

基于广义随机 Petri 网的 CIMS 多任务可靠性研究

张君一, 谢里阳, 王 正

ZHANG Jun-yi, XIE Li-yang, WANG Zheng

东北大学 机械工程及自动化学院, 沈阳 110004

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China

E-mail: hope_zhang@163.com

ZHANG Jun-yi, XIE Li-yang, WANG Zheng. Analysis of multitask reliability for CIMS based on generalized stochastic petri nets. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(33): 26-28.

Abstract: Owing to the complexity of CIMS' missions, the reliability modeling should adapt the production processes accurately. Conventional reliability model method can not reflect the time dynamic behavior of CIMS, so the multitask reliability model based on generalized stochastic Petri nets (GSPN) is established for a CIMS manufacturing shop with multiple missions and the process times of the machines with exponential distributions. Furthermore, analysis of GSPN model based on behavior expression and moment generating function is presented, then can compute the transfer functions. Finally, the multitask reliability can be easily obtained without the reachability graph of Petri nets, which measure can reflect the operating performance of the whole multitask CIMS more intuitively.

Key words: CIMS reliability modeling; multitask reliability; generalized stochastic petri nets; behavior expression

摘 要: CIMS 生产的复杂性要求其可靠性模型可以精确地反映生产过程, 由于传统的可靠性建模方法无法兼顾 CIMS 的时间动态特性, 所以针对一个复杂的有多个加工任务的 CIMS 制造单元, 由于其机器加工工件的时间均为指数分布, 则采用广义随机 Petri 网进行多任务可靠性建模, 在此基础上基于 Petri 网行为表达式, 将矩母函数思想引入其中, 不必生成可达标识图就可计算模型的传递函数, 进而得到整个系统的多任务可靠度, 该可靠性指标可以更直观地反映具有多种加工任务的整个 CIMS 的运行性能。

关键词: CIMS 可靠性建模; 多任务可靠度; 广义随机 Petri 网; 行为表达式

文章编号: 1002-8331(2007)33-0026-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TB114.3

1 前言

20 世纪 80 年代中期, 基于 CIM 理念的系统——计算机集成制造系统 (Computer/Contemporary Integrated Manufacturing Systems, CIMS) 开始得到重视并大规模实施, CIMS 的研究在我国已经起步, 863 CIMS 主题结合国际上先进制造技术的发展, 特别是基于该主题中上万名人员 10 余年的实践, 提出了“现代集成制造系统” (Contemporary Integrated Manufacturing Systems) 的理念, 它在广度和深度上拓宽了传统 CIMS 的内涵。

CIMS 是复杂的且高度自动化的系统, 它基本上是依赖自动化机器执行任务, 分析其的系统可靠性问题就显得突出了。只有在保证其加工单元在高可靠度下运行, 对加工车间的调度及优化问题才有实际意义。CIMS 属于大型复杂系统。复杂大系统可靠性模型具有相应的复杂性^[1,2], 基本设备单元的寿命分布类型各异, 如指数分布、二项式型等等。不仅如此, 基本设备单元由于多种加工任务, 而按照多种逻辑关系而构成, 典型的如串联、并联、串并混联以及网络结构等, 并往往呈现多类结构相互嵌套状态。

Petri 网是异步并发系统建模与分析的有力工具。利用 Petri 网进行系统建模, 可以清晰地描述系统状态之间的动态

转移过程。随机 Petri 网 (Stochastic Petri Net, SPN) 是由 Molloy^[3] 首先提出的, 他首先建立了可达标识图与有限马尔柯夫链的对应关系, 从而为服从负指数分布的有界随机 Petri 网的品质分析提供了相应的马氏分析方法。并在可靠性分析以及性能分析中得到了广泛的应用。其后, Marson 等人^[4] 推广了 Molloy 的工作, 提出一种广义随机 Petri 网 (GSPN) 模型, 此模型包括了某些变迁为立即变迁 (无时延) 的情形。然而这些工作均未突破负指数分布的限制, 因而均是在马氏框架下进行分析。Guo, Zhou 等人^[5,6] 将矩母函数方法应用于 Petri 网, 从而提出适合任意分布的扩展随机 Petri 网 (ESPN) 的矩母函数分析方法, 但是由于这些方法都是基于可达标识图, 因而决定了它们只能分析有界随机 Petri 网。对于生成 CIMS 这样一个复杂系统的 Petri 网模型的可达标识图是一件相当困难的工作, 有时会出现状态爆炸等问题。

论文基于 Petri 网的复杂制造系统建模方法, 针对 CIMS 多任务加工的特点, 建立 CIMS 的可靠性模型, 针对可达标识图难以获得的问题, 将行为表达式与矩母函数法思想引入其中, 并用该方法对模型进行有效的性能分析, 计算出该 CIMS 的多任务可靠度这一可靠性评价指标。

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2006CB605005)。

作者简介: 张君一 (1979-), 女, 博士生, 主要研究领域为: 制造系统建模及可靠性方面研究; 谢里阳 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为: 结构强度与系统可靠性; 王正 (1981-), 男, 博士生, 主要研究领域为: 机械结构疲劳, 系统可靠性, CAE。

2 基于行为表达式的可靠性解析方法

2.1 行为表达式^[7,8]

定理 1 设 $\alpha=t_1t_2\cdots t_q$ 是一个单项式, 则其传递函数

$$W_\alpha(s)=\prod_{i=1}^q W_{t_i}(s)$$

定理 2 设 $\alpha=\alpha_1+\alpha_2+\cdots+\alpha_n$ 是一个标准多项式, 则 $W_\alpha(s)=$

$$\sum_{i=1}^n W_{\alpha_i}(s)$$

定理 3 设 $\alpha=(\alpha')^*$, 则

$$W_\alpha(s)=\frac{1}{1-W_{\alpha'}(s)}$$

2.2 矩母函数与传递函数^[5,8]

定义 1 设 x 是一个随机变量, x 的概率密度函数 $f(x)=\text{exp}sx$ 的期望值存在, 则 $\text{exp}sx$ 的期望值称为 x 的矩母函数 (MGF, Moment Generating Function), 记为 $M(s)=E(e^{sx})$ (x 为实变量)。

若 x 为离散变量, 具有概率分布函数 $p(x_i)=P(X=x_i)$, $i=1, 2, 3, \dots$, 则 x 的矩母函数为

$$M(s)=\sum_{i=1}^{\infty} e^{sx_i} p(x_i)$$

若 x 为连续随机变量, 且概率密度函数为 $f(x)$, 则 x 的矩母函数。

$$M(s)=\int_{-\infty}^{+\infty} e^{sx} f(x) dx$$

定义 2 在一个任意分布的随机 Petri 网中, 对于 $M \in R(M_0)$, $t \in T$, 令 $W_t(s)=p_{M,t}M_{M,t}(s)$, 则 $W_t(s)$ 为 t 在 M 下的传递函数。其中 $p_{M,t}$ 为 M 下 t 被引发的概率, $M_{M,t}(s)$ 为 M 下 t 的矩母函数, 若 M 下只有 t 能被引发, 则 $p_{M,t}=1$, $W_t(s)=M_{M,t}(s)$ 。

2.3 多任务可靠度

CIMS 是一个多功能多任务的大型制造系统, 其产品往往不只一个, 它可以同时加工几种工件, 当同时加工几种零件时其可靠性模型称为多任务系统可靠性模型^[9]。我们采用多任务可靠度之一指标来对多任务制造系统进行可靠性评价:

$$R_s = \sum_{i=1}^n f_i R_i \quad (1)$$

R_i 为每个子任务的可靠度;

f_i 为各类任务的比率;

n 任务种类数。

$$f_i = P\{M=i\} = \frac{T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (2)$$

$P\{M=i\}$ 为所有任务中, 第 i 类任务出现的概率;

T_i 为第 i 类任务时间的累加。

3 CIMS 多任务可靠性建模与分析

3.1 广义随机 Petri 网的定义^[11]

定义 3 一个 GSPN $(S, T; F, W, M_0, A)$, 其中:

(1) (S, W, M_0, A) 是和一般随机 Petri 网定义相同; $S=\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 是所有位置的集合, 且 $S \cup T \neq \emptyset, S \cap T = \emptyset$; $W: (T \times S) \rightarrow N^+$, 是输出函数, 描述从变迁指向库所的有向弧; $M_0: S \rightarrow N^+$, 是全体初始标志的集合;

(2) $T=\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 是所有变迁的集合, T 划分为时间变迁

集 T_t 和瞬时变迁集 T_i 两个子集, $T=T_t \cup T_i, T_t \cap T_i = \emptyset$; $A=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$, 是变迁平均实施速率的集合, 每一个 λ_i 的值是从对所模拟系统的实际测量中获得的或根据某种要求的预测值, $\tau_i=1/\lambda_i$ 称为变迁 t_i 的平均实施延时;

(3) $F: (S \times T) \rightarrow N^+$, 是输入函数, 描述从库所指向变迁的有向弧, F 中允许有禁止弧; $\lambda=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$, 是变迁平均实施速率的集合, 每一个 λ_i 的值是从对所模拟系统的实际测量中获得的或根据某种要求的预测值, $\tau_i=1/\lambda_i$ 称为变迁 t_i 的平均实施延时。

3.2 多任务可靠性建模

在多任务加工车间里的每一工件都需要在特定的一系列机器上加工, 但并不是非得需要全部机器, 也有可能需要使用某些机器若干次。称确定工件的加工所需的机器的序列为路径问题^[10]。

针对某 CIMS 的加工车间的三台机床和三种待加工工件的加工单元进行性能分析。作如下假设:

(1) 假设所要分析的路径是已知的, 每一工件加工的路径是唯一的;

(2) 机器所要加工工件的序列是已知的;

(3) 已知三台机器的可靠度 $R(M_1)=0.9$; $R(M_2)=0.95$; $R(M_3)=0.98$;

(4) 机器加工时间均服从指数分布。

针对这三种待加工工件以及三台机器的加工路径与序列如表 1 所示, $r(J_i)$ 表示工件 J_i 的加工路径; 而 $r(M_i)$ 则表示为某一机器 M_i 它要加工工件的序列。

表 1 多任务加工路径与序列

路径	序列
$r(J_1)=\{M_1, M_3, M_1\}$	$r(M_1)=\{J_{1(1)}, J_{3(1)}, J_{2(2)}, J_{1(3)}\}$
$r(J_2)=\{M_2, M_1, M_3\}$	$r(M_2)=\{J_{2(1)}, J_{3(2)}\}$
$r(J_3)=\{M_1, M_2\}$	$r(M_3)=\{J_{1(2)}, J_{2(3)}\}$

通过各工件的加工回路 $r(J_i)$ 与机器加工的命令回路 $r(M_i)$ 共同组成一个完整的 Petri 网模型, 图 2 所示。由图可见, 工件

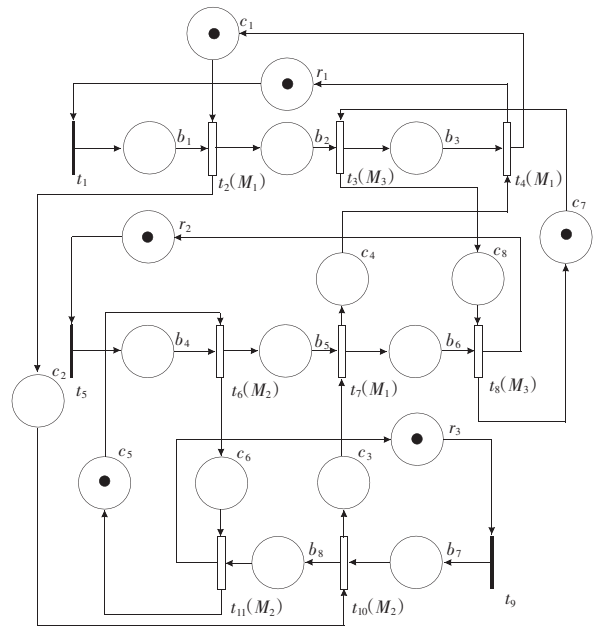


图 2 多任务加工单元模型

1 的加工路径 $r(J_1)$ 可描述为一系列变迁 $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$, 一个托肯表示一个工件, 相应的库所 c_i, b_i 称为加工工件资源库所、堆料库所; 而机器 1 上完成的工序通过命令回路 $t_2, c_2, t_{10}, c_3, t_7, c_3, t_4, c_1$ 来表示, 该回路上的库所 c_i 则称为命令库所。

这里假设所有机床加工工件的时间均为指数分布, 表 2 为图 2 所示加工单元模型中各变迁释义及激发率。

表 2 图 2 模型中各变迁释义及激发率

变迁	释义	激发率
t_1	托盘将工件 1 向该系统派送	-
t_2	工件 1 的第一道工序在机器 1 加工零件	0.5
t_3	工件 1 的第二道工序在机器 3 加工零件	1
t_4	工件 1 的第三道工序在机器 1 加工零件	1
t_5	托盘将工件 2 向该系统派送	-
t_6	工件 2 的第一道工序在机器 2 加工零件	1.2
t_7	工件 2 的第二道工序在机器 1 加工零件	0.9
t_8	工件 2 的第三道工序在机器 3 加工零件	0.5
t_9	托盘将工件 3 向该系统派送	-
t_{10}	工件 3 的第一道工序在机器 1 加工零件	0.5
t_{11}	工件 3 的第二道工序在机器 2 加工零件	0.9

3.3 基于行为表达式及矩母函数的计算

根据模型产生周期行为表达式(3), 其中 α 是含有并发运算形式的多项式。

$$\alpha = (t_2 \parallel t_6)(t_{10} \parallel t_3)(t_7 \parallel t_{11})(t_4 \parallel t_8) \quad (3)$$

将多项式(3)转化为标准多项式的形式, 如下:

$$\tilde{\alpha} = (t_2 t_6' + t_6 t_2')(t_{10} t_3' + t_3 t_{10}')(t_7 t_{11}' + t_{11} t_7')(t_4 t_8' + t_8 t_4')$$

加工车间的输入工件的序列为周期的, 且表示为 $S_0 = \{J_1, J_2, J_3\}$, 则上式可以化简为:

$$\tilde{\alpha} = t_2 t_6 t_3 t_{10} t_7 t_{11} t_4 t_8 \quad (4)$$

根据定理 1~3 计算式(4)中的传递函数为:

$$W_{\tilde{\alpha}}(s) = W_{t_2}(s)W_{t_6}(s)W_{t_3}(s)W_{t_{10}}(s)W_{t_7}(s)W_{t_{11}}(s)W_{t_4}(s)W_{t_8}(s) = \frac{0.5}{0.5-s} \times \frac{1.2}{1.2-s} \times \frac{1}{1-s} \times \frac{0.5}{0.5-s} \times \frac{0.9}{0.9-s} \times \frac{0.9}{0.9-s} \times \frac{1}{1-s} \times \frac{0.5}{0.5-s}$$

则该加工系统的生产周期为

$$T = \frac{\partial}{\partial s} W_{\tilde{\alpha}}(s)|_{s=0} = 11.06$$

为了计算工件 1 的生产周期, 令 $W_i(s)$ 中的 $s=0$, 其中 i 是除 t_2, t_3, t_4 之外的所有变迁, 从而得到该路径的传递函数: $W_{\alpha}(s) =$

$$\frac{0.5}{0.5-s} \times \frac{1}{1-s} \times \frac{1}{1-s}, \text{ 因此, } T_1 = \frac{\partial}{\partial s} W_{\alpha}(s)|_{s=0} = 4.$$

同理, 可得工件 2 与工件 3 的生产周期为

$$T_2 = \frac{\partial}{\partial s} W_{\alpha}(s)|_{s=0} = 3.944$$

$$T_3 = \frac{\partial}{\partial s} W_{\alpha}(s)|_{s=0} = 3.111$$

3.4 计算该系统的多任务可靠度

利用公式(2)得到各任务的比率如下:

$$f_1 = P\{M=i\} = \frac{T_1}{T} = \frac{4}{11.06} = 0.362$$

$$f_2 = \frac{T_2}{T} = \frac{3.944}{11.06} = 0.357$$

$$f_3 = \frac{T_3}{T} = \frac{3.111}{11.06} = 0.281$$

这里将各加工任务的逻辑结构看作串联结构, 计算出各个任务的可靠度:

$$R_1 = 0.9 \times 0.98 \times 0.9 = 0.794$$

$$R_2 = 0.95 \times 0.9 \times 0.98 = 0.838$$

$$R_3 = 0.9 \times 0.95 = 0.855$$

将以上 f_i 以及 R_i 数值代入公式(1), 最后, 即求得该系统的多任务可靠度:

$$R = \sum_{i=1}^n f_i R_i = f_1 R_1 + f_2 R_2 + f_3 R_3 = 0.362 \times 0.794 + 0.357 \times 0.838 + 0.281 \times 0.855 = 0.827$$

4 结论

针对目前 CIMS 多任务生产的复杂性, 本文从可靠性的任务剖面考虑, 采用多任务可靠度来衡量这套 CIMS 运行的可行性, 克服了仅对机器本身的基本可靠性进行分析的局限性, 该可靠性指标可以更直观地反映具有多种加工任务的整个 CIMS 的运行性能。

论文以一有三台机床并要加工三种不同的工件的 CIMS 加工单元为例, 针对各机床加工时间为指数分布, 建立适宜的 GSPN 模型, 具有图形的直观性以及结构的层次性, 针对复杂系统的可靠性模型, 采用行为表达式可以不必生成可达图就可进行系统性能分析, 计算出该加工生产的多任务可靠度, 此可靠性指标可以真实地衡量生产过程运行状态, 可以为整个制造系统的资源调配提供依据, 以提高各机床的可利用率, 继而提高整个制造系统的可靠性和经济效益。(收稿日期: 2007 年 9 月)

参考文献:

- [1] 周炳海, 潘青枝, 王世进. 晶圆制造单元的 petri 网建模和性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(36): 222-225.
- [2] 李睿. 制造网格系统可靠性管理研究[D]. 上海: 上海大学, 2004-06.
- [3] Molloy M K. Performance analysis using stochastic Petrinets[J]. IEEE Trans on Computers, 1982, 31: 913-917.
- [4] Marsan M A, Balbo G, Conte G. A class of generalized stochastic Petri nets for performance analysis of multi-processor systems[J]. ACM TOCS, 1984, 2: 92-122.
- [5] Guo D L, DiCesare F, Zhou M C. A moment generating function based approach for evaluating extended stochastic petri nets[J]. IEEE Tran on Automatic Control, 1993, 38(2): 321-327.
- [6] Zhou M C, Guo D L, DiCesare F. Integration of petri nets and moment generating function approaches for system performance evaluation[J]. J of System Integration, 1993(3): 43-62.
- [7] 蒋昌俊, 郑应平, 疏松桂. 基于行为表达式的任意随机 petri 网的品质分析[J]. 自动化学报, 1997, 23(3): 370-376.
- [8] 蒋昌俊. 离散事件动态系统的 PN 机理论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 武小悦. 柔性制造系统的可靠性技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000.
- [10] 江志斌. Petri 网及其在制造系统建模与控制中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [11] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.