

Location Method and Application of
Underground Wireless Sensor Network



地下无线传感器网络 定位方法及应用

陈光柱 沈春丰 周莉娟 孟庆春 | 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

地下无线传感器网络 定位方法及应用

陈光柱 沈春丰 周莉娟 孟庆春◎著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内容简介

本书是专门针对地下工程环境监测、人员及设备定位应用的地下无线传感器网络定位方法及应用介绍的著作。全书共 5 章，内容涉及地下无线传感器网络体系结构、本质安全型网络节点系统、网络节点能量收集方法、协同感知方法和自主定位跟踪方法。

本书可以为计算机科学、测控技术、信息科学、自动化等领域从事无线传感器网络研究的相关专业技术人员提供参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

地下无线传感器网络定位方法及应用 / 陈光柱等著. —北京：电子工业出版社，2017.1

ISBN 978-7-121-30549-8

I. ①地… II. ①陈… III. ①无线电通信—传感器—无线电定位法 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 294633 号

责任编辑：董亚峰

特约编辑：田学清 赵海军等

印 刷：北京季蜂印刷有限公司

装 订：北京季蜂印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱

邮编：100036

开 本：720×1000 1/16 印张：14.75 字数：284 千字

版 次：2017 年 1 月第 1 版

印 次：2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价：49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：xuye@phei.com.cn。

前言

地下工程是深入地面以下为开发利用地下空间资源所建造的地下土木工程。它包括地下房屋和地下构筑物、地下铁道、公路隧道、水下隧道、地下共同沟和过街地下通道等。在建设与维护地下工程中,为了保证地下工程施工及维护的安全性,需要对相关岩土应力特性、地下结构,以及地下施工设备及人员进行有效的监测监控。无线传感器综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等,能够通过各类集成化的微型传感器协同地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息。这些信息通过无线方式被发送,并以自组多跳的网络方式传送到用户终端,从而实现物理世界、计算世界及人类社会三元世界的连通。无线传感器网络已经在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等领域得到了广泛应用。

将无线传感器网络技术应用于地下工程,可有效地构建地下工程环境及施工设备、人员的有效监测监控系统,保障地下工程的安全。地下工程的地理几何形状大多数呈现一种狭长形状,因此,在应用无线传感器网络对其监测时,网络节点需要沿狭长形区域布置,也就是地下无线传感器网络的拓扑结构表现为链式拓扑结构。因此,地下无线传感器网络具有一些自身的特点,需要对其关键技术进行深入研究。

从2006年开始,在中国博士后科学基金项目、高等学校博士学科点专项科研基金、四川省应用基础研究计划项目、江苏省“六大人才高峰”资助项目、江苏省高校科研成果产业化推进工程项目、机械系统国家重点实验室开放课题、成都理工大学矿业装备技术科研创新团队等的资助下,对面向地下工程的无线传感器网络系统结构、通信模式、节点开发、节点能量收集、定位算法进行了较为深入的探讨。本书正是这些研究工作的一个小结。

全书共5章,包括地下无线传感器网络体系结构、本质安全型网络节点系统、

网络节点能量收集方法、协同感知方法和自主定位跟踪方法。地下无线传感器网络体系结构主要介绍地下无线传感器网络的拓扑模型、地下非理想无线通信模型的建立过程,以及节点的布置策略。本质安全型网络节点系统主要介绍网络节点本质安全电源电路的设计与分析、各网络节点硬件与软件设计,以及网络节点系统的性能分析。节点能量收集方法主要介绍压电发电技术、变频发电技术,以及压电-电磁宽频发电技术。协同感知方法主要介绍网络工作调度策略和二元协同目标感知策略。自主定位跟踪方法主要介绍节点定位工作流程、中垂线定位方法、基于虚拟衍生点的估计定位算法、基于 Voronoi 图的三维定位算法,以及基于 RBF 神经网络的运动目标跟踪预测方法。

在对本书内容进行研究的过程中,笔者得到了许多学者的帮助,在此表示感谢。特别感谢朱真才教授的指导与帮助。特别感谢罗成名、付海岭、周公博、张蕾、卢倩等所付出的辛勤劳动。感谢电子工业出版社的吴长莘老师、朱雨萌老师所付出的辛勤劳动。

本书所用资料不限于书后所列的参考资料。在此谨向在书中提及与未提及的单位和作者表示感谢。

由于作者水平有限,本书难免有疏漏和欠妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 8 月

目 录

第 1 章 地下无线传感器网络体系结构.....	1
1.1 引言	1
1.2 地下无线传感器网络模型.....	3
1.2.1 无线传感器网络拓扑结构	3
1.2.2 地下无线传感器网络结构	3
1.3 地下非理想无线通信模型.....	7
1.3.1 引言	7
1.3.2 采煤工作面无线通信信道衰落模型	9
1.3.3 采煤工作面无线通信信噪比模型	15
1.4 簇头节点布置策略	17
1.4.1 簇头节点布置模型	17
1.4.2 簇头节点最低密度布置数学模型	18
1.4.3 簇头节点非均匀最低密度布置算法	22
1.4.4 簇头节点动态选择算法	22
1.4.5 簇头节点动态选择算法仿真测试	24
参考文献	26
第 2 章 本质安全型网络节点系统.....	29
2.1 引言	29
2.2 网络节点本质安全电源电路.....	30
2.2.1 网络节点的硬件结构	30
2.2.2 本质安全电源电路设计与分析	32
2.3 网络节点电路设计	41
2.3.1 目标节点电路设计	41

2.3.2	感知节点硬件电路设计	46
2.3.3	网关硬件电路设计	50
2.4	网络节点系统软件设计	52
2.4.1	ZigBee 协议简介	52
2.4.2	目标节点软件设计	54
2.4.3	感知节点软件设计	57
2.4.4	网关软件设计	62
2.5	网络节点系统性能测试与分析	66
2.5.1	系统可靠性分析	66
2.5.2	系统能耗分析	71
2.5.3	网络节点系统定位性能实验	76
	参考文献	78

第3章 网络节点能量收集方法

3.1	引言	81
3.2	振动发电原理	82
3.2.1	压电发电原理	82
3.2.2	电磁发电原理	88
3.3	压电振子发电方法	91
3.3.1	压电振子介绍	91
3.3.2	双晶悬臂梁式压电振子建模	93
3.3.3	双晶悬臂梁式压电振子结构有限元分析	102
3.4	变频发电方法	112
3.4.1	变频发电装置结构	112
3.4.2	变频发电装置谐振建模	113
3.4.3	变频发电装置谐振分析	115
3.4.4	变频发电装置发电性能分析	117
3.5	压电-电磁宽频发电方法	120
3.5.1	压电-电磁宽频发电装置结构	120

3.5.2 压电-电磁宽频发电装置发电分析	122
3.6 压电-电磁宽频发电装置制作与性能测试	132
3.6.1 压电-电磁宽频发电装置制作	132
3.6.2 压电-电磁宽频发电装置发电实验平台搭建	137
3.6.3 压电-电磁宽频发电装置发电实验分析	138
参考文献	150
第4章 协同感知方法	153
4.1 引言	153
4.2 网络工作调度策略	154
4.2.1 理论描述	154
4.2.2 感知节点调度算法	160
4.2.3 网络工作调度仿真测试与分析	163
4.3 二元协同目标感知策略	172
4.3.1 目标感知模型	172
4.3.2 感知节点数量模型	174
4.3.3 二元协同感知策略	175
4.3.4 二元协同感知算法仿真测试与分析	178
4.3.5 二元协同感知算法物理性测试与分析	182
参考文献	183
第5章 自主定位跟踪方法	185
5.1 引言	185
5.2 网络节点定位工作流程	186
5.2.1 网络节点定位交互过程	186
5.2.2 各网络节点工作流程	187
5.3 中垂线定位方法	190
5.3.1 中垂线分割法原理	190
5.3.2 中垂线定位算法	195

5.3.3	虚拟中垂线定位算法	196
5.3.4	仿真测试与分析	199
5.3.5	物理性测试与分析	203
5.4	基于虚拟衍生点的估计定位算法	204
5.4.1	虚拟衍生点描述	205
5.4.2	基于虚拟衍生点的估计定位算法	206
5.4.3	仿真测试与分析	208
5.5	基于 Voronoi 图的三维定位算法	211
5.5.1	引言	211
5.5.2	三维 Voronoi 图模型	211
5.5.3	三维 Voronoi 定位算法	212
5.5.4	仿真测试与分析	214
5.5.5	物理性实验与分析	216
5.6	基于 RBF 神经网络的运动目标跟踪预测方法	217
5.6.1	跟踪预测模型	217
5.6.2	RBF 神经网络介绍	218
5.6.3	基于 RBF 神经网络的目标跟踪预测算法	220
5.6.4	仿真测试与分析	221
	参考文献	227

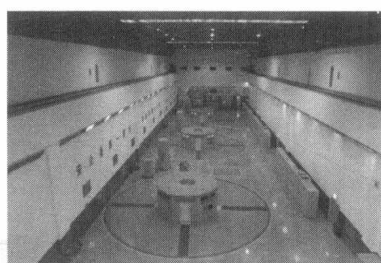
第 1 章

地下无线传感器网络体系结构

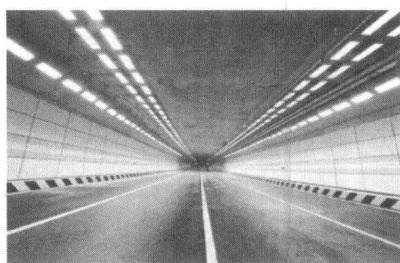
1.1 引言

地下工程（见图 1.1）是指深入地面以下为开发利用地下空间资源所建造的地下土木工程。它包括交通运输方面的铁路、公路、运河隧道，以及地下铁道和水底隧道等；工业和民用方面的市政、防空、采矿、储存和生产等用途的地下工程；军用方面的各种国防坑道；水利发电工程方面的地下发电厂房及其他各种水工隧洞等。目前，我国已成为世界地下工程建设规模和建设速度第一大国，如何保障地下工程施工与使用的安全性提到日程上来。

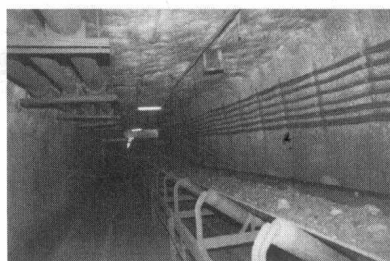
无线传感器网络是当前在国际上广受关注的、涉及多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域。它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等，能够通过各类集成化的微型传感器协同地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息。这些信息通过无线方式被发送，并以自组多跳的网络方式传送到用户终端，从而实现物理世界、计算世界及人类社会三元世界的连通^[1]。无线传感器网络具有十分广阔的应用前景，在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等许多重要领域都有潜在的实用价值，已经引起了有关国家学术界和工业界的高度重视，被认为是对 21 世纪产生巨大影响力的技术之一。



(a) 地下发电厂房



(b) 公路隧道



(c) 煤矿巷道



(d) 地铁

图 1.1 地下工程

图 1.2 所示为一个典型的无线传感器网络结构^[2], 其典型的工作方式为: 大量无线传感器网络节点布置在传感监测区域内或监测对象周围, 节点之间通过自组织快速形成一个感知网络。在感知网络内部, 每个节点既是信息的采集者和发送者, 又是信息的路由者, 采集的数据经过多跳传递到汇聚节点(网关)。汇聚节点再通过 Internet/卫星网/移动通信网络进行互联, 将数据进行存储或进行进一步处理。

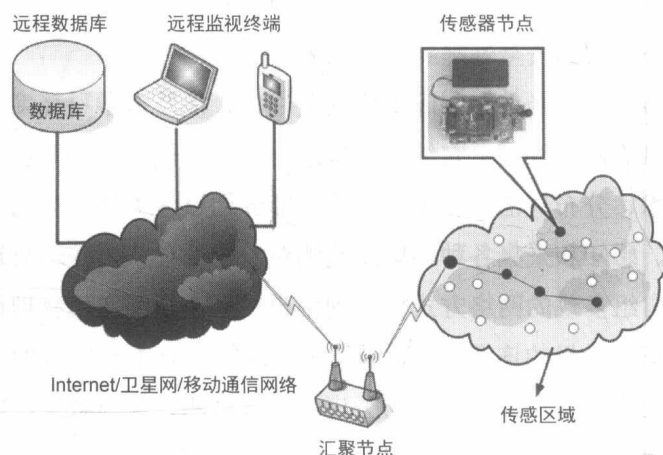


图 1.2 一个典型的无线传感器网络结构

在地下工程施工与维护中,利用无线传感器网络进行环境、人员及设备的定位监测,是保障地下工程安全建设与使用的有效方法。

1.2 地下无线传感器网络模型

1.2.1 无线传感器网络拓扑结构

在无线传感器网络中,良好的拓扑结构对网络性能影响很大。良好的拓扑结构能够提高路由协议和 MAC 协议的效率,为数据融合、时间同步和目标定位等很多方面提供基础,有利于延长整个网络的生存空间^[1]。因此,拓扑结构设计是无线传感器网络中的一个基本问题。

无线传感器网络拓扑结构通常分为集中式拓扑结构、传递式拓扑结构和分层式拓扑结构^[1],如图 1.3 所示。在拓扑结构中,网络节点包括感知节点和汇聚节点。图 1.3 中,圆形表示感知节点,三角形表示汇聚节点。



图 1.3 无线传感器网络拓扑结构

当网络中感知节点非常接近汇聚节点时,集中式拓扑结构有相应的优势,由于传输距离比较近、传输功率不大,容易收到好的效果,但这种场景无疑与传感器网络的应用场景相悖;当感知节点分布密度较小时,多跳传输容易发挥特点,可以采用传递式拓扑结构;而分层式拓扑结构比较适用于汇聚节点位置比较远、感知节点密度较高的情况,由于其结构简单、实施方便,能够充分发挥传感器网络节点密集的优势,通过数据整合和处理,得到精确的用户所需信息。

1.2.2 地下无线传感器网络结构

一般说来,地下工程的地理几何形状大多数呈现一种狭长形状,因此,在应用无线传感器网络对其监测时,网络节点需要沿狭长形区域布置,这时无线传感

器网络就好像由许多的珍珠链组成，也就是地下无线传感器网络的拓扑结构往往表现为链式结构^[3]，如图 1.4 所示。



图 1.4 链式拓扑结构

由于拓扑结构的不同，地下无线传感器网络具有如下特点^[4]。

(1) 传感器节点部署受限。由于受地下环境形状的约束，网络节点往往只能布置在地下巷道的两侧。

(2) 传输路径单一。普通无线传感器网络节点周围有多个相邻网络节点，传输路径是多条的；而链式拓扑结构中，网络节点信息只能顺着唯一的直线路径依次传递。

(3) 多跳路由。由于链式拓扑结构的单一路径，源感知节点采集到的信息必定要经过其他感知节点的接力转发才能到达汇聚节点。

(4) 感知节点处理的信息量不均衡。每个感知节点不但要采集本地的信息，还要对邻居感知节点传送来的信息进行处理和转发。所以，感知节点的信息量是沿着传递路线递增的，越靠近汇聚节点，感知节点需要处理的信息量就越大。

(5) 由于地下地形的狭长性及地下环境对无线通信的干扰，地下无线通信具有较强的多径衰落现象，导致网络节点的通信距离很短，从而使布置的网络节点数量众多。

地下无线传感器网络结构如图 1.5 所示，在地下巷道实际环境中网络节点布置场景如图 1.6 所示。

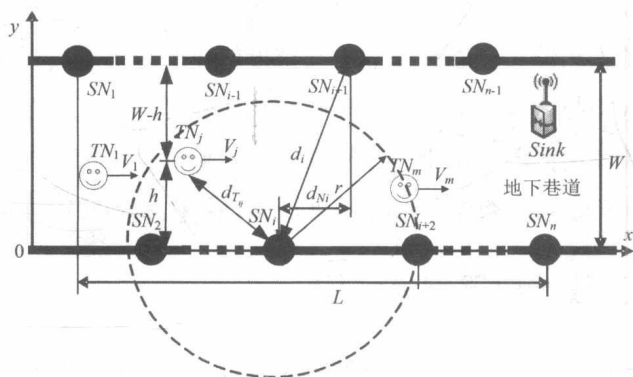


图 1.5 地下无线传感器网络结构

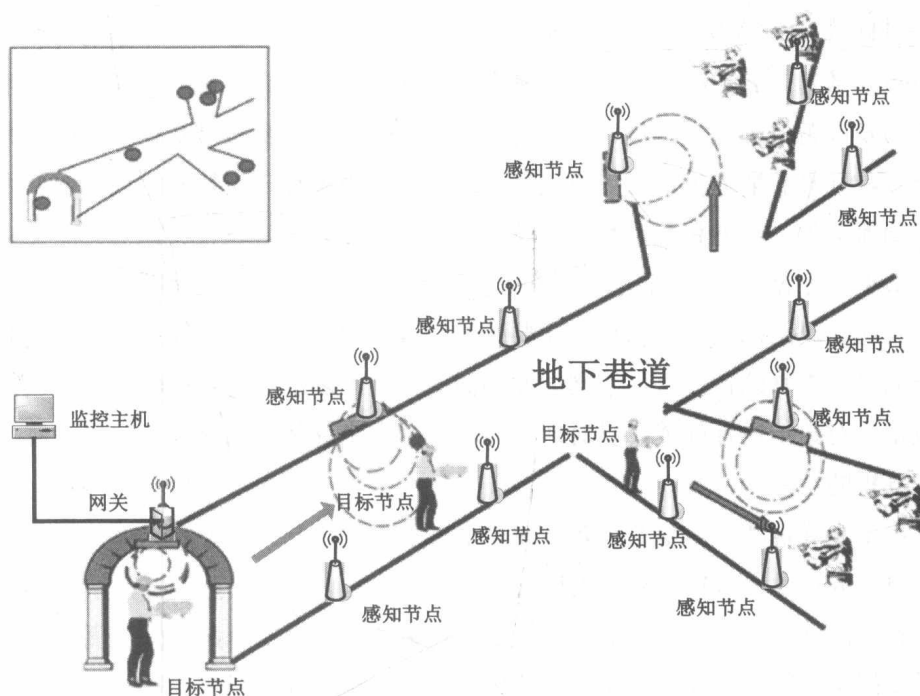


图 1.6 在地下巷道实际环境中网络节点布置场景

根据图 1.5 和图 1.6, 可以对地下无线传感器网络进行形式化描述, 从而建立地下无线传感器网络模型。

定义 1.1 地下无线传感器网络模型

$$UWSN = \langle \text{NODE}, \text{ENV}, \text{ClusALG}, \text{SchALG}, \text{SenALG}, \text{LocALG}, \text{TraALG} \rangle \quad (1.1)$$

式中, NODE 表示网络节点种类集合, $\text{NODE} = \langle \text{SN}, \text{TN}, \text{Sink} \rangle$ 。

感知节点集合 $\text{SN} = \{ \text{SN}_1, \text{SN}_2, \dots, \text{SN}_i, \dots, \text{SN}_n \}$, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为感知节点的数量, $n \in R$ 。感知节点按序号以一定的间距布置在地下巷道两侧的各个探测点上, 其主要作用为与感知范围内的目标节点进行通信, 定位人员及设备信息或通过自身的环境监测传感器检测感知节点所处的环境信息, 并且负责数据的多跳传输。针对地下地理位置的差异, 可将其划分为若干区域, 在这些区域内布置一定数量的感知节点, 然后采用一定的组簇方法, 将这些感知节点形成簇, 每个簇的感知节点由簇头感知节点 (以下简称簇头节点) 和簇内感知节点组成。感知节点处于地下无线传感器网络的最底层, 节点数量较多, 是构成地下无线传感器网络的主干。

目标节点集合 $TN = \{TN_1, TN_2, \dots, TN_j, \dots, TN_m\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, m 为目标节点的数目, $m \in R$ 。目标节点安装在地下作业人员或设备上, 其主要作用是对人员及设备进行跟踪定位, 以便对作业人员及设备的身份进行识别和确定其地理位置, 并且获取人员及设备所处环境信息。这类节点一般随着作业人员及设备的运动而运动, 功能和结构都较为简单。

Sink 表示网关(汇聚节点)。网关不仅要实现与感知节点之间的无线通信, 接收或发送信息给邻近感知节点, 还要通过有线或无线网络与监控主机相连。监控主机通过监控软硬件, 可以给网关发送命令, 查询各节点的工作状态和采集的各项数据; 对数据进行处理, 以对地下环境状况做出评估; 同时具有数据存储、查询和分析的功能。

地下无线传感器网络的主要功能描述如下。

(1) 人员及设备定位数据处理。

首先, 感知节点将自己的位置信息发送给邻近目标节点, 目标节点接收到信息后根据定位算法计算出自身所处的位置。然后, 目标节点将自身的位置参数发送给最邻近的感知节点, 簇头节点对簇内感知节点位置参数进行信息融合再通过多跳的方式将目标节点的位置信息发送给网关。

(2) 环境参数数据处理。

簇头节点将簇内感知节点的参数(位置与环境参数)与邻近目标节点的参数(位置与环境参数)进行融合, 然后以多跳方式发送给网关, 网关再通过有线或无线网络发送到监控主机。这样, 监控主机即可实时地对环境参数数据进行检测。

(3) 数据查询。

数据查询是指监控主机发出查询指令, 通过有线网络或无线网络将查询命令发送给指定的网关, 网关再通过无线传感器网络查找相应的簇。最后, 簇头节点根据查询指令再将得到的数据反向传递给监控主机。

每个网络节点具有一个节点属性集合 $\{ID, E_0, r, \text{Position}, \text{Other}\}$ 。其中, ID 表示网络节点号, 唯一标识节点, E_0 表示网络节点的初始能量, r 表示网络节点的通信半径, Position 表示网络节点的坐标位置, Other 表示其他属性, 如网络节点上的各类传感器参数、目标节点的运动速度及运动方向等。

一般的, 假设如下条件成立。

(1) 所有网络节点属性都相同。

(2) 感知节点和目标节点的能量由电池提供, 有能量限制。

(3) 网关的能量由外部电源提供, 无能量限制。

ENV 表示地下巷道几何环境信息, $ENV = \langle L, W, d_i, d_{N_i}, d_{T_{ij}} \rangle$ 。其中, L 表示地下巷道感知长度, 也就是第一个感知节点到最后一个感知节点沿地下巷道水平方向 (x 轴) 的距离; W 表示地下巷道感知宽度, 也就是感知节点沿竖直方向 (y 轴) 的距离; d_i 表示两邻居感知节点 SN_i 与 SN_{i+1} 的直线距离; d_{N_i} 表示两邻居感知节点 SN_i 与 SN_{i+1} 沿地下巷道水平方向 (x 轴) 的直线距离, 也就是 d_i 沿地下巷道水平方向 (x 轴) 的投影距离; $d_{T_{ij}}$ 表示感知节点 SN_i 与目标节点 TN_j 的直线距离。

ClusALG: 网络节点分簇算法, 地下无线传感器网络拓扑结构采用分层拓扑结构, 地理相邻感知节点可以组成一簇 (CH_i , 表示第 i 簇), 根据一定的簇头选择原则选出簇头节点, 各簇内感知节点与簇头节点进行信息交换, 各簇头节点采用多跳数据传输方式沿链式传输通道将数据传递给网关。

SchALG: 网络节点调度算法, 对感知节点的工作进行调度 (工作或休眠), 以延长网络生命周期。

SenALG: 网络节点感知算法, 多个感知节点协同检测目标节点, 以确定目标节点出现的概率。

LocALG: 网络节点定位算法, 多个定位节点 (起定位作用的感知节点) 协同定位目标节点, 以确定目标节点的位置。

TraALG: 网络节点跟踪算法, 调度感知节点持续跟踪目标节点。

1.3 地下非理想无线通信模型

1.3.1 引言

无线通信传输是无线传感器网络组网的基础, 由于地下环境的复杂性, 地下无线通信的性能与地上无线通信的性能将有所不同。目前, 国内外对地下无线传感器网络通信模型进行了研究。这些研究成果具有如下特点^[5-8]: (1) 在自由空间无线信道模型基础上, 考虑地下环境特征带来的衰落损耗, 建立适用于地下环境特征的无线通信理论模型。(2) 利用波导模式理论建立了地下无线衰落预测损耗

模型，但是这种模型的建立过程相当复杂。(3) 将无线电波按照其光学特性进行计算建模，但是建模过程仍然复杂烦琐。

地下环境往往是一种作业环境，在这个作业环境中，有各种作业人员与作业设备。作业设备由金属件构成，并且设备时时产生机械噪声，这些因素都会对无线通信产生影响。例如，地下采煤工作面是一个由众多采煤装备（如采煤机、刮板输送机、液压支架）组成的复杂环境，这种复杂环境对无线通信的影响表现在如下三个方面：一是在采煤工作面，由于机械设备的运动性，其在采煤空间的相对位置是时变的，因此会对无线通信带来周期或非周期的变化；二是采煤设备本身的金属件会阻碍电磁波的传播路径，造成在传播路径上的损耗；三是采煤设备的运行产生机械噪声会对无线通信造成干扰。因此，影响采煤工作面内无线通信性能的因素取决于采煤设备的相对位置、通信距离、无线通信频率、机械噪声等。本章以地下采煤工作面为应用实例，对地下无线通信信道进行建模与分析。

地下采煤工作面作业设备一般由采煤机、刮板输送机和液压支架（三者简称“三机”）组成，实现破煤、装煤、运煤、支护等工序。采煤工作面三机工况图如图 1.7 所示。

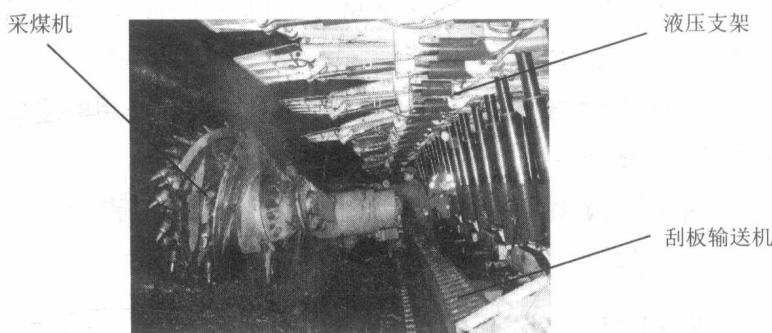


图 1.7 采煤工作面三机工况图

为清晰表述采煤工作面作业设备的分布与工作过程，图 1.8 给出了采煤工作面设备群的俯视图。由图 1.8 可知，在采煤工作面的采煤设备除采煤机、刮板输送机及液压支架之外，还有皮带输送机、破碎转载机等附属设备。破碎转载机破碎大块煤及矸石，而皮带输送机输送煤及矸石至煤仓。如图 1.8 所示，采煤机沿牵引方向采煤，沿煤壁进刀方向是煤层，在液压支架后是采空区，皮带输送机、破碎转载机布置在下顺槽。