



北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

第二十四届“冯如杯”学生创意大赛

基于捷联惯性和 Zigbee 技术的

井下精确定位系统

摘要

我国是以煤炭为主要能源的国家，煤炭占我国一次能源生产和消费结构的 70%左右。但是，我国煤矿井下地质条件非常复杂，部分矿井巷道较长，矿工作业较分散。需要精确的定位系统来高效管理井下作业。而目前国内在井下精确定位与导航领域主流技术包括接触式识别技术、射频识别技术(RFID)、蓝牙技术 (Bluetooth) 等。这些技术可探测距离较短，无法做到精确定位。现综合捷联惯性技术和 Zigbee 技术。利用捷联惯导的自主导航算法实现自主导航。利用 Zigbee 技术的定位功能修正惯性导航的累积误差，并通过卡尔曼滤波算法进行数据融合。以达到精确定位的目的。保证管理和救灾工作的有效展开。实现煤矿采掘业的信息化、现代化。

关键词：井下精确定位，捷联惯性技术，Zigbee 技术，卡尔曼滤波器，组合导航

Abstract

Our country is based on coal as the main energy. Coal accounts for about 70 percent of China's primary energy production and consumption structure. However, the underground geological conditions in our country are very complex and some of the tunnels are very long. Miners' work is relatively scattered. And the current domestic underground mainstream technology in accurate positioning and navigation field includes Contact Identification technology, Radio Frequency Identification (RFID), Bluetooth technology, etc. These techniques have some congenital defect, unable to achieve accurate positioning and navigation. Now combine Strapdown Inertial Navigation technology with Zigbee technology. Using the autonomous navigation algorithm of the strapdown inertial navigation to realize autonomous navigation. Using the positioning function of Zigbee technology to correct the accumulating error of the strapdown inertial navigation. And then conduct the data fusion through the Kalman Filter so as to achieve the purpose of accurate positioning and to ensure the effective management and disaster relief work. Realize the informationization and modernization of coal mining.

Key words: Down-hole precise positioning, Strapdown Inertial Navigation, Zigbee technology, Kalman Filter, integrated navigation

目录

摘要	i
Abstract.....	ii
目录	iii
图表目录	iv
1 引言	1
2 核心创意概述	1
2.1 系统整体设计	1
2.2 捷联式惯性导航技术.....	2
2.3 Zigbee 技术	3
2.4 卡尔曼滤波器	3
2.5 CAN 总线	4
3 创意可行性分析	4
3.1 捷联式惯性导航技术.....	4
3.1.1 捷联惯导原理	4
3.1.2 安放设计	5
3.2 Zigbee 技术	6
3.2.1 系统总结概述	6
3.2.2 技术原理	7
3.3 卡尔曼滤波器	9
3.4 经济可行性	10
4 应用前景	10
结论	11
致谢	11
[参考文献].....	11

图表目录

图 1	系统整体设计图	2
图 2	捷联式惯性导航系统原理图.....	3
图 3	Zigbee 网状拓扑图.....	3
图 4	井下煤矿车	5
图 5	捷联惯导设备	6
图 6	安放设计	6
图 7	三边测量法	8
图 8	Zigbee 整体设计图.....	9

1 引言

中国是世界最大的煤炭生产国和消费国，在我国的能源工业中，煤炭占我国一次能源生产和消费结构中的 70% 左右，预计到 2050 年还将占 50% 以上^[1]。但与之相对的是，我国煤矿开采行业整体信息化机械化水平较低，从业人员相关行业素质不高。2010 年，全国采煤机械化程度在 60% 左右，远低于国际先进水平；但煤矿事故死亡人数高达 2433 人，每百万吨煤事故死亡率为 0.749 人^[2]，远高于国际平均水平。

《煤矿生产“十二五”规划》指出，要以信息化为载体，更新煤矿安全监察机构装备。开发通讯传感的关键设备，推广先进适用技术。

这些数据都表明，在经济飞速发展，对基础能源的依赖日趋严重的今天，煤矿工业的矛盾也十分突出。如何进行信息化升级，如何精确、快速地监测井下人员与车辆的实时动态，保证煤矿企业日常管理和抢险救灾的高效运作，已成为亟待解决的课题。

目前，国内主流的定位导航技术包括射频识别技术（RFID），蓝牙技术，Wifi 技术等。射频识别技术成本低廉，但识别距离短、识别速率低、错误率高。ClassB 的蓝牙设备通信有效距离短且网络节点少。Wifi 技术普及率高但功率偏低^[3]。

这些技术表明目前煤矿井下的人员和车辆精确定位还存在不足，具体表现在定位精度不高、井上管理人员不能及时了解和调配井下工作状况、应对灾险的能力较弱。

现拟开发一套基于捷联式惯性技术和 Zigbee 井下定位技术的组合导航系统。通过捷联惯导进行全自主导航，再通过 Zigbee 技术在关键节点位置进行惯导的误差修正，用卡尔曼滤波算法进行数据融合，以得到精确的定位信息。再通过无线和有线的组合通讯方式，将数据传送到井上调度中心计算机。该系统便于管理员调度井下人员和车辆，是生产运作更加高效合理，同时在发生灾情是能准确知道被困人员的位置，为救援提供了有力保障。

2 核心创意概述

2.1 系统整体设计

组合定位系统分为地上管理中心、地下通信器和移动终端。地上管理中心的计算机配备组态王软件。地下通信器由 CAN 总线和 Zigbee 协调器组成，是移动终端与地上管理人员的连接桥梁。移动移动终端由捷联惯导系统、Zigbee 终端节点和卡尔曼滤波器组

成。基本工作原理图如图 1 所示：

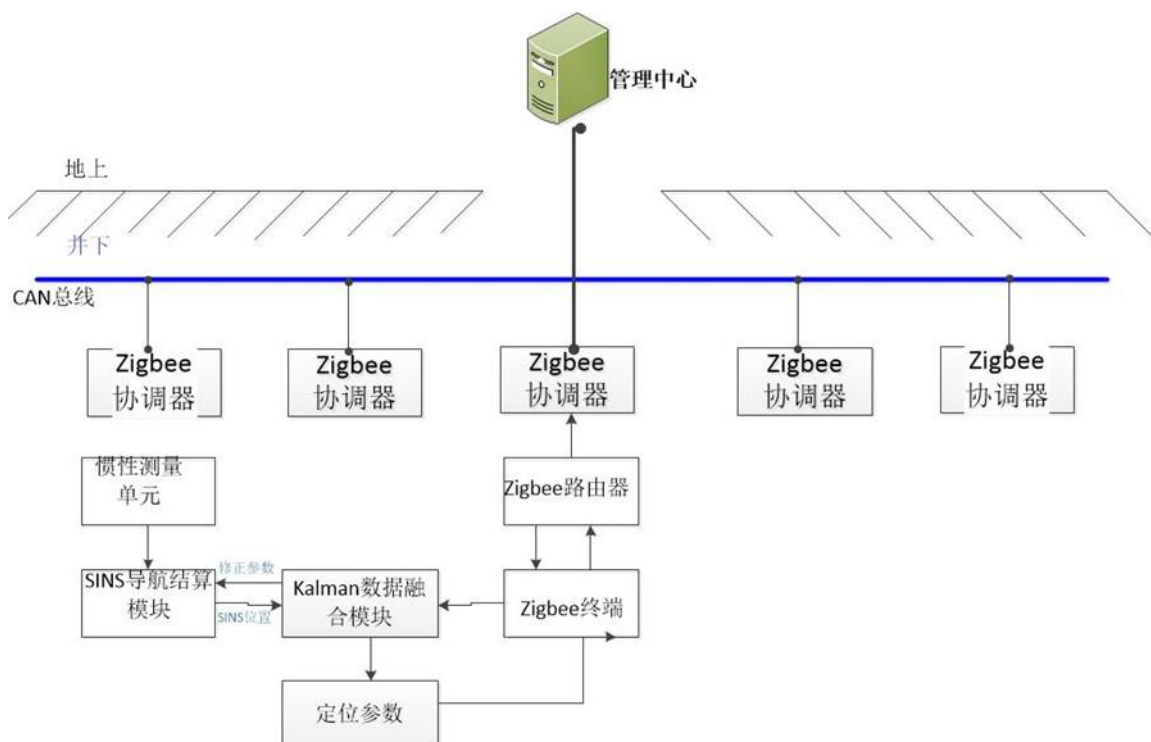


图 1 系统整体设计图

2.2 捷联式惯性导航技术

捷联式惯性导航系统可将加速度及陀螺仪直接安装到载体上，省去了物理稳定平台。在此就直接安装在煤车的车头上通过在导航计算机中实时计算获得姿态矩阵，在计算机中建立数学平台^[4]。

捷联惯导系统在工作时,分别由陀螺仪测得载体坐标系相对于惯性坐标系的姿态角速度，加速度计测得载体坐标系相对于惯性坐标系的加速度。测得的角速度信息。经捷联导航解算模块计算得出姿态矩阵,输出载体姿态信息。测得的加速度信息通过姿态矩阵变换得到导航坐标系加速度,通过对加速度积分得到速度、通过对速度积分得到位置,输出载体的速度位置信息。其原理图如图 2 所示：

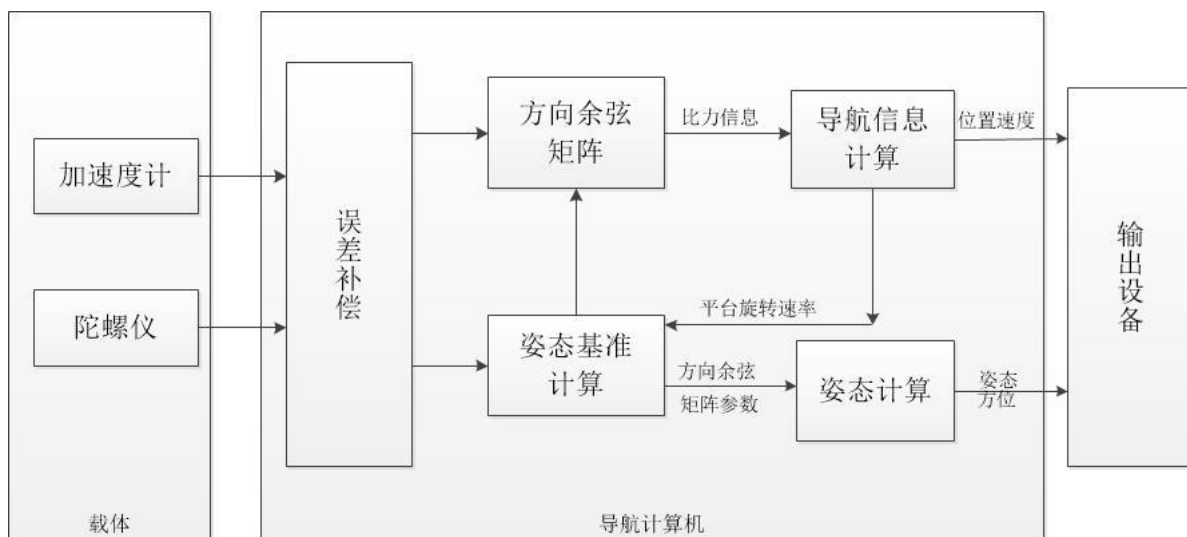


图 2 捷联式惯性导航系统原理图

2.3 Zigbee 技术

Zigbee 是基于 IEEE802.15.4 标准的低功耗局域网协议。根据这个协议规定的技术是一种短距离、低功耗的无线通信技术。其特点是近距离、低复杂度、自组织、低功耗、高数据速率、低成本。是一种便宜的，低功耗的近距离无线组网通讯技术。

Zigbee 技术采用自组网和动态路由技术。可有多达 65000 个节点组成，结合网状拓扑结构把就能实现数据的多通道、高可靠性通信，网状拓扑结构如图 3 所示：

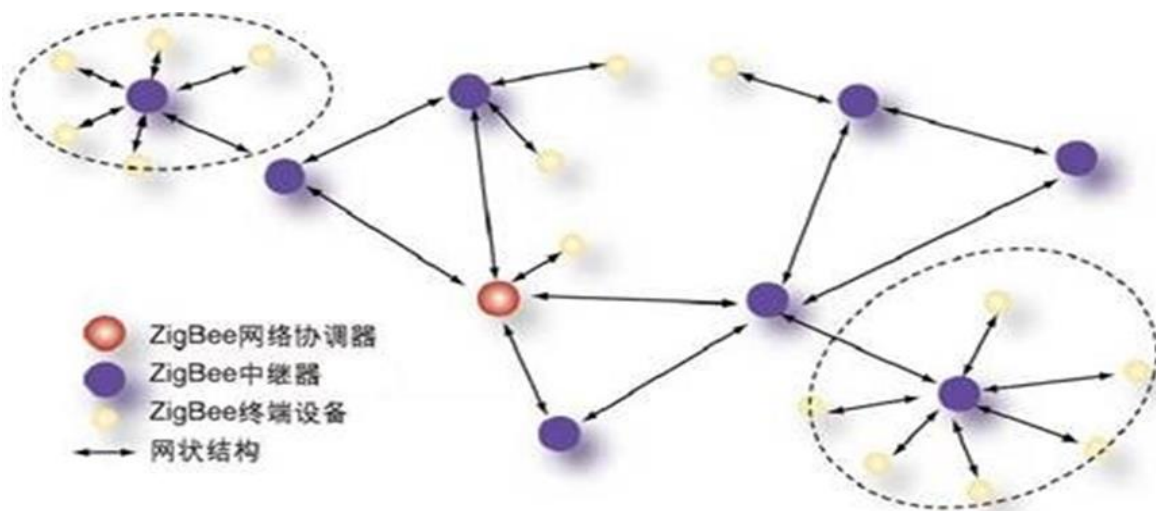


图 3 Zigbee 网状拓扑图

2.4 卡尔曼滤波器

组合导航系统需要综合两个系统的测量结果，通过数据融合给出最优的导航结果。卡尔曼滤波可用于数据融合处理，该理论对组合导航系统的发展起到推动作用。

卡尔曼滤波的一个典型实例是从一组有限的，包含噪声的，对物体位置的观察序列（可能有偏差）预测出物体的位置坐标及速度。它利用目标的动态信息，设法去掉噪声的影响，得到一个关于目标位置的好的估计。这个估计可以是对当前目标位置的估计，也可以是对将来位置的估计，也可以是对过去位置的估计。本系统以捷联惯导的导航结果作为卡尔曼滤波器的输入参数，以 Zigbee 技术在已知固定位置的位置信息作为修正参数，用卡尔曼滤波器进行数据融合，对车辆和人员的位置参数进行高精度、实时最优估计^[5]。

2.5 CAN 总线

CAN 即控制器局域网络(Controller Area Network, CAN)，它是一种有效支持分布式控制或实时控制的串行通信网络，是国际上应用最广泛的现场总线之一。网络各节点之间的数据通信实时性强。CAN 是多主工作方式。任一节点都可以主动发送报文,当总线空闲时,最先访问总线的 CAN 节点将会获得发送权,而当多个节点同时发送的时候,则依据报文的优先权来决定总线访问权的控制。它的出现为分布式控制系统实现各节点之间实时、可靠的数据通信提供了强有力的技术支持。将 CAN 总线铺设矿井的主巷道中，用于 Zigbee 协调器的数据通信，可以保证数据传递的及时性和可靠性。

3 创意可行性分析

3.1 捷联式惯性导航技术

3.1.1 捷联惯导原理

（1）导航坐标系定义和坐标系转换关系

本文选取东北天坐标系为地理坐标系。载体的姿态可以想象为依次绕三个基本轴做基本旋转得到，所以姿态矩阵如下：

$$C_g^b = C_\gamma C_\theta C_\psi$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

其中 γ 、 θ 、 ψ 分别绕-Z 轴、X 轴及 Y 轴做基本旋转的角度。

（2）捷联式惯导解算算法

捷联式惯导解算算法分为姿态更新算法、速度更新算法、和位置更新算法。因为井下定位我们关心的是位置信息，所以这里只介绍位置更新算法。位置更新算法的数学描述形式如式（3.2）

$$\begin{aligned}\Delta R^n(t_m) &= \int_{m-1}^m V^n(t) dt \\ &= \left\{ V^n(t_{m-1}) + \frac{1}{2} \Delta V_{glcom}^n(t_m) - \frac{1}{3} \eta(t_m) \times [C_b^n(t_{m-1}) \Delta V_{sfm}^b(t_m)] \right\} \times \\ &\quad T_m + C_b^n(t_{m-1}) \Delta R_{sfm}^b(t_m)\end{aligned}\quad (3.2)$$

式中：

$$\eta(t_m) = \int_{m-1}^m \omega_{in}^n(t) dt \quad (3.3)$$

对式(3.2)进行运算及坐标变换，可得到载体在导航坐标系下的经度和纬度，如式(3.4)：

$$\left\{ \begin{aligned} L_m &= L_{m-1} + \frac{T_m V_{N(m-1)}^n}{R_{M(m-1)} + h_{m-1}} \\ \lambda_m &= \lambda_{m-1} + \frac{T_m V_{E(m-1)}^n}{R_{N(m-1)} h_{m-1}} \sec(L_{m-1}) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

3.1.2 安放设计

捷联惯导系统体积很小，只有 1cm-4cm 的数量级，现有矿车不需要改造就可以安放，矿车如图 4 所示，捷联惯导设备如图 5 所示，设计图如图 6 所示。



图 4 井下煤矿车



图 5 捷联惯导设备

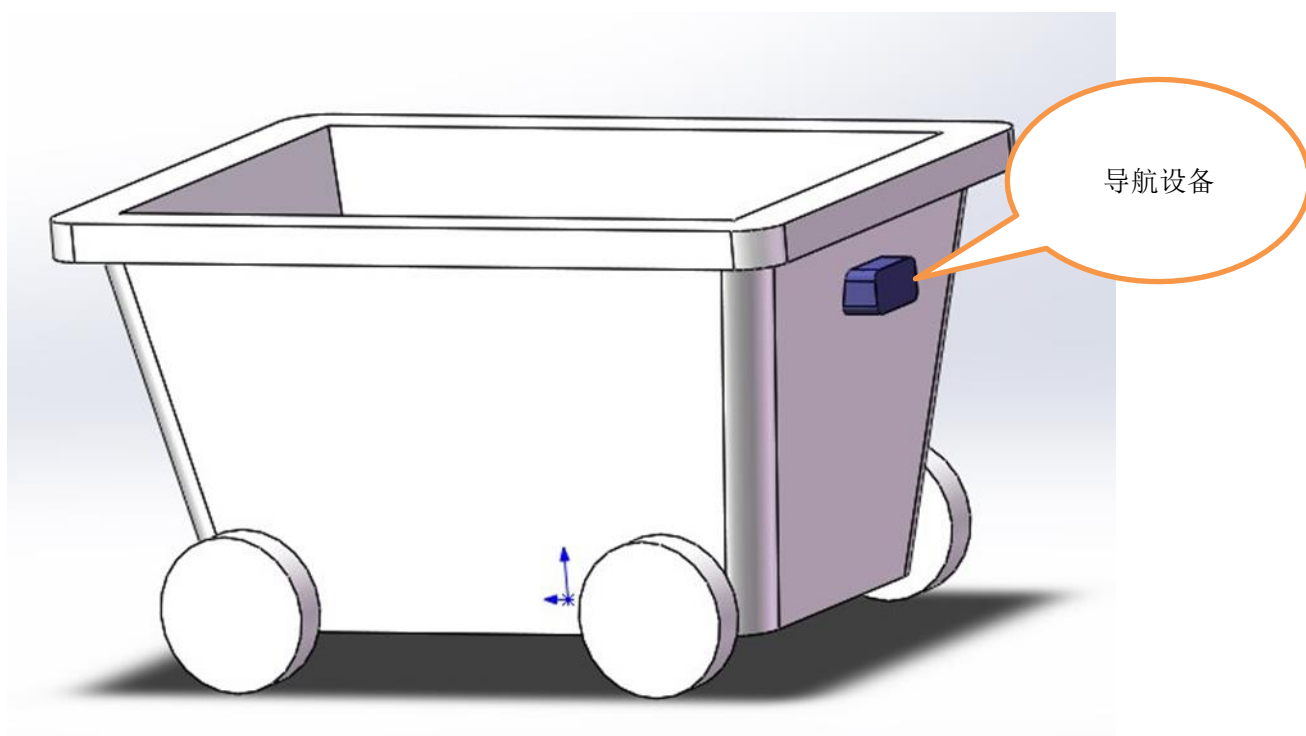


图 6 安放设计

3.2 Zigbee 技术

3.2.1 系统总结概述

Zigbee 系统依赖无线电进行信号传递，在测距方面，通过信号强度的衰减量的检测来进行测距，并对实际中影响强度衰减的有关因素进行了考虑；在定位方面通过多组三边测量并取加权平均的方法进行定位。本系统具有原理简单，方便操作的优点，但对设备的精度要求较高，需要进行定期的维护，而且测距时的误差在定位算法中可能会积累而进一步扩大^[6]。

3.2.2 技术原理

本系统的原理主要可分为测距技术和定位算法两部分。

(1) 测距技术

本系统的是通过接收到的信号强弱测定信号点与接收点的距离，进而根据相应数据进行定位计算的一种定位技术。已知发射功率，在接收节点测量接收功率，计算传播损耗，使用理论或经验的信号传播模型将传播损耗转化为距离。

具体技术原理为

无线信号传输中普遍采用的理论模型为 Shadowing 模型，该模型为：

$$P = P_0 + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + \partial \quad (3.5)$$

在实际测量中，使用以下模型：

$$P = A - 10n \lg(d) \quad (3.6)$$

式中， n 表示信号传播常量， d 表示信号接收端和发射端之间的距离，

通过算法和模型分析可以提高测定的精度。根据信号基本衰减模型(3.6)可得：

$$d = 10^{\left(\frac{P-A}{10n} \right)} \quad (3.7)$$

$$\frac{d_1}{d_2} = 10^{\frac{P_1-P_2}{10n}} \quad (3.8)$$

公式(3.8)中 P_1, P_2, d_1, d_2 分别表示标签到左右两个基站的信号强度以及距离。通过双基站定位的方法，可以消除单位信号强度参数 A ，从而屏蔽了不同基站间的个体差异性，减小系统误差。

(2) 定位算法

定位节点获得相对于邻近路由器的距离，这里介绍三边测量法计算自己的位置。原理图如图 7 所示。

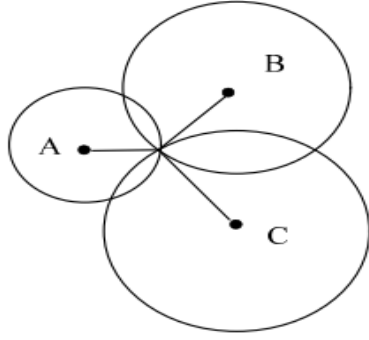


图 7 三边测量法

设参考节点的位置是 (x_a, y_a) , (x_b, y_b) , (x_c, y_c) 定位节点的坐标为 (x, y) 。则有：

$$\begin{aligned} d_a &= \left((x_a - x)^2 + (y_a - y)^2 \right)^{1/2} \\ d_b &= \left((x_b - x)^2 + (y_b - y)^2 \right)^{1/2} \\ d_c &= \left((x_c - x)^2 + (y_c - y)^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

由该方程组可解得移动节点的相对位置。在实际运行中系统会测得多组数据，对这些数据进行加权平均取得均值作为最终的定位点坐标值，其中权重与每组中移动节点与参考节点相对距离的远近成正相关。

(3) 系统设计方案

在矿井下安装 Zigbee 协调器和 Zigbee 路由器，由井下人员携带 Zigbee 终端设备进入巷道建立完整的 Zigbee 无线网络。Zigbee 路由器向 Zigbee 终端设备发射自身的信号强度，Zigbee 终端设备接收后经过分析整理获取 Zigbee 路由器的位置信息，并将位置信息传输给 Zigbee 协调器，由 Zigbee 协调器通过光纤以太网将井下人员的位置信息传输到地面管理中心。Zigbee 协调器之间通过 CAN 总线相连，可以快速的将采集到的信息汇总，从而更好的实现井下人员的实时定位。同样，地面管理中心也可以将数据或报警信息传输给井下工作人员。方案如图 8 所示：

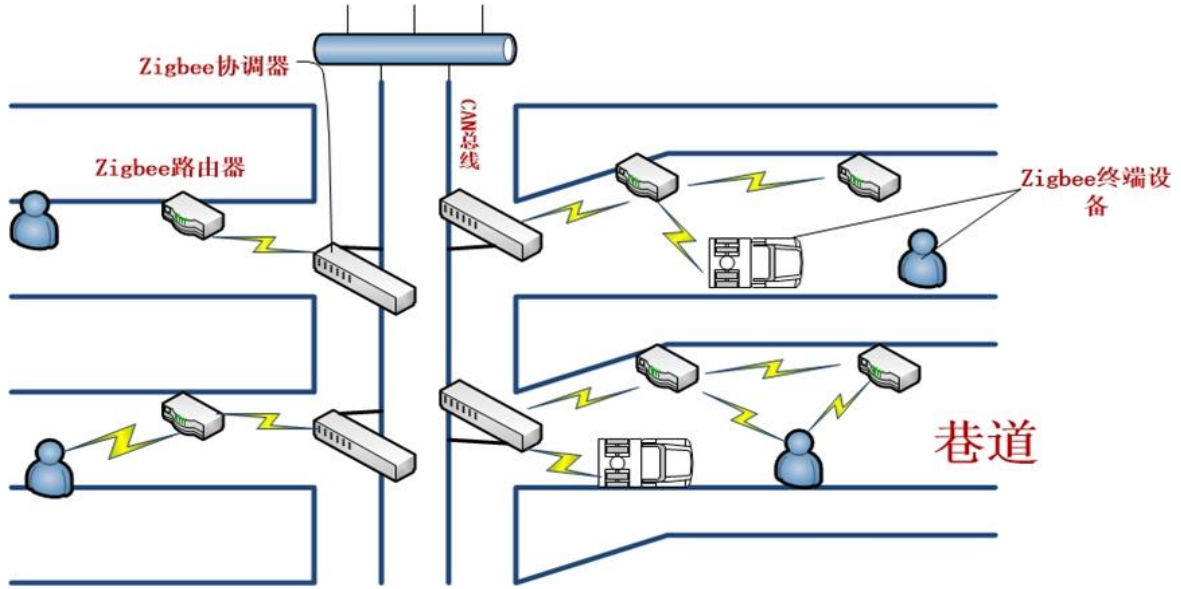


图 8 Zigbee 整体设计图

3.3 卡尔曼滤波器

在卡尔曼数据融合模块中，滤波器接收到捷联惯导导航系统以及 Zigbee 系统的数据后，进行计算，算出估计值后将估计值反馈到捷联惯导系统信号接收机，估计出的导航参数就作为惯性导航力学编排中的相应参数，估计出的误差作为校正量，反馈到 Zigbee 终端，直达地面^[7]。地面指挥人员便可根据最终的结果，给地下的工作者以准确的引导。

卡尔曼滤波估计：

设在 t_k 时刻的被估计状态 x_k 受系统噪声序列 w_{k-1} 驱动，驱动激励由下边所述状态方程描述：

$$x_k = \Phi_{k,k-1} x_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1}$$

对 x_k 的量测满足线性关系，测量方程为：

$$Z_k = H_k X_k + V_k$$

式中 $\Phi_{k,k-1}$ 为 t_{k-1} 时刻的一步转移矩阵； Γ_{k-1} 系统噪声驱动矩阵； H_k 为量测矩阵； V_k 为量测噪声序列； W_k 为系统激励噪声序列。同时， V_k 和 W_k 满足：

$$E[W_k] = 0, Cov[W_k, W_j] = E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj}$$

$$E[V_k] = 0, Cov[V_k, V_j] = E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj}$$

$$\text{Cov}[W_k, V_j] = E[W_k V_j^T] = 0$$

式中： Q_k 为系统噪声序列的方差矩阵，假设为非负定阵； R_k 为测量噪声序列的方差矩阵，假设为正定阵。

其状态一步预测为：

$$X_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} X_{k-1}$$

状态估计为：

$$X_{k/k} = X_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k X_{k/k-1})$$

滤波增益为：

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

这样用卡尔曼滤波器实时估计出位置、速度偏差后对定位参数进行补偿，从而达到实时修正、提高测量精度的目的。

3.4 经济可行性

井下组合定位导航系统是一个十分庞大的系统，尤其对于大型矿井，需要设置的 Zigbee 终端很多，且需给每台矿车配备定位系统，另外还需铺设几公里长的 CAN 总线，所以对系统的前期装配工作的花销比较大。而且这也后期维护费用。但是，可以从 Zigbee 基站和捷联式惯性导航系统的单价入手，设法降低每个设备的价格。现在的 Zigbee 基站价格不到 1000 元。从总体上讲，整个系统的花费还比较大。但是，随着技术的进步，成本的降低，我们相信在不远的将来，此系统将会有广泛的应用。

4 应用前景

本套组合定位系统的开发主要针对井下定位导航领域。对我国来说，现目前煤矿井下的导航技术还比较落后，不能做到精确定位，而本系统的设计旨在解决井下人员和车辆的精确定位和导航问题。做到精确定位，一方面可以方便地上管理人员及时了解井下工作状况，做出合理的调整和机动；另一面方面，在发生矿井漏水等事故时，搜救人员能迅速获知被困人员的具体位置，使救援计划高效运行。所以该系统的应用价值比较高。据专家估计，到 2050 年，煤炭仍将占我国能源比重的 50% 左右，所以在近几十年里，井下定位系统不会过时，所以该系统也能保持较好的活力。

结论

从以上的分析论证我们可以得出，目前井下精确定位导航的缺口还未得到很好的填补，我们设计的组合定位导航系统从市场实际需求出发，在充分考虑各种定位技术的优缺点的前提下，提出了捷联式惯性导航系统结合 Zigbee 技术的组合导航方式。这既充分利用了两种系统的优势，又弥补了各自的劣势。实现的优势互补的创新。同时该系统的设计也体现了安全生产、以人为本的新理念。

但是，限于自身的知识和能力的不足，我们在子系统原理分析、各个子系统的连接、系统的软硬件具体设计等方面仍无法做出详细论述。在此恳请各位老师和同学批评指正。

致谢

参加本次冯如杯创意大赛，我们收获颇丰。我们不仅体会到学术创作的不易和艰苦，也感受到了团队协作的强大力量。我们都很享受这个过程。所以在此，我们要感谢对此创意做出前期指导和后期修改的老师。也要感谢对我们论文提出宝贵建议的同学们！

参考文献

- [1]刘朝乾. 我国煤矿安全现状及安全事故原因分析[A]. 科技资讯, 2011, (28)
- [2]煤矿安全生产“十二五”规划. 2012, (1)
- [3]刘宇. 矿井人员定位、管理、搜救系统的设计. 北京邮电大学学位论文. 2008
- [4]王明昊, 王仕成, 牟建华.捷联惯导/天文组合导航[A]. 弹箭与制导学报, 2009, (2)
- [5]王晖. 矿井组合导航系统的设计与应用. 湘潭大学硕士论文. 2012
- [6]倪英, 戴娟. Zigbee 定位技术的研究[A]. 南京工业职业技术学院学报, 2013, (2)
- [7]黄辉先, 王晖, 汤红忠. 矿井组合导航系统的设计与应用[A]. 计算机工程与应用, 2013, 49(7)