

# 面向掘进机的超宽带位姿检测系统精度分析<sup>\*</sup>

符世琛, 李一鸣, 宗 凯, 张敏骏, 吴 森

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院 北京 100083)

**摘 要:**为实现悬臂式掘进机的无人化作业,提出了一种基于超宽带(UWB)测距技术的位姿检测方法;通过分析悬臂式掘进机工况环境及局域定位技术原理,设计了UWB位姿检测系统,该系统利用4个搭载UWB模块的移动基站机器人对机身节点进行测距,经过解算测距信息得到掘进机位姿参数;并开展了狭长封闭巷道中的UWB测距精度验证实验,仿真分析了基于直接解析法和基于Caffery算法的系统位姿精度。研究表明UWB模块在狭长封闭巷道中的测距精度可达2 cm,系统三轴定位精度在10~95 m的狭长封闭空间中从4 mm~3 cm呈线性增加,系统航向角、俯仰角、横滚角精度从 $0.2^{\circ}$ ~ $1.5^{\circ}$ 呈线性增加,满足悬臂式掘进机位姿检测精度要求,为掘进机自主巡航的实现提供了基础。

**关键词:** 悬臂式掘进机;狭长封闭巷道;超宽带位姿检测;精度分析

**中图分类号:** TD676 TH761.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Accuracy analysis of UWB pose detection system for roadheader

Fu Shichen, Li Yiming, Zong Kai, Zhang Minjun, Wu Miao

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to realize unmanned operation of boom-type roadheader, a pose detection method based on UWB ranging technique is proposed. Through analyzing the working conditions of roadheader and local positioning technology principle, a UWB pose detection system is designed. The system uses 4 mobile base station robots equipped with UWB modules to measure the distance from the fuselage nodes to base stations. After calculating the ranging information, the pose parameters of the roadheader are obtained; The UWB ranging accuracy verification experiments in a narrow and closed tunnel were carried out, and the system pose accuracies based on direct analysis algorithm and Caffery algorithm were simulated and analyzed. The study results show that the ranging accuracy of the UWB module can be less than 2 cm in the narrow-closed tunnel. The system three-axis positioning accuracy increases linearly from 4 mm to 3 cm in the 10~95 m narrow-closed tunnel, and the accuracies of the heading angle, pitch angle and roll angle of the system increase linearly from  $0.2^{\circ}$  to  $1.5^{\circ}$ , which satisfies the pose detection accuracy requirement of boom-type roadheader and provides a basis for realizing the autonomous navigation of roadheader.

**Keywords:** boom-type roadheader; narrow-closed tunnel; ultra-wideband (UWB) pose detection; accuracy analysis

## 0 引 言

长期以来,煤炭一直是我国的主要能源资源,它在我国化石能源资源量中占95%<sup>[1]</sup>。无人采掘装备是当前国际煤炭领域的发展前沿<sup>[2]</sup>,我国大中型煤矿每年新掘进的巷道总长度超过8 000 km<sup>[3]</sup>,目前世界上在役悬臂式掘进机总数已超过5 000台<sup>[4]</sup>,在地下巷道掘进过程中,传统掘进方法不仅效率低,而且精度有限。此外,

矿井工况复杂,增加了矿井工作人员的工作强度及工作危险性,因此我国亟待研制无人采掘装备。

在机械制造、航空、航天、国防、建筑等部门中,目标的坐标及姿态角是需要确定的重要物理量:江洁等人<sup>[5]</sup>提出一种大量程高精度三维姿态角测量系统用于获取目标的姿态角;王文利等人<sup>[6]</sup>提出一种GPS动态测量系统,通过精确控制悬索长度的变化,可完成对射电望远镜馈源舱位置和姿态的动态调整;赵前程等人<sup>[7]</sup>基于机器视觉技术设计了一种3D四轮定位仪,可确定汽车的4轮

定位参数;刘绍锦等人<sup>[8]</sup>采用非接触式光电跟踪瞄准结合激光测距方法,对海上舰船补给活动中船间相对位姿进行检测<sup>[8]</sup>;张利等人<sup>[9]</sup>提出一种基于超声波与航迹推算融合的智能轮椅定位方法;高翔等人<sup>[10]</sup>提出一种基于 Hough 变换的移动机器人全局定位方法,用于解决大范围环境的机器人全局定位及机器人绑架问题。悬臂式掘进机的位姿检测是无人化掘进技术中的关键。现有的掘进机位姿检测方法都存在很多局限性,绝大部分都停留在理论设想阶段,少有实验及精度分析。

本文设计了一种基于超宽带 (ultra-wideband, UWB) 测距的掘进机位姿检测系统,通过 4 个自主定位基站依次对掘进机机身进行 UWB 测距,完成掘进机的远距离位姿检测,建立了 4 基站的到达时间定位模型 (time of arrival, TOA) 的观测方程组,通过 Caffery 算法进行了线性变换,得到目标最小二乘估计值后进行均值迭代优化。在狭长封闭空间中进行了 UWB 模块测距精度实验,并且仿真分析了系统的定位精度及位姿解算精度。经过分析,该方法可满足巷道掘进机机身位姿检测精度的需求。

# 1 悬臂式掘进机工况环境及局域定位技术原理分析

## 1.1 掘进机工况环境分析

掘进机的工作环境称为综合机械化掘进工作面,一般综掘巷道位于地下 300~800 m 处的岩层之间,巷道断面的尺寸取决于悬臂式掘进机的规格,如图 1 所示,以 EBZ160 型掘进机为例,巷道宽约 3~5 m,高约 2~4.8 m,为便于研究规律性理论,可以将综掘巷道抽象为一种狭长封闭空间。

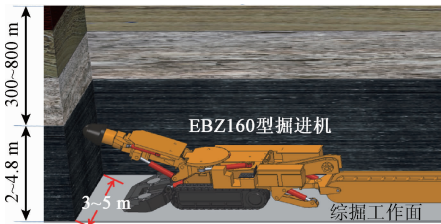


图 1 掘进机工况环境示意图  
Fig. 1 Working condition of roadheader

## 1.2 掘进机定位原理分析

若要实现掘进机的位姿检测,核心问题是获得机身节点在巷道参考坐标系中的位置。

如图 2 所示,首先获得机身节点与巷道坐标系之间的原始物理信号参量,之后将原始物理参量处理得到定位参量,再根据定位参量建立观测方程组,即可得到机身节点坐标。

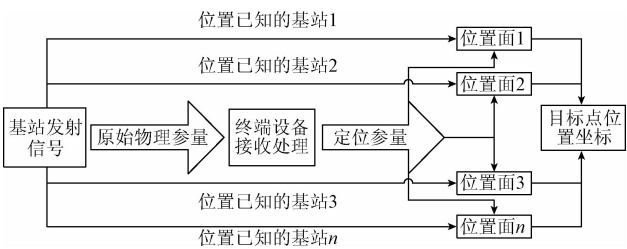


图 2 掘进机定位原理示意图  
Fig. 2 Positioning principle of roadheader

原始参量的精度将直接影响到定位精度和位姿解算精度。井下环境黑暗,机器视觉定位精度将受到严重限制;巷道粉尘严重,将直接干涉可见光和红外线的传播,进而影响系统可靠性,此外,激光和红外线的传播一般以直线或者扇面进行测量,因此,在系统标定的时候还需要考虑基准调平问题,增加了误差影响因素。惯导技术是一种独立测量技术,无法和巷道基准建立关系,随着掘进时间的增加,误差漂移严重。声波定位技术由于波形和频率的限制,相对电磁波定位精度不高。无线电波具有较好的穿透性和抗干扰性,比较适用于井下巷道环境中。

## 1.3 UWB 定位技术分析

UWB 信号是一种非正弦脉冲无线电信号<sup>[11]</sup>,它的频带很宽,可调制出具有非常陡峭脉冲沿的信号,具有很高的波达时间分辨率,可解算出准确的测距信息。UWB 信号的相对带宽必须大于 0.2,绝对带宽大于 500 MHz, UWB 信号在电磁波频谱中的位置如图 3 所示。

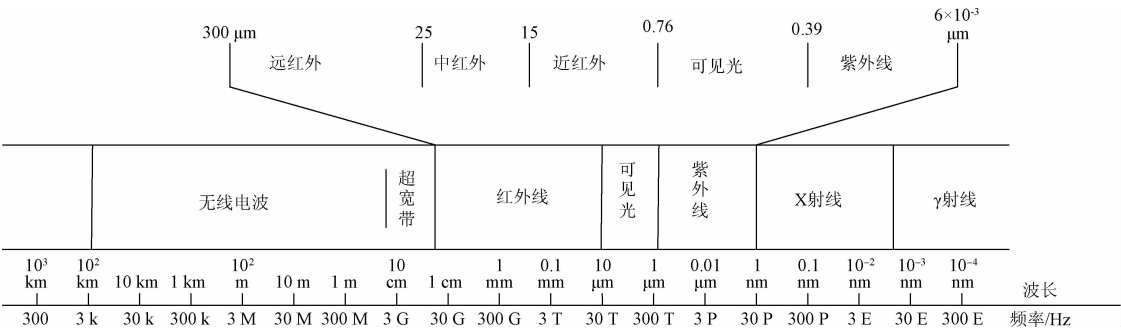


图 3 电磁波频谱分布  
Fig. 3 Electromagnetic wave spectrum distribution

如图 4 所示,UWB 定位按照定位参量的处理方式可以分为集合结构位置线交叉定位和统计定位,按照定位应用场合的不同可分为视距算法定位和非视距算法定位,在

井下巷道中,掘进机机身与基站一般存在视距传播。按照定位参量的不同可分为测距定位、测距差定位、测距和定位、测角定位和混合定位,本文聚焦于测距 TOA 定位模型。

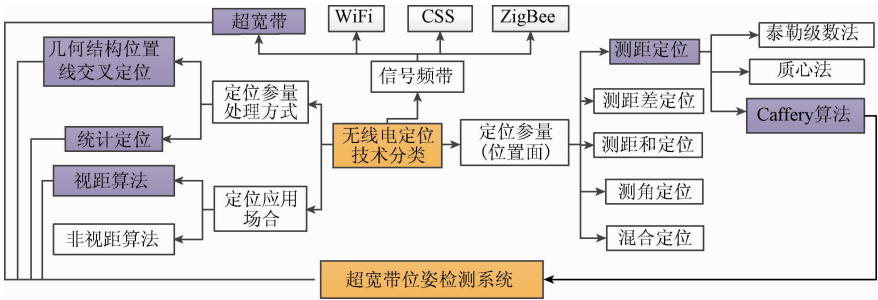


图 4 UWB 位姿检测系统  
Fig. 4 Ultra-wideband pose detection system

位置坐标的解算方法实质上是一个求解非线性方程组的问题,比较经典的方法是泰勒级数展开法,该方法将目标估计点展开成泰勒级数并忽略二次以上项,从而近似为线性方程,在采用最小二乘法估计目标位置<sup>[12-13]</sup>,这种方法缺陷是近似线性方程的过程中忽略了二次以上项,因此会带来额外误差,此外,泰勒级数展开的过程中存在级数展开不收敛的可能。

本文采用了 Caffery 定位算法,这种方法是利用多余的定位参量,将原来的球位置面用两球相交的交点连接面代替<sup>[14]</sup>,从而转化为线性方程组,再利用最小二乘法估计,得到估计值后再进行多次测量均值迭代进行优化。可以达到稳定、精确的目标坐标估计值,且不存在虚数解。

2 掘进机位姿检测系统原理

2.1 系统构成

系统结构如图 5 所示,将 3 个 UWB 模块安装在掘进机机身,4 部 UWB 定位基站机器人布置在巷道后方,基站相对于巷道基准的坐标由地测人员在巷道掘进机之前标定准确,基站 1、2、3、4 分别对机身节点 A、B、C 进行 UWB 测距,根据测距信息建立定位方程组,从而解算出 A、B、C 3 点的坐标,再通过 3 点的坐标解算出掘进机的姿态角(航向角、横滚角、俯仰角)。当掘进机掘进距离超过有效测距范围时,通过基站机器人间的依次移站进行坐标系变换,单个基站移站后通过其他基站对其进行定位,从而消除移站行进间的误差。

定位基站机器人的结构如图 6 所示,行走机构主要由左右两个步进电机提供行进动力,步进电机通过联轴器

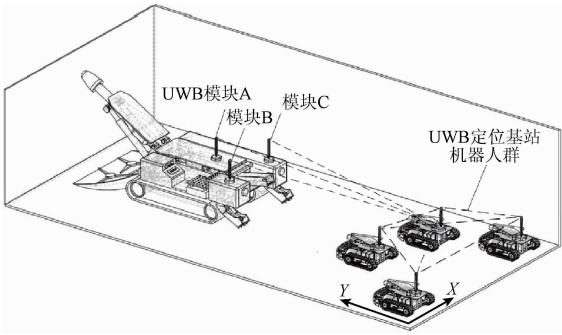


图 5 掘进机位姿检测系统结构  
Fig. 5 The structure of the pose detection system of roadheader

是否有巷道垮落的岩石和煤块,探测得到的信息通过单片机控制左右步进电机进行避障前移。UWB 模块进行掘进机位姿检测及基站机器人间的互相标定,此外 UWB 模块还承担与巷道工控机通信的功能,机载 CCD 摄像机可以进行辅助测量,记录巷道工况及掘进机图像。

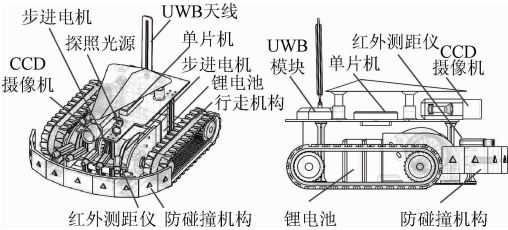


图 6 定位基站机器人结构  
Fig. 6 Structure of the positioning base station robot

2.2 掘进机位姿参数计算

图 7 所示为定位系统几何模型的俯视图, $R_{1A}$ 、 $R_{2A}$ 、 $R_{3A}$  为基站 1、2、3 到 A 点的距离, $R_{1B}$ 、 $R_{2B}$ 、 $R_{3B}$  为基站 1、2、

3 到  $B$  点的距离。图中,  $L_1$ 、 $L_2$  为已知距离, 根据下式可得出航向角  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctan \frac{x_B - x_A}{y_A - y_B} - \arcsin \frac{L_1}{L_2} \tag{1}$$

图 8 所示为数学几何模型的正视图, 根据式(2)可得出待求参数俯仰角  $\beta$ :

$$\beta = \arctan \frac{z_A - z_B}{y_A - y_B} \tag{2}$$

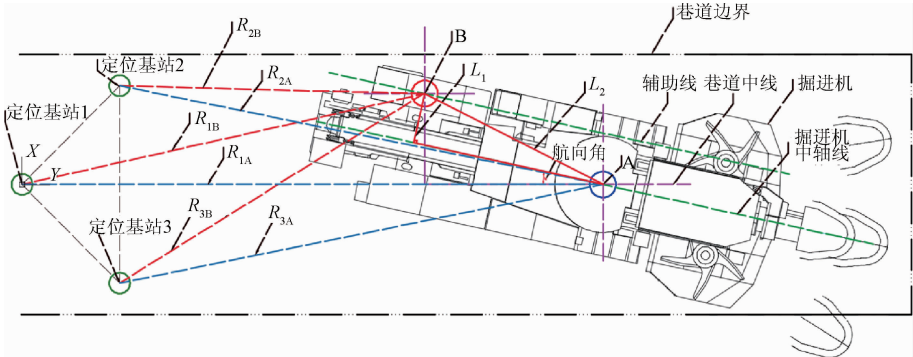


图 7 掘进机航向角计算模型  
Fig. 7 Calculation model of heading angle of roadheader

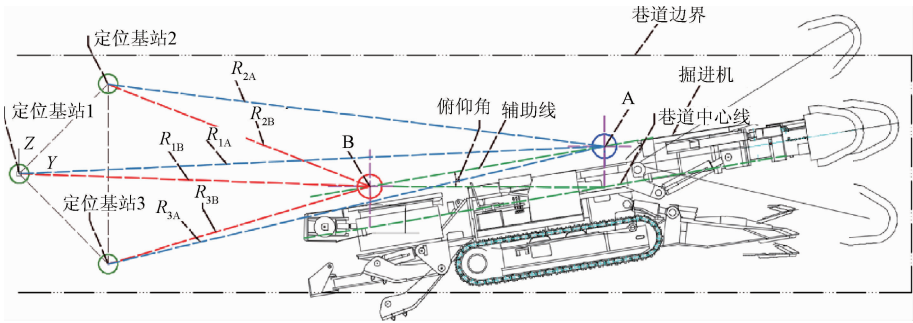


图 8 掘进机俯仰角计算模型  
Fig. 8 Calculation model of pitch angle of roadheader

图 9 所示为定位系统几何模型的侧视图,  $R_{1C}$ 、 $R_{2C}$ 、 $R_{3C}$  为基站 1、2、3 到  $C$  点的距离。根据下式可得横滚角  $\gamma$ :

$$\gamma = \arctan \frac{z_C - z_B}{x_C - x_B} \tag{3}$$

2.3 定位观测方程组的建立

设 4 个定位基站群的位置坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 其中  $i=1,2,3,4$ , 机身节点  $A$  位置坐标为  $(x, y, z)$ , 基站群与机身节点  $A$  的距离为  $d_i$ , 其中  $i=1,2,3,4$ ; 则定位点  $A$  的位置坐标间的 TOA 观测方程组为:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2 \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = d_4^2 \end{cases} \tag{4}$$

式(4)是关于  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的非线性方程组, 为简化计算, 采用 Caffery 算法对式(4)进行变换, 得到关于  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的线性方程组, 如式(5)所示。

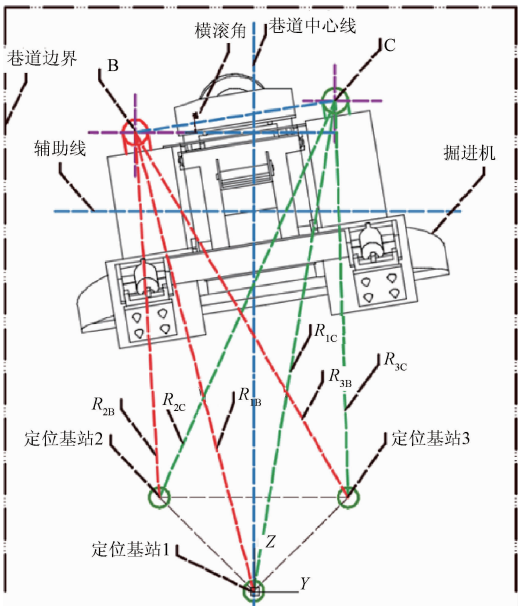


图 9 掘进机横滚角计算模型  
Fig. 9 Calculation model of roll angle of roadheader



$$\begin{cases} (x_2 - x_1)x + (y_2 - y_1)y + (z_2 - z_1)z = \\ (x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + z_2^2 - z_1^2 + d_1^2 - d_2^2)/2 \\ (x_3 - x_2)x + (y_3 - y_2)y + (z_3 - z_2)z = \\ (x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 + z_3^2 - z_2^2 + d_2^2 - d_3^2)/2 \\ (x_4 - x_3)x + (y_4 - y_3)y + (z_4 - z_3)z = \\ (x_4^2 - x_3^2 + y_4^2 - y_3^2 + z_4^2 - z_3^2 + d_3^2 - d_4^2)/2 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中,第1个方程是第1个圆位置面与第2个圆位置面上交点的连接面,其余两个方程同理。经过上面的变换,原来的4个非线性方程变成了3个线性方程。原来的4个圆位置面变成了3个平面位置面。矩阵形式如式(6)所示。

$$Ax = b \quad (6)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ x_4 - x_3 & y_4 - y_3 & z_4 - z_3 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, b =$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + z_2^2 - z_1^2 + d_1^2 - d_2^2 \\ x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 + z_3^2 - z_2^2 + d_2^2 - d_3^2 \\ x_4^2 - x_3^2 + y_4^2 - y_3^2 + z_4^2 - z_3^2 + d_3^2 - d_4^2 \end{bmatrix}。$$

使  $\text{rank}(A) = 3$ , 由此可得最小二乘解为:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (7)$$

## 2.4 定位误差影响因素分析

为了分析基站群与定位点  $A$  间测距误差引起的机身节点  $A$  的坐标误差,将式(5)对  $x, y, z, d_1, d_2, d_3, d_4$  微分(用符号  $\Delta$  表示),整理得:

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T B d \cdot \Delta d \quad (8)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ x_4 - x_3 & y_4 - y_3 & z_4 - z_3 \end{bmatrix}, B =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix}, \Delta d = \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \Delta d_3 \\ \Delta d_4 \end{bmatrix}。$$

由式(8)可知,当  $\Delta d$  服从零均值的高斯分布时,则  $\Delta x$  的均值为:

$$E[\Delta x] = E \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = E[(A^T A)^{-1} A^T B d \cdot \Delta d] = 0 \quad (9)$$

设各测距参量独立,且方差相同为  $\delta_d^2$ ,则测距误差的协方差为:

$$P_d = E[\Delta d \Delta d^T] = I \delta_d^2 \quad (10)$$

式中:  $I$  为单位矩阵。定位误差的协方差为:

$$P_x = E[\Delta x \Delta x^T] = \delta_d^2 [(A^T A)^{-1} A^T B] D [(A^T A)^{-1} A^T B]^T \quad (11)$$

式中:  $D = \text{diag}(d_1^2, d_2^2, d_3^2, d_4^2)$ 。

由上述分析得知,定位误差的协方差不仅与测距信息的协方差有关,且与目标所在位置有关。如图10所示,测距误差越大,相应的位置面的厚度越大,得到交汇区域越大,得到的目标坐标估计值约模糊。此外,定位点距离基站越远,定位交汇区域会急剧增大,当没有对定位观测方程组进行非线性处理时, $Z$ 轴方向的误差的导数将大于 $X, Y$ 轴。当经过Caffery线性变换后,定位误差的模型如图11所示,将误差区域的非线性变化转变为了线性变化,解决 $Z$ 轴的误差过快的致命缺陷。

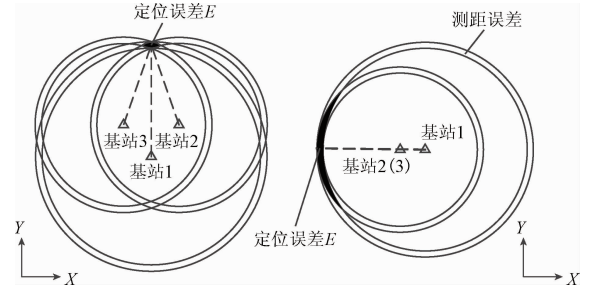


图10 TOA 直接解析法定位误差模型

Fig. 10 The positioning error model of TOA direct analytic method

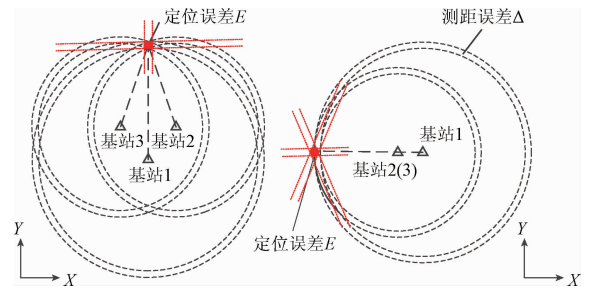


图11 Caffery 算法定位误差模型

Fig. 11 The positioning error model of Caffery algorithm

## 3 系统测距精度实验

由上述分析可知,系统测距精度将直接影响系统定位精度。因此首先进行测距实验,验证测距精度后,再进行坐标解算以及位姿解算的精度验证。本系统的测距实验中采用的是美国 Time domain 公司的 P440 测距模块,带宽  $3.1 \sim 5.3$  GHz,中心频率为  $4.3$  GHz,采用信号双向飞行时间(two way-time of flight, TW-TOF)测距方法。

测距实验系统示意图如图12所示,将P440模块1(设置端口ID:101)连接至电脑,运行time domain Rangenet软件,将软件调至两点测距模式,并将模块1设置为基站。再将P440模块2(设置端口ID:100)连接至电脑,运行软件,将其设置为动点,然后断开连接。

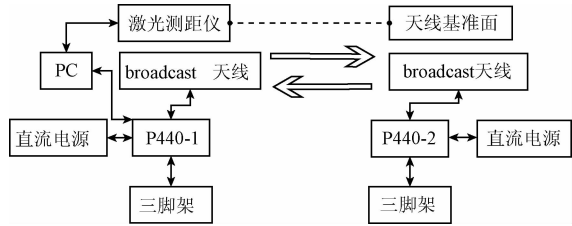


图 12 测距实验系统结构

Fig. 12 Structure of the ranging experiment system

如图 13 所示,放置三脚架,将模块 1 和模块 2 分别固定在两个三角架的云台上,并用激光测距仪进行标定,以保证两个模块处于同一高度和同一条直线上,并用重锤线标定天线相位中心位置。在三角架下方悬挂移动电源,以确保模块供电。

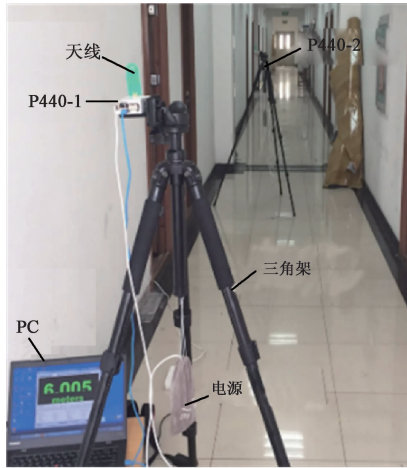


图 13 UWB 测距实验实物

Fig. 13 Photograph of the UWB ranging experiment

如图 14 所示,用激光测距仪标定两个模块天线基准点之间的距离并记录。将动点三脚架每隔一定距离向前移动,再次重复以上测量步骤。以验证模块在狭长封闭巷道中的测距性能。

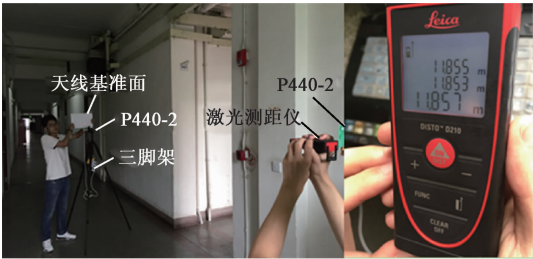


图 14 标定模块间的距离

Fig. 14 Calibration of the distance between modules

选择与井下巷道狭长封闭空间相似环境进行实验,该实验场地参数:长 96.5 m、宽 2.4 m、高 4 m,如图 15 所示。

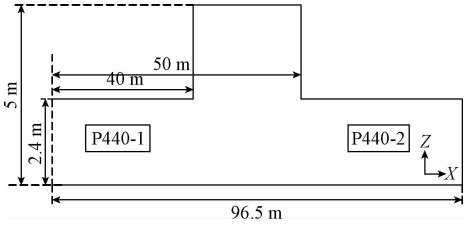


图 15 实验场地示意图

Fig. 15 Sketch diagram of the experiment site

每隔 10 m 左右的距离移动一次动点模块 2 进行双模块测距测量,每个节点测距 1 000 次,UWB 信号脉冲间隔设为 100 ms,测距实验数据如表 1 所示。

表 1 双模块间实测距离数据

Table 1 Measured data of the distance between two modules

| 标定距离   | 测量均值   | 均值误差  | 标准差     |
|--------|--------|-------|---------|
| 2.82   | 2.815  | 0.005 | 0.011   |
| 4.816  | 4.814  | 0.002 | 0.006   |
| 6.029  | 6.032  | 0.003 | 0.013   |
| 11.857 | 11.864 | 0.007 | 0.002   |
| 20.658 | 20.663 | 0.005 | 0.011   |
| 31.133 | 31.154 | 0.021 | 0.021   |
| 41.136 | 41.321 | 0.185 | 0.062   |
| 44.802 | 44.895 | 0.093 | 0.035   |
| 47.866 | 47.959 | 0.093 | 0.013   |
| 57.066 | 57.077 | 0.011 | 0.002   |
| 78.715 | 78.74  | 0.025 | 0.019   |
| 89.974 | 89.983 | 0.009 | 0.004 6 |

将表 1 中的 UWB 实测数据进行插值处理得到误差随距离分布曲线,如图 16 所示,测量误差在 0 ~ 10 m 出现了第 1 个误差峰值,这是由于模块之间距离过近,因此,无线电波在如此近的距离产生的飞行时间极短,因此对于模块内的时钟模块来说难以分辨;测量误差在 40 ~ 50 m 的范围内急剧增大,出现第 2 个峰值,这是由于该位置处的楼道环境变化为空旷非封闭环境(见图 15),从而导致多径传播。除此之外,该模块在正常环境狭长封闭环境下的精度都可以满足要求,均值误差及标准差基本处于 0.02 m 以下。

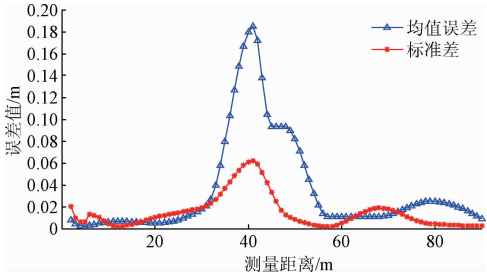


图 16 测距误差随距离分布曲线

Fig. 16 The distribution curve of ranging error vs. distance

4 系统位姿精度分析

4.1 系统定位精度分析

为排除真实环境中的随机影响及验证系统精度的限制和不确定性,更加真实地探究系统精度在狭长空间的变化规律,将定位精度和位姿精度的分析在 MATLAB 中进行仿真模拟。如图 17 所示,系统布局图如下,其中 1(0,0,0)、2(-2,5,0)、3(2,5,0)、4(0,0,5) 设定为定位基站, A 点设定为移动目标点,其中 A 点的坐标设为 (0,  $y_n$ , 0), 其中  $n$  从 10~95 m 每隔 1 m 取一个点。

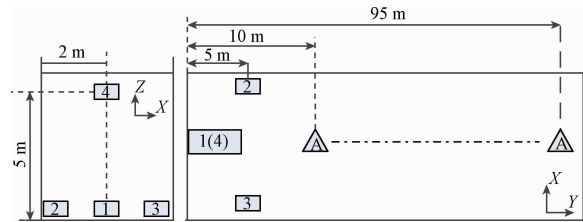


图 17 系统定位基站布置

Fig. 17 System positioning base station layout

在视距传播的条件下的测距参量一般呈现高斯分布<sup>[15-16]</sup>。由 2.1 节的测距精度实验得知, UWB 模块在 95 m 的狭长封闭空间中的误差一般小于 2 cm, 因此拟将均值为 0, 标准差为 2 cm 的正态分布随机参量带入测距数据, 为了优化定位精度, 将 1 000 次定位结果取均值后作为最终对目标定位点的估计, 由此得到图 18 所示的系统在 10~95 m 狭长空间中的定位估计值的分布, 所有估计值所囊括的范围即为系统定位误差的范围。

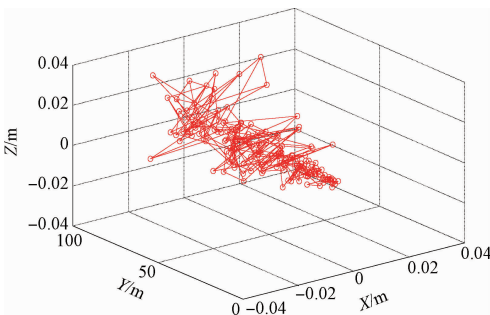


图 18 10~95 m 定位点误差分布

Fig. 18 The error distribution for 10~95 m positioning points

将系统的定位误差分布场在二维中显示并取绝对值可得到如图 19 所示的定位误差分布曲线, 定位点的三轴误差分布随距离增大基本呈线性增长, 95 m 处的 Z 轴最大误差约为 4 cm。总体来看, 系统在 10~95 m 内的误差主要分布在 2 cm 以下。

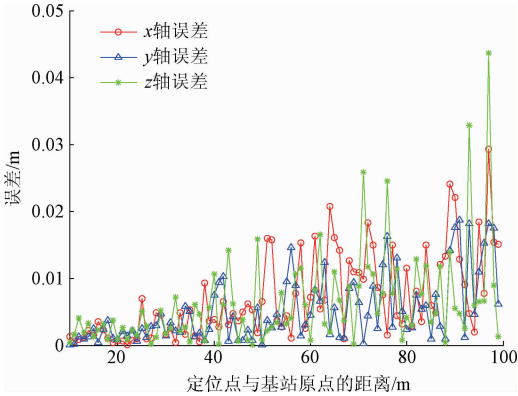
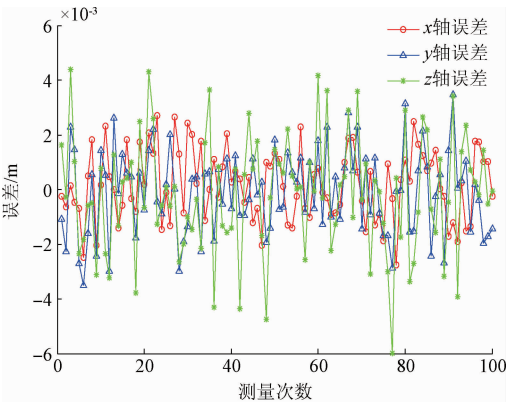


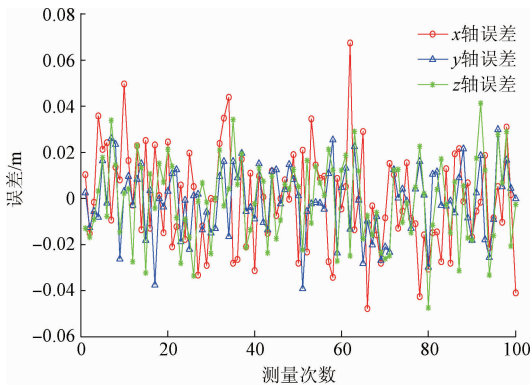
图 19 10~95 m 定位点三轴误差分布曲线

Fig. 19 Tri-axis error distribution curve for the 10~95 m range positioning points

在定位误差场中分别选取了 10、95 m 两个定位点进行精度分析, 每个点测量次数皆为 100 次, 可得图 20 所示 3 轴误差分布曲线, 可知, 3 轴的精度基本处于同量级, 其中 10 m 定位点的误差可达到毫米级, 95 m 定位点的误差可控制在 3 cm 左右。



(a) 10 m 定位点仿真曲线  
(a) 10-meter positioning point simulation curve



(b) 95 m 定位点仿真曲线

(b) 95-meter positioning point simulation curve

图 20 定位点三轴误差仿真曲线

Fig. 20 Three-axis error simulation curves of the positioning points

为探究观测方程组的线性变换对定位精度的影响,选取了 95 m 定位点进行仿真分析,分别利用直接解析法和 Caffery 算法分别对其进行 1 000 次定位仿真,如图 21 所示,解析法定位误差呈弧形分布,其中  $Z$  轴的误差远大于  $X$ 、 $Y$  两轴。在 95 m 处的定位误差达到米级,难以满足精度需求。Caffery 算法的定位误差场呈不规则球形,95 m 处的 3 轴定位精度都可达到厘米级,且不存在  $Z$  轴误差非线性增长过快的缺陷。这与 1.4 节中的误差变化规律分析基本吻合。

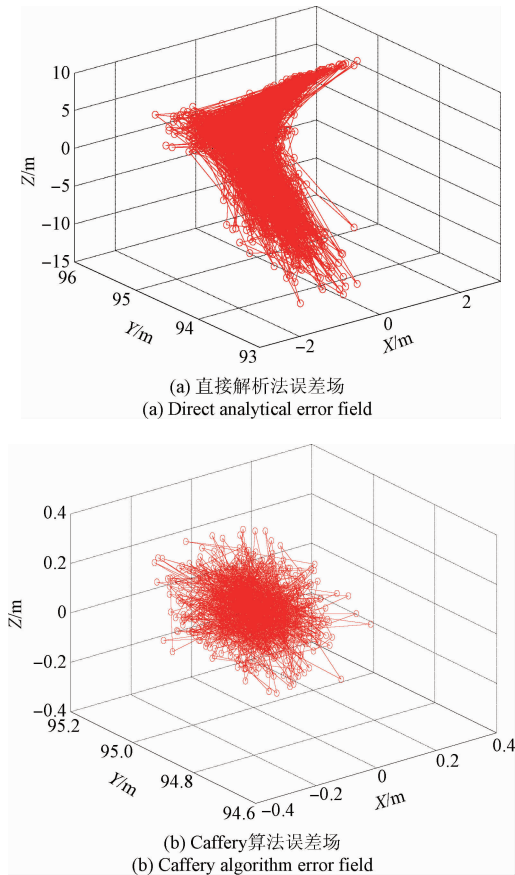


图 21 95 m 定位点误差分布场  
Fig. 21 The error distribution fields for 95 m positioning points

4.2 系统姿态角精度分析

当已确定系统定位精度,根据式(1)~(3),可推导掘进机的位姿精度。图 22 所示为掘进机机身定位节点布置,掘进机机身可视为一个刚体,因此将 3 个节点布置在掘进机顶面,图中  $L_1$  为定位点  $A$  到  $L_2$  之间的垂线, $L_2$  为定位点  $B$ 、 $C$  之间的距离,结合 EBZ160 机型的悬臂式掘进机的尺寸, $L_1$ 、 $L_2$  为 2 m。

将 2.2 节中的定位仿真结果带入 1.2 节的位姿参数计算式(1)~(3)中,可以得到系统在 10~95 m 的位姿精度。图 23 分别选取了 10 和 95 m 的机身位姿参数 100

次精度分布曲线,得知,在 10 m 处的航向角、俯仰角、横滚角精度可达到  $0.2^\circ$  以下。95 m 处的各姿态角精度可达到  $1.5^\circ$  以下。由于定位点误差呈线性增大,从而位姿误差随距离增大呈线性增大。

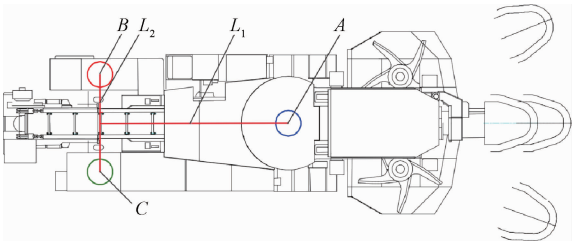


图 22 掘进机机身定位节点布置  
Fig. 22 Layout of the roadheader fuselage positioning nodes

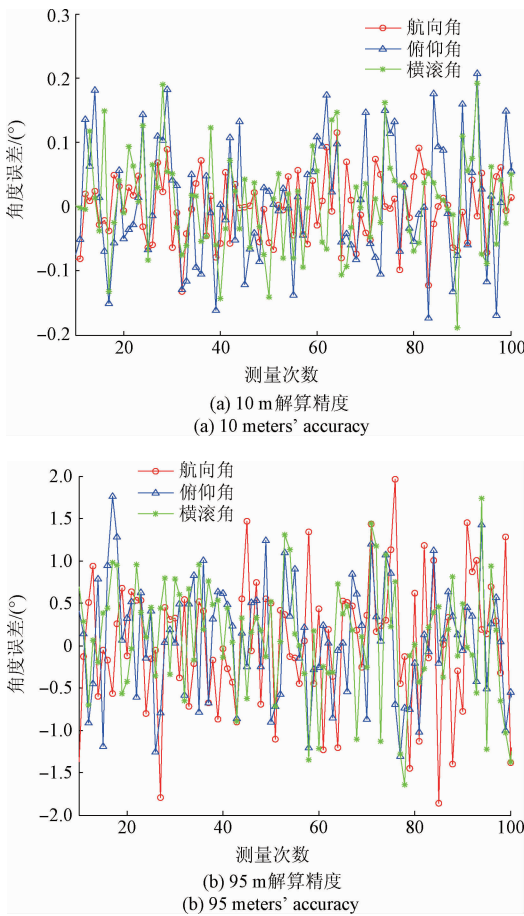


图 23 机身位姿参数 100 次解算精度分布曲线  
Fig. 23 Accuracy distribution curves of the fuselage pose parameters for 100 calculations

5 结 论

设计了一种面向掘进机的 UWB 位姿检测系统,系



统通过 4 个搭载 UWB 模块的移动基站机器人对机身节点进行测距,经过解算得到机身位姿参数;建立了定位机器人的结构模型及掘进机机身位姿解算模型;开展了狭长封闭巷道中的 UWB 测距精度验证实验,仿真分析了基于 Caffery 算法的系统位姿检测精度。通过测距实验和仿真得出 UWB 模块在 95 m 内的狭长封闭空间中的测距精度可达到 2 cm 左右。基于 Caffery 算法的掘进机位姿检测系统的 3 轴定位精度在 10~95 m 的狭长封闭空间中从 4 mm~3 cm 且呈线性增加,系统各位姿参数解算精度从  $0.2^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$  呈线性增加,相比较直接解析法而言系统精度有显著提高,并且消除了 Z 轴方向定位误差非线性增长过快的缺陷。满足巷道掘进机机身位姿检测精度的需求,为掘进机自主巡航的实现提供了基础。

## 参考文献

- [1] 彭苏萍. 深部煤炭资源赋存规律与开发地质评价研究现状及今后发展趋势[J]. 煤, 2008, 17(2): 1-11.  
PENG S P. Present study and development trend of the deepen coal resource distribution and mining geologic evaluation[J]. Coal, 2008, 17(2): 1-11.
- [2] 葛世荣. 智能化采煤装备的关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(9): 7-11.  
GE SH R. Key technology of intelligent coal mining equipment[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 7-11.
- [3] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649-664.  
KANG H P, WANG J H, LIN J. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 649-664.
- [4] 汪胜陆, 孟国营, 田劼, 等. 悬臂式掘进机的发展状况及趋势[J]. 煤矿机械, 2007, 28(6): 1-3.  
WANG SH L, MENG G Y, TIAN J, et al. Development status and trend of boom-type roadheader[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(6): 1-3.
- [5] 江洁, 王雷雷, 王昊予. 大量程高精度三维姿态角测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 48-53.  
JIANG J, WANG Y L, WANG H Y. Design of large FOV high precision three-dimensional attitude angle measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 48-53.
- [6] 王文利, 段宝岩. 大射电望远镜 FAST 的控制与 GPS 动态检测[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(1): 49-53.
- [7] 赵前程, 黄东兆, 杨天龙, 等. 机器视觉 3D 四轮定位仪关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2184-2190.  
ZHANG Q CH, HUANG D ZH, YANG T L, et al. Research on the key techniques of 3D computer vision four-wheel aligner[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2184-2190.
- [8] 刘绍锦, 王志乾, 王春霞, 等. 舰船间水平间距及舷偏角测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 483-488.  
LIU SH J, WANG ZH Q, WANG CH X, et al. Measurement of horizontal distance and declination angle between boats[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 29(4): 483-488.
- [9] 张利, 秦海春, 王文彬, 等. 超声波与航迹推算融合的智能轮椅定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(1): 62-68.  
ZHANG L, QIN H CH, WANG W B, et al. Intelligent wheelchair positioning method based on ultrasonic and track reckoning fusion[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(1): 62-68.
- [10] 高翔, 梁志伟, 徐国政. 基于 Hough 空间的移动机器人全局定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(6): 484-490.  
GAO X, LIANG ZH W, XU G ZH. Global positioning algorithm of mobile robot based on Hough space[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(6): 484-490.
- [11] 吴绍华, 张乃通. 室内信道环境下 UWB 精确测距研究[J]. 通信学报, 2007, 28(4): 65-71.  
WU SH H, ZHANG N T. Research on accurate ranging of UWB under indoor environments[J]. Journal on Communications, 2007, 28(4): 65-71.
- [12] FOY W H. Position-location solutions by taylor-series estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1976, 12(2): 187-194.
- [13] 谢芝玉, 刘雄飞, 胡志坤. 基于 Taylor 展开的 UWB 井下定位算法研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(2): 231-235.  
XIE ZH Y, LIU X F, HU ZH K. Research and design of underground coal mine positioning method based on

Taylor algorithm [ J ]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(2):231-235.

[14] CAFFERY J. A new approach to the geometry of TOA location [J]. IEEE Transactions on SP,1994, 42(8): 1905-1915.

[15] 杨洲,汪云甲,陈国良,等. 超宽带室内高精度定位技术研究[J]. 导航定位学报,2014(4):31-35.  
YANG ZH, WANG Y J, CHEN G L, et al, Indoor channel modeling and localization for uwb sensor networks[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2014(4):31-35.

[16] SILVA B, HANCKE G P. IR-UWB Based non-line-of-sight identification in harsh environments: principles and challenges [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(6): 1188-1195.

作者简介



符世琛(通讯作者),2013 年于成都理工大学获得学士学位,现为中国矿业大学(北京)硕博连读研究生,主要研究方向为掘进机自主巡航、无线电定位技术等。  
E-mail:fushichen0526@163.com

**Fu Shichen**(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chengdu University of Technology in 2013. Now he is a student in the master-doctor combined program in China University of Mining & Technology (Beijing). His main research interest includes roadheader autonomous cruise and radio positioning technology.



**吴淼**,1992 年于中国矿业大学获取博士学位,现为中国矿业大学(北京)教授、博士生导师,主要研究方向为矿山设备机电一体化、测试技术与智能化仪器。  
E-mail:wum@cumt.edu.cn

**Wu Miao** received his Ph. D. degree from China University of Mining & Technology in 1992; now, he is a professor and supervisor for doctoral student in China University of Mining & Technology (Beijing). His main research interest includes mining machine electromechanical integration, test technology and intelligent instruments.