

管道内径在线检测机器人的结构设计

唐德威, 宗德祥, 邓宗全, 张 涛

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要 :针对现有接触式管道内径测量机器人对长距离管道内径进行连续测量的不足,对一种非接触式管道内径在线检测机器人的机械结构进行了设计与研究。分析了机器人的越障能力及弯道处可能产生的运动干涉问题,进行了三维建模与运动仿真,验证了该机器人在管道内运动的稳定性、管道变径的自适应性及障碍与弯道的通过性。该机器人的最大优点是本体可以实现无缆、无自备动力源、利用无压重力水流驱动,实现对管道内径进行长距离在线测量。

关键词 :管道内径; 机器人; 超声测量

中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1001-4462 (2005)02-0039-04

The Structural Design for Internal Diameter of The Pipeline Measured Robot

TANG De-wei, ZONG De-xiang, DENG Zong-quan, ZHANG Tao

(School of Mechtronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150001, China)

Abstract :The paper has designed a new kind of non-contact pipeline robot's structure, which covers the shortage of the existing contact pipeline robot for long distance continuous measuring. The paper has analysed obstacle performance of the robot and the motion interference when passing curved conduit. Through three-dimensional model and movement emulation, the paper proved that robot is stable in pipeline, is adaptive to the changing diameter of the pipeline, and has good performance passing the obstacle and curved conduit. The greatest advantage is that the robot is driven by gravitational force of the water, without cable or self-contained power source, so that the robot can realize the purpose of long distance measuring pipeline internal diameter online.

Key words :internal diameter of the pipeline; robot; ultrasonic measurement

1 系统概述

管道内径在线检测机器人的研制涉及机械设计、超声波探测技术、信号分析与数据处理技术、计算机技术等多学科,其研究将进一步促进各学科的融合,意义十分重大。传统的管道检测机器人多为接触式的,大多采用电机驱动,靠轮子或履带和管壁之间产生的摩擦力来运动,工作时会对管壁产生磨损或造成局部压力过大,致使管道产生局部变形甚至破坏。此外,检测前需要做大量辅助工作,耗时长,并可能影响管道的正常工作。为了克服这些问题,同时充分利用管道内的水环境,本文利用阿基米德的浮子理论,提出了一种新型

非接触式的管道内径在线检测机器人,将无压重力水流的推力转化为机器人的驱动力。利用管道中的水作为载体,既降低了检测过程中机器人对管道的损伤,又降低了自身的能源消耗,并使机器人在无缆无自备动力源的条件下,进行长距离检测工作。

1.1 测量机器人系统的主要技术要求

本文针对 $\Phi 1000\text{mm}$ 管道内径的测量进行机器人设计。由计算机记录检测数据,经数据分析处理后,得到管道内部变形量的大小与变形位置。主要技术要求为:

沿轴向每间隔 1m 在管内径环向测 6 个点;径向测量误差 $\leq \pm 5\text{mm}$;一次测量管道最大长度 2km;机器人

收稿日期: 2004-12-08

检测系统每行走 1m 记录一次测量数据,最小通过直径为 $\Phi 700\text{mm}$ 。

1.2 被测管道的概况

管道:埋地 $\Phi 1000\text{mm}$ 高密度聚乙烯缠绕结构壁管;管道总长:18km;管道用途为无压重力流输送清水;管道全程设有 11 个检查井,井口径向尺寸为 $\Phi 500\text{mm}$,高为 150mm,两井间最大间距 4km。

2 总体设计

2.1 检测原理

超声波检测是目前应用较为广泛的一种无损检测方法,具有灵敏度高、穿透力强、效率高、成本低、对人体无伤害等优点。城市水管道的缺陷主要是管壁的受蚀变形、受压变形及裂缝,用超声波检测技术来测量管壁变形是最为简便直观的方法。本机器人系统在检测过程中超声波探头不绕自身轴线旋转,为了测量整个圆周,采用了周向均布六个超声波探头的方式。同时,为了标定机器人在管道中的位置,本机器人系统还装备了超低频信号发生器,实现同地面指挥中心的联系。

2.2 外形设计

设计要求机器人工作在 $D_{\max}=\Phi 1000\text{mm}$ 的输水管道中,最小可通过的管道直径为 $D_{\min}=\Phi 700\text{mm}$ 。而且由于机器人将在输水管道中长距离执行检测任务,要求机器人系统有良好的密封性和自适应性。综合考虑各种现实的因素,提出如图 1 所示机器人总体系统。

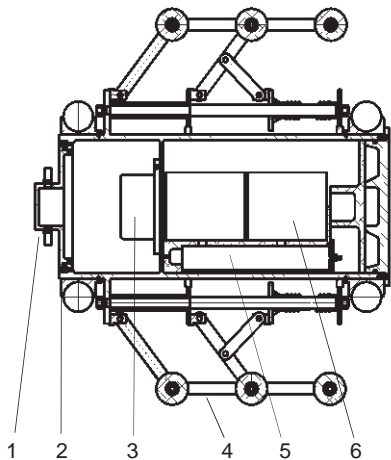


图 1 管道机器人结构

- 1.超声波探头;2.浮子;3.计算机;4.弹簧支架;
5.超低频信号发生器;6.电源

2.3 参数化设计

2.3.1 长度设计

弯道是管道机器人工作时遇到的常见障碍,管道机器人若想顺利完成检测任务,就必须能够通过弯道。图 2 为机器人过弯道的示意图,机器人几何尺寸必须满足如公式(1)所示的约束条件,方可顺利通过弯道。

$$\begin{cases} (R+D/2)\cos\lambda - (R-D/2) < d < D \\ L_{\max} = 2\sqrt{(R+D/2)^2 - (R+d/2)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为管道直径; d 为机器人直径; R 为弯道曲率半径; λ 为弯道弯曲角度。 L_{\max} 为在一定的弯道几何尺寸和机器人直径 d 的条件下能通过弯道的管道机器人的最大长度。

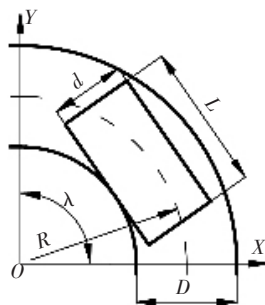


图 2 机器人过弯道示意图

2.3.2 直径设计

机器人系统利用管内介质工作,因而机器人舱体的半径 r 可以通过其所受的浮力来设计计算。若在管道内机器人能够正常工作,必须满足 $F_{\text{浮}} \geq G$ (G 为机器人系统重力),可以得出机器人半径应满足公式:

$$r \geq \sqrt{\frac{G}{\rho_{\text{水}} \cdot g \cdot \pi \cdot L}} \quad (2)$$

式中: L 为机器人舱体长度。

2.3.3 壁厚设计

充分考虑机器人的工作环境要求,以及机器人自身材料、价格、重量等要求,本设计选用防锈铝合金作为机器人舱体的主要材料。根据公式(3)可计算出机器人舱体的壁厚。

$$S = \frac{P \cdot d}{20\omega} \quad (3)$$

式中: S 为管道机器人壁厚; P 为管道机器人所承受的压强; d 为管道机器人直径; ω 为与材料性能相关的壁厚安全系数。

2.3.4 支承部件设计

支撑臂设计采用图 3 所示结构,既增强了机器人在运行过程中的稳定性,又提高了机器人越障的能力。

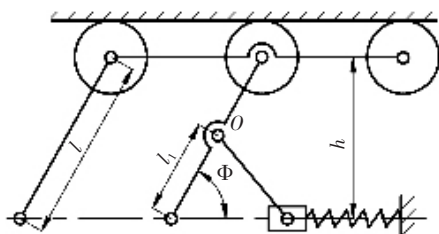


图3 弹簧支撑臂模型

这是一种自适应管道状况的机构。

分析弹簧支撑臂结构,可得出其可以自适应调整的径向距离为:

$$\Delta h = l \cos(\Phi + \Delta \Phi) - l \cos \Phi \quad (4)$$

式中 Δh 为弹簧支撑臂与管道内壁接触后的径向距离变化值 l 为弹簧臂长度 Φ 为弹簧臂与机器人轴向之间的夹角 $\Delta \Phi$ 逆时针为正。

以 O 点为力矩点 根据力矩平衡,可以写出:

$$M_N(o) + M_f(o) = M_{\text{弹}}(o) \quad (5)$$

式中 $M_N(o)$ 、 $M_f(o)$ 、 $M_{\text{弹}}(o)$ 分别是管壁对支撑轮的压力 N 、管壁对支撑轮的摩擦力 F_f 和弹簧力 $F_{\text{弹}}$ 对 O 点所形成的力矩。

由式(5),可得弹簧在支撑杆变形时的弹力变化公式:

$$F_{\text{弹}} = k \cdot (\sum N \cdot \text{ctg} \Phi + \sum F_f) \quad (6)$$

式中 k 为系数 $k = l/l_1 - 1$ 。

3 弯道处的干涉与越障能力验算

3.1 运动干涉分析

进行管道机器人长度设计时,主要考虑了几何约束条件,考虑到机器人在管道中处于运动状态,还必须对机器人进行运动干涉分析,否则可能会产生很大的“内耗”甚至“卡死”。管道机器人在通过弯道时,可以分为过渡阶段和旋转阶段。过渡阶段即管道机器人处于弯道和直管之间,机器人的运动为平面运动。旋转阶段,即机器人完全处在弯道范围内,机器人的运动是绕弯道曲率中心的转动。因为机器人各支撑臂是对称的,所以可以简化计算模型。根据图2所示,可以得出弯道参数方程:

$$\begin{cases} x = R - D/2 \cos \psi \cos \lambda \\ y = R - D/2 \cos \psi \sin \lambda \\ z = D/2 \sin \psi \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\lambda = 0 \sim 90^\circ$ ψ 为机器人姿态角,见图4 $\psi = 0 \sim 360^\circ$ 。

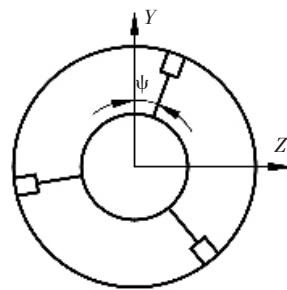


图4 机器人姿态图

同理,可以得出直管参数方程:

$$(y-R)^2 + z^2 = (D/2)^2 \quad (8)$$

由图4、图5可以得出机器人在过渡阶段的运动参数方程:

$$\begin{cases} x_1 = R \alpha - L + D/2 \sin \psi \sin \theta \\ y_1 = R - D/2 \sin \psi \cos \theta \\ z_1 = D/2 \cos \psi \end{cases} \quad (9)$$

式中 α 为机器人在过渡阶段绕曲率中心的旋转角, $\alpha = 0 \sim 2 \sin^{-1}(L/2R)$;

$$\theta = \text{tg}^{-1}(R/(1-R\alpha)) - \cos^{-1} \frac{L^2 + (L-R\alpha)^2}{2L\sqrt{R^2 + (1-R\alpha)^2}}$$

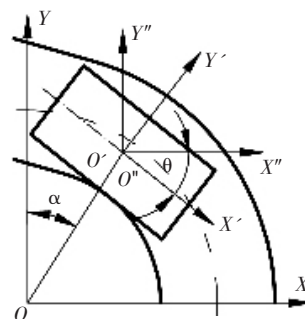


图5 过渡阶段坐标系设置

同理,由图4、图6可得到机器人在旋转阶段运动参数方程:

$$\begin{cases} x_1 = R \sin \beta + D/2 \sin \psi \sin(\beta + \alpha/2) \\ y_1 = R + D/2 \sin \psi \cos(\beta + \alpha/2) \\ z_1 = D/2 \cos \psi \end{cases} \quad (10)$$

式中 β 为机器人在旋转阶段绕曲率中心的转角, $\beta = 0 \sim (90^\circ - \alpha)$ 。

由管道轨迹方程和机器人运动轨迹方程可计算出机器人在弯道内运动时支撑臂在径向产生的变形量 ΔR ΔR 即为过弯道时弹性支撑臂必须能够适应的弹性变形量。

$$\Delta R = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (11)$$

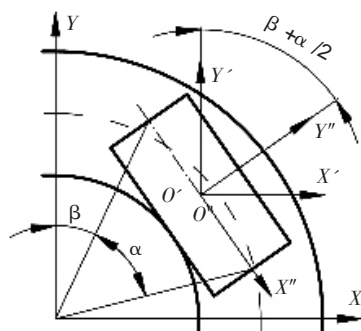


图6 旋转阶段坐标系设置

当 $\Delta R \leq (D_{\max} - D_{\min})/2$ 时, 管道机器人可顺利通过弯道。

3.2 越障能力分析

机器人除了具有管径自适应性和自定心性外, 越障能力也是决定机器人的可靠性和实用性的重要指标。

在一般的管道对接处都会出现 5~10mm 的台阶, 机器人要实现正常工作, 必须能越过这样的台阶。而且长期服役的管道, 由于各种因素的作用管道可能会出现一些凹陷, 故必须考虑使机器人不至于卡在凹陷处。鉴于这些情况, 设计了如图 3 的弹簧支撑臂结构。利用轮子的滚动降低机器人与管壁的摩擦力, 连杆上分布三个轮子的目的是提高机器人跨越较大凹陷的能力。

管道内主要存在凸起与凹陷两种障碍, 下面对这两种障碍分别进行分析。

3.2.1 凸起障碍

机器人在过凸起障碍时, 其行走轮与障碍间的几何关系如图 7 所示。

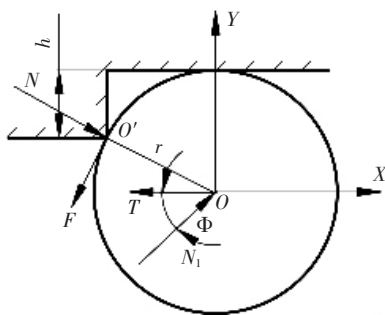


图7 跨越台阶图

图中 T 为轮子所受水的推力, N_1 为连杆对轮作用力, N 为管壁对轮子的压力, F 为轮子受到的摩擦力, O' 为轮子与管壁的接触点, O 为轮子的圆心, h 为障碍的高度, r 为轮子半径。由图 7 的几何关系可以得出:

$$\begin{cases} \sum M(O') \geq 0 \\ F \geq \mu \cdot N \end{cases} \quad (12)$$

由式 (12) 可推得机器人能越过障碍的高度:

$$h \leq r \cdot \left(1 - \frac{N_1 \sin \Phi}{T - N_1 \cos \Phi} \right) \quad (13)$$

3.2.2 凹陷障碍

机器人在过凹陷障碍时, 其行走轮与障碍间的几何关系如图 8 所示。

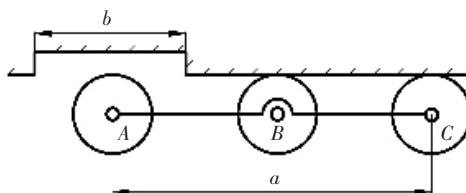


图8 跨越凹陷图

轮 A、B、C 布置于弹簧支撑臂上, 当机器人运动时, 若任意一组轮失去支撑时, 另外两组仍可支撑着管壁而不使整个支架落入凹陷内。如图 8 所示, 当轮 A 遇到凹陷而失去支撑时, 轮 B、C 仍然支撑着平行四边形机构而不使 A 落入凹陷内; 同理, 当轮 C 遇到凹陷而失去支撑力时, 轮 A、B 仍然支撑着平行四边形机构而不使 C 落入凹陷内。要使该机构跨越管道内的凹陷而不使整个支架落入凹陷内的条件为:

$$a \geq b \quad (14)$$

式中 a 为轮 A 与轮 C 之间的距离, b 为凹陷的长度。

4 仿真和实验

为证明上述分析过程的正确性, 对基于浮子模型理论的机器人进行了三维建模仿真分析, 如图 9 所示。仿真依据的管道基本条件为: 管道直径 $\Phi 1000\text{mm}$, 管道曲率半径 $R=15\text{m}$, 管道中水流速度为 10m/min 。利用本文所提的方法可确定机器人的几何参数为: 管道机器人长度 $L=1000\text{mm}$, 直径为 $\Phi 500\text{mm}$, 弹簧支撑臂杆长 $l=250\text{mm}$, 支撑臂上轮 A 与轮 B, 轮 B 与轮 C 距离均为 200mm 。

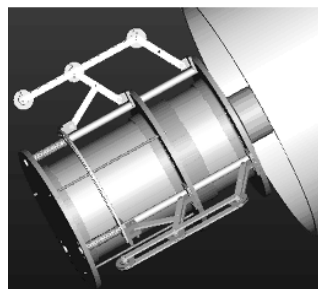


图9 三维仿真图

(下转第 44 页)

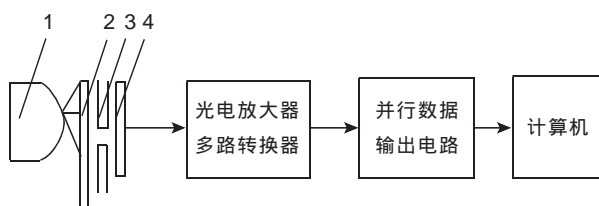


图 2 绝对式编码器原理图

1.发光二极管 ;2.光栅盘 ;3.狭缝 ;4.光电二极管矩阵

现有的回转体回转角度测量系统均采用旋转电位器作为传感元件,经反复的测量后,零点会发生严重的漂移,测量的准确度得不到保证,而且传感器磨损极快,使用寿命短,需经常更换,降低了工作效率。新型回转体回转角度测量仪所使用的 AL-01-1024 绝对式编码器有一个绝对零位的代码,不受停电、关机的影响,可准确地读出停电或关机时的位置代码。该编码器的使用寿命长,而且其角分辨率为 $360^{\circ}/1024$,测量系统的极限误差为 $15'$,因而大大提高了系统的可靠性、准确度和使用寿命。

用联轴器将被测的回转体与 AL-01-1024 绝对式编码器连接,回转体往复旋转时带动编码器旋转,其旋转时将所产生的 10 位二进制数字信号送入计算机,通过预先编写好的程序将测量的结果显示在计算机的屏幕上,即是测得的回转体的回转角。

本系统采用 Visual Basic 6.0 进行软件编程,建立了强有力的数据库应用程序,采用了动态链接库(DLL)技术,实现了 I/O 接口函数的动态调用。DLL 的代码在运行时动态加载,加载时 DLL 被映射到调用进程的地址空间中。这样就允许几个不同的进程在内存中共享 DLL,从而实现代码的共享及系统的优化。经过实际运行证明,采用 Visual Basic 6.0 所编制的程序运行状态良好、性能相当稳定,具有很强的实用性。

新型回转体回转角度测量仪经过一年多的实际运行证明,该系统运行稳定、运行情况良好,经过鉴定测量最大相对误差为 1.5%,与采用旋转电位器作为传感元件的回转体回转角度测量系统相比,其稳定性、使用寿命和准确度大为提高。测量结果数据对比见表 1。

表 1 新型、旧型回转体回转角度测量系统检测结果比较

标准值	旧型	新型
10°	9.8°	9.98°
20°	20.8°	20°
30°	29.6°	30°
40°	39.8°	40.1°
50°	49.2°	50°

新研制的回转体回转角度测量仪在实际运行中,其测量的准确度和系统的可靠性都有明显的提高,而且完全实现了自动化,具有广泛的推广价值。

- [1] 吴启贵. 汽车检测使用手册[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 1994.
- [2] 金篆芷. 现代传感器技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
- [3] 林贵军. 汽车转向系统计算机辅助测试[J]. 汽车研究与开发, 2000 (3): 11-13.

(上接第 42 页)

通过该模型的仿真分析,验证了机器人在管内的稳定性、自适应性以及通过弯管的能力。该仿真试验研究取得了令人满意的效果,证明了基于此种模型建立的管道内径在线检测机器人是可行的。

- [1] 许冯平, 邓宗全. 管道机器人在弯道中的通过研究[J]. 机器人, 26(2):155-160.
- [2] 朱敬德等. 在役石油管道检测机器人机械设计[J]. 上海大学学报(自然科学版), 7(1):57-59.
- [3] S.M.Ryew, S.H.Baik etc. Inspection Robot System with Active Steering Mechanism [J]. Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on intelligent Robots and systems: 1652-1657.
- [4] 邓宗全, 姜生元. 三轴差速器及其在管道机器人驱动系统中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2002,13(10):875-878.

作者简介:唐德威(1967-),男,博士,副教授,研究领域为特种机器人与控制技术,公共卫生安全技术与装备;宗德祥(1980-),男,硕士研究生,研究领域为机器人视觉、图象处理;邓宗全(1957-),男,教授,博士生导师,研究领域为机器人机构学、特种机器人与控制技术、宇航空间机构;张涛(1976-),男,博士研究生,研究领域为机械CAD及模拟仿真。