

## 海底管道检测机器人智能控制器的研制<sup>①</sup>

王忠巍<sup>②</sup> 曹其新 栾楠 张蕾

(上海交通大学机器人研究所 上海 200240)

**摘要** 设计了以嵌入式 PC104 工控机为核心的海底管道检测机器人智能控制器,以嵌入式 Linux 操作系统作为该智能控制器的软件运行平台,根据控制任务的实时性和计算量的不同,开发的控制程序分别运行于系统实时内核和原 Linux 内核,满足了控制系统具有实时性、多任务并行处理等要求。详细介绍了管道检测机器人 CAN 通信应用层协议的定制规则,通过把报文的内容类别信息和节点信息纳入数据帧标识符来规定报文优先级,保证在多个数据帧同时竞争总线时,优先传送紧急程度高的报文。采用 RS232-CAN 协议转换器构建了具有检验智能控制器功能的试验平台,方便了控制程序的设计与验证。在实验室模拟油气管道台架上和工程现场的应用结果表明,该智能控制器实现了各种工况下的控制决策等功能,达到了设计要求,所设计的通信协议满足系统通讯要求。

**关键词** 管道检测机器人,智能控制器,嵌入式 Linux, CAN 总线

### 0 引言

在海洋油气资源开发中,海底管道是实现石油、天然气远距离运输的最快捷和最经济的手段。但海底管道会受到海底表层地基不稳定、介质腐蚀和海浪冲击等因素的影响,使其容易产生缺陷和损伤,缺陷积累到一定程度就会发生油气泄漏,这不仅影响海上油田的正常生产,还会造成海洋环境污染。为确保海底管道的安全运行,需要对其进行定期维护,海底管道检测机器人是实现海底油气管道定期维护的理想设备,许多国家投入巨资进行研发<sup>[1-3]</sup>,有的已开发出能自身携带动力源,实现自主控制,作业距离在数公里量级的机器人。我国对陆上油气管道检测机器人的研究开发工作有十多年的历史,已经处于实用阶段<sup>[4-6]</sup>,但是所研制的检测机器人均采用拖缆供电、人员操控作业,且最大检测距离不超过 1km,无法满足检测海底长输油气管道的需要,为此国家 863 计划支持了“海底管道内爬行器及其检测技术研究”项目。本文报道的智能控制器是该项目的关键技术之一。智能控制器是管道机器人的控制中枢,它以控制器局域网(controller area network, CAN)为纽带,并作为上位机实现与机器人其它单元的通信功能,各单元以信息帧形式实时反馈所处状态,从而它据此做出行动决策,自主控制机器人完成

管道缺陷检测和缺陷定位任务。

### 1 智能控制器的设计

为实现管道检测机器人长时间、长距离在环境恶劣的石油管道中可靠运行,智能控制器除在正常状况下控制机器人的前进、后退等基本的动作外,还需具备故障诊断的功能,即能够综合评价来自机器人各单元的信息,针对故障状况采取适当的策略,并能够保存机器人的运行状态信息,作为评价和改进控制策略的依据,因此智能控制器需集成相关控制技术、多任务并行处理、CAN 通讯、数据采集与保存等功能。

#### 1.1 智能控制器的系统结构

为了贯彻智能控制器要满足计算能力强、可靠性好、方便程序开发调试、体积小、扩展标准插口模块容易等要求的设计原则,我们采取了以下措施:(1)采用 PC104 嵌入式工控机作为系统主机,其主要特点就是采用的低功耗嵌入式 CPU 在标准的 90mm × 96mm 面积内几乎集成了 PC 机所有功能,同时选用 PC104 架构的 DC/DC 电源模块和 CAN 通讯模块,使得控制器结构紧凑、电气兼容性好;(2)考虑到金属腐蚀严重的管道内壁、焊缝处的焊瘤在阻碍机器人行走时会伴随着强烈振动,普通硬盘不适用于这样的恶劣工况,因此选用容量为 4GB 的工业级 CF

<sup>①</sup> 863 计划(2001AA602021)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1978 年生,博士生;研究方向:管道机器人智能控制技术和嵌入式控制技术;通讯作者, E-mail: wangzw@sjtu.edu.cn (收稿日期:2007-06-15)

卡作为存储介质;(3)采用配有重锤的单轴倾角仪监测机器人与水平面的倾斜角度,从而监测电动爬行器的功率变化是否正常,其量程为  $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ ,以串行接口 RS-232 标准输出;(4)为智能控制器扩展了 USB 接口无线网络模块,它与现场调试电脑的无线网卡构成 Ad-hoc 模式无线网络,进行现场调试

时,无线通讯系统可以随时把在个人计算机上开发的程序发送到机器人智能控制器上执行和调试,并且能实时监控程序在机器人上的运行状态,极大地提高了软件开发的效率。图 1 展示了管道机器人各单元间的电气联接关系及智能控制器的硬件结构。

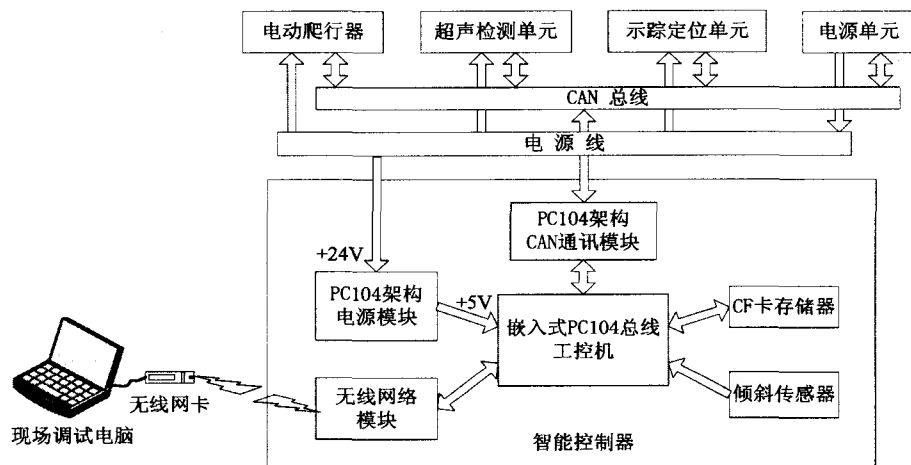


图 1 智能控制器的系统结构框图

### 1.2 嵌入式 Linux 在智能控制器中的应用

由前述可知,智能控制器需要实现复杂的功能,为了减轻相应控制软件的开发难度,采用嵌入式系统作为嵌入式控制软件的运行平台,使得控制软件的设计可以抛开具体的硬件和资源管理的细节,而专注于具体应用功能的实现。目前国际上比较有影响力的几种嵌入式操作系统是: VxWorks、 $\mu C/OS$ 、Window CE、嵌入式 Linux 等。因为嵌入式 Linux 有多种优点,如具有完善的开发平台和函数库,可免费使用,可开放源代码,可根据需要定制内核,对网络支持性好,已得到生产厂商广泛支持等,因此,本研究采用嵌入式 Linux 系统作为智能控制器软件的运行平台。

所定制的嵌入式 Linux 是由微 Kernel(内核)及一些根据智能控制器需要定制的模块组成。Linux 微内核只具备内存管理、进程管理和定时器服务的功能,所需的网络服务和文件系统以模块形式置于微内核的上层, CAN 通讯模块驱动程序、无线网络模块和其它部件在运行时作为可加载模块被添加到内核。

Linux 作为一种类 Unix 操作系统,存在不适合实时应用的缺点,要将 Linux 用作实时嵌入式系统,必须使之具有更好的实时性。一个较好的解决方案是实现双内核系统<sup>[7]</sup>,即在原来的 Linux 内核上增

加一个实时内核——RTLinux,两个内核共同工作。智能控制器所采用的支持实时任务的 Linux 双内核方案结构如图 2 所示,其中 RTLinux 内核主要为实时任务提供硬件的直接访问和完成紧急任务,例如, CAN 通讯的中断处理、对于紧急事件的消息反馈等,而显示、记录机器人状态的操作和实现复杂的智能控制算法可在原 Linux 内核中执行。改进后的系统运行于两种模式下: RTLinux 模式和非实时 Linux 模式。非实时 Linux 内核作为 RTLinux 模式下的一个低优先级任务运行,这样,高优先级的实时任务就能对非实时 Linux 模式进行抢先。该方案节省实时系统的计算资源,提高了实时系统的可用性,保障智能控制器及时响应其它单元的反馈消息,并对紧急事件做出处理。

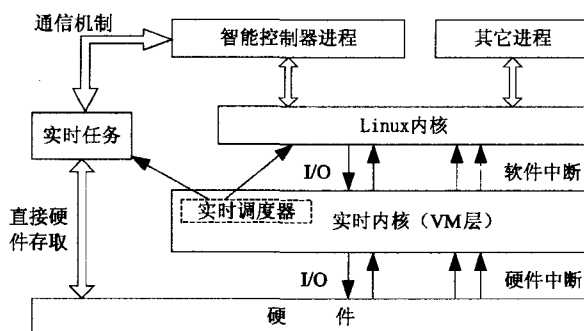


图 2 支持实时的 Linux 双内核方案结构图

## 2 CAN 总线通信协议的设计

CAN 通信协议对层的定义与开放系统互连参考模型(OSI)一致,CAN 定义了物理层、传输层和对象层,相当于 OSI 模型的最下面的两层:物理层和数据链路层。应用层通过不同的上层协议和物理层连接<sup>[8]</sup>,因此在开发基于 CAN 总线的管道检测机器人控制系统时,需通过对 CAN2.0 规范的分析并根据需求,在数据帧的标识符和数据场基础上定制总线

应用层协议。

数据帧标识符即为 CAN 总线报文 ID。CAN 总线的节点没有绝对地址概念,而是采用报文 ID 来对报文进行甄别,即需要对通讯功能的报文识别位提出分配标准化的要求<sup>[9]</sup>。在 CAN-bus 规范 V2.0 版本中,规定了帧的结构,允许对数据帧赋予不同的具体含义,其中包含数据传输所需要的总线报文 ID。考虑到管道检测机器人项目的节点规模比较小,在设计上采用 CAN 规范 V2.0B 的标准格式,数据帧的标识符为 11 位,并按表 1 所示的格式设计具体的报文 ID。

表 1 标准数据帧 ID 定义

ID.10	ID.9	ID.8	ID.7	ID.6	ID.5	ID.4	ID.3	ID.2	ID.1	ID.0
报文内容类别			目的地址				源地址			

当多个数据帧同时竞争总线时,必须保证反应故障的报文和紧急程度高的报文首先得到服务,因此设计了具有多优先级的报文 ID。依据 CAN 规范,总线将根据报文 ID 进行非破坏性仲裁,ID 数值越小的优先级越高,先行通过,优先级低的则等待发送。基于此,将报文内容类别放在 ID 的最高 3 位表示,可区分 8 种报文内容类别,根据管道检测机器人的通信功能要求,对报文内容类别规定如下:000 自检异常反馈;001 命令执行异常;010 检测到管道故障;011 警告帧;100 命令帧;101 命令执行正常反馈;110 工作正常结果反馈;111 保留未用。这样做的优点在于,紧急程度高的报文可以取得较高优先权,而不论它来自哪个节点。此外,为方便各节点设置接收屏蔽码,将源地址、目标地址信息包含在标识符内。标识符 ID.0~ID.3 表示源地址,ID.4~ID.7 表

示目的地址,源地址和目的地址的范围都是 0~15,设计时根据节点的优先权高低从小到大分配节点地址。该规定的另一好处在于,同等紧急程度的报文,比如故障信息,同时从不同节点发出时,总线可以根据 ID.0~ID.3 的信息做进一步仲裁。

数据帧的数据场中保存通信数据,最大长度为 8 个字节。在管道检测机器人的 CAN 总线系统中,基于帧内容的多样性和尽可能简洁使用帧的位数考虑,按表 2 所示的数据格式设计具体帧信息,其中帧的含义用字母类字符表示,此外可以包含 0~7 个参数,详细数值用十六进制的数值表示。例如,要使机器人以 150mm/s 的速度前行,则智能控制器向电动爬行器发送的指令如表 2 所示。F 表示向前,0x96 表示希望达到的速度值为 150mm/s。

表 2 数据场中数据格式

data[7]	data[6]	data[5]	data[4]	data[3]	data[2]	data[1]	data[0]
帧的含义	参数	参数	参数	参数	参数	参数	参数
F	0	0	0	0	0	9	6

## 3 智能控制器的功能验证平台和应用情况

### 3.1 检验智能控制器功能的试验平台

管道检测机器人系统构造复杂,进行整体调试的难度大,因此,首先对文中设计的智能控制器进行单独调试,并设计了检验智能控制器功能的试验平台。在管道机器人的 CAN 通讯网络中,智能控制器作为上位机与其余智能节点进行数据交换,而各智

能节点相互间没有通讯要求。基于该情况和降低开发成本的考虑,采用 4 个由广州周立功公司研发的 RS232-CAN 协议转换器和带有串口的 PC 机代替 4 个智能节点,构建检验智能控制器功能的试验平台,如图 3 所示。基于 Visual C# 分别设计了管道检测机器人 4 个智能节点的仿真程序,采用 PC 机的 RS232 串口与外界通讯,串口借助 RS232-CAN 协议转换器可以实现对 RS232 总线上串行数据与 CAN 网络数据的透明转换,所以各单元仿真程序结合

RS232-CAN 协议转换器作为一个智能节点接入 CAN 网络,在 CAN 网络中对每个智能节点分配唯一的 ID 号,用于数据的传送及区别不同的智能节点。借助该试验平台和各智能节点仿真程序,设置管道检测机器人的正常工况和各种故障工况,可验证智能控

制器的控制决策、多任务并行处理、CAN 通讯、数据采集与保存等功能。此外,管道检测机器人整机调试前,借助该试验平台可进行智能控制器与个别单元的联调,从而减小整机调试的难度。

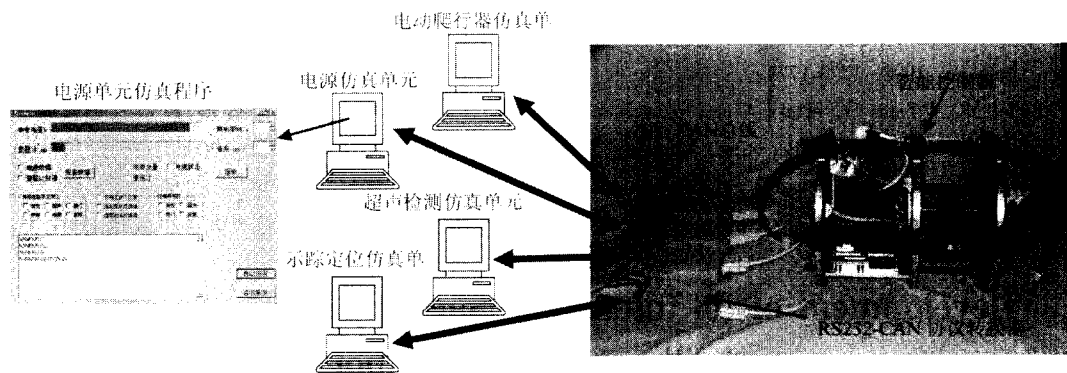


图 3 基于 RS232-CAN 协议转换器的检验智能控制器功能的试验平台

### 3.2 应用情况

为试验管道检测机器人整机性能,在实验室建造了百米长模拟油气输送管道台架,在管道中设置了人工腐蚀缺陷、弯管、上下斜坡等,用来模拟在役油气管道。将研制的智能控制器安置于密封舱内,连入整个系统。进行了多次管道检测机器人自主爬行实验(图 4)。在正常工况下,管道检测机器人均

能自主完成管道缺陷检测和缺陷定位任务。此外,通过在管道中设置障碍、电源单元反馈电量不足等方法,考查了机器人在故障工况下的动作。智能控制器保存的机器人运行数据表明,智能控制器成功实现了在正常工况和故障工况下的控制决策功能,达到了设计要求。

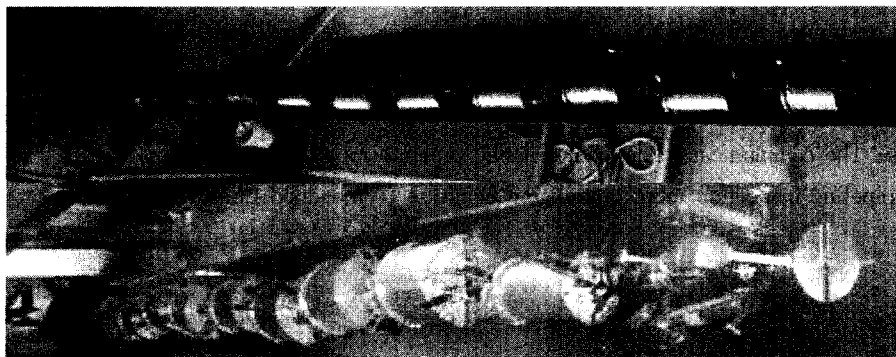


图 4 模拟油气管道台架上进行的管道检测机器人整机性能实验

## 4 结论

智能控制器作为管道检测机器人的控制中枢,对整机性能起着关键作用。本文设计的智能控制器既满足了控制任务具有实时性的要求,又兼顾了高计算速度,为实现不断完善的复杂智能控制提供了保障。构建的智能控制器功能的试验平台起到了方

便控制程序的设计与验证、缩短控制程序开发周期和减小整机调试难度的作用。管道检测机器人在模拟油气管道台架上的实验结果表明:智能控制器实现了在正常工况和故障工况下的正确控制决策、多任务并行处理、CAN 通讯、数据采集与保存等功能,达到了设计要求;所制定的通信协议满足系统通讯要求。

## 参考文献

- [1] Yu J, Lee J G, Park C G, et al. An off-line navigation of a geometry PIG using a modified nonlinear fixed-interval smoothing filter. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(11): 1403-1411
- [2] Kuntze H B, Haffner H. Experiences with the development of a robot for smart multisensoric pipe inspection. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation Leuven, Belgium, 1998. 1773-1778
- [3] Reber K, Beller M, Willems H, et al. A new generation of ultrasonic in-line inspection tools for detecting, sizing and locating metal loss and cracks in transmission pipelines. In: Proceedings of the 2002 IEEE Ultrasonics Symposium Munich, Stutensee, Germany, 2002. 665-671
- [4] 邓宗全, 张晓华, 董连海等. 野外大口径管道焊缝 X 射线检测机器人. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(1): 48-49
- [5] 姜生元, 邓宗全, 李斌等. 内置动力源管内 X 射线探伤机器人的研制. 机器人, 2001, 23(3): 211-216
- [6] 徐小云, 颜国正, 鄢波. 一种新型管道检测机器人系统. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1324-1327
- [7] 李善平, 刘文峰, 王焕龙. Linux 与嵌入式系统. 北京: 清华大学出版社, 2003. 95-99
- [8] 闫在春, 程夕明, 南金瑞等. 燃料电池客车 CAN 通信协议仿真. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2384-2384
- [9] 饶运涛, 邹继军, 郑勇芸. 现场总线 CAN 原理与应用技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. 25-33

## Development of an intelligent controller for submarine pipeline inspection robot

Wang Zhongwei, Cao Qixin, Luan Nan, Zhang Lei  
(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

### Abstract

An intelligent controller, with an embedded PC104 industrial computer as its core, was developed for submarine pipeline inspection robots. Based on the embedded Linux system, its control program ran respectively in real-time kernel and Linux kernel according to the difference of control task's real-time request and calculation amount, which satisfied the control system's real-time capability and multi-tasks parallel processing capability. Application layer protocol customization rule for pipeline robot's CAN communication was introduced in detail. CAN message content sort information and node information were set into message id to assure emergent message to be firstly transmitted under multi-message BUS competition. Constructed with RS232-CAN protocol converter, the intelligent controller testing platform facilitated the design and validation of control program. The applications in experimental pipeline system and project site indicated that the intelligent controller achieved control and decision-making functions under all sorts of situations and realized the design requirements. The communication protocol satisfied pipeline robot systems.

**Key words:** pipeline inspection robot, intelligent controller, embedded Linux, CAN bus