

抑制辐射骚扰的磁环特性建模研究及其应用

孙明辉^{1,2}, 王永安^{1,2}, 赵 阳^{1,2}, 邱 巍³

(1.南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学江苏省电气装备与电磁兼容工程实验室,江苏 南京 210023)

(3.江苏苏美达成套设备工程有限公司,江苏 南京 210018)

[摘要] 介绍了辐射骚扰机理和磁环抑制辐射骚扰原理,建立了磁环抑制辐射骚扰模型,运用毕奥—萨伐尔定律推导出磁环抑制电磁干扰的理论表达式,分析并使用 MATLAB 仿真了磁环形状、磁导率对抑制效果的影响。结果表明,电磁干扰抑制效果随磁环长度的变化快于随外径的变化,抑制效果的变化趋势与磁导率成正相关。使用 3 m 电半波暗室针对磁环形状、磁导率对抑制效果的影响作了实验分析,仿真结果与实验结果一致。

[关键词] 辐射骚扰机理,磁环模型,毕奥—萨伐尔定律,实验分析

[中图分类号] TM277 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)04-0062-08

Research and Application of Magnetic Ring Characteristic Modeling for Suppression of Radiation Disturbance

Sun Minghui^{1,2}, Wang Yongan^{1,2}, Zhao Yang^{1,2}, Qiu Wei³

(1.School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Engineering Laboratory of Electrical Equipment Electromagnetic Compatibility, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3.Sumec Complete Equipment and Engineering Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

Abstract: This paper introduces the mechanism of radiation disturbance and the principles of magnetic ring restraining radiation disturbance, establishes the model of magnetic ring restraining radiation disturbance, deduces the theoretical expression of magnetic ring restraining electromagnetic interference by using Biot-Savart law, and analyzes and simulates the influence of magnetic ring shape and magnetic permeability on restraining effect by MATLAB. The results show that the electromagnetic interference suppression effects changes faster with the magnetic ring length than with the outer diameter, and the change trend of the suppression effect is positively correlated with the magnetic permeability. The influences of magnetic ring shape and magnetic permeability on the suppression effect are experimentally analyzed by using 3m anechoic chamber. The simulation results are consistent with the experimental results.

Key words: radiation disturbance mechanism, magnetic ring model, Biot-Savart law, experimental analysis

随着科学技术的发展,电子系统和设备正向高频率、宽频带、高集成度、高可靠性、高精度和高灵敏度方向发展。电磁干扰的影响日趋严重,因此,有必要进行电磁兼容^[1-2]研究,以降低电磁环境对电子设备的影响。

目前,针对电子设备的辐射电磁干扰噪声问题,为提高电子系统内部和外部的相互兼容性和安全可靠,大部分学者选择从电磁场分析角度进行研究。Hsieh 提出了射频电路乱真发射的快速分析方法^[3]; Ricciardi 提出了天线与散射辐射的近远场转换公式,并结合近场测量得到辐射目标特征^[4]。在电磁干扰(EMI)噪声抑制方面, Wang Shuo 等学者分析 EMI 滤波器中的寄生参数耦合问题,并在 EMI 滤波器电容间集成了消除电感^[5];任小永等学者基于电感电流脉动对变换器的影响,提出了一种损耗最小化的输出电感设计方法^[6];王世山等学者提出了利用两个同侧耦合电感器等效出“负电感”和在电感器中心处连接电容器等效出“负电容”的方法^[7]。

电子设备中,辐射源数量较多,辐射噪声产生机理错综复杂。磁环作为一种使用简单且安装方便的元

器件,研究其特性和应用对于抑制电磁辐射骚扰意义重大.

1 辐射骚扰噪声机理

辐射电磁干扰噪声由两种噪声分量组成,即差模辐射噪声和共模辐射噪声.

1.1 差模辐射噪声模型

如图 1 所示,差模辐射噪声是电流流过电路导体形成的环路产生的,主要由无法良好控制的大信号环路引起,是电路正常工作的结果,也称“磁偶极子辐射”.

自由空间中测得的电场幅值为^[8]:

$$E_{DM} = 131.6 \times 10^{-16} (f^2 A I_{DM}) \left(\frac{1}{r} \right) \sin \theta, \quad (1)$$

式中, E_{DM} 为差模电场强度 (V/m); f 为差模辐射噪声频率 (Hz); A 为环的面积 (m^2); I_{DM} 为小环形天线载有的差模噪声电流 (A); r 为天线在远场中的距离 (m); θ 是观察点和环路平面垂直线间的夹角 (rad); 131.6×10^{-16} 是描述自由空间介质特性的常数.

式(1)是一个小环位于自由空间且周围没有反射时得出的结果. 对于大部分电子产品而言,辐射发射的测量场所为开阔场地或暗室,这个反射面可增大测量的电场幅值 6 dB (或 2 倍) 甚至更多. 因此式(1)必须乘以系数 2 用以修正地面反射. 同时,假设测试点与环平面 r 的夹角 $\theta = 90^\circ$,在开阔场地上可将式(1)改写为:

$$E_{DM} = 2.632 \times 10^{-14} \frac{f^2 A I_{DM}}{r}. \quad (2)$$

式(2)表明, E_{DM} 与 I_{DM} 、 A 和 f^2 成正比,与测试距离成反比. 当电子产品中的差模辐射需要抑制时,电路中的环面积、噪声频率、测试距离均很难改变,此时改变电路中的噪声电流 I_{DM} 是最可行的方法,在电源线缆加磁环是一种较好的方法.

1.2 共模辐射噪声模型

电路中共模辐射是电路的寄生现象,往往难以控制. 共模辐射噪声由导线上的压降产生,如图 2 所示,流经接地阻抗的差模电路在数字逻辑接地系统中产生一个压降. 电缆连接到系统时由于非良好接地或接地反射电位成为一根天线,辐射以电场为主.

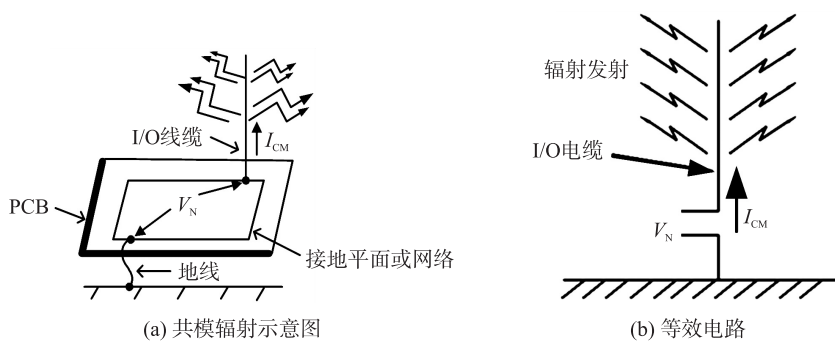


图 2 来自系统电缆的共模辐射

Fig. 2 Common mode radiation from system cables

图 2 所示是共模辐射最常见的形式. 对于一个长度为 l 的短偶极子天线,离源距离为 r 处的远场中测得电场强度的幅度为^[9]:

$$E_{CM} = \frac{4\pi \times 10^{-7} (f I_{CM}) \sin \theta}{r}, \quad (3)$$

式中, E_{CM} 为共模电场强度 (V/m); f 为共模辐射噪声频率 (Hz); I_{CM} 为线缆共模电流 (A); l 和 r 的单位为 m; θ 是观测点与天线轴向间的角度. 最大场强出现在垂直于天线轴线的方向,即 $\theta = 90^\circ$. 在垂直于天线轴线方向 ($\theta = 90^\circ$) 上的距离 r 处,式(3)可改写为:

$$E_{CM} = \frac{12.6 \times 10^{-7} (f l I_{CM})}{r} \quad (4)$$

式(4)表明,共模辐射 E_{CM} 与噪声频率 f 、天线长度 l 及天线上的共模电流 I_{CM} 大小成正比,与测试距离 r 成反比. 由于噪声频率无法预测与控制,系统的天线长度也不能轻易改变,减小共模辐射的关键在于限制共模电流 I_{CM} 的值,此时线缆电流成为系统中容易改变的参数.

2 辐射骚扰噪声抑制方法

从式(2)可以看出,共模辐射与电缆的长度 l 、共模电流的频率 f 和共模电流强度 I 成正比,与测试距离 r 成反比. 共模辐射模型等效电路如图 3 所示,其中, V_{CM} 为共模辐射电压, I_{CM} 为共模辐射电流, Z_{CM} 为线路等效阻抗.

由图 3 可知,减小共模、差模辐射应分别降低 f 、减小 I 、缩短 L , 而限制共模电流 I 是减小共模辐射的基本方法. 为此,需使用与电缆串联的高共模阻抗,即增加磁环. 增加磁环可增大 Z_{CM} , 共模辐射电流 I_{CM} 减小,从而抑制共模辐射.

同理,由式(4)可知,通过减小信号电流强度的方法可抑制差模辐射. 因此,同样可以使用磁环减小差模辐射.

3 磁环抑制机理建模及特性分析

建立如图 4 所示的三维坐标系^[10],假设单匝导线位于磁环中心,导线的直径为 $2a$ (m);磁环内径为 d (m),磁环外径为 D (m),磁环的长度为 l (m);磁导率为 μ (H/m);真空磁导率为 μ_0 ;相对磁导率为 $\mu_r = \mu' - j\mu''$;电流为 I (A);角频率为 ω (rad);磁场强度为 H (A/m);磁通为 ϕ (Wb);电感为 L (H);阻抗为 Z_l (Ω).

根据电磁场理论,通电直导线周围磁场由导体向外呈同心圆分布,磁环、导线及其磁场分布如图 5 所示.

通电直导线产生的磁场在平面 $z=0$ 的交变磁场磁感线示意图如图 6 所示.

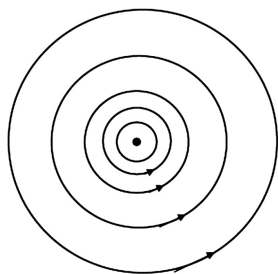


图 5 通电直导线磁感线分布图
Fig. 5 Magnetic induction line distribution diagram of electrified straight wires

根据图 6,通电直导线通过 $z=0$ 截面的磁通量^[12]为:

$$\Phi = \left(\int_0^l \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} \mu_0 H(x, y) dx dy + \int_0^l \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} \mu H(x, y) dx dy + \int_0^l \int_{\frac{D}{2}}^{\infty} \mu_0 H(x, y) dx dy \right), \quad (5)$$

因此,

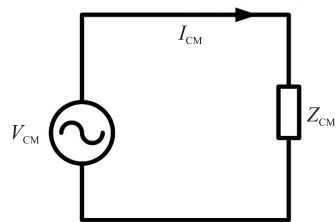


图 3 共模辐射模型等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit of common mode radiation model

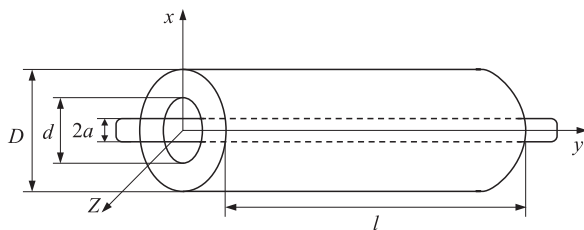


图 4 磁环坐标系
Fig. 4 Magnetic ring coordinate system

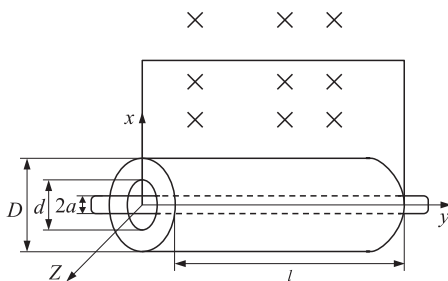


图 6 通过 $z=0$ 截面磁感线分布图
Fig. 6 Magnetic induction line distribution diagram through $z=0$ section

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\left(\int_0^l \int_a^{\frac{D}{2}} \mu_0 H(x, y) dx dy + \int_0^l \int_{\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \mu H(x, y) dx dy + \int_0^l \int_{\frac{D}{2}}^{\infty} \mu_0 H(x, y) dx dy \right)}{I}. \quad (6)$$

设有长为 L 的载流直导线, 通有电流 I . 计算与导线垂直距离为 d 的 P 点的磁感强度, 取 Z 轴沿载流导线, 如图 7 所示.

根据毕奥-萨伐尔定律有:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^3}, \quad (7)$$

所有 dB 的方向相同, 所以 P 点的 B 的大小为:

$$B = \int_L dB = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}. \quad (8)$$

由几何关系有: $\sin \alpha = \cos \beta$, $r = d \sec \beta$, $l = d \tan \beta$, $dl = d \sec^2 \beta d\beta$,

$$B = \int_L dB = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{I}{d} \cos \beta d\beta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (\sin \beta_2 - \sin \beta_1). \quad (9)$$

图 7 中,

$$\sin \beta_1 = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \sin \beta_2 = \frac{l-y}{\sqrt{x^2 + (l-y)^2}}, d = x, H = \mu_0 I. \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)可得:

$$H(x, y) = \frac{I}{4\pi x} \left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{l-y}{\sqrt{x^2 + (l-y)^2}} \right). \quad (11)$$

将式(6)、(11)代入 $Z_l = j\omega L$ 得:

$$\begin{aligned} Z_l = j\omega \mu_0 l \frac{1}{2\pi} & \left[\ln \left(\frac{l}{a} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} + \frac{a}{l} \right) \right] + \\ & j\omega (\mu - \mu_0) l \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D}{d} \times \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2l} \right)^2}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2l} \right)^2}} + \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2l} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2l} \right)^2} - \left(\frac{D-d}{2l} \right) \right) \right] = \\ & j\omega L_{eq} + j\omega (\mu - \mu_0) K, \end{aligned} \quad (12)$$

令

$$L_{eq} = \mu_0 l \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{l}{a} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} + \frac{a}{l} \right) \right], \quad (13)$$

$$K = l \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D}{d} \times \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2l} \right)^2}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2l} \right)^2}} + \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2l} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2l} \right)^2} - \left(\frac{D-d}{2l} \right) \right) \right]. \quad (14)$$

式(12)表明 Z_l 由两部分组成, 其中, L_{eq} 为导线的外自感, 与导线横截面积和磁环长度 l 相关; K 为磁环的形状系数, 与磁环的内径 d 、外径 D 和长度 l 相关.

4 不同参数对磁环抑制特性的影响

4.1 形状不同对磁环抑制特性的影响

对于需要抑制的频段, 阻抗越大, 抑制效果越好. 式(12)说明阻抗与形状系数 K 成正相关, 对同一种磁环, 通过比较 K 就可判断 Z_l 的变化. 为此采取两种方案比较 K :

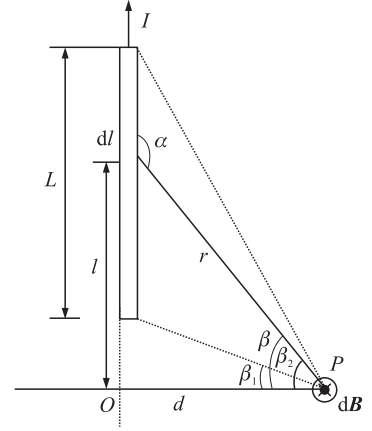


图 7 载流直导线磁场图

Fig. 7 Magnetic field diagram of current-carrying straight wire

- (1) 固定内径大小, 比较形状系数 K 随长度、外径变化的快慢;
- (2) 固定长度, 固定内外径差, 比较形状系数 K 随外径的变化。

对于第一种方案, 设导线 $a=1$ mm, 内径 $d=5$ mm, 外径范围 10~20 mm, 长度范围 10~40 mm; 对于第二种方案, 设导线 $a=1$ mm, 内外径差 10 mm, 长度 20 mm, 外径范围 10~20 mm; 分别代入式(14)用 Matlab 计算, 两种计算结果分别如图 8 所示。

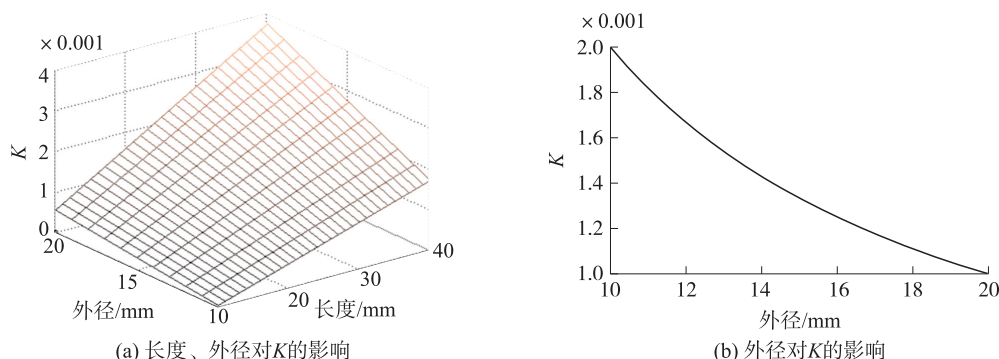


图 8 仿真计算结果

Fig. 8 Simulation results

图 8(a) 表明形状系数 K 随长度的变化明显快于随外径的变化; 图 8(b) 表明在内外径差不变的情况下, 形状系数 K 随外径的增大而减小。因此, 在内径相同条件下, 随长度的变化快于随外径的变化, 应选择贴紧导线的磁环。

4.2 材料不同对磁环抑制特性的影响

式(12)表明阻抗大小与磁导率 μ 成正相关, 对于形状、大小相同但材料不同的磁环其阻抗是不同的。

在交变电磁场中, 由于存在损耗, 磁环中的磁场强度 H 与磁感应强度 B 并非同相位, 此时磁导率是一个复数, 即:

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (15)$$

式中, μ' 为磁导率实部; μ'' 为材料的损耗。 μ' 、 μ'' 与磁环的结构、配方组成、制备工艺等多种因素相关, 是磁环材料的主要参数。

将式(15)代入式(12)可得:

$$Z_l = j\omega L_{eq} + j\omega(\mu - \mu_0)K = j\omega L_e + j\omega(\mu' - j\mu'' - \mu_0)K = \omega\mu''K + j\omega[L_{eq} + (\mu' - \mu_0)K] = R_0 + jX_L \quad (16)$$

不考虑寄生参数情况下, 磁环的等效电路图如图 9 所示, R_0 为等效电阻, X_L 为等效电感。

因此, 磁导率影响阻抗大小, 其中, 磁导率实部与 X_L 正相关, 磁导率虚部与 R_0 正相关。图 10 为磁环阻抗大小随磁导率实部、虚部变化的趋势图。

除此之外, Z_l 与电流频率有关, 即电流频率越高, 其阻抗越大。对于多匝导线穿过磁环, 阻抗还与匝数有关, 匝数越多, 阻抗越大, 但其中也存在寄生电容会影响其阻抗特性。

5 案例分析

5.1 磁环形状实验

将某公司生产的生物反馈胃肠动力仪按中华人民共和国医药行业标准 (YY-0505-2012) 中的 class A 标准进行辐射发射测试, 结果如图 11 所示, 未通过测试^[12]。

如图 12 所示, 在设备电源线相同位置上分别卡扣仅形状、大小不同的 1 号和 2 号磁环。



图 9 磁环等效电路图

Fig. 9 Equivalent circuit diagram of magnetic ring

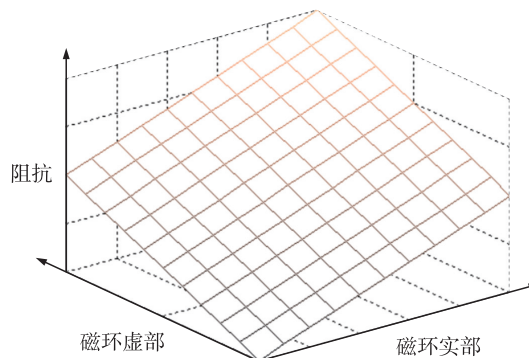


图 10 磁环阻抗大小随磁导率实部、虚部变化的趋势图

Fig. 10 Variation trend of magnetic ring impedance with magnetic permeability

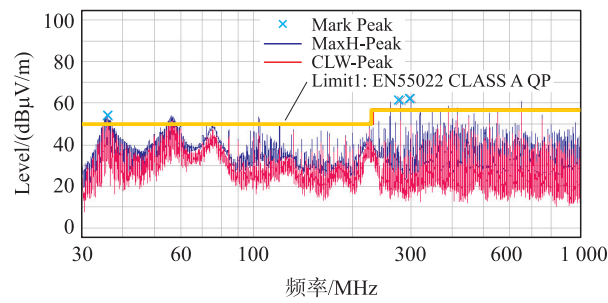


图 11 RE 初测,未通过测试
Fig. 11 RE preliminary test, failed test

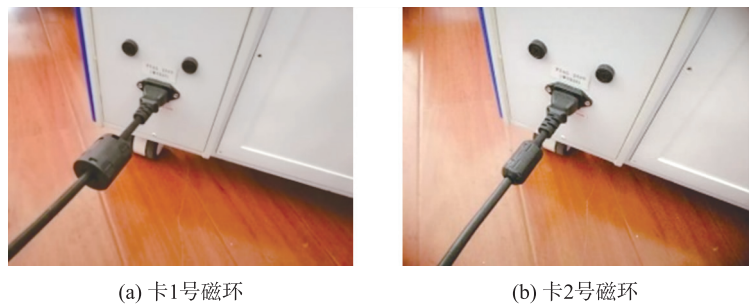


图 12 在电源线上扣形状、大小不同的磁环
Fig. 12 Fastening magnetic rings with different shapes and sizes on the power cord

测试结果如图 13 所示.

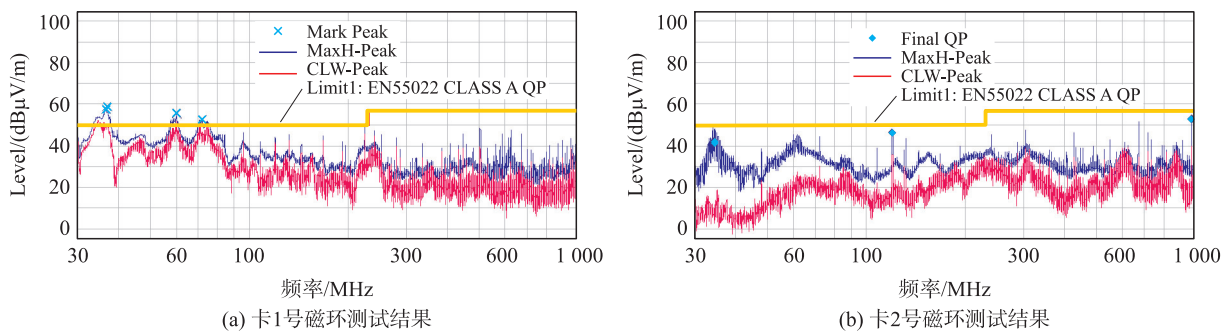


图 13 卡大小、形状不同磁环处理后的测试结果对比
Fig. 13 Comparison of test results after magnetic ring treatment with different card sizes and shapes

5.2 磁环材料实验

对某公司生产的 DT-9C 医用臭氧治疗机进行辐射发射测试. 根据中华人民共和国医药行业标准 (YY-0505-2012) 中的 class B 标准, 测试结果如图 14 所示, 可明显看到在 30 MHz、73 MHz 及 230 MHz 附近有轻微超标, 未通过测试.

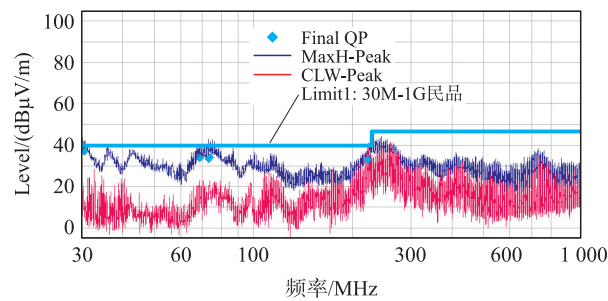


图 14 某型医用臭氧治疗机 RE 测试结果
Fig. 14 RE test results of a medical ozone therapy machine

如图 15 所示,在臭氧机的线缆上分别卡扣锰锌材料磁环和镍锌材料磁环,记为 3 号磁环和 4 号磁环,电源线穿过磁环就构成了一个共模扼流圈。



图 15 在臭氧机的电源线上卡扣材料不同的磁环

Fig. 15 The power cord of the ozone generator is buckled with only magnetic rings with different materials.

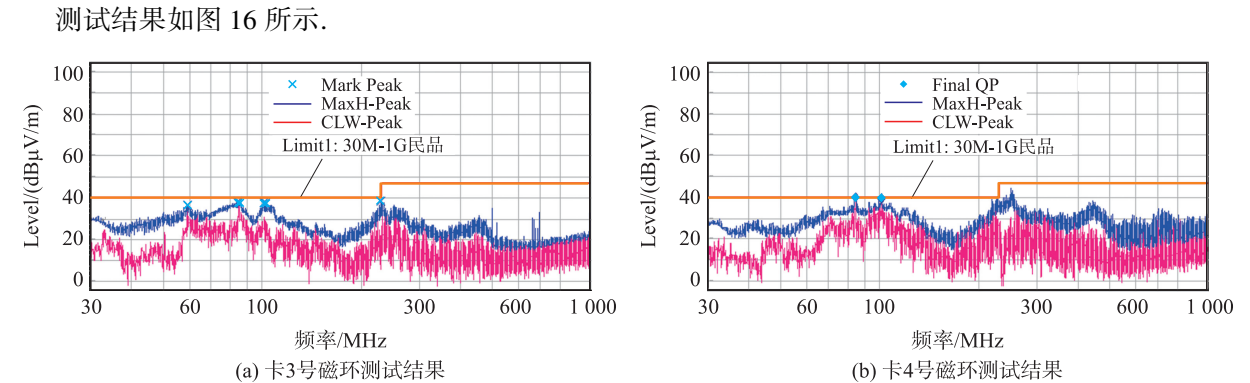


图 16 卡材料不同磁环处理后的测试结果对比

Fig. 16 Comparison of test results of card materials treated with different magnetic rings

分析可知,电源线上卡结构不同、材料不同的磁环,对设备辐射骚扰的抑制效果不同。

6 结论

本文介绍了辐射骚扰机理和磁环抑制辐射骚扰的原理,建立了磁环抑制辐射骚扰的模型,结合理论和案例分析,得出如下结论:

- (1) 选用磁环时应选择能够贴紧导线的磁环,且在内径相同条件下,随长度的变化快于随外径的变化;
- (2) 电源线上卡扣材料不同的磁环对设备辐射骚扰的抑制效果不同。

[参考文献] (References)

[1] 高攸纲. 电磁兼容总论[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2001:47-59.
GAO Y G. General theory of electromagnetic compatibility[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2001:47-59.(in Chinese)

[2] 白同云,吕晓德. 电磁兼容设计[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2001:7-10.
BAI T Y,LÜ X D. Electromagnetic compatibility design[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2001:7-10.(in Chinese)

[3] HAN C H,CHENG N C,WANG C H. A new approach for fast analysis of spurious emissions from RF/microwave circuits[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility,2009,51(3):631-638.

[4] RICCIARDI G F,STUTZMAN W L. A near-field to far-field transformation for spheroidal geometry utilizing an eigenfunction expansion[J]. IEEE transactions on antennas and propagation,2004,52(12):3337-3349.

[5] WANG S,LEE F C,ODENDAAL W G. Improvement of EMI filter performance with parasitic coupling cancellation[J]. IEEE

- transactions on power electronics,2005,20(5):1221-1228.
- [6] 任小永,姚凯,旷建军,等. 损耗最小化输出滤波电感的设计[J]. 中国电机工程学报,2008,29(27):84-88.
REN X Y,YAO K,KUANG J J,et al. Design of output inductor for minimal power loss[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(27):84-87.(in Chinese)
- [7] 王世山,朱叶,崔永生. 基于“负参数”理论的 EMI 滤波器寄生参数的双重消除[J]. 电工技术学报,2011,26(10):181-187.
WANG S S,ZHU Y,CUI Y S. Dual-cancellation of parasitic parameters based on theorem of negative parameters for EMI filters[J]. Transaction of China electrotechnical society,2011,26(10):181-187.(in Chinese)
- [8] 赵阳,夏欢,邱晓晖,等. 基于独立分量分析算法的医疗电子设备辐射电磁干扰 EMI 噪声分析方法[J]. 电工技术学报,2015,30(17):180-190.
ZHAO Y,XIA H,QU X H,et al. The radiated EMI analysis method for electromedical equipment based on ICA[J]. Transactions of China electrotechnical society,2015,30(17):180-190.(in Chinese)
- [9] 王添文,李子森,王群. 磁环抑制电磁干扰分析[J]. 电气技术,2008,2(1):27-30.
WANG T W,LI Z S,WANG Q. Research on magnetic core suppressing electromagnetic interference[J]. Electrical engineering,2008,2(1):27-30.(in Chinese)
- [10] 宋百通,赵阳,夏欢,等. 基于医疗设备的辐射 EMI 噪声诊断与抑制技术研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2014,14(4):1-5.
SONG B T,ZHAO Y,XIA H,et al. The technology of diagnosis and inhibition research on radiated EMI noise based on medical equipment[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering technology edition),2014,14(4):1-5.(in Chinese)
- [11] 夏清. 基于传导骚扰和辐射骚扰混合 EMI 噪声一体化抑制方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2017.
XIA Q. Research on integrated suppression method of mixed EMI noise based on conducted and radiated disturbances[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2017.(in Chinese)
- [12] 郑军奇. EMC 电磁兼容设计与测试案例分析[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2010:1-27,274-277.
ZHENG J Q. EMC electromagnetic compatibility design and test case analysis[M]. 2nd ed. Beijing:Electronics Industry Press,2010:1-27,274-277.(in Chinese)

[责任编辑:严海琳]