

# 一种基于差分进化算法的长波天线地网优化研究

王 军

中国人民解放军92987部队, 广西 贺州

收稿日期: 2022年11月22日; 录用日期: 2022年12月22日; 发布日期: 2022年12月31日

---

## 摘 要

长波发射天线工作频率低, 对应波长越长, 常规工程中建设的天线均属于电小天线, 其辐射电阻较小, 需严格控制地损耗电阻, 保证天线辐射效率。地损耗电阻主要取决于地网形态的设计, 本文提出一种改进的差分进化算法, 针对长波天线的地网设计方案各方面状态进行优化设计, 并通过一个计算实例进行计算验证, 所采用的优化算法可以实现一定限定范围内的最优化设计。

## 关键词

长波, 差分进化算法, 地网

---

# An Optimization of Long-Wave Antenna Ground Network Based on Differential Evolution Algorithm

Jun Wang

Unit 92987 of the People's Liberation Army, Hezhou Guangxi

Received: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2022

---

## Abstract

The long-wave transmitting antenna has a low working frequency and a long corresponding wavelength. The antennas constructed in conventional engineering are all electric small antennas, and their radiation resistance is small, so the loss resistance should be strictly controlled to ensure the radiation efficiency of the antenna. The ground loss resistance mainly depends on the design of the ground network. In this paper, an improved differential evolution algorithm is proposed to

optimize all aspects of the state of the ground network design scheme of the long wave antenna, and a calculation example is used to verify that the optimization algorithm used can achieve the optimal design within a certain limited range.

## Keywords

Long-Wave, Differential Evolution Algorithm, Ground Network

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

长波发射天线形式一般采用顶部加载的单极子天线, 工作状态处于大电压、大电流场景。因为长波所在频段较低, 波长长度达千米级别, 即使采用规模庞大的天线结构, 相比于工作波长仍属于电小天线[1] [2]。

电小天线的辐射电阻一般较小, 天线系统效率正比于天线辐射电阻, 反比于天线系统总电阻(包含辐射电阻、地损耗电阻、调谐线圈损耗电阻及其他损耗电阻等) [3]。损耗电阻中地损耗电阻一般较大, 对效率影响至关重要, 因此长波发射天线需要规模较大的地网系统以降低地损耗电阻。

国内外现有长波天线根据天线形式、尺寸规模、场地条件等, 实际工程中的天线效率分布于10%~70%, 地网设计对于天线效率的影响最为重要。

## 2. 地网优化分析方法

### 2.1. 地网设计理论

在分析长波天线铺设地网的地损耗时, 通常考虑磁场带来的损耗和电场带来的损耗这两种情况。磁场损耗(简称磁损)是指天线引下线电流产生的磁场在大地中形成感应电流, 感应电流在大地中发生的损耗。而电场损耗(简称电损)是指空间的位移电流进入大地后产生的电损耗。长波天线的地损耗电阻  $R_g$  可表示为:

$$R_g = R_H + R_E \quad (1)$$

式中:  $R_H$  —— 磁场损耗电阻,  $R_E$  —— 电场损耗电阻。

对于具有标准伞形天线, 其地网形式一般为辐射状, 它的损耗电阻可由下式进行近似计算, 其中磁场损耗电阻分量为:

$$R_H \approx \frac{10^{-6}}{4\pi n^2} f^{3/2} \sigma^{1/2} h^2 + \frac{10^{-6}}{2\pi n^2} f^{3/2} \sigma^{1/2} h^2 \ln \frac{a}{h} + 1.58 \times 10^{-4} f^{1/2} \sigma^{-1/2} \frac{h^2}{a^2} + 3.16 \times 10^{-4} f^{1/2} \sigma_c^{-1/2} \frac{2h}{nd} \left( 2 - \frac{h}{a} \right) \quad (2)$$

电场损耗电阻分量为:

$$R_E \approx \frac{4}{3n\sigma a'} + \frac{h^2}{n\sigma} \left[ \frac{1}{a'^3} - \frac{1}{a^3} \right] + \frac{14h^2}{f^{1/2} \sigma^{3/2} a^4} \quad (3)$$

上两式中:  $f$  —— 工作频率,  $n$  —— 导线根数,  $\sigma$  —— 大地电导率,  $h$  —— 天线有效高度,  $a$  —— 地网半径,  $d$  —— 地网导线直径,  $\sigma_c$  —— 地网导线电导率,  $a'$  —— 顶负载半径。

## 2.2. 差分进化算法优化

差分进化算法(Differential Evolution, 简称: DE)主要的应用是在连续变量的优化求解方面[4]。本文的应用是一种0-1整数规划问题, 因此需进行改进针对性的改进和优化。采用的改进思路是在[0, 1]范围内采用连续变量的方式, 然后应用四舍五入的方法将变量取整数, 可以得到符合0-1整数规划要求的差分进化算法。具体的计算过程如下:

### 1) 初始化种群

首先确定初始化种群, 采用随机数产生的方式在  $N$  维空间确定  $NP$  个满足约束条件的初始个体, 并对这些变量进行离散化处理, 具体方法如下:

$$x_{ij}^0 = \text{round}\left(x_{ij}^L + \text{rand}_{ij}\left(x_{ij}^R - x_{ij}^L\right)\right) \quad (4)$$

上面式中  $x_{ij}^L$ 、 $x_{ij}^R$  是指第  $i(i=1,2,\dots, NP)$  个体中的  $j(j=1,2,\dots, N)$  个变量的边界值,  $\text{rand}_{ij}$  是指在 [0, 1] 间随机产生的数,  $\text{round}$  函数是指采用四舍五入的方式进行取整。此处  $x_{ij}^L = 0$ ,  $x_{ij}^R = 1$ , 所以化简后上面的式子为:

$$x_{ij}^0 = \text{round}\left(\text{rand}_{ij}\right) \quad (5)$$

### 2) 变异操作

差分进化算法中的变异是指从父代中选取三个个体, 并将其中两个之间的矢量进行缩放操作, 然后与另一个进行相加, 最后将结果进行取整, 形成一个新的变异新隔日。目标个体操作是在父代中随机选取三个个体, 将其中两个个体之间的矢量进行缩放, 再与另一个个体相加, 最后进行四舍五入生成新个体。例如, 个体  $x_i^t$  为第  $t$  代的  $i$  个目标, 对其进行变异处理如下:

$$v_i^{t+1} = \text{round}\left(x_{i1}^t + F\left(x_{i2}^t - x_{i3}^t\right)\right) \quad (6)$$

上式的参数  $i, i1, i2, i3 \in [1, 2, \dots, NP]$ , 而且都是互相不等的整数, 所以一般要求种群的规模  $NP$  需要大于等于 4。上式的  $F$  为缩放因子, 一般选取的范围为 (0, 2)。

### 3) 交叉操作

差分进化算法中的交叉是指当代种群的目标个体  $x_i^t$  和变异个体  $v_i^{t+1}$  间采用随机算法产生试验个体  $u_i^{t+1}$ , 同时需要确保试验个体  $u_i^{t+1}$  中至少有一个是从变异个体  $v_i^{t+1}$  转换而来, 具体操作如下所示:

$$u_{ij}^{t+1} = \begin{cases} v_{ij}^{t+1} & \text{rand}(j) \leq CR \text{ 或 } j = \text{randn}(D) \\ x_{ij}^{t+1} & \text{rand}(j) > CR \text{ 或 } j \neq \text{randn}(D) \end{cases} \quad (7)$$

其中  $\text{rand}(j)$  是一个处在 [0, 1] 间的小数; 而  $CR$  则是交叉因子,  $CR$  的取值范围是 [0, 1];  $\text{randn}(D)$  的取值范围为  $[1, 2, \dots, D]$ , 且为整数。

### 4) 选择操作

差分进化算法采用“贪婪”搜索策略, 把生成的个体  $u_i^{t+1}$  与目标个体  $x_i^t$  进行竞争, 下一代子代应当选取适应度较好的个体, 具体操作方式为:

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t & f(x_i^t) < f(u_i^{t+1}) \\ u_i^{t+1} & f(u_i^{t+1}) < f(x_i^t) \end{cases} \quad (8)$$

上式的  $f(x_i^t)$  和  $f(u_i^{t+1})$  分别表示个体  $u_i^{t+1}$  和个体  $x_i^t$  对应的适应度函数, 具体算法为:

$$f = W_{F1} SLL_{\max} + W_{F2} (BW_{\max} - BW_{I_{mi}=1}) H(T) \quad (9)$$

上式的  $W_{F1}$ 、 $W_{F2}$  分别为权重系数； $SLL_{max}$ 、 $BW_{max}$  则是指所截取的平面内的副瓣电平最大的结果和半功率波束宽度最大的结果。其中  $BW_{I_{mi}=1}$  是指满阵情况下的波束宽度。而  $H(T)$  是指单位阶跃函数，具体操作为：

$$H(T) = \begin{cases} 0 & BW_{max} \leq BW_{I_{mi}=1} \\ 1 & BW_{max} > BW_{I_{mi}=1} \end{cases} \quad (10)$$

最后不断执行步骤 2)至步骤 4)，一直到最大的迭代数。具体的算法流程如图 1 所示。

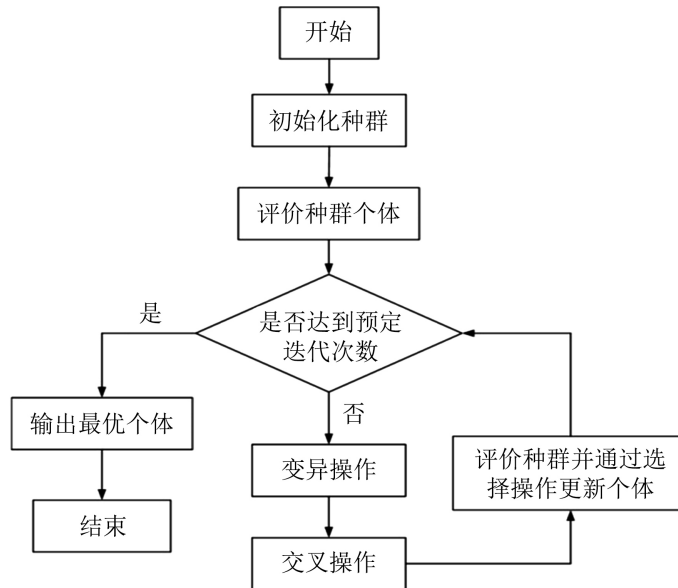


Figure 1. Flow chart of differential evolution algorithm  
图 1. 差分进化算法流程图

将上节所述公式加入优化算法程序中，对地网的根数、长度进行优化，在其他条件限定的情况下，得到最优解。

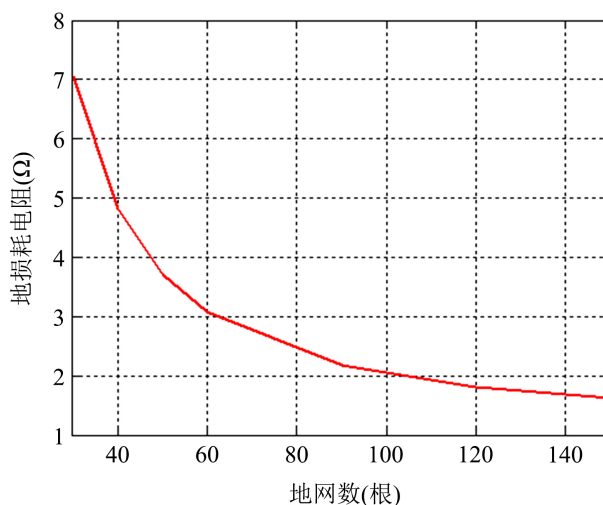
### 3. 地损耗电阻的数值仿真计算

为了验证上述算法优化程序，在一定限制条件下建立一个基本模型[5] [6]，天线高度 200 m，工作频点 150 kHz，地电导率 0.002 s/m，对地网的各项参数进行优化计算(图 2)。



Figure 2. Interface of differential evolution algorithm optimization  
图 2. 差分进化算法优化界面

建立一个优化算法控制界面，设定各项参数的输入控制，针对辐射状地网线的敷设规模，对地网线不同根数情况下进行对比，得到地损耗电阻随地网线根数的变化情况如下图。



**Figure 3.** Influence of the number of ground network roots on loss resistance

**图 3.** 地网根数对损耗电阻的影响

分析结果显示大地损耗等效电阻值将随铺设地网的根数增多而变小，具体如图3所示，但当地网根数增加到一定程度后，地损耗电阻基本不变，其整体仍在减小，但减小的趋势趋于平缓；因此，可得到最优地网设计状态，使的天线性能最佳，且不会过度设计，造成施工成本的增加。

#### 4. 总结

地网铺设是长波天线的设计和架设过程中非常重要的部分，采用差分进化算法对其关键参数进行优化分析，确保在成本可控的基础上，可以实现一定限定范围内的最优化设计，为实际工程设计提供了研究基础及思路

#### 参考文献

- [1] Watt, A.D. 甚低频无线电工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973.
- [2] 梁高权. 甚低频波和超低频波的辐射与传播[M]. 武汉: 海军工程大学学报编辑部, 2002.
- [3] 张大奎, 杨德川, 何治琳. 超长波发射天线的设计方法[J]. 舰船无线电, 1980, 40(2): 18-21.
- [4] 谢欢欢, 景跃骐, 李艳. 0-1 规划的稀布同心圆阵方法研究[J]. 电子学报, 2018, 46(1): 61-67.
- [5] 胡速谋, 李亮, 丁作亚. T 型甚低频发信天线辐射效率分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(3): 59-61.
- [6] 赵越, 彭怀云, 李清亮. 部分浸没于海水中天线阻抗及辐射效率分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(4): 518-523.