

一种新型射频功放建模结构 LMEC 研究及预失真应用^{*}

南敬昌, 李诗雨, 汪赫瑜, 高明明

(辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 针对现代无线通信系统中射频功率放大器的强非线性特征, 提出了一种高精度、低复杂度的 LMEC (LUT-MP-EMP-CIMT) 模型。该模型由查找表(LUT)、记忆多项式(MP)、包络记忆多项式(EMP)及记忆交叉项(CIMT)并联构成。与并联双非线性两箱模型(PTNTB)相比, LMEC 模型增加了 EMP 子模型和 CIMT 子模型。实验结果表明, LMEC 模型能带来更好的建模精度和线性化效果, 较 MP 模型的建模精度提升了 2.9 dB, 邻信道功率比(ACPR)值降低约 5 dB; 较 PTNTB 模型精度提升了 1.1 dB, ACPR 值降低约 3 dB; 与通用记忆多项式模型(GMP)相比性能相近, 但减少了 50% 的系数。

关键词: 行为模型; 预失真; 记忆多项式; 功率放大器

中图分类号: TN92; TN722.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)08-2447-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.08.051

New LMEC model for behavior modeling and predistortion for RF power amplifiers

NAN Jing-chang, LI Shi-yu, WANG He-yu, GAO Ming-ming

(School of Electronic & Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: According to the strong memory effect characteristics of the RF power amplifier in modern wireless communication system, this paper introduced a new, accurate, and complexity-reduced LMEC model. This model was composed of a look-up table(LUT), a memory polynomial(MP), an envelope MP(EMP) and a cross items between memory times(CIMT), which were all connected in parallel. Compared with the parallel twin nonlinear two-box(PTNTB) model, LMEC model increased the EMP and CIMT. The measure results, in both behavioral modeling and digital predistortion applications, show that LMEC method can acquire better modeling accuracy and linear effect. Compared with the MP model, LMEC method increases the accuracy 2.9 dB and reduces the adjacent channel power ratio(ACPR) almost 5 dB. Compared with the PTNTB model, LMEC method increases the accuracy 1.1 dB and reduces the ACPR almost 3 dB. And it shows the same accuracy as the GMP model but with an approximately 50% reduction in the number of coefficients.

Key words: behavioral model; digital predistortion; memory polynomial; power amplifier

0 引言

功率放大器是射频收发器的重要元件,也是主要的非线性来源。现代无线通信系统中,为了追求高效率和高输出功率,功放工作在接近饱和点,导致线性度降低。因此,消除功放非线性失真是一个重要的课题。近年来提出了多种线性化技术来满足功率放大器的线性度要求,常用的有功率回退技术、前馈线性化技术、笛卡儿环路反馈技术、非线性器件线性化技术以及数字预失真技术等^[1,2]。在这些技术中,数字预失真技术由于能在不降低效率的同时获得良好的线性化性能而被视为最有前途的线性化方案之一^[3,4]。

行为建模作为分析功放性能第一步非常重要,也是发展数字预失真线性化技术的必要前提。功放建模必须考虑非线性和记忆效应。在 WCDMA、CDMA2000 和 OFDM 等宽带通信系

统中,功率放大器具有明显的记忆效应,无记忆模型无法精确描述其特性。因此,为具有记忆效应的功率放大器建立精确的行为模型并应用于线性化技术中,提高功放的线性度,对实际设计具有重大的参考价值。

功放行为模型通常可以分为基于神经网络的行为模型和基于 Volterra 级数的行为模型两类。神经网络对非线性函数具有良好的逼近能力,但容易陷入局部极小,网络的泛化能力不强。Volterra 级数可以更加清晰准确地描述非线性系统的物理意义,但它的模型参数数量随系统的非线性和记忆长度的增加呈指数形式增长,辨识过程极为复杂,在某种情况下,不能同时满足模型性能和复杂度的双重要求,一般只适用于弱非线性的功率放大器建模^[5]。因此,提出了一些简化的 Volterra 模型,主要包括记忆多项式模型(memory polynomial, MP)^[6]、正交多项式模型^[6]、包络记忆多项式模型(envelope memory poly-

收稿日期: 2012-11-13; **修回日期:** 2012-12-27 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60971048);辽宁省博士启动基金资助项目(20091033)

作者简介: 南敬昌(1971-),男,河南滑县人,教授,硕士,博士,主要研究方向为射频电路与器件、多媒体信息编码、通信系统仿真等;李诗雨(1989-),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为功放模型、预失真技术(232716880@qq.com);汪赫瑜(1975-),女,辽宁人,副教授,硕士,主要研究方向为计算机软件、算法设计等;高明明(1980-),女,内蒙古人,讲师,硕士,主要研究方向为无线通信、射频微波电路建模仿真技术。

nomial, EMP)^[7]、通用多项式模型(generalized memory polynomial, GMP)^[8]、修剪的 Volterra 模型^[9]、动态偏差减少 Volterra 模型^[10]。这些模型去除了 Volterra 模型中的冗余项,保留对建模有影响的项,降低了识别的复杂度。还有一些两箱模型,如 Wiener 模型^[8]、Hammerstein 模型^[11]、增强型 Hammerstein 模型^[12]、双非线性两箱模型^[13]。还有, Wiener 和 Hammerstein 模型联合构成三箱模型^[14]。

本文在并联双非线性两箱(parallel twin nonlinear two-box, PTNTB)模型的基础上,提出了一种新的模型——LMEC 模型,增加了包络记忆多项式及记忆交叉项(cross items between memory times, CMT),更加准确地描述了功放的强记忆效应。将提出的 LMEC 模型与 MP 模型、GMP 模型和 PTNTB 模型作了彻底的比较,比较了模型的精确度和计算复杂度、归一化均方误差性能和所需的系数数量。结果说明 LMEC 模型的性能优于其他的基于 MP 的模型,在行为建模和数字预失真应用中都能保持合理的系数个数。

1 LMEC 行为模型描述

PTNTB 模型是一个两箱模型,由无记忆非线性函数(可以由查找表或者多项式函数实现)和低阶记忆多项式并联组成,将两个子模型的输出相加作为 PTNTB 模型的输出,结构如图 1 所示^[13]。PTNTB 模型两个子模型都是非线性函数,没有假设将非线性行为和线性行为分开,先后处理了强的静态非线性和适中的动态非线性。PTNTB 模型中,记忆多项式子模型表示为

$$y_{mp}(n) = \sum_{j=1}^{M_1} \sum_{i=1}^{N_1} a_{ji} x(n-j) |x(n-j)|^{i-1} \quad (1)$$

其中: x 、 y_{mp} 分别为 MP 子模型的输入信号和输出信号; M_1 、 N_1 分别为 MP 子模型的记忆深度和非线性阶数; a_{ji} 为 MP 子模型系数。考虑到 PTNTB 模型中查找表(look-up table, LUT)表征了静态非线性,本文中 MP 子模型不包括无记忆项, j 从 1 开始取值。

LMEC 模型是 PTNTB 模型的扩展,模型结构如图 2 所示。

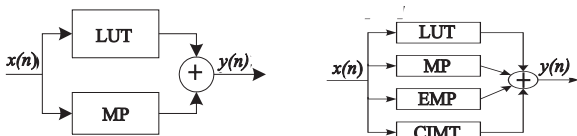


图1 PTNTB模型结构

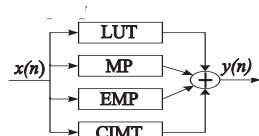


图2 LMEC模型结构

相较于 PTNTB 模型, LMEC 模型的主要优点是增加了 EMP 子模型^[7]和 CMT 子模型^[15],即分别增加了历史时刻包络对当前输入信号的影响项和历史时刻交叉项对功放系统的影响,从而增强了模型的精度。另一方面,增加了总系数个数,可以通过选择合适 EMP 模型和 CMT 模型的尺寸(记忆深度和非线性阶数)来控制系数增加,使之不会显著地增加。EMP 子模型的数学表达式为

$$y_{emp}(n) = \sum_{k=1}^{M_2} \sum_{l=2}^{N_2} b_{kl} x(n) |x(n-k)|^{l-1} \quad (2)$$

其中: x 、 y_{emp} 分别为 EMP 子模型的输入信号和输出信号; M_2 、 N_2 分别为 EMP 子模型的记忆深度和非线性阶数; b_{kl} 为 EMP 子模型系数。LMEC 模型中 LUT 表征了静态非线性,所以 EMP 子模型不包括无记忆项, k 从 1 开始取值, l 从 2 开始取值。

对于宽带系统,记忆交叉项对建模的影响也不能忽略,表达式为

$$y_{cmt}(n) = \sum_{p=1}^{M_3} \sum_{q=1}^{M_3} \sum_{r=1}^{N_3} c_{pqr} x(n-p) |x(n-q)|^{r-1} \quad (3)$$

其中: x 、 y_{cmt} 分别为 CMT 子模型的输入信号和输出信号; M_3 、 N_3 分别为 CMT 子模型的记忆深度和非线性阶数; c_{pqr} 为 EMP 子模型系数。

对于 CMT 子模型,考虑到其选取的非线性阶数越高,需要辨识的系数越多且记忆时刻信号间的高阶非线性项对系统的影响较小,因而这里只考虑影响较大的记忆时刻信号间的三阶交调量。将 CMT 子模型改写为

$$y_{cmt}(n) = \sum_{p=1}^{M_3} \sum_{q=1}^{M_3} \sum_{p \neq q} c_{pq} x(n-p) |x(n-q)|^2 \quad (4)$$

LMEC 模型通过使用三个基于 MP 模型的函数可以更加灵活地表征记忆效应。每一支路的基于 MP 的模型选择相同的非线性阶数会导致模型尺寸过大,增加了模型计算的复杂度。因此, LMEC 模型通过并联添加非线性 LUT 的输出和基于 MP 模型的输出来减小模型尺寸。LUT 表征了功放的高阶静态非线性行为,基于 MP 的子模型使用低阶非线性且分别控制每个模型的尺寸,形成合理的总系数个数。

综上所述, LMEC 模型表示为

$$y_{lme}(n) = x(n) \text{LUT}(|x(n)|) + \sum_{j=1}^{M_1} \sum_{i=1}^{N_1} a_{ji} x(n-j) |x(n-j)|^{i-1} + \sum_{k=1}^{M_2} \sum_{l=2}^{N_2} b_{kl} x(n) |x(n-k)|^{l-1} + \sum_{p=1}^{M_3} \sum_{q=1}^{M_3} \sum_{p \neq q} c_{pq} x(n-p) |x(n-q)|^2 \quad (5)$$

其中: $\text{LUT}(|x(n)|) = \sum_{n=1}^N d_n |x(n)|^{n-1}$, N 为非线性阶数(LUT 的尺寸), d_n 为子模型系数。

文献[8]中的 GMP 模型,输出波形与输入波形的关系为

$$y_{gmp}(n) = \sum_{m=0}^{M_a} \sum_{k=1}^{N_a} a_{mk} x(n-m) |x(n-m)|^{k-1} + \sum_{m=0}^{M_b} \sum_{k=2}^{N_b} \sum_{l=1}^{l_b} b_{mkl} x(n-m) |x(n-m-l)|^{k-1} + \sum_{m=0}^{M_c} \sum_{k=2}^{N_c} \sum_{l=1}^{l_c} c_{mkl} x(n-m) |x(n-m+l)|^{k-1} \quad (6)$$

其中: x 、 y_{gmp} 分别为 GMP 模型的输入信号和输出信号; M_a 、 N_a 和 a_{mk} 分别为对齐的信号包络项的记忆深度、非线性阶数和系数; M_b 、 N_b 、 l_b 和 b_{mkl} 分别滞后交叉项的记忆深度、非线性阶数、交调度和系数; M_c 、 N_c 、 l_c 和 c_{mkl} 分别为超前交叉项的记忆深度、非线性阶数、交调度和系数。

LMEC 模型可以看做使用特殊数量的延迟交叉项,决定了 EMP 模型和 CMT 模型的尺寸。引入的这些交叉项是 GMP 模型中交叉项的特殊情况。此外,特殊交叉项的有效选择减少了模型复杂度,在与 GMP 模型性能相同的情况下减少了模型的系数。

2 模型识别

LMEC 模型识别分为两步:a)用输入/输出波形识别被测元件的第一个静态非线性函数,可以用多项式拟合或者平滑算法;b)嵌入测量数据来产生剩余三个子模型的输入/输出,同时识别子模型系数。

MP、EMP 和 CIMENT 模型的仿真识别为传统的线性识别问题:

$$Y = \Phi \times A \quad (7)$$

其中: Y 是三个动态非线性多项式模型 (MP、EMP 和 CIMENT) 的输出矢量; Φ 是由这三个多项式的基本函数和它们的输入信号构成的矩阵; A 是包含三个子模型系数的矢量。

矩阵 Φ 的定义为

$$\Phi = [\Phi_{MP} \quad \Phi_{EMP} \quad \Phi_{CIMENT}] \quad (8)$$

其中: Φ_{MP} 、 Φ_{EMP} 、 Φ_{CIMENT} 分别为 MP、EMP 和 CIMENT 基本函数组成的子矩阵。

利用最小二乘法 (LS) 拟合, 三个子模型的系数为

$$A = (\Phi^H \times \Phi)^{-1} \times \Phi^H \times Y \quad (9)$$

三个基于 MP 的子模型尺寸的制定要权衡考虑增强模型的整体性能和选取适当的模型系数两方面。因此, LMEC 模型尺寸的选取分为三步: a) 确定 MP 模型的尺寸, 这时 LMEC 模型被看做 PTNTB 模型; b) 确定 EMP 模型的尺寸; c) 确定 CIMENT 模型的记忆深度。三个子模型尺寸的确定用一般的扫描方法, 用归一化均方误差 (normalized mean square error, NMSE) 指标衡量每个模型的精确度^[16]。模型尺寸选取要使系数较低且得到更小的 NMSE 值。

$$NMSE_{dB} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{n=1}^K |y_{means}(n) - y_{est}(n)|^2}{\sum_{n=1}^K |y_{means}(n)|^2} \right] \quad (10)$$

其中: y_{means} 为实际测量的功放输出波形, y_{est} 为模型的输出波形, K 是这些输出波形样本的数量。

本文选取 1 000 对数据点用于模型系数的识别, 2 000 对数据点用于行为模型性能的检验。测试信号为 15 Meps 码片速率的 16 QAM 信号, 信号带宽 15 MHz。驱动 LDMOS Doherty 功放, 增益 50 dB, 中心频率 1.96 GHz。采集功放输入/输出信号用于行为模型的辨识。最终选定 LUT 尺寸为 12, 即无记忆多项式非线性阶数为 12, MP 子模型的记忆深度和非线性阶数分别为 5、5, EMP 子模型的记忆深度和非线性阶数分别为 4、3, CIMENT 子模型的记忆深度为 3。因此, LMEC 模型的总系数个数是 51, 模型的 NMSW 值为 -37.1 dB。

3 模型性能评估

将提出的 LMEC 模型与 MP 模型、PTNTB 模型和 GMP 模型比较, 来验证本文提出模型的精确度。

各模型的尺寸用扫描方法确定。如图 3 描述了 MP 模型、PTNTB 模型、GMP 模型和 PTNTB 模型总系数数量不同时对应的 NMSE 值。可以看出, PTNTB 模型精度高于 MP 模型, 且所需模型系数远远小于 MP 模型。更重要的是随着非线性阶数的增加, NMSE 值没有超过 -36.4 dB, 而本文提出的 LMEC 模型的 NMSE 值达到 -37.1。对比 LMEC 模型和 GMP 模型的 NMSE 性能比较, 发现模型精确度相似, 但 LMEC 模型所需系数更少。总之, 本文提出的 LMEC 模型, 在 PTNTB 模型的基础上增加了 EMP 和 CIMENT 子模型, 相比于 MP 和 PTNTB 模型进一步增强了模型精度, 相比于 GMP 模型降低了模型的复杂度。

图 4 所示为 LMEC 模型和 PTNTB 模型的频谱比较图。曲线①为功放实际输出功率谱, 曲线②为 LMEC 模型计算输出功率谱, 曲线③为 PTNTB 模型计算输出功率谱。由仿真结果可以看出, LMEC 模型计算输出的功率谱图与功放实际功率谱图

更接近, 模型性能更好。

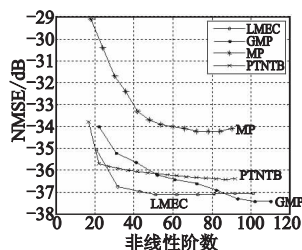


图3 各模型NMSE性能比较

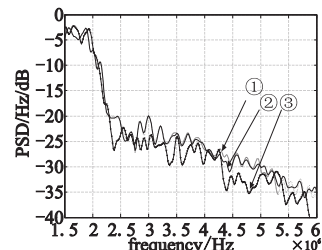


图4 LMEC和PTNTB模型频谱图比较

表 1 从模型尺寸、系数总数、NMSE 性能三方面比较了 LMEC 模型和 MP、PTNTB、GMP 模型。与 MP 模型相比, NMSE 性能提升了 2.9 dB, 模型系数减少了 26.76%。相比于 GMP 模型, 模型系数减少了 50%, 且模型精度相似, 只降低了 0.3 dB。与 PTNTB 模型比较, NMSE 值增加了 1.1 dB, 但是增加了模型的系数。然而, 总系数仍然在合理的范围, 且继续增加 PTNTB 模型的系数也达不到 LMEC 模型的精度。LMEC 模型很好地权衡了模型复杂度和精确度。

表 1 四种模型的性能比较

模型	模型参数	NMSE/dB	总系数
MP	$M=5, N=12$	-34.2	72
PTNTB	$M=5, N=5$ ($M_a=5, N_a=12$)	-36.0	42
GMP	($M_b=4, N_b=4, l_b=1$) ($M_c=4, N_c=4, l_c=1$)	-37.4	102
LMEC	($M_1=5, N_1=5$) ($M_2=4, N_2=3$) $M_3=3$	-37.1	51

4 预失真应用

将 LMEC 模型以及 MP、PTNTB、GMP 模型应用于预失真。图 5 所示为应用不同的预失真函数所得的频谱比较图, 各模型的尺寸按表 1 选取。可以看出, 与只经过功放的输出信号频谱相比, 四种预失真函数均有效地降低了频谱再生。PTNTB 预失真模型较 MP 的邻信道功率比 (adjacent channel power ratio, ACPR) 值约有 5 dB 的提升。本文提出的 LMEC 模型在 PTNTB 的基础上进一步提升 ACPR 约 3 dB。GMP 和 LMEC 预失真模型的频谱曲线在邻近载波频率时几乎重合, 远离载波频率时, GMP 模型的 ACPR 性能稍好, 但是模型复杂度较 LMEC 模型高。

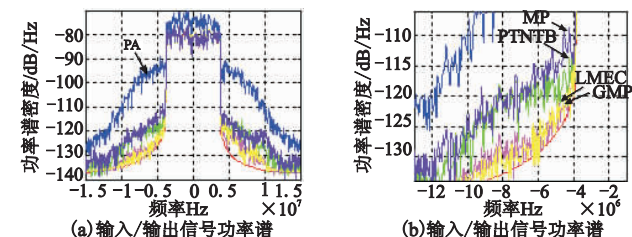


图5 各模型预失真后频谱比较图

图 6 比较了 PTNTB 预失真和 LMEC 预失真的 AM/AM、AM/PM 特性。预失真后线性化均有提升, 而 LMEC 预失真的 AM/AM、AM/PM 曲线更趋近于直线, 预失真线性化效果更好。

5 结束语

本文提出了高精度、低复杂度的 LMEC 模型。该模型由表征静态非线性的 LUT 和表征动态非线性的 MP 子模型、

EMP子模型、CMT子模型并联构成。实验结果表明,LMEC模型在功放模型建模和数字预失真应用中均有很好的表现。LMEC模型较MP模型有更好的性能,同时减少了26.76%的系数。与GMP模型相比有相似的模型精度,减少了50%的系数。与PTNTB模型相比,LMEC模型用稍多的系数得到了更好的精确度,且增加PTNTB模型的系数也达不到LMEC模型的精度。

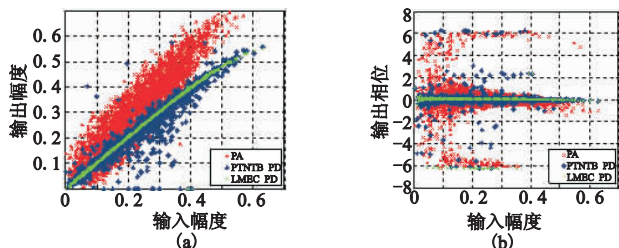


图6 LMEC和PTNTB预失真线性化性能比较

参考文献:

- [1] LEE Y S, LEE M W, JEONG Y H. Analog predistortion power amplifiers using IMD sweet spots for WCDMA applications [J]. *IEEE Trans on Microwave Optimization Technique Letters*, 2007, 49 (11): 2838-2841.
- [2] 詹鹏, 秦开宇, 蔡顺燕. 新的射频功放预失真线性化方法[J]. *电子科技大学学报*, 2011, 40(5): 676-681.
- [3] 侣秀杰, 金明录. 一种新的用于 Hammerstein 预失真器的自适应结构[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1345-1349.
- [4] 曹新容, 黄联芬, 赵毅峰. 一种基于 Hammerstein 模型的数字预失真算法[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2009, 48(1): 47-50.
- [5] MASOOD M, WOOD J, STAUDINGER J, *et al.* Behavioral modeling of high power RF amplifiers using pruned Volterra scheme with IIR basis functions [C]//Proc of IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications. 2012: 97-100.
- [6] ZHANG Jing, HE Song-bai, GAN Lu. Design of a memory polynomial predistorter for wideband envelope tracking amplifiers [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(2): 193-199.
- [7] HAMMI O, GHANNOUCHI F M, VASSILAKIS B. A compact envelope memory polynomial for RF transmitters modeling with application to baseband and RF-digital predistortion [J]. *IEEE Trans on Microwave Wireless Component Letters*, 2008, 18(5): 359-361.
- [8] MORGAN D, MA Zheng-xiang, KIM J, *et al.* A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers [J]. *IEEE Trans on Signal Process*, 2006, 54(10): 3852-3860.
- [9] XIE Zhong-shan, LIU Bing, LIU Wei, *et al.* A novel approach to pruning Volterra models with memory effects [C]//Proc of International Conference on Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences. 2011: 59-61.
- [10] STAUDINGER J. DDR Volterra series behavioral model with fading memory and dynamics for high power infrastructure amplifiers [C]//Proc of IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications. 2011: 61-64.
- [11] GADRINGER M E, SILVEIRA D, MAGERL G. Efficient power amplifier identification using modified parallel cascade Hammerstein models [C]//Proc of Radio Wireless Symposium. 2007: 305-308.
- [12] MAYADA Y, FADHEL M G. An accurate predistorter based on a feedforward Hammerstein structure [J]. *IEEE Trans on Broadcasting*, 2012, 58(3): 254-460.
- [13] HAMMI O, GHANNOUCHI F M. Twin nonlinear two-box models for power amplifiers and transmitters exhibiting memory effects with application to digital predistortion [J]. *IEEE Trans on Microwave Wireless Component Letters*, 2009, 19(8): 530-532.
- [14] SILVA C P, CLARK C J, MOULTHROP A A, *et al.* Optimal-filter approach for nonlinear power amplifier modeling and equalization [C]//Proc of IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2000: 437-440.
- [15] 都天骄, 于翠屏, 刘元安, 等. 一种有效的基于宽带功率放大器强记忆效应特性的 PMEC 预失真方法 [J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(2): 440-445.
- [16] CUI Ping, LIU Yuan-an, LI Shu-lan. Step memory polynomial predistorter for power amplifiers with memory [J]. *Journal of South-east University*, 2009, 25(3): 303-308.
- [12] 王志明, 符云清. 基于遗传算法的集装箱后方堆场箱位分配策略 [J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(8): 2939-2941.
- [13] 金涛, 赵璐, 高鹏. 集装箱港口多式运输系统资源配置协调优化研究 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(3): 900-904, 908.
- [14] 张海霖, 江志斌. 基于 R-OPN 的集装箱码头物流系统建模与分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(2): 231-237.
- [15] HENESEY L, DAVIDSSON P, PERSSON J A. Agent based simulation architecture for evaluating operational policies in transshipping containers [J]. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2009, 18(2): 220-238.
- [16] 李斌, 李文锋. 基于 MAS 的集装箱码头物流系统协同生产调度体系 [J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(11): 2502-2513.
- [17] 温景容, 武穆清, 宿景芳. 信息物理融合系统 [J]. *自动化学报*, 2012, 38(4): 507-517.
- [18] 王志远, 王建华, 徐旸. 可重构计算综述 [J]. *小型微型计算机*, 2009, 30(6): 1203-1207.
- [19] 王金鹏, 朱洪俊, 周俊. 最优子种群遗传算法求解柔性流水车间调度问题 [J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(2): 442-444.
- [20] 王圣尧, 王凌, 许辉, 等. 求解混合流水车间调度问题的分布估计算法 [J]. *自动化学报*, 2012, 38(3): 437-443.

(上接第2438页)

- [6] CANONACO P, LEGATO P, MAZZA R M, *et al.* A queuing network model for the management of berth crane operations [J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(8): 2432-2446.
- [7] LIU Yan-bin, ZHOU Chung-uang, GUO Dong-wei, *et al.* A decision support system using soft computing for modern international container transportation services [J]. *Applied Soft Computing*, 2010, 10(4): 1087-1095.
- [8] IMAI A, NISHIMURA E, PAPADIMITRIOU S. Marine container terminal configurations for efficient handling of mega-containerships [J]. *Trans on Research Part E*, 2013, 49(1): 141-158.
- [9] LEGATO P, MAZZA R M, TRUNFIO R. Simulation-based optimization for discharge/loading operations at a maritime container terminal [J]. *OR Spectrum*, 2010, 32(3): 543-567.
- [10] CHEN Lu, ANDRE L B, LU Zhi-qiang. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 225(1): 142-152.
- [11] 王展, 陆志强, 潘尔顺. 堆区混贝的堆场吊调度模型与算法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(1): 182-188.