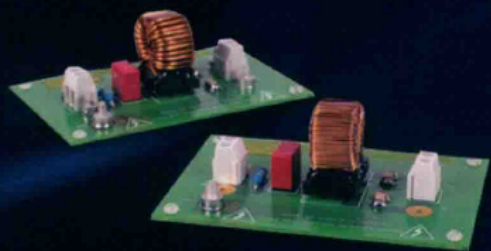


Proceedings of the 26th National Electromagnetic
Compatibility Conference

第26届 全国电磁兼容会议论文集

石 丹 刘元安 穆冬梅 钱晓佳 编著

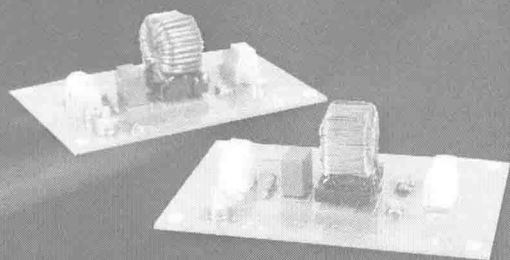


北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

Proceedings of the 26th National Electromagnetic
Compatibility Conference

第26届 全国电磁兼容会议论文集

石 丹 刘元安 穆冬梅 钱晓佳 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

中国电子学会电磁兼容分会举办的第26届全国电磁兼容学术会议于2018年10月13日至10月15日在重庆召开。全国电磁兼容学术会议始创于1991年,每年举办一次,是中国举办最早、影响力最大的电磁兼容交流平台,会议主题涵盖基础理论、技术进展和发明、应用和应用分析、测量与新设备新方法、规范和管理等电磁兼容的全部领域,参加人员有工程师、教授、研究生等各界精英。本届会议论文主要涵盖电磁兼容设计与分析、复杂电磁环境、电磁计算、电磁生物效应、天线、电磁兼容标准、电磁兼容测试、机器学习算法在电磁兼容领域的应用等问题。本书可供电磁兼容技术相关的科技工作者和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

第26届全国电磁兼容会议论文集 / 石丹等编著. -- 北京:北京邮电大学出版社,2019.5
ISBN 978-7-5635-5709-7

I. ①第… II. ①石… III. ①电磁兼容性—文集 IV. ①TN03-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第067084号

书 名: 第26届全国电磁兼容会议论文集
责任编辑: 满志文
出版发行: 北京邮电大学出版社
社 址: 北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)
发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578
E-mail: publish@bupt.edu.cn
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司
开 本: 889 mm×1 194 mm 1/16
印 张: 20.25
字 数: 609千字
版 次: 2019年5月第1版 2019年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-5709-7

定 价: 88.00元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

随着智能制造和芯片制造技术的迅速发展，电子设备高度集成化，元器件和 PCB 都趋向于小型化和精密化。但由于物理空间有限，并且集成的模块和系统繁多，其电磁兼容问题成为影响电子设备性能的关键因素。因此对电子设备的电磁兼容性能进行建模、分析、预测、设计和测试至关重要。同时，由于用频设备的大量使用，大量电磁信号在空间、时间和频域上混叠，构成了复杂的电磁环境。不论是在军事领域，还是在民用领域，对复杂电磁环境的预测和分析都是研究的热点问题。近年来，人工智能技术在各个行业的应用推动了各领域的智能化和自动化水平，其在电磁兼容领域的应用也是未来发展的方向。

本书聚焦以上热点问题，主要分为以下几个专题：“电磁兼容设计与分析”“复杂电磁环境”“电磁计算”“电磁生物效应”“天线”“电磁兼容标准”“电磁兼容测试”“机器学习算法在电磁兼容领域的应用”。本书的受众主要为在电磁兼容领域的科研、工程和技术人员。

本书是论文作者们研究观点和科研成果的汇总，由石丹、刘元安、穆冬梅、钱晓佳编著，研究生薛梦涛、姚成和严梦婷为本书的编辑做了大量工作，在此向他们表示衷心的感谢。

由于电磁兼容的内容涉及面广，相关的理论和技术发展迅速，加上作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请各位读者和专家批评指正。

编 者

目 录

EMI 电源滤波器防护性能的脉冲电流注入法测试 黄瑞涛 段艳涛 王建宝 陈海林 王 可	1
Test of Protection Effect for EMI Power Filter by Pulse Current Injection Method	1
Fe_3O_4 -C 核壳微米颗粒的制备及微波吸收性能研究 张永搏 王 鹏 王 涛	5
Synthesis and electromagnetic wave absorption properties of Fe_3O_4 -C core-shell micron particles via anaerobic annealing	5
FPGA 实现针对射频功放线性化的反馈多项式模型 王广江 ¹ 李久超 ² 刘枫 ² 李亚秋 ² 于翠屏 ¹ 刘元安 ¹	11
非接触 ESD 电极移动速度影响基于 Maxwell 方程组的初步分析 孙军 ^{1,2} 梁梦玉 ^{1,2} 阮方鸣 ^{2,3} 程聪 ² 王珩 ³ 陈曦 ³ 李佳 ⁴	16
Mechanism primary analysis based on Maxwell equations to electrode moving speed in non-contact ESD	16
大型线栅有界波模拟器过渡段结构的仿真研究 马如坡 ¹ 石立华 ² 张军 ¹	20
Simulation Study on Transition Section Structure of Large Wire Grating Bounded Wave Simulator	20
电波暗室静区反射电平和尺寸的测试 孙景禄 周峰	24
Test of reflection level and size of quiet zone in anechoic chamber	24
电磁发射现场测试的探讨 李圆圆 谢树果 杨顺川 左铭	29
Research on In-situ Test of Conducted Emission and Radiated Emission	29
电磁混响室技术研究进展 程二威 陈亚洲 周星	33
电动汽车 PMSM 寄生参数对传导电磁干扰的影响 李 祥 翟 丽 钟广缘 胡桂兴	39
Influence of PMSM parasitic parameters on conducted electromagnetic interference in Electric vehicle	39

电连接器抗雷击测试系统冲击电流校准方法研究 瞿明生	46
Research of Calibration Method of Electrical Connectors Resisting Lightning Strike Test System	46
电涌保护器 EMP 防护效能实验研究 周颖慧 石立华 孙 征 付尚琛 刘 波 郭一帆	51
Experiment Research on Protected Effect of Typical SPD to EMP	51
多导体传输线分布参数提取方法的研究 杨莉 逯贵祯	55
Research about extraction method of parameter distributed for multi-conductor transmission lines	55
多物理和多尺寸目标电磁散射高性能算法研究 张 楠 吴语茂 吴安雯	60
Title The study of the high performance algorithm for the electromagnetic scattered fields from the multi-scale and multi-physics scatterers	60
国际空间站电磁兼容标准初步研究 张 华	64
Preliminary Research on Electromagnetic Compatibility Standard of International Space Station ...	64
国外某常规潜艇升降装置雷达波隐身评估方法研究 唐兴基 李铨铨 倪家正 张凌江	68
Research on the method of Assessment for RADAR Stealth of the Submarine	68
混响室场均匀性优化的研究 陈雨夏 ¹ 丁一夫 ² 陈 磊 ² 王卫民 ¹	72
Research on Optimization of Field Uniformity in a Reverberation Chamber	72
机箱及其内部 PCB 板的静电放电仿真研究 杨昌 杨兰兰 许文婷	77
Simulation Research on Electrostatic Discharge of Chassis and Its Internal PCB Board	77
机载蜂窝通信与机载卫星导航系统电磁兼容性研究 孙思扬 ¹ 陈晓晨 ¹ 王 娜 ¹ 戴 巡 ¹ 肖 雳 ² 祝思婷 ¹ 谢 江 ¹ 王瑞鑫 ¹ 张 霄 ¹	82
基于 Morlet 小波变换的静电放电信号时频分析 程聪 ¹ 孙军 ² 阮方鸣 ^{1,3}	86
Time-Frequency Analysis of Electrostatic Discharge Signal Based on Morlet Wavelet Transform	86
基于 SVM 的手机电磁兼容管理系统命名实体识别 薛梦涛 ¹ 石 丹 ² 张芳菲 ³ 王楠 ⁴	91
Named Entity Recognition of Mobile Phone Electromagnetic Compatibility Management System Based on SVM	91
基于传输线理论的 TEM 小室纵向阻抗变化现象的分析及其对于 TEM 小室应用的影响 熊宇飞 ...	96
Analysis of Longitudinal Impedance Variation of TEM Cell based on Transmission Line Theory and Its effects on Application of TEM Cell	96
基于多维不确定度量化的电磁模型验证与确认研究 伍月千 ^{1,2} 鲍献丰 ^{1,2} 李瀚宇 ¹ 周海京 ¹ ...	101
Study on Multidimensional Uncertainties Quantification and its Application in Verification and Validation of Electromagnetic models	101

基于混响室的电场传感器校准传递方法 齐万泉 王淞宇 冯英强	107
Transfer Method for E-Field probe Calibration Based on Reverberation Chamber	107
基于量子相干效应的天线近场测量探头研究 曾庆运 薛正辉 任武 李伟明	111
Research on Antenna Near-Field Measurement Probe Based on the Quantum Coherence Effect ...	111
基于频率选择表面的宽带宽角扫描缝隙阵天线 李 伟 屈世伟	117
Wideband and Wide-angle Scanning Slot Array based on FSS	117
基于去耦分析的毫米波低副瓣阵列天线赋形算法研究 朱雄志 ¹ 刘欢欢 ¹ 张金玲 ¹ 郑占旗 ²	120
Research on Pattern Synthesis Algorithm of mm-wave Antenna Arrays with Low sidelobe Including Mutual Coupling	120
基于全局透射边界条件的宽角抛物方程电波预测模型 郭琪 黎子豪 朱琼琼 龙云亮	125
Research of radio propagation prediction model based on wide-angle parabolic equation with non-local boundary condition	125
基于神经网络的 DC-DC 变换器电磁干扰抑制方法 陶秀丽 孙 胜 孙家静 易嗣为 胡 俊	130
Mitigation of EMI in DC-DC Converter based on Neural Networks	130
基于时间反演的室内定位方案 郑名洋 ¹ 邓力 ² 李书芳 ³	133
Indoor positioning method based on time-reversal	133
基于特征模理论的微带天线耦合抑制方法 马振鹏 杨 照 吴 琦 苏东林	137
Reduction of Mutual Coupling for Microstrip Antennas Using the Theory of Characteristic Mode	137
基于无源谐波对消的宽阻带滤波器设计 李 坤 陈 翔 韩 慧 曾勇虎	141
Design of wide-stopband filter based on passive counteraction	141
基于下一代移动通信的宽频高增益基站天线 周 扬 贾婧蕊	146
A Wideband High Gain and Dual-polarization Base Station Antenna based on The Next Generation Mobile Communication System	146
舰船电磁辐射对燃油危害安全控制研究 蔡明娟 ¹ 曹 斌 ² 万海军 ¹ 吴文力 ¹	151
Study on Safety and Control about Hazards of Electromagnetic Radiation to Fuel of Ship	151
舰船电磁脉冲及雷电防护技术概述 耿建明 ¹ 宋璟毓 ³ 颜世伟 ²	155
舰船平台电磁兼容顶层数字化设计技术 刘其凤 吴为军 倪 超 王 春 方重华	158
The Top-Level Digital Design Method for Ship Platform	158

通信系统高阻抗接地电阻的可行性分析 杨川林 张庭炎 袁明福 王兴春 166

Feasibility analysis of high impedance grounding resistance of communication system 166

军民融合背景下商业现货电磁兼容性要求及风险评估 陈 锐 李建轩 万海军 施佳林 172

EMC Requiremens and Risk Assessment on the Commercial Items under the Background of
Civil-military Integration 172

雷电电磁脉冲对架空接地线缆的耦合效应研究 罗小军 石立华 张 琪 王建宝 付尚琛
孙 征 177

Study of Coupling Effects of Lightning Electromagnetic Pulse on Overhead Grounded Line 177

雷电直接效应高电压试验脉冲模拟源校准 谭艳清^{1,2} 张 成² 陈 彦² 182

Calibration of high-voltage pulse generator of lightning direct effects 182

某卫星星载电子设备 EMC 测试及整改 杨 青¹ 程显富² 宋 伟³ 187

EMC test and corrections for spaceborne electronic equipment 187

某型电源电场辐射发射测试整改分析及试验验证 张龙龙 王 磊 张振宇 李文晓 王本东
赵建伟¹ 宗 岩¹ 190

Design Improvement and Experimental Verification on Electromagnetic Radiation Emissions of
Specific Power Supply 190

某型铜网雷电通流能力仿真分析 陈 旻¹ 杜鸣心² 195

Simulation Analysis of Lightning current capacity of Copper mesh 195

某整机产品电磁瞬态干扰评价方法 邵伟恒¹ 李广伟^{1,2} 邵 鄂¹ 方文啸¹ 200

Evaluation method of electromagnetic transient interference foran appliance 200

高功率微波照射下抛物面天线响应特性仿真 金祖升 张 勇 施佳林 李建轩 205

Simulation on Response of a Parabolic Antenna to the Irradiation of the High Power Microwave 205

平衡天线测试方法研究和比较 蔡晨威 洪卫军 李书芳 209

Research and Compare on Measurement Methods of Balanced Antenna 209

平面波照射下微带贴片天线的散射特性仿真 李铨铨 唐斯密 唐兴基 倪家正 215

强电磁脉冲对军用加固计算机的影响建模与仿真分析 王堃兆 张明明 刘 锟 刘沂东 218

Modeling and simulation analysis of the influence of EMP on military reinforced computer 218

三维典型凸目标量子雷达散射计算方法研究 方重华¹ 石昕阳² 雷飞飞³ 刘其凤¹ 223

The Calculation Method of Quantum Radar Cross Section For 3D Convex Targets 223

利用转接头进行单相传导骚扰测试的验证分析 李文龙^{1,2} 白 璐^{1,2} 张 君³ 229

Test Verification and Analysis of Single-Phase EUT Conducted Interference Test by Adding Adapters in Three-Phase Artificial Power Network	229
无人机雷电间接效应试验方法的仿真分析 郭 飞 姜张磊 苏丽媛	233
Simulation of lightning indirect effect test method for UAV	233
面向 IoT 应用的无线射频能量收集电路设计 潘道儒 ¹ 刘元安 ¹ 吴 帆 ¹ 沈瑞松 ² 陈双明 ²	237
Design of RF energy harvesting circuit for IoT	237
系统电磁环境效应要求研究 张 勇 ^{1,2} 金祖升 ¹ 李建轩 ¹ 赵炳秋 ¹	242
Study on the requirements of Electromagnetic environmental effect for systems	242
斜置线缆电磁耦合的时域建模方法研究 刘 强 ¹ 叶志红 ²	246
Time Domain Modeling Method for the Coupling of Oblique Transmission Lines	246
新型静电放电测试系统的小型温度控制系统设计 王智宇 ¹ 阮方鸣 ^{*2} 孙晓平 ¹ 苏 明 ² 王 珩 ² 邓 迪 ³ 李 佳 ⁴	251
一种垂直极化的超宽带低剖面半折叠 Vivaldi 天线 肖 林 屈世伟 杨仕文	256
A vertically-polarized ultra-wideband, low-profile and folded half Vivaldi antenna	256
一种基于 GPU 并行优化的 CE-LOD-FDTD 方案 黎子豪 郭 琪 朱琮琮 龙云亮	259
A CE-LOD-FDTD Scheme Based on GPU Parallel Optimization	259
一种基于液晶的可调谐频率选择表面设计 杨 鑫 ¹ 杨国辉 ¹ 吴 群 ¹ 张 狂 ¹ 李迎松 ¹	265
A Tunable Frequency Selective Surface Design Based on Liquid Crystal	265
一种具有隐藏特性的缝隙偶极子阵列天线 梁志鹏 梁志禧 李元新 龙云亮	271
A Slot Dipole Array Antenna with Hidden Characteristics	271
一种屏蔽对称电缆屏蔽衰减的测量方法 杨金涛 韩玉峰 马永光 张磊	276
A Measurement of Screened Symmetrical Cable's Screening Attenuation	276
一种整车级导航系统的电磁兼容测试原理和方法 陈 睿 ^{1,2} 雷剑梅 ^{1,2} 黎晓娇 ^{1,2} 孙欣萌 ^{1,2} 耿东东 ²	280
An EMC Test Principle and Method Applied in Vehicle level Navigation System	280
有关因素对舰载超短波通信天线方向图的影响分析 施佳林 金祖升 陈 锐 吴文力	285
Analysis on the Influence of Relevant Factors on the Pattern of Shipborne VHF Communication Antenna	285
方向图可重构垂直极化低剖面紧凑天线设计 段云露 唐明春 武震天 陈晓明	289

Design of a pattern reconfigurable, vertically polarized, low-profile, compact antenna 289

复杂环境场景化电波传播预测及态势处理方法 穆冬梅¹ 吴 帆¹ 石 丹¹ 张庭炎² 甄海潮²
陈双明² 刘元安¹ 293

基于 Geo 编码的 CNN 无线室内定位 朱琼琼 黎子豪 陈绍建 龙云亮 299

Geo hash based convolutional neural network for wireless indoor localization 299

一种极化可重构惠更斯源电小天线设计 武震天 唐明春 304

A design of polarized reconfigurable, electrically small Huygens source antenna 304

一种紧凑平面下宽带极化可重构滤波天线设计 李大疆 唐明春 陈晓明 汪 洋 胡坤志 309

Design of a compact, planar, wideband polarization-reconfigurable filtenna 309

EMI 电源滤波器防护性能的脉冲电流注入法测试

黄瑞涛 段艳涛^① 王建宝 陈海林 石立华 王 可

(陆军工程大学电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室 南京 210007)

摘 要: 在电源输入端口安装 EMI 电源滤波器可有效抑制经电源线进入敏感设备或系统的电磁干扰和设备或系统自身的传导发射。为了测试 EMI 电源滤波器抑制传导干扰的性能,本文采用 PCI 注入的方法对某型号三相四线滤波器的三个相线进行了脉冲电流注入试验,通过计算电流抑制比,判断该滤波器的传导干扰抑制能力。初步测试结果表明:在注入电流 2.5 kA 的情况下,残余电流均小于 0.3 A,电流抑制比大于 74 dB。

关键词: EMI 电源滤波器, PCI 注入, 传导干扰, 电流抑制比。

中图分类号: TM89

文献标识码: A

Test of Protection Effect for EMI Power Filter by Pulse Current Injection Method

Huang Ruitao Duan Yantao Wang Jianbao Chen Hailin Shi Lihua Wang Ke

(National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-optical Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Installing the EMI source filter at the power input port can effectively prevent the electromagnetic interference from entering the sensitive device. Simultaneously, it can suppress the conducted interference from the device or the system itself. In order to test the protection performance of EMI source filter to suppress conducted interference, this paper uses pulse current injection method to a certain type of three-phase four-wire power filter. By calculating the current suppression ratio, the protection effect is judged. The test results show that the residual current is less than 0.3 A and the current suppression ratio is greater than 74 dB when the injection current is 2.5 kA.

Key words: EMI Power Filter, PCI Injection, Conducted Interference, Current Suppression Ratio.

1 引言

随着现代技术的快速发展,电子和电气设备不断增加,也使得电磁环境日益复杂,再加上设备的小型化、集成化、数字化程度不断提高,各种设备能否在这种环境下正常运行成为了目前关注的焦点。电磁干扰能量主要通过辐射性耦合和传导

性耦合进行传输,屏蔽、滤波和接地是最常用的电磁兼容控制技术。屏蔽用于切断空间的辐射发射途径,滤波用于切断通过导线的传导发射途径,而接地的好坏则直接影响到设备内部和外部的电磁兼容性。近年来,在电力电子技术大力发展的同时,人们在开关电源的电磁兼容性研究过程中普遍遇到的一个技术难题就是传导干扰问题^[1]。传导干扰主要包括设备信号线传导干扰、接地线共

^① 基金项目:国家重点研发计划(2017YFF0104300)

* 作者简介:段艳涛(通信作者)(1980 年出生),男,讲师,博士,硕士生导师。主要研究方向:电磁防护与电磁仿真。E-mail:dcmechdyt@126.com。

地阻抗干扰以及电源线传导干扰,其中电源线上的传导干扰危害最大,抑制环节也最为薄弱。因此,一般在电源输入端口都要安装 EMI 电源滤波器^[2],主要有两个目的,一是抑制经电源线进入敏感设备或系统的电磁干扰;二是抑制设备或系统自身的传导发射。

对 EMI 电源滤波器进行脉冲电流注入(PCI)试验是验证其电磁脉冲防护性能的有效方法^[3-5],GJB8848^[6]中提出了地面系统 EMP 效应验证方法,采用线缆 PCI 试验方法可测试 EMI 滤波器对于线缆上传导干扰的抑制能力。国外有文献报道相关试验情况,其按照 MIL-STD-188-125 标准对 HEMP 滤波器进行了 PCI 注入测试^[7]。

2 PCI 试验方法

根据测试标准要求^[3-5],对某型号 EMI 电源线滤波器进行脉冲电流注入测试。测试配置如图 1 所示^[6],脉冲电流注入源直接将大电流注入滤波器,经滤波器内部保护器件后的残余电流信号由电流探头进行测量,通过计算电流抑制比(注入电流/残余电流)判断 EMI 滤波器的电磁脉冲防护能力。

脉冲电流注入源的典型校准输出波形,如图 2 所示。波形上升时间小于 20 ns,脉冲半宽度 500~550 ns,满足标准要求^[3-5]。

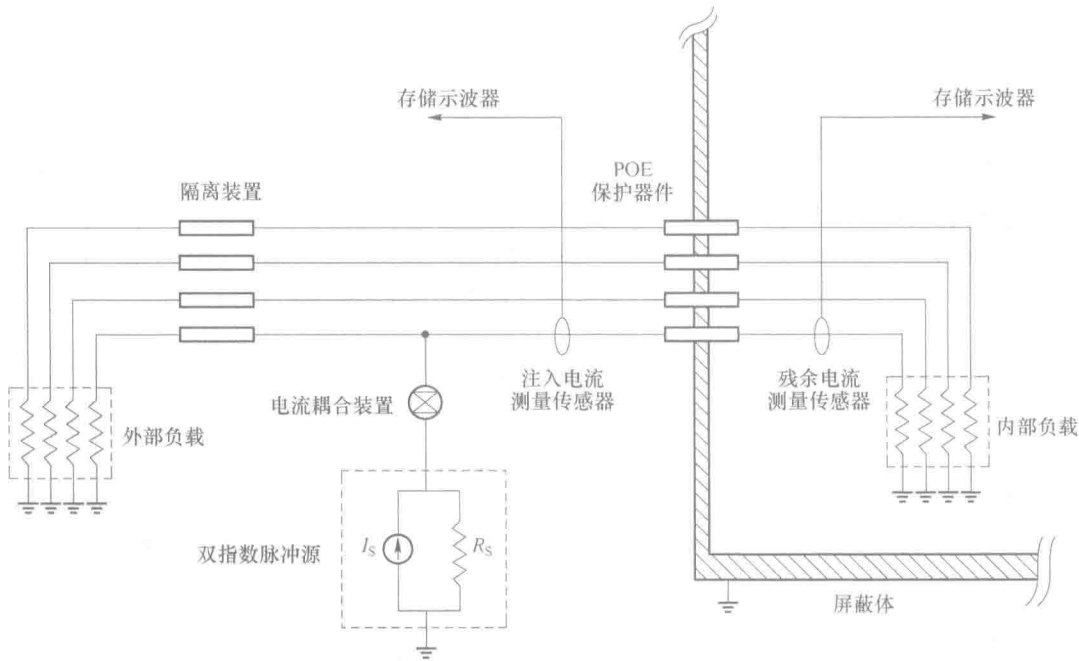


图 1 电源线滤波器电流抑制比测试配置图

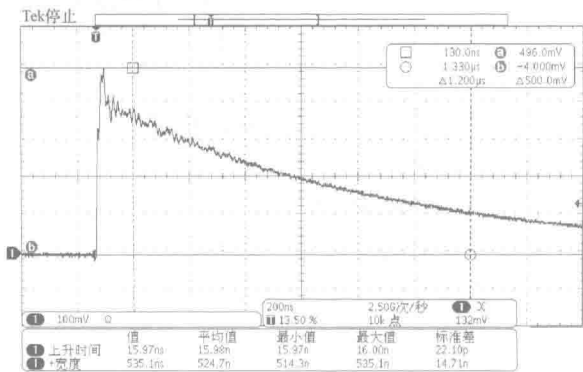


图 2 脉冲电流注入源的典型校准输出波形

3 注入试验

3.1 试验配置

在实际试验中,滤波器的防护性能不仅与其本身防护能力有关,整体试验的连接对测试结果也有影响。本次试验依据标准采用线一地注入的方式测量单根相线的电磁脉冲防护性能。

PCI 注入试验连接,如图 3 所示,被测件为某型号三相四线滤波器,测试三根相线的抑制传导干扰能力。脉冲电流源产生的电流注入滤波器输入端线缆中,经滤波器后,其输出端通过负载接地,根据标准要求,负载为 2 Ω。脉冲电流源负极、滤波器壳体与屏蔽柜均接地。接地要接牢固,不良的接地会损坏设备,同时对人身安全会有一定威胁。

电流探头 1 和电流探头 2 分别测量注入电流和残余电流,电流探头 2 放置于屏蔽柜中,防止外界电磁干扰。

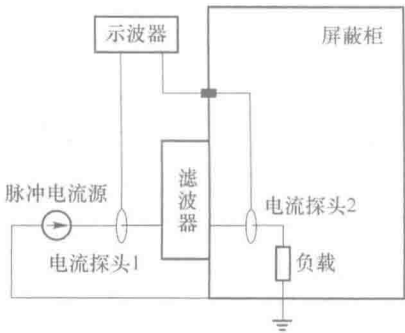


图 3 PCI 注入试验连接示意图

3.2 试验流程

(1) 校准脉冲电流源波形,注入电流波形应满足标准要求,波形上升时间小于 20 ns,脉冲半宽度 500~550 ns,校准后波形如图 2 所示。

(2) 试验连接:脉冲源输出电流直接注入滤波器待测线缆中,注入电流测量探头放置于屏蔽柜外,距离滤波器 15 cm,残余电流测量探头放置于屏蔽体内部,距离滤波器 15 cm,滤波器壳体与屏蔽柜外壳连接并接地,为保证壳体连接良好,中间垫多层铜网。

(3) 注入试验:注入电流分两个等级,1.2 kA 与 2.5 kA,注入 1.2 kA 的电流可预估注入 2.5 kA

时滤波器的残余电流大小,防止大电流造成损坏。

3.3 试验结果

选取不同电流峰值的脉冲波注入,测量电源滤波器输入峰值电流、残余峰值电流,由式(1)计算被测件的电流抑制比。被测件的测试数据记录,如表 1 所示,典型测试波形,如图 4 所示。

$$SE_V = 20 \log_{10} (I_{peak} / I_{residual}) \quad (1)$$

式中,SE_V 为电流抑制比, I_{peak} 为注入电流峰值, I_{residual} 为残余电流峰值。

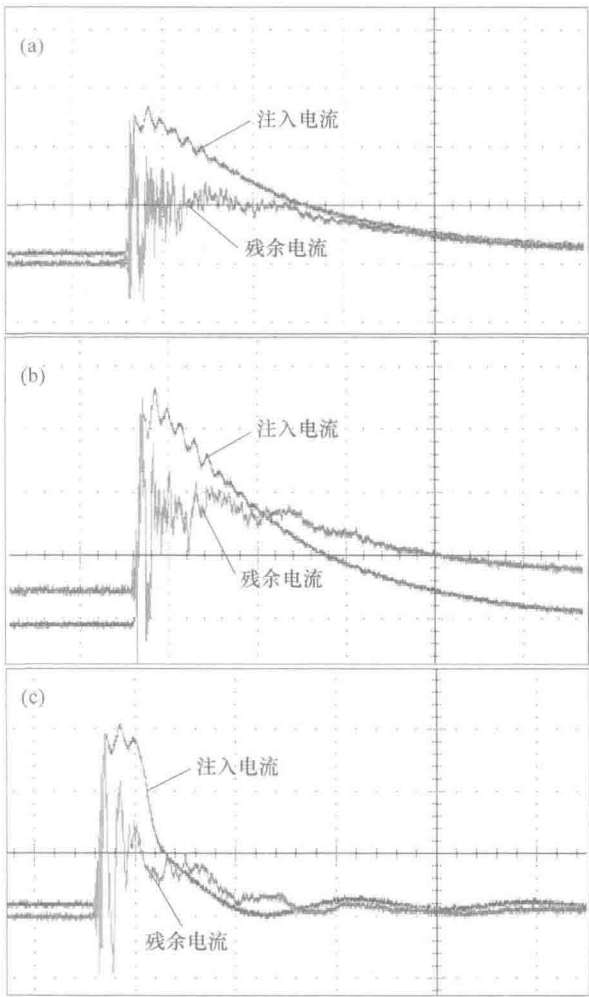


图 4 典型测试波形

由图 4 测试波形可知,在接入滤波器及负载后,因放电回路中电路参数发生变化,注入电流波形发生变化,在波形峰值处有一些震荡,滤波器输出端残余电流很小,因此易受干扰,测量结果叠加了干扰信号,这对准确测量残余电流峰值带来了一些影响。

图 4(a)和(b)为正常输出波形,在忽略残余电流波形前端噪声的情况下,可以看出,残余电流的上升时间增大,而半宽度与注入波形相当;图 4(c)为试验中异常测量结果,其原因为放电回路中电阻被击穿,因脉冲电流源输出为同轴传输线形式的,这种结构容易导致电阻被击穿,发生对地放电,打火等现象,所以改变其结构或提高其绝缘性可提高其稳定性。

表 1 脉冲电流注入抑制比数据记录表(线一地接入)

被测线	注入电流 峰值/kA	残余电流 峰值/A	电流抑制 比/dB
黄线	1.26	0.086	83
	2.50	0.096	88
绿线	1.30	0.240	74
	2.50	0.220	81
红线	2.50	0.284	78

从表 1 中可以看出,被测三相四线电源滤波器以线一地方式接入时对电磁脉冲电流抑制比大于 74 dB。被测滤波器在 2.5 kA 脉冲电流注入下,残余电流均小于 0.3 A。

4 结论

本文介绍了测量 EMI 电源滤波器传导耦合的试验方法,即脉冲电流注入(PCI)的方法。通过

PCI 注入的方式得到注入电流与残余电流,计算电流抑制比,以此判断滤波器的电磁脉冲防护能力。对三相四线滤波器的三根相线进行了 PCI 注入试验,测量注入电流与残余电流,试验结果表明:在注入电流 2.5 kA 的情况下,残余电流均小于 0.3 A,电流抑制比大于 74 dB。

参考文献

[1] 郭攀锋,谭国俊,赵艳萍,等. 开关电源传导 EMI 抑制技术探讨[C]. 全国电磁兼容会议. 2010:73-75.

[2] 周立夫,林明耀. EMI 电源滤波器的设计和仿真分析[J]. 上海:电器与能效管理技术, 2004(4):7-9.

[3] MIL-STD-188-125-1. High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Fixed Ground-Based Facilities[S]. Department of Defense Interface Standard,1998.

[4] MIL-STD-188-125-2. High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Transportable System [S]. Department of Defense Interface Standard,1999.

[5] GJB 3622——1999. 通信和指挥自动化地面设施对高空核电磁脉冲的防护要求[S],1999.

[6] GJB 8848——2016, 系统电磁环境效应试验方法[S],2016.

[7] Antoni Jan Nalhorczyk. HEMP Filter Design To Meet MIL-STD-188-125 PCI Test Requirements [J]. 10th Inter-national Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility, INCEMIC 2008,2008: 205-209.

Fe₃O₄—C 核壳微米颗粒的制备及微波吸收性能研究

张永搏 王 鹏 王 涛

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 兰州大学 物理科学与技术学院, 兰州 730000)

摘 要: 通过厌氧退火的方法合成直径约 400 nm 的磁性 Fe₃O₄—C 微米颗粒, 详细对其形状、组成和晶体结构表征, 发现颗粒呈不太规则的八面体结构, 并且外围包覆了碳层, 颗粒整体呈核壳状结构。这种材料的吸波性能结果显示厚度在 1.7~8.0 mm 和频率在 1.5~10 GHz 时可以达到 -10 dB 以下的反射损耗, 同时在 2.6 GHz 时达到了最大的反射损耗 -44 dB。通过对这种材料吸收峰频率和吸波体厚度关系的分析, 发现两者之间的关系满足四分之一波长关系。研究结果显示磁性 Fe₃O₄—C 微米颗粒作为轻质吸波材料在 S-X 波段有较高的应用潜质。

关键词: Fe₃O₄, 碳材料, 磁性材料, 吸波体。

Synthesis and electromagnetic wave absorption properties of Fe₃O₄—C core-shell micron particles via anaerobic annealing

Zhang Yong bo Wang Peng Wang Tao

(1. Institute of Modern Physics, Lanzhou 730000, China; 2. School of physical science and technology,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Magnetic Fe₃O₄-C (Fe₃O₄-carbon) micron particles with an average diameter of approximate 400 nm were synthesized by a simple anaerobic annealing method. Their morphology, composition, and crystal structure have been characterized in detail. It is found that the imperfect octahedral Fe₃O₄ is coated by a layer of carbon, and the particle has a core-shell structure. Electromagnetic wave absorption results show that the material has a reflection loss exceeding -10 dB in 1.5~10.0 GHz for an absorber thickness of 1.7~8.0 mm, accompanying a maximum reflection loss value of -44 dB at 2.6 GHz. The analysis on the relationship between absorption peak frequency and absorber thickness shows that their relationship obeys quarter-wave cancellation condition. The results suggest that the magnetic Fe₃O₄-C micron particles composite is good candidate for the use as a lightweight absorber in S-X wave band.

Key words: Fe₃O₄, carbon material, magnetic material, absorber.

1 引言

近年来, 由于微波吸收材料在民用和军事上的广泛应用^[1], 在千兆赫(GHz)范围内吸波性能引起了越来越广泛的兴趣。优良的吸波体要求所

使用的电磁吸波材料具有吸波带宽宽、尺寸小、重量轻的特点^[2,3]。磁粉复合吸波体是降低吸收体厚度、增加吸收带宽的有效方法。在磁性颗粒吸波材料领域中, 铁氧体颗粒与金属磁性颗粒相比具有密度低、化学稳定性好等优点。在铁氧体材料中, Fe₃O₄ 的饱和磁化强度最高。根据 Snoek

极限,高饱和磁化强度(M_s)可以在 GHz 频段获得更高的磁导率,这对降低吸波体厚度至关重要^[4]。因此, Fe_3O_4 在铁氧体中是一种很有应用潜力的吸波材料。单铁氧体粒子复合的吸收材料,其介电常数相对较低,这不利于在界面达到良好的阻抗匹配,也无法使吸波体的厚度更薄。为了提高阻抗匹配,由 Fe_3O_4 和石墨烯复合的高介电常数、重量轻的吸收体已被广泛报道^[4,5]。除了石墨烯,碳是另一种高介电常数和轻质量的材料,也可以用来调节阻抗匹配。如果能在 Fe_3O_4 颗粒表面涂上碳,并且包覆的碳壳还可以进一步提高 Fe_3O_4 的化学稳定性。Liu 等人设计了一种简单的方法,通过溶剂热法,使用 $FeCO_3$ 前体获得在克量级的多孔的微米 Fe_3O_4 球体颗粒。常用的水热法获得的多孔碳包覆的 Fe_3O_4 微球颗粒^[6]。Xiao 等人报道了简单的水热法合成 Fe_3O_4 -C 自组装棒状纳米结构的新方法^[7]。

在本文中,我们介绍了一种厌氧退火法制备 Fe_3O_4 -C 颗粒的方法,并且探究了其电磁波吸收性能。

2 实验

采用常规共沉淀法制备了平均尺寸约 400 nm 的 Fe_2O_3 前驱体,详细的制造方法在另一篇论文^[8]中有介绍。采用厌氧退火法在 Fe_3O_4 颗粒表面形成碳层。详细流程如下:0.6 g Fe_2O_3 和 0.15 g 葡萄糖添加到 4 mL 蒸馏水中超声搅拌 30 min。混合物转移到烤箱,在 50 °C 下烘烤 40 min,形成胶体混合物。然后在氩气中 480 °C 下煅烧 90 min,为了获得良好的 Fe_3O_4 的结晶颗粒,加热速率设为 2 °C/min。

用 X 射线衍射(XRD)检测了样品的相。在室温下用透射穆斯堡尔谱进一步鉴定了样品粒子的结构。 γ 射线源是 25 mCi ^{57}Co 钼源,振子驱动速度的校准是用的 α -Fe 箔。利用 MossWinn 程序对所有谱线做超精细场分布拟合^[9]。分别用扫描电子显微镜(SEM 日立 S-4800)和高分辨率透射电子显微镜(HETEM, JEM-2010, JEOL)观察了铁氧体颗粒表面层的形貌。采用振动样品磁强计(VSM, Lake Shore 7304)测量样品的饱和磁化

强度(M_s)和矫顽力(H_c)。将体积浓度为 50% 的 Fe_3O_4 -C 颗粒和石蜡复合材料压制成外径 7.00 mm、内径 3.04 mm 的环形样品,用安捷伦(E8363B)矢量网络分析仪测量了复合物的磁导率和介电常数。

根据传输线理论,当波通常以金属底板入射到吸收层时,在给定吸收层厚度下的 RL 曲线可由复磁导率和介电常数通过以下表达式计算:

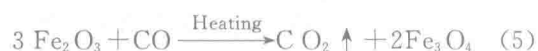
$$Z = \frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tan h j \left(\frac{2\pi t}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right) \quad (1)$$

$$RL(dB) = 20 \log \left| \frac{Z-1}{Z+1} \right| \quad (2)$$

式中, Z 为与自由空间阻抗相关的归一化输入阻抗; μ_r 和 ϵ_r 分别是复数磁导率和介电常数, t 为吸收器厚度; λ 是自由空间波长。

3 结果与讨论

图 1(a)为制备的 Fe_2O_3 颗粒和在厌氧条件下退火 Fe_2O_3 及葡萄糖复合物颗粒的 XRD 谱图。下谱线为典型的尖晶石相的 Fe_2O_3 。上谱线是厌氧条件下煅烧样品的衍射结果,索引图谱为 Fe_3O_4 。在高温碳化过程中,葡萄糖可通过热解^[10]转化为碳成分,碳成分可诱导碳热还原生成金属铁或金属离子 Fe^{2+} ^[11]。 Fe_3O_4 的 x 射线衍射图谱和 γ - Fe_2O_3 非常相似,需要用穆斯堡尔谱区分它们。已知 Fe_3O_4 结晶成立方尖晶石结构^[12],铁离子同时占据了四面体(A)位和八面体(B)位点(Fe)^A (Fe_2)^B O_4 。通过穆斯堡尔技术测量两个不同占位原子的超精细场,可以用来区分 Fe_3O_4 和 γ - Fe_2O_3 。图 1(b)给出了厌氧条件下 Fe_2O_3 和葡萄糖混合物煅烧样品室温下的 Mossbauer 光谱。我们可以发现,两个磁六级分裂谱刚好拟合,分别对应于 A 位点的 Fe^{3+} 离子和 B 位点的 ($Fe^{2+} Fe^{3+}$) 离子。穆斯堡尔谱的参数,如表 1 所示。A 位和 B 位超精细场分别为 48.7 T 和 45.6 T。结果表明,样品是 Fe_3O_4 而不是 γ - Fe_2O_3 ^[13,14]。厌氧退火过程中发生的化学反应可以用以下方程来解释:



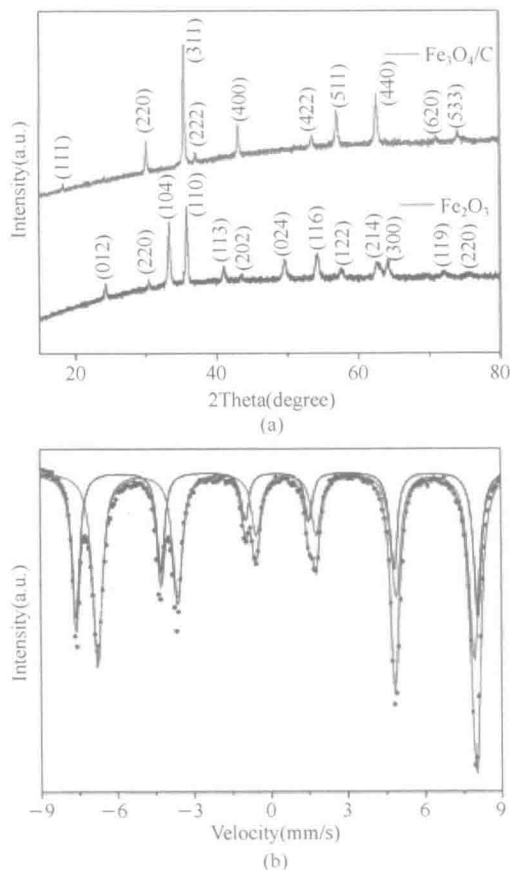


图1 (a) Fe₃O₄—C 颗粒的 XRD 谱和(b)穆斯堡尔谱

表1 从图1(b) Fe₃O₄—C 颗粒常温穆斯堡尔谱线中提取的 A 和 B 占位原子的超精细参数:超精细场(*B_{hf}*), 四级劈裂, 同质异能位移, 相对光谱所占面积。

Site	<i>B_{hf}</i> (T)	QS/(mm · s ⁻¹)	IS/(mm · s ⁻¹)	<i>I</i> %
A	48.7	-0.03	0.24	38.2
B	45.6	-0.04	0.60	61.8

Fe₂O₃ 和在厌氧条件下形成的 Fe₃O₄ 颗粒的 SEM 图像,如图 2(a)(b)所示。Fe₂O₃ 粒子呈不完整八面体结构,平均直径约为 400 nm。通过对比图 2(a)和(b),我们发现 Fe₂O₃ 脱氧为 Fe₃O₄ 时,样品颗粒大小没有变化。从图 2(b)中可以看出,Fe₃O₄ 颗粒表面形成了一些絮状物质,应该是方程(3)中描述的高温缺氧条件下的残余碳^[10]。利用透射电镜观察得到了图 2(c)中颗粒结构和更细微的细节。如图中所示,Fe₃O₄—C 颗粒形貌呈 Fe₃O₄ 颗粒上包覆了一层碳。退火颗粒样品的拉曼光谱如图 2(d)所示,峰出现在 1317 cm⁻¹ 的 D 波段,1596 cm⁻¹ 的 G 波段,分别来源于无序和有

序的晶体石墨碳。这一结果进一步揭示了颗粒表面的涂层是碳。以 411、500、612 和 666 为中心的峰值与 Fe₃O₄ 的 Fe—O 带有关^[15]。

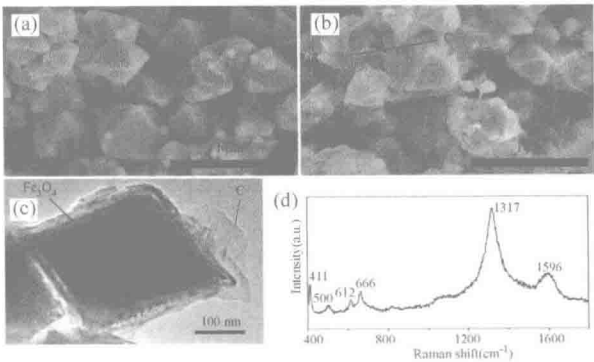


图2 (a) Fe₂O₃ 和(b) Fe₃O₄—C 微米颗粒的 SEM 图, (c) Fe₃O₄—C 微米颗粒的 TEM 图和拉曼散射光谱

Fe₃O₄—C 颗粒的常温磁滞回线,如图 3(a)所示。从图中可以看出矫顽力(*H_c*)和饱和磁化强度(*M_s*)分别为 30 Oe 和 76 emu g⁻¹。饱和磁化强度值小于纯 Fe₃O₄ 颗粒(*M_s* = 90 emu g⁻¹)^[16]。这是由于 Fe₃O₄—C 复合材料中含有非磁性碳。观察热重(TG)曲线图 3(b),可以看到两个重量损失的拐点,分别是吸附水挥发(约 150 °C)和碳发生化学反应(约 310 °C),以及一个微弱的质量增加区(Fe₃O₄ 氧化为 Fe₂O₃)转变温度范围 150 ~ 320 °C^[17]。由于碳成分可以在空气中完全燃烧,最终的产物将只有 Fe₂O₃。因此,该复合材料中的碳含量可以用^[18]计算:

$$wt\%R = (1 - wt\%carbon - wt\%water) \frac{1.5M(Fe_2O_3)}{M(Fe_3O_4)}$$

(6)

式中,wt %*R* 为氧化后剩余重量百分比,*M* 为化合物分子量。由式(6)推导出的 Fe₃O₄—C 复合物中碳的重量百分比为 10.5 %。

电磁波吸收体的吸收性能和材料的复介电常数和复磁导率高度相关,复介电常数的实部(ε')和复数磁导率实部(μ')代表电场和磁场能量的存储能力,虚部(ε''和 μ'')代表电场和磁场能量的损耗^[19,20]。磁性 Fe₃O₄—C/石蜡复合材料的复数介电常数谱,如图 4(a)所示,实部(ε')和虚部(ε'')的值在整个所测频段范围内约为 20 和 2。Fe₃O₄—C /石蜡复合物复数磁导率实部(μ')和(μ'')在 1 ~ 10 GHz 范围内所测曲线,如图 4(b)所示。μ''值在 1 GHz 时为 2.3 并且随着频率的升高逐渐降低至