

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210627

基于多目标粒子群算法的变电站5G天线布点*

张 灿¹ 刘兴发² 齐道坤³ 唐 波^{1,4}

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 中国电力科学研究院有限公司 武汉 430074;
3. 国网河南省电力公司经济技术研究院 郑州 450052; 4. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心 宜昌 443002)

摘要: 为了减轻5G基站天线引入变电站后对站内敏感设备带来的电磁干扰,并对站内各监测设备处的5G信号进行优化,提出了一种基于多目标粒子群算法的变电站5G基站天线布点方法,即以变电站敏感设备处的射频场强不能超过规定的电磁兼容抗扰度限值为约束条件,以站内监测设备接受信号的Pareto最优解作为目标函数,采用多目标粒子群算法在变电站相关布点区域内找出最合适的基站天线布点。以500 kV官渡变电站为例,按照其内部实际的空间布局,利用本文算法得到4种天线布点安装方案,都能使得站内所有敏感设备处的射频场强低于10 V/m抗扰度限值,同时还能使得站内各监测设备处的平均信号分别提升3.77、6.37、4.34、4.58 dB,监测设备信号的方差分别减少了15.07%、12.64%、14.62%、14.78%,说明了本文算法即可以在一定程度上提升监测设备处的信号强度,还能使得站内各监测设备处信号的离散程度减小,使得信号在监测设备处覆盖更稳定,能为实际工程中变电站内5G基站天线的布点提供一定的参考。

关键词: 多目标优化;粒子群算法;Pareto最优解;电磁兼容

中图分类号: TM75 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Layout of 5G antennas in substations based on multi-objective particle swarm algorithm

Zhang Can¹ Liu Xingfa² Qi Daokun³ Tang Bo^{1,4}

(1. College of Electronic Engineering & New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
3. State Grid Henan Eco-Nomic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;
4. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to reduce the electromagnetic interference caused by the introduction of the 5G base station antenna into the substation to the sensitive equipment in the station, and to optimize the 5G signal at each monitoring device in the station, a method for 5G base station antenna placement in the substation based on the multi-objective particle swarm algorithm is proposed, namely. The radio frequency field strength at the sensitive equipment of the substation cannot exceed the specified electromagnetic compatibility immunity limit as the constraint condition, and the Pareto optimal solution of the signal received by the monitoring equipment in the station is used as the objective function. Find the most suitable base station antenna layout. Taking the 500 kV Guandu substation as an example, according to its actual internal space layout, four antenna layout installation schemes are obtained by using the algorithm in this paper, which can make the radio frequency field strength at all sensitive equipment in the station lower than the 10 V/m immunity limit, and at the same time. It can also increase the average signal of each monitoring equipment in the station by 3.77, 6.37, 4.34 and 4.58 dB respectively, and the variance of the monitoring equipment signal is reduced by 15.07%, 12.64%, 14.62% and 14.78% respectively. It can improve the signal strength at the monitoring equipment to a certain extent, and can also reduce the dispersion of the signals at the monitoring equipment in the station, so that the signal coverage at the monitoring equipment is more stable, which can be used for the actual project. 5G base station antenna layout in substations provide some reference.

Keywords: multi-objective optimization; particle swarm optimization; Pareto optimal solution; electromagnetic compatibility

0 引言

为提升变电站内监测数据的传输速率,国内已有部分

变电站开始采用5G通信技术^[1]。相比与传统的3G或4G基站天线,5G基站天线采用大规模MIMO(多入多出系统)技术和精确波束赋形等新技术,因此发射功率更大,波

收稿日期:2022-07-09

* 基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5217L021000X)资助

束更为集中、电磁辐射更为强烈^[2]。这对于电磁环境本就复杂的变电站来说,无疑增加了新的高频强电磁场源。在这种情况下,若 5G 基站天线布点不当,则必将给变电站内带来严重的电磁兼容问题。

由于 5G 基站天线引入变电站属于近年来电网公司的创新之举。因此,目前仅有少量文献对变电站内 5G 基站天线的布点有所研究,如文献[3]根据变电站内部的传导耦合和辐射耦合对 5G 基站天线的布点进行了研究,但是没有考虑 5G 基站天线对站内敏感设备电磁兼容的影响。文献[4]则根据国标^[5]规定的变电站内射频辐射抗扰度标准,采用了电磁散射场求解的方法探讨了不同架设情况下 5G 基站天线对变电站内电磁环境的辐射影响。但并未继续对站内 5G 基站天线的布点位置展开深入研究。而实际上变电站内受到 5G 基站天线电磁干扰的一般是分布在变电站各处的敏感设备^[6]。因此,5G 基站天线在布点时,必须严格参考站内敏感设备的空间位置和受到射频电场大小的具体情况。除此之外,为了保证变电站的监测数据时刻以高速率传递给变电站内站控层,变电站内 5G 基站天线的布点还必须确保站内的监测设备都能够尽可能接收到最好的信号。因此,变电站 5G 基站天线布点本质上与其他领域的天线布点问题一样,同属于典型的多目标优化问题。

而现有的文献一般通过构建相应的约束条件和目标函数,采用多目标粒子群(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法、遗传算法(genetic algorithm, GA)等智能算法对此类问题进行研究^[7-12]。如文献[7]利用 GA 对车载雷达天线的布点进行了计算,文献[8]利用改进的 NSGAN-II 算法对地面监测天线的布点进行了研究。而文献[9]在研究舰船上层的天线布点时,利用了 MOPSO 算法进行研究,并取得了较好的布点结果。考虑到该文献中的舰船上层的金属环境和变电站内部金属环境基本类似。因此,本文变电站内的 5G 基站天线优化布点位置也可以依据此方法进行计算。

为此,本文以变电站敏感设备处的射频场强不能超过规定的电磁兼容抗扰度限值为约束条件,以站内监测设备接收信号的 Pareto 最优解为目标,基于 MOPSO 算法对变电站内的 5G 基站天线进行布点,为后续变电站基站天线布点问题的研究提供一定的参考。

1 变电站内 5G 基站天线的电磁干扰机理与布点需求

1.1 5G 基站天线对变电站敏感设备的电磁干扰机理

如图 1 所示,变电站敏感设备一般根据相应的测量、控制、保护、调节功能安装在站内各区域内电气设备金属外壳或附近。由变电站内电磁干扰传播途径可知^[13],5G 基站天线对站内敏感设备的电磁干扰主要体现在两个方面,一方面 5G 基站天线直接对变电站内敏感设备进行电磁辐射,此时 5G 基站天线直接通过敏感设备的开口,孔隙进入

设备内部线路,以辐射耦合的辐射对设备造成电磁干扰;另一方面 5G 基站天线对暴露在变电站空间的敏感设备导线进行辐射,通过场线耦合的方式在导线内产生高频噪声电流,进而以传导耦合的方式流入敏感设备内部线路,并对其造成干扰。



图 1 变电站内的敏感设备

根据我国在 2017 制定的相关标准^[5]可知,位于变电站一、二次侧的敏感设备及电气元件受到的射频辐射抗扰度限值为 10 V/m,并规定相应射频抗扰度频率为 80~6 000 MHz,这涵盖了变电站内部常用的 2 575~2 635 MHz 的 5G 通信频段。因此,5G 基站天线在变电站布点时必须保证站内所有敏感设备受到的辐射场强小于 10 V/m。

1.2 变电站 5G 基站天线的布点需求

根据 1.1 节可知,5G 基站天线在变电站内 5G 基站天线的布点前提是满足变电站内敏感设备射频辐射抗扰度要求。但实际上变电站每个区域内的敏感设备所处的电磁环境并不相同。因此,还需要结合变电站各区域实际所能受到的 5G 信号具体辐射情况,对变电站 5G 基站天线的布点区域进行规划。

根据现有的变电站电磁环境研究结论^[14],变电站的电气设备所处空间可以大致分为如图 2 所示的强电磁环境区域、被保护区域和变电站外 3 个区域。

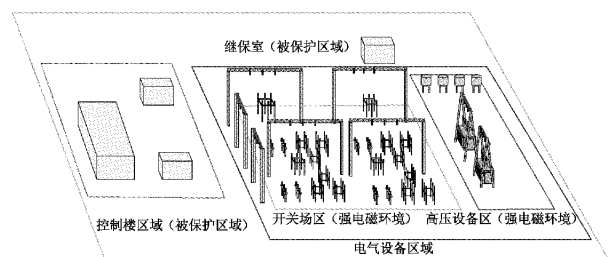


图 2 变电站电磁环境的区域划分

其中,对于 5G 基站天线来说,变电站被保护区域为站内的控制楼及继保室等内部工作区域,该区域的敏感设备通常已采取了特殊的屏蔽措施,再加上墙体的遮挡。因此,该区域可能遭受的 5G 信号作用很弱。而对于变电站电气设备区域,由于该区域直接暴露在基站天线辐射下,而且对于高频射频辐射缺少相应的屏蔽措施,所以处于此处的敏

感设备极易受到 5G 高频电磁波的干扰。因此,5G 基站天线在变电站内布点时,需主要考虑电气设备区域内敏感设备的射频辐射抗扰度问题。

2 变电站 5G 基站天线布点

2.1 5G 基站天线场强数学模型推导

基站天线布点时,变电站电气设备区内敏感设备和监测设备所受的 5G 射频信号或电场分为两部分,一部分来自于 5G 基站天线的直接辐射,另一部分来自于附近金属设备对 5G 基站天线辐射场的散射,如图 3 所示。

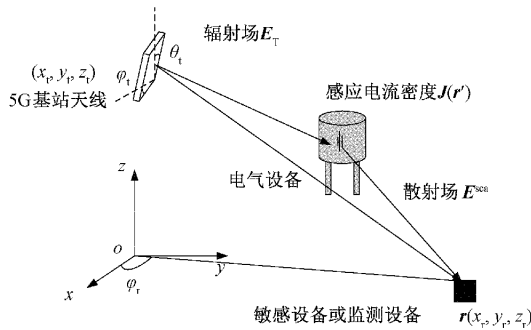


图 3 变电站内敏感设备或监测设备受到的 5G 信号辐射示意图

其中, (x_i, y_i, z_i) 为 5G 基站天线在布点区域内的点位, xoy 为变电站空间内的三维直角坐标系, θ_t, φ_t 分别为 5G 基站天线俯仰角和其反射板与 x 轴的夹角, $r(x_r, y_r, z_r)$ 为变电站内敏感设备或监测设备的位置。由于 5G 基站天线为大型阵列天线。因此,监测设备和敏感设备所受的 5G 基站天线辐射场 $E_T(r)$ 可由下列公式计算^[15]:

$$E_T(r) = C \frac{e^{-jkr}}{R} \sum_{m=0}^{N_x-1} \sum_{n=0}^{N_y-1} I_{mn} e^{jk(md_x \cos\theta + nd_y \sin\theta) \sin(\varphi_t - \varphi_r)} \quad (1)$$

式中: k 为 5G 基站天线辐射的电磁波波数; R 为基站天线到敏感设备或监测设备的距离, 有 $R = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2}$; C 为天线单元因子; I_{mn} 为阵列天线中第 m 行、 n 列个振子的激励电流; d_x, d_y 分别为阵列天线振子之间的行、列间距; N_x, N_y 分别为 5G 基站天线行、列阵子的总数; φ_r 为敏感设备或监测设备和坐标原点的连线与 x 轴的夹角大小。

而对于站内敏感设备和监测设备所受的散射场 $E^{sc}(r)$, 则可采用电场积分方程计算, 即:

$$E^{sc}(r) = j\omega\mu \int_S G(r, r') J(r') dS' - \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \int_S G(r, r') \nabla' \cdot J(r') dS' \quad (2)$$

式中: $J(r')$ 为附近金属设备表面的感应电流, ω 为入射波角频率, μ 为磁导率, ϵ 为介电常数, S 为金属设备表面积分域, $G(r, r')$ 为格林函数, 有:

$$G(r, r') = \frac{e^{-jk|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \quad (3)$$

根据理想导体表面切向电场为 0 的边界条件, 可知, 金属设备表面满足:

$$t \cdot (E^{sc}(r) + E^{inc}(r)) = 0, r \in S \quad (4)$$

式(4)代入式(5)可得到关于 $J(r')$ 的电场积分方程:

$$-t \cdot E^{inc}(r) = t \cdot \left(-j\omega\mu \int_{S'} g(r, r') J(r') dS' + \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \int_S g(r, r') \nabla' \cdot J(r') dS' \right) \quad (5)$$

式中: t 为金属设备表面单位切向矢量, ∇ 为哈密尔顿算子, E^{inc} 为金属设备表面入射场, 即为 5G 基站天线对金属设备的辐射场 E_T 。

考虑到变电站电气设备相对于 5G 基站信号波长属于典型的电大尺寸散射体, 因此, 本文利用大面元物理光学法 (large element-physics optic, LE-PO) 法^[16], 采用大面元物理光学三角基函数 $A_n(r)$ 对散射体表面感应电流进行离散即:

$$J(r) = \sum_{n=1}^N \gamma_n A_n(r) \quad (6)$$

式中: γ_n 为未知系数。

将式(6)代入式(5)后, 根据三角求积方法, 即可求解变电站 r 处监测设备或敏感设备的散射场大小。进而可得到 r 处敏感设备或监测设备受到的总射频电场为:

$$E(r) = E^{sc}(r) + E^{inc}(r) \quad (7)$$

考虑到敏感设备和监测设备在变电站内的位置通常是固定不动的。因此, 根据式(4)可知, 在基站天线布点过程中, 位于已知点 r 处的设备终端和监测设备受到的射频电场 $E(r)$ 实际上是关于基站天线到设备终端距离 $R = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2}$, 天线俯仰角 θ 以及其反射板与 x 轴夹角的函数。也即可从基站天线角度出发, 用函数 $E(x_i, y_i, z_i, \theta_i, \varphi_i)$ 表示天线布点过程中敏感设备的场强。

根据 1.1 节的分析, 若按照国家标准^[5]规定的变电站射频抗扰度 10 V/m, 作为天线布点时变电站内敏感设备处的射频场强限值, 则有约束条件:

$$s. t. E_i(x_i, y_i, z_i, \theta_i, \varphi_i) \leq 10 \quad (8)$$

式中: E_i 为第 i ($i = 1, 2, \dots, I$) 个敏感设备处的电场强度, 单位 V/m。

而对于变电站内每个接收 5G 信号的监测设备来说, 则希望其接收的天线信号都能最好, 也即在满足站内敏感设备的抗扰度的前提下, 监测设备都能接收到各自 5G 基站天线在布点区域布点时遇到的最强信号。因此, 对于站内监测设备来说, 5G 基站天线在布点时, 应该以下列目标函数作为参考:

$$\max P(x_i, y_i, z_i, \theta_i, \varphi_i) = [P_1, P_2, \dots, P_j] \quad (9)$$

式中: P_j 为变电站内第 j ($j = 1, 2, \dots, J$) 个监测设备处的信号强度大小, 单位 dBm, 满足:

$$P_j = E_j + G - AF - 107 - K \quad (10)$$

式中: E_j 为变电站内第 j ($j=1, 2, \dots, J$) 个监测设备处的射频场强大小, 单位为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$; G 为天线增益, 单位为 dBi ; AF 为天线系数, 单位为 dB/m ; K 为带宽因子, 单位为 dB 。

2.2 MOPSO 算法下 5G 基站天线优化布点的选取

由于多目标优化问题中每个目标对应的最优解是互不相同, 也即变电站内每个监测设备接收到各自最优信号对应的基站天线布点是相互冲突的。因此, 只能在 5G 基站天线布点解集中, 找出最好的折中解, 使得站内各监测设备处的 5G 天线信号都尽可能地最强, 从而最大程度满足目标函数式(8)。

为此, 本文引入 Pareto 最优解概念^[17]作为 5G 基站天线布点寻优判断指标, 并令 $\mathbf{A} = (x_1, y_1, z_1, \theta_1, \varphi_1)$, 以最大化目标为例, 对 5G 基站天线布点的 Pareto 解进行定义:

定义 1 Pareto 支配: 假设 \mathbf{A}_1 和 \mathbf{A}_2 为变电站内 5G 基站天线布点过程中的两组可行解, 若 \mathbf{A}_1 和 \mathbf{A}_2 满足以下关系, 则称 \mathbf{A}_1 可支配 \mathbf{A}_2 :

$$\begin{cases} P_i(\mathbf{A}_1) \geq P_i(\mathbf{A}_2), \forall i \in 1, 2, \dots, I \\ P_i(\mathbf{A}_1) > P_i(\mathbf{A}_2), \exists i \in 1, 2, \dots, I \end{cases} \quad (11)$$

定义 2 Pareto 非支配解: 假设 \mathbf{A} 为变电站 5G 基站天线布点过程中的一组可行解, 并且不存在其他解支配 \mathbf{A} 。

定义 3 Pareto 最优解集: 所有 Pareto 非支配解组成的集合。

然后将定义的 Pareto 最优解概念引入到 MOPSO 算法中, 采用优中选优的思想, 利用 Pareto 最优解集引导粒子群向整体最优解集进行移动, 然后根据定义的适应度函数从最优解集中筛选出天线布点的最优解, 具体步骤如下:

步骤 1) 首先初始化粒子群, 设置粒子群中的粒子数目为 Q , 最大迭代次数为 T , 并按照变电站内的 5G 基站天线布点区域, 随机生成 Q 个布点参数 $(x_1, y_1, z_1, \theta_1, \varphi_1)$ 分别作为每个粒子的向量 \mathbf{A}_q ($q=1, 2, \dots, Q$)。

步骤 2) 计算出每个粒子对应的布点参数下敏感设备受到的射频场强和监测设备接收到的信号, 并筛选出满足 $10 \text{ V}/\text{m}$ 射频抗扰度标准的粒子, 然后按照 2.1 的定义, 从筛选出的粒子中再选取 D 个 Pareto 非支配解, 并组成 Pareto 最优解集 \mathbf{Z} 。

步骤 3) 然后对步骤二生成的 Pareto 最优解集 $\mathbf{Z}(t)$ 进行下列监测设备处信号大小适应度计算, 并选取解集中适应度最小的 Pareto 最优解 \mathbf{Z}_d ($d=1, 2, 3, \dots, D$) 作为粒子群的全局最优解:

$$\text{fitness} = \sum_{j=1}^J |P_j(\mathbf{Z}(t)) - P_j^{\max}(t)| \quad (12)$$

式中: t 为迭代次数; P_j^{\max} 为粒子在迭代过程中, 监测设备 j 能接收到的最大信号。

步骤 4) 以最优解 \mathbf{Z}_d 作为全局最优解, 按照下列公式搜索变电站内新一轮 5G 基站天线的布点参数:

$$\mathbf{V}_q(t+1) = \omega \mathbf{V}_q(t) + c_1 r_1(t) [\mathbf{Z}_d(t) - \mathbf{A}_q(t)] + c_2 r_2(t) [\mathbf{B}_q(t) - \mathbf{A}_q(t)] \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_q(t+1) = \mathbf{A}_q(t) + \mathbf{V}_q(t+1) \quad (14)$$

式中: \mathbf{V}_q 为第 q 个粒子第 t 次迭代后的飞行速度; ω 为粒子本身的惯性系数, 通常取 0.8; \mathbf{Z}_d 为定义的 Pareto 最优解集中第 d 个非支配解; \mathbf{B}_q 为粒子 \mathbf{A}_q 认为的自身最优解; c 为粒子的学习系数, 通常取 2; r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

步骤 5) 根据粒子群新迭代出的粒子, 重复步骤 2)~4) 的过程, 直至达到最大迭代次数 T 后, 输出整个迭代过程中适应度最小的 Pareto 最优解 \mathbf{Z}_d , 其对应的向量即为 5G 基站天线布点的参数。

即本文利用 MOPSO 算法进行变电站 5G 基站天线布点选取的流程如图 4 所示。

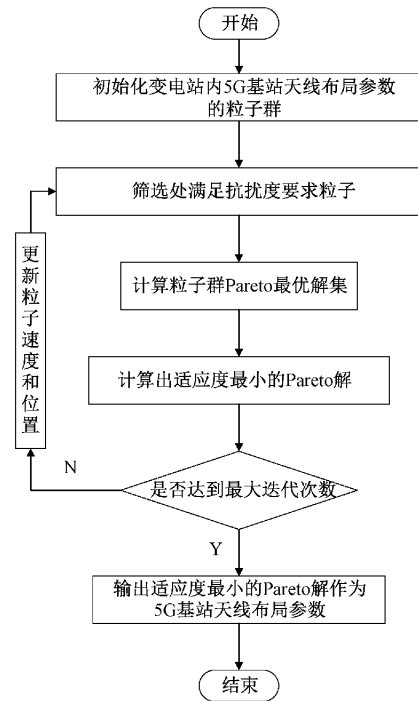


图 4 本文变电站 5G 基站天线布点选取流程

3 本文算法的应用与对比

3.1 实例应用

以河南 500 kV 官渡变电站为例, 整个变电站的内部建筑和电气设备分布, 如图 5 所示。站内一共 10 个监测设备和 25 个敏感设备的分别在图中标出, 并以变电站西南方位的地面为原点, 建立如图所示三维直角坐标系, 原 5G 基站天线位于区域 1 坐标约 $(50, 13, 10)$, 基站天线倾角约 30° , 反射板与 x 轴夹角约 2° , 其最大发射功率为 200 W。

在其最大发射功率下, 站内各敏感设备的场强值和监测设备处的信号大小如图 6、7 所示。

由图 6 可知, 在站内原有布点下, 敏感设备 3、4、5 处的射频场强要大于国标规定的抗扰度要求。因此, 现根据站内具体情况, 采用本文 MOPSO 算法分别在站内区域 1、区域 2、区域 3 和区域 4 重新进行 5G 基站天线布点。其中区

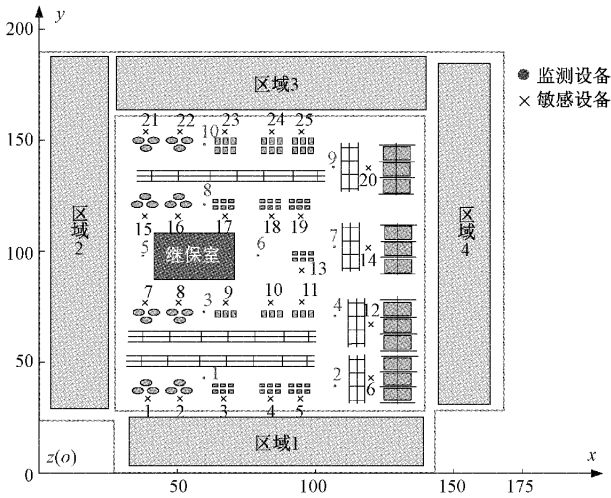


图 5 500 kV 官渡变电站布局示意图

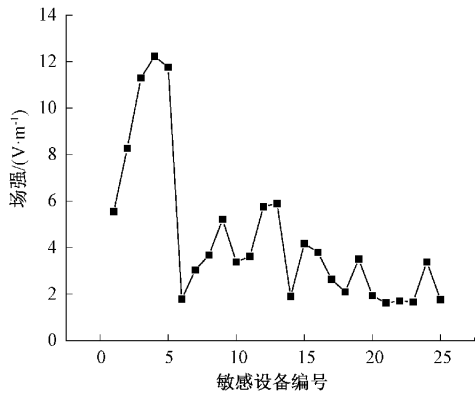


图 6 原布点下各敏感设备处的射频场强

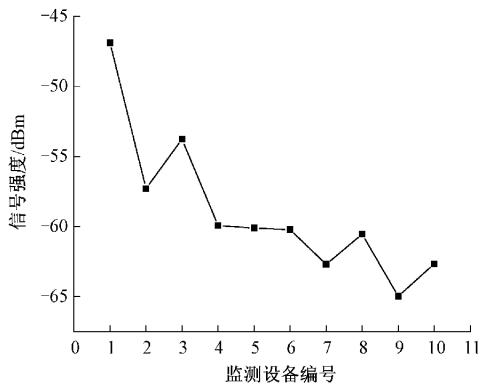


图 7 原有布点下各监测设备处的信号大小

域 1 约处于站内 $x \in [30, 130], y \in [5, 20]$, 区域 2 约处于站内 $x \in [5, 20], y \in [25, 170]$, 区域 3 约处于站内 $x \in [20, 130], y \in [155, 170]$, 区域 4 约处于站内 $x \in [130, 150], y \in [25, 170]$ 。根据站内实际需求, 设置 5G 基站天线布点高度在 8~15 m 之间, 基站天线倾角 θ_i 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间, 反射板与 x 轴夹角 φ_i 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间, 算法迭代次数为 200 次。

计算得 5G 基站天线布点解的整体收敛情况如图 8 所示。

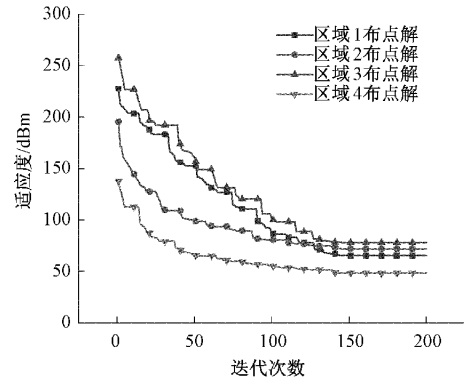


图 8 5G 基站天线布局解相应的适应度收敛情况

可以看出当迭代次数在 150 之前, 基站天线布点解就开始收敛, 因此, 200 次迭代满足布点要求, 并输出此时 4 个区域内的 5G 基站天线布点坐标, 以及俯仰角和反射板与 x 轴夹角, 如表 1 所示。

表 1 4 个区域基站天线的布点方案

布点	x	y	z	θ_i	φ_i
1	63.12	17.13	11.38	20.13	18.21
2	10.58	108.44	12.74	14.49	263.31
3	74.24	160.32	11.77	21.35	224.53
4	141.57	106.79	12.91	15.31	97.50

当 5G 基站天线以 200 W 功率运行时, 4 个布点方案下, 站内各敏感设备的场强值以及监测设备处的信号大小值, 分别如图 9 和表 2 所示。

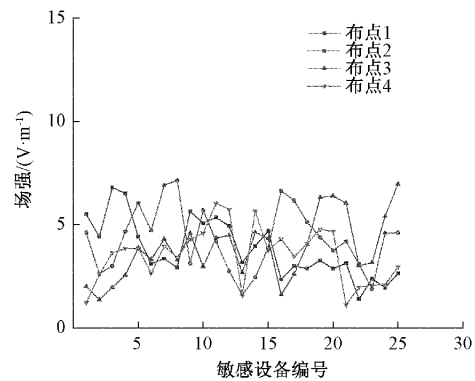


图 9 本文布点下各敏感设备处的射频场强

由图 9 可知, 在这 4 个 5G 基站天线布点方案下, 敏感设备受到的电磁辐射均可以降至规定的 10 V/m 抗扰度限值下。

由表 2 可知, 本文在变电站 4 个区域计算得出的布点方案较站内原有布点下, 监测设备处的平均信号强分别提升了 3.77、6.37、4.34、4.58 dB, 并且 4 种方法下监测设备

表 2 本文布点方案下各监测设备处的信号大小

编号	布点				原有布点
	1	2	3	4	dBm
1	-47.17	-59.92	-58.64	-51.33	-46.87
2	-53.21	-53.22	-56.42	-49.35	-57.29
3	-54.32	-48.37	-56.17	-53.67	-53.77
4	-57.11	-53.85	-55.23	-50.89	-59.93
5	-56.82	-47.61	-58.48	-55.17	-60.11
6	-57.73	-54.25	-55.94	-54.42	-60.22
7	-54.12	-53.79	-52.36	-53.69	-62.69
8	-55.79	-49.92	-53.44	-56.64	-60.55
9	-58.27	-54.45	-50.64	-59.88	-64.98
10	-56.82	-50.01	-48.39	-58.21	-62.66
平均信号大小	-55.14	-52.54	-54.57	-54.33	-58.91
信号方差	9.54	11.97	9.99	9.83	24.61

信号的方差较原有布点下,分别减少了 15.07%,12.64%,14.62%,14.78%。这说明以站内监测设备接受信号的 Pareto 最优解作为目标函数,不光可以在一定程度上提升监测设备处的信号强度,还可以使得站内各监测设备处信号离散程度减小,使得信号在监测设备处覆盖更稳定。

3.2 算法对比

为了验证本文算法的优越性,利用传统 PSO 算法同样对上述案例中变电站内各区域最优的 5G 基站天线布点进行计算,得到 4 个区域中 5G 基站天线的布点结果如表 3 所示。

表 3 传统 PSO 算法下 4 个区域中 5G 基站天线的布点

布点	x	y	z	θ_i	φ_i
1	100.89	10.32	13.83	19.79	23.55
2	7.96	113.17	12.67	23.54	276.52
3	99.76	156.05	13.27	6.88	161.55
4	131.78	88.65	11.25	18.70	93.05

相应的变电站内各敏感设备处的射频场强大小,如图 10 所示。

以及各监测设备处的信号大小如表 4 所示。

可以看出,基于传统 PSO 算法计算出的 5G 基站天线布点,虽然可以使得站内所有敏感设备处的射频场强大小控制在 10 V/m 以下,在一定程度上也可以提高监测设备处的信号大小。但是与本文算法对比,传统 PSO 算法得到的 5G 基站布点下,监测设备处信号离散程度较原有布点并不能得到很明显的优化,这是因为传统 PSO 算法仅能以敏感设备处的射频场强作为优化函数,而不能考虑监测设备信号场强的 Pareto 最优解。因此,无法准确找出适合站

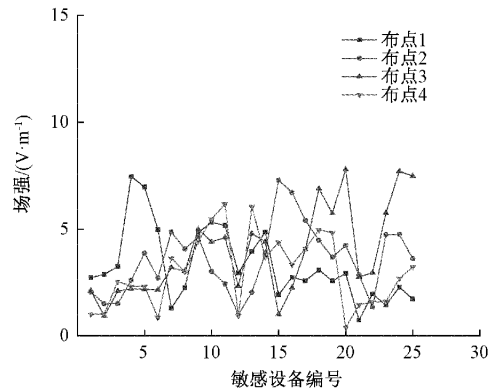


图 10 敏感设备处的射频场强大小

表 4 基于传统 PSO 算法下各监测设备处的信号大小

编号	布点				原有布点
	1	2	3	4	dBm
1	-50.16	-59.19	-59.26	-61.83	-46.87
2	-54.77	-49.11	-61.66	-57.93	-57.29
3	-44.63	-53.08	-61.63	-55.20	-53.77
4	-58.21	-52.52	-58.82	-49.58	-59.93
5	-56.66	-45.14	-58.68	-56.70	-60.11
6	-56.75	-52.66	-56.84	-52.63	-60.22
7	-58.71	-54.92	-56.04	-46.74	-62.69
8	-53.22	-59.07	-51.43	-58.25	-60.55
9	-61.30	-60.65	-46.79	-52.50	-64.98
10	-58.69	-50.65	-54.06	-62.04	-62.66
平均信号大小	-55.31	-53.70	-56.52	-55.34	-58.91
信号方差	21.64	21.52	19.69	22.66	24.61

内所有监测设备通信的 5G 基站天线布点折中解。

所以,综上所述,采用本文布点方法能够在确保站内敏感设备射频电场抗扰度安全前提下,在一定程度上提升站内监测设备处的信号质量。并且较站内原有布点和传统 PSO 算法相比还能有效减少站内监测设备处信号离散程度。

4 结 论

本文利用 MOPSO 算法对河南 500 kV 官渡变电站进行 5G 基站天线布点,结果证明该方法能够满足站内敏感设备的射频抗扰度要求,和保证监测设备处的信号稳定。因此,可以为站内工程人员提供一定的 5G 基站天线布点参考。

实际工程中,还需要施工人员结合变电站内部设备、建筑等的布局情况,合适选择 5G 基站天线布点区域,以便能够利用算法得到更好的布局解。

参考文献

- [1] 谢石木林. 基于 5G 的变电站电气设备智能巡检技术研究与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12): 109-116.
- [2] 是德科技与中国信息通信研究院(CAICT)携手, 加速 IMT-2020(5G)推进组组织的 5G 基站性能测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 200.
- [3] WANG Z, HU Y, MENG S, et al. Research on location selection method of 5G base station in substation considering radiation disturbance and conduction disturbance [C]. 2022 International Conference on Computer Communication and Informatics(ICCCI), 2022: 1-8.
- [4] 李枫航, 唐波, 齐道坤, 等. 变电站内 5G 基站天线对二次设备的电磁干扰[J]. 南方电网技术, 2021, 15(10): 111-117.
- [5] 全国电磁兼容标准化技术委员会. GB/Z 17799.6-2017, 电磁兼容通用标准发电厂和变电站环境中的抗扰度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [6] 马海杰, 安勃. 变电站内电力通信设备电磁骚扰分析研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [7] 邹乐, 王伟, 王学田. 基于遗传算法的车载雷达天线阵列布局优化方法[J]. 微波学报, 2018, 34(S1): 155-158.
- [8] 杜文占, 余志勇, 杨剑, 等. 改进 NSGA-II 算法及监测天线部署优化研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(5): 239-248.
- [9] 朱启龙, 陈少昌. 多目标优化算法在舰船天线布局中的应用[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(9): 132-135.
- [10] 俞永斌, 张树春, 李德鑫, 等. 基于阵列 Taylor 权的最优粒子初值估计法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6): 70-75.
- [11] 施锦文, 张新刚, 时政欣, 等. 基于遗传算法的高性能赋形天线优化设计[J]. 微波学报, 2019, 35(3): 16-19.
- [12] 樊倩丽. 考虑 L 型支架卡箍约束的航空发动机管路布局 CFC-PSO 优化[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(3): 130-136.
- [13] 安勃. 变电站内无线传感器的电磁兼容问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [14] 全国电磁兼容标准化技术委员会. GBZ 17799.6-2017 电磁兼容通用标准发电厂和变电站环境中的抗扰度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 唐波, 张楠, 齐道坤, 等. 共享铁塔基站天线对在线监测设备的电磁干扰及防护[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4365-4375.
- [16] 王晨, 刘梅林, 焦金龙. 基于大面元物理光学的超电大尺寸求解技术[J]. 微波学报, 2012, 28(S1): 23-26.
- [17] 尤文斌, 丁永红. 基于 WPSO-PO 的冲击波测试适配器参数优化研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 221-228.

作者简介

张灿(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为超特高压输变电电磁环境及输电线路工程。

E-mail: 1798776730@qq.com

刘兴发, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电磁环境与电磁兼容。

E-mail: liuxingfa@epri.sgcc.com.cn

齐道坤, 高级工程师, 主要研究方向为输电线路工程设计、科研工作。

E-mail: qidaokun@126.com

唐波, 博士, 教授, 主要研究方向为超特高压输电技术及输变电系统电磁环境等。

E-mail: tangboemail@sina.com