

文章编号: 1002-0446(2001)02-0127-05

微小管道涡流检测机器人系统研究*

钱晋武¹ 沈林勇¹ 程维明¹ 章亚男¹
杨建鸿² 李劲松² 叶 琛² 卞雪飞²

(1. 上海大学精密机械工程系 上海 201800; 2. 核工业无损检测中心)

摘要: 微小机器人系统 Tubot II 型是适应 20mm 管道内缺陷的自动探测系统, 它由一个两级计算机控制的管内移动机构携带涡流探头, 外加涡流分析仪和记录设备等组成. 本文专述 Tubot II 系统设计、关键技术和性能试验. 这套机器人系统经产品化开发后可望应用于诸如核电、化工、制冷和公用事业等的非磁性金属管道的定期检查.

关键词: 微小机器人; 管道检测; 涡流; 系统设计

中图分类号: TP24 文献标识码: B

A MICRO ROBOTIC SYSTEM FOR PIPELINE INSPECTION USING EDDY-CURRENT TECHNIQUE

QIAN Jin-wu¹ SHEN Lin-yong¹ CHENG Wei-ming¹ ZHANG Ya-nan¹
YANG Jian-hong² LI Jin-song² YE Chen² BIAN Xue-fei²

(1. Dept. Of Precision Mech. Eng., Shanghai University, Shanghai 201800;
2. Shanghai NDT Center for Nuclear Industry)

Abstract: The micro-robotic system, Tubot II, is developed for automatic inspection of flaws inside 20mm pipelines made of non-magnetic metals. It is composed of a micro-locomotion mechanism, a two-layer computer control system with a user-friendly graphics interface, an eddy-current sensor, a signal-analyzing instrument and a tape recorder. This paper presents the system design, the key technological components and the performance experiment of the robot. When commercialized, the robotic system could have potential applications in the regular inspection of pipelines, which will be widely used in nuclear power plants, chemical factories, refrigeration industry, and utility engineering.

Keywords: micro-robot, pipe inspection, system design, eddy-current

1 引言(Introduction)

细小工业管道在发电、制冷、航空、炼油、化工等行业普遍使用, 长期的介质腐蚀、机械振动以及制造缺陷的作用和影响, 会导致管道裂纹发生、管壁减薄或破裂. 定期检查, 及时发现缺陷及其扩展情况, 并采取相应的修补或堵塞措施, 是管道系统安全运行的重要保证. 由于时常存在有毒、有害介质或介质残余, 加上人工检查不可及性的障碍, 用机器人技术对细小管道进行检查、诊断、维护等作业成为人们关注的热点.

国内外细小管道机器人研究开发中, 主要进展在三个方面: 移动机构、缺陷探测、系统集成等. 在文献报道的几十个细小管道移动机构中, 管径为 98~25mm 不等. 但移动机构原理主要有四个类型, 即蠕动式^[1,2]、电磁振动式^[3]、压电驱动式^[4,5]和螺旋车轮式^[6,7], 此外还有水中游动等形式^[8]. 在细小管内检测技术方面, 先后有光学扫描传感器、微小 CCD 摄像头和多层涡流微传感器研究成功的报道^[9,10]. 带传感器的微小机器人系统仅有东京工业大学、日本 Denso 公司和日本东芝公司的微机器人^[6,5,11].

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目(863- 512- 9704- 26, 863- 512- 9804- 18).

收稿日期: 2000- 05- 07

为了在微小机器人研究中实现跨越式发展,我们在技术调研和用户接洽的基础上,针对核工业应用背景,开发了微小管道检查机器人系统 Tubot II. 正文中拟分别阐述系统设计、技术组成和性能试验等.

2 系统设计 (System design)

Tubot II 管道检查机器人的开发是在前期研究成果 Tubot I^[7]的基础上,以 20mm 内径非磁性金属管道中机器人移动、损伤检查和系统集成设计为目标.

Tubot II 机器人系统分为管内、管外两部分. 管内部分负责移动和原始信号拾取,分别由移动机构和涡流传感器完成. 管外部分负责机器人机构驱动和控制、人机界面、信号分析和处理等,分别由控制系统、涡流分析仪和信号记录仪完成.

实际作业中,操作人员在 PC 机的图形界面上选取机器人移动速度、管道形状、行走方向等. 机器人移动过程中,由涡流传感器拾取得管内缺陷信号通过屏蔽电缆传到信号分析仪,供操作人员实时观察,也可将信号存放于记录仪,以便离线重放.

Tubot II 机器人系统构成示于图 1.

2.1 移动机构

对于面向实用目的而开发的微小管道检查机器人系统,足够的承载能力和移动速度,适应一定的管径变化或圆度变化(由于制造引起),适应一定的弯曲管道、跨越由于管道长年使用引起的内壁表面缺陷(粗糙、剥落、结垢等)以及减少对检测传感器的信号干扰是至关重要的.

对移动机构系统设计的任务是要在众多的机构原理中精选一种可用在 Tubot II 的设计中. 在对现有机构的分析比较的基础上,我们设计了电机内置式螺旋轮机构作为 Tubot II 的移动机构.

Tubot II 机器人移动机构由螺旋轮驱动牵引机构 A、减速电机(或称电机/减速器组件)B、张紧轮姿态保持机构 C 等组成,见图 2.

螺旋轮驱动牵引机构 A、减速电机 B、张紧轮姿态保持机构 C 之间通过弹性元件连接. 螺旋轮驱动牵引机构 A 中有两组共 6 个驱动滚轮压紧在管壁上,驱动滚轮的回转轴线与管道轴线有一个角度 θ . 张紧轮姿态保持机构 C 中有 4 个张紧滚轮压紧在管壁上. 张紧滚轮的回转轴线与管道轴线垂直或接近

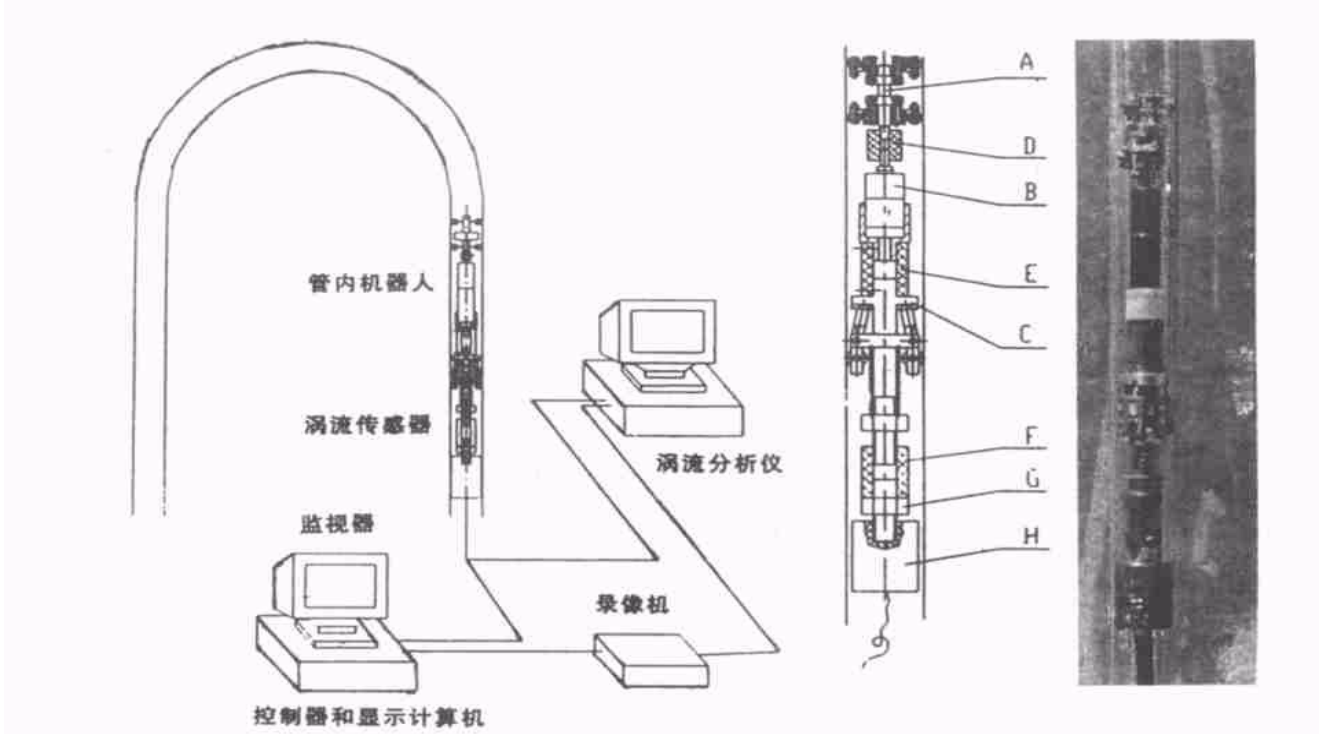
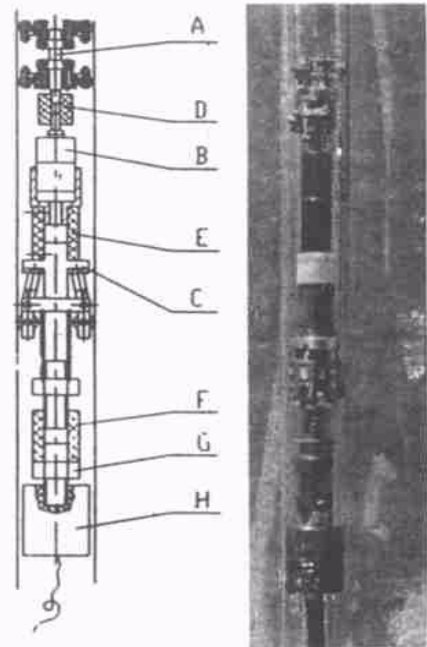


图 1 涡流检测微小机器人系统 Tubot II

Fig. 1 Micro robot system Tubot II with eddy-current sensor



(a) 结构简图

(b) 实物照片

图 2 电机内置式螺旋轮移动机构

Fig. 2 Screw wheel locomotion mechanism

表 1 Tubot II 机器人管内移动机构主要参数

Table 1. Major parameters for in-pipe robotic locomotion mechanism Tubot II

| 电机功率 (W) | 电机额定电压 (V) | 减速比 i | 螺旋角 θ | 滚轮直径 D (mm) | 自重 (g) | 载重 (上行) (g) | 上行速度 mm/m in | 水平速度 (进) mm/m in | 水平速度 (退) mm/m in |
|----------|------------|-------|--------------|-------------|--------|-------------|--------------|------------------|------------------|
| 1.5 | 12 | 64 | 10° | 5 | 74 | 203 | 655 | 1070 | 979 |

垂直,既能沿管壁灵活滚动,又能防止减速电机 B 的后部反方向转动。当减速电机 B 带动螺旋轮驱动牵引机构 A 转动时,各驱动滚轮组件将沿管壁上的螺旋线作滚动,从而带动整个细小管道内机器人移动装置沿管壁运动。通过改变减速电机 B 输出轴的转动方向,可以改变细小管道内机器人移动装置的移动方向。弹性元件能够弯曲,其作用是使细小管道内机器人移动装置能够通过弯曲管道。Tubot II 机器人移动机构的主要参数见表 1。

2.2 控制系统

Tubot II 机器人移动机构的控制系统由微电机的驱动控制单元和 PC 机控制两部分组成。在这个两级计算机控制系统中,PC 机控制用于处理高级的操作员指令,用户界面和系统状态监视。驱动控制单元根据机器人移动的要求,驱动和控制单元具有四档速度选择与电机正反转控制。四档速度由驱动电压控制,电压调节范围为 6~12 V,最大驱动电流 1A。电压具有稳压功能,从而实现稳速要求。该单元可以接受手动控制命令,也预留了与 PC 机通讯的功能,能接受 PC 计算机的控制命令。控制单元中还设置了包括电压分档指示灯和电机换向指示灯。

驱动和控制单元由一块 20 芯的 AT89C2051 微型单片机为中心,辅以其他接口电路构成。在该单元中,利用 AT89C2051 串行接口构成与 PC 机的串行通讯连接。该串行接口中,使用 MAX232 芯片实现 TTL 与标准 RS232C 串行接口的电平转换。驱动和控制单元中利用单片机的 P3 口构成手动控制命令的输入接口,利用 P1 口构成电压切换和电机换向的控制接口。电机驱动电压采用 LM317 芯片,配以数字控制电阻值切换电路构成调速和稳速功能。

驱动和控制单元的硬件框图如图 3 所示。

Tubot II 机器人的 PC 计算机控制系统软件用 VB5.0 写成,通过 RS232C 串行口与驱动与控制单元通讯,向驱动与控制单元发送操作命令,并从驱动与控制单元读取系统状态。控制软件为 32 位软件,操作系统为中文 Windows 9x 或西文 Windows 9x+ 中文平台,用户界面为中文。PC 计算机控制软件的功能包括:自检、行走和设置。

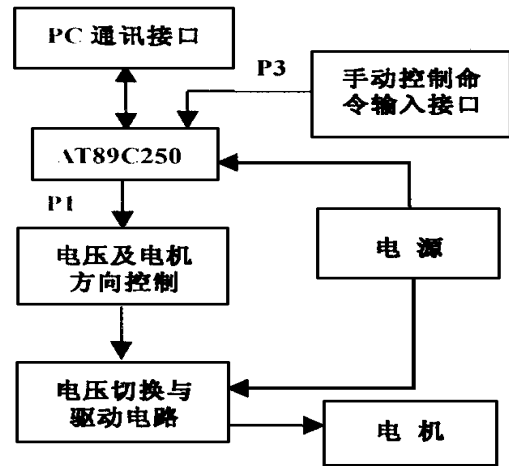


图 3 驱动和控制单元硬件框图

Fig. 3 Actuation and control block diagram

自检功能用于确认串行口是否准备好,与驱动和控制单元的通讯是否正常。若有问题,将弹出警告对话框。行走包括前进和后退。可根据不同类型的管道(如直管、弯管、U 形管、直角弯管等)和不同移动速度档(共 4 档)显示机器人在管道内的移动进程。移动到规定长度可自动停止,亦可随时手动停止。设置功能对本软件的基本功能(如串行口的模式等)进行设置,使用户更好地控制软件。串行口的模式的缺省模式为:波特率 2400bps,偶校验,8 位数据位,1 位停止位。

2.3 涡流检测装置

涡流检测装置由涡流探头和涡流分析仪组成。当交流电流流过携带在机器人移动机构上的涡流传感器的检验线圈时,产生交变磁场,磁场作用于管壁,在管壁中产生涡流,涡流产生一个与原来的磁场相反的交变磁场。两个磁场叠加会使线圈的阻抗发生变化,因此测量线圈阻抗,就可以得到包括缺陷在内的管子各种参数。所得到的信号是各种影响的综合反映,在检测时用多通道多频涡流仪取出所希望的缺陷信号,消除其它“干扰”信号,得到图 4 所示的李萨育图形。

涡流探头的外型尺寸为 $\varnothing 9.2 \times 25\text{mm}$,坯体材料为尼龙。线圈的设计采用自比动线圈(差动线圈)即两个相距很近的相同线圈,其优点是抑制缓慢变化的信号,对探头移动时震动的影响较小。线圈的具

体参数是: 每个线圈相距 1mm, 线圈的引出线用耐辐射的射频线, 终端用航空插头与 MIZ-40 涡流仪相接.

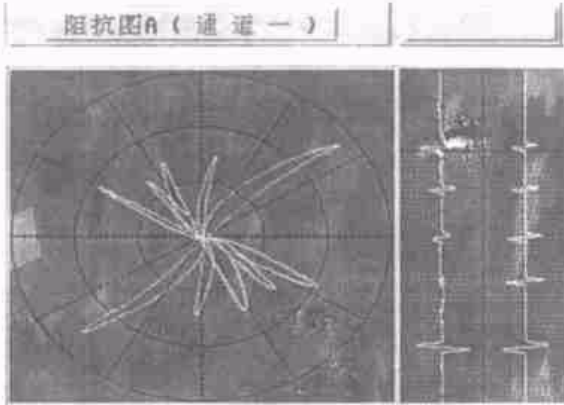


图 4 检测到的李萨育图形

Fig. 4 Lissajous patterns on eddy-current analyzer

3 实验结果 (Experiment results)

根据 ASME 对蒸发器管道在役检查的标准, 我们制作了带有人工缺陷的不锈钢样管. 其中的缺陷包括不同深度的平底孔、通孔和内、外环形槽.

涡流传感器在样管中进行标定, 产生一条可供比对的相对缺陷深度-信号相位关系曲线, 如图 5 所示. 对涡流探头在使用频率 1KHz~ 1MHz 下的试验结果符合 ASME 检测要求.

Tubot II 机器人工作时, 根据涡流传感器反映在涡流分析仪显示屏上的李萨育图形的相位(与图形的倾斜角度相对应) 与传感器标定曲线进行比对

后, 确定出管道中发现的缺陷的深度, 从而为决定要采取的维修措施提供依据.

需要指出的是, 当机器人的移动方向改变时, 在同一缺陷处传感显示的李萨育图形的的倾斜角(相位) 相差 180°. 为了避免比对检测中歧义的产生, 实际检测时或者规定沿一个确定方向移动检测, 或者利用不同方向移动的两条标定曲线分别进行比照.

机器人移动机构在几种不同粗糙度的管道中进行实测. 在带有深 1mm 宽 10mm 的槽、或 1~ 1.5mm 分布式突起障碍的管道中, 以及在由于弯曲或制造误差引起的管径不一致和有圆度变化的管道中, Tubot II 机器人移动机构通过性良好.

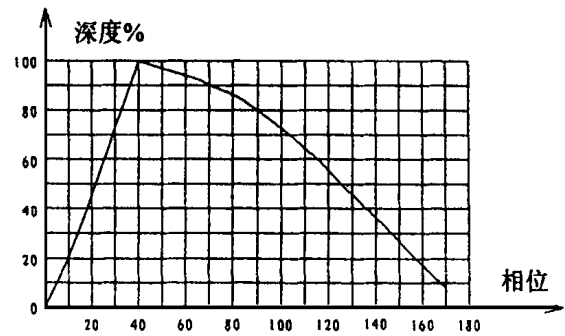


图 5 涡流传感器标定曲线

Fig. 5 Eddy current sensor calibration chart

管道涡流检测微小机器人系统 Tubot II 的综合参数和性能列于表 2.

表 2 Tubot II 机器人系统的综合参数和性能

Table 2 General parameters and specification of robot system Tubot II

| | | |
|------------------|-------------|---------------------------------|
| 管 内 部 分 | 自重(含传感器) | 92 g |
| | 直管上行额外载重 | 185 g |
| | 长度(含传感器) | × 202 mm |
| | 适应管径(含圆度偏差) | Φ20± 1 mm |
| | 弯管曲率半径 | < 495 mm |
| | 越障能力 | 内环槽: 深 1× 宽 10mm; 分布凸障: 高 1.5mm |
| | 直管上行检测速度 | 655 mm/m in |
| 管 外 部 分 | 信号拾取 | 差动涡流传感器, 信噪比> 3 |
| | 系统控制 | PC/AT89C2051 两级, 图形界面, 四速 |
| | 信号处理 | MIZ-40 多通道多频涡流仪 |
| | 电源要求 | 220V, 50H, 650W |

4 结论(Conclusion)

管道检查微小机器人系统样机 Tubot II, 将新颖的螺旋轮管内移动机构和圈形差动涡流传感器集成在微小尺寸水平上, 配以用户友好的 PC 计算机操作界面和先进的涡流分析/记录系统, 适合于 20mm 内径的非磁性金属管道中缺陷的自动检测. 与已有的管道机器人相比, 具有承载能力大、移动速度快、传感器信号容易屏蔽、适应一定的管径和圆度变化和可以跨越一定的障碍, 是一种有开发前景的微小管道机器人.

参考文献 (References)

- 1 Takahashi M, Hayashi I, *et al.* The Development of an In-pipe Microrobot Applying the Motion of an Earthworm. *Journal of Precision Engineering*, 1995, **61**(1): 90- 94 (日文)
- 2 Anthierens C, Ciftci A, Betemps M. Design of an Electro Pneumatic Micro Robot for In-pipe Inspection. *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1999, **2**: 968 - 972
- 3 Sun L, Sun P, Qin X, Wang C. Micro Robot in Small Pipe with Electromagnetic Actuator. *Proceedings of 1998 International Symposium on Micromechanics and Human Science*, 243- 248
- 4 Idogaki T, Kanayama H, Ohya N, *et al.* Characteristics of Piezoelectric Locomotion Mechanism for an In-pipe Micro Inspection Machine. *Proceedings of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Sciences*, 1995, 193- 198
- 5 Kawakita S, Isogai T, Ohya N, *et al.* Multilayered Piezoelectric Bimorph Actuator. *Proceedings of 1997 International Symposium on Micromechanics and Human Science*, 73- 78
- 6 Hayashi I, Iwatsuki N, Morikawa K. An In-pipe Operation Microrobot Driven Based on the Principle of Screw. *Proceedings of 1997 International Symposium on Micromechanics and Human Science*, 125- 129
- 7 Qian J, Zhang Y, Sun L, *et al.* Micro Robot for Small Pipeline Inspection Based on Screw Motion Wheels. *Journal of Shanghai University*, 2000 (待发表)
- 8 Fukuda T, Kawamoto A, Arai F, *et al.* Mechanism and Swimming Experiment of Micro Mobile Robot in Water. *Proceedings of IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 1994, 273- 278
- 9 Goto H, *et al.* Development of a Scanning Type Miniature Two-dimensional Image Sensor. *Journal of Precision Engineering*, 1997, **63**(2): 218- 222 (日文)
- 10 Hamasaki Y, *et al.* A Multilayer Eddy Current Micro Sensor for Nondestructive Inspection of Small Diameter. *Journal of Precision Engineering*, 1996, **62**(3): 359- 362 (in Japanese)
- 11 Suzumori K, Miyagawa T, Kimura M, *et al.* Micro Inspection Robot for In-pipes. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1999, **4**(3): 286- 292

作者简介:

钱晋武 (1962-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人机械学, 移动机器人技术, 微小机器人.