

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.06.026

引用格式:冯强,廖成,熊祥正,等.3 kW微波源传导电磁干扰测试及分析[J].电讯技术,2014,54(6):835-839. [FENG Qiang, LIAO Cheng, XIONG Xiang-zheng, et al. Measurement and Analysis of Conducted Electromagnetic Interference inside 3 kW Microwave Source[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(6):835-839.]

## 3 kW微波源传导电磁干扰测试及分析\*

冯强\*\*,廖成,熊祥正,叶志红

(西南交通大学电磁场与微波技术研究所,成都610031)

**摘要:**微波源工作时内部的电磁干扰可以通过电源输入线耦合出来,干扰其他电力电子设备。研究三相输入电源线的传导干扰文献很多,但分离的共模(CM)和差模(DM)电流局限于相线之间,缺少对中线上干扰的分析。使用电流探头测试3 kW磁控管微波源输入线的传导干扰,利用矢量网络分析仪校准电流探头,从而获得150 kHz~30 MHz频带内相线和中线的传导干扰电流,并分离出CM电流与DM电流。通过对比DM电流和中线上干扰的频谱,分析了中线上传导干扰成分。测试数据表明,在150 kHz~8 MHz频带内差模干扰电流比共模干扰电流大10 dB以上;中线上的干扰与DM干扰幅值一致,表明中线上的干扰主要是差模成分。该干扰分布规律有助于提出有效的干扰抑制手段。

**关键词:**微波源;电磁干扰;共模;差模;中线

**中图分类号:**TN01;TM931 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)06-0835-05

## Measurement and Analysis of Conducted Electromagnetic Interference inside 3 kW Microwave Source

FENG Qiang, LIAO Cheng, XIONG Xiang-zheng, YE Zhi-hong

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Electromagnetic interference (EMI) inside the microwave source case can couple outside along the power lines to affect other power electronic equipment when it is working. There exists many literatures for research on conducted EMI of the three-phase input power lines, in which the separated common-mode (CM) current and differential-mode (DM) current between three-phase lines are only considered, but the analysis of conducted EMI on neutral line is absent. In this paper, a current sensor, which is calibrated in a vector network analyzer, is used to measure the conducted EMI of 3 kW magnetron microwave source power lines, then the interference current on phase line and neutral line at 150 kHz~30 MHz is obtained, and the CM and DM current is separated. EMI mode on the neutral line is analyzed by comparing the DM current spectrum with the interference spectrum on the neutral line. The tested data shows that DM interference magnitude is above 10 dB larger than CM interference at 150 kHz~8 MHz, and the phenomenon that interference on neutral line and DM interference show a good concordance in terms of peak value indicates DM interference is in dominant on neutral line. Knowing about these interference distribution is helpful for proposing efficient interference suppression method.

**Key words:** microwave source; electromagnetic interference; common-mode; differential-mode; neutral line

\* 收稿日期:2014-01-10;修回日期:2014-04-02 Received date:2014-01-10;Revised date:2014-04-02

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB328904)

Foundation Item: The National Program on Key Basic Research Project(973 Program)(2013CB328904)

\*\* 通讯作者: weikan126@163.com Corresponding author: weikan126@163.com

## 1 引言

对传导电磁干扰进行准确测量是对电磁干扰进行量化,这对有效实施电磁干扰抑制措施有着重要的意义。电力线中传导电磁干扰(EMI)可以分为共模(Common Mode, CM)干扰和差模(Differential Mode, DM)干扰<sup>[1]</sup>。CM 干扰存在于电源线与地构成的回路中,而差模干扰是指电源线之间的回路噪声。三相五线制中的 CM 和 DM 电流不仅存在于相线之间,也存在于相线与中线之间。

微波源工作时,电路中的快恢复二极管的正向反向恢复作用<sup>[2]</sup>,三极管漏源极的振铃现象,以及对散热片的寄生电容<sup>[3]</sup>,都是产生传导发射的原因。内部严峻的电磁干扰可以通过输入电源箱耦合出来<sup>[4-5]</sup>,经过电网影响其他电力设备的正常工作。

电流探头是电磁干扰常用的测试设备,具有使用简单、测试方便的优点。文献[6]中采用电流探头测试变频器电源输入线上的电磁干扰,用于验证所设计的共模差模分离网络。文献[7]使用电流探头测量逆变器输入端和交流电动机输入端的共模和差模传导干扰,并详细阐述了电源线的共模和差模的测试方法。这些文献中分离的共模和差模干扰只局限于三根相线,对电源线中中线的电磁干扰并未考虑。研究中线与相线之间的共模与差模干扰,判定中线上的干扰成分,对输入电源线上干扰模态的分析具有重要的意义。

本文根据传导电磁干扰测试标准制定以电流探头、矢量网络分析仪、人工电源网络和频谱仪为主要仪器的测试方案。以 3 kW 磁控管微波源为测试对象,测试了微波源电源输入线上的相线和中线 150 kHz ~ 30 MHz 频率范围内的传导电磁干扰。通过改变电流探头不同的嵌套方式获得相线和中线的传导干扰,测试结果经过电流探头的传输导纳校准。对比分离出相线与中线之间的差模干扰和两者对地的共模干扰,研究电源线上传导电磁干扰的分布,数据表明在中线上,主要是差模干扰,共模成分很少。

## 2 测试及 CM/DM 分离方法

### 2.1 测量仪器

线性阻抗稳定网络也叫人工电源网络,简称 LISN(Line Impedance Steady Network),是电磁兼容测量的常用仪器,其阻抗随着频率变化,在工频时呈高阻抗,在噪声频率呈低阻抗。其基本电路图如图 1 所示。LISN 的主要作用:一是隔绝外网的电磁干

扰;二是给待测设备的电源线的噪声输出端提供一个稳定阻抗;三是耦合出线上的干扰电压,传送至测量接收机。

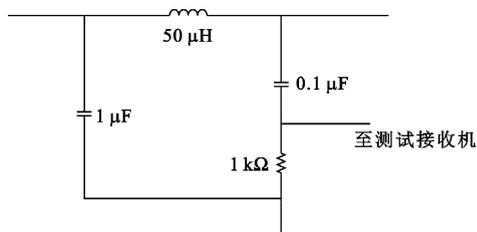


图 1 LISN 简化原理图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of LISN

电流探头是一种将流过导线的电流成比例地转换为电压的耦合装置,可以测量一定频带下的干扰电流。常用的电流探头有两种:一种是霍尔(Hall)传感器,另一种是测量电流的磁场。本文中采用的是前一种。将测量得到的电压,通过转移阻抗校准,就可以得到干扰电流的大小。

频谱仪作为一种常用的测量接收机,可以得到功率或电压频谱数据。通过混频和调谐,将待分析信号下变频至中频,在中频进行分析,得到频谱。测量前,设置起始频点、终止频率,选取合适的取样点。保存文档数据方便画图和操作。

### 2.2 测量与校准方法

用电流探头直接钳夹住相线或者中线,相应线上的干扰可以通过频谱仪检测得到。图 2 中描述了测量单相电路中共模和差模电流的方法。当同时钳夹住相线和中线时,差模电流方向相反,幅值相同,产生通量刚好抵消,共模电流加强,此时接收机检测到的是  $2I_{CM}$ 。通过环绕其中一根电源线,用电流探头同时钳夹住两根线如图 2 中右图所示,此时本来相反的 DM 电流在电流探头钳夹住的绕环中的 DM 电流与另外一个线上的 DM 电流同相了,接收机检测到的是  $2I_{DM}$ 。

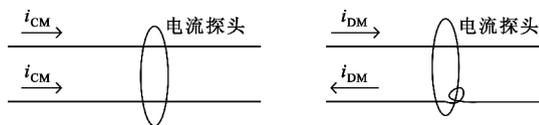


图 2 共模和差模电流测试方法

Fig. 2 Arrangement for the CM and DM current measurement

用频谱仪接收的干扰数据为电压,此时数据并不是线上干扰电流,干扰电流需要通过电流探头的传输导纳进行校准。采用矢量网络分析仪对电流探

头的转移阻抗进行校准<sup>[8]</sup>获得端口散射参量  $S_{21}$  数据, 用公式 (6) 实现传输导纳  $Y_t$  的转换。线上干扰电流可以通过频谱仪检测的电压和电流探头传输导纳修正:

$$Y_t = -S_{21} - 34 \quad (6)$$

$$I = U - Y_t \quad (7)$$

其中,  $Y_t$  的单位为 dBs,  $S_{21}$  的单位为 dB,  $I$  的单位为 dB $\mu$ A,  $U$  的单位为 dB $\mu$ V。

### 3 测量及分析

通过对一台 3 kW 微波源进行电源线的传导干扰测试, 并利用上述方法得到相线、中线、CM 干扰电流和 DM 干扰电流。测试布置如图 3 所示, LISN 接在微波源电源输入端, 隔绝外网干扰, 电流探头接收的数据经同轴线传至频谱仪。该微波源输入电源为三相电。线性阻抗稳定网络选用北京大泽公司生产的 ZN3770A 型、50  $\Omega$ /50  $\mu$ H 的 V 型网络, 符合 GB/T 6113. 102-2008 标准在 150 kHz ~ 30 MHz 频率范围内的阻抗要求, 用于测量 EUT 大电流条件下交流电源上的射频骚扰电压。电流探头选用 ZN23101 型号, 测量频率范围为 0.01 ~ 60 MHz。频谱仪使用安捷伦 N9000A 信号分析仪, 可检测的频率范围为 9 kHz ~ 7.5 GHz。图 3 中虚线为系统地线, LISN 和微波源都系统接地。测试时, 设置样点 1 001 个, 起始频率 150 kHz, 终止频率 30 MHz。

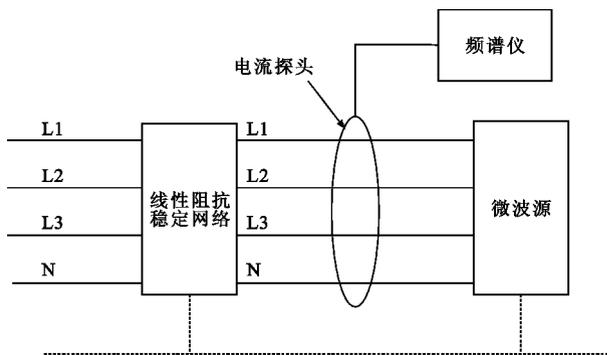


图 3 微波源电源线传导干扰测试布局  
Fig. 3 Arrangement for the measurement of the microwave source power lines

在三相线中, 相线与中线及相线与相线之间都存在 CM 和 DM 电流, 如图 4 所示。在  $N$  线上存在差模电流  $i_{dm4}$  和共模电流  $i_{cm4}$ , 并且满足

$$i_{dm1} = i_{dm2} + i_{dm3} + i_{dm4} \quad (8)$$

$$i_{cm1} + i_{cm2} + i_{cm3} + i_{cm4} = i_{Gnd} \quad (9)$$

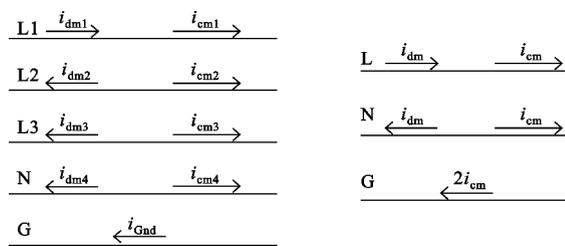


图 4 电源线的共模差模电流分布  
Fig. 4 Distribution of CM and DM current on the power lines

为了研究相线与中线的 CM 和 DM 电流, 将 3 根相线(L1、L2 和 L3 表示)用一根相线(L 表示)替代, 这样三相线就简化为了单相, 使用电流探头钳夹电源线就可以简单快速得到相线、中线传导干扰和两者之间的共模与差模干扰。

校准测试过程中使用的电流探头和同轴线。图 5 所示为连接了同轴线的电流探头校准布置图, 在 150 kHz ~ 30 MHz 内, 确定好校准点为 1 001 个, 以保证样点数与接收机的一致, 使得校准得到的干扰电流有意义。电流探头和同轴线连接起来的传输导纳曲线如图 6 所示。

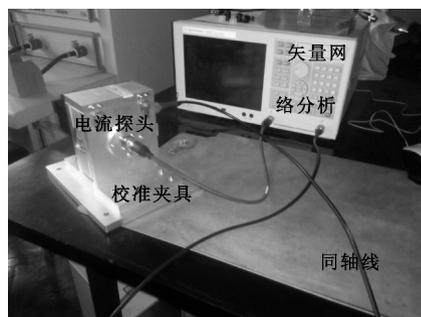


图 5 电流探头校准布局  
Fig. 5 Arrangement for the current sensor calibration

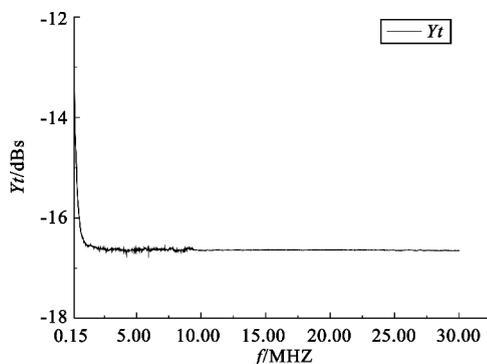


图 6 电流探头传输导纳  
Fig. 6 Admittance of the current sensor

图 7 显示, 在 150 kHz ~ 30 MHz 频带上, 中线干扰电流大小与 3 根相线的 CM 干扰电流总体趋势一

致,随着频率增加干扰大小下降;并且在10 MHz以后,两者几乎重叠,因为高频时干扰电流本身就很小,电流探头检测精度有限。利用上一节中测量方法,得到的相线与中线的 CM 干扰电流和 DM 干扰电流如图 8 所示。很明显,在150 kHz ~ 30 MHz频带上,DM 电流几乎都要高于 CM 电流,最大的差别有20 dB。在相线与中线存在的主要是差模分量,而相对的共模分量很少。

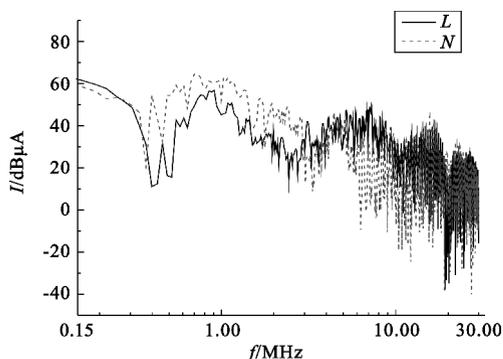


图7 相线与中线上干扰电流

Fig.7 Interference current of the phase-lines and the neutral-line

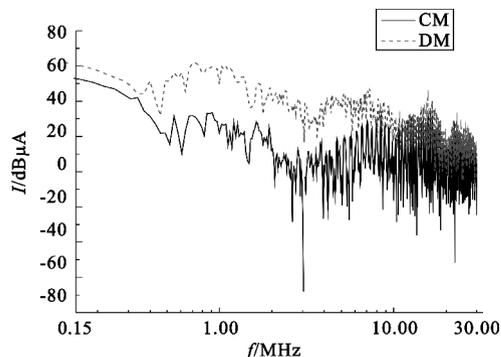


图8 相线与中线之间的共模和差模干扰电流  
Fig.8 CM and DM interference current between the phase-lines and the neutral line

分析干扰电源线上中线上的干扰成分。对比图7中的中线电流和图8中的CM电流发现,CM干扰电流比中线上干扰电流要小很多。任何电源线上的干扰等于CM干扰和DM干扰的矢量和,因此CM分量对中线上的影响很小,在中线上主要是差模干扰分量。图9为中线上传导干扰噪声和差模噪声对比,发现在150 kHz ~ 30 MHz频带上,两者整体比较吻合;在5 ~ 8 MHz频率范围,吻合得不好。因为在该频带,CM电流和中线上的干扰电流大小可比拟,在此频带内CM电流对中线上干扰由明显影响。由以上分析可知,在中线上150 kHz ~ 30 MHz的传导干扰主要是差模成分。

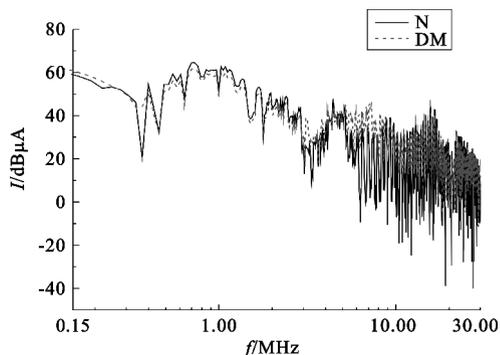


图9 中线上干扰电流与DM干扰电流

Fig.9 Interference current of the neutral line and DM

## 4 结论

微波源内部复杂的电磁环境通过电源线给电网产生干扰,目前文献中研究三相输入线中的中线上干扰报道不多。针对该问题,本文使用电流探头测量电源线的传导电磁干扰的方法,快速方便测量出150 kHz ~ 30 MHz频率范围内相线、中线和两者之间的CM与DM干扰电流,最后通过对比测试数据知,差模噪声明显高于共模噪声,得出在中线上的传导干扰主要是差模成分的结论。该测试和分析工作,完善了对三相电源线上的干扰测量和差模共模模态分析,对提出有效的抑制手段有着重要意义。

对比中线上的干扰和DM干扰频谱,两者在整体幅值上大致相等,但对于350 kHz频点附近,中线的干扰比DM干扰小很多,本文并未给出完善的解释。采用其他的传导干扰测试方法研究该微波源的传导干扰,是本课题今后的研究方向。

## 参考文献:

- [1] 孟进,马伟明. 电力电子系统传导干扰建模和预测方法研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2006.  
MENG Jin, MA Wei-ming. Conducted Electromagnetic Interference (EMI) Modeling and Prediction for Power Electronic Systems [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2006. (in Chinese)
- [2] Liang Y C, Gosbell V J. Diode forward and reverse recovery model for power electronic SPICE simulations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 5(3): 346-356.
- [3] Grandi G, Casadei D, Reggiani U. Common and Differential-Mode HF Current Components in AC Motors Supplied by Voltage Source Inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 16-24.

- [4] 史记元, 罗建书, 倪谷炎, 等. 孔缝腔体内多导体传输线的耦合响应[J]. 强激光与离子束, 2012, 23(3): 849-852.  
SHI Ji-yuan, LUO Jian-shu, NI Gu-yan, et al. Coupling onto wires enclosed in cavity with aperture [J]. High Power Laser and Particl Ebeams, 2012, 23(3): 849-852. (in Chinese)
- [5] 刘满堂, 彭笠. 航空通信系统试飞过程中的电磁兼容性评估[J]. 电讯技术, 2013, 53(5): 661-666.  
LIU Man-tang, PENG Li. Electromagnetic compatibility evaluation in test flight of avionics communication systems [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(5): 661-666. (in Chinese)
- [6] 王坤, 张磊, 胡安琪, 等. 传导电磁干扰三相 CM/DM 分离网络研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(3): 76-78.  
WANG Kun, ZHANG Lei, HU An-qi, et al. The three-phase CM/DM Separation Network of Conducted Electromagnetic Interference [J]. Power Electronics, 2011, 45(3): 76-78. (in Chinese)
- [7] Grandi G, Casadei D, Reggiani U. Common and Differential-Mode HF Current Components in AC Motors Supplied by Voltage Source Inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004(1): 16-24.
- [8] 彭静英. 一种 EMI 电流探头的校准方法[J]. 电讯技术, 2007, 47(6): 175-177.  
PENG Jing-ying. An EMI current sensor calibration method [J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(6): 175-177. (in Chinese)

## 作者简介:



冯强(1990—),男,江西丰城人,2012年于西南交通大学获得学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为电磁兼容;

FENG Qiang was born in Fengcheng, Jiangxi Province, in 1990. He received the B. S. degree from Southwest Jiaotong University in 2012. He is now a graduate student. His research concerns electromagnetic compatibility.

Email: weikan126@163.com

廖成(1964—),男,重庆人,西南交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为计算电磁学、电磁兼容和天线原理与设计;

LIAO Cheng was born in Chongqing, in 1964. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include computational electromagnetic, electromagnetic compatibility, and antenna theory and technology.

Email: c. liao@swjtu.edu.cn

熊祥正(1964—),男,重庆人,西南交通大学教授,主要研究方向为微波电路设计、电磁兼容;

XIONG Xiang-zheng was born in Chongqing, in 1964. He is now a professor. His research concerns microwave circuit design and electromagnetic compatibility.

叶志红(1988—),男,江苏泰兴人,西南交通大学博士研究生,主要研究方向为电磁兼容。

YE Zhi-hong was born in Taixing, Jiangsu Province, in 1988. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns electromagnetic compatibility.