

一种 IPMCS 的实时性评估方法

张渝 刘枫

(西南大学计算机与信息科学学院 重庆 400715)

摘要 针对缺少对工业过程测量和控制系统(IPMCS)实时性评估研究的情况,提出了一种利用随机 Petri 网评估 IPMCS 实时性的方法。首先利用 FB 为 IPMCS 建模,转换为 SPN 模型;然后利用 SPN 模型与马尔可夫链(MC)同构的特征,转换为 MC。最后基于 MC 的状态转移矩阵和稳态概率,对 IPMCS 的实时性进行评估,得到了量化的实时性数据。以具体示例的形式来说明如何对 IPMCS 的实时性进行评估。这种方法能给出量化的实时性数据,可以为 IPMCS 的设计提供参考。

关键词 工业过程测量和控制系统,随机 Petri 网,评估

中图法分类号 TP202 **文献标识码** A

Evaluation Method of IPMCS Real-time Characteristic

ZHANG Yu LIU Feng

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

Abstract Few studies are done on industrial process measurement and control systems (IPMCS) real-time characteristic evaluation. So the paper provided an evaluation method of IPMCS real-time characteristic based on stochastic Petri net. First, FB was used to model IPMCS. Then the model was transformed to SPN model. Second, SPN model was transformed to Markov Chain (MC). Because an SPN model is isomorphic to a continuous time MC. Lastly, based on MC's transition matrix and steady probability, IPMCS real-time characteristic was evaluated. An example was given to illustrate how to evaluate IPMCS real-time characteristic. The method can give out real-time characteristic quantitative data which can provide reference when designing IPMCS.

Keywords IPMCS, Stochastic petri net, Evaluation

1 引言

在化工、冶金、电力等行业,功能块(FB)常用于开发 IPMCS 控制应用。IEC 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。61499 功能块可以很好地用于 IPMCS 的快速建模、设计、开发和重配置。

IPMCS 控制应用的正确性和实时性至关重要。因此在设计阶段需要对其进行正确性验证和性能评估。已有文献在 FB 模型上进行了研究,文献[2]提出将 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。文献[3]提出使用时间自动机来验证 FB 的应用,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验证 FB 网络的执行。文献[4-6]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。文献[7]提出了一种新的基于 Petri 网(SPN)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。但以上研究在 IPMCS 实时性评估方面还很薄弱,本文研究恰好弥补这种不足。

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^[8]。根据 FB 运行状态的特点,本文提出了一种利用随机 Petri 网评估 IPMCS 的方法。首先利用 FB 为 IPMCS 建模。然后转换为 SPN 模型,利用 SPN 模型与马尔可夫链(MC)同构的特征,转换为 MC。最后基于 MC 的状态转移矩阵和稳态概率,对 IPMCS 的实时性进行分析,获得量化的实时性数据。

论文的第 2 节对 FB 模型进行介绍;第 3 节引入 SPN 模型;第 4 节以示例的形式利用 SPN 来评估 IPMCS 的实时性;最后对论文进行总结。

2 工业过程测量和控制系统

IEC61499 定义了一种通用的 IPMCS FB 模型。应用由 FB 组成,它是一种 FB 网络。这种网络的节点是 FB 或子应

到稿日期:2008-11-24 返修日期:2009-02-05 本文受重庆市科技公关计划项目(CSTC-2006AA3011),重庆市科技公关计划项目(CSTC-2007AB2031)资助。

张渝(1979-),男,硕士,讲师,主要研究领域为智能控制系统、工业控制网络,E-mail:zhangyu@swu.edu.cn;刘枫(1957-),男,教授,主要研究领域为智能控制系统。

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,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。

FB 是一种软件功能单元,是分布式应用的核心部分。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 的功能是通过控制算法来实现的。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。因此,要对 IPMCS 进行实时性评估,必须先从 FB 的 ECC 入手,将 ECC 状态映射到其他模型上。FB 和 ECC 如图 1 所示

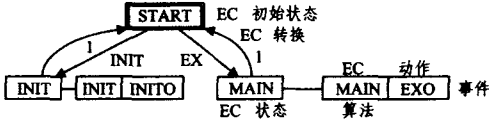


图 1 FB 的 ECC

3 随机 Petri Net (SPN)

Petri 网以研究模型系统的组织结构和动态行为为目标,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,易于表示系统变化发生的条件及变化发生后的系统状态^[9]。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) $S \cup T \neq \emptyset$; (2) $S \cap T = \emptyset$; (3) $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$; (4) $dom(F) \cup cod(F) = S \cup T$ 。

在网中, F 的元素叫弧。 $dom(F) = \{x | \exists y: (x, y) \in F\}$; $cod(F) = \{x | \exists y: (y, x) \in F\}$ 。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) $M_1: S \rightarrow N$ 是初始标识,满足: $\forall s \in S: M_1 \leq K(S)$ 。

定义 3(连续时间) $SPN=(S, T; F, W, M_1, \lambda)$, 其中 $(S, T; F, W, M_1)$ 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^[9]。

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 网的每个变迁都与一个实施速率相关联。文献[10]证明了以下定理。

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,可以对系统实时性作定量分析。

4 IPMCS 实时性评估方法

4.1 模型转换

为了对 IPMCS 的实时性进行评估,本文以锅炉液位控制为例进行说明。为了对液位进行控制,采用了液位变送器、PLC、调节阀组成的硬件回路,利用 PID 进行控制。控制应用由 3 个功能块组成,分别为 AI, PID, AO 功能块。3 个功能块分别分布在 3 个不同的设备中,构成工业过程测量和控制系统的分布式应用,如图 2 所示。

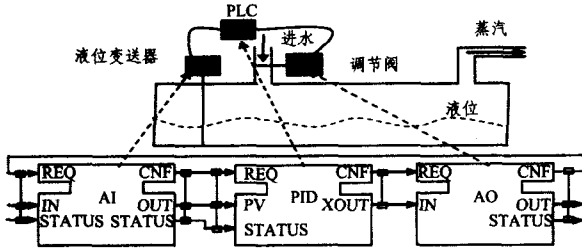


图 2 锅炉液位控制的分布式应用

3 个功能块的 ECC 如图 3 所示。为了方便假设功能块已经经过初始化,进入到了 IDLE 状态。当 AI 功能块接收到 REQ 事件后,对数据输入 IN 进行采样,并触发 AI 算法。算法执行完后,发出 CNF 事件。AI 功能块的 CNF 事件达到 PID 功能块后,将导致 PID 功能块进入 REQ 状态。在此状态下判断来自 AI 块的数据输入的状态,如果状态为 GOOD,则运行 PID 运算,误差大于预设值 A 则执行 PD 控制,否则执行 PID 控制,算法结束后产生 CNF 事件;如果状态不为 GOOD,则进入故障安全 FS 状态,由 FS 算法给出故障安全值,并发出 CNF 时间。在 PID 或 FS 状态下执行完相应算法后都将立即返回到 IDLE 状态。AO 块收到 PID 块的 CNF 事件后将进入到 REQ 状态。在此状态下执行与模拟量输出相关的算法。算法执行完后将发出 CNF 事件。AO 块的 CNF 事件将导致 AI 块的再次运行,进入到下一个控制周期。

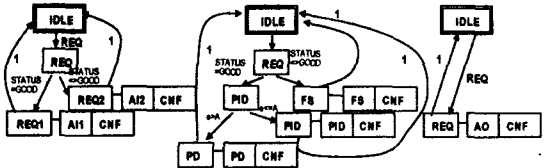


图 3 AI, PID 和 AO 块的 ECC

ECC 是基于状态的,因此可以容易地将 ECC 转换为 SPN 模型。根据 ECC 和随机 Petri 网 (SPN) 的特点,本文采用了以下的转换规则:

- 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。

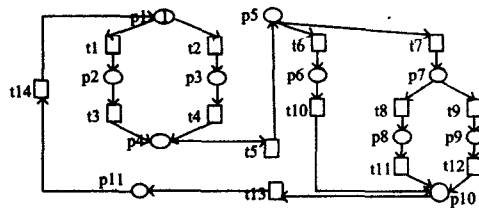


图 4 IPMCS 的 SPN 模型

4.2 状态转移与稳态概率

得到 SPN 模型以后,可以构造出同构的 MC。MC 的状态数量与 $[M_0 >]$ 的标识数量相同。MC 的状态有 M_1 (100000000000), M_2 (010000000000), M_3 (001000000000), M_4 (000100000000), M_5 (000010000000), M_6 (000001000000), M_7 (000000100000), M_8 (000000010000), M_9 (000000001000), M_{10} (000000000100) 和 M_{11} (000000000010)。SPN 中各变迁的实施需要一定的时间,为了能方便地评估 IPMCS 的实时性,本文根据经验,假设各变迁的实施速率为:

$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{14}\} = (100, 1, 100, 100, 50, 100, 1, 100, 1, 100, 100, 100, 50, 50)$, 其数值表示每秒钟处理执行的次数。其状态转移矩阵 $Q = [q_{ij}]$, $1 \leq i, j \leq n$, 由以下规则^[9]生成:

(1) $i \neq j$ 时, if $\exists t_k \in T: M_i[t_k > M_j]$ then $q_{ij} = \lambda_k$ else $q_{ij} = 0$

(2) $i = j$ 时, $q_{ii} = -\sum_k \lambda_k$

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

因此,可以计算出转移矩阵。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

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

解线性方程组可得每个标识的稳态概率 $P[M_1] = 0.09910900027476$, $P[M_2] = 0.09910900027476$, $P[M_3] = 0.00099109000275$, $P[M_4] = 0.20020018055501$, $P[M_5] = 0.09910900027476$, $P[M_6] = 0.09910900027476$, $P[M_7] = 0.00098127723044$, $P[M_8] = 0.00098127723044$, $P[M_9] = 0.0000981277230$, $P[M_{10}] = 0.20020018055501$ 和 $P[M_{11}] = 0.20020018055501$ 。

4.3 实时性分析

将 p_{11} 和 t_{14} 从 SPN 网络中去除,剩余的位置和变迁为 AI, PID 和 AO 组成的 IPMCS 控制应用的一个循环,它们组成一个子系统。通过计算,可以得到该子系统运行所需时间,以此得到 IPMCS 的循环周期。首先需要计算出该子系统位置集所含的平均标记数。

$$\bar{N} = \bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \dots + \bar{n}_{10} = P[M(p_1) = 1] + P[M(p_2) = 1] + \dots + P[M(p_{10}) = 1]$$

其中, $P[M(s) = i] = \sum_j P[M_j]$ 为在稳定状态下,每个位置所含的标记数量的概率, $M_j \in [M_0 >]$ 且 $M_j(s) = i$ 。因此可以求得 $\bar{N} = P[M_6] + P[M_1] + \dots + P[M_9] = 0.79979981944499$ 。

利用 Little 规则和平衡原理^[11]来计算非零回归的 MC。Little 规则为 $\bar{N} = \bar{\lambda}T$, $\bar{\lambda}$ 为流入子系统的平均标记流速,队列到达平均速率, T 是队列平均延时时间。变迁的标记流速为

$$R(t, s) = W(t, s) \times \sum_{M \in E} P[M] \times \lambda$$

其中, E 是使 t 可实施的所有可达标识集合, λ 为 t 的平均实施速率。可以计算出, $\bar{\lambda} = R(t_{14}, p_1) = 1 \times 0.20020018055501 \times 50 = 10.01000902775050$ 。最终计算可得 $T = \bar{N} \div \bar{\lambda} = 0.07990000980296$, 单位为秒。

可见, IPMCS 控制应用的平均循环周期为 79.9ms, 在 IPMCS 设计过程中,根据得到的量化数据,可以判断设计是

否达到需求,并以此进行改进。

结束语 论文介绍了基于功能块的工业过程测量和控制系统、随机 Petri 网。针对缺少对 IPMCS 实时性研究的情况,提出了一种利用随机 Petri 网对 IPMCS 实时性进行分析的方法,并以一个具体的例子来说明如何对 IPMCS 的实时性进行评估。这种方法可以给出量化的实时性数据,为 IPMCS 的设计提供参考。但是,在本文提出的方法中,FB 模型到 SPN 模型的转换规则和 SPN 转换的时间建立在经验值之上,还存在不足,值得以后研究改进。在本文研究的基础上,可以容易地对 IPMCS 的正确性、有界性、并行性等方面进行研究。利用 Petri 网的自动化工具可以快速地计算出 IPMCS 的实时性数据。将其与工业控制应用的集成开发环境结合起来,可以开发出高效、正确的系统应用,还可以有效地提高开发人员的效率。

参考文献

- [1] International Electro-technical Commission. (IEC), International Standard IEC61499[S]. Function Blocks, Part 1 - Part 4, IEC Jan. 2005. <http://www.iec.ch/>
- [2] Zhang W, Diedrich C, Halang W. Module and integration verifications for function block-based safety-related system development[C]//2004 2nd IEEE International Conference, June 2004: 210-215
- [3] Stanica M, Guéguen H. Using timed automata for the verification of IEC 61499 applications[C]//Workshop on Discrete Event Systems, WODES'04. Reims, France, Sept. 2004: 22-24
- [4] Vyatkin V, Hanisch H-M. A modeling approach for verification of IEC1499 function blocks using Net Condition/Event Systems [C]//IEEE Conference on Emerging Technologies in Factory Automation (ETFA'99). Barcelona, 1999: 261-270
- [5] Vyatkin V, Hanisch H-M, Starke P, et al. Formalisms for verification of discrete control applications on example of IEC1499 function blocks[C]//Conference "Verteilte Automatisierung" (Distributed Automation). Magdeburg, 2000: 72-79
- [6] Vyatkin V, Hanisch H-M. Modeling of IEC 61499 function blocks-a clue to their verification[C]//XI Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems. Wroclaw, 2000
- [7] Hagge N, Wagner B. A New Function Block Modeling Language Based on Petri Nets for Automatic Code Generation[J]. IEEE Trans. On Industrial Informatics, 2005, 1(4): 226-237
- [8] Thramboulidis K. IEC 61499 in Factory Automation[C]//International Conference on Industrial Electronics, Technology & Automation. (CISSE'05-IETA), Dec. 2005: 115-124
- [9] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2005
- [10] Dugan J B, Trivedi K S, Geist R M, et al. Extended stochastic Petri nets, Applications and analysis[C]//Gelenbe E, ed, PERFORMANCE'84, Mders of Comput. System Performance. In Paris, Proc. 10th Int. Sump. Amsterdam; Elsevier, 1984: 507-519
- [11] Trivedi K S. Probability & statistics with reliability, queuing, and computer science applications[M]. Prentice-Hall, Inc, 1982
- [12] 陈义华, 葛显龙, 李希成. 基于高级 Petri 网的汽车零部件电子采购业务流程建模[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(3): 126-132