

长波伞形发射天线纤绳绝缘子研究

王 冰, 王 拓, 郭耀江, 赵 源

西安导航技术研究所, 陕西 西安

收稿日期: 2026年8月17日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月18日

摘 要

文章针对长波伞形发射天线的重要组成部分——纤绳绝缘子展开研究, 系统阐述了其设计原则及选型方法, 深入分析了电压分布及绝缘子数量对天线电性能影响。借助矩量法电磁仿真软件, 研究对各方案参数进行了综合对比与评估, 可为实际工程实施方案的选择提供理论支撑, 大幅降低工程风险。

关键词

长波, 伞形发射天线, 绝缘子

Research on Guy Insulators for Long-Wave Umbrella Transmitting Antennas

Bing Wang, Tuo Wang, Yaojiang Guo, Yuan Zhao

Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an Shaanxi

Received: August 17, 2026; accepted: September 10, 2026; published: September 18, 2026

Abstract

This study investigates guy insulators, a key component of long-wave umbrella transmitting antennas. It systematically elaborates on their design principles and selection criteria and provides an in-depth analysis of how voltage distribution and insulator quantity affect antenna electrical performance. By employing Method of Moments (MoM) electromagnetic simulation software, the effects of different parameter configurations are systematically compared. The results offer practical guidance for scheme selection, significantly mitigating engineering risks.

Keywords

Long Wave, Umbrella Transmitting, Insulator

Copyright © 2026 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. 引言

长波天线的应用主要分为通信与导航授时两大领域。在导航授时方面，目前广泛采用罗兰 C 系统，其工作频率为 100 kHz，对应波长 3 km。受限于工艺、材料及成本，该频段天线通常采用高度为 200~300 m 的单塔绝缘伞形发射天线。由于此类天线仍属于电小天线范畴，需通过顶线加载来增大其有效电尺寸，从而提升辐射能力[1] [2]。

单塔绝缘伞形发射天线按功能可分为辐射体单元、支撑体单元、绝缘单元、接地单元和馈线。其中绝缘单元是长波发射天线电气不可缺少的组成部分，通常由底座绝缘子、顶线绝缘子、纤绳绝缘子、馈线支柱绝缘子组成；它将天线的辐射单元与接地单元在电气上隔离开来，防止天线与地短路或产生电晕，从而保证天线的正常工作[3]。

传统设计通常采用理论公式计算塔体及顶线各处的电压分布，以确定绝缘子的耐压需求。然而，此类公式基于典型的简化模型，无法完全准确反映电压实际分布；同时，对于直接影响天线性能的纤绳绝缘子，设计只能依赖经验准则，即要求纤绳上绝缘子的间隔不大于 0.015 个波长，却无法准确评估该布局对天线性能的影响。因此，如何准确计算天线上的电压分布，并据此合理设计绝缘子以同时满足耐压要求与性能指标，是亟待解决的关键问题。

2. 纤绳绝缘子串设计原则

长波发射天线的顶线及纤绳绝缘子除需承受顶部负载的机械拉力或压力外，还需耐受 100~200 kV 的顶部高电压。为满足机械强度要求，通常采用绝缘子并联方式；为满足电气绝缘需求，则需将多个绝缘子串联使用，最终形成串并联组合的绝缘子串。

若采用的绝缘子强度不满足电气要求，则会产生从高电位端向低电位端的放电，放电路径见图 1。

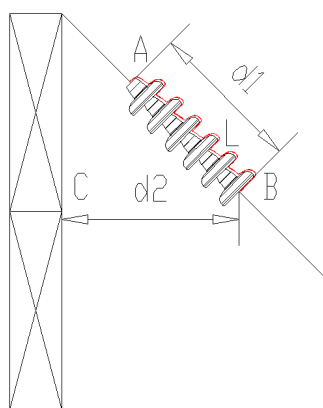


Figure 1. Schematic diagram of insulator discharge path

图 1. 绝缘子放电路径示意图

- 1) 由点 A 沿绝缘子串表面向点 B 放电，放电长度 L，称为绝缘子爬距。
- 2) 由点 A 沿空气向点 B 的最短距离放电，放电长度为 d1，叫做棒 - 棒空气间隙。

3) 由点 C 沿空气向点 B 的最短距离放电, 放电长度为 d_2 , 叫做棒 - 板空气间隙。

在实际设计过程中, 三路放电路径均需满足绝缘要求。

为了提高绝缘子的耐压性能, 将多个绝缘子联接在一起组成绝缘子串, 从而提高总的额定电压。然而, 由于电容效应, 当绝缘子串联起来时, 中间的绝缘子比靠近两端的绝缘子承受的电压要低, 且电压分布的不均匀性随串联绝缘子个数的增加而增加。若要降低绝缘子串的击穿风险, 需使电压在各绝缘子上均匀分布。可在串体两端加装均压环, 以调整端部电容分布, 实现电压的均衡分配, 进而提高整体耐压能力[4]-[6]。

按照实际工作情况, 绝缘子一般应具有以下特性:

1) 在各种气候条件下具备较好的工作稳定性, 要求绝缘子吸水性差, 不易受潮, 材料特性不受环境温度变化的影响。

2) 绝缘子材料应具有较小的损耗角, 以减少绝缘子的损耗, 保证其在高频电流作用下, 绝缘子不会大幅发热。

3) 绝缘子应具有高电压耐受能力, 干燥或潮湿环境下的耐受电压都需满足要求, 一般关注湿耐受电压。

4) 绝缘子要有足够的机械强度, 能承受大的压力或拉力, 同时不应有太大的脆性。

3. 纤绳绝缘子串选型

为了减少纤绳上的感应电流产生的二次辐射和纤绳上的涡流损耗, 需将纤绳用绝缘子分段隔离, 传统方案采用拱型绝缘子, 该绝缘子安装靠金具将其卡在中间, 对金具及拱型绝缘子尺寸要求高, 而拱型绝缘子是烧制而成, 无法像机加件一样将尺寸误差控制在很小的程度内, 需要烧制后进行筛选, 进而造成部分报废浪费; 同时, 由于拱型绝缘子仅靠金具将其卡在中间, 纤绳整体架设过程中, 拉力不能太小, 否则易造成拱型绝缘子脱落的情况发生, 给工程施工带来困难。拱形绝缘子串示意图如图 2 所示。

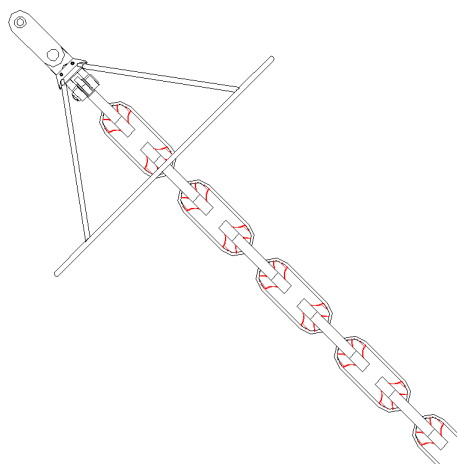


Figure 2. Schematic diagram of an arched insulator string

图 2. 拱形绝缘子串示意图

考虑到这些问题, 建议采用盘形绝缘子对其进行更换, 如图 3 所示, 盘形绝缘子连接简单, 对结构及架设过程工艺要求低, 可降低施工难度; 同时无弯曲应力变形, 机械性能优, 耐污与自洁性好, 长期可靠性高[7] [8]。

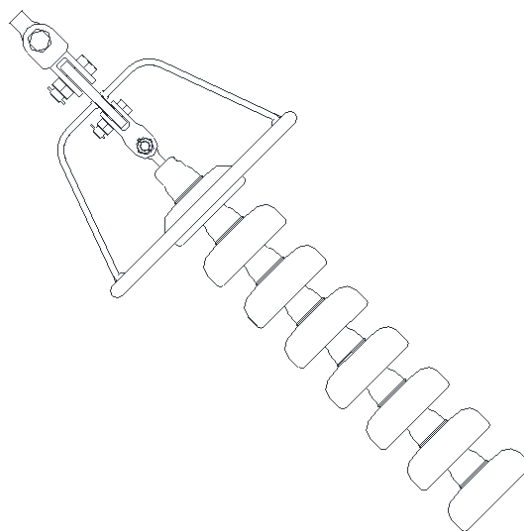


Figure 3. Schematic diagram of a disc insulator string
图 3. 盘形绝缘子串示意图

4. 纤绳绝缘子承受电压计算

为了解决如何准确计算天线上的电压分布,同时准确评估绝缘子设计对天线电性能的影响,引入基于矩量法的电磁仿真软件对其电压分布进行分析计算[9] [10]。

建立工作在 100 kHz 的单塔绝缘伞形天线,天线中心塔高 280 m,塔顶加载顶线 12 根,顶线长度 180 m,顶线与中心塔夹角为 45 度,在中心塔上设置三方纤绳,每个方向纤绳分为 4 层,分别设置在塔高 60 m、120 m、180 m、240 m 处;地网中心设置半径 3 m 的金属接地板,在其周围设置长度 280 m 的 120 根辐射状地网,间隔 3 度均匀排布,并在地网外部最边缘设置汇流环,将 120 根地网线相连接,见图 4。

在电磁仿真软件 FEKO 中建立仿真模型,地面采用无限大平面多层介质,介质相对介电常数为 10,电导率为 0.01 S/m,地网埋入地介质下 0.5 m 处;馈电采用线端口在塔体底部进行馈电;绝缘子采用串联等效模型加入对应位置,其等效电容取 50 pF,等效电阻取 2200 MΩ [5];模型剖分网格设置为面,网格最大边长为 2 m,线网格最大长度为 20 m。

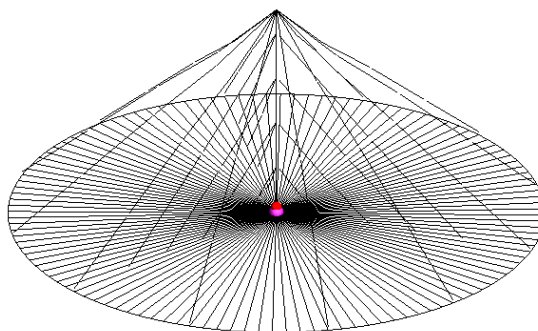


Figure 4. Single-tower insulated umbrella antenna model
图 4. 单塔绝缘伞形天线模型

天线模型采用传统设计方案,纤绳绝缘子以间隔长度不大于 0.015 个波长为准进行布局,从底到顶每层绝缘子数量分别为 3 处、5 处、7 处、9 处、6 处,设置绝缘子后模型见图 5。

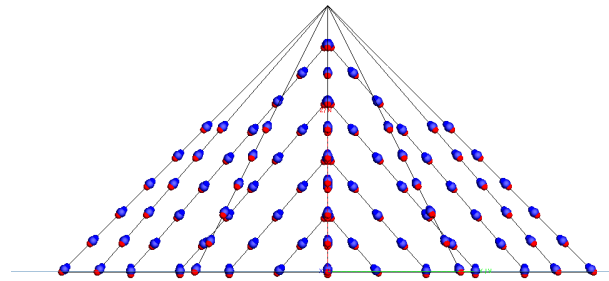


Figure 5. Model diagram for insulator voltage calculation
图 5. 绝缘子电压计算模型图

对天线性能进行计算，各层电压如表 1 所示：

Table 1. Layer voltages of guy insulators
表 1. 纤绳绝缘子各层电压

序号	理论计算电压 kV	仿真计算电压 kV	电压偏离比%
1	36.0	31.7	-12.0
2	55.3	51.9	-6.2
3	72.7	73.5	1.1
4	87.6	95.6	9.1
5	113.1	113.4	0.2

从上表可以看出，仿真计算结果与理论计算结果最大存在 10%左右的偏差，可以更准确地评估各绝缘子位置的耐受电压。

在正常工作条件下，绝缘子串使用的绝缘子数目为：

$$n = \frac{V}{V_u \eta} \quad (1)$$

式中， η 为额定下降系数， V 为工作总电压， V_u 为单个绝缘子安全工作电压，通常为单元击穿电压的一半；额定值下降系数，根据所使用的均压环来确定。

5. 纤绳绝缘子数量对电性能影响

在采用理论公式计算天线电性能时，无法评估纤绳绝缘子设置对天线电性能的影响，只能按照下述方法进行设置。

1) 纤绳绝缘子间隔长度不大于 0.015 个波长；

2) 纤绳上电压主要在第一串隔离绝缘子上，以后每串电压变小，离主塔近的纤绳上感应电压大，离主塔远的纤绳上感应电压小。

采用基于矩量法的电磁仿真软件对绝缘子设置间距及数量对天线电性能的影响进行分析。

在前述章节 3 中天线模型的基础上，首先对绝缘子数量最多的第四层进行分析，评估其是否能降低纤绳的分段数量。

从表 2 可以看出，绝缘子数量对天线有效高度和带宽均有影响，随着绝缘子数量的增多，其有效高度增大，辐射能力增强，天线带宽增大；但随着绝缘子数量的增多，其有效高度和带宽增大幅度变小。

在第四层设置 3 处绝缘子的基础上，对第三层绝缘子数量进行计算分析，结果见表 3。

Table 2. Effect of the number of insulators in the fourth layer on effective height**表 2.** 第四层绝缘子数量对有效高度的影响

序号	状态	有效高度 m	相对有效高度%	天线带宽 kHz
1	2 处绝缘子	177.8	93.4	3.52
2	3 处绝缘子	187.8	98.6	3.72
3	5 处绝缘子	189.8	99.7	3.75
4	7 处绝缘子	190.1	99.8	3.75
5	9 处绝缘子	190.4	100.0	3.76

Table 3. Effect of the number of insulators in the third layer on effective height**表 3.** 第三层绝缘子数量对有效高度的影响

序号	状态	有效高度 m	相对有效高度%	天线带宽 kHz
1	2 处绝缘子	182.2	97.0	3.63
2	3 处绝缘子	186.5	99.3	3.71
3	4 处绝缘子	187.3	99.7	3.72
4	7 处绝缘子	187.8	100.0	3.72

从表 3 中可以看出,有效高度和带宽随绝缘子数量的变化规律与表 2 中仿真结果规律一致。在第三、四层设置 3 处绝缘子的基础上,对第二层绝缘子数量进行计算分析,结果见表 4。

Table 4. Effect of the number of insulators in the second layer on effective height**表 4.** 第二层绝缘子数量对有效高度的影响

序号	状态	有效高度 m	相对有效高度%	天线带宽 kHz
1	2 处绝缘子	184.5	98.9	3.69
2	3 处绝缘子	186.1	99.8	3.71
3	4 处绝缘子	186.3	99.9	3.70
4	5 处绝缘子	186.5	100.0	3.71

从上表可以看出,有效高度和带宽随绝缘子数量的变化规律与第三层、第四层仿真结果规律一致。在第二、三、四层设置 3 处绝缘子的基础上,对第一层绝缘子数量进行计算分析,结果见表 5。

Table 5. Effect of the number of insulators in the first layer on effective height**表 5.** 第一层绝缘子数量对有效高度的影响

序号	状态	有效高度 m	相对有效高度%	天线带宽 kHz
1	2 处绝缘子	185.7	99.8	3.71
2	3 处绝缘子	186.1	100	3.71

从上述一至四层的计算结果可知,绝缘子数量变化引起的有效高度和天线带宽变化规律一致,绝缘子数量越多,有效高度越高,天线带宽越宽,但数量继续增加后提升效果变缓。结合工程施工实施难度情况,需根据实际工程情况,选择合适的绝缘子数量,可将 3 处绝缘子作为一个均衡的选择。

对各层均采用 3 处绝缘子的最终状态与初始状态对比如表 6 所示:

Table 6. Effect of the number of insulators on effective height
表 6. 绝缘子数量对有效高度的影响

序号	状态	有效高度 m	相对有效高度%	天线带宽 kHz
1	初始状态	190.4	100	3.52
2	各层均为 3 处绝缘子	186.1	97.7	3.71

6. 总结

本文针对长波伞形发射天线的重要组成部分——纤绳绝缘子进行研究分析，系统阐述了其设计原则及选型对比，并借助矩量法电磁仿真软件，深入分析了电压分布及绝缘子数量对天线电性能的影响。研究表明，纤绳上设置 3 处绝缘隔断即可获得良好的电气性能。工程实施时，可综合对比各方案参数带来的影响，得到兼顾成本、施工、性能的最优方案。

参考文献

- [1] 沃特. 甚低频无线电工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973.
- [2] 吴华宁, 冯慧婷, 谢慧, 等. 低频通信技术的应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2026.
- [3] 黄裕厚. 长、中波发射天线的改进[J]. 电波科学学报, 1991(4): 57-68.
- [4] 王敦青, 王红星, 张瑞晨. 500 kV 紧凑型输电线路复合绝缘子均压环优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 114-122.
- [5] 黄韬, 文远芳, 文康珍, 吕健双, 端木林楠. 基于电路等效变换的绝缘子串电压分布研究[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 29-34.
- [6] 李斌, 柳超, 康颖, 周诗嘉, 张波. 基于矩量法和蝴蝶交配优化算法的甚低频发射天线顶线绝缘子均压环优化设计[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 94-100, 106.
- [7] 谢飞. 长波天线大跨越导线的防微风振动设计[J]. 电子机械工程, 2019, 35(1): 20-24.
- [8] 邓铁辉, 柳超, 张静. 甚低频大功率发射天线高压绝缘子研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(5): 168-171.
- [9] 王拓, 张鑫, 安迪, 王卫东. 小型化长波发射天线研究[J]. 现代导航, 2025, 6(3): 214-218.
- [10] 黄金辉, 李斌, 柳超, 严亚龙. 一种基于缩比模型的甚低频伞形发射天线电压分布计算方法[J]. 2018, 51(7): 1527-1531.