

# 基于 RTAI 的多数据融合智能检测仪的研制

刘云松<sup>1</sup>, 田晋羽<sup>1</sup>, 马诗文<sup>2</sup>

(1. 辽宁省电力有限公司锦州供电公司, 辽宁 锦州 121000; 2. 锦州供电公司义县供电公司, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:** 设计并实现了一种基于 RTAI 嵌入式 Linux 实时内核的多数据融合的智能检测仪的研制, 针对传感器的非线性输出问题, 给出了一种数据重构算法, 采用最小二乘拟合与径向基函数残差插值进行融合重构, 在增加有限计算量的条件下, 提高传感器数据的近似精度; 采用 ARM11 作为主处理器, 构建以 RTAI 硬实时嵌入式系统为主核的管理子系统, 采用 DSP (TMS320F28335) 作为协处理器, 构建以  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统为辅核的数据采集处理子系统, 实现双 CPU 嵌入式实时系统架构, 进行气体检测、风速检测、温度检测、风量检测、通道截面周长及面积测量等; 设计了分析判断功能, 对检测到的数据进行综合分析, 依靠分析决策库, 进行决策判断; 在多个工业现场测试实验表明, 该检测仪具备智能性高、数据实时处理能力强等特点。

**关键词:** 数据融合重构; 智能检测仪; RTAI;  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ ; 双 CPU 架构

## Development of a Multi Data Fusion Intelligent Detecting Instrument Based on RTAI

Liu Yunsong<sup>1</sup>, Tian Jinyu<sup>1</sup>, Ma Shiwen<sup>2</sup>

(1. Jinzhou Power Supply Branch, Liaoning Province Power Co., LTD., Jinzhou 121000, China)

(Yixian Power Supply Branch, Jinzhou Power Co., LTD., Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** A multi data fusion intelligent detection instrument based on RTAI is designed and implemented. For the nonlinear problem of output of sensor, we develop a data reconstruction method, using least square fitting and radial basis function error interpolation fusion reconstruction, in the condition of increasing the limited computing quantity, the data accuracy of the sensor is improved; This paper uses ARM11 as the main processor to build the management subsystem, and uses DSP (TMS320F28335) as the coprocessor to build the data acquisition and processing subsystem of  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  operating system being auxiliary nuclear, then the paper implements the construction of the double kernel embedded operating system, conducts the gas detection, speed detection, temperature detection, flow testing, the roadway section perimeter and area measurement; We design the state analysis function, analyzing the detected data comprehensively, relying on the library of the evaluation experience to make decision. Field test shows that, the detection with high intelligence, strong data processing ability and other characteristics.

**Key words:** data fusion reconstruction; intelligent instrument; RTAI;  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ ; double CPU construction

## 0 引言

针对工业用传感器的非线性输出问题, 给出了一种数据重构算法, 采用最小二乘拟合与径向基函数残差插值进行融合重构, 在增加有限计算量的条件下, 提高传感器数据的近似精度, 并在此理论基础上, 设计并实现了基于 RTAI 嵌入式系统的智能检测仪。RTAI (Real-Time Application Interface) 是对 Linux 内核的硬实时扩展, 它遵循自由软件规范; 它可以提供工业级的 RTOS 功能, 而且其所有的功能都可无缝地通过 GNU/Linux 环境访问。随着嵌入式技术的不断发展, 32 位 ARM 微处理器、实时操作系统以及适合嵌入式系统的人机界面的应用, 越来越多的嵌入式设备进入工业监控领域。本系统适用于智能电网、煤矿安全等多类工业领域, 根据其特殊性, 对监控系统的实时性及人机接口界面提出了更高的要求。本设计选用具有硬实时特征的操作系统, 建立双内核操作系统 RTAI 硬实时嵌入式系统 &  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  架构, 实现数据的实时

提取和解析; 通过采用人机界面支持系统, 完成数据的图形化显示; 通过标准的无线通信协议, 完成智能检测仪与现场工业设备、监控中心站的通讯。由于  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  运行效率高、资源占用少的特点, 因此采用 TI 公司的集成低功耗控制器芯片 DSP (TMS320F28335) 作为支撑  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  内核运行的微处理器芯片, 而 RTAI 做硬件支撑<sup>[1-3]</sup>。

## 1 智能检测仪总体设计

智能检测仪分为核心板及数据采集板, 在核心板的基础上, 根据实际测量用途的变化而选用相应的数据采集板。检测仪的工作过程如下: 通过数据采集板对数据进行采集, 实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  拆除数据包头、包尾、提取有效数据并暂存, RTAI 硬实时嵌入式系统在提取数据后对该数据进行算法分析并进行图形化显示。显示的效果有两种: 实时数据的显示和历史数据的曲线显示。同时, 转发数据至监控主站, 由主站进行进一步的处理。智能检测仪的设计方案如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

### 1.1 极坐标激光截面测量积分算法

本系统对截面面积和周长的测量是在激光测距传感器获得距截面到仪器之间的距离数据基础上, 利用曲边扇形面积和周长的极坐标积分, 通过上位机软件设置测量角度, 完成不同测量角度下的测量, 再由系统软件计算断面的面积和周长数据。

收稿日期: 2013-11-21; 修回日期: 2014-01-02。

作者简介: 刘云松 (1978-), 男, 辽宁抚顺人, 工程师, 大专, 主要从事电力系统方向的研究。

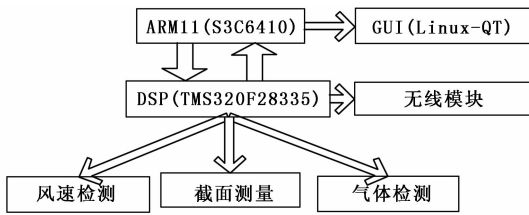


图 1 智能检测仪设计方案

系统对断面面积和周长的测量依据是两个基本参数：距离数据和所设置的测量角。按曲面面积和曲线段的极坐标积分获得激光测距传感器所扫过的曲边扇形的微元面积  $dA$  和扇形弧长  $dl$ 。整个断面的面积和周长由  $dA$  和  $dl$  求和得到。图 2 所示为极坐标面积和周长测量极坐标原理图<sup>[6-8]</sup>。

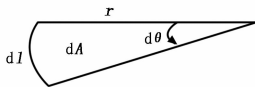


图 2 极坐标测量原理图

图中， $d\theta$ 、 $dA$ 、 $dl$ 、 $r$  分别是测量角、微元面积、微元曲线长和所测两点距离。断面的面积和周长分别由式 (1) 和式 (2) 表示：

$$A = \sum dA = \frac{1}{2} \sum_0^{2\pi} r^2 d\theta \quad (1)$$

$$l = \sum dl = \sum_0^{2\pi} rd\theta \quad (2)$$

根据上述原理，利用激光测距探头、旋转驱动机构、激光信号处理电路连接到核心板的 IO 口上，实现终端对巷道断面的周长及面积进行测量。

### 1.2 风速测量时差算法

超声波在空气中传播时，在顺风与逆风方向传播存在一个速度差，当传播固定的距离时，此速度差反映成一个时间差，这个时间差与待测风速具有线性关系。在实际应用中，可以选用两对超声波换能器，保证距离不变，以固定频率发射超声波，测量两个相对方向上的超声波到达时间，由此得到顺风的传播速度和逆风的传播速度，经过软件换算即可得到风速值。系统设计中，采用一对收发一体的超声波探头，顺序发射超声波。首先 A 作为发射探头，B 作为接收探头，进行测量时得到一个时间，然后 B 作为发射探头，A 作为接收探头得到相对方向上的另一个时间，具体原理如图 3 所示<sup>[9]</sup>。

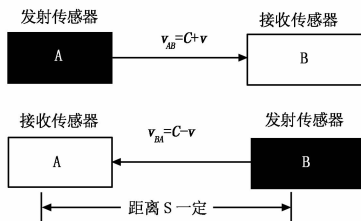


图 3 超声波风速测量

顺风情况下，超声波由发射传感器 A 传到接收传感器 B 的传播速度  $v_{AB}$  为无风速度  $C$  与风速  $v$  的叠加，即：

$$v_{AB} = C + v \quad (3)$$

逆风情况刚好相反，超声波由接收传感器 B 传到发射传感器 A 的传播速度  $v_{BA}$  风速  $v$  的相减，即：为无风速度  $C$  与风

速  $v$  的相减，即：

$$v_{BA} = C - v \quad (4)$$

保证两对传感器之间的距离  $S$  不变，则有顺风传播时间为：

$$T_{BA} = \frac{S}{v_{BA}} \quad (5)$$

逆风传播时间为：

$$T_{AB} = \frac{S}{v_{AB}} \quad (6)$$

当测  $T_{AB}$  与  $T_{BA}$  时，则可以得到风速：

$$v = \frac{S(T_{BA} - T_{AB})}{T_{AB}T_{BA}} \quad (7)$$

以及超声波在无风状态下的速度：

$$C = \frac{S(T_{AB} + T_{BA})}{T_{AB}T_{BA}} \quad (8)$$

根据多次现场实现，并结合相关物理理论，得出本系统所采用的传感器 A、B 在空气中的传播速度与温度存在如下关系，

$$C = 120.42 + 0.455T \quad (9)$$

由此，得到测量时的空气温度为

$$T = \frac{C - 120.42}{0.455} \quad (10)$$

## 2 传感器多数据融合

由于全特性的局部差异小，因而可在传统 LS 多项式拟合基础上，结合其残差部分所丢失的有用信息，来实现该情况下传感器数据的精确重构<sup>[10]</sup>。

### 2.1 LS 数据拟合

对于所给传感器数据对  $\{x_i, h_i\}_{i=1}^N$ ，其中  $x_i = \{x_{i1}, \dots, x_{in}\}$  为  $n$  维输入向量， $h$  为标量输出，利用 LS 多项式拟合对之进行数据重构，近似模型  $h(x)$  可表述为：

$$h(x) = p^T(x)a \quad (11)$$

式中， $p(x) = [p_1(x), \dots, p_m(x)]^T$  是同  $m$  项完备单项式基函数， $a = [a_1, \dots, a_m]^T$  为待定系数。

考虑如下：

$$J = \sum_{i=1}^N h(x_i - h_i)^2 = \sum_{i=1}^N [p^T(x_i)a - h_i]^2 \quad (12)$$

为得到较为精确的近似，需要对式 (2) 进行最小化，由

此可令  $\nabla J = \left[ \frac{\partial J}{\partial a_1}, \dots, \frac{\partial J}{\partial a_2} \right]^T = 0$ ，并解得

$$a = \left[ \sum_{i=1}^N p(x_i)p^T(x_i) \right]^{-1} \sum_{i=1}^N p(x_i)h_i \quad (13)$$

如果矩阵  $\sum_{i=1}^N p(x_i)p^T(x_i)$  非奇异，将式 (3) 代入式 (1) 即得到传感器数据的近似模型  $h(x)$ 。

LS 多项式拟合其实仍是基于 Taylor 展开思想。假设传感器的真实模型为  $\phi(x)$ ，近似模型  $h(x)$  为  $k$  阶多项式，比较  $h(x)$  与  $\phi(x)$  在某点  $x_0$  处的  $k$  阶 Taylor 展开式：

$$\phi(x_0 + \Delta x) = \phi(x_0) + \nabla \phi(x_0) \cdot \Delta x + \frac{1}{2} (\Delta x)^{-1} \times H_{\phi}(x_0) \Delta x + \dots + o(\|\Delta x\|^{k+1}) \quad (14)$$

可以发现，LS 多项式拟合模型  $h(x)$  实质是根据已知数据采用最小二乘法计算  $\phi(x)$  在一个区间内的梯度、Hessian 直

至  $k$  阶偏导数矩阵, 并将残差  $O(\|x\|^{k+1})$  忽略的结果。正因为如此, 所以通过提高拟合多项式的阶数  $k$  (一般  $k \leq 4$ ), 只能有限改善 LS 多项式拟合质量。

### 2.2 RBF 残差近似处理

径向基函数 RBF 是一种径向对称函数, 由 Powell 于 1985 年构造, 由于优良的近似性能, RBF 获得了极为广泛的应用。本文应用 RBF 对 LS 多项式拟合残差进行近似处理来提取残差中的有用信息, 残差近似函数可写成:

$$g(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(\|x - x_i\|) \quad (15)$$

其中:  $\phi(\cdot)$  为 RBF 核, 一般使用 Gauss 型核,  $\varphi(x) = \exp\left(-\frac{\|x - \mu\|^2}{\sigma^2}\right)$ ,  $\mu$ 、 $\sigma$  分别是 RBF 的中心与宽度参数;  $\|\cdot\|$  为 Euclid 范数。

将传感器各已知数据点的残差  $R_i = f(x_i) - f_i$  代入, 得到关于未知  $\lambda$  的  $N$  个方程, 如果矩阵  $A_{ij} = \phi(\|x_i - x_j\|)$  ( $i, j = 1, \dots, N$ ) 非奇异, 则求取  $\lambda_i$  后即可得到 LS 多项式拟合的残差近似函数  $g(x)$ 。

### 3 智能检测仪的硬件设计

智能检测仪的核心板由主处理器 ARM11 与协处理器 DSP (TMS320F28335) 共同组成, 包括其他存储芯片等, 协处理器 DSP (TMS320F28335) 上运行  $\mu C/OS-II$  操作系统, 其主要任务就是对本机配备的传感器进行数据采集, 并驱动无线模块, 将数据远传给监控中心, 并对数据进行解析, 最后通过双核间的通信, 把数据传送给 RTAI 硬实时系统的上层软件, 核心板与数据检测模块、无线传输模块、电源模块等都各自独立。

### 4 基于 RTAI 硬实时系统的应用软件的设计

#### 4.1 应用软件的设计

检测仪上层应用软件具有气体曲线采样记录、温度采样记录以及风速、风量、通道截面周长及面积参数值显示等基本功能, 还设计了零点校正设置功能、状态分析决策等高级功能, 操作人员也可通过上层软件进行操作, 控制激光测距探头对通道截面进行测量<sup>[11]</sup>。

#### 4.2 双 CPU 构建硬实时嵌入式系统

$\mu C/OS-II$  是最小的微内核操作系统, 具有源代码公开、可移植、可固化、可裁减及可剥夺等特性。其实, 我们可以借鉴 RT-Linux 的思想, 并且再做得彻底一些, 为 RTAI 硬实时嵌入式系统选择一个底层的微内核操作系统。

我们把微内核的  $\mu C/OS-II$  作为主系统, 宏内核的 RTAI 硬实时嵌入式系统作为主系统中的一个子系统, 形成一个多层的系统结构。RTAI 硬实时嵌入式系统以进程的形式运行, 赋予最低的优先级, 在  $\mu C/OS-II$  体系中相当于空转进程。实时任务运行于  $\mu C/OS-II$  中, 非实时任务则作为 RTAI 硬实时嵌入式系统的应用程序在 RTAI 硬实时嵌入式系统的进程空间执行, 具体系统结构如图 4 所示<sup>[12]</sup>。

在此系统构架中,  $\mu C/OS-II$  通过硬件抽象层 uHAL 访问硬件, 通过一个简单的实时高度器进行实时任务调度, 实时任务可直接对硬件进行存取。RTAI 硬实时嵌入式系统内核产生的中断请求作为软件中断由  $\mu C/OS-II$  中的软件中断管理器处理。由于  $\mu C/OS-II$  是一种最小的微内核实时系统, 它的进程调度极为简洁高效, 主要分为两个部分:

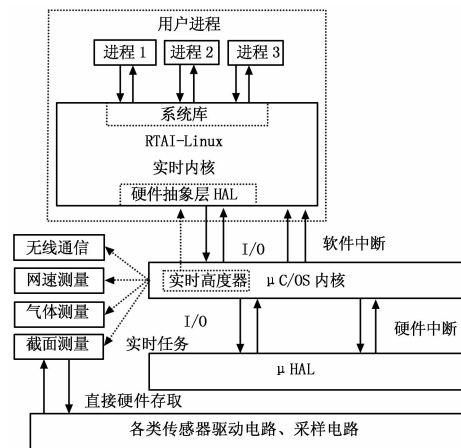


图 4 RTAI&- $\mu C/OS-II$  系统结构

1) 实时进程空间的调度: 按照  $\mu C/OS-II$  原来的优先级调度算法进行调度, 任务级的进程的调度是由函数 OSSched() 完成。具体过程是: 先根据 OSLockNesting 是否大于 0 判断调度是否上锁, 若允许调度, 则根据编组就绪位图 (OSRdyGrp) 和就绪任务表数组 OSRdyTbl[] 来找出进入就绪态且优先级最高的任务, 再拿 OSTCBHighRdy 和 OSTCBCur 做比较, 确保找出来的最高优先级任务不是正在运行的任务, 最后通过宏调用 OS\_TASK\_SW() 来作任务切换, 切换时, 先将挂起任务的微处理器寄存器数据推入堆栈, 然后将较高优先级的任务的寄存器值从栈中恢复到寄存器中。

2) 非实时进程空间的调度: 在 RTAI 硬实时嵌入式系统内核中, 采用传统的多级轮转反馈调度算法进行调度。在没有其它进程进入就绪态时, CPU 被藏在空转进程 OSTaskIdle() 中的 RTAI 硬实时嵌入式系统内核接管,  $\mu C/OS-II$  的软件中断管理器将一个作为标志位的变量置为非零, 这时对于 RTAI 硬实时嵌入式系统来说中断已打开, RTAI 硬实时嵌入式系统可以访问到中断控制硬件, 当有实时任务运行时, 软件中断管理器将标志位变量置为零, 对于 RTAI 硬实时嵌入式系统内核来说中断已关闭, RTAI 硬实时嵌入式系统的中断请求会被挂起, 等到实时任务运行完后进入调度。

在这个双 CPU 系统中,  $\mu C/OS-II$  的高效、简洁保证了整个系统的实时性, RTAI 硬实时嵌入式系统部分可以针对不同的应用环境进行内核配置, 保证了系统的灵活性。这一系统属于 RTAI 硬实时嵌入式系统丰富的系统调用和软件资源, 由于双内核均采用开源的操作系统, 保证了系统的开放性。

### 5 实验结果

在现场实验时, 采用智能检测仪样机对现场甲烷气体进行测量, 分别通过甲烷校正仪及智能检测仪样机进行对甲烷气体的测量, 将数据进行对比来评估样机测量误差, 测量结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 由于甲烷气体浓度在空气中不均匀, 各个测量点的测量误差存在差异, 但是绝对测量误差均小于 0.01%, 满足实际甲烷浓度检测精度要求。智能检测仪嵌入式核心板和数据采集板总功耗小于 5 W, 外壳尺寸 8 cm × 7 cm × 4 cm, 重量不超过 0.7 kg, 符合便携式测量的要求<sup>[13]</sup>。

(下转第 1992 页)

阻上形成电压信号和 2.5 V 恒压源驱动被测电阻分压形成电压信号的两种电阻测量方法, 根据欧姆定理和电阻分压原理, 以及采集到的电压值, 就可以计算出被测电阻的值<sup>[6]</sup>。

### 5 系统功能测试

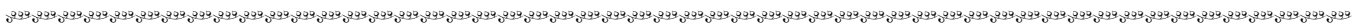
采用 Agilent U3401A 数字万用表对被测电阻进行对比测试, 测试项目包括 100 Ω~10 MΩ 共 4 种量程内的电阻测试, 以及电阻筛选功能测试。测试结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 电阻值和误差测试

档位	标称值	万用表测量值	系统测量值	测量误差 (%)
100Ω	3.3 Ω	3.4 Ω	3.41 Ω	0.29
	68 Ω	68.12 Ω	68.1 Ω	0.03
1 kΩ	200 Ω	200.2 Ω	200.3 Ω	0.05
	680 Ω	680.2 Ω	679.2 Ω	0.15
10 kΩ	3.3 kΩ	3.28 kΩ	3.27 kΩ	0.3
	9.6 kΩ	9.59 kΩ	9.61 kΩ	0.21
10 MΩ	860 kΩ	860.2 kΩ	861.1 kΩ	0.10
	4.3 MΩ	4.28 MΩ	4.27 MΩ	0.23

表 3 电阻筛选功能测试

标称值	设定电阻值	设定误差 (%)	系统测量值	是否符合
10 Ω	10 Ω	1	10.1 Ω	合格
200 Ω	200 Ω	1	201.2 Ω	合格
4.7 kΩ	4.7 kΩ	0.5	4.65 kΩ	合格
9.6 kΩ	9.6 kΩ	0.5	9.62 kΩ	不合格
5.1 MΩ	5.1 MΩ	1	5.11 MΩ	合格



(上接第 1989 页)

表 1 标准测量与样机测量结果对比

序号	标准校正仪测量 (%)	结果样机测量 (%)	绝对误差 (%)
1	3.20	3.19	0.01
2	3.21	3.22	0.01
3	3.19	3.20	0.01
4	3.35	3.34	0.01
5	3.24	3.25	0.01
6	3.46	3.46	0.00
7	3.23	3.20	0.03
8	3.31	3.30	0.01
9	3.33	3.32	0.01
10	3.41	3.41	0.00

### 6 结论

本文设计并实现了智能检测仪, 设计丰富了 GUI 系统, 设计了风量模型、风速表、零点漂移校正、断面勘测、气体实时采样、温度实时采样、激光探头启动及状态分析等功能, 利用 ARM、DSP 构建双处理器架构, 提高了检测仪数据处理能力以及检测精度, 由于检测仪的软硬件平台功能强大, 将会在工业领域中得到很好的应用, 尤其在智能电网、风力发电及煤矿安全等工业现场。

#### 参考文献:

[1] 张旭莘, 刘振乾, 王 顺, 等. 基于双处理器架构的列车超限检

测系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33 (1): 91-93.

### 6 结论

本自动电阻测量仪是以 TMS320F2812 处理器为核心, 根据恒流源和恒压源作用在不同电阻范围内的优点, 设计电阻测量驱动电路; 在系统软硬件设计上, 采用 ADC 采样校正算法、数字滤波等技术, 使各量程内的电阻测量精度均达到 0.3%; 通过系统功能测试, 该电阻测量仪具有量程手动或自动转换档位、自动电阻筛选等功能, 测量精度高, 可广泛应用电阻测量、电阻筛选等场合。

#### 参考文献:

[1] 陈文华, 余水宝, 张艳艳. 高精度宽量程电阻测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (8): 452-453.  
 [2] 高吉星, 赵 强, 佟为明. 基于 ENC28J60 的 TMS320F2812 以太网通信接口设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 709-711.  
 [3] 李德尧, 等. 基于单片机的自动电阻测量仪设计 [J]. 仪表技术, 2012, (1): 16-24.  
 [4] 韩富春, 武天文, 等. 采用软件校正的 TMS320F2812 内置 ADC 采样值方案 [J]. 太原理工大学学报, 2006 (2): 173-175.  
 [5] 顾卫钢编. 手把手教你学 DSP—基于 TMS320X281X [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.  
 [6] 李鹏程, 靳世久, 陈世利. 基于恒流源的陀螺仪测温丝电阻测量电路的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (12): 1781-1801.  
 [7] 郝 研, 王太勇. 基于分形理论的便携式故障诊断系统的设计与开发 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (12): 2742-2747.  
 [8] 张金平, 张定会, 谢光伟, 等. 基于 Linux 下的 ARM 与 DSP 之间数据通信 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (s3): 2056-2059.  
 [9] 竺乐庆, 张三元, 幸 锐. 基于 ARM 与 Windows CE 的掌纹鉴别系统 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (12): 2624-2626.  
 [10] 樊杨垂. 基于 pC/OS-1H 的煤矿瓦斯图形智能检测仪的设计与实现 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.  
 [11] 石 零, 余新明, 吴学军, 杨伟忠, 邓金灿. 巷道断面测定仪的研制 [J]. 矿山测量, 2010, (6): 54-56.  
 [12] 洪占勇, 杨永跃, 邓善熙. 车轮热轧轮胚尺寸激光测量系统的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24 (7): 686-691.  
 [13] 黄 旭. 基于 TDC-GP2 的远距离脉冲式激光测距的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
 [14] 金 晶. 基于 ARM 的超声波风速测量系统设计 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.  
 [15] Chen, Sun T, Liang N C. An Evaluation Study of Mobility Support in ZigBee Networks [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2010, (4): 111-122.  
 [16] 秦 怡, 曹雪祥. 矿井瓦斯浓度测量仪器的设计 [J]. 矿业安全与环保, 2010, 37 (1): 223-227.  
 [17] 唐密媛, 张根宝. 基于 ARM Cortex-M3 的便携式智能瓦检仪的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (12): 45-49.  
 [18] 路秋英, 郝国法, 向晓东. 基于 51 单片机和 VB6.0 的瓦斯浓度监测系统 [J]. 工矿自动化, 2008, (1): 38.