

基于无线光纤混合传感网络的井下安全监控系统研究

摘要

我国是一个以煤为主的能源生产和消费大国，煤炭的开发和应用与我国社会发展和人民生活密不可分，但是近年来我国煤矿事故频繁发生，使得煤炭的安全生产一直倍受人们的关注。现有的煤矿安全监控系统大多是以工业总线为基础构成的有线通信传输网络，随着煤矿开采掘进而带来的管道延伸问题，单纯采用有线网络已经无法满足安全生产的需要，无线光纤混合传感网络的发展为我们提供了解决问题的方案。

ZigBee 技术，作为一种新出现的无线个人区域网络，以其协议简单、成本低、功耗低、组网容易等特点，非常适用于要求低成本、低功耗的无线传感网络。本文以 ZigBee 技术为基础，针对实际煤矿安全环境的需求，对无线传感网络在井下安全监控系统中的应用进行了研究，同时根据国内外井下安全监控系统的现状，结合我国中小煤矿的企业安全生产要求，提出了一种基于 ZigBee 技术的无线与光纤网络相结合，集多参数井下安全监控和人员定位于一体的矿井安全监控系统的设计方案。

整个监控网络由井下各分巷道中的无线网络及连接无线网络和地面监控机的光纤网络组成。其中无线网络由以 XBee_PRO 无线通信芯片和单片机为核心的无线信标节点和人员佩戴的便携节点构成，所有节点都会将由传感器得到的井下环境参数通过网络上传给地面监控机，同时根据节点间信号传输的 RSSI 值对人员进行定位。地面监控机实时显示这些环境参数和人员位置信息，如有数据超限则触发报警通知工作人员进行处理。

最后，在封闭的楼道中对该系统进行了测试，取得了满意的效果，证明了该系统的可行性。

关键词： 无线网络，ZigBee，安全监控，Xbee_Pro，RSSI，混合网络

**The research on underground monitoring system for safety based
on wireless and optical fiber sensing hybrid networks**

Abstract

The coal is a major energy which used in producing and consuming in our country. The development and application of coal is inseparable from social development and people's lives. However, the coal mine accidents are frequently happened in recent years which make the safety of coal production be much attention. The existing mine safety monitoring systems are mostly based on industry bus wired communication transmission networks, so the pipeline extension would be a difficulty with coal mining and excavation. The cable networks can not meet the needs of production safety, so a wireless and optical fiber sensing hybrid network may be an alternate choice to this difficulty.

ZigBee technology, as a recently emerging WPAN communications technology, has some characteristics such as simple agreement, low cost, low power consumption, easy to network, which makes it suitable for applying in low-cost, low-power wireless sensor networks. In this dissertation, based on the ZigBee technology and aimed at the needs of the real coal safety environment, the application of wireless sensor network in the mine monitoring systems is studied.

According to the actuality of mine monitoring systems and the safety production needs of domestic small and medium-sized mine enterprises, the design proposal combining the parameter monitoring system with the personal locator and based on the ZigBee technology and wireless fiber network is put forward.

The entire monitor network is composed of underground wireless network and optical fiber network which connected the wireless network and the monitoring computer. The wireless mesh network is composed of the fixed-nodes which based on wireless communication chips and single chip microcomputer and the portable nodes.

All nodes upload the environmental parameters being sampled by the sensor to the monitor computers through the network. At the same time, the system locates the position of miner's

by RSSI value between the nodes. The monitor computer shows the environmental parameters and the personnel location in real time. If some parameters exceed limits, the system will give warning information to the staff to deal with the problems.

Finally, the system has been tested in a seal corridor and the results have been testified the feasibility of the system.

Key words: wireless network, ZigBee, monitoring system, Xbee_Pro, RSSI, hybrid network

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 孙立新 日期： 2009.5.27

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解中北大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：
①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名： 孙立新 日期： 2009.5.27

导师签名： 师进龙 日期： 2009.6.2

1 引言

1.1 课题的目的与意义

我国是世界煤炭生产大国，产量占世界的百分之三十一，同时煤炭作为我国的基本能源和重要材料，在国民经济经济中占有极其重要的战略地位。在我国的能源结构中，煤炭占我国一次性能源生产和消费结构中的 70%左右，并且在相当长的时期内煤炭仍将是我国的主要能源，以煤炭为主的能源结构在短期内将难以改变。

然而，我国煤矿与世界各主要产煤国家比较，不仅地质构造比较复杂，以井工开采为主，而且自然灾害也较为严重。煤矿下自然环境复杂，存在多种安全隐患。特别是中小型乡镇煤矿和私人煤矿，由于安全生产设备落后、安全生产意识不够、没有建立一套完整的安全生产管理体系，安全生产状况令人担忧。近年来，我国煤矿事故频繁发生，轻则造成经济损失，重则人员伤亡，安全问题已经成为煤矿生产的瓶颈。统计数据显示，我国煤矿的百万吨死亡率是美国的 100 倍，是同为发展中国家的印度的 10 倍，安全生产事故造成的经济损失达到 2500 多亿元^[1,2,3]，这种情况不仅直接影响了国家经济建设和社会发展，同时也对煤矿工作者造成了巨大的心理负担。近年来，随着煤炭产量的逐年增加，煤矿安全生产事故又有进一步提升的趋势。为此，我国领导部门和普通民众对煤矿安全生产越来越重视，煤矿安全监控设备的研究已经成为近年来国家大力扶持及发展的项目之一^[4,5]。

要解决煤矿安全生产问题，不仅要建立合理的管理制度、完善的规章制度，更要有先进的安全监控设备及技术平台。需要 24 小时对井下环境参数及工作人员状况进行监控，方便管理者对井下设备及人员进行调整，一旦发生事故，可以引导矿工及时撤离现场，并为井上搜救人员提供井下信息辅助搜救。但现有的监控系统大都基于有线网络且设备昂贵，不利于网络规模的扩大，随着煤炭开采的推进，很难及时将监控网络铺设到开采面，不能及时监测这些危险区域的情况，这就成为有线监控系统存在的最大不足^[6,7]。因此，开发一种基于无线光纤混合网络、造价低廉、维护简单的煤矿井下安全监控系统有着重要的现实意义。

本课题来源于 2006 年国际科技合作项目：矿井瓦斯浓度、温度监测与安全预警传感网络研究。目的是设计一种基于无线网络且适用于我国中小煤矿的井下安全监控系统，该系统能够实时监测井下瓦斯浓度、温度等环境参数，同时提供井下工作人员的位置信息，为矿井安全生产提供可靠的数据保障。

1.2 井下安全监控系统概述

1.2.1 井下安全监控系统介绍

井下安全监控系统是指由井下监控基站及分布在井下各处的节点和计算机组成的全天 24 小时对井下瓦斯、温度、风速、一氧化碳、湿度等环境参数进行监控，并运用计算机对采集的参数进行综合分析，一旦参数异常则及时通知操作人员进行处理的实时监控系统。井下安全监控系统是煤矿工业化发展的必然产物，是维护矿井安全生产与保护矿工生命安全的重要基础设施之一。

1.2.2 井下安全监控系统研究现状分析

由于我国工业化起步相对落后，因此我国的安全监控技术应用较晚。直到 80 年代初期我国才从美国、波兰、英国等发达国家引进了一批安全监控系统，其中包括 TF200、MINOS 等当时较成熟的产品。随着这些系统的在我国煤矿的应用，通过消化吸收，国内一些公司逐渐研发出 KJ2、KJ4、KJ8 等 KJ 系列监控系统，并在我国的大中型煤矿得到了大量的应用。随后国内一些科研机构又在这些系统基础上进行完善，研发出 KJ92、KJ95、KJ101、KJG2000 等系列产品^[8]。这些产品的特点是在原有基础上测控分站的智能化水平有了进一步的提高，整个系统具有有线网络连接功能，由于大都采用了 Windows 操作系统使得操控难度进一步下降。目前，我国煤矿使用的监控系统多达十几种，很好地改善了我国煤矿的安全状况^[9]。

分析目前正在使用的监控系统，在数据传输方面绝大多数煤矿采用有线电缆方式来通讯，但这些传统的布线方式存在着明显的缺陷：

1) 布线繁琐，安装维护成本大

监控系统所需的大量光缆、电缆价格不菲，此外在复杂的地下环境布设线路同样需

要消耗大量的人力物力。

2) 覆盖范围有限

由于地形环境复杂多变，矿井中存在着大量难以布线的区域，有线监控系统很难遍布矿井的各个地区，无法实现对整个矿井的全方位监测，为安全生产留下了隐患。

3) 线路依赖性强

有线网络的自我修复性能较差，局部线路遭到破坏很可能造成整个监控系统的瘫痪。特别是发生爆炸事件时，线缆往往受到致命的破坏，不能为搜救工作及事态检测提供信息。

考虑到这样的问题，我国一些新型的煤矿安全监控系统采用了较为基础的无线通讯方式，这些系统主要分为两种方式：

1) 感应通信：感应通信是用电磁感应原理实现通信，在巷道中敷设一条接地的感应传输线，收发信机采用电磁耦合天线，通话时将天线靠在感应传输线上。它与载波通信一样，感应通信杂音大，对环境中的电气噪音不易克服，通话时耦合天线要十分接近感应线。

2) 漏泄通信：漏泄通信技术是依靠在巷道中架设一条特制的同轴电缆，每隔一段距离在电缆上开个槽孔，使其周围形成一个连续的电磁波漏泄场。通过漏泄场，移动收发信号与漏泄电缆之间实现双向可逆的耦合，从而实现移动台之间或移动台与基站之间的远距离通信。虽然漏泄通信技术较好地解决了井下移动通信的问题，但其缺点是系统造价昂贵，在条件恶劣的采掘工作面、掘进头等场所，无法架设漏泄电缆，漏泄电缆的耦合技术复杂，并制约着移动台的纵向移动距离。

为解决漏泄通信、感应通信存在的缺点，人们开始研究超低频无线通信。例如，澳大利亚国家矿山技术开发公司研制的井下无线通讯急救系统 PDE，采用超低频信号穿透岩层传输无线信号，可由地面调度中心寻呼矿井下数百米深处的工作人员。透地通信的突出优点是抗事故灾害的能力强，因其信道是大地，不会因砸碰、顶板塌落、爆炸、火灾等情况而损坏，在井下发生紧急情况时，能够迅速有效地与井下人员进行通讯。PDE 系统信号通过发射机将输出功率放大，以 250V 和 5A 的驱动信号到达大的环形天线上，形成围绕环形天线的电磁场，电磁场信号穿透岩层传到井下的接收机。但是，庞大的环形天线和收/发装置，以及强大的电磁场是 PDE 明显的缺点，大同煤炭集团公司云岗矿

布置的天线长度达到 950mm，由于收/发装置的庞大昂贵，也不可能人手一台接收机。目前仅作为矿井现有通讯系统的重要补充环节，以增强矿井的抗灾能力。

1.2.3 基于 ZigBee 的无线监控网络的提出

针对上述监控系统组网都存在着这样那样的问题，人们迫切需要寻找一种集协议简单、成本低、功耗低、组网容易为一体的新技术来替代现有的技术。针对这些需求，由英国 Invensys 公司、日本三菱电气公司、美国摩托罗拉公司以及荷兰飞利浦四家公司在 2002 年共同宣布组成 ZigBee 技术联盟。该项技术及时填补了这方面的空白，一时间 ZigBee 技术在家用系统控制、楼宇自动化、工业监控领域占据了大量的市场空间。因此，采用 zigBee 技术来提高煤矿安全无线网络的实时性和可靠性就成为我们解决井下安全问题的一个新的思路^[10]。

1.3 无线传感器网络通信协议 ZigBee

1.3.1 现有无线网络技术概述

无线网络技术涵盖的范围很广，既包括允许用户建立远距离无线连接的全球语音和数据网络，也包括为近距离无线连接进行优化的红外线技术及射频技术。通常用于无线网络的设备包括便携式计算机、台式计算机、手持计算机、个人数字助理 (PDA)、移动电话、笔式计算机和寻呼机。无线技术已成功应用于多种场合。与有线网络一样，无线网络可根据数据传输的距离分为几种不同类型^[11,12,13]。

1) 无线广域网 (WWAN)

WWAN 技术可使用户通过远程公用网络或专用网络建立无线网络连接。通过使用由无线服务提供商负责维护的若干天线基站或卫星系统，这些连接可以覆盖广大的地理区域，例如若干城市或者国家（地区）。目前的 WWAN 技术被称为第二代 (2G) 系统。2G 系统主要包括移动通信全球系统 (GSM)、蜂窝式数字分组数据 (CDPD) 和码分多址 (CDMA)。现在正努力从 2G 网络向第三代 (3G) 技术过渡。一些 2G 网络限制了漫游功能并且相互不兼容；而第三代 (3G) 技术将执行全球标准，并提供全球漫游功能。ITU 正积极促进 3G 全球标准的指定。

2) 无线城域网 (WMAN)

WMAN 技术使用户可以在城区的多个场所之间创建无线连接（例如，在一个城市或大学校园的多个办公楼之间），而不必花费高昂的费用铺设光缆、铜质电缆和租用线路。此外，当有线网络的主要租赁线路不能使用时，WMAN 还可以作备用网络使用。WMAN 使用无线电波或红外光波传送数据。为用户提供高速 Internet 接入的宽带无线接入网络的需求量正日益增长。尽管目前正在使用各种不同技术，例如多路多点分布服务 (MMDS) 和本地多点分布服务 (LMDS)，但负责制定宽带无线访问标准的 IEEE 802.16 工作组仍在开发规范以便实现这些技术的标准化。

3) 无线局域网 (WLAN)

WLAN 技术可以使用户在本地创建无线连接（例如，在公司或校园的大楼里，或在某个公共场所，如机场）。WLAN 可用于临时办公室或其他无法大范围布线的场所，或者用于增强现有的 LAN，使用户可以在不同时间、在办公楼的不同地方工作。WLAN 以两种不同方式运行。在基础结构 WLAN 中，无线站（具有无线电网卡或外置调制解调器的设备）连接到无线接入点，后者在无线站与现有网络中枢之间起桥梁作用。在点对点（临时）WLAN 中，有限区域（例如会议室）内的几个用户可以在不需要访问网络资源时建立临时网络，而无需使用接入点。1997 年，IEEE 批准了用于 WLAN 的 802.11 标准，其中指定的数据传输速度为 1 至 2 兆位/秒 (Mbps)。802.11b 正在发展成为新的主要标准，在该标准下，数据通过 2.4 千兆赫兹 (GHz) 的频段以 11 Mbps 的最大速度进行传输。另一个更新的标准是 802.11a，它指定数据通过 5 GHz 频段以 54 Mbps 的最大速度进行传输。

4) 无线个人网 (WPAN)

WPAN 技术使用户能够为个人操作空间 (POS) 设备（如 PDA、移动电话和笔记本电脑等）创建临时无线通讯。POS 指的是以个人为中心，最大距离为 10 米的一个空间范围。目前，两个主要的 WPAN 技术是“Bluetooth”和红外线。“Bluetooth”是一种电缆替代技术，可以在 30 英尺以内使用无线电波传送数据。Bluetooth 数据可以穿过墙壁、口袋和公文包进行传输。“Bluetooth 专门利益组 (SIG)”推动着“Bluetooth”技术的发展，于 1999 年发布了 Bluetooth 版本 1.0 规范。作为替代方案，在近距离（一米以内）连接设备，用户还可以创建红外链接。

为了规范 WPAN 技术的发展，IEEE 已为 WPAN 成立了 802.15 工作组。该工作组正在发展基于 Bluetooth 版本 1.0 规范的 WPAN 标准。该标准草案的主要目标是低复杂性、低能耗、交互性强并且能与 802.11 网络共存。

5) ZigBee 技术

ZigBee 是一种新兴的近距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本的无线网络技术，它是一种介于无线标记技术(RFID)和蓝牙之间的技术。主要用于近距离无线连接。它依据 802.15.4 标准，在数千个微型的传感器之间相互协调实现通信。这些传感器只需要很少的能量，以接力的方式通过无线电波将数据从一个传感器传到另一个传感器，所以它们的通信效率非常高。ZigBee 联盟预测的主要应用领域包括工业控制、消费性电子设备、汽车自动化、农业自动化和医用设备控制等析^[14]。

ZigBee 是一组基于 IEEE 批准通过的 802.15.4 无线标准研制开发的，有关组网、安全和应用软件方面的技术标准。IEEE 仅处理低级 MAC 层和物理层协议，ZigBee 联盟对其网络层协议和 API 进行了标准化。完全协议用于一次可直接连接到一个设备的基本节点的 4K 字节或者作为 Hub 或路由器的协调器的 32K 字节。每个协调器可连接多达 255 个节点，而几个协调器则可形成一个网络，对路由传输的数目则没有限制。ZigBee 联盟还开发了安全层，以保证这种便携设备不会意外泄漏其标识，而且这种利用网络的远距离传输不会被其它节点获得。

ZigBee 使用 2.4GHz 波段，采用跳频技术。与蓝牙相比，ZigBee 更简单、速率更快、功率及费用也更低。它的基本速率是 250kb/s，当降低到 28kb/s 时，传输范围可扩大到 134m，并获得更高的可靠性。另外，它可与 254 个节点联网。完整的 Zigbee 协议套件由高层应用规范、应用会聚层、网络层、数据链路层和物理层组成。网络层以上协议由 ZigBee 联盟制定，IEEE802.15.4 负责物理层和链路层标准。

1.3.2 ZigBee 技术详述

1) ZigBee 频带和数据传输率

表 1.1 ZigBee 频带和数据传输率

频率	频带	使用范围	数据传输率	信道数
2.4GHz	ISM	全世界	250kbps	16
868MHz		欧洲	20kbps	1
915MHz	ISM	北美	40kbps	10

ZigBee 无线可使用的频段有 3 个，分别是 2.4GHz 的 ISM 频段、欧洲的 868MHz 频段、以及美国的 915MHz 频段，而不同频段可使用的信道分别是 16 个、1 个和 10 个。ZigBee 在中国采用 2.4G 的 ISM 频段，是免申请和免使用费的频率，在 2.4G 的频段上具有 16 个信道，带宽为 250K。

2) ZigBee 无线网络标准

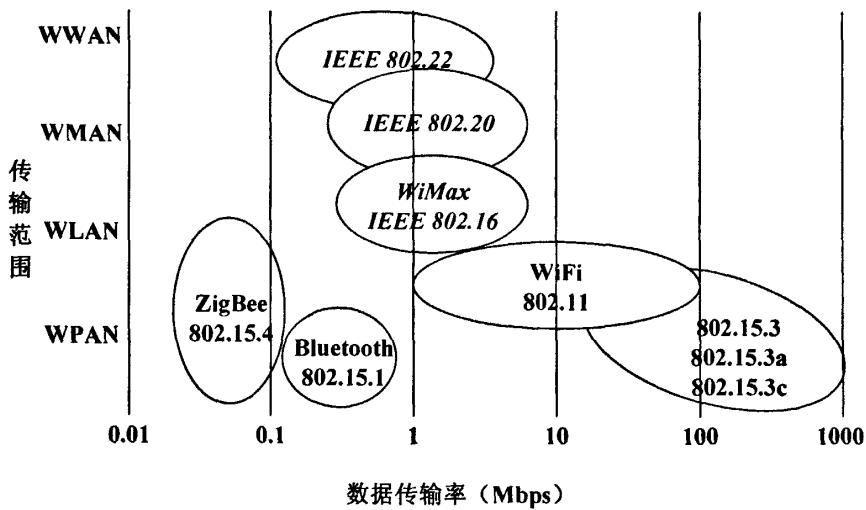


图 1.1 ZigBee 无线网络标准

ZigBee 和 802.15.4 标准都适合于低速率数据传输，最大速率为 250K，与其他无线技术比较，适合传输距离相对较近。ZigBee 无线技术适合组建 WPAN 网络，就是无线个人设备的联网，对于数据采集和控制信号的传输是非常合适的。因此 ZigBee 技术的应用定位是低速率、复杂网络、低功耗和低成本应用。

3) 无线网络比较

表 1.2 无线网络性能比较

市场名标准	GPRS/GSM 1xRTT/CDMA	Wi-Fi™ 802.11b	Bluetooth™ 802.15.1	ZigBee™ 802.15.4
应用重点	广阔范围 声音&数据	Web、Email、图 像	电缆代替品	检测&控制
系统资源	16MB+	1MB+	250KB+	4KB-32KB
电池寿命 (天)	1 至 7	0.5 至 5	1 至 7	100 至 1000+
带宽 (KB/s)	64-128+	11000+	720	20-250
传输距离 (米)	1000+	1-100	1-10+	1-100+
网络大小	1	32	7	255/65000
成功尺度	覆盖面广，质量	速度、灵活性	价格便宜、方便	可靠、低功耗、 价格便宜

由表 1.2 可知 ZigBee 无线网络的传输带宽在 20-250KB/s 范围，因此非常适合传感器数据采集和控制数据的传输。ZigBee 技术还可以组建大规模网络，网络节点容量达到 65535 个，具有非常强大的组网优势。同时由于 ZigBee 技术特有的低功耗设计，可以保证电池工作很长时间^[15,16,17]。

4) ZigBee 无线信道

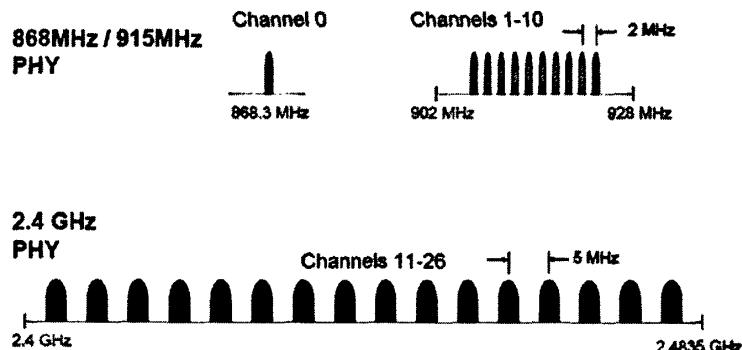


图 1.2 ZigBee 无线信道

ZigBee 在 2.4G 的频段上具有 16 个信道，从 2.405GHz—2.480GHz 间分布，信道间隔是 5M，ZigBee 还采用 CSMA-CA 的碰撞避免机制，同时为需要固定带宽的通信业务预留了专用的时隙，避免了发送数据时的竞争和冲突，因此具有很强的信道抗串扰能力。

5) ZigBee 协议栈

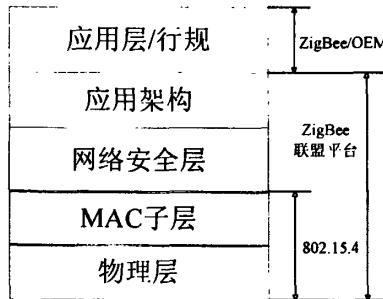


图 1.3 ZigBee 协议栈

ZigBee 不仅采取了 IEEE 802.15.4 强有力的无线物理层所规定的全部优点，还增加了逻辑网络、网络安全和应用软件，更加适合于产品技术的一致化，利于产品的互联互通，同时 ZigBee 继续与 IEEE 紧密结合，以保证向市场提供一种完整的集成解决方案。

6) ZigBee 网络结构

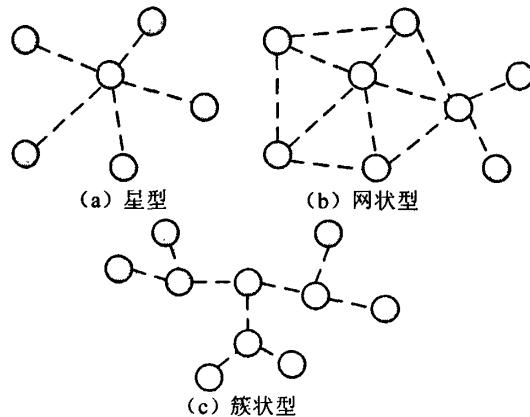


图 1.4 ZigBee 网络结构

ZigBee 技术具有强大的组网能力，可以形成星型、树型和 MESH 网状网，可以根据实际项目需要来选择合适的网络结构。MESH 网状网络拓扑结构的网络具有强大的功能，网络可以通过“多级跳”的方式来通信。该拓扑结构还可以组成极为复杂的网络，网络还具备自组织、自愈功能。星型和簇树型网络则适合一点对多点、距离相对较近的应用。

综合以上分析，ZigBee 技术的优势体现在数据传输速率低：10KB/秒-250KB/秒，专注于低传输应用；功耗低：在低功耗待机模式下，两节普通 5 号电池可使用 6-24 个月；成本低：ZigBee 数据传输速率低，协议简单，所以大大降低了成本；网络容量大：网络

可容纳 65000 个设备；时延短：典型搜索设备时延为 30ms，休眠激活时延为 15ms，活动设备信道接入时延为 15ms；网络的自组织、自愈能力强，通信可靠；数据安全：ZigBee 提供了数据完整性检查和加权功能，采用 AES-128 加密算法，各个应用可灵活确定其安全属性；工作频段灵活：使用频段为 2.4GHz 为免执照的频段。可见 ZigBee 技术非常适合在矿井下使用^[18,19,20]。

1.4 主要研究工作及论文组织结构

通过了解现有的煤矿井下安全监控和矿井人员定位系统，弥补现有监控系统的不足。结合 802.15.4 标准，提出了一种基于 ZigBee 技术的井下多参数安全监控系统，旨在实时对井下环境参数及井下工作人员位置进行检测，并通过计算机对监控数据进行分析和存储，为安全管理人员的决策提供准确可靠的数据支持。其中主要内容有：

- 1) 根据矿井实际需求，提出适用于井下的安全监控系统的总体设计思路和各功能模块的详细描述及实现方案。
- 2) 根据功能不同将硬件节点划分为矿工随身携带的便携节点和固定在巷道中的固定节点两种。
- 3) 提出适用于井下监控系统的数据包格式和存储方式。
- 4) 提出适用于井下的人员定位算法。
- 5) 对各个功能模块进行模拟环境测试，分析其性能。

论文的组织如下：

第 1 章：为本文的引言部分，介绍了研究背景知识和主要工作。

第 2 章：介绍了系统总体设计方案。

第 3 章：介绍了组成无线监控网络的固定节点及便携节点的设计与实现。

第 4 章：在充分研究了现有的无线定位方案的基础上，结合井下的实际情况提出了一种基于 RSSI 的两点定位多点去平均的定位算法，并对算法进行了实验。

第 5 章：介绍了上位机监控软件的平台选择及各模块功能实现。

第 6 章：介绍了在模拟环境中对系统进行测试。

第 7 章：对全文进行了总结，提出了一些系统有待解决的问题，并展望系统未来的应用前景。

2 井下安全监控系统总体方案设计

2.1 系统的总体结构

本系统按照安置位置不同分为地面监控子系统和井下监控子系统两个部分。地面监控子系统由服务器和监控终端组成，服务器主要负责接收监控节点的监控数据并将其存入 SQL Server 数据库中，以备历史数据查询之用。监控终端机通过访问数据库，实时显示当前各个位置上的环境参数值和井下人员的位置信息，一旦参数异常应及时发出报警信息以提醒管理人员对现场进行处理。

井下监控子系统由无线固定节点、人员佩戴的无线便携节点、交换机和单模光纤网络组成。交换机将分布在采集区的无线网络和主巷道中的光纤网络连接起来，固定节点将便携节点采集的环境参数及位置信息连同自身采集的环境参数信息打包经由无线网络和光纤网络上传至地面监控机。整个系统的总体结构如图 2.1 所示。

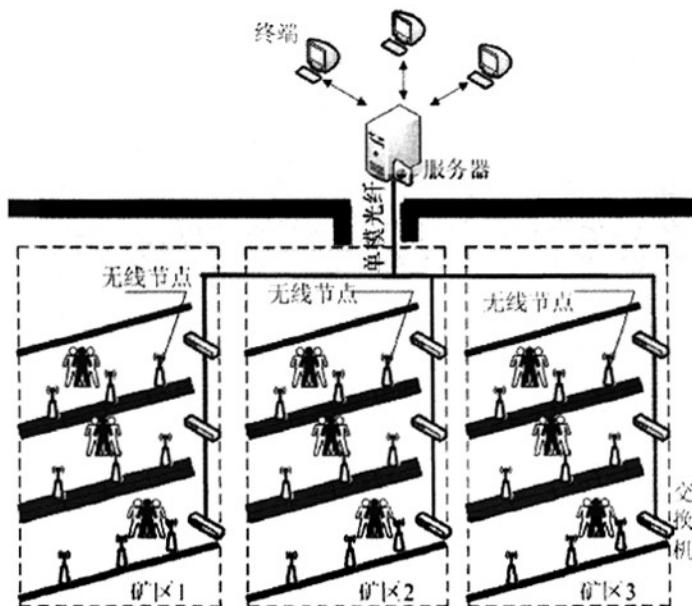


图 2.1 系统总体结构

2.2 系统功能及特点

本系统集井下环境参数检测与人员定位为一体，实现无人自动快速组网，能够及时

准确地将井下各方位的环境参数与人员位置信息上传给地面监控机。当参数值异常或井下发生事故时能及时通知地面管理人员对现场进行有针对性的处理。即使事故致使井下部分网络完全瘫痪，管理人员依然能够在第一时间通过数据库中的数据了解矿难前一刻井下的状况，为营救及事故处理提供可靠的保证。

该系统的两个子系统通过交换机相连，最大程度地减少系统成本及提高通讯可靠性，使之成为一种光纤网络与无线网络相结合的大范围、高可靠性、快速的局域监控网络。

地面监控子系统功能如下：

- 1) 实现远程实时监控井下各方位环境参数及人员位置信息，如瓦斯浓度、温度、各节点位置信息等。
- 2) 采用人性化监控界面，实时显示矿区各位置的环境参数及人员位置信息。
- 3) 提供数据的存储、打印及历史数据对比等功能。
- 4) 发生事故或参数异常时，监控机将提供具体发生事故位置的信息，并发出报警信息，提醒管理人员对现场进行处理。

井下监控子系统功能如下：

- 1) 实时采集当前位置环境参数信息，人员便携节点还将当前位置信息通过固定节点上传至地面监控机
- 2) 实现由固定节点及便携节点的自动组网。在某一节点意外损坏的情况下，自动恢复网络通讯。
- 3) 当采集到的参数异常时所有节点发出报警信息。
- 4) 遥控器设定固定节点的位置信息，方便节点的布置。
- 5) 每个固定节点都可作为中继节点上传下级节点的监控数据。

2.3 系统技术指标

固定节点的分布按照矿井环境及人员定位精度而定，其主要分布在采掘面及盲井等光纤不宜到达的分巷道中，实时将附近的环境参数通过无线网络上传至地面监控机。人员携带的便携节点安置在矿工的矿帽上，因此矿工不必再携带多余的设备。矿工在井下进入无线网络时，便携节点会根据无线信号能量自动寻找离自身最近的固定节点挂靠，

通过定位算法将其与离该固定节点的距离通过无线网络上传至地面监控机。地面监控机将上传的数据进行分析存储，实时显示在监控机界面上。系统的技术指标如下^[21,22]：

- 1) 固定节点容量：固定节点的分布可根据矿井实际情况布置，在单个巷道中节点数量可达到 65535 个。
- 2) 信号传输速率：250Kbps。
- 3) 采集密度：固定节点及便携节点每两秒向上级传送一次数据，根据煤矿的实际要求还可有所提高。
- 4) 环境参数误差：瓦斯浓度误差不超过 0.5%，温度误差不超过 0.1℃。
- 5) 节点功耗：便携节点采用电池供电，在不更换电池的情况下可工作 3-5 个月。
- 6) 定位精度：人员定位精度根据固定节点的布置密度而不同，在固定节点间距为 50 米的情况下，定位精度小于两米。
- 7) 地面监控机操作平台：操作系统 WINDOWS XP；网络平台为 1000M 光纤以太网；数据库采用 SQL Server 2000。

2.4 系统硬件组成

系统由构成无线监控网络的井下固定节点和矿工携带的便携节点以及交换机、服务器和监控终端机构成^[23]。

2.4.1 固定节点

固定节点放置在采掘面和盲巷中，每个固定节点在放置的时候由工作人员使用遥控器设置其与上一级节点的距离和节点编号，这样每个固定节点在巷道中的位置就成为不变的，为之后人员定位提供坐标参考。由于固定节点固定放置可以为其提供大容量电池，不必过多考虑固定节点的节能问题，因此在固定节点上可以接一些功耗大但精度较高的传感器，同时可以接显示模块让工作人员可以随时观察当前该位置的环境参数信息。一旦环境参数异常，固定节点会发出报警信息，提醒工作人员及时撤离。

每个固定节点都可以成为末节点或者中间节点，且布置的时有一定的冗余，这样一旦某个固定节点发生故障，其附近的节点利用多跳技术可以重新组网，不会因为某个节

点的故障致使整个无线网络瘫痪。固定节点不但将自身采集的环境参数上传，同时还将其附近挂接在自身上的便携节点采集的环境参数和人员位置信息上传给上一级节点，这样一级一级上传最终由头节点通过串口以太网转换器接入光纤网络，并最终上传到监控终端。

2.4.2 便携节点

人员便携节点安装在矿帽上，由于体积功耗限制宜采用电池供电，因此矿帽要尽量减小功耗，便携节点上只能安装功耗小的传感器，例如现在瓦斯检测中经常用到的热催化传感器。另外便携节点还会根据其与固定节点间的信号能量值并利用合适的算法计算出它与该固定节点间的距离，根据这一信息及固定节点在矿井中的位置我们就可得出该便携节点在矿井中的准确位置。便携节点上也安装了声音报警装置，一旦该区域环境参数异常就会发出报警提醒工作人员及时处理。

便携节点的设计和固定节点非常相似，只是去掉了固定节点中的显示模块和功耗较大的传感器。当便携节点进入到固定节点组成的无线网络中时，便携节点首先会根据同附近固定节点的信号能量判断它与哪个固定节点距离最近，于是与这个固定节点建立连接从而连入整个无线网络。在网络中每个便携节点都有其自身唯一的标识号，这样可以为考勤记录、安全监测管理等提供数据依托。

2.4.3 交换机

作为无线网络与光纤网络的连接装置，交换机起到了至关重要的网络连接、转接作用。因此交换机必须具备光纤和以太网双接口，巷道边缘最靠近交换机的固定节点通过串口转以太网设备将无线网络接入交换机，光纤接口则可连接铺设在主巷道中的光纤，于是实现了无线网络与光纤网络的连接。同时每个交换机都可以作为中继使光纤网络得到最大的扩充，使监控网络遍布整个矿区。

2.5 监控软件部分

监控终端软件作为直接与操作人员交互的平台，稳定性与易操作性成为对监控软件

最基本的要求。按功能监控软件可分为环境监测系统和人员定位系统两个部分。监控终端通过接收无线传感网络的数据，利用图形化界面将矿区各个位置的环境参数信息和人员定位信息以示意图的方式显示在屏幕上，监测人员可通过显示屏方便地看到这些数据信息。当环境参数异常或者人员丢失时，监控软件会在事故地点以醒目的标志和声音报警来提醒工作人员。每条数据软件都会将其存储到数据库中，方便对历史数据的查询和对比。如果需要，还可将数据库通过 INTERNET 安全机制共享到 INTERNET 网中，方便煤矿高层人员对矿区状况的监控和管理。监控系统结构如图 2.2 所示：

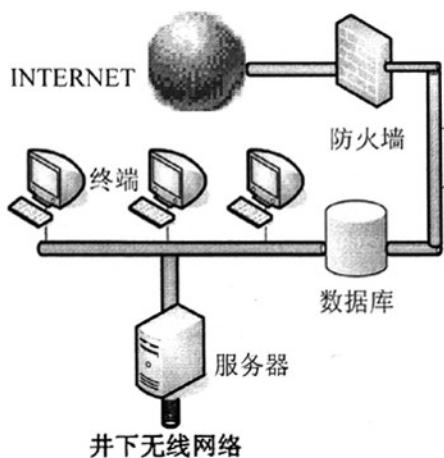


图 2.2 监控系统结构

本章小结

在对现有井下无线监控系统的分析和煤矿实地调研的基础上，为了改善现有系统由于有线网络的扩展性及造价等问题，提出了一种基于 ZigBee 技术的井下无线监控系统，并对该系统的总体结构、技术指标和各组成部分分别进行了介绍。

3 无线传感器节点设计

作为无线网络的基本构成元素，环境参数及人员定位系统信息的采集者，无线传感器节点在整个无线监控系统中占据着重要地位。无线传感网络由两种节点构成，分别是固定在巷道中的固定节点和佩戴在矿帽上的便携节点，他们在整个系统中有着不同的作用。一个良好的井下监控系统必须以性能优良的无线传感器节点为基础。本章在仔细分析系统需求的基础上，详细介绍这两种节点的软硬件设计及实现。

3.1 器件的选择

3.1.1 无线芯片的选择

性能优秀的无线传感网络必须以良好的无线芯片为依托，所以无线芯片的选择成为关键。井下恶劣的地质和生产环境对通信频率有较大的影响，其中主要的因素有^[24]：

1) 信号的衰减：矿井巷道复杂的地质环境对信号造成很大的衰减，在低频段时衰减随频率的增加而增大，中频段、高频段时衰减达到最大值，甚高频段和特高频段时衰减又会随着频率的增加而减小。因此在巷道中只能选择低频段或者甚高频段，但是如果选择低频段则需要大功率的发射机和较长的天线，显然这两个条件并不适合在狭窄的巷道中使用，所以在巷道中必须选择甚高频段和特高频段^[25]。

2) 巷道壁及拐角对信号的影响：信号在巷道中传播时，巷道粗糙的外壁和曲率都会使信号衰减，根据相关文献的理论分析和实验可知，在高频时这两种因素对信号的影响都会加大。

3) 导体对信号的影响：巷道中的电缆、电机车架空线、铁轨、水管等形成了纵向导体，在中、低频段这些导体的导波作用很大，但在高频、特高频段时纵向导体的作用可以忽略不计。

4) 井下设备对信号的影响：井下的设备例如：机车、采掘机、风墙和风门等都会对信号有一定的影响。

通过对这些因素的综合分析，以及北京博讯科技有限公司对无线传感器网络在煤矿

井下的实地测试数据的分析，选择高频段或特高频段在矿井下会有较好的效果。因此本课题选择了一在实际应用中取得较好效果的 MaxStream 公司的 XBee_Pro 无线芯片。该芯片工作在 2.4GHz，是一种比较成熟的体积小、功耗低、传输距离远的无线通信部件^[26]。

1) XBee_Pro 性能特点及接口应用

XBee/XBee_Pro模块设计满足 IEEE 802.15.4 标准，工作频率 2.4GHz。XBee 模块的基本性能参数如下：(1) 功率 1mW，接收灵敏度 -92dBm，室内传输距离 30m，室外传输距离 100m，RF 数据传输速率为 250kbit/s；(2) 在 3.3V 电源下，发送电流 45mA，接收电流 50mA；(3) 在网络性能方面，具有 DSSS（直接序列扩频）功能，可以组成对等网、点对点及点对多点网络；(4) 12 个软件可选的直接序列信道，每个信道具有 65000 个可用网络地址等。XBee_Pro 是 XBee 的加强型产品，其传输距离大于 XBee，同时发送功率、工作电流等也比 XBee 大，但是二者在引脚、操作模式等方面完全兼容。

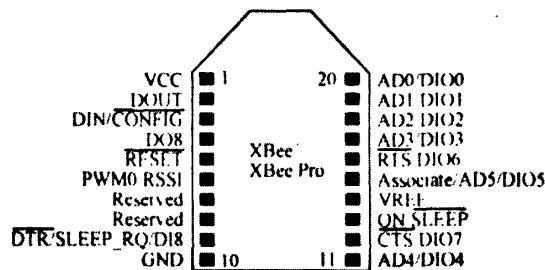


图 3.1 XBee_Pro 模块引脚

XBee_Pro 模块为我们提供了丰富的引脚，每个引脚的功能如表 3.1 所示：

表 3.1 XBee_Pro 模块各引脚功能

引脚编号	引脚名称	信号方向	描述
1	VCC	-	电源
2	DOUT	输出	UART 数据输出
3	DIN / CONFIG	输入	UART 数据输入
4	DO8	输出	数字输出 8
5	RESET	输入	模块复位
6	PWM0/RSSI	输出	PWM 输出 0 / 接收信号强度
7	Reserved	输出	保留
8	Reserved	-	保留
9	DTR / SLEEP_RQ / DI8	输入	数据终端就绪/睡眠模式控制信号/数字输入8
10	GND	-	地
11	AD4 / DIO4	双向	模拟信号输入4 / 数字输入输出4
12	CTS / DIO7	双向	清除发送流程控制信号/数字输入输出7
13	ON / SLEEP	输出	模块状态指示
14	VREF	输入	A /D 转换的基准电压输入
15	Associate / AD5 / DIO5	双向	关联指示/模拟信号输入5 / 数字输入输出5
16	RTS / AD6 / DIO6	双向	请求发送流程控制信号/数字输入输出6
17	AD3 / DIO3	双向	模拟输入信号3 / 数字输入输出3
18	AD2 / DIO2	双向	模拟输入信号2 / 数字输入输出2
19	AD1 / DIO1	双向	模拟输入信号1 / 数字输入输出1
20	AD0 / DIO0	双向	模拟输入信号0 / 数字输入输出0

XBee_Pro模块中集成了一个UART接口，其内部结构如图3.2所示。当串行数据通过DI引脚进入XBee_Pro模块后，数据会存储在DI缓冲器中，直到发送器通过天线发送出去；当RF数据由天线接收后，接收数据进入DO缓冲器，然后再串行送入主机中。

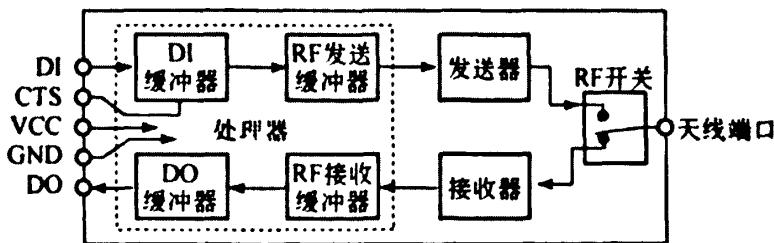


图 3.2 XBee_Pro 模块 UART 内部数据控制流程

2) XBee_Pro 操作模式

XBee_Pro 模块一共有五种操作模式分别是：空模式、接收模式、发送模式、睡眠和命令模式。每种模式都可在以字节为单位操作的透明方式和以一定的数据格式为单位

操作的 API 模式下工作。

1) 空模式：当XBee_Pro模块没有发送数据操作和接收数据操作发生时，XBee_Pro模块进入空操作模式；当有数据进入DI缓冲器、天线端接收到有效数据、睡眠条件满足、命令模式序列(“+++”)发布时，XBee_Pro模块分别自动进入发送、接收、睡眠、命令模式。

2) 接收模式：当天线接收到有效数据时，XBee_Pro模块进入接收模式，将天线接收数据存入D0缓冲器，再由控制器读取。

3) 发送模式：在发送模式下，发送数据包完全遵循IEEE 805.15.4标准，包含源地址域和目的地址域。源地址域表示发送数据的XBee_Pro模块的地址，有16位地址方式(来自MY命令参数)和64位地址方式(来自SH, SL命令参数)。目的地址表示要接收该传送数据的XBee_Pro模块地址(来自DH, DL 命令参数)。发送操作有直接发送和间接发送两种方式。直接发送下，数据由发送模块直接发送给具有目的地址的目标模块；间接发送是只有当目标模块发出请求时，再将保持在源模块中的数据发送出去，间接发送只能用于协调器，而不能用于终端设备。

4) 睡眠模式：睡眠模式是一种低功耗工作模式，对于必须以电池供电的无线传感网络节点，电源功耗是一个相当重要的指标，当模块处于不工作状态时，将其设置为低功耗的睡眠模式是非常必要的。对于XBee_Pro模块，可以控制SLEEP_RQ引脚使其强行进入睡眠模式，也可以通过设置相应的命令参数，使其自动转入睡眠模式。

5) 命令模式：命令模式是XBee_Pro模块操作的一个重要模式。在该模式下，所有传送的信息都被解释成相关命令，从而可以修改或者读出模块的各项命令参数。

3.1.2 瓦斯及温度传感器的选择

1) 瓦斯传感器的选择

据统计瓦斯爆炸在我国矿难中占 70%以上，因此煤矿瓦斯治理是煤矿安全生产治理的核心。为了对煤矿瓦斯监测进行统一管制我国制定了《煤矿安全规程》。煤矿井下瓦斯浓度、空气成分、环境温度等环境参数必须满足规程要求才可以开采。甲烷气体与空气的混合气中，甲烷的爆炸范围是 4.9%(V/V)~16%(V/V)，因此我们的测量范围选择在 0%~5%就可以达到煤矿开采的需要。

MC112 型热催化瓦斯传感器，测量范围在 0%~15%，测量精度<0.5%，MC112 型热催化瓦斯传感器的技术指标如表 3.2 所示：

表 3.2 MC112 技术指标

工作电压 (V)	3.0±0.1
工作电流 (mA)	@100
灵敏度 (mV)	1%甲烷 >14
	1%丁烷 >30
	1%氢气 >24
线性度 (%)	0~5
回应时间 (90%)	小于 10 秒
回复时间 (90%)	小于 30 秒
使用环境	-20—+60°C 低於 95%RH
存储环境	-30—+80°C 低於 95%RH
外形尺寸 (mm)	10×14×18

MC112 现在已经广泛应用于工业现场的天然气、液化气、煤气、甲烷等可燃性气体浓度监测。其具有响应速度快，良好的重复性、选择性，且元件工作稳定、可靠，抗 H_2S 中毒。该款传感器完全能满足我们的需求。

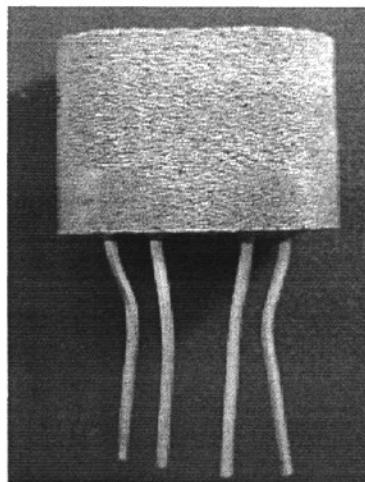


图 3.3 MC112 实物图

2) 温度传感器的选择

井下温度也是煤矿安全开采的重要指标之一，因为在不同的温度状况下瓦斯的爆点有所不同，一旦井下温度过高无疑加大了煤矿开采的危险性。

本系统选取了 AD7416 作为温度传感器，该传感器的主要技术指标如表 3.3 所示：

表 3.3 AD7416 技术指标

工作电压 (V)	2.7~5.5
测量精度 (℃)	0.25
测量周期	15 μ s
使用环境	-25℃~+100℃

3.1.3 单片机的选择

单片机相当于无线节点的大脑，所有的设备控制、任务调度、能量计算和功能协调、通信协议、数据融合和数据转储程序都将在这个模块支持下完成，所以处理器的选择在传感器结点设计中是至关重要的。传感器网络结点使用的处理器应该满足一下要求：外形尽量小、集成度尽量高、功耗低而且支持睡眠模式、运行速度要尽量快、要有足够的外部通用FO端口和通信接口、成本要尽量低、有安全性保证。

C8051F320 是兼容 8051 但性能得到极大提升的微处理器。由于采取了流水线结构 C8051F320 较 8051 的指令执行速度有了大幅度的提高，并且增加了存储器的个数和容量方便将来对采集的数据进行处理。该款单片机的特性可总结为如下几点：

- 1) 高速、流水线结构的8051兼容的微控制器内核（可达25MIPS）。
- 2) 全速、非侵入式的在系统调试接口（片内）。
- 3) 通用串行总线(USB)功能控制器，有8个灵活的端点管道，集成收发器和1K FIFO RAM
- 4) 电源稳压器（5V至3V）。
- 5) 真正10位200 ksps的17通道单端/差分ADC，带模拟多路器片内电压基准和温度传感器片内电压比较器（两个）
- 6) 高精度可编程的12MHz内部振荡器和4倍时钟乘法器
- 7) 16KB可在系统编程的FLASH存储器
- 8) 2304字节片内RAM（256+1K+1K USB FIFO）
- 9) 硬件实现的SMBus/ I²C、增强型UART和增强型SPI串行接口
- 10) 4个通用的16位定时器
- 11) 具有5个捕捉/比较模块和看门狗定时器功能的可编程计数器/定时器阵列

(PCA)

- 12) 片内上电复位、VDD监视器和时钟丢失检测器
- 13) 25/21个端口I/O (容许5V输入)

由上述特点可以看出，C8051F320 的性能完全达到甚至超过我们的需求。因此这样一款单片机能很好的应用在我们的无线节点上。

3.2 固定节点的设计

3.2.1 固定节点指标

固定节点是构成无线网络的基石，同时还要负责将便携节点和自身采集的环境信息和人员位置信息上传至地面监控机，因此在设计固定节点的时候必须要考虑以下这几方面^[27]:

- 1) 通信稳定性及数据准确性。作为井下安全监控系统，每个固定节点都要一天 24 小时不间断的监控井下的环境参数，并实时上传至地面监控机。因此，每个固定节点首先必须要准确的采集传感器得到的数据，在保证数据准确的情况下尽量减少无线传输时的丢包率，并能长时间持续稳定工作。
- 2) 网络的自我修复能力。长时间的工作或者意外事故一定会使某些固定节点损坏，在这样的情况下为了保证系统的正常运行，损坏节点附近的节点必须能跳过这个节点重新组建新的无线网络。
- 3) 功耗要尽量小。虽然固定节点是固定在巷道中某一位置一般不会移动的，但是有些地方例如：废弃的采掘面，盲井等地方仍然不方便接入电缆。为了解决这个问题就要求固定节点也采用电池供电，才有利于无线网络的延伸扩展。
- 4) 恶劣环境下的生存能力要强。由于固定节点全天候运行，因此要求固定节点必须能在一些较为恶劣的环境下正常工作。

3.2.2 固定节点结构

考虑到固定节点的指标^[28]，利用 3.1 节选取的设备，设计的固定节点结构如图 3.5 所示：

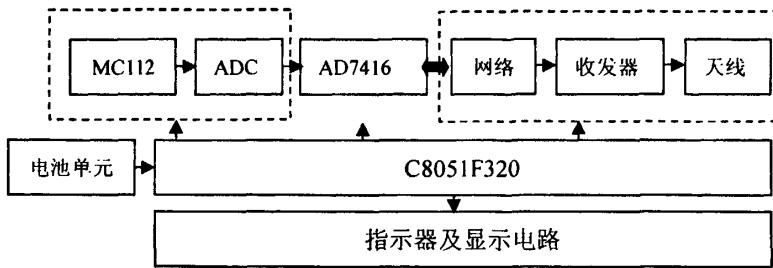


图 3.4 固定节点结构

如图所示，整个节点可分为传感器单元、处理器单元、网络单元、能量单元及显示单元 5 部分组成。每个节点在工作时都会有个固定的编号作为自身的通信地址。建立网络时，节点会根据信号能量自动分配自身的编号，越靠近交换机的节点编号越小。这样一级一级组成链状网络。每隔固定的时间(可设置)，节点会把自身传感器得到的数据打包上传至上一级节点，同时也可作为中继节点把下一级节点的数据转发到上一级节点。

3.2.3 固定节点原理图及电路板设计

在确定了单片机、传感器及无线芯片的基础上结合节点结构绘制了固定节点原理图和 PCB 图，并依照 PCB 图制作了固定节点实物，如下图所示：

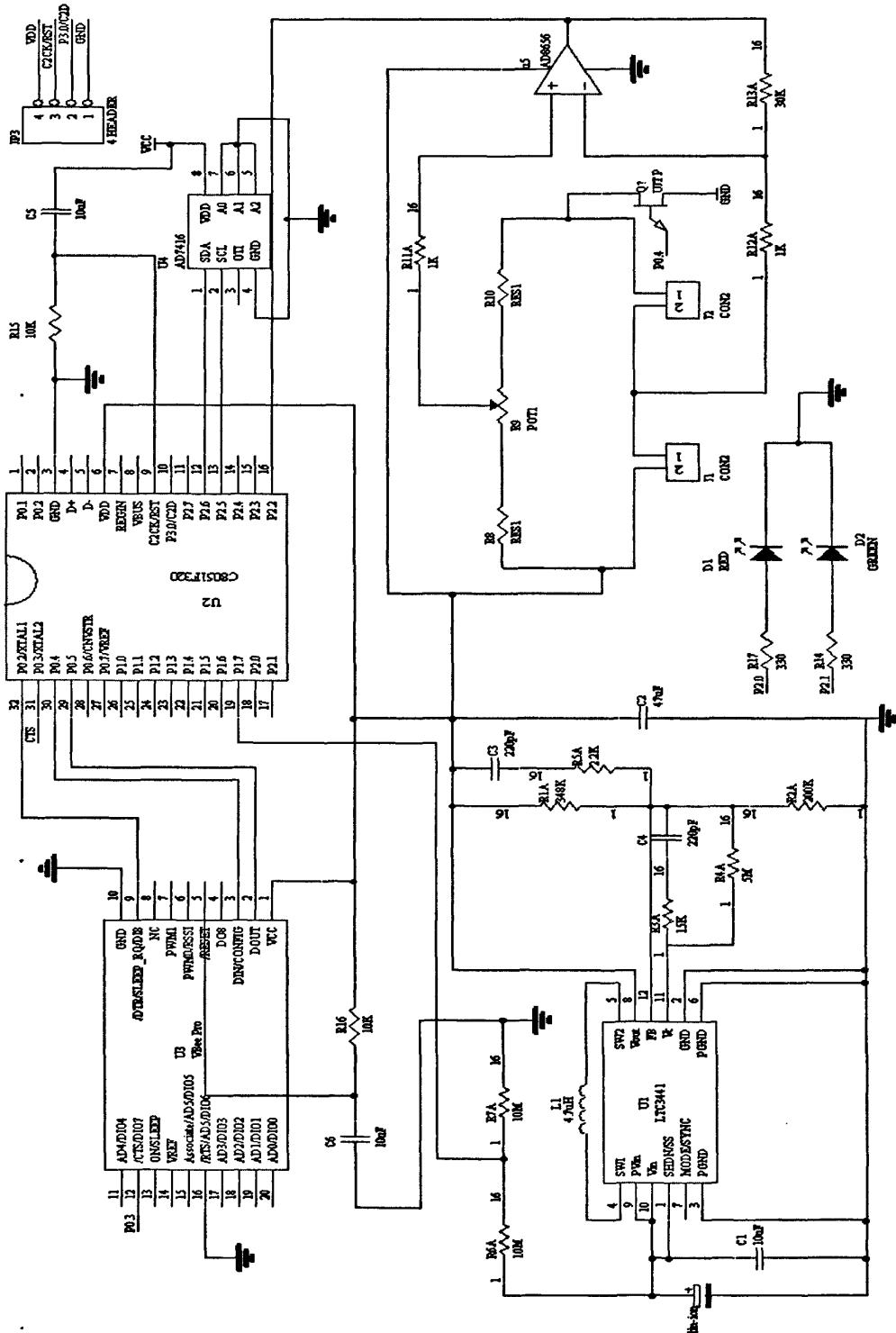


图 3.5 固定节点原理图

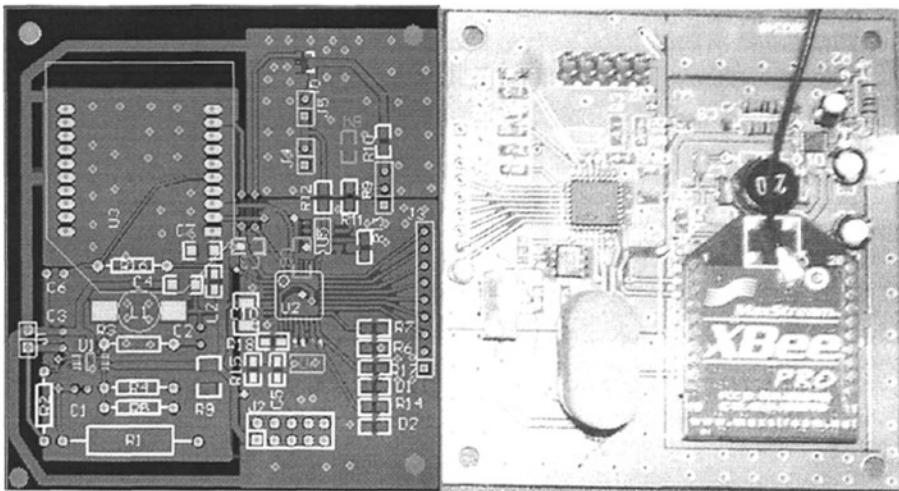


图 3.6 固定节点 PCB 及实物图

3.2.4 固定节点软件设计

固定节点软件部分按功能可分为三部分，分别是数据采集模块、数据传输模块及组网模块，如图 3.7 所示：

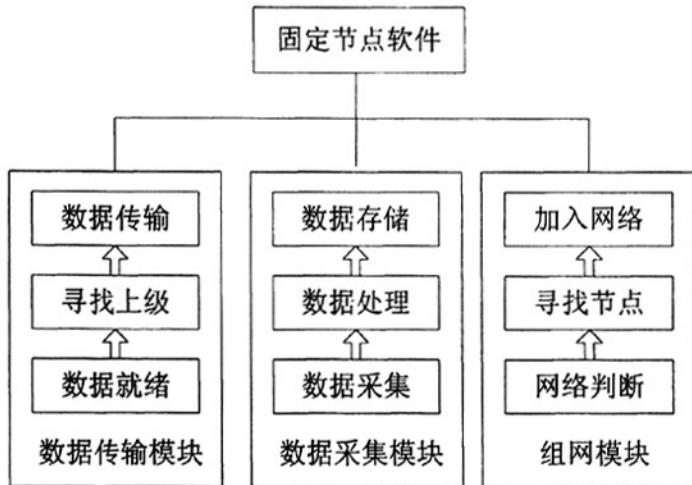


图 3.7 固定节点软件模块

1) 数据采集模块设计：

数据采集模块的功能就是通过单片机将各个传感器得到的数据采集到单片机中，同时对数据进行处理打包。数据打包的核心代码如下：

```
void data_add()
```

```

{
    *receive_node_data=LEN_CAP+5;          //长度
    receive_node_data++;
    *receive_node_data=NODE_ADDRESS;        //节点地址
    receive_node_data++;
    *receive_node_data=TEMPERATURE;         //温度采集
    receive_node_data++;
    *receive_node_data=THICKNESS;           //瓦斯浓度
    receive_node_data++;
    *receive_node_data=JULI;                //节点位置
    receive_node_data++;
    *receive_node_data=ENERGY;              //信号能量
    receive_node_data++;
    receive_cap_data=DS_CAP;
    while(LEN_CAP)
    {
        *receive_node_data=*receive_cap_data;
        receive_node_data++;
        receive_cap_data++;
        LEN_CAP--;
    }
    NODE_NUMBER++;
}

```

2) 数据传输模块:

数据传输模块的功能包括将自身采集的环境参数、下级节点上传上来的数据以及便携节点上传的环境参数和位置信息统一打包，通过路由协议向它的上级节点传输。节点上传数据时采用 API 格式进行打包传输，数据格式如表 3.4 所示^[29,30]:

表 3.4 节点发送数据包格式

第 1 位	第 2 位	第 3 位	第 4 位	第 5 位	第 6 位	第 7 位	第 8 位	第 9 位	第 10 位	第 11 位	第 12 位	第 13 位	第 14 位	第 15 位
起 始 位 7E	包 长 度	识 别 码 01	ff	日 的 节 点 地 址	数 据 包 标 识 00	命 令 码 33	本 节 点 地 址 00	数 据 长 度	本 节 点 地 址	温 度	浓 度	距 离	电 量	校 验 位

表 3.5 接收数据包格式

起始位 7E	包长度	识别码 81	源节点地址	接收信号强度	数据包标识 00	命令码 33	源节点地址	数据长度	源节点地址	温度	浓度	距离	电量	校验位
-----------	-----	-----------	-------	--------	-------------	-----------	-------	------	-------	----	----	----	----	-----

表 3.6 发送广播包数据格式

起始位 7E	包长度	识别码 01	ff	ff	数据包标识 02	命令码 22	本节点地址	末节点地址	校验位
-----------	-----	-----------	----	----	-------------	-----------	-------	-------	-----

表 3.7 接收广播包数据格式

起始位 7E	包长度	识别码 81	源节点地址	接收信号强度	数据包标识 02	命令码 22	源节点地址	末节点地址	校验位
-----------	-----	-----------	-------	--------	-------------	-----------	-------	-------	-----

根据这样的数据格式，节点可分辨出数据的来源及数据的完整性，当数据的来源为它的下级节点或者为自身，且数据完整节点就会将这条数据上传给上级节点，这样一级一级的上传，数据最终就会上传至地面监控机。

3) 组网模式：

固定节点网络作为无线传感网络的主干，具有通信路由功能，实现环境参数的有序传输^[31,32,33]。在该级网络中，为保证数据链路的有序传输，所有节点都参考末节点调整本节点的工作周期，且考虑到新节点的加入可能存在两种情况：一种为更换故障的中间节点，另一种为延伸整个网络而加入链路末尾。因此，为保证网络的稳定工作，将节点网络程序分为两部分考虑：末节点子程序和中间节点子程序。其流程图分别如下所示：

节点主程序流程图

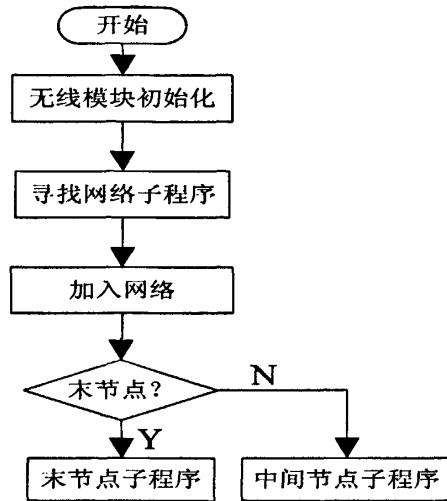


图3.8 节点主程序流程图

末节点子程序流程图

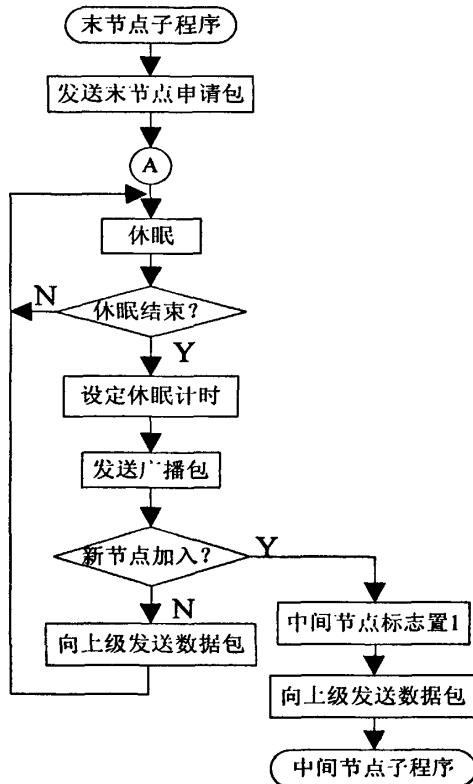


图 3.9 末节点程序流程图

中间节点子程序流程图

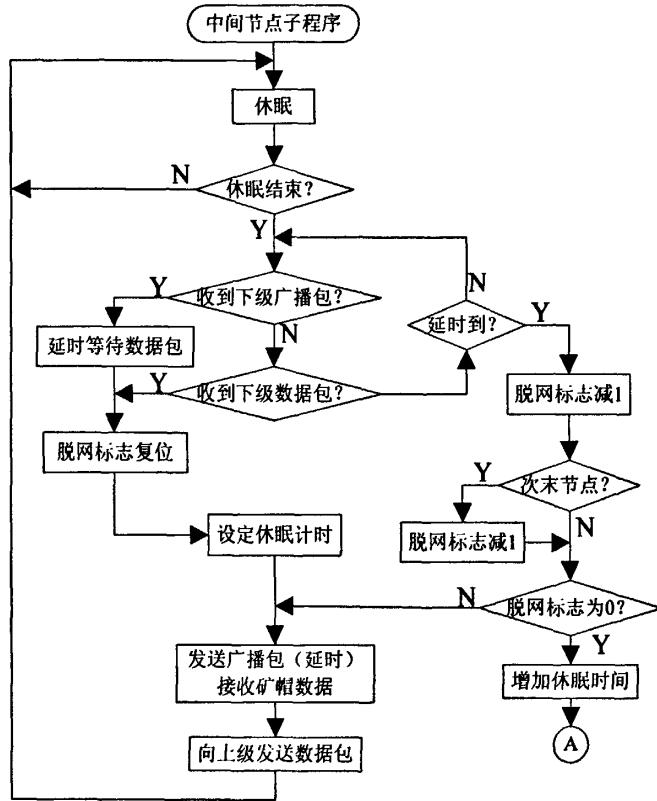


图 3.10 中间节点程序流程图

3.2.5 节点加入网络的代码实现

当节点初始化完成后首先寻找附近时都有已经建立好的网络，如果网络存在则节点发送申请准备加入网络，如果附近没有网络则将自己定为头节点等待别的节点加入。节点加入网络的核心代码如下所示：

```

if(NODE_ADDRESS!=1)
{
    if(END_NODE==1)
    {
        while(FIND_NEXT_NETWORK==0);
        FIND_NEXT_NETWORK=0;
        SEND_NODE_ADDRESS=NODE_ADDRESS-1;
        data_packet(0x44); //发送末节点申请包
        TIMER_COUNT=3;
        TR0=1;
    }
}
  
```

```

while(TIMER_COUNT)
{
    if(ACK_SUCCESS==1)
    {
        ACK_SUCCESS=0;
        break;
    }
}
TIMER_COUNT=SLEEP_TIMEEND; //设置休眠计时
}
else if(END_NODE==0)           //中间节点, 设置休眠时间
{
    while(FIND_TOP_NETWORK==0);
    FIND_TOP_NETWORK=0;
    TIMER_COUNT=SLEEP_TIME;
    TH0=COUNTH;
    TR0=1;
}
}
}

```

3.3 便携节点的设计

便携节点是整个系统中最为灵活的部分，它会随着矿工的移动而移动因此如何保证其顺利加入网络并随着自身的移动变换其所挂靠的固定节点从而为人员定位做好基础。和固定节点一样便携节点也会实时采集当前位置的环境参数，但它还需添加人员位置信息，而该数据的获得是通过计算自身与距离它最近的固定节点间的信号能量值来确定的。

出于上述考虑，便携节点的结构和固定节点非常相似，只是去掉了其中的显示模块，更换了更小的电池。便携节点的结构如图3.11所示：

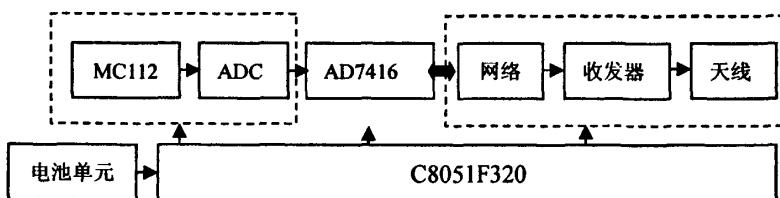


图3.11 便携节点结构

便携节点的数据采集方式和数据传输方式同固定节点完全相同，只是在路由组网方

式上有很大的不同。由于便携节点可以看作一种末节点，因此它不需要作为中继节点使用，当便携节点进入固定节点组好的无线网络中时，只需要根据它和附近固定节点传输信号的能量来判断当前距离哪个固定节点最近，然后该便携节点就将这个距离它最近的固定节点设置为自己的上级节点，它只需要把自身采集的环境参数和由它同这个固定节点间信号能量通过一定算法计算出的距离信息发送给固定节点。

3.4 固定节点遥控器的设计

由于人员定位系统的需求，我们需要知道每个固定节点在矿井中的具体位置，并以此为参照根据便携节点和固定节点间计算出来的相对位置以确定这个便携节点当前在矿井中的准确位置。

遥控器的实现主要运用了XBee_Pro的命令模式，在这种模式下我们可以自由的对固定节点的节点编号、固定数据位数值、节点状态等进行设置。遥控器的结构如图3.12所示：

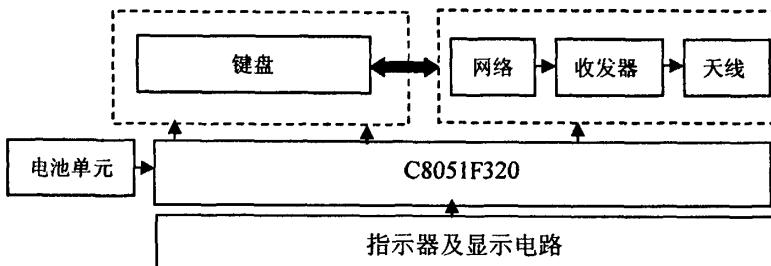


图3.12 节点位置遥控器结构

遥控器需向XBee_Pro模块发送命令模式序列，使其进入命令模式。命令模式序列缺省是：+++，用户也可以使用CC命令修改它。进入命令模式的C语言代码如下：

```
void start_command ( void) {
    uart_put_byte ( ' + ') ;
    uart_put_byte ( ' + ') ;
    uart_put_byte ( ' + ') ;
}
```

同样在对其修改时只需要先和需要修改的固定节点建立连接，发送“+++”进入命令模式，再输入相应的命令序列和数值最后发送“ATCN”退出命令模式就可以了，为

为了输入方便我们在遥控器上为常用功能设计功能键来方便输入，以修改固定节点网络地址改为125为例，修改节点网络地址的命令序列是“ATMY”，其实现过程的C语言代码如下：

```
void start_command ( void) {  
    · uart_put_byte ( ' + ') ;  
    uart_put_byte ( ' + ') ;  
    uart_put_byte ( ' + ') ;  
  
    wait() ;//延时  
  
    uart_put_byte ( ' A ') ;  
    uart_put_byte ( ' T ') ;  
    uart_put_byte ( ' M ') ;  
    uart_put_byte ( ' Y ') ;  
    wait() ;  
    uart_put_byte ( ' 1 ') ;  
    uart_put_byte ( ' 2 ') ;  
    uart_put_byte ( ' 5 ') ;  
    · uart_put_byte ( ' 0x0d ') ;  
}
```

通过类似的命令，我们可以设置固定节点的节点编号、位置信息等，为人员定位时作为参考节点创造条件。

本章小结

本章详细介绍了无线节点的设计和实现方案。无线节点是组成无线网络的基础，由于使用环境限制，必须在节能、通信稳定性、抗干扰等方面着重考虑。基于以上考虑，本系统从芯片的选择到系统功能的设计都遵循这一原则。本章不但对固定节点和便携节点的设计做了详细的叙述，并且给出了各个功能的核心代码和电路的原理图等相关资料供大家参考。

4 井下人员定位系统研究

无线传感网络中，每个节点采集的环境参数都需要附加该节点的位置信息，这样采集的环境参数才有意义，特别是当矿井发生事故时人员的位置信息更成为救援工作至关重要的依据，同时节点位置信息还可以减少无线传感网络路由发现的开销以提高路由效率、实现网络的负载均衡、反映网络的拓扑结构及实现网络拓扑的自配置^[34,35]。可见位置信息对无线监控网络非常重要。节点定位技术一般是以一些位置已知的节点作为参考节点，其他的节点根据各种各样的算法模型计算出自身相对于参考节点的位置，结合参考节点的绝对位置信息，就可以得出当前节点的准确位置。本章首先对当前使用的定位算法进行介绍，然后结合矿井下特殊的地质环境和生产环境，提出一种适合于煤矿井下的定位技术^[36]。

4.1 无线传感网络定位技术概述

测量参考节点和未知节点之间的距离是现在大多数无线节点定位技术的基础，按照节点是否有物理测距能力可以将当前的无线定位机制分为两种^[37]，即基于测距的节点定位机制（range-based），和不基于测距的节点定位机制（range-free）。

4.1.1 基于测距的节点定位机制

基于测距的节点定位机制需要两个节点间，通过以某种方式得到对方和自己的距离信息，再通过一定的算法得出自身的位罝。现在通过这种机制实现定位的主要有基于到达时间的TOA（Time of arrival）算法、基于到达时间差的TDOA（Time Difference Of Arrival）算法、基于到达角度的AOA（Angle Of Arrival）算法以及基于接收信号强度RSSI（Received Signal Strength Indicator）算法^[38,39]。

1) 基于TOA的定位算法

TOA定位算法中，要求已知信号的传播速度，根据信号在两节点间的传播时间来确定节点间的距离，然后根据参考节点位置或者已有的一些算法计算出节点的位置。TOA

算法的定位精度很高，但由于需要通过传播时间来计算距离，就要求节点间保持时间的高度一致，这对于造价低、功耗低的无线传感器节点来说很难实现，因此TOA算法一般适用于对功耗和价格不太敏感的场合。

2) 基于TDOA的定位算法

TDOA是一种应用较为广泛的定位算法，它利用发射节点同时发射两种不同传播速度的信号，接收节点根据两种信号到达的时间差和两种信号已知的传播速度可以计算出两个节点之间的距离，再根据已有的TDOA算法就可以计算出当前待测节点的位置。TDOA算法也有较好的定位精度，但是由于超声波的传播距离有限，在巷道等复杂地质中传播距离更短，且造价较高，因此不适用于煤矿井下。

3) 基于AOA的定位算法

待测节点通过天线阵列接收多个参考节点发射的信号，判断参考节点的方位和角度，再通过算法加算出待测节点的位置。AOA算法不仅能计算位置还能提供方位信息，但是它需要天线阵列等辅助设备，同时功耗也很大，同样也不适合在矿井下使用。

4) 基于RSSI的定位算法

通过测量节点之间的接收信号强度(RSSI)实现定位。该技术的主要特点是成本低、功率小、实现简单，但受环境影响较大，传统RSSI算法精度较低。利用信号衰减经验模型和适宜的算法可以提高RSSI定位算法的精度。

4.1.2 不基于测距的节点定位机制

距离无关的定位技术无需测量结点之间的绝对距离或方位，仅根据网络连通性等信息即可实现，降低了对结点硬件的要求，但定位的误差也相应有所增加。Range-free定位则无须距离和角度信息。目前提出了两类主要的距离无关的定位方法：一类先对未知结点和信标结点之间的距离进行估计，然后利用三边测量法或极大似然估计法进行定位；另一类方法是通过邻居结点和信标结点确定包含未知结点的区域，然后把这个区域的质心作为未知结点的坐标。主要有质心定位算法、Dv-HOP算法、DV-distance算法和APIT算法等。

1) 质心定位算法

质心算法是南加州大学的Nirupama Bulusu等提出的一种仅基于网络连通性的室外

定位算法。多边形的几何中心称为质心，多边形顶点坐标的平均值就是质心节点的坐标。多边形ABCDE的顶点坐标分别为 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$ 、 $D(x_4, y_4)$ 、 $E(x_5, y_5)$ ，其质心坐标 $(x, y) = (\frac{x_1+x_2+x_3+x_4+x_5}{5}, \frac{y_1+y_2+y_3+y_4+y_5}{5})$ 质心定位算法首先确定包含未知节点的区域，计算这个区域的质心，并将其作为未知节点的位置。在质心定位算法中，信标节点周期性地向临近节点广播信标分组，信标分组中包含信标节点的标识号和位置信息。当未知节点接收到来自不同信标节点的信标分组数量超过某一门限或接收一定时间后，就确定自身位置为这些信标节点所组成的多边形的质心^[40]。

质心定位算法简单，但仅能实现粗粒度定位，需要较高的锚节点密度才能提高定位精度。

2) Dv-HOP算法

DV-Hop算法的核心思想是用平均每跳距离与未知节点到锚节点跳数的乘积，表示未知节点到锚节点的距离。DV-Hop算法由3个阶段组成。首先使用典型的距离矢量交换协议，使网络中所有节点获得距锚节点的跳数。第2阶段，在获得其他锚节点位置和相隔跳距之后，锚节点计算网络平均每跳距离，然后将其作为一个校正值广播至网络中。校正值采用可控洪泛法在网络中传播，这意味着一个节点仅接受获得的第一个校正值，而丢弃所有后来者，这个策略确保了绝大多数节点可从最近的锚节点接收校正值。在大型网络中，可通过为数据包设置一个TTL域来减少通信量。当接收到校正值之后，节点根据跳数计算与锚节点之间的距离。当未知节点获得与3个或更多锚节点的距离时，则在第3阶段执行三边测量定位^[41]。

3) DV-distance算法

DV-distance算法与DV-Hop类似所不同的是相邻节点使用Rssi测量节点间点到点距离，然后利用类似于距离矢量路由的方法传播与锚节点的累计距离。当未知节点获得与3个或更多锚节点的距离后使用三边测量定位^[42]。DV-distance算法也仅适用于各向同性的密集网络。随着测距误差的增大，定位误差也急剧增。.

4) APIT算法

近似三角形内点测试法（approximate point-in-triangulation test，APIT）首先确定多个包含未知节点的三角形区域，这些三角形区域交集是一个多边形，它确定了更小的包

含未知节点的区域; 然后计算这个多边形区域的质心, 并将质心作为未知节点的位置^[43]。

APIT算法定位时分以下几步:

- 1) 收集信息: 未知节点收集临近信标节点的信息, 如位置、标识号、接收到的信号强度等, 邻居节点之间交换各自接收到的信标节点的信息;
- 2) APIT测试: 测试未知节点是否在不同的信标节点组合成的三角形内部;
- 3) 计算重叠区域: 统计包含未知节点的三角形, 计算所有三角形的重叠区域;
- 4) 计算未知节点位置: 计算重叠区域的质心位置, 作为未知节点的位置。在无线信号传播模式不规则和传感器节点随机部署的情况下, APIT算法的定位精度高, 性能稳定, 但APIT测试对网络的连通性提出了较高的要求。

由于这类算法一般都应用在节点分布密度大, 节点连通性较好的场合, 井下无线传感网络由于其成本和参考节点布置不能达到这样高的密度, 且狭窄的巷道不能提供多方向连通的节点网络, 而是趋于链状, 因此这些算法并不适合在矿井下使用。

4.2 适用于井下的 RSSI 改进算法模型

由上述定位算法的分析, 且考虑到XBee_Pro芯片本身带有RSSI支持, 单片机可以很方便的获取待测节点和参考节点之间的RSSI值, 鉴于以上种种原因, 选择基于RSSI的定位算法作为系统的定位算法模型。

4.2.1 RSSI 测距模型

无线信号的发射功率和接收功率之间的关系可以用式 $P_R = P_T / d^n$ 表示, 其中 P_R 是无线信号的接收功率, P_T 是无线信号的发射功率, d 是收发单元之间的距离, n 传播因子, 数值大小取决于无线信号传播的环境。对此公式两边取对数可得 $P_R = A - 10 \times n \lg d$ 。其中A为信号传输1m时接收的功率。可以看出A和n的数值决定了接收信号强度和信号传输距离的关系。

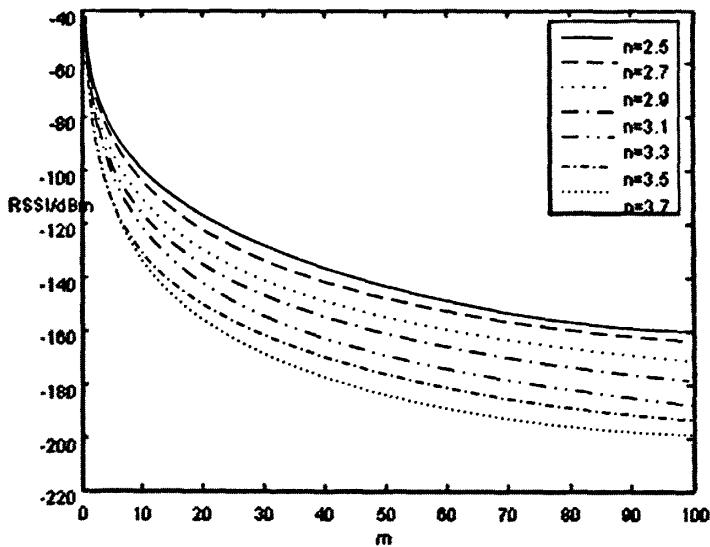


图 4.1 n变 A不变时 RSSI与距离曲线图

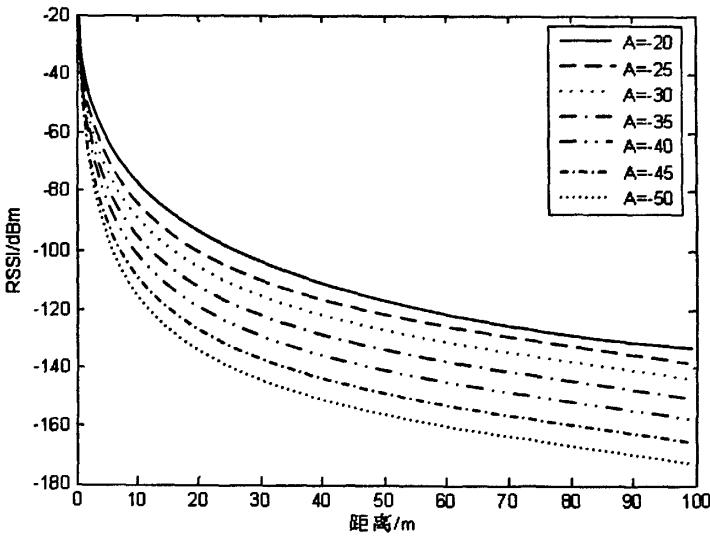


图 4.2 A变 n不变时 RSSI与距离曲线图

由图我们可以看出，RSSI与距离之间服从对数正态分布，传统RSSI定位算法正是测出未知节点的信号功率，由于信标节点的功率和位置已知，则由上述公式在确定A和n的情况下计算出未知节点的位置。还有一些相对复杂的算法，例如加权质心定位法、动态距离估计法等，这些算法虽然在一定程度上提高了RSSI算法的精度，但这些算法需要数量较多的信标节点，在狭窄的井下线形巷道中无法实现，而使用传统的单公式计算法这

样简单的算法，又会因为采集到的RSSI值常因为环境、待测对象等因素具有很大的不确定性，从而产生较大的定位误差^[44]。

4.2.2 适用于矿井下的定位算法的提出

根据煤矿井下特殊的线形巷道特点，在井下一般信标节点的分布呈链状。但为了提高网络的健壮性，一般会提高节点的密度。在本文论述的系统中，每个信标节点在放置时都能接收到链路中与其间隔一个节点的那个节点的信号。

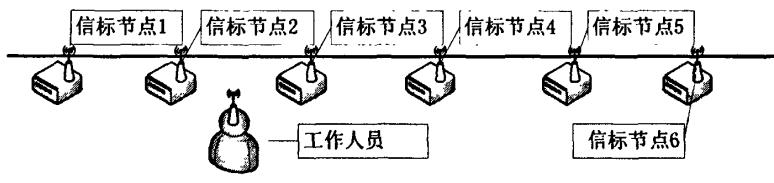


图 4.3 线形巷道及节点摆放示意图

如图4.3所示，信标节点3至少可以接收到节点1、2、4、5的信号，这样的话工作人员也至少可以接收到节点1、2、3、4，四个信标节点的信号。于是每个工作人员都至少可以与其附近的四个信标节点利用RSSI值计算其位置，这样就使得计算结果存在进行平均的可能。

由于在实际的矿下工作中，定位精度并不要求精确到毫米，那样既浪费资源而且在人员管理以及营救过程中也没有实际的意义。在加上节点的功耗要求低、计算能力相对较差等特点，那些较为精确的动态定位算法并不适用于矿井下。在综合了大量算法的特点和矿工的实际需求后，我们选择了两点定位法再取平均的算法，如图4.4所示：

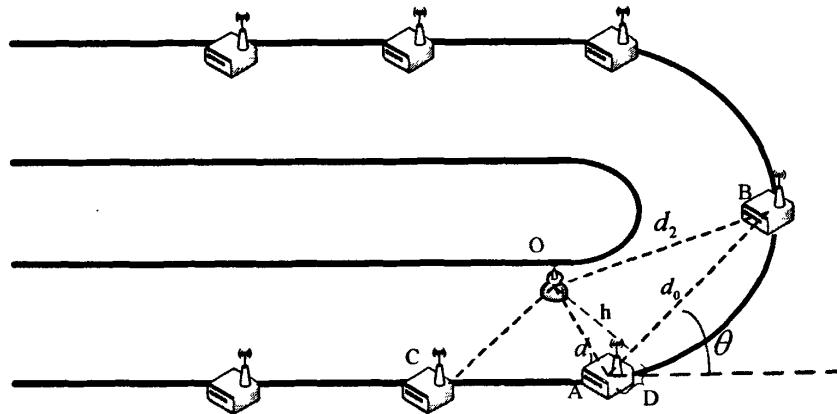


图4.4 巷道转角处模型

情况扩展到矿井下较为复杂的U形弯，由于信标节点的安置只能在靠近支撑住的一侧，因此待测人员只能出现在两个信标节点连线的1、2象限，这为我们的计算带来了方便。 d_0 、 d_1 、 d_2 分别为信标节点A，信标节点B和待测人员O之间的距离。由余弦定理可得：

$$d_2^2 = d_1^2 + d_0^2 - 2d_1d_0 \cos A, \quad D = d_1 \cos A, \quad h = \sqrt{d_1^2 - D^2} \text{ 可得:}$$

$$\begin{cases} X_0 = X_A + D \cos \theta - h \sin \theta \\ Y_0 = Y_A + D \sin \theta - h \cos \theta \end{cases}$$

由于每个待测人员都能接收到多个信标节点的信号，我们将每两个信标节点与其进行两点定位后再将所得值取均值， $(\sum_{i=1}^n X_i / n, \sum_{i=1}^n Y_i / n)$ ，这样就可以避免单个信标节点的误差对人员定位的影响，得到一个较为理想的估计值。

4.2.3 信标节点的部署

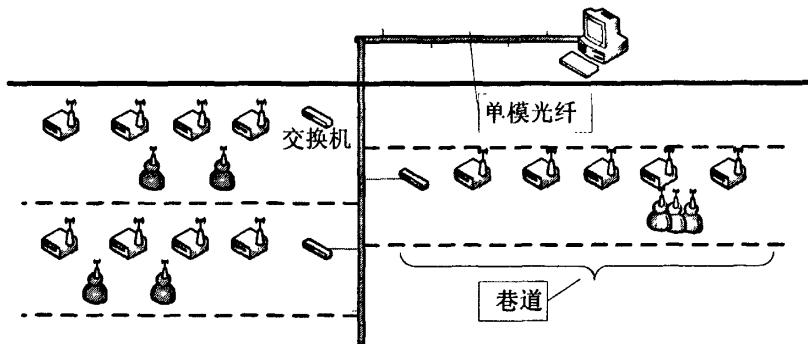


图4.5 系统中信标节点的部署示意图

信标节点在网络中的部署如图4.5所示，信标节点都放置在靠近支撑住的一侧，巷道之间是隔离的，即不同的巷道之间不存在无线信号的通信。整个主干网由铺设在主巷道的单模光纤连接，各个分巷道的无线网络由交换机和主干网连接，最终将各个巷道内的人员位置信息上传至地面上的监控系统，并由监控系统实时显示。

4.2.4 定位方案的实施

工作人员下井工作时，每人佩戴一个安置在矿帽上的结构类似于信标节点的矿帽节点，进入无线网络范围后，每个矿帽节点接收到附近信标节点的RSSI信息并从中选取四个信号最强的信标节点，通过上面介绍的算法模型，就能够对自身在巷道中的位置进行准确的估计。

4.2.5 实验及误差分析

首先对公式 $P_R = A - 10 \times n \lg d$ 中的A及n进行标定。

在楼道中以待测节点为圆心，1m为半径的圆周上放置10个信标节点，每个信标节点都向待测节点发送广播包，记录不同角度的信标节点到待测节点的RSSI值，这样可以消除天线的方向性对定位的影响。

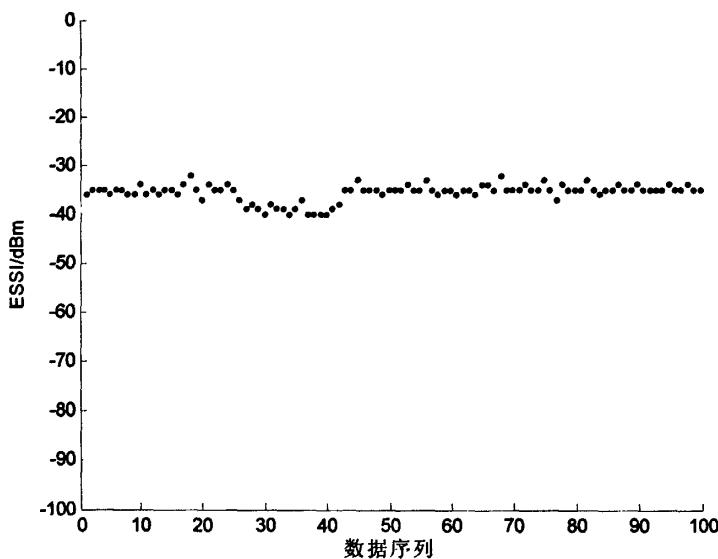


图4.6 各方向距离1米时A值曲线

由图可以看到，天线并不是全向相性的，在一个方向的RSSI略低于其他方向的值。根据这组数据，我们对其求均值可得到A=-35.32。

对n的标定是以一个信标节点为起始点，待测节点沿直线每隔3m记录100个RSSI值，并对其取平均作为该距离的测量RSSI值，从3m到69m共做23组这样的记录，并对公式
 $P_R = A - 10 \cdot n \lg d$ 进行拟合，设A和10n为两个未知参数，拟合公式为：

$P_R = -34.8540 - 14.867 \lg d$ ，拟合相关系数 $R^2 = 0.9599$ ，则可得出参数 $n=1.4867$ 且由拟合得到的A=-34.8540与实际测量的平均值相差很小。拟合曲线如下图所示：

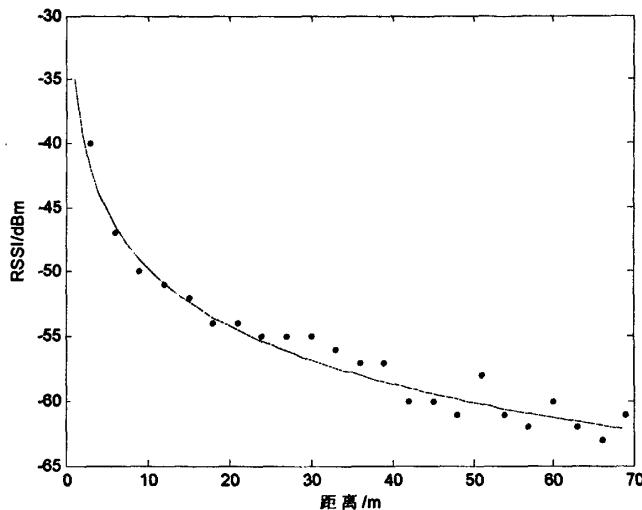


图4.7 定位拟合曲线

我们可以看到当在20m之前RSSI值随距离变化较大且拟合效果良好，超过20m后RSSI值随距离变化偏小且拟合效果明显变差，因此我们在此环境下定位时最好选取与待测节点之间距离小于20m的信标节点来估计其位置。

根据标定好的RSSI和传输距离的关系，利用3.2节提出的算法模型进行了定位实验，

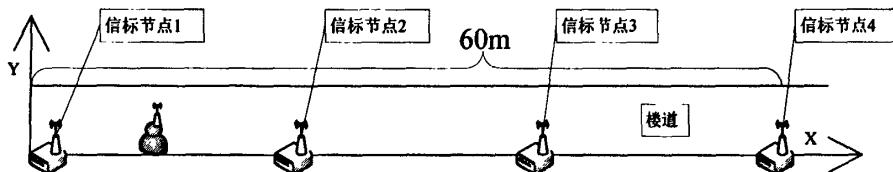


图4.8 楼道模拟实验环境示意图

如图所示在楼道中信标节点沿一侧墙壁放置，假定信标节点1为原点，待测人员每隔3m记录一次数据，得出的测量坐标和真实坐标之间的关系如表4.1所示：

表4.1 真实值于实验值对比

测试序号	1	2	3	4	5
测量值	(2.364,2.713)	(6.537,2.453)	(9.513,3.561)	(11.669,3.433)	(15.662,3.484)
真实值	(3,3)	(6,3)	(9,3)	(12,3)	(15,3)
误差距离	0.698m	0.767m	0.760m	0.545m	0.820m

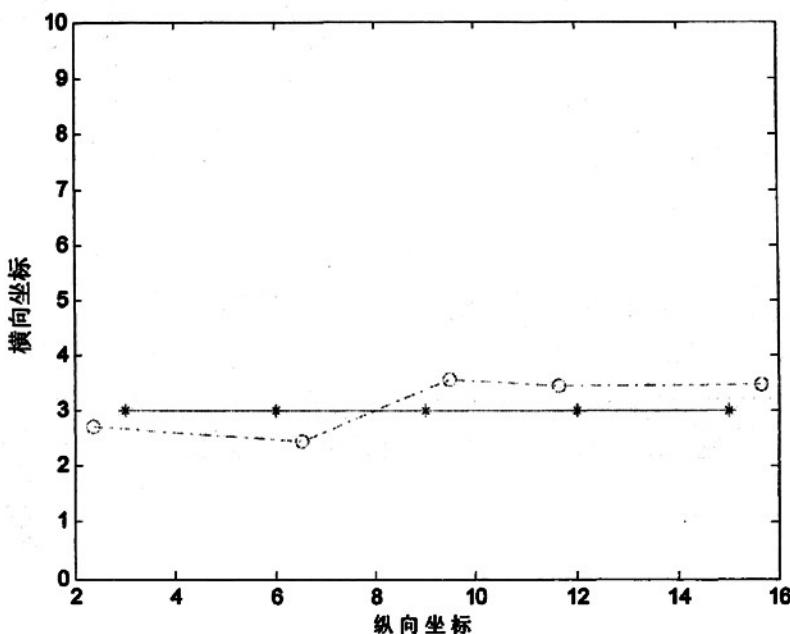


图4.9 待测节点的真实值与估计值集合曲线

由实验结果可得，该定位算法具有以下这些特性：

- 1) 随着节点布置密度的提高，定位精度会随之提高。
- 2) 由于该算法采用RSSI值为依据，因此不需要附加设备，减少了系统成本。
- 3) 算法以距离待测节点最近的固定节点为参考节点，但每个固定节点和便携节点都支持网络自我重组，因此某一节点的故障不会对定位系统产生影响。

同时也可以看出，矿井下的恶劣环境对定位系统有严重的影响，例如井下的噪声、地形的变化和众多的障碍物都会对RSSI值产生影响，目前可以采用的方法是可以适当加大固定节点的发射功率，这样在一定程度上会减小这些因素对定位系统的影响。

本章小结

本章详细叙述了无线监控网络定位系统的基本原理和算法模型，并通过实验对算法进行了验证。由于井下环境的特殊性，无线节点的功耗、计算能力和数据传输等都会受到很大的限制，因此定位算法必须相对简单易于实现。经过对现有无线网络主要定位算法的分析和研究，结合井下的实际情况，提出了采用两点定位多点之间取平均的定位算

法模型，通过实验对该算法进行了验证。本章最后提出了系统所选算法存在的不足和可改进之处，并提出了解决的方法。

由于井下环境复杂多变，因此同一模型不一定适用于所有的矿井，在实际应用中，应当根据网络规模、参考节点部署成本、节点能量等因素综合考虑，在两者间进行折中。

5 监控机监控软件设计

监控软件按照功能可分为环境监测和人员定位。它是监控系统中唯一直接与操作人员交互的部分，它的易用性和稳定性是评价一个监控系统好坏的重要标志。监控软件在整个监控系统中负责将监控节点上传的数据进行解析，将解析后的数据按照节点号分组，实时显示在监控机屏幕上，操作人员能很直观地通过图像监控界面观察到当前矿区各个监测点的环境参数和矿工位置信息。同时监控软件还将上传的数据存储到SQL Server数据库，方便管理人员对历史数据的查询和对比，为煤矿安全生产和煤矿事故后的处理及救援提供数据保障。

5.1 上位机监控软件的设计思想

上位机监控软件作为人机交互的载体、数据处理的终端以及历史数据的接口在监控系统中占有很重要的位置。通过调研现有煤矿监控软件特点并结合无线传感网络的特点，本系统的监控软件主要考虑以下几个方面：

1) 良好的人机交互性、操作简单、实用、人机界面友好

一个优秀的软件，良好的人机交互是必不可少的，作为整个监控系统唯一直接与人交互的部分，监控软件仅仅实现最基本的监控功能是不能满足工作人员需求的。在实现基本功能的基础上，简单的操作，简洁的界面，丰富的功能能给工作人员日常工作带来便利。界面上显示的数据单位要符合国家标准，不要产生歧义以免产生不必要的麻烦，软件主界面要尽量将工作人员日常记录的数据都显示出来同时要尽量符合工作人员的习惯，这样工作人员在填写工作记录时就不必有多余的操作。

2) 良好的可移植性

通用性和可移植性一直是软件界追寻的目标，一款软件要尽量在不修改或者只需极少修改的基础上就能应用到别的环境中。虽然每个煤矿的具体要求和实际情况都不太一样，但是数据的结构、操作的方式、通信接口等部分完全可以实现标准化。监控界面等需要更多个性化的部分也有通用的部分，我们要尽量保留监控软件通用的部分并将其标准化为软件的可移植性创造条件。

3) 数据库的高效性

数据库的高效性指数据的高效存储、访问、筛选等。数据库中的数据是整个上位机的基础，数据库的性能直接影响整个监控系统的效率，在数据存储时尽量不要占用监控软件的线程转而使用SQL存储过程能在很大程度上释放监控软件的资源，数据的访问是每时每刻都在发生的事件，较少每次访问的时间就能大量提高系统的反应性能，数据筛选为特定数据的查找提供基础，因此就需要良好的数据结构来提高筛选的效率。总之提高数据的性能就能提高整个系统的性能，这方面的工作是监控软件中最基础也是最重要的部分之一。

4) 系统的容错性

每个软件都会有不可预料的特殊事件发生，对这些事件的处理不可能在软件编写阶段都考虑进去，因此要保证监控软件的稳定性，就要求监控软件有良好的容错性。例如在系统死机、异常数据产生、违法操作等情况下，能继续稳定地运行。

5.2 上位机监控软件结构

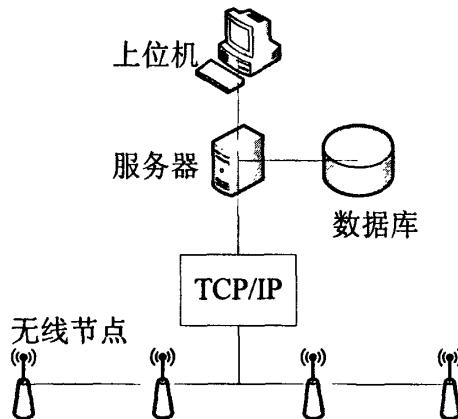


图5.1 监控软件组成框图

由图5.1我们可以看出，上位机监控软件主要有上位机、服务器、数据库、数据接收模块组成。其中上位机是监控软件的终端，所有的数据显示、数据操作、报警操作、图形界面等都在上位机中执行和显示。服务器是相当于一个中转站，它负责接收数据、将数据存入数据库并为上位机提供数据，由于整个监控系统监控节点数目庞大，因此数据

的交互操作很多，如果将所有的任务都集中在上位机中则上位机的负荷会很大，服务器的配备解决了这个问题，它能将一些频繁交互的操作在内部自动运行，这样就减少了上位机的负担同时也增加了系统的稳定性。数据库部分负责存储和提供数据检索，它有自己独立的进程和操作，通过数据库软件的优化将这些数据操作达到最优化。TCP/IP部分连接着监控节点，它主要将监控节点的数据通过转化装置接入以太网并为服务器提供数据接口。

只有这些组成部分都稳定合理的运行，整个监控系统才能成为一个稳定快速的系统。

5.3 上位机监控软模块化设计

监控系统数据操作频繁复杂，要想整个系统在开发的时候保持高效，系统功能模块化思想必不可少。只有将监控系统按功能模块化，才能单独的对每一部分进行设计和管理，每个模块只需留接口给别的模块，这样就能使整个程序编写简单、维护方便。系统的模块化设计如图5.2所示：

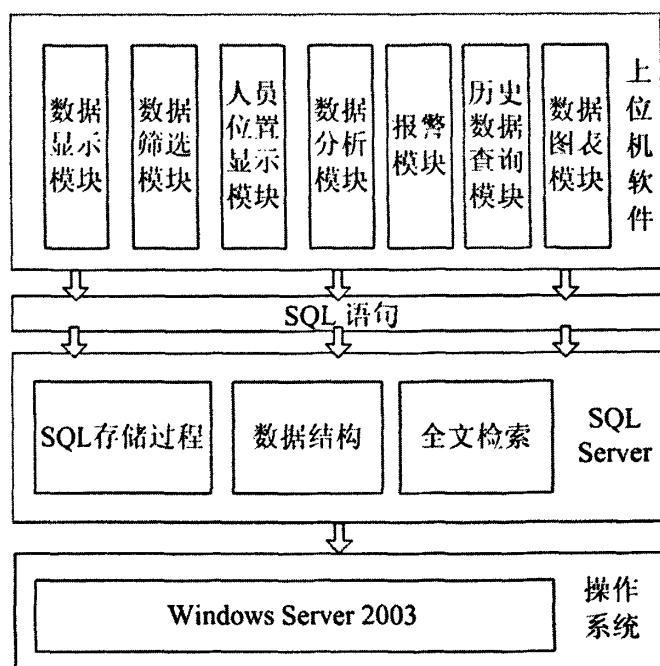


图5.2 系统模块化示意图

- 1) 数据显示模块：根据接收到的环境参数数据，将这些数据以节点编号为键值，实时显示在监控机界面上。
- 2) 数据筛选模块：用过一定的条件在数据库中对数据进行筛选，选出符合要求的数据。
- 3) 人员位置显示模块：通过接收到的便携节点的位置数据，将便携节点的位置以固定的显示比例显示在其跟随的距离它本身最近的那个固定节点旁边，让工作人员很直观的看到该名矿工的巨图位置。
- 4) 报警模块：根据国家矿井安全开采的要求，对每种环境数据定义个阀值，一旦某个数据超过了该项数据的阀值，就启动报警进程，提醒工作人员及时处理。
- 5) 数据图表模块：将接收到的监控数据，以图表的方式显示在监控界面上。
- 6) SQL存储过程：利用SQL存储过程，减少数据存储时对监控机机缘的占用，使数据的存储变得更高效、更稳定。
- 7) 全文检索：合理安排数据的存储格式，通过数据库间建立合理的关系，大幅提高数据查找时的速度。

5.4 开发环境

上位机操作系统采用Windows Server 2003, Windows Server 2003 是在可靠的 Windows 2000 Server 系列的基础上生成的，它集成了功能强大的应用程序环境以开发全新的 XML Web 服务和改进的应用程序，这些程序将会显著提高进程效率，为监控系统的安全和高效提供保障。

在性能优秀操作系统基础上，采用Microsoft Visual Basic 6.0作为后台开发环境，Visual Basic 是一种可视化的、面向对象和采用事件驱动方式的结构化高级程序设计语言，可用于开发 Windows 环境下的各类应用程序。它简单易学、效率高，且功能强大可以与 Windows 专业开发工具SDK相媲美。在Visual Basic环境下，利用事件驱动的编程机制、新颖易用的可视化设计工具，同时使用Windows内部的广泛应用程序接口（API）函数，以及动态链接库（DLL）、对象的链接与嵌入（OLE）、开放式数据连接（ODBC）等技术，可以高效、快速地开发Windows环境下功能强大、图形界面丰富的应用软件系统。

本系统数据库采用微软的SQL Server 2000, SQL Server 2000 是Microsoft 公司推出的SQL Server 数据库管理系统的一个经典版本该版本继承了SQL Server 7.0 版本的优点同时又比它增加了许多更先进的功能具有使用方便可伸缩性好与相关软件集成程度高等优点可跨越多种平台使用，是一个稳定、高效的成熟型数据库。

5.5 监控系统数据接收模块的设计

5.5.1 TCP/IP 概述

TCP/IP协议组之所以流行，部分原因是因为它可以用在各种各样的信道和底层协议（例如T1和X.25、以太网以及RS-232串行接口）之上。确切地说，TCP/IP协议是一组包括TCP协议和IP协议，UDP（User Datagram Protocol）协议、ICMP（Internet Control Message Protocol）协议和其他一些协议的协议组^[45]。

5.5.2 TCP/IP 整体构架概述

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：

- 1) 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）等。
- 2) 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。
- 3) 互连网络层：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）。
- 4) 网络接口层：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。

5.5.3.TCP/IP 如何工作

1) 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。

2) 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。

3) 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（网落时间协议）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。

4) 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，ICMP可以使TCP连接“体面地”终止。PING是最常用的基于ICMP的服务。

5) 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地址即发送包的IP地址、目的IP地址即接收包的IP地址、源端口即源系统上的连接的端口、目的端口即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。

由此可见其核心协议TCP，UDP，IP等向外提供的只是原始的编程界面，而不是直接的用户服务。用户服务靠核外的应用程序。TCP/IP网络环境下的应用程序是通过网络(应用)程序界面(套接字，socket)实现的。Winsock是TCP/IP编程最低级的WindowsAPI，其代码的一部分位于wsock32.dll中，另一部分位于Windows核心^[46]。使用WindowsAPI可以编写Internet服务器和客户端程序。网间应用程序之间的作用方式为客户机/服务器模式。TCP/IP协议核心与应用程序的关系如图5.3所示。

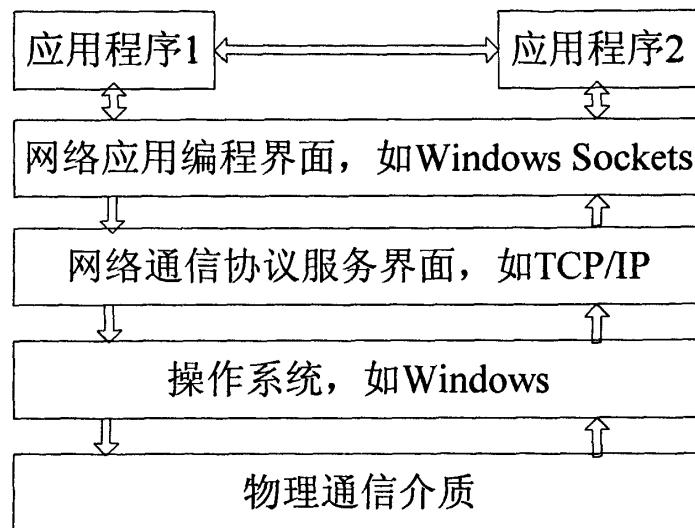


图5.3 应用程序与Windows Socket关系

5.5.4 Socket 通信

通过第三章的介绍，数据从监控节点采集开始，经过每个固定节点的中继，最终接入光纤以太网，这时就需要监控软件在服务器端通过一定的协议对数据进行接收，这里我们用到了Visual Basic中的Socket控件来实现这个功能^[47]。

WinSock并不是一种网络协议，它只是一个网络编程接口，也就是说，它不是协议，但是它可以访问很多种网络协议，你可以把他当作一些协议的封装。现在的WinSock已经基本上实现了与协议无关。你可以使用WinSock来调用多种协议的功能^[48]。实际上，WinSock就是TCP/IP协议的一种封装，你可以通过调用WinSock的接口函数来调用TCP/IP的各种功能^[49]。例如我想用TCP/IP协议发送数据，你就可以使用WinSock的接口函数Send()来调用TCP/IP的发送数据功能，至于具体怎么发送数据，WinSock已经帮你封装好了这种功能。

WinSock编程分为服务器端和客户端两部分^[50]，TCP服务器端的大体流程如下：对于任何基于WinSock的编程首先必须要初始化WinSock DLL库。然后必须创建一个套接字(Socket)。套接字可以说是WinSock通讯的核心。WinSock通讯的所有数据传输，都是通过套接字来完成的，套接字包含了两个信息，一个是IP地址，一个是Port口号，使用这两个信息，就可以确定网络中的任何一个通讯节点。当调用了Socket()接口函数创

建了一个套接字后，必须把套接字与你需要进行通讯的地址建立联系，可以通过绑定函数来实现这种联系。绑定时需要建立连接的本地的地址，包括地址族、IP和端口信息。设置IP地址和port端口时，必须把主机字节转化成网络字节后，才能用Bind()函数来绑定套接字和地址。当绑定完成之后，服务器端必须建立一个监听的队列来接收客户端的连接请求。现在基本上已经完成了一个服务器的建立，而客户端的建立的流程则是初始化WinSock，然后创建Socket套接字，再使用connect()来连接服务端。

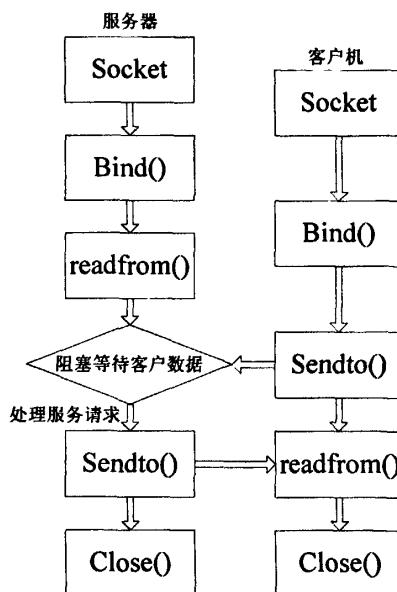


图5.4 无连接套接字接口时序图

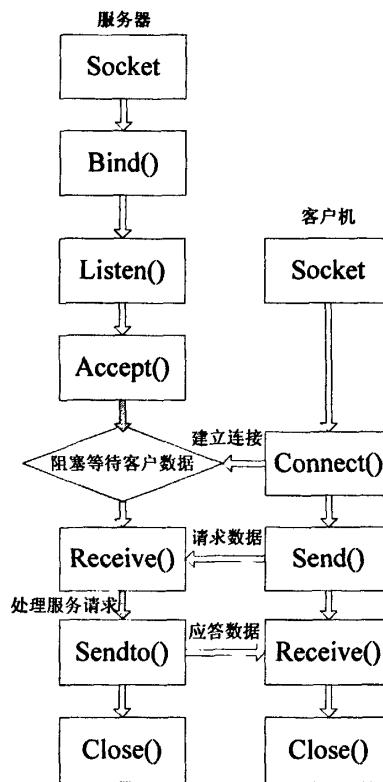


图5.5 面向连接套接字时序图

5.5.5 数据的接收

服务器端，使用`ServerSocket`监听指定的端口，端口可以随意指定，等待客户连接请求，客户连接后，会话产生；在完成会话后，关闭连接。客户端，使用`Socket`对网络上某一个服务器的某一个端口发出连接请求，一旦连接成功，打开会话；会话完成后，关闭`Socket`^[51,52]。客户端不需要指定打开的端口，通常临时的、动态的分配一个1024以上的端口。数据连接流程图如下所示：

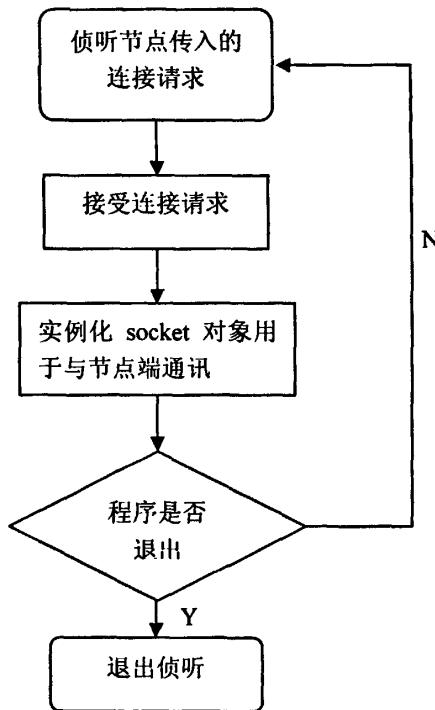


图5.6 数据连接流程图

5.5.6 数据的解析

成功接收数据之后，就开始按照第三章使用的API数据格式对数据进行解析。由于每次监控节点上送的数据中不止是监控数据包，其中还包含节点之间建立网络的广播包等数据，而监控软件不需要对这些广播包进行处理，所以首先要判断接收到的数据是否是包含监控数据的数据包，如果不是直接将这个包丢弃，如果是再对数据的完整性进行判断，如果数据完整就以位为单位对数据进行解析，交给显示模块、报警模块等后续模块进行处理。整个数据接收、解析的流程图如下所示：

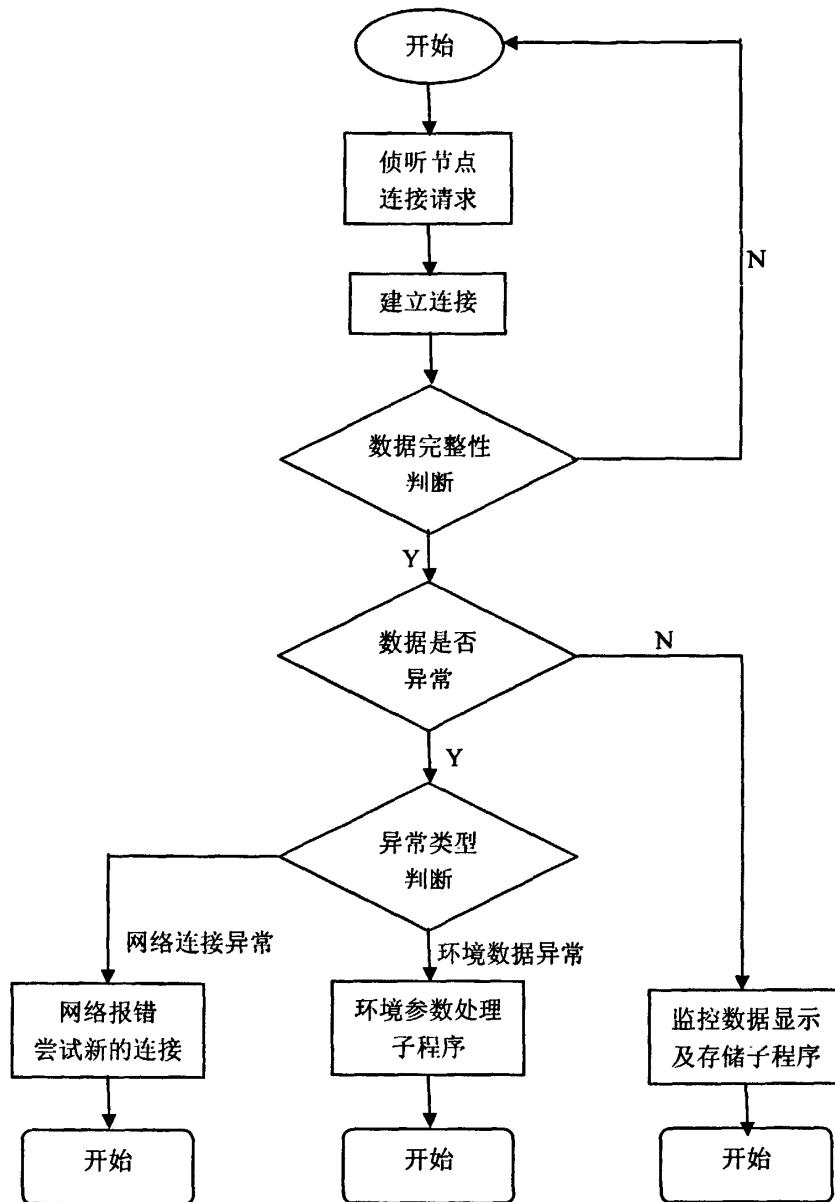


图5.7 数据处理流程图

至此，数据的接收和解析完成，监控软件已经得到了以节点编号为标志位的数据。

5.6 数据库的设计与实现

数据库是以一定的组织形式存放在计算机存储介质上相互关联的数据的集合，这些

数据按照一定的模型组织、描述和存储，具有较小的冗余度，较高的独立性和易扩展性，可为各种用户所共享。数据库经过这些年的发展不断的推陈出新，但关系数据库在其中依然占有重要的位置，这种类型的数据库是按照事物之间的联系组成一张一张的表，数据以最小重复方式存储，它拥有一些其他数据库不具有的有点：它是建立在严格的数学概念的基础上的；无论实体还是实体之间的联系都可以用关系表示，对数据的检索结果也是关系（表），数据结构简单清晰，易懂易用；存取路径对用户透明，因此具有更高的数据独立性和安全保密性，同时简化了开发人员的工作和数据库建立的工作。

5.6.1 SQL Server 2000 数据库介绍

SQL Server作为微软在Windows系列平台上开发的数据库，一经推出就以其易用性得到了很多用户的青睐，区别于FoxPro、Access小型数据库，SQL Server是一个功能完备的数据库管理系统。它包括支持开发的引擎、标准的SQL语言、扩展的特性(如复制、OLAP、分析)等功能。而像存储过程、触发器等特性，也是大型数据库才拥有的。SQL Server还拥有以下这些优点，使之成为一般建设数据库的首选^[53]：

1) 上手容易

话分两头，如果您的企业至今还未购置数据库，其中一个主要的原因可能就是认为它不好上手，那么，从SQL Server开始吧。毕竟，大多数的中小企业日常的数据应用是建立在Windows平台上的。由于SQL Server与Windows界面风格完全一致，且有许多“向导(Wizard)”帮助，因此易于安装和学习，有关SQL Server的资料、培训随处可得，并且目前国内具有MCDBA认证的工程师不在少数。

从另一个角度来讲，学习 SQL Server 是掌握其他平台及大型数据，如 Oracle,Sybase,DB/2 的基础。因为这些大型数据库对于设备、平台、人员知识的要求往往较高，而并不是每个人都具备这样的条件，且有机会去接触它们。但有了 SQL Server 的基础，再去学习和使用它们就容易多了。IT 行业的实践经验充分证明了这一点。

2) 兼容性良好

由于今天 Windows 操作系统占领着主导地位，选择 SQL Server 一定会在兼容性方面取得一些优势。另外，SQL Server 2000 除了具有扩展性，可靠性以外，还具有可

以迅速开发新的因特网系统的功能。尤其是它可以直接存贮 XML 数据，可以将搜索结果以 XML 格式输出等特点，有利于构建了异构系统的互操作性，奠定了面向互联网的企业应用和服务的基石。这些特点在.NET 战略中发挥着重要的作用。

3) 数据仓库

Microsoft SQL Server 2000 非常明显的改进就是增加了 OLAP(联机分析处理)功能，这可以让很多中小企业用户也可以使用数据仓库的一些特性进行分析。OLAP 可以通过多维存储技术对大型、复杂数据集执行快速、高级的分析工作。数据挖掘功能能够揭示出隐藏在大量数据中的倾向及趋势，它允许组织或机构最大限度的从数据中获取价值。通过对现有数据进行有效分析，这一功能可以对未来的趋势进行预测。

4) 增强的在线商务

Microsoft SQL Server 2000 简化了管理、优化工作，并且增强了迅速、成功的部署在线商务应用程序所需的可靠性和伸缩性。其中，用以提高可靠性的特性包括日志传送、在线备份和故障切换群集。在伸缩性方面的改进包括对多达 32 颗 CPU 和 64 GB RAM 的支持。通过自动优化和改进后的管理特性--诸如数据文件尺寸的自动管理、基于向导的数据库拷贝、自动内存管理和简化的故障切换群集安装与管理，在线商务应用程序能够被迅速部署并有效管理。

5.6.2 选用 Visual Basic 作为数据库开发平台

Visual Basic 具有数据库连接和数据处理功能，因此完全有资格作为数据库应用程序的开发环境。Microsoft 公司把许多新的数据访问功能加到 Visual Basic 中，使得该产品成为桌面数据库市场中 Access、FoxPro 及 Paradox for Windows 的直接竞争者。与普通的数据库系统相比，用 Visual Basic 作为数据库开发平台有以下优点：

- 1) 简单性。Visual Basic 提供了数据控件，利用该控件，用户只要编写少量的代码甚至不编写任何代码就可以访问数据库，对数据库进行浏览。
- 2) 灵活性。Visual Basic 不像一般的数据库(如 Access)那样局限于特定的应用程序结构，也不需要用某些指令对当前打开的数据库进行操作，因而比较灵活。
- 3) 可扩充性。Visual Basic 是一种可以扩充的语言，其中包括在数据库应用方面

的扩充。在Visual Basic中，可以使用ActiveX控件（以前版本中称为VBX或OLE控件），这些控件可以由Microsoft公司提供，也可以由第三方开发者提供。有了这些控件，可以很容易地在Visual Basic中增加新功能，扩充Visual Basic数据存取控制的指令系统。在其它数据库开发平台中，目前还不具备ACtiveX控件。

同时Visual basic还可以通过三种方式连接多种数据库。

1) Access数据库引擎 Access是Visual Basic的“内部数据库”，即在Visual Basic中可以直接建立Access数据库。同时，通过Access数据库引擎，还可以使用下列数据库：Btrieve(. DAT)、dBASE(. DBF/. NDX)、Foxpro(. DbF/. CDX/. NDX)、Paradox(. DB, . PX)。

2) Microsoft ODBG 通过Microsoft ODBC驱动程序，可以使用下列数据库 Microsoft SQL Server、Oracle、Sybase SQL Server、Excel(. XLS)、Text(. TXT)、Access(. MDB)、Btrieve、DBASE、FoxPro、Paradox，上面所列的数据库中，除前三种外，其余数据库均包含在一套Microsoft ODBC桌面数据库驱动程序及Microsoft Query 中。

3) Visual Baisc还可以通过第三方的ODBC对其他一共该接口的数据库进行连接。

因此Visual Basic几乎可以同任何一种数据库联系，同时它简单、易用，因此本系统选取Visual Basic作为数据库的开发平台。

5.6.3 数据表的设计

根据数据类型的不同，将数据按照固定节点、便携节点、人员考勤等分为几张表。

1) 固定节点数据表

除了固定节点采集的环境参数等必要的数据位外，为了系统数据的唯一性和便于后期查找，因此在固定节点数据表中需要添加数据上传时间和每条数据标号等。数据上传时间以服务器接收到该条数据为准，在接收数据的同时将得到的当前系统的时间添加入数据库中。由于在同一时间可能有多个节点上传数据，因此不能用时间作为区分数据的键值，本系统通过SQL中的一条语句getid()得到一个序号，该序号是一个32位的全球唯一标识码如“E36D57E0-F6F6-4451-B445-72999812EEA6” 固定节点的表结构如图5.8所示：

列名	数据类型	长度
FlagBit	varchar	50
NodeID	int	4
Temperature	char	10
ThickNess	varchar	2
Distance	float	8
Power	float	8
CreateDateTime	datetime	8

图5.8 固定节点表结构

2) 编写节点数据表

便携节点除了固定节点的数据之外，由于编写节点还有人员定位的作用，因此还需要添加两位来实现该功能。当前距离最近的固定节点号、距离该固定节点的距离。

列名	数据类型	长度
FlagBit	varchar	50
HatID	int	4
NodeID	int	4
Temperature	char	10
ThickNess	varchar	2
Distance	varchar	2
CreateDateTime	datetime	8

图5.9 便携节点表结构

5.6.4 存储过程

存储过程（Stored Procedure）是一组为了完成特定功能的SQL语句集，经编译后存储在数据库中。用户通过指定存储过程的名字并给出参数（如果该存储过程带有参数）来执行它。存储过程是数据库中的一个重要对象，任何一个设计良好的数据库应用程序都应该用到存储过程。

存储过程是由流控制和SQL语句书写的过程，这个过程经编译和优化后存储在数据库服务器中，应用程序使用时只要调用即可。使用存储过程有以下的优点：

- 1) 存储过程的能力大大增强了SQL语言的功能和灵活性。存储过程可以用流控制语句编写，有很强的灵活性，可以完成复杂的判断和较复杂的运算。
- 2) 可保证数据的安全性和完整性。通过存储过程可以使没有权限的用户在控制之下间接地存取数据库，从而保证数据的安全。通过存储过程可以使相关的动作在一起

发生，从而可以维护数据库的完整性。

3) 再运行存储过程前，数据库已对其进行了语法和句法分析，并给出了优化执行方案。这种已经编译好的过程可极大地改善SQL语句的性能。由于执行SQL语句的大部分工作已经完成，所以存储过程能以极快的速度执行。

4) 可以降低网络的通信量。

5) 使体现企业规则的运算程序放入数据库服务器中，以便集中控制。当企业规则发生变化时在服务器中改变存储过程即可，无须修改任何应用程序。企业规则的特点是要经常变化，如果把体现企业规则的运算程序放入应用程序中，则当企业规则发生变化时，就需要修改应用程序工作量非常之大（修改、发行和安装应用程序）。如果把体现企业规则的运算放入存储过程中，则当企业规则发生变化时，只要修改存储过程就可以了，应用程序无须任何变化。

本系统中固定节点存储过程的核心代码如下所示：

```
CREATE PROCEDURE NodeSave
    @FlagBit  varchar(50),
    @NodeID   varchar(2),
    @ThickNess varchar(2),
    @Temperature varchar(2),
    @Distance  varchar(2),
    @Power     varchar(4),
    @CreateDateTime datetime
AS
    INSERT Node
        (FlagBit,
        NodeID,
        ThickNess,
        Temperature,
        Distance,
        Power,
        CreateDateTime)
    VALUES
        (
        @FlagBit,
        @NodeID,
        @ThickNess,
        @Temperature,
        @Distance,
```

```
@Power,  
@CreateDateTime )  
GO
```

5.7 数据图表功能的设计与实现

图表能直观的显示当前监控数据的值和趋势，是数据分析中经常使用的方法，一般的图表只能在某个固定的坐标系下将数据以点表示，再将数据点之间连线从而实现数据图表。为了加强系统的实用性和操作的便利性，本系统采用了基于teechart控件的数据图表。

5.7.1 Teechart 控件介绍

TeeChart 是西班牙Steema SL公司开发的图表类控件，主要用来生成各种复杂的图表。开发人员可以在熟悉和喜欢的开发环境中(如VB、VC、Delphi、PB 等)利用TeeChart 开发出各种图形，通过TeeChart 提供的各种属性或方法来控制生成的图形，TeeChart 可以无缝地融入到应用程序中。它还是一款提供上百种2D和3D图形风格、40种数学和统计功能、加上无限制的轴和22种调色板组件供选择，TeeChart还包括一个强大的、完整的编辑对话框，几乎可用于每个组件和子组件，允许你快速的设计复杂图表应用程序。

5.7.2 系统图表缩放功能实现

下图是编号为1的固定节点，在2009-4-13日10点9分到10点11分之间的瓦斯浓度记录，在实验中我们选择每5秒钟监控节点向上传送一次数据，因此图中一共有25个数据（如图5.10所示），在当前界面情况下我们可以通过鼠标左键选取其中其中的某几点数据就可以得到所选取点的放大图像。如图5.11所示：

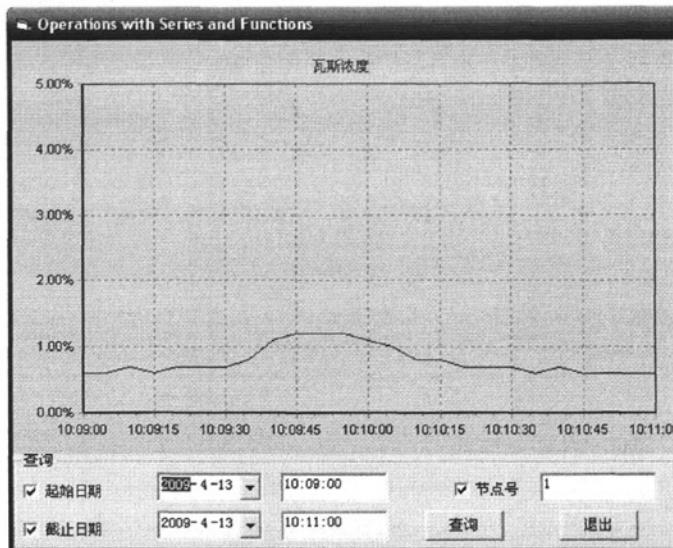


图5.10 25个数据图像显示

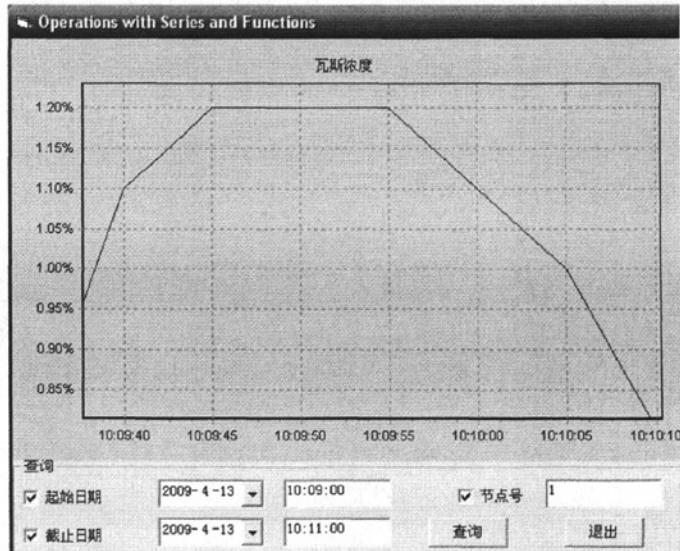


图5.11 图像局部放大后的效果

5.7.3 系统图表数据对比功能的实现

历史数据对比对井下环境参数的规律统计提供基础，如果在同一个图像中可以同时显示不同时间的两条数据曲线，则可以让工作人员更直观的观察到某一参数在不同时间的变化。下图显示的是编号为1的固定节点在两天中同一时间的瓦斯浓度对比图：

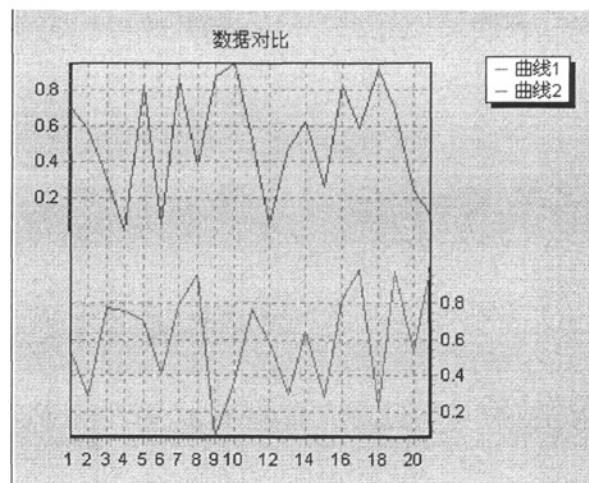


图5.12 浓度对比曲线图

5.7.4 数据饼图的实现

TeeChart拥有数据的统计功能，只要简单的选取数据库中某一时间段的数据，通过TeeChart内部的百分比算法，就可以得到选取时间段上每种数据所占的百分比，让操作人员直观的看到数据的分布。

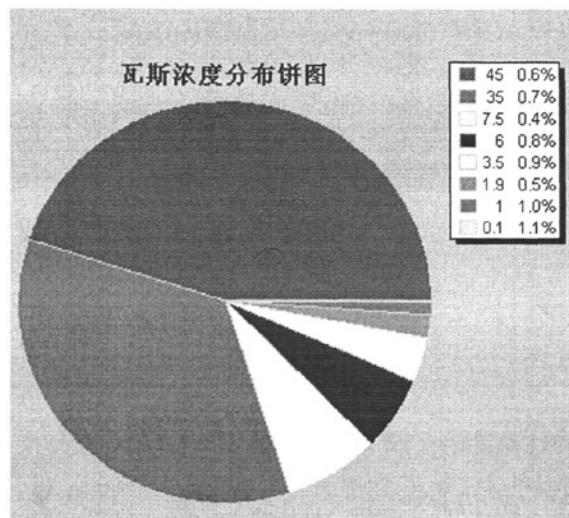


图5.13 系统数据饼图

5.8 历史数据查询功能的设计与实现

分析每天中那个时间段井下温度最高、那个时间段瓦斯浓度相对较高、事故过后了解事故时人员的位置，这些功能都可以通过对历史数据的查询来实现。这其中的一部分功能已经在图表界面中实现。但是为了使工作人员对历史数据的查询和分析更加方便，本系统在这个模块中主要通过多条件联合对数据进行筛选。例如，如果我们要查找节点1在某一时间内瓦斯浓度超过0.7%的数据，我们就需要时间、节点编号、瓦斯浓度值这三个条件来完成这项任务。当然对历史数据分析的种类有很多，所以我们必须增加数据筛选的条件，同时每个条件都可以单独对数据进行筛选，这样多条件间的组合就有很多种，可以完成操作人员对历史数据的多种统计和对比。下图所示是查找节点编号为2、时间在2009-3-15九点至2009-3-15十点之间、瓦斯浓度在0.50%至0.60%范围内、节点附近温度在12℃-13℃之间的所有数据。

The screenshot shows a Windows application window titled '历史数据' (Historical Data). The main area displays a table titled '数据' (Data) with columns: 节点号 (Node ID), 气体浓度 (Gas Concentration), 温度 (Temperature), 距离 (Distance), 电量 (Electricity), and 时间 (Time). The data table contains 15 rows of historical data for node ID 2. Below the table is a '查询' (Query) panel with the following fields:

<input checked="" type="checkbox"/> 起始日期	2009-3-15	09:00:00	<input checked="" type="checkbox"/> 截止日期	2009-3-15	10:00:00	
瓦斯浓度	数值范围	0.50%	—	0.60%	<input checked="" type="checkbox"/> 节点号	2
温度	数值范围	12℃	—	13℃	<input type="button" value="查询"/>	<input type="button" value="退出"/>

图5.14 多条件数据筛选

5.9 监控界面的设计与实现

整个监控界面显示分为两层，顶层显示的是当前整个煤矿矿区总的环境参数情况，

这个界面目的是让操作人员可以很直观的观察到整个煤矿当前的运行状态。界面中单击某个区域，就会显示当前点击区域中具体的巷道情况。这个细化的图层，可以显示出巷道固定节点的位置、井下工作人员位置、节点附近环境参数及网络运行状态等信息。系统截图如下所示：

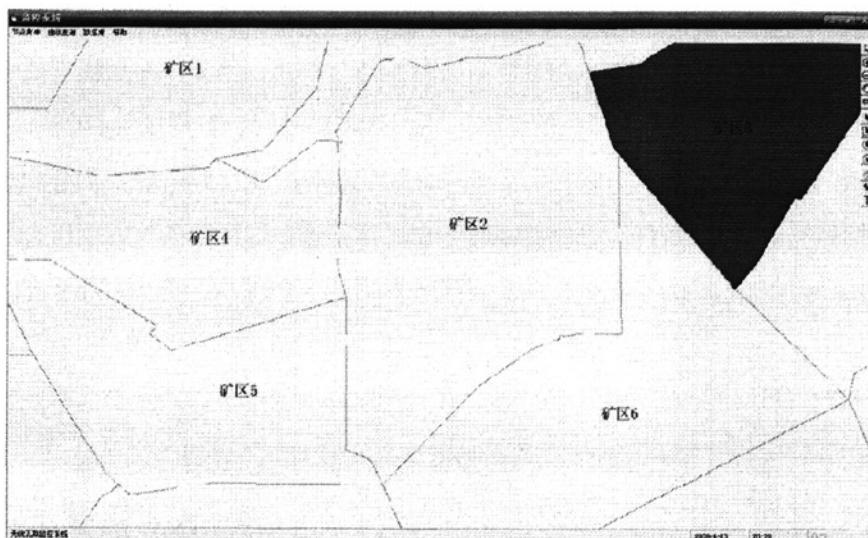


图5.15 监控系统主界面

如图5.15所示，整个监控界面显示了6个矿区的基本瓦斯浓度情况，当矿区瓦斯浓度正常时为绿色，当矿区瓦斯某个节点附近瓦斯浓度超标时，整个矿区的颜色变为红色并发出警报，操作人员只需单击该矿区区域就会进入该矿区的细化界面中对股市进行具体观察。如图5.16在矿区1的细化监控界面中只要单击固定节点1的图标即可显示出固定节点1当前监控数据的具体曲线图便于操作人员记录和观察。井下工作人员则显示在其跟随的固定节点附近并且在便携节点下方显示出该点距离其跟随的节点的具体距离从而实现井下工作人员的定位显示。

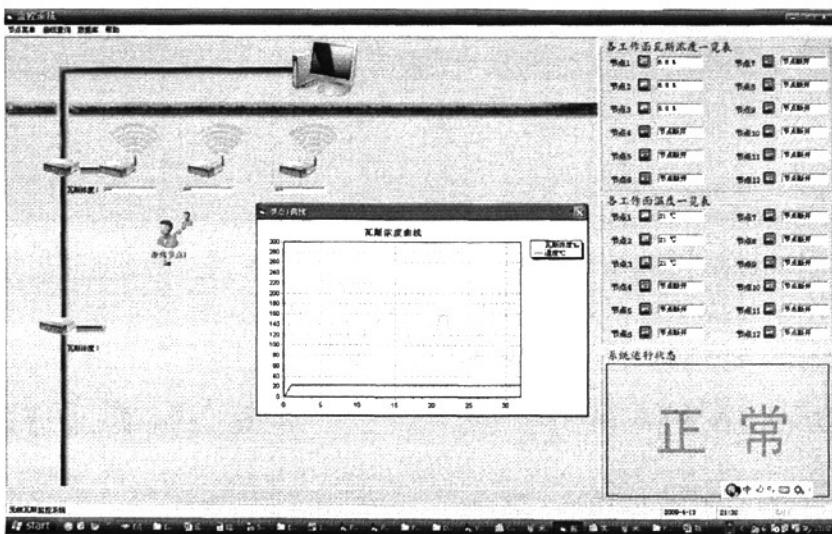


图5.16 矿区1的细化监控界面

本章小结

本章主要介绍了上位机监控软件的设计与实现，首先介绍了上位机软件的设计思想、上位机软件结构和开发平台的基础知识，接着详细介绍了上位机软件的设计和开发，根据不同的功能模块逐一介绍并给出了核心开发代码，其中包括数据接收和处理、数据库的建设和数据存储调用以及图形界面的开发等。实现了实时自动显示监控数据、人员位置信息，并对异常数据进行报警操作无需人工参与的高效率监控软件。

6 系统测试

6.1 测试方案

本方案测试是在实验室所在大楼中搭建的模拟环境中进行的，分别对环境参数采集精确度、系统通信稳定性及人员定位三方面进行了测试。

6.1.1 环境参数采集精度

本部分测试分瓦斯浓度及温度两个部分。

1) 瓦斯浓度采集精度。实验环境如图所示：将监控机与放置在固定体积的密闭气室中的节点直接连接，每次向气室中充入 0.5% 体积的瓦斯，并记录实验数据。测试中需保证气体扩散均匀且气压恒定，因此每次向气室中充入定量瓦斯气体后需等待 1 分钟，待气体扩散均匀后再从气室中抽出等量扩散后的气体，以保证实验数据的准确性。

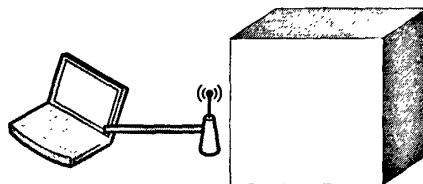


图 6.1 瓦斯浓度采集精度实验环境

表 6.1 测量数据：

气体浓度	测量浓度	误差
0.5%	0.62%	0.12%
1.0%	1.15%	0.15%
1.5%	1.62%	0.12%
2.0%	1.86%	0.14%
2.5%	2.58%	0.08%
3.0%	3.20%	0.20%
3.5%	3.43%	0.07%
4.0%	4.16%	0.16%
4.5%	4.33%	0.17%
5.0%	5.11%	0.11%

如表 6.1 所示, 瓦斯浓度测量误差不超过 0.2%, 完全能满足矿井下瓦斯监测的需求。

2) 温度采集精度测试

采用与瓦斯精度测试相同的方法将节点放置在高低温试验箱内, 每次将温度提高 1 ℃并记录数据, 实验结果与实际温度值完全吻合。

6.2 系统通信稳定性实验

系统通信稳定性实验在如图所示的环境中进行。固定节点布置在 12、13 两层, 由于楼梯处的拐角对信号传输影响较大, 因此在楼梯间中增加一个固定节点保证通信。上位机放置在 14 层东边的一个教室中, 上位机通过以太网线交换机 1 连接, 交换机 1 与交换机 2 之间通过光纤网络连接。

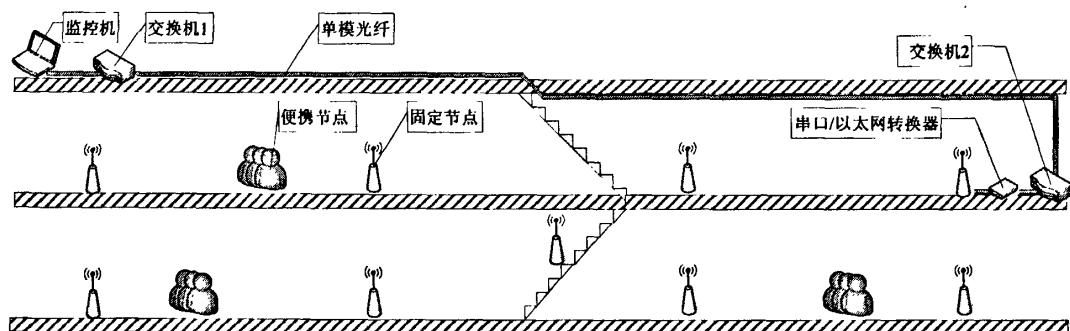


图 6.2 系统通信稳定性测试

系统运行时单个节点工作电流保持在 80mA 左右, 在 8 个小时的测试中系统始终保持正常通信, 未出现异常数据及数据丢失等情况。系统测试时部分实物如下图所示:

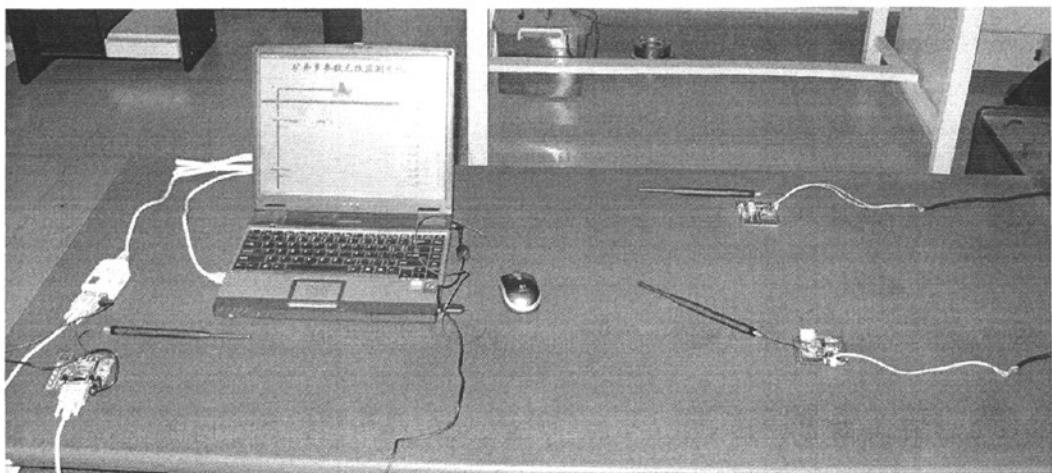


图 6.3 系统测试部分实物图

经测试该系统具有操作简单、性能优异、安全可靠等优点，而且无线节点的易延伸性为安装维护提供了方便。监测数据全部上网，极大的提高了管理人员的工作效率，降低了工作量。本系统的优良功能可实现煤矿安全的全面、实时、自动的监测，使用本系统将及时发现安全隐患，采取防护措施，从而减少煤矿事故的发生。为煤矿安全生产提供了保障。

7 结论与展望

7.1 总结

本文以2006年国际科技合作项目：《矿井瓦斯浓度、温度监测与安全预警传感网络研究》为背景，通过对山西省古交市相关煤矿的现场考察，分析了当前煤矿监控系统的不足，提出了一种基于ZigBee技术集煤矿安全检测和人员定位为一体的煤矿井下无线光纤混合网络综合监测系统，弥补了当前煤矿监控系统由于巷道掘进带来的实时性和灵活性缺陷，进一步提高了煤矿安全监控系统的可靠性。

文中介绍了该系统的设计原理和具体实施方案，分析了系统的硬件电路及系统软件的设计思路。在系统中，为实现井下远程无线监测，提出采用光纤网络和无线网络相结合的方式来实现煤矿安全监控系统的新的网络组建方法，设计出适用于煤矿安全系统的井下无线监控网络系统。这样的系统解决了我国当前的井下监控网络由于以有线网络组成，必然会在网络的控制范围、系统的可扩展性以及信息采集的灵活性上存在一定缺陷的问题。

人员定位方面，根据井下的实际环境和要求，提出了基于RSSI值的区域差分定位算法。该定位算法经测试可以有效减少井下恶劣环境对信号的衰减而造成的定位差异，以及环境差异对相邻节点衰减率不同而产生的定位差异。是一种适用于井下的成本小、精度较高的人员定位系统。

由于本文开发的系统涉及到许多新技术领域，且作者系统开发经验欠缺，因此系统还存在一些不足和需改善的地方：

- 1) 由于本文研究的系统还处在实验阶段并未产品化，而井下恶劣的环境对节点的防爆性、稳定性、抗干扰性等方面势必有更高的要求，因此需要在防爆性、稳定性和抗干扰性方面对监控节点做进一步的修改和完善。
- 2) 矿井下的环境千差万别，单一的路由协议不一定能满足所有的矿井，因此在现有基础上可以针对特定的矿井对网络的路由协议做一些调整。
- 3) 当前定位算法对固定节点的密度有一定要求，可以通过对定位算法的进一步改

进降低对固定节点密度的要求。

4) 本文系统只是对井下的瓦斯浓度和温度参数进行采集，可以考虑在固定节点上安装一些其他类型的传感器，增加网络的利用率。

7.2 展望

随着信息技术的进一步发展，Zigbee技术以其体积小、功耗低、成本低的特点使得Zigbee技术在工业安全监控领域具有独特的优势。ZigBee技术必然在工业安全监控领域中起到更大的作用，它可以将监控的范围扩大到任意角落，提高监控网络的灵活性。根据不同应用环境采用不同的网络规划，可以大大提高无线网络的效率，减少节点的消耗。

综上所述，ZigBee技术在煤矿井下监控领域有很广阔的应用前景，本系统的研究对于井下安全监控系统有一定的使用价值和实践意义。

参考文献

- [1] 顾秀根, 刘过兵. 我国煤矿安全监察机制探析[J]. 华北科技学院学报. 2005, vol.2(3): 61-64.
- [2] 曹新. 中国能源发展战略与石油安全对策研究[J]. 经济研究参考. 2007(57): 2-15.
- [3] 窦永山. 英国的煤矿安全监察体制[J]. 当代矿工. 2002(4): 34-35.
- [4] 张勇. 美国煤矿安全生产立法及对我国的启示[J]. 华北科技学院学报. 2002(4): 10-12.
- [5] 胡殿明. 煤炭企业信息化建设探究[J]. 河南科技. 2005(3):14-15.
- [6] 杨世兴. 煤矿监测监控系统的现状与发展[J]. 安防科技. 2004(5): 39-41.
- [7] 胡敬东, 连向东. 我国煤炭科技发展现状及展望[J]. 煤炭科学技术. 2005, vol.33(1): 21-24.
- [8] 张红霞. KJ-90型煤矿综合监控系统在屯兰矿的应用[J]. 科技情报开发与经济. 2003, 13(8): 265-266.
- [9] 于海斌, 曾鹏等. 智能无线传感器网络[M]. 科学出版社. 2006.
- [10] 付芳, 张思东, 顾瑞红. 基于 IEEE 802.15.4 和 ZigBee 构建低速无线个域网. 北京交通大学现代通信研究所. 2005.7.
- [11] 蒋伟民, 毕红军. 五种主流近距离无线技术比较[J]. 科技资讯导报. 2006.14.
- [12] 张莉. 近距离无线通信技术及应用前景[J]. 电信技术. 2005,11: 9-11.
- [13] 傅民仓, 冯立杰, 李立波. 短距离无线网络通信技术及其应用[J]. 现代电子技术. 2006.
- [14] ZigBee alliance. ZigBee Alliance ZigBee specification, ZigBee document, version 1.0 2004.12.
- [15] 王宇. 无线局域网基本原理及前沿应用. 中国数据通信. 2003,8: 34-39.
- [16] 王任, 刘劲峰, 于哲. 蓝牙技术的应用. 信息技术. 2002,7: 47-48.
- [17] 蒋挺, 赵成林. 紫蜂技术及应用[M]. 北京邮电大学出版社. 2006.6.
- [18] 贺文. 基于 IEEE 802.15.4/ZigBee 的无线传感网络研究[D]. 浙江大学硕士论文.

2006.

- [19] IEEE 802.15.4, Part 15.4: Wireless Lan Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), October, 2003.
- [20] Bob Heili. Emerging Standards: Where does ZigBee fit. ZigBee Alliance, October, 2004.
- [21] 李文峰. 煤矿瓦斯、可燃性气体及井下环境参数的检测[J]. 煤矿安全. 2006(01): 49-50.
- [22] 陈捷频. 煤矿爆炸性气体的检测[J]. 煤矿安全. 1998(04): 12-15.
- [23] 熊振华. 基于 ZigBee 的井下无线监控网络的研究与开发[D]. 合肥工业大学硕士论文. 2007.
- [24] 李国民. 基于 ZigBee 的瓦斯浓度采集系统的研究与开发[D]. 西安科技大学硕士论文. 2008.
- [25] Patrick Kinney. ZigBee Technology. Wireless Control that Simply Works, 2005
- [26] www.maxstream.net
- [27] 王胜坤. 矿井无线通信系统探讨[J]. 自动化与仪表. 1998(03): 1-4.
- [28] 杨振江. 智能仪器与数据采集系统中的新器件及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007: 109-126.
- [29] Capetanakis J.I. Tree algorithms for Packet broadcast channels [J], IEEE Information, Theory, 1979, 25(5):505-515.
- [30] Roberts. ALOHA Packet System with and without slots and Capture [J], Computer Communication. Rev, 1975, 5(2).
- [31] 孙利民, 李建中等. 无线传感器网络[M]. 清华大学出版社. 2005.
- [32] Grehan R, Moote R, Cyliax I. Real-time Programming. A Guid to 32-bit Embedde Development. Beijing: China Electric Power, 2000.
- [33] 王海涛. Ad Hoc 网络的体系结构和分簇算法研究[D]. 解放军理工大学. 2003.
- [34] Koen F, angendoen and Niels Reijers. Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison [J]. Computer Networks, 2003(43):499-518.

- [35] Andreas Savvides, Heemin Park, and Mani B. Srivastava. The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems [M]. 2006.43(6):99-118.
- [36] C. Savarese, K. Langendoen, and J. Rabaey. Robust Positioning algorithms for distributed AD-Hoc wireless sensor network [J]. In USENIX Technical Annual Conference, 2002:317-328.
- [37] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报. 2005,16(5): 857-868.
- [38] 马祖长, 孙怡宁. 无线传感器网络节点的定位算法[J]. 计算机工程. 2004(4): 85-88.
- [39] Niculescu D, Nath B. DV based positioning in AD-Hoc Networks [J]. Journal of Telecommunication Systems, Vol. 22, No.4, 2003:267-280.
- [40] Dmitri Perkins and Ranesh Tumati, Computing, and Communications (IPCCC 2004), Phoenix, Arizona, April 15-17, 2004:723-729.
- [41] Yi Shang, Wheeler Runl, and Ting Zhang. Localization from mere connectivity [J]. In MobiHoc 03, Annapolis, Maryland, USA, 2003:201-212.
- [42] 陈维克, 李文峰, 袁兵. 基于 RSSI的无线传感器网络加权质心定位算法[J]. 武汉理工大学学报. 2006,30(2): 265-268.
- [43] 贾广新, 皮兴宇. 无线传感器网络节点的协作式定位[J]. 传感器与一起仪表. 2006.22(9):155-157.
- [44] Hunt.L Turi.R. A new algorithm for constructing approximate transformations for nonlinear systems [J], IEEE Trans AC, 1993,38(10): 1553-1556.
- [45] Nikolakopoulos G, Koundourakis M. An integrated system based on Web and/or WAP framework for remote monitoring and control of industrial processes. Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, Electr. & Comput. Eng. Dept. Patras Univ. Greece, 2003.
- [46] 程庭. 应用 Socket 套节字技术实现文件远程传输[J]. 河南科学. 2002, Vol.20 (5).
- [47] 张数兵, 庞勇. Winsock 网络通信程序的开发[J]. 华北工学院学报. 2002,Vol.23 (2).
- [48] 程咏喜, 蒋珉. 基于 TCP/IP 协议的 Winsock 网络编程及应用[J]. 计算机时代. 2004, No.7:29-30.

- [49] 邓全良. WinSock 网络程序设计[M]. 中国铁道出版社. 2002.
- [50] 王刚, 林立志. 基于 Windows 的 TCP/IP 编程[M]. 清华大学出版社. 2002.
- [51] 施炜, 李铮, 秦颖. Windows Sockets 规范及应用, Windows 网络编程接口[M]. 清华大学出版社. 2000.
- [52] Forouzan B A, Chung S F. TCP/IP Protocol Suite [M]. The McGraw-Hill Companies Inc, 2000. 602-603
- [53] 申时凯, 李海雁. 数据库应用技术(SQL Server 2000)[M]. 中国铁道出版社. 2005.

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 孙立新, 张记龙, 王志斌 等. 基于无线 mesh 网的井下安全监控系统设计与实现[J].
煤矿安全 (已录用).

致 谢

在课题的研究和本论文的写作过程中，自始至终得到了我尊敬的导师张记龙教授的悉心指导和无微不至的帮助，张老师以他渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，严以律己、宽以待人的崇高风范使我终生收益。不仅使我在学术上掌握了基本的研究方法，还使我明白了许多待人接物与为人处世的道理。在此，谨对恩师表示衷心的感谢！

在研究生学习过程中，我还得到了田二明老师、李晓老师、王志斌老师以及光电工程中心的其他老师和师兄弟姐妹的热心帮助和鼓励支持，在此向你们说声：谢谢！

感谢我挚爱的父母多年来对我学业上的支持和生活上的关爱，还有朋友的关心，正是他们的爱，理解和支持，我才得以顺利完成学业。

课题得到了科技部国际合作项目资金支持和山西省光电信息与仪器与工程技术研究中心的资助，在此表示感谢！

最后，向对本论文进行评审的各位专家、老师表示真挚的谢意！