

矿井信集闭系统中车载式机车定位传感器^①

张国军, 陈红

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

摘要: 为解决以往煤矿井下运输信集闭系统中依赖轨道铺设的传感器实现机车位置监测的可靠性差的难题, 本文提出一种不依赖轨道铺设传感器的机车位置监测的煤矿铁路运输信集闭系统, 采用捷联惯性导航技术, 设计了依靠电机车自身精确定位的信集闭系统。重点介绍捷联惯性导航系统的算法问题以及车载式机车定位的硬件设计方案, 经实验测试, 取得了良好的效果。

关键词: 信集闭系统; 机车精确定位; 轨道传感器; 捷联惯性导航

Vehicle-Mounted Locomotive Positioning Sensor in Coal Railway Transportation Signaling Centralized and Locking System

ZHANG Guo-Jun, CHEN Hong

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

Abstract: To solve the problem of the poor reliability of monitoring locomotive position relying on laying on the track in letter coal mine transport information system. The paper proposes a coal mine transport information system which not relying on track sensors. The system adopts strapdown inertial navigation and designs the coal mine transport information system of motor vehicle's own set of precise positioning. Mainly introduces the algorithms of strapdown inertial navigation and the hardware scheme of vehicle positioning. The experimental test of this system proves a good result.

Key words: signal concentrating and interlocking system; locomotive precise location; track sensors; strapdown inertial navigation

信集闭系统是提高矿井运输能力、保证电机车运行安全的重要手段。长期以来, 煤矿运输信集闭系统大都采用基于轨道传感器来实现机车位置监测, 该方法不足之处在于: 由于轨道铺设传感器线路较长, 系统工作量大, 维护成本高; 安装位置不隐蔽, 易损坏传感器; 在特殊情况下, 机车的丢车或某些机车不能与传感器发生作用时, 传感器都不能反映机车位置信息, 使系统不能识别机车存在而造成事故; 机车位置的监测可靠性较差, 不能适应煤矿井下恶劣环境, 也就不能实现真正意义上的调度工作现代化的信集闭系统^[1]。

为了改善煤矿井下信集闭系统中运输调度工作的落后状况, 本文提出无轨道传感器的煤矿铁路运输信集闭系统。该系统利用捷联惯性导航技术实现电机车

的精确定位, 该系统可靠性高, 自主性强, 隐蔽性好, 并且不受轨道条件好坏影响, 有利于信集闭系统在煤矿铁路运输中的推广^[2]。

1 信集闭系统的原理及设备组成

(1) 系统调度基本原理: 按照某一进路行驶的电机车根据车载机上的传感器获得机车的运动信息, 并把机车的具体状况信息由无线传输模块传给上位机显示。调度员根据全面掌握的电机车运行信息, 对接收的信息进行分析判断, 并发出相应指令, 实现煤矿井下铁路运输的自动调度。

(2) 系统结构: 该信集闭系统分为三层, 第一层为监控主站, 即主控计算机, 通过 RS485 总线和机车精确定位系统监测到的机车运动状况信息, 对井下大巷的机

① 收稿时间:2011-07-28;收到修改稿时间:2011-08-31

车进行监控和调度；第二层为监控分站，实现主站与子站之间的数据通信；第三层为监控子站，包括信号机、转辙机等现场设备，实现数据的采集并控制信号机与道岔状态。其中，监控主站与分站之间，及分站与子站之间均通过 485 总线实现数据传输。总体结构如图 1 所示。基于电机车精确定位系统主要由固联在煤矿井下电机车上的车载机、节点机、上位显示组成。车载机，主要包括陀螺仪、加速度计、主控制芯片、语音处理芯片、无线通讯模块，实现对惯性数据的采集与计算，同时肩负着语音的采集与发送。每个车载机赋予固定的编号信息，无线通讯将这些编号信息传给巷道固定位置的节点机，方便任何一个节点与附近的车载机进行通信。机车精确定位系统如图 2 所示。

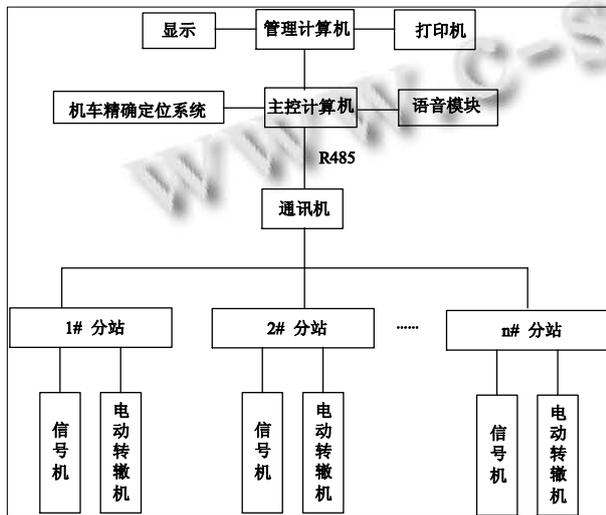


图 1 信集闭系统结构框图

2 机车定位原理

无轨道传感器的煤矿井下运输信集闭系统是利用捷联惯性导航技术实现电机车自身精确定位的煤矿井下信集闭系统。它将陀螺和加速度计直接固联在煤矿井下电机车体上，分别测量机车相对惯性空间上的角运动和线运动的数据信息。车载机上计算机根据这些数据信息通过积分、微分、矩阵乘法等运算计算出机车姿态、速度和位移等参数，进而确定机车位置。为了降低捷联陀螺和加速度计的输出噪声对系统解算精度的影响，并且能够完全利用输出信息，陀螺和加速度计的输出全部采用增量形式，并且在相应的计算中

$$C_n^b = (C_b^n)^T = \begin{bmatrix} \cos\gamma \cos\psi + \sin\gamma \sin\theta \sin\psi & \sin\gamma \sin\theta \sin\psi - \cos\gamma \sin\psi & -\sin\gamma \cos\theta \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\theta \cos\psi & \sin\theta \\ \sin\gamma \cos\psi - \cos\gamma \sin\theta \sin\psi & -\sin\gamma \sin\psi - \cos\gamma \sin\theta \cos\psi & \cos\gamma \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

做严格的误差补偿。此捷联惯导系统的导航坐标系一般取为地理坐标系，可令电机车坐标系为 b ，导航坐标系为 n 。用捷联陀螺仪测量的角速度与导航解算的角速度来对捷联矩阵进行修正，经旋转四元数得到捷联矩阵。再从捷联矩阵元素中提取机车的姿态信息，得到机车位置、速度信息。从而可以得到机车的航向、姿态、速度及位置信息。具体变换过程如图 3 所示。

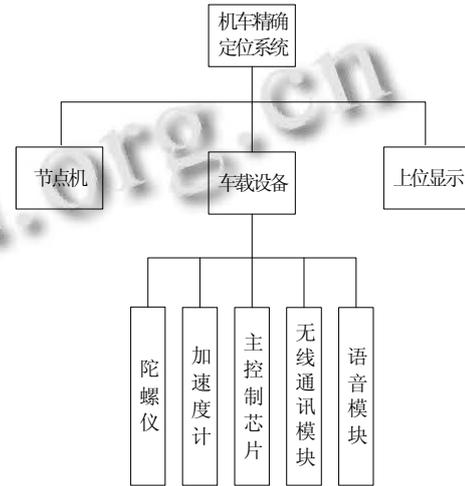


图 2 机车精确定位系统

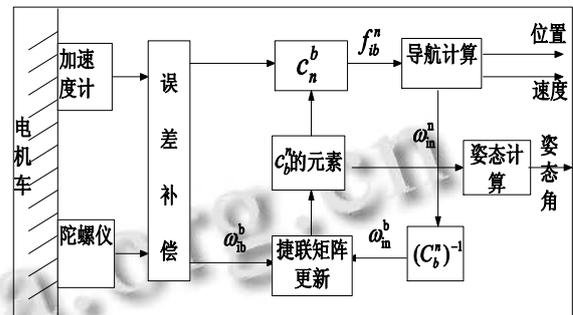


图 3 捷联惯性导航系统原理

2.1 电机车的姿态阵的更新及姿态角的计算

取电机车坐标系相对平台坐标系旋转四元数为：

$$Q = q_0 + q_1 i_1 + q_2 j_0 + q_3 k_0 \quad (1)$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对应的三角关系矩阵为：

同时若记:

$$C_n^b = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据其对应关系, 可得机车的俯仰角 θ , 横滚角 r , 航向角 ψ 分别为:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin(T_{23}) \\ r = \arctan(-\frac{T_{13}}{T_{33}}) \\ \psi = \arctan(\frac{T_{21}}{T_{22}}) \end{cases}$$

2.2 速度的求取

为了实现陀螺和加速度计的输出信号在时间上的无遗漏采样和利用, 系统采集的是在确定时间间隔内陀螺的角增量输出和加速度计的速度增量输出, 而不是离散时间点上的角速度输出和比力输出。采用可逆计数器对脉冲在确定的时间段内作计数, 所得脉冲计数乘以相应的脉冲当量即得角增量和速度增量。速度方程为:

$$V^R = C_b^R f^b - (2\omega_{ie}^R + \omega_{eR}^R) \times V^R + g^n \quad (5)$$

对速度方程积分, 得 t_m 时刻机车在导航坐标系内的速度:

$$V_m^n = V_{m-1}^n + C_{b(m-1)}^n \int_{t_{m-1}}^{t_m} C_{b(t)}^{b(m-1)} f^b dt + \int_{t_{m-1}}^{t_m} [g^n - (2\omega_{ie} + \omega_{en}) \times V^n] dt \quad (6)$$

其中 T 为速度更新的周期, n 为每一更新周期时间内的角增量和速度增量的采用次数。

2.2 位置矩阵的更新及位置求取

位置解根据离散时间点上的速度和角增量和速度增量求取。 t_1 时刻的位置矩阵 C_e^n 为:

$$C_e^{n(l)} = C_{n(l-1)}^{n(l)} C_e^{n(l-1)} \quad (7)$$

式中为上位置更新时间点上确定的位置矩阵。位置矩阵可以通过求解位置矩阵微分方程式(8) 得到, 其中, $[w_{en}^e]$ 为相对角速度矢量组成的反对称矩。

$$\dot{C}_e^n = C_n^e \cdot [w_{en}^e] \quad (8)$$

对(8)式两边求转置, 则可得方向余弦矩阵微分方程的另一形式:

$$\dot{C}_e^n = -C_n^e \cdot [w_{en}^e] \quad (9)$$

且此方向余弦矩阵是正交的, 即

$$C_e^n = (C_n^e)^{-1} = (C_n^e)^T \quad (10)$$

$$C_e^n = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

若记:

$$C_e^n = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

则得电机车相对位置信息:

$$\begin{cases} \lambda = \arctan(C_{33}) \\ \varphi = \arcsin(\frac{C_{33}}{C_{31}}) \end{cases}$$

以上捷联惯导算法的运算, 最终可得到机车的全部位置信息。机车不需要外部数据, 既可以根据自身数据的改变, 同时知道自身运动前的初始信息, 经过运算得出自身所需的信息。

3 机车定位硬件结构

惯性系统硬件结构如图 4 所示, 首先陀螺仪与加速度计采集数据, 其测量值经过 A/D 转换, 继而传送至微控制器, 微控制器将这些数据进行捷联导航运算, 计算出车载机位置、速度、姿态、行驶方向信息, 然后将这些数据信息以无线通讯方式传至节点机, 节点机再通过 485 总线将这些数据传至上位机显示, 构成清晰的机车信息。语音处理是一个中断程序主要是司机通话要求或者接受来自上位机通话要求时才处理的。

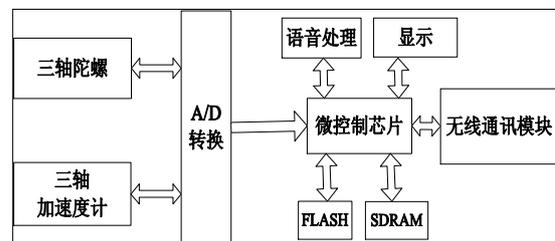


图 4 惯性系统硬件结构

4 陀螺与加速度计的数据检测

为了检验系统的工作状态和性能, 同时也为了进

一步发现系统中存在的各种问题,进行传感器的定位测试是必不可少的。为了使装有加速度计的物体能有较长的运动距离,设计了一个长度为 20m 的轨道来进行系统的测试,第一次实验载体采用电动车,将装有陀螺仪和加速度计的车载机固联在电动车之上,电动车绕实验室周际行走,通过无线通讯模块采集数据,计算结果,统计误差。

表 1 加速度计及陀螺仪的测试

第(N)次试验	实际行程	计算标准	产生误差原因	改进办法
1	20 米	23.5 米	加速度计损坏	更换加速度计
2	20 米	18.5 米	加速度累计误差较大	通过定点校正,进行误差补偿
3	20 米	19.0 米	通频带过宽	增加了数字滤波,滤波截止频率为 1HZ
:	:	:	:	:
30	20 米	19.98 米	误差趋近于零	

为了能实时清晰地跟踪实验结果,我们将采集来的数据通过无线采集卡存储于电脑上,然后将这些数据在 MATLAB 平台上进行分析。采取来的数据格式如图 5 所示:

```

axx(10)=1700; ayy(10)=1733; azz(10)=1967; ixx(10)=2488; iyy(10)=2486; izz(10)=2487;
axx(11)=1699; ayy(11)=1735; azz(11)=1966; ixx(11)=2488; iyy(11)=2486; izz(11)=2487;
axx(12)=1698; ayy(12)=1731; azz(12)=1963; ixx(12)=2488; iyy(12)=2488; izz(12)=2487;
axx(13)=1700; ayy(13)=1731; azz(13)=1968; ixx(13)=2488; iyy(13)=2488; izz(13)=2487;
axx(14)=1698; ayy(14)=1727; azz(14)=1968; ixx(14)=2487; iyy(14)=2488; izz(14)=2487;
axx(15)=1699; ayy(15)=1731; azz(15)=1966; ixx(15)=2488; iyy(15)=2488; izz(15)=2487;
axx(16)=1699; ayy(16)=1731; azz(16)=1964; ixx(16)=2488; iyy(16)=2486; izz(16)=2487;
axx(17)=1698; ayy(17)=1731; azz(17)=1967; ixx(17)=2488; iyy(17)=2486; izz(17)=2487;
axx(18)=1697; ayy(18)=1731; azz(18)=1966; ixx(18)=2486; iyy(18)=2486; izz(18)=2487;

```

图 5 数据采集

数据采取率为 10 为精度:

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 4096}{V_{REF}} \quad (13)$$

这样可以折算出实际数据为,

$$V_{IN} = \frac{ADC \cdot V_{REF}}{4096} \quad (14)$$

即 $axx(10)=1700$, 其中参考电压值为 4.1V, 则折算出实际值为,

$$V_{IN} = \frac{1700 \cdot 4.1}{4096} = 1.7017V \quad (15)$$

因为加速度计的灵敏度为 800mV/g, 故所得的加速度为,

$$a = \frac{V_{IN}}{800mV/g} \quad (16)$$

取 $g=9.8m/s^2$, 求出

$$a = \frac{1.7017V}{800mV/9.8m/s^2} = 20.8458m/s^2$$

经过由上表可看出, 装有陀螺仪和加速度计的电机车的计算行程与实际行程误差趋于零, 很好的实现了预期效果, 自主性强, 解决了信集闭系统中机车位置监测可靠性差问题。体现了无轨道传感器信集闭系统的优势。

5 结语

无轨道传感器的煤矿井下铁路运输信集闭系统, 把陀螺仪和加速度计直接固联在井下电机车体上, 经过捷联导航精确计算得到电机车的精确位置信息, 使调度员准确掌握机车运行动态, 确定相应进路开放与否。车载机同时兼顾了语音功能, 方便调度员和司机的随时通话, 调度司机行驶, 使机车安全有序的运行。经试验测试, 电机车的计算航程与实际行程误差趋近于零, 可靠性高, 自主性强, 保证了机车的安全高效行驶, 提高了矿井运输能力。接下来需要做的是将其应用到煤矿井下电机车实际生产中。

参考文献

- 柳春生. 矿井信集闭传感器技术现状及发展煤矿自动化, 1993,(1):40-42.
- 王晓迪. 捷联惯导系统导航算法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- 商永泰. 矿井信集闭. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- 韩旭. 捷联导航系统数据采集与航姿算法技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- 李玉良. 矿井机车监控系统. 徐州: 中国矿业大学, 2003.
- 王德春, 芮健, 张杰. 捷联惯性导航系统姿态算法综述. 战术导弹控制技术, 2009,(2).
- 吕振, 刘丹, 李春光. 基于捷联惯性导航的井下人员精确定位系统. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1149-1152.
- 兰献寰, 华钢, 左明. 矿井轨道监控系统. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.