

场线路多耦合下电机及其驱动系统辐射 电磁干扰预测方法研究

肖培¹, 王珏², 凌明祥², 聂宝林¹, 杜平安¹

(1. 电子科技大学机械电子工程学院, 四川成都 611731; 2. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川绵阳 621900)

摘 要: 本文研究了场线路多耦合下电机及其驱动系统辐射电磁干扰预测方法. 共模干扰回路是系统产生电磁辐射的主要来源, 分析了系统共模干扰源的产生机理和传导路径. 建立了共模干扰传导路径中主要部件的模型, 即交流感应电机等效电路模型及驱动系统输入输出屏蔽电缆线束模型等, 将各部分电路模型按照实际连接情况进行组合, 获得了系统辐射电磁干扰预测模型. 提出了利用 CST MWS 和 CST CS 对预测模型联合仿真的分析方法, 并通过实验验证了预测模型的正确性.

关键词: 电机; 驱动系统; 辐射电磁干扰; 预测方法; 共模干扰

中图分类号: TM153 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)10-2449-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.10.020

An Efficient Approach for Predicting Electromagnetic Interference Emission of Motor and Its Driver System Under Field-Circuit and TL Coupling

XIAO Pei¹, WANG Jue², LING Ming-xiang², NIE Bao-lin¹, DU Ping-an¹

(1. Department of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: This paper proposed an efficient approach for predicting electromagnetic interference emission of motor and its drive system under field-circuit and transmission line (TL) coupling. As the common mode interference circuit is the main source of electromagnetic emission, its propagation path is analyzed. On this basis, the key components' models in common mode interference conduction path are established, such as AC induction motor's equivalent circuit model, drive system's inputs' and outputs' harness model of shielded cable and so on. Then, each part circuit model is connected according to the system's actual combination and the system's EMI prediction model is obtained. Finally, CST MWS and CST CS studio joint simulation method is used to analyze the proposed prediction model and the results are in good agreement with experiment measurement, which validate the accuracy of our proposed approach.

Key words: motor; drive system; electromagnetic interference emission; prediction approach; common mode interference

1 引言

随着电力电子技术的发展, 电机及其驱动系统的应用越来越广泛, 由此带来的辐射电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI) 也日益严重. 这不仅威胁电气设备自身安全、稳定运行, 也影响周围电气系统的正

常工作, 辐射 EMI 已成为困扰电气设备安全稳定运行的尖锐问题^[1-7]. 共模干扰传导回路会产生辐射 EMI, 且随着功率器件开关频率和系统工作电压等级的提高, EMI 辐射强度也在加大. 解决该问题, 不仅涉及许多工程技术问题, 还涉及电磁场、多导体传输线和微波工程等理论问题. 因此, 研究电机及其驱动系统辐射 EMI

的预测方法既具有理论意义又具有工程应用价值。

近年来,各国学者就电机及其驱动系统的辐射 EMI 问题做了大量研究,文献[8,9]分析了 PWM 调速驱动系统共模干扰的产生机理,建立了等效电路计算共模干扰,并通过实验验证了等效模型的正确性.文献[10~12]建立了用于分析共模和差模传导干扰的高频电机模型.文献[13,14]研究了屏蔽电缆电磁瞬态效应及电缆辐射,并通过实验验证了预测模型的正确性.文献[15,16]建立了交流感应电机驱动系统中共模干扰辐射 EMI 的时域和频域预测模型.

本文针对场线路多耦合下电机及其驱动系统辐射 EMI 预测方法进行了研究,在分析系统辐射 EMI 的同时,也考虑了辐射场对系统本身的电磁干扰.共模干扰回路是电磁辐射的主要来源,首先分析了共模干扰的产生机理和传导路径,其次建立了共模干扰传导路径中主要部件的模型,即交流感应电机等效电路模型、驱动电路模型以及驱动系统输入输出屏蔽电缆束模

型,并将各部分电路模型按实际连接进行组合,获得整个系统辐射 EMI 预测模型.提出了利用 CST MWS 和 CST CS 对预测模型联合仿真的分析方法,并通过实验验证了预测模型的正确性.

2 系统共模干扰源分析与测试

2.1 共模干扰传导路径分析

电机及其驱动系统工作时的电磁辐射环境很复杂.由于驱动电路中分布着大量杂散电感和电容,开关器件开通和断开必然导致电压和电流发生瞬变,形成很高的 $\frac{di}{dt}$ 和 $\frac{du}{dt}$,对整个系统造成很强的电磁干扰.高 $\frac{du}{dt}$ 对寄生电容进行冲放电,产生高频共模电流^[17],并通过寄生电容→底面导体→电池组对底面导体的分布电容→电池组→直流母线→驱动器形成回路,如图 1 红线所示.此共模电流还会通过寄生电容→底面导体→动力电缆对底面导体的分布电容→动力电缆→驱动器形成回路.

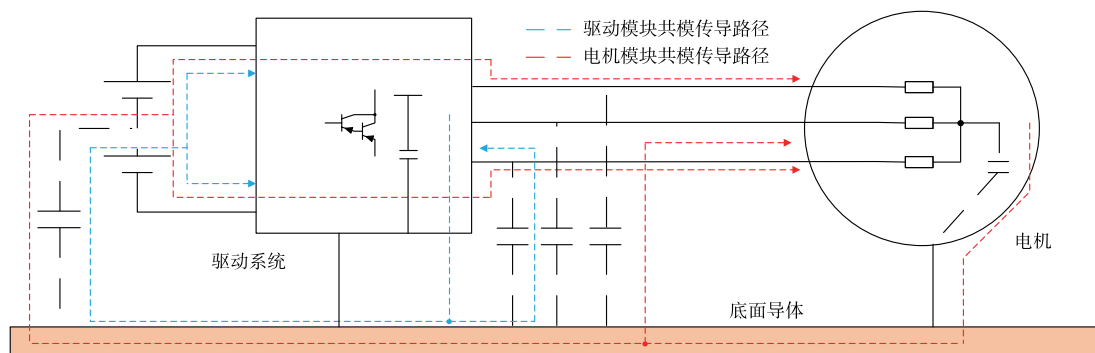


图1 系统共模干扰传导路径

对于电机内部工作电路,由于电机定子绕组与外壳之间同样具有较大的寄生电容,高频共模电压通过寄生电容产生流向底面导体的共模电流^[18].此共模电流的一个回路为:定子绕组→定子绕组与外壳的寄生电容→底面导体→电池组对底面导体的分布电容→直流母线→驱动器→动力电缆→电机,如图 1 蓝线所示.此共模电流另一个回路是:定子绕组→定子绕组与外壳的寄生电容→底面导体→动力电缆对底面导体的分

布电容→动力电缆→电机.

2.2 共模干扰测试实验

驱动系统既有输入电缆,即直流母线,又有输出电缆,即三相交流动力电缆.依照 GB/T18655 标准对参考接地进行设置,将线路阻抗稳定网络(Line Impedance Stabilization Network, LISN)参考点、驱动器外壳和电机外壳通过导线与参考地共地连接,如图 2 所示.

在电机空载情况下,用电流探头和频谱分析仪测

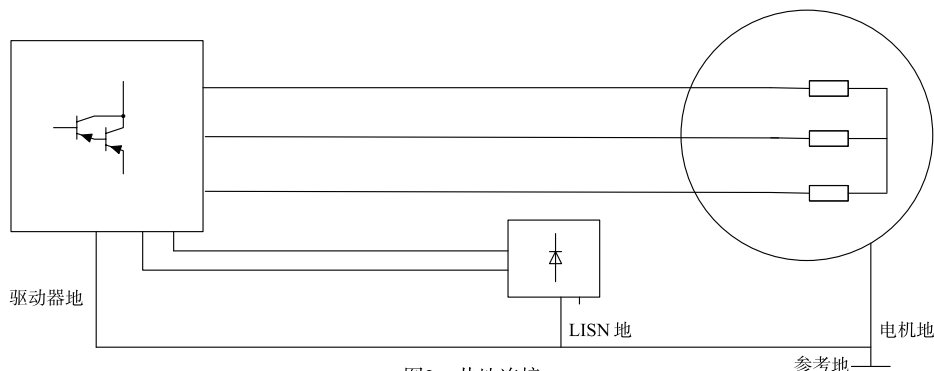
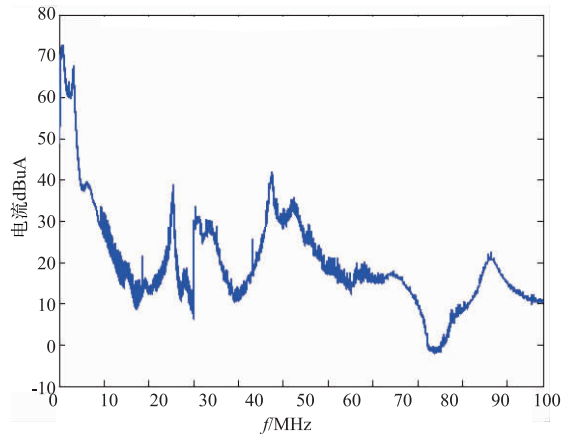
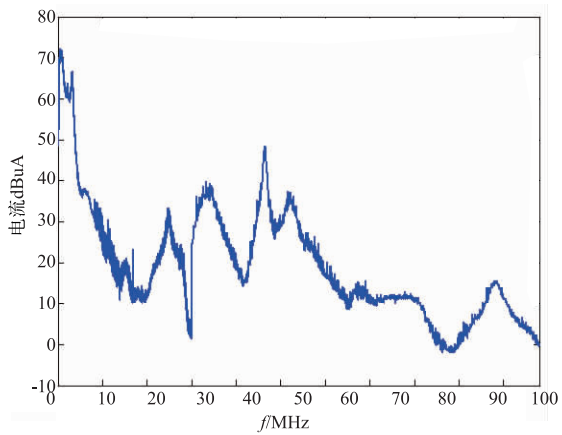


图2 共地连接

量直流母线上的共模电流,结果如图 3 所示. 在不同测试频段共模电流都伴有少量毛刺,这是由于驱动电路中存在大量寄生电感和电容.



(a) 正极输入直流母线共模电流



(b) 负极输入直流母线共模电流

图3 共模电流

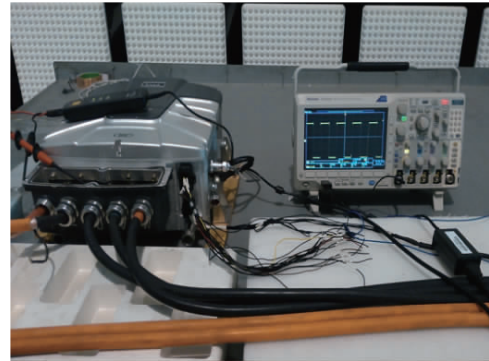
采用示波器测试驱动系统三相交流电缆的时域共模电压,如图 4(a)所示. 示波器正极接三相交流电压输出端,负极接驱动系统参考地,共模电压测试结果如图 4(b)所示. 该电压通过电机定子绕组与外壳间的寄生电容产生流向底面导体的共模电流,从而向电缆周围产生电磁辐射.

3 辐射 EMI 模型建立

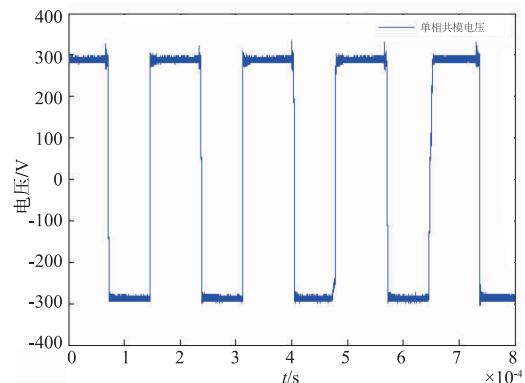
3.1 电机等效电路模型

本文基于阻抗幅频特性曲线,采用谐振单元建立交流感应电机等效电路模型. 电机单相等效电路模型如图 5 所示,图中 Z_{cm} 和 Z_{dm} 分别表示电机端口共模阻抗和差模阻抗^[19]. Z_{cm} 和 Z_{dm} 测试方法分别如图 6 和图 7 所示. 通过阻抗分析仪测量 Z_{cm} 和 Z_{dm} 幅频特性,利用最小二乘方法得到阻抗幅频特性拟合曲线^[20].

以松下 MDMA152A1H 伺服电机为例建立电机等效电路模型. 电机端口共模阻抗和差模阻抗测试与仿



(a) 共模电压测试实验



(b) 单相共模电压测试曲线

图4 共模电压

真幅频特性如图 8 所示,根据图 8 并结合串、并联谐振单元阻抗表达式,计算出谐振单元的 R 、 L 、 C 等电路参数,如表 1、表 2 所示.

根据表 1、表 2 的谐振单元 R 、 L 、 C 参数建立电机单相 Z_{cm} 和 Z_{dm} 的等效电路,如图 9 所示.

表 1 共模电路参数列表

| 单元 | R/Ω | C/F | R_L/Ω | L/H |
|------|-----------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| 单元 1 | 3.85×10^6 | 2.70×10^{-9} | 0 | 0 |
| 单元 2 | 1.00×10^{15} | 2.16×10^{-9} | 2.50×10^2 | 9.13×10^{-4} |
| 单元 3 | 2.32×10^{12} | 6.56×10^{-9} | 8.04 | 8.16×10^{-6} |
| 单元 4 | 1.00×10^{20} | 9.52×10^{-11} | 4.10 | 2.52×10^{-7} |
| 单元 5 | 1.00×10^{20} | 6.33×10^{-11} | 9.52 | 1.22×10^{-6} |

表 2 差模电路参数列表

| 单元 | R/Ω | C/F | R_L/Ω | L/H |
|------|-----------------------|------------------------|--------------|-----------------------|
| 单元 1 | 3.79×10^5 | 3.01×10^{-9} | 0 | 0 |
| 单元 2 | 1.00×10^{20} | 6.27×10^{-9} | 8.26 | 8.37×10^{-6} |
| 单元 3 | 1.29×10^{20} | 7.29×10^{-11} | 3.12 | 1.26×10^{-7} |
| 单元 4 | 1.00×10^{20} | 1.37×10^{-10} | 4.29 | 5.66×10^{-7} |

根据电机单相等效电路模型及 Z_{cm} 和 Z_{dm} 的等效电路,采用星型连接建立松下 MDMA152A1H 伺服电机等

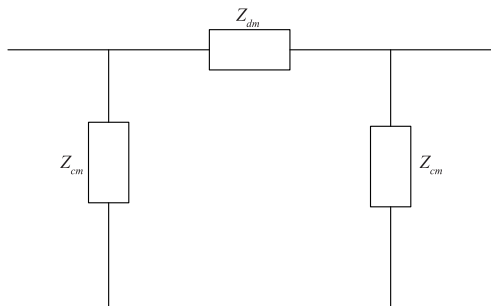
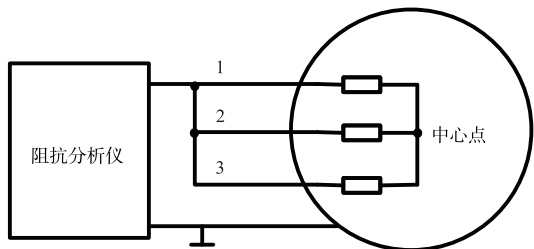
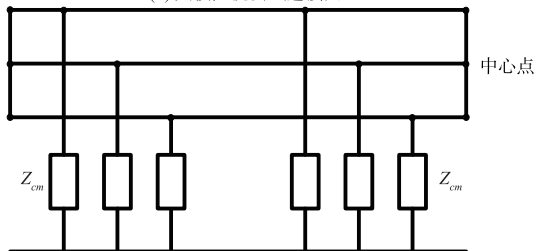


图5 单相等效电路模型

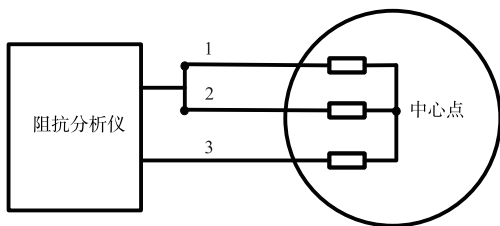


(a) 共模阻抗测试连接图

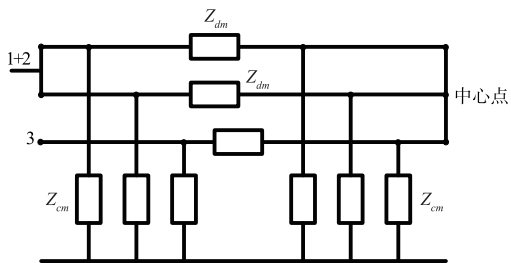


(b) 共模等效阻抗

图6 Z_{cm} 测试方法



(a) 差模阻抗测试连接图



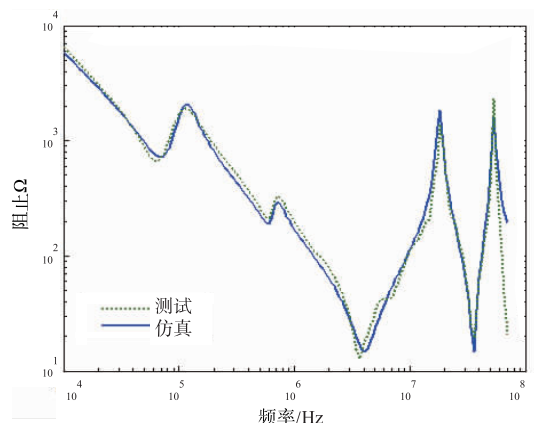
(b) 差模等效阻抗

图7 Z_{dm} 测试方法

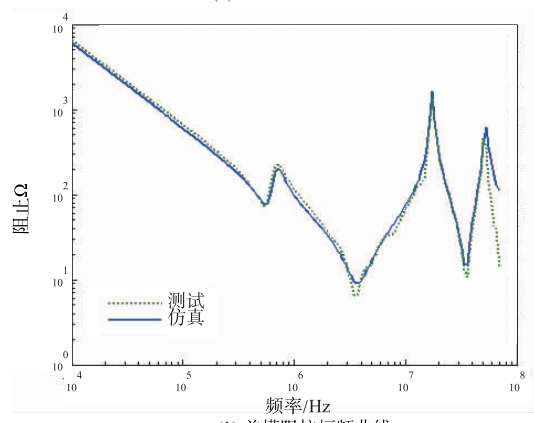
效电路模型,如图 10 所示.

3.2 直流母线及动力电缆模型

在 CST Cable 中建立驱动系统三相交流输出电缆

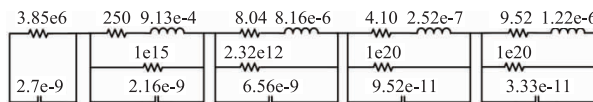


(a) 共模阻抗幅频曲线

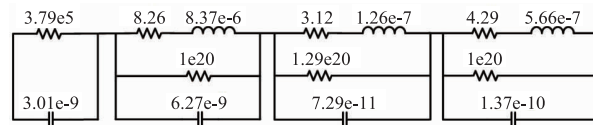


(b) 差模阻抗幅频曲线

图8 共模阻抗和差模阻抗测试与仿真幅频特性



(a) Z_{cm} 等效电路



(b) Z_{dm} 等效电路

图9 电机单相 Z_{cm} 和 Z_{dm} 等效电路

和输入直流母线线束模型,如图 11 所示. 电缆均采用 RG58 屏蔽线,间距 10mm. 2D(TL) Modeling 传输线求解器基于积分方程和边界元算法,从电缆结构及布局数据中抽取传输线参数生成电缆线束等效电路模型,如图 12 所示.

3.3 系统预测模型

系统辐射 EMI 预测模型的建立分为两个步骤. 首先,在 CST MWS 中建立系统 CAD 模型,如图 13(a) 所示,包括驱动器、电机、LISN、电池组及屏蔽电缆等,结构尺寸及布局均参照实际实验系统. 其次,利用 CST CS

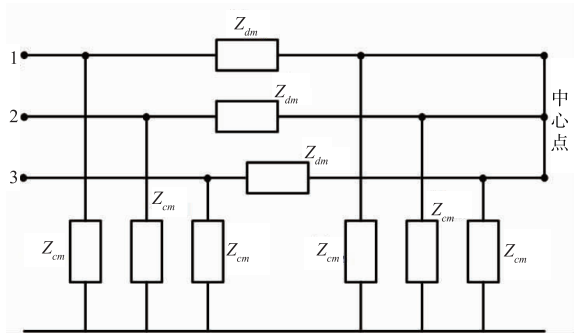


图10 电机等效电路拓扑图

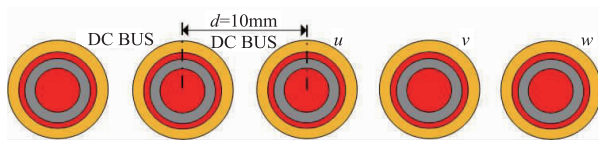


图11 线缆截面及布局

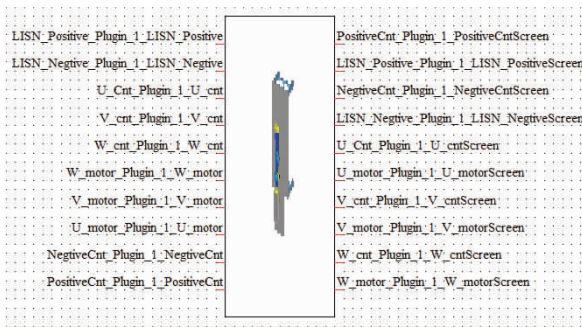


图12 电缆等效电路模型

的 2D (TL) Modeling 传输线求解器生成电缆线束等效电路模型,对模型端口设置相应的负载和激励源,得到整个系统辐射 EMI 电路模型,如图 13(b) 所示。

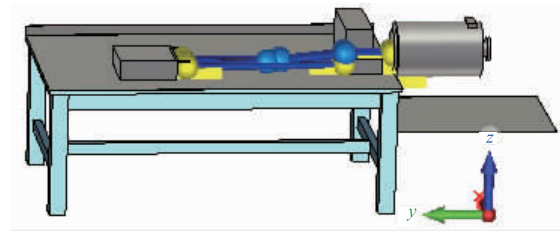
4 仿真与验证

4.1 CST 联合仿真分析方法

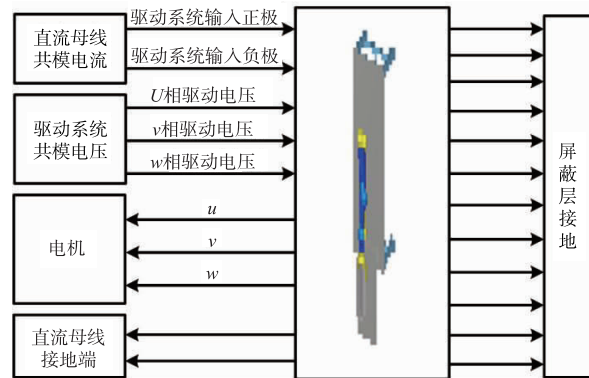
本文利用 CST MWS 和 CST CS 对预测模型进行联合仿真,仿真技术路线如图 14 所示. 首先利用 2D(TL) Modeling 建立系统电缆线束等效电路模型,并基于电机等效电路模型,在 CST DS 中建立辐射 EMI 仿真电路;其次,导入系统实验测试数据,通过电路计算电缆电流分布,然后通过 CST MWS 与 CST CS 的数据交换接口,将此电流分布直接导入 CST MWS 时域求解器作为辐射源进行辐射分析. 利用 CST CS 传输线求解器的“Bi-directional”耦合方式,从而考虑了辐射场对系统本身的电磁干扰影响。

4.2 方法验证

本节利用 CST 联合仿真分析技术,对图 13 中系统辐射 EMI 预测模型进行仿真,并通过三相交流电机系



(a)系统CAD模型



(b)系统辐射EMI电路

图13 系统辐射EMI预测模型

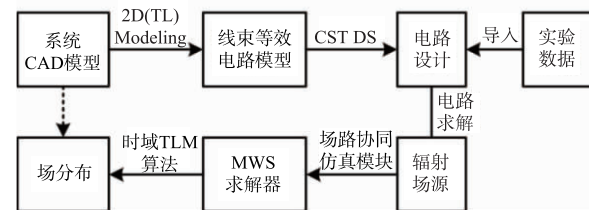


图14 系统辐射EMI仿真技术路线

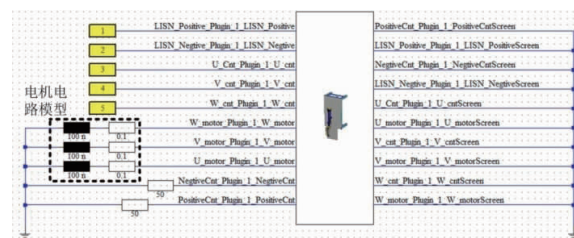


图15 三相交流电机系统辐射EMI电路模型

统辐射 EMI 测试实验验证了本文方法的正确性. 三相交流电机系统辐射 EMI 仿真电路如图 15 所示,电路模型的激励源,即直流母线共模电流和驱动系统共模电压,为图 3 和图 4 所测试的共模电流和共模电压. 由于 CST CS 中电路求解采用时域求解器,所以先将直流母线共模电流频域测试信号通过 IFFT 转换到时域,再作为激励源导入仿真模型。

根据 GB/T18655 测试标准,在微波暗室对系统辐射 EMI 进行测试,实验布局如图 16 所示。

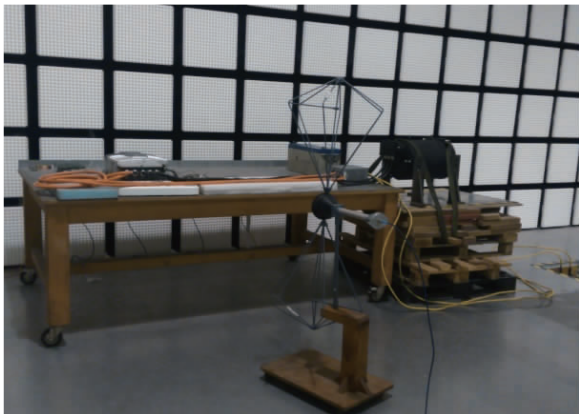


图16 电机及其驱动系统辐射EMI测试实验

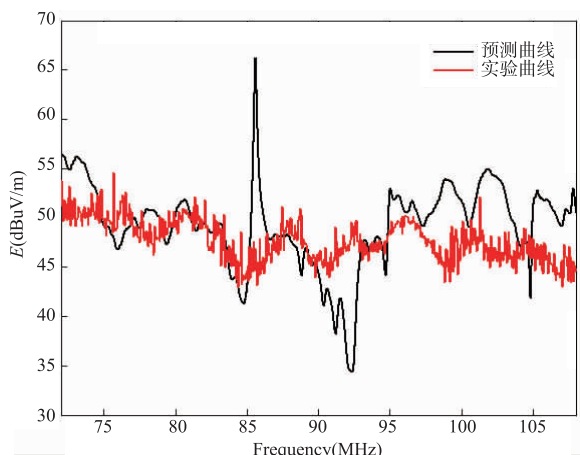


图17 实验与仿真结果对比

采用垂直极化双锥天线测试(72,108) MHz 频段范围内系统辐射 EMI,即辐射电场大小.系统预测模型仿真与实验结果对比如图 17 所示,在整个测试频段内,预测模型的仿真结果与实验结果基本吻合,表明本文预测方法具有较高的精度.

4.3 伺服电机系统辐射 EMI 分析

根据 3.1 节中松下 MDMA152A1H 伺服电机等效电路模型,利用本文提出的预测方法,建立其系统辐射 EMI 仿真电路,如图 18 所示,其中电路模型激励信号,即直流母线及驱动系统共模信号,均采用单位电压脉冲信号.系统辐射 EMI 仿真结果如图 19 所示,在系统谐振频率点 81MHz、96.7MHz 和 105MHz 处,辐射 EMI 急剧增加.

5 结束语

本文研究了场线路多耦合下电机及其驱动系统辐射 EMI 预测方法.分析了系统共模干扰传递路径,建立了系统辐射 EMI 预测模型,提出了利用 CST MWS 与 CST CS 对预测模型联合仿真的分析方法,并通过辐射

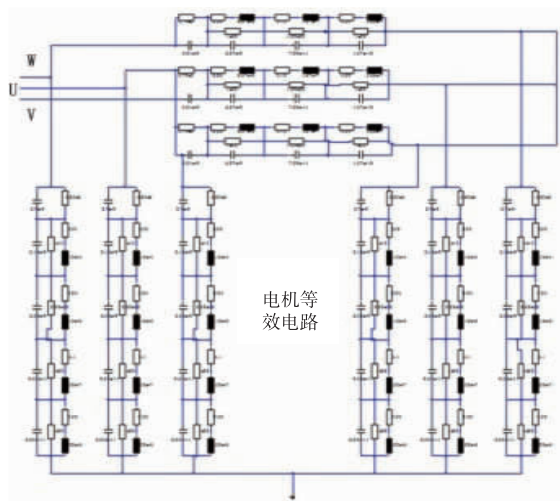
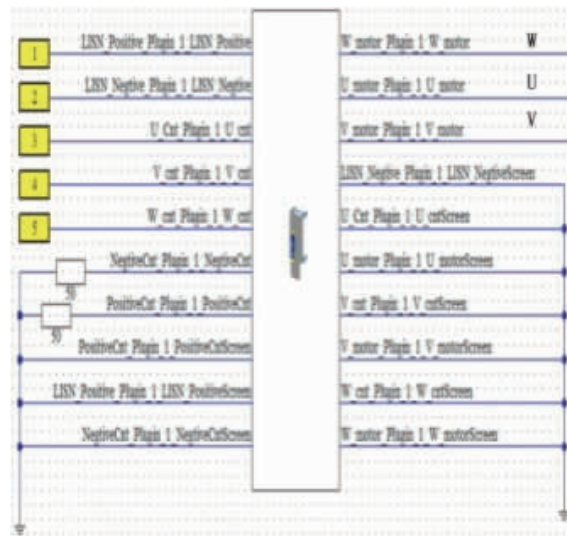


图18 伺服电机系统辐射EMI电路模型

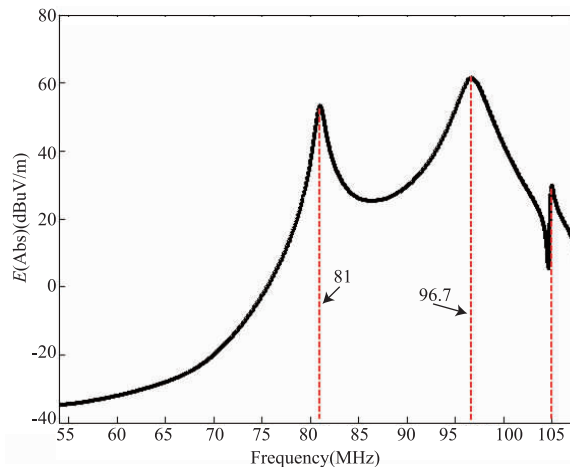


图19 伺服电机及其驱动系统辐射EMI仿真结果

EMI 测试验证了预测方法的正确性.利用 CST CS 中 2D 传输线求解器,能快速准确生成电缆等效电路模型,通

过电路仿真得到电缆线上电流分布. 电流分布在三维全波分析中作为辐射源, 替代了屏蔽电缆线束模型, 避免了对复杂屏蔽电缆的网格划分, 从而大大降低内存需求, 提高了计算效率.

参考文献

- [1] ORLANDI A, SCHEICH R. EMC in power electronic devices; radiated emissions from a silicon controlled rectifier [A]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compat [C]. Chicago, USA: IEEE Press, 2004. 22 - 26.
- [2] SWAMY M M, YAMADA K, KUME T. Common-mode current attenuation techniques for use with PWM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 16 (2): 248 - 255.
- [3] 齐磊, 崔翔. 基于时域有限差分法的电缆系统电磁瞬态分析 [J]. 电子学报, 2006, 34(3): 525 - 529.
QI Lei, CUI Xiang. Electromagnetic transient analysis of cable system based on FDTD method [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 525 - 529. (in Chinese)
- [4] 石峥, 杜平安, 聂宝林. 基于矢量有限元法的热沉结构电磁辐射研究 [J]. 电子学报, 2009, 37(11): 2439 - 2443.
SHI Zheng, DU Ping-an, NIE Bao-lin. Study of heatsink electromagnetic radiation based on vector FEM [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(11): 2439 - 2443. (in Chinese)
- [5] 田锦, 谢拥军, 辛红全, 等. 复杂系统电磁兼容评估的改进 TOPSIS 方法 [J]. 电子学报, 2013, 41(1): 105 - 109.
TIAN Jin, XIE Yong-jun, XIN Hong-quan, QIU Yang, KE Zhong-ming. A synthetical EMC evaluation method for a complicated system based on a novel TOPSIS approach [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 105 - 109. (in Chinese)
- [6] 刘恩博, 杜平安, 周元, 等. 以 PCB 为干扰源的带孔机箱电磁辐射特性仿真研究 [J]. 电子学报, 2015, 43(3): 611 - 614.
LIU En-bo, DU Ping-an, ZHOU Yuan, REN Dan. Numerical simulation on the electromagnetic radiation performance of enclosure with apertures excited by PCB [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(3): 611 - 614. (in Chinese)
- [7] YOUNG H L, ADEL N. Analysis and modeling of conductive emi noise of power electronics converters in electric and hybrid electric vehicles [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Power Electronics Conference [C]. USA: IEEE Press, 2008. 1952 - 1957.
- [8] RENDUSARA A D, CENGELCI E. Analysis of common-mode voltage "neutral shift" in medium voltage PWM adjustable speed drive (MV-ASD) systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(6): 1124 - 1133.
- [9] LUSZCZ Jaroslaw. Modeling of common mode currents induced by motor cable in converter fed AC motor drives [A]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic, Compatibility [C]. USA: IEEE Press, 2011. 459 - 464.
- [10] 孟进, 马伟明, 张磊. PWM 变频驱动系统传导干扰的高频模型 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 141 - 148.
MENG Jin, MA Wei-ming, ZHANG Lei, PAN Qi-jun, ZHAO Zhi-hua. High frequency model of conducted EMI for PWM variable-speed drive systems [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(15): 141 - 148. (in Chinese)
- [11] 汪泉弟, 张飞, 彭河蒙, 等. 基于向量拟合法的永磁同步电机 EMI 高频模型 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 77 - 84. 83 - 88.
WANG Quan-di, ZHANG Fei, PENG He-meng, et al. permanent magnet synchronous AC motor EMI model based on vector-fitting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 77 - 84. 83 - 88. (in Chinese)
- [12] 安群涛, 姜保军, 孙力. 感应电机传导干扰频段 II 型共模等效模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 73 - 79.
AN Qun-tao, JIANG Bao-jun, SUN Li, ZHAO Ke. Novel π -type conducted common-mode EMI model for induction machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 73 - 79. (in Chinese)
- [13] 孙铁雷, 林程, 曹万科. 带有屏蔽线缆的电动车辆动力系统共模模型与预测 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 128 - 132.
SUN Tie-lei, LIN Cheng, CAO Wan-ke. Common mode prediction on cable shielded drive system in electric vehicle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 128 - 132. (in Chinese)
- [14] 齐磊, 崔翔. 基于时域有限差分法的电缆系统电磁瞬态分析 [J]. 电子学报, 2006, 34(3): 525 - 529.
QI Lei, CUI Xiang. Electromagnetic transient analysis of cable system based on FDTD method [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 525 - 529. (in Chinese)
- [15] RAN L, CLARE J, BRADLEY K, et al. Conducted electromagnetic emissions in induction motor drive systems part 1: time domain analysis and identification of dominant modes [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(4): 757 - 767.
- [16] RAN L, CLARE J, BRADLEY K, et al. Conducted electromagnetic emissions in induction motor drive systems part 2: frequency domain models [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(4): 768 - 776.
- [17] ZHONG E K, LIPO T A, JAESCHKE J R, et al. Analyti-

- cal estimation and reduction of conducted EMI emissions in high power PWM inverter drives [A]. Proceedings of the 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference [C]. Maggiore, Italy: IEEE Press, 1996. 1169 – 1175.
- [18] HE J, ZHANG B, YU S, et al. Electromagnetic conductive interference characteristics in driving system of fuel cell bus [A]. Proceedings of the IEEE International Symposium Electromagnetic Compatibility [C]. USA: IEEE Press, 2007. 1 – 4.
- [19] IDIR N, WEENS Y, MOREAU M, FRANCHAUD J J. High-frequency behavior models of AC motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (1) : 133 – 138.
- [20] 陈名, 孙旭东, 黄立培. 变频空调压缩机电机高频参数的提取 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2011, 51 (1) : 43 – 46.
- CHEN Ming, SUN Xu-dong, HUANG Li-pei. Extraction of high frequency operating parameters of a compressor motor for a variable frequency air conditioner [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51 (1) : 43 – 46. (in Chinese)

作者简介



肖培男, 1989 年 12 月出生, 湖南邵阳人. 2013 年毕业于电子科技大学机械电子工程学院, 现为电子科技大学博士研究生, 主要研究方向为电磁兼容分析及数值仿真、电缆线束电磁辐射干扰建模及分析.
E-mail: xiaopei_uestc@sina.cn



王珏 (通信作者) 男, 1982 年 4 月出生, 河南林州人, 中国工程物理研究院研究生部工学硕士, 现为中国工程物理研究院总体工程研究所环境试验中心副主任, 主要从事装备环境适应性、可靠性与安全性试验技术研究及系统研制.
E-mail: swcaep@163.com