文章编号: 1002-0446(2005)03-0252-04

海底管道检测机器人自主缺陷定位的模糊控制研究

雷小军,付庄,曹其新,赵言正

(上海交通大学机器人研究所,上海 200030)

摘 要:针对全自主管道检测机器人对超长距离海底油气管道内壁缺陷的精确定位的难题,提出了一种基于 缺陷信息定位的模糊控制方法,并将其应用在海底管道检测机器人的智能控制器中. 仿真实验和模拟样机的现场 测试证明,该智能控制器定位准确,工作稳定可靠,满足了检测机器人在超长距离海底油气管道内全自主精确定 位的技术要求.

Fuzzy Control of Autonomous Defect Location for Submarine In-pipeline Inspection Robots

LEIXiao-jun, FU Zhuang, CAO Qi-xin, ZHAO Yan-zheng

(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: When the autonomous in-pipeline inspection robot is working in super-bog submarine oil transportation pipelines, it is difficult to locate the wall-loss defect of pipelines. To solve this problem, a design method of fuzzy controller based on wall-loss defect information is presented and applied to the intelligent controller of the autonomous in-pipeline inspection robot. Through the subsequent simulation experiment and the field test of the robot prototype, the intelligent controller is proved to be reliable and stable. And it can achieve precise location, and meets the technical requirements for the inspection robots on accurate defect location of super-long submarine oil transportation pipelines.

Keywords: submarine pipeline; defect location; intelligent controller; fuzzy control

1 引言(Introduction)

海底管道作为石油输送通道极其重要,但长时 间的运行磨损、设备的自然老化、地理和气候环境的 变化等因素都会导致管道泄漏.因此,为保证海底管 道正常运行,海底管道泄漏的在线检测是十分必要 的.对此,国外已做了大量的研究工作,取得了不少 成果.国内的研究工作则起步较晚,也取得一些进 展^[1~3].目前比较常用的管道检测方法是有缆检测方 式,通过缆线,由外部控制检测装置在管内工作.这 种检测装置的控制方法简单,但受制于缆线的重量、 拉伸强度和弯曲强度等因素影响,不适于海底管道 长距离的检测.为此,必须研制一种无缆自主检测装 置(或称无缆检测机器人)完成海底输油管道的长距 离检测工作,使之能够在管内连续检测 20km以上,

* 基金项目:国家 863计划资助项目 (2001AA602021). 收稿日期: 2004 - 08 - 10 完全自主地完成爬行、检测、定位工作.

目前对于管内自主机器人的定位主要有 GPS导 航定位和机器视觉自主定位两种^[4~5],但是,海底输 油管道具有管线长、线路埋藏深、管内油污严重等特 点,很难利用 GPS和机器视觉进行定位.因此本文从 分析控制系统和定位过程入手,利用管道缺陷检测 信息进行定位.

2 智能控制系统(Intelligent control system)

海底管道检测机器人控制系统采用时下流行的 基于 CAN 总线的现场分布式控制系统 EDCS (Field Distributed Control System)结构^{16~71}. CAN 总线即控 制器局域网技术 (Controller A rea Net,简称 CAN 总线 技术),它具有通信速率快,工作稳定可靠,组网形式 简单灵活等特点,十分适用于管道检测这种较恶劣 的工作环境.控制系统主要分为 4个部分,智能控制 单元、爬行驱动单元、检测单元、动力源单元,如图 1 所示.



图 1 控制系统结构总图

Fig 1 Block diagram of control system structure

其中智能控制器是整个检测机器人系统的核 心,负责与其余单元的通信、指令各单元协调工作、 对系统故障在线诊断、记录系统各个时段的工作状 况等.以下简要介绍智能控制器对各单元的控制.

2.1 运动控制

智能控制器向爬行驱动单元发出具体速度、加 减速命令,爬行驱动单元按收到的命令驱动电机,带 动整个机器人在管道内爬行,并定时向智能控制器 反馈电机转速值以及安装在电机轴上光电码盘检测 到的角位移数值.

2.2 检测定位控制

7

检测单元负责大量采集管道内壁信息并处理. 其检测器基于漏磁和超声原理设计,通过多个漏磁 和超声传感器采集大量管道内壁信息,并对这些信 息进行融合,分析处理,处理结果通过 CAN总线反馈 到智能控制器.若检测到缺陷,智能控制器指令检测 单元和爬行单元协同工作,进行后退、复检确认.若 确认为缺陷,则智能控制器控制爬行器将检测机器 人停住,使定位发射器对准缺陷中心位置,向海面维 修船发射超低频定位信号 ,完成精确定位. 检测机器 人完成这一连串动作的运动曲线如图 2所示.





2.3 电源控制

动力源单元使用高能量电池对各部分隔离供 电,由于电池是耗尽型能源,电量不足将会影响系统 正常工作,因此需要对电池电量进行实时监控,一旦 电量不足,动力源单元立即向智能控制单元报警.智 能控制器根据当前的任务、当前位置规划逃生路线, 关闭一些当前不必要的电源供应,如检测、定位,节 省电力,尽快爬出管道.

3 精确定位控制分析 (Control analysis of the accurate location)

为了准确检测缺陷并定位,我们将在线检测及 定位过程分两个阶段完成.

第一阶段借助于油压驱动检测机器人,利用漏 磁原理进行 20km以上管道的全程粗检,同时,通过 光电码盘和随动轮上的里程计的检测,智能控制器 可以得到缺陷位置信息;通过倾角仪,得到缺陷角度 信息.于是智能控制器将缺陷的特征信息,即长度、 深度、位置、角度,详细记录在大容量存储器(容量为 2G的 Compact Flash),待爬出管道做进一步的离线 分析.经离线分析后基本上能确定所存在的管壁缺 陷的大体位置及特征,其结果以数据库的形式保存.

第二阶段重点是精确检测和精确定位过程,完 成这一任务的工作过程如图 2所示.在第二次检测 之前,离线分析已经将第一次的检测结果进行了处 理,处理后的结果以路线图和缺陷特征数据库的形 式预装入智能控制器,路线图将第二次检测的路线 主要分为 7个工作区,分别是起动区 OA 段、免检爬 行区 AB 段、减速转换区 BC 段、检测区 CD 段、减速 停止区 DE 段、后退复检区 EH 段、精确定位区 HK 段.管道检测机器人被投放进入管道并开启后,管道 检测机器人自动开始动作,首先加速爬行到预定最 高速度 0.400m/s,在最高速度下经过免检爬行区,根 据光电码盘反馈回来的位置信息在进入预定缺陷的 大体位置范围 (即检测区)前 3m处开始减速爬行,速 度减至 0.160m/s,令检测装置开始检测.当检测到缺 陷信号结束时开始减速停止,准备后退复检.复检结 束后智能控制器自动将两次检测的结果与预装的粗 检缺陷特征进行对比,确认后进行目标设定,并开始 定位爬行,爬行速度 0.160m/s为了保证状态平滑转 换,采用斜坡加速规律,启动区 3 ±0.50m,减速转换 区 2 ±0.30m,减速停止区 1 ±0.20m,后退复检区的加 速段和减速段均为 1 ±0.20m,精确定位区加速段 1 ± 0.10m.

254

为了准确定位在缺陷中心位置,定位过程采用 位置 PD 控制,同时必须对检测探头到定位装置上 定位发射点的距离进行补偿,设定位爬行距离为 S_p, 机器人的检测探头到定位装置上定位发射点的距离 为 S_e,管壁缺陷纵向长度为 S_a,则有:

 $S_{p} = S_{e} + \frac{S_{d}}{2}$ $u_{k} = K_{P} e_{k} + K_{i} e_{j} + K_{d} (e_{k} - e_{k-1}) + S_{p}$

由于管道缺陷具有很大的不确定性,因此定位 点的时变性和非线性都很大.在这种情况下,使用常 规的 PD,依靠一两套整定好的参数显然远远不能满 足系统工作要求,必须对 P、I D系数按一定模糊规 则进行实时优化,才能达到较理想的控制效果^(7~10).

首先建立从 J 点到 K 点的模糊 PD 位置控制系 统模型, 如图 3所示.



图 3 模糊控制系统简化框图

Fig 3 Block diagram of the fuzzy control system

定位开始前,智能控制器先综合光电码盘和里 程计反馈的当前位置信息,处理后得到当前位置信 息,计算得缺陷中心的目标设定值 X₀.定位开始后, 由于进入了缺陷范围,因此可以利用此时缺陷检测 传感器检测到的管壁特征信息,与前两次检测到的 管壁特征信息对比得到一个位置信息 x_3 .此时光电 码盘反馈的位置信息为 x_1 ,里程计反馈的位置信息 为 x_2 ,3个位置信息经过融合处理得到 x,令 x与目 标设定值 x_0 对比,得到的位置偏差 x作为输入变 量,输出变量是模糊控制系统的输出速度 v.

为此可用模糊语言描述: X的论域为 [0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5], 对应的模糊语言集 { zero, very small, small, moderate, large, very large}; V的论域为 { 0, 0.040, 0.080, 0.120, 0.160, }, 对应的模糊语言集 { zero, very slow, slow, optimal, fast, very fast}.

表 1 模糊规则表

Table1 Fuzzy rules table

X	Zero	Very small	Small	Moderate	Large	Very large
V	Zero	Very slow	Sbw	Optimal	Fast	Very fast

由此产生模糊规则表,并根据经验得到 6条 "IE...THEN... 的推理规则.由此得到输入输出隶 属函数如图 4所示.



Very Optimal Very 1 Zero Slow Slow Fast Fast 0 0,7 0,11 0,135 0,15 0,16

(b) 输出变量隶属函数图 4 输入输出变量隶属函数



4 仿真及实验(Simulation and experiment)

为了验证定位方法的有效性,对模糊控制器进 行了大量的仿真实验,以验证管道检测机器人在不 同坡度、不同停车距离、不同干扰的情况下的定位精 度.管道的坡度和弯曲度不同,机器人行进的摩擦阻 力不同,因此,坡度采用相对应的负载电流来描述, 管道中的路况 (颠簸程度)用负载上的随机噪声来表 示.机器人爬过弯管时,负载与坡度、进入弯道 A 段 的长度 x之间有个函数关系,即 $F_a = f(, x)$. 经力学分析得:

$$F_d = G[(f\cos - \sin) \frac{x}{L} + \frac{(L-x)f}{\cos - k\sin}]$$

其中, f为管壁摩擦系数, L为机器人总长度, G为机器人总重量, 此处把机器近似看成纵向均重的物体. 由于海底输油管道单段管都较长, 远大于缺陷长度, 因此, 对某一段缺陷中心定位时, 这段缺陷坡度 不会变化, 因此 F_d 可抽象为只与 x有关的线性函数, 即 $F_d = kX + F_0$.

采用 Matlab6.1进行仿真,结果如图 5所示.实验 参数:采样频率 2MHz,恒定负载 4A,干扰噪声 1mm / Hz,为 15 °

对管道检测机器人模拟样机的实验证明(实验 照片如图 6所示),在较恶劣的工作条件下,如强烈 颠簸、大坡度、超长距离等情况,也能够快速准确地 定位,定位误差在 0.10m以内,满足工程需要.



图 5 定位仿真结果 Fig 5 Result of location simulation



图 6 海底管道检测机器人模拟样机

Fig 6 The prototype of the sub-seabed in-pipeline inspection robot

5 结论 (Conclusion)

不同于传统的视觉和 GPS定位,本文提出了一种直接利用缺陷检测信息的辅助定位控制方法,将 模糊推理和 PD结合起来解决了海底油气管道检测 机器人的自主定位控制问题,信息提取方便,定位快 速、准确,实用性强,对于一般管道检测装置的控制 器研究也具有普遍意义.研究过程中我们发现,有的 弯管既有坡度同时又有弯度,如果缺陷位于这种弯 管段,精确定位的复杂性将大大增加,如何实现在这 种复杂弯管处的精确缺陷定位,还有待进一步的研 究.

参考文献 (References)

- [1] 王占山, 张化光, 冯健,等. 长距离流体输送管道泄漏检测与定位 技术的现状与展望[J]. 化工自动化及仪表 2003, 30(5):5-10.
- [2] Upda L, Mandayam S, Upda S, et al Development in gas pipeline inspection technology [J]. Material Evaluations, 1996, 54 (4): 467
 - 471.
- [3] Cordell J L. The latest developments in pipeline pigging world-wide[J]. Pipes and Pipeline International, 1994, 8(7): 9 16.

- [4] 张晓华, 殷德军, 邓宗全. 一种基于视觉模糊推理的管道机器人 自主定位控制方法 [J]. 微计算机信息, 2002, 18 (2):10-11.
- [5]夏海波,张来斌,王朝晖.基于 GPS时间标签的管道泄漏定位方法 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(3):161 172.
- [6] 邬宽明. CAN 总线原理和应用系统设计 [M]. 北京:北京航空航 天大学出版社, 1996.
- [7] Curtiss, P S, Kreider, J F. Recent developments in the control of distributed electrical generation systems [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 8 (125): 352 - 356.
- [8] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论 [M]. 哈尔滨:哈尔滨 工业大学出版社, 1998.
- [9] Hu B-G, Mann G K I, Gosine R G Non-linearity variation analysis of one-input fuzzy PD controllers[A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. San Diego, USA: IEEE, 1998 1916 - 1921.
- [10] Sujitjom S, Puangdownreong D, Prempeaneerat Y. Real-time fuzzy PD-controller for motor speed regulation [A]. Proceedings of the 19th lasted international Conference on Modeling, Identification, and Control Innsbruck [C]. Austria: 2000. 76 - 81.

作者简介:

雷小军 (1977-), 男. 研究领域:海底输油管道检测机器人 智能控制.