

## 基于层次实时有色 Petri 网的实时系统建模与分析方法研究

刘 铭 张国印\* 姚爱红 门朝光

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

**摘 要:** Petri 网是一种基于图形进行模拟和分析的数学工具,能够描述系统的异步和并发行为,但是现有高级 Petri 网不能对嵌入式实时系统进行完整的模拟与实时性分析。该文首先通过扩展有色 Petri 网提出了层次实时有色 Petri 网模型,然后描述了嵌入式实时系统的建模和实时性分析方法。最后,将该文提出的方法应用于硬实时系统——列车通信网络 MVB 总线控制器的建模和实时性分析过程,仿真和分析结果表明,该方法能够满足列车通信网络系统设计对 MVB 总线控制器的功能验证和实时性分析需求。

**关键词:** Petri 网; 列车通信网络; 嵌入式实时系统; 形式化建模

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0580-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00533

## Research on Modeling and Analyzing Method of Real-time System Based on Hierarchical Real-time Coloured Petri Net

Liu Ming Zhang Guo-yin Yao Ai-hong Men Chao-guang

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Petri nets is a modeling and analyzing mathematical tool based on graphic, which can be used efficiently in describing the asynchronous and concurrent behaviors of system. However, existing advance Petri nets are incapable of modeling and analyzing embedded real-time system completely. Hierarchical Real-Time Coloured Petri Net is introduced by extending the definition of coloured Petri net, and methodology of modeling and real-time analysis of embedded real-time system are proposed. As a confirmation of its validity, the methodology described in this paper has been successfully applied to modeling and real-time analysis of MVB (Multifunction Vehicle Bus) device, which can satisfy the requirements about functional verification and timing analysis of system design.

**Key words:** Petri nets; Train communication network; Embedded real-time system; Formal modeling

### 1 引言

随着大规模集成电路的快速发展,特别是以 FPGA(Field Programmable Gate Array)为代表的可编程器件技术的进步,嵌入式实时系统在日常生活和工业控制领域中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。设计复杂度和电路规模的不断提升给硬件电路的设计工作带来了巨大的挑战。Petri 网是一种基于图形的适合于对系统的异步、并发行为进行形式化描述的数学工具<sup>[2]</sup>。近 50 年来, Petri 网的抽象和描述能力得到了加强,从而衍生出了高级 Petri 网,主要包括时间 Petri 网和有色 Petri 网。高级 Petri 网的出现增加了 Petri 网的分析难度,同时给系统模型性质的判断和计算造成了困难。为了有效地对复杂硬件电路设计进行建模并对系统设计的行为进行分析,很多研

究试图通过借助高级 Petri 网模型为嵌入式、分布式以及高可靠系统提供一种严谨、高效、可用性强的建模和分析方法。然而,时间 Petri 网不能有效地对变迁延时的随机性进行分析,有色 Petri 网无法显式对系统的时间进行描述,其它高级 Petri 网在嵌入式实时系统的建模和分析方面 also 存在着各种不足。

列车通信网络 (Train Communication Network, TCN)标准规定了用于列车通信的 RTP 协议、Multifunction Vehicle Bus(MVB, 多功能列车总线), Wire Train Bus(WTB, 绞线列车总线)和 Train Network Management(TNM, 列车网络管理)等内容,此标准起源于欧洲,经过多年的实践已经趋于成熟和稳定<sup>[3-5]</sup>。我国对列车网络的研究起步较晚,所以采用国际已有的列车通信网络标准同时走自主研发的道路对我国的列车系统的发展具有重要意义。列车的安全性和可靠性直接关系到乘车人员的生命安全,列车通信系统属于硬实时系统,

2010-05-27 收到, 2010-09-10 改回

国家自然科学基金(60873138)资助课题

\*通信作者: 张国印 zhangguoyin@hrbeu.edu.cn

列车网络控制器的建模和实时性分析对于保证列车系统的安全性和可靠性起着至关重要的作用。

本文对基于精确语义的有色 Petri 网建模设计方法进行了研究,提出了层次实时有色 Petri 网模型和实时性分析方法。该方法能够完整地描述嵌入式实时系统的功能属性和时间属性,适用于安全性、可靠性要求较高的实时系统设计。

## 2 层次实时有色 Petri 网

### 2.1 嵌入式实时系统

嵌入式实时系统一般由软件和硬件系统组成,其中硬件主要采用 ASIC 或 FPGA 等可编程器件实现,广泛应用于铁路、航天、航空、医疗设备等安全性、可靠性要求较高的领域。嵌入式实时系统的行为正确性不仅依赖于逻辑计算结果,还取决于产生结果的时间。实时系统因为能够在确定的时间内完成系统功能,所以具有时间约束性、可预测性和可靠性的优点。对 Petri 网在时间属性方面进行扩展的研究成果大致可分为时间 Petri 网(Time Petri Nets)<sup>[6]</sup>、计时 Petri 网(Timed Petri Nets)<sup>[7]</sup>和随机 Petri 网<sup>[8,9]</sup>3 类。时间 Petri 网允许变迁在一定的时间间隔内被触发;而对于计时 Petri 网而言,变迁必须被立即触发,能够对变迁的发生消耗的时间进行模拟;随机 Petri 网在每个变迁的使能和触发之间关联一个随机的延时,随机 Petri 网的性能分析主要建立在其状态空间和马尔可夫链同构的基础上。然而,上述 3 类高级 Petri 网都无法独立完成嵌入式实时系统的时间属性、安全性等动态行为的模拟。

本文在经典有色 Petri 网的基础上对其时间属性进行扩展,提出了一种层次实时有色 Petri 网模型,该模型可以同时满足复杂实时系统的时间属性、安全属性和系统行为等方面的建模需求。

### 2.2 HRTCPN 的基本定义

**定义 1** 层次实时有色 Petri 网(Hierarchical Real-Time Coloured Petri Net, HRTCPN)是一个 14 元组:  $HRTCPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I, TD, [d^-, d^+], TS, PW, S)$ , 其中:  $\Sigma$  是颜色的非空集合(colour set);  $P$  是库所的非空集合(places);  $T$  是变迁的非空集合(transitions);  $A$  为有向弧的集合(arcs), 并且满足表达式:  $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$ ;  $N$  是节点函数(node function), 描述从  $A$  到  $P \times T \cup T \times P$  的映射关系;  $C$  是颜色函数(colour function), 描述从  $P$  到  $\Sigma$  的映射关系;  $G$  是守卫函数(guard function), 描述  $T$  到表达式的映射, 表达式为(其中,

$B$  为布尔集,  $Type$  为类型集,  $Var$  为变量集):  $\forall t \in T : [Type(G(t)) = B \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma]$ ;  $E$  是有向弧表达式(arc expression), 描述  $A$  满足表达式(其中  $p$  是  $N(a)$  的库所):  $\forall a \in A : [Type(E(a)) = C(p)_{MS} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$ ;  $I$  为初始化函数(initialization function), 定义为库所  $P$  到表达式的映射, 满足表达式:  $\forall p \in P : [Type(I(p)) = C(p)_{MS}]$ ;  $TD$  为变迁在使能和触发之间的随机延时集合, 满足表达式:  $TD = W(M_k)$ , 其中  $W(M_k)$  是服从一定概率的分布函数;  $[d^-, d^+]$  为变迁的允许触发时间间隔集合, 其中  $d^-$  为允许变迁触发的最早时间,  $d^+$  是允许变迁触发的最迟时间;  $TS$  (Time Stamp) 为托肯的时间戳集合,  $\forall ts \in TS$  包含了托肯经过库所和变迁的时间信息, 托肯的时间戳信息可以通过计算表达式:  $TS = \sum_{(t,b) \in Y} D(p,t) < b > + \sum_{(t,b) \in Y} D(t,p) < b > + \sum_{td \in TD} td$  得出, 其中  $D$  为变迁发生的延时函数;  $PW : PW \rightarrow R^{(0,1]}$  是变迁可能发生的概率, 满足表达式  $\forall pw \in PW : \sum_{t \in P} pw(t) = 1$ ;  $S$  是由层次实时有色 Petri 子网(Sub-HRTCPN)和非层次实时有色 Petri 网(RTCPN)构成的集合,  $S = \{HRTCPN\} \cup \{RTCPN\}$ 。

**定义 2** 变迁  $t$  的绑定是定义在  $Var(t)$  上的函数  $b$ , 满足  $\forall v \in Var(t) : b(v) \in Type(v)$  且  $G(t) < b >$ 。所有绑定的集合记为  $B(t)$ 。

**定义 3** 托肯元素(Token Element, TE)表示为  $(p, c)$ , 其中  $p \in P$  且  $c \in C(p)$ ; 绑定元素表示为  $(t, b)$ , 其中  $t \in T$  且  $b \in B(t)$ 。所有的托肯元素集合用 TE 表示, 同时所有的绑定元素集合用 BE 表示。标记(marking)是 TE 上的一个多重集, 步(step)是 BE 上的非空有限多重集。初始标记  $M_0$  通过计算初始表达式  $\forall (p, c) \in TE : M_0(p, c) = (I(p))(c)$  得到。标记和步的集合分别用  $M$  和  $Y$  表示。

**定义 4** 在一个标记  $M$  中当且仅当满足表达式  $\forall p \in P : \sum_{(t,b) \in Y} E(p,t) < b > \leq M(p)$  时, 步称为被使能(enabled)。此时, 认为  $(t, b)$  或  $t$  处于使能状态。当  $|Y| \geq 1$  时称  $Y$  中元素为并发使能。

**定义 5** 当步在标记  $M_1$  下使能时, 转换后的标记  $M_2$  的结果可以通过计算表达式  $\forall p \in P : M_2(p) = M_1(p) - \sum_{(t,b) \in Y} E(p,t) < b > + \sum_{(t,b) \in Y} E(t,p) < b >$  得出, 此时称标记  $M_2$  从  $M_1$  直接可达。

**定义 6** 有限发生序列定义为满足条件  $M_1 [Y_1 > M_2 [Y_2 > M_3 \cdots M_n [Y_n > M_{n+1}$  的标记和步组成的

序列, 其中  $n \in N$ ,  $M_1$  是起始标记,  $M_{n+1}$  是终止标记。类似地, 无限发生序列定义为  $M_1 [Y_1 > M_2 [Y_2 > M_3 \dots$ 。

**定义 7** 标记  $M_j$  称为从标记  $M_i$  可达当且仅当存在以  $M_i$  为起始标记,  $M_j$  为终止标记的有限发生序列。从  $M_i$  可达的标记集合记为  $[M_i >$ 。如果标记  $M_k$  满足条件  $M_k \in [M_0 >$ , 称标记  $M_k$  是可达的 (reachable)。

**定义 8** 变迁  $t$  的输入库所集合 (preset) 记为  $\bullet t$ , 满足表达式  $\forall p_i \in \bullet t: [p_i \times t \neq \emptyset]$ ; 同理, 变迁  $t$  的输出库所集合 (postset) 记为  $t \bullet$ , 满足表达式  $\forall p_i \in t \bullet: [t \times p_i \neq \emptyset]$ 。

### 3 HRTCPN 建模方法与分析

#### 3.1 HRTCPN 建模方法

在嵌入式系统的硬件电路设计中, 不同的设计需求使得电路结构具有多样性。硬件电路从功能的角度可以划分为两个部分: 功能部件和存储部件。功能部件也称为执行部件, 如运算单元、控制单元等, 主要执行具体的操作; 存储部件如寄存器、存储器等, 用于存储初始数据和功能部件产生的结果。下面给出硬件电路系统的 HRTCPN 建模方法, 所有的扩展属性采用 Standard ML 语言实现。

(1) 每一个存储部件用一个库所  $p_i$  表示, 存储部件中的数据结构定义用颜色集合  $\Sigma$  表示;

(2) 每一个功能部件用一个变迁  $t_i$  表示, 根据部件的功能定义节点函数  $N(t_i)$ , 根据部件功能执行的前置条件定义守卫函数  $G(t_i)$ , 根据部件的时间属性定义变迁允许触发的时间间隔  $[d^-, d^+]$  和随机延时函数 TD;

(3) 如果功能部件从存储部件获取数据, 则定义从相应库所到变迁的有向弧;

(4) 如果功能部件的计算结果送入存储部件, 则定义从相应变迁到库所的有向弧;

(5) 如果多个功能部件从存储部件中获取数据且这些功能部件的操作属于互斥关系, 则定义存储部件对应库所输出有向弧表达式, 描述变迁的发生概率  $pw$ ;

(6) 根据系统的模块之间的层次划分定义 HRTCPN 网与子网的对应关系;

(7) 根据电路系统上电复位后的情况对库所进行初始化, 对存储部件中存在数据的对应库所赋予托肯元素, 并给出托肯的时间戳定义  $ts$ 。

#### 3.2 HRTCPN 的实时性分析

系统的实时性主要取决于最坏情况下关键路径的周期, HRTCPN 的一个重要作用就是可以用来分

析系统的实时性。在 HRTCPN 模型中, 关键路径由变迁发生序列  $M_1 [Y_1 > M_2 [Y_2 > M_3 \dots M_n [Y_n > M_{n+1}$  组成, 关键路径的周期实际上是 HRTCPN 从  $M_0$  开始经序列中所有变迁至少发生一次后回到初始标识  $M_0$  所需的时间。借助于文献[10]的研究, 可以得到系统路径的最小周期时间:

$$T_{\min} = \max\{T_k / N_k : k = 1, 2, \dots, q\}$$

其中  $T_k = \sum_{t_i \in L_k} r_i = Y_k^T (A^-)^T DX$  表示路径 (电路)  $k$  中变迁的延时时间和,  $N_k = \sum_{P_j \in L_k} M_i = Y_k^T M_0$  表示路径 (电路)  $k$  中托肯数之和,  $X$  为 HRTCPN 的  $T$ -不变量,  $Y_k$  为  $S$ -不变量,  $A^- = [a_{ij}^-]_{n \times m}$ ,  $a_{ij}^-$  是库所  $P_j$  输出到变迁  $T_i$  的弧的条数,  $D = [d_{ij}]_{n \times n}$ ,  $d_{ij} = \begin{cases} \text{duration}(T_i), & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ ,  $M_0$  为初始标识。实时系

统中的关键路径即为完成一系列操作的周期达到  $T_{\min}$  的路径, 通过分析关键路径的时序信息, 根据系统特性降低变迁的延时 (如用性能更好的器件替换当前器件, 从而减少操作的执行时间) 或增加路径中库所的托肯数 (增加共享资源, 如加法器等) 能够优化电路的整体性能。在系统建模阶段对电路设计的时间参数进行分析对于保证系统的实时性和系统性能的优化具有重要意义。

### 4 MVB-TCN 总线控制器结构

#### 4.1 列车通信网络

列车通信网络拓扑结构如图 1 所示, 该网络由 WTB 和 MVB 两级总线组成。WTB 是车厢之间的通信总线, MVB 是某节车厢或一组车厢内部设备之间的通信总线。一个车辆可以同时配备多条列车总线, 而且允许 MVB 总线跨越多节车厢。

WTB 和 MVB 总线都属于主-从通信协议, 通信时一个设备被配置为总线的主控制器, 在预定义的基本周期内协调从设备完成数据通信。列车通信网络上传的数据可分为周期数据、偶发数据和监视数据三种类型。WTB 和 MVB 总线对总线的数据

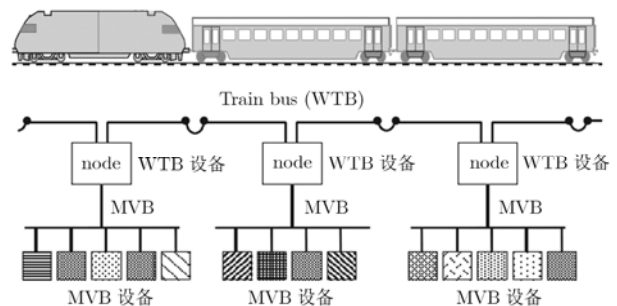


图 1 列车通信网络的拓扑结构

传输与设备管理等任务有较高的实时性要求, WTB 总线的基本周期为 25 ms, MVB 总线的基本周期为 1ms, MVB 相对于 WTB 网络控制器而言具有更高的硬实时性要求。

### 4.2 MVB-TCN总线控制器结构

**4.2.1 MVB 总线网络拓扑** MVB 总线具有容错能力, 能够连接符合列车通信网络标准的设备, 通过访问设备提供的端口可以实现对设备的控制和监

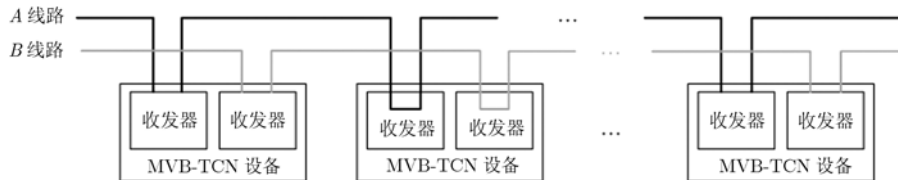


图 2 MVB 总线的双线冗余拓扑结构

路, 称为监视线路。图 2 中的通信线路 A 和 B 既可以是信任线路也可以是监视线路。

**4.2.2 MVB 总线控制器结构** 本文建模的 MVB 总线控制器结构如图 3 所示, 该控制器采用 FPGA 芯片实现, MVB 总线控制器由主控单元(MCU), 报文分析单元(TAU), TM 控制器(TMC), 仲裁器, 中断控制器, 双线冗余控制单元(LRC Unit), 计时器和收发控制单元(Transceiver Unit)等单元组成。

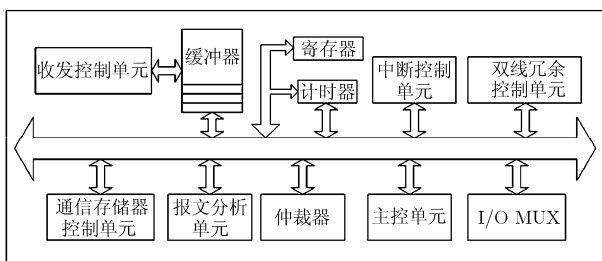


图 3 MVB 总线控制器的结构

主控单元是 MVB 总线控制器的核心单元, 根据 MVB 总线的状态控制其它模块, 完成数据流和控制流的交互, 主要功能是控制主或从设备的数据帧的收发过程, 并通过 TMC 完成对通信存储器读写操作。报文分析单元解析收到的主帧或从帧判断设备的状态, 通知 MCU 并借助计时器完成符合协议时间约束的消息传输。TM 控制器接收来自 MCU 的控制命令完成对通信存储器的读写操作。收发器由曼彻斯特编码器、解码器组成, 与双线冗余控制单元(LRC Unit)一起完成线路上数据的接收和发送, 并根据当前线路通信质量选择信任线路和监视线路。

视。从某种意义上说, 整个 MVB 总线是一种分布式控制系统。MVB 设备的主要功能包括: 发送和接收过程数据、消息数据、事件仲裁、主权转移、设备信息查询等。为了提高总线的可靠性和稳定性, 列车通信网络标准定义了 MVB 总线的双线冗余实现方式, 如图 2 所示。双线冗余机制中每个设备在两条线路上同步传输相同的数据, 设备只从一条线路上接收数据, 称为信任线路, 同时监视另一条线

## 5 MVB-TCN 总线控制器建模与分析

### 5.1 MVB-TCN总线控制器的HRTCPN模型

根据 3.1 节介绍的建模方法以及 MVB 总线的拓扑结构(如图 2 所示)和 MVB 总线控制器的结构(如图 3 所示), 分别建立 MVB 总线拓扑结构和 MVB-TCN 总线控制器的层次化实时 Petri 网模型如图 4 和图 5 所示(图 5 中的 CPU 模块用于模拟 MVB 总线控制器的上位机功能), 由于本文篇幅有限, MVB 总线控制器的各级子模型不在此一一列举。

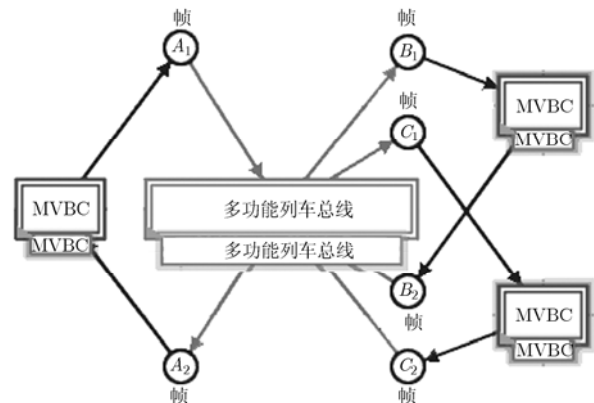


图 4 MVB 总线拓扑结构的层次实时有色 Petri 网模型

MVB 总线控制器的 HRTCPN 模型中库所均表示寄存器、缓存和存储器, 其中  $P_1$  与 MVB 总线直接相连, 完成数据帧的收发, 其它库所用于存储内部功能部件之间的控制流和数据流信息; 模型中的变迁表示功能部件, 各个功能部件完成操作的最坏时间参数如表 1 所示。HRTCPN 模型可以对 MVB 总线中发送和接收过程数据、消息数据、事件仲裁、主权转移、设备信息轮询等功能进行模拟, 验证系

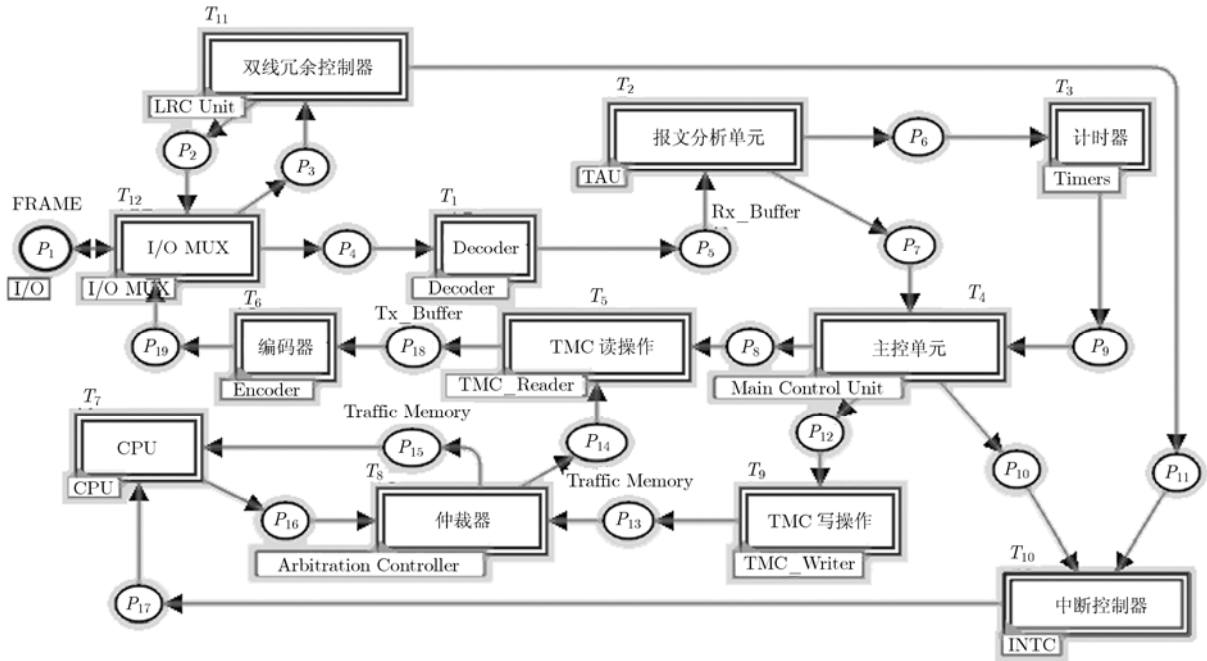


图 5 MVB 总线控制器的层次实时有色 Petri 网模型

表 1 功能部件的操作时间

变迁序号	功能部件	最长延时(ns)
$T_1$	解码器	3168
$T_2$	报文分析单元	40
$T_3$	计时器	4
$T_4$	主控单元	40
$T_5$	TMC 读操作	20
$T_6$	编码器	33
$T_7$	CPU	300
$T_8$	仲裁器	20
$T_9$	TMC 写操作	100
$T_{10}$	中断控制器	500
$T_{11}$	双冗余冗余控制器	20
$T_{12}$	I/O MUX	40

统模型的功能设计是否正确、完整，有关基于 HRTCPN 模型的系统仿真与动态属性验证方法请参考文献[11]。

### 5.2 MVB-TCN总线控制器的实时性分析

**5.2.1 MVB 总线的实时性** 由于不同车型的配置方式、车箱挂载数量和车箱内部 MVB 总线上挂载的设备都有所不同，所以在列车的初运行(Inauguration)阶段，需要根据列车的具体情况对列车总线的参数进行配置，不同的时间参数配置将对总线的利用率产生重要影响，错误的参数配置甚至会造成冲突过多无法保证通信的实时性，因此通过模型对 MVB 总线拓扑及设备的实时性进行分析具有重要的意义。

**5.2.2 实时性分析** 本文以 MVB 总线在列车初运行时需要配置的重要参数  $T\_reply$  为例说明基于 HRTCPN 模型分析和确定系统时间参数的方法。在一个结构确定的总线中，延时  $T\_reply$  的含义是由主设备监测得出的从发送主帧结束到收到从帧应答的最大延时。 $T\_reply$  作为配置参数的作用是通知总线的主控制器在未收到从帧应答的条件下发送下一个主帧前应该等待的时间或进行通信冲突预测的参考时间。 $T\_reply$  等于数据传输时间、解码时间和访问时间之和：

$$T\_reply = 2 \times (6.0 \times L + T\_repeat\_max \times Nrep) + T\_source\_max$$

其中  $6.0 \mu s/km$  是线路传输的最差延时， $L$  是线路的电长度， $T\_repeat\_max$  是使用中继器引入的最大延时(单方向时为  $3.0 \mu s$ )， $Nrep$  为线路中使用的中继器的数量， $T\_source\_max$  是数据源设备端的最大延时。通过分析可知，在  $T\_reply$  参数的计算中线路的电长度、中继器的数量等比较容易确定，所以重点为数据源设备端延时  $T\_source\_max$  参数的计算，下面通过分析 MVB-TCN 设备的 HRTCPN 模型确定数据源设备的最大延时信息。

图 5 所示 MVB-TCN 设备的 HRTCPN 模型的关联矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

由公式  $AY=0$  求出 HRTCPN 的所有  $S$ -不变量为

$$Y_1 = (0001110110000000011)^T$$

$$Y_2 = (01100000000000000000)^T$$

$$Y_3 = (00011010000011100011)^T$$

$$Y_4 = (0001101001000101111)^T$$

$$Y_5 = (0010000000100101111)^T$$

$$Y_6 = (10000000000000000000)^T$$

$$Y_7 = (000000000000000011000)^T$$

$$Y_8 = (0001101100000000011)^T$$

由前面分析可知,  $S$ -不变量代表了电路中的路径,  $S$ -不变量及对应路径的延时和如表 2 所示。

表 2  $S$ -不变量及对应路径的延时和(ns)

$S$ -不变量	路径	延时和
$Y_1$	$T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_{12}$	3345
$Y_2$	$T_{11} T_{12}$	60
$Y_3$	$T_1 T_2 T_4 T_9 T_8 T_5 T_6 T_{12}$	3461
$Y_4$	$T_1 T_2 T_4 T_{10} T_7 T_8 T_5 T_6 T_{12}$	4161
$Y_5$	$T_{11} T_{10} T_7 T_8 T_5 T_6 T_{12}$	933
$Y_6$	$T_{12}$	40
$Y_7$	$T_7 T_8$	320
$Y_8$	$T_1 T_2 T_4 T_5 T_6 T_{12}$	3341

由表 2 可知 MVB 总线控制器的关键路径是  $T_1 T_2, T_4, T_{10}, T_7, T_8, T_5, T_6, T_{12}$ , 路径的最长延时  $T_{min} = 4161 \text{ ns} = 4.161 \mu\text{s}$ , 即所求时间参数  $T\_source\_max = 4.161 \mu\text{s}$ 。分析得到的时间参数符合列车通信网络标准(IEC61375-1)中关于  $T\_source$  的实时性要求:  $T\_source \in [2 \mu\text{s}, 6 \mu\text{s}]$ , 同时按照 3 型车的配置方式( $L=2 \text{ km}$ ,  $Nrep=2$ )求出参数  $T\_reply = 40.161 \mu\text{s}$ , 小于标准规定的默认值  $T\_reply\_def = 42 \mu\text{s}$ , 所以 MVB 总线控制器的设计能够满足列车

系统的硬实时要求, 不会破坏整个列车系统的实时性。如果系统不能满足实时性要求, 可以通过提高功能部件性能或增加共享资源的方式改进系统设计, 直到设计达到系统的实时性指标。

### 6 结论

本文对嵌入式实时系统的建模和分析方法进行了研究, 通过扩展有色 Petri 网模型, 提出了层次实时有色 Petri 网模型, 描述了基于该模型的硬件电路系统建模方法, 并且运用线性代数理论对该模型的实时性进行分析。最后, 对层次实时有色 Petri 网在硬实时系统——列车通信网络 MVB 总线控制器的建模与实时性分析中的应用进行了探讨与研究。结果表明, 通过该方法完成的 MVB-TCN 总线控制器模型能够满足列车通信网络对于系统的功能验证和实时性分析方面的需求。

### 参考文献

[1] 李国徽, 杨兵, 胡方晓, 许华杰, 杜建强. 嵌入式实时系统中基于检验点检测的电压分配技术[J]. 计算机学报, 2009, 32(12): 2403-2410.

Li G, Yang B, Hu F, Xu H, and Du J. A voltage allocation technique with checkpoint-based schedulability test in embedded real-time systems. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(12): 2403-2410.

[2] 潘理, 赵卫东, 王志成, 周新民, 柳先辉. Petri 网的步问题研究[J]. 软件学报, 2009, 20(3): 505-514.

Pan L, Zhao W, Wang Z, Zhou X, and Liu X. On the step problem for Petri nets. *Journal of Software*, 2009, 20(3): 505-514.

[3] Moreno J C, Laloya E, and Navarro J. A link-layer slave device design of the MVB-TCN bus (IEC 61375 and IEEE 1473-T) [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(6): 3457-3468.

- [4] Iturbe X, Zuloaga A, Jimenez J, Lazaro J, and Martin J L. A novel SoC architecture for a MVB slave node[C]. Iecon 2008: 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, USA, 2008: 1398-1403.
- [5] Fernandez D, Jimenez J, Andreu J, Cuadrado C, and Kortabarria I. A TCN gateway emulator[C]. 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Spain, 2007: 2911-2916.
- [6] Lilius J. Efficient state space search for time Petri nets[J]. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 1998, 18(3): 113-133.
- [7] Frigerio L, Marks K, and Krikelis A. Timed coloured Petri nets for performance evaluation of DSP applications: The 3GPP LTE case study[J]. *Design Methodologies for SoC and SiP*, 2010, 313(5): 114-132.
- [8] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 19-30.  
Lin Chuang. Performance Evaluation of Systems Using Stochastic Petri Nets[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 19-30.
- [9] Balbo G. Introduction to Generalized Stochastic Petri Nets[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2007: 83-131.
- [10] Fronk A and Kehden B. State space analysis of Petri nets with relation-algebraic methods[J]. *Journal of Symbolic Computation*, 2009, 44(1): 15-47.
- [11] Liu Ming, Zhang Guo-yin, and Yao Ai-hong. Extended Petri net based formal modeling and verification of WTB-TCN device[C], ICCSIT, China, 2010: 628-691.
- 刘 铭: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为形式化建模与验证、嵌入式实时系统.
- 张国印: 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为嵌入式系统、网络与信息安全.
- 姚爱红: 女, 1972 年生, 博士, 副教授, 研究方向为演化计算、嵌入式系统设计等.