

文章编号: 100123806(2008)022180204

道内壁截面轮廓提取方法的研究

吴恩启, 杜宝江, 张辉辉

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了研究细管道内表面检测技术, 在分析细管道内壁成像特点的基础上, 提出了一种内截面轮廓提取方法。首先根据投射在管道内壁光环的几何特征, 提取出有效的图像区域。以图像中心为原点按一定的角度向光环做射线, 把图像均匀分成若干扇形, 再分别沿着每一射线径向搜索出灰度值最大处作为内轮廓截面上的一点。根据提取出的截面上点的坐标, 可以计算轮廓上任一点的半径。该方法的检测精度达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。实验结果表明, 利用该技术, 能够实现小管道内壁的检测。

关键词: 激光技术; 图像处理; 细管道; 内壁; 缺陷检测

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Study on the extraction method of small pipes inner surface

WU Enqi, DU Baojiang, ZHANG Huihui

(College of Mechanical Engineering University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract To study the inspection technology of small pipes inner surface, a method for extracting inner surface section was proposed based on the inner surface image analysis. Firstly, the effective image zone was extracted in terms of geometry characteristic of the light ring. Then, the radius of each point on the inner surface was achieved taking the image point which has maximum gray value along the ring radial direction as the section point. The corresponding inner section was inspected based on the method. Experiments show that the measurement accuracy of the inspection method is $\pm 0.1\text{mm}$. So the inner surface of small pipes can be inspected with this method.

Key words: laser technique; image processing; small pipes; inner surface; defect inspection

引 言

细管道广泛应用于石油化工、能源电力、航空航天、冶金、军事、核工业等各个领域。它不但能够运输石油、水、天然气、水蒸气等液体和气体, 而且可以利用有压气体或液体作为载体传送固体散料。因此, 管道系统经常被工程界比喻成工厂的血脉, 不论该厂的最终产品是电力还是煤气, 是钢材还是化学品, 管道系统都是必不可少的一部分^[1]。

由于电荷耦合器件 CCD 具有灵敏度高、光谱响应范围大、体积小、像元尺寸的位置精度高等优点, 所以它在光电检测技术上占据着极其重要的位置。目前, 以 CCD 为元器件开发的测量仪器设备, 已经广泛应用于大管道内壁检测。DURAN 等人^[2]以 CCD 摄像头为采集元件, 采用数字图像处理技术实现了内径 260mm ~ 1000mm 排水管道的缺陷检测, 通过分析管道图像

的灰度分布异常情况来判定是否存在缺陷, 其精度为 2mm。ZHANG 等人^[3]通过图像处理技术实现了 70mm ~ 160mm 内径管道的缺陷检测, 检测精度达到 0.1mm。随着微机械加工和光电技术的发展, CCD 的外形尺寸进一步微型化, 因此也可以实现对细管道的检测。SUN 等^[4]研制出了适于 20mm 内径的管道机器人, 但对检测原理及检测精度没有做深入研究。CHENG 等^[5]研制的视频检测器同样适于 20mm 左右的管道, 其目的只是为了将管道内部图像传到管道外面, 便于操作人员观察。检测技术的发展为 10mm 细管道的检测奠定了基础^[6,7]。

以 CCD 为检测器件, 开发了一套适于 10mm 内径细管道内壁的形貌检测器^[8]。该系统主要由光环投射装置和 CCD 内窥摄像机两部分组成, 其中光环投射装置又包括半导体激光器 LD、会聚透镜、锥形反射镜和透明窗等元件。LD 发出的激光经会聚透镜会聚后, 由锥形反射镜反射到管道内壁上形成一个亮的光环, 该光环被 CCD 内窥摄像机接收, 在 CCD 成像面上得到一个环形图像。该图像包含着对应管道内壁截面处的形状、尺寸及缺陷等信息。在分析细管道内壁光学

作者简介: 吴恩启 (1972), 男, 博士, 讲师, 主要从事无损检测、数据处理的研究。

E-mail: weqsd@163.com

收稿日期: 2007201205; 收到修改稿日期: 2007204203

成像特点的基础了,提出了一种管道内轮廓提取方法,实现了管道内壁缺陷的检测。

1 管道内壁图像光强分布特点分析

1.1 管道内壁图像采集系统成像光路分析

基于 CCD 标定技术的形貌检测器的光路如图 1 所示。激光光源在透镜的作用下,把光会聚到锥形反

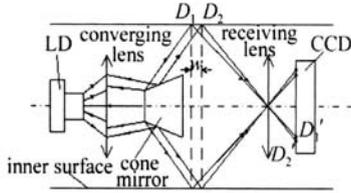


Fig 1 Optical path of detector

射镜表面。呈现出汇聚状态的光束在锥形反射镜表面进行反射,此时从锥形反射镜反射出的光束变为中空

的锥形光环,光环在管道内表面具有一定的宽度,设其宽度为 w 。通过调节激光光源、会聚透镜和锥形反射镜之间的位置可以改变光环的在管道内壁上的宽度,实际宽度调节范围是 $0.1\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ 。具有一定宽度的中空的光环在管道内壁产生反射现象。若管道内壁有异常情况,则在该处反射出的光能会出现异常。故管道内壁反射光环的光能分布规律间接地反映了管道内壁的形貌特征。当反射出的光环被二维光敏传感器 CCD 接收时,就得到反映管道内壁某一截面信息的图像,确切的说

1.2 管道内壁图像光强分布规律分析

设点 D_1 和点 D_2 是投射光环的两个极限位置,反射区域在 D_1, D_2 点之间。反射光线被 CCD 摄像机接收,两个极限点对应的像点分别为 D_1' 和点 D_2' 。管道截面图像的光强分布规律是由反射区域的表面特性和反射光共同决定的,所以,必须分析激光光束在管道内壁反射区域内发生的光强分布变化。

细管道内表面检测系统采用的是激光光源。细管道的内表面与激光光波相比都是极其粗糙的。因此,可认为管道内壁的反射表面会产生大量互相独立、随机的散射子波。则管道内表面的反射光场是由大量散射点引起的不同相位子波叠加的结果。可以对管道内壁的反射表面建立如下统计模型:反射表面是由大量互相独立的散射点组成;各反射点处反射子波相互独立,其振幅和相位也独立。所有反射波的相位分布在区间 $[0, 2\pi]$ 上^[9]。

依据这一统计模型,管道内壁反射光束得到的叠加光场振幅服从高斯统计分布规律,强度服从负指数统计规律,其反射光束的光强分布如图 2 所示,其光强的空间分布符合以光束中心光强最强,向外逐渐衰减

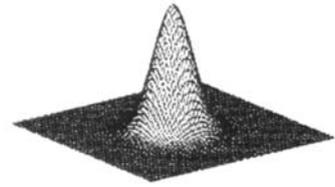


Fig 2 Gaussian light intensity distribution

的高斯分布。沿管道轴线方向对管道剖切,具有一定宽度的反射区域的光强分布规律如图 3 所示,沿反射方向有最大峰值。

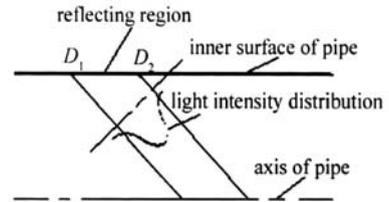


Fig 3 Intensity distribution of light ring on pipe inner surface

在管道内壁 360° 圆周内,反射区域组成一个空间立体微元 "AB",由反射区域反射出的光束表现为空间立体锥形。通过以上分析可得出以下结论,CCD 摄像机像平面上某一处的图样,是管道表面上某个区域内大量反射子波贡献的结果。故反射光场中包含管道内壁表面点信息,当管道内表面发生变化时,如变形、凹坑、凸起等,则管道内壁截面图像也会发生对应的变化。如图 4 所示,该图是管道内壁出现异常时拍摄得到的图像,小圆指示的部位是管道异常区域。

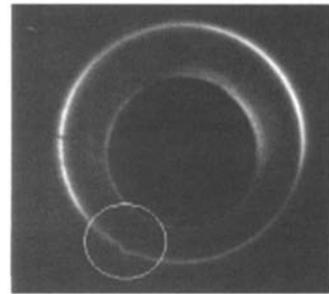


Fig 4 Defect on the pipe inner surface

依据以上分析,由管道内壁表面的空间微元 "AB" 反射出的光束为一个空间锥形光环,在轴线截面上沿光环的反射的方向会出现光强最大分布。这个特性必定会反映在最后的管道内壁图像中;管道内壁的异常情况也会反映在图像中。

2 基于管道内壁图像光强分布特性的内轮廓提取方法

由于管道内壁图像的光强分布具有固定的高斯分布特性。光环中沿直径向方向有光强最大点,可以沿光环的圆周向方向找到光强最大点,这些点反映了管道内壁立体微元内轮廓的形貌特征。

根据光环区域提取管道内轮廓的关键是要保证轮廓提取的一致性。也就是说,要保证管道轮廓的位置与光环发生器具有一致的对应关系。只要光环发生器结构尺寸不发生变化,光强的分布规律和最大光强点不会发生变化。所以能够保证提取轮廓的一致性,这种一致性保证了将二维图像数据转换成三维空间数据的准确性。

管道内壁立体微元内轮廓提取的步骤如下。

(1)依据光环的圆环几何特征,划分信息有效区域。如图 5 所示, u, v 为图像坐标系。两个圆环之间

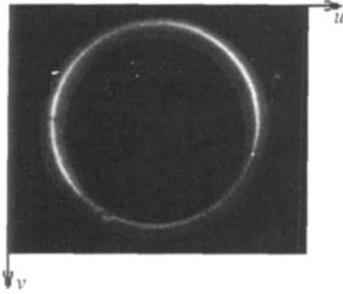


Fig 5 Partition of effective area

的区域为信息有效区域。当在信息有效区域内搜索光强最大点时,可减少搜索光强最大点所耗费的时间。划分工作必须保证管道内壁信息在有效区内。

(2)以图像中心 P_0 开始做一条平行于 u 方向的直线 P_0Q_0 , 即图 6 水平方向。沿 P_0Q_0 方向并在有效

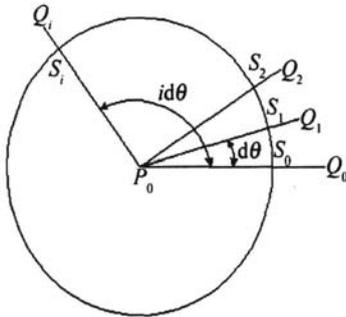


Fig 6 Angle search

区域内搜索光强最大值点,也就是图像中的灰度最大值点。设找到的灰度最大值点为 S_0 ,同时记录该点在图像坐标系下的坐标值。

(3)利用角度搜索法逆时针方向(也可用顺时针方向)搜索其它最大灰度值点。以 P_0Q_0 线为基准,以 P_0 为原点,在光环上建立角度关系。作直线 P_0Q_i ,使其和 P_0Q_0 的夹角为 $(i = 1b, 2b, 3b, \dots, 360b)$,如图 6 所示。然后分别沿 P_0Q_i 搜索各角度方向上的最大灰度值点 S_i 。 d_i 是按照如下方法确定的:设本形貌检测器的最高检测精度为 δ ,检测管道内径为 $2R$,则 $d_i < 360b\delta / 2PR$ 。

对于最大灰度值点的搜索处理,当在图像的某点或者某一方向上搜索时,可能会出现最大灰度值相同

且连续的情况,此时要依据光强的高斯分布规律加以取舍。假设在光环区域内的某两个角度方向上几个像素点的灰度值见表 1。

Table 1 Gray scale distribution of some angle direction

a	210	220	223	223	223	195	Direction A
b	210	223	223	223	223	195	Direction B

对于表 1a 的情况,存在连续 3 个最大灰度值,取第 4 个像素点的坐标值作为最大灰度值点的坐标;对于表 1b 的情况,存在连续 4 个最大灰度值,取第 3 与第 4 两个像素点的坐标平均值作为最大灰度值点的坐标。

经过以上内轮廓提取处理过程,得到二维图像坐标系下的一系列点。这些点构成的几何形状反映了内轮廓的形貌特点。图 4 的光环图像的轮廓提取结果见图 7。

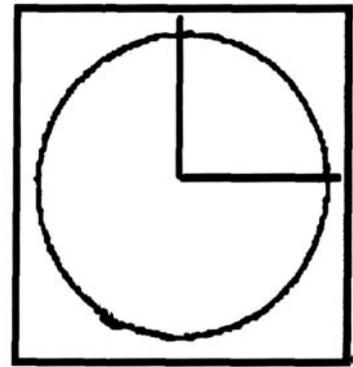


Fig 7 Result of inner surface extraction

3 细管道内壁缺陷检测

对细管道内壁的缺陷检测,依据提取的内轮廓的特点,设计缺陷检测方法。它不仅能判断是否存在缺陷,而且能从具体数据中去分析缺陷,即实现定量检测。提取的内轮廓是一系列的坐标点,这些点构成曲线,称之为内轮廓曲线。内轮廓曲线实际上是检测光环在管道内表面构成的管道内壁立体微元在图形中上的反映,故内轮廓曲线是二次曲线。依据这一特性,设计管道内壁缺陷检测方法,其具体流程如图 8 所示。

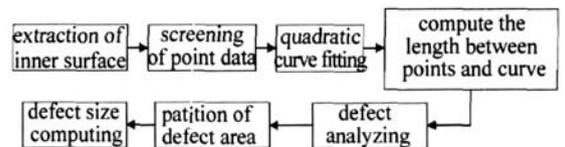


Fig 8 Inspection process of small pipe inner surface

内轮廓点的筛选处理是为了保证拟合二次曲线轮廓的有效性,即要保证拟合二次曲线轮廓能作为衡量的基准。点筛选处理要剔除已提取内轮廓点中的缺陷点。如果用缺陷点来拟合二次曲线轮廓,则二次曲线轮廓将失效。所以点筛选处理同时也实现了定性缺陷

分析的检测目标。

拟合二次曲线处理不但提高了检测精度而且消除了数字图像的量化引起的误差。拟合二次曲线处理采用了亚像素处理技术,将 1 个像素细分成 4 个亚像素。经实验验证,采用亚像素处理后,检测精度从 0.3mm 提高到 0.1mm,如果将像素细分成 10 个亚像素,精度没有明显提高,但是数据处理速度大大降低。

设任意提取内轮廓点到基准轮廓的距离是 D_c ,称之为计算距离。通过分析所有提取内轮廓点到基准轮廓(拟合二次曲线轮廓)的距离分布情况,可以实现缺陷定量分析。因此对管道内壁的缺陷分析转化为计算距离分析。设定一个距离常数 D_r ,当 $D_c > D_r$ 时,进行缺陷定量分析;当 $D_c \leq D_r$ 时认为不存在缺陷。对距离常数 D_r 的设定,通过计算距离的统计规律来确定。

对图 4 所示的一个管道内壁截面光环图像进行缺陷分析,其结果如图 9 所示。从图左边的分析可以看

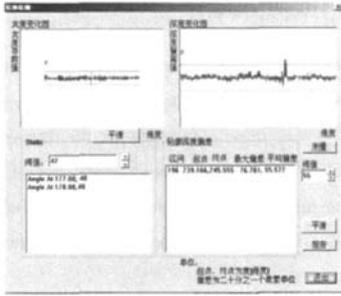


Fig 9 Interface of defect analysis

出,在 177.00b 处,突然变暗,而在 178.00b 处又变亮,回到一般值。也就是说,在 177.0b~178.00b 之间,管道上有暗斑,而实际上这是激光器电源线通过的地方。图右边表示有一个突变区间在 239.135b~245.555b 之间,半径值大于管道半径,故为凹陷缺陷。其缺陷所占角度为 5.845b 管道的内径为 10mm,则缺陷的宽度为 0.510mm,在管道上,这部分刻有宽为 0.5mm 的凹槽。

为了确定该检测方法的测量精度,特在 10mm 的管孔内贴一直径为 0.31mm 的细丝,利用检测装置在管孔内不同的位置进行测量,然后进行数据处理,其结果如图 10 所示。实验表明,该处理方法对 10mm 孔径的最大正误差和负误差分别为 0.052mm 和 -0.455mm;对 0.31mm 直径细丝的宽度测量的最大正误差和负误差分别为 0.062mm 和 -0.049mm,高度测量的最大正误差和负误差分别为 0.019mm 和 -0.083mm,其检测精度在 ±0.1mm 之内。能够满足一般工业细管道检测的需要。

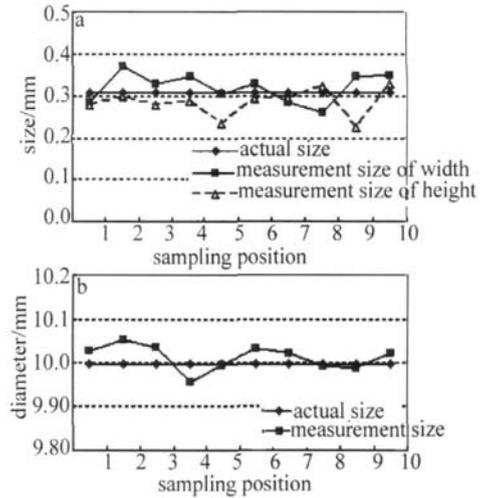


Fig 10 Comparison of measurement results and actual size
a) measurement of 0.31mm defect b) measurement of inner diameter

4 结论

根据基于 CCD 的细管道形貌检测器的成像特点,对管道截面光环进行了光强分布分析,按照角度搜索法获得光环截面的像点。并利用亚像素处理技术对数据进行拟合,提高了检测精度。实验证明,这种轮廓提取方法对管道内表面的检测精度达到 ±0.1mm。

参考文献

- [1] CHEN H X Material transport in pipe and application [M]. Beijing China Chemical Industry Press 2003: 125 (in Chinese).
- [2] DURANO, ALTHOEFER K, SENEVIRATNE L D Automated sewer pipe inspection through image processing [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation Washington: IEEE, 2002: 255122556
- [3] ZHANG W W, ZHUANG B H. Noncontact laser inspection for the inner wall surface of a pipe [J]. Measurement Science and Technology 1998, 9(9): 138021387
- [4] SUN L Zh, LU L H, QN X J Micro in2pipe robot for detection of cracks in pipe wall [J]. Optics and Precision Engineering 2003, 11(1): 11216 (in Chinese).
- [5] CHENG W M, LIG D. In2pipe video detector for small pipes [J]. Optics and Precision Engineering 2001, 9(6): 5192522 (in Chinese).
- [6] ZHAO P T, LIG H, PENG H D, et al New design of optical activity measurement system [J]. Laser Technology 2005, 29(5): 5042506 (in Chinese).
- [7] LN L B, GAO X H, XIA J J et al Research of a novel 32D laser scanning system [J]. Laser Technology 2005, 29(4): 3662369 (in Chinese).
- [8] WU E Q, LI J X, KE Y L 32D measurement of small diameter pipe inner wall [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics 2005, 17(1): 1512154 (in Chinese).
- [9] WU X H. Study on the inner surface 32D measurement technique of curved pipe and deep hole based on image [D]. Hangzhou Zhejiang University, 2004 40247 (in Chinese).