

文章编号: 1671-251X(2022)06-0118-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022030093

井下金属结构近场耦合大环发射天线 电磁波能量安全性分析

范思涵¹, 杨维¹, 刘俊波²

(1. 北京交通大学 电子与信息工程学院, 北京 100044;

2. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015)

摘要: 当井下巷道内分布的金属结构处于大环发射天线近场时, 会耦合大环发射天线的电磁波能量。一旦金属结构存在断点并发生刮擦, 可能会以刮擦放电的形式产生放电火花并点燃瓦斯气体, 对煤矿井下安全造成威胁。针对该问题, 从近场耦合危险系数及安全距离 2 个方面分析了井下金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量的安全性。通过建立金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量等效电路, 推导出近场耦合危险系数表达式和金属结构与大环发射天线之间的安全距离的表达式。分析了大环发射天线半径、金属结构等效接收线圈半径、刮擦放电火花负载、金属结构与大环发射天线之间的距离对近场耦合危险系数和安全距离的影响。仿真结果表明: 近场耦合危险系数随大环发射天线半径的增大先稍增大再稍减小或一直增大; 刮擦放电火花负载在一定条件下可使近场耦合危险系数达到峰值, 当大环发射天线半径大于等于金属结构等效接收线圈半径时, 峰值处的近场耦合危险系数有可能超过近场耦合危险系数临界值 0.46, 可能会造成危险; 当大环发射天线半径小于金属结构等效接收线圈半径时, 峰值处的近场耦合危险系数大部分情况下小于临界值 0.46, 造成危险的可能性较小; 环发射天线半径在一定条件下可使近场耦合危险系数达到峰值, 峰值处的近场耦合危险系数随金属结构等效接收线圈半径的增大先增大后减小, 超过近场耦合危险系数临界值 0.46 的可能性较大, 这种耦合在瓦斯气体环境中很可能造成危险。安全距离随大环发射天线半径的增大而增大, 即刮擦放电火花负载上电磁波能量的安全性随大环发射天线半径的增大而降低; 当大环发射天线半径大于等于金属结构等效接收线圈半径时, 安全距离随金属结构等效接收线圈半径的增大而增大, 即刮擦放电火花负载上电磁波能量的安全性随金属结构等效接收线圈半径的增大而降低; 当大环发射天线半径小于金属结构等效接收线圈半径时, 安全距离随金属结构等效接收线圈半径的增大先缓慢增大再减小, 即刮擦放电火花负载上电磁波能量的安全性随金属结构等效接收线圈半径的增大先降低再升高。

关键词: 矿井无线通信; 大环发射天线; 金属结构; 近场耦合; 电磁波能量; 放电火花; 近场耦合危险系数; 安全距离

中图分类号: TD655

文献标志码: A

Analysis of electromagnetic wave energy safety of underground metal structure
near-field coupled large loop transmitting antenna

FAN Sihan¹, YANG Wei¹, LIU Junbo²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China)

Abstract: When the metal structures distributed in the underground roadway are in the near-field of the large

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-05-31; 责任编辑: 张强。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071032)。

作者简介: 范思涵(1997—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为宽带无线通信, E-mail: 20120039@bjtu.edu.cn。通信作者:
杨维(1964—), 男, 辽宁阜新人, 教授, 博士, 长期从事矿井通信与安全监控方面的研究工作, E-mail: wyang@bjtu.edu.cn。

引用格式: 范思涵, 杨维, 刘俊波. 井下金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量安全性分析[J]. 工矿自动化, 2022, 48(6): 118-127.

FAN Sihan, YANG Wei, LIU Junbo. Analysis of electromagnetic wave energy safety of underground metal structure near-field coupled large loop transmitting antenna[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 118-127.



扫码移动阅读

loop transmitting antenna, they will couple the electromagnetic wave energy of the large loop transmitting antenna. Once the metal structure has a breakpoint and friction occurs, it may produce friction discharge spark and ignite gas. This poses a threat to the safety of coal mine. In order to solve this problem, the safety of electromagnetic wave energy of underground metal structure near-field coupled large loop transmitting antenna is analyzed from two aspects of near-field coupling risk coefficient and safe distance. By establishing the equivalent circuit of electromagnetic wave energy of metal structure near-field coupled large loop transmitting antenna, the expressions of near-field coupling risk coefficient and safe distance between metal structure and large loop transmitting antenna are derived. The influence of the radius of the large loop transmitting antenna, the radius of the equivalent receiving coil of the metal structure, the friction discharge spark load and the distance between the metal structure and the large loop transmitting antenna on the near-field coupling risk coefficient and the safe distance are analyzed. The simulation results show that the near-field coupling risk coefficient increases slightly at first and then decreases slightly or increases all the time with the increase of the radius of the large loop transmitting antenna. Under certain conditions, the friction discharge spark load can make the near-field coupling risk coefficient reach the peak value. When the radius of the large loop transmitting antenna is greater than or equal to the radius of the equivalent receiving coil of the metal structure, the near-field coupling risk coefficient at the peak value may exceed the critical value 0.46 of the near-field coupling risk coefficient. This may cause danger. When the radius of the large loop transmitting antenna is smaller than the radius of equivalent receiving coil of the metal structure, the near-field coupling risk coefficient at the peak value is less than the critical value 0.46 in most cases. This will not cause danger in most cases. Under certain conditions, the radius of the large loop transmitting antenna can make the near-field coupling risk coefficient reach the peak value. The near-field coupling risk coefficient at the peak value first increases and then decreases with the increase of the radius of equivalent receiving coil of the metal structure. It is more likely to exceed the critical value 0.46 of the near-field coupling risk coefficient, which is likely to cause danger in the gas environment. The safe distance increases with the increase of the radius of the large loop transmitting antenna. The safety of the electromagnetic wave energy on the friction discharge spark load decreases with the increase of the radius of the large loop transmitting antenna. When the radius of the large loop transmitting antenna is greater than or equal to the radius of the equivalent receiving coil of the metal structure, the safe distance increases with the increase of the radius of the equivalent receiving coil of the metal structure. The safety of the electromagnetic wave energy on the friction discharge spark load decreases with the increase of the radius of the equivalent receiving coil of the metal structure. When the radius of the large loop transmitting antenna is smaller than the radius of the equivalent receiving coil of the metal structure, the safe distance first increases slowly and then decreases with the increase of the radius of the equivalent receiving coil of the metal structure. The safety of the electromagnetic wave energy on the friction discharge spark load first decreases and then increases with the increase of the radius of the equivalent receiving coil of the metal structure.

Key words: mine wireless communication; large loop transmitting antenna; metal structure; near-field coupling; electromagnetic wave energy; discharge spark; near-field coupling risk coefficient; safe distance

0 引言

随着通信技术的发展进步,无线通信技术在煤矿井下的应用日益广泛,与无线通信技术相关的现代化井下无线通信设备越来越多。众多的井下无线通信设备导致井下电磁环境复杂,加之矿井巷道内金属结构密集,如长导线、雷管引线、绞车钢丝绳、支架、支柱、运煤车和轨道等,金属结构可通过近场磁耦合或远场电磁波辐射的方式耦合发射天线的电

磁波能量,进而对矿井环境产生威胁。井下无线通信设备在使用过程中,有2个因素可能会引起瓦斯爆炸:设备自身的电气安全及设备发出的电磁波能量安全^[1-2]。根据GB 3836.1—2010《爆炸性环境第1部分 设备通用要求》,煤矿瓦斯气体环境中射频天线的发射功率不得超过6 W^[3]。在此要求下,金属结构断点处感应出的电压不足以产生击穿放电火花^[4]。但若金属结构断点的两端发生了刮擦,就会在断点处以刮擦放电的形式产生放电火花^[4-5]。若放电火花

释放的能量大于瓦斯气体的最小点火能,就会点燃瓦斯气体,造成危险。文献[1]对矿井电磁波辐射能量对瓦斯安全性的影响进行了研究,分析了电磁波与金属结构之间的能量耦合特点,提出了金属结构在谐振条件下匹配负载最大功率的计算方法,是研究矿井电磁波辐射能量对瓦斯安全性影响的重要文献。文献[5]对矿井 5G 电磁波辐射能量的安全性进行了研究,探讨了 5G 采用大规模多输入多输出技术存在多个发射天线之间功率叠加,增大了点燃瓦斯气体可能性的问题。文献[6]对井下金属结构等效接收天线的放电火花安全性进行了研究,分析了金属结构等效为接收天线时放电火花点燃瓦斯气体的条件,推导了放电火花作为负载可吸收最大功率的计算表达式。文献[7]针对矿井电磁波能量安全性问题,明确提出了磁耦合共振和电磁波辐射谐振能量耦合 2 种电磁波能量耦合方式,基于磁耦合共振模型分析了磁耦合共振方式的最大能量传输效率;针对远场辐射,结合低衰减度传输线模型,从电大型和电小型 2 个方面研究了井下金属结构作为电磁波接收天线可以向负载输送的最大功率。目前,在对电磁波能量的安全性研究中,对电磁波辐射能量的研究较多,而对发射天线近场电磁波能量的研究较少。

大环发射天线是井下无线通信基站设备重要的天线形式,其辐射电阻较大,使得无线通信设备采用大环发射天线时发射效率较高。但大环发射天线尺寸相对于其工作波长来说较大,导致大环发射天线的近场范围较大。这样在煤矿井下狭小空间内,在大环发射天线近场范围可能存在金属结构,并从大环发射天线耦合电磁波能量,当出现以刮擦形式的放电火花时,可能会对煤矿井下的安全造成威胁。为此,本文对井下金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量的安全性进行了分析。建立了当金属结构处于大环发射天线近场时耦合电磁波能量的等效电路,推导了近场耦合危险系数表达式及金属结构与大环发射天线之间的安全距离表达式。分析了大环发射天线半径、金属结构等效接收线圈半径、刮擦放电火花负载及金属结构与大环发射天线之间的距离对近场耦合危险系数和安全距离的影响。

1 金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量等效电路

假设大环发射天线是孤立的,其等效电路如图 1 所示[8]。图中 U_0 为大环发射天线电源电压, R_{01} 为

大环发射天线欧姆电阻, R_{r1} 为大环发射天线辐射电阻, L_1 为大环发射天线调谐电感, C_1 为大环发射天线电容[9]。

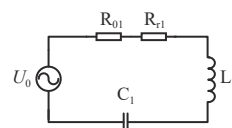


图 1 大环发射天线等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of large loop transmitting antenna

煤矿井下金属结构密集,很多金属结构可以等效为接收线圈[10]。金属结构等效的接收线圈耦合大环发射天线电磁波能量时,会在金属结构的断点处产生感应电压。在一定条件下,如金属结构发生振动时,金属结构的断点处可以刮擦的形式产生放电火花,释放耦合的电磁波能量。金属结构等效接收线圈电路如图 2 所示[11]。刮擦产生的放电火花可以看作纯电阻负载 R_L [7], R_2 为等效接收线圈损耗电阻,包括辐射损耗电阻 R_{r2} 和欧姆损耗电阻 R_{02} , L_2 为等效接收线圈的电感, C_2 为等效接收线圈的寄生电容。

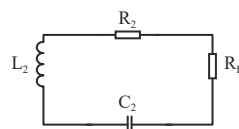


图 2 金属结构等效接收线圈电路

Fig. 2 Metal structure equivalent receiving coil circuit

根据图 1 和图 2 可以建立如图 3 所示的金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量等效电路。图中, R_1 为大环发射天线的辐射电阻与欧姆电阻之和,即 $R_1 = R_{01} + R_{r1}$ 。

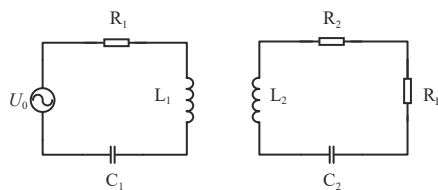


图 3 金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of metal structure near-field coupled electromagnetic wave energy of large loop transmitting antenna

2 近场耦合危险系数及安全距离分析

本文将从近场耦合危险系数及安全距离 2 个方面来分析井下金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量的安全性。

大环发射天线与其他发射天线一样,其周围可划分为 3 个场区:无功近场区、辐射近场区及辐射远场区。无功近场区紧邻天线口径,在该区域内,电场与磁场存在 90° 相位差,没有能量辐射,为天线储能

区, 该区域像谐振器, 但有一些辐射泄漏。辐射近场区内有部分储能, 部分电磁波能量向外辐射。在辐射远场区, 场分量处在辐射方向的横截面内, 所有功率流都是沿径向朝外的^[8, 12-13]。由天线理论可知, 大环发射天线的辐射近场区与辐射远场区的分界半径为^[8]

$$Q = \frac{2N^2}{\lambda} \quad (1)$$

式中: N 为大环发射天线的最大尺度, 即大环发射天线的直径; λ 为大环发射天线的工作波长。

当金属结构与大环发射天线之间的距离 $D < Q$ 时, 即认为金属结构处于大环天线的近场范围内。根据式(1)可看出, 大环发射天线近场与远场的分界半径与大环发射天线的直径和工作波长有关。本文中大环发射天线的工作频率采用 1 200 MHz, 工作波长为 0.25 m。

2.1 近场耦合危险系数分析

对金属结构近场耦合大环发射天线电磁波能量等效电路采用基尔霍夫电压定律(KVL)进行分析, 可得

$$U_0 = Z_1 I_1 - j\omega M I_2 \quad (2)$$

$$0 = Z_2 I_2 - j\omega M I_1 \quad (3)$$

式中: Z_1 , Z_2 分别为大环发射天线等效电路和金属结构等效接收线圈电路的总阻抗; I_1 , I_2 分别为大环发射天线等效电路和金属结构等效接收线圈电路的电流; ω 为角频率; M 为金属结构与大环发射天线之间的互感。

根据式(2)和式(3)可以求得大环发射天线等效电路的电流 I_1 和金属结构等效接收线圈电路的电流 I_2 分别为

$$I_1 = \frac{Z_2 U_0}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{j\omega M U_0}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \quad (5)$$

这样大环发射天线等效电路的发射功率 P_1 及负载 R_L 上的输出功率 P_2 分别为

$$P_1 = \frac{Z_2 U_0^2}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{(\omega M)^2 U_0^2}{[Z_1 Z_2 + (\omega M)^2]^2} R_L \quad (7)$$

根据式(6)和式(7), 近场耦合危险系数为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(\omega M)^2 R_L}{[Z_1 Z_2 + (\omega M)^2] Z_2} \quad (8)$$

当近场耦合危险系数超过一定值时, 刮擦放电火花将有点燃瓦斯气体的危险。

由图3可知, 大环发射天线等效电路的总阻抗 $Z_1 = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)$, 金属结构等效接收线圈电路的总阻抗 $Z_2 = R_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)$ 。假设大环发射天线的周长为 S , 与其工作波长 λ 的比值为 s_λ , 即 $s_\lambda = 2\pi a/\lambda$ (a 为大环发射天线的半径)。当 $s_\lambda \geq 5$ 时, 大环发射天线的辐射电阻 R_{r1} 可近似为^[8]

$$R_{r1} = 60\pi^2 s_\lambda = 592s_\lambda = 3\,720 \frac{a}{\lambda} \quad (9)$$

根据大环发射天线半径 (0.2~0.4 m) 和式(9)可得, R_{r1} 达几千欧姆, 通常远大于 R_{01} , 所以 R_{01} 可忽略不计, 有 $R_1 \approx R_{r1}$ 。此时有 $Z_1 \approx R_{r1} + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)$ 。当大环发射天线谐振, 即 $\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = 0$ 时, Z_1 近似最小, 此时结合式(6)可知, 在不考虑 Z_2 的情况下, 大环发射天线等效电路有近似最大的发射功率, 那么金属结构将耦合到更多的能量, 从而造成更大的危险。

在接下来的分析中, 假设大环发射天线始终工作于谐振状态, 即 $\omega L_1 = \frac{1}{\omega C_1}$, 此时有 $Z_1 \approx R_{r1}$ 。

金属结构等效接收线圈并不是天线, 不会像天线一样有较高的辐射效率, 所以可以不考虑其辐射损耗电阻 R_{r2} , 即可忽略金属结构等效接收线圈的辐射损耗, 仅考虑其欧姆损耗电阻 R_{02} , 则损耗电阻 $R_2 \approx R_{02}$ 。于是可得 $Z_2 = R_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) \approx R_{02} + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)$ 。其中, R_{02} 近似为^[14-15]

$$R_{02} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 n r}{2\sigma b}} \quad (10)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; n 为金属结构等效接收线圈匝数; r 为金属结构等效接收线圈半径; σ 为金属结构等效接收线圈电导率, 假设金属结构等效接收线圈为铜材料, 则 $\sigma = 5.7 \times 10^7$ S/m; b 为金属结构等效接收线圈导线半径。

将 Z_1 和 Z_2 代入式(8), 可得大环发射天线谐振时的近场耦合危险系数为

$$\eta_1 = \frac{(\omega M)^2 R_L}{\left\{ R_{r1} \left[R_{02} + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) \right] + (\omega M)^2 \right\} \left[R_{02} + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) \right]} \quad (11)$$

由式(11)可知,当金属结构等效接收线圈电路谐振,即 $\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} = 0$ 时,近场耦合危险系数 η_1 近似最大,这表示刮擦放电火花负载 R_L 可以从大环发射天线得到近似最大比例的能量,刮擦放电火花的危险性近似达到最大。假设金属结构等效接收线圈电路谐振时,近场耦合危险系数 η_1 最大。此时,金属结构与大环发射天线发生共振,由以上分析可知,共振时金属结构发生刮擦产生的放电火花最危险,瓦斯气体发生爆炸的可能性最大。若金属结构与大环发射天线发生共振时,刮擦放电火花释放的电磁波能量对瓦斯气体是安全的,则在其他非共振情况下对瓦斯气体也是安全的。金属结构与大环发射天线共振时的近场耦合危险系数可表示为

$$\eta_2 = \frac{(\omega M)^2 R_L}{[R_{r1}(R_{02} + R_L) + (\omega M)^2](R_{02} + R_L)} \quad (12)$$

互感 M 在大环发射天线尺寸较大或金属结构尺寸较大 2 种情况下,其取值是不同的。在矿井中,大环发射天线尺寸与金属结构尺寸相等的情况只有极小的可能,大部分情况下二者是不相等的。将互感 M 的取值分 2 种情况进行讨论,即大环发射天线尺寸较大或金属结构尺寸较大。大环发射天线尺寸与金属结构尺寸相等的情况可归入其中任意一种,本文归入第 1 种情况^[16]。

(1) 当大环发射天线半径 a 大于等于金属结构等效接收线圈半径 r 时,有

$$M = \frac{\pi\mu_0 na^2 r^2}{2(a^2 + D^2)^{3/2}} \quad (13)$$

(2) 当大环发射天线半径 a 小于金属结构等效接收线圈半径 r 时,有

$$M = \frac{\pi\mu_0 na^2 r^2}{2(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (14)$$

2.3 大环发射天线半径对近场耦合危险系数 η_2 的影响分析

从式(13)和式(14)可看出,大环发射天线半径 a 不同,则大环发射天线与金属结构之间的互感 M 不同,相应的近场耦合危险系数 η_2 也不同。金属结构等效接收线圈半径 r 分别为 0.10, 0.45 m, 金属结构与大环发射天线之间的距离 D 分别为 0.3, 1.0 m, 刮擦放电火花负载 R_L 为 30 Ω , 则近场耦合危险系数 η_2 与大环发射天线半径 a 的关系如图 5 所示。

由式(9)、式(10)、式(12)一式(14)可看出,近场耦合危险系数 η_2 与刮擦放电火花负载 R_L 、大环发射天线半径 a 、金属结构等效接收线圈半径 r 及金属结构与大环发射天线之间的距离 D 有关。

2.2 负载 R_L 对近场耦合危险系数 η_2 的影响分析

由式(12)可看出,金属结构的近场耦合危险系数 η_2 与刮擦放电火花负载 R_L 有关。大环发射天线工作频率为 1 200 MHz, 金属结构与大环发射天线之间的距离 D 为 2 m, 大环发射天线半径 a 为 0.4 m。金属结构等效接收线圈半径 r 分别为 0.25, 0.55 m, 即分别小于和大于大环发射天线半径, 则近场耦合危险系数 η_2 与刮擦放电火花负载 R_L 的关系如图 4 所示。从图 4 可看出,近场耦合危险系数 η_2 随刮擦放电火花负载 R_L 的增大先增大后减小,即存在刮擦放电火花负载 R_L 可使近场耦合危险系数 η_2 达到峰值。

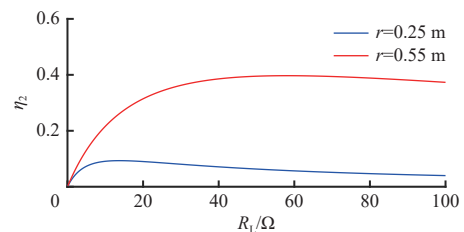


图 4 近场耦合危险系数 η_2 与刮擦放电火花负载 R_L 的关系
Fig. 4 Relationship between the near-field coupling risk coefficient η_2 and friction discharge spark load R_L

对式(12)求关于刮擦放电火花负载 R_L 的导数,可得出刮擦放电火花负载 R_L 使近场耦合危险系数 η_2 达到峰值的条件式:

$$R_L = \left[\frac{R_{r1} R_{02}^2 + (\omega M)^2 R_{02}}{R_{r1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

此时,近场耦合危险系数 η_3 的表达式为

$$\eta_3 = \frac{(\omega M)^2 \left[\frac{R_{r1} R_{02}^2 + (\omega M)^2 R_{02}}{R_{r1}} \right]^{\frac{1}{2}}}{\left\{ R_{r1} \left\{ R_{02} + \left[\frac{R_{r1} R_{02}^2 + (\omega M)^2 R_{02}}{R_{r1}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + (\omega M)^2 \right\} \left\{ R_{02} + \left[\frac{R_{r1} R_{02}^2 + (\omega M)^2 R_{02}}{R_{r1}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}} \quad (16)$$

从图 5(a)可看出,在 $r=0.10$ m, 即 $r < a$ 情况下,当金属结构与大环发射天线之间的距离 D 取不同值时,近场耦合危险系数 η_2 随大环发射天线半径 a 的增大先稍增大再稍减小或一直增大。

将式(13)代入式(12),并对其求关于大环发射天线半径 a 的导数,可得出大环发射天线半径 a 使近场耦合危险系数 η_2 达到峰值的条件式:

$$a = D \quad (17)$$

此时,近场耦合危险系数 η_4 的表达式为

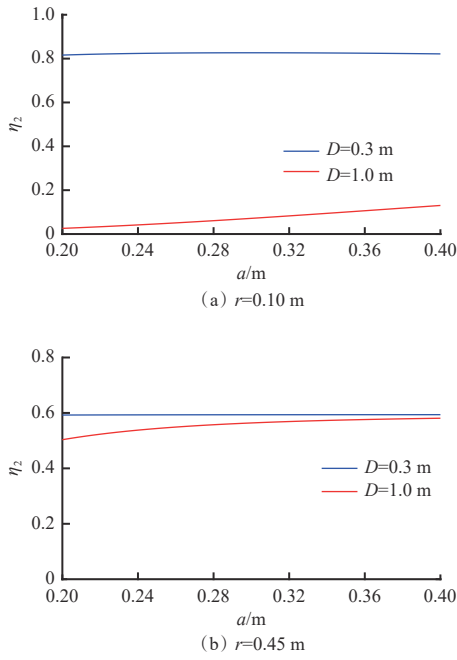


图5 近场耦合危险系数 η_2 与大环发射天线半径 a 的关系

Fig. 5 Relationship between near-field coupling risk coefficient η_2 and radius a of the large loop transmitting antenna

$$\eta_4 = \frac{(\pi\omega\mu_0nr^2)^2R_L}{2^5(R_{02} + R_L) \left[\frac{3720}{\lambda}(R_{02} + R_L)D^3 + \frac{(\pi\omega\mu_0nr^2)^2}{2^5} \right]} \quad (18)$$

从图5(b)可看出, $r=0.45$ m, 即 $r > a$ 情况下, 近场耦合危险系数 η_2 随大环发射天线半径 a 的增大而增大, 但当金属结构与大环发射天线之间的距离 D 较小时, 近场耦合危险系数 η_2 随大环发射天线半径 a 增大不明显。

2.4 安全距离分析

放电火花是否能点燃瓦斯气体, 要看放电火花在点火起始时间内释放的能量是否大于瓦斯气体的最小点火能^[6-7], 即是否大于能够引起瓦斯气体燃烧所需的最小能量。瓦斯气体的体积分数不同, 对应的最小点火能和点火起始时间也不同。最容易点燃的瓦斯体积分数为8.4%, 其点火起始时间为100 μ s, 最小点火能为0.28 mJ^[7]。若刮擦放电火花在100 μ s内释放的能量大于0.28 mJ, 则此刮擦放电火花是不安全的, 可能会点燃瓦斯气体, 发生瓦斯爆炸事故的风险大大增加。若刮擦放电火花释放能量的平均功率不超过2.8 W, 则刮擦放电火花在100 μ s内所释放的能量一定不会超过0.28 mJ。在矿井瓦斯气体环境下, 发射功率最高不能超过6 W。只要金属结构的近场耦合危险系数不超过0.46, 刮擦放电火花释放能量的功率就一定不会超过2.8 W, 在100 μ s的点火起始时间内所释放的能量就一定不超过0.28 mJ, 不会点燃瓦斯气体。

刮擦放电火花负载 R_L 为30 Ω , 大环发射天线半径 a 为0.4 m, 金属结构等效接收线圈半径 r 分别为0.25, 0.75 m, 即分别小于和大于大环发射天线半径, 则近场耦合危险系数 η_2 和金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的关系如图6所示。从图6可看出, 随着金属结构与大环发射天线之间的距离 D 不断增大, 近场耦合危险系数 η_2 不断减小。用安全距离 D_{\min} 表示金属结构刮擦产生的放电火花所释放的能量不足以点燃瓦斯气体时的最小距离。若金属结构与大环发射天线之间的距离 D 小于安全距离 D_{\min} , 则刮擦放电火花有点燃瓦斯气体的危险, 反之是安全的。

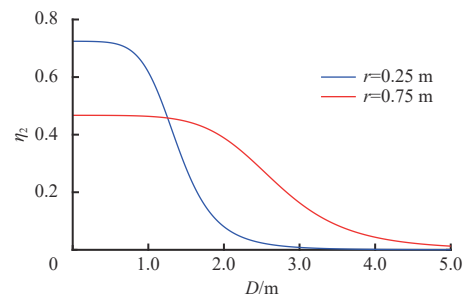


图6 近场耦合危险系数 η_2 和金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的关系

Fig. 6 Relationship between near-field coupling risk coefficient η_2 and distance D between metal structure and large loop transmitting antenna

当大环发射天线半径 a 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系不同时, 由式(12)一式(14)可推导出安全距离 D_{\min} 的表达式, 分别为

$$D_{\min} = \left\{ \left\{ \left[\frac{\pi\omega\mu_0na^2r^2}{2(R_{02} + R_L)} \right]^2 \frac{R_L - \eta_2(R_{02} + R_L)}{\eta_2R_{r1}} \right\}^{\frac{1}{3}} - a^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad a \geq r \quad (19)$$

$$D_{\min} = \left\{ \left\{ \left[\frac{\pi\omega\mu_0na^2r^2}{2(R_{02} + R_L)} \right]^2 \frac{R_L - \eta_2(R_{02} + R_L)}{\eta_2R_{r1}} \right\}^{\frac{1}{3}} - r^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad a < r \quad (20)$$

由式(19)和式(20)可看出, 安全距离 D_{\min} 与大环发射天线半径 a 及金属结构等效接收线圈半径 r 有关。

3 仿真分析

为进一步观察刮擦放电火花负载 R_L 上电磁波能量的安全性, 对近场耦合危险系数与安全距离做进一步的仿真分析。仿真中大环发射天线工作频率设为1 200 MHz。

3.1 近场耦合危险系数 η_2 仿真分析

大环发射天线半径 a 为0.4 m, 刮擦放电火花负载 R_L 为30 Ω , 金属结构与大环发射天线之间的距离

D 为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 m。当金属结构与大环发射天线之间的距离 D 不同时, 大环发射天线半径 a 大于等于或小于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 近场耦合危险系数 η_2 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系如图 7 所示。

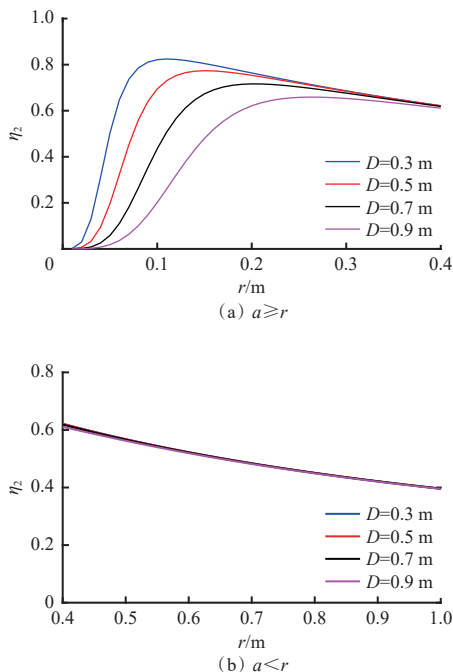


图 7 近场耦合危险系数 η_2 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系

Fig. 7 Relationship between near-field coupling risk coefficient η_2 and equivalent receiving coil radius r of the metal structure

从图 7(a) 可看出, 在金属结构与大环发射天线之间的距离 D 一定时, 近场耦合危险系数 η_2 随金属结构等效接收线圈半径 r 的增大先增大后减小。从图 7(b) 可看出, 近场耦合危险系数 η_2 随金属结构等效接收线圈半径 r 增大而减小, 即此时金属结构等效接收线圈半径 r 进一步增大并不能使刮擦放电火花负载 R_L 从大环发射天线得到更大比例的能量。

3.2 近场耦合危险系数 η_3 仿真分析

大环发射天线半径 a 为 0.40 m, 金属结构等效接收线圈半径 r 分别为 0.25, 0.75 m, 使近场耦合危险系数 η_2 达到峰值的刮擦放电火花负载 R_L 为 0.1~100 Ω 时, 对应的金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的取值范围为 2.2~5.0 m。大环发射天线半径 a 大于或小于金属结构等效接收线圈半径 r 情况下, 近场耦合危险系数 η_3 和金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的关系如图 8 所示。从图 8 可看出, 近场耦合危险系数 η_3 随金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的增大不断减小, 即随着金属结构与大环发射天线之间的距离 D 增大, 刮擦放电火花负载 R_L 上电磁波能量的危险性不断降低, 安全性不

断升高。

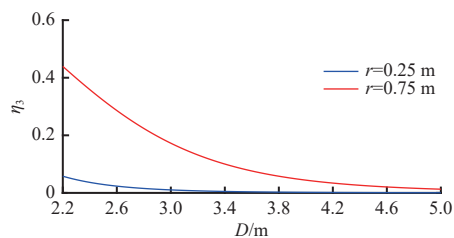


图 8 近场耦合危险系数 η_3 和金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的关系

Fig. 8 Relationship between near-field coupling risk coefficient η_3 and distance D between metal structure and large loop transmitting antenna

金属结构等效接收线圈半径 r 分别为 0.10, 0.45 m, 使近场耦合危险系数 η_2 达到峰值的刮擦放电火花负载 R_L 为 0.1~100 Ω 时, 在大环发射天线半径 a 大于和小于金属结构等效接收线圈半径 r 情况下, 对应的金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的取值范围分别为 0.25~5.00 m 和 1.4~5.00 m。大环发射天线半径 a 大于或小于金属结构等效接收线圈半径 r 情况下, 近场耦合危险系数 η_3 与大环发射天线半径 a 的关系如图 9 所示。

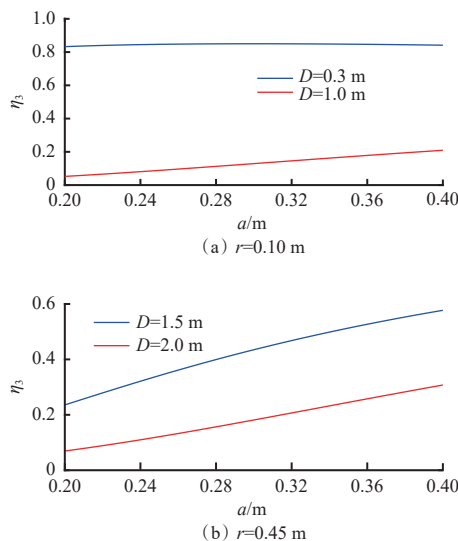


图 9 近场耦合危险系数 η_3 与大环发射天线半径 a 的关系

Fig. 9 Relationship between near-field coupling risk coefficient η_3 and radius a of the large loop transmitting antenna

从图 9(a) 可看出, 当大环发射天线半径 a 大于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 近场耦合危险系数 η_3 虽然受大环发射天线半径 a 的影响, 但受金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的影响更大, 即当金属结构与大环发射天线之间的距离 D 较小时近场耦合危险系数 η_3 可能超过近场耦合危险系数临界值 0.46, 这种耦合就可能造成危险。从图 9(b) 可看出, 当大环发射天线半径 a 小于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 近场耦合危险系数 η_3 虽然随大环发射天线

半径 a 的增大而增大,但在金属结构与大环发射天线之间的距离 D 取值范围内,近场耦合危险系数 η_3 在大部分情况下小于临界值 0.46,这种耦合大部分情况下不会造成危险。

大环发射天线半径 a 为 0.40 m,使近场耦合危险系数 η_2 达到峰值的刮擦放电火花负载 R_L 为 0.1~100 Ω 时,在大环发射天线半径 a 大于等于和小于金属结构等效接收线圈半径 r 情况下,对应的金属结构与大环发射天线之间的距离 D 的取值范围分别为 1.25~5.00 m 和 2.7~5.00 m。大环发射天线半径 a 大于等于或小于金属结构等效接收线圈半径 r 情况下,近场耦合危险系数 η_3 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系如图 10 所示。

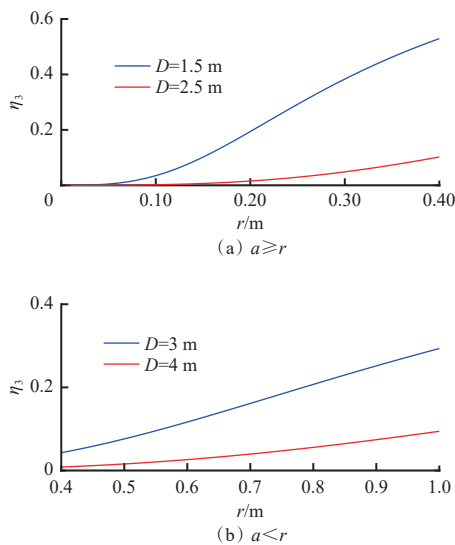


图 10 近场耦合危险系数 η_3 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系

Fig. 10 Relationship between near-field coupling risk coefficient η_3 and equivalent receiving coil radius r of the metal structure

从图 10(a)可看出,当大环发射天线半径 a 大于等于金属结构等效接收线圈半径 r 时,近场耦合危险系数 η_3 随着金属结构等效接收线圈半径 r 的增大而增大,并可能超过近场耦合危险系数临界值 0.46。从图 10(b)可看出,当大环发射天线半径 a 小于金属结构等效接收线圈半径 r 时,近场耦合危险系数 η_3 随着金属结构等效接收线圈半径 r 的增大而增大,但近场耦合危险系数 η_3 超过近场耦合危险系数临界值的可能性很小。

3.3 近场耦合危险系数 η_4 仿真分析

当大环发射天线半径 a 大于等于金属结构等效接收线圈半径 r 时,大环发射天线半径 a 使近场耦合危险系数 η_2 达到峰值 η_4 的条件式是 $a = D$ 。金属结构与大环发射天线之间的距离 D 为 0.4 m,刮擦放电火花负载 R_L 为 30 Ω 时,近场耦合危险系数 η_4 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系如图 11 所示。

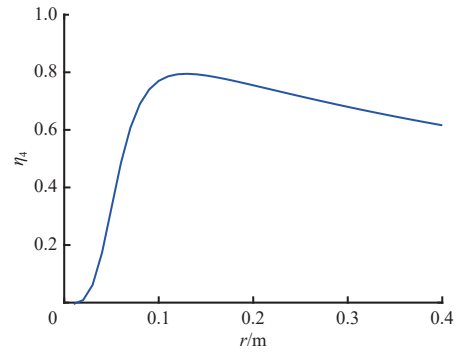


图 11 近场耦合危险系数 η_4 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系

Fig. 11 Relationship between near-field coupling risk coefficient η_4 and equivalent receiving coil radius r of the metal structure

从图 11 可看出,近场耦合危险系数 η_4 随金属结构等效接收线圈半径 r 的增大先增大后减小。此时,近场耦合危险系数 η_4 超过近场耦合危险系数临界值 0.46 的可能性较大,即这种耦合在瓦斯气体环境中很可能造成危险。

3.4 安全距离仿真分析

为确保刮擦放电火花不会点燃瓦斯气体,保证电磁波能量的安全性,仿真了安全距离 D_{\min} 与大环发射天线半径 a 及与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系。刮擦放电火花负载 R_L 为 30 Ω ,近场耦合危险系数 η_2 为 0.4,金属结构等效接收线圈半径 r 为 0.15, 0.45 m,即分别小于和大于大环发射天线半径,则安全距离 D_{\min} 与大环发射天线半径 a 的关系如图 12 所示。从图 12 可看出,安全距离 D_{\min} 随大环发射天线半径 a 增大而增大,表明随着大环发射天线半径 a 增大,刮擦放电火花负载 R_L 上电磁波能量的安全性降低,危险性升高。

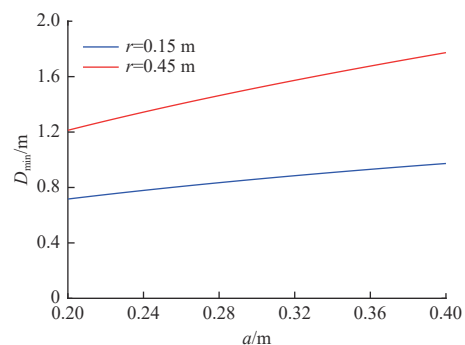


图 12 安全距离 D_{\min} 与大环发射天线半径 a 的关系

Fig. 12 Relationship between safe distance D_{\min} and radius a of the large loop transmitting antenna

刮擦放电火花负载 R_L 为 30 Ω ,近场耦合危险系数 η_2 为 0.4,大环发射天线半径 a 为 0.4 m。当大环发射天线半径 a 大于等于或小于金属结构等效接收线圈半径 r 时,安全距离 D_{\min} 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系如图 13 所示。

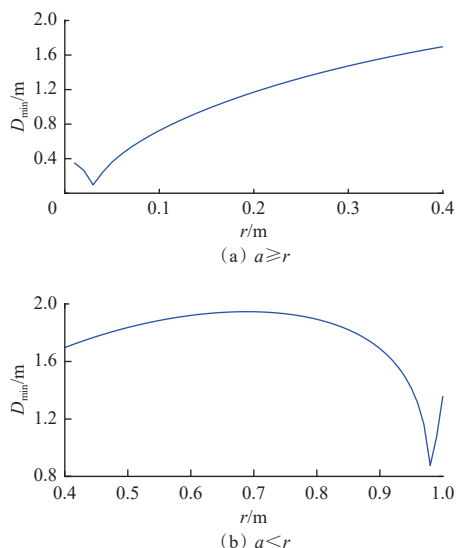


图 13 安全距离 D_{\min} 与金属结构等效接收线圈半径 r 的关系
 Fig. 13 Relationship between safe distance D_{\min} and equivalent receiving coil radius r of the metal structure

从图 13(a) 可看出, 当大环发射天线半径 a 大于等于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 安全距离 D_{\min} 随金属结构等效接收线圈半径 r 的增大而增大, 表明随着金属结构等效接收线圈半径 r 增大, 刮擦放电火花负载 R_L 上电磁波能量的安全性降低。从图 13(b) 可看出, 当大环发射天线半径 a 小于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 安全距离 D_{\min} 随金属结构等效接收线圈半径 r 的增大先缓慢增大再减小, 表明随着金属结构等效接收线圈半径 r 增大, 刮擦放电火花负载 R_L 上电磁波能量的安全性先降低再升高。

4 结论

(1) 当大环发射天线半径 a 大于等于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 近场耦合危险系数 η_2 随大环发射天线半径 a 的增大先稍增大后再稍减小或一直增大; 当大环发射天线半径 a 小于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 近场耦合危险系数 η_2 随大环发射天线半径 a 增大而增大, 但当金属结构与大环发射天线之间的距离 D 较小时, 近场耦合危险系数 η_2 随大环发射天线半径 a 增大不明显。

(2) 当大环发射天线半径 a 大于等于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 近场耦合危险系数 η_2 随金属结构等效接收线圈半径 r 的增大先增大后减小; 当大环发射天线半径 a 小于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 金属结构等效接收线圈半径 r 进一步增加并不能使刮擦放电火花负载 R_L 从大环发射天线得到更大比例的能量。

(3) 当大环发射天线半径 a 大于等于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 近场耦合危险系数 η_3 有可能

超过近场耦合危险系数临界值 0.46, 可能会造成危险; 当大环发射天线半径 a 小于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 近场耦合危险系数 η_3 大部分情况下小于临界值 0.46, 造成危险的可能性较小。

(4) 近场耦合危险系数 η_4 随金属结构等效接收线圈半径 r 的增大先增大后减小, 超过近场耦合危险系数临界值 0.46 的可能性较大, 这种耦合在瓦斯气体环境中很可能造成危险。

(5) 金属结构与大环发射天线之间的安全距离 D_{\min} 随大环发射天线半径 a 的增大而增大, 即随着大环发射天线半径 a 增大, 刮擦放电火花负载 R_L 上电磁波能量的安全性降低, 危险性升高。当大环发射天线半径 a 大于等于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 安全距离 D_{\min} 随金属结构等效接收线圈半径 r 增大而增大, 即随着金属结构等效接收线圈半径 r 增大, 刮擦放电火花负载 R_L 上电磁波能量的安全性降低。当大环发射天线半径 a 小于金属结构等效接收线圈半径 r 时, 安全距离 D_{\min} 随金属结构等效接收线圈半径 r 的增大先缓慢增大再减小, 即随着金属结构等效接收线圈半径 r 增大, 刮擦放电火花负载 R_L 上电磁波能量的安全性先降低再升高。

参考文献 (References):

- [1] 彭霞. 矿井电磁波辐射能量对瓦斯安全性的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 542-547.
 PENG Xia. Electromagnetic wave radiation energy influences on safety of gas in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 542-547.
- [2] 柳玉磊. 电磁波功率与煤矿瓦斯爆炸的关系探讨[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2008.
 LIU Yulei. Discussion on the relationship between electromagnetic waves power and coal mine gas explosion[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2008.
- [3] GB 3836.1—2010 爆炸性环境 第1部分: 设备 通用要求[S].
 GB 3836.1-2010 Explosive atmospheres part 1: equipment general requirements[S].
- [4] EXCELL P S. Choosing threshold levels for electromagnetic hazards[J]. IEEE Technology and Society Magazine, 2002, 21(4): 32-39.
- [5] 刘晓阳, 马新彦, 刘坤, 等. 矿井5G电磁波辐射能量安全性研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(7): 85-91.
 LIU Xiaoyang, MA Xinyan, LIU Kun, et al. Research on the safety of 5G electromagnetic wave radiation energy in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 85-91.
- [6] 刘晓阳, 马新彦, 田子建, 等. 井下金属结构等效接收

- 天线的放电火花安全性研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(9): 126-130.
- LIU Xiaoyang, MA Xinyan, TIAN Zijian, et al. Research on discharge spark safety of equivalent receiving antenna of underground metal structure[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(9): 126-130.
- [7] 孙继平, 贾倪. 矿井电磁波能量安全性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(6): 1002-1008.
- SUN Jiping, JIA Ni. Safety study of electromagnetic wave energy in coal mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(6): 1002-1008.
- [8] KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antennas: for all application[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [9] 朱诚. 基于无线胶囊内窥镜系统的环形天线的设计与研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- ZHU Cheng. Design of loop antenna for wireless capsule endoscope system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [10] 冯柳. 煤矿井下磁耦合谐振式无线电能传输的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
- FENG Liu. Research on magnetically coupled resonance wireless power transmission in coal mine[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2020.
- [11] 傅文珍, 张波, 丘东元, 等. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(18): 21-26.
- FU Wenzhen, ZHANG Bo, QIU Dongyuan, et al. Maximum efficiency analysis and design of self-resonance coupling coils for wireless power transmission system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(18): 21-26.
- [12] 吴亚飞. 毫米波天线阵近场电磁波的汇聚与调控研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- WU Yafei. Research on near-field electromagnetic focusing and steering of millimeter-wave antenna array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [13] 冯林, 杨显清, 王园, 等. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- FENG Lin, YANG Xianqing, WANG Yuan, et al. Electromagnetic fields and electromagnetic waves[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [14] 田子建, 曹阳阳, 樊京, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统功率优化[J]. 工矿自动化, 2016, 42(6): 33-37.
- TIAN Zijian, CAO Yangyang, FAN Jing, et al. Transmission power optimization of magnetic resonance coupling wireless power transmission system[J]. *Industry and Mine Automation*, 2016, 42(6): 33-37.
- [15] 邓亚峰. 无线供电技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- DENG Yafeng. Wireless power technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [16] 陈绥毓. 嵌入式系统磁谐振无线电能传输装置优化设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- CHEN Suiyu. Optimal design of magnetically coupled resonant wireless power transfer system for embedded systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- (上接第94页)
- [15] ZHAO Weiguo, WANG Liying, ZHANG Zhenxing. Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 163: 283-304.
- [16] KAUR S, AWASTHI L K, SANGAL A L, et al. Tunicate swarm algorithm: a new bio-inspired based metaheuristic paradigm for global optimization[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 90: 103541.
- [17] LI Lingling, LIU Zhifeng, TSENG M L, et al. Improved tunicate swarm algorithm: solving the dynamic economic emission dispatch problems[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 108: 107504.
- [18] SHARMA A, DASGOTRA A, TIWARI S K, et al. Parameter extraction of photovoltaic module using tunicate swarm algorithm[J]. *Electronics*, 2021, 10(8): 878.
- [19] FETOUH T, ELSAYED A M. Optimal control and operation of fully automated distribution networks using improved tunicate swarm intelligent algorithm[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 129689-129708.
- [20] YADAV K, ALSHUDUKHI J S, DHIMAN G, et al. iTSA: an improved tunicate swarm algorithm for defensive resource assignment problem[J]. *Soft Computing*, 2022, 26(10): 4929-4937.
- [21] 刘威, 郭直清, 姜丰, 等. 协同围攻策略改进的灰狼算法及其PID参数优化[J/OL]. *计算机科学与探索*: 1-16 [2022-04-09]. <http://202.199.233.17:8000/rwt/CNKI/http/NNYHGLUDN3WXTLUPMW4A/kcms/detail/11.5602.tp.20210714.1741.002.html>.
- LIU Wei, GUO Zhiqing, JIANG Feng, et al. Improved grey wolf optimizer based on cooperative attack strategy and its PID parameter optimization[J/OL]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*: 1-16 [2022-04-09]. <http://202.199.233.17:8000/rwt/CNKI/http/NNYHGLUDN3WXTLUPMW4A/kcms/detail/11.5602.tp.20210714.1741.002.html>.
- [22] KHISHE M, MOSAVI M R. Chimp optimization algorithm[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 149: 113338.