科研成果

文章编号：1671-251X(2024)06-0001-06　　DOI：10.13272/j.issn.1671-251x.18203

无线电波发射功率防爆要求与检测方法

孙继平，　彭铭

（中国矿业大学（北京）人工智能学院，北京　100083）

摘要：现行国家标准 GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第 1 部分:设备 通用要求》和国际标准 IEC 60079-0:2017《Explosive atmospheres-Part 0:Equipment-General requirements》规定无线电发射器的阈功率为无线电发射器的有效输出功率与天线增益的乘积。在无线电波防爆安全发射功率阈值一定的条件下，天线增益越大，无线电发射器的有效输出功率就越小，这将限制通过增大天线增益，提高无线传输距离。因此，有必要对国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 中规定的阈功率的正确性进行研究，提出合理的无线电波发射功率防爆要求与检测方法。提出了无线电波防爆安全发射功率与天线增益无关，国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 规定的无线电发射器的阈功率是错误的。提出了煤矿井下无线电波防爆安全发射功率阈值应大于 16 W，且与天线增益无关；国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 规定阈功率不得大于 6 W，且与天线增益相关，是错误的。提出了无线电波防爆安全性能检测方法——检测无线电发射器输出功率，这既可保证通过检测的防爆无线电设备的防爆安全，又简化了检测方法，更提高了防爆无线电设备的无线电波发射功率，解除了对天线增益的限制，将大大提高煤矿井下防爆无线电设备的无线传输距离。

关键词：矿井无线电波；防爆安全；天线增益；发射功率；输出功率；防爆安全性能检测

中图分类号：TD655　　文献标志码：A

Explosion proof requirements and detecting methods for radio wave transmission power

SUN Jiping,　PENG Ming

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

Abstract: The current national standard GB/T 3836.1-2021 *Explosive atmospheres-Part* 1: *Equipment-General requirements* and the international standard IEC 60079-0:2017 *Explosive atmospheres-Part* 0: *Equipment-General requirements* stipulate that the threshold power of a radio transmitter is the product of the effective output power of the radio transmitter and the antenna gain. Under the condition of a certain threshold for the safe transmission power of radio wave explosion-proof, the larger the antenna gain, the smaller the effective output power of the radio transmitter. This will limit the improvement of wireless transmission distance by increasing the antenna gain. Therefore, it is necessary to study the correctness of the threshold power specified in the national standard GB/T 3836.1-2021 and the international standard IEC 60079-0:2017, and propose reasonable explosion-proof requirements and detection methods for radio wave transmission power. It has been proposed that the safe

收稿日期：2024-06-05；**修回日期**：2024-06-08；**责任编辑**：盛男。

基金项目：国家自然科学基金面上项目（52074305）；国家重点研发计划项目（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 9 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 51 项；作为第 1 发明人获国家授权发明专利 130 余件；主持制定《煤矿安全规程》第十一章“监控与通信”；被 SCI 和 EI 检索的第 1 作者或独立完成论文 100 余篇；作为第 1 作者或独立完成著作 12 部；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。

扫码移动阅读

引用格式：孙继平，彭铭. 无线电波发射功率防爆要求与检测方法[J]. 工矿自动化，2024，50(6)：1-5, 22.

SUN Jiping, PENG Ming. Explosion proof requirements and detecting methods for radio wave transmission power[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(6): 1-5, 22.

transmission power of radio waves is independent of antenna gain, and the threshold power of radio transmitters specified in the national standard GB/T 3836.1-2021 and the international standard IEC 60079-0:2017 is incorrect. It is proposed that the threshold for the safe transmission power of underground wireless radio waves in coal mines should be greater than 16 W and independent of antenna gain. The national standard GB/T 3836.1-2021 and the international standard IEC 60079-0:2017 stipulate that the threshold power shall not exceed 6 W, which is incorrect. A method for detecting the explosion-proof safety performance of wireless radio waves has been proposed. The method detects the output power of wireless transmitters. This not only ensures the explosion-proof safety of the detected wireless equipment, but also simplifies the detection method. The method improves the wireless radio wave transmission power of the wireless equipment, removes the limitation on antenna gain, and greatly improves the wireless transmission distance of wireless explosion-proof equipment in coal mines.

Key words: mine radio waves; explosion proof safety; antenna gain; transmission power; output power; explosion proof safety performance detecting

0 引言

5G, 5.5G, WiFi6, WiFi7, UWB, ZigBee 等矿井移动通信系统和车辆及人员定位系统等发射的大功率无线电波，被能作为接收天线的金属结构吸收，并产生放电火花，有点燃爆炸性气体的风险[1-6]。因此，需要合理设置无线电发射器的无线电波防爆安全发射功率阈值，限制无线电发射器的无线电波最大发射功率。现行国家标准 GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第 1 部分:设备 通用要求》[7]规定无线电发射器的阈功率不得大于 6 W。

许多学者认为 6 W 这一阈值限定得过低，导致通信基站的无线覆盖半径较小[8-10]，增大了系统建设成本和维护工作量，不利于矿井移动通信系统和车辆及人员定位系统等在煤矿井下应用。文献[11-12]对国家标准 GB/T 3836.1—2021 进行了溯源分析，指出国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017《Explosive atmospheres-Part 0:Equipment-General requirements》[13]直接引用欧洲标准 CLC/TR 50427:2004《 Assessment of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation-Guide》[14]的相关内容，但错误地将无线电波防爆安全功率阈值直接修改为 6 W，并提出无线电波防爆安全功率阈值应为 8 W。文献[15]指出国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 中规定的无线电波防爆安全功率阈值应为接收点火功率阈值，且无线电波防爆安全接收点火功率应为 8 W。文献[16]分析了无线电波发射功率、接收总功率和接收点火功率之间的关系，得出无线电波防爆安全发射功率阈值应是无线电波防爆安全接收点火功率阈值的 2 倍以上，提出煤矿井下无线电波防爆安全发射功率阈值应大于 16 W。文献[17]通过搭建谐振耦合系统仿真了无线电波频率为 3.55 GHz、收发天线均为单环线圈的情形，结果表明，在无线电波发射功率为 100 W 时，无法在断点间距为 0.4 mm 的单环接收线圈中产生击穿放电。文献[18-19]使用基于半波偶极子天线设计的射频电磁能防爆专用试验装置进行试验，结果表明，当发射射频信号为 700 MHz 正弦波时，测得未点燃瓦斯的临界情况下最小正向功率为 49.6 W、馈入最小功率为 24.8 W，认为 700 MHz 频段的无线电波防爆安全发射功率阈值可以提高到 20 W 以上，并指出了国家标准 GB/T 3836.1—2021 中发射阈功率 6 W 的限制来自于 20 世纪 80 年代英国的研究成果所存在的不足。文献[20]将能作为接收天线的金属结构等效为单环接收线圈，以多物理场仿真得到的工作频率为 3.55 GHz 时最小击穿电压为 200 V 为依据，使用电磁仿真软件模拟了发射天线为八木天线、无线电波频率为 3.55 GHz 时在单环接收线圈断点两端产生的电压，结果表明，在八木天线近场区、远场区和没有传输损耗时无线电波防爆安全发射功率阈值分别为 450, 7 200, 100 W，但仅考虑了无线电波频率为 3.55 GHz 时产生击穿放电的特定情形。文献[21]以 GB/T 3836.1—2021 中规定可能堆积煤尘的电气设备表面温度不能超过 150 ℃ 为依据，使用电磁仿真软件模拟了无线电波在电气设备表面产生的热效应，结果表明，在无线电波发射功率不大于 16.48 W 时，不会导致电气设备表面温度超过 150 ℃。文献[22]依据 GB/T 3836.4—2021《爆炸性环境 第 4 部分：由本质安全型 “i” 保护的设备》[23]中规定的点燃甲烷–空气混合气体的最小能量为 525 μJ，在不同无线电波发射功率下进行电磁仿真，结果表明，在安全距离为 0.2 m 时，点燃甲烷–空气混合气体的无线电波最小发射功率为 27.45 W。

综上所述，仅笔者研究团队[11-12,15-16]对国家标准 GB/T 3836.1—2021 进行了溯源分析，指出了国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017

错误地将欧洲标准 CLC/TR 50427:2004 中规定的接收点火功率 8 W 直接修改为发射阈功率 6 W，提出了无线电波防爆安全发射功率阈值应大于 16 W。而其他文献均是通过电磁仿真或试验来验证国家标准 GB/T 3836.1—2021 中的无线电发射器的阈功率不得大于 6 W 这一条款限定得过低，均没有指出国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 的相关错误。

国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 规定无线电发射器的阈功率为无线电发射器的有效输出功率与天线增益的乘积。也就是说，无线电波防爆安全发射功率阈值，不但与无线电发射器的有效输出功率有关，还与天线增益有关。在无线电波防爆安全发射功率阈值一定的条件下，天线增益越大，无线电发射器的有效输出功率就越小。这将限制通过增大天线增益，提高无线传输距离。因此，有必要对国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 中规定的阈功率的正确性进行研究，提出合理的无线电波发射功率防爆要求与检测方法。

1　天线增益

无线电波需要通过天线发射。天线分为无源天线和有源天线：无源天线是一个无源器件；有源天线可以看作是无源天线+有源信号功率放大器。矿井移动通信及人员和车辆定位系统等使用的天线一般为无源天线。因此，下面研究的天线为无源天线。

天线增益是指在输入功率相等的条件下，实际天线在最大辐射方向上与理想全向天线或偶极子天线在空间同一点处所产生的信号功率密度之比，表示天线将射频信号能量向某个特定方向集中辐射的能力。天线为无源器件，自身不会产生能量，更不能增大射频信号的功率和能量。天线增益越大，则在天线最大辐射方向上产生的功率密度越大，但无线电波发射功率不会增大。天线增益可以表示为[24]

$$G_1 = S_i/S_j \tag{1}$$

式中S_i和S_j分别为该天线和理想全向天线（或偶极子天线）在相同无线电波发射功率下，且在最大辐射方向上相同接收点处产生的功率密度，W/m^2。

天线增益也可以表示为

$$G_2 = 10\lg(S_i/S_j) \tag{2}$$

若 G_2 代表相对于理想全向天线的天线增益，单位为 dBi；若 G_2 代表相对于偶极子天线的天线增益，单位为 dBd。

国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 规定阈功率为等效全向辐射功率（Effective Isotropic Radiated Power, EIRP）。若无线电发射器的输出功率 P_s 为 16 W，天线增益 G_2 为 3 dBi（即 G_1 为 2）时，则 EIRP=P_sG_1=16 W×2=32 W。但 EIRP=32 W 不是指无线电波发射功率从 16 W 增大到了 32 W，而是代表若天线采用的是理想全向天线，无线电发射器的输出功率需要 32 W，才能产生与该天线在最大辐射方向上同样的辐射效果。

2　天线发射效率

无线电发射器可通过一体化方式与天线直接连接，也可通过射频馈线（含射频电缆）与天线连接。手机和无线便携仪等移动终端的无线电发射器一般采用一体化方式与天线直接连接。具有金属外壳的隔爆型和本质安全型防爆基站（以下简称基站）一般采用外置天线（以下简称天线），其无线电发射器（含隔离电容）通过射频馈线和插接件与天线连接。

基站外壳内的无线电发射器可通过固定在外壳上的插接件与外壳外的天线相连：无线电发射器通过插接件（或直接焊接等）与内部射频馈线连接，内部射频馈线的另一端与外壳上插接件的内部端口连接；天线通过插接件（或直接焊接等）与外部射频馈线连接，外部射频馈线的另一端经插接件与外壳上插接件的外部端口连接，或天线直接通过插接件与外壳上插接件的外部端口连接。

基站外壳内的无线电发射器也可通过穿过电缆引入装置的射频馈线与外壳外的天线相连：无线电发射器通过插接件（或直接焊接等）与穿过电缆引入装置的射频馈线连接，射频馈线的另一端接外部插接件；天线直接通过插接件与射频馈线的外部插接件连接，或天线通过插接件（或直接焊接等）与外部射频馈线连接，外部射频馈线的另一端接插接件，再与射频馈线的外部插接件连接。

为了便于分析，将无线电发射器与外置天线的连接方式简化为无线电发射器经射频馈线（包括插接件）连接天线，如图 1 所示。

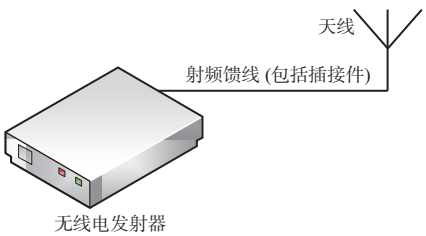

图 1　无线电发射器与外置天线连接

Fig. 1　Connection of the radio transmitter and external antenna

无线电发射器在向外置天线输送射频信号时，会在射频馈线和插接件上产生损耗（以下统称馈线损耗）。馈线损耗主要由阻抗不匹配产生的回波损耗和损耗电阻产生的热损耗 2 个部分组成。

无线电发射器经射频馈线和插接件向外置天线输送射频信号时，射频馈线和插接件与天线的阻抗不匹配，会产生回波损耗。天线馈入功率为

$$P_k = \eta_a \eta_b P_s \tag{3}$$

式中：η_a为馈线传输效率；η_b为馈电效率。

天线内阻由辐射电阻和损耗电阻组成。因此，馈入天线的功率并不会全部转换为无线电波发射功率，其中一部分在天线损耗电阻上以热损耗的形式消耗掉。天线发射效率η_c用无线电波发射功率与天线馈入功率之比表示：

$$\eta_c = \frac{P_t}{P_k} = \frac{P_t}{P_t + P_n} = \frac{R_t}{R_t + R_n} \tag{4}$$

式中：P_t为无线电波发射功率，W；P_n为天线损耗电阻消耗的功率，W；R_t为天线的辐射电阻，Ω；R_n为天线损耗电阻，Ω。

因此，无线电波发射功率可表示为

$$P_t = \eta_a \eta_b \eta_c P_s \tag{5}$$

只有在没有馈线损耗、天线回波损耗和天线热损耗的理想情况下，即馈线传输效率η_a、天线馈电效率η_b和天线发射效率η_c均为 1 时，无线电发射器的输出功率才能全部转换为无线电波发射功率。但在实际工程中，馈线传输效率η_a、天线馈电效率η_b和天线发射效率η_c均小于 1。因此，无线电波发射功率小于无线电发射器输出功率。

3 无线电波防爆安全发射功率及检测方法

3.1 无线电波防爆安全发射功率

在气体浓度、温度、气压、湿度和点火材质等条件一定的情况下，引爆甲烷等可燃性气体的主要因素是火源的能量；对于电火花，主要是电火花能量和功率。上面分析表明，天线不但不能产生能量，不能提升功率，还消耗了能量，降低了功率；无线电波防爆安全发射功率与天线增益无关。因此，国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 规定无线电发射器的阈功率为无线电发射器的有效输出功率与天线增益的乘积，是错误的。国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 没有正确理解天线增益的含义，错误地认为，天线增益就是功率放大。

天线的损耗电阻是客观存在的，不可避免。天线不但不会增大无线电波发射功率，还会减小无线电波发射功率。因此，无线电波防爆安全发射功率阈值与天线增益无关。煤矿井下无线电波防爆安全发射功率阈值应大于 16 W[16]，且与天线增益无关。国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 规定阈功率不得大于 6 W，且与天线增益相关，是完全错误的。

3.2 无线电波防爆安全性能检测方法

为保证无线电发射器的防爆安全性能，需对无线电发射器的无线电波最大发射功率进行检测。通过前面的分析可知，无线电波发射功率小于无线电发射器输出功率。因此，本文提出了无线电波防爆安全性能检测方法——检测无线电发射器输出功率。这既可保证通过检测的防爆无线电设备的防爆安全，又简化了检测方法，更提高了防爆无线电设备的无线电波发射功率，解除了对天线增益的限制，将大大提高煤矿井下防爆无线电设备的无线传输距离。

4 结论

1）笔者研究团队对国家标准 GB/T 3836.1—2021 进行了溯源分析，指出了国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 错误地将欧洲标准 CLC/TR 50427:2004 中规定的接收点火功率 8 W 直接修改为发射阈功率 6 W，提出了无线电波防爆安全发射功率阈值应大于 16 W。其他文献均没有指出国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 的相关错误。

2）天线不但不能产生能量，不能提升功率，还消耗了能量，降低了功率；无线电波防爆安全发射功率与天线增益无关。国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 规定无线电发射器的阈功率为无线电发射器的有效输出功率与天线增益的乘积，是错误的。国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 没有正确理解天线增益的含义，错误地认为，天线增益就是功率放大。

3）煤矿井下无线电波防爆安全发射功率阈值应大于 16 W，且与天线增益无关。国家标准 GB/T 3836.1—2021 和国际标准 IEC 60079-0:2017 规定阈功率（无线电发射器的有效输出功率与天线增益的乘积）不得大于 6 W，且与天线增益相关，是完全错误的。

4）无线电波发射功率小于无线电发射器输出功率。因此，进行无线电波防爆安全性能检测时，仅检测无线电发射器输出功率。这既可保证通过检测的

防爆无线电设备的防爆安全，又简化了检测方法，更提高了防爆无线电设备的无线电波发射功率，解除了对天线增益的限制，将大大提高煤矿井下防爆无线电设备的无线传输距离。

参考文献（References）：

[1] 孙继平. 煤矿用 5G 通信系统标准研究制定[J]. 工矿自动化，2023，49(8)：1-8.
SUN Jiping. Research and development of 5G communication system standards for coal mines[J]. Journal of Mine Automation，2023，49(8)：1-8.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 孙继平，陈晖升. 智慧矿山与 5G 和 WiFi6[J]. 工矿自动化，2019，45(10)：1-4.
SUN Jiping，CHEN Huisheng. Smart mine with 5G and WiFi6[J]. Industry and Mine Automation，2019，45(10)：1-4.

[5] 孙继平. 煤矿机器人电气安全技术研究[J]. 煤炭科学技术，2019，47(4)：1-6.
SUN Jiping. Research on electrical safety technology of coal mine robot[J]. Coal Science and Technology，2019，47(4)：1-6.

[6] 丁序海，潘涛，彭铭，等. 煤矿井下无线电波对人体的影响[J]. 工矿自动化，2022，48(11)：84-92，144.
DING Xuhai，PAN Tao，PENG Ming，et al. Influence of underground radio wave on human body in coal mine[J]. Journal of Mine Automation，2022，48(11)：84-92，144.

[7] GB/T 3836.1—2021 爆炸性环境 第 1 部分：设备 通用要求[S].
GB/T 3836.1-2021 Explosive atmospheres-Part 1：Equipment-General requirements[S].

[8] 邵水才，郭旭东，彭铭，等. 煤矿井下无线传输分析方法[J]. 工矿自动化，2022，48(10)：123-128.
SHAO Shuicai，GUO Xudong，PENG Ming，et al. Coal mine underground wireless transmission analysis method[J]. Journal of Mine Automation，2022，48(10)：123-128.

[9] 张高敏，刘毅，彭铭. FDTD 矿井无线传输特性分析方法研究[J]. 煤炭科学技术，2022，50(11)：202-212.
ZHANG Gaomin，LIU Yi，PENG Ming. Resarch on the FDTD analysis method of wireless transmission characteristics in underground mine[J]. Coal Science and Technology，2022，50(11)：202-212.

[10] 张高敏，刘毅，彭铭. UWR−FDTD 矿井电磁波数值分析方法[J]. 煤炭学报，2022，47(11)：4157-4166.
ZHANG Gaomin，LIU Yi，PENG Ming. Numerical analysis method of the electromagnetic fields in coal mine roadway using UWR-FDTD[J]. Journal of China Coal Society，2022，47(11)：4157-4166.

[11] 梁伟锋，孙继平，彭铭，等. 煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值研究[J]. 工矿自动化，2022，48(12)：123-128，163.
LIANG Weifeng，SUN Jiping，PENG Ming，et al. Research on safe power threshold of radio wave explosion-proof in coal mine[J]. Journal of Mine Automation，2022，48(12)：123-128，163.

[12] 潘涛，彭铭，徐会军，等. 煤矿井下无线电波防爆安全阈值及测试方法[J]. 智能矿山，2023，4(1)：78-82.
PAN Tao，PENG Ming，XU Huijun，et al. Safety thresholds and test methods for radio wave explosion protection in underground coal mines[J]. Journal of Intelligent Mine，2023，4(1)：78-82.

[13] IEC 60079-0：2017 Explosive atmospheres-Part 0：Equipment-General requirements[S].

[14] CLC/TR 50427：2004 Assessment of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation-Guide[S].

[15] 孙继平，彭铭，潘涛，等. 无线电波防爆安全阈值研究[J]. 工矿自动化，2023，49(2)：1-5.
SUN Jiping，PENG Ming，PAN Tao，et al. Research on the safety threshold of radio wave explosion-proof[J]. Journal of Mine Automation，2023，49(2)：1-5.

[16] 孙继平，彭铭. 矿井无线电波防爆安全发射功率研究[J]. 工矿自动化，2024，50(3)：1-5.
SUN Jiping，PENG Ming. Research on the safe transmission power of mine radio wave explosion prevention[J]. Journal of Mine Automation，2024，50(3)：1-5.

[17] 张勇. 煤矿井下无线射频近场谐振耦合防爆电磁能仿真分析[J]. 煤矿安全，2022，53(8)：134-138.
ZHANG Yong. Simulation analysis of explosion-proof electromagnetic energy coupled with radio frequency near field resonance in underground coal mine[J]. Safety in Coal Mines，2022，53(8)：134-138.

[18] 王国法，庞义辉，任怀伟，等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. 煤炭学报，2024，49(1)：181-202.
WANG Guofa，PANG Yihui，REN Huaiwei，et al. System engineering and key technologies research and practice of smart mine[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(1)：181-202.

(下转第 22 页)