基于无线传感器网络的石油钻机设备远程监控系统的设计与实现

李传伟[1,2]，常关羽[1]，于振兴[1]

（1. 西北工业大学 自动化学院，陕西 西安 710072；2. 中国石油测井有限公司，陕西 西安 710077）

摘 要： 针对目前石油钻井分布广、环境恶劣等特点和目前石油钻井参数记录仪器仪表相对落后的现状，设计实现了基于无线传感器网络的石油钻机实时监测系统，改善了现有钻机测量参数有线传输而导致的可移动性差，系统现场布置工作繁琐，施工周期长等缺点。文章详细介绍了系统的整体设计框架，包括选择具有丰富扩展接口的 TQ2440 开发板作为开发平台的硬件设计和采用 eCos 实时操作系统满足实时性要求的软件设计。在完成了包括串口、FLASH、网卡和 Wi-Fi 驱动的移植基础上，将 OLSR 路由协议移植到 eCos 系统作为数据的无线传输路由协议。通过部署 AdHoc 网络模式的节点进行测试，系统实现了数据采集和无线传输功能，取得较好的应用效果。该系统通过扩展可以满足大多数诸如煤矿、石油、天然气等无人值守工作环境下的远程监测需求。

关 键 词： 嵌入式软件，实时系统，无线传感器网络，路由协议，石油钻机设备，eCos，OLSR
中图分类号： TP316.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-2758(2013)02-0159-07

石油开采的现代化管理和安全生产是石油行业举足轻重的大事。目前，油田大多位于沼泽、沙漠和盆地、浅海等区域，因远离城市地广人稀，交通通信等设施较为落后。且油田油井分布范围由几十至上百平方公里，分布比较零散，目前大多采用人工巡井方式，由人工每日定时检查设备运行情况并记录采油数据。这种方式必然增加工人劳动强度，提高了开发成本，并且影响了设备监控与采油数据的实时性，甚至准确性。并且当抽油机、电泵出现故障时不能及时发现，得不到有效监控、防患和控制。

另一方面，我国石油与天然气勘探开发重点向西部转移，使西部成为油气资源开发的主战场。大多数西部油气田储层类型多、埋藏深、地质条件复杂、地理条件恶劣，给油气钻机的可靠性和安全性提出很高要求，为了能很好掌握钻井的工作状态，降低生产成本，保障人身安全，高效完成钻井工作，有必要研究开发出适合我国特殊环境的钻机远程监控技术。从而建立一个石油钻机安全监控系统来提高整个钻井过程运行状态的安全性。

多年来，钻井工作者一直致力于监测系统研究、改善与提高，目的是提高钻井过程中各项参数的指示与记录的准确程度。随着钻井技术的不断发展，各种指示与记录系统相继问世。如以前使用过的六道参数仪、八道参数仪及其它形式的钻井参数仪，液面报警器等单项的参数记录仪。这些系统，有的因为防震、防水、防冻等耐用性能差，经常损坏，不能适应钻井队较恶劣的使用环境；记录系统本身性能不能很好地反映钻井现场的需要，需人工观察，手工记录，有的只能报警，不能记录，并且记录的数据只能靠人工来分析，而过去和现在使用的参数监测系统从传感器到计算机的传输都是有线传输，在现场使用过程中，都不能很好地满足钻井现场使用环境和记录的要求[1]。

为此，我们针对油田分布范围广、分布地形复杂，并且现有的钻井监测系统存在的仅为现场监控、仅为工作状态监控、仅支持有线传输的 3 大问题，同时为了降低开发成本和故障率、保障人身安全，而提出了一个可远程监控，可检测设备多种运行状态，并

收稿日期： 2012-04-28 **基金项目：** 国家自然科学基金(60803158)、国防科技基础研究项目(B2720110)与西北工业大学基础研究项目(GBKY1004)资助
作者简介： 李传伟(1970—)，西北工业大学博士后，主要从事 AdHoc 网络和嵌入式系统研究。

支持无线传输的基于传感器网络的石油钻机远程监测系统设计方案。

系统的参数采集和数据处理节点通过 Wi-Fi 组成基于 AdHoc 模式的无线传感器网络，实现了对井架、泥浆泵、绞车、转盘四种设备运行参数的实时检测。同时，监控中心通过可视化的人机交互界面实时检测各个远程设备监测点的数据，发现故障并及时处理。由于各部分均采用低功耗的设计，传感器采集节点利用蓄电池进行供电，现场不需要交流电源线，使得仪器的安装、拆卸和维修比较方便。

1 系统的整体设计

本文设计的基于无线传感器网络的远程监控系统应用于油田、油井等无人职守的环境。因此它必须有环境参数采样节点。同时，为了处理捕获的数据，必须有中心服务节点对数据进行处理和分析。更重要的是，现场数据需要显示在远方的监控显示器上，供工作人员进行查看，并对发现的问题进行及时处理。因此系统中的主控机房必不可少。这样，根据功能需求设计的系统各部分节点联合到一起，可以在实践中获得满意的性能和效果。

另外，系统各个采集节点和中心服务节点通过无线进行数据传输，无线传输方面可以选择 ZigBee 或 Wi-Fi。它们主要区别在功耗和传输宽带上[2]。ZigBee 功耗低，但是数据传输速率低，而 Wi-Fi 数据传输速率高但是功耗相对要高。针对特殊的应用需求，ZigBee 被应用于传感器网络中的控制信息或小量数据的传输，Wi-Fi 应用于如图片、视频传输等密集数据的传输。在某些情况下，ZigBee 和 Wi-Fi 被同时应用以满足特定的设计要求[3,4]。它们的结合的确带来了一些好处，但同时也增加了节点的复杂性[4]。本系统最终选择系统相对于 USB 连接方式功耗更小的 SPI 方式连接的 Wi-Fi 模块实现数据的无线传输。系统的整体架构如图 1 所示。

1.1 系统节点功能需求分析

从整体来说，系统作为一个远程监控系统，完成了智能参数采集、实时记录、无线传输、计算机分析等任务。同时，远程采集节点也接收监控中心的远程主机传来的命令以实现扩展功能。各个节点的主要的功能需求如下:

·采样节点 实现参数采集和状态识别功能，采集是通过各种传感器捕获环境参数。如温度、湿度、气体密度等。状态识别为获取如井架等现场设备的状态参数，以判断装备是否正常运行。如果有故障，反映到主控机房，并采取一定的处理措施。

·中心服务节点 实现数据处理和传输功能。通过采样节点得到的原始数据需要被 DSP 或其它设备转换成易于理解的数据，因此要求节点具有数据处理功能。同时，数据传输将原始数据或处理过的数据通过无线传送到主控房存储并进一步使用。

·监控中心 实现钻机设备运行状态的实时监控及故障处理功能。石油钻井工人通过主控房的显示器来实时监测钻机等设备的工作状态，如发现运行故障及时采取相应措施进行处理。

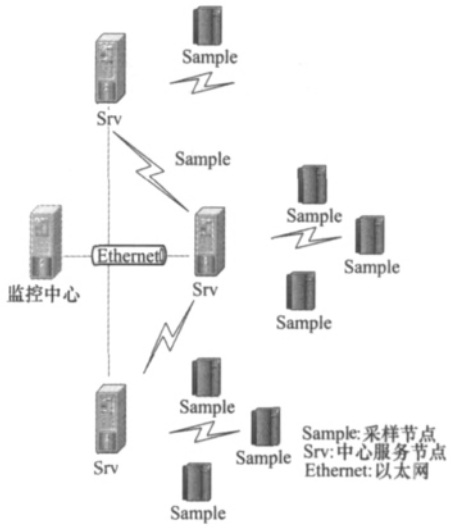


图1 系统整体架构

另外，功能的需求会随着时间不断改变和增加，因此可以设计一些额外的接口来提高节点的可扩展性。例如，可以设计视频接口以满足未来的需求。

1.2 系统功能模块设计

基于上述的节点的功能分析，设计相应的功能模块。分别为采样节点的参数监测和采集模块、中心服务节点的数据处理和传输模块、主控房的中心控制模块及扩展功能模块。参数采集模块由传感器组成。数据处理和传输通过 MCU 和 Wi-Fi 共同完成。中心控制模块决定在某一时刻哪一个模块被使用。扩展模块包括多个接口来实现功能的扩展。各个模块间的关系如图 2 所示。

2 硬件设计

讨论到整个系统的设计细节时，硬件设计需要

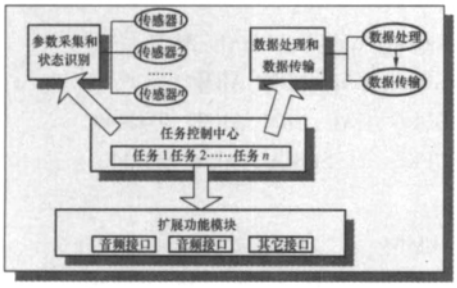


图 2　功能模块间的关系

首先被考虑。硬件平台的选择要结合系统的功能需求和成本两方面考虑。为了满足功能需求,硬件平台需要具备基本的硬件模块以使开发者实现系统基本的功能。同时,它应满足合适的成本支出并且可以获得良好的技术支持。

2.1　硬件平台

本系统选择 TQ2440 开发板作为基本的硬件平台。此板包括了核心板和底版。核心板上集成了 CPU、SDRAM 和 FLASH,使其成为可扩展的最小系统。基础版用来搭载外围电路。核心板 CPU 为三星公司的 S3C2440,采用 ARM920T 内核,实现了 MMU、AMBA、BUS 和 Harvard 高速缓冲体系结构,并可以运行在高达 400 MHz 的 CPU 时钟频率下。SDRAM 采用提供了 64 M 物理地址空间的 HY57V561620FTP-H 芯片。核心板同时支持 NOR FLASH 和 NAND FLASH。NOR FLASH 芯片为 2M 大小并支持 ROM 启动的 EN29LV160A 芯片。NAND FLASH 选择 K9F1208U0C 来存储比较大的数据,如 YAFFS 文件系统。基础版包含许多外部接口: 串口、并口、A/D 转换、网卡接口、USB 等等。这些组件组成了以 CPU 为中心,包含丰富功能接口的硬件系统。主要的硬件结构如图 3 所示。

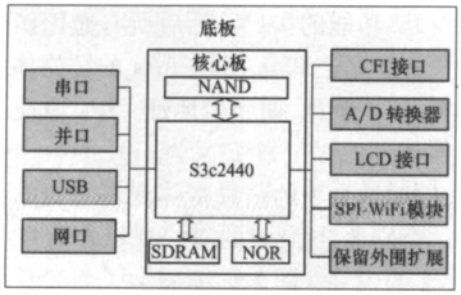


图 3　硬件结构

2.2　外围扩展

TQ2440 平台已经提供了满足目前大多数应用需求的接口。但考虑到需求的不断变化,同时还增添了外围的扩展接口。除了上边提到的一些基本硬件,在板子上还分布了许多 CPU 的引脚。SPI 接口的 Wi-Fi 模块正式通过这种方式实现的,它为今后的扩展模块提供了先例。随着监控条件下多媒体应用的迫切需求,将来可能会开发视频和音频模块。因此底板和核心板的设计符合长远应用的扩展需求。

3　软件设计

软件需要基于已有的硬件平台来设计,特别是运行在开发板上的操作系统。目前,有许多嵌入式操作系统可用,如嵌入式 Linux、μC/OS、μClinux、VxWorks 等等。一般来说,选择的操作系统必须具有可移植性并且符合应用的需求。而应用软件需要基于运行在目标硬件上的操作系统来进行设计开发。

3.1　操作系统的选择和移植

本系统中,选择 eCos 系统来满足数据传输的实时性要求。eCos 意思为嵌入式可配置实时操作系统。相比于 Linux,eCos 经常被用于工业控制中。除了具有良好的实时性能之外,eCos 还具有应用级的配置性。也就是说,eCos 可以根据应用程序进行最小化的配置。例如,像"hello world"样的程序可以脱离 eCos 系统内核运行,但对于 Linux 等系统来说,必须运行在系统内核之上。另一方面,eCos 在应用程序中采用静态链接,剔除了没有用到的动态链接库,使其更加适用于对硬件和系统精简性要求较高的嵌入式系统环境中。eCos 是基于许多不同的硬件架构平台开发的,因此,可以将其移植到具有主流 CPU 的 TQ2440 开发平台。根据如图 4 所示的 eCos 系统的整体结构,移植主要涉及硬件抽象层(HAL)的移植和外围设备驱动的移植两方面[5,6]。

eCos 提供了许多当前主流的各种 CPU 的移植模版,因此选择相似平台作为参考进行移植可以降低移植的难度。基于最小的应用要求,参考 eCos 系统提供的 SMDK2410 模版进行 Redboot 移植主要步骤如下:

· 复制 SMDK2410 模版相关文件到对应的目录位置。

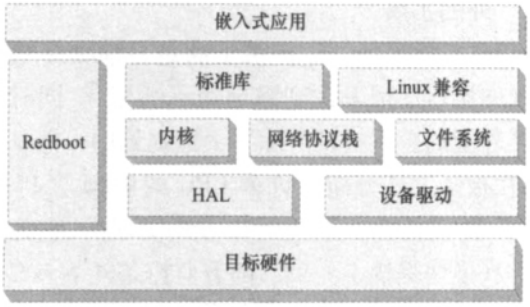


图4 eCos 的整体结构

·修改关键文件代码以适应 TQ2440 平台。这些文件位于 include/folder 和 src/folder 文件夹下。表1 中列出了这些文件的名字和主要用途。

表1 TQ2440 HAL 移植涉及主要文件

文件名	用 途
include/plf_cache.h	高速缓存处理
include/hal_platform_intrs.h	定义平台中断向量和专有的平台中断处理
include/hal_platform_setup.h	平台启动代码
src/tq2440_misc.c	平台初始化、中断初始化、中断的使能和禁止、定时器延时等等
src/hal_diag.c	诊断输出函数的定义

·在 ecos.db 数据库文件中增添 TQ2440 的 HAL 包。为了使 eCos 配置工具可以使用新建立的 TQ2440 平台模版,在数据库中需要建立一个新的目标平台,添加内容如下:

```
# = = add package for TQ2440 HAL = =
package CYGPKG_HAL_ARM_ARM9_TQ2440 {
    alias    { "Samsung ARM9/TQ2440 development board" hal_arm_arm9_tq2440 }
    directory        hal/arm/arm9/tq2440
    script           hal_arm_arm9_tq2440.cdl
    hardware
    description "
    The SMDK2410 HAL package provides the support needed to run eCos on Samsung TQ2440 and S3c2440x (ARM9) based development boards."
}
# = = add target setting for TQ2440 = =
target tq2440 {
    alias{ "Samsung ARM9/TQ2440 yaffs development board" s3c2440x }
    packages { CYGPKG_HAL_ARM
    CYGPKG_HAL_ARM_ARM9
    CYGPKG_HAL_ARM_ARM9_TQ2440
    CYGPKG_IO_SERIAL_ARM_TQ2440
    }
    description "
    The TQ2440 target provides the packages needed to run eCos on Samsung S3c2440x (ARM920T) based development boards (TQ2440)."
}
```

配置 TQ2440 平台的 RedBoot,解决存在的冲突,必要时修改源码文件。然后编译生成 redboot.bin 镜像文件。

利用 H-JTAG 工具下载 redboot.bin 镜像文件到 NOR FLASH 中。当在通过串口连接的终端上出现"redboot >"提示符时,说明基于 TQ2440 目标版的 HAL 移植成功。

3.2 设备驱动程序的设计与实现

Redboot 正常启动后,需要进行必要的外围设备的驱动程序开发。eCos 系统提供了到 IO 子系统层的驱动开发接口[7]。

在本项目中,需要完成的驱动开发有串口驱动、网卡驱动、NAND FLASH 驱动、和基于 SPI 的 Wi-Fi 驱动。通过详细描述 NAND FlASH 驱动的开发过程来展示设备驱动开发的整个过程。

一般情况下,2 个步骤必不可少。①定义和实现驱动函数 APIs(应用程序接口)。②链接已实现的 APIs 作为一个设备的驱动程序接口,并在系统中注册。

NAND 驱动分为 2 层:底层涉及具体的芯片,上层是 NAND FLASH 的通用接口。底层负责 SFR(特殊功能寄存器)的基本操作,如芯片启用、禁用、复位、状态读写和数据读写等等。上层实现提供芯片读、写和擦除功能的接口。然后所有通用函数被打包在一个称为 cyg_flash_dev_funs 的结构体中。而其它的 FLASH 信息,如起始地址、结束地址和其它的私有数据,存储在一个定义为 cyg_flash_dev 的结构体中,同时这个表的信息将体现在系统的驱动程序表中。特别地,优化过的 NAND FLASH 的驱动可以支持 2k 的大页。图5 详细展示了 NAND FLASH 驱动程序的层次结构。

通过上述类似的方法,可以实现网卡和基于 SPI 的 Wi-Fi 驱动开发。此外,802.11 协议定义在

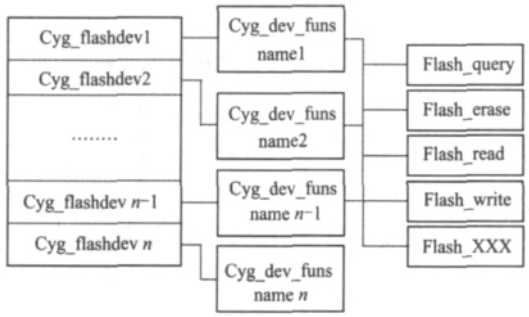


图 5　NAND FLASH 驱动层次结构

Wi-Fi 驱动移植的过程中,同时将 Wi-Fi 驱动以以太网实例的形式注册到系统当中[8]。

将新开发的驱动程序包添加到 ecos. db 文件中,然后修改 TQ2400 的目标平台,添加相应硬件驱动程序包。利用配置工具 Configuretool 来配置新的平台,然后编译生成新的 eCos。

基于 NAND FLASH 的文件系统和利用 ping 命令进行网络测试如图 6 展示。



图 6　文件系统和网络测试

3.3　eCos 基本应用程序开发和 OLSR 路由协议的移植

HAL 和硬件驱动的移植为 eCos 的应用程序开发提供了环境。在这一部分,由于 OLSR 的稳定拓扑结构[9],选择 OLSR 路由协议作为无线路由协议进行移植。在 eCos 系统中,OLSR 与其它应用一样运行在系统之上。eCos 的应用程序开发流程如图 7 所示。

首先,eCos 需要配置生成包含 libtarget. a 和 libextra. a 的静态库供应用程序链接使用。配置选择 TQ2400 平台和网络包,同时根据需要添加其它相应的包到现有的配置当中。

OSLR 最初是基于 Linux、Macos 和 BSDs 设计运行的。由于 eCos 系统中的一个网络协议栈是从 FreeBSD 移植过来的,这个使得基于 eCos FreeBSD

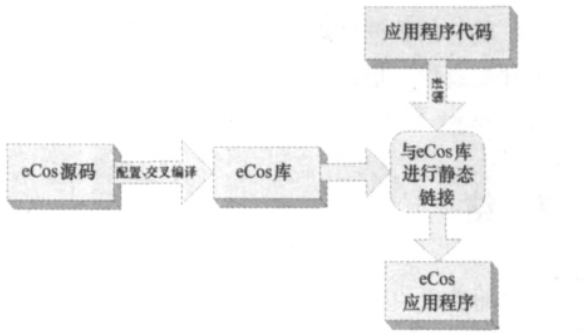


图 7　eCos 应用程序开发流程

的网络协议栈移植 OLSR 变成了可能。在 OSLR 源码分析的基础上,完成了主要的移植工作:

修改相关的 Makefile 文件,获得正确的交叉编译环境,包括交叉编译器、头文件和库文件的目录、正确的编译和链接标志。主要设置如下所示:

```
CCACHE = arm-eabi-
ifeq ( $(origin CC),default)
CC =    $(CCACHE) gcc
else
CC ? =    $(CCACHE) gcc
endif
CFFLAGS + =
-I/ecos_installdir/include -L/ecos_installdir/lib ……
LDFLAGS + = -g -nostdlib -Wl,-gc-sections -Wl,-static
```

· 由于 eCos 系统是多线程系统,修改 OLSR 源码,使其从多进程运行改为多线程运行。这个可以通过将 OLSR 的 main 函数写入到 eCos 线程入口函数来实现:

```
cyg_thread_create(4, olsr_main,
(cyg_addrword_t) (&entry_data),
    "Thread Olsr", (void *) stack, 4096,
    &olsr_thread, &thread); //create the thread
cyg_thread_resume(olsr_thread); //start the thread
```

· 修改 OLSR 代码以适应它和 eCos 系统之间的差异。然后编译 OLSR 代码,寻找更多的错误并改正。最终,编译生成 olsrd 可执行程序。

· 运行和测试 olsrd,找到运行时错误并改正。最后,OLSR 路由协议像运行在 Linux 等系统上一样

运行在 eCos 系统下。

其它的数据处理和传输程序开发依据 OSLR 移植开发过程。最终，不同的程序作为不同的线程运行在 eCos 系统下。

4 结 论

随着现代科学技术在石油工业各应用领域的不断发展，以及油田勘探开发管理等领域现代化、一体化管理进程的不断推进，采油队的信息化建设也日趋成熟和完善。在本文中，设计了针对无人职守的基于无线传感器网络的石油钻机远程监控系统。通过采用基于 SPI 接口的 Wi-Fi 模块实现无线传输，在获得了足够宽带的同时，降低了系统数据无线传输过程中的功耗。在给出了系统整体结构设计的基础上，完成了基于硬件平台的操作系统移植和应用软件的设计，包括 eCos 操作系统的移植、设备驱动分析和实现、路由协议移植和应用程序开发。通过现场测试，工作在 AdHoc 模式的网络采集节点，顺利完成了实时数据的采集、处理和传输，数据及时传输到远程的控制端进行分析，整个系统取得了较好反映，满足了石油钻井工程现场参数的实时采集及分析处理，利于生产工况的集中监视，便于现场人员的操作。同时，各个节点可以根据需要选择安装液位、压力、流量、气体浓度等不同的传感器来满足不同的功能需求。

本设计完成的无线智能参数监测系统可以使企业利用高精度的数据采集器，获取钻井过程各个设备的压力、液位、流量、气体浓度等数据，并通过无线数据传输方式将其传输到测控中心，可实现对钻井过程的远程实时监控。本系统拆装移动方便，操作简单、性能可靠，不受部分井场条件差、仪器无法摆放及布线困难的限制，同时具有良好的可扩展性，可以满足大多数诸如煤矿、石油、天然气等无人值守工作环境下的远程监测需求。

参考文献:

[1] 郭 巍，曲延涛，赵 英. 基于无线通信的钻井网络参数监测系统的设计与实现. 电测与仪表，2005，08：31-36
Guo Wei，Qu Yantao，Zhao Ying. Design and Realization of Network Monitoring System of Oil Well Drill Based on Wireless Corresponding. Electrical Measurement and Instrumentation，2005，08：31-36（in Chinese）

[2] Figueiredo C P，Gama O S，Pereira C M，Mendes P M，Silva S，Domingues L，Hoffmann K P. Autonomy Suitability of Wireless Modules for Ambient Assisted Living Applications：WiFi，Zigbee，and Proprietary Devices. Sensor Technologies and Applications（SENSORCOMM），2010 Fourth International Conference，2010，167-169

[3] Pan Tao，Liu Xiaoyang. Hybrid Wireless Communication System Using ZigBee and WiFi Technology in the Coalmine Tunnels. 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation（ICMTMA），2011，2：340-343

[4] Yuan Hongfang，Wang Huaqing，Qi He，Ke Xiyong. A ZigBee Wireless Sensor Network for Fault Diagnosis of Pump. 2010 Sixth International Conference on Natural Computation（ICNC），2010，7：3778-3782

[5] Anthony J. Massa. Embedded Software Development with eCos，Person Education，2003

[6] 蒋句平. 嵌入式可配置实时操作系统 eCos 开发与应用（第二版）. 北京：机械工业出版社，2008
Jiang Juping. The Development and Application of Embedded and Configurable Real-Time Operating System ECos. Beijing：China Machine Press，2008（in Chinese）

[7] 吴华程，张新政，袁从贵. eCos 驱动程序分析. 单片机与嵌入式系统应用，2005，77-78
Wu Huacheng，Zhang Xinzheng，Yuan Conggui. Analysis of eCos Driver Program. Microcontrollers and Embedded Systems，2006，77-78（in Chinese）

[8] 李 伟，邓中亮. 基于 eCos 的无线网卡驱动设计与实现. 微计算机信息，2009，86-88
Li Wei，Deng Zhongliang，The Design and Implementation of Wireless Network Card Driver in eCos. Mircrocomputer Information，2009，86-88（in Chinese）

Design and Implementation of Remote Monitoring System for Oil Drilling Equipment Based on Wireless Sensor Network

Li Chuanwei[1,2], Chang Guanyu[1], Yu Zhenxing[1]

(1. Department Of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi´an 710072, China
2. Logging Co. Ltd, China Petroleum, Xi´an 710077, China)

Abstract: In connection with the bad maintenance conditions of oil well drilling equipment in China, we design and implement a remote monitoring system based on wireless sensor network; in this way, we avoid the disadvantages such as low removability and expansibility, and the complexity of layout circuitry. Firstly, the overall system design framework is introduced, followed by the hardware and software design respectively. This system focuses on the node expansibility, taking TQ2440 as the base hardware platform, which is rich in interfaces. On the other hand, eCos is adopted to provide the real-time performance. After the drives´ implementation on eCos, which contains serial, flash, Ethernet and Wi-Fi, OLSR routing protocol is ported to eCos as system route used in the data transmission course. Ultimately, nodes are deployed in wireless ad hoc networks for test, which proved that the wireless data acquisition and wireless data transfer are both implementable and results are satisfactory. It is believed that the nodes realize a prototype which can be used in most of the remote monitoring scenarios under the working environment of coal, oil or natural gas.

Key words: computer software, data acquisition, data transfer, design, embedded software, oil well drilling equipment, real time control, real time systems, routing protocols, structural health monitoring, wireless ad hoc networks; eCos, OLSR

赵崡麟纪念华东航空学院成立六十周年的文章(其三)
——交通大学航空系和风洞建设

其二见本期学报另一简讯。

其三摘录的内容如下:

交大航空系抗战时由于战乱未建风洞,在重庆时常借用中央大学的风洞为学生开出实验。搬回上海后,1947 年曾筹得款项准备在美国订购一套风洞建设试验台。曹鹤荪为此曾给在美国的级友钱学森写信,请熟悉此事的钱学森协助,钱学森当时也积极为母校奔走接洽,但最终此事因故未成。不过,交大航空系此遗憾几年后由交大人在新中国的哈军工得到弥补并大放异彩。从 1953 年到 1963 年间,由交大航空系调入的马明德和岳吉毅两教授,在哈军工负责设计建立了从低速到超音速不同尺寸的八个风洞组成的风洞群,当时由擅长实验空气动力学的马明德任风洞建设总指挥,他为建造大型塔式六分力机械天平的工作做出了重要贡献。这组风洞不仅为哈军工的教学科研服务,并且直接为飞机、导弹的型号设计试验做出了贡献。钱学森看后曾赞叹"了不起啊……,看来中科院要向你们学习呢!"马明德回答说 "大师兄过奖了",(马明德 1938 年毕业于交大机械系航空门),马明德教授曾参加国庆观礼,受到党和国家领导人接见。可惜文革中他被迫害致死。后来,钱学森曾在他的追悼会上致悼词,高度评价他对国防科委基地建设的贡献。

胡沛泉

2013 年 4 月