

分布式功能块控制应用的性能分析^{*})

张 渝 刘 枫

(西南大学计算机与信息科学学院 重庆 400715)

摘 要 IEC61499 功能块逐渐被工业采纳。本文针对分布式功能块控制应用(DFBCA)缺乏性能分析方法的情况,提出了一种基于随机 Petri 网的 DFBCA 性能分析方法。该方法以 DFBCA 的运行状态为着手点,利用 Petri 网易于表示系统中可能发生的各种状态变化及其关系的特点,将 DFBCA 转换为随机 Petri 网模型。再利用随机 Petri 网模型与马尔可夫链(MC)同构的特征,将随机 Petri 网模型转换为 MC。得到的 MC 为 DFBCA 的性能分析提供了数学基础。最后基于 MC 的状态转移矩阵和稳态概率,对在每个状态中的逗留时间、变迁的利用率、变迁的标记流速、子系统延时时间等性能指标进行了分析。通过具体的示例说明了这种性能分析方法的可行性。

关键词 分布式功能块,控制应用,随机 Petri 网

Performance Analysis of Distributed Function Block Control Application

ZHANG Yu LIU Feng

(Faculty of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract IEC 61499 function block is accepted by industrial. As there does not exist efficient performance analysis methods for distributed function block control applications(DFBCA), the paper propose a DFBCA performance analysis method based on stochastic Petri net(SPN). The method focuses on DFBCA's operating state. For Petri net can represent possible state changing and it's relationship in systems, DFBCA will be transformed to SPN model. An SPN model is isomorphic to a continuous time Markov chain(MC). So SPN model can be transformed to its equivalent MC. The obtained MC provides the mathematic basis for performance analysis. Based on MC's transition matrix and steady probability, the paper analyzes the performance index, such as the during time in certain state, usage efficiency of transition, the marking flow speed of the transition and time delay of the sub-system. An example is given to prove the feasibility of the performance analysis method.

Keywords Distributed function block, Control application, Stochastic petri net

1 引言

功能块(FB)是控制工程师广泛使用的控制应用开发方法。IEC 为分布式工业过程测量和控制系统(IPMCS)定义了 IEC61499^[1] 功能块标准。61499 采用了面向对象的方法,使用功能块作为基本的编程单元。功能块作为健壮的、可重用的软件组件,可以组成复杂的 IPMCS。控制工程师将多个厂家提供的功能块连接成网络,即可组成完整的控制应用。

61499 定义的功能块具有一些内在的特征,如控制算法封装在功能块中、基于过程状态的执行控制、功能块通信和控制的抽象性、事件流和数据流分离等^[2]。这些特征使得利用 61499 功能块可以很好地用于分布式 IPMCS 的快速建模、设计、开发和重配置,有助于企业在竞争激烈、不断变化的市场中保持优势。国内外许多研究者在功能块上做了很多研究工作,本文的主要研究对象为 61499 功能块,简称为 FB。

DFBCA 是工业控制的关键,其正确性至关重要,因此在设计阶段需要对其进行正确性验证和性能的评估。文[3]将 FB 概念用于系统规范和验证测试。通过将 FB 转换为 FSM(Finite State Machine),利用 FSM 测试和模型检查方法来验证基于 FB 的功能安全相关系统。FB 的行为被描述为一种状态机。通过把 FB 执行控制图(ECC)转换为 FSM,就可以使用基于 FSM 的方法来进行自动验证。文[4]提出使用时间

自动机来验证 FB 应用,建立 FB 和相关基本时间自动机之间的联系,将基本时间自动机组合在一起来验证 FB 网络的执行。文[5~7]提出一种基于 Net/Condition Event System 的形式化方法,以其表示的模型可以通过 SESA 和 VEDA 工具来进行验证。为了建立 IEC61499 功能块的形式化模型,介绍了每一输入和输出事件的模块化模型。这种模型的结构和 FB 的结构非常接近,其组合机制会导致复杂的模型。文[8]指出 61499 模型不能防止因设计错误而导致数据和事件连接的数据不一致,因此提出了一种新的基于 Petri 网的 FB 建模语言,把事件和数据模型化为着色托肯,得到一种可验证的模型。

DFBCA 作为工业实时应用,不光需要正确性验证,还需要性能分析。FB 的功能是通过算法提供的。算法对输入和内部数据进行处理,并产生输出。FB 类型规范中通过状态图 ECC 来定义算法的调用顺序^[9]。根据 DFBCA 运行状态的特点,本文提出一种基于随机 Petri 网的 DFBCA 性能分析方法。通过将 DFBCA 模型转换为随机 Petri 网模型,利用随机 Petri 网模型与马尔可夫链(MC)同构的特征,将随机 Petri 网模型转换为 MC。最后基于 MC 的状态转移矩阵和稳态概率,可以对在每个状态中的逗留时间、变迁的利用率、变迁的标记流速、子系统延时时间等性能指标进行分析。

论文的组织如下。第 2 部分和第 3 部分对 IEC61499 分

^{*}) 本文受国家 863 计划资助(2005AA412030-10)、重庆市科委自然科学基金资助(CSTC, 2005BB2068)、西南师范大学科技基金资助(SWNUQ2005021)。张 渝 助教,硕士,研究方向:计算机控制系统、工业控制网络;刘 枫 教授,硕士生导师,研究方向:计算机控制系统、工业控制网络。

布式功能块模型进行介绍,并引入了随机 Petri 网模型。第 4 部分以示例的形式分析了从 DFBCA 到 SPN 模型的转换方法。第 5 部分详细说明了基于随机 Petri 网的 DFBCA 性能分析方法。最后为论文的总结。

2 功能块模型

IEC61499 标准中定义了用于分布式工业过程测量和控制系统(IPMCS)的 FB 模型。IPMCS 被定义为通过一个或多个通信网络相互通信的设备的集合,如图 1 中系统模型所示。一个 IPMCS 包括一个或多个控制应用。控制应用既可只运行于一个设备中,构成集中式应用;也可以分布在多个设备

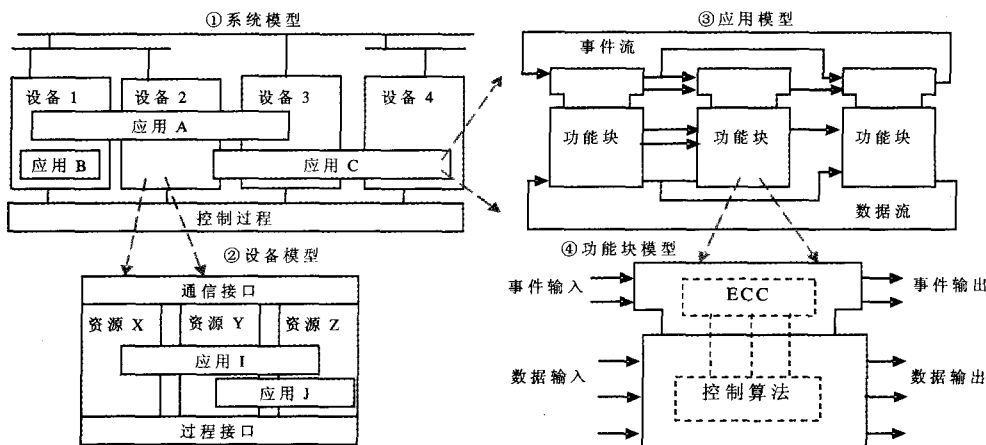


图 1 功能块(FB)模型

FB 是 61499 参考模型的核心部分,如图 1 中的 FB 模型所示。FB 是一种软件功能单元,它是 IPMCS 应用的组成部分。每个 FB 包含由 FB 类型定义的单独的、有名的数据结构,以及一些内部变量。FB 数据结构和内部变量的值将从 FB 的一次执行保持到下一次执行。FB 执行时可产生一个或多个输出值。FB 是有状态的,在两次调用之间保持同一状态,事件或数据的输入可能导致 FB 状态的变化。因此,具有相同输入的 FB 的调用,可能会产生不同的输出值。

FB 由头和主体两部分组成。头部连接到事件流,主体部分连接到数据流。FB 的功能是通过控制算法来提供的。控制算法处理 FB 的输入和内部数据,并且产生输出数据。算法调度的顺序由执行控制图(ECC)规定。ECC 是一种状态图,包括 EC 状态、EC 转换和 EC 动作。一个 EC 状态具有零个或多个 EC 动作。EC 动作具有相关的算法,算法执行完后将发出一个事件。EC 转换表示 FB 从一个状态转换到另一个状态。当相关的逻辑条件为真时,将激活 EC 转换。

3 随机 Petri Net(SPN)

Petri 网的概念是 1962 年由 Carl Adam Petri 提出来的。Petri 网以研究模型系统的组织结构和动态行为为目标,它着眼于系统中可能发生的各种状态变化以及变化之间的关系,它易于表示系统变化发生的条件及变化发生后的系统状态^[10]。Petri 网能够很好地表示系统各元素之间的同步异步、串行并行等关系,采用图形化表示并且支持数学分析。

定义 1(Petri 网) 一个三元组 $N=(S, T; F)$ 是一个 Petri 网,当且仅当:

- (1) $S \cap T = \emptyset$;
- (2) $S \cap T = \emptyset$;
- (3) $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$;

中,构成分布式应用。

设备可以通过通信网络相互通信,可以被进一步分为资源,如图 1 中的设备模型所示。一个设备包含至少一个接口并且包含零个或多个资源。过程接口提供一个物理过程和资源之间的映射。通信接口提供了资源和通过通信网络交换的信息之间的映射。

应用由 FB 组成,它是一种 FB 网络,如图 1 的应用模型所示。这种网络的节点是 FB 或子应用以及它们的参数,分支是数据连接和事件连接。子应用也由 FB 组成,它是组成应用的一部分。由 FB 组成的控制应用,可以分布在多个设备中,构成分布式应用。

$$(4) \text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = S \cup T.$$

在网中, F 的元素叫弧。 $\text{dom}(F) = \{x | \exists y: (x, y) \in F\}$; $\text{cod}(F) = \{x | \exists y: (y, x) \in F\}$ 。集合 $X = S \cup T$ 是网元素的集合。

定义 2 P/T(位置/变迁)系统

一个六元组 $\Sigma = (S, T; F, K, W, M_0)$ 是一个 P/T 系统,当且仅当:

- (1) $(S, T; F)$ 是一个网, S 元素是位置, T 元素是变迁;
- (2) $K: S \rightarrow N^+ \cup \{\infty\}$ 是位置容量函数;
- (3) $W: F \rightarrow N^+$ 是弧权函数;
- (4) $M_0: S \rightarrow N$ 是初始标识,满足: $\forall s \in S: M_0(s) \leq K(s)$ 。

定义 3 连续时间 SPN $= (S, T; F, W, M_0, \lambda)$, 其中 $(S, T; F, W, M_0)$ 是一个 P/T 系统, $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ 是变迁平均实施速率集合^[10]。

随机 Petri 网体现了将随机的指数分布实施时延与 P/T 系统中变迁相结合的思想。P/T 网的每个变迁与一个实施速率相关联。文[11]证明了以下定理 1。

定理 1 任何具有有穷个位置、有穷个变迁的连续时间的随机 Petri 网同构于一个一维连续时间马尔可夫链。

由定理 1 可知,可以将一个位置和变迁有限的随机 Petri 网转换为同构的马尔可夫链,这为性能分析奠定了数学基础。通过马尔可夫链,可以对系统性能做定量的分析,也可以使用模拟技术来求解各性能指标。

4 DFBCA 与 SPN 的模型转换

为了说明 DFBCA 到 SPN 的转换,使用了以下的 DFBCA 示例,如图 2 所示。图 2 左边给出了液位控制的工艺图,右边给出了液位控制的 DFBCA。DFBCA 由“Smp”和“Ctrl”两个功能块组成。“Smp”功能块映射到传感器“Sensor”,负责控

制回路的采样。“Ctrl”功能块映射到阀门定位器“Valve”，负责控制算法的执行，产生控制输出。

“SEI”为“Smp”功能块的事件输入，该事件连接到“Ctrl”功能块的事件输出“VEO”。“SEI”事件的到达将导致一次新的采样，当前液位输入通过数据输入“SDI”输入到“Smp”功能块中。“SDI”输入的数据类型为复合类型(SDI. V, SDI. S)，“SDI. V”表示输入的数值，“SDI. S”表示输入的状态。

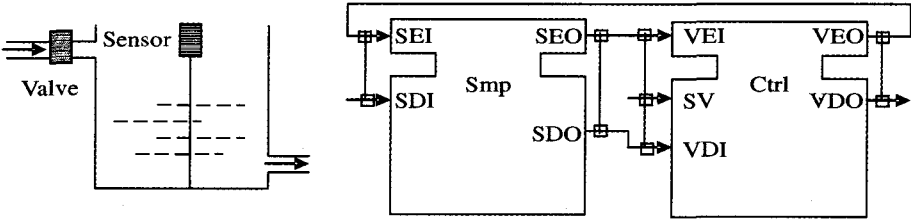


图 2 液位控制功能块应用

功能块“Smp”和“Ctrl”的内部状态转换如图 3 所示。“Smp”功能块的初始状态为“SStart”，根据“SDI”输入的不同状态调度执行不同的控制算法。当“SDI”输入的状态“SDI. S”为“Good”时，执行“SC1”算法，反之执行“SC2”算法，算法执行完后产生输出“SEO”和“SDO”。“Ctrl”功能块的初始状态为“VStart”。“VEI”事件产生后，若数据输入“SDI. S”的状态为“Good”，则进入“VEI”状态；若数据输入与设定值的误差大

于或等于 θ ，即 $SV. V - VDI. V1 \geq \theta$ ，则进入“Vfuz”状态，执行模糊控制算法“fuz”。反之进入“Vpid”状态，执行 PID 控制算法“pid”。“VEI”事件产生后，若数据输入“SDI. S”的状态不为“Good”，则进入故障处理状态“Vfau”，执行故障处理算法“fau”。

根据 DFBCA ECC 和随机 Petri 网 (SPN) 的特点，作者提出了以下的转换规则，可以将 DFBCA 转换为对应的 SPN：

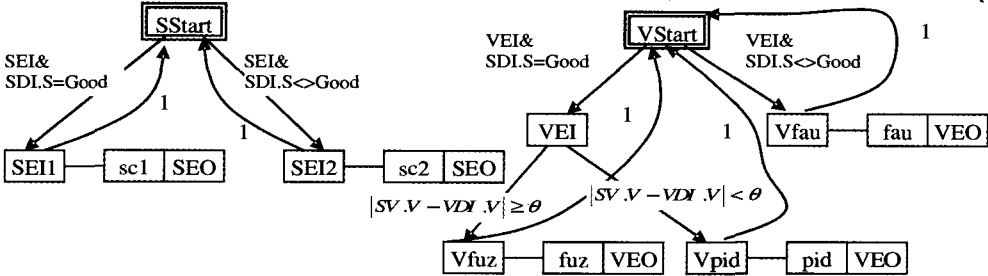


图 3 功能块控制应用的 ECC

- 1) EC 状态映射为 SPN 位置。
- 2) EC 转换映射为 SPN 变迁。
- 3) EC 动作附加到 SPN 的变迁上。EC 动作的执行完成映射为一个 SPN 位置。
- 4) 如果 EC 转换带有布尔条件，则使用 SPN 的分支结构。
- 5) 两功能块之间的连接映射为上游功能块的一个 SPN 到下游功能块 EC 转换对应的 SPN 变迁。

利用以上规则转换得到的 SPN 模型如图 4 所示。

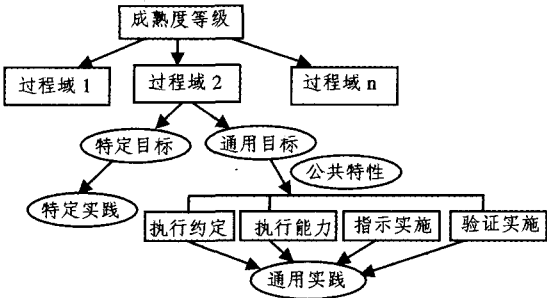


图 4 SPN 模型

图 4 中各位置的含义如下所示：

P0	“Smp”功能块处于“SStart”初态
P1	“Smp”功能块进入计算状态
P2/P3	“Smp”功能块进入 SEI1 状态/SEI2 状态
P4	“Ctrl”功能块处于“VStart”初态
P5	“Ctrl”功能块进入计算状态
P6/P7	“Ctrl”功能块进入“VEI”状态/“Vfau”状态
P8/P9	“Ctrl”功能块进入“Vfuz”状态/“Vpid”状态
P10	“Ctrl”功能块算法执行完成
P11	“Smp”功能块算法执行完成

图 4 中各变迁的含义如下所示：

T0	发生了“SEI”事件
T1/T2	“SDI”输入的状态为“Good”/不为“Good”
T3/T4	算法执行完成，输出，返回初态
T5	发生了“VEI”事件
T6/T7	“VDI”输入的状态为“Good”/不为“Good”
T8/T9	误差大于或等于/误差小于
T10, T11, T12	算法执行完成，输出，返回初态

5 功能块控制应用的性能分析

根据得到的 SPN 模型，可以对其进行性能分析。SPN 的性能分析分为 3 步：建立 SPN 模型；构造出该 SPN 所同构的

MC;基于MC的稳定概率进行所要求的系统性能分析。文[10]为了性能分析的方便,设图4中各变迁的时间服从指数分布且 $\lambda=(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{12})=(9, 8, 2, 6, 6, 9, 8, 2, 4, 6, 5, 5, 5)$ 。

5.1 状态转移矩阵

假设已有一个与SPN同构的MC,其中 $[M_0 >]$ 有 n 个标识,则MC有 n 个状态。与图4中SPN同构的MC有10个状态,分别为 $M_0(100010000010)$ 、 $M_1(010010000000)$ 、 $M_2(000110000000)$ 、 $M_3(100010000001)$ 、 $M_4(100001000000)$ 、 $M_5(100000100000)$ 、 $M_6(100000001000)$ 、 $M_7(100000010000)$ 、 $M_8(001010000000)$ 、 $M_9(100000000100)$ 。其状态转移矩阵 $Q=[q_{i,j}], 1 \leq i, j \leq n$ 由以下规则^[10]生成:

(1) $i \neq j$ 时

if $\exists t_k \in T; M_i[t_k > M_j]$ then $q_{i,j} = \lambda_k$ else $q_{i,j} = 0$

(2) $i = j$ 时

$q_{i,i} = -\sum_k \lambda_k$

其中 $k \neq i$,且有 $\exists M' \in [M_0 >], \exists t_k \in T; M_i[t_k > M'], \lambda_k$ 是 t_k 的速率。

因此,可以计算出转移矩阵为:

$$\begin{bmatrix} -9900000000 \\ 0-1020000080 \\ 00-660000000 \\ 000-11900200 \\ 0000-880000 \\ 00000-104006 \\ 500000-5000 \\ 5000000-500 \\ 500000000-0 \end{bmatrix}$$

5.2 稳定概率

设MC中 n 个状态的稳定状态概率是一个行向量 $X=(x_0, x_1, \dots, x_{n-1}), n > 0$,则根据马尔可夫过程有下列线性方程组:

$$\begin{cases} XQ=0 \\ \sum x_i=1, 1 \leq i \leq n \end{cases}$$

解线性方程组可得每个标识的稳定概率如下:

$P[M_0]=0.1302931435$	$P[M_1]=0.1172638291$	$P[M_2]=0.0390879430$
$P[M_3]=0.1066035047$	$P[M_4]=0.1199289428$	$P[M_5]=0.0959431542$
$P[M_6]=0.0767545234$	$P[M_7]=0.0426414019$	$P[M_8]=0.1563517722$
$P[M_9]=0.1151317851$		

5.3 性能分析

5.3.1 在状态中驻留的时间

在每个可达标识 $M \in [M_0 >]$ 中的驻留时间是以 $-r_{i,i}$ 为参数的一个指数分布随机变量,平均为 $\bar{\tau}(M) = (-r_{i,i})^{-1} = (\sum_{t_j \in H} \lambda_j)^{-1}$,其中 H 是在 M 可实施的所有变迁的集合。由此可计算出“Ctrl”功能块“VDI”输入的状态不为“Good”(此时位置“P9”中的托肯数为1)时,对输入的处理时间为 $\bar{\tau}(M_9) = (5)^{-1} = 0.2$ (时间单位)。

5.3.2 变迁的利用率

$\forall t \in T$ 的利用率 $U(t)$ 等于使 t 可实施的所有标识的稳定概率之和。 $U(t) = \sum_{M \in E} P[M]$,其中 E 是使 t 可实施的所有可达标识集合。可知 $U(T5) = P[M_3] = 0.1066035047$ 。

5.3.3 变迁的标记流速

$\forall t \in T$ 的标记流速是指单位时间内流入 t 后置位置 s 的

平均标记数 $R(t,s) = U(t) \times \lambda$,其中 λ 是 t 的平均实施速率。因此 $R(T5, P5) = U(T5) \times \lambda = 0.1066035047 \times 9 = 0.959432$ 。

5.3.4 子系统的延时时间

位置 $P5, P6, P7, P8, P9$ 和变迁 $T7, T8, T9, T10, T11, T12$ 构成一个子系统,代表功能块“Ctrl”的执行。该子系统位置集所含的平均标记数为 $\bar{N} = P[M(P5)=1] + P[M(P6)=1] + P[M(P7)=1] + P[M(P8)=1] + P[M(P9)=1] = 0.4504$ 。流入子系统的标记流速为 $R(T5, P5) = 0.959432$ 。根据Little规则和平衡原理^[12],可以计算出该子系统的平均延时时间为 $T_{Delay} = \bar{N}/R(T5, P5) = 0.469444$ (时间单位)。

结论 本文对IEC61499中的系统、应用、设备、功能块模型进行了介绍,分析了已有的对功能块的研究工作,指出DFBCA性能分析的必要性。DFBCA的性能分析关键在于对其各状态的验证和分析。Petri网以研究模型系统的组织结构和动态行为为目标,它着眼于系统中可能发生的各种状态变化以及变化之间的关系,它易于表示系统变化发生的条件及变化发生后的系统状态。因此,本文引入随机Petri网,提出了一种基于随机Petri网的DFBCA性能分析方法。该方法首先利用本文提出的转换规则,将DFBCA转换为SPN模型;再利用SPN模型与马尔可夫链同构的特点,将SPN模型转换为马尔可夫链。马尔可夫链为功能块控制应用的性能分析提供了数学基础。最后利用求得的状态转移矩阵和稳态概率,对在每个状态中的驻留时间、变迁的利用率、变迁的标记流速、子系统的延时时间等性能指标进行了分析。本文通过一个具体的示例详细描述了基于随机Petri网的DFBCA性能分析方法,证明了这种方法的可行性。同时,由于随机Petri网的特点,这种性能分析方法稍加改动即可用于DFBCA的验证。

参考文献

- 1 International Electro-technical Commission (IEC). International Standard IEC61499, Function Blocks, Part 1 - Part 4, IEC Jan. 2005. <http://www.iec.ch/>
- 2 Aendenrooier A J R, Ling K V, Sreenidhi K A, et al. Closed-loop Modeling and Rapid Application Generation, using IEC 61499 Function Blocks and In; 3rd Int'l CIRP Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, MI, USA, 2005
- 3 Zhang Wei, Diedrich C, Halang W. Module and integration verifications for function block-based safety-related system development. In: International Conference on Industrial Informatics, 2004
- 4 Stanica M, Guéguen H. Using timed automata for the verification of IEC 61499 applications. In: Workshop on Discrete Event Systems, WODES04, Reims, France, Sept. 2004
- 5 Vyatkin V, Hanisch H M. A modeling approach for verification of IEC1499 function blocks using Net Condition/Event Systems. In: IEEE conference on Emerging Technologies in Factory Automation (ETFA'99), Proceedings, Barcelona, 1999. 261~270
- 6 Vyatkin V, Hanisch H M, Starke P, et al. Formalisms for verification of discrete control applications on example of IEC1499 function blocks. In: Conference "Verteilte Automatisierung" (Distributed Automation), Proceedings, Magdeburg, 2000. 72~79
- 7 Vyatkin V, Hanisch H M. Modeling of IEC 61499 function blocks - a clue to their verification. In: XI Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Proceedings, Wrocław, 2000
- 8 Hagge N, Wagner B. A New Function Block Modeling Language Based on Petri Nets for Automatic Code Generation. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2005, 1(4): 226~237
- 9 Thramboulidis K. IEC 61499 in Factory Automation. In: International Conference on Industrial Electronics, Technology & Automation, (CISSE05 - IETA), Dec. 2005
- 10 林闯. 随机Petri网和系统性能评价. 第二版. 清华大学出版社, 2005
- 11 Dugan J B, Trivedi K S, Geist R M, et al. Extended stochastic Petri nets: Applications and analysis. In: PERFORMANCE'84, Mders of Comput. System Performance. In: Paris, Gelenbe E, ed. Proc. 10th Int Sump, Amsterdam; Elsevier, 1984. 507~519
- 12 Trivedi K S. Probability & statistics with reliability, queuing, and computer science applications. Prentice-Hall Inc, 1982