

文章编号: 1001-3806(2016)05-0648-06

微细孔壁缺陷检测的非对中补偿

魏东梁, 吴斌*

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了满足小型化、微型化的微细管道管内测量需求, 采用外部光源导入、内部图像导出的新思路, 突破管道内壁检测方法中传感器内置的传统模式, 解决了微细管道内部空间狭小的难题。在实验室前期研究工作的基础上, 完善了系统测量方案, 并针对检测系统的关键难题, 即视像管与待测管轴线对中问题进行了深入研究, 分析了该问题对系统测量结果的影响, 建立合适的数学模型, 提出了基于图像畸变矫正技术的补偿方案, 以提高系统的测量精度。结果表明, 搭建测量系统, 对直径 12mm 的微细管道内壁上直径为 0.6mm, 0.8mm 及 1.0mm 的微孔模拟缺陷进行了重复性测量, 应用补偿方案后的测量结果均值误差小于 0.02mm, 标准差不超过 0.03mm。所提出的图像畸变矫正方案能够解决视像管非对中造成的影响, 满足微细管道内壁缺陷高精度测量的要求。

关键词: 图像处理; 视觉检测; 畸变矫正; 微细孔壁**中图分类号:** TP391.4; TH878**文献标志码:** A**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.007

Alignment error compensation for defect measuring system of small bores

WEI Dongliang, WU Bin

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to satisfy the requirement of miniaturization in measuring defects inside small bores, a new approach was proposed with external light importing and internal images exporting. This method solved the problem of the limited dimensional accessibility of small bores. Compared with the traditional measuring methods, the new method made the breakthrough and the method was without built-in sensors. The key problem of alignment error that had a great influence on measurement results was studied deeply and the measuring system was improved. The reasonable alignment error compensation method based on image correction was presented and a measuring system was built. Several tests were conducted on sample pipe with diameter of 12mm. The simulated point defects with diameter of 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm were set on the internal surface of sample pipe. The results showed that after image correction on the unfolding image, the mean deviation of the defect diameter was less than 0.02mm, and the standard deviation was less than 0.03mm. The alignment error compensation method is reliable and able to improve the precision of measurement.

Key words: image processing; visual inspection; distortion correction; small bore

引言

随着现代科技的发展, 微细管道越来越广泛地应用在石油化工、航空航天、汽车等领域中^[1-3], 如材料输送管道、热交换器、发动机的缸体、缸盖及变速箱等。由于某些微细管道作用的特殊性, 需要在设备安装前或工作一段时间后对其进行无损检测, 以便及早发现其内部的凹坑、裂纹或划痕等缺陷, 防止设备性能的降低或安全事故的发生^[4-6]。目前针对直径 10mm 左右

或更小的微细管道内表面的检测方法主要有工业内窥镜和微型管道机器人检测方案。但是工业内窥镜^[7-9]只能定性检测内壁缺陷是否存在, 无法得到缺陷的尺寸和位置, 且需要人工操作、效率低。微型管道机器人^[10-13]虽可进入微细管道进行自动检测, 但其定位精度低、行进速度慢、易受工作空间狭小的限制, 系统的测量精度和测量效率难以保证。

为了解决传统测量方案的不足, 满足小型化、微型化的微细管道管内测量需求, HONG^[14] 和 WU^[15-16] 等人突破管道内壁检测方法中传感器内置的传统模式, 提出外部光源导入、内部图像导出的新思路, 解决了微细管道内部空间狭小难测量的难题。本文中在其研究基础上, 搭建了测量系统, 深入分析影响系统测量精度的关键因素, 并提出合适的解决方案, 最终实现了 8mm ~ 15mm 直径的微细管道管内形貌及尺寸大于

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172120); 天津市自然科学基金资助项目(13JCZDJC34800)

作者简介: 魏东梁(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事工业视觉检测及图像处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wubin@tju.edu.cn

收稿日期: 2015-07-06; 收到修改稿日期: 2015-07-17

500 μm 的微小凹坑等缺陷的高精度检测。

1 系统的工作原理

系统利用视像管作为光学信息传输的核心部件,通过视像管将待测管道的某一位置的内壁成像为环形图像,视像管结构及成像原理如图 1 所示。在电动位移导轨的配合下,可以实现对待测管道内壁的扫描成像。通过图像处理,包括环形图像的抽取、展开及拼接等,获得管道内壁的展开图,最终在展开图中获得缺陷信息。

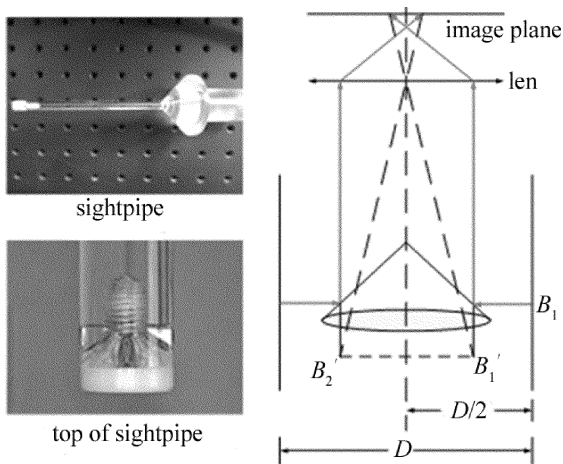


Fig. 1 Constitution and imaging principle of sight-pipe

针对不同的应用场景,设计出相应的检测系统。如图 2 所示,检测系统分为固定式测量系统和基于工业机器人的柔性测量系统。固定式测量系统主要针对单个待测孔或测孔分布比较简单情况,每个待测孔的检测应用一套测量设备,即可同时检测所有待测孔,测量效率高、精度高。柔性测量系统主要针对待测孔较多且分布复杂的情况,引入工业机器人作为运动平台,在工业机器人的配合下,实现柔性、在线、高速、多孔测量。

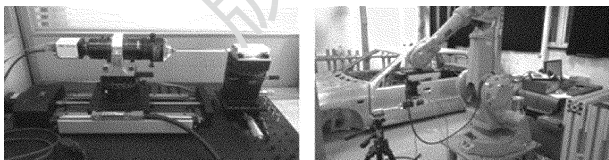


Fig. 2 Defect measuring system for microtubules

应用检测系统,实现了对 8mm ~ 15mm 直径的管道管内形貌及缺陷的检测,但系统的检测精度有待提高。分析视像管成像原理可知,要得到精确的内壁展开图像,保证系统的测量精度,视像管与待测管的相对姿态需满足一定的条件,即视像管与待测管道的中心轴线应当实时重合,否则,会造成内壁展开图中的图像畸变,影响系统的测量精度。但在实际测量中,由于相机、视像管等设备安装时的装配误差,电动位移平台的

运动误差,以及待测量工件的定位误差等原因,在测量过程中,视像管轴线和被测管道的轴线并不是实时重合的。针对这一问题,WU^[16] 等人从系统设备姿态调整的角度进行了研究,首先测量轴线的相对偏离角度,然后通过手动调整,近似实现两轴线的实时重合。该方案虽然在一定程度上提高了测量精度,但其主要通过手工调整旋转台和俯仰台等装置来实现,效率低、精度无法保证。而且设备姿态调整均是在系统测量前进行,测量过程中设备的偏移未考虑在内,因此该方案具有一定的局限性。本文中提出一种新的解决轴线偏离导致测量误差的难题的方法,通过分析轴线偏离对系统成像的影响,建立准确的图像畸变数学模型,提出合适的图像畸变矫正方案,对最终的内壁展开图进行图像矫正,以提高系统的测量精度。

2 图像畸变数学模型分析

微细管道内壁检测系统工作的理论条件是视像管轴线与被测管道轴线的重合,以保证采集到的环形图像展开后能够真实再现管道内壁形貌。轴线的不重合会导致得到的管道内壁图像存在一定的畸变。因而,评价视像管轴线与待测管轴线的相对偏离对系统的测量结果的影响至关重要,需通过构建合适的数学模型来确定测量误差。

为了方便描述,对于待测管道内壁展开后的矩形图像,将沿轴线的方向称之为“纵向”,垂直于轴线的方向称之为“横向”。将系统最终获得的展开图像中的图像畸变分为横向畸变和纵向畸变,分别分析横向畸变和纵向畸变的来源及其对最终测量结果的影响。

2.1 图像纵向畸变分析

在理论情况下,当视像管轴线与被测管道轴线重合时,由于光程相等,垂直于被测管道轴线的任一内壁截面通过视像管成像为一个圆形,经过环形图像展开后,成为一条垂直于轴线的横线。但是,实际测量过程中轴线的相对偏离,导致该截面成像时,光程不相等,实际成像位置发生变化,展开后成像变成一条曲线。在最终的拼接图像中,这种变化表现为该截面的任意一点的实际成像位置相对于理论成像位置在纵向上发生偏移,称之为系统图像的纵向畸变。

相机成像时,满足高斯公式:

$$1/u + 1/v = 1/f \tag{1}$$

式中, u 为物距, v 为像距, f 为焦距。若定义物高为 H ,像高为 h ,则由理想透镜成像光路可知:

$$h/H = v/u \tag{2}$$

将(1)式、(2)式联立,可得:

$$h = Hf/(u - f) \tag{3}$$

对于本系统来说,像高 h (mm) 对应的是环形图像中成像位置到环形中心的距离 R (pixel), 而且, 距离 R 也决定了成像点在最终拼接图像中的纵向位置。当物距发生变化时, 像高随之变化, 成像位置也发生变化, 即成像点在展开图像中发生纵向偏移, 最终影响管道内壁缺陷检测的精确度。

假设距离 R (pixel) 与像高 h (mm) 的比例系数为 d , 则由(3)式可得:

$$R = dHf / (u - f) \quad (4)$$

假定距离 R 随物距 u 的变化率为 g , 则:

$$g = dR/du = -dHf / (u - f)^2 \quad (5)$$

本系统中, 当待测管直径为 12mm 时, 摄像机的镜头焦距约为 60mm, 理想工作距离 (即物距) 约为 255mm。比例系数 d 为固定值, 可由实验得到, 约为 320pixel/mm。

因此, 当物高为 2mm 时, 由(5)式可得距离 R 随物距 u 的最大变化率 g 为:

$$g = -39000 / (u - 60)^2 \quad (6)$$

变化率曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 当物距在 255mm 左右时, 像素变化率约为 1pixel/mm。说明当物距变化 1mm 时, 成像点在最终拼接图像中的纵向位置至多偏移 1pixel。由于系统检测的是微细管道, 视像管与管道的直径相差不大, 因此当视像管轴线与待测管道轴线不重合时, 物距变化不超过 2mm, 即成像点的纵向畸变不超过 2pixel, 这是可以接受的。因此, 纵向畸变对系统的测量精度影响较小, 可以忽略。

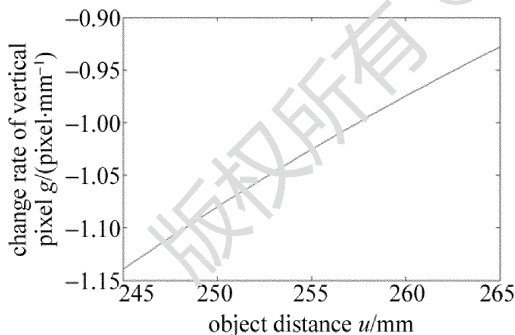


Fig. 3 Change rate of vertical migration

2.2 图像横向畸变分析

在实际测量中, 当视像管轴线与待测管轴线发生相对偏离时, 视像管顶端锥面镜成像截面如图 4 所示, 其中 O_1 为待测管道截面圆的圆心, O_2 为视像管顶端锥面镜截面的圆心, S 为待测管道内壁上的任意一点, x 为 O_1 与 O_2 偏离的距离 (简称偏心距)。可以看到, 由于偏心距的存在, S 附近的任意一段圆弧 dS 在两个圆中对应的圆心角分别是 $d\alpha$ 和 $d\beta$ 。由于系统通过视像管成像, 所以 $d\beta$ 可以称之为实际成像视场角。而在

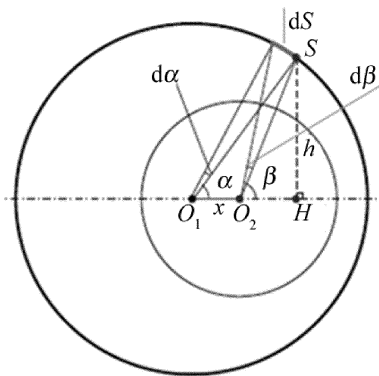


Fig. 4 Cross section of inner surface imaging

理论情况下, O_1 与 O_2 重合, 所以 $d\alpha$ 为理论成像视场角。成像视场角发生变化, 会导致圆弧 dS 的成像尺寸发生变化。这种变化在最终的拼接图像中, 主要表现为横向的局部收缩和扩展, 称之为系统图像的横向畸变。

定义畸变系数 k , 用来表示截面上任意一段圆弧在展开图像中的成像尺寸相对于理论尺寸的变化程度。由于圆弧成像尺寸与成像视场角的大小成比例关系, 所以, 可以用实际成像视场角与理论成像视场角的比值来近似表示畸变系数 k , 即:

$$k = d\beta / d\alpha \quad (7)$$

畸变系数 k 的大小受偏心距 x 的影响。当 x 较小时 (即系统对中较好), 畸变系数 k 十分接近于 1, 也就是说, 横向畸变很小, 可以忽略; 当 x 较大时, 畸变系数 k 与 1 的差值较大, 表明横向畸变较大, 图像失真严重。

圆弧在截面圆周上的位置也会影响畸变系数 k 的大小。图 4 中虚线表示的是图像展开时的剪切线, 以剪切处到圆弧位置的圆心角 α 来表示圆弧所在的位置。通过成像分析可知, 视像管离管道内壁较近的位置, 畸变系数较大于 1, 表明此处内壁成像会被放大; 而离内壁越远的位置, 畸变系数小于 1, 即成像被压缩。

综上所述, 畸变系数 k 是包含偏心距 x 和圆心角 α 两个参量的函数, 即:

$$k = f(\alpha, x) \quad (8)$$

观察图 4, 由几何关系可知:

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{O_1H}{SO_1}, \sin\alpha = \frac{SH}{SO_1}, \\ \tan\beta &= \frac{SH}{O_2H} = \frac{SO_1 \cdot \sin\alpha}{SO_1 \cdot \cos\alpha - x} = \frac{\frac{D}{2} \sin\alpha}{\frac{D}{2} \cos\alpha - x} \quad (9) \end{aligned}$$

式中, D 为待测管道的直径。可得:

$$\beta = \arctan \frac{\frac{D}{2} \sin\alpha}{\frac{D}{2} \cos\alpha - x} \quad (10)$$

通过对(10)式求导,即可得到畸变系数 k :

$$k = \frac{d\beta}{d\alpha} = \frac{\frac{D}{2}\cos\alpha}{\frac{D}{2}\cos\alpha - x} + \frac{\left(\frac{D}{2}\sin\alpha\right)^2}{\left(\frac{D}{2}\cos\alpha - x\right)^2} + 1 \quad (11)$$

由于测量过程是圆周测量,圆心角 α 可以是 $0 \sim 2\pi$ 的任意值。假定偏心距 x 在 $0\text{mm} \sim 2\text{mm}$ 之间变化,圆心角 α 在 $0 \sim 2\pi$ 之间变化,待测孔的直径为 12mm ,通过软件 MATLAB 绘制 3 维曲面来描述畸变系数 k 与 x, α 的关系,如图 5 所示。

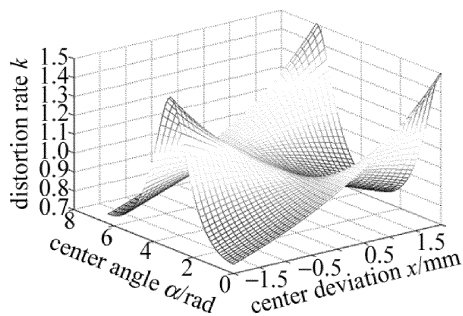


Fig. 5 3-D variation of k

从图 5 中可以看出:(1)随着圆心角 α 和偏心距 x 的变化,畸变系数 k 存在极值点,即在视像管离管壁最近和最远处畸变最大;(2)偏心距的大小决定横向畸变系数的变化范围,而且横向畸变比较严重,需要矫正。

3 图像畸变矫正方案

传统意义上的图像畸变,指的就是“透镜畸变”,即对于符合针孔成像模型的光学系统而言,由于透镜本身曲面制造工艺,装配误差等造成的图像畸变。本系统中图像畸变的来源主要包括两个方面:透镜畸变和姿态偏差导致的畸变,其中姿态偏差是畸变的主要来源。本文中主要研究的是设备姿态偏差导致的图像横向畸变。以下分别针对固定式测量系统和柔性测量系统提出相应的图像畸变矫正方案。

3.1 固定式测量系统畸变矫正方案

图像的横向畸变主要表现为展开图像中的横向局部压缩和扩展。可以通过分析非对中时的管道内壁成像及其理论成像,获得在某一设备姿态偏差状态下,管道内壁展开图中任意位置的畸变率,进而对获得的实际图像进行矫正,得到准确的管道内壁图像。

选一个较小的矩形区域作为图像矫正最小单元,将图像分为多个矩形区域。由于纵向畸变被忽略,可

以矩形区域的宽度畸变率作为矩形的整体畸变率。若是将矩形区域内部的图像畸变当作是线性变化的,则可将矩形区域的横向畸变率作为比例系数,对矩形按比例进行反向压缩或扩展,从而实现对内壁展开图相应区域的近似矫正,得到较精确的目标图像。矩形区域越小,矫正越精确,但计算量也越大。

设计了如图 6a 所示的竖线图样,该图形大小与待测管内壁展开大小尺寸相同,以此图形来模拟管道内壁。对内壁贴有图纸的管道进行内壁缺陷检测,得到此时的内壁图像,如图 6b 所示。

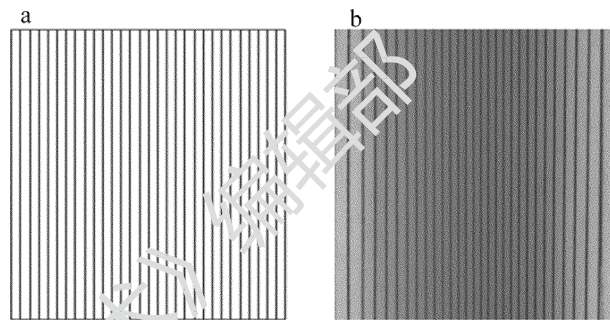


Fig. 6 Simulated inner surface and its imaging
a—simulated surface b—the image of simulated surface

由(11)式可知,在管道任意深度处,内壁截面成像的横向畸变曲线同时受到偏心距 x 和圆心角 α 的影响,即在不同测量位置横向畸变曲线是不一致的。在测量过程中,随着视像管的深入,偏心距 x 不断地变化,但图像中相邻的横向区域内,偏心距 x 相差不大。而且为了保证图像质量,在每次拍摄的环形图像中截取的有效宽度仅为 5pixel ,因此可以假设在纵向高度为 5pixel 的区域内,偏心距 x 为固定值。此时横向畸变曲线只与圆心角 α 有关,可以得到该位置的横向畸变曲线,方法如下:(1)通过图像处理获得任一纵向高度处相邻两条竖线间的像素间隔,该间距与理论竖线间距的比值即为竖线间区域畸变率;(2)以竖线间区域畸变率为数据,选择合适的曲线拟合方法,获得合适的拟合曲线。

选取畸变矫正最小矩形,宽为 6pixel ,高为 5pixel ,通过拟合曲线获得每个最小矩形的横向畸变率,然后对内壁展开图进行矫正。

3.2 柔性测量系统畸变矫正方案

固定式测量系统畸变矫正方案只适合于设备相对姿态较稳定的情况,即每次测量时整个管道偏心距要稳定,该方案对检测系统的重复性精度及待检测工件的定位精度要求比较高。在实际检测中,尤其是对于某些具有复杂的微细管道的设备的检测,而且为了实现柔性、自动、快速、在线等方面的要求,需引入工业机器人作为运动平台。工业机器人受工作时间的增加、

温度、湿度等环境因素的影响,其定位可能产生漂移,误差可能达到 $\pm 0.4\text{mm} \sim \pm 0.6\text{mm}$,不能满足精密测量及以上方案的要求,需要采取新的畸变矫正方案。

作者提出一种基于全局空间控制的高精度机器人定位方法,在机器人工作空间外部设置精密测量定位设备,对机器人末端的特殊靶标进行实时跟踪测量,由于光学传输部件等与机器人末端工具刚性联接,进而实现光学传输部件(视像管)的精确定位。此定位精度与机器人的机构精度无关,仅由外部精密测量装置测量给定。如图7所示,采用两个(或多个)高精度空间定位数字测量相机建立全局控制网,在高精度光学靶标(光学控制点或LED)的配合下,实现高精度的工业机器人全局空间定位测量。

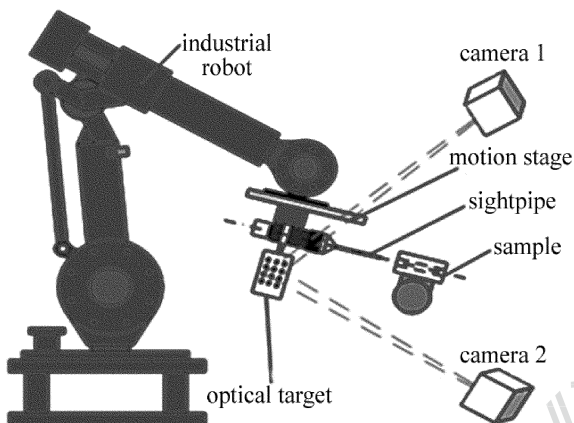


Fig. 7 Positioning scheme for global space

具体实现方法如下:(1)利用两台数字相机搭建定位平台,完成相机参数的标定,利用激光跟踪仪建立全局空间基准坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$,完成基准坐标系与相机坐标系的转换;(2)利用双目相机获得光学靶标特征点在基准坐标系下的坐标,通过跟踪仪获得视像管末端轴线上的 A, B 两点在基准坐标系下的坐标;(3)建立靶标坐标系 $O-xyz$,获得 A, B 两点在靶标坐标系下的坐标 P_A', P_B' ;(4)测量过程中,通过相机实时获得靶标特征点在基准坐标系下的坐标,得到靶标坐标系到基准坐标系的实时转换矩阵 R, T ,进而获得 A, B 两点在基准坐标系下的实时位置 P_A, P_B ,即:

$$\begin{cases} P_A = P_A'RT \\ P_B = P_B'RT \end{cases} \quad (12)$$

对于 A, B 两点, A 点为视像管轴线与其末端平面的交点, B 点为实现管轴线上与点 A 相距 80mm 的点。系统相应坐标系如图8所示。以上步骤中,第(1)步~第(3)步是测量前的准备工作,即获得 A, B 两点在靶标坐标系下的坐标,第(4)步是在测量过程中实时获得 A, B 两点(即视像管轴线)的位置,为图像矫正提供依据。

如图9所示, C, D 两点分别是待测圆孔前后端的

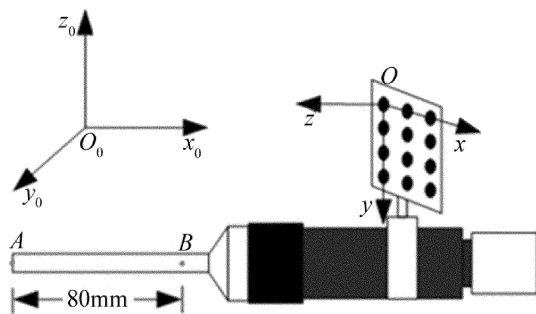


Fig. 8 The corresponding coordinate system

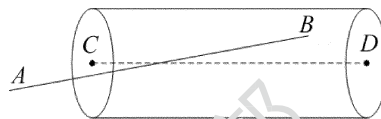


Fig. 9 Deviation of axes

截面中心,通过跟踪仪获得两点坐标。计算视像管上的 A, B 两点到直线 CB 的距离 d_A, d_B 。在实际测量过程中,轴线倾斜的角度不大,所以可以将 d_B 近似作为当前检测位置的偏心距,得到此时的畸变矫正公式,然后即可按照固定式矫正方案实现对最终图像的矫正。

由于视像管与待测管道的直径相差不大,在测量过程中,可能发生相撞,需要在测量时进行实时判断。假设 a 为待测管与视像管的半径之差。若:

$$\max\{d_A, d_B\} \geq a \quad (13)$$

则需要停止测量并调整测量设备的姿态。

4 实验验证

为方便两种矫正方案进行比较,且柔性测量系统矫正方案精度与机器人定位精度无关,可以在固定式测量系统上验证两种方案。在深度为 100mm 、直径 12mm 的微细管道内壁预先布置直径为 0.6mm 、 0.8mm 及 1.0mm 的孔状模拟缺陷,利用固定式检测系统对上述内壁缺陷进行检测,通过图像处理获得内壁展开图,如图10所示。分别利用两种矫正方案对最

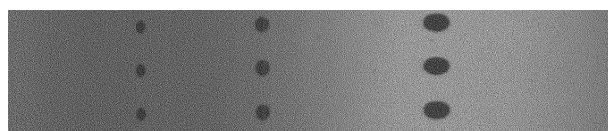


Fig. 10 Uncorrected image of internal surface

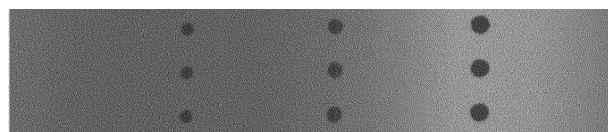


Fig. 11 Image corrected with the scheme for stationary system

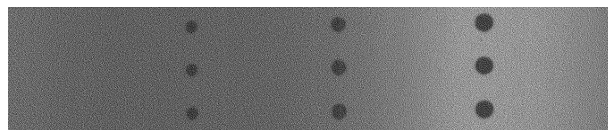


Fig. 12 Image corrected with the scheme for flexible system

终展开图进行矫正,矫正效果如图 11、图 12 所示。对待测管道进行重复性测量,获得孔壁缺陷矫正前后的尺寸信息,如表 1~表 3 所示。

Table 1 Measurement results of defects with diameter of 0.6mm/mm

	defect 1		defect 2		defect 3	
	mean value	standard deviation	mean value	standard deviation	mean value	standard deviation
uncorrected image	0.613	0.024	0.608	0.039	0.591	0.039
stationary correction	0.613	0.020	0.608	0.012	0.596	0.021
flexible correction	0.619	0.029	0.581	0.027	0.613	0.023

Table 2 Measurement results of defects with diameter of 0.8mm/mm

	defect 1		defect 2		defect 3	
	mean value	standard deviation	mean value	standard deviation	mean value	standard deviation
uncorrected image	0.801	0.020	0.787	0.023	0.769	0.018
stationary correction	0.796	0.015	0.787	0.015	0.796	0.014
flexible correction	0.812	0.021	0.778	0.023	0.816	0.017

Table 3 Measurement results of defects with diameter of 1.0mm/mm

	defect 1		defect 2		defect 3	
	mean value	standard deviation	mean value	standard deviation	mean value	standard deviation
uncorrected image	1.424	0.011	1.409	0.018	1.423	0.009
stationary correction	0.987	0.009	0.997	0.011	1.013	0.020
flexible correction	1.015	0.013	0.987	0.021	1.026	0.024

5 结 论

为满足小型化、微型化的微细管道管内测量需求,针对不同应用场景,提出两种测量方案并搭建测量系统。深入分析视像管非中对系统测量结果的影响,提出合理的解决方案。通过对最终展开图进行图像矫正,获得精确的测量信息,避免了手动调整设备的不确定性。应用测量系统,对深度 100mm、直径 12mm 的待测孔中的 0.6mm、0.8mm、1.0mm 直径的圆形缺陷进行检测,测量结果表明,矫正后的缺陷尺寸标准差均小于 0.03mm,均值误差不超过 0.02mm,优于矫正前。因此,本文中提出的图像矫正方案,能够解决视像管非中对造成的影响,实现微细孔壁缺陷的精确检测。固定式测量系统矫正方案的误差主要来自曲线拟合误差,其矫正效果优于柔性矫正效果,主要是因为柔性测

量系统全局定位精度有待提高。下一步工作将是优化图像矫正方案,研究更准确的曲线拟合方法,提高全局空间定位精度,进一步提高系统测量精度。

参 考 文 献

- [1] HOU Zh X, WU Y H, GONG H Ch. Modeling and simulating of intake pipe fuel film dynamic characteristic in gasoline engine start process[J]. Journal of Computers, 2011, 6(4):799-804.
- [2] YU D K, QIAO X G, JIA Zh A, et al. The fiber Bragg grating temperature and pressure sensing system applied in oil pipeline[J]. Laser Technology, 2007, 31(1):12-14 (in Chinese).
- [3] WU E Q, DU B J, ZHANG H H. Study on the extraction method of small pipes inner surface[J]. Laser Technology, 2008, 32(2):180-183 (in Chinese).
- [4] ZHAO H Q. Cause of oil and gas pipeline incidents in China and environmental precautions[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(4):368-372 (in Chinese).
- [5] HANG L J, HE C F, WU B, et al. Detection technology of underwater pipeline leakage and its location method[J]. Laser Technology, 2011, 35(3):376-379 (in Chinese).
- [6] ZHOU Y M, FU Zh Q, LI P, et al. Infrared nondestructive testing of cavity defects and PNN recognition and quantitative evaluation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4):1193-1197 (in Chinese).
- [7] GUEN Y S, LU X R. Design of a 5mm tube diameter industrial video endoscope[J]. Nondestructive Testing, 2015, 35(3):64-72 (in Chinese).
- [8] YANG D L, LU D, FENG D W. Research on 3D-industrial endoscope based on image processing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6):1285-1289 (in Chinese).
- [9] YANG X T, YANG J F, XUE B, et al. Design of the objective lens for endoscope with imaging fiber bundle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2):423-427 (in Chinese).
- [10] DONG W J, GUO P, HU Ch. Aeroengine borecope inspection technique and non-destructive testing [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(9):69-73 (in Chinese).
- [11] TAO R, CHEN Y H, LIU Q Y. A helical drive in-pipe robot based on compound planetary gearing[J]. Advanced Robotics, 2014, 28(17):1165-1175.
- [12] QI H M, YE J R, ZHANG X H, et al. Wireless tracking and locating system for in-pipe robot[J]. Sensors & Actuators, 2010, A159(1):117-125.
- [13] QIAO J W, SHANG J Zh, CHEN X, et al. Unilateral self-locking mechanism for inchworm in-pipe robot[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(5):1043-1048.
- [14] HONG E, KATZ R, HUFNAGEL B, et al. Optical method for inspecting surface defects inside a small bore[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(1):209-213.
- [15] WU B, HAN W Q, SHAO Zh Y. Surface defects inspecting inside small bores based on machine vision[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(11):2137-2141 (in Chinese).
- [16] WU B, SHAO Zh Y, ZHANG Y H. A new technology of building up defect measuring system for inner micro-pipe[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(2):293-298 (in Chinese).