

基于加速度传感器的井下电机车实时定位系统^①

汪玉凤¹, 李 凯¹, 张月玲²

¹(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

²(辽宁工程技术大学 矿业技术学院, 葫芦岛 125105)

摘 要: 针对目前煤矿井下电机车精确定位技术并不成熟的问题, 提出了一种基于加速度传感器的电机车实时定位系统, 该系统以电机车自身信息与调度信息相结合为基础, 阐述了定位原理和具体实现方案, 分析了实现此系统的三项关键技术: 判断行车方向准确、加速度传感器计算位移准确、无线传输误码率低, 并通过设计、改进相关算法解决了关键技术问题。此外, 仿真实验与测试实验证明了系统的可行性。

关键词: 煤矿; 实时定位; 加速度传感器; 无线

Real-time Positioning System of Locomotives Based on Acceleration Sensor Underground Mine

WANG Yu-Feng¹, LI Kai¹, ZHANG Yue-Ling²

¹(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

²(Faculty of Mining and Technology, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Aimed at the problem that the present precise positioning technology of coal mine is not mature, a real-time positioning system of locomotives based on acceleration sensor is presented. On the foundation of locomotives of its information and scheduling information combined, the system introduced the positioning principle and concrete implementation scheme. It also analyzed the three key techniques for realizing this system: the acceleration sensor calculating the shift accurately, judging the driving direction accurately, the low bit error rate of wireless transmission. And it solved the key technique problems through designing and improving the correlation algorithms. In addition, the feasibility of the system is proved through simulation and testing experiments.

Key words: coal mine; real-time positioning; acceleration sensor; wireles

研究煤矿井下电机车精确定位技术是井下电机车实现高效率调度的前提, 这对煤矿安全生产具有重要的意义。在目前电机车监控系统中, 由于调度员不能及时了解在线电机车的位置, 经常依靠记忆来进行调度, 经常发生撞车事故, 存在巨大的安全隐患。

随着数字矿山概念的提出^[1], 我国经过多年的研究已经取得了一定的成果。国内外各高校、科研单位等已经在该领域开展了研究。但是目前的主要研究方面是 ZigBee 技术和 RFID 技术。由于利用 ZigBee 技术实现定位是根据复杂算法来估算目标位置, 再加上井下复杂的电磁环境, 容易导致定位精度低。现在实际应用较多的定位系统是基于 RFID 技术的^[2], 但是定位

精度直接取决于标签铺设的密度, 且与成本成正比。因此基于 ZigBee 技术和 RFID 技术的定位系统只能精确到某一区域, 而不是严格意义上的实时精确定位。本文在研究基于捷联惯性导航的机车精确定位系统的基础上^[3], 提出了基于加速度传感器的井下电机车实时精确定位系统, 此系统具有结构简单、成本低、易实现、可靠性高等优点, 能够保证煤矿安全生产。

1 定位原理

井下巷道一般较窄, 电机车在固定轨道上行驶, 所以只需考虑电机车的一维位置信息就可以实现实时的精确定位, 在上位机画面中一般用一系列曲线来表

① 基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51307076)

收稿时间: 2013-10-09; 收到修改稿时间: 2014-01-20

示即可. 所以本系统中实现精确定位的核心问题是, ①电机车在哪个区间行驶; ②电机车距离此区间原点的距离. 两个道岔为一区间, 其中一个道岔为区间原点, 另一个道岔为区间的终点, 区间的划分如图 1 所示. 要想知道机车进入哪一区间和区间的具体位置, 必须事先测量每个区间的实际距离, 还要知道道岔动作信息、机车行驶方向和位移. 先判断机车行驶方向是否改变来决定行驶位移的增加或减少, 当电机车的位移等于某区间的实际距离或者 0 时, 在通过检测道岔信息来决定机车将要行驶的下一区间.

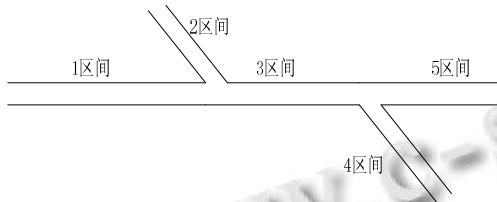


图 1 区间划分示意图

电机车定位系统一般是用在电机车监控系统中, 其对井下电机车的定位信息, 一般来说都要通过有线无线相结合的网络传输给上位机. 另外, 在电机车监控中调度室通过上位机操纵转辙机使道岔动作, 并将道岔动作信息再传回上位机显示. 因此充分利用井下无线网络, 将上位机的调度信息传送给相应的机车, 既机车行驶路线中的道岔信息. 再通过加速度传感器判断行驶方向并计算机车行驶距离, 这样就可以知道机车行驶的具体区间和具体位置, 系统组成结构图如图 2 所示.

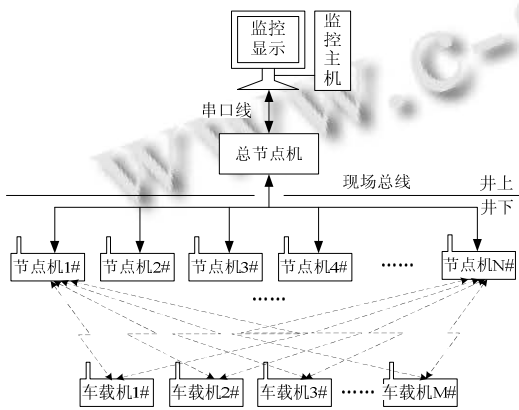


图 2 系统组成结构图

2 系统实现方案

本文所设计的电机车实时精确定位系统中起到定

位作用的主要是车载机和传输调度信息的节点机, 所以下面主要介绍车载机和节点机的设计.

车载机安装在电机车里面, 主要负责行车方向的检测、电机车位移的计算、判断电机车的具体位置和通过无线模块对定位信息进行接收和发送, 系统结构框图如图 3 所示.

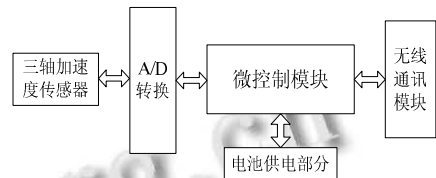


图 3 车载机系统结构框图

其中三轴加速度传感器选用基于 MEMS 技术的 ADXL335 三轴加速度传感器, 具有精度高、转换时间短、典型功耗值低等特点. 并且其动态测量范围为正负 3g, 能够完全满足电机车正常运行时的加速度测量范围. 车载机的主控芯片采用的是飞思卡尔公司 16 位 MC9S12XS128MAL 单片机, 其工作频率达到了 16M, 其中集成了 A/D 转换模块, 10 数字转换时间仅有 7us, 并且能够进行浮点数运算, 能够完全满足对加速度数据的进行实时采集、转换和计算. 无线通讯模块选用杭州飞拓电子科技有限公司基于 CC1101 芯片的 Si4432 无线模块, 它工作在 433MHz 免费 ISM 频段, 可一次发送长达 384 字节数据包, 具有透明传输、距离远、功耗低、传输快等特点, 能够适应矿井下的复杂环境.

节点机安装在井下巷道内, 主要作用是电机车和上位机进行信息交换的中介, 电机车通过节点机将自身信息发送给上位机, 然后将这些信息在其画面上显示; 而上位机将调度信息通过无线节点发送给电机车, 并与位移信息相结合实现定位功能, 其系统结构图如图 4 所示. 其硬件选用与车载机一样, 这里不再赘述.

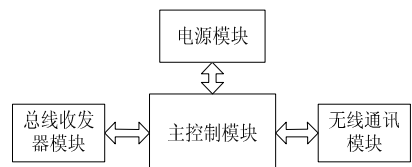


图 4 节点机系统结构框图

本方案实现精确定位的关键技术在于判断行车方向准确、加速度传感器计算位移准确、无线传输误码率低.

3 定位关键技术

随着 MEMS 技术的成熟, MEMS 三轴加速度传感器在物体任意空间动作检测和模式识别上得到广泛应用, 本方案中利用它来判断机车行驶方向和计算机车行驶路程. 但是加速度传感器输出存在误差, 并且存在多种干扰因素, 因此必须从硬件和软件两方面来抑制误差. 由于篇幅有限, 本文只介绍软件算法在两项关键技术中的应用.

3.1 行车方向检测

将加速度传感器的 X 轴正方向对准机车前进方向, 由于机车从静止开始运动不管是向前行驶还是向后行驶都会产生一个加速度, 而且这两个加速度在减去静态输出值之后数值符号不同. 机车记录下这个启动加速度值, 通过与上一时刻记录的值相比较来判断行车方向是否改变. 但是由于自身噪声、环境噪声等的影响会让加速度传感器产生误输出, 导致行车方向判断错误. 所以必须设计有效的滤波方法, 保证加速度传感器输出值的稳定性, 这也为位移的积分运算奠定了基础.

本文设计了 FIR 低通滤波器滤除高频噪声, 保证静态输出值的准确性和稳定性. 数学中的 M 阶 FIR 滤波器表示为:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M-1} h(i)x(n-i).$$

其中: $y(n)$ 是滤波后的数据; $x(n-i)$ 是滤波前的数据; $h(i)$ 是滤波系数. 其系统函数为 $H(z) = \sum_{n=0}^{M-1} h(n)z^{-n}$.

利用 MATLAB 进行滤波器设计. 选用窗函数设计方法. 其中参数为: 采样频率 $f_s = 800\text{Hz}$. 通带边缘频率 $f_{p1} = 50\text{Hz}$. 阻带边缘频率 $f_{s1} = 60\text{Hz}$. 通带波纹 $\delta_p \leq 1\text{dB}$. 阻带衰减 $\delta_s \geq 30\text{dB}$. 滤波阶数为 15. 以 X 轴为例. 其仿真结果如图 5 所示.

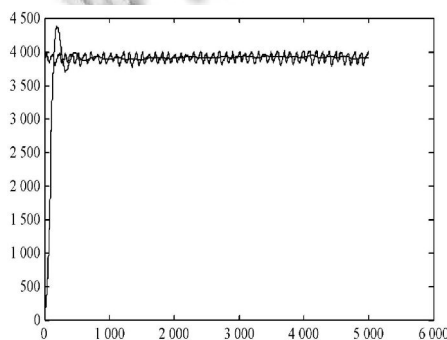


图 5 加速度传感器低通滤波仿真图

由上图可以可知, 在滤波之前加速度传感器的静

态输出值是以某数值为中心上下波动的, 滤波之后静态输出值可认为是一个常数. 本文所提出的滤波方法可以有效滤除噪声干扰, 使加速度传感器输出一个准确的、稳定的加速度值.

3.2 位移计算

机车行驶的路程是由 X 轴和 Y 轴两个方向上的位移共同计算得来的. X 轴方向上的位移为 $S_x = \iint a_x dt$. Y 轴方向上的位移为 $S_y = \iint a_y dt$. 所以机车行驶位移为 $S = S_0 + \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$. 其中 S_0 是初始距离. 但是在实际计算结果就是连续的采样值 $f(x)$ 与采样时间 T 的乘机之和. 即为 $\sum_{i=0}^n f(i)T$.

由于这样计算出来的是矩形面积代表位移, 那就会在所难免的存在误差, 误差如图 6(a)阴影部分. 而且误差会随着时间不断的累加, 最后由于误差过大导致定位失败. 为了减小矩形面积积分过程中积累的误差, 本文通过减小采样值的方法来减小误差, 即利用连续的两次采样值的平均值作为实际的采样值. 也就是采用梯形面积代表采样时间内的位移如图 6(b)所示, 即:

$$\sum_{i=0}^n \left[\frac{f(i) + f(i+1)}{2} \right] T.$$

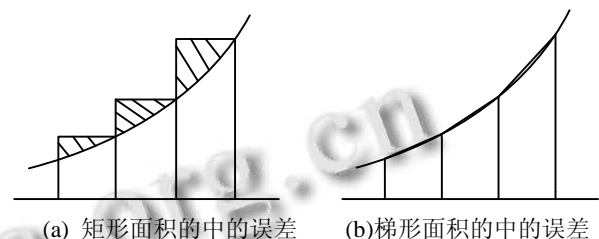


图 6 积分过程中的误差

3.3 降低误码率

节点机工作稳定性的高低直接决定了定位的成功与否. 但是煤矿井下实际环境十分复杂, 电磁波传输衰减严重, 这样将严重影响节点机的工作稳定性.

对于提高无线节点工作稳定性, 本文将从无线节点安装位置、容错机制、网络拓扑图三方面进行分析:

1) 在煤矿井下无线节点选择合适的安装位置, 不仅可以降低电磁波传输衰减程度, 扩大无线覆盖范围, 而且还可以减少多径起伏现象. 根据文献[4]基于水平极化天线设计的无线节点的合理安装位置可以选取在巷道侧壁的中心, 基于垂直极化天线的设计的无线节点的合理安装位置可以是巷道顶壁的中心.

2)井下的复杂环境容易对电磁波产生干扰,易使接收的信息与发送的信息不一致.本文设计了基于CRC 校验应答容错机制,机车接收数据之后先进行CRC 校验,如果数据正确,向上位机发送一帧应答数据表示已经正确接收;如果机车没有正确接收数据或者上位机没有收到应答数据,上位机一直向下发送未应答数据.这样就可以保证上位机发送的调度信息能被机车正确接收.

3)煤矿井下不仅仅有电机车监测系统,需要网络规模较大,所以无线网络的拓扑的选择必须保证无线链路的畅通和无线网络的健壮性.本文选用文献[5]提出的与现场总线相结合4层分簇链状无线传感器网络拓扑结构,此拓扑结构可以提高数据的安全性和稳定性.

最后上位机通过发送消息帧信号再判断网络模块的应答,统计发送的失败值.经试验验证误码率在1%以下.

4 速度、位移结果重建

与理想情况不同的是,因为积分特性的影响加速度计对误差会随着积分运算过程不断累加导致在电机车停止后的速度并不为0,这与实际情况并不相符.并且随着时间的增长,积分结果误差也会越来越大,最终导致最后计算结果与电机车实际运行情况相差很多.因此,为了解决定位更加精确的问题,本文设计二次多项式重建算法对计算完成的速度和位移进行重建,使其达到定位精度要求.

设速度重建二次多项式为:

$$v_r(t_x) = v(t_x) + bt_x^2 + ct_x + b_3 \quad (1)$$

则位移重建多项式为:

$$s_r(t_x) = s(t_x) + \frac{b}{3}t_x^3 + \frac{c}{2}t_x^2 + bt_x + b_4 \quad (2)$$

在实际情况下,电机车运行前的位移和速度都为0,运行停止后的速度也为0,但是仅通过上述这些条件是无法求出式(1)、(2)中的所有系数.但是考虑到电机车运行前实际加速度也为0,因此引入了加速度状态,将式(1)两边求导,得:

$$a_r(t_x) = a(t_x) + 2bt_x + b_2 \quad (3)$$

联立式(1)、(2)、(3)和已知条件 $v_r(t_0) = 0$. $s_r(t_0) = 0$. $v_r(T) = 0$. $a_r(0) = 0$ 解得:

$$b_1 = \frac{a(0)T + v(0) - v(T)}{T^2}, \quad b_2 = -a(0)$$

$$b_3 = -v(0), \quad b_4 = -s(0)$$

则速度与加速度的重建多项式分别为:

$$v_r(t_x) = v(t_x) + \frac{a(0)T + v(0) - v(T)}{T^2}t_x^2 - a(0)t_x - v(0) \quad (4)$$

$$s_r(t_x) = s(t_x) + \frac{a(0)T + v(0) - v(T)}{3T^2}t_x^3 - \frac{a(0)}{2}t_x^2 - v(0)t_x - s(0) \quad (5)$$

式中: $v(t_x)$. $s(t_x)$ 为重建前的计算结果. $v_r(t_x)$. $s_r(t_x)$ 为重建后的速度与位移. $a(0)$. $v(0)$. $s(0)$ 为电机车初始状态. T 为电机车运行时间.

本文进行了实际的对比测试试验,在实际为100米的轨道上,先将未利用矩形面积算法和未对速度、位移结果重建后的系统测试运行50次,再将利用矩形面积算法和对速度、位移结果重建后的系统测试运行50次,测试结果如表1所示.由表可知,利用梯形面积算法并对速度、位移重建后误差明显减小,误差在1m左右.

表1 测试结果数据表

第(N)次 试验	实际行程	未改变算法. 结果未重建	改变算法. 结果重建
1	100m	105.4m	100.4m
2	100m	105.7m	99.6m
3	100m	95.3m	98.9m
...
50	100m	106.3m	101.2m

5 结论

本文利用机车自身信息和调度信息实现了煤矿井下的机车精确实时定位.通过设计FIR低通滤波器,经仿真实验验证,可有效抑制加速度传感器的噪声干扰.为了提高位移计算精度问题,设计了梯形面积算法,并对速度、位移结果进行了重建,误差在1m左右.对于调度信息传输可靠性问题,从无线节点安装位置、容错机制、网络拓扑图三方面进行了分析.经测试实验验证,该系统可靠性高,具有较大工程实用价值.

参考文献

- 1 吴立新,汪云甲,丁恩杰,朱旺喜,张瑞新,张申,王植.三论数字矿山—借力物联网保障矿山安全与智能采矿.煤炭学报,2012,3:357-363.
- 2 司匡书,李锡文.WIFI 和 RFID 的矿井机车实时定位系统.机械与电子,2012,5:27-29.
- 3 牛迎丽,李晓峰,乔和,葛爱丽.基于惯性导航技术的井下电机车精确定位系统.计算机系统应用,2012,21(10):43-46.
- 4 霍羽,刘逢雪,徐钊.煤矿井巷天线位置对辐射场分布的影响.煤炭学报,2013,4:715-719.
- 5 张申,丁恩杰,武增.煤矿井下综合业务数字网网络结构的研究.煤炭学报,2002,4:206-210.
- 6 顾卫东,卢新艳.FIR 数字滤波在 MEMS 加速度计中的应用.器件与技术,2009,12:735-737.
- 7 于立娟,于海业,张志平.基于 GSM 的远程环境监控系统.仪表技术与传感器,2007,(3):69-70.
- 8 赵仕俊,孙美玲,唐懿芳.基于遗传模拟退火算法的无线传感器网络定位算法.计算机应用与软件,2009,(10):189-191.
- 9 毛晓峰,杨珉,毛迪林.无线传感器网络应用综述.计算机应用与软件,2008(3):179-181.
- 10 Chehri A, Fortier P, Tardif PM. Geo-location with wireless sensor networks using non-linear optimization. Proc. of International Journal of Computer Science and Network Security(IJCSNS), 2008,(1):145-154.
- 11 Tam V, Cheng KY, Lui KS. Improving APS with anchor selection in an isotropic sensor networks. Proc. of the International Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, USA. 2006.