



一种离散事件系统实时控制器的设计

王 蓓 吴智铭

(上海交通大学自动化系 上海 200030)

摘 要 针对实时离散事件系统,提出了一种实时动态控制器的设计方法.用有限状态机FSM(Finite State Machine)对系统进行建模.用时态逻辑TL(Temporal Logic)给出系统的规范化要求.通过这两种形式化方法的有效结合,实现了控制器动态监控的功能.

关键词 FSM,时态逻辑,监控器,动态控制器.

AN APPROACH FOR DESIGNING REAL TIME DES CONTROLLER

WANG Bei WU Zhiming

(Dept. of Automation, Shanghai Jiaotong Univ, Shanghai 200030)

Abstract A new design method is presented for discrete event system(DES)controller. DES is modeled by finite state mechanism(FSM). The system specification is described by using temporal logic(TL). With the combination of these two formal methods, one can not only realize the DES supervisor to maintain close-loop behavior in the allowed state domain, but also add control actions dynamically to enforce the system to meet the required dynamic specification.

Key words Finite state machine, temporal logic, supervisor, dynamic controller.

1 引言

由 Ramadge 和 Wonham 提出的监控理论^[2]是一种反馈控制机制,通过禁止某些可控事件的发生,保证系统的闭环行为.但在实际系统运行中,不仅要禁止“坏”的事件发生,而且要求施加外部控制,使系统按照所期望的行为变化.前者属静态规范,后者为动态规范,即设计有动态特性的控制器.考虑系统的实时性,在控制器设计过程中,应该将时间因子引入到系统的建模和规范化中,从而导出离散事件系统实时控制器的设计方法.

2 系统的建模与规范化

2.1 用有限状态机建立系统模型

使用标识化 FSM 作为系统的模型,定义为5元组 $M = \{Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m\}$,其中 Q 为状态集, $q \in Q, \Sigma$ 为变迁集, $\delta \in \Sigma, \delta$ 为状态变迁函数,定义为 $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q, q_0$ 为起始状态; Q_m 为标识状态.

本文以标识化 FSM 对系统中的每一个对象,分别建立其 FSM 模型,假定各个事件不在同一时刻发生,整个系统的模型则为系统中所有对象的 FSM 非同步积形式.

定义1. FSM 的非同步积(\parallel).

给定两个对象 FSM $M_1: \{Q_1, \Sigma_1, \delta_1, q_{01}, Q_{m1}\}$ 和 $M_2: \{Q_2, \Sigma_2, \delta_2, q_{02}, Q_{m2}\}$, 并且 $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset, \sigma \in \Sigma_1, q_1, q'_1 \in Q_1, \mu \in \Sigma_2, q_2, q'_2 \in Q_2$. 非同步积 $M_R = M_1 \parallel M_2$ 是由每一个状态机的状态相互穿插^[3]构成 $M_R: \{Q_R, \Sigma_R, \delta_R, q_{0R}, Q_{mR}\}$, 其中 $\Sigma_R = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$, 与某一状态 q 对应的状态变量 $q_R \in Q_R$, 并且 $\delta(\sigma, q_R) = q_R, \delta(\mu, q_R) = q''_R$.

FSM 的非同步积对构造整个系统模型十分重要. 以火车经离道口(M_1)时闸门起落(M_2)为例. 火车驰近闸门时,门应放下,车远离后,门应抬起,其状态和事件转移标记由表1给出. 由表1可得出 M_1, M_2 和它们之间非同步积 M_3 的 FSM, 示于图1, 2, 3. 注意, 非同步积 M_3 的结构在未施加控制时,其中包含不允许存在的状态,如(2, 0).

表1 火车-道口系统状态变迁表

| 对象 | FSM | 图 | 状态标记 | 意义 | 变量值 | 转移标记 | 意义 | 关联 |
|----|-------|---|-------|------|-----|------|------|-----------------------|
| 火车 | M_1 | 1 | S_0 | 火车甚远 | 0 | 11 | 进邻区 | $S_0 \rightarrow S_1$ |
| | | | S_1 | 火车接近 | 1 | 12 | 过闸门 | $S_1 \rightarrow S_2$ |
| | | | S_2 | 火车在闸 | 2 | 13 | 远离去 | $S_2 \rightarrow S_0$ |
| 闸门 | M_2 | 2 | S_0 | 闸门已开 | 0 | 21 | 闸门关闭 | $S_0 \rightarrow S_1$ |
| | | | S_1 | 闸门已关 | 1 | 22 | 闸门打开 | $S_1 \rightarrow S_0$ |

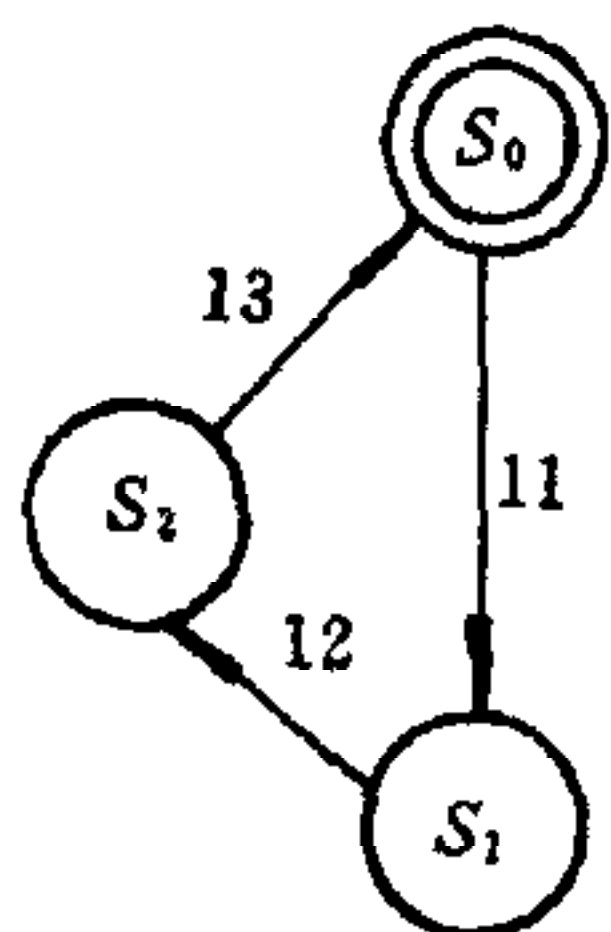


图1 火车经离

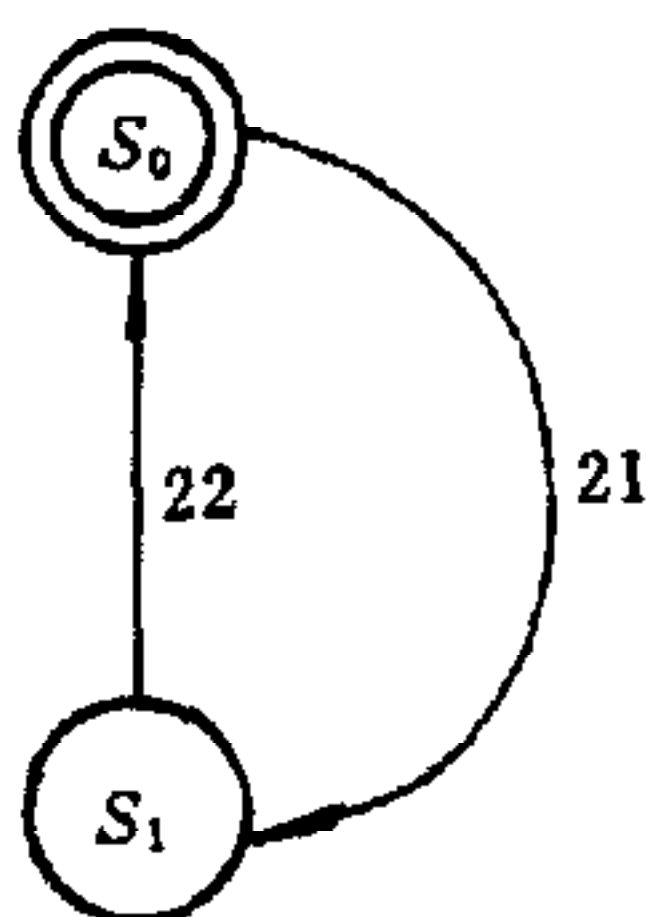


图2 闸门起落

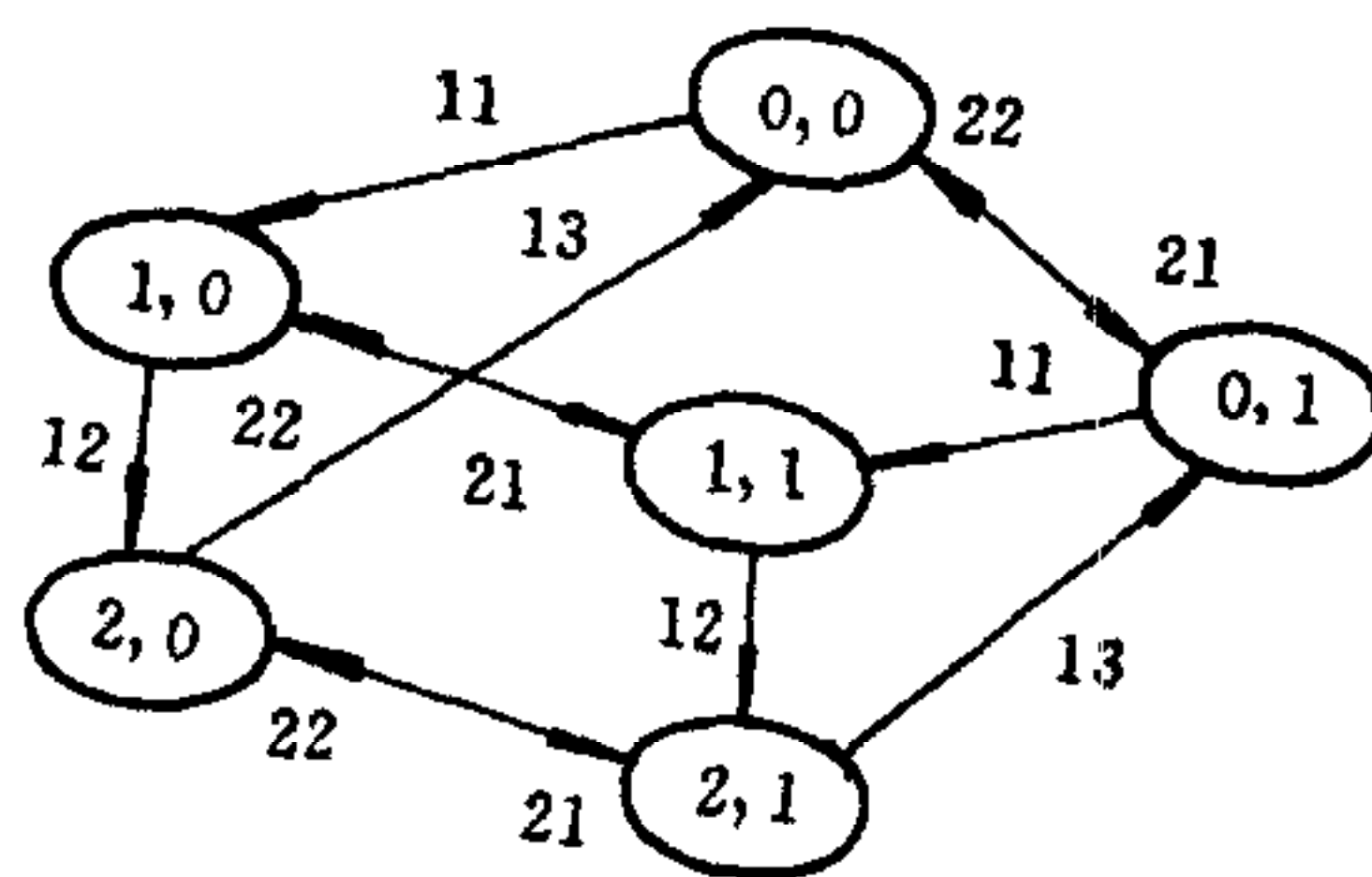


图3 火车-道口系统 M_3

2.2 用时态逻辑给出系统规范化

对控制结构,都应事先提出所允许的系统行为,以便分析系统和设计监控器. 由于 FSM 方法很难给出复杂系统的形式化规范化需求,因此本文采用时态逻辑 TL 作规范描述^[1]. TL 有丰富的代数结构,能够用简洁的模型来表达高度复杂的规范化需求. TL 代数与 TMS 状态变迁之间存在对应关系. 在控制器综合时,可用 FSM 来描述局部控制器.

规范化建模分为:静态规范体现系统逻辑不变特性,用 TL 的谓词逻辑子句来实现;动态规范描述期望事件的发生序列,用 TL 的时态逻辑算子来实现. 对 Train-Gate 系统,

静态规范 $S:(2,0)=\text{false},$ (1)

S 表示当火车通过道口时, 闸门不能打开, 这个状态为禁止状态;

动态规范 $D_1:(0,0) \rightarrow \bigcirc(\tau = 11 \wedge \tau \neq 21),$ (2)

$D_2:(2,1) \rightarrow \bigcirc(\tau = 13 \wedge \tau \neq 22) \rightarrow \bigcirc(\tau = 22 \vee \tau = 11),$ (3)

$D_3:(1,0) \rightarrow \bigcirc(\tau = 21) \rightarrow \bigcirc(\tau = 12 \wedge \tau \neq 22).$ (4)

上式中以 \rightarrow 表示过程; \bigcirc 表示下一步时态算子; D_1 表示当火车接近时, 下一个发生的事件为放下闸门; D_2 表示火车离开且没有新火车开来时, 下一个发生的事件应抬起闸门, 如果又有火车紧接着开来, 闸门仍然关闭; D_3 表示当门放下后, 紧接着发生的不应是抬起闸门.

3 控制器综合

当建立了系统的 FSM 模型及给出了系统的 TL 规范化后, 就可以设计系统的控制器, 使闭环系统的行为满足规范化需求. 为进行控制器综合, 给出 FSM 同步积.

定义2. FSM 的同步积(Π).

给定两个对象 FSM M_1 和 M_2 (同定义1), 同步积 $M_R = M_1 \Pi M_2, M_R: \{Q_R, \Sigma_R, \delta, q_{0R}, Q_{mR}\}$, 其中 $\Sigma_R = \Sigma_1 \cap \Sigma_2, \sigma \in \Sigma_R, \delta(\sigma, q_R) = q'_R$.

在控制器综合过程中, 首先要建立与每一个静态规范和动态规范相对应的 FSM 形式. 将 TL 公式转化成 FSM 形式是建立在 TL 的每一个框架与 FMS 同构基础之上的. 这种同构给出一种充分条件, 它确保所得到的对应于 TL 的 FSM 中, 每一个 TL 公式都成立. 有了每一个规范的 FSM 模型后, 利用 FSM 同步积形式, 给出受控系统的控制器. 在 Train-Gate 系统中, 系统模型 M_3 与静态规范的 FSM 模型同步化后, 得到系统的监控器 M_4 . 然后将监控器 M_4 分别与动态规范(2), (3), (4) 同构的 FSM 同步化后, 得到系统局部控制器 M_5, M_6 和 M_7 (这里省略其描述). 最后 M_5, M_6 和 M_7 的同步积, 得到全局控制器 M_8 . 图4中给出监控器 M_4 的描述, 图5中给出全局控制器 M_8 的描述.

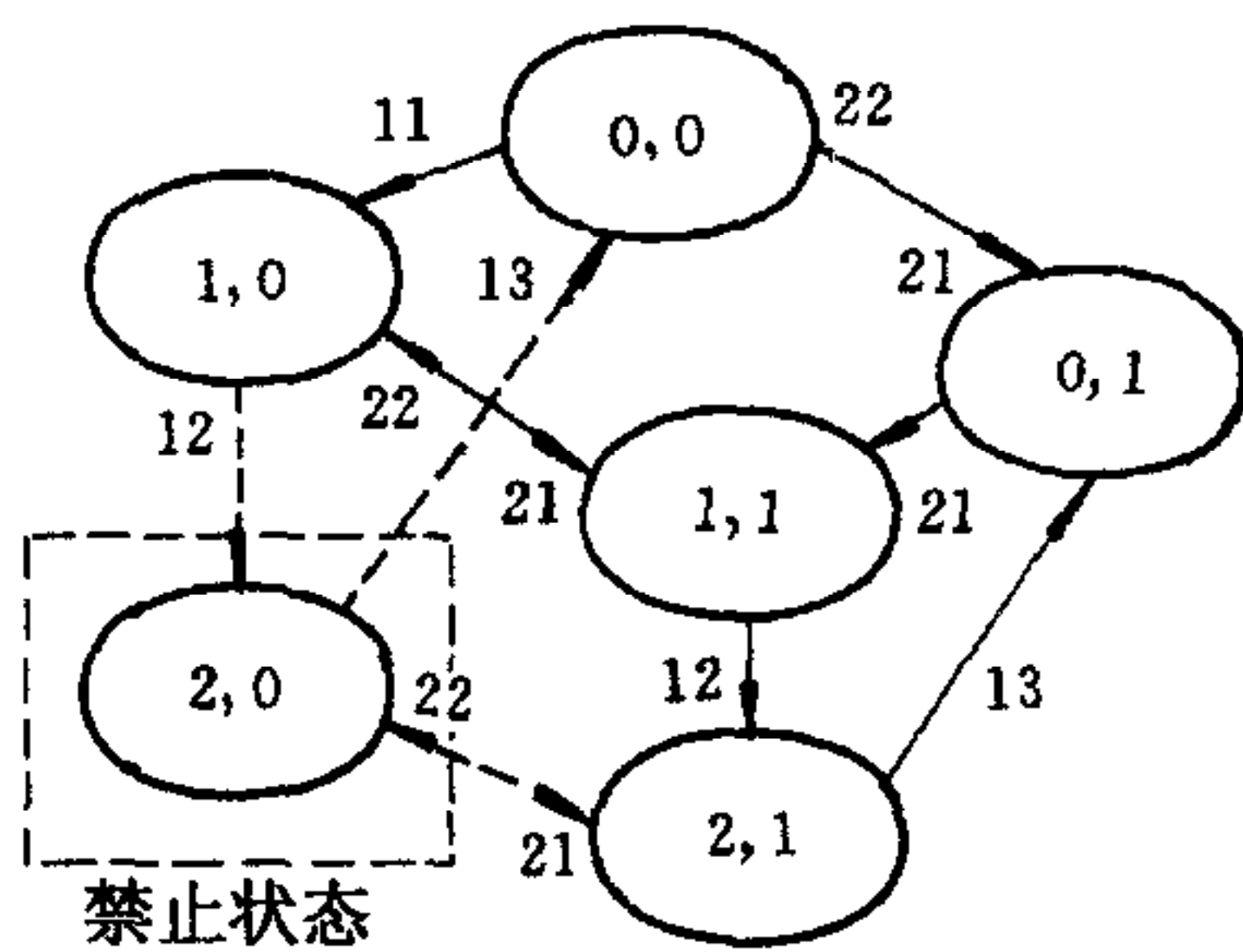


图4 监控器 M_4

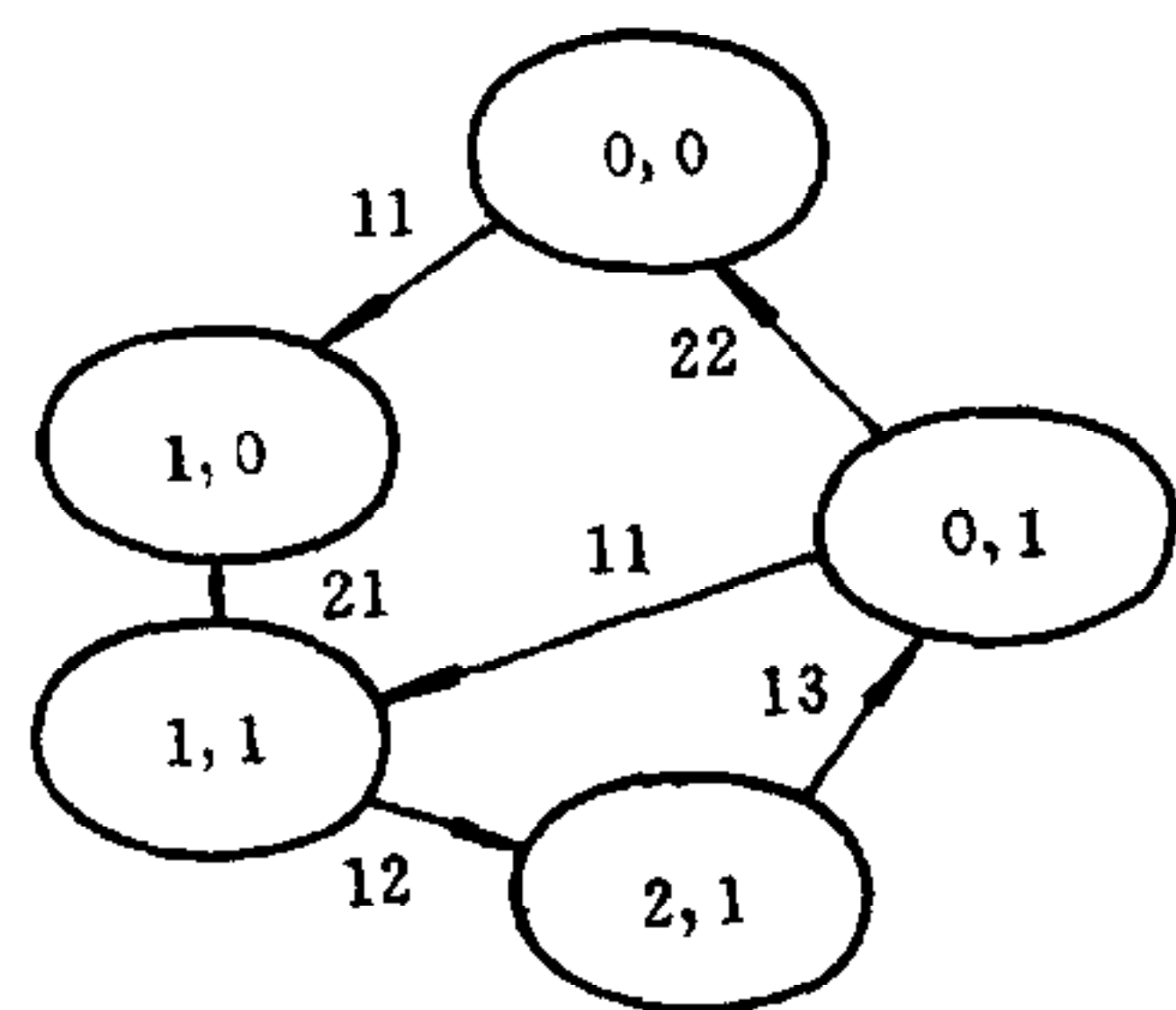


图5 全局控制器 M_8

4 实时控制器综合

4.1 用 TFSM (Timed FSM) 为实时离散事件系统建模

定义3. 一个 TFSM 为六元组 $M = \{Q, \Sigma, C, \delta, q_0, Q_m\}$, C 为有限时钟集合, δ 为状态变迁函数, $\delta: \Sigma \times 2^C \times Q \rightarrow Q$, 其他项的定义同 FSM. TFSM 每个动作都相应某一时间, 因

此对象的 TFSM 比 FSM 复杂,由表2给出. 系统模型见图6所示.

表2 实时火车-道口系统状态变迁表(x, y 分别为火车和闸门的时钟)

| 对象 | 状态标记 | 意义 | 变量值 | 转移标记 | 意义 | 关联 | 时间限制 |
|----|-------|------|-----|------|------|-----------------------|--------------------------|
| 火车 | S_0 | 火车甚远 | 0 | 11 | 进邻区 | $S_0 \rightarrow S_1$ | $x_i = 0$ |
| | S_1 | 火车接近 | 1 | 12 | 进闸门 | $S_1 \rightarrow S_2$ | $x > 2$ |
| | S_2 | 火车在闸 | 2 | 13 | 远离去 | $S_2 \rightarrow S_0$ | $x > 5$ |
| 闸门 | S_0 | 闸门已开 | 0 | 21 | 关闸门 | $S_3 \rightarrow S_4$ | $y_i = 0$ |
| | S_1 | 闸门正关 | 1 | 22 | 闸门关闭 | $S_4 \rightarrow S_5$ | $y < 1$ |
| | S_2 | 闸门已关 | 2 | 23 | 开闸门 | $S_5 \rightarrow S_6$ | $y_i = 0$ |
| | S_3 | 闸门正开 | 3 | 24 | 闸门打开 | $S_6 \rightarrow S_3$ | $(y > 1) \wedge (y < 2)$ |

4.2 用 RTTL(Real-Time TL)给出实时离散事件系统的规范

在 RTTL 中,仍使用时态算子 \bigcirc (next), \square (always). 与状态公式不同的是,一个时态公式不能在某一单一状态进行评价,而必须在某一状态序列上进行评价. 下面给出实时 Train-Gate 系统的规范,

静态规范

$$S: \square_{\neg} (S_1 \wedge_{\neg} S_5) \tag{5}$$

动态规范

$$D_1: (0,0) \rightarrow \bigcirc(\tau = 11, z = 0) \rightarrow \bigcirc(\tau = 21, z = 1), \tag{6}$$

$$D_2: (2,2) \rightarrow \bigcirc(\tau = 13, z = 0) \rightarrow \bigcirc(\tau \neq 11, z = 0) \rightarrow \bigcirc(\tau = 23, z < 0), \tag{7}$$

$$D_3: (2,2) \rightarrow \bigcirc(\tau = 13, z = 0) \rightarrow \bigcirc(\tau = 11, z = 0), \tag{8}$$

$$D_4: (1,1) \wedge (\tau = 22) \rightarrow \bigcirc(\tau = 12), \tag{9}$$

这里,符号 z 和 x, y 一样,表示与控制器有关的时钟.

4.3 实时控制器综合

实时离散事件系统控制器综合方法与第3节介绍的方法相同. 首先,由受控系统的 TFSMN₁与静态规范的 FSM 进行同步积,得到监控器模型;然后,通过求监控器模型与动态规范的 FSM 的同步积,得到局部控制器;最后,所有局部控制器的同步积得到全局控制器 N_2 . 图7中给出了全局控制器 N_2 .

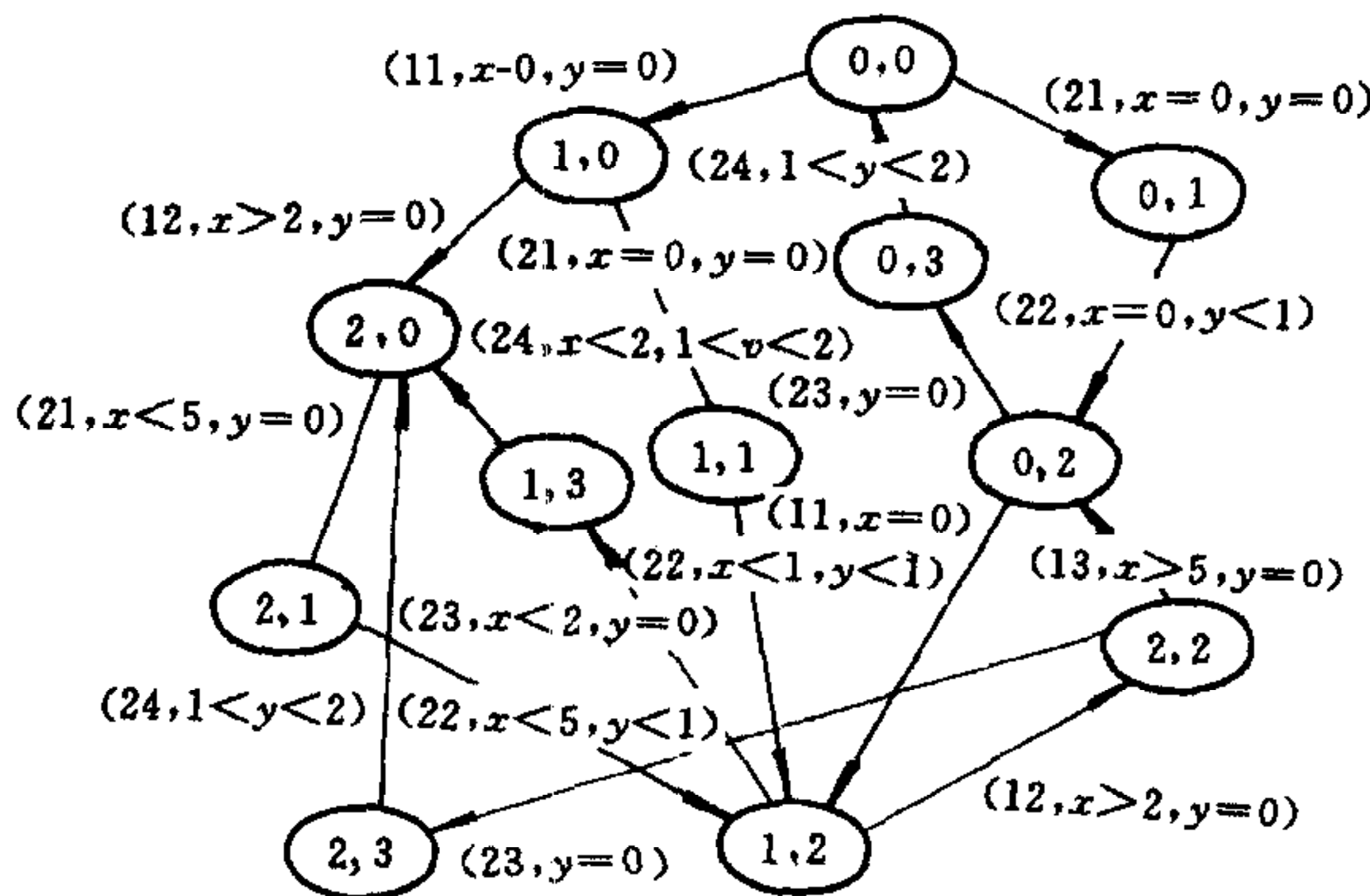


图6 火车-道口系统的实时 FSM

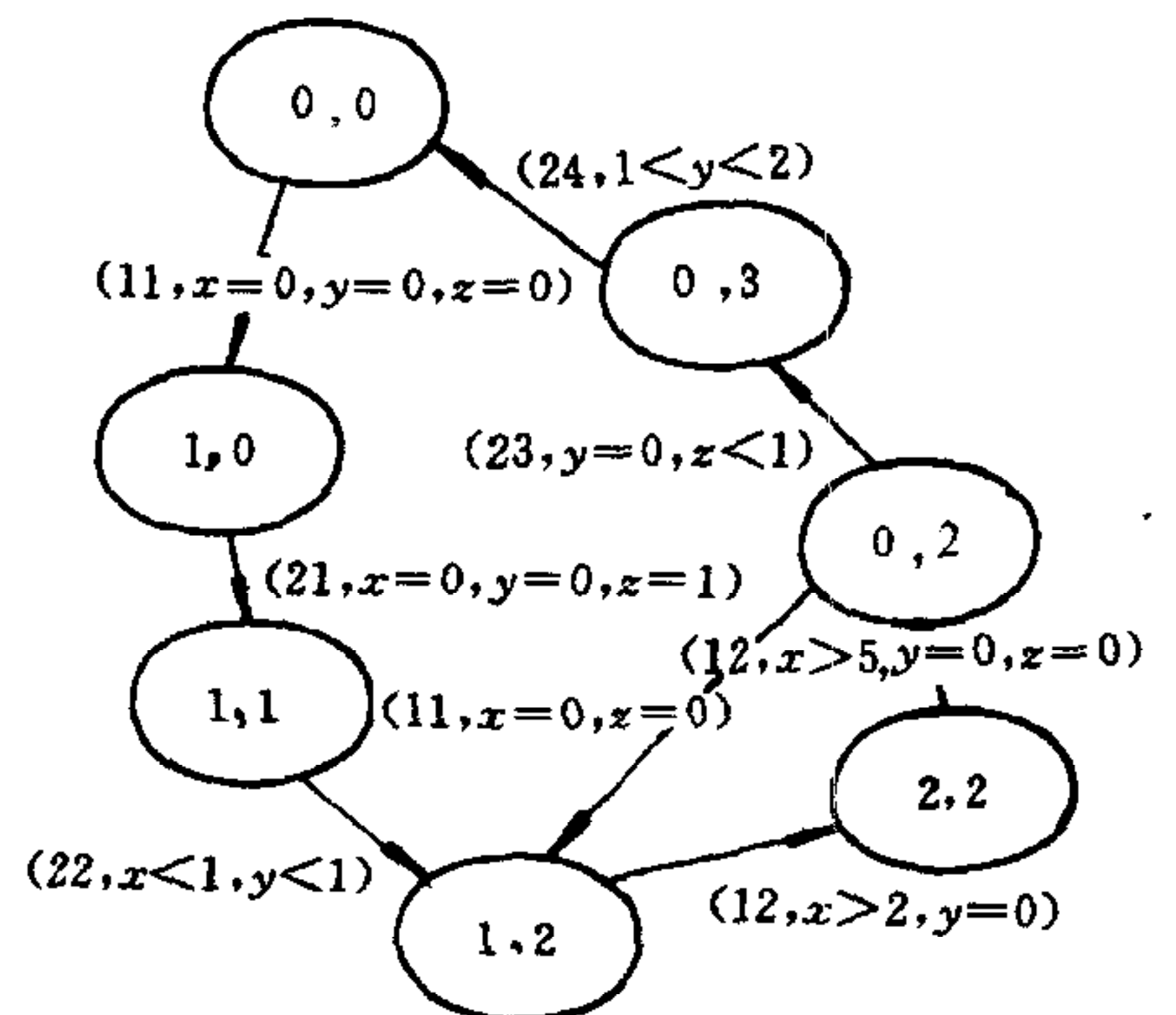


图7 实时火车-道口系统的全局控制器 N_2

5 小结

下面给出实时控制器设计的一般步骤:

- 1) 用 TFSM 为实时离散事件系统的每一个对象建模;
- 2) 求系统中所有对象 TFSM 的同步积, 建立整个系统 TFSM 模型;
- 3) 对受控系统的性能需求以 RTTL 列出, 与 TFSM 模型的相应行为对照;
- 4) 求系统 TFSM 模型与静态规范的 TFSM 形式的同步积, 得到系统的监控器模型;
- 5) 求监控器模型与每一个动态规范的 TFSM 形式的同步积, 得到系统局部控制器模型;
- 6) 求所有局部控制器的同步积, 得到全局控制器.

这种方法改进了传统控制器的设计原则, 使系统能够按照我们所期望的行为变化.

参 考 文 献

- 1 Ostroff J, Wonham W. A temporal logic approach to real time control. In: Proc. of the 24th CDC, Dec. 1985, 656~657
- 2 Ramadge P, Wonham W. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM J. Control Optim*, 1987, 25(5):1202~1228
- 3 Hoare C A R. 通信顺序进程, 周巢尘译. 北京: 北京大学出版社, 1990年, 45~53

王 蓓 于西北工业大学本科毕业, 并获硕士学位, 1997年在上海交通大学获博士学位, 目前在美国 Wayne State University 做研究工作. 研究方向为离散事件系统中有关自动机和时态逻辑应用.

吴智铭 上海交通大学自动化系教授. 研究方向为离散事件系统.