

区间速率连续 Petri 网的模糊模型

廖伟志¹ 彭月英¹ 古天龙²

(广西师范学院信息技术系 南宁 530001)¹ (桂林电子科技大学计算机系 桂林 541004)²

摘要 为了实现区间速率连续 Petri 网的模糊控制,建立了区间速率连续 Petri 网的模糊模型,定义了区间速率连续 Petri 网的模糊规则。进一步地,对区间速率连续 Petri 网的模糊控制进行了讨论,给出了库所标识收敛的定理,为基于区间速率连续 Petri 网描述的模糊系统的控制提供了理论依据。实例分析表明了区间速率连续 Petri 网的模糊控制的可行性。

关键词 区间速率连续 Petri 网, 模糊逻辑, 模糊控制

Fuzzy Model of Interval Speed Continuous Petri Nets

LIAO Wei-zhi¹ PENG Yue-ying¹ GU Tian-long²

(Department of Information Technology Guangxi Normal University, Nanning 530001, China)¹

(Department of Computer Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)²

Abstract Interval continuous Petri nets(ICPNs) can be considered as a general formalism of continuous Petri nets, and it is an effective tools for system simulation and analysis. Fuzzy logic theory is used to model and control interval continuous Petri nets. A fuzzy multimodeling of each transition of the ICPNs was proposed, and the fuzzy control for interval continuous Petri nets was developed. Finally, upper and lower bounds of the convergence were presented.

Keywords Interval continuous petri nets, Fuzzy logic, Fuzzy control

1 引言

为了解决 Petri 网可达状态爆炸问题, H. Alla 和 R. David 提出了连续 Petri 网(Continuous Petri nets, 简称 CPN)的概念和理论^[1]。根据瞬时引发速率计算方法的不同, 可把连续 Petri 网分为 CCPN(Constant speed CPN), VCPN(Variable speed CPN)及 ACPN(Asymptotic CPN)等^[1-4]。目前, 连续 Petri 网理论已应用于工业过程控制、制造系统、交通控制及离散事件系统等。基于近似时间 Petri 网的目的, Gu 提出了区间速率连续 Petri 网(Interval speed Continuous Petri Nets, 简称 ICPN)^[5,6]。文献[7-11]分别对基于区间速率连续 Petri 网模型的制造系统的优化与控制策略、区间速率连续 Petri 网的模型行为分析、区间速率连续 Petri 网的有效冲突及区间速率连续 Petri 网的稳态分析进行了讨论。

由于模糊理论能够处理系统中不确定、复杂的因素, 并完成系统的分析和控制设计, 因此在 Petri 网中引入模糊理论有助于 Petri 网的分析及系统的分析和实现。鉴于离散时间 Petri 网的可达状态的数量大, 分析困难, 文献[12]利用基于模糊的方法来执行离散时间 Petri 网, 提出了离散时间 Petri 网的模糊模型。由于连续 Petri 网模型的动态行为是非线性的且难于合成, 文献[13]利用模糊逻辑实现了 VCPN 的模糊控制。

研究结果表明区间速率连续 Petri 网模型描述能力比其它连续 Petri 网模型描述能力更强, CCPN, VCPN 等只是区间速率连续 Petri 网模型的一种特殊情形, 同时区间速率连续 Petri 网模型的语义更复杂。为此, 本文提出区间速率连续 Petri 网的模糊模型, 给出了各个迁移的模糊规则并实现其模糊控制。

本文第2部分给出区间速率连续 Petri 网的形式化定义; 第3部分给出区间速率连续 Petri 网的模糊模型; 第4部分讨论区间速率连续 Petri 网的模糊控制; 第5部分是举例分析, 最后是总结。

2 区间速率连续 Petri 网

定义 2.1 区间速率连续 Petri 网为一个五元组 $N = \langle P, T, Pre, Post, F \rangle$, 其中 $P, T, Pre, Post$ 等含义见文献[5,6]。

对任意的迁移 T_j , 记 $F(T_j) = [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$, $V_j^{\min}, V_j^{\max}$ 分别为 T_j 的最小、最大引发速率, $V_j^{\min} \leq V_j^{\max}$ 。迁移 T_j 的所有输入、输出库所分别用 $\cdot T_j, T_j \cdot$ 表示; 类似的分别用 $\cdot p_i, p_i \cdot$ 表示库所 p_i 的所有输入和输出迁移。时刻 τ 库所 p_i 的标识记为 $m_i(\tau)$; 所有库所标识记为 $m(\tau) = (m_1(\tau), m_2(\tau), \dots, m_n(\tau))$, 其中 $k = |P|$; 迁移 T_j 在时刻 τ 的瞬时引发速率记为 $v_j(\tau)$; 时刻 τ 所有迁移的瞬时引发速率记为 $v(\tau) = (v_1(\tau), v_2(\tau), \dots, v_n(\tau))$, 其中 $n = |T|$ 。用 $\langle N, m_0 \rangle$ 表示具有

到稿日期: 2008-03-04 本文受国家自然科学基金项目(60563005), 广西科学基金项目(桂科基 0640032)资助。

廖伟志 副教授, 博士, 研究方向为形式化技术及其应用、混杂系统建模与控制, E-mail: liaowz@gxnc.edu.cn; 彭月英 副教授, 研究方向为人工智能; 古天龙 教授, 博士生导师, 研究方向为形式化技术及其应用、混杂系统建模与控制。

初始标识 m_0 的区间速率连续 Petri 网, 并把 0 标识的库所简称为 0 库所。

定义 2.2 若 $\forall p_i \in \cdot T_j$ 在时刻 τ 均满足 $m_i(\tau) > 0$, 则称迁移 T_j 在时刻 τ 是强使能迁移或 2 级使能迁移。

定义 2.3 若 T_j 的任一 0 输入库所 p_i 满足 $\sum_k Pre(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) - \sum_{k \neq j} Post(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) \geq Post(p_i, t_j) \cdot V_j^{\min}$ 则称 T_j 在时刻 τ 为 1 级使能迁移。

定义 2.4 若 T_j 存在一 0 输入库所 p_i 满足: $0 < \sum_k Pre(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) - \sum_{k \neq j} Post(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) < Post(p_i, t_j) \cdot V_j^{\min}$ 并且对于其它 0 输入库所 p_h 满足 $\sum_k Pre(p_h, t_k) \cdot v_k(\tau) - \sum_{k \neq j} Post(p_h, t_k) \cdot v_k(\tau) > 0$, 则称 T_j 在时刻 τ 为 0 级使能迁移。

定义 2.5 若 T_j 不为强使能、1 级使能、0 级使能迁移, 那么称 T_j 为非使能迁移。

性质 2.1 若迁移 T_j 在时刻 τ 为 2 级使能迁移, 则 $v_j(\tau) \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$ 。

性质 2.2 若迁移 T_j 在时刻 τ 为 1 级使能迁移, 则 $v_j(\tau) \in [V_j^{\min}, \min(V_j^{\max}, V_j^*)]$, 其中 V_j^* 的计算方法见文献[8]。

性质 2.3 若迁移 T_j 在时刻 τ 为 0 级使能迁移, 则其瞬时引发速率 $v_j(\tau) = 0$, 若在时刻 $\tau + d_j$ 迁移没有变为非使能迁移, 那么经过时间延迟 d_j , 迁移 T_j 的瞬时引发速率 $v_j(\tau) \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$, 其中 $d_j = 1/V_j^{\min}$ 。

3 区间速率连续 Petri 网的模糊模型

根据区间速率连续 Petri 网的使能与引发规则, 每个迁移 T_j 能否被引发, 关键是取决于该迁移获得的引发速率。若 $v_j \geq V_j^{\min}$, 即 T_j 为强使能迁移或 1 级使能迁移, 则该迁移能被立即引发; 当 T_j 为 0 级使能迁移, 则需等待 $1/V_j^{\min}$ 时间后才能被引发。由此, 对每一个迁移 T_j 有如下两条规则:

R_j^1 : 若迁移 T_j 获得的速率 $v_j < V_j^{\min}$ 或引发延迟时间尚在运行中, 则迁移 T_j 不被引发。

R_j^2 : 若迁移 T_j 获得的速率 $v_j \geq V_j^{\min}$ 或引发延迟时间运行完成, 则迁移 T_j 被引发。

定义迁移 T_j 的引发速率 v_j 的模糊集: “weak” 和 “strong”, 其关系如图 1 和式(1)、(2)所示; 定义迁移 T_j 的延迟时间 t 的模糊集: “run” 和 “done”, 其关系如图 2 和式(3)、(4)所示。

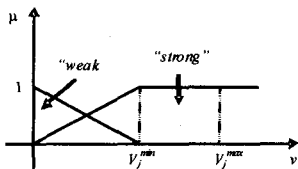


图 1 速率 v_j 的模糊集

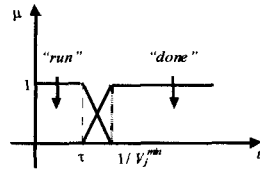


图 2 时间 t 的模糊集

$$\mu_{\text{weak}}(v_j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } v_j = 0 \\ 1 - \frac{v_j}{V_j^{\min}} & \text{当 } v_j \in (0, V_j^{\min}) \\ 0 & \text{当 } v_j \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}] \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{strong}}(v_j) = \begin{cases} 0 & \text{当 } v_j = 0 \\ \frac{v_j}{V_j^{\min}} & \text{当 } v_j \in (0, V_j^{\min}) \\ 1 & \text{当 } v_j \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}] \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{run}}(t) = \begin{cases} 1 & \text{当 } t \in [0, \tau) \\ \frac{V_j^{\min}}{\tau \cdot V_j^{\min} - 1} t - \frac{1}{\tau \cdot V_j^{\min} - 1} & \text{当 } t \in [\tau, 1/V_j^{\min}) \\ 0 & \text{当 } t \in [1/V_j^{\min}, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{\text{done}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{当 } t \in [0, \tau) \\ \frac{V_j^{\min}}{1 - \tau \cdot V_j^{\min}} t - \frac{\tau \cdot V_j^{\min}}{1 - \tau \cdot V_j^{\min}} & \text{当 } t \in [\tau, 1/V_j^{\min}) \\ 1 & \text{当 } t \in [1/V_j^{\min}, \infty) \end{cases} \quad (4)$$

区间速率连续 Petri 网的模糊规则如下:

R^1 : if v_j is “weak” or t is “run” then $S^1 = 0$;

R^2 : if v_j is “strong” or t is “done” then $S^2 = 1$;

其中, R^k 表示变迁 T_j 的第 k 条规则, S^k 表示第 k 条规则的输出值。于是可得如下的全局模糊系统:

$$S_{\text{res}} = \frac{A \times 1 + B \times 0}{A + B} \quad (5)$$

其中 $A = \max(\mu_{\text{strong}}(v_j), \mu_{\text{done}}(t))$, $B = \min(\mu_{\text{weak}}(v_j), \mu_{\text{run}}(t))$ 。

由于 $A + B = 1$, 于是有如下几种情形:

(1) 若 $v_j = 0$ 或 $t \in [0, \tau]$ 则 $S_{\text{res}} = 0$, 该情况下迁移为非使能迁移, T_j 不被引发;

(2) 若 $v_j \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$ 且 $t \in [1/V_j^{\min}, \infty)$ 则 $S_{\text{res}} = 1$, 该情况是不可能发生的。因为当 $v_j \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$ 则迁移为强使能或 1 级使能, 无须延迟;

(3) 若 $v_j \in [0, V_j^{\min}]$ 且 $t \in [\tau, 1/V_j^{\min})$, 则

$$S_{\text{res}} = \max\left(\frac{v_j}{V_j^{\min}}, \frac{V_j^{\min}}{1 - \tau \cdot V_j^{\min}} t - \frac{\tau \cdot V_j^{\min}}{1 - \tau \cdot V_j^{\min}}\right) \times 1 \quad (6)$$

该情况下迁移为 0 级使能迁移但延迟时间尚在运行中, T_j 不被引发;

(4) 若 $v_j \in [0, V_j^{\min}]$ 且 $t \in [1/V_j^{\min}, \infty)$, 则

$$S_{\text{res}} = \max\left(\frac{v_j}{V_j^{\min}}, 1\right) \times 1 = 1 \quad (7)$$

该情况下迁移为 0 级使能迁移且延迟时间已运行完毕, T_j 被引发;

(5) 若 $v_j \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$ 且 $t \in [\tau, 1/V_j^{\min})$, 则

$$S_{\text{res}} = \max\left(1, \frac{V_j^{\min}}{1 - \tau \cdot V_j^{\min}} t - \frac{\tau \cdot V_j^{\min}}{1 - \tau \cdot V_j^{\min}}\right) \times 1 \quad (8)$$

同(2)该情况也是不可能发生的;

(6) 若 $v_j \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$ 且 $t = 0$, 则

$$S_{\text{res}} = \max(1, 0) \times 1 = 1 \quad (9)$$

迁移为强使能或 1 级使能, T_j 被引发。

4 区间速率连续 Petri 网的模糊控制

各个迁移 T_j 的模糊控制如下给出:

R_j^1 : if v_j is “weak” or t is “run” then $S^1 = u_j^1$ 。

R_j^2 : if v_j is “strong” or t is “done” then $S^2 = u_j^2$;

其中 u_j^1 和 u_j^2 为局部控制变量。由此可得出全局模糊控制规则如下:

$$S_{\text{res}} = \frac{A \times u_j^1 + B \times u_j^2}{A + B} \quad (10)$$

所以有

$$\dot{m}(t) = \max(\mu_{\text{strong}}(v_j), \mu_{\text{done}}(t)) (u_j^1 - u_j^2) v_j + u_j^2 v_j$$

假设 4.1 假设 u_j^1 和 u_j^2 满足如下方程:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t u_j^1(\tau) v_j(\tau) d\tau = m_{d1}; \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t u_j^2(\tau) v_j(\tau) d\tau = m_{d2}$$

其中 m_{d1} 和 m_{d2} 为有穷正实数。基于假设 4.1 有如下定理:

定理 4.1 如果区间速率连续 Petri 网满足假设 4.1, 则该迁移的输出库所的标识是有穷的, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t))(u_j^1 - u_j^2)v_j + u_j^2 v_j d\tau$$

存在且有穷。

证明: 由于 $u_j^1 \geq 0, u_j^2 \geq 0$, 且 $\max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t)) \in [0, 1]$, 于是有:

(1) 当 $u_j^1 > u_j^2$,

$$m(t) - m_0 = \int_0^t \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t))(u_j^1 - u_j^2)v_j + u_j^2 v_j d\tau \leq \int_0^t (u_j^1 - u_j^2 + u_j^2)v_j d\tau$$

即有

$$m(t) - m_0 \leq \int_0^t u_j^1 v_j d\tau$$

由于 $0 \leq \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t)) \leq 1$, 所以有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m(t) \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t u_j^1 v_j d\tau + m_0 = m_{d1} + m_0$$

(2) 当 $u_j^1 \leq u_j^2$

$$m(t) - m_0 = \int_0^t \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t))(u_j^1 - u_j^2)v_j + u_j^2 v_j d\tau \leq \int_0^t u_j^2 v_j d\tau$$

由于 $0 \leq \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t)) \leq 1$, 所以有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m(t) \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t u_j^2 v_j d\tau + m_0 = m_{d2} + m_0$$

(3) 当 $u_j^1 > u_j^2, t = t_1$, 或 $u_j^1 \leq u_j^2, t = t_2$, 则有

$$\begin{aligned} m(t) - m_0 &= \int_0^t \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t))(u_j^1 - u_j^2)v_j + u_j^2 v_j d\tau \\ &= \int_0^{t_1} A u_j^1 v_j d\tau + \int_0^{t_2} (1-A) u_j^2 v_j d\tau \leq \\ &\quad \int_0^{t_1} u_j^1 v_j d\tau + \int_0^{t_2} u_j^2 v_j d\tau \end{aligned}$$

其中 $A = \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t))$; 由于 $0 \leq \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t)) \leq 1$, 所以有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m(t) \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t u_j^1 v_j d\tau + \int_0^t u_j^2 v_j d\tau + m_0$$

即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m(t) \leq m_{d1} + m_{d2} + m_0$$

根据假设 4.1 可知迁移的输出库所的标识是有穷的, 命题得证。

定理 4.2 如果区间速率连续 Petri 网满足假设 4.1, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} m(t)$ 具有上下界。

证明: 若 $u_j^1 > u_j^2$, 则有

$$m(t) - m_0 = \int_0^t \max(\mu_{strong}(v_j), \mu_{done}(t))(u_j^1 - u_j^2)v_j + u_j^2 v_j d\tau$$

因此

$$m(t) - m_0 \geq \inf_{\substack{\mu_{strong}(\cdot) \in [0,1] \\ \mu_{done}(\cdot) \in [0,1]}} \int_0^t A(u_j^1 - u_j^2)v_j + u_j^2 v_j d\tau$$

且

$$m(t) - m_0 \leq \sup_{\substack{\mu_{strong}(\cdot) \in [0,1] \\ \mu_{done}(\cdot) \in [0,1]}} \int_0^t A(u_j^1 - u_j^2)v_j + u_j^2 v_j d\tau$$

根据假设 4.1, 易知

$$m_{d2} + m_0 \leq \lim_{t \rightarrow \infty} m(t) \leq m_{d1} + m_0$$

类似可证当 $u_j^1 < u_j^2$ 时, 有

$$m_{d1} + m_0 \leq \lim_{t \rightarrow \infty} m(t) \leq m_{d2} + m_0$$

当 $u_j^1 = u_j^2$ 时, 有

$$m_{d1} + m_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} m(t) = m_{d2} + m_0$$

命题得证。

5 分析举例

最后通过例子来说明上述收敛定理在系统分析中的应用。图 3 所示为具有 4 个机器的化工生产系统。机器 M_1, M_2 生产的半成品送入缓冲区 B3, 两台机器的速率分别限定在速率区间 $[2, 3]$ 和 $[3, 5]$ 。机器 M_3 加工的产品送入缓冲区 4, 其速率限定在速率区间 $[4, 6]$ 。缓冲区 4 的产品分别送入机器 M_4, M_5 进行加工, 两台机器的速率分别限定在速率区间 $[3, 4]$ 和 $[1, 2]$, 设缓冲区 3 的最大容量为 30, 其初始值为 10, 其它缓冲区的容量为无限大。对应的区间速率连续 Petri 网模型如图 4 所示。

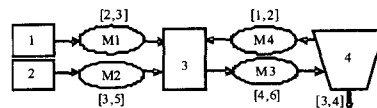


图 3 一个化工生产系统

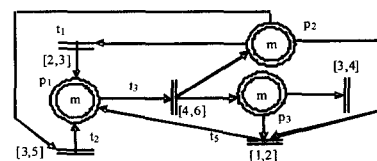


图 4 化工生产系统的 ICPN 模型

该化工过程要考虑的问题包括:

- (1) 该系统是否稳定;
- (2) 任意时刻缓冲区 B3 和 B4 产品数量的大小;
- (3) 有限缓冲区 B3 的产品数量在任意时刻是否均不大于缓冲区的最大容量。

基于传统的方法或基于 ICPN 的使能和引发规则无法证明该系统是否稳定, 利用本文第 3, 4 节的方法对每个迁移建立模糊模型, 容易证明各个迁移的模糊模型都是收敛的, 因此该系统也是收敛的, 即该系统是稳定的。

由于系统是稳定的, 利用 ICPN 的模型行为演变算法^[5]可求出在任何时刻 τ 上述 3 个库所的标识可分别由如下公式求出:

$$m_1(\tau) = \begin{cases} 10 + \int_0^\tau 4dx & \tau \in [0, 5] \\ 30 + \int_{5k}^\tau -1.8dx & \tau \in [5k, 5k + 0.5] \\ 29.1 + \int_{5k+0.5}^\tau 0.2dx & \tau \in [5k + 0.5, 5(k+1)] \end{cases}$$

$$m_2(\tau) = \begin{cases} 20 + \int_0^\tau -4dx & \tau \in [0, 5] \\ 0 + \int_{5k}^\tau -1.8dx & \tau \in [5k, 5k+0.5] \\ 0.9 + \int_{5k+0.5}^\tau 0.2dx & \tau \in [5k+0.5, 5(k+1)] \end{cases}$$

$$m_3(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \in [0, 5] \\ \int_5^\tau 0.8dx & \tau \geq 5 \end{cases}$$

即在任意时刻 τ 缓冲区 B3 的产品数量 $=m_1(\tau)$, 缓冲区 B4 的产品数量 $=m_3(\tau)$, 其中 k 为正整数。

由上述公式可知在任意时刻 τ 均有 $m_1(\tau) + m_2(\tau) = 30$, 因此缓冲区 B3 的产品数量在任意时刻均小于等于缓冲区的最大容量。

结束语 为了实现区间速率连续 Petri 网的模糊控制, 本文建立了区间速率连续 Petri 网的模糊模型, 定义了区间速率连续 Petri 网的模糊规则。另外, 对区间速率连续 Petri 网的模糊控制进行了讨论, 给出了库所标识收敛的定理。ICPNs 中每个变迁的模糊模型都由两条模糊规则构成, 由于他们都是线性的, 可以适用于控制应用工程。下一步, 我们将对区间速率连续 Petri 网的模糊模型在系统控制与优化的应用进行研究。

参考文献

- [1] David R, Alla H. Continuous Petri Nets // 8th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, Saragossa (E), Juin 1987; 275-294
- [2] Ball J LE, Alla H, David R. Asymptotic Continuous Petri Nets. J. of Discrete Event Dynamic Systems; Theory and Applications, 1993; 235-263

- [3] Haounani M, Lefebvre D. Variable Speed Continuous Petri Net. Gringdeld, Switzerland // Proc. of the 17th IASTED Int. Conf. Modeling, Identification And Control. 1998
- [4] 叶志宝, 赵义军, 董焕河. 最大速度变化的连续 Petri 网 (VCPN) 的动态演变及性质判定. 计算机研究与发展, 2002, 39(3): 330-334
- [5] Gu Tianlong, Dong Rongsheng, Tian Yu-chu. Continuous Petri Nets Augmented with Maximal and Minimal Firing Speeds // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). 2003
- [6] Gu Tianlong, Dong Rongsheng. Novel Continuous Model to Approximate Time Petri Nets; Modeling And Analysis. Journal of Application Mathematic and Computer Science, 2005, 15(1): 141-150
- [7] Liao Weizhi, Gu Tianlong. Optimization And Control Of Production Systems Based On Interval Speed Continuous Petri Nets // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). Hawaii, USA; 2005; 1212-1217
- [8] 廖伟志, 古天龙, 王汝凉. 区间速率连续 Petri 网模型行为分析研究. 小型微型计算机系统, 2006, 27(8): 1490-1494
- [9] 廖伟志, 古天龙. 区间速率连续 Petri 网的有效冲突及其消解. 计算机科学, 2006, 33(10): 221-224
- [10] 廖伟志, 文 瑛, 王汝凉. 一类区间速率连续 Petri 网的可达稳态分析. 系统仿真学报, 2005, 17(z1): 44-47
- [11] 廖伟志, 王汝凉. 区间速率连续 Petri 网可达稳态必要性分析. 计算机工程与应用, 2005, 41(25): 78-80
- [12] 周必水, 唐云廷, 罗勇. 离散时间 Petri 网的模糊模型. 计算机研究与发展, 2003, 40(5): 657-660
- [13] Hennequin S, Lefebvre D, Elmoudni A. Fuzzy Control of Variable Continuous Petri Nets[C] // Proceeding of the Conference on Decision & Control. Phoenix, Arizona USA; 1999; 1352-1356

(上接第 221 页)

测方法仍然是在低信噪比情况下进行比较。可以说, 这两种方法的检测效果不相上下, 但是经过前期的算法处理, 最后都需要确定一个阈值, 以此来确定是语音还是噪声。所以这个阈值的确定很重要, 直接影响到切分出来的语音是否完整、是否准确。由图 7 和图 8 可以看出, 在语音与噪声的边缘地带, 临界带距离轨迹的突变很明显, 这使得阈值的确定比较容易, 而且切分准确。而谱熵函数由于在噪声部分起伏比较大, 所以在语音与噪声的边缘地带的函数突变不是很明显, 这就给确定阈值带来了不便。如果确定不准确, 极有可能造成漏切或错切。

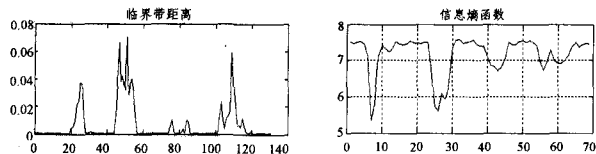


图 7 低信噪比时时临界带距离轨迹 图 8 相同信噪比时谱熵波形

结束语 本文提出了一种新的基于短时谱临界带矢量特征的语音端点检测方法。实验对比表明, 该方法在强噪声环

境下比基于倒谱距离和基于频谱熵的端点检测方法具有更好的鲁棒性。并且, 所需的变换可用高效的 FFT 来完成, 计算开销较小, 检测精度较高, 可广泛用于语音编码与语音识别。

参考文献

- [1] LI Ye, WANG Tong, CUI Huijuan, et al. Voice Activity Detection in Non-stationary Noise // IMACS Multi Conference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA). Beijing, China, October 2006; 1573-1575
- [2] 陈斌, 郭大勇, 等. 基于 DSP McBSP 的语音实时采集与噪声环境下的端点检测研究[J]. 测控技术, 2004(21): 212-214
- [3] 胡光瑞, 韦晓东. 基于倒谱特征的带噪语音端点检测[J]. 电子学报, 2001(10): 95-97
- [4] Shen J L, Hung J W, Lee L S. Robust Entropy-based End point Detection for Speech Recognition in Noisy Environments [C] // Proceedings of ICSLP- 98. 1998
- [5] 陈四根. 基于熵函数的语音端点检测方法[J]. 声学与电子工程, 2001; 28-30
- [6] 赵立. 语音信号处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003; 42-45