

基于扩展 DPN 的 CPS 混成行为时效建模与综合评估

宋翠叶¹ 杜承烈¹ 李刚²

(西北工业大学计算机学院 西安 710029)¹ (华北电力大学计算机系 保定 071003)²

摘要 信息物理融合系统行为是一种由离散计算过程与连续物理动态过程深度融合并紧密交互的混成行为。在 CPS 设计早期对信息系统实体的信息实体的关键监控参数、实时指标,以及物理系统设施的连续行为规律进行综合评估,是这类系统进一步设计与实现的基础。基于扩展 DPN 语义,以某智能车 CPS 系统自主行进紧急避障过程为研究对象,建立了其信息物理混成行为的 Petri 网模型,以融合并集中体现各关键参数和指标的时序协作效应;通过对该模型的仿真运行,实现了 CPS 行为的在线观测与综合评估。该方法为 CPS 子系统关键设计指标的综合合理性评估及其组合设计提供了一种解决途径。

关键词 CPS,混成行为,微分 Petri 网,实时指标,时效评估

中图分类号 TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.1.005

Indicator-effect Modeling and Evaluation for CPS System Based on Extended DPN

SONG Cui-ye¹ DU Cheng-lie¹ LI Gang²

(Department of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)¹

(Department of Computer, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)²

Abstract Cyber physical system (CPS) is composed of networked physical devices, in which computing entities are embedded to perceive everything and control the running of the devices. Evaluating the integral effect of the physical and computing arguments, control indicators and related real-time properties is essential to the product development of a CPS system. In this paper, an intelligent vehicle was taken as the research object, and an extended differential Petri net (DPN) model was adopted to establish the integrated model of its cyber physical behavior and desired control effect, in which the key design elements are reflected. By executing of the model, the integrated control effect is judged directly from the model. This method provides an effective way to assess the integral properness, and combined design of key design indicators of a CPS system.

Keywords CPS, Hybrid behavior, Differential Petri net, Real time indicator, Indicator-effect evaluation

1 引言

信息物理融合系统(Cyber Physical System, CPS)是指在环境感知的基础上,深度融合了计算通信和控制能力的网络化物理设备系统^[1]。然而,在信息领域,并发操作系统、并行指令流等技术在提高计算资源利用率的同时,也增加了计算过程的耗时不确定性^[2],实时指标就成为了信息实体行为的重要设计指标和评估依据。在航空航天、军事、核工业等关键领域,实时指标的不合理可能导致物理设备运行突破安全界限,损害生命财产或危害生态环境;而物理参数反过来也影响实时指标的合理性。因此,有必要引入 CPS 行为的时效合理性评估体系。CPS 行为时效合理性可定义为:在给定物理参数和信息行为关键参数与实时指标的情况下,经过信息、物理系统的协作,物理设备的运行能够达到的特定物理指标。在 CPS 设计早期对 CPS 行为时效合理性进行评估,对提高 CPS

的可靠性、安全性保障,以及降低系统开发成本具有重要作用。

在 CPS 系统的行为中,离散计算过程与连续物理动态过程两种异构行为并行运作,且通过信息系统的感知和控制而紧密交互,因此,建立一种统一语义的行为模型来刻画这类混成行为的并行时序特性和集成为,进而基于模型实现各指标和参数的综合评估非常困难。在现有的带时间特性的混成理论中,时间混成 Petri 网^[3](THPN)继承了 Petri 网能够方便地描述系统的分布、并发、资源共享、同步和异步等重要特性的能力,提供了离散量与连续量及其变迁速度特性的表达能力;微分 Petri 网(DPN)^[4]提供了连续系统微分表达式的建模能力,有效地实现了将连续系统进行离散化建模与仿真。但是 THPN 与 DPN 都不能直接支持信息系统对连续物理量的感知过程的描述,也难以实现信息系统对连续系统的控制效应的刻画,因此都不能充分支持 CPS 系统行为的集成建

到稿日期:2014-01-15 返修日期:2014-05-16 本文受国家“863”计划基金项目:面向信息-物理融合的系统平台(2011AA010102),中央高校基本科研业务费专项资金(2014MS127),河北省自然科学基金(F2014502050),河北省高等学校科学研究项目(Z2013007)资助。

宋翠叶(1983—),女,博士生,主要研究方向为 CPS 系统建模与仿真技术,E-mail: songcy@mail.nwpu.edu.cn;杜承烈(1970—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为 CPS 的运行支撑与仿真验证技术;李刚(1980—),男,讲师,主要研究方向为电力 CPS 建模及仿真。

模。本文尝试基于扩展的 DPN 语义,以某智能车 CPS 系统自主行进中紧急避障过程为研究对象,通过分析其障碍感知与车辆行进控制过程,建立其信息物理混成行为的集成模型来集中体现各实时指标、周期性时间特性参数及其他关键参数,采用模型元素反映其综合合理性判断依据;通过该模型的仿真运行,实现 CPS 行为的在线观测与综合评估;并通过调整关键指标或参数和重复仿真,实现各关键指标和参数的组合设计。

本文第 2 节对扩展 DPN 模型的结构和行为语义进行阐述;第 3 节采用该语义分别对某智能车辆行走与紧急避障过程中的障碍感知与刹车过程、速度控制与路程积分过程进行建模;第 4 节通过对系统控制目标有效性的分析和推导,确定了其综合合理性的仿真判断依据,建立了车辆 CPS 系统的信息物理混合行为与时效集成模型来集中体现各实时指标和参数与时效合理性的仿真关系;第 5 节将给出不同参数组合对应仿真结果的统计,提炼该仿真评估方法的基本步骤,并与其他相关研究工作对比分析;最后总结全文。

2 扩展 DPN 语义

DPN 由 Demogodin I 和 Koussoulas N T 于 1998 年提出,主要用于连续系统的离散化建模^[4]。与 THPN 不同,在 DPN 中,连续标识量可以取任意实数,而不再受限于正实数范围,从而支持微分与积分变量的表达。本文采用的扩展 DPN 语义,在 DPN 结构的基础上增加了抑止弧和测试弧的使用,限制了其变迁使能条件和标识量更新函数,从而支持 CPS 系统行为的建模。

(1) 模型结构

扩展 DPN 模型表示为六元组 $B_{CPS} = \langle R, f, m_0, A_C, A_I, \tau \rangle$, 其中,

• $R = \langle P, T, Pre, Post \rangle$ 为基本 Petri 网结构,各元素含义详见文献[3];为消除模型执行语义的不确定性,对 P 和 T 的连接关系做如下限制:

$$\forall P_i \in P^D, T_j \neq T_k \in T^D, \text{if } Pre(P_i, T_j) \in \emptyset \\ \text{then } Pre(P_i, T_k) = 0$$

另外,采用以下条件限制离散位置对连续变迁的直接影响:

$$\forall P_i \in P^D, T_j \in T^C, Pre(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j) = 0.$$

• $f: P \cup T \rightarrow \langle D, C \rangle$ 为离散连续指示函数;将节点划分为 4 个子集 P^D, P^C, T^C 和 T^D ;

• m_0 为初始标识向量;

• $A_C: \langle P_i \in P^C, T_j \rangle \rightarrow \emptyset; \langle P_i \in P^D, T_j \rangle \rightarrow \emptyset$, 或 $\langle P_i, T_j \rangle \in \{ \}$ 为条件弧集合; T_j 的测试弧关联位置集记为 $A_C(T_j)$; P_i 与 T_j 间测试弧权值记为 $A_C(P_i, T_j)$ 。

• $A_I: \langle P_i \in P^C, T_j \in T^D \rangle \rightarrow \emptyset; \langle P_i \in P^D, T_j \rangle \rightarrow \emptyset$; 或 $\langle P_i, T_j \rangle \in \{ \}$ 为抑止弧集合。 T_j 的抑止弧关联位置集记为 $A_I(T_j)$; P_i 与 T_j 间抑止弧权值记为 $A_I(P_i, T_j)$ 。

• τ 为变迁时间函数;如果 $T_j \in T^D, d_j = \tau(T_j)$ 表示延迟;如果 $T_j \in T^C, \tau(T_j) = \langle v(T_j) | d_j \rangle = \langle v_j | h \rangle$ 表示变迁速率,由 v_j 和 d_j 两部分表示。记位置集 $P^o = A_C(T_j) \cup {}^o T_j$, 则 $v_j = G(m_1, m_2, \dots, m_n)$ 为标识量的函数, d_j 为标识更新延时, d_j 等于仿真微步长时,记为 h 。

(2) 执行语义

• 24 •

在 B_{CPS} 中,对于 $T_j \in T^D$,在 t_0 时刻使能且可执行条件为:

$$\forall t \in [t_0 - d_j, t_0] (\forall P_i \in {}^o T_j, m_i(t) \geq Pre(P_i, T_j) \\ \wedge \forall P_i \in A_C(T_j), m_i(t) \geq A_C(P_i, T_j) \\ \wedge \forall P_i \in A_I(T_j), m_i(t) < A_I(P_i, T_j))$$

且对应标识更新函数为:

$$\begin{cases} \forall P_i \in {}^o T_j, m_i(t_0) = m_i(t_0 - d_j) - Pre(P_i, T_j) \\ \forall P_i \in T_j^o, m_i(t_0) = m_i(t_0 - d_j) + Post(P_i, T_j) \end{cases}$$

对于 $T_j \in T^C$,在 t_0 时刻使能且可执行条件为:

$$\forall t \in [t_0 - d_j, t_0] ((\forall P_i \in A_C(T_j) \wedge P_i \in P^D, m_i(t) \geq \\ A_C(P_i, T_j)) \wedge (\forall P_i \in A_I(T_j), m_i(t) < A_I(P_i, \\ T_j)))$$

且对应的标识量更新关系为:

$$\begin{cases} \forall P_i \in {}^o T_j, m_i(t_0) = m_i(t_0 - d_j) - v_j(t_0) \cdot Pre(P_i, T_j) \cdot d_j \\ \forall P_i \in T_j^o, m_i(t_0) = m_i(t_0 - d_j) + v_j(t_0) \cdot Post(P_i, T_j) \cdot d_j \end{cases}$$

当 $d_j = h$ 时, T_j 的使能条件判断与执行为瞬间执行,与时段 $[t_0 - d_j, t_0]$ 无关,但仍适用于标识量更新关系。对于给定 B_{CPS} 模型,设定仿真总时长为 T_s 和积分微步长为 h ,其仿真执行步骤如下:

① 初始化逻辑时钟 $C_L = 0$;依据模型初始化标识向量 m_0 ;初始化变迁使能性,并根据变迁延时标记变迁时刻;在 0 时刻,变迁 T_j 若无前驱位置、无测试和抑止条件,则标记为使能,且标记其执行时刻为 d_j 。

② 执行 $C_L = C_L + h$,将逻辑时钟向前推进一个微步长;

③ 依据变迁使能和执行判断条件对各变迁执行使能和执行条件进行判断和更新;

④ 对于可执行连续变迁,依据当前标识量计算连续变迁速度,并依据标识更新关系对相应位置的标识量进行更新;

⑤ 对于可执行离散变迁,依据标识更新关系对其前驱和后继位置的标识量进行更新;

⑥ 判断 $C_L = T_s$? 是否成立,若不成立,则跳转至步骤②;若成立,则结束仿真。

3 智能车 CPS 系统行为 Petri 网模型

本节采用扩展 DPN 语义,在开源软件 HISim^[5] 和 Eclipse 平台的支撑下,建立智能车 CPS 自主行走和紧急避障过程的 Petri 网模型,将车辆行走的连续过程与障碍感知、信息传输与控制过程进行集成建模,以集中体现各实时指标和控制参数,刻画其信息物理融合时序特性。

(1) 场景简介

某智能车的自主行走与紧急避障过程如图 1 所示:车辆在指定路面启动行驶,通过照相机对前方路面进行图像捕获,经过图像分析对障碍进行感知;当检测出障碍时,自动启动紧急刹车,以防止车辆与前方障碍相撞。

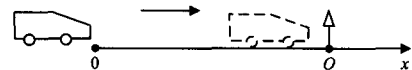


图 1 车辆自主行走与紧急避障场景示意图

将车辆最初位置视作原点 0,假设车辆按直线行走,直到检测到前方 O 点障碍,执行刹车。记 O 点坐标为 O_x ,若车能够停在 O 点左侧,则说明车辆能够避免碰撞,安全停车,也说明各设定指标的合理性。在该系统中,照相节点和中央处理

节点分布在车内不同位置,通过网络互连,最大信息传输延时为 T_{comm} 秒;中央处理节点与控制机构间控制指令传输延时最大值为 $T_{control}$;照相过程的工作周期为 T_{camer} 秒,照相延时为 D_{camer} 秒,障碍物判断标准为距车身 s 米,车辆紧急刹车制动距离为 l 米。本节基于 B_{CPS} 尝试对该场景进行建模,探索各时间和物理指标的综合合理性验证方法。

(2) 离散感知与控制模型

通过对感知过程进行抽象与参数转换来对障碍感知与控制过程进行建模。模型各节点设计如表 1 所列,采用位置和变迁节点来表示连续待感知量和各行为过程。

表 1 周期性感知过程 Petri 模型含义表

节点名称	含义说明
P_0	车辆前端位置
P_2	照相机工作状态;1 表示新周期开始,0 表示忙碌中
P_3	障碍事件状态;1 表示产生并捕获中,0 表示无
P_4	中央处理单元接收障碍事件并做出响应控制
T_0	照相机工作状态刷新器,延时为照相周期 T_{camer}
T_1	P_2 标识清零器,使得 P_2 标识量只在瞬间有效
T_2	带障碍信息事件产生并瞬间捕获
T_3	从障碍捕获到刹车控制;延时为 $T_{comm} + D_{camer} + T_{control}$

这里采用测试弧和抑止弧来辅助障碍感知过程的抽象和建模。假设参数取值 $s = 15m$, $O_x = 60m$,则障碍的检测距离为 $O_x - s = 45m$,障碍产生并被照相捕获的条件转换为 $m(P_0) \geq 45 \wedge m(P_2) = 1$,因此采用测试弧 $A_C(P_0, T_2) = 45$ 和 $A_C(P_2, T_2) = 1$ 来共同限制 T_2 行为的产生。由于在该场景中,当 $m(P_0) \geq O_x$ 时,车辆已与障碍相撞,已无继续观测的必要,因此采用抑止弧 $A_I(P_0, T_2) = 60$ 来结束 T_2 的进一步行为。障碍捕获与响应过程如图 2 所示。

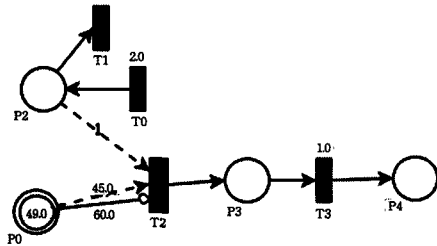


图 2 障碍捕获与响应过程

假设障碍捕获过程的各个阶段实时设计指标分别为 $T_{camer} = 2s$, $D_{camer} = 0.2s$, $T_{comm} = 0.5s$, $T_{control} = 0.3s$,则变迁延迟 $d(T_0) = 2s$, $d(T_3) = 0.2 + 0.5 + 0.3 = 1s$ 。假设当前 $m(P_0) = 49$,又因为照相机初始状态为延时等待,则系统标识向量初值为 $m_0 = (49, 0, 0, 0)$,各变迁延时属性向量为 $d = (2, 0, -1, 0, -1, 0, 1, 0)$,其中 $-1, 0$ 表示仿真微步长,其随系统仿真运行参数设置而变。

(3) 车速控制与路程积分模型

假设车速的控制采用典型的 PID 控制器,且车速的设定分为两个档位。档位 k 与设定车速 v 的对应关系为:

$$v = 50k - 5 (\text{km/h}) \approx 13.9k - 1.4 (\text{m/s}), k \in \{1, 2\}$$

PID 控制的积分环节为:

$$x(n) = x(n-1) + u(n)$$

微分环节为:

$$d(n) = u(n) - u(n-1)$$

对应牵引力输出公式为:

$$y(n) = Kp \cdot u(n) + Ki \cdot x(n) + Kd \cdot d(n)。$$

这里, Kp, Ki, Kd 为 PID 控制系数。且已知其最佳控制效果对应的控制周期为 $0.02s$,对应系数为 $Kp = 25, Ki = 0.01, Kd = 1$ 。汽车的动力机构运行规律符合以下规律:

$$F(t) = m\dot{v}(t) + bv(t)$$

其中, $F(t)$ 为牵引力, m 为车身重量, b 为阻力因子, $v(t)$ 和 $\dot{v}(t)$ 分别为速度和加速度。假设 m 和 b 为常量,且 $m = 1000kg, b = 20$,为简化速度控制和路程积分模型的建立,对控制规律的最简积分表达式进行推导:

由 $F = m\dot{v} + bv$ 得:

$$\dot{v} = \frac{F}{m} - \frac{b}{m}v$$

又由 $v(n+1) = v(n) + \dot{v}(n) \cdot \Delta t$,将上式代入可得:

$$v(n+1) = v(n) + \left(\frac{F - b \cdot v(n)}{m}\right) \Delta t$$

将 $F = y(n) = Kp \cdot u(n) + Ki \cdot x(n) + Kd \cdot d(n)$ 代入上式得:

$$v(n+1) = v(n) + \left(\frac{Kp \cdot u(n) + Ki \cdot x(n) + Kd \cdot (u(n) - u(n-1)) - b \cdot v(n)}{m}\right) \Delta t$$

Δt

根据路程 $S(t)$ 与速度的关系式 $S(t) = \int_0^t v(t) dt$,得其离散表达式为:

$$S(n+1) = S(n) + v(n) \cdot \Delta t$$

根据上述两式采用连续位置对关键计算变量进行表示,实现其 Petri 网模型的设计与建立,相应关键节点物理含义如表 2 所列。采用连续位置的变量名直接表示该位置的标识量,并将 $Kp = 25, Ki = 0.01, Kd = 1, m = 1000, b = 20$ 代入 $v(n+1)$ 式,根据表中位置含义,得:

$$v(n+1) = v(n) + \left(\frac{25 \cdot P_3 + 0.01 \cdot P_5 + 1 \cdot (P_3 - P_7) - 20 \cdot P_8}{1000}\right) \Delta t$$

式中, P_3, P_5, P_6 和 P_8 分别为对应位置的标识量,从而可得速度 $v(n)$ 的变迁速度函数为:

$$f(T_0) = \frac{25 \cdot P_3 + 0.01 \cdot P_5 + 1 \cdot (P_3 - P_7) - 20 \cdot P_8}{1000}$$

同理,路程 $S(n)$ 对应变迁 T_4 的变迁速度为:

$$f(T_4) = P_8$$

表 2 车速控制与路程积分模型节点含义表

节点名称	含义说明
P_0	车辆前端位置,即车辆行驶路程
P_3	设定车速值与实际车速差值 $u(n)$
P_4	仿真采样周期,连续变迁速度函数辅助表达因子
P_5	积分因子 $x(n)$
P_6	当前档位设定速度值
P_7	微分辅助因子 $u(n-1)$
P_8	当前车速 $v(n)$
T_0	速度积分
T_1	积分因子增值
T_2	当前 $u(n)$ 值转移至 P_7
T_3	P_7 原值清零转移
T_4	速度积分,求取路程
T_5	$u(n)$ 值求取
T_6	P_3 位置清零转移

图 3 为车辆的档位设置、速度控制与路程积分集成仿真模型。假设初始档位为 1 档,即 P_9 初始值为 1,则相应速度 $12.5m/s$ 在一个仿真步长后迁移至 P_6 并保持。

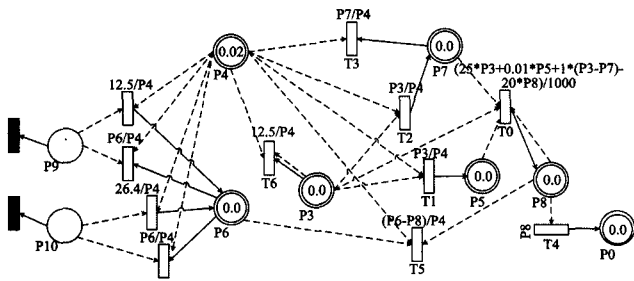


图3 车速档位控制与路程积分模型

P4 为仿真采样周期,用于辅助各连续变迁的变迁速度计算,它在该模型中同时也是速度微控制周期。如图4所示,通过对不同的仿真步长对应的速度值进行采样和曲线绘制对比可知,在该模型中,若仿真微步长 h 过小,速度的控制则出现严重抖动;若 h 过大,则速度控制响应速度又过慢;当 $h = 0.02s$ 时,速度控制曲线最快且最平稳,与控制过程的已知最佳效果吻合,因此设置 $P4 = h = 0.02s$ 。

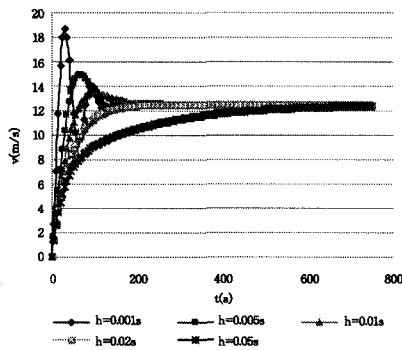


图4 仿真微步长与速度变化曲线对照图

图3所示模型通过离散档位节点P9和P10,为信息子系统对车速的动态控制过程描述提供了接口,同时通过连续节点P0对待感知连续变量路程进行了描述。通过模型的仿真执行,P0值便随时间动态变化,从而为连续物理动态和离散感知控制过程的融合点进行了描述,为信息物理融合行为的集成建模奠定了基础。

4 信息物理集成与时效建模

(1) 系统时效分析

由于路程值 $P0$ 直接影响各指标和参数的综合合理性判断,且在通过速度的离散积分求取路程的模拟过程中,路程值的精度有一定的丢失,因此就该过程对仿真结果的影响进行考察。根据图4中 $0.02s$ 控制周期对应的速度曲线可知,速度在模型执行过程中是单调不减的,设第 i 步结束时刻的速度值为 $v(i)$, $i \geq 1$,记仿真微步长为 h ,则路程值在下一步的新增量为 $x(i+1) = v(i) \cdot h$,满足:

$$x(i+1) \geq \int_{h \cdot (i-1)}^{h \cdot i} v(t) dt, i \geq 1$$

因此,对于任意的 $k+1$ 步仿真,有:

$$\sum_{i=1}^{k+1} x(i) \geq \int_0^{h \cdot (k+1)} v(t) dt, k \geq 1$$

给定仿真时长 T_s ,则积分步数 $k = T_s / 0.02$ 为定值,积分路程值 $P0 = \sum_{i=1}^k x(i)$ 。代入得:

$$P0 + x(k+1) - x(1) \geq \int_0^{h \cdot k} v(t) dt, k \geq 1$$

记 $\int_0^{h \cdot k} v(t) dt$ 为 $RealD$,对于设定速度值 v_s 有 $x(k+1) \leq v_s \cdot h$,又 $x(1) = v(0) \cdot h = 0$,故 $P0 + v_s \cdot h \geq RealD$ 成立。

因此,对于当前车速的刹车制动距离 $l(m)$,当信息子系统发出并执行刹车指令时,若 $RealD < O_x - l$,则说明车辆能够及时刹车,避免与障碍相撞。因此,若 $P0 + v_s \cdot h < O_x - l$ 成立,即 $P0 < O_x - l - v_s \cdot h$ 成立,则 $RealD < O_x - l$ 成立。由于档位设置模型的集成,导致速度值的设定在模型中比实际延迟一个微步长,因此将刹车及时性的判断条件修正为 $P0 < O_x - l - 2 \cdot v_s \cdot h$ 。

(2) 信息物理集成时效模型

在图3的基础上,将障碍感知与响应控制过程集成,并新增了节点P14、P15、T17和T18来对各指标和参数的综合合理性进行建模,如图5所示。其中,P14表示障碍被检测到但由于响应过迟而避障失败;P15表示避障响应控制的产生;P14与P15的标识数量分表表示相应情况在仿真运行过程中产生的次数。这里采用测试弧 $A_C(P_{13}, T_{17}) = 1$ 和测试弧 $A_C(P_0, T_{17}) = O_x - l - 2 \cdot v_s \cdot h$ 共同刻画T17的执行条件。

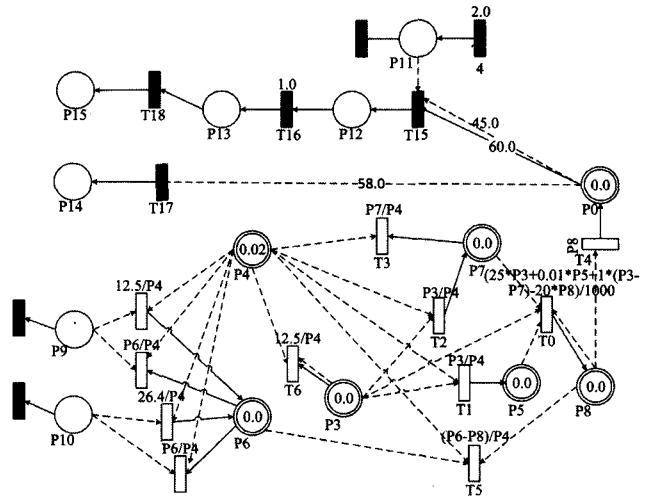


图5 智能车自主行走与紧急避障集成时效模型

在系统实际运行过程中,当第一次检测到障碍时,信息子系统便会执行刹车控制,不会产生第二次的障碍检测与控制。因此,当仿真结束时,若 $P15 > P14$ 成立,说明在当前的各时间指标、车速控制过程和车量刹车制动距离指标下,车辆通过各子系统的协作能够安全地避免与障碍相撞,也即综合时效指标是合理的;若不成立,则表示当前时效指标的综合不合理性,需要进一步调整时间或制动距离参数,直到能够成功避障。

5 时效仿真与评估分析

为提高评估效率,依据障碍坐标值 $O_x = 60$ 对仿真总时长进行仿真试验。经仿真观测,当仿真执行时间到30s时,P0值达到110,已能够满足评估需要。因此设定仿真总时长为30s,仿真微步长为 $0.02s$ 。各设计指标和相关可设计参数的名称和物理含义如表3所列,各指标值与图5所示模型元素的初始关联关系为: $D_{16} = T_{camer} + D_{camer} + T_{control}$; $D_{14} = T_{camer}$; $A_C(P_0, T_{15}) = O_x - s$; $A_C(P_0, T_{17}) = O_x - l - 2 \cdot v_s \cdot h$; $A_1(P_0, T_{15}) = O_x$ 。对于一次仿真评估,综合合理性 P 的判断是

在仿真结束后,其判断依据为 $P_{15} > P_{14}$,若成立,则 P 为 true;否则 P 为 false。通过调整指标取值,更新模型元素和重复仿真运行,实现了综合合理性的评估。

表3 设计指标与时效仿真结果对照表

指标名称	物理含义	组合1	组合2	组合3
$T_{comm}(s)$	通信延时	0.2	0.1	0.1
$T_{camer}(s)$	照相工作周期	2	2	2
$D_{camer}(s)$	照相工作延时	0.6	0.4	0.4
$T_{control}(s)$	控制响应延时	0.2	0.1	0.1
$s(m)$	障碍物判断距离	15	15	10
$l(m)$	刹车制动距离	3	3	2
P	综合合理性	false	true	true

本文提出的基于扩展 DPN 语义的 CPS 混成行为时效建模与评估方法总体可概括为以下步骤:

(1)通过对信息感控过程进行抽象,依据其感知逻辑和时间特性建立扩展 DPN 模型;

(2)依据离散控制过程模型和连续物理规律方程,推导出关键控制量的最简状态方程,并据此建立其扩展 DPN 模型;

(3)通过分析 CPS 集成行为的物理控制效应目标,对各指标和参数合理性进行抽象和推导,确定合理性判断依据;在此基础上建立信息物理混成行为和相应时效合理性的集成模型;

(4)依据各指标与模型元素值的对应关系,调整指标参数和模型;通过重复仿真运行实现多指标综合合理性的评估。

在现有的带计算时间语义的 CPS 系统行为仿真技术中,PTIDEs 编程模型^[6]为计算过程绑定计算时间,对计算行为的时序演化模拟提供了途径;基于 Modelica 及其嵌入式扩充库的信息物理集成计时仿真即为确定性耗时的计算过程与连续物理动态过程的集成仿真^[7,8];相比较而言,扩展 DPN 模型由于不具有灵活的赋值表达能力,不适于进一步生成可执行软硬件框架,因此只能用于性能评估;但基于扩展 DPN 模型的建模与仿真为各实时指标和感控参数的集成建模提供了

更简洁且语义统一精确的数学模型,在多指标评估阶段避开了系统实体的程序设计,简化了评估过程。

结束语 本文阐述了扩展 DPN 模型的结构和执行语义,以某智能车自主行进与紧急避障过程为研究对象,建立了其关键信息过程、行进控制过程与路程积分过程的统一模型;通过分析和推导其系统控制物理目标,建立了该信息物理混合过程与物理时效的集成模型;通过调整指标参数及模型的仿真运行,实现了多指标的综合评估。该方法为信息物理混成行为集成时效合理性的评估及多指标的组合设计提供了一种简洁有效的途径。

参考文献

- [1] 何积丰. Cyber-physical systems[J]. 中国计算机学会通讯, 2010,6(1):25-29
- [2] Lee E A. CPS foundations[C]// Proc. of Design Automation Conference. 2010;737-742
- [3] David R, Alla H. Discrete, continuous, and hybrid Petri nets [M]. Germany: Springer, 2005
- [4] Demongodin I, Koussoulas N T. Differential Petri Nets: Representing Continuous Systems in a Discrete-Event World [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998,43(4):573-579
- [5] Hybrid Petri Net ICSI Simulator[OL]. <http://sourceforge.net/projects/hisim>, 2013
- [6] Center for hybrid and embedded software systems. Timing-Centric Software [OL]. <http://chess.eecs.berkeley.edu/ptides/>, 2010
- [7] Henriksson D, Elmqvist H. Cyber-physical systems modeling and simulation with modelica [C]// Proceedings 8th Modelica Conference. 2011;502-509
- [8] Malmheden M, Elmqvist H, et al. ModeGraph-A Modelica Library for Embedded Control Based on Mode-Automata [C]// Proceeding of 6th International Modelica Conference. 2008;255-267
- [9] Lynden S J, Tanimura Y, Kojima I, et al. Dynamic data redistribution for MapReduce joins [C]// Proc of Cloud Com. Washington: IEEE, 2011;717-723
- [10] Afrati F N, Ullman J D. Optimizing multiway joins in a Map-Reduce environment [J]. TKDE, 2011,23(9):1282-1298
- [11] Zhang X F, Chen L, Wang M. Towards Efficient join processing over large rdf graph using MapReduce [C]// Proc of SSDBM. Berlin: Springer, 2012;250-259
- [12] Lin J. Brute force and indexed approaches to pairwise document similarity comparisons with MapReduce [C]// Proc of SIGIR. New York: ACM, 2009;155-162
- [13] Elsayed T, Lin J J, Oard D W. Pairwise document similarity in large collections with MapReduce [C]// Proc of ACL. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2008;265-268
- [14] Li B, Mazur E, Diao Y L, et al. A platform for scalable one-pass analytics using MapReduce [C]// Proc of SIGMOD. New York: ACM, 2011;985-996
- [15] Gufler B, Augsten N, Reiser A, et al. Handling data skew in MapReduce [C]// Proc of CLOSER. SciTePress, 2011;574-583
- [16] Gufler B, Augsten N, Reiser A, et al. Load balancing in MapReduce based on scalable cardinality estimates [C]// Proc of ICDE. Washington: IEEE, 2012;522-533
- [17] Fagin R, Lotem A, Naor M. Optimal aggregation algorithms for middleware [J]. Computer and System Sciences, 2003,66(4):614-656
- [18] Sarawagi S, Kirpal A. Efficient set joins on similarity predicates [C]// Proc of SIGMOD. New York: ACM, 2004;743-754
- [19] Xiao C, Wang W, Lin X M, et al. Efficient similarity joins for near duplicate detection [C]// Proc of WWW. New York: ACM, 2008;131-140
- [20] Jacox E H, Samet H. Metric space similarity joins [J]. ACM Transactions on Database Systems, 2008,33(2):1-38
- [21] Xiao C, Wang W, Lin X M, et al. Top-k set similarity joins [C]// Proc of ICDE. Washington: IEEE, 2009;916-927
- [22] Zhu S W, Wu J J, Xia G P. Top-k cosine similarity interesting pairs search [C]// Proc of FSKD. Washington: IEEE, 2010:1479-1483
- [23] Blanas S, Patel J M, Ercegovic V, et al. A comparison of join algorithms for log processing in MapReduce [C]// Proc of SIGMOD. New York: ACM, 2010;975-986
- [24] Li G L, Deng D, Wang J N, et al. Pass-Join: a partition-based method for similarity joins [C]// Proc of VLDB. New York: ACM, 2012;253-264

(上接第5页)