

基于大肠内窥镜的噪声源内阻抗建模的分析研究

陈 涛,陶 卫,赵 阳,颜 伟,李世锦,马宝萍

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 针对医用大肠内窥镜的电磁干扰问题,分析插入损耗法噪声源内阻抗建模和电流探头法内阻抗建模,研究电磁干扰处理方法,提出了针对医用大肠内窥镜传导电磁干扰噪声问题的解决方法. 试验结果表明,所提方法可以有效抑制医用大肠内窥镜的传导高频噪声,达到 GB 9254 标准要求.

[关键词] 医用大肠内窥镜,传导电磁干扰噪声,噪声理论模型,噪声抑制

[中图分类号] TM12 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)03-0039-05

Analysis and Research of Internal Impedance Modeling of Noise Source Based on Colorectal Endoscope

Chen Tao, Tao Wei, Zhao Yang, Yan Wei, Li Shijin, Ma Baoping

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: According to the medical prostate instrument electromagnetic interference problems, the paper analyzes common mode and differential mode noise mathematical model, studies the electromagnetic interference processing method, and proposes the solution of medical instrument prostate conducted electromagnetic interference noise. The experimental results show that the proposed method can effectively suppress the high frequency noise conduction medical prostate the instrument, thus reaching the requirements of GB 9254.

Key words: medical prostate instrument, conductive electromagnetic interference noise, noise theoretical model, noise suppression

近年来,随着电力电子技术的不断进步和无线通讯的持续发展,电子设备中的电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)问题日趋突出,严重影响电子设备的正常运行,所以如何有效测量、诊断传导电磁干扰噪声成为电磁兼容领域重要的研究内容^[1]. 传导电磁干扰噪声的测量,主要是采用人工电源网络,对传导电磁干扰噪声进行测量,以此判断被测产品的传导干扰噪声是否超标. 本文结合医用大肠内窥镜,从传导 EMI 噪声试验出发,分析了传导噪声数学模型和噪声阻抗提取方法,研究了 EMI 的相关处理方法,提出了针对前列腺仪器 EMI 问题的解决方法.

1 高频电流探头特性

利用电流探头法提取噪声源内阻抗时,需采用电流探头检测噪声电流,其一侧夹在注入信号源的连接电缆上,另一侧与接收测试仪器相连,将发生单元产生的信号电流注入到测试电路中或将电路中传输的电流信号耦合到测试设备. 它是在测试过程中将测试系统短路或加载标准电阻,以求得测试系统参数. 因此,电流探头性能以及系统参数测试将影响该方法的鲁棒性.

首先,对电流探头特性进行分析. 电流探头是根据法拉第电磁感应原理设计的,由于其带有环形磁芯,可用来测量导线中干扰电流信号. 实质上,它是一个匝数比为 $N:1$ 的电流互感器,但它与电子设备中常用的电流互感器相比有非常大的差别.

一般地,电流互感器在电力系统中常用于测量工频各电压等级的有用电流信号,而本文研究的电流探

收稿日期:2017-06-26.

基金项目:江苏省教育厅高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-20).

通讯联系人:赵阳,教授,博导,研究方向:电磁兼容技术与应用. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

头是用于提取传输线缆上的 150 kHz~30 MHz 的高频噪声信号,而此信号为无用的干扰信号,会导致设备自身甚至其他设备不能正常工作,因此需要采用适当的措施进行噪声抑制处理,以提高电子设备的 EMC 性能^[2]. 然而,常规高频电流探头的最低测试频率为 1 MHz,故对于传导的考察低频段 150 kHz~1 MHz 是电流探头测试的盲区,因此在传导 EMI 噪声测量时电流探头也具有一定的局限性.

依据高频电流探头的工作原理,其结构可等效为图 1. 其中, L_1, L_2 为电流探头原边与副边的自感, M 为互感, $L_1, I_1, 50 \Omega$ 分别为电流探头原边的自感、回路电流和接口匹配阻抗, L_w, I_w 分别为电流探头副边的自感和回路电流, Z_i 为噪声源阻抗.

根据等效电路可得接收端口的电压为

$$V_i = (50 + j\omega L_1) \frac{Z_i + r_w + j\omega L_w}{j\omega M} I_w - j\omega M I_w \quad (1)$$

2 噪声源内阻抗建模

2.1 电流探头法内阻抗建模分析

运用两个电流探头,一个作为注入探头接至信号源的输出端,另一个作为接收探头接至频谱分析仪的输入端,两个探头经线路耦合阻抗与被测噪声源阻抗组成闭合回路,按照图 2 连接放置于实验台上.

电流探头相当于电流互感器,因此将图 2 电路等效为图 3.

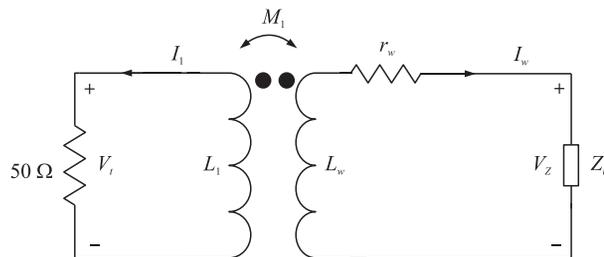


图 1 电流探头等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of current probe

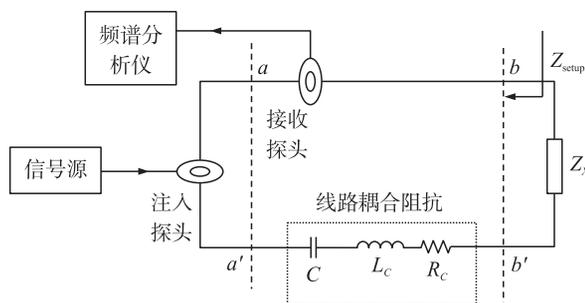


图 2 EMI 噪声源阻抗提取原理图

Fig. 2 Schematic diagram of EMI noise source impedance extraction

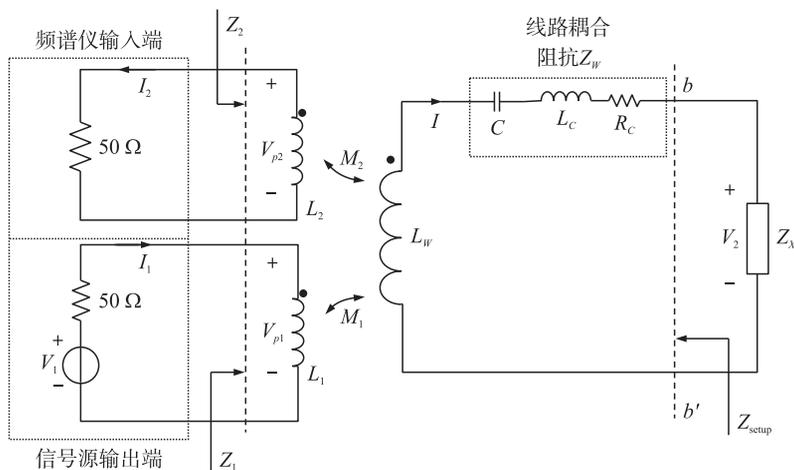


图 3 EMI 噪声源阻抗提取等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of impedance extraction of EMI noise source

图 3 中,注入电压为 V_1 ,注入电流为 I . 信号源的输出端口和频谱分析仪的输入端口匹配电阻均为 50Ω ,注入和接收探头端的等效阻抗分别为 Z_1, Z_2 . 两个电流探头的自感分别为 L_1, L_2 ,与回路之间的互感分别为 M_1, M_2 . 根据基尔霍夫电压定律,可将图 4 中的 3 个回路可以描述为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ -V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 \Omega + Z_1 & 0 & -j\omega M_1 \\ 0 & 50 \Omega + Z_2 & j\omega M_2 \\ -j\omega M_1 & j\omega M_2 & Z_w + j\omega L_w \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I \end{bmatrix} \quad (2)$$

被测阻抗可以表达为

$$Z_X = K \cdot (V_{P1}/V_{P2}) - Z_{\text{setup}} \quad (3)$$

式中, $K = \frac{j\omega M_1 Z_{T2}}{Z_1}$, K 为随频率而变的测试系统系数.

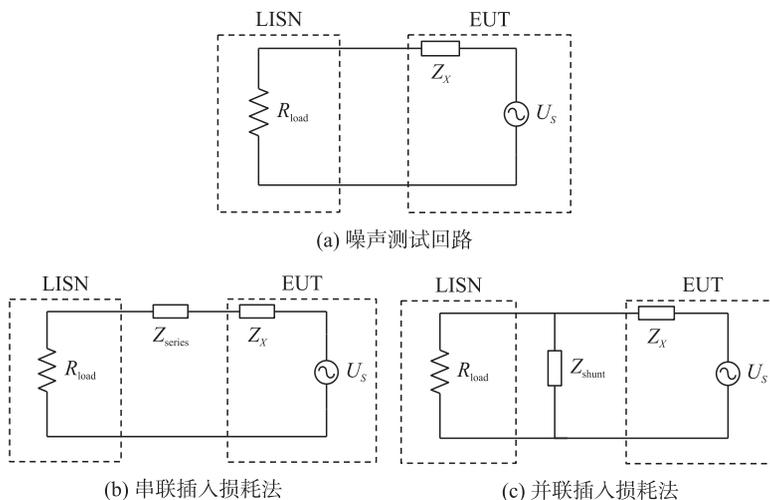


图 4 插入损耗法测试原理图

Fig. 4 Schematic diagram of insertion loss test

2.2 插入损耗法噪声源内阻抗提取

阻抗的定义为端口电压相量与电流相量的比值,用欧姆定理的相量表示为

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} = |Z| \angle \varphi_Z \quad (4)$$

$|Z|$ 称为阻抗模,即阻抗的幅值. $\angle \varphi_Z$ 称为阻抗角,即阻抗的相位. \mathbf{Z} 的代数形式为

$$\mathbf{Z} = R + jX \quad (5)$$

R 为等效电阻分量, X 为等效电抗分量. 插入损耗法的测试原理如图 4 所示. 其中, U_s 为传导 EMI 噪声源, Z_X 为噪声源内阻抗, R_{load} 为 LISN 受试端阻抗. 在 Z_X 和 R_{load} 之间插入一个滤波单元,即 Z_{series} 或 Z_{shunt} , 此时 R_{load} 两端噪声电压将由此改变. 因此,测试回路的插入损耗可定义为

$$A_T = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{load with filter}}}{U_{\text{load without filter}}} \right) \quad (6)$$

3 最大阻抗失配原则

阻抗匹配是指负载阻抗与激励源内阻抗的共轭值相等,即它们的模相等而相角之和为零,这时在负载阻抗得到最大功率输出的一种工作状态,否则称为失配^[3-4].

如图 5 所示为插入 EMI 滤波器后的电路,当源阻抗 Z_s 和负载阻抗 Z_L 不相等时,若 EMI 滤波器的端口特性阻抗 Z_{c1} 和 Z_{c2} 分别等于 Z_s 和 Z_L ,由于滤波器起到的阻抗匹配作用,则源端发送的功率被负载端全部吸收,即 $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

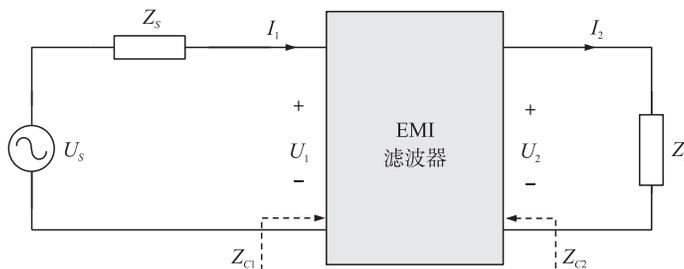


图 5 EMI 滤波器接入后的电路

Fig. 5 Circuit after EMI filter access

4 某型大肠内窥镜传导 EMI 应用案例分析

4.1 问题描述

如图 6 所示为某公司生产的某型大肠内窥镜^[5-6]. 近几年来,由于大肠内窥镜在临床上的应用,使得早期大肠癌的检出率明显提高,且达到内科治疗治愈的效果,从而使早期大肠癌发现和诊断成为可能. 若其传导骚扰超过标准限值,则严重制约着其设备的工作特性,因此其传导骚扰需满足我国 YY 0505-2012 标准. 根据 YY 0505-2012 标准限值和测试结果曲线对比,可得该大肠内窥镜的传导发射超过标准限值.

4.2 问题分析和整改措施

根据图 7 测试结果分析可得,通常由于电源模块自身设计不合理以及滤波器适配不当,传导骚扰首先通过电源线传输进入 LISN. 高频超标部分初步判测主要由于 PCB 板内部差模干扰噪声引起的. 而测试曲线中频超标原因主要和传导共模和差模干扰都有相关性.



图 6 大肠内窥镜实物图

Fig. 6 Colorectal endoscopic physical image

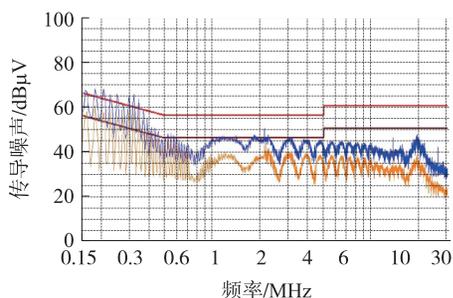


图 7 整改前大肠内窥镜传导 EMI 噪声

Fig. 7 Colorectal endoscopic conduction EMI noise before rectification

PCB 中各个芯片的供电电源发现同样具有非常大的传导干扰噪声,根据谐频公式与阻尼系数公式,可以在各电源转换芯片处加上二阶 $L-C$ 滤波器.

首先,为了抑制刷卡机传导 EMI 噪声超标的问题,在电源入口处添加了如图 8(a)所示的近似的 π 型滤波器. L_1 和 L_2 为手工绕制的电感, C_1 、 C_2 、 C_3 为陶瓷电容. 以共模扼流圈为电感的 π 型滤波器的滤波特性在高频段非常优越. 该滤波器谐频为:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

其次,针对 PCB 直流电源转换芯片产生的高频干扰噪声的问题(如图 8(b)所示),其共模噪声分量和差模噪声相差不大,本文设计了一种直流 EMI 滤波器(如图 9(a)所示),滤波器为 T 型结构(如图 9(b)所示),其中 L_1 和 L_2 为 10 mH 的色环电感, C 为 0.68 μ F 的陶瓷电容.

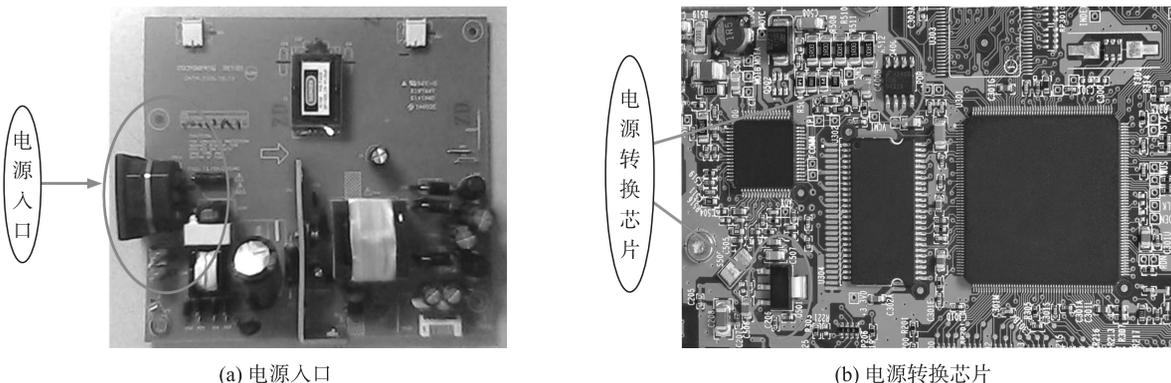


图 8 PCB 板级分析实物图

Fig. 8 PCB board level analysis of the physical map

通过上述措施的采用,该设备的传导 EMI 问题得到了有效解决,经测量后,传导 EMI 噪声显著降低(如图 10 所示),噪声抑制效果可达 32.5 dB μ V,符合 GB 9254 标准,相应超标频点的抑制结果见表 1.

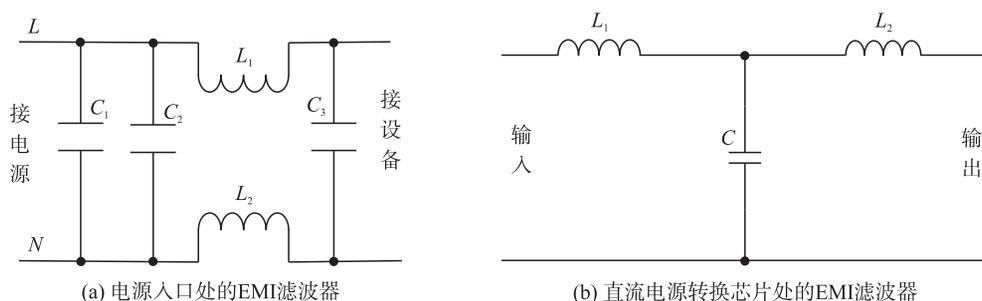


图9 电源入口处与直流电源转换芯片处所设计的 EMI 滤波器

Fig. 9 EMI filter designed at the entrance of power supply and DC power conversion chip

表1 大肠内窥镜传导 EMI 噪声采取措施前后

Table 1 Conduction of EMI noise in colorectal endoscope before and after taking measures

频点/MHz	抑制前/dB μ V	超标/dB μ V	抑制后/dB μ V	安全裕量/dB μ V
0.270	81.05	19.52	54.66	26.39
0.400	81.95	23.93	49.64	32.31
0.510	67.14	11.14	48.16	18.98
0.650	56.97	0.97	46.28	10.69
1.610	72.56	16.56	44.05	11.95
10.718	68.34	12.34	42.02	13.98

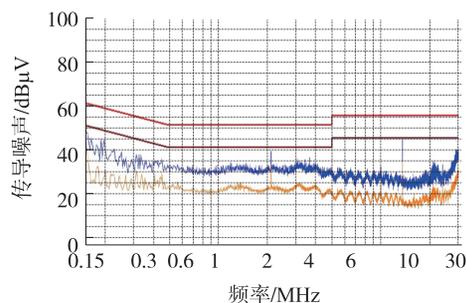


图10 整改后大肠内窥镜传导 EMI 噪声

Fig. 10 Colorectal conduction EMI noise after rectification

5 结语

本文针对传导 EMI 噪声源识别方法,成功分离出设备中的传导电磁干扰噪声,并将分离后的噪声与总噪声进行特征对比,确定有效性.在两端网络参数理论的方法上,提出提取噪声源内阻抗的算法.分析插入损耗法噪声源内阻抗建模和电流探头法内阻抗建模,研究 EMI 处理方法,提出了针对医用大肠内窥镜传导 EMI 噪声问题的解决方法.

[参考文献](References)

- [1] 赵阳,封志明,黄学军. 电磁兼容测试方法与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:1-12.
ZHAO Y, FENG Z M, HUANG X J. Electromagnetic compatibility test method and engineering application[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010:1-12. (in Chinese)
- [2] 黄益庄. 变电站智能电子设备的电磁兼容技术[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15):6-9.
HUANG Y Z. EMC technology for IED in substations[J]. Power system protection and control, 2008, 36(15):6-9. (in Chinese)
- [3] 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.
ZHENG J Q. EMC design and test case analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2010:1-27. (in Chinese)
- [4] PAUL C R, HARDIN K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emissions[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 1988, 30(4):553-560.
- [5] GROBLER I, GITAU M N. Low cost power lead extended pre-compliance conducted EMI measurement setup and diagnostics with compact LISN[C]//ECCE Asia Downunder. Melbourne: IEEE, 2013:1 144-1 149.
- [6] BEER A S D, WOODING G N, WYK J D U V. Problematic aspects when using a LISN for converter EMI characterisation[C]//ICIT. Capa Town: IEEE, 2013:633-637.

[责任编辑:陈 庆]