



文章编号: 1671-251X(2023)07-0001-05

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18141

## 基于图像邻帧像素灰度和的 矿井电火花识别及报警方法研究

孙继平, 李小伟, 王建业

(中国矿业大学(北京) 人工智能学院, 北京 100083)

**摘要:** 尽早发现矿井电火花并报警, 可避免或减少瓦斯和煤尘爆炸及矿井火灾事故发生。井下没有日光、月光及星光等自然光源, 影响矿井电火花识别的主要因素是矿井光源。通过调整摄像机的安装位置及角度, 可以避免或减少矿井固定光源对电火花识别的影响, 但不能解决矿井移动光源对电火花识别的影响。不同形式电路产生的电火花放电周期不同, 但电火花放电时间均小于 4 ms。闪光光源最小亮持续时间为 240 ms。因此, 可利用电火花发光时间短、矿井移动光源对摄像机照射时间较长的特点, 排除矿井移动光源对摄像机照射的影响。摄像机在较高帧频下拍摄, 电火花图像具有 1 帧暗-1 帧亮-1 帧暗的特征, 即“暗-亮-暗”的帧特征。有电火花的“亮”帧, 单帧图像像素灰度和较大; 无电火花的“暗”帧, 单帧图像像素灰度和较小。移动光源对摄像头的照射是变化的, 经历了无光-有光-无光过程。在无电火花的情况下, 摄像机同样在较高帧频下拍摄, 无论是移动常亮光源还是移动闪光光源的图像均不会出现“暗-亮-暗”的帧特征。基于电火花图像独有的“暗-亮-暗”的帧特征, 提出了基于图像邻帧像素灰度和的矿井电火花识别及报警方法: 实时采集监控区域视频图像; 根据设定的帧频, 对视频图像进行分帧预处理, 分别计算单帧图像像素灰度和; 若当前帧图像像素灰度和与前一帧图像像素灰度和之差小于预先设定的阈值, 则继续采集视频图像, 否则计算当前帧图像像素灰度和与后一帧图像像素灰度和之差; 若该差值小于预先设定的阈值, 则继续采集视频图像, 否则发出矿井电火花报警信号; 矿井电火花报警后, 若人工没有启动应急响应, 则继续进行矿井电火花报警, 否则退出当前报警状态, 继续采集视频图像。通过该方法可有效消除移动常亮光源和闪光光源的干扰。

**关键词:** 矿井电火花; 电火花监测; 图像识别; 矿井光源; 邻帧像素

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Research on mine electric spark recognition and alarm method based on  
the sum of adjacent frame pixel grayscale of images

SUN Jiping, LI Xiaowei, WANG Jianye

(School of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Early detection of mine electric sparks and alarm can prevent or reduce gas and coal dust explosions and mine fire accidents. There are no natural light sources such as sunlight, moonlight, and starlight underground. The main factor affecting the recognition of mine electric sparks is the mine light source. By

收稿日期: 2023-07-07; 修回日期: 2023-07-14; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801800)。

作者简介: 孙继平(1958—), 男, 山西翼城人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 中国矿业大学(北京)原副校长; 获国家科技进步奖和技术发明奖二等奖 4 项(第 1 完成人 3 项); 作为第 1 完成人获省部级科技进步特等奖和一等奖 8 项; 作为第 1 完成人主持制定中华人民共和国煤炭行业、安全生产行业和能源行业标准 48 项; 作为第 1 发明人获国家授权发明专利 100 余项; 主持制定《煤矿安全规程》第十一章“监控与通信”; 作为第 1 作者或独立完成著作 12 部; 被 SCI 和 EI 检索的第 1 作者或独立完成论文 100 余篇; 作为国务院煤矿事故调查专家组组长参加了 10 起煤矿特别重大事故调查工作; E-mail: sjp@cumtb.edu.cn。

引用格式: 孙继平, 李小伟, 王建业. 基于图像邻帧像素灰度和的矿井电火花识别及报警方法研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(7): 1-5.

SUN Jiping, LI Xiaowei, WANG Jianye. Research on mine electric spark recognition and alarm method based on the sum of adjacent frame pixel grayscale of images[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(7): 1-5.



扫码移动阅读

adjusting the installation position and angle of the camera, the impact of fixed mine light sources on electric spark recognition can be avoided or reduced. But it cannot solve the impact of mobile mine light sources on electric spark recognition. The discharge cycle of electric sparks generated by different forms of circuits is different, but the discharge time of electric sparks is less than 4 ms. The minimum bright duration of the flash light source is 240 ms. Therefore, the features of the short emission time of electric sparks and longer exposure time of mine moving light sources to cameras can be utilized to eliminate the impact of mine moving light sources on camera exposure. The camera shoots at a high frame rate, and the electric spark image has a feature of 1 frame dark -1 frame bright -1 frame dark, that is, a "dark light dark" frame feature. The "bright" frames with sparks have a large sum of pixel grayscales in a single frame. The "dark" frames without sparks have a small sum of pixel grayscales in a single frame. The illumination of a moving light source on the camera is variable, going through a process of no light, light, and no light. In the absence of electric sparks, the camera also shoots at a high frame rate. The images of both moving constant bright light sources and moving flashing light sources do not exhibit the "dark bright dark" frame feature. Based on the unique "dark bright dark" frame feature of electric spark images, a mine electric spark recognition and alarm method based on the sum of adjacent frame pixel grayscale is proposed. The method collects monitoring area video images in real time. According to the set frame rate, the method preprocesses the video image into frames and calculates the pixel grayscale of a single frame image separately. If the difference between the current frame image pixel grayscale and the previous frame image pixel grayscale is less than the pre-set threshold, the method continues to collect the video image. Otherwise, the method calculates the difference between the current frame image pixel grayscale and the subsequent frame image pixel grayscale. If the difference is less than the pre-set threshold, the method continues to collect video images. Otherwise, the method issues a mine electric spark alarm signal. After the mine electric spark alarm, if the emergency response is not activated manually, the mine electric spark alarm will continue. Otherwise, the method exits the current alarm state and continues to collect video images. This method can effectively eliminate the interference of moving constant light sources and flashing light sources.

**Key words:** mine electric spark; spark monitoring; image recognition; mine light source; adjacent frame pixels

## 0 引言

煤矿井下电火花有发生在隔爆外壳内的壳内电火花和发生在隔爆外壳外的壳外电火花。因隔爆外壳的隔爆作用,隔爆外壳内的电气开关分合和电气设备故障等产生壳内电弧和电火花,不会引起隔爆外壳外的瓦斯和煤尘爆炸及矿井火灾。电缆和电气设备漏电等产生的壳外电火花,以及大功率无线电发射在金属支护和机电设备金属上感生电动势放电产生的壳外电火花,会引起瓦斯和煤尘爆炸及矿井火灾<sup>[1-3]</sup>。据统计<sup>[4-7]</sup>,2005—2014年全国煤矿发生一次死亡10人以上重特大瓦斯爆炸事故108起,其中电气火源引爆瓦斯事故48起,事故占比高达44.4%;在引爆瓦斯的各种火源中,电气火源引起瓦斯爆炸最多。因此,研究煤矿井下壳外电火花(以下简称矿井电火花)识别方法,并及时报警,可避免或减少瓦斯和煤尘爆炸及矿井火灾事故发生。

地面电火花监测识别方法研究较多。汪金刚等<sup>[8]</sup>提出了基于光电倍增管的紫外传感器来检测“日盲”区紫外光,但该方法只针对紫外波段230~280 nm

有较好的检测效果。王鹏飞等<sup>[9]</sup>提出了一种基于图像背景建模的电火花检测技术,但该方法仅对电火花检测背景简单且单一情况的使用效果较好,局限性较大。余家奎<sup>[10]</sup>设计了基于视频的火花和烟雾检测算法,将高斯混合模型和统计非参数方法相结合,利用颜色特征的分割得到火花的候选区域,从而检测火花,但该方法易受烟雾等干扰的影响,导致准确率大幅下降。李扬等<sup>[11]</sup>通过光学镜头和光纤感知火花辐射,采取对射式无盲区检测方式,信号经过光电检测电路输入到火花检测器中,选择近红外区及红外区作为检测敏感信号,通过感应微小火花的波长特性实现火花检测,其优点是灵敏度高,但只能用于点检测,无法进行大范围的面检测。

井下环境与地面环境差异大,煤矿井下漏电电火花、感应电火花等矿井电火花具有每次放电能量较小,电火花本身温度较高,但电火花周边物体升温不明显的特点<sup>[3]</sup>。上述地面电火花监测识别方法难以用于矿井电火花识别。因此,针对煤矿井下特点,本文研究矿井电火花识别及报警方法。

## 1 电火花的最大放电周期及时间

刘树林等<sup>[12]</sup>基于安全火花实验装置得出,短路电火花的放电过程分为介质击穿、火花产生、火花维持和火花熄灭4个阶段,其中电火花的放电时间即电火花光亮持续时间(包括火花产生、火花维持和火花熄灭3个阶段),且放电时间小于放电周期。张燕美等<sup>[13]</sup>给出了电阻性电路的断路电火花放电周期,为100~300 μs。陈坤等<sup>[14]</sup>基于高压火花发生器和高速摄像系统实验,给出了电火花释放过程的整个放电周期,为1.408 ms。刘佳<sup>[15]</sup>研究了静电火花放电模型下不同电容对电火花放电周期的影响,当电容为1 nF时,最小能引发井下瓦斯爆炸的电火花放电周期为10 μs左右。在电火花工业应用领域,梁天宇<sup>[16]</sup>给出了无损伤零件加工时电火花的释放周期,为0.3 μs~4 ms。

综上所述,不同形式电路产生的电火花,其放电周期不同,但电火花的放电时间均小于4 ms。

## 2 矿井光源对电火花识别的影响

矿井电火花的产生具有偶发性,放电光亮持续时间极短,加之光源干扰,很难被发现。井下没有日光、月光及星光等自然光源,影响矿井电火花识别的主要因素是矿井光源。矿井光源按用途可分为巷道灯、矿灯、车灯、信号灯(含报警灯)和指示灯等。矿井光源按工作原理可分为LED灯、白炽灯和日光灯等。矿井光源按移动性可分为移动光源和固定光源:移动光源主要有矿灯、车灯等;固定光源主要有巷道灯、固定设备信号灯(含报警灯)、巷道指示灯等。矿井光源按发光连续性可分为连续发光的常亮光源和非连续发光的闪光光源:常亮光源主要有巷道灯、矿灯、车灯、连续发光的信号灯(含报警灯)和指示灯等;闪光光源主要有闪烁的信号灯(含报警灯)和指示灯等。

### 2.1 闪光光源最高工作频率

中华人民共和国煤炭行业标准MT/T 1199—2023《煤矿用防爆柴油机无轨胶轮运输车辆通用安全技术条件》<sup>[17]</sup>中规定无轨运输车辆运行方向的照明灯照明时,至少在前方20 m处不低于8 lx的光强度,且车前和车后的红色信号灯能见距离不小于60 m。中华人民共和国国家标准GB 17509—2008《汽车及挂车转向信号灯配光性能》<sup>[18]</sup>中规定了汽车及挂车转向信号灯的闪烁状态应在1~2 Hz的频率下转换,且脉冲持续时间应大于0.3 s。中华人民共和国国家标准GB 14886—2016《道路交通信号灯设置与安装规范》<sup>[19]</sup>中规定了绿闪信号灯的频率为1~2次/s,其

中信号亮暗时间比为1:1,则最小亮持续时间为250 ms;卤钨灯光源的闪光信号频率允许降低,但不得低于30次/min,信号亮暗时间比不低于1:1。中华人民共和国公共安全行业标准GA/T 743—2016《闪光警告信号灯》<sup>[20]</sup>中规定了闪光警告信号灯的闪烁频率为40~50次/min,且每次闪烁的占空比应在1:3~1:5之间,则最小亮持续时间为240 ms。中华人民共和国机械行业标准JB/T 12707—2016《道路监控电子闪光装置》<sup>[21]</sup>中规定了道路监控电子闪光装置的闪光频率,即10 s的间隔连续触发闪光3次。综上所述,闪光光源最小亮持续时间为240 ms。

### 2.2 移动光源最大移动速度

矿井运输及采掘移动设备和车辆主要有无轨胶轮车、轨道机车、架空乘人装置、掘进机、掘锚一体机、连续采煤机、采煤机等,其中,无轨胶轮车移动速度最大。《煤矿安全规程》规定,采用无轨胶轮车运人时运行速度不超过25 km/h,运送物料时运行速度不超过40 km/h。因此,井下移动光源的最大移动速度不大于40 km/h(11.11 m/s)。

### 2.3 矿井光源对电火花识别的影响

避免或减少矿井光源对电火花识别的影响,是矿井电火花识别必须解决的问题。通过调整摄像机的安装位置及角度,可以避免或减少矿井固定光源对电火花识别的影响,但不能解决矿井移动光源对电火花识别的影响。因此,避免或减少矿井移动光源对电火花识别的影响,是矿井电火花识别的关键。

无论矿井常亮移动光源,还是矿井闪光移动光源,对固定摄像机的光照都是非连续的。受巷道和采掘工作面布置、车辆和设备移动速度等影响,矿井移动光源对摄像机照射时间较长。长期受训练的职业拳手的极限挥拳速度为13次/s,由此可知矿工挥动矿灯照射摄像机的时间<77 ms。因此,可以利用电火花发光时间短、矿井移动光源对摄像机照射时间较长的特点,排除矿井移动光源对摄像机照射的影响。

## 3 基于图像邻帧像素灰度的矿井电火花识别及报警方法

笔者所做研究和实验表明,当摄像机在较高帧频下拍摄,电火花图像具有1帧暗-1帧亮-1帧暗的特征,即“暗-亮-暗”的帧特征。有电火花的“亮”帧,单帧图像像素灰度和较大;无电火花的“暗”帧,单帧图像像素灰度和较小。移动光源对摄像头的照射是变化的,经历了无光-有光-无光过程。在无电火花的情况下,摄像机同样在较高帧频下拍摄,移动常亮光源图像具有“暗-暗-暗”“暗-暗-亮”“暗-亮-亮”“亮-亮-亮”或“亮-亮-亮”“亮-亮-暗”“亮-暗-

“暗”“暗-暗-暗”的帧特征,但不会出现“暗-亮-暗”的帧特征。闪光光源的发光持续时间远大于电火花的发光持续时间。因此,在无电火花的情况下,摄像机同样在较高帧频下拍摄,移动闪光光源图像同样具有“暗-暗-暗”“暗-暗-亮”“暗-亮-亮”“亮-亮-亮”或“亮-亮-亮”“亮-亮-暗”“亮-暗-暗”“暗-暗-暗”的帧特征,但不会出现“暗-亮-暗”的帧特征。因此,摄像机在较高的帧频下拍摄,无论是移动常亮光源还是移动闪光光源的图像均不会出现“暗-亮-暗”的帧特征。

因此,本文基于电火花图像独有的“暗-亮-暗”的帧特征,提出了基于图像邻帧像素灰度和的矿井电火花识别及报警方法,可有效消除移动常亮光源和闪光光源的干扰。该方法流程如图 1 所示( $N$ 为设定的阈值)。

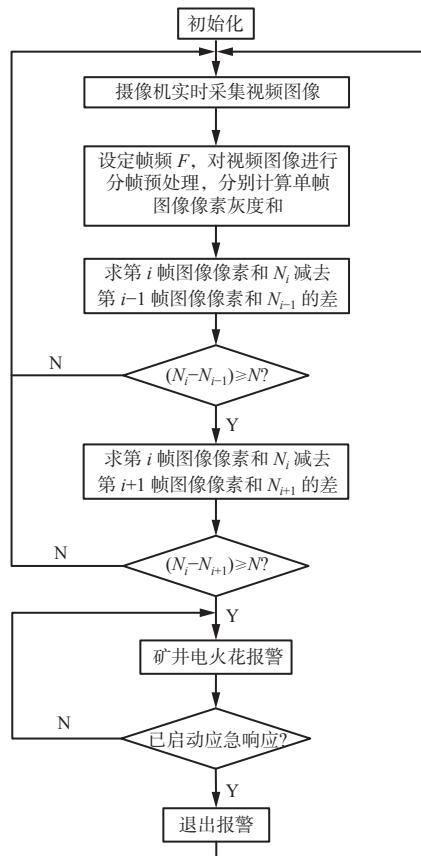


图 1 基于图像邻帧像素灰度和的矿井电火花识别及报警方法流程

Fig. 1 Flow of mine electric spark recognition and alarm method based on the sum of adjacent frame pixel grayscale of images

具体步骤如下:① 实时采集监控区域视频图像。② 根据设定的帧频,对视频图像进行分帧预处理,分别计算单帧图像像素灰度和。③ 若当前帧图像像素灰度和与前一帧图像像素灰度和之差小于预先设定的阈值,则继续采集视频图像,否则计算当前帧图像像素灰度和与后一帧图像像素灰度和之差。

④ 若当前帧图像像素灰度和与后一帧图像像素灰度和之差小于预先设定的阈值,则继续采集视频图像,否则发出矿井电火花报警信号。⑤ 矿井电火花报警后,若人工没有启动应急响应,则继续进行矿井电火花报警,否则退出当前报警状态,继续采集视频图像。

#### 4 结论

1) 井下没有日光、月光及星光等自然光源,影响矿井电火花识别的主要因素是矿井光源。矿井光源按用途可分为巷道灯、矿灯、车灯、信号灯(含报警灯)和指示灯等。矿井光源按工作原理可分为 LED 灯、白炽灯和日光灯等。矿井光源按移动性可分为移动光源和固定光源。矿井光源按发光连续性可分为连续发光的常亮光源和非连续发光的闪光光源。

2) 通过调整摄像机的安装位置及角度,可以避免或减少矿井固定光源对电火花识别的影响,但不能解决矿井移动光源对电火花识别的影响。

3) 闪光光源最小亮持续时间为 240 ms。井下移动光源的最大移动速度不大于 40 km/h。不同形式电路产生的电火花,其放电周期不同,但电火花放电时间均小于 4 ms。可利用电火花发光时间短、矿井移动光源对摄像头照射时间较长的特点,排除矿井移动光源对摄像机照射的影响。

4) 当摄像机在较高帧频下拍摄,电火花图像具有 1 帧暗-1 帧亮-1 帧暗的特征,即“暗-亮-暗”的帧特征。有电火花的“亮”帧,单帧图像像素灰度和较大;无电火花的“暗”帧,单帧图像像素灰度和较小。移动光源对摄像头的照射是变化的,经历了无光-有光-无光过程。在无电火花的情况下,摄像机同样在较高帧频下拍摄,无论是移动常亮光源还是移动闪光光源的图像均不会出现“暗-亮-暗”的帧特征。

5) 基于电火花图像独有的“暗-亮-暗”的帧特征,提出了基于图像邻帧像素灰度和的矿井电火花识别及报警方法:实时采集监控区域视频图像;根据设定的帧频,对视频图像进行分帧预处理,分别计算单帧图像像素灰度和;若当前帧图像像素灰度和与前一帧图像像素灰度和之差小于预先设定的阈值,则继续采集视频图像,否则计算当前帧图像像素灰度和与后一帧图像像素灰度和之差;若该差值小于预先设定的阈值,则继续采集视频图像,否则发出矿井电火花报警信号;矿井电火花报警后,若人工没有启动应急响应,则继续进行矿井电火花报警,否则退出当前报警状态,继续采集视频图像。

## 参考文献(References):

- [1] 孙继平. 屯兰煤矿“2·22”特别重大瓦斯爆炸事故原因及教训[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 72-75.  
SUN Jiping. The causes and lessons of "2.22" gas explosion disaster at Tunlan Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 72-75.
- [2] 孙继平. 煤矿瓦斯和煤尘爆炸感知报警与爆源判定方法研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(6): 1-5, 11.  
SUN Jiping. Research on method of coal mine gas and coal dust explosion perception alarm and explosion source judgment[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(6): 1-5, 11.
- [3] 孙继平, 李小伟, 徐旭, 等. 矿井电火花及热动力灾害紫外图像感知方法研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 1-4, 95.  
SUN Jiping, LI Xiaowei, XU Xu, et al. Research on ultraviolet image perception method of mine electric spark and thermal power disaster[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(4): 1-4, 95.
- [4] 孙继平. 互联网+煤矿监控与通信[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.  
SUN Jiping. Internet+coal mine monitoring and communication[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 2016.
- [5] 孙继平, 钱晓红. 2004—2015年全国煤矿事故分析[J]. 工矿自动化, 2016, 42(11): 1-5.  
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Analysis of coal mine accidents in China during 2004-2015[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(11): 1-5.
- [6] 孙继平. 煤矿事故分析与煤矿大数据和物联网[J]. 工矿自动化, 2015, 41(3): 1-5.  
SUN Jiping. Accident analysis and big data and Internet of things in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3): 1-5.
- [7] 孙继平, 钱晓红. 煤矿重特大事故应急救援技术及装备[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 112-116, 153.  
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Emergency rescue technology and equipment of mine extraordinary accidents[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 112-116, 153.
- [8] 汪金刚, 林伟, 彭鹤, 等. 高压放电紫外传感器与检测装置研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(8): 56-59.  
WANG Jingang, LI Wei, PENG Hu, et al. Study on ultraviolet sensor and detection to high-voltage discharge[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(8): 56-59.
- [9] 王鹏飞, 杨余旺, 夏吉安. 基于图像背景建模的电火花检测[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(3): 154-159.  
WANG Pengfei, YANG Yuwang, XIA Ji'an. Electric spark detection based on background generation[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(3): 154-159.
- [10] 余家奎. 基于视频的火花和烟雾检测算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.  
YU Jiakui. Research on video based spark and smoke detection algorithms[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [11] 李杨, 李绍鹏, 刘建翔, 等. 物料输送管道中的火花检测及熄除技术研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(11): 1551-1554.  
LI Yang, LI Shaopeng, LIU Jianxiang, et al. Research on spark detection and extinguishing technology in material delivery pipeline[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(11): 1551-1554.
- [12] 刘树林, 钟久明, 樊文斌, 等. 电容电路短路火花放电特性及其建模研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2123-2128.  
LIU Shulin, ZHONG Jiuming, FAN Wenbin, et al. Short circuit discharge characteristics of the capacitive circuit and its mathematical model[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2123-2128.
- [13] 张燕美, 李维坚. 本质安全电路设计[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.  
ZHANG Yanmei, LI Weijian. Intrinsic safety circuit design[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 1992.
- [14] 陈坤, 张小良, 陶光远, 等. 影响静电火花放电的因素[J]. 中国粉体技术, 2021, 27(5): 1-10.  
CHEN Kun, ZHANG Xiaoliang, TAO Guangyuan, et al. Influence factors of electrostatic spark discharge[J]. China Powder Science and Technology, 2021, 27(5): 1-10.
- [15] 刘佳. 静电火花放电特性探究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
LIU Jia. Exploring the characteristics of electrostatic spark discharge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [16] 梁天宇. 浅谈电火花加工的要素[J]. 中国高新技术企业, 2015(4): 91-92.  
LIANG Tianyu. Discussion on the elements of electrical discharge machining[J]. China High-Tech Enterprises, 2015(4): 91-92.
- [17] MT/T 1199—2023 煤矿用防爆柴油机无轨胶轮运输车辆通用安全技术条件[S].  
MT/T 1199-2023 General safety technical condition of the explosion-proof diesel trackless rubber wheel transport vehicles for coal mines[S].
- [18] GB 17509—2008 汽车及挂车转向信号灯配光性能[S].  
GB 17509-2008 Photometric characteristics of direction indicators for motor vehicles and their trailers[S].
- [19] GB 14886—2016 道路交通信号灯设置与安装规范[S].  
GB 14886-2016 Specifications for road traffic signal setting and installation[S].
- [20] GA/T 743—2016 闪光警告信号灯[S].  
GA/T 743-2016 Flash alarm signals[S].
- [21] JB/T 12707—2016 道路监控电子闪光装置[S].  
JB/T 12707-2016 Electronic flash apparatus for road monitoring[S].