

基于有效幅值的电磁兼容预测模型

张涛¹ 吴国庆¹ 杨伟²

(1. 海军航空工程学院青岛校区 青岛 266041; 2. 海军青岛雷达声纳修理厂 青岛 266100)

摘要: 为了对某探测系统不同工况下的电磁兼容性进行准确、快捷的预测,提出了基于有效幅值的电磁兼容预测模型。首先,根据该探测系统的工作原理定义了有效幅值,并利用配谐电路和带通滤波电路的幅频响应给出了有效幅值的计算方法。然后,用高度为敏感度阈值的平面去切割有效幅值的三维曲面,得到电磁兼容的分界线。最后,利用电磁测量传感器对辐射干扰进行直接测量,由辐射干扰的频率和幅度所决定的坐标,判断是否电磁兼容。实验验证了该预测模型的准确率为97.4%。

关键词: 电磁兼容;预测模型;有效幅值

中图分类号: TN03 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Electromagnetic compatibility prediction model based on effective amplitude

Zhang Tao¹ Wu Guoqing¹ Yang Wei²

(1. Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China;

2. Naval Qingdao Radar and Sonar Mending Factory, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aiming to predict the electromagnetic compatibility (EMC) of a detection system on different working status correctly and quickly, the EMC prediction model based on effective amplitude is put forward. Firstly, according to the working principle of detection system, effective amplitude is defined, and the computation method of effective amplitude is given by amplitude-frequency response of matching circuit and bandpass filter circuit. Then, the three dimensional surface of effective amplitude is incised by the plane at the height of sensitivity, and the EMC boundary is obtained. Lastly, radiated interference is measured by electromagnetic measuring sensors. The conclusion that the detection system is electromagnetic compatible or not can be drawn with the help of the coordinate, which is decided by frequency and amplitude of radiated interference. Accuracy rate of the prediction model is 98.6% by experiment.

Keywords: electromagnetic compatibility (EMC); prediction model; effective amplitude

0 引言

某探测系统利用电磁波进行主动探测,由于其自身带有灵敏的电磁接收装置,系统内其他工作部件产生的辐射干扰很容易影响其正常工作,甚至会造成系统本身的电磁不兼容,使探测系统出现误判。因此,为了更好地把握该探测系统的工作性能,并及时发现潜在的干扰源,对该系统不同工况下的电磁兼容性进行预测是十分必要的。

国内外学者已经提出了很多电磁兼容性的预测方法、预测模型和预测软件^[1-9],通常首先建立干扰源、敏感设备和干扰传播耦合的数学模型,然后采用某种判决准则判断是否电磁兼容。由于该探测系统复杂的结构和狭小的密闭空间,各工作部件产生的辐射干扰必然会发生反射和散射等物理现象,所以电磁接收装置所接收到的实际上是一个

复杂的叠加干扰,干扰源和干扰的传播耦合难以用常规的电磁理论建立数学模型进行分析和推算。本文采用直接测试的方法获得电磁接收装置处的辐射干扰强度,然后根据探测系统的目标识别原理,重点对敏感设备,即该探测系统的电磁接收装置建立相应的数学模型,以实测数据和数学模型预测探测系统的电磁兼容性。

1 电磁兼容预测模型

该探测系统由发射装置发射一定频率、一定功率的电磁波,如果目标在有效探测距离范围内,电磁接收装置将接收到的目标反射信号送至信号处理电路,进行放大、滤波等信号处理,对目标信号的频率、幅值、相位和时间特性进行鉴别,最后通过门限电路与信号的幅值进行比较,判定是否为有效目标信号。因此,对目标信号不同参数的鉴别最后

都转化为对信号幅值的调整,即如果接收信号的参数与目标信号的理想参数相同时,信号能通过正常的放大、处理并使幅值达到或超过门限值;反之接收信号的幅值将受到不同程度的衰减,以至于小于门限值,从而达到剔除干扰的目的。

把信号处理电路处理后最终输入门限比较电路的信号幅值定义为有效幅值,记为 U 。尽管探测系统要对信号多个参数进行综合鉴别后,才能做出判定结果,但是相比而言,信号的频率和幅值是最重要的两个参数。仅考虑频率和幅值对有效幅值的影响,不考虑其他参数对有效幅值的影响,因此有效幅值可看作幅值和频率的函数。把门限电压 U_T 定义为电磁接收装置的敏感度阈值,如果 $U > U_T$,则探测系统将出现误判,该系统电磁不兼容;如果 $U < U_T$,则干扰不会影响探测系统的正常工作,该系统电磁兼容。

为了更直观的描述该系统的电磁兼容性,把频率 f 和幅值 A 作为两个变量,绘制出有效幅值 $U(f, A)$ 的三维曲面,有效幅值在高度为 h 下的截面如图 1 所示,在该截面内得到一条不闭合的曲线^[10]。若 $h = U_T$,则该曲线为电磁兼容与电磁不兼容的分界线,若辐射干扰 $u(f, A)$ 位于该曲线之下,则辐射干扰不会对系统造成影响,若辐射干扰 $u'(f', A')$ 该曲线之上,则辐射干扰将造成系统误判。因此该曲线之下的区域为电磁兼容区域,之上的区域为电磁不兼容区域。利用有效幅值建立的电磁兼容预测模型,只须测得系统不同工况下辐射干扰的频率和幅度,然后由二者所决定的坐标即可判断系统是否电磁兼容。

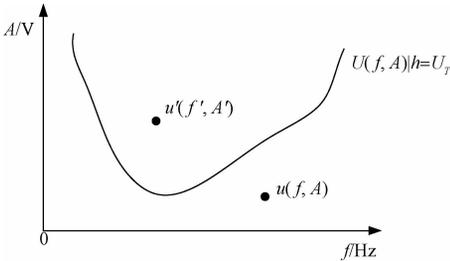


图 1 有效幅值在高度为敏感度处的截面

2 有效幅值的计算

基于有效幅值的电磁兼容预测模型的建立,关键是求取有效幅值的函数表达式,有效幅值可按式(1)进行计算。

$$U(f, A) = K \cdot A \cdot K_f \quad (1)$$

式中: K 为信号处理电路的增益, A 为信号的幅值, K_f 为归一化的幅频响应,主要由电磁接收装置的配谐电路和带通滤波电路决定,由于两者以串联方式连接,因此, K_f 的计算公式为:

$$K_f = K_{f1} \cdot K_{f2} \quad (2)$$

式中: K_{f1} 和 K_{f2} 分别为配谐电路和带通滤波电路的归一

化幅频响应。

配谐电路主要就是根据电磁接收装置接收线圈的电感选配合适的电容,构成 LC 滤波电路,对接收信号进行初步滤波,配谐电路如图 2 所示。

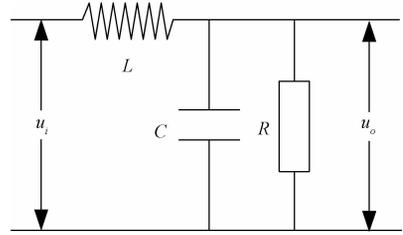


图 2 电磁接收装置的配谐电路

则配谐电路的归一化幅频响应为

$$K_{f1} = \frac{1}{\sqrt{Q_1^2 [1 - (f/f_0)^2]^2 + (f/f_0)^2}} \quad (3)$$

带通滤波电路的归一化幅频响应为^[10]

$$K_{f2} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_2^2 (f/f_0 - f_0/f)^2}} \quad (4)$$

在式(3)和式(4)中: f 为信号的频率, f_0 为目标信号的理想频率,也即中心频率, Q_1 和 Q_2 分别为配谐电路和带通滤波电路的品质因数。

由式(2)~式(4)即可求得探测系统信号处理电路的归一化幅频响应,其中 f_0 、 Q_1 和 Q_2 均可由该探测系统的技术手册查得,则利用上述数学模型所得的归一化幅频响应如图 3 所示。

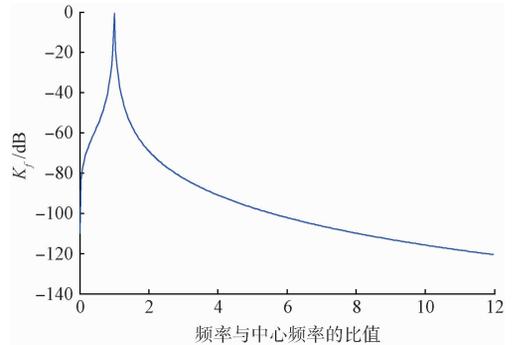


图 3 信号处理电路的归一化幅频响应

把有效幅值 $U(f, A)$ 除以门限电压 U_T , 然后对该比值取 20 倍的以 10 为底的对数,定义为有效幅值-门限电压比,用 $p(f, A)$ 表示,单位为 dB,即

$$p(f, A) = 20 \lg \left(\frac{U(f, A)}{U_T} \right) = 20 \lg \left(\frac{K \cdot A}{U_T} K_f \right) \quad (5)$$

把变量 f 和 A 做如下坐标转换:

$$\begin{cases} x = \frac{f}{f_0} \\ y = 20 \lg \left(\frac{K \cdot A}{U_T} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式(5)可以改写为

$$p(x,y) = 20\lg[K_f(x)] + y \quad (7)$$

式中： $K_f(x)$ 是变量 x 的函数，可把 $x = \frac{f}{f_0}$ 代入 K_f 的表达式求得。

利用式(6)所示的坐标转换和式(7)所示的函数关系，绘制该探测系统有效幅值-门限电压比的三维曲面，如图4所示。

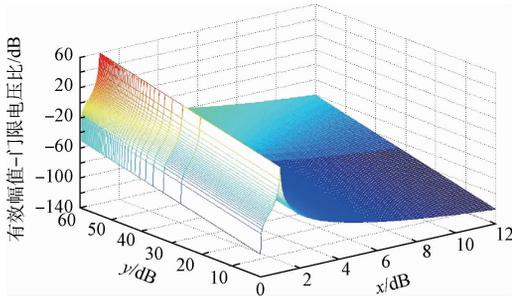


图4 有效幅值-门限电压比的三维曲面

由图4可得，信号的频率越偏离中心频率，信号的幅值越小，有效幅值-门限电压比越小，与上述信号处理的理论分析相吻合。然后用 $U(f,A) = U_T$ ，即 $p(x,y) = 0$ 的截面去切割所得到的三维曲面，所得到的电磁兼容分界线如图5所示。

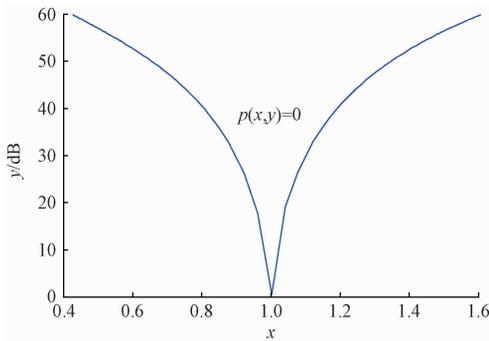


图5 探测系统的电磁兼容分界线

由于信号处理电路中采用了大量的有源器件，设有源器件的工作电压为 U_0 ，当输入有源器件的信号电压大于 U_0 时，有源器件将达到饱和，使信号处理电路不能正常工作，将造成探测系统的电磁不兼容。因此，在电磁兼容的情况下，干扰的幅度应该满足 $K \cdot A \leq U_0$ ，即

$$y \leq 20\lg\left(\frac{U_0}{U_T}\right) \quad (8)$$

利用上述约束条件对图5所得的电磁兼容分界线进行修正，如图6所示。

则图6所示的实线即为该探测系统电磁兼容分界线，分界线之下的区域为电磁兼容区域，分界线之上的区域为电磁不兼容区域。

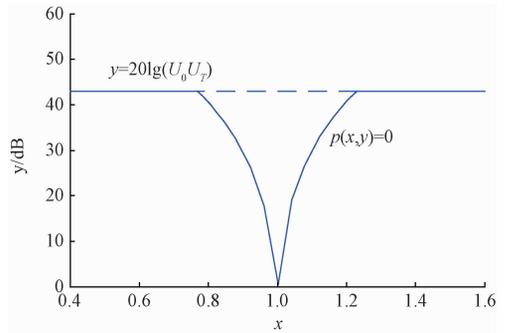


图6 修正的电磁兼容分界线

3 实验分析

为了避免对于干扰源和干扰传播耦合的建模，本文利用实验测试的方法直接采集数据。把特定的电磁测量传感器置于探测系统的电磁接收装置处，并且使二者的接收方向保持一致。电磁测量传感器实物如图7所示。



图7 电磁测量传感器

电磁传感器是一种把通过测量线圈的磁场强度转化为感应电动势的传感器，其磁电转换关系可表示为

$$E = \mu \cdot \omega_0 \cdot S \cdot N \cdot H \quad (9)$$

式中： E 为感应电动势， H 为磁场强度， ω_0 为磁场信号的角频率， μ 、 S 和 N 分别为电磁传感器测量线圈的磁导率、横截面积和匝数。

对于同一点处的磁场强度和频率是一定的，因此，特定的电磁测量传感器和探测系统电磁接收装置在同一点处测得的电压信号频率相同。但由于所采用的电磁传感器与探测系统本身的电磁接收装置并不相同，根据式(9)可知，二者测得的幅值只相差一个比例系数 K_e ，即

$$K_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\mu_1 S_1 N_1}{\mu_2 S_2 N_2} \quad (10)$$

电磁测量传感器和探测系统电磁接收装置的磁导率、横截面积和匝数均已知，由式(10)即可求得二者测量值之间的比例系数 K_e ，从而可以利用电磁测量传感器的测量值推算探测系统电磁接收装置的测量值，得到电磁接收装置

在不同工况下接收的辐射干扰的强度。

现利用电磁辐射器在该探测系统附近辐射一定频率和一定强度的电磁波,利用式(6)求取频率和幅值所决定的坐标,进而利用图6所得的电磁兼容分界线,判断该信号是否是有效目标信号,并且与该探测系统实际的判决结果进行比较。不断调整辐射信号的频率和强度,进行1000次实验,本文所提出的模型对电磁兼容性的预测准确率为97.4%。因此,基于有效幅值的电磁兼容预测模型可以实现对该探测系统电磁兼容性的准确预测。

4 结 论

本文提出了基于有效幅值的电磁兼容预测模型,利用高度为敏感度阈值的平面切割有效幅值的三维曲面,得到电磁兼容与电磁不兼容的分界线,只需测得不同工况下辐射干扰频率和幅度,然后由二者所决定的坐标,即可判断该工况的电磁兼容性,从而避免了复杂的建模计算,实现了对该探测系统电磁兼容性的快速预测。实验验证本文所提出的预测模型准确性高达97.4%。

参考文献

- [1] 郑军奇. EMC电磁兼容设计与测试案例分析[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [2] 区健昌. 电子设备的电磁兼容性设计理论与实践[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [3] 郝晓军,陈翔,闫京海. 基于预测分析的电磁兼容数据

库设计[J]. 电子测量技术,2015,38(6):122-124.

- [4] 包贵浩,苏东林,戴飞,等. 飞机油量表电磁兼容半实物仿真预测平台设计[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(2):152-158.
- [5] 郭艳辉,李子森,杨宝山. EMC预测试软件在测试整改中的应用及实现[J]. 国外电子测量技术,2011,30(3):54-56,63.
- [6] 李圭源,张厚,殷雄,等. 基于作用距离衰减的雷达间电磁兼容模型[J]. 电讯技术,2010,50(3):49-53.
- [7] 夏惠诚,毛建舟. 舰艇作战系统电磁兼容的综合预测[J]. 火力与指挥控制,2005,30(8):46-49.
- [8] 孙翱,王之海. 基于分阶段筛选的雷达装备电磁干扰预测方法[J]. 舰船电子工程,2009,29(7):185-187.
- [9] 李晓箭,康锐,戴飞,等. 一种基于可靠性数学的电磁兼容性分析方法研究[J]. 遥测遥控,2010,31(1):65-70.
- [10] 赵惠昌,周新刚. 基于模糊函数切割法的线性调频连续波引信抗干扰性能测度[J]. 兵工学报,2009,30(12):1591-1595.
- [11] 张亚,黄克平. 有源模拟带通滤波器的设计[J]. 电子科技,2009,22(1):9-12.

作者简介

张涛,工学博士,讲师,研究方向为舰面航空保障。
E-mail:zt6130@163.com