作为多媒体系统模型的时间 Petri 网的同步合成*)

吴哲辉
(山东科技大学　泰安 271019)

摘　要　本文用一种以出现网为基网的时间 Petri 网作为多媒体系统模型。这种模型便于描述和分析并行媒体流间的同步问题。文中提出了时间层次同步和同步时间差阈值等概念。同步时间差同步是时间层次同步性能的一个度量。根据实现时间层次同步的可能性,一个时间 Petri 网中的同步变迁可划分为三种类型:理想同步变迁、可实现有效同步的变迁和不可能实现有效同步的变迁,一个好的多媒体系统的时间 Petri 网模型不应存在第三类同步变迁。文中给出了这三类变迁的判定条件。

关键词　时间 Petri 网,多媒体系统,同步

Synchronous Composition of Time Petri Nets as Models of Multimedia System

WU Zhe-Hui
(Shandong University of Science and Technology, Taian 271019)

Abstract　A kind of time Petri nets are used to be models of multimedia systems in this paper. The underlying nets of this kind of time Petri nets are occurrence nets. They are convenient to describe and analyze the synchronous problem between concurrent media streams. From the understanding of synchronization in multimedia systems, the concept of synchronization on time level and the concept of threshold of time distance for synchronization are presented. The threshold of time distance is a measure of synchronization on time level. The synchronous performance of synchronous transitions in a time Petri net model is divided to three classes according to the possibility of realizing the valid synchronization on time level and the decided conditions of this classification are given.

Keywords　Time Petri net, Composition, Multimedia system, Synchronization

1. 引言

时间 Petri 网[1]作为实际系统的模型,得到了广泛的应用。同原型 Petri 网相比较,含时间因素的 Petri 网作为系统模型,在某些方面有其优越性。原型 Petri 网着眼于描述系统中各个事件(进程)之间的逻辑关系,而时间 Petri 网则能够描述和分析系统中时间层次的性能。

许多实际系统(如作业调度、施工安排、多媒体同步等)都可以用以出现网为基网的时间 Petri 网建模。对于这种模型进行分析时,并发序列的同步问题往往是分析的关键(这类网中不存在冲突)。显然对于不同的实际系统,性能分析的目标可能不一样,但要实现各自的分析目标,都离不开对这种网中的同步问题的分析。不同的实际系统对于同步性能的要求也不同。虽然从总体上说,都希望尽量减少同步等待的时间,但对等待的时间的限度要求有明显的差别。对作业调度、施工安排等一类问题,减少同步等待的时间是为了使完成整个任务的时间最短,而对于这段时间的长短并没有严格的限制。如果用这类网系统作为多媒体同步模型,那么对同步等待的时间就有严格的限制。因为一旦同步等待的时间大于某个允许值,多媒体系统会失真。这种情况就认为同步失效。

以出现网为基网的时间 Petri 网用于施工安排、作业调度等问题的建模和分析,已有许多文献(如文[2])作过详细的论述。本文主要讨论用于描述多媒体系统中媒体流间同步问题的这类网系统的同步问题。

基于时间 Petri 网的多媒体系统模型已提出了多个,其中比较有代表性的有 OCPN[3],XOCPN[4,5],TSPN[6],FTPN[7],DTPN[8]等。这些模型各自从某个角度反映了多媒体系统的一些特征,分析了多媒体系统在某些方面的一些性能。其中某些模型(如 TSPN)也讨论到媒体流间的同步问题,考虑到由于网络严重延迟、阻塞或丢包等因素而导致的同步失败,并提出了主弧规则对这种情况进行处理。所谓主弧规则,就是在几个需要同步的媒体流中确定一个主媒体流,以主媒体流的进度为基准,其它的媒体流采用等待或跳过(如减帧)的方法实现同主媒体流的同步。这种处理方案的效果显然不理想。原因就在于这种方案是到了马上需要同步时才检查是否能够(从时间上)同步,并进行紧急处理。

本文提出一个检查和处理媒体流间同步的方法。这种方法是根据多媒体系统的时间 Petri 网模型中各个媒体段的表演时间(时间区间),事先计算出各个媒体流的进度时间表,考察在需要同步的媒体段是否能实现有效的同步(即各个媒体流到达该媒体段的时间差是否在允许的范围之内)。否则从一开始就对非主媒体流的各个媒体段的表演时间进行调整(而不是到了同步时才紧急处理),这样可以实现各媒体流间较理想的同步。

2. 作为媒体流间同步模型的时间 Petri 网

关于 Petri 网的基本概念、术语和记号请参看文[9],这里从略。

定义 2.1　时间 Petri 网是一个五元组 $\Sigma=(S,T;F,D,M)$,其中 $(S,T;F)$ 为一个网,M 是网系统 Σ 的标识,D 是变迁集 T 到非负实数区间集的一个映射,即

$D:T\rightarrow R^{*}\times R^{*}$ (R^{*} 是非负实数集)

*)国家自然科学基金资助项目(60173053)。**吴哲辉**　教授,博士生导师,主要研究方向有 Petri 网理论及应用、算法设计与分析、形式语言与自动机理论等。

对于 $t_i \in T$，若 $D(t_i)=[\alpha_i,\beta_i](\alpha_i\leqslant\beta_i)$，那么变迁 t_i 发生的持续时间 θ_i 满足 $\alpha_i\leqslant\theta_i\leqslant\beta_i$，即 t_i 的发生至少需要 α_i 个单位时间，最多不超过 β_i 个单位时间。当 $\alpha_i=\beta_i=0$ 时，称 t_i 为瞬时变迁。

定义 2.2 设 $\Sigma=(S,T;F,D,M)$ 为一个网，其初始标识为 M_0，

1)规定初始标识为 M_0 的出现时间为零，记为 $O(M_0)=0$；

2)M 为 Σ 中的一个标识，其出现时间为 τ，即 $O(M)=\tau$；若 $t\in T$，$D(t)=[\alpha,\beta]$ 满足 $\forall\ s\in {}^{\cdot}t: M(s)\geqslant 1$ 则变迁 t 从时刻 τ 起可以发生，t 发生所需的时间 θ 满足 $\alpha\leqslant\theta\leqslant\beta$，变迁 t 发生后得到新的标识 M'，满足

$$M'(s)=\begin{cases} M(s)+1 & \text{当 } s\in t^{\cdot}-{}^{\cdot}t \\ M(s)+1 & \text{当 } s\in {}^{\cdot}t-t^{\cdot} \\ M(s) & \text{其它} \end{cases}$$

M' 的出现时间为 $O(M')=\tau+\theta$

时间 Petri 网的概念最早是由 C. Ramchandani[1]提出的。文[1]给出的时间 Petri 网定义中，对时间区间含义的解释同本文(定义 2.1 和定义 2.2)有所不同。在文[1]中，若 $D(t_i)=[\alpha_i,\beta_i]$，那么变迁 t_i 使能(即存在标识 M:M[t>)后，至少要经过 α_i 个单位时间 t_i 才可能发生，t_i 的发生是瞬时的，不需要持续时间，如果经过了 β_i 个单位时间 t_i 还未发生，则 t_i 失去使能(虽然可能并没有其它变迁发生使标识发生变化)。这样定义的时间 Petri 网，虽然对于某些实际系统的建模来说是合适的，但同施工安排、作业调度以及多媒体同步等系统的实际不相吻合，所以本文采用了定义 2.1 和定义 2.2 作为讨论的基础。

定义 2.3 设 $N=(S,T;F)$ 为一个网，若

1)$\forall\ s\in S: |{}^{\cdot}s|\leqslant 1 \cap |s^{\cdot}|\leqslant 1$

2)$\forall\ x,y\in S\cup T: (x,y)\in F^{+}\rightarrow(y,x)\notin F^{+}$ (F^{+} 是流关系 F 的传递闭包)，则称 N 为一个出现网。

若时间 Petri 网 $\Sigma=(S,T;F,D,M)$ 中的 $(S,T;F)$ 为一个出现网，则称 Σ 为一个以出现网为基网的时间 Petri 网。

作业调度、施工安排等许多实际系统都可以用以出现网为基网的时间 Petri 网建模。一般地，这种模型的初始标识 M_0 满足

$$M_0(s)=\begin{cases} 1 & \text{当 } {}^{\cdot}s=\phi \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

而网系统的运行过程就是由初始标识演变为终止标识的一个过程，终止标识 M_t 满足

$$M_t(s)=\begin{cases} 1 & \text{当 } s^{\cdot}=\phi \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

而且在运行过程中，对任意可达标识 M 和任意库所 $s\in S$，都有 $M(s)\leqslant 1$。

本文中我们也用这样一种网系统来描述多媒体系统中媒体间的同步问题。当一个以出现网为基网的时间 Petri 网表示一个多媒体系统时，每个变迁 $t_i\in T$ 表示一个媒体段，若 $D(t_i)=[\alpha_i,\beta_i]$，则表明媒体段 t_i 的表演时间不小于 α_i 个单位时间，不大于 β_i 个单位时间。当然，这只是建模时的估计，多媒体系统中媒体流运行时，t_i 所代表的媒体段实际的表演时间为某个定值 θ_i，满足 $\alpha_i\leqslant\theta_i\leqslant\beta_i$。

定义 2.4 设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 为一个以出现网为基网的时间 Petri 网，$t\in T$。若

$|\{s|s\in {}^{\cdot}t\wedge {}^{\cdot}s\neq\phi\}|\geqslant 2$

则称 t 为一个同步变迁。

引理 2.1 设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 为一个以出现网为基网的时间 Petri 网。若 $t\in T$ 是 Σ 中的一个同步变迁，则有 $|{}^{\cdot}({}^{\cdot}t)|\geqslant 2$。

定义 2.4 和引理 2.1 表明，在以出现网为基网的时间 Petri 网中，一个同步变迁 t 发生之前，必然有两个以上的变迁并发，而且只有当这些并发的变迁发生后，同步变迁才可能发生。当我们用以出现网为基网的时间 Petri 网作为多媒体系统的模型时，同步变迁表述了媒体流间的同步要求。

例 1 图 1 是一个以出现网为基网的时间 Petri 网，其中 $S=\{s_1,s_2,\cdots,s_{20}\}$，$T=\{t_1,t_2,\cdots,t_{13}\}$，流关系 F 和初始标识 M_0 由图中的有向弧和库所内的圆点标出。对每个 $t_i\in T$ 都有一个时间区间 $D(t_i)=[\alpha_i,\beta_i]$ 以之对应。为清晰起见，在图 1 中我们未标出这个时间区间(一般地应在变迁 t_i 旁标上 t_i 发生的时间区间 $[\alpha_i,\beta_i]$)。

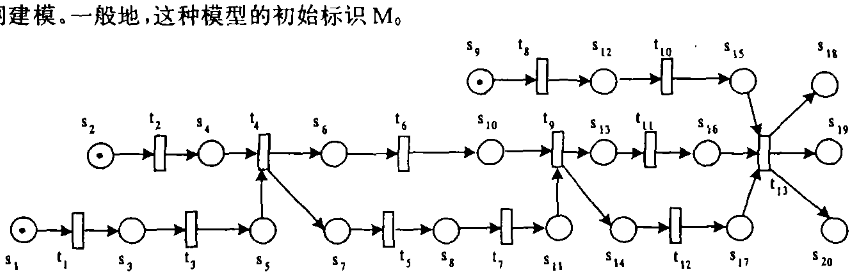

图 1 一个以出现网为基网的时间 Petri 网 Σ_1，用以描述多媒体系统中媒体流间的同步问题

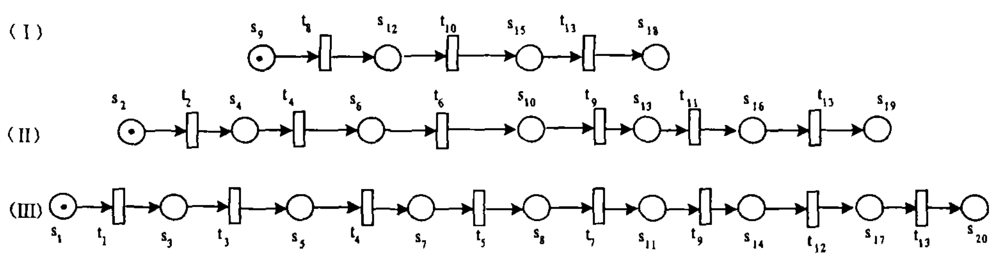

图 2 图 1 表示的多媒体系统中三媒体流的各自流程

这个网系统描述了三种媒体流的合成，三种媒体流的流程分别如图 2 中的(Ⅰ)、(Ⅱ)和(Ⅲ)所示。图 1 的网系统除了

表述出这三种媒体流以外，还清晰地表述了媒体流（Ⅰ）同媒体流（Ⅲ）要在 t_4 和 t_9 两个媒体段实现同步，媒体流（Ⅰ）、（Ⅱ）和（Ⅲ）要在媒体段 t_{13} 实现同步。

3. 时间 Petri 网的同步合成

文[10]给出了 Petri 网的同步合成网的定义，那是针对原型 Petri 网的提出的。这里把同步合成的概念引伸到时间 Petri 网。

定义 3.1 设有两个时间 Petri 网 Σ_1 和 Σ_2：$\Sigma_i=(S_i,T_i;F_i,D_i,M_{0i})$，$i=1,2$，满足

$S_1\cap S_2=\phi \quad T_1\cap T_2\neq\Phi$

且 $t\in T_1\cap T_2\rightarrow D_1(t)=D_2(t)$.

令 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 使得 $S=S_1\cup S_2, T=T_1\cup T_2, F=F_1\cup F_2$

$$\forall\, t\in T_1\cup T_2 \quad D(t)=\begin{cases}D_1(t) & 若\ t\in T_1\\ D_2(t) & 若\ t\in T_2\end{cases}$$

$$\forall\, s\in S_1\cup S_2 \quad M_0(s)=\begin{cases}M_{01}(s) & 若\ s\in S_1\\ M_{02}(s) & 若\ s\in S_2\end{cases}$$

则称时间 Petri 网 Σ 为 Σ_1 和 Σ_2 的同步合成网，记为 $\Sigma=\Sigma_1 O_T \Sigma_2$。

显然，Petri 网的同步合成运算定义可以扩展到任意 k（k$\geqslant$3）个网系统合成的情况。这样，当我们把图 2 中三个媒体流的流程（Ⅰ）、（Ⅱ）和（Ⅲ）各自看作一个时间 Petri 网（分别记为 Σ_1、Σ_2 和 Σ_3）时，图 1 的时间 Petri 网 Σ 就是这三个网的同步合成网即 $\Sigma=\Sigma_1 O_T\Sigma_2 O_T\Sigma_3$。

当一个时间 Petri 网作为多媒体模型时，对同步的要求是十分严格的。如在图 1 的时间 Petri 网中，t_4、t_9 和 t_{13} 是同步变迁。反映到合成 Σ 的三个网系统中，t_4 和 t_9 是 Σ_2 和 Σ_3 的公共变迁（即 $t_4,t_9\in T_2\cap T_3$），而 t_{13} 则是 Σ_1、Σ_2 和 Σ_3 三者的公共变迁（即 $t_{13}\in T_1\cap T_2\cap T_3$）。它们要在时间层次上实现同步（按照多媒体系统中媒体流间同步的含义），就是指在描述各个媒体流进程的网系统 Σ_1、Σ_2 和 Σ_3 各自独立运行时，t_4（以及 t_9）在 Σ_2 中开始发生的时刻同它在 Σ_3 中开始发生的时刻应是相同的，而 t_{13} 在 Σ_1、Σ_2 和 Σ_3 三个网系统中开始发生的的时间应是相同的。诚然，"同时发生"的含义也不是绝对的，从感官感知的角度来说，只要开始发生的时刻相差很小（如小于某个事先规定的数 δ），我们就认为它们是"同时"发生。因此，要讨论作为多媒体模型的同步问题，就是对时间 Petri 网中的每个同步变迁 t，都事先给定一个允许的时间差阈值 $\delta(t)$，然后考察在各个独立的网系统运行时，t 在各个网系统中开始发生的时刻之差是否小于等于 $\delta(t)$。

定义 3.2 设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 为一个以出现网为基网的时间 Petri 网，其中 M_0 是 Σ 的初始标识，即

$$M_0(s)=\begin{cases}1 & 当\ {}^{\cdot}s=\phi\\ 0 & 其它\end{cases}$$

若变迁 $t\in T$ 满足 $M_0[t>$，则称 t 为一个初始使能变迁。

在一个作为多媒体模型的时间 Petri 网中，初始使能变迁往往不只一个，一般地对应每一个媒体流的子网系统中都有一个初始使能变迁。

在一个以出现网为基网的时间 Petri 网中，能否使每个同步变迁都能实现时间层次的同步，主要取决于各个变迁发生所需要的时间长短，或者说取决于定义在变迁集上的函数 D。但对于有些情况，也可以通过调整初始使能变迁的开始发生时刻来实现同步。

当一个同步变迁 t 满足 $\forall\, t'\in T:(t',t)\in F^+\rightarrow t'$ 不是同步变迁时，完全可以通过调整初始使能变迁的开始时刻来实现时间层次的同步。图 1 的时间 Petri 网 Σ 中，t_4 就是这种情况的一个例子。从图中可以看出，变迁 t_4 是 t_1t_3 和 t_2 两个并发的变迁序列的同步。设 $D(t_i)=[\alpha_i,\beta_i]$，i=1,2,3，$t_4$ 所允许的时间差为 $\delta(t_4)$。当系统运行时，t_i(i=1,2,3)发生所需的实际时间记为 θ_i，满足 $\alpha_i\leqslant\theta_i\leqslant\beta_i$(i=1,2,3)。如果对于满足这个条件的任意 θ_1,θ_2 和 θ_3 的值，都有 $|\theta_1+\theta_3-\theta_2|>\delta(t_4)$，而这两个初始使能变迁 t_1 和 t_2 又都从一开始（零时刻）就发生，那是不可能在 t_4 处实现时间层次的同步的。假如我们根据情况把 t_1 或 t_2 的开始发生时间推迟，就有可能在 t_4 处实现同步。譬如，若 $\theta_1+\theta_3>\theta_2$，我们可以把 t_2 的开始发生时间推迟，选取一个 $\gamma(t_2)$，使得 $|(\theta_1+\theta_3)-(\theta_2+\gamma(t_2))|<\delta(t_4)$ 就可以在 t_4 处实现时间层次的同步。

在图 1 的网系统中，初始使能变迁开始发生时刻的调整，对同步变迁 t_9 就不发生作用。从图中可以看出，t_9 是在 t_4 的同步以后，t_5t_7 和 t_6 两个并发变迁序列的再次同步。由于 t_4 的同步，t_5 和 t_6 的开始发生时间是相同的（不管 t_1 和 t_2 的开始发生时间是否相同）。t_9 处是否能实现时间层次的同步完全取决于 $D(t_5)$，$D(t_6)$，$D(t_7)$ 和 $\delta(t_9)$ 的关系。对于这种情况，我们也不能通过调整 t_5 和 t_6 的开始发生时刻来实现同步。因为 t_5 和 t_6 都不是初始使能变迁，调整它们的开始时刻会影响到描述一个媒体流的子网系统的内部衔接（即使流内同步受到破坏）。

同步变迁 t_{13} 又是另一种情况，它是三个并发序列 t_8t_{10}，t_{11}，t_{12} 的同步。由于序列 t_{11} 和 t_{12} 是在 t_9 的同步以后的并发序列，在 t_{13} 处再要求同步。这种时间层次的同步能否实现，完全取决于 $D(t_{11})$，$D(t_{12})$ 和 $\delta(t_{13})$ 的关系。而序列 t_8t_{10} 同另两个序列的同步则可以通过调整初始使能变迁的开始发生时刻来加以补救。原因就在于在初始使能变迁 t_8 到 t_{13} 的有向路上，所有的变迁（除 t_{13} 外）都不是同步变迁。

以上只是对一个具体的例子中的几种情况的讨论。下面给出作为多媒体模型的时间 Petri 网同步问题的一般性提法。这里所说的"同步"，是指时间层次的同步。

设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 为一个以出现网为基网的时间 Petri 网，其中 $S=\{s_1,s_2,\cdots,s_m\}$，$T=\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$；$D(t_i)=[\alpha_i,\beta_i]$，1,2,…,n，$M_0$ 是 Σ 的初始标识，即

$$M_0(s)=\begin{cases}1 & 当\ {}^{\cdot}s=\phi\\ 0 & 其它\end{cases}$$

Σ 的初始使能变迁集记为 T_b，Σ 的同步变迁集记为 T_s。

设对每个 $t_i\in T_b$，选定 t_i 的开始发生时刻为 $\gamma(t_i)$（$\gamma(t_i)\geqslant 0$）；对每个变迁 t_i，选定 t_i 发生所需的持续时间（对应于媒体段的表演时间）为 $p(t_i)$（$\alpha_i\leqslant p(t_i)\leqslant\beta_i$）。

1）反复使用下面两个步骤，可以求出每个 $t_i\in T-T_b$ 的开始发生时刻 $\gamma(t_i)$ 和每个 $s_j\in S$（且 ${}^{\cdot}s_j\neq\phi$）的标志出现（即 $M(s)=1$）时刻 $O(s_j)$。

1.1）若已知 t_i 的开始发生时刻为 $\gamma(t_i)$，则对每个 $s_j\in t_i^{\cdot}$ 都有 $O(S_j)=\gamma(t_i)+p(t_i)$

1.2）若 $\forall\, s_j\in {}^{\cdot}t_i$，$s_j$ 的标志出现时刻 $O(s_j)$ 已知，则 $\gamma(t_i)=\max\{O(s_j)\mid s_j\in {}^{\cdot}t_i\}$

2）对每个同步变迁 $t_i\in T_s$，都给出了同步时间差阈值 $\delta(t_i)$，那么

2.1）对某个同步变迁 t，当

$$\max\{O(s)\mid s\in {}^{\cdot}t\}-\min\{O(s)\mid s\in {}^{\cdot}t\}\leqslant\delta(t) \qquad (3.1)$$

时，我们说 $\gamma(T_b)=\{\gamma(t_i)\mid t_i\in T_b\}$ 和 $p(T)=\{p(t_i)\mid t_i\in T\}$ 的选取可使变迁实现有效同步。

2.2）如果存在一组 $\gamma(T_b)$ 使得任意选取的一组 $p(T)$（在满足 $\alpha_i\leqslant p(t_i)\leqslant\beta_i$ 的条件下任意选取）都能使(3.1)式成立，

则说 t 是一个理想同步变迁。

2.3)如果存在一组 $\gamma(T_b)$ 和一组 $p(T)$(满足 $\alpha_i \leqslant p(t_i) \leqslant \beta_i$)使得(3.1)式成立,则说变迁 t 是一个可控同步变迁。

2.4)如果对任意一组 $\gamma(T_b)$ 和任意一组(满足条件 $\alpha_i \leqslant p(t_i) \leqslant \beta_i$)的 $p(T)$,(3.1)式都不成立,则说变迁 t 是不可能实现同步的。

2.5)若 Σ 中的每个同步变迁都是理想同步变迁,则此 Σ 为一个理想同步网系统;若 Σ 中的每个同步变迁都是可控同步变迁(理想同步变迁当然也是一种可控同步变迁),则说 Σ 为一个可控同步网系统;否则称 Σ 为一个不能实现有效同步的网系统。

2.2)～2.4)给出了作为多媒体系统模型的时间 Petri 网中,同步变迁的同步性能的三个层次。2.5)则是对整个网系统的同步性能的三个层次的划分。理想同步网系统是同步性能最好的网系统。如果一个多媒体系统的模型是这样的一种网系统,那么只要适当选择各媒体流的首媒体段的开始表演时刻,那么各媒体段的表演时间 $p(t_i)$(只要满足 $\alpha_i \leqslant p(t_i) \leqslant \beta_i$)任意选取,在各个同步变迁都可以实现有效同步。对可控同步网系统,除了要适当选择各媒体流中的首媒体段的开始表演时刻以外,对其中的可控同步变迁,还要注意控制同步之前的各媒体段的表演时间,才可能实现有效同步。对于不能实现有效同步的网系统,则必须对各媒体段的表演时间区间[α_i,β_i]进行修改,否则是不能实现有效同步的。

4. 同步性能层次的判定

是否可以根据一个多媒体系统的时间 Petri 网模型直接判定该系统属于理想同步系统、可控同步系统,还是不能实现有效同步的系统呢?回答是肯定的。为简便起见,我们只对由两个媒体流合成的 Petri 网模型进行讨论,给出对各个同步变迁的同步性能的判定条件,整个系统的同步性能可以综合系统中各个变迁的同步性能得到。这些结果容易引伸到多于两个媒体流的多媒体系统的 Petri 网模型。

设 $\Sigma_i=(S_i,T_i;F_i,D_i M_{0i})$,i=1,2,$\Sigma_i$ 为描述单个媒体流的顺序时间网系统(即 Σ_i 是无回路连通网且 $\forall s\in S_i$:$|{}^{\cdot}s|\leqslant 1 \wedge |s^{\cdot}|\leqslant 1$,$\forall t\in T_i$:$|{}^{\cdot}t|=|t^{\cdot}|=1$),$S_1\cap S_2=\phi$,$T_1\cap T_2\neq\phi$,令 $\Sigma=\Sigma_1 O_T \Sigma_2$,显然 Σ 是一个以出现网为基网的时间 Petri 网系统,我们说 Σ 是一个由两个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网模型。

定义 4.1 设 Σ 是一个由两个媒体流合成的时间 Petri 网模型,t∈T 是 Σ 的一个同步变迁,若 $\forall t'\in T$:$(t',t)\in F^{+}\rightarrow t'$ 不是 Σ 的同步变迁,则称 t 为 Σ 中的一个首同步变迁,否则称 t 为 Σ 中的一个再同步变迁。

引理 4.1 设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 是一个由两个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网模型,其中 $\forall t_i\in T$:$D(t_i)=[\alpha_i,\beta_i]$。设 t 为 Σ 中的首同步变迁,其同步时间差阈值为 δ(t),$t_{i1},t_{i2},\cdots,t_{ir}$ 和 $t_{j1},t_{j2},\cdots,t_{js}$ 是在变迁 t 处同步之前的两个并发序列(如图 3 所示),那么 t 是理想同步变迁当且仅当存在 $\gamma(t_{i1}$ 和 $\gamma(t_{j1})$ 使得

$$\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\leqslant\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}+\delta(t) \tag{4.1}$$

且

$$\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}\leqslant\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}+\delta(t) \tag{4.2}$$

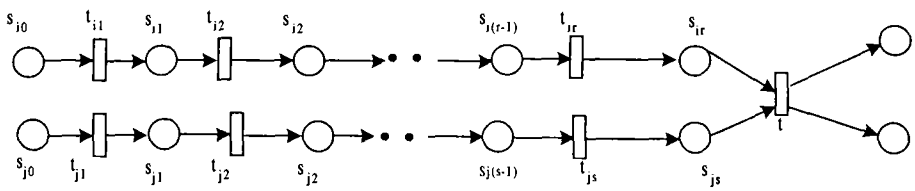

图 3 由两个媒体流合成的多媒体系统模型的一部分,其中 t 是一个首同步变迁

证明:注意 t_{i1} 和 t_{j1} 是初始使能变迁,即有

$$O(s_{ir})=\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik}) \tag{4.3}$$

$$O(s_{js})=\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}p(t_{jk}) \tag{4.4}$$

其中 $p(t_{ik})$(k=1,2,…,r)和 $p(t_{jk})$(k=1,2,…,s)分别为变迁 t_{ik} 和 t_{jk} 发生的持续时间。它们满足

$\alpha_{ik}\leqslant p(t_{ik})\leqslant\beta_{ik}$ k=1,2,…,r

$\alpha_{jk}\leqslant p(t_{jk})\leqslant\beta_{jk}$ k=1,2,…,s

从而就有

$$\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant O(s_{ir})\leqslant\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik} \tag{4.5}$$

$$\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant O(s_{js}\leqslant\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk} \tag{4.6}$$

从(4.5)式和(4.6)式可以得到

$$O(s_{ir})-O(s_{js})\leqslant(\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik})-(\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk})\leqslant\delta(t)$$

$$O(s_{js})-O(s_{ir})\leqslant(\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk})-(\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik})\leqslant\delta(t)$$

即 $$|O(s_{ir})-O(s_{js})|\leqslant\delta(t) \tag{4.7}$$

注意:

$\max\{O(s)|s({}^{\cdot}t)\}-\min\{O(s)|s\in{}^{\cdot}t\}=|O(s_{ir})-O(s_{js})|$

就知满足(4.1)和(4.2)式的同步变迁是理想同步变迁。

反之,若 t 是一个理想同步变迁,则(4.7)式成立。由(4.3)、(4.4)和(4.7)式容易推出条件(4.1)和(4.2)式必然成立。

定理 4.1 设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 是一个由两个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网模型,t 为 Σ 中的首同步变迁(如图 3 所示),δ(t)是 t 的同步时间差阈值,那么 t 是理想同步的当且仅当

$$\max\{\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik},\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\}-\max\{\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik},\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\}\leqslant\delta(t) \tag{4.8}$$

证明:不妨假设 $\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\geqslant\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}$,记 $\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}-\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}=\tau$,取 $\gamma(t_{i1})=\tau$,$\gamma(t_{j1})=0$,那么对任意满足 $\alpha_{ik}\leqslant p(t_{ik})\leqslant\beta_{ik}$ 的一组 $\{p(t_{ik})|k=1,2,\cdots,r\}$ 和任意满足 $\alpha_{jk}\leqslant p(t_{jk})\leqslant\beta_{jk}$ 的一组 $\{p(t_{jk})|k=1,2,\cdots,s\}$ 都有

$$|O(s_{jr})-O(s_{ir})|=|\sum_{k=1}^{s}p(t_{jk})-(\tau+\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik}))|$$

$$\leqslant \max\{\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk},\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}\}-(\tau+\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik})$$

$$=\max\{\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik},\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\}-\max\{\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik},\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\}\leqslant\delta(t) \quad \square$$

这就说明了(4.8)是 t 为理想同步变迁的充分必要条件。

定理 4.2 首同步变迁都是可控同步的。

证明：设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 是一个由两个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网模型，t 为 Σ 中的首同步变迁（如图 3 所示）。我们证明 t 至少是一个可控同步变迁。

由于 $\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}$，$\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}$ 这 4 个和式的大小关系不外乎下面 6 种情况：

1) $\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}$

2) $\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{jk}$

3) $\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}$

4) $\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}$

5) $\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}$

6) $\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}$

对于 1)，2)，3) 三种情况，选取 $\gamma(t_{i1})=\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}-\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}$，$\gamma(t_{j1})=0$ 易知存在一组 $\{p(t_{ik})|k=1,2,\cdots,r\}$ 和一组 $\{p(t_{jk})|k=1,2,\cdots,s\}$ 使得

$\alpha_{ik}\leqslant p(t_{ik})\leqslant\beta_{ik}(k=1,2,\cdots,r)$，

$\alpha_{jk}\leqslant p(t_{jk})\leqslant\beta_{jk}(k=1,2,\cdots,s)$

且 $\gamma(t_{i1})+\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik})=\sum_{k=1}^{s}p(t_{jk})$

从而有 $O(s_{ir})=O(s_{js})$。即在变迁 t 是可以实现有效同步的。

对于 4)，5)，6) 三种情况，选取 $\gamma(t_{j1})=\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}-\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}$ $\gamma(t_{i1})=0$ 同样存在一组 $\{p(t_{ik})|k=1,2,\cdots,r\}$ 和一组 $\{p(t_{jk})|k=1,2,\cdots,s\}$ 使得

$\alpha_{ik}\leqslant p(t_{ik})\leqslant\beta_{ik}(k=1,2,\cdots,r)$，

$\alpha_{jk}\leqslant p(t_{jk}\leqslant\beta_{jk}(k=1,2,\cdots,s)$

且 $\gamma(t_{j1})+\sum_{k=1}^{s}p(t_{jk})=\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik})$

从而有 $O(s_{ir})=O(s_{js})$。即在变迁 t 是可以实现有效同步的。

以上讨论说明，对 6 种情况中的任一种，首同步变迁都是可控同步的。

对于再同步变迁，在实现时间上的有效同步就更困难一些。假设 t 是 Σ 的一个再同步变迁，那么两个媒体流在媒体段 t 之前的另一个媒体段 t' 处已实现了一次同步（如图 4 所示）。这时，在 t 处同步之前的两个并发序列 $\sigma_1=t_{i1}t_{i2}\cdots t_{ir}$ 和 $\sigma_2=t_{j1}t_{j2}\cdots t_{js}$ 的首变迁 t_{i1} 和 t_{j1} 的开始发生时刻是相同的。为了保证媒体流的连续性（即媒体流内同步），不能通过调整 t_{i1} 和 t_{j1} 的开始发生时间来保证两个媒体流间在 t 处的同步，从而只能对两个并发的序列 σ_1 和 σ_2 中各变迁的发生的持续时间区间提出更严格的要求。

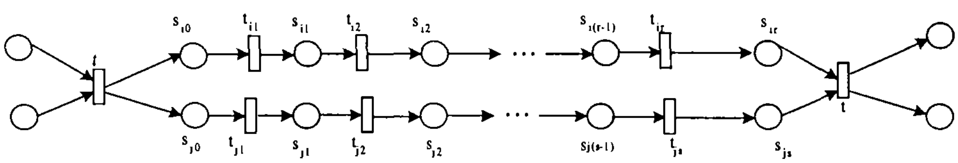

图 4 由两个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网模型的一部分，其中 t 是一个再同步变迁

定理 4.3 设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 是一个由两个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网模型，其中 $\forall\, t_i\in T: D(t_i)=[\alpha_i,\beta_i]$。设 t 为 Σ 中的再同步变迁，其同步时间差阈值为 $\delta(t)$，$\sigma_1=t_{i1}t_{i2}\cdots t_{ir}$ 和 $\sigma_2=t_{j1}t_{j2}\cdots t_{js}$ 是在 t 处同步之前的两个并发序列（如图 4 所示），那么 t 为理想同步变迁的充分必要条件是

$$\max\{\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik},\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\}-\min\{\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik},\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\}\leqslant\delta(t) \qquad (4.9)$$

证明：对于变迁 t_{ik} 发生的持续时间 $p(t_{ik})$（满足 $\alpha_{ik}\leqslant p(t_{ik})\leqslant\beta_{ik}$，$k=1,2,\cdots,r$）和 t_{jk} 发生的持续时间 $p(t_{jk})$（满足 $\alpha_{jk}\leqslant p(t_{jk})\leqslant\beta_{jk}$，$k=1,2,\cdots,s$），注意到从 $\gamma(t_{i1})=\gamma(t_{j1})$（4.3）和（4.4）式可以得到

$$|O(s_{ir})-O(s_{js})|=|\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik})-\sum_{k=1}^{s}p(t_{jk})| \qquad (4.10)$$

显然对于 $p(t_{ik})(k=1,2,\cdots,r)$ 和 $p(t_{jk})(k=1,2,\cdots,s)$ 的任意取值，都有

$$|\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik})-\sum_{k=1}^{s}p(t_{jk})|\leqslant\max\{\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik},\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\}-\min\{\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik},\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\}$$

若（4.9）式成立，那么就有

$$|O(s_{ir})-O(s_{js})|\leqslant\delta(t)$$

即在变迁 t 处是可以实现有效同步，即变迁 t 是理想同步变迁。

反之，若变迁 t 是一个理想同步变迁，即对任意取值 $p(t_{ik})(k=1,2,\cdots,r)$ 和 $p(t_{jk})(k=1,2,\cdots,s)$ 都有

$$|O(s_{ir})-O(s_{js})|=|\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik})-\sum_{k=1}^{s}p(t_{jk})|\leqslant\delta(t)$$

那么也可以推出（4.9）式成立。

定理 4.4 设 $\Sigma=(S,T;F,D,M_0)$ 是一个由两个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网模型，t 为 Σ 中的再同步变迁（如图 4 所示），其同步时间差阈值为 $\delta(t)$，那么 t 为可控同步变迁的充分必要条件是

$$\min\{\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik},\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\}-\max\{\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik},\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\}\leqslant\delta(t) \qquad (4.11)$$

证明：（充分性） $\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}$，$\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}$，$\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}$，$\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}$ 四个和式的大小关系不外乎 6 种情况（在定理 4.2 的证明中已列出）。若（4.11）式成立，那么对 6 种情况中的任何一种我们都可以适当选择 $p(t_{ik})(k=1,2,\cdots,r)$ 和 $p(t_{jk})(k=1,2,\cdots,s)$ 使得

$$\alpha_{ik}\leqslant p(t_{ik})\leqslant\beta_{ik} \quad \alpha_{ik}\leqslant p(t_{jk})\leqslant\beta_{jk} \qquad (4.12)$$

且

$$|O(s_{ir})-O(s_{js})|=|\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik})-\sum_{k=1}^{s}p(t_{jk})|\leqslant\delta(t) \quad (4.13)$$

如对情况 1) $\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}$ 可选取 $p(t_{ik})=\beta_{ik}(k=1,2,\cdots,r)$，$p(t_{jk})=\alpha_{jk}(k=1,2,\cdots,s)$ 这样(4.12)和(4.13)式都成立。

对情况 2) $\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}$ 可选取 $p(t_{jk})=\beta_{jk}(k=1,2,\cdots,s)$，对 $p(t_{ik})(k=1,2,\cdots,r)$ 的选取，使之满足(4.12)式并且 $\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik})\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}$（从而当然有 $\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{r}p(t_{ik})\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}$）这样(4.13)式也成立。

对情况 3) $\sum_{k=1}^{r}\alpha_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{r}\beta_{ik}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\alpha_{jk}\leqslant\sum_{k=1}^{s}\beta_{jk}$ 可选取 $p(t_{ik})=\beta_{ik}(k=1,2,\cdots,r)$，$p(t_{jk})=\alpha_{jk}(k=1,2,\cdots,s)$，那么(4.12)和(4.13)式也都成立。

对情况 4)，5)，6)可分别参照情况 1)，2)，3)的思想方法选取 $p(t_{ik})(k=1,2,\cdots,r)$ 和 $p(t_{jk})(k=1,2,\cdots,s)$ 使得(4.12)和(4.13)式都成立。这就证明了(4.11)式是 t 为可控同步变迁的充分条件。

（必要性） 可以证明，只有当(4.11)式成立时，才能使 6 种情况的任一种都能适当选择 $p(t_{ik})(k=1,2,\cdots,r)$ 和 $p(t_{jk})(k=1,2,\cdots,s)$ 使得(4.12)和(4.13)式都能满足。

定理 4.4 说明，对于一个再同步变迁系统来说，也可能存在连可控同步都达不到的情况（当(4.11)式的条件不能满足时）。对于这种情况，只能事先对有关的媒体段的表演时间区间($[\alpha_i,\beta_i]$)进行修改，否则无论如何也不可能实现有效的同步。

关于同步变迁性能判定的四个定理都是针对由两个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网提出和证明的。其实它们也可用于由多个媒体流合成的多媒体系统同步性能的判定。在这种系统中，一个表示多个媒体流同步的同步变迁，可能对于其中两个媒体流来说，属于再同步，而对于另一对变迁来说都是首同步。这种情况也可以综合运用定理 4.1～定理 4.4 对其同步性能加以判定。下面通过例子来说明。

例 2 我们对图 1 给出的由 3 个媒体流合成的多媒体系统的时间 Petri 网模型中的 3 个同步变迁的同步性能给出判定条件。

同步变迁 t_4 是媒体流(Ⅰ)和媒体流(Ⅱ)的首同步。由定理 4.2 知它一定是可控同步的。根据定理 4.1，如果

$$\max\{(\beta_1+\beta_3),\beta_2\}-\max\{(\alpha_1+\alpha_3),\alpha_2\}\leqslant\delta(t_4)$$

那么 t_4 还是理想同步的。

同步变迁 t_9 是媒体流(Ⅰ)和媒体流(Ⅱ)的再同步。由定理 4.4 知，如果

$$\min\{(\beta_5+\beta_7),\beta_6\}-\max\{(\alpha_5+\alpha_7),\alpha_6\}\leqslant\delta(t_9)$$

那么，t_9 是可控同步的。进一步，（根据定理 4.3），如果

$$\max\{(\beta_5+\beta_7),\beta_6\}-\min\{(\alpha_5+\alpha_7),\alpha_6\}\leqslant\delta(t_9)$$

那么 t_9 还是理想同步的。

同步变迁 t_{13} 是由 3 个媒体流合成的同步。对于媒体流(Ⅱ)和媒体流(Ⅲ)来说，t_{13} 属于再同步，而对于媒体流对(Ⅰ)和(Ⅱ)或媒体流对(Ⅰ)和(Ⅲ)来说，都可以把 t_{13} 看作首同步。因此，t_{13} 是否可控同步的，只需根据定理 4.4 对媒体流对(Ⅱ)和(Ⅲ)加以判定。这样，就得到，当

$$|\min\{\beta_{11},\beta_{12}\}-\max\{(\alpha_{11},\alpha_{12}\}|\leqslant\delta(t_{13})$$

时，t_{13} 是可控同步的。

对 t_{13} 是否理想同步变迁的判定稍为复杂一点。即要根据定理 4.1 对媒体流对(Ⅰ)和(Ⅱ)以及媒体流对(Ⅰ)和(Ⅲ)的首同步条件加以检验，又要根据定理 4.3 对媒体流对(Ⅱ)和(Ⅲ)的再同步条件加以检验。也就是说，t_{13} 是理想同步变迁当且仅当下面 3 个式子同时成立：

$$\max\{(\beta_8+\beta_{10}),\beta_{11}\}-\max\{(\alpha_8+\alpha_{10}),\alpha_{11}\}\leqslant\delta(t_{13})$$

$$\max\{(\beta_8+\beta_{10}),\beta_{12}\}-\max\{(\alpha_8+\alpha_{10}),\alpha_{12}\}\leqslant\delta(t_{13})$$

$$\max\{\beta_{11},\beta_{12}\}-\min\{\alpha_{11},\alpha_{12}\}\leqslant\delta(t_{13})$$

结语 本文提出用以出现网为基网的时间 Petri 网作为多媒体系统的模型，这种模型便于描述和分析媒体流间的同步问题。在这种模型中，一个媒体流用一个顺序网系统来表示，其中一个变迁表示一个媒体段，对变迁赋予的时间区间的上、下限表示该媒体段表演时间可能的最大和最小值。这样，媒体流间的同步就是表示各个媒体流的顺序网的同步合成。

根据多媒体系统中媒体流间同步的含义，本文提出了同步时间差阈值的概念。根据实际系统的要求，事先对时间 Petri 网中的每个同步变迁给出一个同步时间差阈值。说在一个同步变迁可以实现有效的同步（时间层次的同步），就是指该变迁的多个前集库所的标识出现的时刻之差不大于该阈值。进一步，根据实现有效同步的可能性大小，我们把同步变迁的同步性能划分为理想同步、可控同步和不能实现有效同步三个层次。最后，我们给出了根据一个多媒体系统的时间 Petri 网模型的有关参数判定该网系统中各个变迁同步性能三个层次的判定条件。

本文关于多媒体同步的讨论只涉及到（在保证不破坏媒体流内同步的前提下）媒体流间的同步问题。至于多媒体流内的同步问题，本文未作讨论。

参 考 文 献

1 Merlin P M, Farber D J. Recoverability of communication protocol—implication of a theoretical study. IEEE Transaction on Communications, 1976, 24(9): 1036～1043

2 吴哲辉，王培良，王美琴. 非肯定型工程问题的 Petri 网方法. 系统科学与数学，1989，9(4)：289～297

3 Little T D C, Ghafoor A. Synchronization and storage models for multimedia objects. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 1990, 8(3): 413～427

4 Woo W, Quzi N U, Ghafoor A. A Synchronization framework for communication of pre-orchestrated multimedia information. IEEE Network, 1994, 8(1): 52～61

5 Liang Yong-quan, Shi Zhong-zhi. A multimedia synchronization model based on timed Petri net. Journal of Computer Science and Technology, 1999, 14(3): 276～282

6 Senac P, Diaz M. Modeling logical and temporal synchronization in hypermedia systems. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 1996, 14(1): 257～273

7 Zhou Y, Murata T. Fuzzy-timing Petri net model for distributed multimedia synchronization. In: Proc. of The 1998 IEEE Intl. Conf. on Systems. Man and Cybernetics, Lolla California, 244～249

8 Prabhakaram B, Raghavan S V. Synchronization models for multimedia presentation with user participation. Multimedia Systems, 1994, 292: 53～62

9 袁崇义著. Petri 网原理. 电子工业出版社，1998

10 蒋昌俊著. 离散事件动态系统的 PN 机理论. 科学出版社，2000