

文章编号:1000-582X(2011)06-015-05

模糊推理在导线间串扰预测中的应用

李永明, 曾 铨, 郑亚利, 汪泉弟, 俞集辉

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:提出应用模糊逻辑推理对互连导线间串扰问题进行预测的方法,从前期测量数据中选择有效的电磁干扰参数作为预测因子,并根据数据的统计特性对其分级,然后归并模糊蕴涵式语句确定模糊蕴涵关系集。该方法与人工神经网络预测方法相比,不仅可以充分利用原有的专家的经验 and 知识,而且能够从实际数据中自动总结和提取新的推理规则。实例分析表明该方法对导线间串扰问题的预测是可行的。

关键词:串扰;模糊推理;模糊蕴涵关系;预测

中图分类号:TM 751

文献标志码:A

Fuzzy inference in the inter-wire crosstalk prediction

LI Yong-ming, ZENG Xuan, ZHENG Ya-li, WANG Quan-di, YU Ji-hui

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: This paper presents the application of fuzzy inference on the issue of predicting crosstalk between interconnection wires. Effective electromagnetic interference parameters are selected as predictors from the pre-survey data, and the data are classified according to their statistical properties, and then fuzzy implication sentences are merged to determine the relationship between fuzzy implication set. Compared with the artificial neural network forecasting method, fuzzy inference forecasting method can not only make full use of existing experience and knowledge of experts, but also extract automation summary and the new inference rules. The result of the example shows that the method is feasible.

Key words: crosstalk; fuzzy inference; fuzzy implication relations; forecast

随着电子技术和信息技术的迅速发展,电子设备已经广泛应用于人类生活的各个方面。繁多的电子设备产生各种频率的电磁波,造成电磁环境日益复杂,而恶劣的电磁环境又反过来影响电子设备的性能^[1]。复杂的电磁干扰问题影响了系统性能,降低了设备的可靠性。导线作为各类电子设备的连接纽带,对设备的电磁兼容性起着非常重要的作用,大量的理论和工程实践表明,设备互连导线和电缆是系统中引入电磁干扰的重要途径,为了系统的安全

可靠运行,研究设备互连线缆的串扰问题无疑具有非常重要的意义。

电磁场数值计算方法的发展和计算机性能的不断提高,使得越来越多的研究人员运用电磁场数值仿真和预测技术来解决汽车的电磁兼容问题^[2-7]。针对导线间的串扰问题已经有了一些研究。如文献[8]研究了两平行传输线间的串扰问题,文献[9]采用有限元法对电磁兼容问题进行预测,文献[10]采用 MTL/MoM 混合方法研究了导线的辐射问题,文

收稿日期:2010-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877081)

作者简介:李永明(1964-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事电磁场数值计算方法及其应用、电磁兼容与环境保护等研究,(E-mail)cqliym@cqu.edu.cn。

献[11-12]采用 FDTD 方法对两平行线模型的传输线串扰时域响应问题进行了仿真研究,文献[13]采用人工神经网络预测技术分析了两平行导线之间的串扰问题。考虑到电磁干扰预测的最终目的就是尽可能地减少电磁干扰值,达到电磁兼容,而不是得到具体的数值解,因此,只需要知道电磁干扰值的范围即可。笔者把模糊推理应用于导线间串扰问题的预测之中,通过对导线间串扰方面现有的原始数据进行总结、归纳,建立起符合电磁兼容预测的原始数据表,详细地介绍了应用模糊推理进行导线间串扰问题预测的过程和方法。提出了采用模糊推理的方法对汽车电磁兼容性进行预测,避开了模型求解的困难性和局限性。

1 基本原理及预测方法

模糊推理^[13-15]是以模糊判断为前提,运用模糊语言规则外推出一个近似结论的方法,它主要包括 5 个部分:1)采用许多“if...and...then...”形式的模糊规则;2)定义隶属函数的形式和范围;3)执行模糊推理的推理单元;4)将输入因子转换为对应的模糊语言值;5)将模糊计算和推理结果非模糊化为常规形式。

由电磁场理论可以知道,导线间的串扰主要受导线长度 L 、距地高度 h 、导线之间的间距 d 、干扰电压幅值 V_s 以及频率 f 和夹角 θ 等参数的影响。在互连导线串扰预测的模糊推理演算中,把串扰影响因素作为输入因子,受害导线上的耦合电压幅值作为输出因子,模糊推理就是在输入因子和输出因子之间找出一个适当的模糊关系 R ,并由模糊关系的前提作出合乎逻辑的推演结论,从而达到由输入因子预测输出因子的目的,其工作原理如图 1 所示。

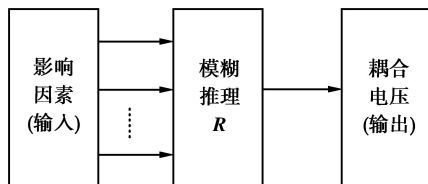


图 1 模糊推理流程图

为简化起见,将 2 根导线的长度和离地高度分别取为等值。将这 6 个影响因素作为预测因子,此时,输入向量就是 1 个含有 6 个预测因子的量。

设导线长度 L_1, L_2, \dots, L_n 是 L 的模糊子集,干扰电压幅值 $V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sn}$; 导线间距 d_1, d_2, \dots, d_n ; 离地高度 h_1, h_2, \dots, h_n ; 频率 f_1, f_2, \dots, f_n ; 夹角

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 分别是 V_s, D, H, F, θ 的模糊子集。对干扰预测的模糊语句进行归纳,可得到一般的电磁干扰模糊推理语句:若 L_a 且 V_{sb} 且 d_c 且 h_d 且 f_e 且 θ_f 则 V_k , 其中: $a, b, c, d, e, f, k=1, 2, \dots, n$ 。它是 L, V_s, d, h, f, θ 和 V 间的 1 个模糊关系 R , 其隶属函数为

$$r_{(a,b,c,d,e,f)k} = R(L_a, V_{sb}, d_c, h_d, f_e, \theta_f, V_k) = [L(L_a)V_s(V_{sb})D(d_c)H(h_d)F(f_e)\theta(\theta_f)] \vee V(V_k) \quad (1)$$

式中, $L(L_a) = L_{ak}$, L_{ak} 表示当预测因子 $L \in L_a$ 时, 预测结果 $V \in V_k$ 的频度。即

$$L_{ak} = \frac{\text{预测因子为 } L_a \text{ 时, 结果为 } V_k \text{ 的样本个数}}{\text{预测因子为 } L_a \text{ 时所有样本个数}} \quad (2)$$

同理 $V_s(V_{sb}) = V_{sbk}$, $D(d_c) = d_{ck}$, $H(h_d) = h_{dk}$, $F(f_e) = f_{ek}$, $\theta(\theta_f) = \theta_{fk}$; $V(V_k) = V_{(a,b,c,d,e,f)k}$, 表示当输入因子为 L_a 且 V_{sb} 且 d_c 且 h_d 且 f_e 且 θ_f 时, 输出结果为 V_k 的频度。

1.1 原始数据预处理及其推理规则

将原始数据进行分类形成决策规则, 根据导线参数原始数据的统计特性和实际经验, 将预测因子和预测对象进行分级, 用正整数序列对每个样本的条件属性 $L_i, V_{si}, d_i, h_i, f_i$ 和 θ_i 进行编码, 建立模糊分析级别表。级别的划分可根据预测所要求的精度来定, 精度要求越高, 分级就越细。

将预测因子和预测对象进行分级后发现, 预测因子 L, V_s, d, h, f, θ 与预测对象 V 之间存在某种联系, 模糊蕴涵语句体现为“若...且...则...”。例如: 原始数据中某一样本经过分级之后可以表示为: 若 L_a 且 V_{sb} 且 d_c 且 h_d 且 f_e 且 θ_f 则 V_k 。这些语句中可能有相同的、矛盾的, 也可能有输入不同但输出相同等情况, 因此必须对其进行归并处理。

将耦合电压级别资料转换为一组模糊规则语句时, 需遵循以下规则^[13]

- 1) 若有 2 个模糊规则语句相同, 则只选择 1 个。
- 2) 若有模糊规则语句: 若 A_i 则 C_k ; 若 B_j 则 C_k 。则表示为: 若 A_i 且 B_j 则 C_k , 其中, $i, j, k=1, 2, \dots, n$ 。

- 3) 若有模糊规则语句: 若 A_i 且 B_j 则 C_k 和若 A_f 且 B_j 则 C_k , 则表示为: 若 A_i 或 A_f 且 B_j 则 C_k , 其中, $i, j, f, k=1, 2, \dots, n$ 。

- 4) 若有模糊规则语句: 若 A_i 且 B_j 则 C_k 和若 A_i 且 B_j 则 C_f , 则表示为: 若 A_i 且 B_j 则 C_k 或 C_f , 其中, $i, j, f, k=1, 2, \dots, n$ 。

1.2 确定模糊蕴涵关系 R

预测对象与预测因子之间的关系蕴涵在大量的输入、输出数据资料中。根据一定数量的输入、输出资料,运用模糊算法可以计算出模糊关系 **R**。模糊蕴涵关系是对导线间串扰数据所反映的规律的概括,用它可以对串扰进行预测。设 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$, $V_s = \{V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sm}\}$, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, $H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$, $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$, $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$, $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 则 $L, V_s, D, H, F, \theta, V$ 间模糊关系 **R** 的隶属函数可由式(1)计算。

1.3 计算预测结果

如果已知 L, V_s, d, h, f, θ , 将其转换为对应的级别(区间) $L_a, V_{s_b}, d_c, h_d, f_e, \theta_f$, 其中 $a, b, c, d, e, f = 1, 2, \dots, n$, 由模糊关系 **R** 就可以推出预测结果

$$V' = (V'_1, V'_2, \dots, V'_n), \quad (3)$$

式中: $V'_k = r_k r_{(a,b,c,d,e,f)k}$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

$$r_k = \frac{1}{N} \sum_{(a,b,c,d,e,f)k} r_{(a,b,c,d,e,f)k} \quad (4)$$

N 为 (a, b, c, d, e, f) 的个数。

取隶属度最大的 V'_k 对应的电磁干扰级别 V_k 作为预测结果, 如果对应的 V'_k 有 2 个以上, 则取 k 值最大的 V_k 为预测结果, 即若有: $\max(V'_k) = V'_1 \approx V'_2$, 此时, 应预测电磁干扰的级别应取为 V'_2 。

2 实例分析

2.1 串扰原始数据的预处理

以导体平面上 2 根非平行(夹角为 θ) 导线之间的串扰问题为预测算例, 其模型如图 2 所示。

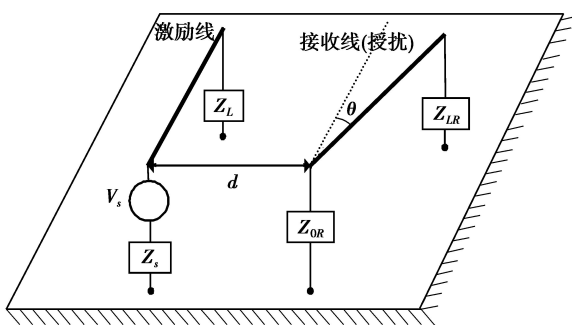


图 2 2 根非平行(夹角为 θ) 导线串扰模型

其中, 激励线上的干扰源电压为 V_s , 设备互连导线之间的近端距离为 d , 夹角为 θ , 两根导线长度和离地高度都相等, 分别为 L 和 h , $Z_s = Z_L = Z_{OR} = Z_{LR} = 50 \Omega$ 。需要预测接收线(受扰线)近端阻抗 Z_{OR} 上的最大干扰电压 V 。通过前期测量得到原始数据见表 1。

表 1 导线间串扰耦合原始数据

序号	$L/$ cm	$V_s/$ V	$d/$ cm	$h/$ cm	$f/$ MHz	$\theta/$ ($^\circ$)	$V/$ V
1	15	1.0	2.0	2.0	20	0	0.012 6
2	30	1.0	2.0	2.0	20	0	0.028 5
3	50	1.0	2.0	2.0	20	0	0.041 2
4	90	1.0	2.0	2.0	20	0	0.053 5
5	50	1.1	2.0	2.0	20	0	0.045 4
6	50	1.3	2.0	2.0	20	0	0.052 8
7	50	1.5	2.0	2.0	20	0	0.061 7
8	50	1.6	2.0	2.0	20	0	0.065 6
9	50	1.0	2.5	2.0	20	0	0.032 3
10	50	1.0	3.0	2.0	20	0	0.026 7
11	50	1.0	4.0	2.0	20	0	0.018 4
12	50	1.0	4.5	2.0	20	0	0.015 6
13	50	1.0	2.0	2.5	20	0	0.047 8
14	50	1.0	2.0	3.5	20	0	0.061 5
15	50	1.0	2.0	4.5	20	0	0.070 9
16	50	1.0	2.0	5.5	20	0	0.078 5
17	90	1.0	2.0	2.0	3.0	0	0.014 5
18	90	1.0	2.0	2.0	6.0	0	0.025 6
19	90	1.0	2.0	2.0	12	0	0.043 7
20	90	1.0	2.0	2.0	18	0	0.052 3
21	15	1.0	2.0	2.0	20	10	0.007 6
22	15	1.0	2.0	2.0	20	20	0.003 9
23	15	1.0	2.0	2.0	20	60	0.001 5
24	15	1.0	2.0	2.0	20	80	0.000 8

根据导线参数的原始数据, 将预测因子和预测对象进行分级, 数据的分级要根据实际情况, 将受扰线内受到的干扰电压分为 3 级, $V_1 < 0.025 0$; $0.025 0 \leq V_2 \leq 0.040 0$; $V_3 > 0.040 0$ 。其中, 定义级别 1 表示受到的干扰很小或者可以看作几乎没有干扰, 级别 2 表示有干扰, 但并不是很强烈, 级别 3 表示受到的干扰很强烈。级别的划分并不是单一的, 精度要求越高, 分级就应当划分的越细。为了简要说明预测的过程, 将预测因子划分为 2 级进行预测。根据原始数据的分布情况可将干扰源电压分级为: $V_{s1} \leq 1.0$; $V_{s2} > 1.0$ 。同理, 将导线长度 L 、间距 d 、离地高度 h 、频率 f 和角度 θ 分级为: $L_1 \leq 50$, $L_2 > 50$; $d_1 \leq 2.0$; $d_2 > 2.0$; $h_1 \leq 2.0$; $h_2 > 2.0$; $f_1 \leq 18$; $f_2 > 18$; $\theta_1 \leq 0$; $\theta_2 > 0$ 。将原始数据表转换成模糊分析的级别表, 见表 2。

表2 模糊分析级别表

序号	L	V_s	d	h	f	θ	V
1	L_1	V_{s1}	d_1	h_1	f_2	θ_1	V_1
2	L_1	V_{s1}	d_1	h_1	f_2	θ_1	V_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
24	L_1	V_{s1}	d_1	h_1	f_2	θ_2	V_1

2.2 模糊蕴涵语句的归并

将表2中的资料处理成“若…且…则…”形式的模糊蕴涵语句,得到24条模糊蕴涵语句,在这些语句中可能存在相同的、输入不同但输出相同的、甚至是矛盾的情况,对其进行归并处理,得到12条模糊蕴涵语句,归并后的级别表,见表3。

表3 归并后的原始数据级别表

样本个数	L	V_s	d	h	f	θ	V
1	L_1	V_{s1}	d_1	h_1	f_2	θ_1	V_1
1	L_1	V_{s1}	d_1	h_1	f_2	θ_1	V_2
1	L_1	V_{s1}	d_1	h_1	f_2	θ_1	V_3
1	L_2	V_{s1}	d_1	h_1	f_2	θ_1	V_3
4	L_1	V_{s2}	d_1	h_1	f_2	θ_1	V_3
2	L_1	V_{s1}	d_2	h_1	f_2	θ_1	V_2
2	L_1	V_{s1}	d_2	h_1	f_2	θ_1	V_1
4	L_1	V_{s1}	d_1	h_2	f_2	θ_1	V_3
1	L_2	V_{s1}	d_1	h_1	f_1	θ_1	V_1
1	L_2	V_{s1}	d_1	h_1	f_1	θ_1	V_2
2	L_2	V_{s1}	d_1	h_1	f_1	θ_1	V_3
4	L_1	V_{s1}	d_1	h_1	f_2	θ_2	V_1

2.3 确定模糊关系R

模糊关系 R 是原始资料所反映规律的概括,用它就可以进行模糊推理,做出导线间串扰的预测。根据表3和式1即可求得模糊关系 R ,可以用下面的 64×3 阶矩阵表示

$$\begin{bmatrix} r(1,1,1,1,1,1)_1 & r(1,1,1,1,1,1)_2 & r(1,1,1,1,1,1)_3 \\ r(1,1,1,1,1,2)_1 & r(1,1,1,1,1,2)_2 & r(1,1,1,1,1,2)_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r(2,2,2,2,2,2)_1 & r(2,2,2,2,2,2)_2 & r(2,2,2,2,2,2)_3 \end{bmatrix}。$$

2.4 预测分析

如果已知 L, V_s, d, h, f, θ ,将他们转化成对应的级别 $L_i, V_{si}, d_i, h_i, f_i, \theta_i$,其中 $i=1,2$ 。由模糊关系 R 可以推出其预测结果

$$V' = (V'_1, V'_2, V'_3)。$$

下面用一组数据来进行推理检验,例如:当导线长度为50 cm,电源幅值为1.0 V,导线间距为3.5 cm,离地高度为2.0 cm,工作频率为20 MHz,夹角为 0° 时,首先将各参数转换成相应的级别, $50 \in L_1$,

$1.0 \in V_{s1}, 3.5 \in d_2, 2.0 \in h_2, 20 \in f_2, 0 \in \theta_1$,代入可得: $\max(V'_j) = \max(0.01628, 0.00846, 0)$,由最大隶属度原则判定其电磁干扰预测级别为 V_1 ,即预测区间为: $V < 0.0250$,实际测量值为0.0216,落在预测区间内,达到了预期的目的,表明利用该方法对导线间串扰问题进行预测是可行的。而且,利用模糊推理预测方法避免了传统电磁场数值仿真方法需要建立复杂的电磁干扰三要素模型及其求解具体电磁干扰值的不足,提高了预测的效率。

3 结 语

笔者提出了用模糊推理对导线间串扰问题进行预测的方法,研究的模型不依赖于具体的数学表达式,而是通过事物之间的内在联系提取各种信息,保证了分析的客观性。在确定合理的决策原则下,代入设计参数可以得到电磁干扰的级别,从本文所举例子可以看出,应用模糊推理的电磁兼容预测是可行的。

基于模糊推理所得出的结论和人的思维方式相似,更加有利于人对知识的理解。作者虽然只是以两根导线之间的串扰为例,但是并不局限于此,可以推广应用到电磁兼容预测的其他领域,如火花塞点火对车内电子设备产生的传导干扰等。但是应用模糊推理预测的方法需要大量具有代表性的原始数据和相关经验,因此,前期数据和经验的积累对运用模糊推理的方法来进行预测是非常重要的。与现有的人工神经网络预测方法相比,模糊逻辑推理方法具有较强的知识表达能力,能够从实际数据中无教师地自动总结和提取新的推理规则,因而具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] PAUL C R. A brief history of work in transmission lines for EMC application[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(2): 237-252.
 - [2] CHEN C. Predicting vehicle-level radiated EMI emissions using module-level conducted EMIs and harness radiation efficiencies [C] // 2001 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. August 13-17, 2001, Montreal, Que, Canada. [s. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers, [2002-08-07]: 1146-1151.
 - [3] 叶青, 金隼, 王华, 等. 汽车运输车虚拟装载仿真系统关键技术研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2342-2345.
- YE QING, JIN SUN, WANG HUA, et al. Study of key

- technologies in car carrier virtual loading simulation system[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 8(18): 2342-2345.
- [4] GERASIMOV A I, GORKUNOV V S, SKRIPKA G M. Provision of electromagnetic facilities[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2005, 16(11): 539-548.
- [5] 张红欣,吕英华,包永芳. 基于FDTD/MoM方法的同轴电缆孔缝辐射效应研究[J]. *北京邮电大学学报*, 2004, 27(2): 61-65.
- ZHANG HONG-XIN, LV YING-HUA, BAO YONG-FANG. The study on the electromagnetic radiation from the aperture on coaxial cable based on FDTD/MoM method[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2004, 27(2): 61-65.
- [6] LIU G P, POMMERENKE D J, DREWNIAK J L, et al. Anticipating vehicle-level EMI using a multi-step approach[C]// 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. August 18-22, 2003, Boston. [s. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers, [2003-10-14]: 419-424.
- [7] ALA G, DI PIAZZA M C, TINE G, et al. Evaluation of Radiated EMI in 42-V Vehicle Electrical Systems by FDTD Simulation[J]. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 2007, 56(4): 1477-1484.
- [8] LI L, LI W B, WANG X G. Crosstalk analysis between two parallel transmission-lines[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2001, 16(2): 271-274.
- [9] DIXON D S, BARA M, SCHADE N. Finite-element analysis (FEA) as an EMC prediction tool[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, 35(2): 241-248.
- [10] TOPCHISHVILI D, JOBAVA R, BOGDANOV F, et al. A hybrid MTL/MoM approach for investigation of radiation problems in EMC[C]// The 9th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory. October 11-14, 2004, Tbilisi, Georgia. [s. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers, [2004-12-27]: 65-68.
- [11] 衣斌,张楠,王泽忠. 基于FDTD法的传输线串扰时域响应分析与实验研究[J]. *现代电力*, 2008, 25(1): 40-43.
- YI BIN, ZHANG NAN, WANG ZE-ZHONG. Time-domain analysis and experimental research on crosstalk of transmission lines based on FDTD[J]. *Modern Electric Power*, 2008, 25(1): 40-43.
- [12] LI L P, LI Y S, WANG C J. FDTD analysis of the crosstalk reduction with guard trace between microstrips[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2006, 28(3): 574-576.
- [13] 李永明,祝言菊,李旭,等. 电磁兼容的人工神经网络预测技术分析[J]. *重庆大学学报*, 2008, 11(31): 1313-1316.
- LI YONG-MING, ZHU YAN-JU, LI XU, et al. Artificial neural networks-based prediction of electromagnetic compatibility problems[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 11(31): 1313-1316.
- [14] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2006.
- [15] 陆建江,张亚菲,宋自林,等. 模糊关联规则的研究与应用[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [16] 王钦,文福拴,刘敏,等. 基于模糊集理论和层次分析法的电力市场综合评价[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(7): 32-37.
- WANG QIN, WEN FU-SHUAN, LIU MIN, et al. Combined use of fuzzy set theory and analytic hierarchy process for comprehensive assessment of electricity markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(7): 32-37.

(编辑 张小强)