

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.5.15

中图分类号: TM92

文献标志码: A

# 电力电子系统中的电磁兼容专辑主编述评

张 波<sup>1</sup>(中国电源学会会士), 李 虹<sup>2</sup>(中国电源学会高级会员), 王 硕<sup>3</sup>,  
和军平<sup>4</sup>(中国电源学会高级会员)

(1. 华南理工大学, 广州 510640; 2. 北京交通大学, 北京 100044; 3. 美国佛罗里达大学, 美国盖恩斯维尔 32611; 4. 哈尔滨工业大学(深圳), 深圳 518055)

**摘要:** SiC、GaN 新一代宽禁带功率半导体在推动电力电子设备快速高频化、高效化和小体积化的同时, 更容易干扰敏感负载、影响无线电通讯, 乃至危害自身安全、可靠运行, 从而给电力电子设备内外部的电磁兼容性能带来极大的压力和挑战。近年来, 功率开关器件的射频特性、磁性器件的宽频带电磁模型、开关电源电磁辐射机理、无线电能传输近场特性、新型电磁干扰 EMI (electromagnetic interference) 滤波器设计成为研究热点, 并受到了学术界及工业界的持续关注。《电源学报》特别推出“电力电子系统中的电磁兼容”专辑, 以期推进电力电子系统电磁兼容分析与设计领域难点和热点问题的探讨。

**关键词:** 电力电子系统; 电磁兼容性; 宽禁带器件

## Editorial for the Special Issue on Electromagnetic Compatibility in Power Electronic Systems

ZHANG Bo<sup>1</sup>, *Fellow, CPSS*, LI Hong<sup>2</sup>, *Senior Member, CPSS*, WANG Shuo<sup>3</sup>,  
HE Junping<sup>4</sup>, *Senior Member, CPSS*

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. University of Florida, Gainesville 32611, USA; 4. Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** The new generation of wide bandgap power semiconductors such as SiC and GaN are driving the rapid high-frequency, high-efficiency, and small volume development of power electronic equipment. However, they are also more likely to interfere with sensitive loads, affect wireless communication, and even endanger their own safety and reliable operation, which poses great pressure and challenges to the electromagnetic compatibility (EMC) performance of power electronic equipment. In recent years, the radiated frequency (RF) characteristics of power switches, wideband electromagnetic models of magnetic components, electromagnetic radiation mechanisms of switched mode power supplies, near-field characteristics of wireless power transmission (WPT), and the new designs of electromagnetic interference (EMI) filters have become current research hotspots and received continuous attention from academia and industry. The *Journal of Power Supply* has specially released the album "Electromagnetic Compatibility in Power Electronic Systems" to promote the exploration of difficult and hot issues in the field of EMC analysis and design of power electronic systems.

**Keywords:** Power electronics system; electromagnetic compatibility (EMC); wide bandgap devices

随着电力电子技术在新型电力系统、电气化交通、信息设备供电等诸多应用领域的持续创新和深化, 电磁兼容性成为制约电力电子设备与系统运行安全、负载稳定、环境友好的重要因素。特别是以碳化硅 SiC、氮化镓 GaN 为代表的新一代宽禁带功率半导体器件近年来得到迅速发展和应用。电力电子设备的效率、工作频率、功率密度快速提升, 使得电

力电子设备内外部的电磁兼容性分析和设计更具挑战性。准确、高效的电磁兼容分析和设计方法已成为电力电子技术进一步发展亟需研究的重点, 引起了全球电力电子研发机构与产业界的持续投入和高度重视。

为展示电力电子设备与系统中电磁兼容领域的最新进展和发展趋势, 共同推动电力电子系统电

磁兼容性理论和技术进一步深入发展,《电源学报》特别推出“电力电子系统中的电磁兼容”专辑。本专辑经过专家评审,最终录用论文 7 篇,其中关于功率半导体器件射频建模的论文 1 篇、磁器件电磁建模与测试的论文 2 篇、开关电源远场电磁辐射预测与机理的论文 2 篇、无线能量传输系统近场特性的论文 1 篇、人工智能 AI(artificial intelligence)在电磁兼容设计中应用的论文 1 篇。

功率半导体开关是电力电子设备工作的核心环节,也是形成各类电磁噪声的物理源头。然而,功率半导体开关瞬态电压、电流的波形受开关器件特性、驱动电路、主电路寄生参数等多种因素影响,其宽带、准确建模一直是电磁干扰 EMI(electromagnetic interference)研究的重要领域和关键。西安交通大学陈雯霞等<sup>[1]</sup>在《考虑结电容和跨导非线性的辐射频段 EMI 分析模型》一文中,提出 1 种改进的宽禁带 WBG(wide bandgap)半导体器件电磁干扰分析模型。在传统的非对称梯形波电磁干扰模型基础上,分析了 WBG 半导体器件的结电容和跨导体的非线性特性,评估了非线性参数对辐射频段噪声的影响,并将其应用在辐射频段噪声源抑制上。该研究对开关器件噪声特性的分析和主动抑制设计具有一定的参考价值。

高频功率磁器件是电力电子设备中重要的能量存储和转换环节,对电磁干扰形成、传播和抑制起着多种作用。由于磁体和绕组结构多样、磁媒质非线性强,磁性器件的宽带模型、具体电磁兼容作用等也是相关研究长期关注的重要方向。厦门理工学院连振珠等<sup>[2]</sup>在《考虑频变特性的共模电感宽频段阻抗建模方法》一文中,针对锰锌铁氧体环形共模电感,从磁芯和绕组分布电容变化的角度分析磁性材料参数、绕组结构对分布电容大小的影响,提出计及磁芯频变参数的共模电感宽频段阻抗建模方法,并在 150 kHz~100 MHz 范围内进行了验证。厦门理工学院傅恺宁等<sup>[3]</sup>在《高频变压器传导共模干扰分析与评估》一文中,针对变压器原边、副边共模噪声传播特性的测量问题,提出将函数发生器和示波器相结合的工程化测试方法,以进行传导频段

变压器共模抑制特性的可信评估,具有一定的工程应用价值。

电力电子设备较易产生 30~300 MHz 频段电磁辐射发射超标,通常认为此频段的远场电磁辐射是由设备输入、输出线缆上的共模电流所产生。然而,辐射频段电压、电流激励源的幅值较小,较难辨识和测量。加之线缆结构和布局多样,辐射传播特性复杂,使电磁辐射预测充满挑战,成为产业界和理论界长期关注的领域。哈尔滨工业大学(深圳)王伟新等<sup>[4]</sup>在《AC/DC 通信电源模块远场电磁辐射发射预测研究》一文中,对通信电源模块电磁辐射机理和预测方法进行创新,建立“输入端口”+“输出端口”的共模电压驱动辐射机理模型,提出综合共模电压驱动源与辐射体辐射传递函数的远场电磁辐射预测方法,设计频谱分析仪+衰减器的共模电压驱动源测量方法,使用电磁仿真软件得到辐射传递函数,实现了 4 kW AC/DC 通信电源模块的辐射发射预测。西安理工大学姬军鹏等<sup>[5]</sup>在《虑及互耦效应的线缆辐射 EMI 建模》一文中,针对开关电源功率线缆并行布线产生的线缆间互耦效应及其对电磁辐射的影响,通过线缆间的互阻抗参数描述互耦作用,得出开关电源线缆辐射的输入阻抗与 EMI 模型,研究表明考虑了耦合效应的辐射电磁干扰模型能够更准确地预测开关电源线缆的辐射电磁。

电力电子设备也极易形成近场电磁干扰,危害敏感设备并造成电场、磁场发射超标。特别是在无线电能传输 WPT(wireless power transmission)领域,传输空间的开放性使功率变换器、发送/接收线圈需精心设计。福州大学郑小瑶等<sup>[6]</sup>在《宇称-时间对称电场耦合无线电能传输系统电场分布特性研究》一文中,针对宇称-时间对称电场耦合无线电能传输 PT-ECPT(parity-time symmetric electric-field coupled wireless power transfer)系统的电场分布和优化设计展开研究,进行耦合极板周围电场分布的理论分析和仿真计算,发现在强耦合区域输出功率相同的情况下,PT-ECPT 系统电场分布在耦合系数较小时更为集中,从而更具安全性。研究结果对于电场

耦合无线电能传输的极板设计有直接指导意义。

近年来, AI 技术飞速进步, 在电力电子和电磁兼容领域也得到了逐步发展和应用, 展现出新的应用优势和可行性。深圳大学陈荣亮等<sup>[7]</sup>在《基于人工神经网络的差模 EMI 滤波器插入损耗预测》一文中, 对 AI 技术在 EMC 设计中的应用给出了良好示范, 为提高 EMI 滤波器插入损耗模型的预测精度及 EMI 滤波器设计效率, 采用反向传播神经网络来建立单级差模 EMI 滤波器插入损耗模型, 仿真和实测结果表明, 相较于高频电路行为模型, 基于神经网络的模型具有更好的预测精度和易用性, 为 EMI 滤波器的设计和优化提供了 1 种新的高效设计方法。

综上, 本专辑的论文从宽禁带功率器件与磁器件的射频建模、开关电源远场电磁辐射模型、无线充电设备近场分布特性、EMI 滤波器的 AI 设计等方面提出了新思路、新方法和新探索。然而, 由于电磁兼容性涵盖领域广、涉及影响因素多, 在电力电子设备内部自兼容性分析和设计、电力电子设备和系统的电磁噪声发射机理、电力电子变换器电磁兼容性设计等方面还有诸多问题值得深入研究, 需要电力电子与电磁兼容等领域的专家们共同努力, 进一步探讨, 共同推动我国电力电子电磁兼容理论和技术的不断发展。

最后, 衷心感谢华中科技大学裴雪军教授、浙江大学陈恒林教授、南京师范大学赵阳教授、北京理工大学翟丽教授、哈尔滨工业大学管乐诗副教授、西北工业大学陈希亮副教授、北京航空航天大学李晓博士等在本刊征稿中的贡献, 感谢专家学者和业界同行们对于本专辑在征文、投稿和评审工作中给予的大力支持!

#### 参考文献:

- [1] 陈雯霞, 陈文洁, 程睿, 等. 考虑结电容和跨导非线性的辐射频段 EMI 分析模型[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 19-27.  
Chen Wenxia, Chen Wenjie, Cheng Rui, et al. Analytical RE EMI model considering nonlinear characteristics of junction capacitor and transconductor [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 19-27 (in Chinese).
- [2] 连振珠, 傅恺宁, 陈为. 考虑频变特性的共模电感宽频段阻抗建模方法[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 28-36.  
Lian Zhenzhu, Fu Kaining, Chen Wei. Wide-band impedance modeling method for common-mode inductor considering frequency-dependent characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 28-36 (in Chinese).
- [3] 傅恺宁, 涂江涛, 陈为. 高频变压器传导共模干扰分析与评估[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 37-43.  
Fu Kaining, Tu Jiangtao, Chen Wei. Analysis and evaluation of conducted common-mode interference of high-frequency transformer [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 37-43 (in Chinese).
- [4] 王伟新, 舒俊华, 睢宁宁, 等. AC/DC 通信电源模块远场电磁辐射发射预测研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 44-51.  
Wang Weixin, Shu Junhua, Sui Ningning, et al. Prediction of far-field electromagnetic radiated emissions from AC/DC telecommunication power supply module [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 44-51 (in Chinese).
- [5] 姬军鹏, 张宁, 林珊, 等. 虑及互耦效应的线缆辐射 EMI 建模[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 52-59.  
Ji Junpeng, Zhang Ning, Lin Shan, et al. Radiated EMI modeling of cables considering mutual-coupling effect [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 52-59 (in Chinese).
- [6] 郑小瑶, 江彦伟, 疏许健, 等. 宇称-时间对称电场耦合无线电能传输系统电场分布特性研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 60-66.  
Zheng Xiaoyao, Jiang Yanwei, Shu Xujian, et al. Study on electric-field distribution characteristics of parity-time symmetric electric-field coupled wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 60-66 (in Chinese).
- [7] 陈荣亮, 梁海燕, 刘艺涛. 基于人工神经网络的差模 EMI 滤波器插入损耗预测[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 67-73.  
Chen Rongliang, Liang Haiyan, Liu Yitao. Insertion loss prediction of differential-mode EMI filter based on artificial neural networks [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 67-73 (in Chinese).

### 主编简介:



张波(1962—),男,中国电源学会会士,华南理工大学教授,博士生导师,兼任中国电源学会副理事长。长期从事电力电子与电力传动的科研和教学,研究方向包括电力电子分析与控制、电力电子系统与装置、电机与节能系统、电力电子技术在智能电网中的应用,是国内外电力电子非线性分析和控制方向的主要研究者之一。主持国家科技支撑计划项目 1 项、国家“863 计划”项目 1 项、国家自然科学基金重点项目 2 项、国家自然科学基金面上项目 4 项。在国内外刊物上发表论文 350 余篇,曾获国家优秀专利奖 1 项、省部级二等奖 8 项、广东省优秀专利奖 1 项。



李虹(1980—),女,中国电源学会高级会员,北京交通大学教授,博士生导师,兼任中国电源学会电磁兼容专业委员会主任。主持国家自然科学基金重点项目、国家自然科学基金面上项目、国家杰出青年基金、国家优秀青年基金、北京市自然科学基金、台达环境与教育基金等科研项目 10 余项。在国内外期刊、会议中发表论文 130 余篇,其中 SCI 收录论文 17 篇, EI 收录论文 30 余篇。出版英文专著 1 部,授权及申请发明专利 20 余项,获“中达学者”称号。



王硕(1974—),男,美国佛罗里达大学电气与计算机工程系正教授,IEEE 电磁兼容学会电力电子 EMI/EMC 特别委员会主席。发表 IEEE 期刊和会议论文 250 余篇,拥有美国/国际专利 30 余项。曾获 2006 年 IEEE 电力电子学会最佳论文奖、2004 年及 2012 年 IEEE 工业应用学会 William M. Portnoy 奖、2012 年美国国家科学基金会职业奖、2022 年 IEEE 安全与隐私研讨会杰出论文奖。兼任 *IEEE Transactions on Industry Applications*、*IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 副编辑, *IEEE Transactions on Power Electronics* 客座编辑,曾任 2014 年 IEEE 国际电动汽车会议技术项目联合主席。



和军平(1971—),男,中国电源学会高级会员,哈尔滨工业大学(深圳)副教授,博士生导师。主持国家自然科学基金面上项目、广东省自然科学基金、教育部博士点基金、深圳市科技攻关项目等科研项目 10 余项。在国内外期刊、会议中发表论文 80 余篇,出版中文专著 1 部,授权国内外发明专利 7 项。