

## 摘要

大型桥梁健康监测及其数据采集系统目前在桥梁的施工及其运营中是一个比较新的研究方向，其内容涵盖了桥梁结构设计分析和自控领域数据采集两大方面，根据桥梁监测系统的特点，通常采用分布式采集的方法。本文结合国内外的研究实例，针对国内大型桥梁健康监测系统近几年的蓬勃发展，力争系统地对分布式数据采集在桥梁健康监测的应用做一个较为全面的研究。

在总结了健康监测中常用的各种传感器输入输出以及采集要求的基础上，单独将这部分传感器数据转换设计为数据采集的前端模块。根据不同的桥梁结构和监测要求，主要设计了基于 RS485 和工业以太网两种总线的智能调理器设备，智能调理器用于将传感器的数据传送到总线上，以一定的协议和远程监测站通信，这种总线系统减少了施工的工程量，提高了数据的采集精度。文中详细分析了基于这两种智能调理器的数据采集系统设计，智能调理器及其相关设备的软硬件设计。最后一章还简要分析了健康监测中用到的其它数据采集方案。目前这些设备已经在实际中得到良好的运用。

关键词：大型桥梁；健康监测；数据采集；RS485；工业以太网

## Abstract

The system of health monitoring and data acquisition for large bridge is a new research direction in Construction and running of bridge at present, it includes the structure design analyze of bridge and data acquisition of automatic domain, according to the system's character of bridge monitoring, the distributed system is often used. With the sample of research in both here and abroad, a full-scale research of data acquisition has been made in the application of bridge health monitoring according to the development of domestic monitoring system.

A front module of data acquisition has been designed based on the I/O of all kinds of sensors and requirement of collection. Two smart conditioners also have been designed according to the different requirement of the bridge structure and monitoring content, the smart conditioner send the data of sensor to the LAN and communicate with the long-distance station, this LAN system reduce the amount of work and improve the acquistion precision of data. The data acquisition system based on two smart conditions and the device of smart conditioner and its correlation have been analyzed. The other data acquisition project has been analyzed in the last chapter. This device has been used in the actual project.

**Key Words :** Large Bridge; Healthing Monitoring; Data Acquisition; RS485;  
Industrial Ethernet

## 插图索引

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 图 2-1 惠斯登电桥比率测量方法.....                | 6  |
| 图 3-1 大型桥梁健康监测数据自动化采集系统.....          | 11 |
| 图 3-2 实验室中模拟现场在运行的数据采集系统.....         | 12 |
| 图 3-3 RS485 总线错误与正确的网络配置.....         | 12 |
| 图 3-4 RS485 总线共模干扰问题.....             | 14 |
| 图 3-5 485智能调理器的电路结构框图.....            | 16 |
| 图 3-6 RS485 偏置电阻.....                 | 16 |
| 图 3-7 RS485 总线的两级防护电路图.....           | 18 |
| 图 3-8 智能调理器软件串行中断服务程序流程图.....         | 20 |
| 图 3-9 RS485 中继器电路结构图.....             | 20 |
| 图 3-10 利用 485 中继器延长 RS485 总线距离.....   | 21 |
| 图 3-11 利用 485 中继器解决 RS485 总线分叉问题..... | 21 |
| 图 3-12 正在组装的前置机系统.....                | 23 |
| 图 3-13 远程监测站中运行的上位机系统.....            | 24 |
| 图 3-14 调试中的手操器.....                   | 25 |
| 图 4-1 基于工业以太网的大型桥梁健康监测数据自动化采集系统.....  | 29 |
| 图 4-2 以太网智能调理器电路结构图.....              | 34 |
| 图 4-3 TCP/IP 四层结构图.....               | 35 |
| 图 4-4 数据进入协议栈时的封装过程.....              | 39 |
| 图 4-5 Modbus 数据帧格式.....               | 40 |
| 图 4-6 UDP 端口调试软件发送一帧数据.....           | 42 |
| 图 4-7 UDP 发送接收数据 ARP 参与过程.....        | 44 |
| 图 4-8 网络工具CommView跟踪UDP数据采集.....      | 45 |
| 图 4-9 查看ARP高速缓冲区.....                 | 45 |
| 图 4-10 上位机发送ARP广播帧.....               | 46 |
| 图 4-11 以太网智能调理器返回 ARP 帧.....          | 46 |
| 图 4-12 上位机请求 UDP 数据帧.....             | 49 |
| 图 4-13 以太网智能调理器返回 UDP 数据帧.....        | 50 |
| 图 4-14 登陆 WEB 服务器的过程.....             | 51 |
| 图 4-15 WEB 服务器页面.....                 | 52 |
| 图 4-16 采用 Mid-span 的 POE 系统工作示意图..... | 53 |
| 图 4-17 48V 电源加在信号线对或备用线对上.....        | 54 |
| 图 4-18 MAX5941 内部电路框图.....            | 57 |
| 图 4-19 以太网供电电路图.....                  | 59 |
| 图 5-1 无线监测系统结构图.....                  | 62 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 图 5-2 无线采集器电路图.....       | 63 |
| 图 5-3 无线WEB服务器电路结构框图..... | 64 |
| 图 5-4 客户端浏览到的WEB页面.....   | 66 |

## 附表索引

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 表 2-1 大型桥梁健康监测中常用的传感器.....           | 5  |
| 表 3-1 Modbus 协议信息帧结构.....            | 18 |
| 表 3-2 两个常用的 Modbus 功能码.....          | 19 |
| 表 4-1 RTL8019 地址线对应的二进制.....         | 34 |
| 表 4-2 以太网物理传输帧.....                  | 37 |
| 表 4-3 Modbus 常用公共功能代码.....           | 41 |
| 表 4-4 传送一帧 Modbus/TCP 数据.....        | 49 |
| 表 4-5 IEEE802.3af 对于 PD 侦测特征的规定..... | 54 |
| 表 4-6 IEEE802.3af 对于 PD 分级的规定.....   | 55 |
| 表 5-1 无线 WEB 服务器协议格式.....            | 65 |

# 兰州理工大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：陈红波

日期：2006年4月9日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权兰州理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

2、不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：陈红波

日期：2006年4月9日

导师签名：李生明

日期：2006年4月9日

## 第1章 绪论

### 1.1 本研究课题的学术背景与实际意义

随着科学技术的进步，作为基础设施的桥梁工程，其建设规模越来越大，造价越来越高。并且大型桥梁在国民经济和社会生活中起着举足轻重的作用。由于气候、环境等自然因素的作用和日益增加的交通量及重车、超重车过桥数量的不断增加，桥梁结构使用功能的退化必然发生，在我国经济迅速发展的形势下，对于交通运输能力的要求也在不断提高，不少桥梁的老化和功能退化已呈现加速的趋势。对已有桥梁特别是对交通运输有重大影响的大跨径桥梁进行必要的监测和相应的养护，对于确保桥梁安全运营，延长桥梁的使用寿命是十分必要。早期发现桥梁病害能大大节约维修费用，可以避免因关闭交通而引起的损失。

1994年10月韩国汉城发生了横跨汉江的圣水大桥中央断塌50m，其中15m掉入江中，造成死亡32人，重伤17人的重大事故。据称造成桥梁在行车高峰期突然断裂的原因是长期超负荷运营，钢析梁螺栓及杆件疲劳破坏所致。

我国早期建造的斜拉桥，由于拉索的防护措施不够合理、可靠而引起斜拉索的严重锈蚀。如济南黄河桥、广州海印桥的斜拉索在远没有达到他们设计寿命的情况下，被迫全部更换，造成很大的经济损失和不良的社会影响。

韩国圣水大桥毁桥事故及我国济南黄河桥和广州海印桥的斜拉索被迫提前更换与很多因素有关，但是缺乏有效的监测措施和必要的维修、养护措施是最重要的原因之一。

过去十几年里，我国已建成一批大跨度的桥梁，仅上海的黄浦江上就有南浦、杨浦和徐浦大桥等具有世界先进水平的桥梁。为了确保大型桥梁结构的使用安全性和耐久性，减少和避免国家、人民生命财产的重大损失，进行大型桥梁结构工作状态和结构特性参数的监测和评估工作已迫在眉睫。为了确保这些耗资巨大、与国计民生密切相关的大桥的安全耐久，许多研究人员都在致力于研究针对桥梁或其他结构的监测及其相应的数据自动化采集系统，就是在大型桥梁上合适的位置安装合适的传感器，利用符合桥梁数据采集要求的嵌入式采集设备，将数据传送到较远距离的远程监测站，分析桥梁的结构状态，对桥梁的健康状况做出评估，进行维护。桥梁安全监测正日益成为土木工程学科和自动化监测学科交叉的一个非常活跃的研究方向。

### 1.2 大型桥梁健康监测及其数据采集的国内外研究动态

目前，国内外的许多大学及研究机构都在积极投入人力、财力研制开发针对桥梁或其他土木工程的安全监测系统。其中包括研究使用先进方法来测量土木工程的一些指标，如位移，应变等。在过去的二十年间，各类新型的传感器相继投入使用，

如早先用于航空工业的光纤传感器、新近投入使用的数字温度传感器等。仪器设备的发展使得测量变得相对简单而且使得处理数据的速度变得很快甚至可以达到实时处理。下面扼要介绍国际国内在桥梁监测及其数据自动化采集方面的研究动态。

### 1.2.1 国外研究动态

加拿大 Quebec 的 Portneuf 桥是一座小跨径高强度混凝土后张式桥。桥上装有先进的温度及静态应变监测系统。桥上有 14 个温度及应变测点。利用调制、解调技术来实现数据自动化采集并且远距离传输，从而监测桥梁的温度变化及应变变化<sup>[1]</sup>。

美国的 Zui 等研制出一种在斜拉桥或悬索桥建造过程中用来调整索力的自动索力测量仪。该仪器设计基于振动测量及分析技术，使得现场自动化采集数据、分析数据成为可能<sup>[2]</sup>。

人们经常采用测量结构在外荷载作用下的动力响应来分析结构的动力特性。 Gilani 等最近在美国加州一座四跨高架桥上运用动力测量来考察桥梁改造的可能性。他们运用高精度数字采集系统及现场计算机来完成对桥梁的自动化测量和初步分析工作。

美国的 Abdel-Ghaflar, Masri and Nibor 在洛杉矶的 Vincent Thomas 桥上进行了一次考察其动力特性的振动测试。一个 19 位(bit)的 A / D 转换数字采集系统将临时和已有的地震记录系统连接起来。用一个封闭的数字通信系统来进行远距离控制及数据采集。在一天中的不同时刻及不同的交通情况下，通过自动采集环境随机振动数据来评价当时振动的模态参数<sup>[3]</sup>。

佛罗里达的 Sunshine skyway 桥上安装有一套综合的设备。它们用来测量在建造中和建成后桥梁的温度、应变及位移，同时通过近距离和远距离两种方式自动采集数据。在建造中，结构及材料随时间变化的特性可以通过分析测量数据来得出<sup>[4]</sup>。

苏格兰的 Kingston 桥是一座旧桥，桥上装有一套安全监测系统，能够远距离自动监测桥梁位移、应变、温度及风力的变化。监测的目的是为了帮助桥梁工程师在修复这座桥期间避免发生倒塌事故。监测计算机装有报警装置，它能在异常风速或其他异常情况下提醒桥梁管理部门<sup>[5]</sup>。

泰国的 Rama IX 桥和韩国的 Namhae 桥上都安装了缩写名为 OASIS(结构安全与完整在线警报系统)的系统。该系统可以自动探测异常风速及异常振动情况，长期监测桥梁动力特性的改变，从而测出疲劳损伤。该系统把相距很远的桥上仪器、监视计算机和实时数字分析仪通过电线及光纤连接。

纽约交通局的 Alampalli 等在纽约的 1--490 / conrail 桥上安装了一套远距离桥梁监测系统。这套系统运用动力测量及基于模态参数的分析技术来探测桥梁结构长期的退化或损坏。纽约州的有关部门正在把这套系统推广应用到其他桥梁上<sup>[6]</sup>。

辛辛那提大学基础设施研究所的 Aktan 等曾在结构状况监测仪器商品化方面做过详细的研究。后来他们研制出一种基于商品化技术的轻便的现场仪器，用来对桥

梁现状进行长期和短期的监测。后来这种桥梁监测的系统被辛辛那提州政府推广应用，大约有六座桥梁将装上这种仪器。

在奥克拉哈马 Purcell 附近的 Walnut Creek 桥上也装有类似的装置。这座桥上装有“地震振动主动吸收仪”，同时还有用于监测反馈及响应特性的监测系统，数据采集系统装有 Modem 通信回路，这样可以远距离监测及控制<sup>[7]</sup>。

由以新墨西哥大学 Ming L Wang 教授为主以及圣母大学、香港科技大学等单位联合组织的攻关小组，最近正致力于开发一种高级的、针对长跨桥梁的监测系统。项目的目标是运用专家系统、新一代的传感器及无线通信系统组成一套桥梁自动监测系统<sup>[8]</sup>。

### 1.2.2 国内研究动态

目前，在国内大多数大规模的桥梁上都已经安装有各种自动监测装置，已经建成和在建的如上海卢浦大桥、杭州湾跨海大桥、润扬长江大桥、深圳湾大桥、南京长江三桥等都配备了齐全的多种传感器进行大桥的实时监测，还有一些早些时间建成的大桥进行健康监测的改造，如江阴长江公路大桥等。

设立润扬大桥结构安全监测系统，主要应用现代化的传感技术、测试技术、计算机技术、现代网络通讯通信技术对桥梁的工作环境、桥梁的结构状态、桥梁在车载等各类外部荷载因素作用下的响应进行实时自动化监测，及时掌握桥梁的结构状态，全面了解桥梁的运营条件及质量退化状况，为桥梁的运营管理、养护维修、可靠性评估以及科学研究提供依据<sup>[9]</sup>。

南京长江第三大桥将在国内首次建立全面的桥梁结构健康智能监控系统，对施工中的大桥和成桥后的桥梁各个重要部位进行实时监控。通过电脑对大桥的梁、柱、应力应变、受力情况、位移情况等进行监测分析。

### 1.3 本研究课题的来源

- 甘肃省科技攻关项目“基于互联网的微控制器产品开发及关键技术”  
(2GS035-A52-007-02)
- 国家自然科学基金项目“特大跨度桥梁施工及运营阶段智能健康监测与控制技术研究”项目批准号：50278079
- 南京长江第三大桥
- 深圳湾跨海公路大桥

### 1.4 本文主要研究内容

在大型桥梁健康监测工作中，数据采集是整个监测系统中最重要的一个环节。由于国内的大型桥梁健康监测也是刚刚起步时间不长，基本上还没有自主开发的用于大型桥梁数据自动化采集的相应产品，大多数情况下都是购买国外的产品，或者用自动化领域目前通用的数据采集系统，比如虚拟仪器的集中式采集方案，即传感器星型连接，将各个传感器分别用独立电缆连接到中央采集站，由中央采集站将所

有连接的信号集中调理发送到上位机，这种方式线路布设复杂，并且由于传输距离太远，对于桥梁监测中的较多使用的传感器微弱信号会造成数据的失真。

分布式采集系统采用总线结构，各个传感器的输出信号用很短的电缆连接到智能调理器，经过处理后，智能调理器将采集到的数据以抗干扰能力强的差分数字信号方式发送到总线上。这种分布式采集是未来桥梁健康监测系统的一个趋势，但是对于对桥梁做健康监测这样的跨学科跨专业的交叉学科来说，设计一系列数据采集产品对于土木桥梁工程专业是比较困难的，目前急需的就是充分利用自动化领域的知识，开发实用的桥梁健康监测系统中的嵌入式产品。因此本文也从多个方面研究了如何将自动化技术运用于桥梁健康监测系统中，主要目的是设计适合于桥梁使用的智能调理器以及基于智能调理器的数据自动化采集方案，并在此基础上讨论相关产品方案的设计。

本文首先分析了大型桥梁健康监测中设计的智能调理器的前端设计，主要就是设计满足技术指标要求的信号滤波、放大和 A/D 转换，要做到这一点，先分析了常用的传感器，讨论了各种传感器的输出参数以及在数据自动化采集是要满足的技术指标，真实地反映出各个传感器的采样数据，根据电路结构不同，将各种传感器数据采集分为三大类，一种是应变电桥的采集，一种是电压和 4—20mA 电流的采集，另一种是数字温度传感器。这一部分智能调理器前端的设计占重要的地位，决定了能否准确有效的采集到各种传感器的数据。对于智能调理器的通信部分，需要根据桥梁的要求，设计不同的总线方式，常用的是 RS485 总线，设计简单，系统性价比高，另一种是以太网总线方式，布线更灵活方便，安全可靠，本文分两个较大的章节分别讨论了这两种方式，从基于这两种总线的采集系统设计到智能调理器的硬件软件设计做了详细论述。文章的最后还讨论的大型桥梁健康监测中可能用到的其它数据自动化采集方案。

将自动化测控领域的知识和桥梁专业的知识结合起来，基于上述构想，本文主要开展以下三个方面的工作：

- (1) 设计了符合大型桥梁健康监测常用的传感器数据采集的前端模块；
- (2) 基于 RS485 总线的智能调理器的设计。
- (3) 基于工业以太网的智能调理器的设计。
- (4) 其它产品的设计和未来产品设计

上面所述的这些内容在自动化领域基本上是一些成熟的设计和方案，但是结合与桥梁工程的应用，要设计制作成在实际工程中使用的产品，还是有比较大的难度，从采集系统的方案设计、智能调理器采集原理、芯片的选型性价比、抗干扰、通信总线保护直到设计印制板图，编写程序和调试，需要对各种大小问题做全面的了解和掌握，这一点也是和做理论研究的完全不同之处。

本文没有非常详细介绍文中提到的各个器件和协议，这些在网络中都可以方便的查到，更多的是对提到的系统和设计的产品做较为全面的介绍，挖掘出容易疏忽的地方，这些是工作中的一些经验积累，以期和本文读者共同探讨这些内容。

## 第2章 大型桥梁健康监测智能调理器的前端设计

智能调理器的前端设计在智能调理器中或者说在整个数据自动化采集系统中占有重要地位，传感器输出的模拟电压或电流经过智能调理器的前端处理后，转变为数字信号，以串行或并行的方式传送给微处理器，因为传感器的众多，输出参数也不尽相同，考虑到桥梁上安装，调试的方便，尽可能的做到智能调理器的前端设计能满足多种传感器的输出，因此首先就是总结各种传感器的输出，以及希望采集后的技术指标，并且还要考虑未来增加传感器有可能的输出方式。

### 2.1 大型桥梁健康监测中常用的传感器介绍

大型桥梁健康监测是一个全面的数据采集分析的系统，因此，大型桥梁上一般会安装多种类型的传感器，比如测量桥梁应力的应变传感器，索力传感器，测量桥梁的温度、湿度、风速等。详细的传感器如下表 2-1：

表 2-1 大型桥梁健康监测中常用的传感器

| 传感器     | 生产公司          | 采集方式及用途      | 输出参数             | 供电                 | 备注 |
|---------|---------------|--------------|------------------|--------------------|----|
| 索力传感器   | 德国 HBM 应变片    | 惠斯登电桥，测量拉索受力 | ±1.5mv/V         | 无源                 |    |
| 应变传感器   | 德国 HBM 应变片    | 惠斯登电桥，结构变形   | ±1.5mv/V         | 无源                 |    |
| 液压传感器   | 美国 ROSEMOUNT  | 梁的线形         | 4—20mA           | 12-42 Vdc          |    |
| 支座传感器   | 西南交大          | 支座受力         | 4—20mA           | 24V                |    |
| 国产温湿度   | 长英科技          | 塔内温湿度变化      | 4—20mA           | 24V                |    |
| 倾斜传感器   | 美国 Durham     | 塔的倾斜         | ±2.5V dc         | 5.5-15V DC         |    |
| 风速传感器   | 美国 R.M. Young | 桥上的风力及方位     | 0—5V dc          | 12-24V DC<br>110mA |    |
| 温湿度     | 美国 R.M. Young | 梁内外温湿度       | 0—1V dc          | 8-24 VDC           |    |
| 振动传感器   | 地震工程局振动研究所    | 塔和梁的振动       | ±5V dc<br>一般是微电压 | 无源                 |    |
| 数字温度传感器 | 美国 MAXIM      | 各个监测点温度      | 单总线数字            | +5V 或者<br>寄生电源     |    |

### 2.2 智能调理器模数转换部分的设计

根据以上所有传感器的输出参数，将其分为三类，一类是 mV 级的微弱电压信号，主要是惠斯登电桥的输出；一类是电压和电流信号，范围在 -5V—+5V dc 之间，

因为 AD 转换的高阻抗输入，4—20mA 的电流信号通过串接 250 欧姆的精密电阻变为 1—5V dc；一类数字温度传感器，用来监测各个传感器的温度。下面将分别分析这三类输出的 AD 转换方法。

### 2.2.1 惠斯登电桥微弱 mV 信号

索力传感器和应变传感器其实质是在桥梁需要监测的位置安装稳定性良好的电阻式应变计，桥梁的结构变形造成电阻的变化，通过测量阻值的变化而得到桥梁的受力状况，这种电阻式传感器在收到力的作用起响应时，其电阻百分比变化数值很小，因此精确测量电阻式传感器任务比较艰巨，惠斯登电桥提供了一种精确测量微小电阻变化极富有吸引力的解决方案，惠斯登电桥由被连接成四边形的四个电阻，跨接在其中一个对角线上的激励源（电压源或电流源）和跨接在另一个对角线上的电压检测器构成，检测器测量跨接在激励源上的两个分压器输出之间的电压差。

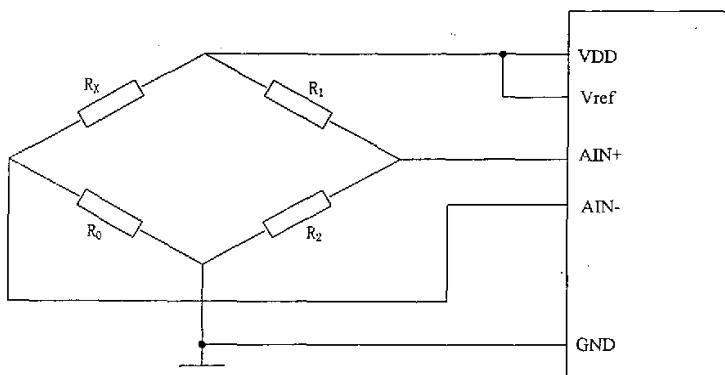


图 2-1 惠斯登电桥比率测量方法

在图 2-1 中，当  $R_x/R_0=R_1/R_2$  时，电桥的输出为 0，而与激励方式（电流或电压、交流或直流）、激励大小、读出方式（电流或电压）或指示器阻抗无关。在大型桥梁采用电桥的传感器应用中，电桥的一个或多个电阻与其初始值的偏离将作为被测变量大小（或变化）的指示。在这种情况下，输出电压的变化便是电阻变化的指示，由于电阻变化一般都很小，所以即使采用激励源电压等于 10V，输出电压的变化也可能小到数十毫伏。在应用中，采用了 2 个或者 4 个电阻桥臂的方式，在这种情况下，我们假定采用恒压激励  $V_b$ ，因此，由于电桥输出与  $V_b$  成正比，所以测量精度不可能优于激励电压的精度<sup>[10]</sup>。

电桥的灵敏度定义为输出电压的最大预期变化与激励电压之比。例如，若  $V_b=10V$ ，而电桥满度输出为 10mV，则灵敏度为  $1mV/V$ 。

维持电桥激励电压的精度和稳定度特别重要，电桥输出与激励电压成正比，激励电压的任何漂移将使输出电压产生相应的漂移。电桥的输出连接到 A/D 转换器，AD 转换器输出数字码  $D_{out}$ ，即  $A_{IN}$  与  $V_{REF}$  之比，输出码对电桥激励和基准电压之间的相对变化很敏感，激励电压的任何变化都会导致由 ADC 检测的模拟输入电压的变化，

由于基准电压、激励等引起的变化不但不会被消除，而且将在测量中受到影响，所以大多数应用都要求使用高度精确、精密且稳定的基准源和激励源，但是这种要求很高，而且测量出的精度往往也不能令人满意，分析电桥的激励、输出和 AD 转换器的参考电压以及 AD 的转换输出的关系，我们采用了一种比率工作方式，同一基准源既用于传感器激励，又用于 ADC，ADC 输出码 DOUT 是转换器的输入 AIN 与其基准点 VREF 之比的数字表示，由于 ADC 及其基准的输入由同一激励源导出，故激励的变化不会引入测量误差，因此，在比率电路配置中，若由传感器测量的变量未改变，则 ADC 的数字输出码不受电桥激励变化的影响。

电桥输出的信号很微弱，一般只有几毫伏，对这样的信号采样首先需将信号放大，测量系统中的放大电路要求精密、低温漂、高共模抑制比 CMRR、一般采用精密仪用放大器或斩波稳零放大器，要达到比较高的测量精度，则需要高分辨率的 ADC，在设计中要选用 14 位或更高有效分辨率的 ADC，随着高密度数字超大规模集成电路工艺的不断发展，很多公司推出了高性能内置信号调理电路的高分辨率  $\Sigma\Delta$  串行 ADC 例如 Analog Devices 的 AD7730，TI/Burr-Brown 的 ADS1210，Cirrus Logic 的 CS5550 等，这类 ADC 由于内部包含了信号调理电路并且是串行接口，所以使电路大大简化，提高了系统整体性能同时也节省了空间，随着成本进一步降低，在各个需要精密测量的领域中都有广泛的应用。

从性能成本等方面综合考虑本系统选用了AD7730它是Analog Devices推出的24位 $\Sigma\Delta$ 串行ADC主要有以下特点

- 峰-峰计数达230,000
- 失调漂移5nV/
- 增益漂移2ppm/
- 线路频率共模抑制>150dB
- 带缓冲器的差分输入
- 可编程滤波器
- 具有低失调和低温漂的斩波Chopper工作方式
- 具有快速阶跃FASTStep工作方式
- 两通道可编程增益前端
- 片内有DAC用于消除失调和去皮
- 可选择直流或交流激励
- 可提供内部校准和系统校准

由以上特点可知AD7730是一款性能优越的ADC，非常适合于电阻应变计等精密测量应用，AD7730使用单电源工作，为了防止干扰，模拟部分和数字部分分别单独供电，电路中通过外接4.9152MHz晶振为AD7730提供主时钟信号<sup>[1]</sup>。

本系统选用的电阻应变计传感器灵敏度为2.0mV/V，在5V激励电压下满刻度输出为10mV，所以将AD7730的输入电压选为10mV，ADC的有效分辨率和采样更新速率、可编程增益放大器的增益等有关，由于输入电压范围已经确定，所以可编程增益放

大器的增益也就确定，这时选择采样更新速率则很重要，更新速率越低，有效分辨率越高，在满足其他要求的情况下尽量降低更新速率，由此来提高有效分辨率。

对于桥式测量电路，其输出电压的稳定性与其工作电桥激励电源的性能是密切相关的，要求电桥激励电源能够对温度时间等因素具有良好的稳定性能，这就需要设计专用的电桥激励，以保证系统工作的稳定性和测量精度，AD7730的基准电压最高允许为+5V，可以与模拟电源电压和电桥激励相同，这就非常方便将测量电路接成比率测量方式，电桥激励电压的输入同时也作为AD7730的差分参考，激励电压的变化不会影响测量结果，能够保证测量精度，比率测量工作方式无需精确稳定的基准电压源，即可实现精确的测量，降低了对电桥激励电源的要求，简化了电路同时也有效的降低了硬件成本<sup>[12]</sup>。

更新速率达到 1.2Ksps 满足动态分析数据的需要。

## 2.2.2 电压和电流信号

为了能满足输入电压范围正负 5V，必须选择一款合适的 AD 转换芯片，其基本要求是单通道输入，数据转换速率在 200HZ 以上，并且还需要选择一款精度符合要求的基准电压。

AD7712 是一种适合低频测量的高精度 A/D 转换器，片内含有两个输入通道，它能把传感器的小信号或大信号 ( $\pm 4 \times V_{REF}$ ) 变成串行数据输出。利用  $\Sigma \Delta$  转换技术，实现高精度，无失码的转换。可编程增益放大器 (PGA) 不仅能满足模拟输入信号宽动态范围的要求，而且还能使输出电平达到电荷平衡 A/D 转换器输入设计的规范值。A/D 转换器的输出馈入数字滤波器，从而消除转换过程中的量化噪声，并获得标准的二进制码，供单片机、微处理器和 DSP 处理<sup>[13]</sup>。

AD7712 和普通的 A/D 转换器 (如逐次逼近和积分式转换器) 不同，只要一加电，AD7712 转换器就开始对输入信号进行采样，而不需要启动信号，这是因为 AD7712 转换器基于连续采样的原理。

AD7712 以 20kHz 或更大的速度对模拟输入信号进行连续采样，采样速率由主时钟 fCLKIN 决定 (速率 fCLKIN/512)。采样信号经  $\Sigma \Delta$  ADC 转换成数字信号，该信号经数字滤波后，以一阶陷波频率确定的速率更新 21 位数据输出寄存器。寄存器中的数据可从双向串行口采用同步 (内或外时钟) 或异步方式随机读取，或者从任意速率到输出寄存器更新速率周期地读取。

AD7712 的串行输出有三种串行输出模式：①同步内时钟 (SSC)；②同步外时钟 (SEC)；③异步通讯方式。

每一个数字周期的开始时刻，AD7712 均要查询 RFS 的状态。如果 RFS 为低电平，那么 SCL K 被激活，AD7712 从 SDATA 脚送出寄存器中的现行数据，先 MSB 后 LSB。在 LSB 送出后，DRDY 信号变为高电平，此时，DRDY 和 SDATA 均为三态输出<sup>[14]</sup>。

## 2.2.3 数字温度传感器

本系统中采用了一种使用 1-wire 结构器件 (DS18B20) 温度传感器。DS18B20 是一个采用 1-wire 总线技术的数字温度传感变送器，它在不同的精度要求下可以输出不同精度的结果，它输出精度的范围是 9~12 位。在本系统中所使用的 9 位转换精度。DS18B20 的测量范围是 -55~125°C，在 -10~+85°C 之间它的线性度非常好，其测量温度可以精确到 ±0.5°C。

DS18B20 有两种供电方式：寄生供电方式和外接供电方式。在寄生供电方式下只要一根数据线再加一根地线 DS18B20 就可以正常工作。但是在寄生供电的方式下，从机和主机之间的距离不可以过长，如果距离长损耗也就大了，寄生方式供电的能量又非常的小，过多的损耗将使得设备不能正常工作。另外，信号在导线中是以横波的方式进行传播的，这样在传播的过程中就会产生很多谐波，容易使设备和主机之间的数据通信受到干扰，因此，两者之间的距离不可过长。当主机和从机之间的距离过大或者一根总线上挂接的器件数目过多时，应当采用外接供电的方式。

和所有的 1-wire 器件一样，DS18B20 也具备一个全球唯一的 64 位的 ID 号，所以在一根 1-wire 总线上可以同时挂多个 DS18B20<sup>[16]</sup>。

## 2.3 总结

前端数据采集模块在智能调理器的设计中占有重要地位，因为这一步工作直接将传感器的模拟信号转换为数字信号送到微控制器处理，在设计过程中尤其要注意几个问题。

- (1) 通信采样速率能否满足要求，采样速率是总线通信和 AD 转换器的重要的技术指标，选择合适采样速率的 AD 芯片并且结合微控制器的选型一定要能保证数据通信采样的要求，对这两个采样速率的一个差值就是微控制器的数据处理能力，因此往往选择比总线通信采样速率要高一些的 AD 采样速率的芯片。
- (2) 抗干扰问题，在桥梁中使用智能调理器，应该注意模拟量输入的抗干扰问题，比如一些空间干扰等，这一点在智能调理器的原理图设计和 PCB 设计都需要注意，必要的时候可以在模块上安装屏蔽等措施。

### 第3章 基于RS485总线的大型桥梁健康监测 数据自动化采集系统

RS485总线目前在工业领域被广泛使用，其布线简单明了，增加接点方便可靠，接口器件众多，便于扩展，而且常搭配应用成熟的Modbus协议，与各种控制系统外围接口通信完全兼容。在大型桥梁健康监测RS485智能调理器数据采集系统中，与智能调理器后端相连接的是RS485采集工业控制计算机，用来进行智能调理器和远程上位机的数据转发工作，RS485采集工业控制计算机以光纤以太网的方式和上位机进行通信，构成的智能调理器总线数据采集方案性能优越，可以在几十公里或者更远的远程监测站内稳定监测桥梁上各个传感器布设点的数据。

#### 3.1 RS485总线简单介绍

RS-485标准是由两个行业协会于1983年共同制订合开发的，即EIA—电子工业协会和TIA—通讯工业协会。EIA开始时在它所有的标准前加上“RS”前缀（推荐标准 Recommended standard 的缩写）。这个名称一直延用至今，现在EIA-TIA已正式用“EIA/TIA”取代“RS”以明确其来源。修订后命名为TIA/EIA-485-A。不过我们还是习惯地称之为RS-485。RS-485由RS-422发展而来。两者是工业应用中最成功的标准。而RS-422是一个差分标准，是为了弥补RS-232的不足提出来的，改进了RS-232通讯距离短和速率低的缺点，RS-422定义了一种平衡通信接口，将传输速率提高到了10Mbps，在速率低于1000Kbps时传输距离延长到4000英尺，并且允许在一条平衡线上连接最多10个接收器，可以说RS-422是一种单机发送、多机接收的单向传输规范。

RS-485是在RS-422的基础上，为了扩展应用范围和通讯能力，增加了多点、双向通信能力，也就是说，允许多个发送器连接到同一条总线上，同时，增加了发送器的驱动能力和通讯冲突的保护特性，通过差分传输扩展总线的共模范围。RS-485满足了所有的RS-422规范，但反之则不成立。

RS-485实质上是一个电气接口规范，它只规定了平衡驱动器~~合~~接收器的电特性，而没有规定插件、传输电缆与及通信协议。只是对应于七层模型中的物理层。RS-485的接口规范特点：

- 平衡传输、差动工作模式
- 驱动器带载最小输入电压：±1.5V
- 最大输出短路电流：250mA
- 接收器输入门限：±200mV
- -7V至+12V总线共模范围  
(12Vin/-7Vin)
- 接收器输出逻辑高：>200mV
- 最大总线负载：32个单位负载
- 多点通信
- 驱动器带载最大输入电压：±5V
- 驱动器输出阻抗：54Ω
- 接收器最小输入阻抗：12KΩ
- 最大输入电流 1.0mA/-0.8mA
- 接收器输出逻辑低：<200mV
- 允许收发器数目：32Tx、32Rx

●最大传输速率：10Mbps

●最大电缆长度：4000 英尺（约 1.2 千米）

RS-485 标准定义了一个基于单对平衡线的多点、双向（半双工）的通讯链路，提供了高噪声抑制、高的传输速率、长传输距离、宽共模范围和低成本的通信平台。随着数字技术的发展和计算机日益广泛的应用，现在一个系统往往由多台计算机组成，需要解决多站、远距离通信的问题。在要求通信距离为几十米到上千米时，广泛采用 RS-485 收发器。RS-485 收发器采用平衡发送和差分接收，因此具有抑制共模干扰的能力，加上接收器具有高的灵敏度，能检测低达 200mV 的电压，故传输信号能在千米以外得到恢复。使用 RS-485 总线，一对双绞线就能实现多站联网，构成分布式系统，设备简单、价格低廉、能进行长距离通信的优点使其得到了广泛的应用<sup>[16]</sup>。

### 3.2 基于 RS485 总线的数据自动化采集系统的设计

基于RS485总线的大型桥梁健康监测数据自动化采集系统的设计中，智能调理器后端设计为RS485总线方式，以RS485的差分数据信号输出到总线，最远可以传输1200m，用来汇总各个智能调理器数据的工业控制计算机选用了MOXA公司性能强大的嵌入式智能通讯服务器UC-7420，UC-7420是专为嵌入式应用而设计的智能通讯服务器，具备8个RS232/422/485串口，双10/100Mbps以太网网络端口，PCMCIA作无线通讯，以及扩充用的CompactFlash接口。通过UC-7420的网络端口外接网络转光纤模块，使数据最终达到远程监测站的上位机，上位机是基于VC++编程的大桥综合管理系统，包括了用户界面及中心数据库子系统。以上构成的桥梁数据自动化采集与传输结构图如图3-1。

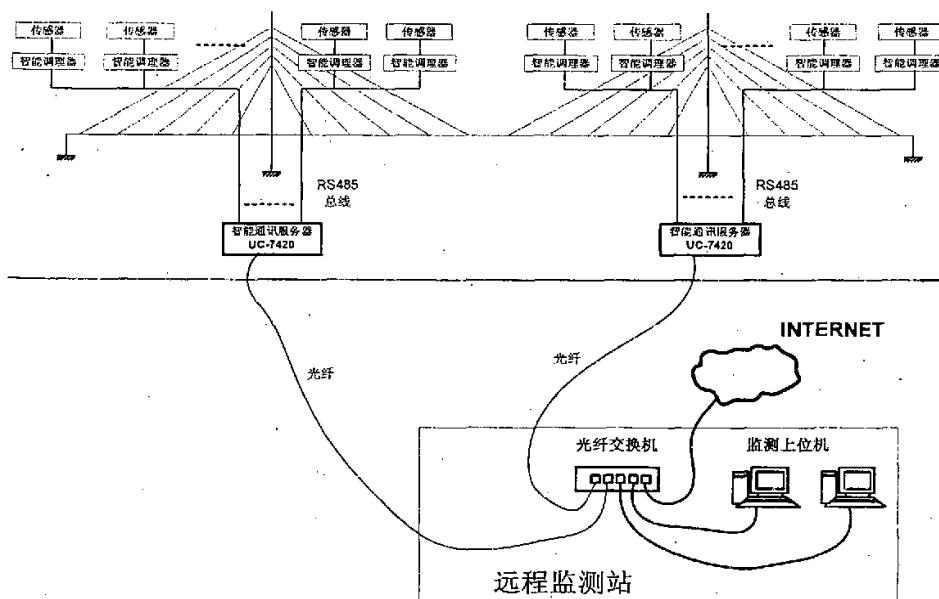


图3-1 大型桥梁健康监测数据自动化采集系统

在实验室中模拟现场在运行的数据采集系统如图3-2

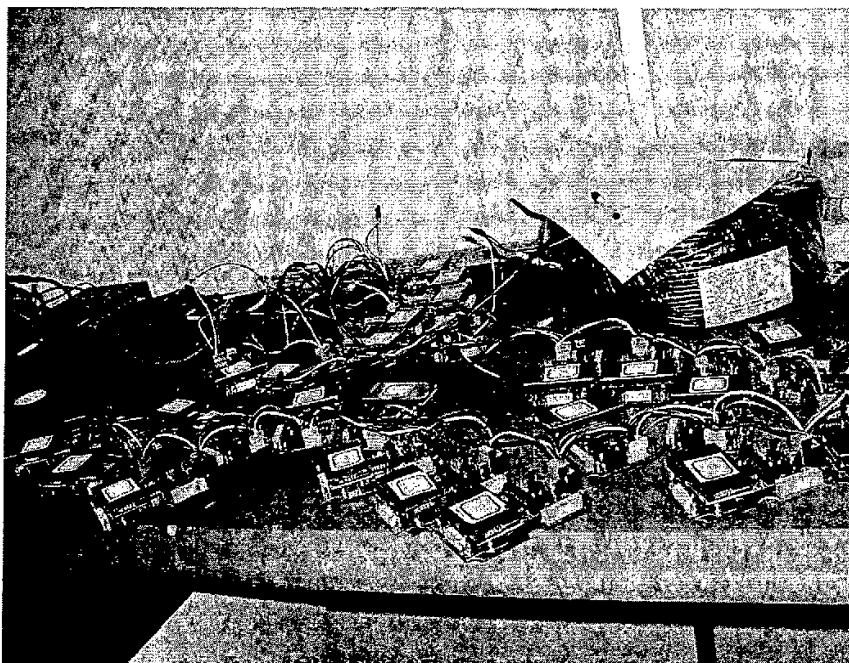


图3-2 实验室中模拟现场在运行的数据采集系统

### 3.2.1 总线结构网络配置

RS-485 支持半双工或全双工模式，网络拓扑一般采用终端匹配的总线型结构，不支持环形或星形网络。最好采用一条总线将各个节点串接起来，从总线到每个节点的引出线长度应尽量短，以便使引出线中的反射信号对总线信号的影响最低。图3-3所示为实际应用中常见的一些错误连接方式(A, B, C)和正确的连接方式(D, E, F)。A, B, C三种不恰当的网络连接尽管在某些情况下(短距离、低速率)仍然可以正常工作，但随着通信距离的延长或通信速率的提高，其不良影响会越来越严重，主要原因是信号在各支路末端反射后与原信号叠加，造成信号质量下降。除此之外还应注意总线特性阻抗的连续性，在阻抗不连续点也会发生信号的反射。例如，总线的不同区段采用不同电缆、某一段总线上有过多收发器紧靠在一起安装、或者是有过长分支线引出总线时都会出现阻抗不连续点。总之，应该提供一条单一、连续的信号通道作为总线。

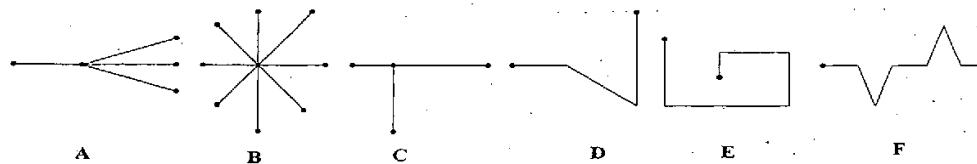


图3-3 RS485总线错误与正确的网络配置

有关总线上允许连接的收发器数标准并没有做出规定，但规定了最大总线负载为 32 个单位负载（UL）。每单位负载的最大输入电流为  $1.0\text{mA} / -0.8\text{mA}$ ，相当于约  $12\text{k}\Omega$ 。为了扩展总线节点数，器件生产厂商增大收发器输入电阻。例如 MAX487，MAX1487 的输入电阻增加至  $48\text{k}\Omega$  以上 ( $1/4\text{UL}$ )，节点数就可增加至 128 个， $96\text{k}\Omega$  输入电阻的 MAX1483 允许节点数可到 256 个<sup>[17]</sup>。

### 3.2.2 总线匹配

是否对 RS-485 总线进行终端匹配取决于数据传输速率、电缆长度及信号转换速率。UART 是在每个数据位的中点采样数据的，只要反射信号在开始采样时衰减到足够低就可以不考虑匹配。有一条经验性的准则可以用来判断在什么样的数据速率和电缆长度时需要进行匹配：当信号的转换时间（上升或下降时间）超过电信号沿总线单向传输所需时间的 3 倍以上时就可以不加匹配。例如具有限斜率特性的 RS-485 接口 MAX483 输出信号的上升或下降时间最小为 250ns，典型双绞线上的信号传输速率约为  $0.2\text{m/ns}$  (24AWG PVC 电缆)，那么只要数据速率在 250kbps 以内、电缆长度不超过 16 米，采用 MAX483 作为 RS-485 接口时就可以不加终端匹配。

当考虑终端匹配时，有多种匹配方案可以选择。最简单的就是在总线两端各接一只阻值等于电缆特性阻抗的电阻。大多数双绞线特性阻抗大约在  $100\Omega$  至  $120\Omega$  之间。这种匹配方法简单有效，但有一个缺点，匹配电阻要消耗较大功率，对于功耗限制比较严格的系统不太适合。另外一种比较省电的匹配方式是 RC 匹配。利用一只电容 C 隔断直流成分可以节省大部分功率。但电容 C 的取值是个难点，需要在功耗和匹配质量间进行折衷。除上述两种外，还有一种采用二极管的匹配方案。这种方案虽未实现真正的“匹配”，但它利用二极管的钳位作用迅速削弱反射信号，达到改善信号质量的目的，节能效果显著<sup>[18]</sup>。

### 3.2.3 引出线

RS-485 总线上的每个收发器通过一段引出线接入总线，引出线过长时，由于信号在引出线中的反射，也会影响总线上的信号质量。和前面的讨论一样，系统所能允许的引出线长度也和信号的转换时间、数据速率有关。下面的经验公式可以用来估算引出线的最大长度：

$$L_{\max} = (t_{RISE} \times 0.2\text{m/ns}) / 10$$

以 MAX483 为例，对应于 250ns 的上升/下降时间，总线允许的最大引出线长度约为 5 米。

从以上的分析可以看出，减缓信号的前后沿斜率有利于降低对于总线匹配、引出线长度的要求，改善信号质量，同时，还使信号中的高频成分降低，减少电磁辐射，因此，有些器件生产厂商在 RS-485 接口器件中增加了摆率限制电路来减缓信号前后沿，但这种做法也限制了数据传输速率。由此看来，在选择接口器件时，并不是速率越高越好，应该根据系统要求，选择最低速率的器件。

如果布线时需要扩展较长的分支，则配合用 RS485 中继器来完成网络布线，详细内容请见 RS485 中继器一节。

### 3.2.3 485 总线通讯线缆的选择

必须采用国际上通行的屏蔽双绞线。我们推荐用的屏蔽双绞线的型号为 RVSP2\*0.5 (二芯屏蔽双绞线，每芯由 16 股的 0.2mm 的导线组成)。采用屏蔽双绞线有助于减少和消除两根 485 通信线之间产生的分布电容以及来自于通讯线周围产生的共模干扰。

### 3.2.4 RS-485 的接地问题

电子系统接地是很重要的，但常常被忽视。接地处理不当往往会导致电子系统不能稳定工作甚至危及系统安全。RS-485 传输网络的接地同样也是很重要的，因为接地系统不合理会影响整个网络的稳定性，尤其是在工作环境比较恶劣和传输距离较远的情况下，对于接地的要求更为严格。否则接口损坏率较高。很多情况下，连接 RS-485 通信链路时只是简单地用一对双绞线将各个接口的“A”、“B”端连接起来。而忽略了信号地的连接，这种连接方法在许多场合是能正常工作的，但却埋下了很大的隐患，这有下面二个原因：

A. 共模干扰问题：正如前文所述，RS-485 接口采用差分方式传输信号方式，并不需要相对于某个参照点来检测信号，系统只需检测两线之间的电位差就可以了。但人们往往忽视了收发器有一定的共模电压范围，RS-485 收发器共模电压范围为 -7~+12V，只有满足上述条件，整个网络才能正常工作。当网络线路中共模电压超出此范围时就会影响通信的稳定可靠，甚至损坏接口。以图 3-4 为例，当发送驱动器 A 向接收器 B 发送数据时，发送驱动器 A 的输出共模电压为  $V_{os}$ ，由于两个系统具有各自独立的接地系统，存在着地电位差  $V_{gpd}$ 。那么，接收器输入端的共模电压  $V_{cm}$  就会达到  $V_{cm}=V_{os}+V_{gpd}$ 。RS-485 标准均规定  $V_{os}\leq 3V$ ，但  $V_{gpd}$  可能会有很大幅度（十几伏甚至数十伏），并可能伴有强干扰信号，致使接收器共模输入  $V_{cm}$  超出正常范围，并在传输线路上产生干扰电流，轻则影响正常通信，重则损坏通信接口电路。

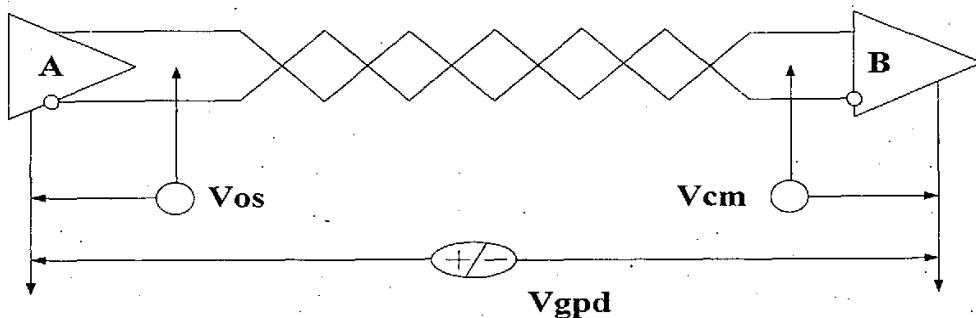


图 3-4 RS485 总线共模干扰问题

B. (EMI) 问题：发送驱动器输出信号中的共模部分需要一个返回通路，如没有一个低阻的返回通道（信号地），就会以辐射的形式返回源端，整个总线就会像一个巨大的天线向外辐射电磁波。

由于上述原因，RS-485 尽管采用差分平衡传输方式，但对整个 RS-485 网络，必须有一条低阻的信号地。一条低阻的信号地将两个接口的工作地连接起来，使共模干扰电压 V<sub>GPD</sub> 被短路。这条信号地可以是额外的一条线（非屏蔽双绞线），或者是屏蔽双绞线的屏蔽层。这是最通常的接地方法。

值得注意的是，这种做法仅对高阻型共模干扰有效，由于干扰源内阻大，短接后不会形成很大的接地环路电流，对于通信不会有很大影响。当共模干扰源内阻较小时，会在接地线上形成较大的环路电流，影响正常通信。经过分析，可以采取以下三种措施：

- (1) 如果干扰源内阻不是非常小，可以在接地线上加限流电阻以限制干扰电流。接地电阻的增加可能会使共模电压升高，但只要控制在适当的范围内就不会影响正常通信。
- (2) 采用浮地技术，隔断接地环路。这是较常用也是十分有效的一种方法，当共模干扰内阻很小时上述方法已不能奏效，此时可以考虑将引入干扰的节点（例如处于恶劣的工作环境的现场设备）浮置起来（也就是系统的电路地与机壳或大地隔离），这样就隔断了接地环路，不会形成很大的环路电流。
- (3) 采用隔离接口。有些情况下，出于安全或其它方面的考虑，电路地必须与机壳或大地相连，不能悬浮，这时可以采用隔离接口来隔断接地回路，但是仍然应该有一条地线将隔离侧的公共端与其它接口的工作地相连<sup>[19]</sup>，具体方法详见硬件电路设计一节。

### 3.3 485 智能调理器的设计

智能调理器在数据自动化采集与传输系统中处于最底层的位置，经过智能调理器处理后的数据传输到总线上的为数字信号，数字信号在传输过程中不会出现系统的误差，因此智能调理器的设计对于整个系统至关重要，下面详细分析智能调理器的设计方案以及各种重要芯片的选型。

#### 3.3.1 硬件电路的设计

首先是智能调理器的微控制器，其选择需要满足内部数据处理速率的要求以及够用的外部接口端口，为方便未来的升级需要，在本系统中选择了通用的8051系列微控制器，40脚封装的AT89S52，考虑到智能调理器应该在工业现场稳定运行，放弃使用AT89S52内部的看门狗，采用了一片硬件看门狗X5045，其内部还有512字节的EEPROM，用来保存各个智能调理器的参数。

智能调理器的电路结构框图如图3-5。

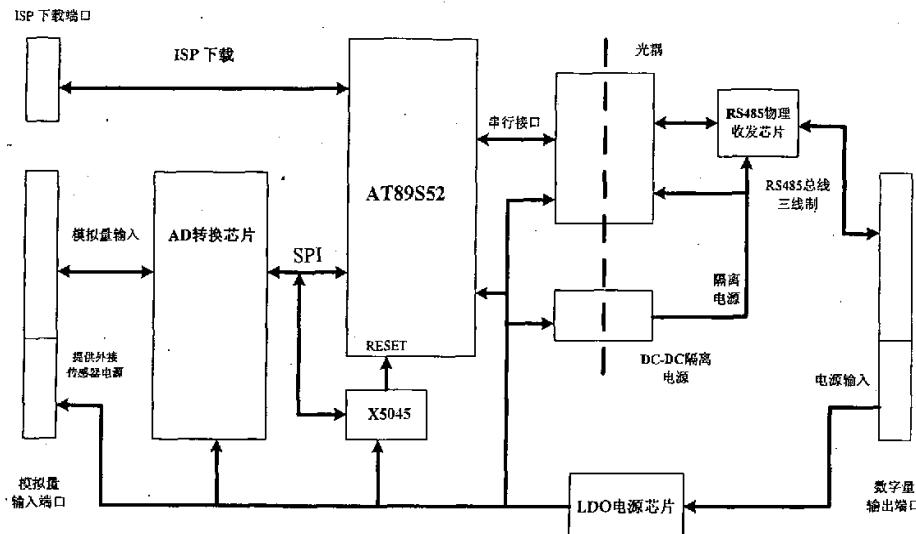


图3-5 485智能调理器的电路结构框图

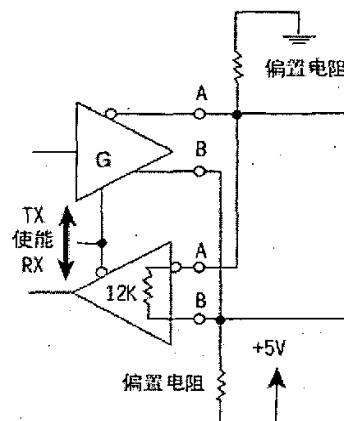
### 3.3.1.1 合理选择RS485收发芯片

RS485 通信部分的电路需要根据需要选择合适的 RS485 收发器，标准的 RS485 仅支持每个 RS485 总线上连接 32 个单位负载 (UL)，但现在大多数半导体厂商通过增大收发器输入电阻来扩展总线节点数，例如输入电阻增加至  $48k\Omega$  以上 ( $1/4UL$ )，节点数就可以增加至 128 个。例如，对外置设备为防止强电磁（雷电）冲击，建议选用 TI 的 75LBC184 等防雷击芯片，对节点数要求较多的可选用 SIPEX 的 SP485R。

### 3.3.1.2 RS-485 的网络失效保护

RS485 标准规定了接收器门限为  $\pm 200mV$ 。这样规定能够提供比较高的噪声抑制能力，如前文所述，当接收器 A 电平比 B 电平高  $+200mV$  以上时，输出为正逻辑，反之，则输出为负逻辑。但由于第三态的存在，即在主机在发端发完一个信息数据后，将总线置于第三态，即总线空闲时没有任何信号驱动总线，使 AB 之间的电压在  $-200\sim+200mV$  直至趋于  $0V$ ，这带来了一个问题：接收器输出状态不确定。如果接收机的输出为  $0V$ ，网络中从机将把其解释为一个新的启动位，并试图读取后续字节，由于永远不会有停止位，产生一个帧错误结果，不再有设备请求总线，网络陷于瘫痪状态。除上述所述的总线空闲会造成两线电压差低于  $200mV$  的情况外，开路或短路时也会出现这种情况。故应采取一定的措施避免接收器处于不确定状态。

通常是在总线上加偏置，当总线空闲或开路时，利用偏置电阻将总线偏置在一个确定的状态（差分电压  $\geq -200mV$ ）。如图 3-6。将 A 上拉到地，B 下拉到  $5V$ ，电阻的典型值是  $1k\Omega$ ，具体数



值随电缆的电容变化而变化。

### 图3-6 RS485偏置电阻

上述方法是比较经典的方法，但它仍然不能解决总线短路时的问题；有些厂家将接收门限移到-200mV/-50mV，可解决这个问题。例如Maxim公司的MAX3080系列RS485接口，不仅省去了外部偏置电阻，而且解决了总线短路情况下的失效保护问题<sup>[20]</sup>。

#### 3.3.1.3 R0 及 DI 端配置上拉电阻

异步通信数据以字节的方式传送，在每一个字节传送之前，先要通过一个低电平起始位实现握手。为防止干扰信号误触发 R0（接收器输出）产生负跳变，使接收端 MCU 进入接收状态，建议 R0 外接 10kΩ 上拉电阻。

#### 3.3.1.4 保证系统上电时的 RS-485 芯片处于接收输入状态

对于收发控制端 TC 建议采用 MCU 引脚通过反相器进行控制，不宜采用 MCU 引脚直接进行控制，以防止 MCU 上电时对总线的干扰。

#### 3.3.1.5 总线隔离保护方法

总线隔离保护分为信号隔离和电源隔离，这种方案实际上将瞬态高压转移到隔离接口中的电隔离层上，由于隔离层的高绝缘电阻，不会产生损害性的浪涌电流，起到保护接口的作用。信号隔离通常采用高频变压器、光耦等元件实现接口的电气隔离，已有器件厂商将所有这些元件集成在一片 IC 中，使用起来非常简便，如 Maxim 公司的 MAX1480/MAX1490，隔离电压可达 2500V。电源隔离可以选择合适的隔离电源模块，构成的总线隔离这种方案的优点是可以承受高电压、持续时间较长的瞬态干扰，实现起来也比较容易，缺点是成本较高<sup>[21]</sup>。

#### 3.3.1.6 雷击过压防护的必要性

RS-485 接收器差分输入端对“地”的共模电压允许范围为-7 到+12V，超过此范围的过压瞬变可能会损坏器件。引起过压瞬变的来源通常是雷电、静电放电、电源系统开关干扰等，例如人体接触芯片的引脚而产生静电放电，其电压可以高达数十千伏，可以使工作中的器件产生闭锁而不能运行或使器件受损；而雷电感应在 RS-485 传输线上引起的瞬变干扰，其能量更可在瞬间烧毁连接在传输线上的全部器件！甚至可以看到收发器爆裂，线路板焦糊的现象。

目前市场上有一些 RS-485 芯片通过在内部集成瞬变电压抑制二极管(TVS)来防过压瞬变。TVS 的作用原理是当管子两端经受瞬态能量冲击时能极快地将其两端的阻抗降低，通过将能量吸收掉从而把其两端间的电压箝制在其标称值上，保护后端元件。受半导体工艺限制，集成到 RS-485 芯片上的 TVS 很难做到大功率，在雷击到来时，瞬态能量可以损坏内置的 TVS，同时，瞬态电流产生的强磁场会使近距离的其他电路上感应出高电压，即形成所谓的反击，造成电路损坏。RS-485 芯片上集成 TVS 的主要功能是为了消除静电，但不能防雷击浪涌。

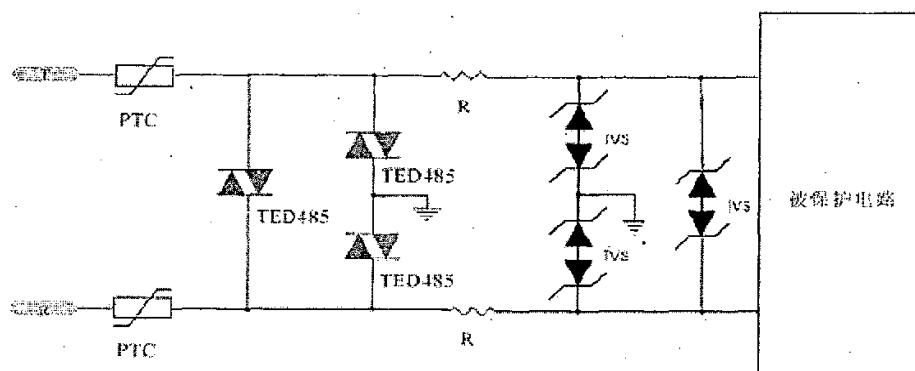


图 3-7 RS485 总线的两级防护电路图

图 3-7 为 RS485 总线的两级防护电路图。当雷击发生时，感应过电压由总线 T 与 R 端引入，PTC 自恢复保险丝和 TED485 防雷管能承受较大的浪涌信号，此时过电压被大大削弱到约 500V 左右，在经过线绕电阻 R1、R2 限流，TVS 二次限压后，到收发器的电压被钳制在 6.8V 左右，从而实现对收发器的保护。

### 3.3.2 Modbus 协议简单介绍

智能调理器采用了 RS485 总线接口，RS485 属于数据收发的物理层，还需要合适的总线通信协议相配合，在大型桥梁健康监测数据自动化采集系统中采用了工业领域广泛使用的 Modbus RTU 通讯协议，此协议支持传统的 RS232、RS422、RS485 和以太网设备。许多工业设备，包括 PLC、DCS、智能仪表等都在使用 Modbus 协议作为他们之间的通讯标准。有了它，不同厂商生产的控制设备可以连成工业网络，进行集中监控。当在网络上通信时，Modbus 协议决定了每个控制器须要知道它们的设备地址，根据不同的功能码，决定要产生何种行动。如果需要回应，控制器将生成应答并使用 Modbus 协议发送给询问方。

Modbus 的 RTU 协议规定了消息、数据的结构、命令和应答的方式，数据通讯采用 Master/Slave 方式，Master 端发出数据请求消息，Slave 端接收到正确消息后就可以发送数据到 Master 端以响应请求；Master 端也可以直接发消息修改 Slave 端的数据，实现双向读写。Modbus 协议需要对数据进行校验，RTU 模式采用 16 位 CRC 校验，另外，Modbus 采用主从方式定时收发数据，在实际使用中如果某 Slave 站点断开后（如故障或关机），Master 端可以诊断出来，而当故障修复后，网络又可自动接通。因此，Modbus 协议的可靠性较好。

MODBUS 协议信息帧结构如表 3-1：

表 3-1 Modbus 协议信息帧结构

| 地址码 | 功能码 | 数据区     | 错误校验码 |
|-----|-----|---------|-------|
| 8 位 | 8 位 | N × 8 位 | 16 位  |

地址码：地址码是信息帧的第一字节(8位)，从0到255。这个字节表明由用户设置地址的从机将接收由主机发送来的信息。每个从机都必须有唯一的地址码，并且只有符合地址码的从机才能响应回送。当从机回送信息时，相当的地址码表明该信息来自于何处。

功能码：主机发送的功能码告诉从机执行什么任务。在南京三桥的系统中，仅用到了两个最主要的功能码如表3-2。

表3-2 两个常用的Modbus功能码

| 代码  | 含义       | 操作             |
|-----|----------|----------------|
| 03H | 从寄存器读取数据 | 读取当前寄存器一个或多个值  |
| 10H | 写数据到寄存器  | 写一个或多个值到指定的寄存器 |

数据区：数据区包含需要从机执行什么动作或由从机采集的返送信息。这些信息可以是数值、参考地址等等。例如，功能码告诉从机读取寄存器的值，则数据区必需包含要读取寄存器的起始地址及读取长度。对于不同的从机，地址和数据信息都不相同。

错误校验码：主机或从机可用校验码进行判别接收信息是否出错。有时，由于电子噪声或其它一些干扰，信息在传输过程中会发生细微的变化，错误校验码保证了主机或从机对在传送过程中出错的信息不起作用，这样增加了系统的安全和效率，错误校验采用CRC-16校验方法<sup>[22]</sup>。

### 3.3.3 软件流程图

智能调理器微处理器采用C51编程，由于总线通信采用主从方式，需要主程序初始化为接收方式，在串行中断入口处判断每次接收的数据帧，先判断接收的数据帧是否CRC校验正确，是否本机地址，错误则跳出中断服务程序，然后根据功能码的不同，进入不同的执行程序，中断服务程序流程图如图3-8所示。

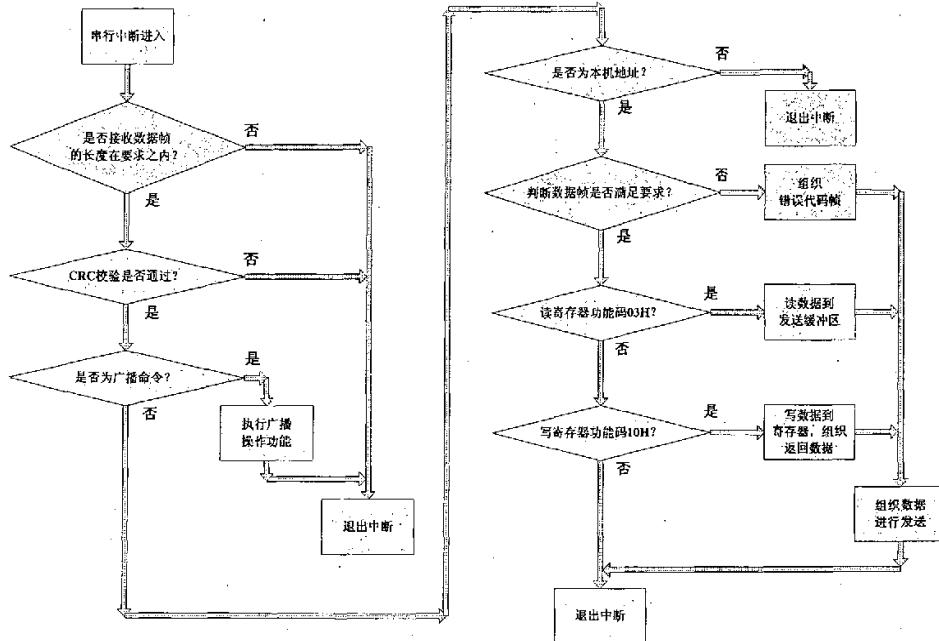


图3-8 智能调理器软件串行中断服务程序流程图

### 3.4 RS485中继器的设计

RS485中继器是指RS485通讯中，用于总线隔离并且可以延长总线距离的设备。为系统配备了RS485总线中继器，一方面可以扩展通讯节点；另一方面，能够将故障隔离，便于故障的查找和系统维护。

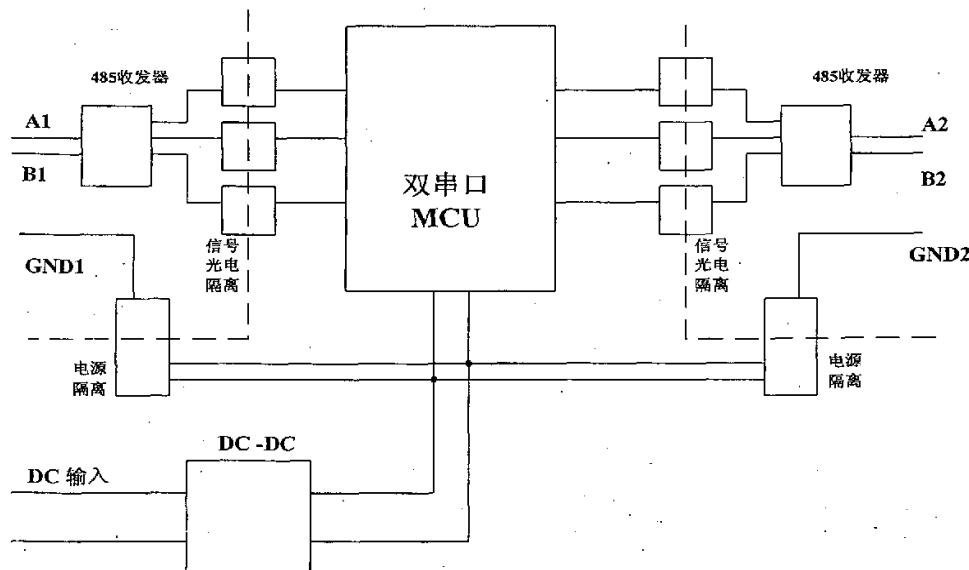


图3-9 RS485中继器电路结构图

RS485中继器电路结构如图3-9所示。该电路通过光电隔离使信号在加强前后隔

离开来,不仅使信号能可靠传输,更加强了系统的抗干扰能力。485的输入输出和电源供电相互隔离,实际运用中要注意终端匹配电阻的正确连接<sup>[23]</sup>。

利用485中继器可以将一个大型485网络分隔成若干个网段。485中继器就如同485网段之间连接的“桥梁”。当然每个网段还是遵循上面的485规范,即1.2公里长度,32个负载节点数,以下两个图没有画出参考地线。

利用485中继器延长网络距离,如图3-10所示:

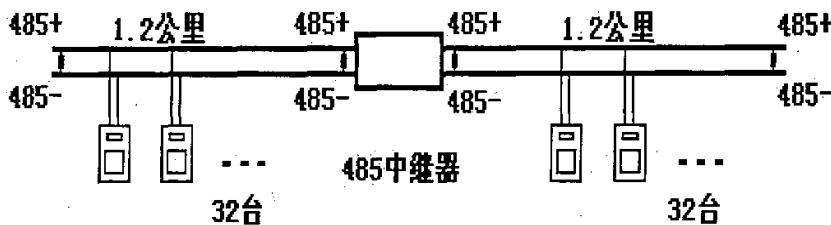


图3-10 利用485中继器延长RS485总线距离

利用485中继器解决485分叉问题<sup>[24]</sup>,如图3-11所示:

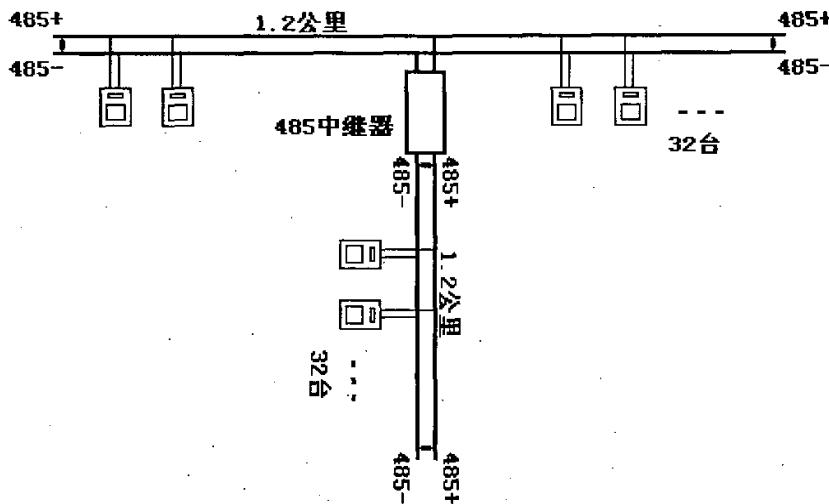


图3-11 利用485中继器解决RS485总线分叉问题

### 3.5 前置机和上位机的设计

前置机采用了MOXA公司嵌入式通信服务器UC-7420,选择UC-7420主要有以下原因。(1)PC可能会死机;(2)PC很大;(3)需要一个可靠的操作系统;(4)UC-7420

可以做前置处理。

UC-7420是专为嵌入式应用而设计的智能通讯服务器，具备8个RS-232/422/485串口，双10/100 Mbps以太网络端口，PCMCIA作无线通讯，以及扩充用的CompactFlash接口。随机预先安装Linux操作系统的UC-7400，让软件工程师可选择自行开发应用程序，或者是轻松且免费地使用开放程序代码。这意味着为针对桌上型PC所写的软件不需要作任何程序代码的修正就可以轻易地透过GNU cross compiler移到UC-7400平台上。

除可编程外，UC-7420还能够给使用者提供一系列网络连接选择。首先，通过串口进入的传感器数据可以被前期处理，然后通过一个或者两个双以太网端口送到局域网。也可以通过PPP连接把一个串口连接到V.90或者GPRS调制解调器上。还有一个PCMCIA端口可安装一个无线网卡实现802.11b/g网络。由于在UC设计中可以有多种网络连接选择，在任何地方都可以满足使用者灵活的连接需求。连接类型的多样也提供了冗余性。例如，出现不可避免的网络问题带来服务中断，使用者可以通过调制解调器连接。

如何在创建一个“小”的系统的同时，并给使用者提供充足的存储空间，这是一个两难的选择。对于无人的应用来说，如果存储设备不包括移动部分是最好的。尽管对日常使用来说，硬盘可能似乎更耐久，在偏远位置我们不能做这种持续应用的假设。UC通过提供一个Compact Flash插槽解决了这一问题。如果需要，可以使存储能力可以达到几个G的记忆卡能用于保存数据，直到将数据转移到中心计算机上，这是非常方便的扩展存储空间的方法<sup>[25]</sup>。

针对数据智能通讯模块响应速度和稳定性的要求，系统智能通讯计算机UC-7420采用嵌入式实时Linux操作系统，针对监控界面的易用性和美观的要求，系统监控机工作站选用了Windows操作系统，后台数据存储和分析的服务器采用Windows Server系统（当然也可以很方便的转换成Unix操作系统），各种功能模块可以根据自身的特点和要求，自由的选择不同种类的操作系统、开发语言和开发工具，极大的降低了系统开发的难度并使系统具有很强的兼容性和可扩展性。

正在组装的前置机系统如图3-12。

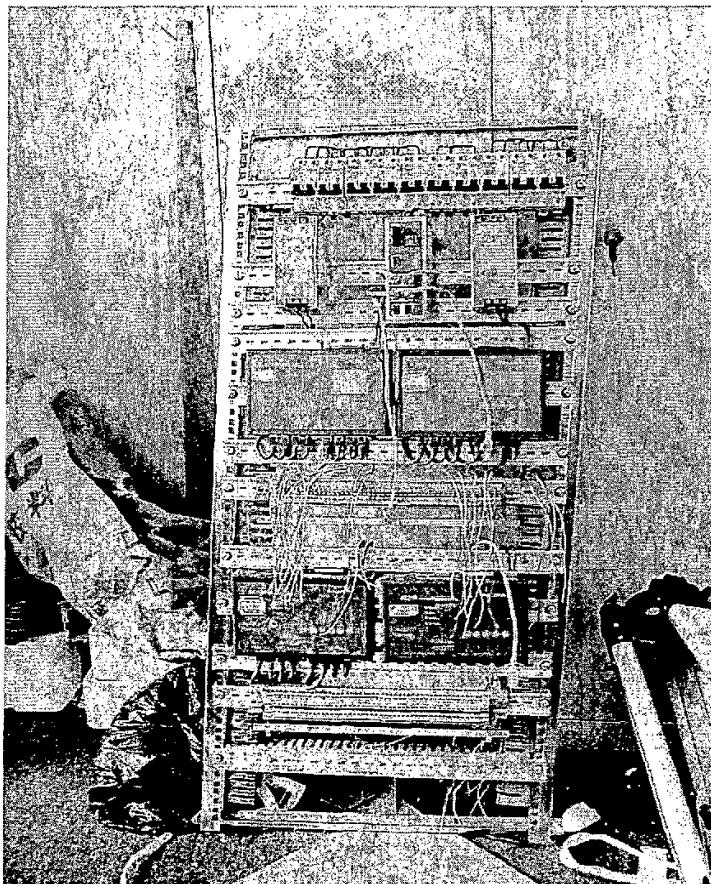


图 3-12 正在组装的前置机系统

网络计算机通过WINDOWS的TCP/IP编程的Winsock机制来实现与网络接入模块的控制与通信。在一一台作为服务器的计算机上设置一个TCP/IP端口监控的程序，实时监控网络接入模块发到局域网的UDP数据报。对于UDP数据报传送方式，上层服务器先建立一个套接字，然后把它和本地接口绑定在一起，由这个绑定的套接字接口读入UDP数据，并在UDP数据拆包后进行自己定义通信协议的处理(包括安全验证、出错重发及用户自定义帧格式等的处理)。

用户界面及中心数据库子系统负责向最终用户展示桥梁三维空间信息，采集数据的实时波形、结构分析结果的图形、竣工资料及巡检资料的相关信息，中心数据库存储桥梁结构信息、数据采集静态数据、数据采集存储数据、结构分析静态数据、结构分析结果数据、结构分析历史分析数据、用户属性信息、竣工资料数据、巡检资料数据内容。该系统与数据采集系统进行通讯连接，向用户展示采集数据的实时波形，然后调用结构分析处理模块，进行结构计算，获取当前阶段的桥梁健康结果数据，并以图形化的方式向用户展现。

在远程监测站中运行的上位机系统如图 3-13。



图 3-13 远程监测站中运行的上位机系统

### 3.6 485智能调理器手操器的设计

为了方便在健康监测施工中系统的调试和维护，设计了485智能调理器手操器，具有两个接口，分别用来采集传感器和调理器的数据，可以判断系统的故障所在。

开发485智能调理器手操器只需要在调理器的基础上增加液晶和少许按键即可，由于调理器的IO资源有限，采用了串行接口的液晶OCM4X8C，其简介如下。

OCM4X8C 是具有串/并接口，内部含有中文字库的图形点阵液晶显示模块。该模块的控制/驱动器采用台湾矽创电子公司的 ST7920，因而具有较强的控制显示功能。OCM4X8C 的液晶显示屏为  $128 \times 64$  点阵，可显示 4 行、每行 8 个汉字。为了便于简单、方便地显示汉字，该模块具 2Mb 的中文字型 CGROM，该字型 ROM 中含有 8192 个  $16 \times 16$  点阵中文字库；同时，为了便于英文和其它常用字符的显示，具有 16Kb 的  $16 \times 8$  点阵的 ASCII 字符库；为便于构造用户图形，提供了一个  $64 \times 256$  点阵的 GDRAM 绘图区域，且为了便于构造用户所需字型，提供了 4 组  $16 \times 16$  点阵的造字空间。利用上述功能，OCM4X8C 可实现汉字、ASCII 码、点阵图形、自造字体的同屏显示。为了和多种微处理器、单片机接口，模块提供了 4 位并行、8 位并行、2 线串行、3 线串行多种接口方式。

该模块具有 2.7~5.5V 的宽工作电压范围，且具有睡眠、正常及低功耗工作模式，可满足系统各种工作电压及便携式仪器低功耗的要求。液晶模块显示负电压，也由模块提供，从而简化了系统电源设计。模块同时还提供 LED 背光显示功能。除此之外，模块还提供了画面清除、游标显示/隐藏、游标归位、显示打开/关闭、显

示字符闪烁、游标移位、显示移位、垂直画面旋转、反白显示、液晶睡眠/唤醒、关闭显示等操作指令<sup>[26]</sup>。

正在调试中的手操器如图 3-14。

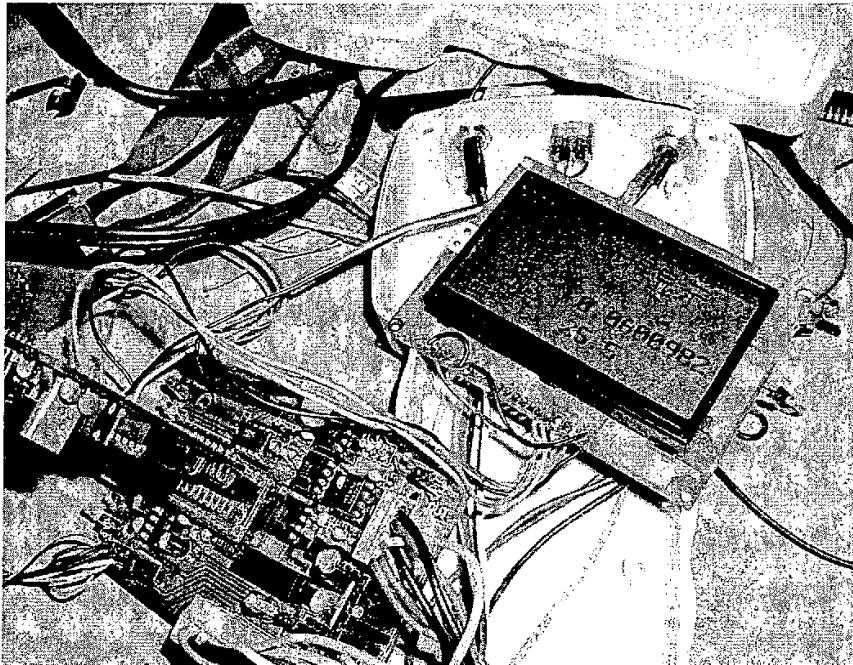


图 3-14 调试中的手操器

### 3.7 RS485总线系统可能遇到的问题及其解决方案

RS-485 是一种低成本、易操作的通信系统，但是稳定性弱同时相互牵制性强，通常有一个节点出现故障会导致系统整体或局部的瘫痪，而且又难以判断。故根据在桥梁中实际调试经验，介绍一些维护 RS-485 的常用方法。

- (1) 若出现系统完全瘫痪，大多因为某节点芯片的 VA、VB 对电源击穿，使用万用表测 VA、VB 间差模电压为零，而对地的共模电压大于 3V，此时可通过测共模电压大小来排查，共模电压越大说明离故障点越近，反之越远；
- (2) 总线连续几个节点不能正常工作。一般是由其中的一个节点故障导致的。一个节点故障会导致邻近的 2~3 个节点（一般为后续）无法通信，因此将其逐一与总线脱离，如某节点脱离后总线能恢复正常，说明该节点故障；
- (3) 集中供电的 RS-485 系统在上电时常常出现部分节点不正常，但每次又不完全一样。这是由于对 RS-485 的收发控制端 TC 设计不合理，造成微系统上电时节点收发状态混乱从而导致总线堵塞。改进的方法是将各微系统加装电源开关然后分别上电；

(4) 系统基本正常但偶尔会出现通信失败。一般是由于网络施工不合理导致系统可靠性处于临界状态，最好改变走线或增加中继模块。应急方法之一是将出现失败的节点更换成性能更优异的芯片；

(5) 在不能完全保证总线距离和分支通信正常时，一定要增加中继器，降低出故障的风险。

### 3.8 结论

RS-485标准定义了一个具有高噪声抑制、宽共模范围、长传输距离、冲突保护等特性，但一个真正可靠的RS-485网络还有赖于合理的应用。合理的网络布局、信号通道的连续性、周全的保护措施等，在设计之初就应该有一个总体规划。

## 第4章 基于工业以太网的大型桥梁健康监测 数据自动化采集系统

相比较基于 RS485 总线在桥梁健康监测数据自动化采集中的应用，采用工业以太网的方式解决了 RS485 总线最大的一个弊端，就是节点之间的相互影响，在 RS485 总线系统中，往往一个节点损坏（一般是 485 芯片的击穿），会造成总线的短路，其结果是连接在同一条线路上的所有节点通信全部失败，而且维修时也比较困难，需要将同一条线路上所有节点逐一断开网络，直到发现错误节点为止；另一方面，受通信速率的影响，RS485 系统对数据的采样频率不能进一步提高，对大型桥梁进行数据的动态分析在设计上比较困难；基于以上问题分析，在进行总线系统升级时，考虑到了 CAN 总线和工业以太网两种方案，CAN 总线虽然通信速率和通信距离性能都有提高，但是其采用短帧结构，每次最大只有 8 个数据，限制了今后可能增大单次发送的数据量，同时其总线短路虽然较少发生，但仍然存在影响其它节点的可能。工业以太网方案也是所有总线的终极方案，其性能优越，目前唯一的不足就是所构成的系统造价比较高，以往常提到的以太网实时性的问题在此处构不成问题的瓶颈，因为桥梁健康监测系统只是数据自动采集，而不需要实时控制，同时实时数据的采集要求并不太严格，由此更新的总线采用工业以太网的方式实现<sup>[27]</sup>。

### 4.1 工业以太网简单介绍

所谓工业以太网，一般来讲是指技术上与商用以太网（即 IEEE802.3 标准）兼容，但在产品设计时，在材质的选用、产品的强度、适用性以及实时性、可互操作性、可靠性、抗干扰性和本质安全等方面能满足工业现场的需要。

工业以太网的优点：

- (1) 具有相当高的数据传输速率（目前已达到 10Gb/s），能提供足够的带宽；
- (2) 由于具有相同的通信协议，Ethernet 和 TCP/IP 很容易集成到 IT（信息技术）世界；
- (3) 能在同一总线上运行不同的传输协议，从而能建立企业的公共网络平台或基础构架；
- (4) 沿用多年，已为众多的技术人员所熟悉，成本低，市场上能提供广泛的设置、维护和诊断工具，成为事实上的统一标准；
- (5) 允许使用不同的物理介质和构成不同的拓扑结构。

工业以太网的不足：

- (1) 实时性，即通信过程的不确定性。
- (2) 本质安全。

工业控制网络不同于普通数据网络的最大特点在于它必须满足控制作用对实时性的要求，即信号传输要足够的快和满足信号的确定性。实时控制往往要求对某些变量的数据准确定时刷新。由于 Ethernet 采用 CSMA/CD 碰撞检测方式，网络负

荷较大时，网络传输的不确定性不能满足工业控制的实时要求，因此传统以太网技术难以满足控制系统要求准确定时通信的实时性要求，一直被视为非确定性的网络。然而，快速以太网与交换式以太网技术的发展，给解决以太网的非确定性问题带来了新的契机，使这一应用成为可能。首先，Ethernet 的通信速率从 10M、100M 增大到如今的 1000M、10G，在数据吞吐量相同的情况下，通信速率的提高意味着网络负荷的减轻和网络传输延时的减小，即网络碰撞机率大大下降。其次，采用星型网络拓扑结构，交换机将网络划分为若干个网段。Ethernet 交换机由于具有数据存储、转发的功能，使各端口之间输入和输出的数据帧能够得到缓冲，不再发生碰撞；同时交换机还可对网络上传输的数据进行过滤，使每个网段内节点间数据的传输只限在本地网段内进行，而不需经过主干网，也不占用其它网段的带宽，从而降低了所有网段和主干网的网络负荷。再次，全双工通信又使得端口间两对双绞线（或两根光纤）上分别同时接收和发送报文帧，也不会发生冲突。因此，采用交换式集线器和全双工通信，可使网络上的冲突域不复存在（全双工通信），或碰撞机率大大降低（半双工），因此使 Ethernet 通信确定性和实时性大大提高<sup>[27]</sup>。

目前许多国际组织都在工业以太网技术上做了大量的工作，包括制订相关标准，并推出基于工业以太网的产品及系统解决方案。FF(现场总线基金会)于 2000 年 3 月 29 日公布了高速以太网(100Mb/s)的最终技术规范(FS11.0)；ControlNet International(CI)推出了 Ethernet/IP 标准；PNO(Profibus 用户组织)推出了 PROFINet 标准；MODBUS 推出了 MODBUS-IDA 标准。

随着互联网技术的发展与普及推广，Ethernet 技术也得到了迅速的发展，Ethernet 传输速率的提高和 Ethernet 交换技术的发展，给解决 Ethernet 通信的非确定性问题带来了希望，并使 Ethernet 全面应用于工业控制领域成为可能。

由于工业自动化网络控制系统不单单是一个完成数据传输的通信系统，而且还是一个借助网络完成控制功能的自控系统。它除了完成数据传输之外，往往还需要依靠所传输的数据和指令，执行某些控制计算与操作功能，由多个网络节点协调完成自控任务。因而它需要在应用、用户等高层协议与规范上满足开放系统的要求，满足互操作条件<sup>[28]</sup>。

对应于 ISO/OSI 七层通信模型，以太网技术规范只映射为其中的物理层和数据链路层；而在其之上的网络层和传输层协议，目前以 TCP/IP 协议为主（已成为以太网之上传输层和网络层“事实上的”标准）。而对较高的层次如会话层、表示层、应用层等没有作技术规定。目前商用计算机设备之间是通过 FTP（文件传送协议）、Telnet（远程登录协议）、SMTP（简单邮件传送协议）、HTTP（WWW 协议）、SNMP（简单网络管理协议）等应用层协议进行信息透明访问的，它们如今在互联网上发挥了非常重要的作用。但这些协议所定义的数据结构等特性不适合应用于工业过程控制领域现场设备之间的实时通信<sup>[29]</sup>。

为满足工业现场控制系统的应用要求，必须在 Ethernet+TCP/IP 协议之上，建立完整的、有效的通信服务模型，制定有效的实时通信服务机制，协调好工业现场

控制系统中实时和非实时信息的传输服务,形成为广大工控生产厂商和用户所接收的应用层、用户层协议,进而形成开放的标准。为此,各现场总线组织纷纷将以太网引入其现场总线体系中的高速部分,利用以太网和 TCP/IP 技术,以及原有的低速现场总线应用层协议,从而构成了所谓的工业以太网协议,如 HSE、PROFINet、Ethernet/IP 等。

由于以太网具有价格低廉、传输速度快、用户基础广泛等显著优点,目前不仅应用在传统的办公室/商业局域网中,而且在工业现场的 PC 到 PC、PLC 到 PLC 和监控层中也有广泛应用,现正在逐渐向工业现场应用的传感器层发展,工业以太网控制系统已初现雏形。

## 4.2 基于工业以太网的数据自动化采集系统的设计

基于工业以太网的大型桥梁健康监测数据自动化采集系统的设计,是将 485 智能调理器的总线升级为以太网总线,并且在 TCP/IP 协议中选择了 UDP 的数据发送方式,目的是减少了 TCP 协议为保证其安全而设计的握手信息等的复杂性,保障数据正确通信方面采用了上位机进行有效的数据分析的措施<sup>[30]</sup>。相比较 RS485 总线来说,基于工业以太网总线的数据采集系统省去了前置机,而是用工业以太网交换机连接网络,最终以光纤环网的方式,使数据最终达到远程监测站的上位机,上位机所涉及到的内容和 RS485 总线系统中完全一样,这里不在详细论述。基于工业以太网的大型桥梁健康监测数据自动化采集系统结构图如图 4-1。

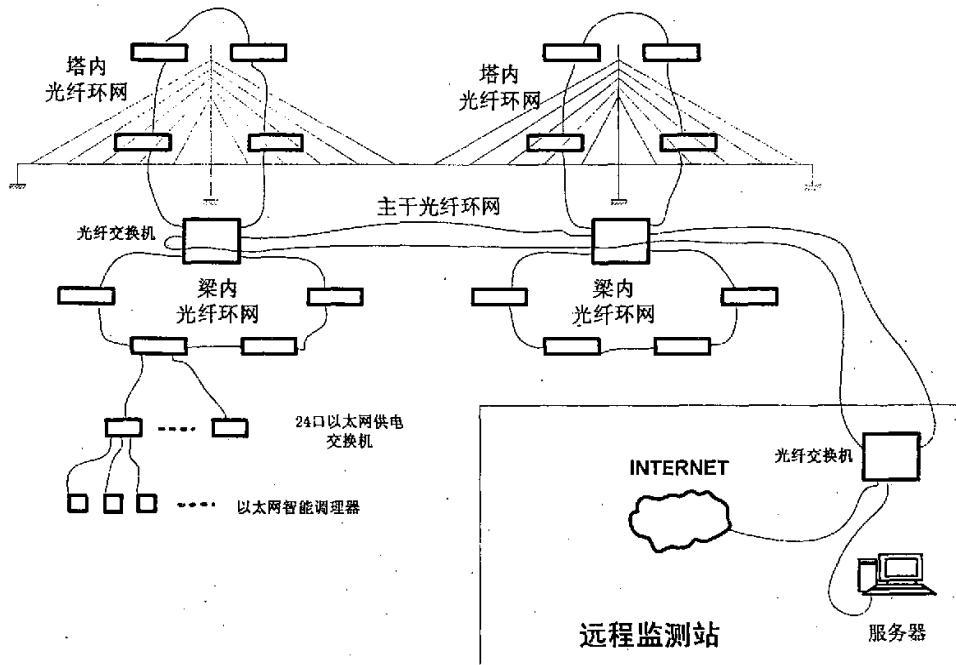


图 4-1 基于工业以太网的大型桥梁健康监测数据自动化采集系统

为确保通信的正常运行,采集系统采用了混合型网络结构,主网应用了光纤环

网的方式，嵌套四个子网分别对应于大型桥梁的南北塔梁，四个子网中的工业以太网交换机星型扩展了带以太网供电的 24 口工业交换机，最终每个以太网供电的 RJ45 端口连接以太网智能调理器。

#### 4.2.1 网络配置

网络拓扑必须具有实时采集功能、长距离、高带宽的网络传输和冗余备份等特性。在结合该网络的实际情况，决定组建光纤网络并选用光纤布线产品。方案要求既要充分满足数据采集网络的需要，又要协调配合通信应用网络。针对本工程具体环境的要求，本采集系统主干网络决定采用工业级冗余环网交换机，构成冗余光纤环形网络结构，另外，此环形拓扑结构便于工程扩充和维护，安全性能高。光纤环网结构采用点到点的链路组成，而点到点的光纤传输技术最为成熟，所以光纤环网的结构最普遍。在这种结构中，光纤的延迟小，易于配置很多站点的环网和高速环网。但是，高速光纤环网价格很贵，只能应用于重要的场合。

该方案的特点本方案具有以下几个特点：

- (1) 链路自动冗余备份在数据采集冗余环网中，我们采用光纤环网交换机，它能自动冗余备份，能自动协商到达最近节点的路径，如果一处线路损坏，网络拓扑重新配置，达到正常网络状态极短时间。
- (2) 较长的传输距离，环型结构采用光纤介质类型，在传输中有低损耗的特性，使得传输线路的无中继传输距离变长，相邻站之间最大长度多模光纤可达 5KM，单模光纤可达 40~80KM，最大覆盖范围为 120KM。
- (3) 具有较大的带宽，环网传输带宽为 100Mbps，同时采用新的多数据处理技术，使得网络在重负荷情况下，仍能保持很高的带宽。
- (4) 可靠性高，环型结构在网络出现故障时仍能自行重构，保证系统安全可靠，同时传输光纤具有对电磁和射频干扰抑制能力，在传输过程中不受电磁和射频噪声的影响，也不影响其设备。由于光纤传输的是光信号，两端的电源相对隔离，所以有效地解决了光纤两端电源和地线对设备可能造成的严重威胁。
- (5) 安全性好，光纤在通信时光束在纤维内部传输，不会产生任何形式的辐射，可防止传输过程中被分接，也杜绝了辐射波的窃听，因而是最安全的通信介质<sup>[31]</sup>。

#### 4.2.2 总线供电技术

以太网供电是指在相同以太网铜缆上提供 48V 直流电源的能力。实施以太网供电需要两种主要设备—电源设备(PSE)，即以太网上的 LAN 交换机或源电源供电，以及受电设备(PD)，即从以太网电缆接收和使用电源以运行的终端设备。具体内容将在下面章节详细分析。

#### 4.3 以太网智能调理器的设计

利用微控制器实现嵌入式以太网方案相比较通用处理器要有一定的难度，首先微控制器的硬件资源有限，如何充分利用有限的资源实现精简的以太网协议是以太

网智能调理器设计的重点，在对以太网智能调理器设计之前，要详细分析将来在调理器中准备使用什么协议类型，目的是确定微控制器的选型是否满足速度要求、程序空间Flash和数据存储器RAM的大小等问题。另外为方便施工中的布线，以太网接口并入了以太网供电的模式，以太网供电不是简单的在空闲网线加入48V电压，供电方可以直接购买带以太网供电的交换机，智能调理器属于受电方，对传输过来的电压要有以太网供电控制器和DC-DC的变换与供电的交换机相呼应。

### 4.3.1 硬件电路的设计

以太网调理器硬件的设计要求和前面的485智能调理器要求基本相同，要满足数据采样频率的要求，微处理器处理速度和总线速度吻合，适合在工业场合应用，具有故障自动复位功能等。

#### 4.3.1.1 微处理器的选型设计

经过分析TCP/IP的协议，准备采用传输速度较快的UDP协议，并且单次传输数据量并不是很多，一般不会达到以太网最大包1500个字节，常用的只有几个字节或者几十个字节，另外在配置以太网智能调理器是用WEB服务器的方法，因此在智能调理器中要实现UDP协议和TCP协议以及应用层的WEB服务器，根据一般的精简的以太网协议分析，微控制器的程序空间大于32K空间，数据存储空间在512字节以上比较合适，并且处理速度达到1MIPS（每秒每兆赫百万指令），据此我选择了MAXIM公司的单时钟周期的51内核的微控制器DS89C450。

DS89C450是当前8051兼容微处理器中性能最高的微处理器。此系列产品具有重新设计的处理器内核，在相同的晶振频率下，执行指令的速度是最初的8051处理器的12倍，典型应用中的速度可提高10倍。在运行于每秒每兆赫百万指令(MIPS)速度下，此系列产品能够在33MHz的最高晶振频率下，达到33MIPS的运行速度<sup>[32]</sup>。

#### 关键特性：

- 高速8051架构，每个机器周期一个时钟，DC至33MHz工作频率，单周期指令30ns，可选择的变时间MOVX指令，以访问快速/低速外围器件，触发选择的自动递增/递减双数据指针，支持四种页面存储器访问模式。
- 与8051引脚及指令集兼容，四路双向、8位I/O端口，三个16位定时器/计数器，片内存储器64kB闪存，在应用可编程，通过串口实现在系统可编程，256字节直接访问RAM以及1kB额外的MOVX RAM。内部程序存储器容量可以通过软件动态调整，允许访问所有的外部地址空间。
- 电源管理模式，可编程的时钟分频器，自动的硬件和软件唤醒。
- 外设特性，两路全双工串行接口，可编程的看门狗定时器，13个中断源(6个外部)，五级中断优先级，电源失效复位，早期电源失效预警中断，降低电磁干扰(EMI)。

每个以太网智能调理器应该存放一些自身的参数，如MAC地址、IP地址、网关，以及前面所述的模数转换部分的标定参数等，微控制器外围用了一片X5045，X5045把四种常用的功能：上电复位、看门狗定时器、电源电压监控和块锁(Block Lock)

TM ) 保护的串行 EEPROM 存储器组成在一个封装之内。这种组合降低了系统成本、减少了电路板空间和增加了可靠性<sup>[33]</sup>。

#### 产品特性:

- 可选择的看门狗定时器
- 低VCC 检测并产生复位，五种标准的复位门限电压，用专用的编程顺序调整低VCC，复位门限电压，复位信号有效至VCC=1V。
- 低功耗使电池寿命长，看门狗工作时，等待电流小于50 μA (最大)，看门狗停止时，等待电流小于10 μA (最大)；当读数时工作电流小于2mA (最大)。
- 4K位EEPROM可进行一百万次擦写，用块锁保护保存重要数据，，可保护EEPROM阵列的0、1/4、1/2或全部，内建偶然性的(inadvertent)写保护，写使能闭锁，写保护引脚。
- 3.3MHz 时钟率，减少编程时间，16字节页写方式，自定时间写周期，5ms写周期(典型)。
- SPI方式。

#### 4.3.1.2 RTL8019AS 以太网控制器简介

目前以太网控制器中最常用的是 10Mbps 速度的，同比与 485 总线的常用的 115.2K 的速度，计算以太网包的头和尾部所增加的字节，10M 速度也是满足要求的。

由台湾 Realtek 公司生产的 RTL8019AS 以太网控制器，由于其优良的性能、低廉的价格，使其在市场上 10Mbps 网卡中占有相当的比例。

#### 主要性能

- 符号 Ethernet II 与 IEEE802.3 (10Base5、10Base2、10BaseT) 标准；
- 全双工，收发可同时达到 10Mbps 的速率；
- 内置 16KB 的 SRAM，用于收发缓冲，降低对主处理器的速度要求；
- 支持 8/16 位数据总线，8 个中断申请线以及 16 个 I/O 基地址选择；
- 支持 UTP、AUI、BNC 自动检测，还支持对 10BaseT 拓扑结构的自动极性修正；
- 允许 4 个诊断 LED 引脚可编程输出；
- 100 脚的 PQFP 封装，缩小了 PCB 尺寸。

#### 内部结构

RTL8019AS 内部可分为远程 DMA 接口、本地 DMA 接口、MAC (介质访问控制) 逻辑、数据编码解码逻辑和其他端口。

远程 DMA 接口是指单片机对 RTL8019AS 内部 RAM 进行读写的总线，即 ISA 总线的接口部分。单片机收发数据只需对远程 DMA 操作。本地 DMA 接口是把 RTL8019AS 与网线的连接通道，完成控制器与网线的数据交换。

MAC (介质访问控制) 逻辑完成以下功能：当单片机向网上发送数据时，先将一帧数据通过远程 DMA 通道送到 RTL8019AS 中的发送缓存区，然后发出传送命令；当 RTL8019AS 完成了上帧的发送后，再开始此帧的发送。RTL819 接收到的数据通过 MAC 比较、CRC 校验后，由 FIFO 存到接收缓冲区；收满一帧后，以中断或寄存器标

志的方式通知主处理器。FIFO 逻辑对收发数据作 16 字节的缓冲，以减少对本地 DMA 请求的频率。

### 内部 RAM 地址空间分配

RTL8019AS 内部有两块 RAM 区。一块 16K 字节，地址为 0x4000~0x7fff；一块 32 字节，地址为 0x0000~0x001f。RAM 按页存储，每 256 字节为一页。一般将 RAM 的前 12 页（即 0x4000~0x4bff）存储区作为发送缓冲区；后 52 页（即 0x4c00~0x7fff）存储区作为接收缓冲区。第 0 页叫 Prom 页，只有 32 字节，地址为 0x0000~0x001f，用于存储以太网物理地址。

要接收和发送数据包就必须通过 DMA 读写 RTL8019AS 内部的 16KB RAM。它实际上是双端口的 RAM，是指有两套总线连接到该 RAM，一套总线 RTL8019AS 读或写该 RAM，即本地 DMA；另一套总线是单片机读或写该 RAM，即远程 DMA。

### I/O 地址分配

RTL8019AS 具有 32 位输入输出地址，地址偏移量为 00H~1FH。其中 00H~0FH 共 16 个地址，为寄存器地址。寄存器分为 4 页：PAGE0、PAGE1、PAGE2、PAGE3，由 RTL8019AS 的 CR (Command Register 命令寄存器) 中的 PS1、PS0 位来决定要访问的页。但与 NE2000 兼容的寄存器只有前 3 页，PAGE3 是 RTL8019AS 自己定义的，对于其他兼容 NE2000 的芯片如 DM9008 无效。远程 DMA 地址包括 10H~17H，都可以用做远程 DMA 端口，只要用其中的一个就可以了。复位端口包括 18H~1FH 共 8 个地址，功能一样，用于 RTL8019AS 复位<sup>[34]</sup>。

#### 4.3.1.3 总线扩展及其电路结构图

由于 RTL8019 网络控制器 16 位地址总线方式，需要对 8 位微处理器进行扩展。最常用的方法是用锁存器 74HC373 或者 74HC573，在上面的分析中，智能调理器还需要用 WEB 服务器的方式配置，这样通信帧的最大数据会达到 1500 多个字节，超出了 DS89C450 中 RAM 的范围，只有放到外部的 RAM 里。使用外部 RAM 的目的是提高单片机的数据传输速度，和复杂的 TCP/IP 的处理，同时这外部的 RAM 也用作串行口的输入输出缓冲。以便单片机可以高速的吞吐数据。（用网卡上的 RAM 来代替 62256 会影响速度）因此微控制器外围一并扩展了 32KRAM 数据存储器<sup>[35]</sup>。电路结构图如图 4-2。

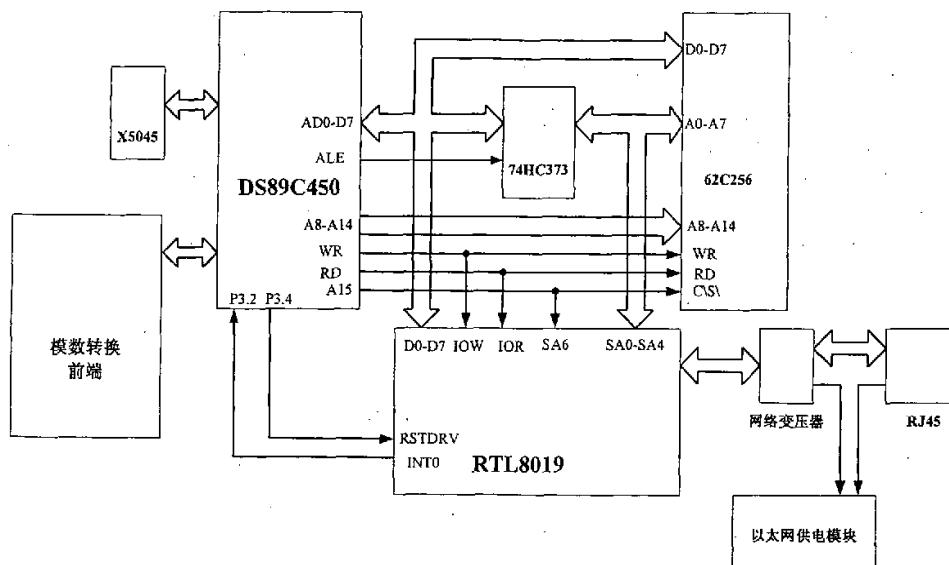


图 4-2 以太网智能调理器电路结构图

DATA0—DATA7 是网卡的 8 位数据总线, 接单片机的 P0 口。RESDRV(33 脚) (RESET) 接单片机的 T0(P3.4), 单片机用 P3.4 来复位网卡。INT0 接单片机的 INT0 (P3.2), INT0 是网卡的中断 0, 接到单片机的中断 0 上。(硬件这样连接, 在程序设计时, 可以选择采用中断或者查询的方式, 在本系统的设计中是用查询操作的), IOW, IOR 接到单片机的 p3.6, p3.7 (/WR, /RD), GND 是地, VCC 为 +5V 的电源。A0—A19 为 RTL8019 的地址线, 共 20 根, 我们用到 RTL8019 的地址为十六进制的 0240H—025FH, 转换为二进制如下表。

表 4-1 RTL8019 地址线对应的二进制

| 地址线  | A19 | A18 | A17 | A16 | A15 | A14 | A13 | A12 | A11 | A10 | A9 | A8 | A7 | A6 | A5 | A4 | A3 | A2 | A1 | A0 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 240H | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| ...  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | X  | X  | X  | X  | X  |
| 25FH | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |

我们看到从地址 240H 到 25FH, 地址线的 A19—A5 是固定的 000000000010010, 因此 A10—A19 接地, A5、A7、A8 接地, A9 接高电平, 只有 5 根地址线连接到微控制器即可, ADDR8—ADDR12 对应地址线的 A0—A4, 分析到扩展的 32KRAM 存储器 62C256 有一个片选信号为低电平, 将 ADDR15 分别连接到 RTL8019 的 A6 脚和 62C256 的片选脚, 这样将 RTL8019 和 62C256 实际的物理地址区分开, (当然直接将 A9 接 VCC 也可以)<sup>[36]</sup>。

以太网供电模块基本有以太网供电控制器和 DC-DC 变换组成, 将在后面章节详细讲述。

#### 4.3.2 TCP/IP 协议简单介绍

TCP/IP 协议并不完全符合 OSI 的七层参考模型。传统的开放式系统互连参考模型，是一种通信协议的 7 层抽象的参考模型，其中每一层执行某一特定任务。该模型的目的是使各种硬件在相同的层次上相互通信。这 7 层是：物理层、数据链路层、网路层、传输层、话路层、表示层和应用层。而 TCP/IP 通讯协议采用了 4 层的层级结构，每一层都呼叫它的下一层所提供的网络来完成自己的需求。这 4 层分别为：

- 应用层：应用程序间沟通的层，如简单电子邮件传输(SMTP)、文件传输协议(FTP)、网络远程访问协议(Telnet)、WEB(Http)等。
- 传输层：在此层中，它提供了节点间的数据传送服务，如传输控制协议(TCP)、用户数据报协议(UDP)等，TCP 和 UDP 给数据包加入传输数据并把它传输到下一层中，这一层负责传送数据，并且确定数据已被送达并接收。
- 网络层：负责提供基本的数据封包传送功能，让每一块数据包都能够到达目的主机（但不检查是否被正确接收），如网际协议(IP)。
- 链路层：对实际的网络媒体的管理，定义如何使用实际网络（如 Ethernet、Serial Line 等）来传送数据。

详细结构图如图 4-3 所示。

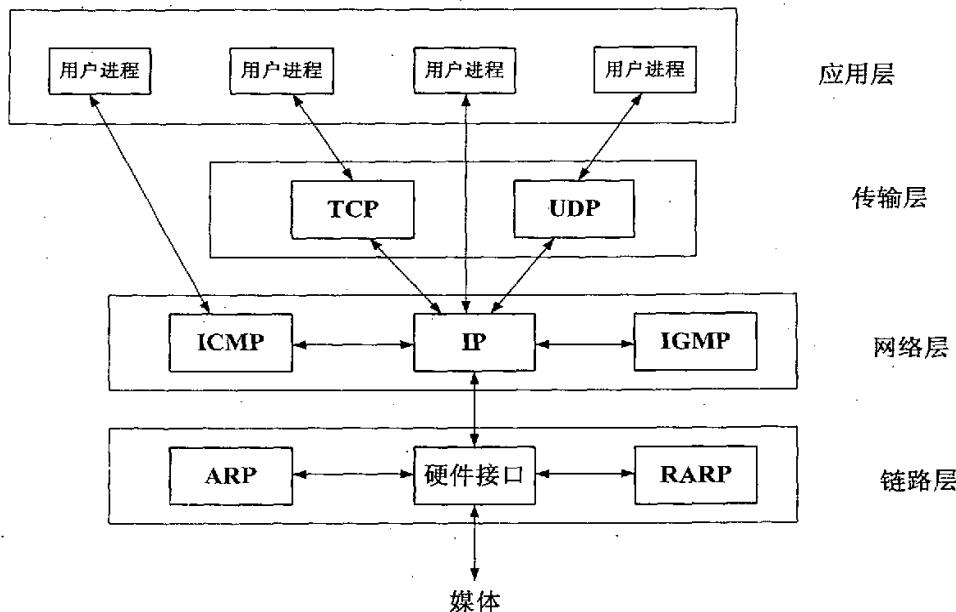


图 4-3 TCP/IP 四层结构图<sup>[37]</sup>

以下简单介绍图 4-3 中最常用的几个协议及其具备什么样的功能，都是如何工作的。

● IP

网际协议 IP 是 TCP/IP 的心脏，也是网络层中最重要的协议。IP 层接收由更低层（网络接口层例如以太网设备驱动程序）发来的数据包，并把该数据包发送到更高层—TCP 或 UDP 层；相反，IP 层也把从 TCP 或 UDP 层接收来的数据包传送到更低

层。IP 数据包是不可靠的，因为 IP 并没有做任何事情来确认数据包是按顺序发送的或者没有被破坏。IP 数据包中含有发送它的主机的地址（源地址）和接收它的主机的地址（目的地址）。

高层的 TCP 和 UDP 服务在接收数据包时，通常假设包中的源地址是有效的。也可以这样说，IP 地址形成了许多服务的认证基础，这些服务相信数据包是从一个有效的主机发送来的。IP 确认包含一个选项，叫作 IP source routing，可以用来指定一条源地址和目的地址之间的直接路径。对于一些 TCP 和 UDP 的服务来说，使用了该选项的 IP 包好象是从路径上的最后一个系统传递过来的，而不是来自于它的真实地点。这个选项是为了测试而存在的，说明了它可以被用来欺骗系统来进行平常是被禁止的连接。那么，许多依靠 IP 源地址做确认的服务将产生问题并且会被非法入侵。

#### ●TCP

如果 IP 数据包中有已经封好的 TCP 数据包，那么 IP 将把它们向‘上’传送到 TCP 层。TCP 将包排序并进行错误检查，同时实现虚电路间的连接。TCP 数据包中包括序号和确认，所以未按照顺序收到的包可以被排序，而损坏的包可以被重传。

TCP 将它的信息送到更高层的应用程序，例如 Telnet 的服务程序和客户程序。应用程序轮流将信息送回 TCP 层，TCP 层便将它们向下传送到 IP 层，设备驱动程序和物理介质，最后到接收方。

面向连接的服务（例如 Telnet、FTP、rlogin、X Windows 和 SMTP）需要高度的可靠性，所以它们使用了 TCP。DNS 在某些情况下使用 TCP（发送和接收域名数据库），但使用 UDP 传送有关单个主机的信息。

#### ●UDP

UDP 与 TCP 位于同一层，但对于数据包的顺序错误或重发。因此，UDP 不被应用于那些使用虚电路的面向连接的服务，UDP 主要用于那些面向查询—应答的服务，例如 NFS。相对于 FTP 或 Telnet，这些服务需要交换的信息量较小。使用 UDP 的服务包括 NTP（网络时间协议）和 DNS（DNS 也使用 TCP）。

欺骗 UDP 包比欺骗 TCP 包更容易，因为 UDP 没有建立初始化连接（也可以称为握手）（因为在两个系统间没有虚电路），也就是说，与 UDP 相关的服务面临着更大的危险。

#### ●ICMP

ICMP 与 IP 位于同一层，它被用来传送 IP 的控制信息。它主要是用来提供有关通向目的地址的路径信息。ICMP 的‘Redirect’信息通知主机通向其他系统的更准确的路径，而‘Unreachable’信息则指出路径有问题。另外，如果路径不可用了，ICMP 可以使 TCP 连接‘体面地’终止。PING 是最常用的基于 ICMP 的服务。

#### ●ARP

ARP 协议是“Address Resolution Protocol”（地址解析协议）的缩写。在局域网中，网络中实际传输的是“帧”，帧里面是有目标主机的 MAC 地址的。在以太

网中，一个主机要和另一个主机进行直接通信，必须要知道目标主机的 MAC 地址。但这个目标 MAC 地址是如何获得的呢？它就是通过地址解析协议获得的。所谓“地址解析”就是主机在发送帧前将目标 IP 地址转换成目标 MAC 地址的过程。ARP 协议的基本功能就是通过目标设备的 IP 地址，查询目标设备的 MAC 地址，以保证通信的顺利进行。

### ● TCP 和 UDP 的端口结构

TCP 和 UDP 服务通常有一个客户/服务器的关系，例如，一个 Telnet 服务进程开始在系统上处于空闲状态，等待着连接。用户使用 Telnet 客户程序与服务进程建立一个连接。客户程序向服务进程写入信息，服务进程读出信息并发出响应，客户程序读出响应并向用户报告。因而，这个连接是双工的，可以用来进行读写。

两个系统间的多重 Telnet 连接是如何相互确认并协调一致呢？TCP 或 UDP 连接唯一地使用每个信息中的如下四项进行确认：

源 IP 地址——发送包的 IP 地址。

目的 IP 地址——接收包的 IP 地址。

源端口——源系统上的连接的端口。

目的端口——目的系统上的连接的端口。

端口是一个软件结构，被客户程序或服务进程用来发送和接收信息。一个端口对应一个 16 比特的数。服务进程通常使用一个固定的端口，例如，SMTP 使用 25、Xwindows 使用 6000。这些端口号是‘广为人知’的，因为在建立与特定的主机或服务的连接时，需要这些地址和目的地址进行通讯<sup>[38]</sup>。

### 4.3.3 以太网的物理帧及其数据的封装

以太网的物理传输帧如表 4-2：

表 4-2 以太网物理传输帧

| PR   | SD  | DA   | SA   | TYPE | DATA        | PAD | FCS  |
|------|-----|------|------|------|-------------|-----|------|
| 56 位 | 8 位 | 48 位 | 48 位 | 16 位 | 不超过 1500 字节 | 可选  | 32 位 |

——PR：同步位，用于收发双方的时钟同步，同时也指明了传输的速率（10M 和 100M 的时钟频率不一样，所以 100M 网卡可以兼容 10M 网卡），是 56 位的二进制数 101010101010.....。

——SD：分隔位，表示下面跟着的是真正的数据，而不是同步时钟，为 8 位的 10101011，跟同步位不同的是最后 2 位是 11 而不是 10。

——DA：目的地址，以太网的地址为 48 位（6 个字节）二进制地址，表明该帧传输给哪个网卡。如果为 FFFFFFFFFFFFFF，则是广播地址，广播地址的数据可以被任何网卡接收到。

——SA：源地址，48 位，表明该帧的数据是哪个网卡发的，即发送端的网卡地址，同样是 6 个字节。

----TYPE: 类型字段, 表明该帧的数据是什么类型的数据, 不同的协议的类型字段不同。如: 0800H 表示数据为 IP 包, 0806H 表示数据为 ARP 包, 814CH 是 SNMP 包, 8137H 为 IPX/SPX 包,(小于 0600H 的值是用于 IEEE802 的, 表示数据包的长度。)

----DATA: 数据段, 该段数据不能超过 1500 字节。因为以太网规定整个传输包的最大长度不能超过 1514 字节。(14 字节为 DA, SA, TYPE)。

----PAD: 填充位, 由于以太网帧传输的数据包最小不能小于 60 字节, 除去 (DA, SA, TYPE 14 字节), 还必须传输 46 字节的数据, 当数据段的数据不足 46 字节时, 后面补 000000.....(当然也可以补其它值)。

----FCS:32 位数据校验位. 为 32 位的 CRC 校验, 该校验由网卡自动计算, 自动生成, 自动校验, 自动在数据段后面填入. 对于数据的校验算法, 我们无需了解.

----事实上, PR, SD, PAD, FCS 这几个数据段我们不用理它 , 它是由网络控制器 RTL8019 自动产生的, 我们要理的是 DA, SA, TYPE, DATA 四个段的内容。

----所有数据位的传输由低位开始(但传输的位流是用曼彻斯特编码的)。

----以太网的冲突退避算法就不介绍了, 它是由硬件自动执行的。

----DA+SA+TYPE+DATA+PAD 最小为 60 字节, 最大为 1514 字节。

----以太网卡可以接收三种地址的数据, 一个是广播地址, 一个是多播地址(我们用不上), 一个是它自己的地址. 但网卡也可以设置为接收任何数据包(用于网络分析和监控)。

下面以 TCP 协议方式传送数据为例描述以太网数据的封装过程。

当应用程序用TCP传送数据时, 数据被送入协议栈中, 然后逐个通过每一层直到被当作一串比特流送入网络。其中每一层对收到的数据都要增加一些首部信息(有时还要增加尾部信息), 该过程如图4-4所示。TCP传给IP的数据单元称作TCP报文段或简称为TCP段 (TCP segment)。IP传给网络接口层的数据单元称作IP数据报 (IP datagram)。通过以太网传输的比特流称作帧(Frame)。

图4-4中帧头和帧尾下面所标注的数字是典型以太网帧首部的字节长度。在后面的章节中我们将详细讨论这些帧头的具体含义。以太网数据帧的物理特性是其长度必须在46~1500字节之间。

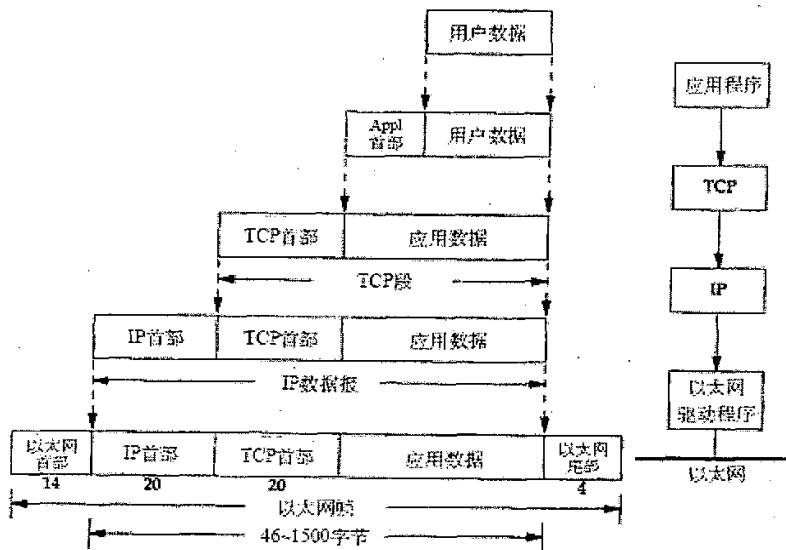


图 4-4 数据进入协议栈时的封装过程

这里的以太网首部指的是DA, SA, TYPE共14个字节。

UDP数据与TCP数据基本一致。唯一的不同是UDP传给IP的信息单元称作UDP数据报(UDP datagram)，而且UDP的首部长为8字节。

#### 4.3.4 Modbus/TCP 协议简单介绍

Schneider Automation 公司于1999 年公布了Modbus/ TCP 协议。Modbus/ TCP 并没有对Modbus 协议本身进行修改,但是为了满足工业实时性需要,改变了数据的传输方法和速率。ModbusTCP是第一家采用TCP/IP以太网用于工业自动化领域的标准协议,是至今唯一获得IANA赋予TCP端口的自动化通讯协议。ModbusTCP协议是ModbusRTU协议的扩展,它定义了ModbusRTU协议如何在其于TCP/IP的网络中传输和应用,Modbus/TCP跟ModbusRTU协议一样简单灵活。

以太网本质上只是一个物理层标准,就像RS232标准一样,而在以太网的应用层是采用Modbus协议,简单高效;传输层使用TCP协议,并使用TCP502端口,用户使用方便,连接可靠;网络层采用IP协议,因为因特网就使用这个协议寻址,故ModbusTCP不但可以在局域网使用,还可以在广域网和因特网上使用。

由于它比较简单,也使该协议嵌入资源宝贵的片上系统成为可能。这是一种面向连接的方式,每一个呼叫都要求一个应答。这种呼叫/应答的机制与Modbus 的主/从机制相互配合,使交换式以太网具有很高的确定性。Schneider公司已经为Modbus 注册了502端口,这样就可以将实时数据嵌入到网页中。通过在设备中嵌入Web服务器,就可以将Web浏览器作为设备的操作终端。同时,现在很多工控组态软件都能很好地支持Modbus/TCP协议,在上位机中将该协议采用OPC封装,能很好地与现有工控组态监控软件接口,使整个系统能无缝地连接起来。

Modbus 是开放协议，IANA(Internet Assigned Numbers Authority, 互联网编号分配管理机构)给 Modbus 协议赋予 TCP 端口 502，Modbus 协议可免费从 [www.Modbus.org](http://www.Modbus.org) 得到。

Modbus 是标准协议，它已提交给 IETF(Internet Engineering Task Force, 互联网工程任务部)，将成为 Internet 标准。因自 1978 年，工业自动化行业已安装了百万计串口 Modbus 设备和十万计 Modbus TCP/IP 设备，拥有超过 300 个 Modbus 兼容设备厂商，还有 90% 的第三厂家 I/O 支持 Modbus TCP/IP，所以是使用广泛的事实标准。Modbus 的普及得益于使用门槛很低，无论用串口还是用以太网，硬件成本低廉，Modbus 和 Modbus TCP 都可以免费得到，不需交任何费用，且在网上有很多免费资源，如 C/C++、JAVA 样板程序、ActiveX 控件、各种测试工具等，所以用户使用很方便。另外，几乎可找到任何现场总线到 Modbus TCP 的网点，方便用户实现各种网络之间的互联<sup>[39]</sup>。

Modbus/TCP 是真正通过 Ethernet TCP/IP 途径的 Modbus。它使用与 Modbus 同样的寄存器和位表示法，它还使用为 Modbus 定义的同样函数。所有 Modbus 消息和 Modbus/TCP 消息是一致的，只是后者未包括循环冗余码校验(CRC)字段。

Modbus/TCP 协议以一种非常简单的方式将 Modbus 帧嵌入到 TCP 帧中(如图 4-5 所示)。当 Modbus 应用在 TCP/IP 上时，将使用一种专用报文头—MBAP 报文头(Modbus 应用协议报文头)来识别 Modbus 应用数据单元。

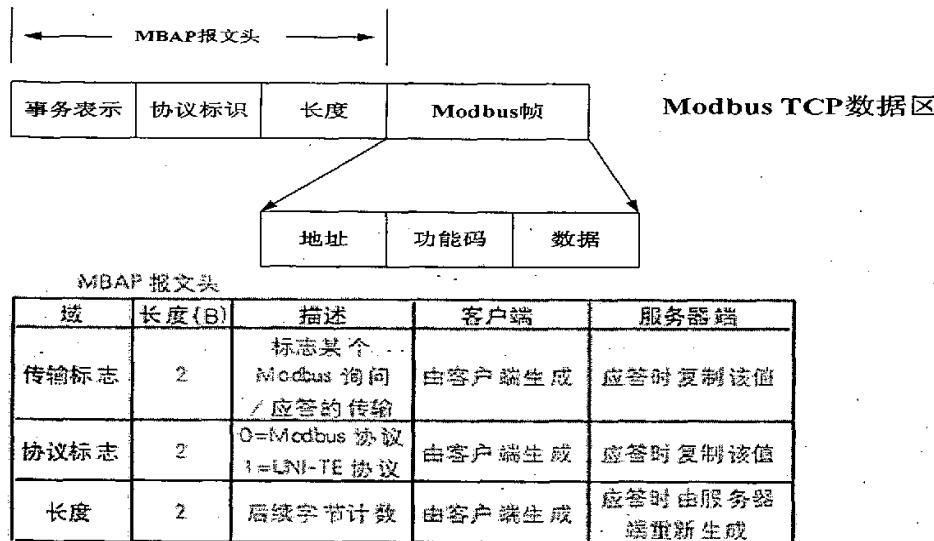


图 4-5 Modbus 数据帧格式

Modbus 协议定义了三种功能码：

- 公共功能码：被确切定义的、唯一的功能码，由 Modbus-IDA 组织确认、可进行一致性测试且已在 MB IETF RFC 中归档。
- 用户定义的功能码：用户无需 Modbus-IDA 组织的任何批准就可以选择和实现的

功能码，但是不能保证被选功能码的使用是唯一的。

- 保留功能码：某些公司在传统产品上现行使用的功能码，不作为公共使用<sup>[46]</sup>。  
公共功能码定义如下表 4-3 所示。

表 4-3 Modbus 常用公共功能代码

Modbus 常用公共功能代码

| 常用公共功能代码 |                    |          | 功能码 |    |      |
|----------|--------------------|----------|-----|----|------|
|          |                    |          | 十进制 | 子码 | 十六进制 |
| 位操作      | 开关量输入              | 读输入点     | 02  |    | 02   |
|          | 内部位或               | 读线圈      | 01  |    | 01   |
|          | 开关量输出              | 写单个线圈    | 05  |    |      |
|          |                    | 写多个线圈    | 15  |    | 0F   |
| 16 位操作   | 模拟量输入              | 读输入寄存器   | 04  |    | 04   |
|          | 内部寄存器或输出寄存器(模拟量输入) | 读多个寄存器   | 03  |    | 03   |
|          |                    | 写单个寄存器   | 06  |    | 06   |
|          |                    | 写多个寄存器   | 16  |    | 10   |
|          |                    | 读／写多个寄存器 | 23  |    | 17   |
|          |                    | 屏蔽写寄存器   | 22  |    | 16   |
| 文件记录     |                    | 读文件记录    | 20  | 6  | 14   |
|          |                    | 写文件记录    | 21  | 6  | 15   |
| 封装接口     |                    | 读设备标识    | 43  | 14 | 2B   |

举例如下：

上位机请求： 00 00 00 00 00 06 01 03 00 04 00 02

以太网智能调理器回复： 00 00 00 00 00 07 01 03 04 AA BB CC DD

使用 TCP/IP Modbus 的原因

- (1) TCP/IP 已成为信息行业的事实标准：世界上 93% 的网络都使用 TCP/IP，只要在应用层使用 Modbus TCP，就可实现工业以太网数据交换；
- (2) 易于与各种系统互连：可用于管理网、实时监控网及现场设备通信；
- (3) 网络实施价格低廉：可全部使用通用网络部件；
- (4) 用户强烈要求：目前中国已把 Modbus TCP 作为工业网络标准之一，用户可免费获得协议及样板程序，可在 Unix、Linux、Windows 下运行，不需要专门驱动程序。在国外，Modbus TCP 被国际半导体业 SEMI 定为网络标准，国际水处理、电力系统也把它作为应用的事实标准，还有越来越多行业作为标准来用；
- (5) 高速的数据：用户最关心的是所使用网络的传输能力，100M 以太网的传输结果为：每秒 4000 个 Modbus TCP 报文，而每个报文可传输 125 个字(16bit)，故相当于  $4000 \times 125 = 500000$  个模拟量数据(8000000 开关量！)；
- (6) 厂家能提供完整解决方案：工业以太网的接线元件，包括工业集成器、工业交换机、工业收发器、工业连接电缆。工业以太网服务器，包括远程、分布式 I/O 扫描功能，设备地址 IP 的设置功能，故障设备在线更换功能，分组的信息发布与订阅功能，网络动态监视功能，还有支持瘦客户机的 Web 服务。其他工控设备的支持：

如工业用人机界面、变频器、软起动器、电动机控制中心、以太网 I/O、各种现场总线的网桥、甚至带 TCP/IP Modbus 的传感器，都为用户使用提供了方便<sup>[41]</sup>。

#### 4.3.5 ARP 协议软件设计

IP 数据包常通过以太网发送。以太网设备并不识别 32 位 IP 地址：它们是以 48 位以太网地址传输以太网数据包的。因此，IP 驱动器必须把 IP 目的地地址转换成以太网网目的地址。在这两种地址之间存在着某种静态的或算法的映射，常常需要查看一张表。地址解析协议 (Address Resolution Protocol, ARP) 就是用来确定这些映象的协议。

ARP 工作时，送出一个含有所希望的 IP 地址的以太网广播数据包，目的地主机，或另一个代表该主机的系统，以一个含有 IP 和以太网地址对的数据包作为应答。发送者将这个地址对高速缓存起来，以节约不必要的 ARP 通信。

如果有一个不被信任的节点对本地网络具有写访问许可权，那么也会有某种风险。这样一台机器可以发布虚假的 ARP 报文并将所有通信都转向它自己，然后它就可以扮演某些机器，或者顺便对数据流进行简单的修改。ARP 机制常常是自动起作用的。在特别安全的网络上，ARP 映射可以用固件，并且具有自动抑制协议达到防止干扰的目的。

当发出 ARP 请求时，发送方填好发送方首部和发送方 IP 地址，还要填写目标 IP 地址。当目标机器收到这个 ARP 广播包时，就会在响应报文中填上自己的 48 位主机地址<sup>[42]</sup>。

下面详细描述一个上位机采集一个以太网智能调理器数据通信的过程，利用安装在上位机的一个 UDP 端口调试软件发送一个请求数据帧，希望以太网智能调理器返回数据，上位机 UDP 端口调试软件如图 4-6。

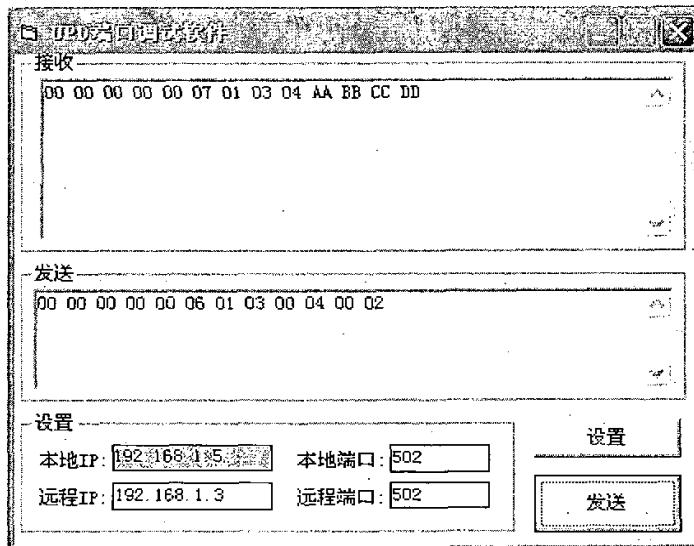


图 4-6 UDP 端口调试软件发送一帧数据

这些步骤的序号如图 4-7 所示。

- 1) UDP客户端组织需要发送的数据。
- 2) UDP客户端请求UDP用得到的IP地址建立连接。
- 3) UDP发送一个连接请求分段到远端的主机，即用上述IP地址发送一份IP数据报。
- 4) 如果目的主机在本地网络上（即没有跨越网段），那么IP数据报可以直接送到目的主机上。如果目的主机在一个远程网络上，那么就通过IP选路函数来确定位于本地网络上的下一站路由器地址，并让它转发IP数据报。在这两种情况下，IP数据报都是被送到位于本地网络上的一台主机或路由器。
- 5) 发送端主机必须把32bit的IP地址转换成48bit的以太网地址。从逻辑Internet地址到对应的物理硬件地址需要进行翻译。这就是ARP的功能。ARP本来是用于广播网络的，有许多主机或路由器连在同一个网络上。
- 6) ARP发送一份称作ARP请求的以太网数据帧给以太网上的每个主机。这个过程称作广播，如图4-2中的虚线所示。ARP请求数据帧中包含目的主机的IP地址（主机名为bsdi），其意思是“如果你是这个IP地址的拥有者，请回答你的硬件地址。”
- 7) 目的主机的ARP层收到这份广播报文后，识别出这是发送端在寻问它的IP地址，于是发送一个ARP应答，这个ARP应答包含IP地址及对应的硬件地址。
- 8) 收到ARP应答后，使ARP进行请求—应答交换的IP数据报现在就可以传送了。
- 9) 发送IP数据报到目的主机。
- 10) 以太网智能调理器回送数据。

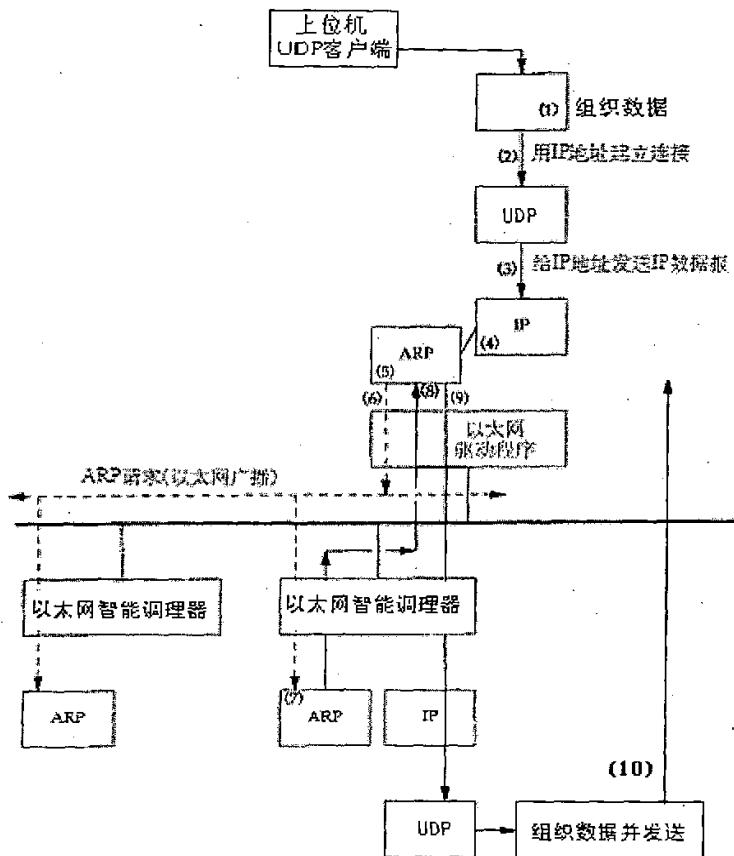


图 4-7 UDP 发送接收数据 ARP 参与过程

在ARP背后有一个基本概念，那就是网络接口有一个硬件地址（一个48bit的值，标识不同的以太网或令牌环网络接口）。在硬件层次上进行的数据帧交换必须有正确的接口地址。但是，TCP/IP有自己的地址：32bit的IP地址。知道主机的IP地址并不能让内核发送一帧数据给主机。内核（如以太网驱动程序）必须知道目的端的硬件地址才能发送数据。ARP的功能是在32bit的IP地址和采用不同网络技术的硬件地址之间提供动态映射<sup>[37]</sup>。

利用网络工具CommView跟踪到的数据包如图4-8：

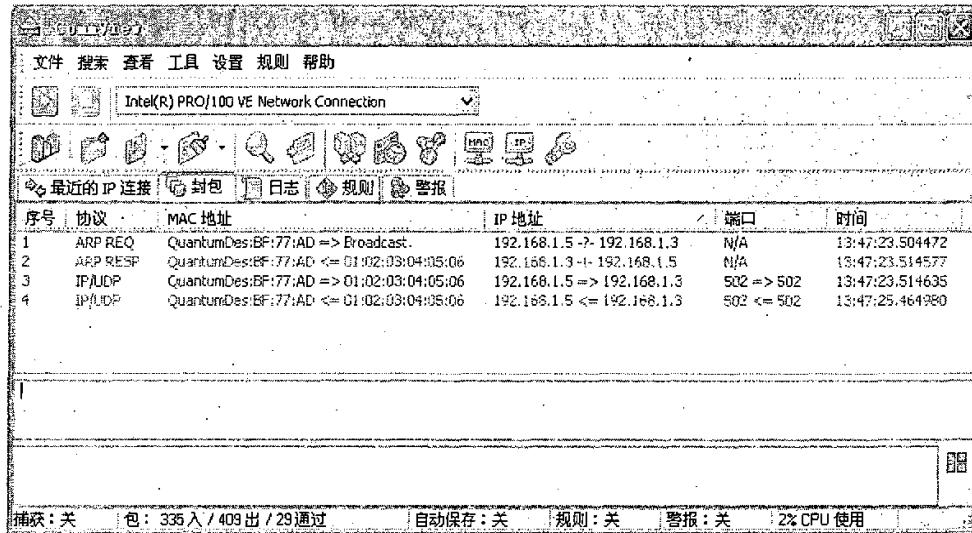


图4-8 网络工具CommView跟踪UDP数据采集

### ARP高速缓存

ARP高效运行的关键是由于每个主机上都有一个ARP高速缓存。这个高速缓存存放了最近Internet地址到硬件地址之间的映射记录。高速缓存中每一项的生存时间一般为20分钟，起始时间从被创建时开始算起。我们可以用arp命令来检查ARP高速缓存。参数-a的意思是显示高速缓存中所有的内容，参数-d的意思是清除高速缓存中的所有内容，如图4-9。

```
EV C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Documents and Settings\chenglei>arp -a
Interface: 192.168.1.5 --- 0x10003
  Internet Address      Physical Address      Type
  192.168.1.3           01-02-03-04-05-06   dynamic

C:\Documents and Settings\chenglei>arp -d
C:\Documents and Settings\chenglei>arp -a
No ARP Entries Found

C:\Documents and Settings\chenglei>arp -a
Interface: 192.168.1.5 --- 0x10003
  Internet Address      Physical Address      Type
  192.168.1.3           01-02-03-04-05-06   dynamic

C:\Documents and Settings\chenglei>
```

图4-9 查看ARP高速缓冲区

以太网智能调理器接收到上位机发送的一个数据帧后，判断帧类型代码是0806，即为ARP帧，跳转到ARP接收、处理过程，如图4-10和图4-11。

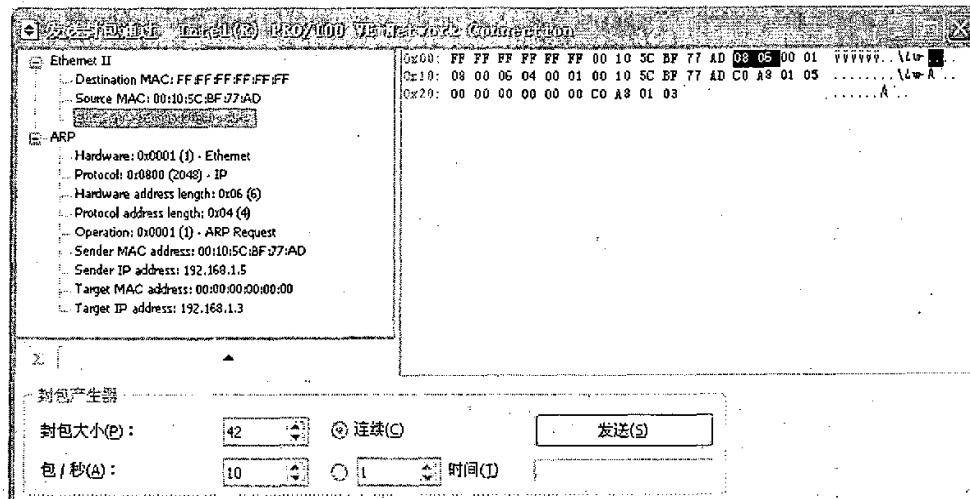


图4-10 上位机发送ARP广播帧

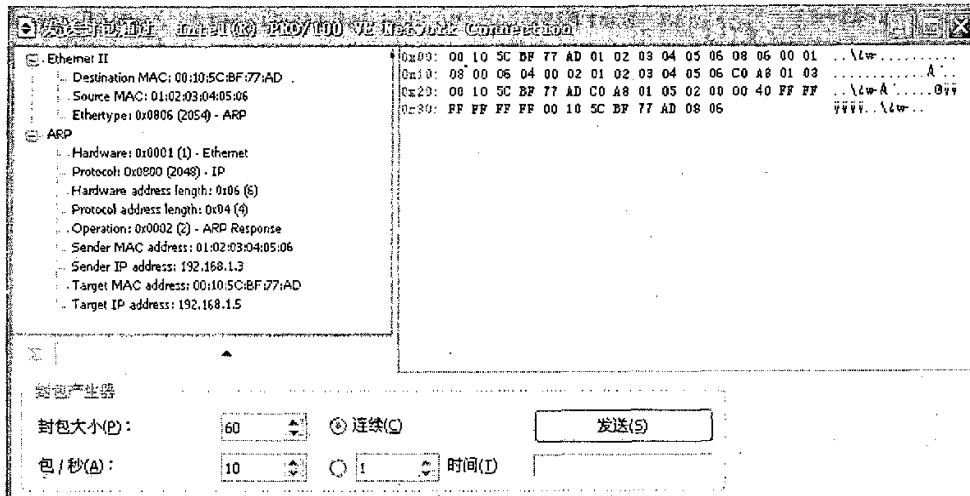


图4-11 以太网智能调理器返回ARP帧

程序如下：

```
void eth_rcve(UCHAR xdata * inbuf)
{
    ETH_HEADER xdata * eth;
    int bbb;
    eth = (ETH_HEADER xdata *) inbuf;
    if (eth->frame_type < 1520)
    {
        if (debug) serial_send("ETH: IEEE 802 pkt rejected\r");
        return;
    }
}
```

```

/* Type number field in Ethernet frame
#define IP_PACKET          0x0800
#define ARP_PACKET          0x0806
协议类型字段指明了发送方提供的高层协议类型，ARP为0806（16进制）。
*/
switch (eth->frame_type) //根据以太网的帧类型判断属于什么帧
{
    case ARP_PACKET:      //如果接收到是ARP请求包
        arp_rcve(inbuf); //详细分解ARP包
        break;
    case IP_PACKET:        //IP包
        ip_rcve(inbuf);
        break;
    default:
        memset(text, 0, 10);
        itoa(eth->frame_type, text, 10);
        serial_send(text);
        if (debug) serial_send("Error: Unknown pkt rcvd\r");
        break;
}
}
}

```

#### 4.3.6 UDP 协议软件设计

UDP协议是英文User Datagram Protocol的缩写，即用户数据报协议，主要用来支持那些需要在计算机之间传输数据的网络应用，包括网络视频会议系统在内的众多的客户/服务器模式的网络应用都需要使用UDP协议。相比TCP协议，UDP协议属于一种不可靠的网络协议。UDP协议从问世至今已经被使用了很多年，虽然其最初的光彩已经被一些类似协议所掩盖，但是即使是在今天，UDP仍然不失为一项非常实用和可行的网络传输层协议。

既然UDP是一种不可靠的网络协议，那么还有什么使用价值或必要呢？其实不然，在有些情况下UDP协议可能会变得非常有用。因为UDP具有TCP所望尘莫及的速度优势。虽然TCP协议中植入了各种安全保障功能，但是在实际执行的过程中会占用大量的系统开销，无疑使速度受到严重的影响。反观UDP由于排除了信息可靠传递机制，将安全和排序等功能移交给上层应用来完成，极大降低了执行时间，使速度得到了保证。本系统的通信过程采用UDP方式，不使用TCP协议的原因，主要是因为用单片机来处理TCP协议，通信速度会较慢；特别是在网络繁忙或网络中有较多的广播信息的时候，速度会特别慢。另外，TCP协议也并不能保证通信“绝对可靠”。

在广域网环境中，数据要经过很多个交换机和路由器转发，容易出现数据丢失和失真，因此带有较多的检验和握手的TCP协议比UDP协议的可靠性好，而局域网中的数据通常只经过几个交换机，所以在局域网环境下，UDP协议的可靠性与TCP协议差别不大，实际测试表明，在正常的网络环境下，有很好的可靠性。如果应用系统对可靠性有特别高的要求，那么应用系统可以自己进行数据检验。

与我们所熟知的TCP（传输控制协议）协议一样，UDP协议直接位于IP（网际协议）协议的顶层。根据OSI（开放系统互连）参考模型，UDP和TCP都属于传输层协议。

UDP协议的主要作用是将网络数据流量压缩成数据报的形式。一个典型的数据报就是一个二进制数据的传输单位。每一个数据报的前8个字节用来包含报头信息，剩余字节则用来包含具体的传输数据。

#### UDP报头

UDP报头由4个域组成，其中每个域各占用2个字节，具体如下：源端口号，目标端口号，数据报长度，校验值。

UDP协议使用端口号为不同的应用保留其各自的数据传输通道。UDP和TCP协议正是采用这一机制实现对同一时刻内多项应用同时发送和接收数据的支持。数据发送一方（可以是客户端或服务器端）将UDP数据报通过源端口发送出去，而数据接收一方则通过目标端口接收数据。有的网络应用只能使用预先为其预留或注册的静态端口；而另外一些网络应用则可以使用未被注册的动态端口。因为UDP报头使用两个字节存放端口号，所以端口号的有效范围是从0到65535。一般来说，大于49151的端口号都代表动态端口。

数据报的长度是指包括报头和数据部分在内的总的字节数。因为报头的长度是固定的，所以该域主要被用来计算可变长度的数据部分（又称为数据负载）。数据报的最大长度根据操作环境的不同而各异。从理论上说，包含报头在内的数据报的最大长度为65535字节。不过，一些实际应用往往限制数据报的大小，有时会降低到8192字节。

UDP协议使用报头中的校验值来保证数据的安全。校验值首先在数据发送方通过特殊的算法计算得出，在传递到接收方之后，还需要再重新计算。如果某个数据报在传输过程中被第三方篡改或者由于线路噪音等原因受到损坏，发送和接收方的校验计算值将不会相符，由此UDP协议可以检测是否出错。这与TCP协议是不同的，后者要求必须具有校验值<sup>[43][44]</sup>。

举例说明以太网调理器接收一帧UDP请求和返回数据的过程。

在数据部分，如果组成UDP帧，其封装如下IP20字节，UDP首部8字节，后面紧跟就是需要发送的数据。

在调理器中，初步设计每次上位机向调理器发送数据请求时，以太网智能调理器返回一个数据进行计算，每个数据占用两个寄存器空间，也即4个字节。因此发送一帧Modbus/TCP数据如表4-4：

表 4-4 传送一帧 Modbus/TCP 数据

| DA+SA+TYPE | 数据内容  |        |   |
|------------|-------|--------|---|
|            | IP    | UDP 首部 | UDP 数据  |
| 14 字节      | 20 字节 | 8 字节   | MPAP6 字节  |
|            |       |        | 00 00 00 00 00 06                                 |
|            |       |        | 请求: 01 03 00 04 00 02<br>回复: 01 03 04 AA BB CC DD |

注意: 在 Modbus/TCP 中, Modbus 最后的校验码不再需要。

利用网络工具 CommView 截获的一个以太网 UDP 数据请求和接收帧如图 4-12 和图 4-13, 分析如下:

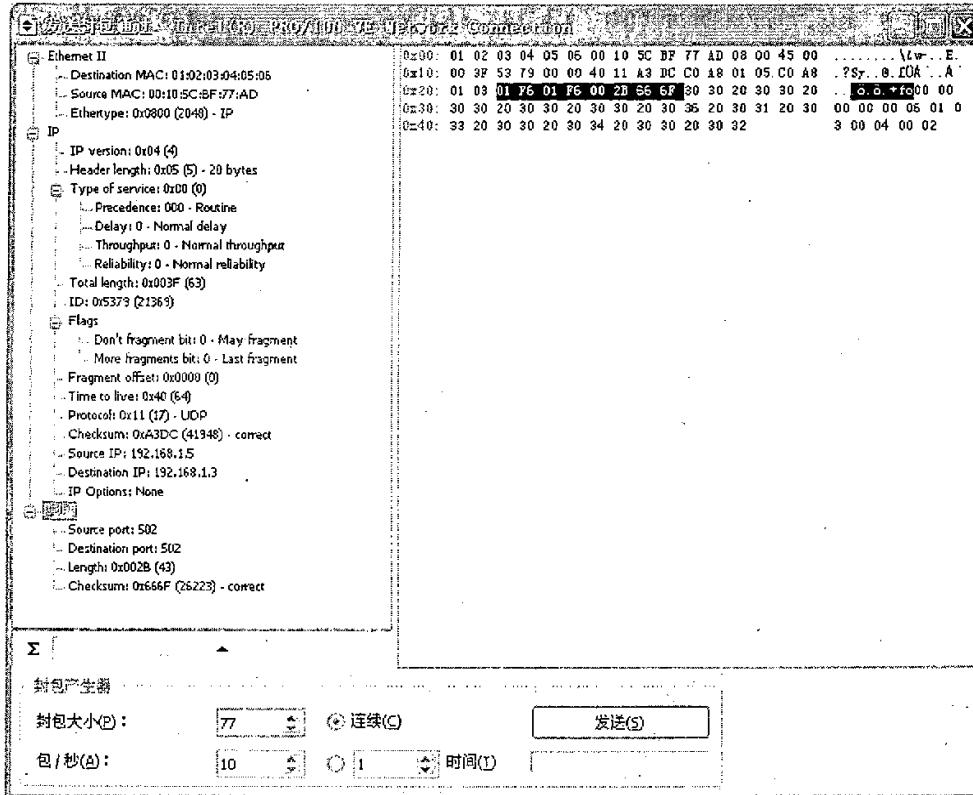


图 4-12 上位机请求 UDP 数据帧

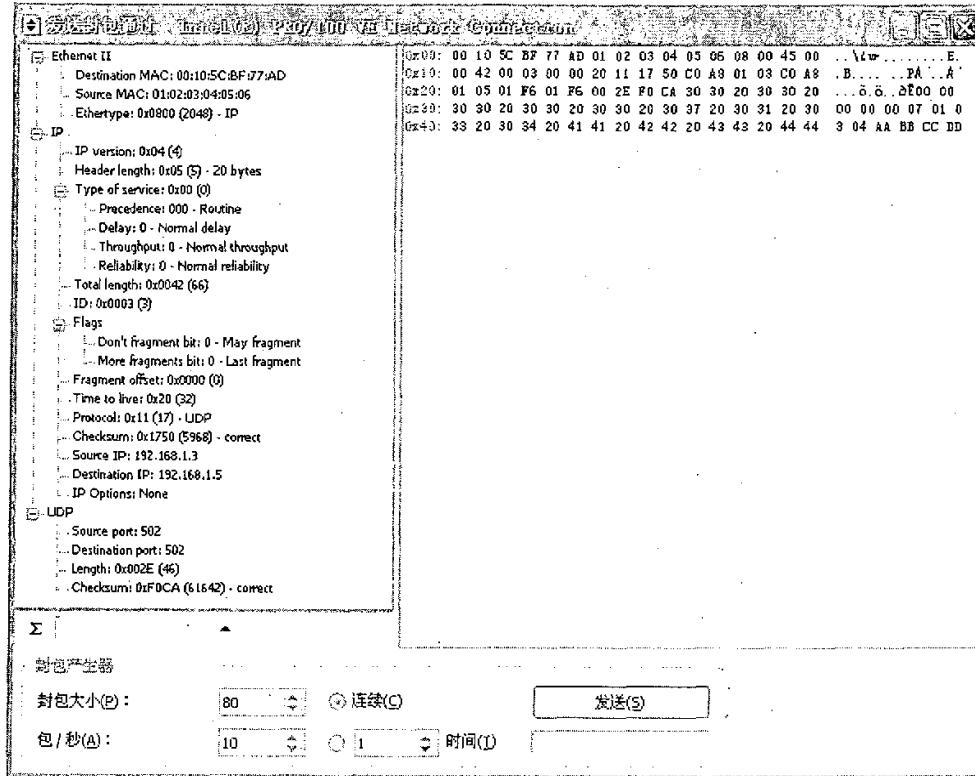


图 4-13 以太网智能调理器返回 UDP 数据帧

本网络调理器采用 10Mbps 以太网芯片，在网路上上传输一个字节数据需要的时间大约为： $(10 \times 1024 \times 1024 / 8)^{-1} \times 1000 = 0.0007629\text{ms}$ 。

从上位机发送到网络调理器，然后返回有效数据到上位机所需要的时间计算如下：从上面表格知道，上位机需要发送 54 个字节，根据网络协议规定增补数据为 60 个字节。设定网络调理器从收到数据到组织完成数据需要 T 毫秒时间，网络调理器返回 1 个数据共 55 个数据，增补数据为 60 个字节。那么在线路上传输数据共  $60 + 60 = 120$  个字节。因此共需要时间  $120 \times 0.0007629\text{ms} = 0.091548\text{ms}$ ，通信的全部时间  $0.091548\text{ms} + T$ ，这里 T 的时间和单片机的处理能力有关系，这也就是为什么在以太网智能调理器硬件设计中的微控制器选型的一个问题。

本文所述目前仅限于在一个网段内，跨网段路由器将在最近研究。

#### 4.3.7 以太网智能调理器 WEB 服务器的设计

以太网智能调理器实现 UDP 的数据传送，每次发送接收的数据量比较少，完全可以在微控制器 DS89C450 芯片内部的 RAM 中处理，这样做的目的是提高通信的速度，也就是减小微控制器处理的 T 值，其实这样的方式在数据采集系统中已经实现了，之所以这里还将以太网智能调理器设计成 WEB 服务器的方式，目的只是为了对调理器进行参数的查看和配置比较方便，当然配置也可以通过其它途径进行配置，

比如利用串口配置，智能调理器出厂默认值的 IP 地址为 192.168.1.1，登陆这个 WEB 页面后，可以更改智能调理器的各种参数，包括 IP 地址的更改，如果以后还想以 WEB 的方式修改参数，前提是要知道修改过的 IP 地址，如果忘记，则可以将调理器的设置默认值的跳线开关置于有效位，按下调理器的复位按键，直到默认值指示灯点亮，然后重新将默认值跳线恢复，这时候调理器的 IP 地址恢复为 192.168.1.1，即可重新登陆到 WEB 页面进行修改。

设置成 WEB 服务器用到 TCP 协议和 HTTP 协议，因为不参与数据的采集，而且这部分数据量比较大，因此数据的处理放在扩展的外部 RAM 中进行。

从功能上来讲，Web 服务器监听用户端的服务请求，根据用户请求的类型提供相应的服务，用户端使用 Web 浏览器和 Web 服务器进行通信。Web 服务器在接收到用户端的请求后，处理用户请求并返回需要的数据。HTTP（超文本传输协议）是 Web 服务器用来与浏览器通信的协议，HTTP 规定了发送和处理请求的标准方式，规定了浏览器和服务器之间传输的消息格式及各种控制信息，从而定义了所有 Web 通信的基本框架<sup>[45]</sup>。登陆 WEB 服务器的过程如图 4-14。

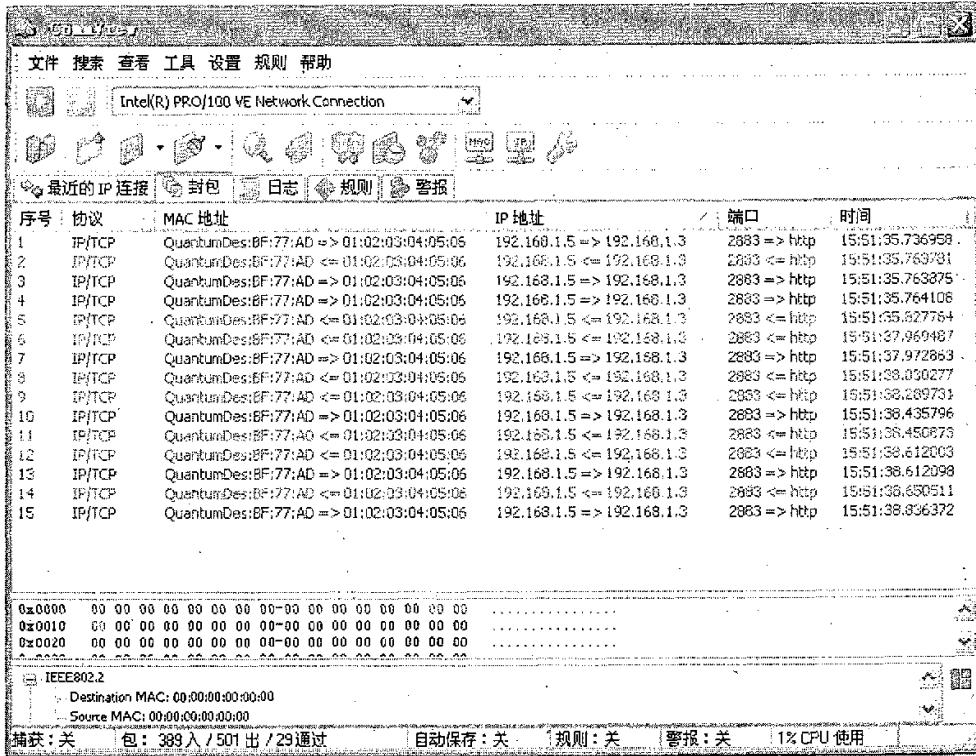


图 4-14 登陆 WEB 服务器的过程

在基于单片机的嵌入式 WEB 服务器上，编程实现 TCP 协议的一个难点在于建立连接和终止连接的具体过程。TCP 协议是一个面向连接的协议，连接的双方无论是哪一方向另一方发送数据，都必须先通过“三次握手”，如图 4-14 中的序号 123，在双方之间建立一条连接，完成数据传输之后再通过“四次握手”终止连接。连接

建立后，TCP 就可以发送数据块，称为数据段。当 TCP 发出一个段后，等待目的端确认收到这个报文段；如果不能及时收到一个确认，将重发这个报文段。另外，TCP 还将对数据进行校验和检查。登陆 WEB 服务器页面可以进行参数的修改<sup>[46]</sup>，如图 4-15。

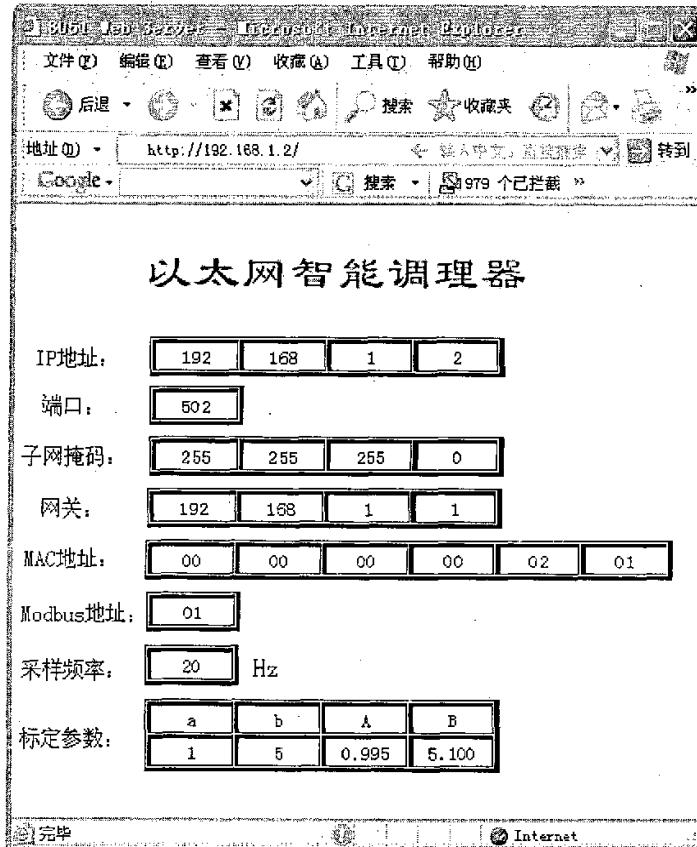


图 4-15 WEB 服务器页面

#### 4.4 工业以太网 802.3af 供电的设计

在 2003 年 6 月 IEEE 最终批准了 802.3af 标准。该标准定义了一种允许通过以太网在传输数据的同时输送 DC 电源的方法，它能安全、可靠地将以太网供电（PoE：Power over Ethernet）技术引入现有的网络基础设施中，并且和原有的网络设备相兼容，它最大能提供大约 13W 的功率，这样小型网络设备就可通过以太网连接供电而无需外接电源，从而大大简化了布线，降低了网络基础设施的建设成本。

##### 4.4.1 802.3af 以太网供电的标准

###### 4.4.1.1 PoE 系统的构成

在 PoE 系统中，提供电源的设备被称为供电设备（PSE：Power Sourcing Equipment），而使用电源的设备称为受电设备（PD：Powered Device）。PSE 负责

将电源注入以太网线，并实施功率的规划和管理。可以采用两种类型的 PSE，一种为“Endpoint PSE”，另一种为“Mid-span PSE”。Endpoint PSE 就是支持 PoE 的以太网交换机、路由器、集线器或其它网络交换设备。mid-span PSE 是用来将以太网供电功能添加到现有网络的一种设备，它专门用于电源管理，并通常和交换机放在一起，和交换机一样也有多路输入输出 RJ-45 端口，对应每路的两个 RJ-45 插孔，一个用短线连接至不具有以太网供电功能的网络交换设备，作为数据输入口；而另一个连接到支持 802.3af 供电的远端用电设备（PD），作为数据/电源双用的 RJ-45 输出口。mid-span 设备通常通过未使用的 4/5 和 7/8 线对来承载供电，剩下的部分预留给数据传输。电源在机箱内被注入网线而信号未作任何调整。PD 则有多种形式，如 IP 电话机、网络摄影机、无线桥接器、收银机、安全存取与监测系统等。实际上，任何需要数据连接并能在 13W 或更低功率下工作的设备都可无需外接电源或电池供电，仅从 RJ45 插座就能够得到相应的电力<sup>[47]</sup>。图 4-16 给出了采用 Mid-span 的 POE 系统工作示意图。

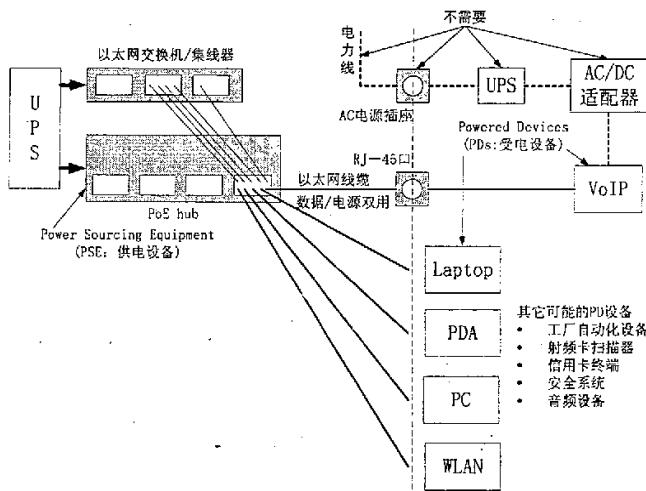


图 4-16 采用 Mid-span 的 POE 系统工作示意图

#### 4.4.1.2 供电设备—PSE

PSE 负责 PoE 系统的电源管理。它连续监视网络上 PD 设备的连接状况，并根据 PD 的功率要求，将适当的电力通过五类电缆中的信号线对（Endpoint PSE）或备用线对（Mid-span PSE）输送到 PD，并在 PD 下线时切断电源，如图 4-17。

Endpoint PSEs 支持 10BASE-T, 100BASE-TX 和 1000BASE-T 网络，Endpoint 的 POE 系统中的 PSE 可以在信号线对之间或备用线对之间（但不是两者同时）提供标称 48V 的 DC 电源，其中在信号线对之间传输电力时，48V 电源通过向耦合变压器的中间抽头供电以共模方式施加在双绞线上，对于差分数据信号没有影响，并且由于耦合变压器的隔离，也不会对数据收发器产生影响；Mid-span PSEs 只支持 10BASE-T 和 100BASE-TX 网络，而对 1000BASE-T 网络的支持 802.3af 标准目前还未定义，

Mid-span PSE 在备用线对之间提供 48V 的 DC 电源。Mid-span PSE 较 Endpoint PSE 需要额外的线缆，占用了更多的空间，并增加了系统成本。

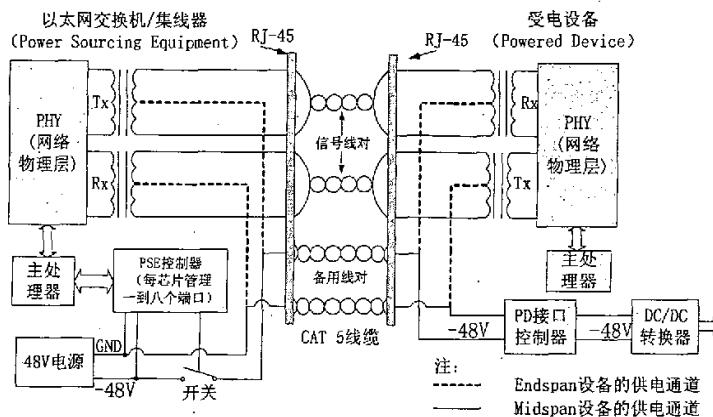


图 4-17 48V 电源加在信号线对或备用线对上

在允许 PSE 向线路供电之前，它必须用一个有限功率的测试源来检查特征电阻，以避免将 48V 电源加给非兼容 PoE 的网络设备，对其造成危害。在加电之前 PSE 首先用 2.8V 至 10V 的探测电压去侦测是否有 PD 接入，具体实施时是将 2.8V 至 10V 之间的两个电压（间隔在 1V 或以上）送到网络链路，然后根据得到的两个不同的电流值再作运算 ( $\Delta V / \Delta I$ )。为了便于 PSE 识别，IEEE802.3af 对于 PD 在侦测过程中的表现（特征）作了规定，如表 4-5 所示。

表 4-5 IEEE802.3af 对于 PD 侦测特征的规定

| 参数                         | 有效的 PD 侦测特征                        | 无效的 PD 侦测特征                                 |
|----------------------------|------------------------------------|---|
| $\Delta V / \Delta I$ (斜率) | $19k\Omega < R_{pd} < 26.5k\Omega$ | $R_{pd} < 15k\Omega$ 或 $R_{pd} > 33k\Omega$ |
| 输入电容                       | $C_{pd} < 0.12\mu F$               | $C_{pd} > 10\mu F$                          |
| 偏移电压                       | $< 1.9V$                           | —   |
| 偏移电流                       | $< 10\mu A$                        | —   |

一旦侦测到有效的 PD，PSE 需要了解 PD 的用电量，便于系统对电源的管理，这个过程称为 PD 分级（IEEE 标准规定此过程是可选的）。这一阶段 PSE 利用一个 15.5V 至 20.5V 的探测电压来检测 PD 的功率级别。通过从线上吸收一个恒定电流——分级特征信号，PD 向 PSE 表明自己所需的最大功率。PSE 测量这个电流以确定 PD 属于哪个功率级别，分级期间使用的 PSE 电压源必须限制到 100mA，以避免损坏失效的 PD，而且它的连接时间不能超过 75ms，以对 PD 功耗加以控制。表 4-6 列出了分级情况及其恒流特征。

表 4-6 IEEE802.3af 对于 PD 分级的规定

| IEEE802.3af 级别 | 分级特征电流 | PD 最大功率 | PSE 最小输出功率 | 说明          |
|----------------|--------|---------|------------|-------------|
| 0              | 0~4mA  | 12.95W  | 15.4W      | PD 功率未知，不分级 |

|   |         |        |       |               |
|---|---------|--------|-------|---------------|
| 1 | 9-12mA  | 3.84W  | 4W    | 低功耗 PD        |
| 2 | 17-20mA | 6.49W  | 7W    | 中等级功耗 PD      |
| 3 | 26-30mA | 12.95W | 15.4W | 高功耗或全功率 PD    |
| 4 | 36-44mA | 12.95W | 15.4W | 保留, 功率情况同 0 级 |

成功侦测和分级后, PSE 就可向 PD 供电了。供电期间, PSE 还要对每个端口的供电情况进行监视, 提供欠压和过流保护。

PSE 不能向非 PD 设备传输电力, 同样 PSE 也不能在 PD 已经断开后还使电源处于接通状态, 因为供电电缆有可能会插在一个非 PD 设备上, 或引起线缆的短接。IEEE802.3af 标准规定了两种方法让 PSE 检测 PD 是否断开, 即 DC 断路检测法和 AC 断路检测法, 不同的芯片供应商根据系统的实际情况选择了最适合他们系统的检测方法。

DC 断路法根据从 PSE 流向 PD 的直流电流大小, 从而判断 PD 是否在线。当电流在给定时间  $t_{DIS}$  (300ms 到 400ms) 内保持低于阈值  $I_{MIN}$  (5mA 到 10mA), PSE 就认为 PD 不存在, 从而切断电源。这种方法的缺点就是, 当 PD 工作在低功耗模式时, 为避免掉线 PD 必须周期性地从线上吸取一定的电流。AC 断路法是测量以太网端口的交流阻抗, 当没有设备连接到 PSE 时, 端口应该是高阻抗, 可能达到几兆欧; 而当接有 PD 时, 端口的阻抗会小于  $26.5k\Omega$ ; 如果 PD 消耗大量功率, 那么阻抗通常会更低。端口阻抗 ( $Z_{PORT}$ ) 通过加电压 ( $V_{AC}$ ) 和测量得到的电流 ( $I_{AC}$ ) 来决定, 即  $Z_{PORT} = V_{AC}/I_{AC}$ 。

目前已有多家半导体厂商提供了符合 IEEE802.3af 规格的 PSE 控制器, 这些器件在降低系统成本、提供更高可靠性的同时也加速了以太网供电的广泛普及。这些控制器为凌特公司 (Linear) 的 LTC4258/59, 德州仪器 (TI) 的 TPS2383, 以色列 PowerDsine 公司的 PD64008, 美信公司 (Maxim) 的 MAX5922A/B/C 及即将上市的 MAX5935。其中 Linear 的 LTC4258/59 可以对四路以太网供电端口进行管理, 它具有自主运行(无需处理器干涉)情况下即可按序处理所以任务的功能, 对每路都可以单独设置其工作模式 (自动、半自动、手动、关闭)。

#### 4.4.1.3 受电设备 — PD

首先 PD 应能通过信号线或备用线接收电源, 通常由二极管对两个电源进行线“或”来实现, 因为 IEEE 规格要求同时只能有一个线对传输电源, 同时 PD 应该能不受电源极性的限制, 这通常可以使用整流桥或其它方法来实现自动极性转换。

当 PSE 用 2.8V 至 10V 之间的电压侦测时, PD 必须具有表 1 所示的输入特性。PD 的输入端口可具有高达 1.9V 的偏移电压 (以容许二极管的压降) 和  $10\mu A$  的偏移电流 (漏电流)。

当 PSE 用 15.5V 至 20.5V 之间的电压侦测时, PD 需要通过吸收一定的恒流来表明自己所需要消耗的功率 (可选), 所以 PSE 能预算 PD 的功耗, 同时也方便 PSE 对电源的管理。

探测和分级完成后，PD 就会从 PSE 获得一个 44V 到 57V 的电压，这时 PD 要遵守几条规定。在端电压升到 30V 以前，它不应该消耗太大的负载电流，以避免与分级特征信号互相干扰；当电压达到 42V 时，它必须处于完全工作状态。工作状态时 PD 端口电压应该在 36 至 57V 之间，而当 PD 的端口电压跌落到 30 至 36V 之间时，PD 应该关断端口。PD 工作时不能连续消耗 350mA 电流或 12.95W 功率，短时内允许有 400mA 的浪涌电流。PD 的输入电容必须低于  $180 \mu F$ ，以便在电源接通时将浪涌电流保持在合理的水平；如果输入电容大于  $180 \mu F$ ，PD 就要主动限制浪涌电流，使它低于 400mA。最后，PD 至少要保持 10mA 的电流且交流阻抗要维持在  $26.25k\Omega$  或更少以避免掉线。

为了使 PD 符合 IEEE802.3af 标准的要求，简化设计任务，同样几大半导体厂商相继推出了 PD 接口控制器。可用的接口控制器有德州仪器（TI）的 TPS2370/TPS2371/TPS2375，凌特公司（Linear）的 LTC4257/LTC4257-1，美信公司（Maxim）的 MAX5940A/MAX5940B、MAX5941A/B、MAX5942A/B，Supertex 公司的 HV110K4 以及 Power Integrations 公司的 DPA423G。其中 Maxim 的 MAX5941A/B、MAX5942A/B 和 Power Integrations 的 DPA423G 将用于 DC/DC 转换的 PWM 控制器也集成在芯片中，利用它们可以实现非常紧凑且高性价比的 PD 供电电路<sup>[48][49]</sup>。

#### 4.4.2 硬件电路的设计

以太网智能调理器属于以太网供电的受电设备，即 PD 设备，这部分功能采用 MAXIM 公司的 MAX5941 完成。

MAX5941A/MAX5941B 是一款高度集成的电源 IC，适用于以太网供电(POE)系统中的受电设备(PD)。MAX5941A/MAX5941B 有两个功能，一是提供 PSE 与 PD 之间的接口，二是通过 DC-DC PWM 控制器实现 48V 电源转换以输出 5V 或者 PD 所需要的电压，输出电压可实现隔离或者非隔离。MAX5941A 的最大占空比为 85%，可用于反激式转换器。MAX5941B 的占空比限制在 50% 以内，主要用于单端正激式转换器中。

##### 4.4.2.1 IEEE 802.3af 标准的 PD 接口特性

MAX5941 的 PD 接口特性符合 IEEE 802.3af 标准，可为 PD 提供侦测特征信号和分级信号，此外，MAX5941 还集成了一个具有可编程浪涌电流控制功能的集成隔离开关，同时还具有宽滞回供电模式欠压锁定(UVLO)以及“电源好”状态输出等功能。

在侦测和分级期间，由于集成的 MOSFET 可提供 PD 隔离，MAX5941 可保证侦测阶段的泄漏电流失调小于  $10 \mu A$ 。其可编程限流功能可防止上电期间产生很高的浪涌电流。这些器件的 UVLO 供电模式具有宽滞回和长故障消隐时间等特性，因而可补偿电压在双绞电缆上的阻性衰减，并确保系统在侦测、分级和上/掉电诸状态间无扰动地转换。MAX5941 的 UVLO 门限可调，并具有一个兼容于 IEEE 802.3af 标准的缺省值。MAX5941 可工作于 PD 前带有或不带二级管桥的设计中，如图 4-18。

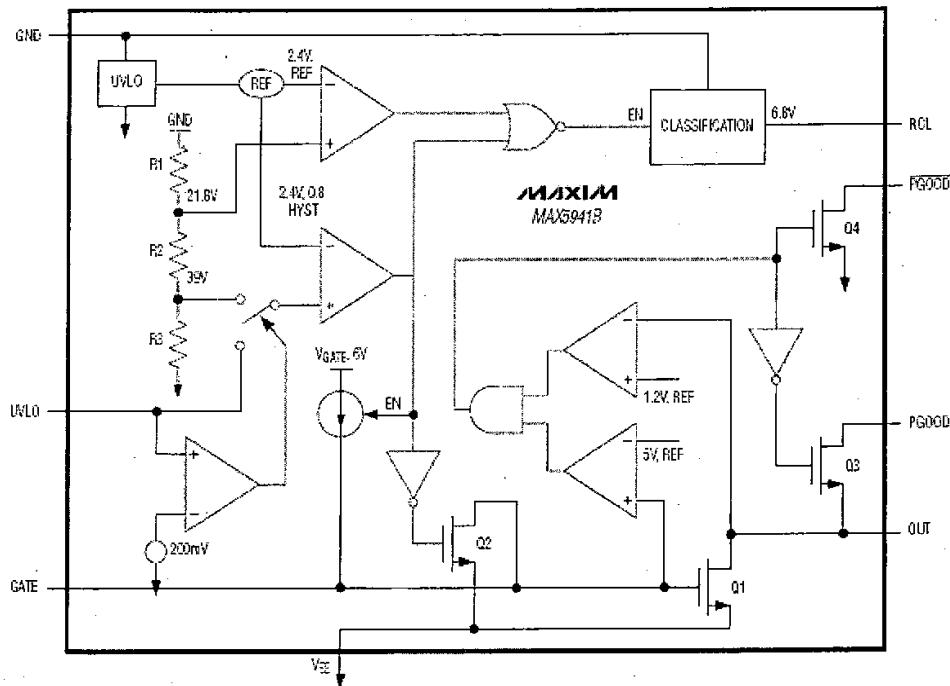


图 4-18 MAX5941 内部电路框图

MAX5941 有三种不同的工作模式：PD 值测、PD 分级和 PD 供电模式。

值测模式( $1.4V \leq VIN \leq 10.1V$ )下，供电设备(PSE)将向  $VIN$  施加两种  $1.4V \sim 10.1V$  范围内的电压(最小步长  $1V$ )，然后记录两个点的电流值，并由 PSE 计算  $\Delta V / \Delta I$ ，以确认  $25.5k\Omega$  特征电阻是否存在。在此模式下，MAX5941 内部的大部分电路处于关闭状态，失调电流小于  $10\mu A$ 。如果施加在 PD 上的电压有可能被颠倒，则需要在输入端安装保护二极管，以免对 MAX5941 造成内部损伤。由于 PSE 使用斜率技术( $\Delta V / \Delta I$ )来计算特征阻抗，这样，保护二极管引起的直流偏差已被扣除，因而不会影响值测过程。

分级模式( $12.6V \leq VIN \leq 20V$ )下，PSE 根据 PD 所要求的功率对 PD 进行分级。以便 PSE 高效地管理功率分配。IEEE802.3af 标准定义了五个不同的级别。分级电流可由连接在  $RCL$  与  $VEE$  之间的外部电阻( $RCL$ )来设定。PSE 通过在 PD 输入端施加一个电压，以及测量流出 PSE 的电流来确定 PD 的分级。当 PSE 施加一个介于  $12.6V \sim 20V$  之间的电压时。PSE 利用分级电流信息区分 PD 所需要的功率。分级电流包括  $25.5k\Omega$  值测特征电阻吸收的电流和 MAX5941 的电源电流，PD 吸收的总电流应在 IEEE802.3af 标准要求之内。进入供电模式后，分级电流将被关断。

供电模式下，当  $VIN$  上升至欠压锁定门限( $VUV-LO, ON$ )以上时，MAX5941 将逐步开启内部 N 沟道 MOSFET 管  $Q1$ 。图 1 是 MAX5941 的内部接口电路框图。MAX5941 用一个恒流(典型值为  $10\mu A$ )对  $Q1$  栅极充电。 $Q1$  的漏-栅电容限制了 MOSFET 漏极

电压的上升速率，因而限制了浪涌电流。为了降低浪涌电流，也可在外部添加漏-栅电容。当 Q1 的漏-源电压降至 1.2V 以下，且栅-源电压高于 5V 时，MAX5941 会发出“电源好”信号。由于 MAX5941 具有较宽的 UVLO 滞回和关断消隐时间，因而可补偿双绞电缆的高阻抗<sup>[50]</sup>。

#### 4.4.2.2 用 MAX5941 实现 48V 电源转换

MAX5941 是电流模式的 PWM 控制器，可将 48V 输入电源转换成 5V 电压输出，MAX5941 用内部稳压器取代高功耗的启动电阻，这不但可为 MAX5941 提供启动所需的电能，还能稳定第三(偏置)绕组的输出电压，从而为 IC 提供稳定的工作电源。开始启动时，调节器将 V+ 调整到 VCC 并为器件提供偏置。启动之后，改由 VDD 稳压器从第三绕组输出稳定的 VCC。此结构只需一只很小的电容即可对第三绕组的输出进行滤波，从而省下了一只滤波电感的成本。

在设计第三绕组时，所设计的线圈匝数应保证最小反射电压始终大于 12.7V。而最大反射电压则必须小于 36V。

为降低功耗，当 VDD 电压达到 12.7V 后，可以将高压调节器关掉。这样可以降低功耗并改善效率。如果 VCC 降低到欠压锁定门限(VCC=6.6V)以下，低压调节器将被关闭，电路重新进入软启动。此时欠压锁定状态 MOSFET 驱动器的输出(NDRV)保持为低。

如果输入电压介于 13~36V 之间，只要不超出最大功耗，就可以将 V+ 和 VDD 连接到线电压，这样就可省掉第三绕组。

图 4-19 是用 MAX5941B 设计的正激式 DC/DC 转换器。

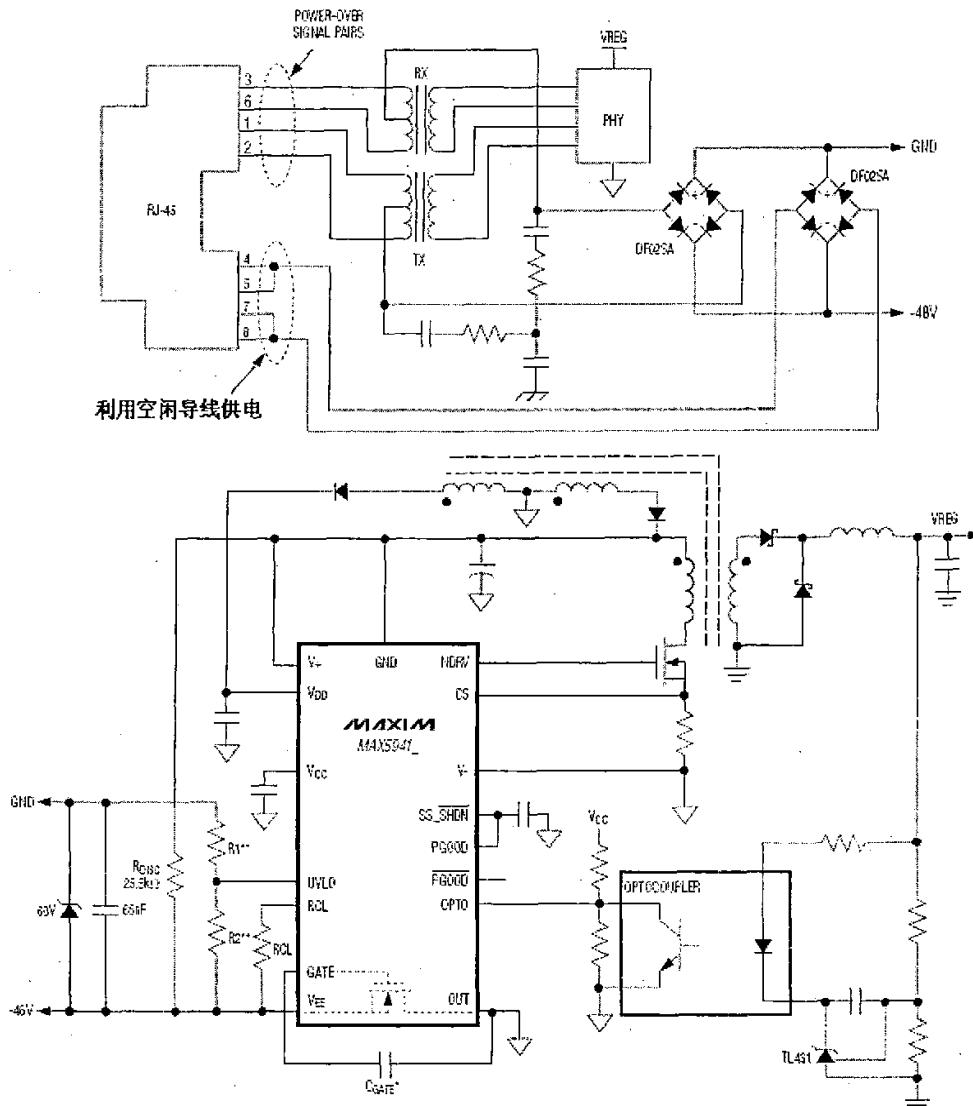


图 4-19 以太网供电电路图

#### 4.5 上位机的设计

上位机的设计同上一章。

#### 4.6 以太网智能调理器手操器的设计

在以太网智能调理器的基础上增加液晶和按键的功能，设计成为以太网智能调理器手操器，方便安装和调试中的使用。

#### 4.7 结论

以太网数据采集方案及其以太网智能调理器的研究是本研究论文的重点，因此

详细介绍了采集系统的组成和相关设备，以太网智能调理器的研发设计从硬件电路的芯片选型、相关协议的介绍等入手，分析了实际数据采集中一帧数据的接收发送过程，使读者一清二楚，这一章给出了大量详细的图例，以有助于理解这个过程。

## 第5章 大型桥梁健康监测使用到的其它数据自动化采集方案

根据大型桥梁健康监测的特点，本章简要讨论了在监测的其它方面使用到的数据采集方案以及设计其它类型总线方式的智能调理器。

### 5.1 大型桥梁施工控制中无线监测系统的设计

桥梁健康监测主要分为施工过程中的监测和运营中的监测两大部分，前面一些章节重点介绍了运营过程中的监测，施工中的监测相比较来说较为困难一些。

桥梁的施工控制过程是一个信息采集、信息分析处理和信息反馈的过程。通过实时采集桥梁施工过程中的所关心的各种数据信息，尤其是对施工中各类结构响应数据（如变形、内力、应力、温度场）的分析，研究制定出精度控制和误差调整的具体措施，最后以施工控制指令的形式为桥梁的施工提供反馈信息<sup>[51]</sup>。在目前的桥梁施工控制中，每次桥梁结构发生变化，必须及时安排人员携带各种传感器和数据采集设备来到现场，在有限的时间内进行紧张的安装调试然后进行相应的数据采集，因此桥梁施工控制中的数据采集是一个较大时间跨度、间断性，重复性的工作，并且施工现场众多单位各种线缆经常调整，会给施工控制监测的通讯线路造成一定影响，另外天气影响等因素也会给数据采集人员带来一定的操作复杂性和危险性。施工控制者往往来对桥梁结构进行连续的监测时必须投入巨大的人力，以分析应力、温度等因素的变化对结构的影响。

综合分析上面的各种因素，本文设计了桥梁施工控制中无线监测系统的方案，由于采用无线方式，在桥梁需要监测的位置可以迅速安放合适的传感器和无线采集器，无需布线，调试快捷简单，用于无线接收和发送上层客户机或者手操器的指令和数据。施工控制过程中所有设备均为无线构成，比起传统方法省去了布设线路的困难，安装灵活方便，通讯采集不受线缆和天气变化的影响<sup>[52]</sup>。该系统已经成功应用到了南京长江第三大桥施工控制中，所构建的无线监测系统实现了整个施工过程的连续监测，这样可以为施工控制提供最接近实际情况的修正参数，从而大大提高施工控制的精度。

#### 5.1.1 无线监测系统的结构组成

无线监测系统的结构如图 4-1 所示，首先在桥梁需要监测的位置安放无线采集器，根据监测内容要求，主要为温度、应力、索力、拉索振动等，要做到无线采集，那么每个采集器应该自备电池，从节约功耗角度考虑，采集数据的传感器尽量选择无源型和低功耗的，如电阻应变片、无源拾振器、数字温度计等。在已建好的下横梁位置安装无线 WEB 服务器，无线 WEB 服务器有两部分无线功能，其中之一是工业 433MHz 频段用来和各个无线采集器、数据采集人员的手操器进行通讯，另一部分无线是 2.4GHz 频段的无线网络，用来和客户机联网构成无线局域网，无线 WEB 服务器设置了三种局域网数据通讯方式，RJ45 用来和本地计算机直接相连，小型天线用于施工

现场的移动 PC 互连, 定向天线用来和远处的远程监测站通讯。远程监测站同样设置一台定向天线, 通过无线路由器和监测客户端构成本地局域网。由于在施工现场安装的是无线 WEB 服务器, 因此, 在整个无线局域网中的计算机不需要安装任何软件程序, 可以直接登陆到服务器的 WEB 页面, 进行数据的动态监测, 分析运算。

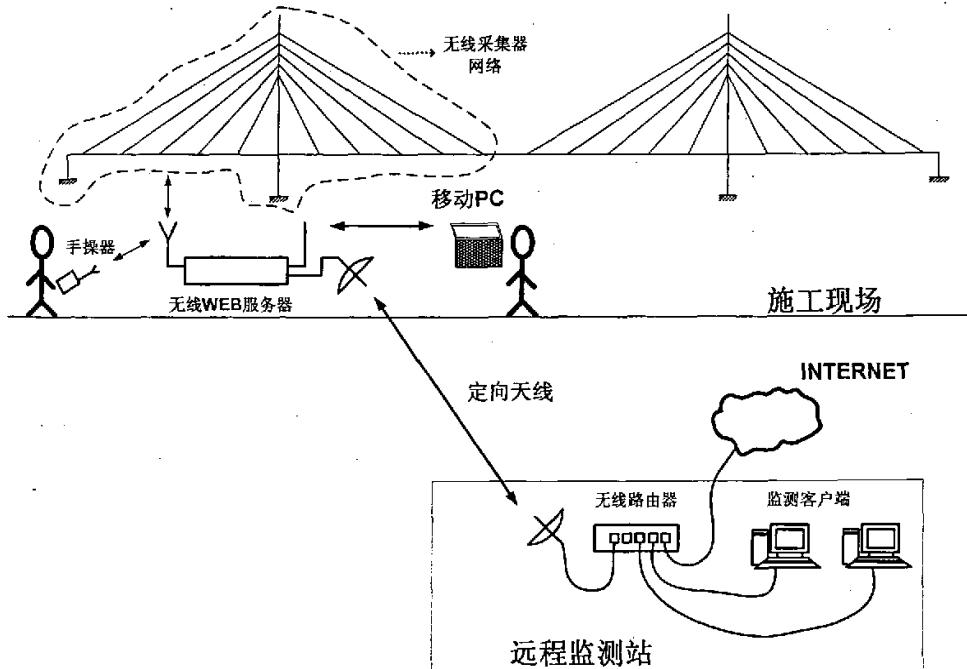


图 5-1 无线监测系统结构图

### 5.1.2 系统硬件的设计

在整个无线监测系统中, 有两个硬件电路需要设计, 一个是无线采集器, 其电路图如图 4-2。无线采集器的微控制器选择用挪威 Nordic 公司的无线单片机 nRF9E5。该芯片采用 +3VDC 供电, 面积为  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ , 共有 32 个外部引脚, 包括 UART 和 SPI 等功能。内部集成了 nRF905 射频模块、8051 微控制器及 A/D 转换模块, 具有 433/868/915MHz 三波段载波频率。采用 GFSK 调制, 抗干扰能力强; 支持多点通讯, 数据传输速率高达 0.1Mbps。具有特有的 ShockBurst 信号发射模式和发射信号载波监测功能, 可有效降低功耗电流、避免数据冲突。内部寄存器为用户提供了基础的通讯协议, 便于用户扩展, 缩短了开发周期。外围电路连接极为简单, nRF9E5 输出端 ANT1、ANT2 对外接环型天线, 信号有效发射距离无遮挡时可达 800m 以上, 有建筑物等遮挡时可达 350m 左右<sup>[53]</sup>。

图4-2中需要根据传感器输出参数不同选择不同的高精度AD转换器模块, 通过串行数字接口和nRF9E5的IO口相连; 另外在AD转换器前端根据需要还增加放大滤波等环节。本系统桥梁测的物理量主要有以下几种, 如果采集电桥输出, 将电桥激励和AD的参考电压端共同连接到电源+5V, 使AD转换器, 仪表放大器, 电桥构成比率

的方式，然后根据电桥灵敏度对仪表放大器设置合适放大倍数，使其输入范围达到满量程的80%左右，以提高采样精度；对于一般电压信号输出，可以直接选择带有可编程增益放大器的AD转换器，根据传感器输出电压范围的不同，自动设定增益或者从客户端下发指令给无线采集器更改增益；4~20mA电流输出在AD转换器输入阻抗极大的情况下，可以外接高精密温漂小的电阻实现电流到电压的转换，或者使用电流到电压变换的芯片实现；数字接口的传感器通过相应的以太网转换器连接到网络中。AD部分在整个网络调理器中占有举足轻重的地位，一定要全盘了解各个传感器的性能指标，设计时各个兼顾等，尤其在设计PCB应该注意模拟部分和数字部分合理布线，一点接地等。

考虑到无线采集器是电池供电，为防止电池供电不足引起的数据错误，在无线采集器的电路中还增加了单总线的电池电量监测芯片DS2780，另外SPI接口的EEPROM芯片25AA320用来存放微控制器的程序。

为方式使用，可以在本无线采集器的基础上，去除AD采集模块，增加液晶和按键构成无线手操器，由程序设定通过无线WEB服务器和所有的无线采集器进行通讯，之所以手操器收发数据必须通过无线WEB服务器，是考虑原因之一使用手操器时位置不确定，和众多的无线采集器通讯有困难，另一个原因，手操器下发数据和采集数据可以及时通过无线WEB服务器到达远程监测站的监测网络。

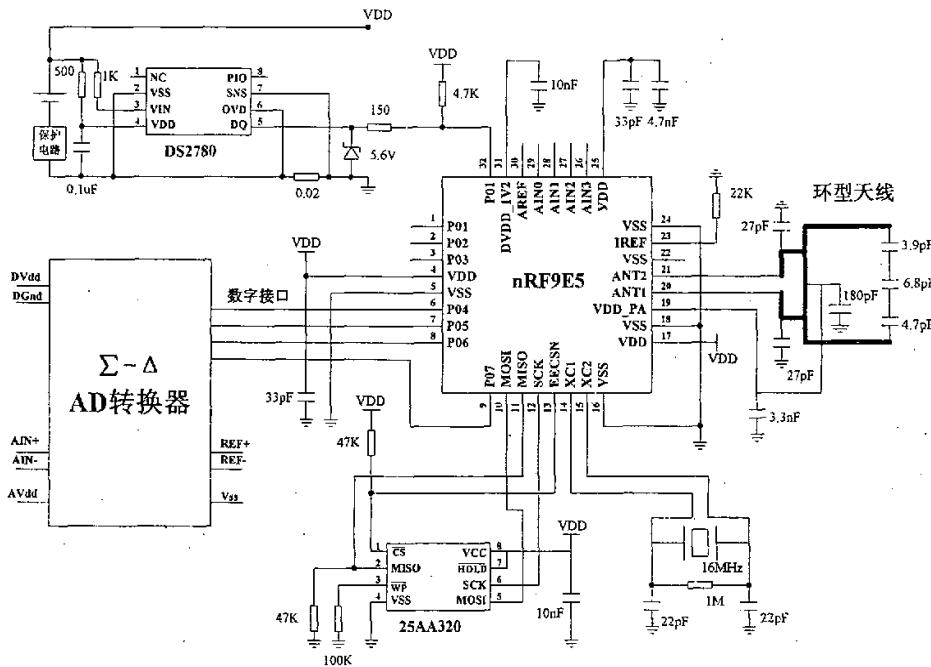


图 5-2 无线采集器电路图

另一部分是无线WEB服务器的硬件设计，其电路结构框图如图4-3所示，首先，我们选用S3C2510作为系统的主控制器，S3C2510是SAMSUNG公司设计的一款基于

ARM940T内核的16/32位RISC微处理器，带有4k数据Cache和4k指令Cache，该处理器可以运行在166MHz的时钟频率上，集成了内存管理单元(MMU)，可以轻松运行嵌入式Linux等流行的嵌入式操作系统。该处理器最大的特色在于提供了丰富的外接接口逻辑，包括以太网控制器，PCMCIA总线控制器，以及通用DMA通道等<sup>[54]</sup>。因此，使用这款微处理器，可以有效的简化硬件设计的复杂性，减小电路板的面积并降低系统功耗。系统的存储器有两部分组成Flash memory和SDRAM，在本设计中选用了AMD公司的Am29LV642D，其容量为128 Megabit(8M×16-Bit)，由于要运行嵌入式Linux操作系统，缓存待收发的数据报需要较大的内存，系统采用两片三星公司生产的K4S561632C，每片容量为256Mbit(4M×16bit×4bank)，实现位扩展，使数据总线宽度为32bit，总容量为64MB，作为系统主存储器。

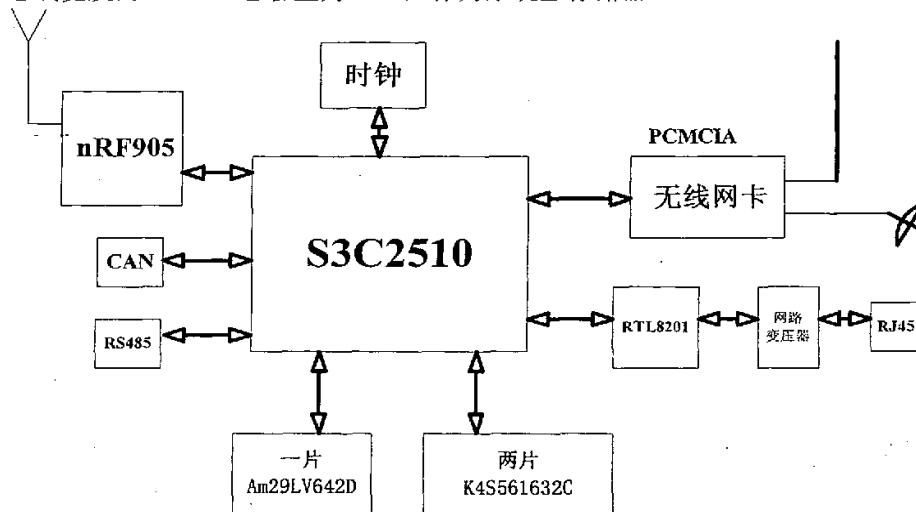


图5-3 无线WEB服务器电路结构框图

WEB服务器对无线信号的收发是较复杂的一部分，这里我们利用S3C2510提供了PCMCIA控制器，只需要将相应的管脚引出，在系统电路板上配置一个PCMCIA插槽，外接一个PCMCIA总线的无线网卡，同时嵌入式操作系统中增加相应的驱动程序，就可以接收和发送无线局域网的数据包。这种结构把对无线信号的调制、解调、基带处理、功率放大等复杂的通信工作都交给了无线网卡来完成，设计时只需选择成熟的无线网卡产品即可，大大减少了硬件设计和调试的工作量，并且使系统更加灵活和可靠。对于以太网接口，S3C2510内嵌了以太网控制器，在全双工模式下支持IEEE802.3 MAC控制层协议，但未提供物理层接口，需外接一片物理层芯片以提供以太网的接入通道。常用的10M/100M以太网物理层接口器件主要有RTL8201、DM9161等。本系统中选用RTL8201作为物理层芯片，信号的发送和接收端通过网络隔离变压器和RJ45接口接入以太网。

用来和无线采集器通讯的部分采用了和nRF9E5同类别的无线射频芯片nRF905，通过收发控制线和S3C2510的IO相连，时钟芯片提供了WEB页面的时间信息，nRF905的SPI接口负责数据的收发。S3C2510提供了两个高速UART接口，可以对外扩展成485

接口和CAN接口，以备用来连接桥梁健康监测时的有线信号。

### 5.1.3 系统软件设计

相对应着无线监测系统的硬件设计，全部软件的设计主要包括无线采集器的软件编程和无线WEB服务器的软件编程。无线数据传输在整个系统中主要分为两个部分，基于工业频段433MHz的无线射频部分和基于2.4G的无线局域网部分，以下从这两方面进行分析。

#### (一) 433MHz频段，来进行无线采集器、无线WEB服务器和手操器直接通讯。

在这个通讯范围内，要根据需要建立合适的通讯协议，手操器每次通过无线WEB服务器转发和无线采集器进行通讯，在其工作信号覆盖范围之外的无线采集器通过其它节点转载信号实现与无线WEB服务器和手操器之间的间接通讯。同时，无线WEB服务器能够根据接收的数据内容判断信号来自哪一个数据采集器。为此，需把系统通讯协议设置为下列格式：Preamble为引导字节；Add为接收机地址；Payload为有效加载数据(包括接收机识别码Jid、目的机识别码Mid、源信号机识别码Yid及Data字：状态字X=1时Data为命令字，X=0时Data为数据)；CRC为校验码。

表 5-1 无线WEB服务器协议格式

|          |     | PAYLOAD |     |     |   |      | CRC |
|----------|-----|---------|-----|-----|---|------|-----|
| PREAMBLE | ADD | Jid     | Mid | Yid | X | Data |     |
|          |     |         |     |     |   |      |     |

nRF9E5 处于发射模式时，Add 和 Payload 由微控制器按顺序送入射频模块 nRF905，Preamble 和 CRC 由 nRF905 自动加载。接收模块时，nRF905 先接收一个数据包，分别验证 Preamble、Add 和 CRC 正确后，再将 Payload 数据送入微控制器处理；当接收机微处理器判断 Payload 中的 Jid 和本机识别码号一致时，继续处理后继数据，否则放弃该数据包。

#### (二) 2.4G 的无线局域网，来进行无线WEB服务器和远处的远程监测站无线通讯。

从功能上来讲，嵌入式WEB服务器监听用户端的服务请求，根据用户请求的类型提供相应的服务。客户端使用Web浏览器和Web服务器进行通信。Web服务器在接收到用户端的请求后，处理用户请求并返回需要的数据。我们采用Linux嵌入式操作系统，通信协议栈选用LWIP(Light Weight TCP/IP Protocol)，并且以HTTP为应用层协议，客户端浏览到的WEB页面如图4-4所示。

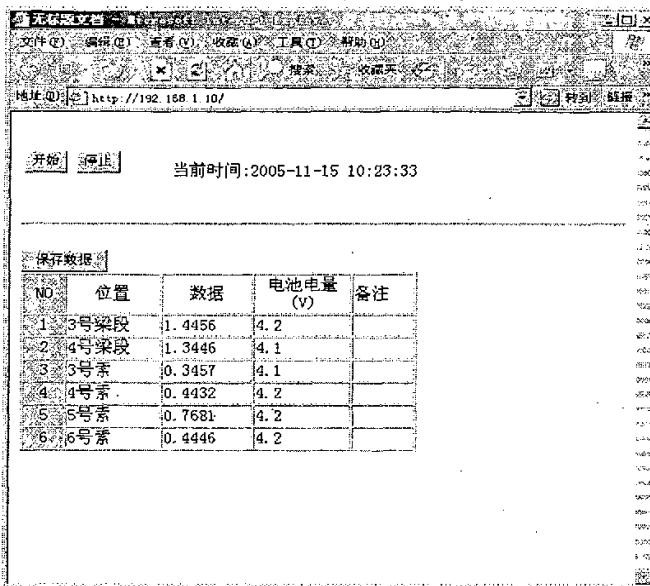


图5-4 客户端浏览到的WEB页面

服务器程序开始运行时, 主进程(守护进程)就创建一个套接口, 并和主机地址绑定到一起, 随后置为被动监听状态, 等待客户端连接请求的到来。一旦接收了一个连接, ACCEPT会返回一个新的套接口描述符, 主进程则开辟一个新的子进程来处理这个新的连接, 这样系统可以同时接受多个客户端来的请求。服务器主进程监听设定的端口, 一旦有浏览器的请求到达, 则建立连接并返回新的套接口描述符交由子进程处理。子进程读取请求并分解出URI请求方法, 再由所请求文件扩展名对应的MIME类型判断, 如是静态文本则直接读取并发送给浏览器; 如是CGI脚本, 则新开一个子进程执行该脚本, 处理脚本运行结果并返回浏览器; 在一定时延后无后续请求则关闭该连接<sup>[55]</sup>。

#### 5.1.4 结束语

本文作者在总结以往桥梁施工控制中数据采集方式的基础上, 分析了诸多实际应用中的可能遇到的问题, 提出了一种传感器采集技术和无线网络通信技术相结合的方法, 其创新点如下:

- (1) 以无线的方式进行数据采集组网, 系统安装维护方便。
- (2) 设计中将AD转换部分单独做成模块, 可以根据不同传感器而进行更换。
- (3) 数据采集站采用WEB服务器方式, 使客户端访问更简单实用。
- (4) WEB服务器具有多种外围数据采集接口, 方便采集器的连接。
- (5) 无线局域网多种访问WEB服务器的方式。

在桥梁施工控制中采用基于无线监测的方法实现了桥梁施工控制的完全数字化和网络化, 使得无线局域网和工业无线测控网融合为一体, 该无线采集器和无线WEB服务器除了在桥梁施工控制中上得到成功的使用外, 在其它大型建筑中配合一

定的协议将会得到更进一步的应用。

## 5.2 结论

大型桥梁健康监测在应用中还是比较新颖的一个研究方向，最终对桥梁的施工控制还是运营后的结构分析和数据自动化采集性能有息息相关，在这方面，还有更多的方面有待和自动化相联系，从而进行的相关设备的开发也在继续的分析和研究。

## 结 论

本文根据大型桥梁健康监测及其数据自动化采集系统的需要,从采集系统的建立、智能调理器的研究设计及其相关内容开展了研究,取得一些创新性的成果。

通过桥梁中常用的传感器输入输入数据的分析,首先设计了数据采集的前端模块,该模块基本覆盖了目前市场上所有传感器的输出类型,简化了智能调理器设计的复杂程度。前端模块对微控制器一般为 SPI 接口,数据传送方便。

智能调理器的重点是通信总线的设计,根据不同的要求,本文重点研究了 RS485 和工业以太网两种总线方式,对两种总线的特点和性能作了详细的分析,分别举例说明了两种智能调理器的设计过程,设计中需要注意的问题,希望对做相关工作的读者有一定的借鉴作用。

大型桥梁健康监测的系统设计和相关产品设计目前国外已经形成比较大的市场,国内对此的产品还没有形成一个系列,本文作者在对大型桥梁监测系统的设计过程中积累了一些相关的经验,也期待着这些性价比较高,符合桥梁监测中使用的产品更加丰富起来。

## 参 考 文 献

- [1] John F. Walker, Peter E. Hughes Bridge Scour Monitoring Methods at Three Sites in Wisconsin Open-File Report 2005 - 1374 U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey
- [2] Brent M. Phares, Terry J. Wipf, Lowell F. Greimann, and Yoon-Si Lee Health Monitoring of Bridge Structures and Components Using Smart Structure Technology Volume 1 Center for Transportation Research and Education Iowa State University January 2005
- [3] Steven B. Chase Smarter bridges, why and how? Technical Director for Bridge Research & Development, Federal Highway Administration, USA Smart Materials Bulletin October 2001 P3-13
- [4] Bergmeister K, Santa U. Global monitoring concepts for bridges[A]. In : Nondestructive Evaluation of Highways. Utilities , and Pipe - lines IV, Proceedings of SPIE[C]. Newport Beach , UAS , 2000. P14~15
- [5] 黄方林, 王学敏, 陈政清等. 大型桥梁健康监测研究进展[J]. 中国铁道科学, 2005 , 26(2) P1~7.
- [6] 杨玉冬, 王浩 ,李爱群 大跨桥梁结构健康监测和状态评估研究进展 江苏建筑 2005年第2期 P18~20
- [7] 邬晓光 徐祖恩 大型桥梁健康监测动态及发展趋势 长安大学学报(自然科学版) 第23卷 第1期 2003年1月
- [8] Wong K Y, Chan W Y K, Man KL. The use of structural health monitoring system in operation & maintenance of cable supported bridges[A]. In : one Day Annual Seminar Structural Symposium 2000 Highway and railway Structures[C]. Hong Kong , 2000. P108~133.
- [9] 李爱群, 缪长青, 李兆霞等. 润扬长江大桥结构健康监测系统研究. 东南大学学报, 2003 , 33(5) P544~548.
- [10] 彭士元, 金属薄膜应变计中桥路电阻的测试调整和计算, 1994 年 5 月 39-40
- [11] Bridge Transducer ADC AD7730/AD7730L Analog Devices, Inc., 1998
- [12] 孙 佐 高精度A/D 转换器AD7730 及其应用 仪表技术2003 年第3 期 P34—36
- [13] LC2MOS Signal Conditioning ADC AD7712 Analog Devices, Inc., 1998
- [14] 纪宗南 高分辨率A/D 转换器AD7712与单片微机的串行接口 电子产品世界 1998 年10 月 P60
- [15] 一种新型单总线数字温度传感器的特性与应用 张广明, 司栋森仪表与传感器 . 2003 . 11 (4) P318—320
- [16] RS-422 and RS-485 Application Note B&B Electronics Mfg. Co. Inc.
- [17] RS485 总线网络特点浅析 广州致远电子有限公司 <http://www.ecardsys.com>
- [18] 求是科技 单片机通信技术与工程实践 人民邮电出版社 2005.1 P231-240
- [19] 徐继红 提高RS-485 网络可靠性的若干措施 Maxim北京办事处

- [20] RS-485 总线在结构健康监测系统中的应用 黎洪生, 董军 第14卷 第10期 2004年10月 微机发展 P59—61
- [21] 杨新华, 张勇胜, 包广清, 骆东松一种无源隔离型RS-485 通讯接口的设计和应用 化工自动化及仪表, 2002, 29 (3) : P50—51
- [22] D. Dube J. Camerini Modbus Application protocol Version1.0—Submitted to the IETF Schneider Automation Inc. May 2002
- [23] 李忠民 王子旭 RS485通信中继器的设计 微计算机信息 2004. 7 P100—101
- [24] 双重防雷、光电隔离型RS-485 中继器 北京捷瑞电讯设备有限责任公司
- [25] UC-7400 Series User's Manual Copyright 2004 Moxa Technologies Co., Ltd.
- [26] 李敏 孟臣 串行接口中文图形点阵液晶显示模块的应用 单片机及嵌入式系统应用 2003. 8 P43—46
- [27] 阳宪惠 工业数据通信与控制网络 清华大学出版社 2003. 6 P390—393
- [28] 工业以太网技术手册 东土电信技术有限公司
- [29] 10 Issues To Consider Before Installing Industrial Ethernet. Copyright 2002 Contemporary Control Systems, Inc. February 2002 CCIEBrochure Feb02 [www.ccontrols.com.cn](http://www.ccontrols.com.cn)
- [30] 柴毅, 王玉堂, 陈禾 基于以太网数据采集与控制模块的设计与应用 计算机测量与控制. 2004. 12(12) P1188—1191
- [31] 东土电信-KIEN 系列工业以太网交换机在热力行业的应用
- [32] DS89C430/DS89C440/DS89C450 Ultra-High-Speed Flash Microcontrollers [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com)
- [33] X5043/X5045 System Supervisors Manage 8051 type Microcontrollers May 2001 [www.xicor.com](http://www.xicor.com)
- [34] 方霆 基于sx52单片机的Web服务器的设计与实现 兰州理工大学硕士论文 2004. 5
- [35] RTL8019 Realtek Full-Duplex Ethernet Controller with Plug and Play Function (RealPNP) REALTEK SEMI-CONDUCTOR CO., LTD. LS003. 6 1995. 04. 25
- [36] 单片机与ISA总线以太网解决方案. doc [www.laogu.com](http://www.laogu.com)
- [37] Addison-Wesley TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols, 1994 page4—5 page38—39
- [38] ThomasH. An Introduction to TCP/IP for Embedded Engineer [A]. In Proceedings of the embedded Systems Conference
- [39] INTRODUCTION TO MODBUS TCP/IP Copyright 2005, Acromag, Inc., Printed in the USA.
- [40] 基于工业以太网的嵌入式控制器的研究—基于Rabbit 2000 实现Modbus/ TCP 协议的相关技术 吴爱国, 何熠, 王冬青 第33卷第4期 2004年8月 信息与控制 P495—499
- [41] 温宝博, 纪文刚, 张慧平. 基于MODBUS/ TCP 的以太网总线适配器的数据交换[J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10(3) P12—15.
- [42] Heather Osterloh 著 张金祥译 TCP/IP Primer Plus 中文版 人民邮电出版社 P60—68

- [43] Jeremy Bentham TCP/IP Lean: Web Servers for Embedded Systems (2nd Edition) CMP Books Lawrence, Kansas 66046 April 2, 2002 P251-253
- [44] Pete Loshin *TCP/IP Clearly Explained, 4th Edition* Morgan Kaufmann December 19, 2002 page208-213
- [45] 郝秉华 刘建辉 基于单片机的嵌入式WEB 服务器的研究 微计算机信息 2005年 16期
- [46] 王传启, 邓文栋, 金敏 工业控制中嵌入式Web 服务器的设计与实现[J] 计算机工程与应用, 2002 (10)
- [47] 丁 丁 黄成军 沈 昊 以太网供电技术研究 自动化仪表 第26 卷第1 期 . P5-8
- [48] IEEE 802. 3af , Data Terminal Equipment (DTE) Power via Media Dependant Interface (MDI) . IEEE Computer Society , June , 2003
- [49] IEEE802.3AF——以太网供电技术 美国泛达公司 智能建筑与城市信息 2004 年 第9期 总第94期 P78-80
- [50] 兼容于 IEEE 802.3af 标准的以太网供电受电设备接口 /PWM 控制器 MAX5941A/MAX5941B www.maxim-ic.com.cn。
- [51] 向忠富 桥梁施工控制技术. 北京: 人民交通出版社 2001.6 P117-118
- [52] 唐亚鸣 丁立波 张河 桥梁健康无线监测系统 土木工程学报 2005.7 71-74 页
- [53] nRF9E5 Single Chip Transceiver with Embedded Microcontroller and ADC Nordic VLSI ASA Revision: 1.2 January 2005 P1-2
- [54] S3C2510A 32-BIT RISC MICROPROCESSOR USER'S MANUAL Revision 1 SAMSUNG P1-2
- [55] 黄天成 刘 洋 一种嵌入式WEB服务器的设计与实现 电子技术应用 2004.11 P21-23

## 致 谢

首先谨向所有支持和关心我的人们致以最诚挚的感谢！

正是我的导师李战明教授，给予了一个能够接触大型工程实践的机会，他以前瞻的眼光，为我领航了这一极具有发展潜力的研究方向，从而让我能进入自动化和相关专业相互结合的应用型设计中，并且取得了一定的研究成果。

由衷地感谢骆东松老师和杨新华老师对我课题研究的帮助，骆东松老师在我研究课题的初期给予了切实的指导建议和鼓励，使我能够有信心完成这一个较为复杂的课题。在系统设计和产品设计中，我多次从杨新华老师那里得到了细节上的指导，使设计的产品更严谨、更实用。

感谢丁磊、瞿华、王贞等同门师兄弟在我做设计中的无私帮助。感谢我的师弟马永刚给予我工作的支援和帮助。

深深感谢南京长江三桥监控组的负责人唐亮博士、何畏博士，他们敏锐的洞察力、渊博的知识、才使我设计出符合桥梁数据采集要求的嵌入式产品，在一年半的朝夕相处中，从生活到学习，从大事到小事，给予了我很多关怀；感谢南京三桥巡检负责人张强博士，他使我了解了更多的有关国外桥梁监测的进展；感谢西南交通大学的冉志红、孟庆成博士，他们使我掌握了监测系统中相关的桥梁知识；感谢南京长江三桥监控组的贾云武软件工程师，他是我做系统设计的好搭档；感谢深圳湾公路大桥监测负责人李娜高级工程师，她使我更加拓展了桥梁健康监测的知识；感谢北京中交公路规划设计院的崔冰高级工程师和董萌工程师，他们的建议给我的设计研究起到良好的指导意义。

感谢铁道部第一设计院的卢明工程师、张金苍工程师和邱军工程师，他们在工程初期的对我的信任，才使我有这一次锻炼实践的机会。

感谢我的父母和小妹，感谢我的家人，是他们一直在背后默默支持着我，使我在设计中遇到困难没有退缩，直到最后解决问题，圆满完成了这一大型工程的设计开发任务。

最后，谨向百忙中抽出时间来参加我的论文答辩的各位专家表示衷心的感谢。

## 附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1] 李战明 陈红波 何畏 唐亮. 基于 Rabbit2000 的桥梁数据自动化监测系统的设计, 微计算机信息, 已接受, 待发表, 2006年第11期
- [2] 李战明 陈红波 何畏 唐亮 孟庆成. 桥梁施工控制中无线监测系统的设计, 仪表技术与传感器, 已接受, 待发表, 文章编号 J5513
- [3] 彭端云 程自峰 陈红波 李战明 韦哲. 基于超声波采集的无线数据传输的输液监控系统研制, 医疗卫生装备, 2005年第26卷第8期 第7—8页
- [4] 程自峰 彭端云 韦哲 王新 马少林 陈红波 方霆. 基于LonWorks的输液远程监控系统的研制, 医疗卫生装备, 2004年第8期 第20—21页
- [5] 陈红波 唐亮 李乔. 南京三桥健康监测智能调理器的研究, 中国交通信息产业, 2006年第3期