

一种信息物理融合系统行为预测模型

余 维^{1,2} 叶阳东¹

(郑州大学信息工程学院 郑州 450052)¹

(北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室 北京 100044)²

摘要 信息物理融合系统(CPS)是一类集成了计算系统、通信网络、传感器网络、控制系统和物理系统的新型互联系统。由于CPS内部异构单元之间的通讯、协同和交互的形式错综复杂,目前尚无统一的模型进行描述和分析,因此对其行为的建模和预测是一个难点问题。首先以混杂系统、模糊集理论和人因学方法为基础,提出一种模糊时间混合Petri网,随后通过对一类典型CPS的行为进行建模和分析,实现了CPS动态行为和状态迁移的预测,最后以仿真数据验证了模型的有效性。该模型可用于分析CPS中的物理世界连续状态和信息世界离散事件之间的联系和交互,有助于研究CPS中的不确定性问题和系统组成单元之间的异步并发关系,为CPS的行为预测、状态评估和实时控制提供了有效方法。

关键词 信息物理融合系统,混杂系统,模糊时间混合Petri网,行为预测

中图分类号 TP301 **文献标识码** A

Behavior Forecasting Model of Cyber-physical Systems

SHE Wei^{1,2} YE Yang-dong¹

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)¹

(State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)²

Abstract Cyber-physical system(CPS) is a new kind of interconnected system which integrates the calculation system, communication network, sensor network, control system and physical system. Since the forms of the communication, cooperation, and interaction among its heterogeneous units are complex, and there is no unified model to describe and analyze it at present, therefore, to model and forecast the behavior of CPS are a difficult point. Based on the hybrid system, fuzzy set theory and human factors method, we proposed a kind of fuzzy time hybrid Petri net(FTHPN). Through the modeling and quantitative analysis of a typical behavior of the CPS, the dynamic behavior forecasting and the state transformation of the CPS were realized. The simulation results verify the effectiveness of the model. This model can be used to analyze the relationship and interaction between the continuous state of physical world and the discrete event of information world of CPS. It will help study the uncertainty of CPS and asynchronous concurrent relationships among system composition units, hence has provided effective methods to forecast, assess, and real-time control CPS.

Keywords Cyber-physical system, Hybrid system, Fuzzy time hybrid Petri net, Behavior forecasting

1 引言

随着物联网、传感器网络、嵌入式系统和计算智能等技术的发展,信息世界和物理世界的交互、协同和融合在不断加强。人们对于各种复杂系统和计算设备的需求已不仅仅局限于系统功能的扩充,而是更关注系统中各种计算元素和物理元素之间的紧密结合,以及在动态不确定事件作用下的相互协调。系统资源的合理有效调配和运行时的实时、可靠、高效,内部实体间平等有效的通讯以及各实体自主感知、自主调节和高度自治,正在成为新的需求。在这种需求的引导下,信息物理融合系统(Cyber-physical systems, CPS)作为一种新型

智能系统应运而生^[1,2]。CPS的理念最早由美国国家科学基金会(NSF)在2005年提出。根据NSF的定义^[3],CPS是将计算与物理资源紧密结合所构成的系统。更具体地讲,CPS是集成了计算系统、大规模通信网络、大规模传感器网络、控制系统和物理系统的新型互联系统。CPS应具有对大规模互联物理系统进行实时监视、仿真、分析和控制的能力,最终目标是使未来的物理系统具有灵活性、自治性、高效率、高可靠性和高安全性^[3,4]。CPS的概念一经提出便得到了广泛关注,各国学者和科研人员从CPS的理论方法、相关组件、运行环境、系统设计和实现等不同层面对CPS进行了探讨,并在计算机、通信、控制、生物、交通、物流、制造、能源、医疗、军事、

到稿日期:2012-07-25 返修日期:2012-11-09 本文受国家863计划资助项目(2011AA110501),国家自然科学基金项目(61170223),国家重点实验室开放课题基金(RCS2009K003),河南省重点科技攻关项目(122102210004),湖南省科技攻关计划项目(2012FJ3092)资助。

余 维(1977-),男,博士生,副教授,主要研究方向为Petri网理论、复杂系统建模,E-mail:shewei1977@163.com;叶阳东(1962-),男,博士,教授,主要研究方向为机器学习、智能系统。

基础设施建设等多个领域展开了相关的研究工作^[5-9]。

目前针对 CPS 的研究与应用多以混杂理论为基础^[6,10],借鉴了离散事件模型、计算智能模型、博弈法等混杂系统中的模型和技术。传统的混杂系统的分析通常围绕系统中物理元素的连续状态与离散事件之间的复杂关系展开研究。而在 CPS 中,所有的计算模块、通信模块、网络节点、物理实体,包括人自身,都被视为系统中的物理组件。人不仅作为系统的设计者、监控者和使用者,而且作为系统的一部分。将人的语言、思想、行为甚至人的生物特征等因素都参与到 CPS 的运行与决策之中。因此,在传统的混杂系统、传感器网络、控制系统等成熟理论的基础上融入对系统中的智能体、相关环境及不确定性因素的分析,研究它们在 CPS 中的行为和状态演进,正成为一个新的研究热点^[11-14]。在 Bestavros 等人的研究中,给出了一种 CPS 行为的抽象结构^[12],其较为直观地体现了通过 Cyber-Physical 进行交互,将物理世界和虚拟世界互联的思想;不足之处在于没有突出物理组件所具有的自主协调、自主验证和自主决策能力,也没有充分考虑人在系统中的地位和作用。Al-Hammouri 等人提出了一种 CPS 交互的拓扑结构^[13],在这种结构中,CPS 的网络环境是异构的,涵盖了不同属性的网络,并且传感网络中除了传感器节点外,还包含了执行器节点和同时具有传感与执行能力的节点。控制者、传感器和执行器位于同一层面与物理世界交互,体现出 CPS 是包含了人和生物等生命体在内的与物理环境直接交互的反馈系统。Tan 等提出了一种基于可信的 CPS 原型架构^[14],从系统构建和实现的角度讨论了 CPS 在控制、计算、通信、信息交互行为中的具体实现以及实时感知能力的演进过程。赵俊华等人基于微分代数方程组、有穷自动机等数学工具建立了 CPS 稳态和动态模型^[11],系统地研究了 CPS 稳态分析和动态分析问题,并对通信网络的传输延迟和数据丢失对于 CPS 运行控制的影响提出了延时与丢失补偿机制。Wan 等研究了混合自动机、进程代数、标注混合 Petri 网等常用的混杂系统建模工具在 CPS 分析和设计上的局限性,并提出一种 CPS 描述和分析的统一框架^[15]。Antsaklis 描述了一类有人参与的离散事件系统,并将其视为 CPS 的一种表现形式,运用 Petri 网对其进行建模^[16]。蔡热文使用一种面向方面的时间 Petri 网来对 CPS 系统进行分析 and 建模,对离散时间、连续时间、随机时间和模糊时间在系统实时特性上的表现进行了研究,并提出了用时间函数表达 CPS 的空间信息的构想^[17]。

上述研究内容从不同角度描述和分析了 CPS 的行为模式和内部状态的演化过程,对人们进一步研究 CPS 的结构、性质和行为提供了基本的模型和方法。但上述研究对于 CPS 中广泛存在的不确定性和异步并发问题均未进行深入分析,在讨论模型的具体实现时可能会在多平台协作和实体间同步的问题上遭遇瓶颈,并且上述模型在对物理世界连续状态的分析上仍显不足,对复杂系统的预测、评估和实时控制能力有限。本文的研究即针对以上问题而展开,将模糊集、混杂系统理论和人因学方法运用于 CPS 的研究和建模,首先提出一种模糊时间混合 Petri 网(Fuzzy Time Hybrid Petri Net, FTHPN),随后运用 FTHPN 构建了 CPS 的行为预测模型,通过一个典型 CPS 系统的状态演化分析,研究了实体的动态行为和异构组件之间的通信、协同及控制。仿真实验证明了 FTH-

PN 在 CPS 状态分析和行为预测上的有效性。

2 模糊时间混合 Petri 网

2.1 模糊时间混合 Petri 网系统

基于文献[18-21],本文定义了一种模糊时间混合 Petri 网(FTHPN),用于分析 CPS 中连续过程和离散事件的交互以及不确定性因素对系统的影响。该模型以动态方程描述系统中连续变量的演化过程,并引入模糊时间区间分析系统状态迁移过程中的不确定性。

定义 1 模糊时间混合 Petri 网系统(FTHPN's)

$FHPN's = (P, T, F, R, C, E, U, \omega, \kappa, \alpha, \beta, \gamma, \tau, M_0)$ 是一个十四元组,其中:

(1) $P = P_C \cup P_D, P_C = \{p_C\}$ 为连续库所 p_C 的有限集, $P_D = \{p_D\}$ 为离散库所 p_D 的有限集, $P_C \cap P_D = \emptyset$ 。 p_C 中的令牌记为 $\Delta_{p_C} = \{\lambda\}$, 为连续令牌 λ 的有限集; p_D 中的令牌记为 $\Delta_{p_D} = \{\delta\}$, 为离散令牌 δ 的有限集, λ 和 δ 的具体说明见定义 3。

(2) $T = T_C \cup T_D, T_C = \{t_C\}$ 为连续变迁 t_C 的有限集, $T_D = \{t_D\}$ 为离散变迁 t_D 的有限集, $T_C \cap T_D = \emptyset$ 。

(3) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是库所与变迁之间流关系的有限集。

(4) $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{|P_C|}\}$ 是一类状态演化方程组的有限集。

(5) $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{|T_C|}\}$ 是一组规约的有限集。

(6) $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{|T_D|}\}$ 是离散事件的有限集。

(7) $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{|T_D|}\}$ 是模糊时间区间的有限集合,具体说明见定义 2。

(8) $\omega: F \rightarrow N^+, \omega(f)$ 为流关系 $f \in F$ 上的权值。

(9) $\kappa: P \rightarrow N^+, \kappa(p)$ 为库所 $p \in P$ 的容量。

(10) $\alpha: P_C \rightarrow R, \alpha(p)$ 是连续库所 $p \in P_C$ 所对应的状态演化方程组 $r \in R$, 在某个系统状态标识 M_i 下, 对于 $\forall \lambda_j \in M_i(p_C)$, 连续令牌 λ_j 依照 r 进行演化。

(11) $\beta: T_C \rightarrow C, \beta(t)$ 是连续变迁 $t \in T_C$ 所对应的规约 $c \in C$ 。

(12) $\gamma: T_D \rightarrow E, \gamma(t)$ 是离散变迁 $t \in T_D$ 所对应的离散事件 $e \in E$ 。

(13) $\tau: T_D \rightarrow U, \tau(t)$ 是离散变迁 $t \in T_D$ 所对应的模糊时间区间 $u \in U$ 。

(14) M_0 是初始标识, 表示最初的系统状态。

定义 2 模糊时间区间

模糊时间区间 u 是离散变迁 t 发生所需时间的可能性分布。例如, $\tau(t) = u = [3, 4, 5, 6]$ 说明离散变迁 t 在 $[4, 5]$ 发生的可能性是 1, 在 $[3, 4]$ 和 $[5, 6]$ 发生的可能性小于 1。其梯形图如图 1 所示。

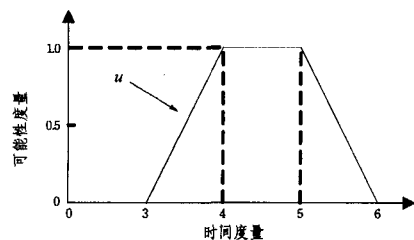


图 1 模糊时间区间

定义3 连续令牌和离散令牌

连续令牌 λ 是一个 n 维向量,用于描述实体的连续属性,记为 $\lambda=(a_1, a_2, \dots, a_n)$,其中分量 a_i 的定义域为 A_i ,则 $\lambda \in A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ 。连续令牌 λ 由与其相关的变迁 $t \in T$ 触发而产生或消耗,其所描述的实体属性值则随 λ 的库所 $p \in P_C$ 对应的状态演化方程组 $\alpha(p)$ 进行演化。

离散令牌 δ 是一个 m 维向量,用于描述实体的离散属性,记为 $\delta=(d_1, d_2, \dots, d_m)$,设分量 d_j 的定义域为 D_j ,则 $\delta \in D_1 \times D_2 \times \dots \times D_m$ 。离散令牌 δ 由与其相关的变迁 $t \in T$ 触发而产生或消耗,其分量在令牌产生时即已确定,在被消耗之前不发生变化。

定义4 状态标识集 M

状态标识是对系统状态的描述。将某一时刻的令牌分布定义为系统的一个状态标识 M_i ,所有系统状态的集合记为 $M=\{M_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 。本文采用库所和令牌的集合表示某个状态标识,即 $M_i = \{(p_C, \Delta_{p_C}), (p_D, \Delta_{p_D})\}$,没有令牌的库所不出现在集合中。若 M_j 通过变迁 t 的发生直接可达 M_k ,则其记为 $M_j[t]M_k$ 。

2.2 模糊时间混合 Petri 网的变迁触发规则

FTHPN 在同一个模型框架下将系统划分为连续和离散两个部分来建模。连续部分包括连续库所和连续变迁,用于描述系统中连续变量的演进过程;离散部分包括离散库所和离散变迁,用于描述系统中离散事件的动态迁移。连续部分与离散部分之间通过状态的变化进行通讯和交互,共同对系统的整体行为施加影响。

定义5 连续变迁的使能规则

对 $t_C \in T_C$,若在 M_i 状态下满足

$$\begin{cases} \forall p \in \cdot t_C \rightarrow |M_i(p)| \geq \omega(f_{p \rightarrow t_C}) \\ \forall p \in \cdot t_C \cap P_C, \exists \lambda \in \Delta_p \rightarrow \beta^\lambda(t_C) \\ \forall p \in \cdot t_C \cap P_D, \exists \delta \in \Delta_p \rightarrow \beta^\delta(t_C) \end{cases} \quad (1)$$

则连续变迁 t_C 是使能的,记为 $M_i[t_C]$ 。式(1)中 $\beta^\lambda(t_C)$ 和 $\beta^\delta(t_C)$ 分别表示 λ 和 δ 满足 t_C 对应的规约 $\beta(t_C)$, $\omega(f_{p \rightarrow t_C})$ 为弧 $f_{p \rightarrow t_C}$ 上的权值。

定义6 离散变迁的使能规则

对 $t_D \in T_D$,若在 M_i 状态下满足

$$\forall p \in \cdot t_D \rightarrow |M_i(p)| \geq \omega(f_{p \rightarrow t_D}) \quad (2)$$

则变迁 t_D 是使能的,记为 $M_i[t_D]$ 。

定义7 状态迁移规则

若 M_i 状态下,变迁 $t \in T$ 的发生产生新的状态标识 M_{i+1} ,则其记为 $M_i[t]M_{i+1}$,

$$M_{i+1}(p) = \begin{cases} M_i(p) \setminus \overrightarrow{\beta_p(t)} \cup \overrightarrow{\beta_p(t)}, & \text{if } p \in \cdot t \cup t \cdot \wedge t \in T_C \\ M_i(p) \setminus \overrightarrow{\gamma_p(t)} \cup \overrightarrow{\gamma_p(t)}, & \text{if } p \in \cdot t \cup t \cdot \wedge t \in T_D \\ M_i(p), & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\overrightarrow{\beta_p(t)}$ 和 $\overleftarrow{\beta_p(t)}$ 分别表示 t 发生时,在库所 p 中根据规约 $\beta_p(t)$ 所消耗的令牌和产生的令牌; $\overrightarrow{\gamma_p(t)}$ 和 $\overleftarrow{\gamma_p(t)}$ 分别表示 t 发生时,在库所 p 中根据离散事件 $\gamma_p(t)$ 所消耗的令牌和产生的令牌。

3 信息物理融合系统行为建模

本文以一个特定领域为背景,选取典型的 CPS 系统进行建模并分析其动态行为。

在铁路交通领域,列车运行调整系统(Train Operation Adjustment System, TOAS)中既有状态参数的连续变化,如列车距离下一站点的里程、运行速度等;又有大量辅助运行设备的交互和通讯,如速度传感器、信号系统等;还涉及到人对系统的控制和影响,例如由驾驶员操作的列车加速、制动等^[21]是一类典型的 CPS。TOAS 的系统特征能够体现出 CPS 的一些典型、共性的行为和状态演化方式,对其进行建模分析和行为预测是研究 CPS 系统行为的有效手段。孟令云等^[22]提出一种两阶段带补偿的随机期望值模型,从列车运行调整角度研究了单线铁路区间能力失效持续时间不确定所带来的问题;章优仕等^[23]研究了列车运行调整的优化问题,提出一种单线列车运行图的离散事件拓扑图模型及运行调整修复算法。以上方法和模型从控制优化的角度对 TOAS 中的时间不确定性因素和离散事件之间的相互作用进行了研究并取得了良好的效果,但这些方法从根本上讲都是一类离线分析模型,也难以对列车内部连续变量和离散事件的频繁交互及时做出反应。更重要的是,TOAS 是一个有人参与的系统,合理地体现人在系统中的作用是非常有必要的。以下的分析过程将列车、事件、状态和人均作为一个系统的组成部分来整体考虑。

3.1 TOAS 运行过程分析

TOAS 的运行过程可分为运行、调整、修正、稳定 4 个阶段,如图 2 所示。这 4 个阶段循环往复,使列车正常、安全地从出发地行驶往目的地。在这期间,列车的运行状态由速度、温度、压力等传感器监测,运行控制系统根据这些状态参数决定列车在何种状况下进行调整,并在调整后根据预期值和实际运行值进行比对和修正。当列车完成调整进入稳定状态后,继续步入正常运行。

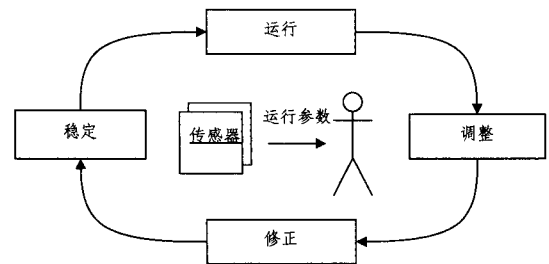


图2 TOAS运行过程

在图2所示的运行过程中,“操作员”和“传感器”在运行控制中起到了至关重要的作用。在此需要说明的是,“操作员”并不是仅仅泛指列车的驾驶员,也包括行车控制计算机、自动驾驶仪等能够对传感器捕获的参数进行信息处理和实时控制的计算单元。

3.2 TOAS 运行模型

基于对 TOAS 运行过程的分析,运用模糊混合 Petri 网建立 TOAS 运行模型(TOFTHPN)(见图4)。TOAS 运行过程涉及众多的物理、计算单元及其之间的通讯和交互,为了简化描述,在图3的模型中仅对列车、传感器和操作员(人类)3类主要的实体进行研究,分析它们的交互、协同、演化和涉及

的不确定性问题。

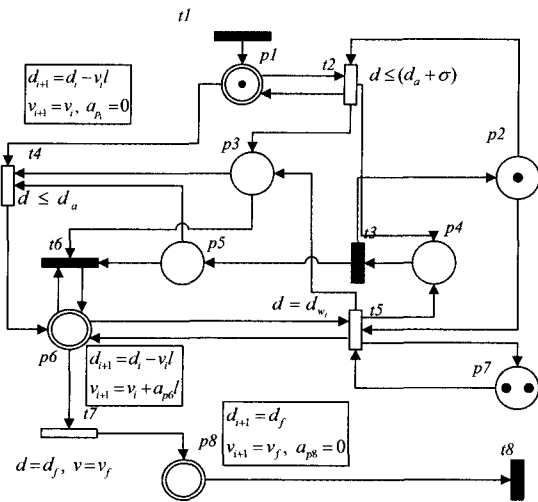


图3 TOAS的模糊时间混合Petri网模型

在图3所示的模型中用双线圆形表示连续库所,其中令牌 λ 的值为列车状态向量;连续变迁用空心矩形表示;离散库所使用单线圆形表示;离散变迁 T_D 用实心矩形表示。各变迁的含义见表1,库所的含义见表2。

表1 TOFTHPN中变迁的含义

变迁或事件	对应的规约	模糊时间区间	含义
t_2	$d \leq (d_a + \sigma)$	—	列车与终点的距离 d 满足发出调整指令的时机, d_a 为调整点与终点的距离, σ 为距离提前量
t_4	$d \leq d_a$	—	列车与终点的距离 d 满足进行速度调整的条件
t_5	$d = d_{w_i}$	—	列车到达某个监测点 d_{w_i} , 具体的 d_{w_i} 值由其前置离散库所中的令牌决定
t_7	$d = d_f, v = v_f$	—	列车与终点的距离为 d_f 时, 达到了速度要求 v_f
t_1	准备进行速度调整动作	$[0, 0, 0, 0]$	列车进入速度调整的准备
t_3	发出指令动作	$[c_1, c_2, c_3, c_4]$	操作员发出速度调整指令动作, 完成动作所需时间的可能性分布为 $[c_1, c_2, c_3, c_4]$
t_6	设定速度调整参数	$[s_1, s_2, s_3, s_4]$	列车控制系统根据操作员指令和列车运行情况设定速度调整参数, 完成设定所需时间的可能性分布为 $[s_1, s_2, s_3, s_4]$
t_8	结束速度调整动作	$[0, 0, 0, 0]$	列车完成速度调整

表2 TOFTHPN中库所的含义

库所	关联方程组	含义
p_1	$d_{i+1} = d_i - v_i l, v_{i+1} = v_i, a_{p_1} = 0$	列车处于匀速运行阶段
p_6	$d_{i+1} = d_i - v_i l, v_{i+1} = v_i + a_{p_6} l$	列车处于速度调整阶段, 其加速度 a_{p_6} 由传感器参数计算得到
p_8	$d_{i+1} = d_f, v_{i+1} = v_f, a_{p_8} = 0$	列车保持调整后的速度, 匀速运行
p_2	—	操作员处于空闲状态
p_3	—	根据传感器参数和当前列车状态, 应施加给列车的加速度
p_4	—	操作员准备进行速度调整
p_5	—	操作员完成速度调整指令的下达
p_7	—	列车速度传感器

TOFTHPN中, 连续库所集 $P_C = \{p_1, p_6, p_8\}$, 连续变迁集 $T_C = \{t_2, t_4, t_5, t_7\}$; 离散库所集 $P_D = \{p_2, p_3, p_4, p_5, p_7\}$, 离散变迁集 $T_D = \{t_1, t_3, t_6, t_8\}$; 初始标识 $M_0 = \{(p_C, \Delta_{p_C}),$

$(p_D, \Delta_{p_D})\} = \{(p_1, \{\lambda_1\}), (p_2, \{\delta_1\}), (p_7, \{\delta_2, \delta_3\})\}$, $\lambda_1 = (d_1, v_1, 0)$, 表示这一时刻列车与终点间的距离为 d_1 , 瞬时速度为 v_1 , 加速度为0; $\delta_1 = (operator_1)$, 表示操作员 $operator_1$ 负责速度调整; $\delta_2 = (d_{w_1})$, $\delta_3 = (d_{w_2})$ 表示在与终点相距 d_{w_1} 和 d_{w_2} 处分别放置了一个列车速度传感器。由于本文模型只针对单辆列车进行分析, 因此流关系的权值 $\omega = 1$ 。

3.3 TOFTHPN模型特点

较以往的TOAS模型^[21-23], TOFTHPN表现出如下特点:

(1)体现了列车运行系统内部连续变量的演化对系统状态迁移的影响, 例如, 连续变量 d 在关联方程组 $d_{i+1} = d_i - v_i l, v_{i+1} = v_i, a_{p_1} = 0$ 的约束下进行演化, 符合规约 $d \leq (d_a + \sigma)$ 并满足资源要求时, 系统随即发生状态迁移;

(2)体现了人的参与和人与系统中其他实体间的相互作用与反馈, 例如, 连续变迁 t_2, t_5 和离散变迁 t_3 的发生均与操作员所处的状态有关, 当操作员处于非空闲状态时, 相关变迁均不能发生;

(3)体现了内部实体的平等有效通讯, 例如, 连续变迁 t_5 的前置库所包括 p_2, p_6, p_7 , 其分别表示操作员、列车、速度传感器, t_5 代表这些实体之间的同步和通讯, 当满足规约 $d = d_{w_i}$ 时, 这些实体共同作用, 使系统发生状态迁移;

(4)体现了不确定性因素对系统行为的影响, 例如, 与离散变迁 t_3 相关的模糊时间区间 $[c_1, c_2, c_3, c_4]$ 说明, 操作员将在一个不确定的时间点完成速度调整指令的下达并将操作员状态恢复到空闲, 接下来的系统状态演化将以这个不确定时间点为基准重新开始计时, 系统此后的行为也将因这个不确定时间点出现的早或晚而表现出差异。

4 行为分析与预测

根据TOFTHPN所描述的TOAS运行过程, 对TOAS进行如下分析: (1)时间不确定性问题与操作提前量的预测; (2)传感器间隙的列车状态偏移量估计; (3)实体间通讯与加速度的迭代修正; (4)带人因条件的紧急避险。这些问题的研究和分析, 对TOAS行为的预测有着重要意义。

4.1 列车速度调整过程的TOFTHPN描述

TOFTHPN描述了TOAS从运行/调整临界状态 $M_0 = \{(p_1, \{\lambda_1\}), (p_2, \{\delta_1\}), (p_7, \{\delta_2, \delta_3\})\}$ 到稳定/运行临界状态 $M_f = \{(p_2, \{\lambda_f\}), (p_7, \{\delta_2, \delta_3\}), (p_8, \{\delta_f\})\}$ 的全过程。为了方便说明, 在状态标识中仅标出带有令牌的库所的下标, 例如 $M_0 = \{(p_1, \{\lambda_1\}), (p_2, \{\delta_1\}), (p_7, \{\delta_2, \delta_3\})\}$ 标记为 $M_0(1, 2, 7)$ 。调整过程描述如下:

首先, 模型中的连续变量 d 在连续库所 p_1 的关联方程组 $d_{i+1} = d_i - v_i l, v_{i+1} = v_i, a_{p_1} = 0$ 的约束下进行演化, 即列车匀速运行, 处于运行/调整临界状态。

设 k_1 时刻 p_1 中的连续令牌为 $\lambda_{k_1} = (d_{k_1}, v_{k_1}, 0)$, 若此时 $d_{k_1} \leq (d_a + \sigma)$, 满足规约 $\beta(t_2)$, 且 t_2 的离散输入库所 p_2 内有令牌, 则 t_2 使能并触发, 使状态标识更新为 $M_{k_1}(1, 3, 4, 7)$ 。此时 p_1 内的连续令牌 λ_{k_1} 和 p_2 内的离散令牌 δ_1 被消耗, 同时 p_1 获得新的令牌 $\lambda'_{k_1} = (d'_{k_1}, v'_{k_1}, 0)$, 其中 $d'_{k_1} = d_{k_1}, v'_{k_1} = v_{k_1}$; p_3 获得令牌 $\delta_5 = (a_{k_1})$, 表示根据 $train_i$ 当前状况应施加的加速度为 a_{k_1} ; p_4 获得令牌 $\delta_6 = (operator_1)$, 表示操作员

operator₁ 准备进行速度调整。此后,离散变迁 t_3 使能并触发,在时间延迟 $[c_1, c_2, c_3, c_4]$ 后,系统标识更新为 $M'_k(1, 2, 3, 5, 7)$, p_4 中的令牌被消耗, p_2 获得令牌 $\delta_7 = (operator_1)$, p_5 获得令牌 $\delta_7 = (operator_1)$, 表示操作员 $operator_1$ 已完成调整动作。与此同时, λ'_1 根据方程组 $\alpha(p_1)$ 继续演进。

设 k_2 时刻 p_1 中的连续令牌为 $\lambda_{k_2} = (d_{k_2}, v_{k_2}, 0)$, 若 $d_{k_2} \leq d_a$, 满足规约 $\beta(t_4)$, 且 t_4 的离散输入库所 p_3, p_5 内有令牌(表示加速度已计算完毕,且操作员已下达指令), 则 t_4 使能并触发,使状态标识更新为 $M_{k_2}(2, 6, 7)$ 。此时 p_1, p_3, p_5 内的令牌 $\lambda_{k_2}, \delta_5, \delta_6$ 被消耗, p_6 获得令牌 $\lambda'_{k_2} = (d'_{k_2}, v'_{k_2}, a_{k_1})$, 其中 $d'_{k_2} = d_{k_2}, v'_{k_2} = v_{k_2}, a_{k_1}$ 为 δ_5 所携带的加速度值。此后, λ'_{k_2} 根据方程组 $\alpha(p_6)$ 继续演进。

设 k_3 时刻 p_6 中的连续令牌为 $\lambda_{k_3} = (d_{k_3}, v_{k_3}, a_{k_1})$, 若 $d_{k_3} = d_{w_1}$, 即到达第一个速度传感器的位置, 满足规约 $\beta(t_5)$, 且 t_5 的离散输入库所 p_2, p_7 内有令牌(表示传感器可用,且操作员空闲), 则 t_5 使能并触发,使状态标识更新为 $M_{k_3}(3, 4, 6, 7)$ 。此时 p_2, p_6, p_7 内的令牌 $\delta_7, \lambda_{k_3}, \delta_2$ 被消耗, 同时 p_6 获得新令牌 $\lambda'_{k_3} = (d'_{k_3}, v'_{k_3}, a_{k_1})$, 其中 $d'_{k_3} = d_{k_3}, v'_{k_3} = v_{k_3}$; p_7 获得新令牌 $\delta_8 = (d_{w_1})$, p_3 获得令牌 $\delta_9 = (a_{k_3})$, p_4 获得令牌 $\delta_{10} = (operator_1)$ 。此后,离散变迁 t_3 使能并触发,在时间延迟 $[c_1, c_2, c_3, c_4]$ 后,系统标识更新为 $M_{k_3}(2, 3, 5, 6, 7)$, p_4 中的令牌被消耗, p_2 获得令牌 $\delta_{11} = (operator_1)$, p_5 获得令牌 $\delta_{12} = (operator_1)$, 与此同时, λ'_{k_3} 根据方程组 $\alpha(p_6)$ 继续演进。随后,离散变迁 t_6 使能并触发,在时间延迟 $[s_1, s_2, s_3, s_4]$ 后,系统标识变为 $M'_{k_3}(2, 6, 7)$, p_3, p_5, p_6 中的令牌被消耗,同时 p_6 获得新令牌 $\lambda'_{k_3} = (d'_{k_3}, v'_{k_3}, a_{k_3})$, 并继续根据方程组 $\alpha(p_6)$ 演进。

设 k_4 时刻 p_6 中的连续令牌为 $\lambda_{k_4} = (d_{k_4}, v_{k_4}, a_{k_3})$, 若此时 $d_{k_4} = d_{w_2}$, 即根据第二个速度传感器所测参数进行加速度的调整,与 k_3 时刻的运行过程类似,在此不再赘述。其间,系统标识依次更新为 $M'_{k_4}(2, 3, 5, 6, 7)$ 和 $M_{k_4}(2, 6, 7)$, p_6 中的令牌更新为 $\lambda'_{k_4} = (d'_{k_4}, v'_{k_4}, a_{k_4})$ 。

设 k_5 时刻 p_6 中的连续令牌为 $\lambda_{k_5} = (d_{k_5}, v_{k_5}, a_{k_5})$, 若 $d_{k_5} = d_f$ 且 $v = v_f$, 满足规约 $\beta(t_7)$, 则 t_7 使能并触发,使状态标识更新为 $M_{k_5}(2, 7, 8)$ 。此时 p_2, p_6, p_7 内的令牌 $\delta_7, \lambda_{k_5}, \delta_2$ 被消耗,同时 p_8 获得令牌 $\lambda_{k_5} = (d_f, v_f, 0)$ 。最后, t_8 使能并触发,表明列车调整速度的过程结束。

上述关键时刻系统状态的可达图如图 4 所示,该图是进行系统状态分析的基础。

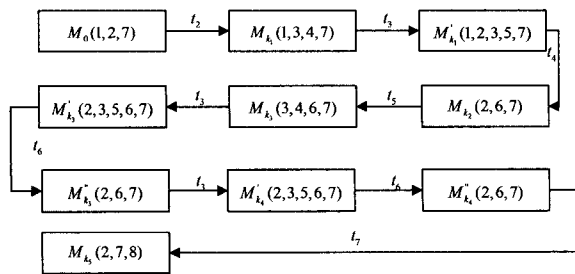


图 4 TOFTHPN 模型关键时刻的状态可达图

需要注意的是,图 4 中的 $M_{k_3}(2, 6, 7)$ 和 $M'_{k_4}(2, 6, 7)$ 虽然令牌分布相同,但由于分别是 k_3 和 k_4 时刻的系统状态, p_6 中的连续令牌分别为 $\lambda_{k_3} = (d'_{k_3}, v'_{k_3}, a_{k_3})$ 和 $\lambda'_{k_4} = (d'_{k_4}, v'_{k_4}, a_{k_4})$,

a_{k_4} , 其所携带的列车距离、速度、加速度参数均不相同,因此不能认为是同一个系统状态。同样的解释也适用于 $M_{k_3}(2, 3, 5, 6, 7)$ 和 $M'_{k_4}(2, 3, 5, 6, 7)$ 。

4.2 时间不确定性问题与操作提前量的预测

根据 4.1 节所描述的速度调整过程,分析人的行为对列车调整速度时所需操作提前量的影响。

在文献[21]中,将速度调整指令的下达和完成视为一个原子事件,没有考虑人处理信息并完成动作所需的反应时间。实际上,在 TOAS 这类物理单元和计算单元融合的系统中,人的参与所带来的智能性和不确定性是并存的,需要在模型层面体现人在智力、体力上的局限性^[24],并进行合理的分析和度量。

TOFTHPN 在建模中考虑了操作员处理信息并下达指令的时间延迟,即人的反应速度。为了使列车在到达调整点 d_a 时立即进入速度调整状态,在规约 $\beta(t_2)$ 中引入了提前量 σ 。由于操作员处理信息并发出动作的过程需要在一个模糊时间区间 $u_1 = [c_1, c_2, c_3, c_4]$ 内完成,且根据传感器参数完成加速度的设定(通常为刹车或提速)所需的时间为 $u_2 = [s_1, s_2, s_3, s_4]$, 因此进行速度调整所需的时延分布在一个模糊时间区间 D 内:

$$D = u_1 + u_2 = [c_1 + s_1, c_2 + s_2, c_3 + s_3, c_4 + s_4] \quad (4)$$

设列车在到达调整点 d_a 前以匀速 v 运行,由匀速运动公式可得:

$$\sigma = D \cdot v = [v(c_1 + s_1), v(c_2 + s_2), v(c_3 + s_3), v(c_4 + s_4)] \quad (5)$$

由式(5)可知,操作员一般应在列车到达 $[d_a + (c_2 + s_2) \cdot v, d_a + (c_3 + s_3) \cdot v]$ 距离区间时提前进行速度调整的相关动作,若列车已驶过 $d_a + (c_1 + s_1) \cdot v$, 则操作员很难及时反应并在 d_a 点完成速度调整。

4.3 传感器间隙的列车状态偏移量估计

在 4.1 节所述过程中,为了对列车速度进行调整,设置了两个传感器 w_1, w_2 分别在距离 d_{w_1} 和 d_{w_2} 测量列车参数,以计算其加速度。 k_3 时刻 p_6 中的连续令牌为 $\lambda_{k_3} = (d_{k_3}, v_{k_3}, a_{k_1})$, 随后发生的变迁 t_5 通过传感器 w_1 测定了列车速度并重新计算了加速度 a_{k_3} , 在 t_3, t_6 发生后将 p_6 中的令牌更新为 $\lambda'_{k_3} = (d'_{k_3}, v'_{k_3}, a_{k_3})$ 。

若不考虑 t_3, t_6 所需的时间,可以用 t_5 发生时的当前速度 v_{k_3} 和当前距离 d_{k_3} 计算 a_{k_3} 。但 t_3, t_6 的发生造成了时间延迟上的不确定性,在 t_3, t_6 发生期间, p_6 中连续令牌所代表的列车状态一直在随时间进行演化,速度和位移都发生了改变。

由式(4)可计算 t_3, t_6 的时延分布 D 。由于无法在 $k_3 + D$ 的时间区间内再次测得列车速度,需要在 k_3 时刻即对此后的车速进行预测以便计算加速度。若 t_3, t_6 的时延分布在模糊区间 D 内,与时间密切相关的速度变化 Δv 和位移变化 Δd 也将在这个区间内分布。

不失一般性,设传感器测定前列车到终点的距离为 d_0 , 速度为 v_0 , 加速度为 a_0 。若列车在经过传感器后的模糊时间区间 D 内仍然保持匀速直线运动,则

$$\begin{aligned} \Delta v &= a_0 \cdot D \\ &= [a_0(c_1 + s_1), a_0(c_2 + s_2), a_0(c_3 + s_3), a_0(c_4 + s_4)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= v_0 \cdot D + \frac{a_0 \cdot D^2}{2} \\ &= \left[\frac{(2v_0 + a_0 c_1 + a_0 s_1)(c_1 + s_1)}{2}, \frac{(2v_0 + a_0 c_2 + a_0 s_2)(c_2 + s_2)}{2}, \right. \\ &\quad \left. \frac{(2v_0 + a_0 c_3 + a_0 s_3)(c_3 + s_3)}{2}, \frac{(2v_0 + a_0 c_4 + a_0 s_4)(c_4 + s_4)}{2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可知,考虑系统中的时间不确定性因素时,根据传感器测得的速度值进行实际操作,需要对偏移量 Δv 和 Δd 的范围进行估计,以便降低这些不确定性因素所带来的系统误差。

4.4 实体间通讯与加速度的迭代修正

基于与 4.3 节相同的原因,需要在加速度的计算中考虑时间延迟因素的影响。

设目标速度为 v_f , 达到目标速度时与终点的距离为 d_f , 传感器测定前列车到终点的距离为 d_0 , 速度为 v_0 , 经模糊时间区间 D 后速度的变化为 Δv , 位移的变化为 Δd , 则此时应施加于列车的加速度为

$$a = \frac{v_f^2 - (v_0 + \Delta v)^2}{2(d_0 + \Delta d - d_f)} \quad (8)$$

将式(6)、式(7)代入式(8), 可得

$$\begin{aligned} a &= \left[\frac{v_f^2 - (v_0 + a_0 c_1 + a_0 s_1)^2}{2d_0 - 2d_f + (2v_0 + a_0 c_1 + a_0 s_1)(c_1 + s_1)}, \right. \\ &\quad \frac{v_f^2 - (v_0 + a_0 c_2 + a_0 s_2)^2}{2d_0 - 2d_f + (2v_0 + a_0 c_2 + a_0 s_2)(c_2 + s_2)}, \\ &\quad \frac{v_f^2 - (v_0 + a_0 c_3 + a_0 s_3)^2}{2d_0 - 2d_f + (2v_0 + a_0 c_3 + a_0 s_3)(c_3 + s_3)}, \\ &\quad \left. \frac{v_f^2 - (v_0 + a_0 c_4 + a_0 s_4)^2}{2d_0 - 2d_f + (2v_0 + a_0 c_4 + a_0 s_4)(c_4 + s_4)} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

因此,由式(9)可知,在考虑时间因素影响时,依据传感器参数所计算出的加速度分布于一个模糊区间内。根据物理世界普遍存在的测不准原理,人和机械设备在完成某个动作的操作响应时间上均带有一个允许的误差区间,因此很难精确给出加速度的预测,只能对其数值进行一定范围内的估计。

基于以上原理和分析,列车加速度的设定将是一个迭代过程,需要多次反馈和修正。在这个过程中,列车速度传感器与列车指挥控制系统的有效通讯起到了至关重要的作用(在本文中简化为操作员与传感器),这也是 TOFTHPN 模型中使用了多个传感器进行加速度矫正的原因。

4.5 带人因条件的紧急避障分析

为了及时对列车运行过程中可能出现的不安全因素采取紧急处理措施,保证列车满足对确定目标点的调整要求,需要对最短和最长刹车距离进行估计。

设进入紧急刹车状态时,列车速度为 v_0 , 列车允许的加速度为 a , 刹车距离为

$$d_{sop} = v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (10)$$

由于 TOFTHPN 模型中存在人和机械装置的响应时间这类不确定性因素,在计算刹车距离时也应将操作员的反应时间和装置的动作时间计入。设在反应期间的位移 Δd 可根据式(7)计算。结合式(4)、式(7),将式(10)修正为

$$d_{sop} = v_0(t - D) + \frac{a(t - D)^2}{2} + v_0 \cdot D + \frac{a_0 \cdot D^2}{2} \quad (11)$$

因末速度为 0, 有 $v_0 + at = 0$, 即 $t = -\frac{v_0}{a}$, 代入式(11), 可得

$$d_{sop} = \frac{aD^2}{2} - \frac{v_0^2}{2a} + v_0 \cdot D + \frac{a_0 \cdot D^2}{2} \quad (12)$$

式中, a_0 是进入刹车状态前列车的加速度。对 d_{sop} 求关于 a 的偏导数 $\frac{\partial d_{sop}}{\partial a} = \frac{D^2}{2} + \frac{v_0^2}{2a^2}$, 可知 $\frac{\partial d_{sop}}{\partial a} > 0$, 因此 d_{sop} 为关于 a 单调递增函数, 且

$$\begin{aligned} \frac{a_{\min} D^2}{2} - \frac{v_0^2}{2a_{\min}} + v_0 \cdot D + \frac{a_0 \cdot D^2}{2} \leq d_{sop} \leq \frac{a_{\max} D^2}{2} - \frac{v_0^2}{2a_{\max}} \\ + v_0 \cdot D + \frac{a_0 \cdot D^2}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

设 D_{\max} 为模糊区间 D 上的最大值, D_{\min} 为模糊区间 D 上的最小值, 刹车时的加速度可选范围为 $[-a_{\max}, -a_{\min}]$, 可知最长刹车距离为

$$d_{sop_{\max}} = \frac{-a_{\min} D_{\min}^2}{2} + \frac{v_0^2}{2a_{\min}} + v_0 \cdot D_{\min} + \frac{a_0 \cdot D_{\min}^2}{2} \quad (14)$$

最短刹车距离为

$$d_{sop_{\min}} = \frac{-a_{\max} D_{\max}^2}{2} + \frac{v_0^2}{2a_{\max}} + v_0 \cdot D_{\max} + \frac{a_0 \cdot D_{\max}^2}{2} \quad (15)$$

5 仿真实验

为了验证模型的有效性, 本文使用 Matlab 实现了图 4 所示的 TOAS 模糊时间混合 Petri 网模型, 并根据表 3 中的参数进行了仿真实验。其中, 人的反应速度和机械装置的响应时间依照文献[25]中的方法计算得出。通常情况下人类的正常反应时间在 0.15~0.4s 之间, 统计认为绝大多数人在不同身体状况下的反应时间应在 $[0, 1, 1]$ 区间内。同时考虑到操作员在接到指令后, 完成速度调整动作需花费的时间^[24]一般为 0.3~0.5s, 因此将操作员从产生反应到完成全部动作的模糊时间区间设置为 $[0, 0.4, 0.45, 0.9, 1.5]$ 。

表 3 列车减速过程参数取值及说明

参数取值	含义
$d=2000$	列车在距停车点 2000m 时准备进入速度调整
$v \in [0, 55.6]$	列车最大运行速度 200km/s, 即速度的调整范围为 $[0, 55.6]$, 单位为 m/s
$d_a=1600$	列车进入速度调整时与停车点距离 1600m
$d_{w_1}=800, d_{w_2}=500, d_{w_3}=300$	3 个传感器 w_1, w_2, w_3 , 分别与停车点距 800m, 500m, 300m
$d_t=0, v_t=0$	到达停车点, 速度降为 0
$a_{\min}=0.1, a_{\max}=1.2$	最小加速度为 0.1 m/s^2 , 最大加速度为 1.2 m/s^2
$[c_1, c_2, c_3, c_4]=[0, 0.4, 0.45, 0.9, 1.5]$	操作员完成动作的模糊时间区间为 $[0, 0.4, 0.45, 0.9, 1.5]$, 单位为 s
$[s_1, s_2, s_3, s_4]=[0.5, 0.8, 1.5, 3]$	设定速度调整参数的模糊时间区间为 $[0.5, 0.8, 1.5, 3]$, 单位为 s

实验方案的设计如下: (1) 模拟 TOAS 中的减速停车过程, 模型中的连续变量(列车的距离、速度等)根据系统时钟进行演进, 实体(操作员、传感器、列车)通过连续条件和离散事件进行通信和协同; (2) 在不同初速条件下, 对系统中的时间不确定性进行仿真分析, 并比较由此产生的操作提前量之间的差异; (3) 对传感器间隙列车状态偏移量的产生过程进行仿真; (4) 使用多个传感器模拟加速度的迭代修正过程; (5) 模拟列车全速行驶时(最大加速度)在不同速度下的紧急避障。根据实验方案进行减速过程模拟, 仿真结果如表 4 所列。

表4 列车减速过程仿真结果

	初速度 v_0 (m/s)				
	56	48	42	39	70
到达 d_a 前的 σ (m)	[50.4000,70.0000, 134.4000,252.0000]	[43.2000,60.0000, 115.2000,216.0000]	[37.8000,52.5000, 100.8000,189.0000]	[35.1000,48.7500, 93.6000,175.5000]	[63.0000,87.5000, 168.0000,315.0000]
经 d_a 后的 a (m/s ²)	[-0.9501,-0.9389, -0.9041,-0.8467]	[-0.7011,-0.6940, -0.6716,-0.6344]	[-0.5385,-0.5337, -0.5186,-0.4930]	[-0.4651,-0.4613, -0.4490,-0.4283]	[-1.4732,-1.4519, -1.3857,-1.2794]
经 w_1 后的 a (m/s ²)	[-0.9260,-0.9062, -0.8459,-0.7511]	[-0.6858,-0.6731, -0.6342,-0.5717]	[-0.5282,-0.5197, -0.4930,-0.4498]	[-0.4568,-0.4499, -0.4284,-0.3932]	[-1.4269,-1.3893, -1.2764,-1.1053]
经 w_2 后的 a (m/s ²)	[-0.9516,-0.9402, -0.9021,-0.8343]	[-0.7022,-0.6951, -0.6711,-0.6278]	[-0.5394,-0.5346, -0.5186,-0.4894]	[-0.4658,-0.4620, -0.4492,-0.4258]	[-1.4755,-1.4529, -1.3785,-1.2504]
经 w_3 后的 a (m/s ²)	[-0.9838,-0.9807, -0.9583,-0.8924]	[-0.7232,-0.7219, -0.7101,-0.6718]	[-0.5539,-0.5533, -0.5467,-0.5231]	[-0.4776,-0.4773, -0.4726,-0.4547]	[-1.5345,-1.5253, -1.4712,-1.3325]
经 w_1 后的 Δv (m/s ²)	[-0.8551,-1.1737, -2.1697,-3.8099]	[-0.6310,-0.8675, -1.6119,-2.8546]	[-0.4847,-0.6672, -1.2446,-2.2186]	[-0.4186,-0.5766, -1.0777,-1.9275]	[-1.3259,-1.8148, -3.3258,-5.7572]
经 w_2 后的 Δv (m/s ²)	[-0.8334,-1.1328, -2.0300,-3.3801]	[-0.6172,-0.8414, -1.5220,-2.5728]	[-0.4754,-0.6496, -1.1833,-2.0239]	[-0.4111,-0.5624, -1.0282,-1.7693]	[-1.2842,-1.7366, -3.0633,-4.9737]
经 w_3 后的 Δv (m/s ²)	[-0.8565,-1.1752, -2.1649,-3.7543]	[-0.6320,-0.8688, -1.6106,-2.8252]	[-0.4854,-0.6683, -1.2447,-2.2023]	[-0.4193,-0.5775, -1.0782,-1.9160]	[-1.3279,-1.8162, -3.3085,-5.6269]
从 d 到达停车点的 总时长(s)	[65.1195,65.5539, 67.3236,71.5594]	[75.8032,76.2130, 77.8712,81.8431]	[86.4940,86.8845, 88.4536,92.2067]	[93.0755,93.4561, 94.9787,98.6148]	[52.3140,52.7889, 54.7358,59.3699]
人因条件下最长/ 最短刹车距离(s)	15943/1357.1	11747/1003.2	9020.1/772.8	7791.6/668.85	24826/2104.7
不考虑人因条件的 最长/最短刹车距离(s)	15680/1306.7	11520/960	8820/735	7605/633.75	24500/2041.7

由于 TOAS 中存在的时间不确定性,因此除最长/最短距离外的所有指标值都以区间的形式存在。根据表中数据进行进一步的分析可知:

(1)列车的初速越大,进行速度调整前所需的操作提前量越大,人的反应速度和机械装置的响应时间决定了其需要的提前量。因此,在 TOAS 中需要对人的反应速度和机械装置的响应时间进行测定,若某些带有响应时间的实体相对固定地与另一些实体进行交互,则需要在测定其响应时间的基础上限定一个常用的响应时间区间,以确保系统安全。

(2)根据传感器进行速度调整,使得列车阶段性地运行在某个匀速或匀变速状态,但从列车运行的整个过程看来则是一个变加速过程,更多不确定性因素的影响使得列车运行速度的变化更为复杂。因此,在 TOAS 中进行速度预测只能解决短时间内的速度控制问题,良好的控制必须依赖系统中的实体间有效、平等的通讯和交互。

(3)TOAS 系统中的规约起到了基本的安全保障作用,违反参数条件的运行实例有可能引发事故。例如,表中背景为灰色的部分是初速 70m/s(即 252km/h)时列车的运行状态预测。为了能在到达停车点时使速度降为 0,需要持续赋予列车大于 1.4m/s^2 的加速度,但这已超出列车可提供的最大加速度 1.2m/s^2 ,因此列车将越过停车点,并可能导致行车事故的发生。

(4)人因条件影响了列车在紧急避险时的行为,使得考虑人因条件的紧急停车距离明显长于不考虑人因条件的理论计算值。在执行紧急避险这类实时性要求很强的任务时,需要正确估计 TOAS 系统中与任务相关实体的各类不确定性因素,并计算所求参数的极值,以便使任务执行在一个可控的范围内。对这类行为的分析,也为实时任务相关设备的设计制造提供了参考依据。

TOAS 是一类典型的 CPS,且以上问题亦为 CPS 中的共性问题,对于 TOAS 行为的分析和特点的归纳对于同类型的 CPS 系统均有参考价值。

结束语 CPS 是一类复杂系统,其内部异构单元之间的

通讯、协同和交互的形式错综复杂,对其行为的建模和预测是一个难点问题。本文以混杂系统、模糊集理论和人因学方法为基础,提出一种模糊混合 Petri 网用以分析 CPS 的结构和状态迁移,通过对一类典型 CPS 的行为进行建模和定量分析,实现了 CPS 动态行为的预测,仿真结果验证了模型的有效性。本文分析了 CPS 中的物理世界连续状态和信息世界离散事件之间的联系和交互,研究了一类 CPS 中的不确定性问题建模和系统组成单元之间的异步并发关系,为 CPS 的预测、评估和实时控制提供了有效方法。

本文存在的不足之处是,TOFTHPN 模型所涵盖的实体和实体关系较少,只是真实 CPS 的一个抽象刻画,未来的工作将对更复杂的系统和其间存在的不确定性问题进行讨论,以期进一步完善对 CPS 行为预测的模型和方法。但是,对复杂巨系统细节的建模和分析存在计算上的瓶颈问题:目前人们普遍使用的计算模型为图灵机模型,其串行处理的本质难以真正应对物理世界的复杂计算;Petri 网模型为理想的物理建模计算模型,但目前没有可实用化的硬件 Petri 网计算机。可预期的量子计算时代的到来或许能带来真正实用的量子 Petri 网计算机,届时对 CPS 的建模、分析将真正体现其信息物理融合的本质。

参考文献

- [1] Lee E. Computing Foundations and Practice for Cyber-Physical Systems; a Preliminary Report[R]. University of California, USA,2007
- [2] Lin J, Sedigh S, Miller A. A General Framework for Quantitative Modeling of Dependability in Cyber-Physical Systems; A Proposal for Doctoral Research[C] // Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference, Seattle, USA; IEEE,2009:668-671
- [3] 黎作鹏,张天驰,张菁. 信息物理融合系统(CPS)研究综述[J]. 计算机科学,2011,38(9):25-31

(下转第 47 页)

$$A_2 = (0.5, 0.2, 0.3, 0.1, 0.1), B_2 = (0.3, 0.5, 0.3)$$

规则组 S_2 :

$$A_3 = (0.7, 0.5, 0.4, 0.5, 0.4), B_3 = (0.5, 0.7, 0.5)$$

$$A_4 = (0.2, 0.5, 0.3, 0.2, 0.4), B_4 = (0.5, 0.5, 0.4)$$

容易验证这两组规则是相容的,有最大解:

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} 0.3 & 1.0 & 0.3 \\ 1.0 & 1.0 & 0.4 \\ 1.0 & 0.6 & 0.6 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

利用例 1 给出的谐调度定义计算得出两者的谐调度 $\theta(S_1, S_2) = 1$ 。这验证了相容的两组规则谐调度为 1。

结束语 本文利用模糊关系方程的理论,通过模糊关系方程的形式模糊解定义了两组模糊规则间的谐调度和矛盾度。通过实验可以看出,所给谐调度定义能准确度量两组模糊规则间的协调程度,保留相容规则、排除矛盾规则,从而为模糊规则库的管理提供了有力工具。将来我们将研究其他形式的模糊规则组的协调度,并将其应用到智能系统的研制与开发中。

参考文献

[1] 张景元. 模糊控制规则库及其优化方法[J]. 淄博学院学报:自然科学与工程版, 2000(3):13-16

[2] 张文修,梁怡. 模糊规则的谐调度与矛盾规则的排除方法[J]. 计算机学报, 1997(10):949-952

[3] Castineira E, Cubillo S, et al. Searching degrees of self-contradiction in Atanassov's fuzzy sets[J]. Mathware & soft computing, 2008, 13(2006):139-156

[4] Setnes M, Babuska R, et al. Similarity measures in fuzzy rule base simplification[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part B:cybernetics, 1998, 28(3)

[5] 宗成庆,陈肇雄. 规则库冗余性控制策略的研究[J]. 软件学报, 1997, 8(1):1-6

[6] 石松芳,宋建萍. 专家系统中知识库维护的若干问题[J]. 湖北教育学院学报, 2006(8):24-26

[7] Elstner M. SCC-DFTB: what is the proper degree of self-consistency[J]. J. Phys. Chem. A, 2007, 111:5614-5621

[8] Carmona P, Castro J L, et al. Contradiction sensitive fuzzy model-based adaptive control[J]. International journal of approximate reasoning, 2002, 30:107-129

[9] 陈新建,李建新. 关于 max-min 模糊关系方程有唯一解的充要条件[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 1998(7):73-76

[10] 汪培庄,罗承忠. 有限模糊关系方程极小解的个数[J]. 科学通报, 1985(11):814-816

[11] 罗承忠. 模糊集引论(上册)[M]. 北京:北京师范大学出版社, 2005:217-416

(上接第 30 页)

[4] Poovendran R. Cyber physical systems; Close Encounters Between Two Parallel Words[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(8):263-1366

[5] Ilic D, Xie L, Khan A, et al. Modeling Future Cyber-Physical energy Systems[C]// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting. Pittsburgh, USA; IEEE, 2008:1-9

[6] Derler P, Lee A, Vincentelli S. Modeling Cyber-Physical Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1):13-28

[7] Swain T, Couzin D, Leonard E. Real-Time Feedback-Controlled Robotic Fish for Behavioral Experiments With Fish Schools [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1):150-163

[8] Zhihao J, Pajic M, Mangharam R. Cyber-Physical Modeling of Implantable Cardiac Medical Devices [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1):122-137

[9] Calhoun H, Lach J, Stankovic J, et al. Body Sensor Networks: A Holistic Approach From Silicon to Users[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1):91-106

[10] Kinsy M, Khan O, Celanovic I. Time-Predictable Computer Architecture for Cyber-Physical Systems; Digital Emulation of Power Electronics Systems[C]// Proceedings of the 32nd Real-Time Systems Symposium. Vienna, Australia; IEEE, 2011:305-316

[11] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16):1-8

[12] Bestavros A, Kfoury A, Lapets A, et al. Safe Compositional Network Sketches; Formal Framework [C]// Proceedings of the 13th ACM International Conference on Hybrid Systems; Computation and Control. New York, USA; ACM, 2010:231-241

[13] Al-Hammouri A, Liberatore V, Al-Omari H, et al. A co-simulation platform for actuator networks[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA; ACM, 2007:383-384

[14] Tan Y, Goddard S, Prez C. A Prototype Architecture for Cyber-Physical systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1):1-2

[15] Wan K, Man K L, Hughes D. Towards a Unified Framework for Cyber-Physical Systems(CPS)[C]// 2010 First ACIS International Symposium on Cryptography, and Network Security, Data Mining and Knowledge Discovery, E-Commerce and Its Applications, and Embedded Systems. Qinhuangdao, China; IEEE, 2010:292-295

[16] Antsaklis P. On Control and Cyber-Physical Systems; Challenges and Opportunities for Discrete Event and Hybrid Systems [C]// Proceedings of the 9th International Workshop on Discrete Event Systems. Göteborg, Sweden; IEEE, 2008:28-30

[17] 蔡热文. 基于面向方面的时间 Petri 网的实时信息物理系统的建模 [D]. 广州:广东工业大学, 2012

[18] 叶阳东,王娟,贾利民. 基于模糊时间 Petri 网的列车运行时间不确定性问题的处理[J]. 铁道学报, 2005, 27(1):6-13

[19] Giua A, Seatzu C. Modeling and Supervisory Control of Railway networks using Petri Nets [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008, 5(3):431-445

[20] Lesire C, Tessier C. Particle Petri Nets for Aircraft Procedure monitoring under Uncertainty[C]// Applications and Theory of Petri Nets 26th. Miami, FL, USA; Springer, 2005:329-348

[21] 叶阳东,程少芬,王旭,等. 基于一种混合 Petri 网的列车运行系统的建模与分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(5):42-49

[22] 孟令云,杨肇夏,李海鹰. 单线铁路区间能力失效条件下列车运行调整模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(4):885-894

[23] 章优仕,金炜东. 单线列车运行调整的梯度搜索算法仿真与研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11):2496-2501

[24] 戴晓峰,刘澜. 铁路系统安全的人因研究综述[J]. 人类工效学, 2007, 13(4):51-54

[25] Koval O, Floyd L. Human Element Factors Affecting Reliability and Safety [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(2):406-414