

一类模糊混合 Petri 网的交通信号灯的实时控制

张四平¹ 余维² 王梅¹

(湖南信息职业技术学院计算机工程系¹,长沙 410200;郑州大学信息工程学院²,郑州 450052)

摘要 针对固定周期的交通信号灯浪费道路资源的问题,提出一种模糊混合 Petri 网用于交通信号灯实时控制的建模方法。该模型结合本相位方向的排队长度和路口的车流量对本相位绿灯时长实时控制,再结合其他相位红灯时长和其他相位的排队长度,实时控制相序的变化。仿真分析表明,基于模糊混合 Petri 网对信号灯实时控制可最大程度降低车辆的停车次数。

关键词 Petri 网 模糊控制 信号控制

中图法分类号 TP301.6; **文献标志码** A

当前城市汽车数量的增长速度远高于城市的道路建设速度,使得城市道路交通日趋紧张,交通拥堵现象越来越严重,于是提高道路交通的通行能力变的越来越迫切。在城市道路交通网络运行的过程交通流量一般都会有比较明显的高峰和低谷,这就需要有不同的信号配时方案来适应不同的交通状况,随之就出现了智能信号灯控制和实时信号灯控制的相关研究。

当前,对信号灯的实时控制的相关研究有:文献[1]基于带抑制弧和使能弧的增广 Petri 网对交叉口的信号灯进行实时控制,通过采集实时的车流量信息来确定信号灯周期及各相位时长。文献[2]基于模糊逻辑对路口交通信号灯进行实时控制,使用模糊逻辑能够更好的描述交叉口信号控制的定性模型,从而对信号相位变化顺序、信号周期和信号绿灯时间进行定性分析和模糊实时控制。文献[3]基于混合 Petri 网对城市道路交通网络进行建模和仿真,采用连续 Petri 网对交叉口车流量进行建模,采用时延 Petri 网对信号灯相位变化进行建模,结合

两种 Petri 网构造混合 Petri 网来实现单个交叉口的信号控制。

Petri 网特别适合描述系统的顺序、并发、冲突和同步等现象,而交通信号灯控制就是一类典型的顺序、并发和同步系统,于是选用 Petri 网作为交通信号灯的实时控制建模的工具。本文定义了一类新的 Petri 网模型,即结合模糊时延 Petri 网、连续 Petri 网和模糊推理 Petri 网等各种 Petri 网的优势构造了模糊混合 Petri 网,然后给予该 Petri 网模型对单个交叉口的信号相序和绿灯时间进行实时控制^[4]。

1 信号灯控制

信号灯控制道路交叉口的车辆通行是保证城市道路交通安全有序运行的保障,关于信号灯控制主要给出五个概念:路段、周期、相位、绿信比和排队长度^[5]。以中国车辆靠右行驶的简单路网来解释以上五个概念。在图 1 中,连接两个交叉口之间的道路称为路段。在图 2 中,描述的信号灯为四相位的信号灯。周期是指交叉口所有流向都有一次绿灯通行的所有信号灯状态。相位是指某个流向的绿灯通行的信号灯状态,图 2 中相位 1 为东西直行,相位 2 为东西左转,相位 3 为南北直行,相位 3 为南北左转,这里不考虑右转的控制。所有相位时长之和为周期时长。绿信比是指某各相位的绿灯

2013 年 4 月 11 日收到

河南省重点科技攻关项目

(122102210004)、湖南省“四千工程”(湘经信科技

[2011]639 号)、湖南省教育厅科学研究项目(11C0936)资助

第一作者简介:张四平(1979—),讲师,硕士研究生。研究方向:软件工程, Petri 网理论,智能控制。E-mail:siping_zhang@sina.com。

时长占周期时长的比值。排队长度是指车辆在红灯时在交叉口前排队一直到变为绿灯时车辆的总排队长度。

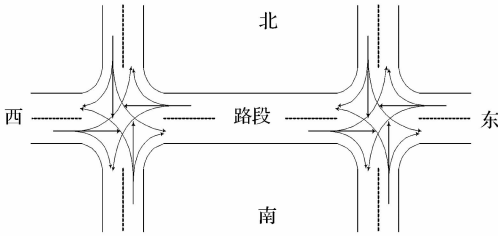


图1 两个交叉口的城市道路

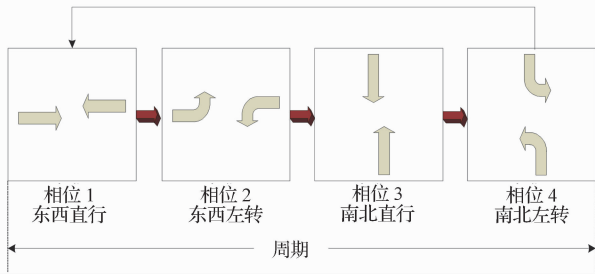


图2 交叉口信号灯相位和周期

2 模糊混合 Petri 网

以图2所示的四相位的单交叉口为例,构造模糊混合 Petri 网,其他复杂的单交叉口构造方法类似。

定义1 模糊混合 Petri 网 (Fuzzy Hybrid Petri Net, FHPN)

模糊混合 Petri 网是一个八元组

$$FDPN = \{P, T, A, DT, PP, PC, R, M_0\}。$$

其中:

(1) $P = P_d \cup P_c$, P_d 是离散库所的集合, P_c 是连续库所的集合, $P_d \cap P_c = \emptyset$, 离散库所 P_d 可分为两种库所子集合,即相位标识库所集合 P_p 和绿灯时间库所集合 P_g , $P_p \cap P_g = \emptyset$;

(2) $T = T_d \cup T_i \cup T_r$, T_d 是模糊延时变迁的集合, T_i 为瞬时变迁的集合, T_r 为模糊推理变迁的集合, $T_d \cap T_i \cap T_r = \emptyset$;

(3) $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 为输出弧和输入弧的集合;

(4) $DT: \langle P_p, T_d \rangle \rightarrow [\alpha, \beta]$ 为库所 P_p 和变迁

T_d 到正整数区间 $[\alpha, \beta]$ 的映射函数, $\alpha, \beta \in N^+$ 且 $P_p \in \bullet T_d$;

(5) $PP: P_p \rightarrow (a, b, c, d)$ 为库所 P_p 到向量 (a, b, c, d) 的映射函数, $a, b, c, d \in \{-1, 0, 1\}$;

(6) $PC: P_c \rightarrow (w, x, y, z)$ 为库所 P_c 到正实数向量 (w, x, y, z) 的映射函数, $w, x, y, z \in R^+$;

(7) $PG: P_g \rightarrow g$ 为库所 P_c 到正实数 g 的映射函数, $g \in R^+$;

(8) R 为托肯的集合, $r \in R$ 的取值由映射函数 PP, PC 和 PG 确定;

(9) M_0 为初始标识,表示系统的初始状态。

定义2 模糊延时变迁 t_d 的使能与触发规则

模糊延时变迁 $t_d \in T_d$ 使能,当且仅当: $\forall p \in I(t_d) \cap P_d, \exists r \in M(p)$ 。其中, $I(t_d)$ 为变迁 t_d 的输入库所, $M(p)$ 为库所 p 的状态标识。

模糊延时变迁 $t_d \in T_d$ 的触发规则为:如果 $\forall p \in I(t_d) \cap P_d, \exists r \in M(p), \forall p' \in O(t_d) \cap P_d$, 那么 $M(p) \rightarrow M(p) / \{r\}, M(p) \rightarrow M(p') \times \cup \{r\}$ 。其中, $/$ 表示从库所标识中去掉。

定义3 瞬时变迁 t_i 的使能与触发规则

瞬时变迁 $t_i \in T_i$ 使能,当且仅当 $\forall p \in I(t_i) \cap P_d, \exists r \in M(p)$ 。

瞬时变迁 $t_i \in T_i$ 的触发规则为:如果 $\forall p \in I(t_i) \cap P_d, \exists r \in M(p), \forall p' \in O(t_i) \cap P_d$, 那么 $M(p) \rightarrow M(p) / \{r\}, M(p) \rightarrow M(p') \cup \{r\}$;

如果 $\forall p \in I(t_i) \cap P_d, \exists r \in M(p), \exists p' \in O(t_i) \cap P_c$, 那么 $M(p) \rightarrow M(p), M(p) \rightarrow M(p') \Delta \{r\}$ 。其中, Δ 表示连续库所 p' 中的标识与托肯 r 的一种运算,形成库所 p' 中的新标识。

定义4 模糊推理变迁 t_r 的使能与触发规则

模糊推理变迁 $t_r \in T_r$ 使能,当且仅当: $\forall p \in I(t_r), \exists r \in M(p)$ 。

模糊延时变迁 $t_d \in T_d$ 的触发规则为:如果 $\forall p \in I(t_r), \exists r \in M(p), \forall p' \in O(t_r)$, 那么对 $\forall p \in P_c$ 有 $M(p) \rightarrow M(p)$, 对 $\forall p \in P_d$ 有 $M(p) \rightarrow M(p) / \{r\}, M(p) \rightarrow M(p) \cup \{r\}$ 。

3 信号灯控制的 FHPN 模型

基于以上的定义先构建单交叉口四相位的信

号灯控制 FHPN 模型,如图 3 所示。库所和变迁的含义如表 1 和表 2 所示。其中: q_{11} 表示东西直行排队长度, q_{12} 表示东西左转排队长度, q_{21} 表示南北直行排队长度, q_{22} 表示南北左转排队长度,单位为米(m); f_{11} 表示东西直行的车流量, f_{12} 表示东西左转的车流量, f_{21} 表示南北直行的车流量, f_{22} 表示南北左转的车流量,单位为每 15 min 车辆数(pcu); r_{11} 表示东西直行红灯时间, r_{12} 表示东西左转红灯时间, r_{21} 表示南北直行红灯时间, r_{22} 表示南北左转红灯时间,单位为秒(s)。

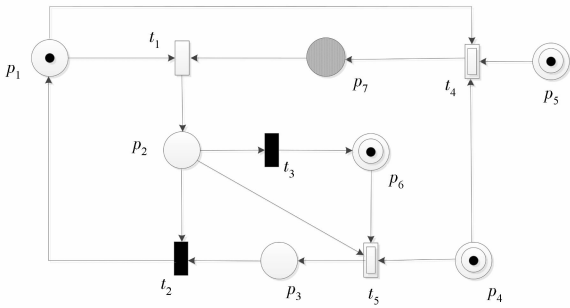


图 3 信号灯控制的 FHPN 模型

表 1 FHPN 中库所的含义

库所	所属子集	含义	实例说明
p_1	P_d (P_p)	相位开始	$M(p_1) = \{(1,0,0,0)\}$ 说明东西直行绿灯开始
p_2	P_d (P_p)	相位结束	$M(p_2) = \{(0,-1,0,0)\}$ 说明东西左转绿灯结束
p_3	P_d (P_p)	相位选择	$M(p_3) = \{(0,0,1,0)\}$ 说明下一个绿灯为南北直行
p_4	P_c	排队长度	$M(p_4) = \{(95,30,123,12)\}$ 说明 $q_{11} = 95, q_{12} = 30, q_{21} = 123, q_{22} = 12$
p_5	P_c	车流量	$M(p_5) = \{(900,268,1090,152)\}$ 说明 $f_{11} = 900, f_{12} = 268, f_{21} = 1090, f_{22} = 152$
p_6	P_c	红灯时长	$M(p_6) = \{(0,50,100,60)\}$ 说明 $r_{11} = 0, r_{12} = 50, r_{21} = 100, r_{22} = 60$
p_7	P_d (P_g)	绿灯时长	$M(p_7) = \{78\}$ 说明该相位绿灯时间为 78 s

连续库所 p_4 和 p_5 中的托肯 r 的取值由交叉口的附近的传感器实时的获取;连续库所 p_6 中时间托肯 r 随时间更新,同时变迁 t_3 的触发会改变时间托肯 r 的取值,把结束相位的红灯时间改为 0。推理变迁

t_4 和 t_5 的触发,其前置库所中连续库所中托肯的取值不改变,而离散库所的托肯会消失;其他变迁的触发都是使的前置库所的托肯转移到后置库所中,但取值会根据不同的规则来确定。

表 2 FHPN 中变迁的含义

变迁	所属子集	含义
t_1	T_d	t_1 的触发说明该相位绿灯结束
t_2	T_i	t_2 的触发说明下一个相位绿灯开始
t_3	T_i	t_3 的触发将该相位的红灯时间清零
t_4	T_r	t_4 的触发确定该相位的绿灯时长
t_5	T_r	t_5 的触发确定下一个相位的选择

4 FHPN 模型的分析

下一个相位的确定是实时的,即相位 1、相位 2、相位 3 和相位 4 四个相位不一定是以固定的顺序发生的,可能出现 1—3—4—1—2 的情况,故暂时不讨论信号周期。这里主要分析各相位绿灯时间的确定和相序的确定。

4.1 相位绿灯时长的实时确定

相位绿灯时长的确定有推理变迁 t_4 来确定,前置库所包括连续库所和离散库所,离散库所确定要推理的绿灯时长为哪一个相位,连续库所排队长度和车流量来确定绿灯时长。若前置离散库所 p_1 的标识为 $M(p_1) = \{(0,0,1,0)\}$,则所要计算绿灯时长的相位为相位 3,即南北直行绿灯时长,然后提取连续库所 p_4 中相位 3 的排队长度 q_{21} 和连续库所 p_5 中相位 3 的车流量 f_{21} ,再通过一个模糊推理 Petri 网来推理所需要的绿灯时长,最后得到后置库所 p_7 的绿灯时长,即确定了相位 3 的绿灯时长。

交叉口的具体位置和特性决定不同的模糊推理过程,首先构造模糊控制器^[6],输入量为排队长度 Q 和交通流量 F ,排队长度以米为单位,隶属函数如图 4 所示,交通流量以每小时车辆数位单位,隶属函数如图 5 所示;输出量为绿灯时间 T ,以秒为单位,隶属函数如图 6 所示。模糊推理是根据相关交通智能方法及经验得到,模糊推理规则如表 3 所示,推理结论的隶属度为推理条件隶属度的最小值,去模糊化方法采用加权平均隶属度法则来计算。因篇幅有限,这里不给出模糊推理的详细过程。

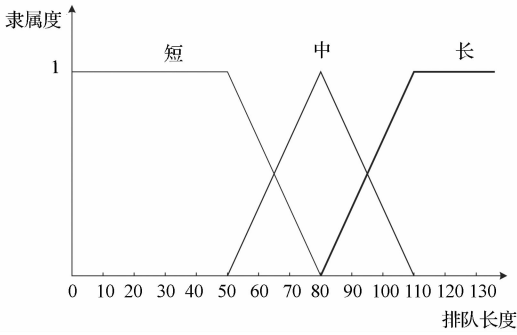


图4 排队长度 Q 的隶属函数

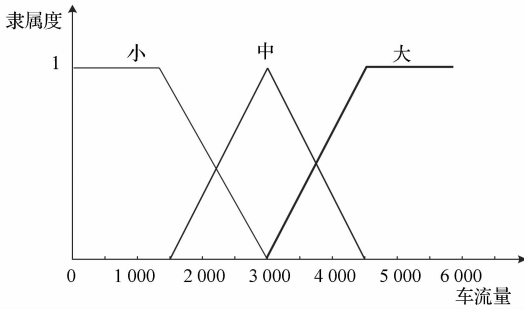


图5 车流量 F 的隶属函数

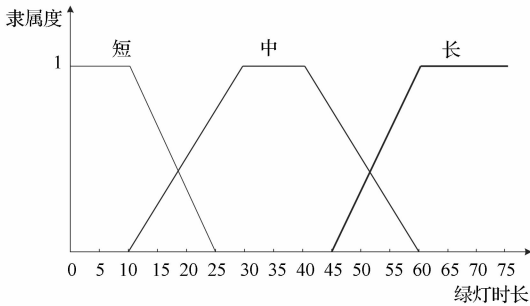


图6 绿灯时长 T 的隶属函数

表3 模糊推理规则

绿灯时间 T	交通流量 Q			
	小	中	大	
排队长度 L	短	短	短	中
	中	中	中	中
	长	中	长	长

基于以上的模糊控制器,构造的模糊推理 Petri 网如图7所示,库所和变迁的含义如表4所示,其中,库所 p_3 - p_{11} 中的托肯值为隶属度,库所 p_1 中的托肯值为排队长度值,库所 p_3 中的托肯值为交通流量值,库所 p_{12} 为中的托肯值为绿灯时间值。

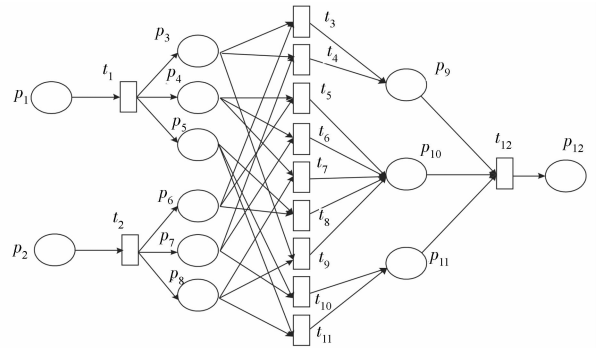


图7 模糊推理 Petri 网

表4 模糊推理 Petri 网中库所的含义

库所	含义	变迁	含义
p_1	排队长度值	t_1	排队长度值的模糊化
p_2	交通流量值	t_2	交通流量值的模糊化
p_3	排队长度短	t_3	模糊推理规则:短 & 小→短
p_4	排队长度中	t_4	模糊推理规则:短 & 中→短
p_5	排队长度长	t_5	模糊推理规则:中 & 小→中
p_6	交通流量小	t_6	模糊推理规则:中 & 中→中
p_7	交通流量中	t_7	模糊推理规则:中 & 大→中
p_8	交通流量大	t_8	模糊推理规则:长 & 小→中
p_9	绿灯时间短	t_9	模糊推理规则:短 & 大→中
p_{10}	绿灯时间中	t_{10}	模糊推理规则:长 & 中→长
p_{11}	绿灯时间长	t_{11}	模糊推理规则:长 & 大→长
p_{12}	绿灯时间值	t_{12}	绿灯时间的去模糊化

以上的模糊推理 Petri 网的推理过程详细说明了 FHPN 中变迁 t_4 的触发过程,即相位的开始的瞬间确定了绿灯时长,由于变迁 t_4 的触发使得库所 p_7 中产生托肯值 η ,此时延迟变迁 t_1 可触发,因映射函数 DT 使得延迟变迁对应一个正整数区间 $[\alpha, \beta]$, α 表示前置库所描述的相位最短绿灯时间, β 表示前置库所描述的相位最长的绿灯时间。延迟变迁 t_1 的触发由 η 和 $[\alpha, \beta]$ 共同决定,如果 $\alpha < \mu < \beta$,则 t_1 在延迟 η 秒触发,使得库所 p_2 中产生托肯,表示该相位绿灯结束,即将进入下一相位;如果 $\eta \leq \alpha$,则 t_1 在延迟 α 秒触发,使得该相位结束;如果 $\eta \geq \beta$,则 t_1 在延迟 β 秒触发,使得该相位结束。

4.2 下一个相位的实时确定

交叉口信号灯的实时控制不仅要考虑当前相位的绿灯时长,尽量保证通行的车辆有较少的停车次数,同时要考虑所有方向的车辆的延迟,于是在考虑相位变换的时候,采用可变相序的实时控制。

在图3中,如果库所 p_2 中含有托肯,且

$M(p_2) = \{(0, -1, 0, 0)\}$, 说明相位 2 结束, 下一个相位可为相位 1, 相位 3 或者相位 4。首先库所 p_2 中的托肯使得瞬时变迁 t_3 触发, 使得连续库所 p_6 中的托肯值发生变化, 例如: 瞬时变迁 t_3 触发前:

$$M(p_2) = \{(0, -1, 0, 0)\},$$

$$M(p_6) = \{(50, 165, 115, 15)\}, \text{ 则触发后:}$$

$$M(p_2) = \{(0, -1, 0, 0)\},$$

$$M(p_6) = \{(50, 0, 115, 15)\}。 \text{ 此时模糊推理}$$

变迁 t_5 触发, 假设触发前 $M(p_4) = \{(130, 5, 120, 30)\}$, 通过模糊推理 Petri 网可以得到变迁 t_5 触发后库所 p_3 的标识为 $M(p_3) = \{(0, 0, 1, 0)\}$, 即说明下一个绿灯相位为相位 3。

模糊推理变迁 t_5 的触发过程是三个模糊推理 Petri 网的结果, 其结构与图 7 中的模糊推理 Petri 网类似, 因篇幅有限这里不做详细说明。因 $M(p_2) = \{(0, -1, 0, 0)\}$, 则只需考虑相位 1、相位 3 和相位 4 这三个相位的红灯时长和排队长度, 推理的结果为下一个相位选择的可能性, 如果推理结果分别为 0.8, 0.9 和 0.1, 选择最大的可能性, 于是选择相位 3, 即为标识 $M(p_4) = \{(0, 0, 1, 0)\}$ 的推理过程。这里强调了下一个相位的选择需要考虑两个因素, 第一是红灯时长, 第二是排队长度。

离散库所 p_2 的标识 $M(p_2) = \{(0, -1, 0, 0)\}$ 和离散库所 p_3 的标识 $M(p_3) = \{(0, 0, 1, 0)\}$ 使得瞬时变迁 t_2 触发, 触发后离散库所 p_1 的标识 $M(p_2) = \{(0, 0, 1, 0)\}$, 即所选择的下一个相位为相位 3。

5 实例仿真分析

基于信号灯实时控制的模糊混合 Petri 网模型, 设置相关参数进行仿真分析。这里设置东西直行的绿灯时间的最大值和最小值为 90 s 和 40 s, 东西左转的绿灯时间的最大值和最小值为 30 s 和 15 s, 南北直行的绿灯时间的最大值和最小值为 80 s 和 30 s, 南北左转的绿灯时间的最大值和最小值为 25 s 和 10 s。在此给出三个交通流量 2 000 pcu/h、3 500 pcu/h 和 5 000 pcu/h 进行对比分析, 以 15 min 的总停车次数作为指标来评价模糊混合 Petri 网的信号

灯控制方法, 对比的控制方法为传统定时控制方法和传统实时控制方法, 结果如表 5 所示。

表 5 仿真结果分析

总停车次数		交通流量		
		2 000 pcu/h	3 500 pcu/h	5 000 pcu/h
控制方法	传统定时控制	16	25	50
	传统实时控制	3	12	20
	本文控制方法	0	2	12

6 结论

提出了模糊混合 Petri 网, 结合了模糊时延 Petri 网、连续 Petri 网和模糊推理 Petri 网等各种 Petri 网的优势, 以交通信号灯实时控制为例子, 实时控制绿灯的时间和相序的变化。通过实例仿真分析了 FHPN 模型的有效性, 能够实时控制交叉口的运行情况, 最大程度的利用道路资源且大幅度的降低了交叉口的停车次数。下一步的工作是加入模糊时间 Petri 网^[7]对主干道单流向的信号灯联合控制进行建模和分析。

参 考 文 献

- 1 叶剑虹, 叶 双, 宋 文, 等. 基于增广 Petri 网的实时交通信号控制系统. 厦门大学学报(自然科学版), 2011; 50(1): 28—32
- 2 赵 晨, 胡福乔, 施鹏飞. 基于模糊逻辑的路口交通信号控制. 计算机工程, 2003; 29(10): 50—52
- 3 岳 昊. 基于混合 Petri 网的城市道路交通网络建模和仿真. 济南: 山东科技大学, 2009
- 4 袁崇义. Petri 网原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2005: 35—36
- 5 Liu Zhiping, Liu Jiazhuang, Han Qiang. On the traffic signals hierarchical fuzzy control systems. Proceedings of the 13th Annual Conference of System Engineering Society of China. 2004
- 6 邝先验, 吴翠琴, 许论辉, 等. 交通信号多相位智能优化控制方法. 计算机工程, 2008; 34(20): 205—207
- 7 田 钊, 余 维, 叶阳东. 基于模糊时间知识推理的实时系统冲突研究. 计算机工程, 2011; 37(14): 183—188

(下转第 5877 页)

此下降补给作业时,应预先选择合适的初始绳长,避开共振区,增加吊重下放的平稳性。

(3)浮吊下降补给作业时,如果系统固有圆频率不可避免地要在某一时刻与外部波浪激励频率接近时,在条件允许的情况下可以加快升降速度,缩短共振时间,尽快使系统固有频率远离外激励频率,使吊物恢复小幅度摆动。

(4)所得吊重下降过程中相对于被补给船的速度和位移规律可为浮吊的海上作业提供有益参考。

由于在数学建模时,没有考虑风载荷、钢丝绳的刚度,阻尼等,与实际尚有差别,需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 周国宝,米旭峰,渠延模. 1000t 起重船扒杆结构强度有限元分析. 科学技术与工程,2009;9(17):5252—5255
- 2 Henry R J, Masoud Z N, Nayfeh A H, *et al.* Cargo Pendulation Reduction of Ship-mounted Cranes Via Boom-luff Angle Actuation. *Journal of Vibration and Control*, 2001,7(8):1253—1264
- 3 Posiadala, B. Effect of Vibration in Hoist System on Dynamics of Truck Crane. *Z. Angew Math Mech*, 1996;76S5:403—404
- 4 李 跃,沈 庆,陈徐均. 波浪环境中作业起重船悬吊载荷的摆振分析. *建筑机械*,2003;(8):55—61
- 5 王学林,尤心一,胡于进. 规则波作用下起重船吊重动力学仿真. *中国机械工程*,2010;21:1077—1082
- 6 董艳秋,韩 光. 起重船吊物系统在波浪中的动力响应. *中国造船*,1993;34(1):63—71
- 7 陶尧森. *船舶耐波性*. 上海:上海交通大学出版社,1996

Simulation Studies on Dynamic Characters of Floating Cranes

DONG Das-han, SUN You-gang*, LIU Long

(Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, P. R. China)

[Abstract] When the floating cranes carry out replenishment at sea, the decrease and swing of hoisting rope as well as the forced vibration of hull will easily crash the deck and cause vital accidents. Considering the elastic force at the hoisting point, dynamic equation of cargo system of the floating crane was established. With the method of numerical analysis in MATLAB, the dynamic characteristics in stillness and operation were studied. The results indicate that the length of ropes, sea conditions and decreasing speed make important impact on safety replenishment. The speed and displacement regulation of hoists obtained can provide the great basis for the heave compensation system.

[Key words] floating crane dynamic response numerical simulation lifting load system

(上接第 5871 页)

Real-time Control for Traffic Signal Based on Fuzzy Hybrid Petri Net

ZHANG Si-ping¹, SHE Wei², WANG Mei¹

(Department of Computer, Hunan College of Information¹, Changsha 410200, P. R. China;

School of Information Engineering, Zhengzhou University², Zhengzhou 450052, P. R. China)

[Abstract] According to the problems of the road resources waste based on the fixed signal cycle, a kind of Fuzzy Hybrid Petri Nets (FHPN) is provided to simulate the real-time control for the traffic signal. The duration of the green light can be got by the fuzzy reasoning with the Fuzzy Reasoning Petri nets based on the queue length and the traffic flow, and then can control phase sequence in time based on the queue length and the duration of the red light of other phases. The simulation analysis shows that the real-time traffic signal control based on the Fuzzy Hybrid Petri nets can reduce furthest the count of the vehicle stops.

[Key words] Petri net fuzzy control signal control