

重载列车上人员攀车行为感知及其时间自动机模型

王 瑾 孙景昊 何兴权 孟亚坤

(东北大学计算机与通信工程学院 沈阳 510275)

摘 要 重载列车进港安全监测是我国港口信息化建设中的重点和难点问题。实现列车运行过程追踪自动化对于保证安全高效完成列车进港监测具有十分重要的作用。在速度触发的条件下,设计了能够实时感知人员攀车行为的低功耗信息物理系统,并基于时间自动机理论给出了该系统的实时行为模型。应用 UppAal 工具仿真了系统的运行轨迹,并验证了系统可达性、安全性、活性和实时性等系统关键性质。实验结果表明,系统不仅在逻辑上满足正确性,而且在任何系统状态上都不会对时间约束发生偏移性错误。

关键词 重载列车,安全监测,时间自动机,UppAal

中图法分类号 TP301 **文献标识码** A

Safety Supervision System for Heavy Haul Railway: Timed Automaton Model and Verification

WANG Jin SUN Jing-hao HE Xing-quan MENG Ya-kun

(School of Communication and Computer Engineering, Northeastern University, Shenyang 510275, China)

Abstract Safety supervision for trains approaching port is an important and difficult issue in China port information construction. Realizing full automation of train traveling process tracing plays a very significant role in ensuring safety and high efficiency in supervision in port. A cyber-physical system was designed to deal with the incident when some person climbs the train traveling on the heavy haul railway, and an associated timed automaton model was proposed to describe the real-time behaviors of the system. A random run sequence was simulated by the UppAal tool, and the verification results show that the system designed in this paper satisfies the critical properties, such as reachability, security, liveness and timing constraints.

Keywords Heavy haul railway, Safety supervision, Timed automaton, UppAal

1 前言

煤炭长期以来占据我国能源消耗的 70% 左右,对国民经济具有举足轻重的影响^[1]。由于我国的主要煤炭矿区和用煤区域分布差异,煤炭运输形成了先由重载列车运输到沿海港口,再由港口集散中转即“西煤东运”、“北煤南运”的瓶颈式能源运输格局^[2]。这造成了我国煤炭港口异常繁忙,甚至超负荷运行,安全问题成为港口生产面临的巨大难题。

以我国最大的煤炭港口秦皇岛港为例,秦港集团技术专家于 2012 年 9 月在《港口物联网技术研讨会》^[3]上曾提到:“在大秦线上闲杂人员攀车行为时有发生,每天经由大秦线进港的重载车厢就有万节之多,仅靠人力和机械的传统排查方法已经无法保证煤炭安全接卸,翻车机房中人员伤亡事故每年都有发生。”在现阶段,我国将港口扩能扩容及重载列车专用铁路建设纳入到“十二五”规划,预计到 2015 年我国主要煤炭港口的接卸能力将翻一番,这意味着港口生产安全问题将变得更加不容小觑,能够保障港口生产零事故的新科技和新科技亟待提出。

以上车厢人员检测问题可以从两个环节突破:(1)在列车

运行环节,对人员攀车行为进行感知,从根源上消除安全隐患;(2)在列车进港环节,对车厢上人员自动识别排查,将危险扼杀在事故发生之前。其中,第一个环节是利用计算机科学中缩小解空间的思想^[4],将感知到有人攀车行为的车厢标识为嫌疑车厢,只需对嫌疑车厢进行重点排查,就可完成对整辆列车的人员检测,这样大大缩小了排查范围。如果忽略了环节一,即在列车运行环节不进行人员感知,那么在环节二,即在列车进港时,就要安排大量工作人员对每节车厢进行排查,这会占用过多的人力资源。人工排查的缺陷是,人员疲劳更易造成漏检,从而降低排查的效率和准确率^[5]。

本文研究了重载列车上人员攀车行为感知系统(Safety Supervision System for Heavy Haul Railway; 3SHHR),该系统由感应器、接收器和控制器 3 个子系统构成。其中,感应器实时感知人员攀车行为的物理特征量;接收器同步接收感应器发送的攀车行为信号量,并控制感应器进入新的感知状态;控制器以低功耗为目标,仅在速度阈值内对感应器和接收器进行触发,从而节约了大部分的电能。3 个子系统相互通信,协同工作,是一个典型的物联网服务应用。局部交互实时性是物联网系统的一大特征^[5],3 个子系统间交互信号对时间

本文受河北省青年科学基金项目(F2013501048),秦皇岛市科技支撑计划(2012021A101)资助。

王 瑾(1993—),女,主要研究领域为实时系统;孙景昊(1985—),男,博士,讲师,主要研究领域为实时系统、优化理论和时间自动机理论;何兴权(1994—),男,主要研究领域为时间自动机;孟亚坤(1987—),女,讲师,主要研究领域为实时系统。

约束的偏移,将导致攀车行为的错误感知和漏检,从而使得翻车机房内事故发生的概率大大增加,造成灾难性的后果。为了保证系统的正确性和实时性,我们基于时间自动机理论^[6,7]对该系统进行建模,并应用 UppAal 工具^[8]对系统的状态可达性、安全性、活性以及时间约束等物联网服务的 4 大特性^[9]进行验证。实验结果表明,本文的系统满足以上 4 类性质,无论在逻辑上还是时间上都是正确的。

本文第 2 节介绍 3SHHR 系统;第 3 节提出感知系统的时间自动机模型;第 4 节基于 UppAal 工具对感知系统进行验证;最后是总结。

2 人员攀车行为实时感知

3SHHR 系统主要由两部分构成:感应器和接收器。感应器安装在每节车厢的扶梯上,用来感应人员攀车时产生的压力物理量,如图 1 所示。在列车运行过程中,感应器一旦检测到扶梯上的压力信号,就立即将该信号发送给接收器。接收器安装在车头,实时接收感应器发送的人员攀车信号,并反馈接收信号,触发感应器进入新的检测状态。

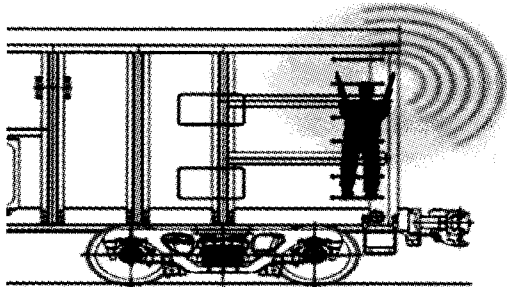


图 1 3SHHR 系统示意图

此外,在列车高速运行时,人员是不可能攀车的。为了实现系统的低功耗,本文增加了一个控制器,用于对感应器和接收器执行统一的开启和关闭。也就是说,当列车运行速度在适合攀车的速度阈值之内时,控制器触发感应器和接收器工作;当列车速度超过速度阈值时,控制器向感应器和接收器发送关闭信号,以达到节省电能的目的。

本系统是一个典型的实时系统,不仅要求所产生的结果在逻辑上是正确的。而且要求在时间上也是正确的。为了保证攀车人员感知系统的正确性,采用形式化方法对其进行描述和分析是非常重要的。在接下来的一节,我们将基于时间自动机理论对攀车行为感知系统进行形式化建模。

3 时间自动机模型

我们把时间自动机作为实时系统行为的形式化建模工具。下面先简单介绍时间自动机的基本概念。

由 Alur 和 Dill 所提出的时间自动机,是一种用于描述、分析实时系统行为的形式化模型。它在有限状态机的基础上扩充了取实数值的时钟变量,用以刻画连续变化的时间。该理论的一个重要性质是:检测时间自动机中任意状态是否可达的问题是可判定的。人们研发出多种模型检测工具^[9],其中,UppAal 由 Aalborg 大学和 Uppsala 大学于 1995 年联合提出,是应用最广泛的模型检测工具之一。本文中利用 UppAal 工具对缩写系统进行模型验证。

本文使用的时间自动机中的符号如下:

Chan:所有通道名的集合。

Act:所有行为的集合,包括输入、输出和内部 3 类行为,即:

$$\text{Act} = \{a? \mid a \in \text{Chan}\} \cup \{a! \mid a \in \text{Chan}\} \cup \{\text{In}\}.$$

Clock:所有的时钟变量。

在时钟变量集合 $C \subseteq \text{Clock}$ 的取值上可以建立一些约束条件,统称为保卫公式,记为 $\Phi(C)$,由变量集合、基本运算符和比较运算符按一定语法构成。

除了对变量取值进行约束外,还可以对变量进行赋值操作。假设 $C \subseteq \text{Clock}$,则其上的赋值操作记为 $R(C)$ 。时钟变量只有重置赋值,即 $c \in C, c := 0$,赋值操作序列表示为 $R(C) *$ 。

下面给出时间自动机的定义:

定义 1 一个时间自动机是一个六元组 (A, C, S, s_0, G, E) ,其中 $A \subseteq \text{Act}$ 是动作的集合; $C \subseteq \text{Clock}$ 是时钟变量的集合; S 是有限状态集合; $s_0 \in S$ 表示初始状态; G 为一个保卫公式集合,成为状态的不变量; E 是有向边的集合,元素 $(s, \phi, a, r, s') \in E$ 表示从状态 s 到状态 s' 的有向边,边上标识有保卫公式 ϕ ,行为 $a \in A$ 和赋值操作序列 r 。

对该系统建立感应器时间自动机 sensor(见图 2)、接收器时间自动机 acceptor(见图 3)和控制器时间自动机 controller(见图 4)。

3.1 感应器时间自动机 Sensor

$\text{Sensor} = (A, C, S, s_0, G, E)$,如图 2 所示。其中,动作集合 $A = \text{输入集合 } I \cup \text{输出集合 } O$;该自动机通过信道 $vIsAvailable$ 和 $vIsExtra$ 接收 controller 的控制命令;另外,通过信道 $person$ 和 $accepted$ 与接收器 acceptor 进行交互与同步。时钟变量集合 $C = \{x\}$ 。状态集合 S 和迁移集合 E 分别包含 6 个状态和 9 条迁移,其中每个状态所关联的迁移情况如下:

(1) initialize 为初始状态,它接收到控制器 controller 发送的速度触发 $vIsAvailable?$ 信号,进入苏醒状态 $revive$,同时时钟置零。

(2) 状态 $revive$ 在满足状态不变量 $x < t_{small}$ 的情况下才会发生迁移,即在 $[0, t_{small}]$ 时间内发送 $okAvailableS!$ 信号,时钟置零;这条迁移说明时间自动机从 $revive$ 状态进入 $wait$ 状态。

(3) $wait$ 状态分为两种情况:

① 接受到 controller 发送的 $vIsExtra?$ 信号,从 $wait$ 状态迁移到 $sleeps$ 状态,并且时钟置零;这表明时间自动机进入 $sleeps$ 状态。

② 当感应到有人攀车,即接受到 $person!$ 信号,迁移到 $work$ 状态,同时时钟置零;这条迁移表明 sensor 检测到有人攀车的行为,进入 $work$ 状态。

(4) $work$ 状态分为 3 种情况:

① 在保卫公式 $x < t_{small}$ 的时钟约束下,即在 $[0, t_{small}]$ 时间内接收到接收器 acceptor 发出的 $accepted$ 信号,状态 $work$ 迁移到 s_2 ,并且时钟置零;这条迁移表明接收器已经接收到有人攀车的信号。

② 在保卫公式 $x > t_{loop}$ 的时钟约束下,发出 $person$ 信号,时钟置零;这条迁移表明在 $work$ 状态之后长时间内未接收到 acceptor 发送的 $accepted$ 信号,这就意味着 acceptor 可能未接收到人员攀车的信息,因此 sensor 再次发送攀车信号以确认。

③接受到 controller 发送的 $vIsExtra?$ 信号,状态迁移到 $sleeps$ 状态,并且时钟置零;这就表明时间自动机进入 $sleeps$ 状态。

状态 $affirm$ 在保卫公式 $x > tLoopPerson$ 的时钟约束下,发出 $rework!$ 信号,时钟置零;这条迁移表明在 $affirm$ 状态超过 $tLoopPerson$ 时间,时间自动机回到 $wait$ 状态。

在 $x < tsmall$ 的时钟约束下, $Sleeps$ 发送 $okExtraS!$ 信号给 controller,时钟置零;这表明在 $[0, tsmall]$ 时间内 sensor 发出 $okExtraS!$ 信号,同时时间自动机回到初始状态。

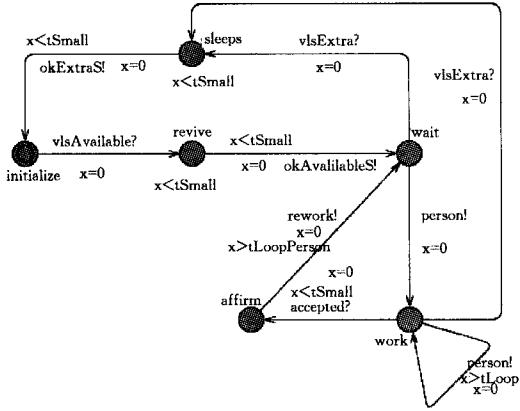


图 2 时间自动机 sensor

3.2 接收器时间自动机 Acceptor

Acceptor $\equiv (A, C, S, s_0, G, E)$, 如图 3 所示。其中,动作集合 $A =$ 输入集合 $I \cup$ 输出集合 O ;该自动机通过信道 $vIsAvailable$ 和 $vIsExtra$ 接收 controller 的控制命令;另外,通过信道 $person$ 和 $accepted$ 与感应器 sensor 进行交互与同步。时钟变量集合 $C = \{x\}$ 。状态集合 S 和迁移集合 E 分别包含 6 个状态和 8 条迁移,其中每个状态所关联的迁移情况如下:

(1)initialize 为初始状态,它接收到控制器 controller 发送的速度触发 $vIsAvailable?$ 信号,进入苏醒状态 $revive$,同时时钟置零。

(2)状态 $revive$ 满足状态不变量 $x < tsmall$ 的情况下才会发生迁移,即在 $[0, tsmall]$ 时间内发送 $okAvailableA!$ 信号,时钟置零;这条迁移说明时间自动机从 $revive$ 状态进入等待状态 $wait$ 。

(3)wait 状态分为两种情况:

①接受到 controller 发送的 $vIsExtra?$ 信号,从 $wait$ 状态迁移到 $sleepa$ 状态,并且时钟置零;这表明时间自动机进入 $sleepa$ 状态。

②接收到感应器 sensor 发出的有人人员攀车的信号,状态 $wait$ 迁移到 $work$,并且时钟置零;这条迁移表明接收器已经接受到有人攀车的信号。

(4)work 状态分为两种情况:

①接受到 controller 发送的 $vIsExtra?$ 信号,状态迁移到 $sleepa$ 状态,并且时钟置零;这就表明时间自动机进入 $sleeps$ 状态。

②在保卫公式 $x < tsmall$ 的时钟约束下,即在 $[0, tsmall]$ 时间内,发出 $accepted$ 信号,状态 $work$ 迁移到 $affirm$,并且时钟置零;这条迁移表明接收器已经反馈给感应器 $accepted$ 信号。

时间自动机出于状态 $affirm$,若接收到感应器发出的 $re-$

$work?$ 信号,状态迁移到 $wait$ 状态,同时时钟置零;这表明时间自动机回到等待状态 $wait$ 。

在 $x < tsmall$ 的时钟约束下, $Sleepa$ 发送 $okExtraA!$ 信号给 controller,时钟置零;这表明在 $[0, tsmall]$ 时间内接收器发出 $okExtraA!$ 信号,同时时间自动机回到初始状态。

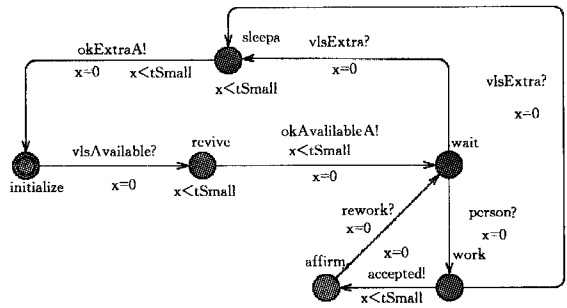


图 3 时间自动机 acceptor

3.3 控制器时间自动机 Controller

Controller $\equiv (A, C, S, s_0, G, E)$, 如图 4 所示。其中,动作集合 $A =$ 输入集合 $I \cup$ 输出集合 O ;该自动机通过信道 $vIsAvailable$ 和 $vIsExtra$ 发送控制命令给 sensor 和 acceptor。时钟变量集合 $C = \{x\}$ 。状态集合 S 和迁移集合 E 分别包含 6 个状态和 9 条迁移,其中每个状态所关联的迁移情况如下:

initialize 为初始状态,它发送 $vIsAvailable!$ 信号给感应器和接收器,进入状态 $send$,同时时钟置零;这条迁移可以控制感应器和接收器工作。

状态 $send$ 分为两种情况:

①在保卫公式 $x > tloop$ 的时钟约束下,发出 $vIsAvailable!$ 信号,时钟置零;这条迁移表明时间超过 $tloop$ 时,再次发送 $vIsAvailable!$ 信号。

②在保卫公式 $x < tsmall$ 的时钟约束下,即在 $[0, tsmall]$ 时间内接收到接收器 acceptor 反馈的 $okAvailableA?$ 信号,状态 $send$ 迁移到 $work1$,并且时钟置零;这条迁移表明接收器已经接受到控制器发出的信号,并且处于 $wait$ 状态。

$work1$ 状态分为两种情况:

①在保卫公式 $x > tloop$ 的时钟约束下,发出 $vIsAvailable!$ 信号,时钟置零;这条迁移表明时间超过 $tloop$ 时,再次向感应器发送 $vIsAvailable!$ 信号。

②在保卫公式 $x < tsmall$ 的时钟约束下,即在 $[0, tsmall]$ 时间内接收到感应器反馈的 $okAvailableS?$ 信号,状态 $work1$ 迁移到 $work$,并且时钟置零;这条迁移表明感应器已经接受到控制器发出的信号,并且处于 $wait$ 状态。

$work$ 状态在保卫公式 $x > tEnd$ 的时钟约束下,发出 $vIsExtra!$ 信号,迁移到 $work0$ 状态,并且时钟置零;这条迁移表明时间超过 $tEnd$ 时,发送 $vIsAvailable!$ 信号给感应器和接收器。

$work0$ 状态分为两种情况:

①在保卫公式 $x > tloop$ 的时钟约束下,发出 $vIsExtra!$ 信号,时钟置零;这条迁移表明时间超过 $tloop$ 时,再次向感应器和接收器发送 $vIsExtra!$ 信号。

②在保卫公式 $x < tsmall$ 的时钟约束下,即在 $[0, tsmall]$ 时间内接收到接收器反馈的 $okExtraA?$ 信号,状态 $work0$ 迁移到 $sendc$,并且时钟置零;这条迁移表明接收器已经接受到控制器发出的 $vIsExtra!$ 信号,并且回到初始状态。

Sendc 状态在保卫公式 $x < t_{small}$ 的时钟约束下,即在 $[0, t_{small}]$ 时间内接收到感应器反馈的 $okExtraS?$ 信号,时间自动机回到初始状态,并且时钟置零;这条迁移表明感应器已经接受到控制器发出的 $vIsExtra!$ 信号,并且回到初始状态。

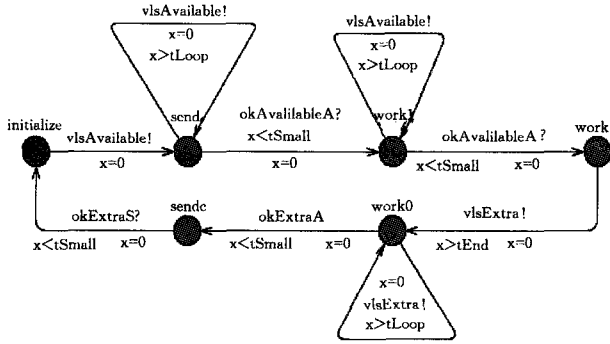


图 4 时间自动机 controller

3.4 系统行为序列分析

本系统产生的一个随机运行轨迹如图 5 所示。

```
Simulation Trace
(initialize, initialize, initialize)
vIsAvailable: controller --> sensor, accept
(revive, revive, send)
okAvailableA: acceptor --> controller
(revive, wait, work1)
okAvailableS: sensor --> controller
(wait, wait, work)
person: sensor --> acceptor
(work, work, work)
accepted: acceptor --> sensor
(affirm, affirm, work)
```

图 5 系统随机运行序列

图 5 表示的运行轨迹中,偶数行表示通信动作,奇数行则记录着各时间自动机状态的变化。

其中第 1 行表示 3 个自动机 sensor、acceptor、controller 进入初始化状态 initialize。

第 2、3 行表示控制器 controller 进入通信状态 send,向感应器 sensor、接收器 acceptor 发送速度触发信号 $vIsAvailable!$,感应器 sensor、接收器 acceptor 收到信号 $vIsAvailable?$ 进入苏醒状态 revive。

第 4、5 行表示接收器 acceptor 向控制器 controller 发送确认信号 $okAvailableA!$ 并进入待机状态 wait,控制器 controller 收到确认信号 $okAvailableA?$ 进入 work1 状态。

第 6、7 行表示感应器 sensor 向控制器 controller 发送确认信号 $okAvailableS!$ 并进入待机状态 wait,控制器 controller 收到确认信号 $okAvailableS?$ 进入 work 状态。

第 8、9 行表示感应器 sensor 检测到有人登车,进入工作状态 work,发送 $person!$ 信号给接收器 acceptor,接收器 acceptor 进入工作状态 work。

第 10、11 行表示接收器 acceptor 进入确认状态 affirm 并向感应器 sensor 发送确认信号 $accepted!$,感应器 sensor 进入确认状态。

4 基于 UppAal 的模型验证

物联网服务的正确性不仅仅在于自身的行为,更进一步要在合适的环境进行合适的行为,即必须与环境的变化适配。这一节我们将对物联网服务的时效正确性进行验证。

现在将物联网服务的时效正确性分解为以下 4 类性质,并采用 UppAal 的时序逻辑公式表达:

(1)状态可达性:表示物联网系统期望到达的某个状态。存在从初始状态开始到该状态的一条运行轨迹。状态可达主要关注环境实体的状态,表示在物联网服务的控制下,环境实体的期望状态可达。例如希望感应器的工作状态是可达的,其逻辑公式表示为: $E \langle \langle \rangle \rangle sensor.work$ 。

我们验证了 3 个自动机中所有 18 个状态均是可达的,如图 6 所示。

$E \langle \langle \rangle \rangle sensor.revive$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle acceptor.work$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle controller.initialize$ Property is satisfied.
$E \langle \langle \rangle \rangle sensor.wait$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle acceptor.initialize$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle controller.send$ Property is satisfied.
$E \langle \langle \rangle \rangle sensor.affirm$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle acceptor.revive$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle controller.work$ Property is satisfied.
$E \langle \langle \rangle \rangle sensor.sleeps$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle acceptor.wait$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle controller.work1$ Property is satisfied.
$E \langle \langle \rangle \rangle sensor.work$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle acceptor.affirm$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle controller.work0$ Property is satisfied.
$E \langle \langle \rangle \rangle sensor.initialize$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle acceptor.sleeps$ Property is satisfied.	$E \langle \langle \rangle \rangle controller.sendc$ Property is satisfied.

图 6 系统状态可达性验证结果

(2)系统安全性:我们不仅期望物联网服务在运行过程中能保证其安全性,同时也希望控制服务能使被控制的环境实体不会进入错误的状态。系统安全性表示整个物联网系统不期望的事件永不发生,例如希望整个物联网系统的运行不出现死锁,其逻辑公式表示为: $A[] \text{not deadlock}$,如图 7 所示。

```
A[] not deadlock
Property is satisfied.
```

图 7 系统安全性验证结果

(3)系统活性:表示期望的事件最终能发生。一般用于描述当被感知的环境实体处于某一状态时,被控制的环境实体也最终能进入一个特定的状态。例如希望当感应器检测到有人时能立即发射信号、接收器则能及时收到信号,其逻辑公式表示为: $sensor.work \rightarrow acceptor.work$ 。

我们还验证了当列车实时速度小于速度阈值时,系统及初始初始化;控制器发送速度触发信号时,感应器、接收器进入苏醒状态,如图 8 所示。

```
sensor.work --> acceptor.work
Property is satisfied.
controller.initialize --> sensor.initialize and acceptor.initialize
Property is satisfied.
controller.send --> sensor.revive and acceptor.revive
Property is satisfied.
```

图 8 系统活性验证结果

(4)时间约束:这类性质描述中至少包含有一个时间变量,用于强调对服务行为的时间约束是否被满足。例如希望当列车实时速度小于速度阈值时,控制器向感应器、接收器发送工作信号,感应器和接收器必须在 1s 内内进入复苏状态,其逻辑公式表示为: $controller.send \rightarrow sensor.revive \text{ and } ac-$

(下转第 130 页)

如图 2 所示,在不同的问题规模下,本文中改进的离散粒子群算法有较快的迭代速度,且随着问题求解难度的升高,本文中改进的离散二进制粒子群算法较标准的离散二进制粒子群算法的效果的差距也逐渐体现出来。在问题规模较小的情况下,如图 2(a)(b)(c)(d)所示,标准的离散二进制粒子群算法和本文中改进的离散二进制粒子群算法都可以在较短的迭代步骤中找到较好的最优解,但是随着问题规模的增加,改进的粒子群算法相对于粒子群算法的优势开始逐渐体现出来,如图 2(g)(h)中改进的离散二进制粒子群算法在迭代步骤数足够的情况下,改进的离散二进制粒子群算法找到的最优值甚至是标准的离散二进制粒子群算法的两倍。

结束语 本文中展示了一个改进的二进制离散粒子群算法。通过理论证明,改进的算法较原算法有更高的收敛速度以及最优值。通过实验对经典的离散优化问题背包问题进行的测试验证了本文中改进的二进制离散粒子群算法相对于标准的二进制离散粒子群算法具有较快的收敛速度,能在相同的迭代步骤数内找到更好的目标函数最优值。

由于实验有限,对本文中的算法通用性的讨论依然不足,能否找到一个在各种实验问题情况下都可以找出一个比较通用的高效离散粒子群算法,依然是一个值得研究的问题。

参 考 文 献

[1] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1995:1942-1948
 [2] 张顶学,关治洪,刘新芝.一种动态改变惯性权重的自适应粒子群算法[J].控制与决策,2008,23(11):1253-1257
 [3] 王丽,王晓凯.一种非线性改变惯性权重的粒子群算法[J].计算机工程与应用,2007,43(4):47-48

[4] 段晓东,高红霞,刘向东,等.一种基于种群群的自适应粒子群算法[J].计算机工程,2007,33(18):222-223
 [5] 王俊伟,汪定伟.一种带有梯度加速的粒子群算法[J].控制与决策,2004,19(11):1298-1300
 [6] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Orlando: IEEE Inc, 1997:4104-4108
 [7] 钟一文,蔡荣英.求解二次分配问题的离散粒子群优化算法[J].自动化学报,2007,33(8):871-874
 [8] 潘全科,王凌,赵保华.解决零空闲流水线调度问题的离散粒子群算法[J].控制与决策,2008,23(2):190-194
 [9] 魏明,靳文舟.求解车辆路径问题的离散粒子群算法[J].计算机科学,2010,37(4):187-191
 [10] 孙晓雅,林焰.一种新的离散粒子群算法在指派问题中的应用[J].计算机应用研究,2009,26(11):4091-4093
 [11] 郭文忠,陈国龙.一种求解多目标最小生成树问题的有效离散粒子群优化算法[J].模式识别与人工智能,2009,22(4):597-604
 [12] 张长胜,孙吉贵,欧阳丹彤.一种自适应离散粒子群算法及其应用研究[J].电子学报,2009,37(2):299-304
 [13] Clerc, Maurice. Discrete particle swarm optimization, illustrated by the traveling salesman problem[M]. New optimization techniques in engineering. Berlin Heidelberg: Springer, 2004: 219-239
 [14] 胡中华,赵敏.引入侦查子群的蚁群算法求解 0/1 背包问题[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2009,27(3):82-88
 [15] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. Natural computing, 2002, 1(2/3): 235-306
 [16] Salman A, Ahmad I, Al-Madani S. Particle swarm optimization for task assignment problem[J]. Microprocessors and Microsystems, 2002, 26(8): 363-371

(上接第 97 页)

ceptor. revive<1. 我们还验证了当列车实时速度大于速度阈值时,控制器向感应器、接收器发送休眠信号,感应器和接收器必须在 1s 内进入休眠状态,以实现我们低功耗的目的;接收器收到触发信号必须在 1s 向控制器发送确认信号;感应器收到触发信号必须在 2s 内向控制器发送确认信号,如图 9 所示。

```

acceptor.wait --> controller.work1<1
Property is satisfied.
sensor.wait --> controller.work2
Property is satisfied.
controller.send --> sensor.revive and acceptor.revive<1
Property is satisfied.
controller.sendc --> sensor.sleeps and acceptor.sleeps<1
Property is satisfied.
    
```

图 9 系统实时性验证结果

结束语 列车运行过程中对乘务人员的实时感知,可以有效缩减列车进港时对列车车厢的排查时间,能够有效提高港口作业的效率,对于实现港口信息化、自动化和智能化都起到重要作用。文中设计的 3SHHR 系统实现了对重载列车的全程追踪式感知和监控,并基于速度触发条件,实现了感知系统的低功耗目标。自动机模型从系统行为逻辑正确性和时间约束两方面入手,对 3SHHR 系统进行精准刻画。基于 UppAal 工具的验证实验表明,3SHHR 系统满足状态可达性、安全性(无死锁)、活性和实时性等物联网系统的典型关键性质。

为进一步正确设计 3SHHR 系统模块、详细电路和编码以及测试用例等奠定了理论基础。

参 考 文 献

[1] 姜子英,程建平,刘森林,等.我国煤电的外部成本初步研究[J].煤炭学报,2008,35(11):1325-1328
 [2] 陈雍君,周磊山,余吉安.重载铁路列车运行调整计划的序优化策略研究[J].铁道学报,2013,35(1):1-7
 [3] 孙景昊,白秋果,刘杰民.港口铁水联运信息协同平台关键技术研究[R].北戴河:东北大学,2012
 [4] Aho A V, Ullman J D. Foundations of computer science[M]. New York: Computer Science Press, 1992
 [5] Lee E A. Cyber-Physical Systems-Are Computing Foundations Adequate? [C]// Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap. 2006
 [6] Alur R, Dill D. A theory of timed automata [J]. Theoretical Computer Science, 1994, 126: 183-235
 [7] 谭国真,孙景昊,王宝财,等.时变网络中国邮路问题的时间自动机模型[J].软件学报,2011,22(6):1267-1280
 [8] Behrmann G, David A, Larsen K G. A tutorial on UppAal: Formal methods for the design of real-time systems[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2004: 200-236
 [9] 李力行,金芝,李戈.基于时间自动机的物联网服务建模与验证[J].计算机学报,2011,34(8):1365-1377