

井下精确人员定位系统定位重测机制研究

唐丽均¹, 吴畏², 刘世森³

(1. 重庆工程职业技术学院 大数据与物联网学院, 重庆 402260;

2. 重庆城市管理职业学院 智能工程学院, 重庆 401331;

3. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

摘要:无线信号在井下传输过程中由于信号强度衰减和干扰导致读卡器与标志卡之间测距失败,当测距失败后,标志卡只能等到下一超帧内的固定测距时隙再次与读卡器进行测距,由于标志卡与读卡器进行重新测距的间隔时间较长,不利于及时掌控井下人员实时动态分布情况。针对该问题,提出了一种井下精确人员定位系统定位重测机制。当标志卡测距失败时,该定位重测机制利用空闲时隙,重新对标志卡进行测距。在出现多张标志卡竞争空闲时隙进行重测的情况下,采用层次分析法,根据标志卡的累计重测次数、信号强度、运动速度,确定标志卡抢占空闲时隙的重测优先级,定位读卡器根据重测优先级为测距失败的标志卡优先进行重测。测试结果表明,当标志卡数量少于70张时,定位重测机制能提高精确人员定位系统的平均测距成功率、降低平均重测延时、提升平均时隙利用率,从而能实时监测到不间断的标志卡运动轨迹。

关键词:井下精确人员定位; 测距时隙; 定位重测机制; 空闲时隙; 读卡器; 标志卡

中图分类号:TD76

文献标志码:A

Research on positioning and re-measurement mechanism of underground precise personnel positioning system

TANG Lijun¹, WU Wei², LIU Shisen³

(1. Big Data and Internet of Things School, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China; 2. School of Intelligent Engineering, Chongqing City Management College, Chongqing 401331, China; 3. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: During the underground transmission of wireless signal, the measurement between card reader and marker card fails due to signal strength attenuation and interference. When the measurement fails, the marker card can only wait until the fixed measurement time slot in the next super-frame to measure the distance with the card reader again. As the marker card and the card reader re-measurement interval time is long, it is not conducive to control the real-time dynamic distribution of underground personnel in time. In order to solve this problem, a positioning and re-measurement mechanism of underground precise personnel positioning system is proposed. When the marker card measurement fails, the positioning and re-measurement mechanism uses the idle time slot to re-measure the marker card. When multiple marker cards compete for idle time slots for re-measurement, the hierarchical analysis method is used to determine the re-measurement priority of marker cards using idle time slots according to the accumulated re-measurement times, signal strength and movement speed of the marker cards. And the

收稿日期:2021-09-22;修回日期:2022-01-06;责任编辑:王晖,郑海霞。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808303);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202003407);重庆工程职业技术学院院级课题(KJB202134)。

作者简介:唐丽均(1981-),女,重庆人,副教授,博士,研究方向为无线网络通信技术,E-mail:tanglijun_2002@163.com。通信作者:吴畏(1979-),男,重庆人,高级工程师,副教授,硕士,研究方向为电子信息信息,E-mail:wwzj_cq@tom.com。

引用格式:唐丽均,吴畏,刘世森.井下精确人员定位系统定位重测机制研究[J].工矿自动化,2022,48(1):103-108.

TANG Lijun, WU Wei, LIU Shisen. Research on positioning and re-measurement mechanism of underground precise personnel positioning system[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(1): 103-108.



扫码移动阅读

positioning card reader gives priority to the marker cards which fail in measurement according to the re-measurement priority level. The test results show that when the number of marker cards is less than 70, the positioning re-measurement mechanism can improve the average measurement success rate, reduce the average re-measurement delay, improve the time average slot utilization rate, and enable to monitor the uninterrupted marker card movement track in real time.

Key words: underground precise personnel positioning; measurement time slot; positioning and re-measurement mechanism; idle time slot; card reader; marker card

0 引言

近年来,随着国家对煤矿安全的日益重视,保障井下人员生命安全成为煤矿安全的首要任务。精确人员定位系统^[1-3]可及时掌握井下人员实时动态变化情况,在很大程度上提高了井下人员作业安全系数。

现有精确人员定位系统中,读卡器采用超帧模式为其覆盖范围内的标志卡分配测距时隙^[4-6],当读卡器与标志卡之间的信号强度较强时,标志卡能在固定时隙里与读卡器进行测距。由于矿井巷道结构复杂,同时存在大量悬浮的煤尘、瓦斯及各种设备的电磁干扰,使得无线信号在井下传输过程中的信号强度衰减和干扰比在地面传输更严重^[7-9],导致读卡器与标志卡之间的信号强度无法得到保证,从而增加了读卡器与标志卡之间测距失败的概率。当测距失败后,标志卡只能等到下一超帧内的固定测距时隙再次与读卡器进行测距,由于标志卡与读卡器进行重新测距的间隔时间较长,不利于及时掌控井下人员实时动态分布情况。

为解决上述问题,本文提出一种井下精确人员定位系统定位重测机制。该机制在标志卡测距失败后使用空闲时隙进行重新测距,可提高标志卡的测距成功率,减少读卡器与标志卡进行重新测距的延迟时间。

1 定位重测机制设计

井下精确人员定位系统主要由人员定位服务器、交换机、人员管理分站、定位读卡器和标志卡组成,如图 1 所示。当人员携带标志卡首次进入定位读卡器覆盖范围时,定位读卡器采用超帧模式为标志卡分配固定的测距时隙,每张标志卡在分配的测距时隙里与定位读卡器完成定期测距,定位读卡器获取相应标志卡的位置信息。定位读卡器将其覆盖范围内所有标志卡的位置数据进行汇总,再将汇总数据通过人员管理分站和交换机上传至人员定位服务器。

本文在定位读卡器为标志卡分配测距时隙的超

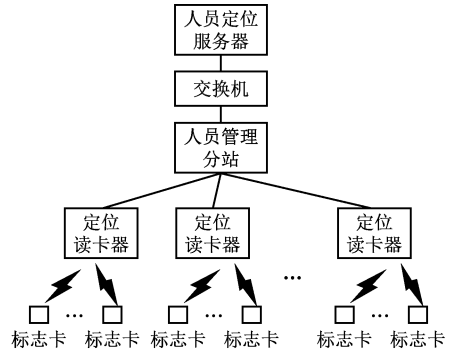


图 1 井下精确人员定位系统结构

Fig. 1 Architecture of underground precise personnel positioning system

帧模式中引入一种改进的定位重测机制,用于减少标志卡测距失败时的重新测距等待时间。井下精确人员定位系统定位重测机制原理如图 2 所示。

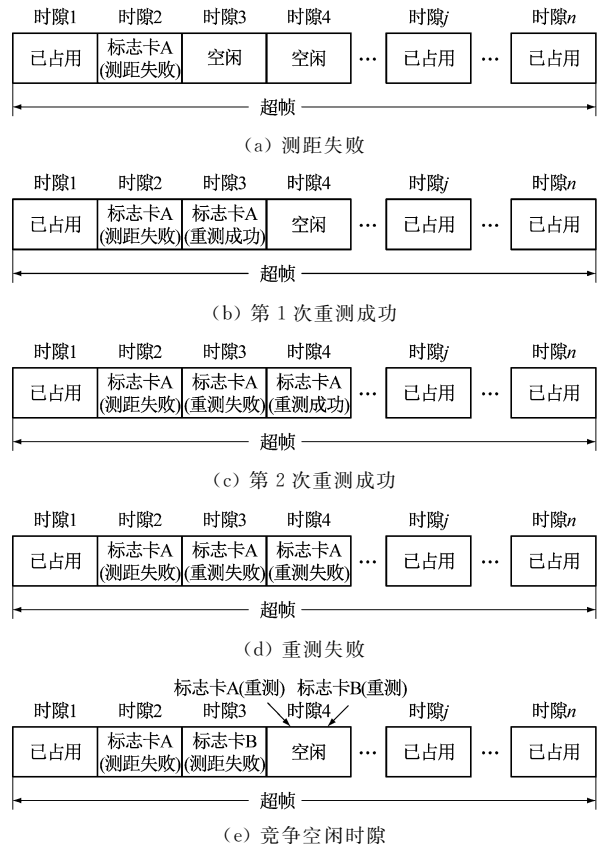


图 2 井下精确人员定位系统定位重测机制原理

Fig. 2 Mechanism and principle of positioning and re-measurement of underground precise personnel positioning system

假设定位读卡器与标志卡 A 测距失败,如图 2(a)所示,在下一时隙,标志卡 A 重新发送测距信号,如存在空闲时隙,读卡器将该空闲时隙临时分配给标志卡 A,在该时隙里再次与标志卡 A 进行测距,如测距成功,则收回该时隙,如图 2(b)所示;如测距仍失败,则根据设置的单超帧最大重测次数,标志卡确定是否继续进行重新测距,如未超过最大重测次数限制,则继续重测直至重测成功,如图 2(c)所示,否则停止重测,如图 2(d)所示。当多个标志卡都需重新测距时,会出现同时竞争 1 个空闲时隙的情况,如图 2(e)所示,这时根据标志卡的重测优先级将当前空闲时隙分配给相应的标志卡。

2 定位重测机制实现

2.1 定位重测机制的分析模型

在定位重测机制中,为了避免多个标志卡抢占空闲时隙进行重测导致无序竞争,读卡器根据覆盖区域内标志卡平均测距成功率、平均重测延时及平均时隙利用率来对重测标志卡确定优先级,从而根据优先级进行空闲时隙重测分配。为了能更加直接体现各标志卡重测条件的差异,本定位重测机制以各标志卡的累计重测次数、信号强度、运动速度替代平均测距成功率、平均重测延时及平均时隙利用率来计算各标志卡抢占空闲时隙的重测优先级。

通过层次分析法建立定位重测机制的分析模型^[10-13],确定标志卡的累计重测次数、信号强度、运动速度在重测优先级中所占权重,如图 3 所示。

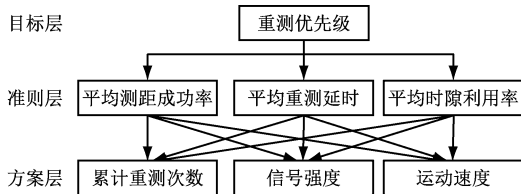


图 3 定位重测机制的分析模型

Fig. 3 Analysis model of positioning re-measurement mechanism

根据定位重测机制的分析模型,按以下流程计算标志卡的重测优先级。

(1) 构建方案层的累计重测次数因素 S_1 、信号强度因素 S_2 、运动速度因素 S_3 对于准则层判断矩阵 T_j 。

$$T_j = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 t_{ij} 为 S_i 与 S_j 相对平均测距成功率的重要性之比, $t_{ij} > 0$, $t_{ji} = 1/t_{ij}$, $t_{ii} = 1$, $i, j = 1, 2, 3$ 。

(2) 获取判断矩阵 T_j 的最大特征值 λ_{\max} 及特征向量 W_j 。

$$W_j = \{f_1^j, f_2^j, f_3^j\} \quad (2)$$

$$f_i^j = \sqrt[r]{\prod_j t_{ij}} / \sum_{i=1}^r \sqrt[r]{\prod_j t_{ij}} \quad (3)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{(T_j W_j)_i}{f_i^j} \quad (4)$$

式中: f_i^j 为平均测距成功率对于 S_i 的权重; r 为判断矩阵的阶数, $r = 3$; $(T_j W_j)_i$ 为 $T_j W_j$ 的第 i 个元素。

(3) 为了确保特征向量的不一致性程度在容许范围内,需对判断矩阵进行一致性检验。

$$X_i = \lambda_{\max} - r/r - 1 \quad (5)$$

$$Y_i = X_i / Z_i \quad (6)$$

式中: X_i 为一致性指标; Y_i 为一致性比率, 当 $Y_i < 0.1$ 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性; Z_i 为随机平均一致性指标, 当 $r = 3$ 时, $Z_i = 0.58$ 。

(4) 计算方案层所有因素在目标层因素中所占权重。根据步骤(1)~(3), 分别计算出平均测距成功率、平均重测延时及平均时隙利用率在重测优先级中所占权重 g_1, g_2, g_3 , 计算累计重测次数在平均测距成功率、平均重测延时及平均时隙利用率中所占权重 q_1, q_2, q_3 。则累计重测次数对于重测优先级的权重为 $h_1 = \sum_{i=1}^3 q_i g_i$ 。

(5) 当平均测距成功率、平均重测延时及平均时隙利用率在重测优先级中所占权重确定之后, 对其一致性进行检验。分别计算平均测距成功率、平均重测延时及平均时隙利用率对于方案层一致性指标 X_1, X_2, X_3 , 同时得到其随机平均一致性指标 Z_1, Z_2, Z_3 , 分别计算总体一致性指标 X 及总体随机平均一致性指标 Z 。

$$X = \sum_{i=1}^3 g_i X_i \quad (7)$$

$$Z = \sum_{i=1}^3 g_i Z_i \quad (8)$$

计算总体一致性比率 Y , $Y = X/Z$, 当 $Y < 0.1$ 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性。

(6) 按照步骤(1)~(5)分别获得累计重测次数、信号强度、运动速度在重测优先级中所占权重 (h_1, h_2, h_3) 。

(7) 计算标志卡的重测优先级 C_k 。

$$C_k = L_k h_1 + P_k h_2 + V_k h_3 \quad (9)$$

式中: L_k 为归一化后的累计重测次数, 该参数值越大, 表示标志卡所处位置的环境越恶劣, 重测优先级越高; P_k 为归一化后的信号强度, 该参数值越大, 表示标志卡重测成功率越高, 重测优先级越高; V_k 为归一化后的运动速度, 该参数值越大, 表示在相同时间内, 标志卡的测距值变化越大, 对延时要求越高,

重测优先级也就越高。

(8) 生成标志卡的重测集合 C 。

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\} \quad (10)$$

式中 m 为标志卡总数。

2.2 定位重测机制流程

(1) 初始化相关参数。配置超帧的测距时隙总数、单超帧最大重测次数、层次分析法的判断矩阵。

(2) 获取标志卡的重测集合。计算平均时隙利用率、平均测距成功率及平均重测延时在重测优先级中所占权重；获取各标志卡的 L_k, P_k, V_k ，计算标志卡的重测优先值 C_k ，生成标志卡的重测集合 C 。

(3) 重新测距。当标志卡测距失败时，读卡器分配空闲时隙用于重测；当多张标志卡均要抢占该时隙进行重测，则将该时隙分配给优先级最高的标志卡，其余标志卡则认为重测失败；如果重测仍失败，且该标志卡在本超帧内的重测次数不超过单超帧最大重测次数，则继续重新测距，否则标志卡在本超帧内的重测结束。

(4) 如标志卡未离开读卡器覆盖区域，则获取标志卡的重测集合，否则，重测结束。

3 测试验证

在黑龙江龙煤矿业集团股份有限公司某煤矿搭建精确人员定位系统，对定位重测机制的性能进行验证。定位系统包括 1 台测试电脑、1 个定位读卡器、100 张标志卡，测试参数见表 1。

表 1 测试参数

Table 1 Test parameters

参数	数值
定位范围/m	0~200
超帧时间/s	2
人员运动速度/m · s ⁻¹	0~3
超帧时隙/个	100
单超帧最大重测次数	2

邀请专家根据影响井下精确人员定位系统无线通信的因素及各因素之间的关系^[14-15]，对各因素进行打分，以确定判断矩阵，并通过一致性检验。

准则层-目标层的判断矩阵见表 2。通信可靠性是无线通信的重要指标，通过提高平均测距成功率可提升定位系统无线通信的可靠性，因此平均测距成功率相对重测优先级的重要性高于平均重测延时和平均时隙利用率；降低平均重测延时可提升定位系统无线通信的实时性，实时性对定位系统及时准确监测人员运动轨迹的性能有较大影响，相对重测优先级的重要性次于平均测距成功率，高于平均时隙利用率；提高平均时隙利用率可改善定位系统

无线通信的 QoS(Quality of Service, 服务质量)，重要性最低。

表 2 准则层-目标层的判断矩阵

Table 2 Criterion layer-target layer judgment matrix

重测优先级	平均测距成功率	平均重测延时	平均时隙利用率
平均测距成功率	1	4	7
平均重测延时	1/4	1	3
平均时隙利用率	1/7	1/3	1

平均测距成功率-方案层的判断矩阵见表 3。信号强度直接影响读卡器与标志卡的通信是否成功，对平均测距成功率影响最大，因此其相对平均测距成功率的重要性高于累计重测次数和运动速度；累计重测次数间接反映标志卡与读卡器通信质量，其相对平均测距成功率的重要性次于信号强度，高于运动速度；运动速度对平均测距成功率影响很小，其重要性最低。

表 3 平均测距成功率-方案层的判断矩阵

Table 3 Average measurement success rate-schematic layer judgment matrix

平均测距成功率	累计重测次数	信号强度	运动速度
累计重测次数	1	1/2	3
信号强度	2	1	7
运动速度	1/3	1/7	1

平均重测延时-方案层的判断矩阵见表 4。累计重测次数越多，会直接增加平均重测延时，因此累计重测次数相对平均重测延时的重要性高于运动速度和信号强度；标志卡运动速度越快，相同时间内标志卡位置变化越大，监测到快速移动的轨迹点所需平均重测延时越短，运动速度相对平均重测延时的重要性次于累计重测次数，高于信号强度；信号强度间接影响平均重测延时，其重要性最低。

表 4 平均重测延时-方案层的判断矩阵

Table 4 Average re-measurement delay-schematic layer judgment matrix

平均重测延时	累计重测次数	信号强度	运动速度
累计重测次数	1	5	3
信号强度	1/5	1	1/3
运动速度	1/3	3	1

平均时隙利用率-方案层的判断矩阵见表 5。跟踪快速运动标志卡的完整轨迹需要保证足够多的成功测距点，则需要占用更多的时隙来确保重测成功，因此运动速度相对平均时隙利用率的重要性高于累计重测次数和信号强度；累计重测次数越多，累计占用的时隙也越多，对平均时隙利用率的影响越大，累计重测次数相对平均时隙利用率的重要性次

于运动速度,高于信号强度;信号强度间接影响平均时隙利用率,其重要性最低。

表5 平均时隙利用率-方案层的判断矩阵

Table 5 Average slot utilization-schematic layer judgment matrix

平均时隙利用率	累计重测次数	信号强度	运动速度
累计重测次数	1	3	1/2
信号强度	1/3	1	1/5
运动速度	2	5	1

有无定位重测机制下井下精确人员定位系统平均时隙利用率、平均测距成功率和平均重测延时的对比如图4—图6所示。

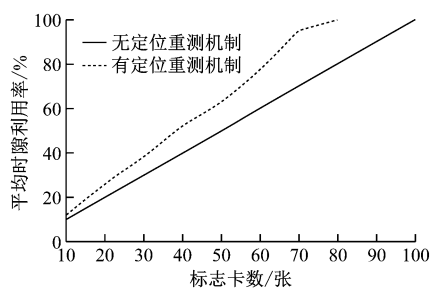


图4 平均时隙利用率

Fig. 4 Average slot utilization

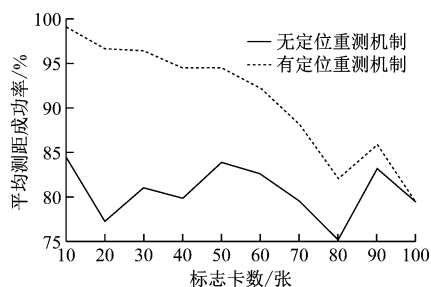


图5 平均测距成功率

Fig. 5 Average measurement success rate

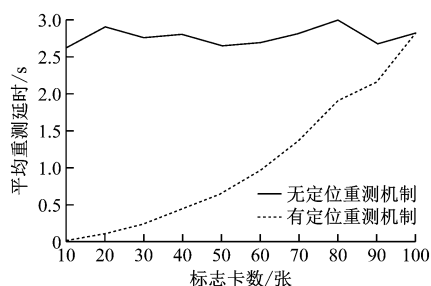


图6 平均重测延时

Fig. 6 Average re-measurement delay

从图4可看出,当标志卡数量少于70张时,定位重测机制能提高平均时隙利用率20%~25%;但当标志卡数量超过70张后,定位重测机制平均时隙利用率提高幅度低于20%。从图5可看出,当标志卡数量少于70张时,定位重测机制能提高平均测距成功率10%~20%;当标志卡数量超过70张后,定位重测机制平均测距成功率提高幅度低于10%。从图6可看出,当标志卡数量少于70张时,定位重

测机制能使平均重测延时从2.6~2.9 s降低到0.05~1 s;当标志卡数量超过70张后,平均重测延时从2.6~3 s只能降低到1.4~2.8 s。

无定位重测机制的标志卡运动轨迹如图7所示。可看出标志卡A在16,36 s这2个时间点处测距失败,标志卡B在8,16,28,30 s这4个时间点处测距失败,导致标志卡的运动轨迹不连续。有定位重测机制的标志卡运动轨迹如图8所示。可看出标志卡B在4个测距失败时间点处重测均成功,其运动轨迹在全时段内均连续;标志卡A在16 s处重测失败,因为在该时间点,标志卡A的重测优先级低于标志卡B,但在36 s处重测成功,其在16~38 s内的运动轨迹未出现中断。

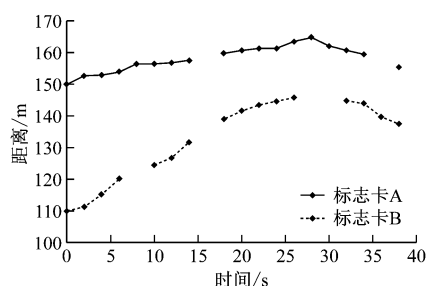


图7 无定位重测机制的标志卡运动轨迹
Fig. 7 The trajectory of flag card without positioning and re-measurement mechanism

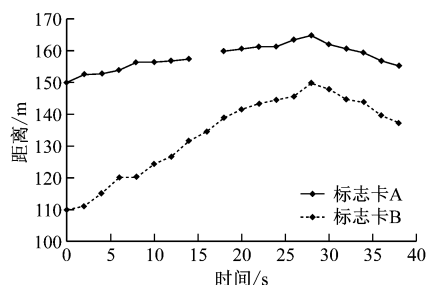


图8 有定位重测机制的标志卡运动轨迹
Fig. 8 The trajectory of marker card with positioning and re-measurement mechanism

4 结论

(1) 提出了标志卡在测距失败后利用空闲时隙进行重新测距的井下精确人员定位系统定位重测机制,并采用层次分析法根据标志卡的累计重测次数、信号强度、运动速度,计算标志卡的重测优先级。

(2) 定位读卡器根据标志卡的重测优先级为标志卡分配重测时隙,重测优先级高的标志卡优先进行重测。测试结果表明,当标志卡数量少于70张时,定位重测机制能提高井下精确人员定位系统的平均测距成功率、降低平均重测延时、提升平均时隙利用率,从而能实时监测到不间断的标志卡运动轨迹。

参考文献(References):

- [1] 曹永刚. 基于射频识别技术的煤矿井下人员定位系统设计应用[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(2): 194-196.
CAO Yonggang. Design and application of underground personnel positioning system based on radio frequency identification technology [J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(2): 194-196.
- [2] 王国亮. 煤矿井下作业人员高精度定位系统设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(3): 247-249.
WANG Guoliang. Design of high-precision positioning system of coal mine underground operators [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(3): 247-249.
- [3] 尹建龙, 郭秀娟. 基于 STM32 单片机的煤矿综合监测系统的设计[J]. 吉林建筑大学学报, 2021, 38(2): 78-82.
YIN Jianlong, GUO Xiujuan. Design of coal mine comprehensive monitoring system based on STM32 MCU[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2021, 38(2): 78-82.
- [4] 牛永刚, 窦学丽, 殷鹏, 等. 基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统[J]. 工矿自动化, 2021, 47(7): 125-129.
NIU Yonggang, DOU Xueli, YIN Peng, et al. Positioning system of fully mechanized working face based on UWB and laser ranging [J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 125-129.
- [5] 王飞. 矿用精确定位系统防碰撞方法研究与实现[J]. 煤炭技术, 2016, 35(7): 108-109.
WANG Fei. Research and implementation of anti-collision algorithm in coal mine precise positioning system [J]. Coal Technology, 2016, 35(7): 108-109.
- [6] 王超, 姚瑞玲. 融合有向天线 AOA 和 RSSI 的定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(6): 1574-1578.
WANG Chao, YAO Ruiling. Fusion algorithm for antenna array AOA and RSSI [J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(6): 1574-1578.
- [7] 王凯敏. 对煤矿无线通信系统电磁干扰相关问题的探讨[J]. 电子世界, 2014(2): 53.
WANG Kaimin. Study on electromagnetic compatibility in coal mine wireless communication system [J]. Electronics World, 2014(2): 53.
- [8] 孙继平, 徐卿. 矿井无线中继应急通信系统实现方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(5): 1-8.
SUN Jiping, XU Qing. Implementation method of mine wireless relay emergency communication system [J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(5): 1-8.
- [9] 张克, 刘留, 袁泽, 等. 工业物联网无线信道与噪声特性[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 87-97.
ZHANG Ke, LIU Liu, YUAN Ze, et al. Wireless channel and noise characteristics in industrial Internet of things [J]. Telecommunications Science, 2018, 34(8): 87-97.
- [10] 王红梅. 基于层次分析法的煤矿矿山生态环境评价定量模型研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(7): 70-75.
WANG Hongmei. The study on eco-environmental evaluation model of coal mine based on analytic hierarchy process method [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(7): 70-75.
- [11] 李满如. 事故树和层次分析法在煤矿透水事故分析与评价中的应用[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(5): 60-62.
LI Manru. Application of incident tree and hierarchical analysis method in the analysis and evaluation of mine permeability accidents [J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(5): 60-62.
- [12] 李欢, 王涌川. 基于模糊层次分析法的页岩气钻井井喷事故风险评价[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(2): 126-130.
LI Huan, WANG Yongchuan. Risk assessment of shale gas drilling blowout accidents based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(2): 126-130.
- [13] 庄晓燕. 高可靠性的工业现场无线通信系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
ZHUANG Xiaoyan. Research on high reliability wireless communication system at industrial field [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [14] 罗涵, 刘宇泓, 张洪光, 等. 抗反射干扰的时间感知重传机制在物联网中的应用[J]. 物联网学报, 2019, 3(4): 25-33.
LUO Han, LIU Yuhong, ZHANG Hongguang, et al. Application of time-aware retransmission against reflection signal interferences in internet of things [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(4): 25-33.
- [15] 唐丽均, 吴畏. 基于数据流量控制的矿用精确定位认知算法设计[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5): 58-61.
TANG Lijun, WU Wei. Design of mine precise positioning cognition algorithm based on data flow control [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(5): 58-61.