

文章编号: 1671-251X(2023)03-0137-05

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18078

# 基于UWB的PDOA与TOF煤矿井下联合定位方法

郭爱军

(国能神东煤炭技术研究院, 陕西 榆林 719315)

**摘要:** 煤矿井下人员和车辆精确定位是煤矿安全高效生产的重要保障。目前矿井人员和车辆精确定位主要采用超宽带(UWB)无线通信技术, 其中仅采用飞行时间(TOF)的定位方法需2个定位分站或天线联合测距和定向, 存在天线间距大、不便于安装维护、定位误差大等问题。针对上述问题, 提出了应用于煤矿巷道一维定位场景的基于UWB的到达相位差(PDOA)与TOF煤矿井下联合定位方法。该方法通过TOF测量定位卡与定位分站之间的距离, 通过PDOA判断定位卡的方位, 再根据测得的定位卡与定位分站之间的距离和方位, 对定位卡进行定位。该方法根据从定位卡发送的无线电信号到达定位分站的2根天线的相位差判断定位卡的到达角度(AOA), 不需要很大的天线间距即可确定定位卡的方位, 缩短了定位分站的2根天线之间的距离, 可将2根天线一体化, 便于安装维护, 提高了定位精度。煤矿井下测试结果表明, 该方法定位精度在15 cm以内; 在200 m测试距离范围内, 定位精度不受距离远近影响; TOF测距数值稳定在相对其均值 $\pm 10$  cm的范围内, 具有很好的稳定性。

**关键词:** 井下联合定位; 人员定位; 车辆定位; UWB; 到达相位差; 飞行时间; PDOA; TOF

中图分类号: TD655

文献标志码: A

A joint positioning method of PDOA and TOF in coal mines based on UWB

GUO Aijun

(CHN Energy Shendong Coal Technology Research Institute, Yulin 719315, China)

**Abstract:** The precise positioning of personnel and vehicles in coal mines is an important guarantee for safe and efficient production in coal mines. Currently, ultra-wideband (UWB) wireless communication technology is mainly used for the precise positioning of personnel and vehicles in coal mines. The positioning method that only uses the time of flight (TOF) requires two positioning substations or antennas for joint ranging and direction. It has problems such as large antenna spacing, inconvenience in installation and maintenance, and large positioning errors. In order to solve the above problems, a joint positioning method based on UWB phase difference of arrival (PDOA) and TOF is proposed for one-dimensional positioning scenarios in coal mines. This method measures the distance between the positioning card and the positioning substation through TOF, and judges the direction of the positioning card through PDOA. The method locates the positioning card based on the measured distance and direction between the positioning card and the positioning substation. This method determines the angle of arrival (AOA) of the positioning card based on the phase difference between the radio signals transmitted from the positioning card and the two antennas of the positioning substation. It does not require a large antenna spacing to determine the direction of the positioning card. It shortens the distance between the two antennas of the positioning substation. It integrates the two antennas to facilitate installation and maintenance, improving positioning precision. The underground testing results of coal mines show that the positioning precision of this method is within 15 cm. Within the test distance range of 200 m, the positioning precision is not affected by the distance. The TOF ranging value is stable within a range of  $\pm 10$  cm relative to its mean value, with good stability.

**Key words:** underground joint positioning; personnel positioning; vehicle positioning; UWB; phase difference of arrival; time of flight; PDOA; TOF

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-03-17; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家能源集团科技创新项目(GJNY2030XDXM-19-06.1); 国家重点研发计划项目(2017YFC0804303)。

作者简介: 郭爱军(1970—), 男, 内蒙古包头人, 教授级高级工程师, 现主要从事矿井精确定位方面的工作, E-mail: wlmlgaj@163.com。

引用格式: 郭爱军. 基于UWB的PDOA与TOF煤矿井下联合定位方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(3): 137-141.

GUO Aijun. A joint positioning method of PDOA and TOF in coal mines based on UWB[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(3): 137-141.



扫码移动阅读

## 0 引言

为提高矿山安全生产保障能力,国家要求全国煤矿及非煤矿山建立和完善监测监控、人员定位、供水施救、压风自救、通信联络及紧急避险等井下安全避险“六大系统”<sup>[1]</sup>。其中,井下人员定位系统在遏制井下超定员生产、防止人员进入危险区域、及时发现未按时升井人员、加强特种作业人员管理、加强干部带班管理、实现煤矿井下作业人员考勤管理等工作中发挥着重要作用<sup>[2-4]</sup>。同时,井下车辆精确定位是矿井安全高效运输的重要保障<sup>[5]</sup>。目前矿井人员和车辆精确定位主要采用超宽带(Ultra Wide Band, UWB)无线通信技术,可实现厘米级高精度定位,并具有抗多径能力强、系统复杂性低等特点<sup>[6-11]</sup>。在算法上,主要采用飞行时间(Time of Flight, TOF)定位方法,具有定位精度不受信号发送功率、接收灵敏度和信号传输衰减影响,不需定位分站与定位卡时钟同步等优点,但需双天线或双定位分站联合测距和定向,以辨识定位卡位于定位分站左侧或右侧,不便于天线安装维护<sup>[12-14]</sup>。因此,本文提出了到达相位差(Phase Difference of Arrival, PDOA)与 TOF 煤矿井下联合定位方法,通过定位分站的 2 根天线与定位卡之间的 TOF 平均值计算定位卡距分站的距离,通过 PDOA 值判断定位卡在分站的哪一侧,可缩短双天线距离,将双天线集成为一体,便于安装维护。

## 1 方法原理

### 1.1 TOF 测距方法

目前应用广泛的 TOF 测距方法属于双向测距技术,主要利用无线电信号在源节点和目的节点之间的飞行时间来测量二者之间的距离<sup>[15-16]</sup>。TOF 测距原理如图 1 所示。

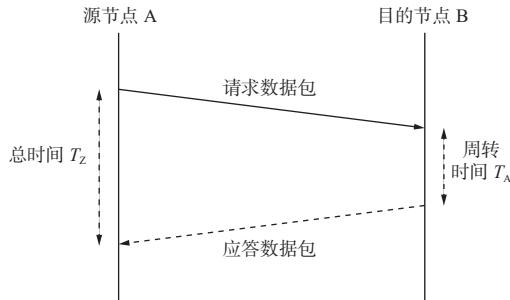


图 1 TOF 测距原理

Fig. 1 TOF ranging principle

源节点 A 向目的节点 B 发送一个请求数据包,目的节点 B 收到数据包并对其进行处理,将周转时间  $T_A$  封装到应答数据包中并发送给源节点 A, 源节点 A 计算出从开始发送请求数据包到接收到目的节

点 B 返回的应答数据包的总时间  $T_Z$ , 用总时间  $T_Z$  减去周转时间  $T_A$  就是双方数据包在飞行中度过的往返时间, 记为  $T_R$ 。假定在每个方向发生的飞行时间  $T_F$  等于一半的往返时间:

$$T_F = T_R/2 = (T_Z - T_A)/2 \quad (1)$$

则 2 个节点之间的距离为

$$D = cT_F \quad (2)$$

式中  $c$  为光速,  $c=3\times10^8$  m/s。

矿用本安型定位分站为双天线设计,分站通过 1 m 长的馈线与天线相连。安装时,2 根天线在分站相反方向形成与巷道壁平行的直线。2 根天线独立与通信覆盖范围内的定位卡测距,利用二者距离差的符号判断定位卡在分站的哪一侧,从而实现对定位卡的一维定位,如图 2 所示。

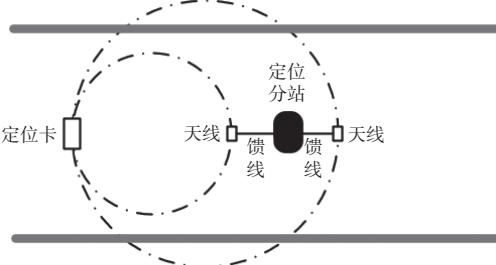


图 2 定位分站定向原理

Fig. 2 Directional principle of positioning substation

### 1.2 PDOA 定位算法

PDOA 定位算法具有以下优点:角度估计精度高;可减小用于定向的 2 根天线之间的距离;将定位分站的 2 根天线一体化,便于安装维护;定位精度高。基于 PDOA 的到达角度(Angle of Arrival, AOA)估计原理如图 3 所示。

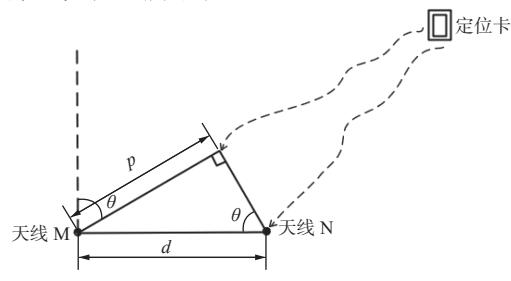


图 3 基于 PDOA 的 AOA 估计原理

Fig. 3 Principle of AOA estimation based on PDOA

从定位卡发送的无线电信号到达定位分站的 2 根天线,信号路径长度的差别  $p$  与天线 M, N 之间的距离  $d$  和 AOA 值  $\theta$  满足下式。

$$p = d \sin \theta \quad (3)$$

2 根天线接收的信号中的第一路径(First-Path)的 PDOA 为

$$\alpha = 2\pi p / \lambda \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为波长。

则 $\alpha$ 与 $\theta$ 有如下关系<sup>[17-19]</sup>:

$$\theta = \arcsin(\alpha\lambda/2\pi d) \quad (5)$$

当 $d < \lambda/2$ 时,  $\theta$ 与 $\alpha$ 在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 上有一一对应关系。

### 1.3 PDOA与TOF联合定位方法

基于UWB的PDOA与TOF联合定位方案:通过2根天线与定位卡之间的TOF平均值估计定位卡分站的距离;在天线距离小于信号半波长的情况下,对于煤矿巷道一维定位场景,可以基于PDOA值判断定位卡在分站的哪一侧,而不必求出具体的AOA值。

仅采用TOF技术的定位分站安装时2根天线必须分开一定的距离,且使用支架固定,需要将2根天线的距离录入定位软件系统,而天线较易因其他矿井施工活动误碰而改变位置,使系统稳定性受到影响<sup>[20-21]</sup>。采用PDOA与TOF联合定位方法的定位分站用仅5 cm长的棒状天线取代接有1 m馈线的平面天线,便于天线角度固定,安装简单,维护方便,有利于节省人力成本,提升系统稳定性。棒状天线和平面天线对比如图4所示。



图4 棒状天线与平面天线对比

Fig. 4 Comparison of rod antenna and plane antenna

## 2 应用测试

### 2.1 测试设计

在神东煤炭集团大柳塔煤矿东辅助运输大巷进行测试。巷道宽6 m、高5 m,断面为半圆拱形,巷道平坦、无煤尘。巷道顶部及左右侧巷帮中部有金属管道,整个巷道为水泥墙面,地面有有轨电车轨道,如图5所示。主要测试器材为矿用本安型定位分站、车辆定位卡及相应的固定支撑器材,激光测距仪等。定位分站和车辆定位卡发射的电磁波信号中心频率为4.0 GHz。

本文测试分为PDOA方向测试和TOF精度测试2个部分,布置如图6所示。测试步骤:①将定位分站与车辆定位卡分别固定到支撑器材上。②用RS485通信线缆将定位分站与业务化运行的矿井定位系统定位分站连接,开启分站。③将定位分站天线固定到巷帮,高度为2 m。④调节车辆定位卡到合适位置固定,高度为1.5 m。⑤进行PDOA方向测

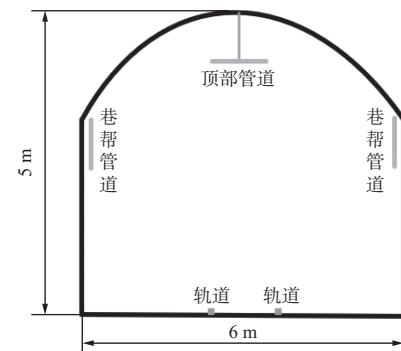


图5 巷道断面

Fig. 5 Roadway section

试,车辆定位卡在定位分站两侧位置取样。⑥用激光测距仪测量车辆定位卡天线与定位分站天线的距离。⑦车辆定位卡与定位分站每1 s通信1次,距离固定后,每个采样点车辆定位卡固定10 s以获得稳定读数。⑧移动车辆定位卡远离定位分站,重复测试步骤⑤和步骤⑥。⑨进行TOF精度测试,车辆定位卡在定位分站单侧位置取样。⑩用激光测距仪测量车辆定位卡天线与定位分站天线的距离。⑪距离固定后,每个采样点车辆定位卡固定1 min以获得足够数据。⑫移动车辆定位卡远离定位分站,重复测试步骤⑩和步骤⑪。⑬测试数据通过定位系统上传至地面服务器,测试完毕后从服务器下载数据到本地。

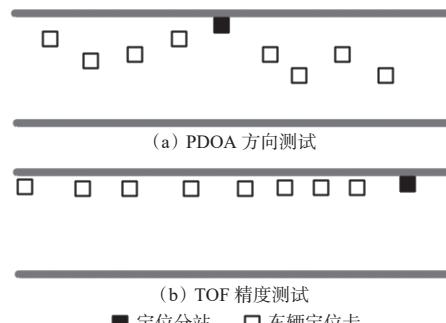


图6 PDOA方向测试和TOF精度测试布置

Fig. 6 Layout of PDOA directional test and TOF precision test

### 2.2 PDOA方向测试结果

PDOA方向测试结果如图7所示(图中包含41个点位的测试数据,零点是定位分站所在位置),可看出在定位分站两侧,PDOA值符号相反。因此,可以通过PDOA值的符号判断定位卡方向。

### 2.3 TOF精度测试结果

在距定位分站一侧200 m范围内的18个点位进行TOF精度测试,距离近时测试点间距小,距离远时测试点间距大。将测试点位测试数据的平均值用于误差计算,结果见表1。

将测试点位误差与真实距离绘制成曲线,如图8所示。可看出在约82 m处误差最小,为1.2 cm;

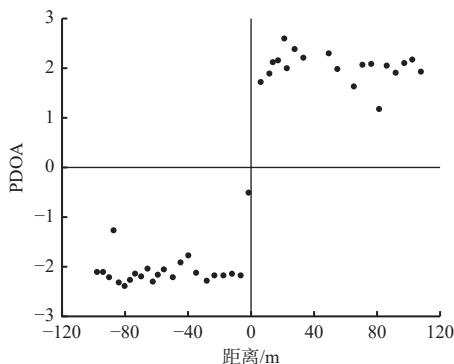


图 7 PDOA 方向测试结果

Fig. 7 PDOA directional test results

表 1 TOF 精度测试数据

Table 1 TOF precision test data

真实距离/m	测量均值/m	绝对误差/m	相对误差/%
1.938	1.895	0.043	2.22
2.922	2.855	0.067	2.29
4.779	4.829	0.050	1.05
8.186	8.206	0.020	0.24
10.984	10.874	0.110	1.00
15.338	15.198	0.140	0.91
20.726	20.616	0.110	0.53
25.446	25.541	0.095	0.37
30.921	30.952	0.031	0.10
40.767	40.696	0.071	0.17
61.731	61.627	0.104	0.17
82.217	82.229	0.012	0.01
100.479	100.398	0.081	0.08
122.302	122.376	0.074	0.06
139.672	139.557	0.115	0.08
159.092	158.951	0.141	0.09
177.285	177.398	0.113	0.06
198.489	198.350	0.139	0.07

在约 159 m 处误差最大, 为 14.1 cm, 接近定位系统设备所采用的 DW1000 型 UWB 定位芯片的设计理论精度 10 cm; 在测试距离范围内, 精度与距离没有明显的相关变化趋势。

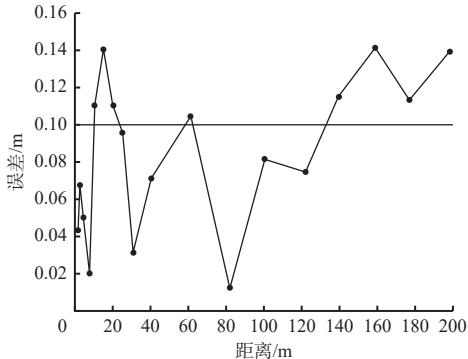


图 8 错误随距离变化曲线

Fig. 8 Curve of error with distance

由于业务化运行的矿井定位系统有实时展示需求, 为保证展示效果, 运动中的定位目标轨迹应尽量平滑。所以, 系统的定位稳定性较为关键, 即在不考虑定位精度的情况下, 对同一位置的定位卡进行多次测量, 其测量值的分布范围应尽量小。取距定位分站距离最远的 198 m 处测试点位的测试数据进行分析, 在此处共有 62 个测量值。计算测量值与其均值的离差, 将离差分为 10 组, 通过直方图统计各组测量值的频数, 结果如图 9 所示。可看出离差全部在 10 cm 内, 分布近似正态分布。将离差进行正态分布拟合, 得到离差分布的标准差为 0.033 4。

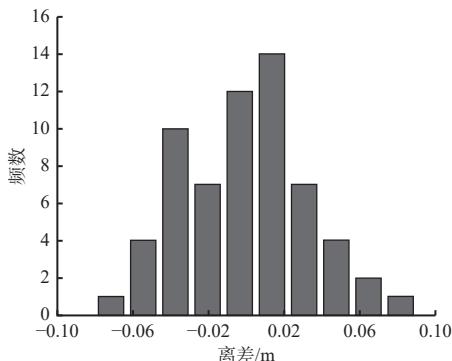


图 9 离差统计

Fig. 9 Deviation statistics

离差经验分布与正态分布拟合结果的累计概率曲线如图 10 所示, 可看出二者吻合度非常好, 表明本文提出的联合定位方法具有良好的稳定性。

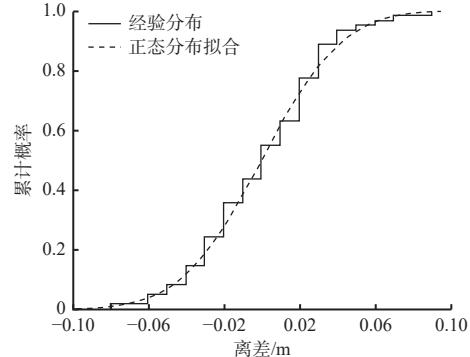


图 10 离差累计概率曲线

Fig. 10 Cumulative probability curve of deviation

### 3 结语

采用 PDOA 与 TOF 煤矿井下联合定位方法的定位分站用长度仅 5 cm 的棒状天线取代接有 1 m 馈线的平面天线, 硬件实现方案更简单, 维护更方便, 有利于节省人力成本, 提升系统稳定性。在大柳塔煤矿井下进行了 PDOA 方向和 TOF 精度测试, 结果表明: 利用 PDOA 值的符号可以正确判断定位卡在定位分站的哪一侧; 定位精度在 15 cm 以内, 可为煤矿安全生产提供精准的位置服务; 在 200 m 测试距离

范围内,定位精度不受距离远近影响;TOF测距数值稳定在相对其均值 $\pm 10$  cm的范围内,具有良好的稳定性。

#### 参考文献(References):

- [1] 孙继平.煤矿井下安全避险“六大系统”的作用和配置方案[J].工矿自动化,2010,36(11):1-4.  
SUN Jiping. Effect and configuration of "six systems" for safe act of rescue of coal mine underground[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(11): 1-4.
- [2] 孙继平.煤矿井下人员位置监测技术与系统[J].煤炭科学技术,2010,38(11):1-5.  
SUN Jiping. Personnel position monitoring technology and system in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11): 1-5.
- [3] AQ 6210—2007 煤矿井下作业人员管理系统通用技术条件[S].  
AQ 6210-2007 General technical conditions of the system for the management of the underground personnel in a coal mine[S].
- [4] AQ 1048—2007 煤矿井下作业人员管理系统使用与管理规范[S].  
AQ 1048-2007 Specification for the usage and management of the system for the management of the underground personnel in a coal mine[S].
- [5] 孙继平.煤矿信息化自动化新技术与发展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):19-23, 83.  
SUN Jiping. New technology and development of mine informatization automation[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 19-23, 83.
- [6] 孙继平.煤矿智能化与矿用5G[J].工矿自动化,2020,46(8):1-7.  
SUN Jiping. Coal mine intelligence and mine-used 5G[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 1-7.
- [7] 孙继平.煤矿智能化与矿用5G和网络硬切片技术[J].工矿自动化,2021,47(8):1-6.  
SUN Jiping. Coal mine intelligence, mine 5G and network hard slicing technology[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(8): 1-6.
- [8] 孙继平,程加敏.煤矿智能化信息综合承载网[J].工矿自动化,2022,48(3):1-4, 90.  
SUN Jiping, CHENG Jiamin. Coal mine intelligent information comprehensive carrier network[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(3): 1-4, 90.
- [9] 孙继平,江羸.矿井车辆无人驾驶关键技术研究[J].工矿自动化,2022,48(5):1-5, 31.  
SUN Jiping, JIANG Ying. Research on key technologies of mine unmanned vehicle[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(5): 1-5, 31.
- [10] 符世琛,李一鸣,张敏骏,等.基于UWB信号的TW-TOF测距技术在狭长巷道中的精度测试实验研究[J].煤炭技术,2017,36(3):246-248.  
FU Shichen, LI Yiming, ZHANG Minjun, et al. Accuracy testing experiment in narrow roadway based on TW-TOF ranging technique of UWB signals[J]. Coal Technology, 2017, 36(3): 246-248.
- [11] 刘清.基于超宽带技术的采煤机定位系统设计[J].煤炭科学技术,2016,44(11):132-135.  
LIU Qing. Design on positioning system of shearer based on ultra wide band technology[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 132-135.
- [12] 孙继平.煤矿安全生产监控与通信技术[J].煤炭学报,2010,35(11):1925-1929.  
SUN Jiping. Technologies of monitoring and communication in the coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1925-1929.
- [13] 孙继平.矿井宽带无线传输技术研究[J].工矿自动化,2013,39(2):1-5.  
SUN Jiping. Research of mine wireless broadband transmission technology[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(2): 1-5.
- [14] 孙继平.煤矿事故特点与煤矿通信、人员定位及监视新技术[J].工矿自动化,2015,41(2):1-5.  
SUN Jiping. Characteristics of coal mine accidents and new technologies of coal mine communication, personnel positioning and monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(2): 1-5.
- [15] 车志平.基于TOF测距的无线传感器网络定位技术研究[D].大连:大连理工大学,2016.  
CHE Zhiping. Research of localization technology based on TOF ranging in wireless sensor network[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [16] 常华伟,王福豹,严国强,等.无线传感器网络的TOF测距方法研究[J].现代电子技术,2011,34(1):35-38.  
CHANG Huawei, WANG Fubao, YAN Guoqiang, et al. TOF ranging method for wireless sensor networks[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(1): 35-38.
- [17] MOK E, XIA Linyuan, RETSCHER G, et al. A case study on the feasibility and performance of an UWB-AoA real time location system for resources management of civil construction projects[J]. Journal of Applied Geodesy, 2010, 4(1): 23-32.
- [18] JACHIMCZYK B, DZIAK D, KULESZA W J. Customization of UWB 3D-RTLS based on the new uncertainty model of the AoA ranging technique[J]. Sensors, 2017, 17(2): 227-252.
- [19] DOTLIC I, CONNELL A, MA Hang, et al. Angle of arrival estimation using decawave DW1000 integrated circuits[C]. 14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications, Bremen, 2017. DOI: 10.1109/WPNC.2017.8250079.
- [20] 孙继平.《煤矿安全规程》安全监控与人员位置监测修订意见[J].工矿自动化,2014,40(6):1-7.  
SUN Jiping. Proposal of revision for safety monitoring and control and personnel position monitoring of Coal Mine Safety Regulation[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(6): 1-7.
- [21] 孙继平.2016年版《煤矿安全规程》监控与通信条款解析[J].工矿自动化,2016,42(5):1-8.  
SUN Jiping. Explanations for part of monitoring and communication of Coal Mine Safety Regulations of 2016 Edition[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(5): 1-8.