

文章编号: 1002-0446(2004)05-0385-06

## 油罐检测爬壁机器人结构与控制系统设计\*

田兰图, 杨向东, 赵建东, 赖庆文, 陈 曷

(北京清华大学精仪系制造所, 北京 100084)

**摘 要:** 研究智能爬壁机器人检测技术及其系统, 提出了机器人在大型垂直罐壁移动作业的路径规划方法, 并分析了抗倾覆机构的作用, 设计给出了机器人总体结构和控制系统. 系统以磁吸附爬壁机器人为运动载体, 采用非接触式无损检测技术, 并配备多种传感器, 具备较高的智能化水平. 现场实验表明, 该系统自动化程度高, 运动稳定可靠, 定位精度高, 大幅度提高了检测效率.

**关键词:** 爬壁机器人; 无损检测; 抗倾覆机构; 姿态控制

中图分类号: TP24

文献标识码: B

### Structure and Control System Design of a Wall Climbing Robot for Oilcan Testing

TIAN Lan-tu, YANG Xiang-dong, ZHAO Jian-dong, LAI Qing-wen, CHEN Ken

(Institute of Manufacturing Engineering, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The testing technology and the system of intelligent wall climbing robot are studied in this paper. A path planning method for motion on vertical walls is presented, the function of the anti-upset device is analyzed, and the general structure and control system is designed. Its main body is a wall climbing robot using permanent magnetic tracks. A non-contact NDT (non-destructive testing) technology and various sensors are applied to this robot, which give it high intelligence. Field experiments indicate that the equipment is in highly automatic level. It can move stably, has a high localization precision, and greatly improves the efficiency of oilcan testing.

**Keywords:** wall climbing robot; non-destructive testing (NDT); anti-upset device; attitude control

#### 1 引言 (Introduction)

油罐是石化企业中最常见的储存设备, 由于压力的作用以及雨水和油品的侵蚀, 罐壁可能产生凹坑、裂纹、内部孔洞等缺陷, 这些缺陷不仅会造成油品泄漏, 甚至可能引起火灾, 因此必须定期进行检测. 目前, 对油罐的检测均由人工实现, 需搭建脚手架, 效率很低且危险性高. 随着石化工业的迅速发展, 企业对检测技术的要求也越来越高, 研制自动化检测设备势在必行. 鉴于油罐检测任务的特点, 自动检测系统需要着重解决如下一些关键技术:

(1) 研制可靠的运动载体, 能够按照预先设定的路径携带检测探头遍历整个油罐内表面, 并保证一定的精度;

(2) 系统体积小、安装调试方便、易于操纵、检

测效率高、定位精度高;

(3) 采用的检测方法不能对油罐壁造成损伤, 且适合于对金属平面作高速自动扫查.

清华大学机器人与自动化实验室研制的大型油罐自动检测系统 TH Climber I 以磁吸附爬壁机器人为载体, 将涡流检测技术应用于油罐检测, 很好地解决了这一问题. 与常规的无损检测设备相比, 该系统引入了配有多传感器系统的智能机器人, 在检测灵活性和可靠性上有不可比拟的优势; 此外, 采用涡流检测技术能够在检测探头不与油罐壁面直接接触的情况下, 对表面或近表面缺陷进行探测, 从而为探头的高速运动提供了可靠保障. 现场实验表明, 该系统智能化程度高, 运动稳定可靠, 大大提高了油罐检测的效率.

## 2 总体结构与关键部件 (General structure and key components)

### 2.1 总体方案与机械结构

为了对大型油罐的整个内壁进行自动检测,油罐检测爬壁机器人应具备3个方面的基本功能,即无损检测、吸附和运动。

常用的无损检测技术有磁粉检测<sup>[6]</sup>、射线检测<sup>[7]</sup>、超声波检测<sup>[8]</sup>、涡流检测<sup>[9]</sup>等。在这些检测方法中,涡流检测不需要附加机构和成像底片、探头和壁面不需接触,因而尤其适用于对平直壁面进行连续快速扫查。

爬壁机器人的吸附方式<sup>[1~4]</sup>可以采用真空吸附、电磁吸附、永磁吸附、推动力吸附等。相对于其它吸附方式,永磁吸附具有吸附力大、受表面状况影响小、系统意外断电不影响吸附力等优点。油罐壁为钢制材料,表面多有锈迹和油污,且高度很大,因而非常适合于应用永磁吸附。

爬壁机器人通常采用的运动方式<sup>[1~4]</sup>有车轮式、履带式、足脚式、框架式等。其中履带式爬壁机器人<sup>[5]</sup>吸附力强、结构简单、控制方便、运动速度较快,优点比较明显,应用最为广泛。

综合分析油罐检测任务的实际需要和现场条件,采用履带式永磁吸附爬壁机器人,并配以涡流检测方式是最为实际和可靠的方案。

依据此总体方案所设计的机器人本体结构如图1所示。

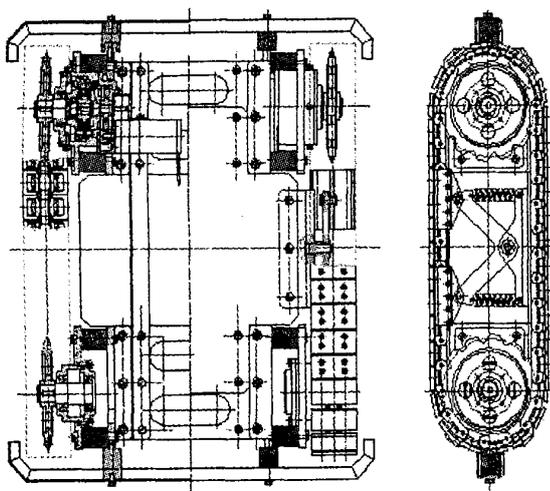


图1 机器人本体结构

Fig.1 Structure of the robot body

本体左右侧各有前后两个带轮,分别与装有永磁体块的履带啮合,构成运动部件。机器人采用后驱

动方式,也即以两个后轮(图中为上方两个轮)为主驱动轮,它们分别由一台直流伺服电机通过谐波减速器驱动。在本体正对壁面一侧,装有涡流检测组件,该组件通过直流小电机和同步带机构带动涡流探头在垂直于机器人运动路线的方向上往复移动,换向动作靠继电器和行程开关实现。

此外,为完成自动检测任务,爬壁机器人必须具备一定的智能,这包括自动纠正运动路径的偏差、自动识别本体所处的位置(主要是判断本体是否运动至罐顶或罐底)等。为了实现这些功能,机器人需要安装多种传感器,如表1所示。

表1 机器人传感器

Table 1 Sensors of the robot

传感器	厂商	作用	性能描述
倾斜计	AGI (美国)	监测机器人姿态偏角	测量范围: $\pm 25^\circ$ 精度: $0.01^\circ$
光电接近开关	浙江洞头	判断本体是否到达罐顶或罐底	测量距离: 10cm
CMOS摄像头	台湾百特	实时显示机器人工作环境	无线传输 红外夜视功能

### 2.2 抗倾覆机构

机器人在侧壁运动时,要跨越焊缝和一些不规则的表面凸起,很容易在重力作用下剥离壁面。为了避免这种现象,在机器人两侧分别安装了一条支撑杆,如图2(b)所示。支撑杆的末端安装有支撑轮。这套机构即为抗倾覆机构,其作用可以通过图2来分析。图中, $G$ 为机器人及其负载的总重量, $M$ 为履带接壁段吸附力的等效集中力, $f$ 为壁面对履带接壁段摩擦力的等效集中力, $N$ 为没有安装抗倾覆机构时壁面对履带接壁段支持力的等效集中力, $R_1$ 和 $R_2$ 分别为安装抗倾覆机构以后壁面对履带接壁段和支撑轮支持力的等效集中力, $L$ 为前后带轮的中心距, $H$ 为机器人重心与壁面间的距离, $S$ 为后带轮与支撑轮的中心距。

为了比较安装抗倾覆机构前后机器人所能提供的最大抗倾覆力矩,假设两种情况均处于翻转临界状态,此时履带接壁段所受壁面的支持力呈三角形分布<sup>[10]</sup>。显然,图(a)可以提供的最大抗倾覆力矩为:

$$T_{R1 \max} = M \frac{L}{6} \quad (1)$$

而对于图(b),抗倾覆力矩可以表达为:

$$T_{R2} = R_1 \frac{L}{6} + R_2 \left[ \frac{L}{2} + S \right]$$

$$= R_1 \frac{L}{6} + (M - R_1) \left| \frac{L}{2} + S \right|$$

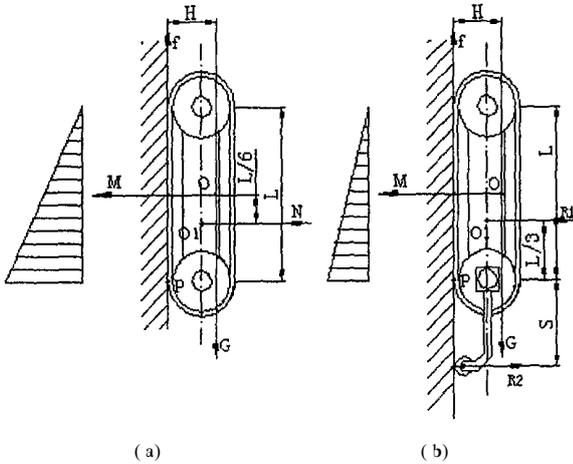


图 2 抗倾覆机构分析  
Fig.2 Analysis of the anti-upset device

当机器人翻转趋势加剧时,上述  $R_1$  将减小,同时  $R_2$  增大.这时,根据抗倾覆机构支撑轮与轮轴的连接方式不同可以分两种情况来讨论.

(1) 铰链连接

这种情况下,支撑轮可以自由旋转,无法为机器人本体提供阻动摩擦力.因此  $R_1$  不能小于  $G/\mu$ ,否则机器人将沿壁面下滑,其中  $\mu$  为履带表面与壁面的摩擦系数.若设  $S = L/2$ ,则最大抗倾覆力矩为:

$$\begin{aligned} T_{R2\max} &= \left| M - \frac{5}{6} \frac{G}{\mu} \right| L \\ &= M \frac{L}{6} + \left| M - \frac{G}{\mu} \right| \frac{5L}{6} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 固定连接

这时,支撑轮不能转动,可以提供抵抗重力作用的摩擦力,假设支撑轮与壁面之间的摩擦系数也为  $\mu$ ,则无论  $R_1$ 、 $R_2$  怎样变化,总的摩擦力是恒定的,且总能保证机器人不下滑.当  $R_1 = 0$  时,壁面的全部支持力都作用在支撑轮上,抗倾覆力矩最大,仍设  $S = L/2$ ,有:

$$T_{R2\max} = M \left| \frac{L}{2} + S \right| = ML \quad (3)$$

是未加抗倾覆机构时的 6 倍.此外,从上述两种情况的对比我们还可以得出结论:抗倾覆机构的支撑轮与轮轴固定连接时,具有更好的抗倾覆能力.

### 3 路径规划 (Path planning)

路径规划主要是指对机器人在圆柱形油罐侧壁运动方式的规划.可能的路径方案有两种:螺旋上升式和上下往复式.对两种方案的分析表明:螺旋上升式运动具有连续的路径、控制简单、检测效率高,但

累积误差比较严重,容易造成漏检且不易对机器人本体和缺陷进行定位;而上下往复式运动则恰好相反.应用于油罐检测时,更重要的是能够保证检测和定位的精度,而不是速度,因此上下往复式相对较优.上下往复运动时,相邻路径线之间应错开约一个车宽的距离,采用图 3 所示的方式来实现.

图中,初始状态下机器人竖直向上运动,到达罐顶时,安装在机器人顶部的光电开关感应到罐顶,输出高电平从而触发自动反向中断,通过两个连续的转弯实现路径线之间的横向移动.为了保证机器人运动平稳,两段转弯路径线应该相切,一种简单的方法是用两段相切的圆弧路径来实现.其中,  $B$  为机器人宽度,  $R$  为转弯半径,  $\phi$  为两个转弯过程切换时的姿态角,  $V_L$ 、 $V_R$  分别为左右轮质心线速度,  $\delta X$  和  $\delta Y$  分别为调整过程的横向和纵向移动量.

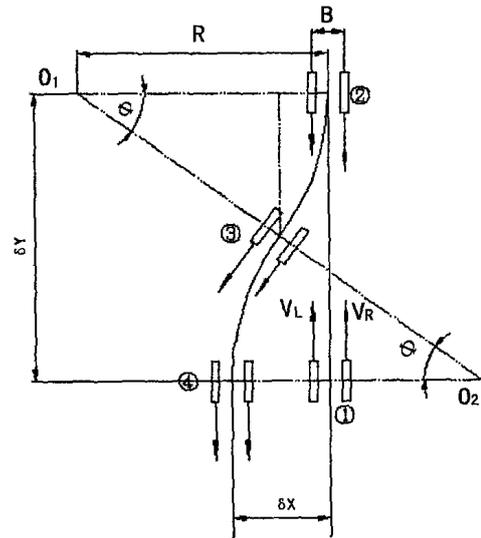


图 3 机器人的路径规划  
Fig.3 Path planning of the robot

整个换向动作控制过程可以描述为:

- (1) 机器人到达罐顶,光电开关输出电平翻转,触发中断;
- (2) 驱动轮反向,并改变左右轮速度大小,走第一段圆弧路径,直至偏角达到  $\phi$ ;
- (3) 改变两轮速度,走第二段圆弧路径,直到偏角为 0,此时即已实现  $\delta X$  的移动量;
- (4) 驱动轮反向,向上运动  $\delta Y$ ,补偿上述过程中纵向移动造成的漏检;
- (5) 驱动轮再次反向,退出中断子程,机器人向下运动.

若机器人到达罐底,控制过程与上述相似.

从图中几何关系可以得到控制参数:

$$\frac{R + B/2}{R - B/2} = \frac{n_2}{n_1} = k \Rightarrow R = \left| 1 + \frac{2}{k-1} \right| \frac{B}{2} \quad (4)$$

$$\frac{\delta X}{2} = R(1 - \cos \phi) \Rightarrow \phi = \arccos \left| 1 - \frac{\delta X}{2R} \right| \quad (5)$$

$$\frac{\delta Y}{2} = \sqrt{R^2 - \left| R - \frac{\delta X}{2} \right|^2} \Rightarrow \delta Y = \sqrt{\delta X(4R - \delta X)} \quad (6)$$

式中,  $n_1$ 、 $n_2$  为两轮转速,  $k$  为二者之比. 由以上 3 式, 首先根据实验和理论分析确定转弯半径以及两轮转速, 然后由  $\delta X$  的限定值计算出转角  $\phi$  以及纵向移动量  $\delta Y$ , 最后编程实现上述的控制过程.

### 4 控制系统 (Control system)

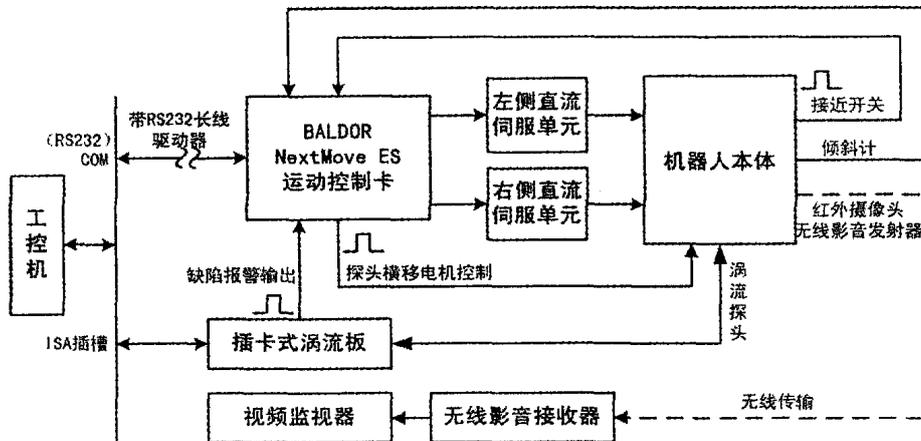


图 4 控制系统硬件结构

Fig. 4 Hardware structure of the control system

### 4.2 编程结构

下位机程序使用 BALDOR 公司开发的专用运动控制语言 Mint MT 编写, 用于实现电流环、速度环、位置环和姿态环的底层运动控制. 上位机程序是在 VB6.0 环境下开发的 GUI 界面, 用于发送初始参数、控制下位机程序进程、读取和显示状态. 开发时, 将调试编译好的 Mint MT 程序下载到控制卡的存储器内, 由上位机程序控制其进程; 上位机程序通过 Mint MT 的 ActiveX 控件与下位机程序接口, 并调用预置于控制卡中的运动控制库函数. 这一编程结构可以用图 5 来描述, 它具有执行速度快、资源利用率高优点.

图 6 所示为系统的 GUI 界面. 该界面可以分为上中下 3 个部分, 其中上部和中部为状态显示区, 所显示的信息包括机器人的位置、姿态和运动速度, 油罐的高度和直径, 缺陷位置坐标等; 下部为控制区, 通过相应操作可以在自动和手动两个控制模式之间切换, 调整机器人启停状态和运动速度, 启动涡流检

### 4.1 硬件结构

控制系统为上下两层体系结构, 上位机采用工控机, 为主控计算机, 用于参数初始化、任务规划和状态监控; 下位机采用运动控制卡, 负责底层的运动控制、信号采集和处理. 二者通过 RS232 通讯, 为了提高其传输距离, 在传输线上配置 RS232 增强器, 可以将 RS232 的传输距离提高至 1km 以上. 所采用的运动控制卡具有 CAN 总线、RS232 接口、DA、AD、步进电机输出、数字 I/O、码盘输入等输入输出接口, 为多传感器系统融合的基体. 系统的整体框图如图 4 所示. 该系统从功能上可以分为运动控制单元、涡流检测单元和摄像单元 3 个部分.

测程序和保存油罐缺陷分布图.

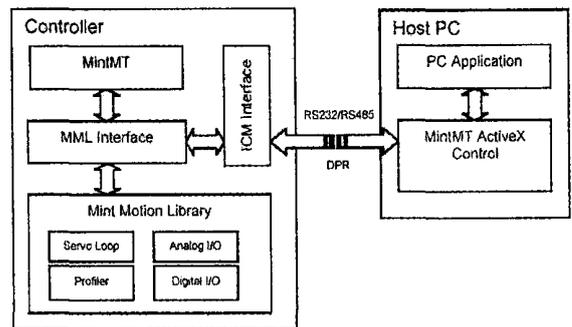


图 5 编程结构

Fig. 5 Software architecture

### 4.3 姿态控制算法设计

设本体两轮质心线速度分别为  $v_1$  和  $v_2$ , 瞬时转弯半径为  $R$ , 则本体的姿态角速度可以表达为:

$$\omega = \dot{\phi} = \frac{v_1 + v_2}{2R}$$

将 (4) 式代入上式, 并考虑到  $v_2 = kv_1$ , 以及令  $k-1$

=  $\Delta k$ , 得到:

$$\omega = \Delta k \frac{v_1}{B} \quad (7)$$

因此,本体角速度与  $\Delta k$  成正比.笔者设计的 PID 姿态控制器正是基于这一结论构建的,图 7 是其原理框图.

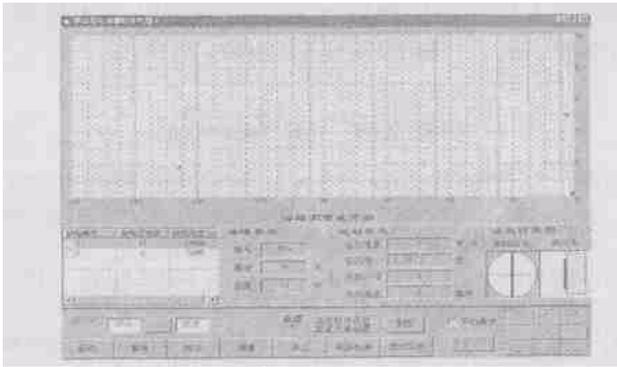


图 6 系统 GUI 用户界面

Fig.6 GUI of the system

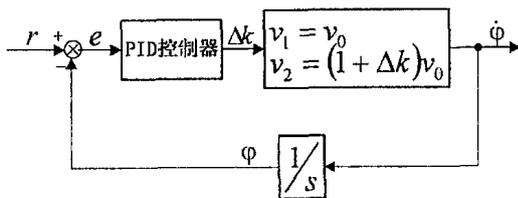


图 7 PID 姿态控制器

Fig.7 PID attitude controller

控制器参数初值由 Roberts P D 提出的归一参数整定法得到,然后根据实验效果进行调整.为了改善控制器的控制效果,笔者在控制器设计中采取如下一些改进方法.

第一,采用变速积分算法.其思想是在计算 PID 算式的积分项时,在误差值  $E(k)$  前面加上一个系数  $c$ ,  $c$  的取值满足下式:

$$c = \begin{cases} 1 & |E(k)| \leq B \\ \frac{A|E(k)| + B}{A} & B < |E(k)| \leq A + B \\ 0 & |E(k)| > A + B \end{cases} \quad (8)$$

$A$  和  $B$  可以根据实际的控制效果不断调整,笔者优化后的取值为  $A = 1^\circ$ 、 $B = 0.5^\circ$ .这一算法实现了用比例作用消除大偏差,用积分作用消除小偏差的理想调节特性,可以很好地消除积分饱和现象,大大减小超调量<sup>[11]</sup>.

第二,设置死区.也即当误差绝对值小于某一个很小的阈值时,不再对姿态进行调整,直到误差再次超出该范围时再重新启动 PID 控制.笔者设计中所

取阈值为  $0.05^\circ$ .这一算法避免了过于频繁的控制动作,从而消除了频繁动作造成的振荡<sup>[11]</sup>.

第三,设置控制量上限. PID 控制器的输出为  $\Delta k$ ,即两轮相对转速差.当误差值较大时,按照 PID 算式计算出的  $|\Delta k|$  也会较大,两轮转速相差较大.由于维持机器人吸附于壁面的吸附力很大,从而履带接壁段与罐壁之间存在较大的静摩擦力,车体很难灵活转向,如果两轮转速差比较大,容易造成卡死.为了避免这种现象,可以为  $|\Delta k|$  设置一个上限值  $\Delta k_{max}$ :

$$\Delta k = \begin{cases} -\Delta k_{max} & \Delta k < -\Delta k_{max} \\ \Delta k & |\Delta k| \leq \Delta k_{max} \\ \Delta k_{max} & \Delta k > \Delta k_{max} \end{cases} \quad (9)$$

### 5 实验与结论 (Experiment and conclusion)

基于上述设计和研究,研制了爬壁机器人样机 TH-Climber I,并在实验平台和油罐现场进行了大量的实验.图 8 显示了样机在油罐内运动的情况.

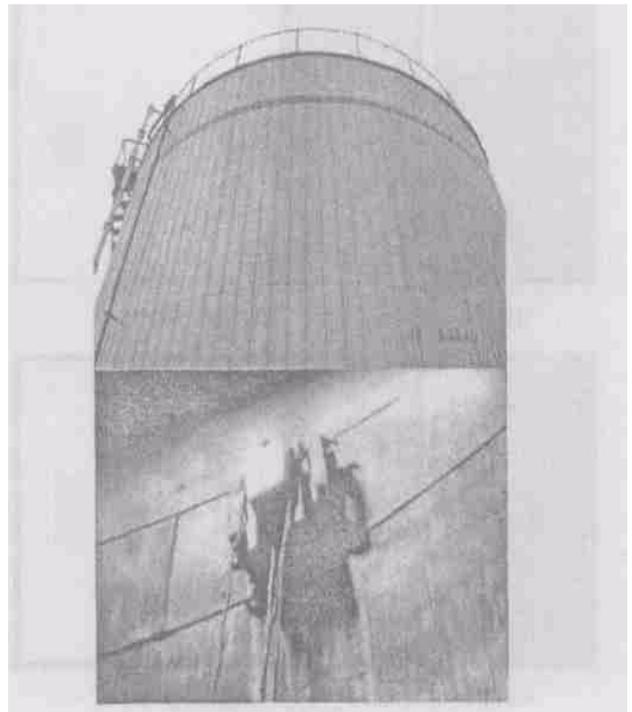


图 8 TH-Climber I 样机及其现场应用

Fig.8 TH-Climber I and its field application

图 9 中两图分别为自由运动状态和加入姿态调整后机器人姿态角随时间变化的曲线.可以看到,在自由运动状态下,机器人的运动误差存在随机性,对初始误差没有调整作用;加入姿态调整以后,机器人的初始误差得到迅速调整,进入稳态以后,其姿态角只在给定角度(这里为  $0^\circ$ )附近有微小变化.

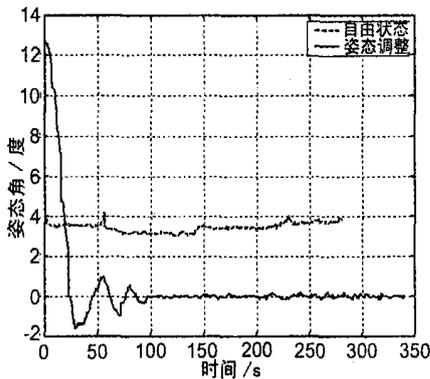


图9 姿态控制器实验效果

Fig.9 Experiment effect of the attitude controller

图10则为现场实验中典型缺陷的涡流检测信号图线,其中上侧两图分别为表面裂纹的实物图及其涡流检测信号,下侧两图为孔洞的实物及其涡流检测信号.检测结果表明,系统可以有效地检出各种壁面缺陷;同时,相对孔洞而言,涡流检测对表面裂纹更加敏感,检出率更高.

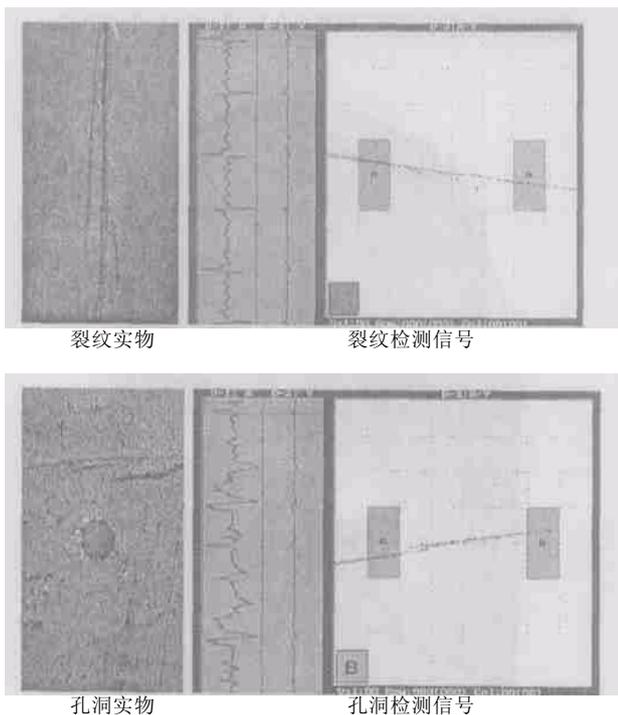


图10 典型缺陷及其涡流检测信号

Fig.10 Typical defects and their eddy signals

实验和现场应用都表明,TH Climber I 具有较高的运动速度、稳定性和定位精度:其最大运动速度可达  $8\text{ m/min}$ ,可跨越高  $10\text{ mm}$  以上的焊缝和表面凸起等障碍,角度误差可控制在  $\pm 0.2^\circ$  以内.系统配置的涡流检测仪可以在快速扫查过程中检测出宽  $0.5\text{ mm}$ 、深  $0.5\text{ mm}$  的裂纹和直径  $1\text{ mm}$  的孔洞.该智能机器人检测系统很好地满足了油罐自动无损检测的需要,具有广阔的发展前景和应用价值.

### 参考文献 (References)

- [1] Nishi A, Miyagi H. Wall-climbing robot using propulsive force of propeller[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 1991, 57(543): 3585 - 3591.
- [2] 刘淑霞,王炎,徐殿国,等. 爬壁机器人技术的应用[J]. 机器人, 1999, 21(2): 148 - 155.
- [3] 潘佩霖,韩秀琴,赵言正,等. 日本磁吸附爬壁机器人的研究现状[J]. 机器人, 1994, 16(6): 379 - 382.
- [4] 张越. 国内外壁面移动式机器人发展概况[J]. 唐山工程技术学院学报, 1994, 16(1): 27 - 31.
- [5] 潘焕焕,赵言正,高学山,等. 水冷壁爬壁机器人的本体结构设计[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(5): 7 - 10.
- [6] 美国无损检测学会.《美国无损检测手册》译审委员会. 美国无损检测手册(磁粉卷)[M]. 上海: 上海世界图书出版公司, 1994.
- [7] 刘德镇. 现代射线检测技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [8] 中国无损检测学会. 超声波探伤[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [9] 中国机械工程学会无损检测学会. 涡流检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [10] 龚振邦,汪勤蕊,陈振华,等. 机器人机械设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
- [11] 潘新民,王燕芳. 微型计算机控制技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

### 作者简介:

田兰图 (1980-), 男, 硕士研究生. 研究领域: 机电智能控制, 特种机器人, 爬壁机器人.

陈 恳 (1954-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 仿人机器人, 微操作机器人, 生物机器人, 机电一体化技术, PDM.