

一种基于均值量化的抗去同步攻击数字水印算法

马天笑¹ 王向阳^{1,2} 杨红颖¹

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029)¹

(中国科学院软件研究所信息安全国家重点实验室 北京 100039)²

摘要 基于量化调制的音频水印方案以其原理简单、操纵灵活等特点,已引起人们广泛关注,但现有方案不同程度地存在鲁棒性较差等不足之处。结合音频统计均值稳定特性及同步码技术,提出了一种新的数字音频水印嵌入算法,该算法选取稳健的 16 位巴克码作为同步标记,通过量化音频样本统计均值嵌入同步码,同时结合听觉掩蔽特性量化低频小波系数平均值嵌入数字水印。仿真实验结果表明,本算法不仅具有较好的不可感知性,而且对常规信号处理(MP3 压缩、低通滤波、添加噪声、均衡化等)和去同步攻击(随机剪切、幅度缩放、抖动等)均具有较好的鲁棒性。

关键词 音频水印,量化调制,统计均值,同步码

Robust Digital Watermarking Based on Audio Statistics Characteristics and Synchronization Code

MA Tian-xiao¹ WANG Xiang-yang^{1,2} YANG Hong-ying¹

(School of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)¹

(State Key Laboratory of Information Security, Institute of Software of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)²

Abstract We proposed a new robust digital audio watermarking using audio statistics characteristics and synchronization code. Firstly, the origin digital audio was segmented and then each segment was cut into two sections. Secondly, with the spatial watermarking technique, synchronization code was embedded into the statistics average value of audio samples in the first section. Finally, the DWT was performed on the second section, and then the digital watermark was embedded into the statistics average value of low frequency components. Experimental results show that the proposed scheme is robust against common signals processing such as MP3 compression, low-pass filtering, noise addition, and equalization etc, and robust against desynchronization attacks such as random cropping, amplitude variation, and jittering etc.

Keywords Audio watermarking, Quantization index modulation, Statistics average value, Synchronization code

1 引言

数字水印(Digital Watermarking)作为传统加密方法的有效补充手段,是一种可以在开放的网络环境下保护版权和认证来源及完整性的新技术。依据应用范围,通常可以把数字水印技术划分为图像水印技术、视频水印技术和音频水印技术等^[1]。所谓数字音频水印,就是将具有特定意义的标记(水印),利用数据嵌入的方法隐藏在数字音频作品中,用以证明创作者对其作品的所有权,并作为鉴定、起诉非法侵权的依据,同时通过对水印的检测和分析保证数字信息的完整可靠性,从而成为知识产权保护和数字多媒体防伪的有效手段。近年来,数字音频水印技术研究取得了很大进展,陆续提出了诸如空间域、变换域、压缩域等多种音频水印嵌入方案^[2]。其中,基于量化调制的数字音频水印以其原理简单、操纵灵活等

特点,已引起人们高度重视^[3,4],该类数字音频水印嵌入手段,并非直接将数字水印信号简单叠加在原始音频载体上,而是根据不同水印信息用不同的量化器去量化原始音频信号。同时,根据待检测音频数据与不同量化结果的距离,来恢复和提取数字水印信息。

Ronghui 等^[5]提出了一种量化小波系数的半易损性水印算法,通过设置不同的量化步长来控制算法的鲁棒性;王秋生等^[6]提出了一种基于量化的小波域数字音频脆弱水印算法,通过等概率随机量化音频信号不同子带的小波系数嵌入视觉可辨别的二值水印图像,算法对攻击具有很强的敏感性。Miyazaki 等^[7]分析了利用可控量化方法隐藏数字水印的过程,并利用神经网络技术改进了水印提取方法;文献^[8]以量化调制理论为基础,提出了一种在提升小波域的同时嵌入鲁棒水印和易损水印的音频水印算法。Xu 等^[9]采用遥感图像

到稿日期:2008-05-23 本文得到国家自然科学基金(60773031,60873222),辽宁省教育厅科技研究项目(2008351),信息安全国家重点实验室(中国科学院软件研究所)开放基金(03-06),计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学)开放基金(A200702),大连市科技基金(2006J23JH020),“图像处理与图像通信”江苏省重点实验室(南京邮电大学)开放基金(ZK205014)和江苏省计算机信息处理技术重点实验室(苏州大学)开放课题基金(KJS0602),近代声学教育部重点实验室(南京大学)开放课题基金(0802)资助。

马天笑(1984—),女,研究生,主要研究领域为数字水印;王向阳(1965—),男,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为信息隐藏与数字水印、多媒体信息处理技术,E-mail: wxy37@126.com。

作为数字水印,其首先对数字水印进行误差扩散半色调处理,然后利用量化调制方法将处理后水印信息嵌入到小波域低频子带内。Xiang等^[10]综述了基于量化调制策略的数字水印研究现状,讨论了AD/DA等各种攻击对量化调制水印嵌入方法的影响。尽管基于量化调制的音频水印已得到广泛应用,但现有方法仍在不同程度上存在如下问题:(1)仅量化单个音频采样值(或变换系数),导致水印对部分常规信号处理(如重新采样等)较敏感;(2)抵抗随机剪切、抖动等去同步攻击能力较差。

针对上述问题,本文结合音频统计均值稳定特性及同步码技术,提出了一种新的数字音频水印嵌入算法,该算法选取稳健的16位巴克码作为同步标记,通过量化音频样本统计均值嵌入同步码,同时结合听觉掩蔽特性量化低频小波系数平均值嵌入数字水印。

2 基本原理与同步码

2.1 基本原理

本文算法的主要工作步骤为:(1)对原始音频信号进行分段处理,并将每个音频数据段划分成前后两部分以进行信息嵌入(其中,前部分用于时间域嵌入同步码,后部分用于DWT域嵌入数字水印);(2)利用音频数据段前部分音频样本统计特性,在时间域内将同步码信息嵌入到音频样本的统计均值上;(3)将音频数据段后部分划分成音频数据节,并对音频数据节实施DWT,同时将水印信息位嵌入到低频小波系数的平均值内。

2.2 同步码

音频水印的同步具有重要意义。进行实时水印检测时,检测器必须通过准确地检测同步信息来确定水印嵌入的起始位置。而同步码在同步音频水印中的作用至关重要,同步码能否准确定位决定了检测器是否有效,因此同步码的稳健性也就成为了水印检测系统的关键。

一般说来,选取同步码时应该尽量考虑有效避免假同步现象。而影响假同步的主要因素包括:①帧同步码码型;②帧同步码码长;③信息码中“0”和“1”出现的概率等。其中,帧同步码码长的选择非常重要,选择不当将影响帧同步系统的性能。帧同步码码长越短,在宿主音频中产生假帧同步的概率就越大。

本文选用自相关性能良好、更为稳健的16位巴克码作为同步标记。巴克码是一种有限长的非周期序列。其定义为:一个 n 位长的码组 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$,其中, x_i 的取值为+1或-1,若它的局部相关函数满足

$$R(j) = \sum_{i=1}^{n-j} x_i x_{i+j} = \begin{cases} n, & j=0 \\ 0, +1, -1, & 0 < j < n \\ 0, & j \geq n \end{cases}$$

则称这种码组为巴克码,其中 j 表示错开的位数。

3 数字水印的嵌入

本文所采用的数字水印嵌入策略为:在空间域内嵌入同步信号,在DWT域内嵌入水印信息。假设原始数字音频信号为 $X = \{x(i), 0 \leq i < \text{Length}\}$ 。其中, Length 为音频数据的个数, $x(i) \in \{0, 1, 2, \dots, (2^p - 1)\}$ 是第 i 个音频数据的幅值, p 为表示每个数据所使用的比特数。

假设二值水印图像为 $W = \{w(i, j), 0 \leq i < M, 0 \leq j < N\}$ 。其中, $w(i, j) \in \{0, 1\}$ 代表二值水印图像的第 i 行、第 j 列像素值。

假设同步码为 $F = \{f(i), 0 \leq i < L_{syn}\}$,其中, $f(i) \in \{0, 1\}$, L_{syn} 为同步码的长度。则基于均值量化的数字音频水印嵌入过程(关键步骤)可描述如下。

3.1 水印图像预处理

为了消除二值水印图像的像素空间相关性,提高数字水印的鲁棒性,确保数字音频某一部分受到破坏后仍能全部或部分地恢复水印,宜首先对二值水印图像进行置乱加密。为此,本文首先引入Arnold变换,将二值水印图像 W 置乱加密为安全水印矩阵 W_1 ,其中

$$W_1 = \{w_1(i, j), 0 \leq i < M, 0 \leq j < N\} \quad (1)$$

为了便于将二维水印图像嵌入到一维音频信号中,再对其进行降维处理,即将二维水印图像转换为二维二进制水印序列

$$W_2 = \{w_2(k) = w_1(i, j), 0 \leq i < M, 0 \leq j < N, k = i \times N + j, w_2(k) \in \{0, 1\}\} \quad (2)$$

为了提高算法抵抗随机剪切、抖动等去同步攻击能力,使得数字音频部分数据丢失后仍能保证水印检测的有效可靠,本文算法首先对原始数字音频信号进行分段处理,然后再将每个音频数据段分割成长度为 L_1 和 L_2 的两部分并分别嵌入同步码与水印信息。其中,第 i 个音频数据段可以表示为

$$X(i) = \{x(iL+k), 0 \leq k < L\} \quad (0 \leq i < \lfloor \frac{\text{Length}}{L} \rfloor) \quad (3)$$

这里, $L = L_1 + L_2$, $L_1 = L_{syn} \times n$, n 为常数(本文选取为5)。

设某个音频数据段已被划分成长度为 L_1 和 L_2 的两部分 X_1, X_2 ,则同步码与数字水印信息的嵌入过程如下。

3.2 同步码嵌入

由时间域局部音频样本统计特性知:相邻音频样本间具有高度相关性,少数音频样本所发生的畸变不会引起音频样本统计均值的大变化。为此,本文采用修改多个音频样本值(n 个音频样本值)的方法,将同步信息嵌入到音频样本的统计均值中,以取得不可感知性与鲁棒性的良好平衡。具体步骤为:

(1)将 X_1 按同步码长度 L_{syn} 分成 L_{syn} 段,每一段 $PX_1(m)$ 含有 n 个音频样本,即

$$PX_1(m) = \{p_{x_1}(m)(i) = x_1(i+m \times n), 0 \leq i < n, 0 \leq m < L_{syn}\} \quad (4)$$

(2)计算 $PX_1(m)$ 的平均值,即

$$\overline{PX_1(m)} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{x_1}^0(m)(i), (0 \leq m < L_{syn}) \quad (5)$$

(3)采用量化方法嵌入同步码,即对每一段 $PX_1(m)$,修改其均值 $\overline{PX_1(m)}$,以嵌入一位同步码。修改策略为:

$$p_{x_1}'(m)(i) = p_{x_1}(m)(i) + (\overline{PX_1'(m)} - \overline{PX_1(m)}) \quad (6)$$

其中, $PX_1(m) = \{p_{x_1}(m)(i), 0 \leq i < n\}$ 为修改前音频样本值, $PX_1' = \{p_{x_1}'(m)(i), 0 \leq i < n\}$ 为修改后的音频样本值,且有

$$\overline{PX_1'(m)} = \begin{cases} IQ(\overline{PX_1(m)}) \times S_1 + S_1/2, & \text{如果 } Q(\overline{PX_1(m)}) = f(m) \\ IQ(\overline{PX_1'(m)}) \times S_1 - S_1/2, & \text{如果 } Q(\overline{PX_1(m)}) \neq f(m) \end{cases} \quad (7)$$

$$IQ(\overline{PX_1(m)}) = \lfloor \overline{PX_1(m)} / S_1 \rfloor, Q(\overline{PX_1(m)}) \\ = \text{mod}(\overline{IQ(PX_1(m))}, 2) \quad (8)$$

其中, mod 为取模运算, S_1 为量化步长。

3.3 水印信号的嵌入

(1) 将音频数据段后部分 X_2 划分成长度为 $L_2 \times R / M \times N$ 的音频数据节 $X_2(k) (k=0, 1, \dots, M \times N - 1/R)$ 。这里, 假设每个音频数据节内嵌入 R 位水印信息。

(2) 对音频数据节 $X_2(k)$ 实施 DWT。对每个音频数据节 $X_2(k)$ 进行 H 级小波变换, 并得到小波系数 $X_2(k)^H, D_2^0(k)^H, D_2^1(k)^H, \dots, D_2^{H-1}(k)^H$ 。其中, $X_2(k)^H$ 为音频数据节 $X_2(k)$ 小波变换的第 H 级近似分量, $D_2^0(k)^H, D_2^1(k)^H, \dots, D_2^{H-1}(k)^H$ 分别为音频数据节 $X_2(k)$ 小波变换的第 $1 \sim H$ 级的细节分量。其中

$$X_2(k)^H = \{x_2(k)(t)^H, k=0, 1, \dots, M \times N - 1/R; \\ 0 \leq t < L_2 \times R / M \times N \times 2^H\} \quad (9)$$

(3) 将近似分量 $X_2(k)^H$ 内小波系数进行随机置乱(仍用 $X_2(k)^H$ 表示置乱后小波近似分量), 并做区块分组处理(即将 $X_2(k)^H$ 划分为 R 个区块), 同时计算出每个区块的小波系数平均值

$$\alpha(k)(j) (k=0, 1, \dots, M \times N - 1/R; j=0, 1, \dots, R)$$

(4) 计算出每个区块的索引数 $I(k)(j)$ 及相应的 $A(k)(j)$ 值

$$I(k)(j) = \left\lfloor \frac{\alpha(k)(j)}{\Delta} \right\rfloor \text{mod } 2, (k=0, 1, \dots, M \times N - 1/R; \\ j=0, 1, \dots, R; \Delta \text{ 为量化步长})$$

$$A(k)(j) = \frac{\alpha(k)(j)}{\Delta}$$

(5) 水印的嵌入。将数字水印 W_2 嵌入到音频数据节 $X_2(k)$ 的小波域近似分量中, 嵌入方法为

$$x_2'(k)(j)(t)^H = x_2(k)(j)(t)^H + \delta(k)(j) \quad (10)$$

($k=0, 1, \dots, M \times N - 1/R; j=0, 1, \dots, R; 0 \leq t < L_2 / M \times N \times 2^H$)

这里, $x_2'(k)(j)(t)^H$ 为修改后低频小波系数, $x_2(k)(j)(t)^H$ 为原始低频小波系数, $\delta(k)(j)$ 为修正值, 且满足

$$\text{if } w_2(Rk+j) = I(k)(j) \text{ 则}$$

$$\delta(k)(j) = [0.5 - (A(k)(j) - \lfloor A(k)(j) \rfloor)] \times \Delta$$

$$\text{if } w_2(Rk+j) \neq I(k)(j) \text{ 则}$$

$$\delta(k)(j) = \begin{cases} [1.5 - (A(k)(j) - \lfloor A(k)(j) \rfloor)] \times \Delta, & \text{如果 } (A(k)(j) - \lfloor A(k)(j) \rfloor) \geq 0.5 \\ [(\lceil A(k)(j) \rceil - A(k)(j)) - 1.5] \times \Delta, & \text{如果 } (A(k)(j) - \lfloor A(k)(j) \rfloor) < 0.5 \end{cases}$$

(6) 对修改后近似分量 $X_2'(k)^H$ 内小波系数进行逆随机置乱。

(7) 逆 DWT。以 $X_2'(k)^H$ 代替 $X_2(k)^H$ 并进行 H 级逆 DWT, 得到含有水印的音频数据节 $X_2'(k)$ 。

3.4 循环嵌入

为抵抗剪切、抖动等去同步攻击, 增加水印的鲁棒性, 重复步骤 3.2 和 3.3, 对其它音频数据段进行同步码与水印信息的嵌入(即对同步码及水印信息采用循环嵌入的策略)。

4 数字水印的检测

本文讨论的数字音频水印算法属于盲水印算法, 即检测

数字水印信号时不需要原始音频载体的参与。数字水印的检测过程如下:

(1) 采用通讯中的帧同步码逐位比较方式, 查找同步码, 定位检测器的起始位置 B。

(2) 将起始位置 B 后的含水印音频数据区划分成音频数据节 $X^*(k)$, 并对其进行 H 级 DWT, 得到小波系数

$$X^*(k)^H, D^*(k)^H, D^*(k)^{H-1}, \dots, D^*(k)^1$$

(3) 对近似分量 $X^*(k)^H$ 内小波系数进行随机置乱, 并做相应的区块分组处理, 同时计算出每个区块的小波系数平均值

$$\alpha^*(k)(j) (k=0, 1, \dots, M \times N - 1/R; j=0, 1, \dots, R)$$

(4) 计算出每个区块的索引数 $I^*(k)(j)$ 。

(5) 提取水印信息。提取公式为

$$w_2^*(kR+j) = \begin{cases} 0 & \text{如果 } I^*(k)(j) = 0 \\ 1 & \text{如果 } I^*(k)(j) = 1 \end{cases}$$

$$(k=0, 1, \dots, M \times N - 1/R; j=0, 1, \dots, R)$$

(6) 对所提取出一维序列 W_2^* 进行升维处理, 得到水印图像的安全水印矩阵 W_1^* 。

(7) 对 W_1^* 进行逆置乱解密, 即得到所提取的二值图像水印 W^*

$$W^* = \{w^*(i, j), 0 \leq i < M, 0 \leq j < N\}$$

5 仿真实验结果

为了验证本文数字音频水印算法的高效性, 以下分别给出了检测性能测试、抗攻击能力测试的实验结果。实验中, 所选用的原始音频载体为采样频率为 44.1kHz, 分辨率为 16 比特, 长度分别为 9.75 秒的单声道数字音频信号。数字水印采用了 64×64 的二值图像, 并选用了码长为 16 位的巴克码 1111100110101110 作为同步信号。小波变换采用了常见的 Daubechies-1 小波基。小波变换级数选取为 $H=3$, 量化步长 $S_1=0.2, \Delta=0.05, R=4$ 。由于采用的水印在感觉上是可视的, 因此提取的水印信息很容易辨别。

为了检测算法的鲁棒性能, 仿真实验对本文算法的含水印音频信号进行了一系列攻击, 包括两大类: (1) 不显著影响音频信号同步结构的常规信号处理, 如重新量化、重新采样、叠加噪声、低通滤波、添加回声、均衡化、MP3 压缩等; (2) 损坏音频信号同步结构的去同步攻击, 包括如随机剪切、幅度缩放、变调、时间延展、抖动等。

表 1 和表 2 给出了本文数字水印方案的抗攻击能力测试结果。

表 1 数字水印对常规信号处理的抵抗能力

	未攻击	重采样			高 低通滤波		
		重量化	22050HZ	11025HZ	8000HZ	斯 噪 声	4KHZ
本文 BER	0	0	0.072	0.1335	0.145	0	0
算法 PSNR	41.3118	40.4582	30.1061	27.3344	27.0952	40.0481	39.4552

	添加回声	均衡化					
		MP3- 256k	MP3- 128k	MP3- 112k	MP3- 64k	MP3- 56k	
本文 BER	0.001	0	0	0	0	0	
算法 PSNR	39.9531	40.6347	41.3397	41.4095	41.4233	41.1631	41.1277

表 2 数字水印对去同步攻击的抵抗能力

	剪切前 1秒	剪切中 间 1秒	前面加		升调 降调		
			幅度扩 1秒	幅度缩 大 20%	小 50%	1度	1度
本文 BER	0	0	0	0	0	0	
算法 PSNR	39.9531	40.6347	41.3397	41.4095	41.4233	41.1631	41.1277

本文 BER	0.0012	0	0	0.502	0.0549	0.4792	0.4631
算法 PSNR	41.6832	28.9861	26.8374	22.9996	37.7097	26.2881	26.3525

	TSM (+1%)	TSM (-1%)	TSM (-2%)	TSM (-3%)	TSM (-4%)	抖动攻击 (1/100000)	抖动攻击 (1/50000)
本文 BER	0.4395	0.4543	0.4463	0.4597	0.4348	0.0007	0.0234
算法 PSNR	26.7864	27.0071	27.1599	26.7324	26.6203	35.3953	31.3474

结束语 针对现有量化调制音频水印所存在的问题,本文结合音频统计均值稳定特性及同步码技术,提出了一种新的数字音频水印嵌入算法,该算法选取稳健的16位巴克码作为同步标记,通过量化音频样本统计均值嵌入同步码,同时结合听觉掩蔽特性量化低频小波系数平均值嵌入数字水印。仿真实验表明,该算法不仅具有较好的不可感知性,而且对常规信号处理、部分去同步攻击均具有较好的鲁棒性。

参考文献

[1] Cox I J, Matthew L M, Jeffrey A B, et al. Digital watermarking and steganography. Second Edition. Burlington, MA, Morgan Kaufmann Publishers (Elsevier), 2007

[2] 李伟,袁一群,李晓强,等. 数字音频水印技术综述[J]. 通信学报, 2005, 26(2): 100-111

[3] Barni M, Cox I J, Kalker T. Digital watermarking// Proceedings of 4th International Workshop on Digital Watermarking

(IWDW). Siena, Italy, 2005: 15-19

[4] 孙圣和,陆哲明,牛夏牧. 数字水印技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004

[5] Tu Ronghui, Zhao Jiying. A novel semi-fragile audio watermarking scheme// IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and their Applications. Ottawa, Ontario, Canada, September 2003: 89-94

[6] 王秋生,孙圣和,郑为民. 数字音频信号的脆弱水印嵌入算法[J]. 计算机学报, 2002, 25(5): 520-525

[7] Miyazaki A, Okamoto A. Analysis of watermarking systems in the frequency domain and its application to design of robust watermarking systems// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Vol. 2, Oct. 2001: 506-509

[8] 王让定,徐达文. 基于提升小波的多重数字音频水印[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1820-1825

[9] Xu Zhao, Wang Ke, Qiao Xiao-hua. Digital audio watermarking algorithm based on quantizing coefficients// 2006 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia. 2006: 41-46

[10] Xiang Shijun, Huang Jiwu. Analysis of D/A and A/D Conversions in quantization-based audio Watermarking. International Journal of Network Security, 2006, 3(3): 230-238

(上接第 253 页)

一站台,必须在该站台等待。

函数解析:首先根据站台上的托盘信息查找具体 RGV 小车编号,然后在 FrontRGV, BackRGV 输入库所里查找该 RGV 小车,并将其输入库所,相同路径或环路、环路链的路径存放在数组里。若数组为空,则表明没有与该 RGV 小车相同或冲突的路径,返回值 0;否则,对于数组里的每一条记录做如下处理:查找小车当前所在站台,判断当前站台是否是输入库所。如果否,则当前小车可以进入;如果是,对于该输入库所的冲突或环路(环路链)路径,查找其路径站台上是否有托肯。如果有,则小车不可进入,返回 1;如果没有,则继续查询下一条记录,直至记录里的所有值都没有,返回值 0。

结束语 本文应用双重着色赋时 Petri 网构建了 RGVs 系统的动态模型。为避免 RGVs 发生路径死锁,探讨了其临界状态,即将发生环路(环路链)死锁的状况,实现了 RGV 小车环路(环路链)的识别,并提出了可靠的无环路死锁的控制策略。最后通过实验验证了其有效性。本文研究的是 AVS/RS 中同一层 RGVs 系统环路死锁的问题,对于不同层、多层 RGV 路径以及升降机路径所形成的混杂环路死锁必将更加复杂,这是今后需要继续完善的工作。

参考文献

[1] Zizi D V. Whats New in the Equipment Field, 2000 International Material Handling Research Colloquium. Material Handling In-

stitutue, York, Pennsylvania, 2000

[2] Malmborg C J. Conceptualizing tools for autonomous vehicle to-rage and retrieval systems [J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(8): 1807-1822

[3] 田国会,刘长友,徐心和. 自动化仓库输送过程调度问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 1998, 4(2): 51-54

[4] 常发亮,刘长友. 自动化立体仓库输送系统调度的优化仿真及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(5): 14-19

[5] Dotoli M, Fanti M P. Modeling of an AS/RS Serviced by Rail-Guided Vehicles with Colored Petri Nets; a Control Perspective [C]// Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Hammamet, Tunisia, 2002: 162-167

[6] 郝扬,古天龙. 基于着色 Petri 网的 Internet 电话端系统业务冲突检测[J]. 计算机科学, 2007, 34(12): 41-45

[7] He S J, Cheng F, Luo J. Modeling and Implementing of an Automated Warehouse via Colored Timed Petri Nets-a Behavior Perspective [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Automation. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007: 2823-2828

[8] 李鹏,李勋,顾庆,等. TCPN 的组合可调度分析[J]. 计算机科学, 2008, 5(1): 290-293

[9] Wu N Q, Zhou M C. Deadlock modeling and control of automated guided vehicle systems [J]. IEEE ASME Trans. Mechatronics, 2004, 9(1): 50-57