

文章编号: 2095-4980(2020)02-0313-05

## 新能源汽车电力线缆串扰仿真分析与抑制方法

杨兴超, 李志勇, 张占营\*, 陈卓, 陈新美

(许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 新能源汽车主要依靠电力驱动, 其电力线缆传输高电压、大功率的瞬变信号, 加之线缆本身的天线效应, 使其成为电动汽车中最主要的电磁干扰发射源。因此电力线缆极易对周围线缆产生串扰。通过分析电力线缆辐射电磁干扰的来源, 利用FEKO仿真工具建立了电力线缆和相邻线缆的简化模型。通过改变仿真模型中线缆屏蔽层及金属线槽的设置, 对比分析了这些因素对抑制串扰和干扰发射的影响。根据仿真结果, 得出了降低线缆屏蔽层阻抗和增加金属线槽的使用, 有助于抑制线缆串扰的结论。

**关键词:** 新能源; 电力线缆; 串扰; 电磁兼容; FEKO 仿真工具

**中图分类号:** TN972

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2018382

## Simulation analysis and suppression method for the crosstalk of power cables in the new-energy vehicle

YANG Xingchao, LI Zhiyong, ZHANG Zhanying\*, CHEN Zhuo, CHEN Xinmei

(Xuchang KETOP Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang Henan 461000, China)

**Abstract:** The new-energy vehicles are mainly powered by electricity. Its power cables transmit the transient signals of high voltage and power. In addition, the antenna effect of the cable makes the cable become the dominant emission source of electromagnetic interference in electric vehicles. The power cable also exerts the crosstalk on the surrounding signal cables. This research analyzes the source of electromagnetic interference in power cables. Then the simplified model of power cable and adjacent cable is established using FEKO tool. The effect of these factors on restraining crosstalk is compared and analyzed by changing the settings of the cable shield layer and the metal groove in the simulation model. Finally, based on the simulation results, it is concluded that reducing the impedance of the cable shielding layer and increasing the use of the metal groove are helpful to minimize the cable's crosstalk effects.

**Keywords:** new energy; power cable; crosstalk; Electro Magnetic Compatibility; FEKO

近年来, 新能源电动汽车凭借能源效率高, 无尾气排放等优点, 成为汽车行业发展的热点之一, 正获得越来越广泛的市场应用。电动汽车采用电力驱动系统取代了传统汽车的燃油发动机, 使得车载电力电子装置数量和功率远超传统汽车。大功率高电压的电力驱动系统也导致整车电磁环境的明显复杂化<sup>[1]</sup>。此外, 汽车电子技术的迅猛发展使车载电子产品的复杂性日益提升, 这对整车的电磁兼容性设计带来了更多挑战。电动汽车的驱动系统中, 驱动线缆由于具有一定的天线效应, 因此成为电磁干扰主要的发射源和耦合路径<sup>[2]</sup>。驱动线缆引起的串扰可能对其他数据和控制线缆的数据传输产生严重干扰。因此有必要开展线缆串扰耦合和抑制方法的研究。FEKO 是一款功能强大的三维电磁场仿真软件, 特别适合求解电大尺寸等复杂的电磁问题。FEKO 的线缆仿真工具也十分丰富, 能够对线缆的设置生成各种形式的线缆模型, 如单线、同轴线、排线和复杂线束等。本文采用 FEKO 仿真工具中的矩量法与传输线法的混合仿真技术分析了动力线缆与相邻平行弱电线缆的串扰情况<sup>[3-5]</sup>, 研究了线缆串扰的影响因素和抑制方法, 以达到提高电动汽车的电磁兼容性和可靠性的目标。

收稿日期: 2018-12-14; 修回日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1804252)

作者简介: 杨兴超(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电气、电子类产品的电磁兼容试验与研究。email: yangxingchao@ketop.cn

\*通讯作者: 张占营 email: zhangzhanying@ketop.cn

## 1 电磁干扰源分析

### 1.1 动力系统构成

新能源电动汽车的动力系统主要由动力电池组、电源管理系统、充电控制器、高压驱动控制器、驱动电机和中央控制单元等组成,见图 1。电源管理系统控制和监测动力电池组的充放电过程。中央控制单元接收踏板操纵杆的控制信号并转化成相应的控制信号传递给其他控制器<sup>[6]</sup>。高压驱动控制器中包含绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 逆变器功率器件,可以将动力电池组的能量转化为驱动电机的高压大电流信号。

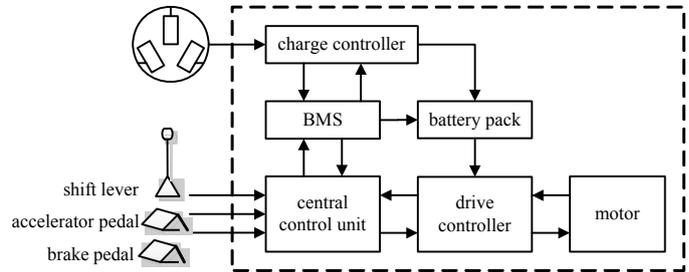


Fig.1 Electric drive and control system of the new-energy vehicle  
图 1 新能源汽车电力驱动与控制系统示意图

### 1.2 动力系统干扰源分析

动力系统中的电力线缆是能量传递的重要元件。但在车辆行驶中,电缆传输的瞬变的高电压和大电流会产生强电磁干扰。由于信号本身功率达到数十千瓦以上,动力电缆如果非屏蔽或布线不合理将成为动力系统主要的宽频电磁干扰源,其频谱分布主要受驱动脉冲宽度调制波的波形上升时间和频率的影响。此外,在动力系统 IGBT 等功率器件进行高速的开关操作,产生较大的  $dv/dt$  和  $di/dt$ ,并通过系统线缆等的分布参数形成严重的宽频传导和辐射电磁干扰。最后,动力驱动系统中,电机是另一个主要的电磁干扰源<sup>[7-9]</sup>。由于电机属于感性设备,会在车辆起、停及变速等驱动电流突变时,产生较强的脉冲电流,引起相应的电磁干扰。这也是一种宽频电磁干扰,频谱从数千赫兹到一千兆赫兹。

电力线缆连接动力系统的主要部件,并且线缆容易产生天线效应,因此电力线缆除了自身传输的信号引起的电磁干扰外,还会耦合系统中其他干扰源产生的电磁干扰。这些电磁干扰可以通过发射或传导耦合到其他线缆中,对其他线缆的信号和数据传输产生负面影响,这就是所谓的串扰<sup>[10]</sup>。因此,本文接下来将通过仿真分析,研究干扰输出线缆抑制电力线缆串扰的有效方法<sup>[11]</sup>。

## 2 线缆串扰模型构建

本文共建立 3 个线缆串扰仿真模型: a) 平行线缆串扰的基础模型,由电力线缆和受扰单芯线缆组成,其仿真串扰强度用来作为更改参数设置后的模型仿真结果的参照; b) 更改电力线缆的屏蔽层参数的仿真模型,用来对比屏蔽层阻抗对抑制串扰的影响; c) 在基础模型上给电力线缆增加一个金属线槽模型,对比两者串扰强度的差异。

### 2.1 构建平行线缆模型

#### 2.1.1 线缆物理结构设置

本文参照 JIS C3409 AMD 1-2009 和 ISO 14572-2011 等汽车电缆相关标准设置了电缆模型的基本结构<sup>[12-13]</sup>。本文采用双芯的屏蔽线模型模拟电力线缆,作为模型中的干扰输出线缆。用单芯无屏蔽的线缆模型模拟受干扰的线缆。2 根线缆首尾对齐,平行分布。线缆长度都设置成 1 m,线缆之间的水平距离设置为 3 cm,线缆模型的轴心对地高度都设置为 3 cm,见图 2。

电力线缆模型的线束结构设置成由绝缘介质填充的双芯线缆,金属内芯的半径为 5 mm。线束外围添加编织网屏蔽层,屏蔽层参数采用默认设置,阻抗值符合阻抗计算的 Kley 公式,厚度为 0.5 mm,屏蔽层外侧有 1 mm 厚度的绝缘外壁,见图 3。受干扰单芯线的模型则采用半径 1 mm 的金属内芯和厚度 1 mm 的绝缘外壁构成。

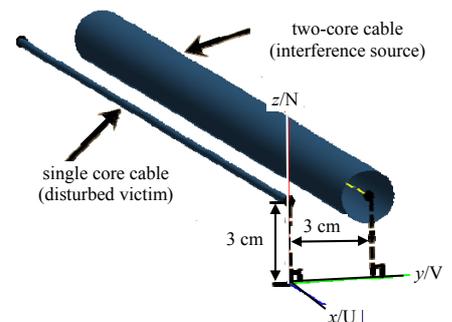


Fig.2 Cables' CAD model  
图 2 线缆 CAD 模型

### 2.1.2 线缆端接电路设置

通过对电磁干扰源的分析，电力线缆的主要电磁干扰源来自其自身传输的瞬变驱动信号，且为宽频谱干扰源。因此，在电力线缆模型的起始端接入一个电压源作为模拟干扰源，其电压设为 1 V，频率变化范围 30 MHz~1 GHz。这个频段是绝大多数电子产品信号频谱所处的频段，因此串扰仿真时将干扰源设置为这一频段。根据动力线连接负载的基本阻容特性，在电力线缆的末端并联接入 RLC 简化负载电路，作为线缆的模拟负载。在屏蔽层和芯线之间跨接了一个 10 pF 的电容，用来模拟芯线和屏蔽层之间的分布电容效应，最后将屏蔽层接地。受扰线缆的端接电路相对简单，其两端只需要通过 50 Ω 的电阻接地。2 根线缆模型的端接电路见图 4。模型仿真计算后，通过监测和比较这两个端接电阻上的电压或电流，得出电力线缆对受扰线缆的串扰程度。经过上述过程就完成了平行线缆串扰的基础模型的建立，标记为 Model\_1，再通过加载近场或远场求解器和电阻电压和电流的模拟探头，就可以通过模型进行电磁干扰发射和线路串扰的仿真计算。

### 2.2 修改模型屏蔽层设置

在基础模型建立时，电力线缆的模型中屏蔽层采用了符合 Kley 阻抗计算公式的编织网结构<sup>[14]</sup>。根据如下屏蔽层阻抗的近似公式<sup>[15]</sup>：

$$Z'_d \approx \frac{4(1+j)d}{\pi d^2 N l \sigma \cos \varphi \sinh \frac{(1+j)d}{\delta}} \quad (1)$$

式中： $d$  为编织线的直径； $N$  为编织线数； $l$  为编织束数； $\sigma$  为电导率； $\varphi$  为编织角度； $\delta$  为集肤深度。

可知，增加编织线直径、编织线数和编织束数可以实现屏蔽层的阻抗减小。因此，在模型 Model\_1 的基础上，本文对编织网屏蔽层的相应参数进行了修改，建立了一个屏蔽层阻抗更低的电力线缆模型 Model\_2<sup>[16]</sup>。该模型通过仿真求解，得到与电磁辐射和串扰相对的远场场强和端接电阻电压的计算结果。

### 2.3 构建金属线槽模型

第 3 个模型只在第 1 个基础模型 Model\_1 的电力线缆周围添加 1 个金属线槽，不改变模型的其他参数。该金属线槽的水平中心轴与电力线缆的中心线重合。线槽和线缆模型首尾对齐，长度相等，线槽侧面的宽度和高度分别为 2 cm，以上即为 Model\_3，其 CAD 结构见图 5。最后对该模型进行相同的仿真计算。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 改变信号源电压对比分析

在基础模型 Model\_1 的端接电路中修改电压源的输出电压，分别设置为 1 V 和 10 V，再进行仿真计算得到受扰线缆端接电阻的感应电流随信号源频率变化的曲线，见图 6。从仿真结果可以显现，负载阻抗不变的情况下，信号源输入电压越大，电缆输送的功率越大，其对临近线缆产生的串扰作用越强。因此，对于传输高电压大功率的新能源汽车

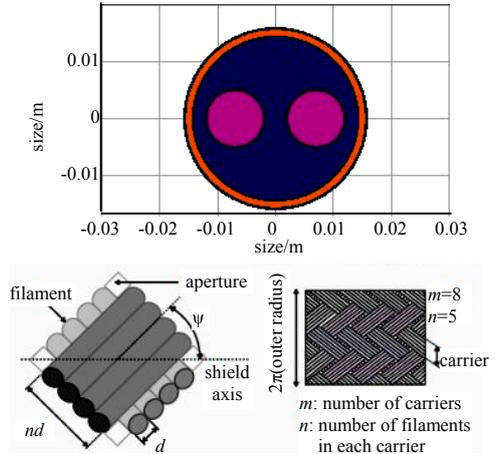


Fig.3 Structure of the power wiring harness and its shielding layer  
图 3 电力线束及其屏蔽层结构示意图

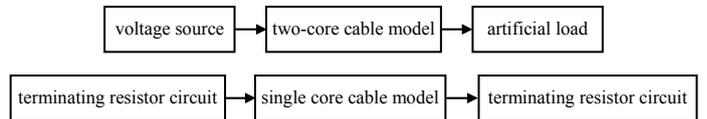


Fig.4 Cables' terminal circuits  
图 4 线缆端接电路

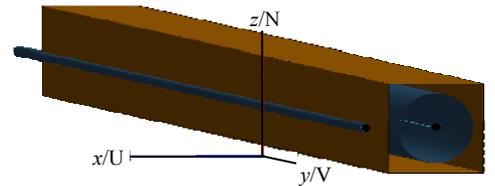


Fig.5 CAD model of the power line with metal raceway  
图 5 电力线缆添加金属线槽 CAD 模型图

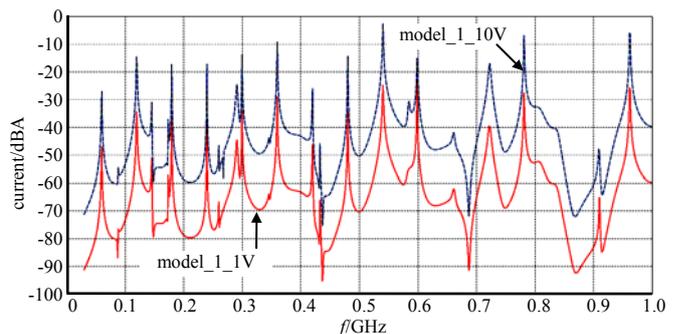


Fig.6 Crosstalk of the cable models with different voltage sources  
图 6 不同电压源的线缆模型的串扰仿真

的电力线缆有必要研究和抑制其对周围线缆的串扰作用。

### 3.2 改变屏蔽层阻抗对比分析

图 7 中, model\_1 的曲线代表基础模型中受扰线缆的端接电阻上的感应电流随频率的变化, model\_2 的曲线代表降低电力线缆阻抗后,端接电阻上的感应电流随频率的变化。这一曲线可以用来表征电力线缆对受扰线缆的串扰强度。从图 7 中可以看出,线缆屏蔽层改变,串扰耦合的谐振点发生了改变,同时 model\_2 的感应电流的强度明显总体减弱,说明降低干扰输出的电力线缆的屏蔽层阻抗可以削弱其串扰其他线缆的强度。

图 8 是 2 组模型的远场不同频点的场强曲线图。从图 8 中可以看到,虽然两条曲线的谐振频率点有所差别,但是屏蔽层阻抗较低的线缆的远场辐射场强明显减弱,说明降低屏蔽层阻抗对抑制电力线缆的电磁辐射发射也有明显作用。

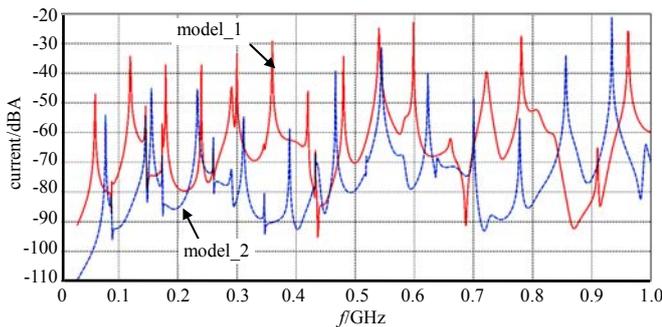


Fig.7 Crosstalk of the models with different shield impedance  
图 7 不同屏蔽层阻抗的模型串扰仿真

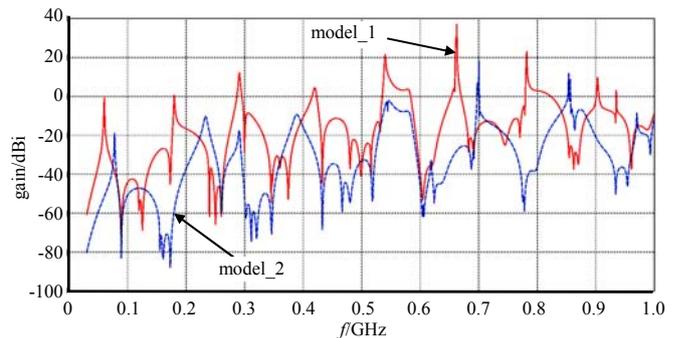


Fig.8 Far field interference of the models with different shield impedance  
图 8 不同屏蔽层阻抗模型的远场干扰仿真

### 3.3 添加金属线槽对比分析

图 9 中, 2 条曲线表示了端接电阻的感应电流随干扰输出频率的变化, 也表征串扰强度随频率的变化。从图 9 中可以看到 2 条曲线的谐振频率点变化较小, 说明模型中的金属线槽对线缆的分布参数影响较小。同时 model\_3 的感应电流总体减小, 说明金属线槽可以起到抑制串扰的作用。

图 10 中, 2 条曲线表明了模型的远场电磁辐射强度随频率变化的情况。从图 10 中可以看到, 2 条曲线十分接近, 谐振点也基本一致。由此可见, 孤立的金属线槽不能充分抑制或屏蔽电磁干扰, 对远场辐射强度没有明显影响。

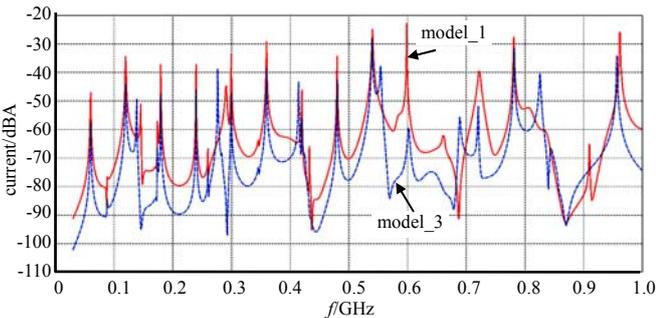


Fig.9 Crosstalk of the models before and after adding the metal groove  
图 9 添加金属线槽前后的模型串扰仿真

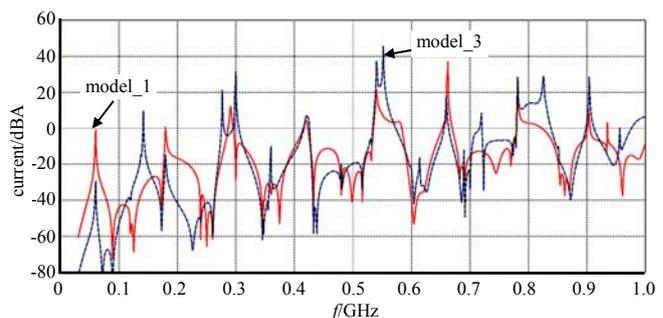


Fig.10 Far field interference of the models before and after adding the metal groove  
图 10 添加金属线槽前后模型的远场干扰仿真

## 4 结论

本文通过仿真研究分析, 明确了电动汽车中电力线缆是主要的电磁干扰发射源, 其干扰主要来源于自身传输的大功率瞬变驱动信号。然后本文通过利用 FEKO 仿真软件, 构建了 3 组线缆串扰仿真模型。通过对比受扰线缆端接电阻的感应电流和模型的远场场强的仿真计算结果, 得出了如下结论: a) 线缆传输的电压和功率越大时, 线缆产生的串扰作用越强; b) 降低干扰发射线缆的屏蔽层阻抗, 可以抑制该线缆的远场辐射发射强度和对相邻线缆的串扰作用; c) 采用孤立的金属线槽, 可以对干扰发射线缆的近场串扰有一定的阻挡抑制作用, 但对该线缆的远场辐射发射影响微弱。

## 参考文献：

- [1] 窦汝振,王慧波,苟毅彤,等. 电动汽车用电机驱动系统的电磁兼容技术研究[J]. 天津工业大学学报, 2011,30(6):67-70. (DOU Ruzhen,WANG Huibo,GOU Yitong,et al. Research of electromagnetic compatibility of motor drive system applied in electric vehicle[J]. Journal of Taijin Polytechnic University, 2011,30(6):67-70.)
- [2] GONSER M,KELLER C,HANSEN J,et al. Simulation of automotive EMC emission test procedures based on cable bundle measurements[C]// 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(MTT). Montreal,QC,Canada:[IEEE], 2012:1-3.
- [3] CHOBANYAN H,BADZAGUA I,INJGIA T,et al. Application of hybrid MOM/MTL method to simulation of interaction between cable harness and antennas[C]// International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory. Lviv,Ukraine:IEEE, 2009:33-38.
- [4] 焦金龙,王晨,刘源. 线缆束电磁兼容仿真技术[J]. 微波学报, 2012,28(s3):57-60. (JIAO Jinlong,WANG Chen,LIU Yuan. Simulation technology for cable harness EMC analysis[J]. Journal of Microwaves, 2012,28(s3):57-60.)
- [5] 蒋彦雯,邓彬,王宏强,等. 基于 FEKO 和 CST 的太赫兹目标 RCS 仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):684-689. (JIANG Yanwen,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. RCS simulation in THz band based on FEKO and CST[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):684-689.)
- [6] 刘晴. 纯电动汽车动力系统的电磁兼容性分析与评估[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013. (LIU Qing. Electromagnetic compatibility analysis and evaluation on power system in pure electric vehicle[D]. Nanjing,China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.)
- [7] 张新宇. 电动汽车电机逆变器系统的电磁干扰与抑制研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016. (ZHANG Xinyu. Electromagnetic interference and suppression in power inverter system of electric vehicles[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2016.)
- [8] REUTER M,FRIEDL T,TENBOHLEN S,et al. Emulation of conducted emissions of an automotive inverter for filter development in HV networks[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Denver,CO,USA: IEEE, 2013:236-241.
- [9] MUTOH N,NAKANISHI M,KANESAKI M,et al. EMI noise control methods suitable for electric vehicle drive systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006,47(4):930-937.
- [10] LI G,HESS G,HOECKELE R,et al. Prediction of radiated emissions from cables with multiple connections to a metal plane[C]// Electromagnetic Compatibility. Taipei,Taiwan,China:IEEE, 2015:565-568.
- [11] HUANG J,WEI T,WANG T,et al. Control of critical coupling in a coiled coaxial cable resonator[J]. Review of Scientific Instruments, 2014,85(5):1-4.
- [12] Japanese Industrial Standards Committee. JIS C3409 AMD 1-2009 High-voltage resistance cables for automobile (Amendment 1)[S]. 2009-02-20.
- [13] International Organization for Standardization. ISO 14572-2011. Road vehicles-round, unscreened 60 V and 600 V multicore sheathed cables-test methods and requirements for basic and high performance cables[S]. 2011-10-01.
- [14] KLEY T. Optimized single-braided cable shields[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993,35(1):1-9.
- [15] VANCE E F. Shielding effectiveness of braided-wire shields[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1975,EMC-17(2):71-77.
- [16] 王小铃. 屏蔽电缆转移阻抗的测量与仿真方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012. (WANG Xiaoling. Research on the measurement and simulation methods for transfer impedance of shielded coaxial cables[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2012.)