道内径测量系统示意图

激光发生仪投射出的环形激光束垂直照射在管壁上,形成的圆环形图案与管道形状完全吻合,能够显示出管道内壁截面形状。若管道内壁光滑,则环形光环规则;若管道内壁存在凹坑、椭圆变形等缺陷,则环形

光环呈现不规则的图案。因此,通过采集管壁上激光发生仪投射的光环图案(图 4),就能得到管道在该截面上的形状和尺寸信息。

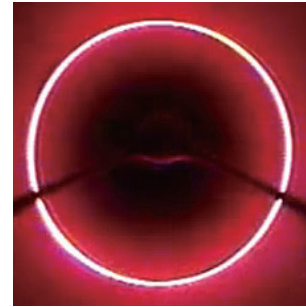


图4 相机采集的管壁上激光发生仪投射的光环图案

将相机采集的图像传输到计算机中进行后处理,通过分析管壁上激光环的图像亮度分布(图 5)可知,图像亮度分布规律明显,管壁上激光环的亮度最高,且图像亮度极值基本相同,光带宽度也比较均匀,体现出激光束很好的会聚性。图像上被测目标与环境具有明显的对比度,能够避免图像受到局部噪声的影响<sup>[21]</sup>。

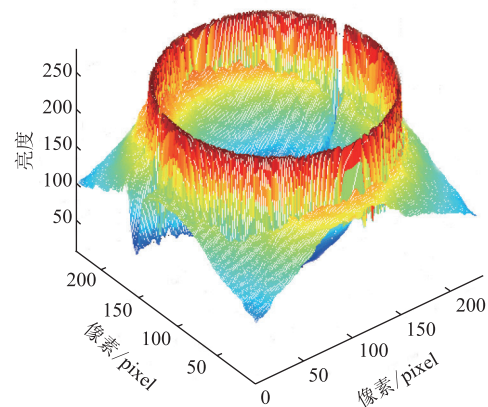


图5 管壁上激光环的图像亮度分布图

相机采集的彩色图像通过灰度转换,对图像进行阈值分割得到二值化图像(图 6a)。通过阈值分割能有效去除环境噪声,同时将管道上的激光环图案与环境分隔开,方便图像信息的提取和后处理。将二值化图像进一步细化处理,提取激光环骨架,最终得到管道轮廓曲线(图 6b)。

对细化后的管道轮廓曲线进行 Radon 变换,以  $1^\circ$  为间隔,得到图像经 Radon 变换后的计算结果(图 7)。Radon 变换后图像的轮廓边界即为管道在所有方向角上的内径尺寸,图像上管道平均内径的像素为 205 pixel,最大直径的像素为 207 pixel,最小直径的像素为 202 pixel。根据标定系数  $K$  可以计算得到管道在该截面的平均直径为 118.90 mm,最大直径为 120.06 mm,最小直径

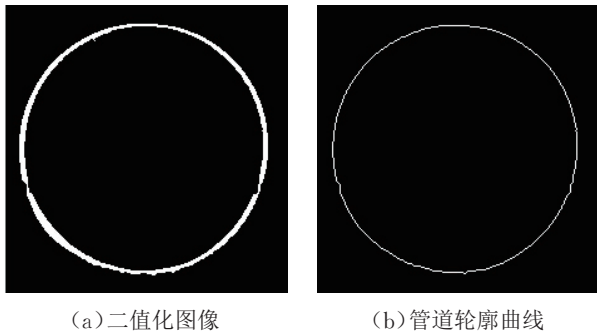


图6 经灰度转换处理的管道轮廓图像

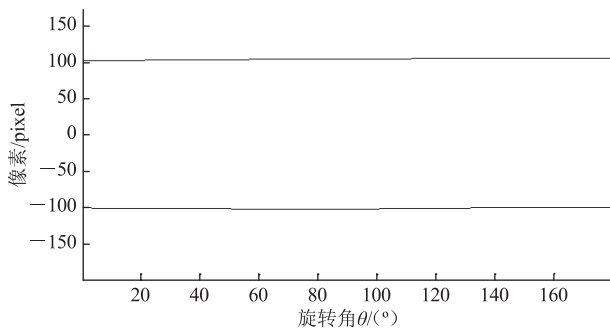


图7 细化提取边界线后管道在不同方向角上的内径图

为 117.16 mm。由实验测量结果可知,通过视觉技术和 Radon 变换测量得到的管道数据与实际管道尺寸基本一致,显示出较高的测量精度。

### 3 结论

(1) 基于视觉的管道通径内检测技术中,对经过图像预处理后的圆形管道轮廓曲线进行 Radon 变换可以精确求解图像在任意方向角上的内径尺寸, Radon 变换在求解图像截面尺寸方面具有重要价值和前景。

(2) 管道变形检测和内径尺寸准确量化是管道完整性领域中长期存在的一个难点,基于视觉的管道通径内检测技术能够比较准确的对管道进行测量,整个测量过程仅需获取管壁上的激光环图像,就能还原得到管道截面上的内径尺寸,测量过程简单易行,且测量结果具有较高精度,为后续管道的三维重构和完整性评估奠定了基础。

#### 参考文献:

[1] 高鹏,王培鸿,杨耀辉,等. 2015年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济,2016,24(3):60-65.  
GAO P, WANG P H, YANG Y H, et al. China's oil and gas

pipeline construction in 2015[J]. International Petroleum Economics, 2016, 24(3): 60-65.

[2] 祝恣智,段沛夏,王红菊,等. 全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2015, 34(12): 1262-1266.  
ZHU Q Z, DUAN P X, WANG H J, et al. Current situations and future development of oil and gas pipelines in the world[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(12): 1262-1266.

[3] 卢泓方,吴晓南,ISELEY T,等. 国外天然气管道检测技术现状及启示[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 103-111.  
LU H F, WU X N, ISELEY T, et al. The status quo of natural gas line pipe inspection technologies abroad and its implications for China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 103-111.

[4] 丁超,唐东林,王斌,等. 油管横向缺陷动态检测装置设计及研究[J]. 石油机械, 2018, 46(3): 110-115.  
DING C, TANG D L, WANG B, et al. Dynamic detection device for transverse defects of tubing[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(3): 110-115.

[5] 明瑞卿,贺会群,唐纯静,等. 连续管检测监控技术[J]. 特种油气藏, 2017, 24(3): 164-169.  
MING R Q, HE H Q, TANG C J, et al. Detection and supervision techniques of coiled tubing[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(3): 164-169.

[6] 陈金忠,段礼祥,马义来,等. 基于巴克豪森效应的管道应力内检测数值计算[J]. 石油机械, 2018, 46(8): 113-117.  
CHEN J Z, DUAN L X, MA Y L, et al. Numerical calculation of in-line stress measurement of pipeline based on Barkhausen effect[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(8): 113-117.

[7] 代莉莎,张仕民,朱霄霄,等. 油气管道通径检测器技术研究进展[J]. 油气储运, 2012, 31(11): 808-813.  
DAI L S, ZHANG S M, ZHU X X, et al. Research progress of path detector technology for oil and gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(11): 808-813.

[8] 李成凯,孙永兴,李晓菲,等. 在线管道缺陷常用检测方法分析[J]. 管道技术与设备, 2009(6): 24-26.  
LI C K, SUN Y X, LI X F, et al. Analysis of commonly used detection approaches about defects in inspection of on-line pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2009(6): 24-26.

[9] 王文明,王晓华,张仕民,等. 长输管道超声波内检测技术现状[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 5-9.  
WANG W M, WANG X H, ZHANG S M, et al. Long-distance pipeline ultrasonic internal inspection - state of the art[J]. Oil &

- Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1): 5-9.
- [10] 张鹏贤, 韦志成, 刘志辉. 管道焊口间隙量与错边量的激光视觉检测[J]. 焊接学报, 2018, 39(11): 103-107.  
ZHANG P X, WEI Z C, LIU Z H. Laser visual detection of pipeline weld gap and misalignment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(11): 103-107
- [11] 刘洋. 基于激光影像的管道几何形变检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018: 20-28.  
LIU Y. Research on pipeline geometric deformation detection technology based on laser image[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018: 20-28.
- [12] 李忠虎, 张琳, 闫俊红. 管道腐蚀视觉测量图像边缘检测算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1788-1795.  
LI Z H, ZHANG L, YAN J H. Research on image edge detection algorithm for pipeline corrosion visual measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1788-1795.
- [13] KAWASUE K, KOMATSU T. Shape measurement of a sewer pipe using a mobile robot with computer vision[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10: 1-7.
- [14] STANIĆN, LEPOT M, CATIEAU M, et al. A technology for sewer pipe inspection (part I): Design, calibrations, corrections and potential application of a laser profiler[J]. Automation in Construction, 2017, 75: 91-107.
- [15] 韩雪. 基于机器视觉的小型管道机器人研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2017: 15-25.  
HAN X. Research on small pipeline robot based on machine vision[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017: 15-25.
- [16] 曾树杰, 龙斌, 唐德渝, 等. 基于视觉的管道内焊缝检测机器人研究[J]. 焊接技术, 2016, 45(10): 55-59.  
ZENG S J, LONG B, TANG D Y, et al. Research on vision-based inspection robot for pipeline internal weld[J]. Welding Technology, 2016, 45(10): 55-59.
- [17] 郭延杰, 白福忠, 张铁英. 基于 Radon 变换与灰度重心法的环形目标直径测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 209-213.  
GUO Y J, BAI F Z, ZHANG T Y. Ring object diameter measuring method based on Radon transform and gray gravity algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 209-213.
- [18] 李茂宽, 关键. 基于共形几何代数与 Radon 变换的圆检测方法[J]. 光电工程, 2010, 37(4): 72-76.  
LI M K, GUAN J. Circle detection algorithm based on conformal geometric algebra and Radon transform[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(4): 72-76.
- [19] 王璟, 李政. 离散 Radon 变换卷积分配性及在从投影直接提取 CT 图像边缘的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(4): 359-362.  
WANG J, LI Z. Detecting image edge from projections using Radon transform properties[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(4): 359-362.
- [20] 邱新明, 汪超, 苑益军, 等. Radon 变换及其在地震矢量数据处理中的应用研究现状[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 905-914.  
QIU Xinming, WANG Chao, YUAN Yijun, et al. Research status of the application of Radon transform in seismic vector field processing[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 905-914.
- [21] 张国际, 陈强, 孙权森, 等. 遥感图像光照一致性定量评价[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(11): 3494-3497.  
ZHANG G J, CHEN Q, SUN Q S, et al. Quantitative assessment for illumination homogeneity of remote-sensing images[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(11): 3494-3497.

(收稿日期: 2017-03-14; 修回日期: 2019-04-10; 编辑: 张雪琴)

**基金项目:** 中石油管道有限责任公司科技项目“管道防腐补口材料及施工适用性研究”, GDGS-2018-JS-505; 中石油管道有限责任公司科技项目“管道自动焊施工规范化研究”, GDGS-2018-JS-503。

**作者简介:** 李华, 男, 1983 年生, 工程师, 2009 年硕士毕业于河北工业大学机械电子工程专业, 现主要从事油气管道设备自动化相关技术的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道 51 号, 065000。电话: 19933617583。Email: 27419521@qq.com