

基于时域有限差分的传输线串扰方法研究

方举昊¹, 陈 健¹, 颜 伟¹, 刘兴发²

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

(2. 中国电力科学研究院武汉分院电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

[摘要] 针对串扰这一高频电子电路多发现象, 从时域有限差分法这一有效的电磁学计算工具出发, 给出了 π 型 Leapfrog 中心差分格式的理论推导. 利用时域有限差分法计算出三芯线在集总参数模型、分布参数模型以及外施场激励条件下的“场-线耦合”模型三者的串扰值理论值, 并与三维电磁场软件 CST Studio Suite 的仿真结果进行对比, 验证了此方法的准确性与可靠性.

[关键词] 多导体传输线方程, 时域有限差分法, 场线耦合, 频率响应, 平面波激励

[中图分类号] TM72 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2020)03-0022-05

Research on Transmission Crosstalk Method Based on Finite Difference Time Domain Method

Fang Juhao¹, Chen Jian¹, Yan Wei¹, Liu Xingfa²

(1. School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan Branch of China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the high frequency electronic circuit of the crosstalk multiple phenomenon, from the point view of the finite difference time domain (FDTD) method as an effective tool of electromagnetism calculation, this article gives a theoretical derivation of π type Leapfrog central difference scheme. It uses the finite difference time domain method to calculate the theoretical value of the lumped parameter model, distribution parameter model, and field-line coupling model under external excitation condition comparing with the simulation results of the 3d electromagnetic field software CST Studio Suite. The accuracy and reliability of this method are verified.

Key words: multiconductor transmission line equation, finite difference time domain method, field-line coupling, frequency response, plane wave excitation

传输线上的信号完整性与可靠性, 关乎着整个电子电力设备系统运行的稳定性. 随着电力电子设备的现代化、高频化、小型化的发展, 传输线在系统内的布置愈发呈现出有规则或无规则的密集排布. 当传输线之间距离很近, 一条传输线传播信号时, 会在附近传输线上产生噪声, 这种现象称为串扰. 串扰会导致干扰线电压跌落, 而被扰线上产生不必要的电磁干扰, 致使目标设备无法正常工作. 如果能在电路设计的早期能够预测、减弱串扰, 则可为后期整改节约大量成本, 这也成为了目前业界关注的焦点.

时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 方法是在求解时域多导体传输线 (multiconductor transmission lines, MTL) 方程中应用最广的数值方法. 按照有无稳定条件可将其分为两类. 第一类是稳定条件为 Courant Friedrich Levy (CFL) 的 FDTD 法, 如传统的 Leapfrog 差分格式、Lax-Friedrichs 差分格式等, 第二类是无稳定条件 FDTD 法, 如 Implicit-Wendroff 差分格式、Laguerre-FDTD 差分格式等. 文献[1]提出了一种新型的 CN-FDTD 差分格式, 文献[2]提出了修正节点中的 Implicit Wendroff-FDTD 和欧拉方法, 文献[3]提出了一种新型的 Kambiz Afrooz-FDTD 差分格式, 以上三种 FDTD 算法的差分格式不需要满足 CFL

收稿日期: 2020-06-04.

基金项目: 江苏省社会发展重点项目 (BE2019716)、南京市国际产业技术研发合作项目 (201911021)、电网环境保护国家重点实验室开放基金项目.

通讯作者: 颜伟, 博士, 副教授, 研究方向: 电磁兼容. E-mail: yanwei@njnu.edu.cn

稳定条件. 文献[4]用(M1-D)FDTD方法模拟耦合线微带滤波器. MTL串扰模型一般可分为两类,一类是均匀传输线模型^[5-7],另一类是非均匀传输线模型. 文献[8]通过采用级联均匀传输线的链参数矩阵来获得三绞线的串扰模型. 文献[9]将线束分为 N 个级联的子段,每一子段的横截面位置由分形理论生成不规则的曲线,称为随机中点布置法(random midpoint displacement, RMD)用统计的方法对其进行串扰预测. 文献[10]针对双绞线螺距误差的随机性,分析了双绞线串扰的统计特性,并得到了双绞线串扰的概率分布. 文献[11]提出了一种基于混沌多项式展开法的线束串扰统计模型. 国内各大高校也做了许多研究工作,例如吉林大学、重庆大学研究方向主要是汽车线束不均匀性和动态变化的串扰测定;北京、西南交通大学研究方向主要是动车、机车线缆的串扰机理及时域BLT方程;北京航空航天大学研究方向主要是航空、航天线缆中的非均匀螺距双绞线串扰特性;南京航空航天大学研究方向主要是线缆束串扰仿真的简化算法、线束内串扰的概率特性^[12-15].

1 时域有限差分法

MTL方程可以表达为如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{V}(z, t) = -\mathbf{R}(z) \mathbf{I}(z, t) - \mathbf{L}(z) \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{I}(z, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{I}(z, t) = -\mathbf{G}(z) \mathbf{V}(z, t) - \mathbf{C}(z) \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V}(z, t). \quad (2)$$

$\mathbf{R}(z)$ 、 $\mathbf{L}(z)$ 、 $\mathbf{C}(z)$ 、 $\mathbf{G}(z)$ 是 $n \times n$ 阶分布参数矩阵,当其不随位置 z 变化时,其表示为均匀MTL方程;反之,当其随位置 z 变化时,其表示为非均匀MTL方程. 其中 $\mathbf{V}(z, t)$ 和 $\mathbf{I}(z, t)$ 为MTL上 $n \times 1$ 阶的电压和电流向量.

将MTL分成了 Q 段,每段长度为 $\Delta z = l/Q$ (如图1所示). 同时将MTL方程求解时间分成 P 段,每段时间为 $\Delta t = t/P$. 按照如图2所示的方法,将时间 t 和空间 z 进行交织,每个电压节点与相邻电流节点之间的空间位置为 $\Delta z/2$,时间间隔为 $\Delta t/2$.

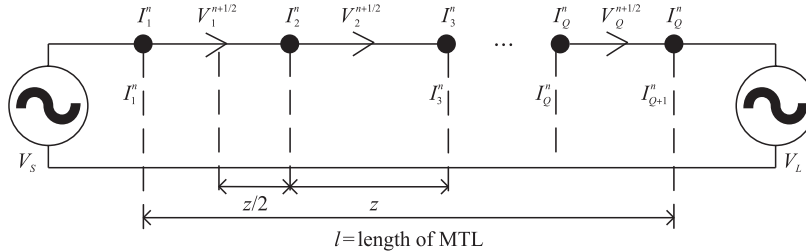


图1 π 型Leapfrog传输线离散化为 Q 段

Fig. 1 Discrete into Q segment π type Leapfrog a transmission line

按照图1和图2所示的交错方式可以将MTL方程组(1)、(2)采用中心差分格式表示为如下四个迭代通式:

$$\mathbf{I}_k^{n+\frac{3}{2}} = \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{L} + \frac{\Delta z}{2} \mathbf{R} \right)^{-1} \left[\left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{L} - \frac{\Delta z}{2} \mathbf{R} \right) \mathbf{I}_k^{n+1/2} - (\mathbf{V}_{k+1}^{n+1} - \mathbf{V}_k^{n+1}) \right]. \quad (3)$$

式中, $k=1, 2, 3, \dots, Q$.

$$\mathbf{V}_k^{n+1} = \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{C} + \frac{\Delta z}{2} \mathbf{G} \right)^{-1} \left[\left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{C} - \frac{\Delta z}{2} \mathbf{G} \right) \mathbf{V}_k^n - (\mathbf{I}_k^{n+1/2} - \mathbf{I}_{k-1}^{n+1/2}) \right]. \quad (4)$$

式中, $k=2, 3, 4, \dots, Q$.

$$\mathbf{V}_1^{n+1} = \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{R}_s \mathbf{C} + \frac{\Delta z}{2} \mathbf{R}_s \mathbf{G} + 1 \right)^{-1} \left\{ \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{R}_s \mathbf{C} - \frac{\Delta z}{2} \mathbf{R}_s \mathbf{G} - 1 \right) \mathbf{V}_1^n - 2 \mathbf{R}_s \mathbf{I}_1^{n+1/2} + (\mathbf{V}_s^{n+1} + \mathbf{V}_s^n) \right\}. \quad (5)$$

$$\mathbf{V}_{Q+1}^{n+1} = \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{R}_L \mathbf{C} + \frac{\Delta z}{2} \mathbf{R}_L \mathbf{G} + 1 \right)^{-1} \left\{ \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{R}_L \mathbf{C} - \frac{\Delta z}{2} \mathbf{R}_L \mathbf{G} - 1 \right) \mathbf{V}_{Q+1}^n + 2 \mathbf{R}_L \mathbf{I}_Q^{n+1/2} + (\mathbf{V}_L^{n+1} + \mathbf{V}_L^n) \right\}. \quad (6)$$

终端条件为

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_s - \mathbf{I}_s \mathbf{R}_s. \quad (7)$$

$$V_{Q+1} = V_L - I_L R_L. \quad (8)$$

2 “线-线耦合”串扰模型的搭建与仿真

2.1 基本参数设置

传输线等效电路如图 3 所示. 其中 wire1 是干扰线, 干扰电压源为 V_s , 其他两根传输线均为受扰线. 图中编号为①, ②, ③的位置称为传输线的近端(靠近源端), 编号为④, ⑤, ⑥的位置称为远端(远离源端). 在 CST Cable Studio 中建立如图 4 所示的平行三导体模型, 其中导体材质为 Cu, 半径为 0.7 mm, 绝缘层材质为 PVS, 厚度为 0.75 mm, 三导体间距均为 25 mm, 距地高度均为 50 mm. 在 ANSYS Q3D 中提取的电磁参数矩阵如式(9)所示, 这里假设传输线为无耗传输线, 即三导体均为理想无耗导体($R=0, G=0$).

$$L = \begin{bmatrix} 0.9918 & 0.2840 & 0.1619 \\ 0.2840 & 0.9914 & 0.2841 \\ 0.16193 & 0.28410 & 0.99140 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 13.8420 & -3.9761 & -1.2406 \\ -3.9761 & 14.8690 & -3.9778 \\ -1.2406 & -3.9778 & 13.8460 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

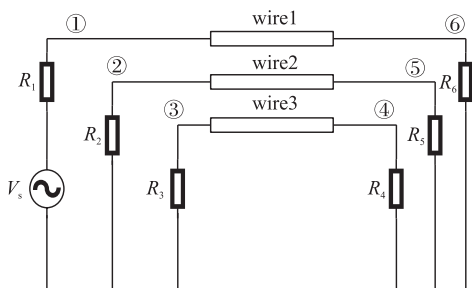


图 3 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram

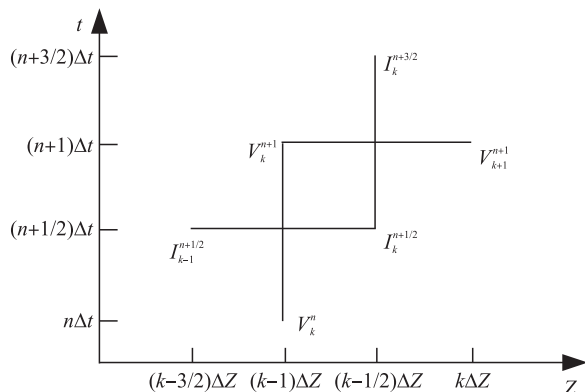


图 2 π 型 Leapfrog 离散差格式

Fig. 2 π type Leapfrog discrete difference scheme

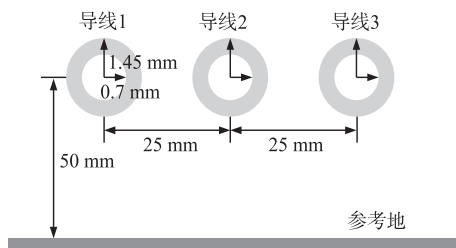


图 4 导体空间位置关系

Fig. 4 Spatial location of conductors

2.2 集总参数电路模型

集总参数模型适用于传输线长度远小于电磁波波长的情况, 即低频频段. 此时, 电磁过程受电路拓扑结构影响, 都集中在元件内部进行. 电路的所有参数都集中于空间各个点上, 各点的电流、电压信号是瞬时传递的而不是空间坐标的函数.

根据式(9)中的电磁参数矩阵, 在 CST DESIGN STUDIO 中搭建如图 5 所示的 SPICE 电路. 其中, 由电感 L 矩阵的非主对角线元素可计算出: L_{11} 与 L_{22} 之间互感耦合系数 $K12=0.286$, L_{22} 与 L_{33} 之间互感耦合系数 $K23=0.287$, L_{11} 与 L_{33} 之间互感耦合系数 $K13=0.163$. 电源内阻抗和负载阻抗均为 50Ω .

对比结果如图 6 和图 7 所示, 在 $10^3 \sim 10^6$ Hz 频段, 使用时域有限差分法计算得到的 wire2、wire3 的远

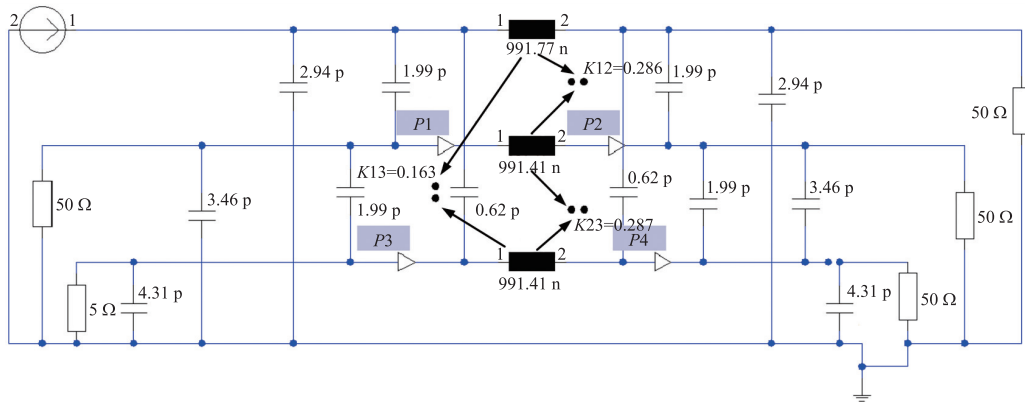


图 5 SPICE 电路模型

Fig. 5 SPICE circuit model

端串扰结果与用 CST DESIGN STUDIO 搭建的 SPICE 电路计算结果所差无几. 证明了 FDTD 法对于“低频”的集总参数电路模型,串扰的计算结果契合度较高.

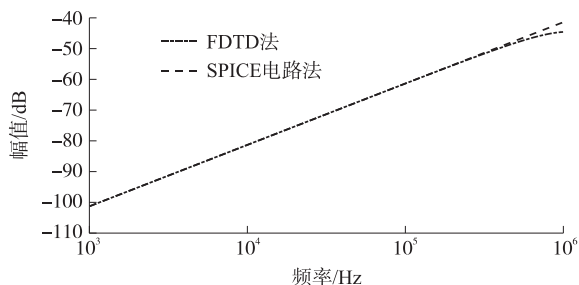


图6 电路模型中的2号线远端串扰

Fig. 6 FEXT of wire 2 in the circuit model

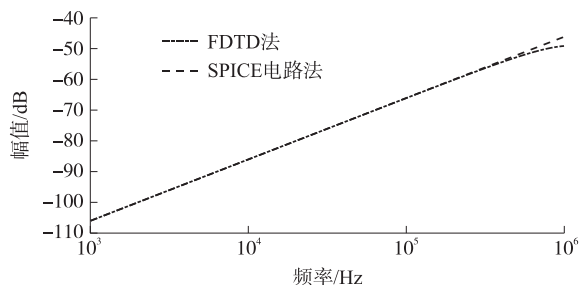


图7 电路模型中的3号线远端串扰

Fig. 7 FEXT of wire 3 in the circuit model

2.3 分布参数传输线模型

分布参数传输线模型适用于传输线的横截面尺寸远小于波长,但线长相对于波长仍属于电大尺寸. 此时,传输线上的电流、电压不仅是时间的函数也是空间坐标的函数. 即高频频段. CST Cable Studio 自带的场路协同仿真提供了 TLM(传输线矩阵法)求解器与端口 S 参数求解,利用二者的计算结果与时域有限差分法进行对比.

在 $10^6 \sim 10^9$ Hz 频段,如图 8 和图 9 所示,使用时域有限差分法计算得到的 wire2、wire3 远端串扰结果与用 CST-TLM 法的计算结果所差无几,与 S 参数法在中间频段相比最大误差相差不过 3 dB. 由此可见, FDTD 法对于“高频”的分布参数传输线模型,也有着很好的计算精度.

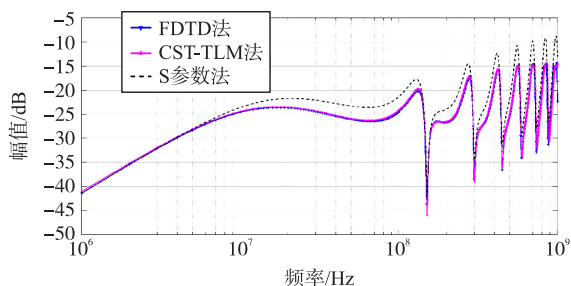


图8 传输线模型中的2号线远端串扰

Fig. 8 FEXT of wire 2 in the transmission line model

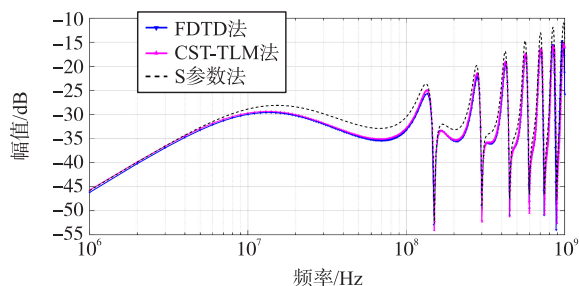


图9 传输线模型中的3号线远端串扰

Fig. 9 FEXT of wire 3 in the transmission line model

3 “场-线耦合”模型搭建与仿真

当传输线所处外部电磁环境中的频率、功率达到一定条件时,我们称传输线受到了外施激励场的作用. 其对线缆的耦合,以及线缆间的耦合都将产生新的影响. 此时,由于新的激励方式的存在,兼有“场-线耦合”与线缆间的耦合. 如图 10 所示,均匀平面波是一种特殊的外施激励场,其波的入射方向、电场极化方向、磁场强度方向三者构成右手定则. 比节算例中,在 CST Cable Studio 建立以端射式和垂射式为代表的两种极化方向的均匀平面波激励下的三导体传输线模型. 三平行线均平行于 xoz 建系平面,距地高度分别

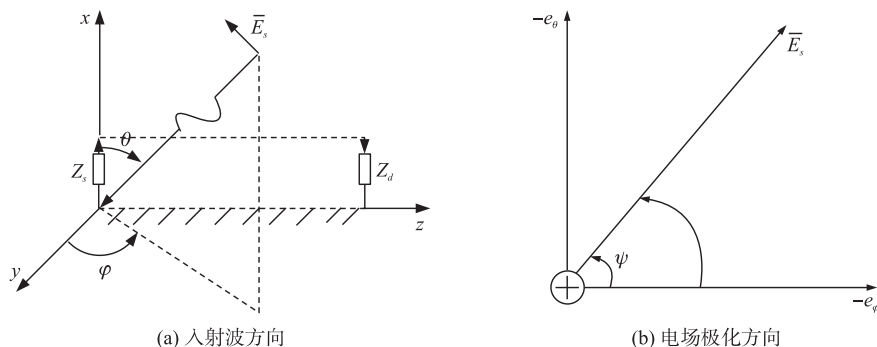


图10 均匀平面波的电场矢量的极化

Fig. 10 Polarization of electric field vector of uniform plane wave

为 15 mm、10 mm 和 5 mm,材料以及尺寸参数同第 2.1 节。

当入射的均匀平面波满足 $\theta=90^\circ, \varphi=-90^\circ, \psi=90^\circ$ 时,称为端射式平面波. 当入射的均匀平面波满足 $\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ, \psi=90^\circ$ 时,称为垂射式平面波. 三根平行线远端串扰对比结果如图 11、图 12 所示,虽然在某些谐振点附近频段误差较大,但整体趋势和低、高频误差与用 TLM 求解器的计算结果吻合度较高. 且 CPU 占用率不高,计算速度较快,实现了精度与速度上的平衡. 由此可见, FDTD 法对于外施激励场下的“场-线耦合”模型也有着较高的计算精度.

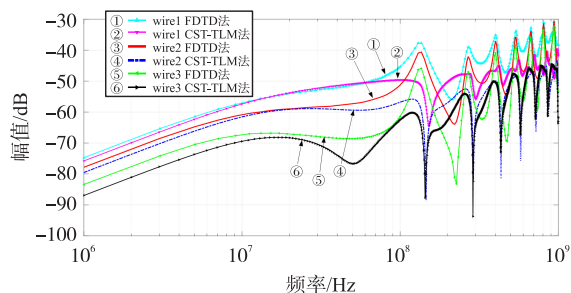


图 11 外施场端射下 3 线远端串扰对比

Fig. 11 Contrast of FEXT of third lines under the external excitation field endshooting condition

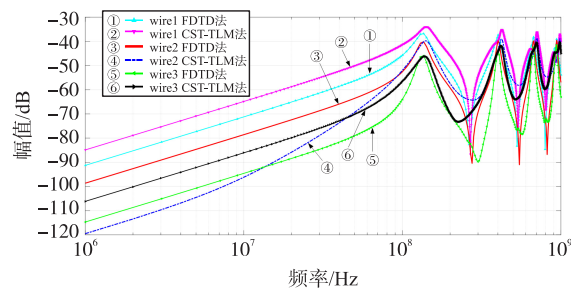


图 12 外施场垂射下 3 线远端串扰对比

Fig. 12 Contrast of FEXT of third lines under the external excitation field vertical condition

4 结论

时域有限差分法是求解多导体传输线方程中应用最广泛的数值方法,它能够将 MTL 微元化. 对于 π 型 Leapfrog 中心差分格式,在满足 CFL 条件的前提下,通过对时间片段和空间片段的多层剖分达到精细求解. 本文通过低频的集总参数电路模型、分布参数传输线模型以及外施激励场下的“场-线耦合”模型这三种不同的仿真模型对时域有限差分法的计算精度加以验证. 集总参数模型和分布参数模型的计算结果较为准确,而垂射条件下的外施激励场“场-线耦合”模型相比于端射条件,在较高频段计算结果更加接近仿真值,进一步证明了时域有限差分法在电磁学计算理论研究中的举足轻重的地位和作用.

[参考文献] (References)

- [1] HONARBAKHS B, ASADI S. Analysis of multiconductor transmission lines using the CN-FDTD method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 59(1): 184-192.
- [2] BRANCIK L, SEVCIK B. Fully time-domain simulation of multiconductor transmission line systems; Implicit Wendroff and Euler methods within modified nodal analysis[C]//The Workshop on Nonlinear Dynamics. Slovenia: IEEE, 2011: 1-6.
- [3] AFROOZ K, ABDIPOUR A. Efficient method for time-domain analysis of lossy nonuniform multiconductor transmission line driven by a modulated signal using FDTD technique[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(2): 482-494.
- [4] YANG Z, TAN E L. Multiple one-dimensional FDTD method for coupled transmission lines and stability condition[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(11): 864-866.
- [5] MORA N, RACHIDI F, PELISSOU P, et al. Cable crosstalk analysis and simulation; a comparison between low frequency circuit approach and transmission line theory[C]//The Workshop on Aerospace Emc. Venice, Italy: IEEE, 2012: 1-6.
- [6] IANCONESCU R, VULFIN V. Analysis of lossy multiconductor transmission lines and application of a crosstalk cancelling algorithm[J]. Iet Microwaves, Antennas and Propagation, 2017, 11(3): 394-401.
- [7] HE X, WEN Y, ZHANG J, et al. Analysis of crosstalk between cables on board in high speed EMUs[C]//International Symposium on EMC Technologies. Shanghai, China: IEEE, 2016: 454-457.
- [8] LI G R, WANG L A. Transmission line model for prediction of crosstalk involving three-core twisted cables[C]//International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan, China: IEEE, 2010: 3241-3244.
- [9] PAUL C R. Solution of the transmission-line equations for three-conductor lines in homogeneous media[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978, 20(1): 216-222.

(下转第 70 页)

著. 随着 S-Imperv 取值的增大,可见淹没范围有一定程度的缩减,所以不渗透区注蓄量是内涝模型的敏感参数;但缩减程度较小,所以其敏感度较低.

在其他因素保持不变的情况下,当不透水区注蓄量 S-Imperv 的取值变大时,发生淹没的区域略有减小. 研究区域内地表类型中的不透水区占有很大的比例,不透水区包括有注蓄不透水区和无注蓄不透水区,对于有注蓄不透水区,不透水区注蓄量的取值会对其产流造成影响. 随着 S-Imperv 取值的增大,地表产流量会有所减小,经过汇流过程后汇入排水系统的流量也相应减少,从而导致各节点水位有所下降,发生溢流的节点数量和溢流量都随之减小,最终使得淹没的区域也有一定程度的缩小.

5 结论

本文在分析城市内涝发生过程机理的基础上,解析 SWMM 模型各模块的参数和计算原理,研究 SWMM 模型数据建模方法. 针对已有的城市内涝模型在模拟结果表达方面的不足,研究 SWMM 模型与三维可视化平台的集成技术. 对比分析了目前发展迅速的三维可视化技术的优缺点及可视化的具体需求,选择 Cesium 作为可视化的平台,利用开源技术构建城市内涝模型与 Cesium 集成的三维可视化原型系统,在三维场景中展示城市内涝模拟的结果,对城市内涝灾害的应急管理有一定的价值.

[参考文献](References)

- [1] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual, version 5.0 [M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [2] KOUDELAK P, WEST S. Sewerage network modelling in latvia, use of infoworks cs and storm water management model 5 in liepaja city [J]. Water & Environment Journal, 2010, 22(2): 81-87.
- [3] PITT R, VOORHEES J, FIELD R, et al. SLAMM, the source loading and management model [J]. Wet-weather Flow in the Urban Watershed: Technology and Management, 2003: 79-101.
- [4] 程海云, 黄艳. 丹麦水力研究所河流数学模拟系统 [J]. 水利水电快报, 1996, 17(19): 24-27.
- [5] 许婷. 丹麦 MIKE21 模型概述及应用实例 [J]. 水利科技与经济, 2010, 16(8): 867-869.
- [6] ALLEY W M, SMITH P E. Distributed routing rainfall-runoff model; version II [R]. Dallas: US Department of the Interior, 1982.
- [7] 岑国平. 城市雨水径流计算模型 [J]. 水利学报, 1990(10): 68-75.
- [8] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统 [J]. 水利学报, 2000(11): 34-42.
- [9] 周玉文, 戴书健. 城市排水系统非恒定流模拟模型研究 [J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(1): 84-86.
- [10] 陈建香. 面向用户的地图交互方式的比较与应用研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2012.

[责任编辑: 严海琳]

(上接第26页)

- [10] 包贵浩, 戴飞. 非均匀螺距的双绞线串扰统计特性分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 193-197.
- [11] 王天皓, 王忠福. 基于混沌多项式展开法的线束串扰统计模型 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(5): 1568-1576.
- [12] 王天皓. 汽车电磁兼容中线束串扰及其统计特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [13] 安占扬. 汽车线束串扰及其动态特性的预测研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [14] 张俊东. 汽车线束串扰和电磁辐射敏感度的时域分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [15] 张昭. 基于“场—线耦合”效应的多导体传输线电磁噪声的预测 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

[责任编辑: 陈 庆]