

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105678

## 雷电低频磁场探测天线关键参数敏感性分析\*

蔡露进<sup>1</sup> 李祥超<sup>2</sup> 苏静文<sup>1</sup> 罗俊才<sup>1</sup> 潘岑<sup>1</sup> 徐高静<sup>3</sup>(1. 贵州省气象服务中心 贵阳 550002; 2. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044;  
3. 贵州大气探测技术与保障中心 贵阳 550002)

**摘要:** 为了探究设计参数对雷电低频磁场探测天线的影 响,设计了雷电低频磁场探测天线,首先使用 LCR-分析仪测试不同参数下天线的静态参数,而后基于亥姆霍兹线圈试验平台对天线的接收性能进行敏感性试验。首先分析了天线长度、丝包线股数和磁棒直径对天线静态参数(电阻、电容和电感)的影响。而后结合天线的静态参数,分析了不同参数对天线频响曲线、频响最值和带宽的影响。得出了增加天线长度虽可以增加带宽,但会减少天线的频响值,然而增加丝包线股数的情况则相反;增加磁棒直径能同时增加频响值和带宽,但使得天线的尺寸变大,因此天线长度、丝包线股数和磁棒直径的选择需要折中考虑。本文研究了各参数对雷电低频天线的影响,对于提高雷电的探测能力具有一定的参考价值意义。

**关键词:** 雷电低频磁场探测天线;关键参数;频响曲线;敏感性试验;亥姆霍兹线圈试验平台

**中图分类号:** TM863 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.15

## Sensitivity analysis on key parameters of lightning low frequency magnetic field detection antenna

Cai Lujin<sup>1</sup> Li Xiangchao<sup>2</sup> Su Jingwen<sup>1</sup> Luo Juncai<sup>1</sup> Pan Cen<sup>1</sup> Xu Gaojing<sup>3</sup>(1. Guizhou Meteorological Service Center, Guiyang 550002, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;  
3. Guizhou Meteorological Observation Technology and Support Centre, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of design parameters on the lightning low frequency magnetic field detection antenna, this paper designs a lightning low frequency magnetic field detection antenna. Firstly, based on the LCR analyzer, the influence of the antenna length, the number of the wire and the diameter of the magnetic rod on the resistance, capacitance and inductance of the antenna is analyzed. Secondly, a test platform was constructed using Helmholtz loop coils, and then the platform was used to perform sensitivity tests on the reception performance of ferrite antennas wound. And the effects of antenna length, the number of wires and the diameter of the magnetic rod on the receiving performance of the antenna were discussed. Finally, the research conclusions are as follows: increasing antenna length can increase the antenna bandwidth, but it will reduce the frequency response value of the antenna. However, increasing the number of wrapped wires is the opposite. Increasing the magnetic rod diameter can increase the frequency response value and the bandwidth, but it will make the size of the antenna larger. So, the selection of the antenna length, the wires number and the magnetic rod diameter needs to be considered in a compromise. This paper analyzes the influence of various parameters on the lightning low-frequency antenna, which has a certain reference value for improving the lightning detection ability.

**Keywords:** lightning low frequency magnetic field detection antenna; key parameters; frequency response curve of ferrite antenna; sensitivity test; Helmholtz loop coil test platform

## 0 引 言

地闪回击过程中的大电流和强电磁辐射,是形成电子

设备故障造成危害的主要原因<sup>[1-2]</sup>。回击过程中主要辐射频率为 30~300 kHz<sup>[3]</sup>的电磁信号,如果能对其进行较为准确的探测,不仅可以提高闪电的定位精度还能加深对闪

收稿日期:2021-01-08

\* 基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1501505)资助

• 16 •

电回击过程中物理过程的认识<sup>[4]</sup>。在探测过程中,天线的特性对其探测效率与探测距离影响较大,所以对探测天线特性的研究变得至关重要。

目前,国内外学者对磁天线做了大量的研究<sup>[5-9]</sup>。Tumanski<sup>[10]</sup>对空心线圈和磁芯线圈的频率特性进行了对比分析,并给出了影响线圈性能的重要参数。Tan等<sup>[11]</sup>在2015年使用1 m环形天线来探测由雷电放电产生的天电,其中探测频率范围为1~10 kHz。樊艳峰等<sup>[12]</sup>研究表明基于磁天线的遥感方法对人工引雷中特有的初始连续电流有很好的反演效果,其中磁天线的频响最大值为0.1 V/nT,磁天线的3 dB带宽为6~340 kHz。Weinert<sup>[13]</sup>在2017年设计ELF/VLF的无线电探测仪,所设计的传感器系统具有很强的鲁棒性,适合在雷暴天气下长时间工作;其中,VLF的磁天线长度约为30 cm,电感约为1.625 H,电阻约为19.54 Ω,电容约为20.74 μF,天线的频率范围为100 Hz~12 kHz,频响最大值约为0.65 V/nT。以上学者设计不同的天线来探测雷电信号,但他们对天线的设计参数对天线接收性能的研究较少。

基于此,本文利用铁氧体材料在很宽的频率内保持高导磁率,能量损耗小和特性稳定等优良性能,设计基于铁氧体材料的雷电低频磁场探测天线。同时改变天线的设计参数,如天线长度、丝包线股数和磁棒直径,并测量了天线的静态参数。同时在实验室里搭建了亥姆霍兹线圈试验平台,利用该平台对雷电低频磁场探测天线的接收性能敏进行感性试验。结合天线的静态参数,分析了不同参数对天线频响曲线、频响最大值和带宽的影响。本文研究了各设计参数对天线的意义,对于提高雷电的探测能力具有一定的意义。

## 1 理论分析

天线是绕在磁芯上的环形天线。根据法拉第电磁感应定律,当环形天线置于角频率为 $\omega$ 的均匀交变磁场中,当绕组的轴线与磁场强度 $H$ 相平行时,环形天线在其两端产生的电压为<sup>[14]</sup>:

$$V = -n \frac{d\phi}{dt} = -n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = \mu_0 \cdot n \cdot A \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

其中, $\mu_0$ 为初始导磁率, $n$ 为线圈的匝数, $A$ 为每个线圈的面积。

在频域中假设:

$$B(t) = B_0 \cdot e^{j2\pi ft} \quad (2)$$

则有:

$$V = -j \cdot n \cdot A \cdot \omega \cdot B_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (3)$$

从而计算感应线圈的比例因子为:

$$|V/B = V/B_0| = n \cdot A \cdot \omega \quad (4)$$

同时计算天线两端的感应电动势 $E_e$ 为:

$$E_e = \mu_0 \mu_r \omega H A n \quad (5)$$

式中: $\mu_0$ 为空气的导磁率, $\mu_r$ 相对导磁率。

基于前面的分析,将天线等效为一个由电动势 $E$ 与 $\omega L$ 组成信号源。天线最终输出的信号由天线耦合到的信号和由天线自身引起损耗共同决定的,其中天线的损耗主要是绕组损耗、磁芯损耗和辐射损耗。与绕组损耗、磁芯损耗相比,在实际应用中,铁氧体天线的辐射损耗较小,基本上可以忽略不计。如果将前面的损耗等效为与电感并联的电阻 $R_p$ ,同时初级绕组的负载电阻为 $R'_b$ ,天线的恒流源等效电路如图1所示。

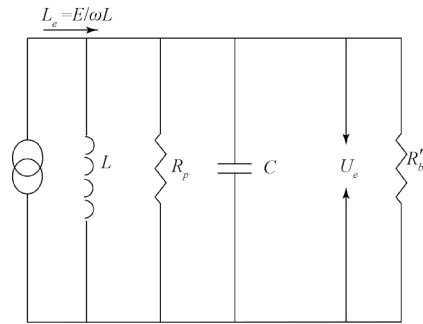


图1 天线等效电路

在图1中,计算得到负载电阻 $R'_b$ 的信号电压 $U_e$ 为:

$$U_e = I_e \cdot \frac{R_p R'_b}{R_p + R'_b} = \frac{E_e}{\omega L} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_p + R'_b}{R_p R'_b}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (6)$$

将铁氧体天线的 $E_e$ 值代入上式后,得到:

$$U_e = \frac{\mu_0 \mu_r H A n}{L} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_p + R'_b}{R_p R'_b}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (7)$$

当电路谐振时,分析可知,有 $\omega L = -\frac{1}{\omega C}$ ,从而得到信号峰值 $U_{\max}$ 为:

$$U_{\max} = \frac{\mu_0 \mu_r H A n}{L} \cdot \frac{R_p R'_b}{R_p + R'_b} \quad (8)$$

## 2 试验模型

### 2.1 天线参数

为了分析天线参数(天线长度、丝包线股数和磁棒直径)的变化对天线耦合雷电磁场的影响,本文对不同磁棒直径、不同丝包线股数和不同天线长度的天线进行敏感性试验,天线的参数如表1所示。其中 $0.10 \times 5$ 表示此丝包线由5股0.10 mm铜丝构成,同时天线采用密绕方式。

### 2.2 试验

天线的电阻会对天线产生有功损耗,而电容和电感虽然产生的是无功损耗,但会影响信号的特征,因此采用LCR-分析仪测量了天线在1 kHz频率下的电阻、电容和电感,测量示意图如图2所示。

亥姆霍兹线圈试验平台搭建的方法更加简易,具有更大空间的均匀磁场,同时受仪器分布参数的影响和试验人

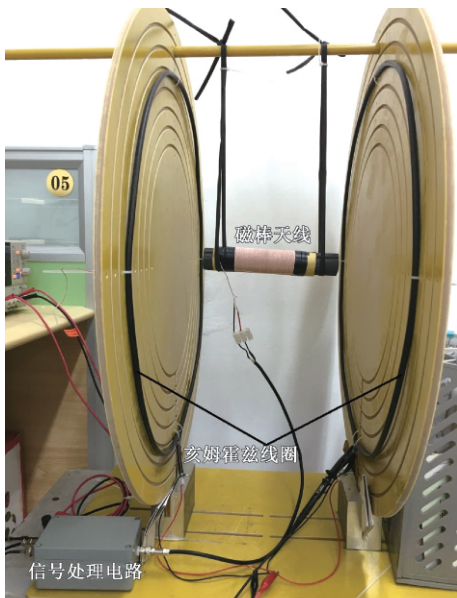
表 1 天线参数

天线参数类型	参数取值
磁棒类型(直径, 长度, 导磁率)	(10 mm, 140 mm, 1 000), (20 mm, 140 mm, 1 000), (35 mm, 200 mm, 1 000)
丝包线类型 (mm×股)	0.10×5, 0.10×10, 0.10×15, 0.10×20, 0.10×25, 0.10×30
天线长度	10 mm, 20 mm 磁棒天线(2 cm, 2.5 cm, ..., 9.5 cm, 10 cm)、35 mm 磁棒天线(2 cm, 2.5 cm, ..., 11.5 cm, 12 cm)

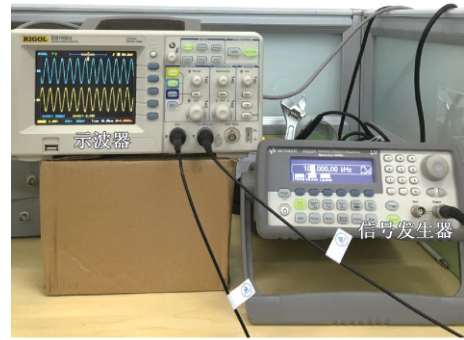


图 2 天线的电阻、电容和电感测量

员干扰更小。因而在实验室搭建标准场(亥姆霍兹场)试验台来测量天线的频响曲线,其中圆环的半径和圆环之间的距离都为 27.5 cm。天线频响测量的试验图如图 3 所示,试验过程中,首先把高频信号源与亥姆霍兹线圈对称端口连接,接着把天线放置于中心,并用示波器显示和记录电路输出的信号,然后改变高频信号源的输入频率,记录每一次输出的信号和信号的幅值。其中信号发生器的频率范围是 1~800 kHz。



(a) 亥姆霍兹标准场试验台



(b) 试验结果图

图 3 天线频响测试

### 3 试验数据分析

#### 3.1 天线的静态参数分析

由于天线随磁棒直径或丝包线股数的静态参数变化趋势一致,本文分别以磁棒直径为 20 mm 和丝包线股数为 0.10×30 的天线数据为例来分析。

##### 1) 电阻分析

图 4 给出磁棒直径为 20 mm 时天线的电阻,天线的电阻数量级范围是  $10^{-1} \sim 10^1 \Omega$ ;其值随着丝包线股数的增加而减小,但随着天线长度的增加而增大;当丝包线股数为 0.10×5 时,其最短天线的阻值比丝包线股数大于 10 的天线的阻值大。如果仅考虑电阻的影响,在设计过程中,相同长度和磁棒直径的天线,可以增加绕制在天线上的丝包线股数来减少天线的损耗,从而提高天线的接收效能。

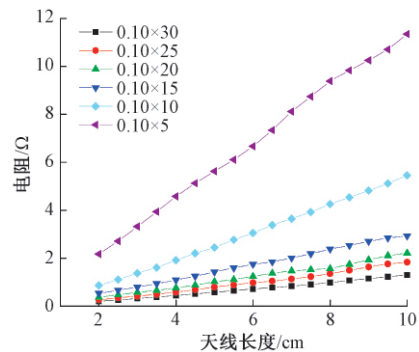


图 4 磁棒直径为 20 mm 时不同丝包线股数下天线的电阻

图 5 为 0.10×30 丝包线股数下天线的电阻,天线较短时,不同直径磁棒天线的电阻之间差值较小,但随着天线长度的增加,其差值变大。磁棒直径越大,其天线的电阻越大。结合图 4 可知,天线的电阻受丝包线股数的影响比受磁棒直径的大。

##### 2) 电容分析

图 6 给出磁棒直径为 20 mm 时天线的电容,天线的电容数量级范围是  $10^0 \sim 10^2 \mu F$ ;天线的电容随着天线长度的增加先急剧减小后趋于平缓。其原因是增加天线长度,即增加天线匝数,而天线的总电容是其相邻匝之间的电容串

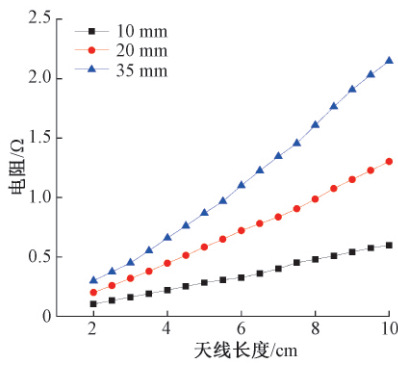


图 5 丝包线股数为 0.10×30 时不同磁棒直径下天线的电阻

联之和,电容串联越多,总电容越小。此外,且在天线较短时,天线的电容差值较大,但随着长度的增加,电容差值减小。天线的电容随着丝包线股数的增加而增加,这是由于相同天线长度下,天线的丝包线股数越多,其匝数越少,从而串联的电容个数越少。

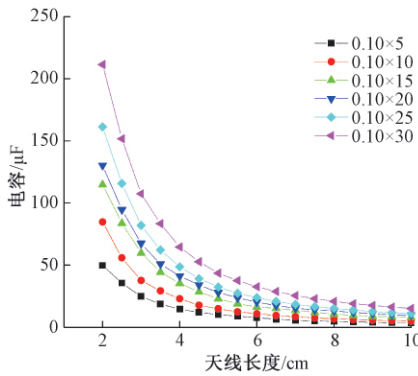


图 6 磁棒直径为 20 mm 的天线不同丝包线股数下的电容

图 7 为丝包线股数是 0.10×30 时天线的电容,磁棒直径越大,其天线的电容越小。其原因是磁棒直径越大,天线的横截面越大,电容容量与横截面成反比关系。结合图 6 分析可知,较短天线的电容受丝包线股数和磁棒直径影响较大,而较长天线的电容受两者的影响基本上可以忽略。

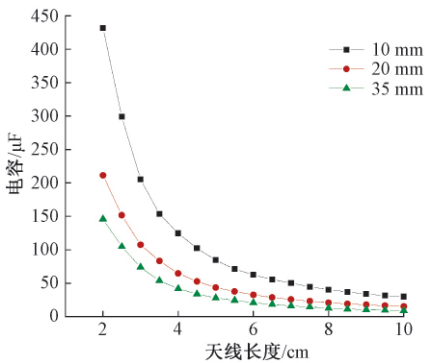


图 7 0.10×30 丝包线股数时不同磁棒直径下天线的电容

3)电感分析

图 8 给出磁棒直径为 20 mm 时天线的电感,天线的电

感数量级范围是  $10^{-1} \sim 10^0$  mH;天线的电感随着天线长度增加而增加,但随着丝包线股数的增加而减小。图 9 为 0.10×30 丝包线股数天线的电感,天线的电感随磁棒直径的增加而增加;较短天线在不同直径磁棒下,其电感差值小,而较长天线的则相反。结合图 8 和 9,初步可推测天线电感首要受线圈长度影响,其次受磁棒直径,最后则为丝包线股数。

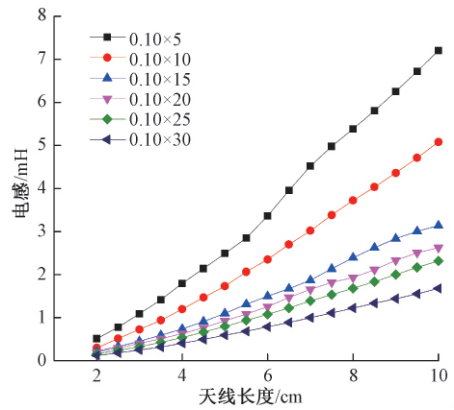


图 8 磁棒直径为 20 mm 的天线不同丝包线股数下的电感

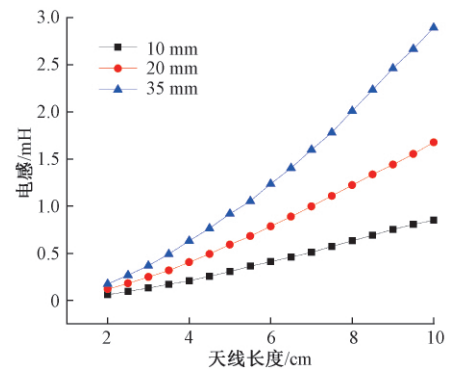


图 9 0.10×30 丝包线股数不同磁棒直径下天线的电感

3.2 天线的频响试验数据分析

1) 试验波形分析

图 10 为 10 kHz 下天线(丝包线股数为 0.10×20,磁棒直径为 20 mm,天线长度 6 cm)的试验波形图,CH1 的信号为天线耦合的信号,CH2 的信号为亥姆霍兹线圈上串联 51 Ω 电阻时两端的电压信号。由亥姆霍兹线圈特性可知,磁场在  $r < a$  区域内可近似为恒定的,所以本文取中心点的磁场来计算分析。中心点磁场的计算公式如下<sup>[15]</sup>:

$$B = \frac{\mu_0 I}{a(1 + \beta^2)^{3/2}} \quad (9)$$

其中,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ,  $I$  为亥姆霍兹线圈的电流,可以根据 CH<sub>2</sub> 中电压数据求得,  $a$  为亥姆霍兹线圈之间的距离,其值为 27.5 cm,  $\beta = 1/2$ 。

一般而言,天线的频响值为天线在单位磁感应强度中耦合的电压值,用来衡量天线的接收性能。

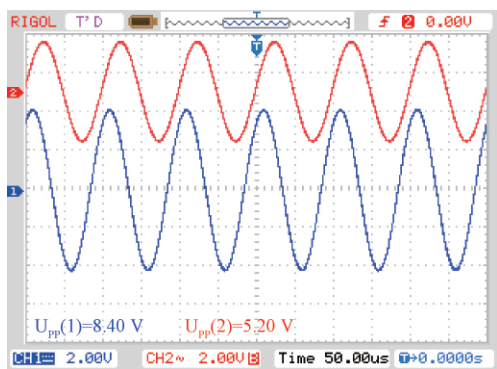


图 10 10 kHz 下天线(丝包线股数为  $0.10 \times 20$ , 磁棒直径为 20 mm, 天线长度 6 cm)试验波形图

$$VFR = \frac{U}{B} \quad (10)$$

为了便于分析,单位取 V/nT。

根据式(10)得,10 kHz 天线(丝包线股数为  $0.10 \times 20$ , 磁棒直径为 20 mm, 天线长度为 6 cm)的频响值为  $0.05051 \text{ V/nT}$ 。

### 2) 频响曲线分析

试验发现,相同丝包线股数和磁棒直径的不同长度天线,其频响曲线的变化趋势类似。本文以丝包线股数为  $0.10 \times 15$ 、磁棒直径为 35 mm 的天线为例,分析其频响曲线。图 11 中,天线的频响值主要在  $0.01 \sim 0.25 \text{ V/nT}$ ;天线的频响值随着频率先是增加的阶段,记为上升区,此频段接收的信号  $U$  正比于  $\text{dB}/\text{dt}$ ;随即基本保持不变的阶段记为平坦区,其信号  $U$  正比于  $B$ ;最后随着频率的增加而减小的阶段记为下降区。随着天线长度的增加,上升区的天线频响值增大,但上升区间变窄,平坦区和下降区的频响值减小,平坦区区间变宽,下降区区间变窄。大部分天线的频响

曲线在 10 kHz 时进入平坦区,因而本文把低于 10 kHz 定为低频,高于 10 kHz 定为高频。

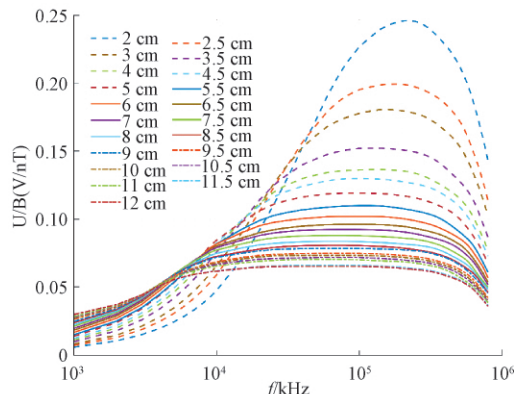


图 11 不同长度天线(丝包线股数为  $0.10 \times 15$ , 磁棒直径为 35 mm)的频响曲线(曲线峰值从大到小依次为:2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6、6.5、7、7.5、8、8.5、9、9.5、10、10.5、11、11.5、12 cm)

由图 11 可知,在上升区时,天线的频响值随着天线长度的增大而增大,且天线的上升区间是随着天线长度的增加而减小。在平坦区和下降区时,天线的频响值随着天线长度的增加而减小,同时,天线越长,其平坦区区间越大,而下降区区间越小。

由以上分析得天线的静态参数与频响曲线之间的关系,如表 2 所示。结合天线频响曲线和天线静态参数的变化规律得,较短天线由于匝数少,耦合到的信号小;而较长天线由于匝数多,耦合到的信号大。此外,电阻对任何频段都有衰减,电容通高频而阻低频,电感则通低频而阻高频。因而较短天线的电阻小,电感小,电容大;较长天线的电阻大,电感大,电容小。

表 2 天线的静态参数与频响曲线之间的关系

天线长度	静态参数			频响曲线		
	电阻	电容	电感	上升区	平坦区	下降区
相对短的天线	小	大	小	频响值小上升区间大	频响值大平坦区间小	频响值大下降区间大
相对长的天线	大	小	大	频响值大上升区间小	频响值小平坦区间大	频响值小下降区间小

综合前面的分析可知,在低频时,天线的信号主要由耦合的信号所决定,随着频率的增加,天线的损耗的影响越来越大。同时对于长的天线而言,在高频时,电阻、电感和电容引起信号衰减要远远大于长度短的天线中相关参数引起的信号衰减。

图 12 为不同丝包线股数的天线(磁棒直径为 35 mm, 天线长度为 11.5 cm)频响曲线,频率较低时,天线的丝包线股数越少,天线的频响值越大,频率较高时则相反。

图 13 为不同直径磁棒天线(丝包线股数为  $0.10 \times 20$ , 天线长度为 6.5 cm)的频响曲线。由图 13 可知,天线频响值的大致范围是  $0.005 \sim 0.079 \text{ V/nT}$ 。此外,天线的磁棒

直径越大,其频响值就更高,这是因为更大的磁棒面积,能让更多的磁场穿过天线。

### 3) 频响峰值分析

从探测的角度分析,天线的频响最大值越大越好,如果信号太大,会导致后端的电路饱和。因而对磁棒直径为 35 mm 时不同丝包线股数天线的频响最大值进行分析和讨论。由图 14 可知,天线的频响最大值范围为  $0.05 \sim 0.33 \text{ V/nT}$ ;天线的频响最大值随着天线长度增加而减小,随着丝包线股数的增多而增加。

天线频响最小值在一定程度上反映了天线的灵敏度,因而对磁棒直径为 35 mm 时不同丝包线股数天线的频响



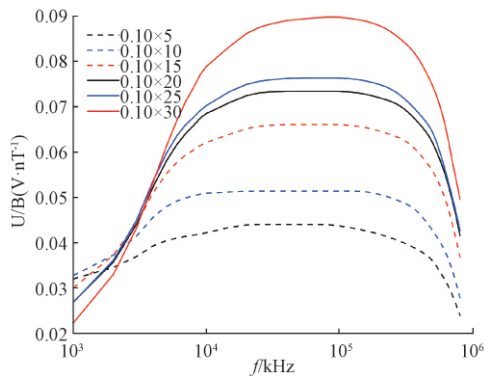


图 12 不同丝包线股数的天线(磁棒直径为 35 mm,天线长度为 11.5 cm)频响曲线(曲线峰值从大到小依次为:0.10×30、0.10×25、0.10×20、0.10×15、0.10×10、0.10×5)

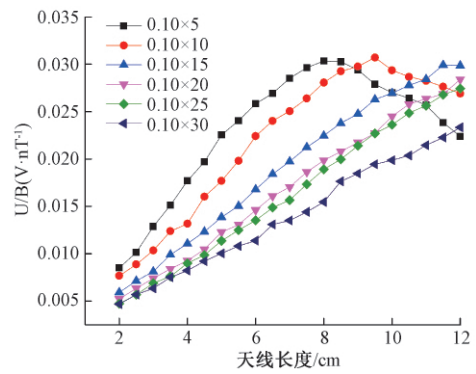


图 15 直径为 35 mm 时不同丝包线股数的天线频响最小值

如图 16 和 17 所示,天线的频响最大值和最小值均随磁棒直径的增加而增大。所以在空间尺寸允许的情况下,可增加磁棒直径来提升天线的频响值。

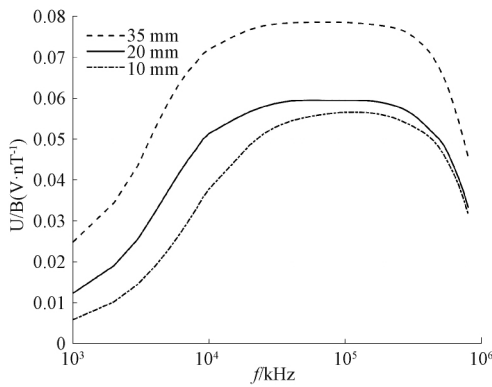


图 13 不同直径磁棒天线(丝包线股数为 0.10×20,天线长度为 6.5cm)的频响曲线

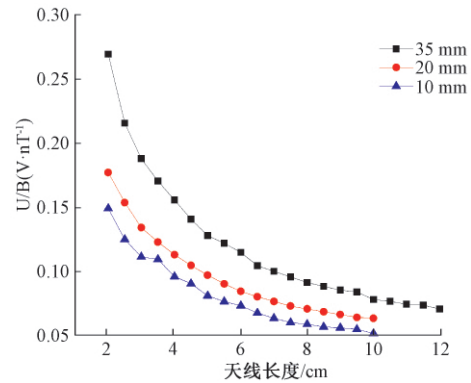


图 16 丝包线股数为 0.10×20 时不同磁棒天线的频响最大值

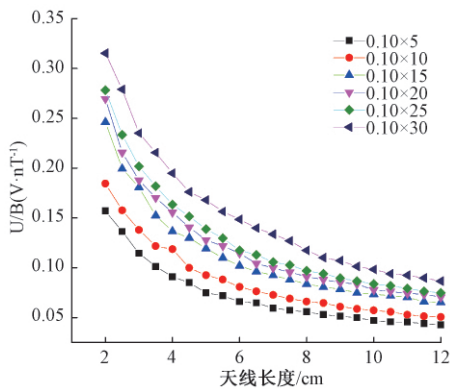


图 14 直径为 35 mm 时不同丝包线股数的天线频响最大值

最小值进行分析和讨论。由图 15 可知,天线频响最小值的范围为 0.005~0.031 V/nT。丝包线股数 < 20 时,天线的频响最小值随着天线长度的增加先增加后减小。这说明过长的天线,其内阻增加明显,从而使天线频响值受到损耗。丝包线股数 ≥ 20 时,天线的频响最小值随着天线长度的增加而增加,而随丝包线股数的增加则相反。总之,可再次说明在频率较低时,天线频响值主要是由耦合信号的大小决定,而随频率的增加,天线自身的损耗的影响越来越大。

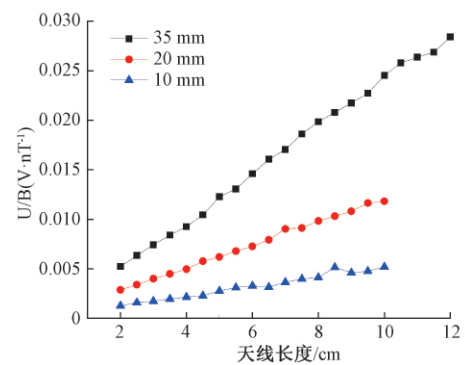


图 17 丝包线股数为 0.10×20 时不同磁棒天线的频响最小值

#### 4) 带宽分析

本文所讨论的是一 3 dB 带宽,表示功率减少到一半的频带宽度。根据试验数据,使用式(11)计算峰值功率:

$$P_{\max} = 20 \lg \left( \frac{|U_2|}{|U_1|} \right)_{\max} \quad (11)$$

式中:  $U_1$  为输入端口的电压,单位为 V;  $U_2$  为输出端口的电压,单位为 V。

从而可以计算截止功率为:

$$P_{\text{cut-off}} = P_{\text{max}} - 3 \quad (12)$$

根据截止功率,计算得到下限截止频率  $f_L$  和上限截止频率  $f_H$ ,则带宽为:

$$fbw = f_H - f_L \quad (13)$$

使用式(13)计算不同丝包线股数、不同长度和不同直径磁棒天线的带宽。如图 18 所示,天线的带宽范围约为 625~665 kHz。天线的带宽随天线长度的增加先急剧增加,后基本保持不变。此外,天线带宽随着丝包线股数的增多而减小,而随磁棒直径的变化相反,如图 19 所示。

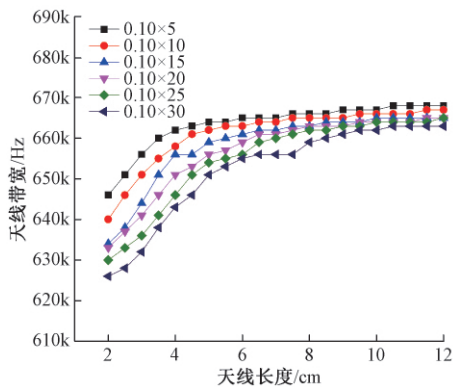


图 18 磁棒直径为 35 mm 时不同丝包线股数天线的带宽

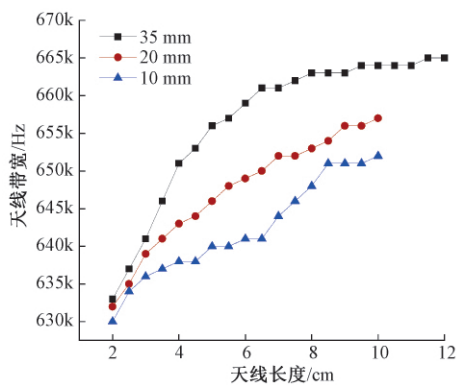


图 19 丝包线股数为 0.10×20 时不同直径磁棒天线的带宽

## 4 结 论

本文在天线采用密绕方式,磁棒导磁率为 1 000,磁棒直径范围为 10~35 mm,长度为 2~12 cm,绕制丝包线股数为 0.10×5~0.10×30 的情况下,对雷电低频磁场探测天线的关键参数进行敏感性试验,得到以下结论:

1)天线的电阻数量级范围是  $10^{-1} \sim 10^1 \Omega$ ,电容的数量级范围是  $10^0 \sim 10^2 \mu\text{F}$ ,电感的数量级范围是  $10^{-1} \sim 10^1 \text{mH}$ ;可以适量增加丝包线股数、天线长度和磁棒直径来增加天线耦合能力和减少天线的损耗。

2)天线的信号  $U$  主要正比于  $B$ ,该信号更能反映闪电的自身特征,更利于反演回击的物理过程。其中天线频响

值的范围约 0.000 1~0.25 V/nT,带宽范围约 610~665 kHz。

3)增加天线长度虽可以增加带宽,但会减少天线的频响值;然而增加丝包线股数的情况则相反;增加磁棒直径能同时增加频响值和带宽,但使得天线的尺寸变大,因此天线长度、丝包线股数和磁棒直径的选择需要折中考虑。在测量 10 kHz 下的信号时,可增大天线长度和减小丝包线股数;10 kHz 以上且满足带宽要求时,可减少天线长度和增加丝包线股数,并在空间和材料允许的情况下选择直径较大的磁棒。

4)在频率较低时,天线的信号主要由天线耦合到的信号决定,而随着频率的增加,天线的损耗影响越来越大,且在频率较高时,天线的信号主要由天线损耗决定。

## 参考文献

- [1] 张义军,吕伟涛,陈绍东,等.广东野外雷电综合观测试验十年进展[J].气象学报,2016,74(5):655-671.
- [2] 李祥超,张其林,陈良英,等.接收机耦合雷电电磁脉冲抑制方法的研究[J].电瓷避雷器,2018(5):39-49.
- [3] 王睿超,邱实,石立华,等.雷电弱磁场宽带测量与标定[J/OL].解放军理工大学学报(自然科学版),2020:1-6 [2020-12-09]. DOI: 10.12018/j.issn.1009-3443.2018.0704002/2018.10.31.
- [4] 周璧华,马洪亮,李皖,等.雷电电磁脉冲三维磁场测量系统研究[J].电波科学学报,2013,28(1):39-44,86.
- [5] XIE H, YANY M, JI L. Mathematical analysis of super low frequency ground loop receiving antennas [J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2013, 7(3): 1087.
- [6] 王雅丽,李维斌,任清华,等.HL-2M 磁场电源测量系统设计与实现[J].电子测量技术,2019,42(18):95-100.
- [7] 陈奇东,刘睿,刘杨,等.低频/甚低频电磁脉冲测量系统研究[J].电波科学学报,2020,35(5):791-798.
- [8] 李祥超,蔡露进,徐晓培,等.同轴中雷电波传输暂态特性的分析[J].电瓷避雷器,2019(1):1-8.
- [9] LYU F, CUMMER S A, SOLANKI R, et al. A low-frequency near-field interferometric-TOA 3-D lightning mapping array [J]. Geophysical Research Letters, 2014,41(22):7777-7784.
- [10] TUMANSKI S. Induction coil sensors—A review[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(3): R31-R46.
- [11] TAN L M, MARBOUTI M, GHANBARI K. Constructing a low-cost ELF/VLF remote sensing to observe tweek sferics generated by lightning discharges[J]. Acta Technica Napocensis, 2015, 56(2): 1.
- [12] 樊艳峰,陆高鹏,蒋如斌,等.利用低频磁场天线遥

- 感测量人工引雷中的初始连续电流[J]. 大气科学, 2017,41(5): 1027-1036.
- [13] WEINERT J L. Remote measurement of ELF/VLF radio emissions by lightning and ground-based transmitters[D]. Durham: Duke University, 2017.
- [14] 过璧君. 磁芯设计及应用[M]. 成都:电子科技大学出版社, 1989:93.
- [15] 银照. 轴对称线圈磁场计算[M]. 北京:中国计量出版社, 1991:151.

#### 作者简介

蔡露进, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为雷电安全防护技术。

E-mail: cailujin\_nuist@163.com

李祥超, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷电安全防护技术。

E-mail: lxcfanglei@163.com

苏静文, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为气象灾害预警。

E-mail: 554910503@qq.com