

小口径管道机器人的检测精度分析

朱玉芳¹, 施祖康²

(1. 南京师范大学 控制科学与工程系, 江苏 南京 210042; 2. 南京理工大学 机器人研究所, 江苏 南京 210094)

[摘要] 研制一种基于介质压差驱动的用于检测小口径在役石油管道残余壁厚的管道检测机器人, 探究影响该种机器人检测精度的因素. 研究了探头与管壁的距离及探头轴线与管壁表面法线存在偏离时对检测精度的影响, 反射镜片安装角度的改变以及其它影响检测精度的因素, 并在此基础上提出有效提高机器人检测精度的措施.

[关键词] 机器人, 超声波检测, 石油管道

[中图分类号] TP242. 2, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292(2004)02-0037-04

管道检测机器人是一种可在管道内行走的机械装置, 可以携带一个或多个传感器及操作装置在操作人员的远距离控制下进行一系列的管道检测维修作业^[1].

研制的小口径管道智能检测机器人(适用于管径 $\Phi \leq 300$ mm 的管道)采用超声波检测技术对石油管道残余壁厚进行检测, 具有体积小、动作灵活、对管材不敏感、检测精度高的特点. 整个机器人系统由牵引仓、检测仓、电源仓、定位系统、各仓间通信及数据处理系统等部分组成^[2], 如图 1 所示, 其中牵引仓中装有超声波探头、反射镜、镜面旋转机构、齿轮和微型电机等. 机器人工作时, 探头发出的超声波经镜面反射, 射向管壁, 同时由管壁反射回的超声波再经镜面反射, 被探头接收. 机器人在沿管道轴向行走时, 镜面旋转, 完成机器人所在处的整个管壁的周向检测.

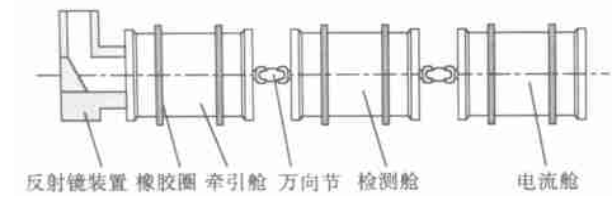


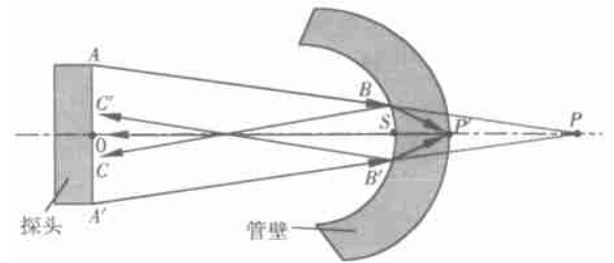
图 1 管内超声波检测系统结构示意图

1 影响机器人检测精度的因素

1.1 探头距管壁距离及角度的改变对检测精度的影响

在用探头检测管壁时, 要求探头与被测管壁垂直(探头轴线与管壁表面法线重合), 探头与管壁的相对位置如图 2 所示. 探头发出超声聚焦声束从油中倾斜入射到材料为钢的管壁中时, 会发生折射现

象. 折射以后的情况与界面形状和超声波在此两种介质中的波速有关. 因为超声波在油中的传播速度小于在钢中的速度, 而且实验中界面形状是凹曲面(此时管道内壁是界面), 所以超声波经折射后在管壁内会进一步聚焦. 为使管壁获得较大的能量, 实验中使声束在管壁中的聚焦点恰好位于管道的外壁.



粗实线: 入射声线; 细实线: 反射声线; O : 探头的中心; S : 探头轴线与内管壁的交点; P : 探头在油中的焦点; P' : 探头在钢中的焦点; SP : 探头中心线与内管壁交点距声束在油中焦点的距离; SP' : 探头中心线与内管壁交点距声束在管壁中焦点的距离; OP : 探头在油中的焦距.

图 2 直接用探头检测管壁的情况

图 2 在包含管道轴线且与管道轴线垂直的平面内表示了探头与管壁的相对位置及超声波束的入射和反射情况, 此时探头与被测管壁垂直.

在图 2 中, 可以把聚焦声束看成是由声线 AB 和 $A'B'$ 形成的一个区域. 这时声线 AB 和 $A'B'$ 分别与管道内壁交于 B 和 B' 点, 然后一部分反射回来形成反射声线 BC 和 $B'C'$, $BB'C'C$ 就形成了反射声束, 它被探头接收后在超声波探伤仪的显示屏上形成的波形就是管壁的表面波; 另一部分透射入管壁形成透射声线 BP' 和 $B'P'$ 并聚焦于 P' 点, 然后管道外壁的反射声线 $P'S$ 垂直入射到油中, 并被

探头接收从而形成管道的底波. 机器人收到两个波的时间之差与管壁厚成比例(时间差等于两倍壁厚除以超声波在钢质材料中的速度).

须指出的是: 超声聚焦声束实际上并非聚焦于严格意义上的一个“点”, 而是聚焦于一个区域, 这个区域是以焦点为中心的圆柱. 为了便于表示, 在图中只画了一条从焦点发出的声线. 因此, 探头接收到的来自管道外壁的反声束, 实际上应该是以声线 $P'S$ 为中心的圆柱区域.

图中 SP 和 SP' 满足式(1):

$$\frac{n_1}{SP} - \frac{n_2}{SP'} = \frac{n_1 - n_2}{R}$$

(1)

式中, n_1 为油的折声率(≈ 1); n_2 为钢的折声率($\approx 1/4$); R 为管道内壁的半径.

检测中, 如果由于某些原因使探头与管壁的距离或者探头轴线与管壁表面的法线存在一个夹角, 必然会影响声束在管壁中的聚焦情况, 从而影响检测精度甚至出现异常情况. 以下是两种典型的异常情况:

(1) 探头与管壁垂直但与管壁间的距离改变. 当距离变化时声束的聚焦就会偏离理想位置. 若探头与管壁间的距离变小, 这时虽然声束未在管壁处聚焦, 但由于声束传播的路径短, 能量损失少, 因而管壁的表面波和底波能量不会太弱, 对检测的影响不是太大; 当探头与管壁间的距离变大, 声束不仅未在管壁处聚焦, 而且由于声束传播的路径长, 能量损失多, 管壁反射波的能量会很弱, 当反射波的能量弱到一定程度时, 在相同的衰减系数下, 反射波可能无法被探头接收, 从而出现一个波(探头只接收到表面波, 未接收到底波)或无波(表面波和底波都未被探头接收到)的情况. 实验中, 调节探头与管壁间的距离, 所发现的现象与上述分析相同.

(2) 探头与管壁不垂直但与管壁间距离不变. 图3在包含管道轴线且与管道轴线垂直的平面内对声束的聚焦情况进行了分析. 图中角 β 表示探头轴线与管壁表面法线之间的夹角.

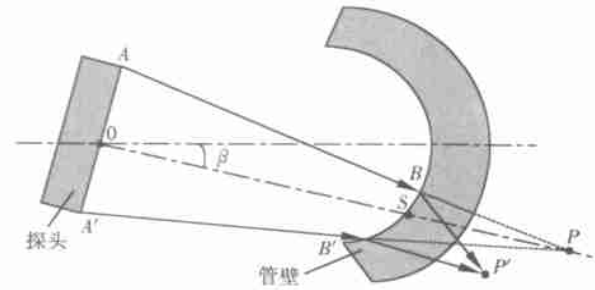


图3 探头轴线与管道表面法线呈某一夹角时的情况

图3只画了探头顺时针转动的情况, 当探头逆时针转动时与此相似. 在这种情况下, SP/SP' 的值与 β 有关^[3]: 当 β 变化小时, 由于探头与管壁间的距离未变, 所以 SP 不变, SP' 的变化也不大, 所以, SP/SP' 的值较小, 此时声束聚焦在 P' 点附近, 即此时对检测的影响较小; 当 β 变化大时, SP/SP' 的值随 β 的值变化比较大, 声束不能聚焦在正确位置, 回波的能量可能减弱, 从而引起少波或无波. 此外, 当 β 值比较大时, 管壁的底面反射波经折射后, 可能无法进入探头的接收范围, 这也会引起少波或无波现象.

除了上述两种情况之外, 还有第三种情况——探头与管壁不垂直而且与管壁间的距离也不正确. 这是上述两种情况的综合, 但两者无耦合, 可分别加以解决.

1.2 反射镜法线与探头轴线夹角对检测精度的影响

平面反射镜仅仅改变聚焦声束的方向, 并不影响其他参数. 利用反射镜装置对管道进行检测时, 探头发出的超声波经反射镜反射后到达被测管壁, 管壁反射回来的声波再经镜片反射后被探头接收. 实验中, 为了让管壁获得较高能量使得反射波强度提高, 要求被镜面反射后的声束中心线垂直于被测管壁而且反射后的声束入射到管壁后仍聚焦于管道外壁. 此时反射后的声束的中心线与管壁的法线重合, 如图4所示.

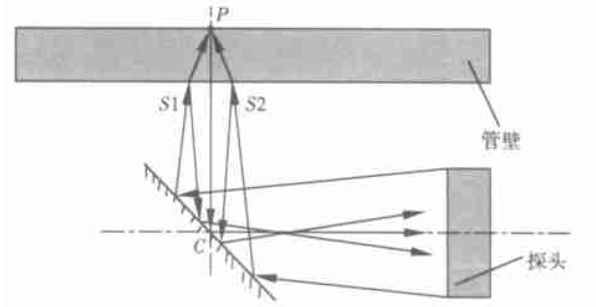


图4 利用反射镜装置的检测情况

根据机器人总体设计的要求, 为了使反射后的声束中心线垂直管壁, 需要把镜面放置在与探头中心线成 45° 的位置. 实验过程中发现, 镜片安装的角度是影响检测结果的重要因素. 镜面与探头轴线所成角度的改变, 会从两个方面影响检测:

(1) 回波能量的降低导致波形的变化. 从图4可以看出, 如果当反射镜法线与探头中心线成 45° 时, 被镜面反射后的声束与直接使用探头垂直于管壁检测时的情况相似. 因此, 镜面的角度不正确也会导致回波的能量降低, 以至不能被探头接收.

(2) 回波经镜面反射后超出探头所能接收的范围. 如图 5 所示, 当反射镜与探头中心线为某个角度时, 探头发出的声束经镜面反射后到达管道内壁, 此时一部分声波折射入管壁再从管壁返回, 形成底面反射波 DE 和 $D'E'$, 但此时 DE 和 $D'E'$ 却超出探头所能接收的范围, 无法在显示屏上形成底波; 另一部分声波则由管道内壁反射回来形成声束 SA 和 $S'A'$, 但是 SA 和 $S'A'$ 此时也不能被反射镜反射或被探头接收, 因此无法在显示屏上形成表面波. 这样, 显示屏上就会出现无波的情况.

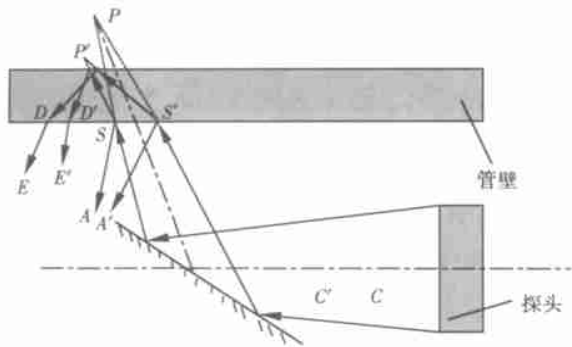


图5 反射镜角度改变导致无波

此外, 当镜面角度为某一值时还可能导致多波的情况, 如图 6 所示. 当反射镜与探头中心线成某个角度时, 探头发出的声束经镜面反射后到达管道内壁, 此时一部分声波折射入管壁再从管壁返回, 形成底面反射波 DE 和 $D'E'$. 但此时 DE 和 $D'E'$ 却超出探头所能接收的范围, 无法在显示屏上形成底波.

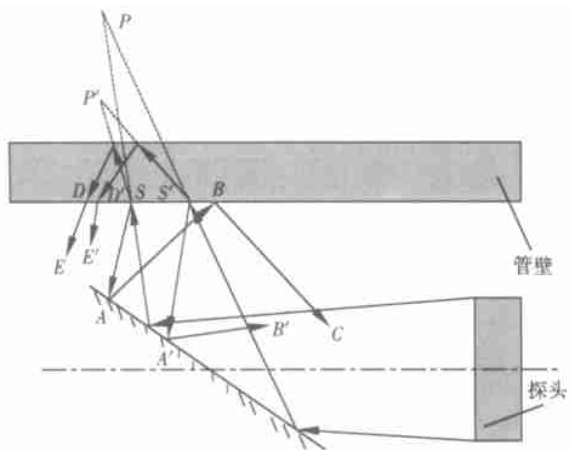


图6 反射镜角度改变导致多波

另一部分声波则由管道内壁反射回来形成声束 SA 和 $S'A'$, 但是当 SA 和 $S'A'$ 经反射镜反射后, 一部分声束不是被探头接收, 而是又返回管道内壁 (如声线 AB); 另一部分声束被探头接收 (如声线 $A'B'$). AB 再经内壁反射形成的声线 BC 被探头接收 (AB 进入管壁声波形成的底波可能由于能量过

小无法被接收).

探头接收的实际上是来自管道内壁的多次反射波壁的声波形成的底波. 这样, 在探伤仪的显示屏上会出现多个波形, 且它们的间距与壁厚不符 (实验中发现它们的间距几乎相等).

通过以上分析并结合实验可知, 在利用反射镜装置进行检测时, 反射镜与探头轴线之间的夹角对检测的精度有着极其重要的影响.

1.3 同轴度对检测精度的影响

这里所说的同轴度包括探头轴线与机器人轴线的同轴度, 以及机器人轴线与被测管道轴线的同轴度. 如果探头轴线与机器人轴线的同轴度不符合要求, 就会使反射镜相对探头的角度变化; 如果机器人轴线与被测管道轴线的同轴度不符合要求, 也会使反射镜位置发生相应的变化, 这些都会影响超声波检测的精度.

1.4 其它因素对检测精度的影响

除了上述因素之外, 介质的波动和介质温度的变化同样会影响检测的精度. 当管道内石油波动时, 也会在一定程度上影响声束的传播方向, 实验中发现, 介质振动对波形的影响相对较小.

介质温度改变会使声束的焦距发生变化. 考虑到现场温度变化较大, 在进行系统对介质温度的敏感性测定时, 系统工作温度为 $0\sim 25^{\circ}\text{C}$. 在该温度范围内, 系统测量精度波动较小.

2 提高检测精度的措施

为尽量克服或避免影响检测精度的上述诸因素的出现, 在研制过程中重点解决了以下几个问题:

2.1 提高系统各部件加工和安装精度

机器人在加工、组装过程中要严格按设计要求完成. 要确保机器人轴线与管道轴线的同轴度、探头轴线与机器人轴线的同轴度以及反射镜与探头轴线之间所成的角度满足要求.

2.2 选择合理的探头参数

在研制检测机器人时, 在遵循选择探头的基本原则的前提下, 还需结合实际管道的特点合理选择探头的参数 (探头直径、焦距、发射声波的频率和声波的波长等) 以及反射镜距探头的距离.

2.3 降低系统对介质温度的敏感性

降低系统对温度的敏感性主要是指降低温度对探头焦距的影响. 由于被测管道多处在恶劣环境下, 环境温度变化较大, 因此, 有必要考虑具有极限温度的工作介质对检测系统造成的影响.

3 实验结果分析

为验证以上分析,做了以下实验:在室温 10℃左右的实验室中分别采用一个型号为 2.5PΦ20Z,焦距是 50 mm 的水浸式聚焦探头和一个反射镜装置(反射镜片是经表面抛光处理,厚度为 1.5 mm 的不锈钢板),以机油作为耦合剂对含人工缺陷的直钢板和直管进行检测.其中探头直接检测直管的检测结果和利用反射镜装置检测直管的检测结果如表 1 和表 2 所示.通过对实验数据的分析得出了几种检测方式的检测精度,如表 3 所示.

由表 3 可见,各种检测方式的误差均低于 ±0.3 mm,满足检测要求(±0.5 mm).

表 1 利用探头直接检测直管的检测结果/ mm

人工缺陷	直径测量	深度测量
直径×深度	均值,绝对误差	均值,绝对误差
外壁缺陷 Φ6 0×2 7	5 80, - 0.20	2.48, - 0.22
内壁缺陷 Φ5 0×3 6	5 23, + 0.23	3.40, - 0.20
内壁缺陷 Φ5 5×2 8	5 28, - 0.22	2.58, - 0.22
内壁缺陷 Φ4 6×3 0	4 36, - 0.24	3.21, + 0.21
内壁缺陷 Φ2 3×2 5	2 05, - 0.25	2.30, - 0.20

表 2 利用反射镜装置检测直管的检测结果/ mm

人工缺陷	直径测量	深度测量
直径×深度	均值,绝对误差	均值,绝对误差
外壁缺陷 Φ6 0×2 7	5 77, - 0.25	2.44, - 0.26
内壁缺陷 Φ5 0×3 6	5 26, + 0.26	3.47, - 0.23
内壁缺陷 Φ5 5×2 8	5 22, - 0.28	2.54, - 0.26
内壁缺陷 Φ4 6×3 0	4 33, - 0.27	3.25, + 0.25
内壁缺陷 Φ2 3×2 5	2 01, - 0.29	2.23, - 0.27

表 3 各种检测方式的平均精度/ mm

检测方式	缺陷径向 尺寸平均精度	缺陷深度 平均精度
探头直接检测钢板	±0.16	±0.158
利用反射镜装置检测钢板	±0.206	±0.196
探头直接检测直管	±0.228	±0.21
利用反射镜装置检测直管	±0.27	±0.254

4 结论

在介绍了实验室环境下的小口径管道智能检测机器人的工作原理的基础上,对影响机器人检测精度的因素进行了研究,得出了以下结论:

(1) 探头与被测管壁的距离及反射镜与探头轴线间的夹角,这两个因素直接影响到检测的精度.

(2) 管道中存在的缺陷、同轴度等多种因素对机器人检测精度也有一定的影响.

(3) 通过实验验证了提高机器人检测精度措施的可行性.

[参考文献]

[1] Flann Nicholas S, Moore Kevin L, Ma Lili. A small mobile robot for security and inspection operations[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(11) : 1265 - 1270.
[2] 朱玉芳,施祖康. 智能管道检测机器人[J]. 机械制造, 2003, 41(463) : 13 - 14.
[3] 张志永. 水浸聚焦超声波探伤原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985. 1 - 110.

Testing Accuracy Analysis for Small Diameter Pipe Inspection Robot

ZHU Yufang¹, SHI Zukang²

(1. Department of Control Science & Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;
2. Institute of Intelligent Robot, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Intelligent petroleum pipe inspect robot driven by medium pressure difference was developed. Some factors were studied to test inspecting capability of the robot based on its simulating working environment. Effects of factors on testing accuracy were discussed for distance between inspector and tube well, departure of inspector axes from nomal line of tube well and mirror setting angle. Several measures were also suggested to solve the abnormalities.

Key words: robot, ultrasonic inspection, petroleum pipe

[责任编辑: 严海琳]