



基于 Q3D 的宽带电力线通信信道建模

曹旺斌¹, 梁晓林²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 河北大学电子信息工程学院, 河北 保定 071002)

摘要: 提出了一种基于 Q3D 的宽带电力线信道建模方法。首先利用 Q3D 软件提取电力线信道的单位长度参数 RLGC, 然后根据提取的 RLGC 参数计算电力线信道的 ABCD 传输矩阵, 最后根据 ABCD 矩阵求出电力线通信信道传输函数和输入阻抗的幅频响应和相频响应。利用所提方法, 建立基于 3 mm×4 mm 三芯对称电缆的宽带电力线通信信道模型, 并在 30 kHz~100 MHz 频带范围内与实测数据进行对比。结果表明, 仿真结果能够很好地符合测量结果, 本文所提方法能够快速、准确地建立电力线宽带信道模型, 对于电力线通信信道特性的研究以及工程实践具有重要意义。

关键词: 电力线通信; 宽带; 信道模型; Q3D; 三芯对称电缆

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019021

Broadband power line communication channel modeling based on Q3D

CAO Wangbin¹, LIANG Xiaolin²

1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

2. College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China

Abstract: A method of broadband power line communication (PLC) channel modeling based on Q3D extractor was proposed. The per unit length RLGC parameters of PLC channel was extracted by the Q3D extractor. Then, the ABCD transfer matrix of power line channel was calculated based on the extracted RLGC parameters. Finally, the amplitude and phase frequency responses of the channel transfer function and input impedance were obtained by using ABCD matrix. Based on the proposed method, a broadband PLC channel model for 3 mm×4 mm symmetrical cable was set up. The calculated results show that the simulated results fit the measured results well. The proposed method can quickly and accurately establish the broadband PLC channel model, which is of great significance for studying the characteristics of PLC channel.

Key words: power line communication, broadband, channel model, Q3D, three cores symmetrical cable

收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2019-01-15

通信作者: 梁晓林, xl.liang@foxmail.com

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2018MS096); 河北省科技计划项目 (No.17211704D); 国家自然科学基金资助项目 (No.61172075)

Foundation Items: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2018MS096), The Science and Technology Planning Project of Hebei Province (No.17211704D), The National Natural Science Foundation of China (No.61172075)

1 引言

随着信息技术的发展,电力线通信(power line communication, PLC)技术在楼宇自动化、自动抄表、智能控制、物联网以及微网等方面的应用日益广泛,电力线通信业务变得更加多样化,宽带电力线通信(BPLC)在国内外受到了越来越广泛的关注^[1-9]。电力线信道模型对于特定线路信道特性的掌握、电力线通信相关产品的性能指标确定以及初期研制具有重要意义。电力线通信信道的建模一般需要确定单位长度的电阻、电感、电导和电容参数(RLGC),计算传输方程,结合终端条件建立信道模型3个步骤^[10]。对于给定的传输线,由于单位长度的电阻、电感、电导和电容参数需要包含导体的横截面、半径、导体间的空间间隔以及绝缘材料的电气特性等信息,对于宽带PLC的通信信道建模计算复杂且准确度难以保证。在以往针对电力线信道的建模中,单位长度参数主要通过解析法获得,此方法需要利用电路原理进行分析、设计实验、测量电路的一次参数。然后根据一次参数推导出二次参数,计算过程复杂,要求建模人员具有扎实的专业知识和数学功底。

Q3D,也称为Quick3-D,用于对电磁场仿真所需的电阻、电感、电导和电容参数进行提取,主要用于PCB高频电路设计领域。Q3D使用了先进的三维准静态电磁场求解器,核心算法为矩量法,同时采用了快速多极子算法进行加速。在求解的过程中考虑了耦合效应、趋肤效应、介质损耗、金属损耗和频变属性的影响。在实践中发现,Q3D软件对于电力线通信信道的仿真同样适用,不仅适用复杂形状的导体建模,准确度高,而且可以减少计算复杂度,能显著地简化RLGC参数的提取过程。

本文主要介绍了以Q3D extractor提取参数为依据,建立宽带PLC信道模型的步骤和方法。利用网络分析仪分别测量了三芯对称电缆的散射

参数(S参数),利用S参数计算出线缆的输入阻抗、幅频特性以及相频特性,并与仿真结果进行了对比。

2 传输参数计算

两个平行的电缆可以当作传输线,根据传输线理论,传输线特性可以用特征阻抗和传输常数来描述^[11-12]。通过Q3D软件提取出的单位长度参数,很容易计算出平行电缆的特征阻抗 Z_0 和传输常数 γ ,计算式为:

$$Z_0 = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)} \quad (1)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2)$$

其中, R 、 L 、 G 、 C 分别表示单位长度的电阻、电感、电导和电容。

在知道特征阻抗 Z_0 、传输常数 γ 以及线路长度 L 的情况下,传输线的ABCD参数可以由式(3)算得:

$$\begin{cases} A = D = \cosh(\gamma l) \\ B = Z_0 \cdot \sinh(\gamma l) \\ C = 1/Z_0 \cdot \sinh(\gamma l) \end{cases} \quad (3)$$

ABCD参数又称传输参数或T参数,用ABCD参数表示一个二端口网络对于计算线缆的传输函数非常方便。一个典型的二端口网络如图1所示。二端口网络的输入电压 V_i 、输入电流 I_i 和输出电压 V_o 、输出电流 I_o 之间的关系可以用式(4)表示。

$$\begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

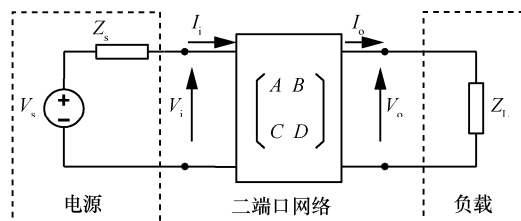


图1 二端口网络模型



其中:

$$\begin{aligned} A &= \left. \frac{V_i}{V_o} \right|_{I_o=0}, \quad B = -\left. \frac{V_i}{I_o} \right|_{V_o=0} \\ C &= \left. \frac{I_i}{V_o} \right|_{I_o=0}, \quad D = \left. \frac{I_i}{I_o} \right|_{V_o=0} \end{aligned} \quad (5)$$

对于互易网络, $AD-BC=1$; 对于对称网络, $A=D$; 对于互易无损网络, A 与 D 为纯实数, 而 B 与 C 为纯虚数。

因为 $I_o = V_o / Z_L$, 如式 (6) 所示, 用 ABCD 参数可以很容易得到二端口网络的传输函数 H 和输入阻抗 Z_{in} , 其中, Z_s 为测量仪器的内阻, Z_L 为负载阻抗。

$$H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_s + DZ_s} \quad (6)$$

$$Z_{in} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (7)$$

3 线路参数测量

电力线通信信道参数可以通过电桥、网络分析仪等设备测量得到, 本文选用网络分析仪来测量线缆的信道参数。网络分析仪可直接测量有源或无源、可逆或不可逆的双口和单口网络的复数 S 参数 (散射参数), 并以扫频方式给出各散射参数的幅度、相位频率特性。 S 参数为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, S_{11} 为输入反射系数, S_{12} 为反向传输系数, S_{21} 为正向传输系数 (即增益), S_{22} 为输出反射系数。

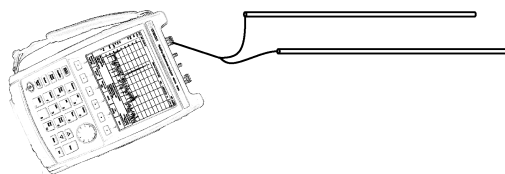
如果把阻抗不连续点之后线路的阻抗看作负载阻抗 Z_L , 阻抗不连续点的反射系数可以用式 (9) 来计算, Γ 为反射系数, Z_0 为反射不连续点之前的线路特征阻抗。

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (9)$$

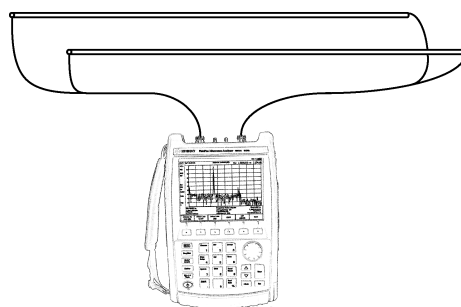
如图 2 (a) 所示, 如果将仪器与线缆连接点看作阻抗不连续点, 让线缆一端开路, 一端与网

络分析仪相连, 把整条线缆当作测量仪器的负载, 仪器的内阻当作特征阻抗, 便可测得末端开路的线缆输入阻抗 Z_{in} , 计算式为:

$$Z_{in} = Z_L = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (10)$$



(a) 反射系数 S_{11} 测量



(b) 正向传输系数 S_{21} 测量

图 2 S 参数测量示意图

以图 2 (b) 方式连接网络分析仪与电缆, 即可获得 S 参数中的 S_{21} 参数, 根据 S 参数的定义, S_{21} 为正向传输系数, 即信道增益。

4 用 Q3D 提取信道 RLGC 参数

Q3D 采用了将计算电磁学中的有限元与矩量结合的方法进行电磁场的求解^[13]。Q3D 采用有限元对整个空间进行网络分割计算, 采用矩量法对导体和介质表面进行网络分割计算, 分割技术采用了自适应网络分割。采取了网格数量和计算精度之间平衡的策略, 具有计算速度快、精确度高、适用于复杂结构等特点^[14-15]。计算频率上限都在 GHz 以上, 计算原理和频率范围适用于宽带电力线的寄生参数提取。

根据传输线理论, 一个二端口的单位长度的电力线通信信道可以用如图 3 所示的等值电路来表示。

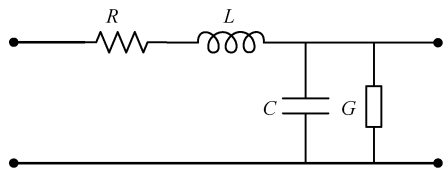


图3 双导体传输线单位长度等值电路

其中, R 、 L 、 G 、 C 分别表示单位长度的电阻、电感、电导和电容。RLGC 是 4 个相互独立的参数, 通常也叫作一次参数 (primary parameter), RLGC 的取值仅取决于传输线的形状、导体的材料、介质材料以及信号频率, 与施加在线缆上的电压值和电流值无关^[16]。RLGC 来源于电磁场理论, 能够全面反映传输线的信道特征。用 Q3D 软件提取 RLGC 的详细步骤如下。

步骤 1 根据线缆实际参数画线缆几何模型

线缆的形状是软件提取 RLGC 参数的重要依据之一。在 Q3D 中设定画图单位, 在工作布中按照线缆横截面的实际形状和尺寸、导体之间的距离画出线缆横截面结构图。

步骤 2 为线缆几何模型各部分分配材料

包括导体材料和绝缘材料在内, 步骤 1 中所画线缆几何模型各部分的材料属性也是软件提取 RLGC 参数的重要依据之一。根据线缆的实际情况, 为线缆的绝缘部分和导体部分分配相应的材料, 或根据材料相关参数新建材料。

步骤 3 分配导体

信号线和地线是软件进行电磁场求解的依据, 只有正确地分配信号线和地线, 才能提取出需要的参数。对于三相电缆而言, 有相相耦合和相地耦合两种方式。对于单相电缆而言, 一般使用相地耦合方式, 也可以使用相中耦合。

步骤 4 设定求解参数 (确定信号频率范围)

求解参数的设定可以确定需要提取哪些参数。在分析设置中添加求解。设置求解频率, 选中需要提取的参数 (Admittance、Impedance), 设置 Loss convergence 选项。设定好求解参数后, 在 2D 提取菜单下选择分析设置, 添加扫频以确定

求解频率范围和频率间隔。

步骤 5 验证设计、执行仿真

在设计通过验证后执行仿真, 便可以获得随设定频率变化的 RLGC 参数, 求解时间随计算机配置的不同而不同。通过结果命令可以将所有数据以 “*.csv” 格式导出。

5 实验验证

选取配电网中常用三芯对称电缆对本文所提方法进行实验验证, 结构如图 4 所示。外形尺寸为 11.4 mm, 单芯半径 r 为 1.128 4 mm, 两芯之间的距离 d 为 2.256 8 mm, 导体材料为铜, 绝缘材料均为 PVC, 中间三角部分为空气。根据线缆的实际尺寸, 以火线和零线连线的中点为圆心画几何模型, 导线的包裹材料用几何相减的方法得到; 将几何模型中的绝缘部分材料分配为 PVC, 导体部分分配为铜, 中间三角部分介质分配为空气; 分别将线缆的火线和零线设置为载波信号的信号线和地线, 设定求解频率范围为 30 kHz~100 MHz, 频率间隔为 999.7 kHz, 执行仿真得到 RLGC 在 30 kHz~100 MHz 内的参数值如图 5 所示。

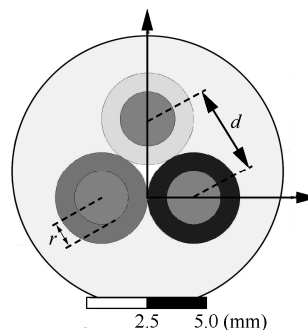


图4 三芯对称电缆结构

从图 5 (a) 可以看出, 单位长度的电阻值 R 随频率的增大而增大, 这是因为当导体中有交变电流通过时, 随着频率的增高, 电流会向导体表面集中, 导体的有效横截面积减小, 趋肤效应使得阻值随频率的增大而不断增大。

从图 5 (b) 中可以看出, 单位长度的电感值

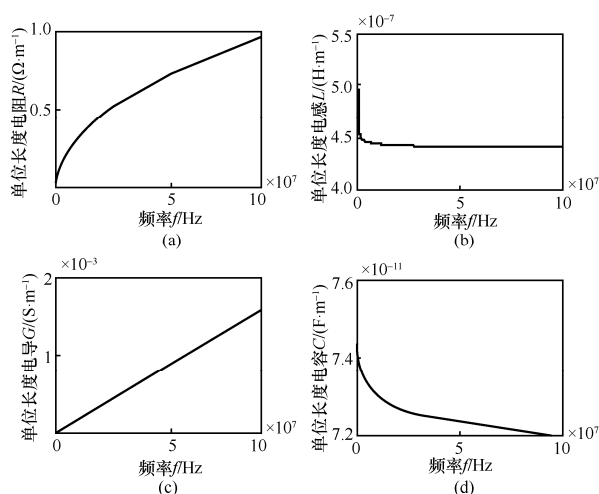


图5 用Q3D提取得到的RLGC参数

将随频率的增高而下降。这是由于趋肤效应致使导体中的电流随频率向导体表面集中。

从图5(c)可以看出,以PVC为绝缘材料的导体间电导值与 f 之间存在正比例关系。单位长度的电导值 G 是描述绝缘材料绝缘质量的参数,当在导体上施加交变电流时,导体间绝缘介质分子的极化方向将随两导体之间的电压的方向而改变,介质分子极化方向的改变需要克服阻力做功,因此会让导体中的电能转化成绝缘介质的热能,造成功率损耗。

从图5(d)可以看出,单位长度的电容值 C 随频率的增高而减小。一段双导体传输线可以看成一个电容器,当有多条平行导体存在时,电容的计算还应考虑其他导体的影响,而对于三芯对称电缆类似结构,计算难度过大,计算精确度无法保证,这也体现了本文利用Q3D软件进行参数提取的优越性。

将用Q3D得到的RLGC代入之前介绍的计算过程中,得到仿真环境下的传输函数和输入阻抗。利用网络分析仪测量方法,对实际电缆在30 kHz ~ 100 MHz内进行 S 参数测量,进而得到相应的传输函数和输入阻抗。信道的幅频响应和相频响应的计算值和测量值对比分别如图6所示,从图6中可以看出,信道的传输衰减的幅度随着频率的

增大而增大,在100 MHz时达到了-6 dB左右。相位从 $-\pi$ 到 π 呈现规律性变化,且随着频率的增加,变化频率间隔变长。不管是幅度还是相位,通过本文所提方法建立的模型都能够较好地匹配测量值。

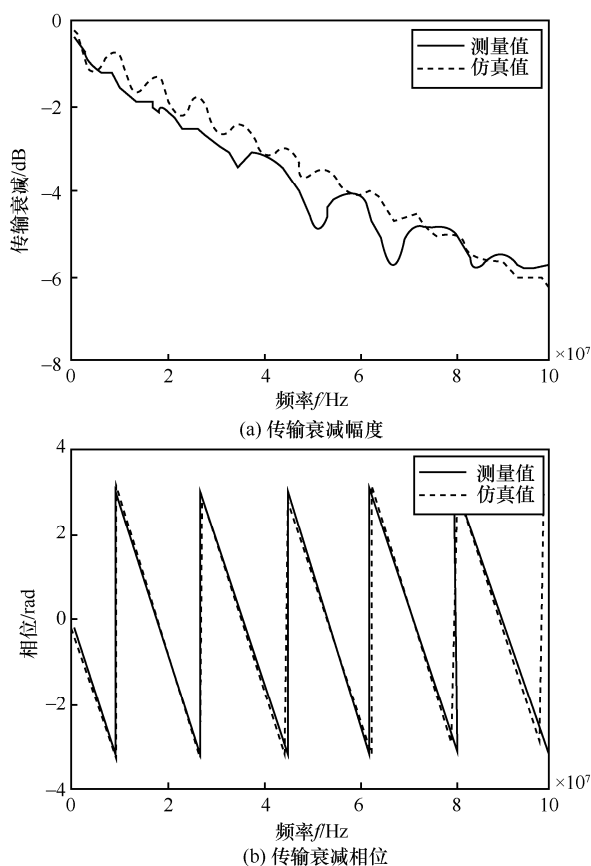


图6 传输衰减对比

线缆输入阻抗的测量值与仿真值对比如图7所示,从图7中可以看出,输入阻抗的幅度和相位震荡都随着频率的增大而减小,最后趋于稳定。输入阻抗的幅度、相位的仿真值与测量值匹配良好。

6 结束语

本文提出了一种基于Q3D的宽带电力线信道建模方法,所提方法能够适用于双导体、多导体及横截面结构复杂的多种PLC信道。本文所提方法不需要大量复杂的计算,将复杂的数学问题转

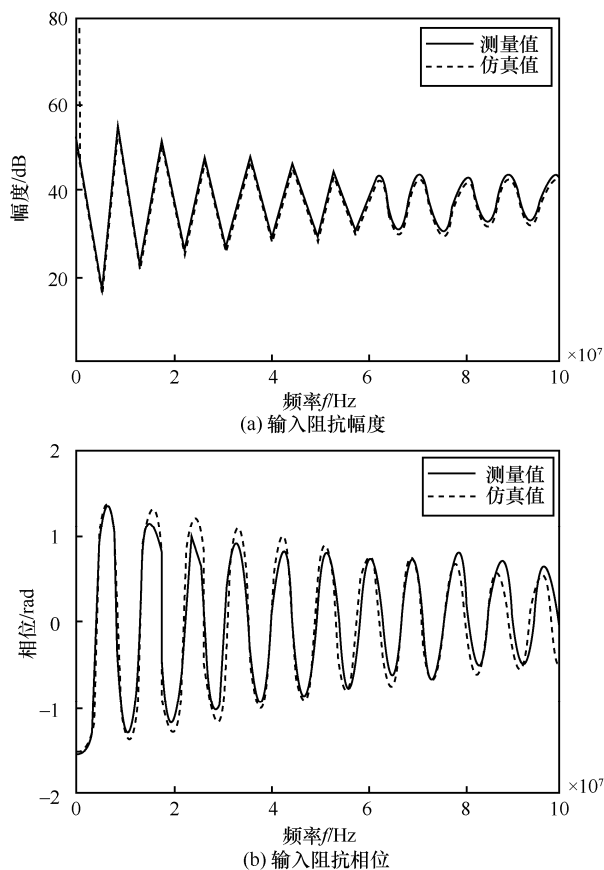


图7 输入阻抗对比

化成了几何作图问题, 快捷方便且对使用者的专业知识和数学功底要求较低。根据所提方法, 以三芯对称电缆构成的 PLC 信道为仿真对象进行了建模, 通过对比可以看出, 模型计算值能够很好地匹配实测值, 能够达到实用化的目的, 本文提出的方法对于 PLC 通信系统的设计和工程实践具有重要意义。

参考文献:

- [1] 郑建宏, 陈鹤云, 周朋光, 等. 一种交叠分层诱导的 PLC 自动路由算法设计[J]. 电信科学, 2018, 34(2): 12-22.
ZHENG J H, CHEN H Y, ZHOU P G, et al. Design of automatic routing algorithm based on overlapping hierarchical induction[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(2): 12-22.
- [2] 孙增友, 李依潼, 吉海强. 基于宽带电力载波的电能质量监测系统的设计与实现[J]. 电测与仪表, 2012(7): 76-79.
SUN Z Y, LI Y T, JI H Q. Power quality monitoring system design and implementation based on the broadband power carrier[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012(7): 76-79.
- [3] 田新成, 侯思祖, 王旭. 基于 OFDM 的低压电力线通信系统信道噪声特性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2007(1): 111-114.
TIAN X C, HOU S Z, WANG X. Noise characteristics analysis of OFDM system in low-voltage power line communication channels[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2007(1): 111-114.
- [4] 吕新荣, 李有明, 余明宸. 基于稀疏贝叶斯学习的电力线载波通信接收机设计[J]. 电信科学, 2017, 33(9): 92-99.
LV X R, LI Y M, YU M C. Design of transceivers based on sparse Bayesian learning for power line carrier communications[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(9): 92-99.
- [5] BERGER L T, SCHWAGER A, PAGANI P, et al. MIMO power line communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(1): 1.
- [6] 曹旺斌, 尹成群, 谢志远, 等. 多输入多输出宽带电力线载波通信信道模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1136-1142.
CAO W B, YIN C Q, XIE Z Y, et al. Research on broadband MIMO power line communications model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1136-1142.
- [7] 龚钢军, 陆俊, 熊琛, 等. 混合业务公平的宽带电力线正交频分复用系统跨层资源分配[J]. 中国电机工程学报, 2015(6): 1390-1398.
GONG G J, LU J, XIONG C, et al. Cross-layer resource allocation based on mixed-service fairness for broadband power-line OFDM system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015(6): 1390-1398.
- [8] 谢志远, 李娜, 郭以贺. 适用于配电网通信的纠错编码技术与设计[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008(4): 97-101.
XIE Z Y, LI N, GUO Y H. Research and design on a new kind of encoding and decoding of BCH codes[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2008(4): 97-101.
- [9] 孙利梅, 尹成群, 曹旺斌. 基于模块化端口行为的无功补偿器高频建模[J]. 实验室研究与探索, 2016(4): 43-46.
SUN L M, YIN C Q, CAO W B. The high frequency modeling of reactive power compensator based on modular port behavior[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2016(4): 43-46.
- [10] PAUL C R. 多导体传输线分析[M]. 杨晓亮, 译. 北京: 中国电力出版社, 2013.
PAUL C R. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. Translated by YANG X X. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [11] MASOOD B, BAIG S. Channel modeling of NB-PLC for smart grid[C]/IEEE Symposium on Computers & Communication, July 6-9, 2015, Larnaca, Cyprus. Piscataway: IEEE Press, 2015: 745-750.



- [12] TIRU B. A novel method of computation of transfer function of unknown networks for indoor power line communication: transfer function estimation of power line using transmission matrices[C]//IEEE Symposium on Computational Intelligence for Communication Systems & Networks, Dec 9-12, 2014, Orlando, FL, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 109-114.
- [13] 杨光. 高频开关电源的EMI建模与仿真研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
YANG G. Research on EMI modeling and simulation of high frequency switching mode power supply[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008.
- [14] Ansoft Corporation. Maxwell quick 3D parameter extractor——user's reference[Z]. 1994.
- [15] Ansoft Corporation. Maxwell 2D parameter extractor——user's reference[Z]. 1993.
- [16] CHIPMAN R A. Theory and problems of transmission lines[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.

[作者简介]



曹旺斌(1989-), 男, 博士, 华北电力大学电气与电子工程学院讲师, 主要研究方向为电力系统通信、智能配用电。



梁晓林(1987-), 女, 博士, 河北大学电子信息工程学院讲师, 主要研究方向为电磁场理论及其应用、MIMO 无线通信技术。