

基于混和 Petri 网的公路仿真系统模型

杨宏志, 许金良

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:公路仿真系统是连续变量动态系统和离散事件动态系统相互作用的混杂系统。通过分析公路仿真系统的混杂特征,在基于 Multi-Agent 的仿真框架下,提出利用混和 Petri 网描述系统中离散事件和连续变量相互作用的观点。在传统混和 Petri 网的基础上,建立了考虑时变特征的推广混和 Petri 网模型,并建立了基于推广混和 Petri 网的公路仿真模型体系。将该模型体系应用于驾驶员速度控制过程。应用结果表明,仿真效果良好。

关键词:道路工程;公路;仿真;混和 Petri 网

中图分类号:U412.1 **文献标识码:**A

Model of highway simulation system based on hybrid Petri net

YANG Hong-zhi, XU Jin-liang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The highway simulation system is a hybrid system that is consisted of continuous variables dynamic system and disperse events dynamic system. The hybrid features of highway simulation system is analyzed with Multi-Agent simulation framework. It is found that the disperse events and continuous variables can be described by hybrid Petri net. Based on the classic hybrid Petri net, a model of generalized hybrid Petri net is developed, which takes the time-change characters into account. The highway simulation system is set up on the basis of the model of generalized hybrid Petri net. This simulation system is applied to the description of driver's operation on vehicle's speed control. The application shows that the simulation results are very good. 3 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; highway; simulation; hybrid Petri net

0 引 言

公路工程投资巨大,不可能通过制造“样品”的方式来验证设计方案的合理性;设计方案受多种因素的影响,难以用数学模型来评价;专家评议由于缺乏足够的信息,只能依靠经验进行判断,很难做出客观全面的评价。将计算机仿真技术引入公路设计评

价中,研究和建立公路仿真系统,以公路为主体,对公路设计方案反复进行仿真实验,科学地分析和评价仿真实验结果,可以达到科学评价公路设计方案的目的。

公路仿真系统是连续变量动态系统(CVDS)和离散事件动态系统(DEDS)相互作用的混杂系统(HS),具有复杂性、混杂性、交互性、实时性和模块

性等特点。由于公路 HS 中有两种不同类型的变量和两种不同类型的动态机制,原有的 DEDS 和 CVDS 方法和工具都不能很好地直接应用于 HS。因此,在公路仿真系统中,如何描述系统中离散事件和连续变量的相互作用,刻画公路混杂系统行为本质,从而协调仿真过程中的基于时间驱动(DEDs)和事件驱动(CVDS)的各 Agent 之间的消息传递,是仿真系统实现的关键之一^[1-4]。

本文在分析公路仿真系统混杂特征、时变特征的基础上,基于 Multi-Agent 的仿真框架,提出利用时变特征的推广混和 Petri 网模型来描述仿真过程中 CVDS 和 DEDS 的相互作用,并对驾驶员速度控制模型进行了描述^[5-6]。

1 公路仿真系统特点及仿真框架

行驶在公路上的汽车与驾驶员及周围环境共同构成了一个时变的行驶状态。驾驶员根据公路环境状态,通过速度和方向控制汽车的行驶状态,而汽车的行驶状态又改变汽车所处的公路与环境。反映这种状态的仿真系统,具有时变性、混杂性的特征。

公路仿真系统的特点决定了传统面向过程和面向对象的软件开发方法难以处理时变状态下子系统间交互、协同、自适应、自反馈等特征,同时也难以解决公路仿真系统混杂性的问题。因此在仿真系统研究中,提出了基于 Multi-Agent 的仿真框架。

1.1 公路仿真系统混杂特点分析

1.1.1 人-车-路与环境时变特征模型

公路仿真过程中的时变特点可以用人-车-路与环境时变特征模型描述

$$\begin{cases} \Phi(t_i) = \{\alpha^i, r^i, w^i\} \\ \alpha^i = \{\alpha_v^i, \alpha_{av}^i, \alpha_{ah}^i, \alpha_\beta^i, \alpha_o^i, \alpha_p^i\} \\ r^i = \{r_H^i, r_V^i, r_C^i\} \\ w^i = \{w_E^i, w_C^i\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Phi(t_i)$ 为人-车-路与环境时变特征模型; α^i 为 t_i 时刻汽车的状态; $\alpha_v^i, \alpha_{av}^i, \alpha_{ah}^i, \alpha_\beta^i, \alpha_o^i, \alpha_p^i$ 分别为 t_i 时刻的汽车速度、纵向加速度、横向加速度、前轮转角、汽车其他状态以及位置描述; r^i 为 t_i 时刻公路的几何特征; r_H^i, r_V^i, r_C^i 分别为 t_i 时刻的公路平、纵、横几何特征; w^i 为 t_i 时刻周围环境特征; w_E^i 为 t_i 时刻的环境特征; w_C 为天气特征。

用 $Q_{i+1}(\Phi(t_{i+1}))$ 描述在 t_{i+1} 时刻由环境信息确定的行驶状态,则

$$Q_{i+1}(\Phi(t_{i+1})) = p_i(Q_i(\Phi(t_i))) \quad (2)$$

其中, p_i 为与公路、环境不相关的只对汽车发生作

用的操作算子,即驾驶员对汽车的操作。式(2)也说明了过程期望的行驶状态 $Q_{i+1}(\Phi(t_{i+1}))$ 可以通过对过程特征参量 α_i 进行调整,达到行驶目标。

1.1.2 公路混杂系统的仿真特点

由上述时变特征模型可以看出,公路仿真系统是公路与环境特征的离散状态、驾驶员操纵的离散行为和汽车运行的连续状态相结合的混杂系统。其混杂性表现在:

(1)结构和算法的复杂性。公路混杂系统中人-车-路与环境不同动态的耦合、子系统之间的耦合又导致 HS 的结构复杂性。公路混杂系统涉及连续变量和离散变量,变量的动态性导致系统行为的复杂性。公路混杂系统仿真中,仿真时钟推进过程中的大量控制任务需要采用复杂的控制策略,而且运行中要面临大量的逻辑、同步和数值计算问题,从而带来仿真控制算法的复杂性。

(2)驱动机制的混杂性。公路混杂系统具有离散事件动态系统和连续变量动态系统的结构混杂性和行为混杂性,系统的演化由时间(汽车运行)和事件(驾驶员操纵、公路与环境状态事件)两类不同性质的机制驱动,这种内在的多重混杂性是混杂系统的最本质特征。

(3)交互性和实时性。公路混杂系统仿真中的人-车-路与环境不是孤立的,而是相互影响、相互联系的,子系统之间存在复杂的交互性,体现在交互过程混杂有大量逻辑符号与数值计算相关的问题。公路混杂系统中的事件是可度量连续事件,系统的动态行为不仅与离散事件的顺序结构有关,而且与事件之间的时间结构紧密相关。

(4)模块性。混杂系统的混杂性具有多模块子系统集成特点。这种结构上的特征使系统具有很强的层次性和分布式特征。这就要求在系统设计和实现过程中,既要从整体进行考虑,又要注意各模块的自身特性。另一方面,这种模块性又为系统的分布式实时和控制创造了条件。

1.2 基于 Multi-Agent 的仿真框架

根据人-车-路与环境仿真系统的时变动态特点,基于 Multi-Agent 的人-车-路与环境仿真系统框架如图 1 所示。

图中,将人-车-路与环境仿真运行系统划分为 6 个相互作用 Agent,根据其承担的任务和对任务求解机制的不同,可将其分为反应 Agent、合作 Agent、界面 Agent 3 类。驾驶员 Agent、汽车 Agent 和中心协调 Agent 属于合作 Agent,即具有内部状

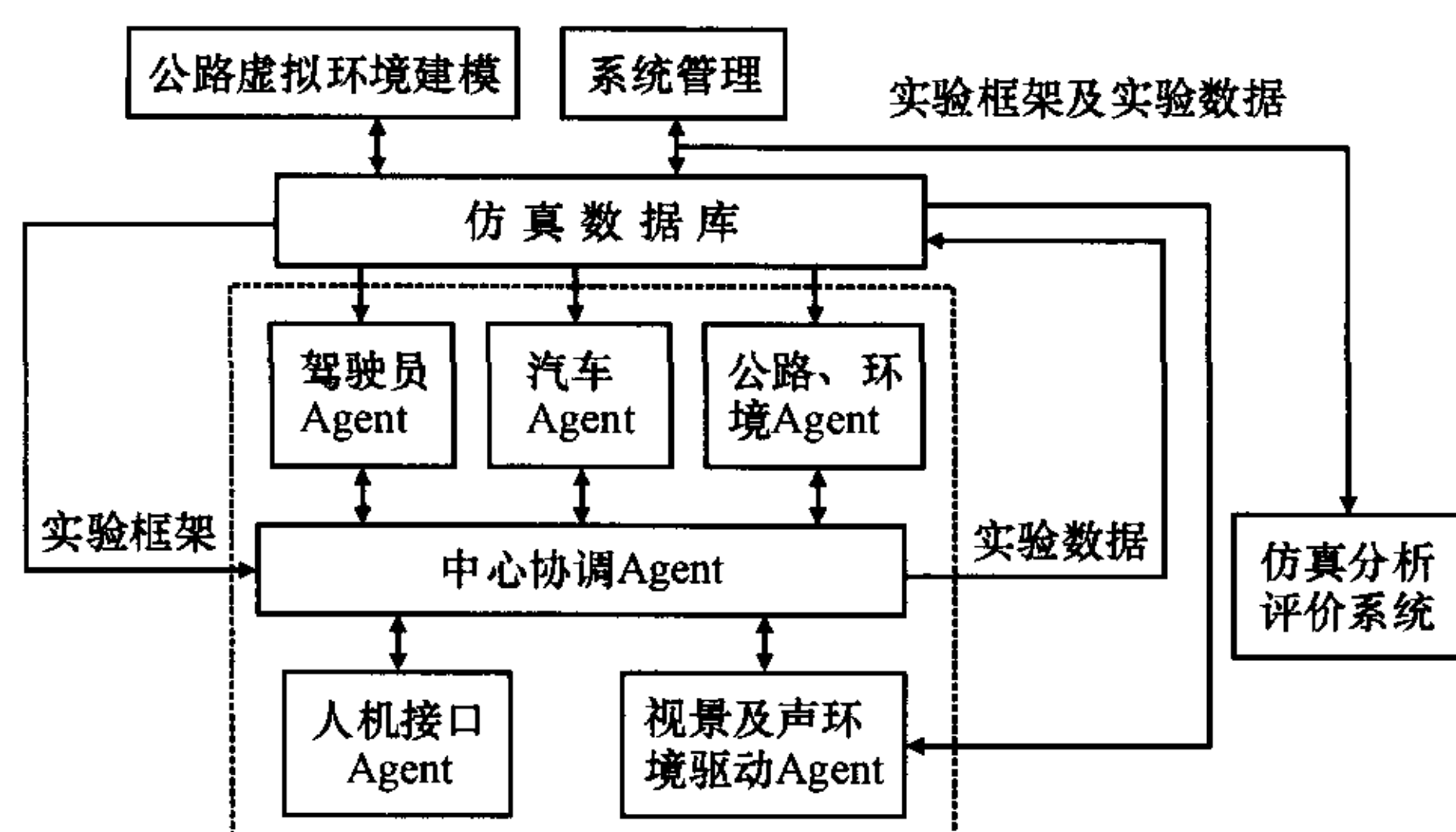


图1 基于 Multi-Agent 的人-车-路与环境仿真框架

态的主动 Agent,具有知识表示、问题求解表示等;公路、环境 Agent 和视景及声音驱动 Agent 属于反应 Agent,只是简单地对外部刺激产生反应,类似于客户/服务器体系结构,Agent 既是客户,又是服务器,根据程序安排,做出回答或发出请求;人机接口 Agent 属于界面 Agent,能够与用户交互,进行显示和控制。

2 推广混和同步 Petri 网模型

2.1 混和 Petri 网模型

混合 Petri 网是在传统离散 Petri 网的基础上发展起来的,其特点是将位置和变迁区分为连续和离散两种类型,以表征连续变量过程和离散事件过程。在混合 Petri 网中,离散事件和连续变量被置于单一的框架内来考虑,易于分析离散变量和连续变量之间的交互作用。因此,混合 Petri 网已经成为对混杂系统进行建模和分析的一个基本工具。本节主要是在传统混合 Petri 网的基础上,结合人-车-路与环境时变特征模型提出一种新的推广 Petri 网,并对其进行讨论^[7-8]。

定义1 混合 Petri(HPN)网

$$\text{HPN} = \{P, T, \text{Pre}, \text{Post}, h, \theta, M(0)\}$$

(1) P 是位置的非空有限集合, T 为变迁的非空有限集合,两者满足于关系 $P \cap T = \emptyset$;

(2) $h: P \cup T \rightarrow \{C, D\}$,称之为混合函数,用于指示库所或变迁是离散的(为 D)或连续的(为 C);

(3) Pre, Post 分别称之为输入关联函数和输出关联函数,具有如下关系,其中, R^+ 表示非负实数集合, N 表示非负整数集合:

$$\text{Pre}: P \times T \rightarrow R^+, \text{ 如果 } h(P_i) = C$$

$$\text{Pre}: P \times T \rightarrow N, \text{ 如果 } h(P_i) = D$$

$$\text{Post}: P \times T \rightarrow R^+, \text{ 如果 } h(P_i) = C$$

$$\text{Post}: P \times T \rightarrow N, \text{ 如果 } h(P_i) = D$$

(4) $\theta: T \rightarrow R^+$,该函数为每个变迁 T_j 指定一个

非负实数 d_j ,对离散型变迁即 D 变迁, d_j 为延迟时间,对连续型变迁即 C 变迁, d_j 可表示其最大发射速率为 $V_j = 1/d_j$;

(5) $M(0)$ 为初始标识。

2.2 推广混和同步 Petri 网模型

由混和 Petri 网模型的定义可知,传统的混合 Petri 网并没有体现仿真过程中离散事件对连续系统的控制以及反映连续系统的动态特征,有鉴于此,本文提出推广混合同步 Petri 网模型对公路仿真系统进行描述。

2.2.1 推广混和同步 Petri 网模型的定义

推广混合同步 Petri 网模型为 10 元组,定义为

定义2 推广混合同步 Petri 网(GHSPN)

$$\text{GHSPN} = \{P, T, \text{Pre}, \text{Post}, h, \theta, M(0), E, \text{Sync}, Q, \varphi\}$$

(1) $P, T, \text{Pre}, \text{Post}, h, \theta, M(0)$ 的含义见定义1;

(2) E 为事件集,诸如满足某一特定条件、实现某一特定状态等均定义为事件,此外还可定义事件集上的运算;

(3) Sync 是 Petri 网的变迁集 T 到事件集 E 上的函数;

(4) Q 是定义在模型位置上的变量,表示为

$$Q = \{(V_{p_i}, X_{p_i}, C_{p_i}, Z_{p_i}, f_{p_i}), p_i \in P \wedge h(p_i) = C\}$$

① V_{p_i} 为位置 p_i 所对应的状态变量集合,把 V_{p_i} 中的状态变量按一定顺序排列组成状态向量 $\overrightarrow{X_{p_i}}$,以下把 $\overrightarrow{X_{p_i}}$ 和 V_{p_i} 视为意义相同;

② X_{p_i} 为状态变量的值域, $\forall X \subseteq X_{p_i}, X_{p_i}(X)$ 表示状态向量 \overrightarrow{X} (向量组)的值域。各集合 V_{p_i} 允许交叠,即同一状态变量可以定义在不同的活动位置上,也即允许 $p_i \neq p_j, p_i$ 和 $p_j \in P$ 且 $h(p_i), h(p_j) = C$,使 $V_{p_i} \cap V_{p_j} \neq \emptyset$,但要满足初态一致性和值域一致性条件;

③ C_{p_i} 为位置 p_i 所对应的控制变量的集合,把控制变量集 C_{p_i} 中的变量按一定次序排列,组成控制向量 $\overrightarrow{C_{p_i}}$,以下把 $\overrightarrow{C_{p_i}}$ 与 C_{p_i} 视为意义相同;

④ Z_{p_i} 为 C_{p_i} 中控制变量的定义域;

⑤ $f_{p_i}: X_{p_i} \times Z_{p_i} \times R^+ \rightarrow X_{p_i}$ 为位置 p_i 对应的状态向量的向量场。与 f_{p_i} 对应的状态向量 $\overrightarrow{X_{p_i}}$ 的演化模式为

$$\overrightarrow{X_{p_i}}(t) = f_{p_i}(\overrightarrow{X_{p_i}}(t), \overrightarrow{C_{p_i}}(t), t)。$$

(5) φ 为定义在变迁集 T 上 $t_i \in T$ 所对应的状态跳变函数。

2.2.2 推广混和同步 Petri 网的特点

(1) 以事件控制变迁的激发时刻,也就决定了连

续系统子模型的切换。推广混合同步 Petri 网是非自主 Petri 网,其最基本的特点是使能的变迁仅当与之联系的事件发生时才能激发。在 GHSPN 模型中,通过定义事件集 E 并利用 Sync 函数映射到变迁集上,从而决定了连续系统子模型的切换。不仅如此,GHSPN 还把一类引起连续系统子模型切换的控制量视为事件,从而有效解决了某些情况下可能发生的系统运行死循环的问题。

(2)推广混合同步 Petri 网的另一个显著的特点是突破了安全 Petri 网的限制,以往用 Petri 网对 HDS 进行建模时,总是有意无意地将其限制为安全 Petri 网。而本文的推广混合同步 Petri 网模型不仅允许资源位置的标记大于 1,也允许与连续子模型对应的过程位置大于 1,从而增强了建模能力。

(3)连续时间模型位置变量 Q 的引入,加强了推广混合同步 Petri 网描述处于时变状态下的控制系统的能力,对人-车-路与环境时变特征仿真模型描述具有其他混合 Petri 网无法比拟的优势。

2.2.3 推广混和同步 Petri 网的运行规则

推广混合同步 Petri 网的运行规则与混合 PN 及同步 PN 的激发规则类似,但要考虑系统连续状态的演变。推广混合同步 Petri 网中含有标记的位置称为当前的活动位置,当整个网中只有一个连续活动位置 p_i 时,系统连续状态 X_{p_i} 的演变模式为 $\vec{X}_{p_i}(t) = f_{p_i}(\vec{X}_{p_i}(t), \vec{C}_{p_i}(t), t)$,其他状态则保持不变。当网中有多个连续活动位置 $p_i \in P (i = 1, 2, \dots)$,系统连续状态的演变满足迭加规则,即

$$\vec{X}_{p_i}(t) = \sum_{x_j \in V_{p_i}} f_{p_i}(\vec{X}_{p_i}(t), \vec{C}_{p_i}(t), t)$$

式中: X_j 为某个状态变量, $X_j \in V_{p_1} \cup V_{p_2} \cup \dots \cup V_{p_m}$; $f_{p_i,j}(\cdot)$ 为对应于变量 X_j 的分量。

在每个仿真步长内,依次扫描各个活动位置 p_i 对 $O(p_i)$ 中的变迁 t_j ,当 $M(p_i) \geq \text{Pre}(p_i, t_j)$ 时, t_j 处于使能状态;当与 t_j 相联系的事件 E_j 发生时,使能的 t_j 才真正激发。在 t_j 激发的同时,若存在跳变函数 φ_i ,则系统状态从 τ 时刻的 $X_{t_i}(\tau)$ 跳变至 τ^+ 时刻的 $\varphi_{t_j}(X_{t_i}(\tau^+), m_{t_j})$,其中 τ 为开始跳变时间。

3 模型的应用

3.1 基本假定

本文在考虑驾驶员模型时,假定汽车是按下面原则运动的:在当前时刻没有方向盘转角或踏板输入时,汽车将按当前纵向侧向车速、纵向侧向加速度和横摆角速度等初始状态行驶;在当前时刻所施加

的方向盘转角仅仅使汽车产生在汽车动坐标系下的横轴方向的侧向加速度和汽车自身转动的横摆角速度,而当前时刻施加的踏板输入也仅仅使汽车产生在汽车动坐标系下纵轴方向的纵向加速度。即汽车踏板输入只影响汽车在其动坐标系下的纵轴方向位移和速度,汽车方向盘转角仅对汽车在其动坐标系下横轴方向位移和汽车航向角的变化有影响。基于上述假定,限于篇幅,本文仅描述驾驶员速度控制 GHSPN 模型。

3.2 驾驶员速度控制模型

驾驶员对速度控制是多种因素影响的结果,包括汽车的速度、平面线形、纵断面线形、平纵横组合情况以及周围环境的特征。由于人-车-路与环境的时变特征,上述因素对驾驶员的影响表现出时变、同步和并发等特性。从逻辑层次描述这种并发、同步特性,对驾驶员速度控制模型的建立具有重要的理论价值。驾驶员速度控制模型如图 2 所示。

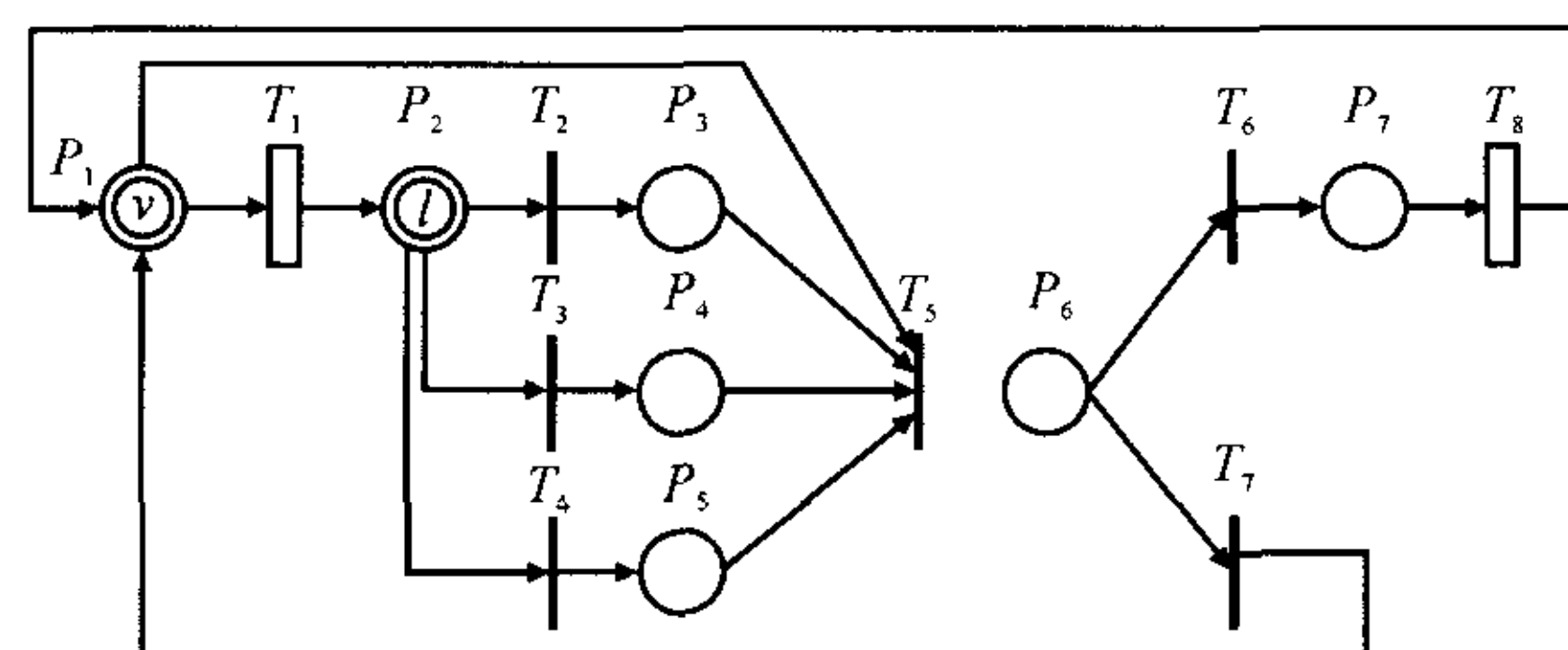


图2 驾驶员速度控制模型

(1) $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7\}$, P_1 为汽车以速度 v 行驶; P_2 为汽车所处的桩号; P_3 为平面线形状态; P_4 为纵断面线形状态; P_5 为周围环境状态; P_6 为驾驶员决策状态; P_7 为汽车加速状态。

(2) $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8\}$, T_1 为汽车位置变化; T_2 为平面线形变化; T_3 为纵断面线形变化; T_4 为周围环境变化; T_5 为驾驶员决策; T_6 为驾驶员决策加速; T_7 为驾驶员决策不变; T_8 为汽车以决策的加速度进行变速。

(3) Petri 网的初始标识为: $M_0 = \{v, l, 0, 0, 0, 0, 0\}$, 其中 v 和 l 分别表示汽车初始速度和所处的初始桩号。

(4) $E = \{E_1, E_2\}$ 为事件集, E_1 为平面线形变化事件; E_2 为纵断面线形变化事件。

(5) 定义 Sync 函数: $T_2 \rightarrow E_1, T_3 \rightarrow E_2$ 。

3.3 平面线形变迁 GHSPN 模型

图 2 中 $P_2-T_2-P_3$ 表示由于汽车行驶引起的平面线形的变化,可展开如图 3 所示。

(1) $P = \{P'_1, P'_2, P'_3, P'_4\}$, P'_1 为汽车所处桩号, P'_2 为汽车处于直线段; P'_3 为汽车处于缓和

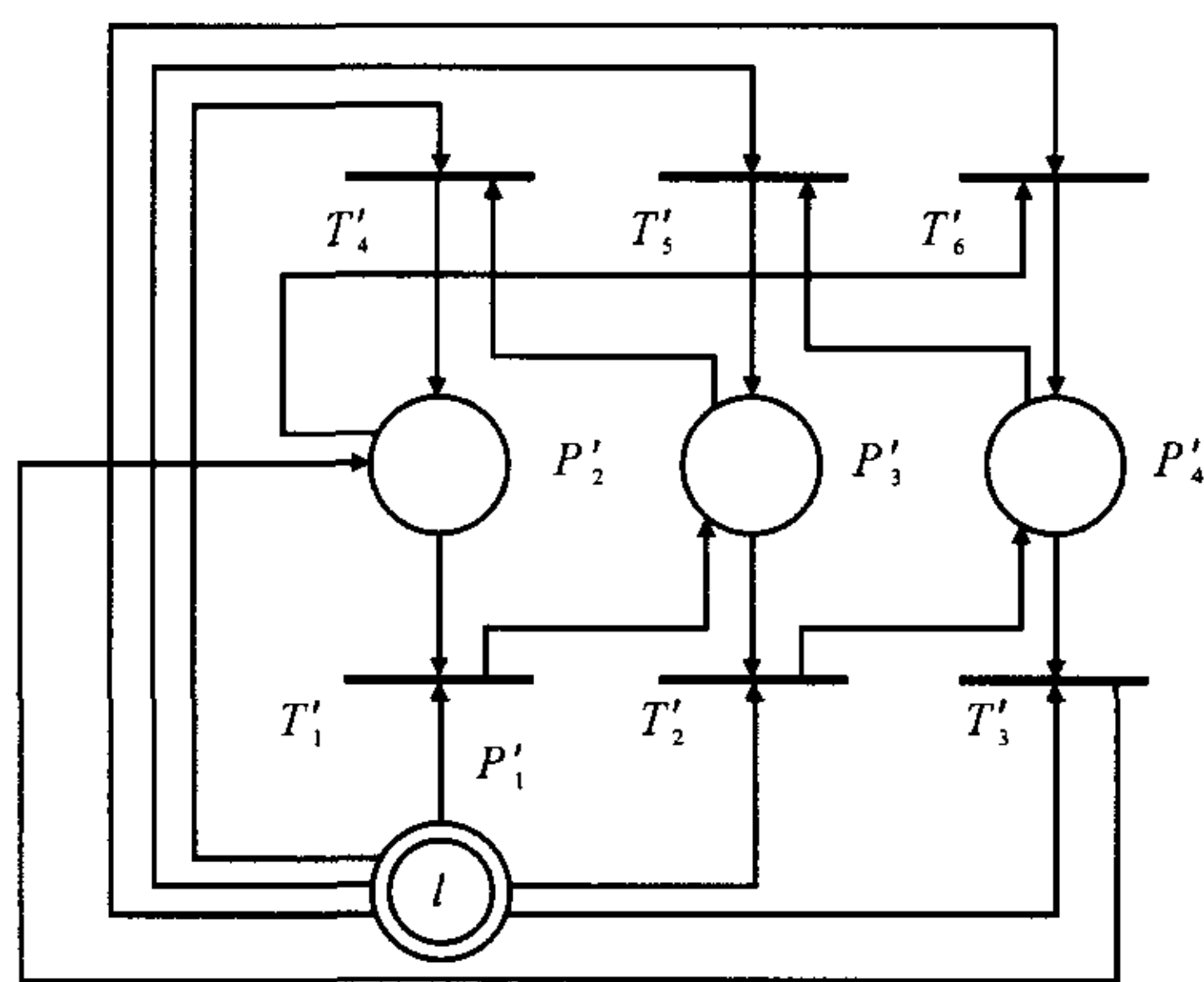


图3 平面线形状态变迁图

曲线段; P'_4 为汽车处于圆曲线段。

(2) $T = \{T'_1, T'_2, T'_3, T'_4, T'_5, T'_6\}$, T'_1 为平面线形由直线向缓和曲线变化; T'_2 为由缓和曲线向圆曲线变化; T'_3 为由圆曲线向直线变化; T'_4 为由缓和曲线向直线变化; T'_5 为由圆曲线向缓和曲线变化; T'_6 为由直线向圆曲线变化。

限于篇幅,对纵断面线形变迁模型,本文不再赘述。

4 结 语

本文分析了公路仿真系统的混杂仿真特点,在仿真系统框架的指导下,提出运用推广混和同步 Petri 网对公路仿真系统模型进行描述的思路,在传统混和 Petri 网的基础上,建立了符合公路仿真特点的推广混和同步 Petri 网模型,并建立了驾驶员速度控制模型,从而有效地解决了仿真过程中连续变量系统与离散事件系统的相互作用过程中存在的并发、异步和冲突等问题,为仿真模型的建立和仿真系统的实现奠定了理论基础,并有利于公路仿真系统的开发。

参考文献:

References:

- [1] 陈丽君,吴芳美. 城市道路交通仿真系统混合 Petri 网建模[J]. 同济大学学报:自然科学版,2002,30(12): 1478-1482.
CHEN Li-jun, WU Fang-mei. Modelling of urban traffic system simulation based on hybrid Petri net[J]. Journal of

Tongji University: Natural Science Edition, 2002, 30 (12): 1478-1482.

- [2] 杨少伟,石飞荣,慕 慧,等. 运行车速预测中的汽车换挡[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):34-37.
YANG Shao-wei, SHI Fei-rong, MU Hui, et al. Shift regulation of predicting vehicle speed[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 34-37.
- [3] 杨宏志,许金良,李建士. 基于计算机仿真的公路线形评价[J]. 中国公路学报,2005,18(1):14-17.
YANG Hong-zhi, XU Jin-liang, LI Jian-shi. Evaluation of highway route design based on computer simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 14-17.
- [4] 邹智军,杨东援. 城市道路交通仿真系统设计[J]. 交通运输工程学报,2001,1(3):86-89.
ZOU Zhi-jun, YANG Dong-yuan. Software design of urban road traffic simulation system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(3): 86-89.
- [5] 魏 朗,周维新,李春明,等. 驾驶员道路认知特性模型[J]. 交通运输工程学报,2005,5(4):116-120.
WEI Lang, ZHOU Wei-xin, LI Chun-ming, et al. Driver perception model for road structure parameters [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 116-120.
- [6] 杨宏志,许金良,朱理平. 公路仿真系统数据库[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):34-37.
YANG Hong-zhi, XU Jin-liang, ZHU Li-ping. Database of highway simulation system [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 34-37.
- [7] 林 闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
LIN Chuang. Stochastic Petri net and system performance evaluation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [8] 刘皓玮. 行车指挥系统的 Petri 网建模与列车运行调整的遗传优化的研究[D]. 北京:铁道部科学研究院,2000.
LIU Hao-wei. A study of train traffic control system modelling with Petri nets and train operation adjustment using genetic algorithm[D]. Beijing: Rail Science Research Institute, 2000.