

中波广播天调网络元器件参数精算与选取

张有科

(榆林广播转播台, 陕西 榆林 719000)

摘要:中波广播因其覆盖范围广,接收端设备简易等特点而被广泛应用,在中波发射系统中,天调匹配网络最重要、最根本的作用就是要使馈线端与发射天线之间实现阻抗匹配,只有阻抗匹配,高频功率才能最大程度不失真的传送到天线,并最高效率的将能量发射到覆盖空间,其次,良好的匹配网络也能保证中波发射机和整个中波发射系统运行安全和稳定。但如果天调网络元器件的选取不合适,可能会造成元器件击穿、发热发烫,影响元器件性能和安全播出,甚至发生火灾等安全事故,文章将介绍天调网络元器件参数精算方法和一些选取规则,作者还将按照本台在用天调网络进行实例计算,以供相关人员在计算与选取过程中参考。

关键词:中波广播;天调匹配网络;元器件参数精算;元器件选取

中图分类号:TN934.81

文献标识码:A

文章编号:2096-9759(2023)06-0230-03

1 引言

中波天调网络的设计过程中,无论用匹配原理计算或使用仿真软件辅助设计,当最终电路确定下来以后,只是确定了其中的电感量 L 和电容容量 C ,紧接着还要计算所有网络元件的额定参数。其中电容元件还要计算出额定耐压和虚功率,电感元件需要计算出两端额定对地电压和流过的额定电流。电感两端额定电压用来确定实际电感元件的绝缘工艺要求,即对地的最小距离和支架材料的绝缘能力要求,而额定电流用来决定电感线圈的线径粗细。

2 天调匹配网络元器件选取与安装原则

2.1 中波天调网络在元器件选取需要注意或遵循以下原则

天调网络中主要构成的元器件有电感、电容等,电容和电感的额定参数是指在特定电路中,在特定载波频率、载波功率和 100% 幅度下各元器件所能承受的电压、电流、虚功率等参数值。

电容元器件的极限参数:包括极限耐压和极限虚功率,指其所能耐受的极限值,出厂时就决定了的参数;电感元件的极限参数:包括对地耐压极限值和高频电流(有效值)极限值。

原则上说,实际选择所需的电感电容元件极限参数时,要优于电路中计算出来的额定参数,并留有余量。按照电感铜管每 1mm 线径可流过 3A 电流的原则,选择合适线圈直径的电感,如线圈直径为 6mm 的电感,最大能承受的电流是 18A。整个电感线圈在特定频率下的电感量应大于网络中计算出的电感量,为方便调试还需配好短路抽头。电容元件所标称的电流、电压及伏安量应至少大于电路在额定功率、指定频率及 100% 调幅度下参数值的 30%。如果单个电容不能满足参数条件,可串并联多个电容进行安装使用^[1]。

2.2 中波天调网络元器件安装原则

为减小或避免相互感应,在一定范围内同一平面最多安装 3 只电感线圈,方向需要三维垂直;电感抽头及引线走在线圈内部,避免感应使得阻抗值波动;剩余电感量较大应短接;天调网络结构复杂,元器件数量比较多时,可依势分层进行安装。

铺设铜带或地线是应沿电流方向行进。铜带采用厚 0.3-0.5mm 宽 60-100mm 以上,并和天调室的零电位地线焊接,保证各点接地都为等电势。

连接元器件的铜线,可根据计算的电流大小值选取合适

铜线,尽量减小可能影响网络稳定的引线电感与分布电容^[2]。

3 天调网络精算方法

3.1 塔底电压、电流和功率计算

铁塔天线的底部电流和电压铁塔的底部电流电压可由下式求出:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R_A}} \quad (1)$$

$$E = \sqrt{\frac{P}{R_A} \times \sqrt{R_A^2 + X_A^2}} \quad (2)$$

式中 P —发射机的载波功率(不计传输损耗),单位为 W ;

R_A —天线的塔底阻抗实部,单位为 Ω ;

X_A —天线的塔底阻抗虚部,单位为 Ω ;

I —天线的塔底电流,单位为 A ;

E —天线的塔底电压,单位为 V 。

中波广播使用调幅波。绝缘子强度和电晕场强应按 100% 调幅时电压的瞬时最大值计算,导线的最大电流是由电流的热效应决定的,应按 100% 调幅时的有效值计算,分别为:

$$I_P = \sqrt{1.5} \times I = 1.23 \times I \quad (3)$$

$$E_P = 2 \times \sqrt{2} \times E = 2.83 \times E \quad (4)$$

3.2 单频率下中波网络的额定参数计算方法

3.2.1 完整断面通过的电流计算方法

良好设计的天调网络,效率很容易达到 90% 以上,所以计算参数时可以先忽略元件损耗。那么,根据能量守恒定律,从发射机输出的功率在经过图 1 中的 A、D、F 点和图 3 中的 A、B、C、D、E、F 等完整断面时,功率大小没有变化。但经过图 1 中 B、C、E 和图 3 中的 G、H 等断面时,功率不会等于发射机输出功率,因为图 1 中 B、C、E 和图 3 中的 G、H 不是完整断面,它们只是发射能量流的一个支流。

对于电路中的完整断点,因为阻抗的虚部只起吞吐功率和调整相位的作用,是不损耗能量的,所以只要知道该点(断开发射机侧的电路以后)向天线看过去的阻抗实部和发射机额定载波功率,就能得到流过该断点的电流有效值。以图 1 中 A 点为例,设其向天线看过去的阻抗为:

$$Z_A = R_A + jX_A, \text{ 则通过 A 点的电流有效值为 } I = \sqrt{\frac{P}{R_A}}$$

收稿日期:2023-02-04

作者简介:张有科(1991-),男,陕西省榆林人,本科,学士,主要研究方向:中波广播发射。

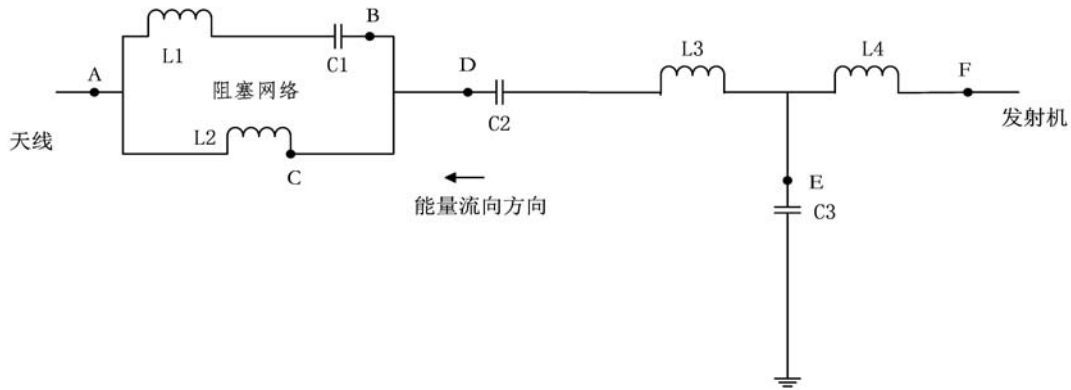


图1 天调网络能量断面图

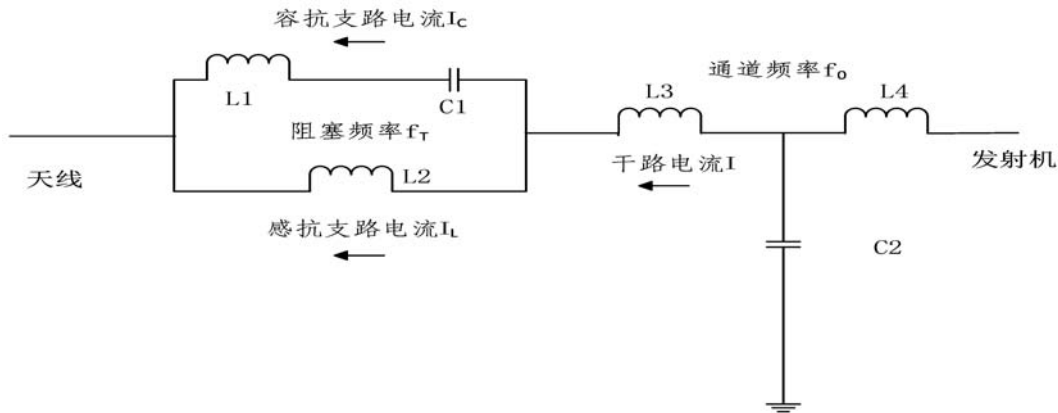


图2 天调网络并联支路电流流向图

上式是考虑了100%调幅度下通过A点支路电流的有效值,该参数用于为支路中的电感元件提供额定电流标准值,以及为支路中的电容元件计算最大虚功率时的电流数值。

$$A \text{ 点对地电压最大峰值为 } E = 2.83 \sqrt{\frac{P}{R_A}} \times \sqrt{R_A^2 + X_A^2}.$$

注意到A点对地的峰值电压与有效值电压并非相差 $\sqrt{2}$ a倍,因为调幅波并非等幅的正弦波。

3.2.2 网络中并联支路的电流计算

如图2中的G、H点,其通过电流的计算不能用完整断面的方法直接计算。但可以用间接方法,先计算出与其等电位的完整断面(如E、F)的对地有效值电压,然后除以该支路的电抗值,就得到了该支路的电流有效值。

3.2.3 网络中阻塞单元元器件电流的计算

图2中,L、C组成的阻塞单元其阻塞的频率是 f_T ,但在通道本频 f_0 的激励下会流过电流 I_L ,如图中所示。图中的干路电流 I 可以用前述的完整断面法求出。通过电抗、电抗并串联及伏安特性等计算公式可推导出容抗支路电流和感抗支路电流:

$$I_L = \frac{1}{1 - (\frac{f_0}{f_T})^2} \times I \quad (5)$$

$$I_C = \frac{1}{1 - (\frac{f_T}{f_0})^2} \times I \quad (6)$$

从以上计算式 I_C , I_L 中可以看到,阻塞单元中的电流大小与元件参数无关,只与阻塞频率与本频频率之比及干路电流有关。同时, I 前面的系数可能得到负数值,那只是说明该电流的瞬时相位与图中所示相反而已。

3.2.4 电感两端之间额定电压计算(单频激励)

单频激励下,应先计算出电感元件在该频率的载波状态

下的电流有效值 I_{L0} 然后乘上其电抗值得到载波状态下的电压有效值,其1.414倍为电压峰值,再乘2得到100%调制度下的电感两端额定电压最大值 U :

$$U = 2.83 \times I_{L0} \times 2\pi f L \quad (7)$$

3.2.5 电容元件额定耐压和虚功率的计算

网络调配电容元件除了电容量外,还有两个参数:额定耐压和虚功率(伏安量)。

电容额定耐压参数计算:先求出载波状态下流过电容的电流有效值,再乘该电容的容抗值(在给定频率下),最后乘上2.83倍得到100%调制下电容两端的额定电压: $U_C \approx 2.83 \times I_{C0} \times \frac{1}{2\pi f C}$ 。

电容虚功率的计算:100%调制下的电容吞吐功率(虚功率),为载波状态下吞吐功率的1.5倍: $P_C \approx 1.5 \times I_{C0}^2 \times \frac{1}{2\pi f C}$ 。

3.2.6 单频率激励下网络电感的电流有效值与线径关系精确算法

电感元件能承受多大的高频电流,不仅与线径大小有关,还与信号频率、线圈体积有关,而且与天调室的尺寸和外墙对阳光的吸收率等外部吸、散热环境有关。由于高频趋肤效应的存在,在同样线径的电感中流过同样大小的电流情况下,中波最高频率(1602kHz)与最低频率(535kHz)所产生的热量之比为1.73倍。

电感元件之所以承受电流有个极限,究其原因就是高频电流流过线圈时会发热,使线圈温度上升,如果不加限制,温升会造成灾难性后果,例如使元件变形而改变原来的电感量、加速铜管氧化、烧毁支撑胶木板等等。

因此,有必要引入一个参数来衡量高频电流所导致的电感发热程度,那就是热功率密度 W ——单位电感线圈表面积的发功率。并设 W_0 为临界热功率密度,只要热功率密度超过了 W_0 ,就认为高频电流超限了。从这一概念出发,计算过程如下:

$$\text{由 } h = \frac{k}{\sqrt{F}} \text{ 及 } W_0 = \frac{I^2 \rho \frac{L}{\pi D^2}}{\pi^2 D^2 k} = \frac{I^2 \rho \sqrt{F}}{\pi^2 D^2 k} \text{ 得 } I = \frac{\pi \sqrt{\frac{k W_0}{\rho}}}{\sqrt{F}} \times D$$

$$\text{令 } M = \pi \sqrt{\frac{k W_0}{\rho}} \text{ 则 } I = M \frac{D}{\sqrt{F}},$$

D 为电感的铜管直径, L 为电感线圈铜管长度, I 为极限高频电流有效值, F 为高频信号频率, k 是由材料电导率和介电常数决定的常数, h 为趋肤深度, M 是一个只与材料特性有关的常数。

上式表明, 电感线圈的高频电流限值, 与线圈直径成正比, 与频率四次方根成反比, 设在频率 f_0 下, 线径为 D_0 的电感线圈其电流限值为 I_0 , 则由

$$I_0 = M \frac{D}{\sqrt{f_0}} \text{ 得 } I = \frac{I_0 \sqrt{f_0}}{D_0} \times \frac{D}{\sqrt{F}} \quad (8)$$

其中 D 的单位: mm, F 的单位: kHz, I 的单位: A

根据上式, 我们可以很方便地计算出, 在给定线径 D 下各个频率点所允许的极限电流数值。

3.3 多频共塔中的通道隔离阻塞单元和公共预调部分的元件极限参数选择

3.3.1 多频共塔中, 免不了要使用通道隔离阻塞单元

这些阻塞单元中, 主要流过两种不同频率的电流: 一是所在通道的本频电流, 一是所阻塞的频率在天线端的电压全部加在其上(其它电路部分的分压可以忽略)所引起的电流。换句话说, 每个通道中, 来自其它共塔频率的电压都几乎由该通道中对应的阻塞单元全部承担。另外, 公共部分(预调)的元件也是同时流过不同频率的高频电流。

这些同一个电抗元件同时流过不同频率高频电流的情况, 其极限参数选择原则是: 电容元件在多频率激励下的极限参数选择极限耐压选择: $U_{CM} > U_{C1} + U_{C2} + \dots + U_{CN}$ (其中 U_{C1} 、 U_{C2} 等是各个激励频率单独计算时对应的额定耐压值); 电容元件的极限耐压值, 要大于所有频率共同激励下的最大叠加值。极

限虚功率选择: $P_{CM} > P_{C1} + P_{C2} + \dots + P_{CN}$ (其中 P_{C1} 、 P_{C2} 等是各个激励频率单独计算时对应的额定虚功率值), 电容元件的极限虚功率值, 要大于所有频率共同激励下的最大叠加值。

3.3.2 电感元件在多频率激励下的极限电流选择

多频率激励下电感元件的总额定电流, 不能像耐压和虚功率那样直接由各个频率单独激励下的额定数值相加得到。

耐压限值来源于绝缘能力的限制, 而电流限值来源于发热功率的限制。因此, 多频率激励下对总电流额定值的影响, 只能在发热功率上叠加, 而不是直接的电流相加。实际上, 发热功率是与电流的平方成正比, 而不是简单的线性关系。

之前我们讨论了单频率激励下电感的发热量计算, 并因此导出了电感电流限值的精确算法。不同频率的信号电流都在电感上产生了热功率的贡献, 只要所有的热功率贡献之和不超过电感元件的热功率限值, 就不会产生电感过热问题。在这一原则下, 电感在多信号激励下不过热的条件如下:

$$\frac{I_{F1}^2}{I_{F10}^2} + \frac{I_{F2}^2}{I_{F20}^2} + \dots + \frac{I_{FN}^2}{I_{FN0}^2} \leq 1 \quad (9)$$

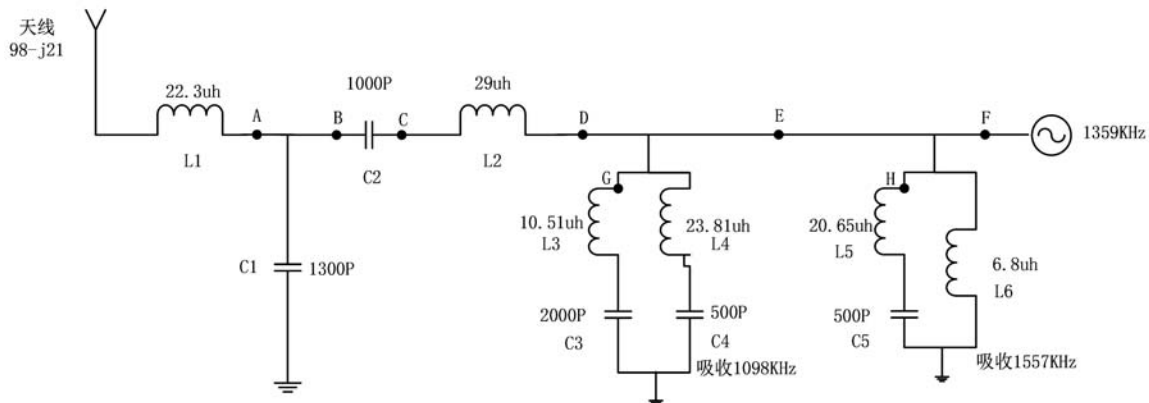
I_{FN} : 电感元件在第 N 个频率信号单独激励下的额定电流有效值, 从设计图上计算出来。

I_{FN0} : 电感元件在第 N 个频率信号单独激励下的电流限值, 计算方法如前述。

上式左边各项, 实际上是各频率信号所贡献的热功率在电感元件所允许的最大热功率限值中的占比。各电流以平方形式计算, 是因为热功率与线圈的热损耗电阻成正比, 同时与流过电流的平方成正比。

根据前述, 选择电感元件的极限电流实际上就是选择电感线圈的线径。实际操作上, 就是先计算出所有频率单独激励下的额定电流有效值, 然后选择一个较小的线径计算出在所有需要频率下的电流限值, 如果不能满足条件, 则加大线径重新计算直到满足条件为止。

4 本台 1359KHz 天调网络元器件精算实例



1359KHz 下各点阻抗: A: $98+j169.4\Omega$ B: $50-j130.6\Omega$ C: $50-j247.7\Omega$ D: $50-j0.02\Omega$ E: $50-j0.02\Omega$ F: $50-j0.02\Omega$

图 3 本台天调网络图

4.1 塔底电压、电流计算

载波时 (10KW)

$$\text{天线电流: } I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{10000}{98}} = 10.1A$$

$$\text{天线电压: } U = I \times |Z| = 10.1 \times \sqrt{98^2 + 21^2} = 1012.3V$$

M=100%时

$$I = 1.23 \times 10.1 = 12.423A \quad (10)$$

$$U = 2.83 \times 1012.3 = 2864.8V \quad (11)$$

4.2 各点或各元器件的电压电流计算

文章已论述天调网络电压、电流计算方法一般可分为完整断面与非完整断面, 故此处实例计算只在完整断面与非完整断面各选取一个点进行计算, 其他点处参数可参考相同类型点的计算。

C 点、D 点和 E 点处在工作频率下的阻抗都为 50, 根据计算公式可得: (下转第 237 页)

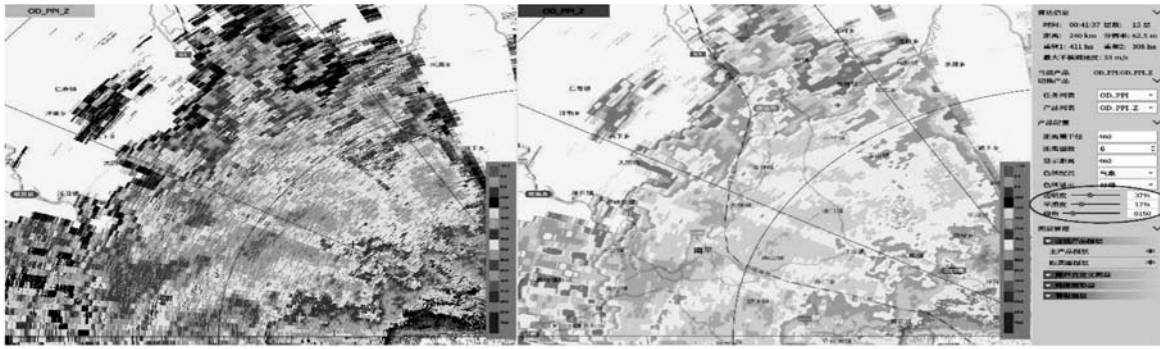


图8 图像渲染效果

系统在不同缩放级别下的绘制采用实时映射重绘的方式进行,展现精细到具体库的数据可视化结果,数据叠加高精度GIS信息时,完成标准折射大气下的曲率订正以及投影转换,保证数据真实性、可靠性,在产品端充分展现相控阵天气雷达的高分辨率探测效果。

得益于GPU高效数据处理,按需产品在常规着色渲染的基础上,可以进行任意色例的切换、透明度的调整以及平滑度的调整,都为毫秒级响应。具体在业务使用中,不同色例的切换,有利于不同系统或部门间方便进行结果比对;透明度的调节可叠加高精度GIS信息,精准获取天气发生的具体位置,满足在预警预报业务中的精细化要求;平滑度的调节切换,可满足不同应用场景下的多变需求,如在数据分析中,展现真实可靠的原始数据,而在气象服务产品发布中,展示更美观的数据结果。

4 结语

本文基于相控阵天气雷达对后端产品处理和显示的需求,阐述了按需产品系统的软件总体设计和主要功能模块的设计,通过实际在业务中使用的情况,可见按需产品系统可以更加高效的满足用户对相控阵天气雷达基本产品的灵活使用需求,可以更加友好便捷实现相控阵天气雷达多仰角大体量观测数据可视化,充分发挥了相控阵天气雷达高精度探测能力。按需产品系统主要针对的是基本产品,在产品系统后续其他产品的处理、绘制显示过程中,还需结合实际需求和产品特性,不断探索。希望本系统的设计开发可以为相控阵天气雷达后端数据应用提供更多思路,为未来相控阵天气雷达的数据应

用和产品系统的设计开发提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 刘思思.某相控阵天气雷达信号处理系统的研究[D].西安电子科技大学.
- [2] 李柏,古庆同,李瑞义,等.新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J].气象,2013,39(3):16.
- [3] 俞小鼎.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].气象出版社,2006.
- [4] 张光义.相控阵雷达的技术特点及关键技术[J].电子科技导报,1996(7):2-4.
- [5] 张光义.相控阵雷达原理[M].国防工业出版社,2009.
- [6] 张越.相控阵技术在天气雷达中的应用[J].现代雷达,2003,25(12):3.
- [7] 惠良,孙金华,陈晓东.新一代天气雷达产品软件RPG,PUP介绍[C].江苏省气象学会第七届学术交流会.2011.3-10.
- [8] 田程,雷登林,彭茜,等.双偏振天气雷达PUP地图细化的设计和实现[J].中低纬山地气象,2022(001):046.
- [9] 刘一谦.多普勒天气雷达PUP产品共享系统设计与实现[D].电子科技大学.2015.2-3.
- [10] 张杰,张思豆,代华.多普勒天气雷达PUP产品强天气监测预警系统设计[J].暴雨灾害,2018,37(5):7.
- [11] 田程,马传成,倪雷,等.CINRAD/CD雷达PUP和RPG的安装方法和技巧[J].贵州气象,2016,40(4):4.
- [12] 张曦,黄兴友,刘新安,等.北京大兴国际机场相控阵雷达强对流天气监测[J].应用气象学报,2022,33(2):192-204.

$$(上接第232页) \quad I_C = I_D = \sqrt{\frac{10000}{50}} = 14.14A \quad (12)$$

$$I_{Cmax} = I_{Dmax} = 1.23 \times 14.14 = 17.39A \quad (13)$$

$$U_{C2max} = 2.83U_{C2} = 2.83 \times I_C \times |X_C| = 2.83 \times 14.14 \times \sqrt{50^2 + 247.7^2} = 10084V \quad (14)$$

(根据C₂处电压、电流及虚功率选取合适电容)

$$U_D = U_E = I_D \times |Z_D| = 14.14 \times 50 = 707V \quad (15)$$

$$U_{Dmax} = U_{Emax} = 2.83 \times 707 = 2001V \quad (16)$$

$$\varnothing_{L2} = \frac{17.39}{3} = 6mm \text{ (实际可选取线径为10mm的电感线圈)}$$

$$I_{L3} = I_{L4} = \frac{U_{Ex}}{|X_{1359}|} = \frac{707}{31.1} = 22.73A \quad (17)$$

$$I_{L3max} = I_{L4max} = 1.23 \times 22.73 = 28A \quad (18)$$

$$\varnothing_{L3} = \varnothing_{L4} = \frac{28}{3} = 9.3mm \text{ (实际可选取线径为20mm的电感线圈)}$$

$$U_{C3max} = 2.83U_{C3} = 2.83 \times I \times |X_{C3}| = 2.83 \times \frac{707}{31.1} \times 367.9 = 2946V \quad (19)$$

$$U_{C4max} = 2.83U_{C4} = 2.83 \times I \times |X_{C4}| = 2.83 \times \frac{707}{31.1} \times 1467.67 = 11784V \quad (20)$$

(根据C₃、C₄处电压、电流及虚功率选取合适电容)

5 结语

总之,要做好中波广播的安全播出,天调匹配网络是不可忽视的一个系统,只有进行参数精算后选用合适的元器件,天调网络才能最高效率的将能量辐射到覆盖范围内,完成安全高效的播出工作。另外在新天调网络投入工作前应进行一段时间的试运行,期间观察各元器件状态,确保各器件工作状态正常,日常维护时也应按期对天调网络进行巡查,及时排查隐患,保证信息安全高效传送。

参考文献:

- [1] 苏玉.浅谈中波广播发射机的运行环境[J].才智,2012,(14),2012-05-15,330.
- [2] 颜大健.中波天线调配网络的设计要求及元器件选取[J].西部广播电视,2004,(11),2004-11-28,39-41.