第 23 卷　第 1 期　　　　自 动 化 学 报　　　　Vol. 23, No. 1
1997 年 1 月　　　　ACTA AUTOMATICA SINICA　　　　January, 1997

具有相型寿命的 Clarke 型 CIMS 生产线可靠性研究[1)]

李泉林
（中国科学院应用数学研究所　北京　100080）
田乃硕
（燕山大学数理系　秦皇岛　066004）

摘　要　详细地研究了具有位相型寿命，带有两类不同柔性机制的有限缓冲库的 Clarke 型 CIMS 生产线的可靠性问题. 首先给出了各个工件广义加工时间相型结构的递变规律，其次在平稳状态下利用二维标值闭环网络理论，给出了系统的主要稳态生产指标和可靠性指标的算法公式. 最后讨论了系统对参数组摄动时的灵敏界.

关键词　计算机集成制造系统，相型寿命，可靠性，排队网络，敏感性.

1　引言

近年来，CIMS 的可靠性问题受到了国内外的广泛关注和研究，已经取得了许多研究成果并且发展了一些有效的研究方法[1-6]. 但是，迄今几乎所有 CIMS 可靠性的研究文献都集中在工作站的指数寿命上. 这种指数寿命表明其剩余寿命独立于已使用过的时间，这在理论和实际上都是一个很强的附加限制. 无疑具有非指数寿命的 CIMS 是 CIMS 可靠性研究的一个重要课题[5-7].

本文引入了 Clarke 型 CIMS 生产线，其中两类有限缓冲库对提高系统的稳态生产率和可用度起不同的柔性作用，在各级工作站的位相型寿命和加工时间下，详细地分析了这个生产线的位相结构和随机性态，给出了系统的主要稳态生产指标和可靠性指标，讨论了这些指标对系统中某些参数组摄动时的灵敏界. 由于 PH 分布在非负随机变量族中稠密，从理论上讲，可选取适当的 PH 分布，把任意一般分布逼近到所要求的精度，所以本文的结果具有相当好的一般性.

2　Clarke 型 CIMS 生产线的数学描述

2.1　模型描述

1) 国家自然科学基金资助项目.
收稿日期　1994-01-06

设有三个工作站，两个缓冲库串联构成一个 Clarke 型 CIMS 生产线，其结构如图 1 所示.

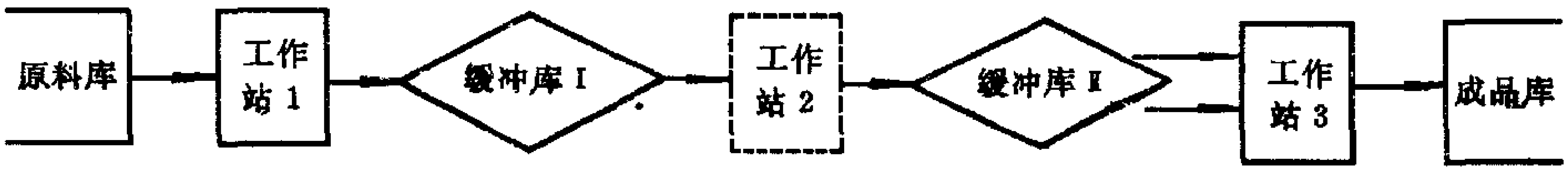

图 1 CIMS 的结构关系

在这个生产线中，缓冲库 I 的容量为 M，缓冲库 II 的容量为 N. 每个工件在生产线中的加工规则为：首先，工件在工作站 I 中完成加工就存入缓冲库 I 中；然后，再需进入工作站 II 或工作站 III 中，加工后就为成品. 当工作站 III 空闲时，在缓冲库 I 中的工件直接进入工作站 III 加工，待其加工完成就离线进入成品库；当工作站 III 忙时，在缓冲库 I 中的工件进入工作站 II 加工，待其加工完成就存入缓冲库 II 中. 所有在缓冲库 II 中的工件，不再由工作站 III 加工，而是等待在工作站 III 正在加工的那个工件，当它完成加工时它们都一起离线进入成品库.

每个工件在工作站 I，II，III 中的加工时间 x_1,x_2,x_3 分别服从 k_1,k_2,k_3 阶的 PH 分布，其不可约表示依次为 (τ_1,Γ_1)，(τ_2,Γ_2)，(τ_3,Γ_3). 其中 τ_1,τ_2,τ_3 都为初始概率向量，Γ_1，Γ_2,Γ_3 都为方阵. $\Gamma_i^0+\Gamma_i e_i^{(1)}=0, i=1,2,3$. $e_i^{(1)}$ 为分量全为 1 的 k_i 维列向量.

工作站 I，II，III 的寿命 X_1,X_2,X_3 分别服从 l_1,l_2,l_3 阶的 PH 分布，其不可约表示依次为 (α_1,T_1)，(α_2,T_2)，(α_3,T_3). 其中 $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 都为初始概率向量，T_1,T_2,T_3 都为方阵. $T_i^0+T_i e_i^{(2)}=0, i=1,2,3$. $e_i^{(2)}$ 为分量全为 1 的 l_i 维列向量.

工作站 I，II，III 的修理时间 Y_1,Y_2,Y_3 分别服从参数为 β_1,β_2,β_3 的指数分布.

上述所有随机变量都相互独立.

每个工作站在阻塞期或饥饿期既不劣化又不失效. 若在加工过程中工作站失效，则对正在接受加工的工件暂停加工，待工作站修复后再对其继续加工，以前的加工时间仍然有效. 工作站修复如新.

缓冲库传递工件的过程无故障. 工件从缓冲库中取出或存入的时间很短，可忽略不计.

工作站 I 不因缺料而空闲(即有足够多的原材料)，工作站 III 输出无阻塞(即有足够大的成品库).

当缓冲库 I，II 装满时，则工作站 I，II 出现阻塞而停车待命，工作站 III 继续工作；当缓冲库 I 空仓时，则工作站 II，III 出现饥饿而停车待命，工作站 I 继续工作.

2.2 广义加工时间

在平稳状态下，我们从某个工件的加工完成时刻开始对接受加工的工件进行重新计数，用 $x_{(n)}^*$，$n\geqslant 1$，表示重新计数后第 n 个工件的广义加工时间.

定理 1 在平稳状态下，$\{x_{(n)}^*\}$ 构成一个半马氏加工时间过程，并且它们是同 PH 分布的，其不可约表示为 (σ,L).

其中

$$\sigma=(\tau\otimes\alpha^*,0),$$

$$L = \begin{bmatrix} \Gamma \oplus T & e^{(1)} \otimes T^{0} \\ \beta(\tau^{*} \otimes \alpha & -\beta \end{bmatrix}, \quad \alpha^{*} = \frac{\alpha T^{-1}}{\alpha T^{-1} e}, \quad \tau^{*} = \frac{\tau \Gamma^{-1}}{\tau \Gamma^{-1} e},$$

$$E[x^{*}_{(n)}] = -(\tau \otimes \alpha^{*})[\Gamma \oplus T + (e^{(1)} \tau^{*}) \otimes (T^{0} \alpha)]^{-1} [e^{(1)} \otimes (e^{(2)} + \beta^{-1} T^{0})].$$

2.3　代数结构体系

由于生产线的首端有足够多的原材料,而末端有足够大的成品库,所以系统的运行过程可用缓冲库Ⅰ,Ⅱ中的存件个数的变化表出. 于是我们用二维字典排序定义系统的状态为

$$\begin{array}{l} (0,0),(0,1),(0,2),\cdots\cdots,(0,M+1),(0,M+2) \\ (1,1),(1,2),(1,3),\cdots\cdots,(1,M+1),(0,M+2) \\ \cdots\cdots \quad \cdots\cdots \quad \cdots\cdots \quad \cdots\cdots \\ (N,1),(N,2),(N,3),\cdots\cdots,(N,M+1),(N,M+2) \end{array}$$

其中(m,n)表示缓冲库Ⅰ中有$m-2$个工件,工作站Ⅱ,Ⅲ中各有一个工件,缓冲库Ⅱ中有n个工件.

$$\tilde{J} = \{(0,m),(n,r)/0 \leqslant m \leqslant M+2, 1 \leqslant n \leqslant N, 1 \leqslant r \leqslant M+2\}.$$

由定理 1 知,在平稳状态下,每个工件在工作站Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ中的广义加工时间$\tilde{x}_1,\tilde{x}_2,\tilde{x}_3$都服从 PH 分布,其不可约表示依次可记为$(\sigma_1,L_1),(\sigma_2,L_2),(\sigma_3,L_3)$.

用$S(t)$表示时刻t系统所处的状态,则$\{S(t),t \geqslant 0\}$在平稳状态下构成了状态空间$\tilde{J}$上的一个二维标值闭环网络,并且是一个准生灭过程. 其状态转移率矩阵为

$$Q = \begin{array}{c c} & \begin{array}{cccccc} 0 & 1 & 2 & \cdots & N-1 & N \end{array} \\ \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ N-1 \\ N \end{array} & \begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} & & & & \\ A_{10} & A_{11} & A_{12} & & & \\ A_{20} & 0 & A_{22} & \ddots & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \\ A_{N-1\,0} & 0 & 0 & \cdots & A_{N-1\,N-1} & A_{N-1\,N} \\ A_{N\,0} & 0 & 0 & \cdots & 0 & A_{N\,N} \end{bmatrix} \end{array}$$

其中,

$$A_{00} = \begin{array}{c c} & \begin{array}{cccccc} 0 & 1 & 2 & \cdots & M+1 & M+2 \end{array} \\ \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ M+1 \\ M+2 \end{array} & \begin{bmatrix} L_1 \otimes I_2 \otimes I_3 & (L_1^0 \sigma_1) \otimes I_2 \otimes I_3 & & & & \\ I_1 \otimes I_2 \otimes (L_3^0 \sigma_3) & L_1 \oplus (I_2 \otimes L_3) & (L_1^0 \sigma_1) \otimes I_2 \otimes I_3 & & & \\ & I_1 \otimes I_2 \otimes (L_3^0 \sigma_3) & L_1 \oplus L_2 \oplus L_3 & (L_1^0 \sigma_1) \otimes I_2 \otimes I_3 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & I_1 \otimes I_2 \otimes (L_3^0 \sigma_3) & L_1 \oplus L_2 \oplus L_3 & (L_1^0 \sigma_1) \otimes I_2 \otimes I_3 \\ & & & & I_1 \otimes I_2 \otimes (L_3^0 \sigma_3) & I_1 \otimes (L_2 \oplus L_3) \end{bmatrix} \end{array}$$

$$A_{01}=\begin{array}{cc} & \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & \cdots & M & M+1 & M+2 \end{array} \\ \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ M+1 \\ M+2 \end{array} & \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ 0 & 0 & & & & \\ I_1\otimes(L_2^0\sigma_2)\otimes I_3 & 0 & \ddots & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & I_1\otimes(L_2^0\sigma_2)\otimes I_3 & 0 & 0 \\ & & & & I_1\otimes(L_2^0\sigma_2)\otimes I_3 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$A_{n0}=\begin{array}{cc} & \begin{array}{ccccccc} 0 & 1 & 2 & \cdots & M & M+1 & M+2 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ M+1 \\ M+2 \end{array} & \begin{bmatrix} I_1\otimes I_2\otimes(L_3^0\sigma_3) & & & & & & \\ & I_1\otimes I_2\otimes(L_3^0\sigma_3) & & & & & \\ & & I_1\otimes I_2\otimes(L_3^0\sigma_3) & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & I_1\otimes I_2\otimes(L_3^0\sigma_3) & & \\ & & & & & I_1\otimes I_2\otimes(L_3^0\sigma_3) & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$A_{mm}=\begin{array}{cc} & \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & \cdots & M+1 & M+2 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ M+1 \\ M+2 \end{array} & \begin{bmatrix} L_1\oplus(I_2\otimes L_3) & (L_1^0\sigma_1)\otimes I_2\otimes I_3 & & & & \\ & L_1\oplus L_2\oplus L_3 & (L_1^0\sigma_1)\otimes I_2\otimes I_3 & & & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & L_1\oplus L_2\oplus L_3 & (L_1^0\sigma_1)\otimes I_2\otimes I_3 \\ & & & & & I_1\oplus(L_2\oplus L_3) \end{bmatrix} \end{array}$$

$$A_{mm+1}=\begin{array}{cc} & \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & \cdots & M & M+1 & M+2 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \cdots \\ M+1 \\ M+2 \end{array} & \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ I_1\otimes(L_2^0\sigma_2)\otimes I_3 & 0 & & & & \\ & I_1\otimes(L_2^0\sigma_2)\otimes I_3 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & \ddots & I_1\otimes(L_2^0\sigma_2)\otimes I_3 & & \\ & & & & I_1\otimes(L_2^0\sigma_2)\otimes I_3 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

$1\leqslant n\leqslant N,\quad 1\leqslant m\leqslant N-1$

$$A_{NN}=\begin{array}{cc} & \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & \cdots & M+1 & M+2 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ M+1 \\ M+2 \end{array} & \begin{bmatrix} L_1\oplus(I_2\otimes L_3) & (L_1^0\sigma_1)\otimes I_2\otimes I_3 & & & & \\ & L_1\oplus(I_2\otimes L_3) & (L_1^0\sigma_1)\otimes I_2\otimes I_3 & & & \\ & & L_1\oplus(I_2\otimes L_3) & & & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & L_1\oplus(I_2\oplus L_3) & (L_1^0\sigma_1)\otimes I_2\otimes I_3 \\ & & & & & I_1\oplus(I_2\otimes L_3 \end{bmatrix} \end{array}$$

引理 1　矩阵 Ann, $0\leqslant n\leqslant N$,均为逆矩阵.

在平稳状态下,有限态时齐马氏链 Q 一定存在平稳概率分布,不妨记其为 $\Pi=(\pi_0,\pi_1,\cdots,\pi_{N-1},\pi_N)$所以 Π 为线性方程组 $\Pi Q=0$, $\Pi e_Q=1$ 的唯一非负解向量.

定理 2　$\pi_n=(-1)^n\pi_0A_{01}A_{11}^{-1}A_{12}A_{22}^{-1}\cdots A_{n-1n}A_{nn}^{-1}$, $1\leqslant n\leqslant N$,其中 π_0 为下列线性方程组的唯一解,

$$\begin{cases}\pi_0\left[A_{00}+\sum_{n=1}^{N}(-1)^nA_{01}A_{11}^{-1}A_{12}A_{22}^{-1}\cdots A_{n-1n}A_{nn}^{-1}A_{n0}\right]=0,\\ \pi_0\left\{e_3+\left[\sum_{n=1}^{N}(-1)^nA_{01}A_{11}^{-1}A_{12}A_{22}^{-1}\cdots A_{n-1n}A_{nn}^{-1}A_{n0}\right]e_4\right\}=1.\end{cases}$$

由 $A_{00}, A_{11},\cdots,A_{NN}$的位相结构可知,

$$\begin{aligned}\pi_0&=(\pi^{(0,0)},\pi^{(0,1)},\pi^{(0,2)},\cdots,\pi^{(0,M+1)},\pi^{(0,M+2)}),\\ \pi_n&=(\pi^{(n,1)},\pi^{(n,2)},\pi^{(n,3)},\cdots,\pi^{(n,M+1)},\pi^{(n,M+2)}),\\ &1\leqslant n\leqslant N.\end{aligned}$$

其中,$\pi^{(m,n)}=(\pi_{1,1,1}^{(m,n)},\pi_{1,1,2}^{(m,n)},\cdots,\pi_{1,1,k_3l_3+1}^{(m,n)};\pi_{1,2,1}^{(m,n)},\pi_{1,2,2}^{(m,n)},\cdots,\pi_{1,2,k_3l_3+1}^{(m,n)};\cdots;\pi_{1,k_2l_2+1,1}^{(m,n)},\pi_{1,k_2l_2+1,2}^{(m,n)},\cdots,\pi_{1,k_2l_2+1,k_3l_3+1}^{(m,n)};\pi_{2,1,1}^{(m,n)},\pi_{2,1,2}^{(m,n)},\cdots,\pi_{2,1,k_3l_3+1}^{(m,n)};\cdots;\pi_{k_1l_1+1,k_2l_2+1,1}^{(m,n)},\pi_{k_1l_1+1,k_2l_2+1,2}^{(m,n)},\cdots,\pi_{k_1l_1+1,k_2l_2+1,k_3l_3+1}^{(m,n)})$.

当 $m=0$ 时,$n=0,1,2,\cdots,M+1,M+2$,

当 $1\leqslant m\leqslant N$ 时,$n=1,2,3,\cdots,M+1,M+2$.

定理 3　设系统在平稳状态下,则

1)　工作站 Ⅰ 的阻塞概率为

$$P_{(\mathrm{I},b)}=\sum_{n=0}^{N}\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{r=1}^{k_3l_3+1}\pi_{i,j,r}^{(n,M+2)}.$$

2). 工作站 Ⅱ 的阻塞概率和饥饿概率分别为

$$P_{(\mathrm{II},b)}=\sum_{m=2}^{M+2}\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{r=1}^{k_3l_3+1}\pi_{i,j,r}^{(N,m)};$$

$$P_{(\mathrm{II},s)}=\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{r=1}^{k_3l_3+1}\pi_{i,j,r}^{(0,0)}+\sum_{n=0}^{N}\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{r=1}^{k_3l_3+1}\pi_{i,j,r}^{(n,1)}.$$

3)　工作站 Ⅲ 的饥饿概率为

$$P_{(\mathrm{III},s)}=\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{r=1}^{k_3l_3+1}\pi_{i,j,r}^{(0,0)}.$$

3　稳态指标及其敏感度分析

为了给出系统的稳态指标,类似于文献[2],我们认为,只要系统中有输出,即工作站 Ⅲ 处于工作状态,则系统就被看为处于正常状态;反之,若系统中无输出,则系统被看为处于故障状态.

3.1　稳态指标

定理 4　系统的稳态可用度为

$$A_S=\sum_{m=1}^{M+1}\sum_{n=0}^{N}\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{r=1}^{k_3l_3+1}\pi_{i,j,r}^{(n,m)}.$$

为了求系统的稳态故障频度，记 $T_3^0=(t_{31}^0,t_{32}^0,t_{33}^0,\cdots,t_{3l_3}^0)'$，$\Gamma_3^0=(\tau_{31}^0,\tau_{32}^0,\tau_{33}^0,\cdots,\tau_{3k_3}^0)'$.

定理 5 系统的稳态故障频度为

$$W_f=\sum_{m=1}^{M+2}\sum_{n=0}^{N}\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{s=1}^{k_3}\sum_{r=1}^{l_3}t_{3r}^0\,\pi_{i,j,(sr)}^{(n,m)}+\sum_{m=1}^{M+2}\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{s=1}^{k_3}\sum_{r=1}^{l_3}\tau_{3s}^0\,\pi_{i,j,(sr)}^{(1,m)}.$$

对于这个 Clarke 型 CIMS 生产线，其生产能力直接由工作站 Ⅱ，Ⅲ 的稳态成品生产率之和表出. 为此我们引入，$\Gamma_i^0=(\tilde{\tau}_{i1}^0,\tilde{\tau}_{i2}^0,\tilde{\tau}_{i3}^0,\cdots\cdots,\tilde{\tau}_{ik_i}^0)$，$i=2,3$.

定理 6 设系统在平稳状态下，则

1） 工作站 Ⅱ 的稳态生产率为

$$W_{(\mathrm{II})}=\sum_{m=2}^{M+2}\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{s=1}^{k_2}\sum_{j=1}^{l_2}\sum_{r=1}^{k_3l_3+1}\tilde{\tau}_{2s}^0\,\pi_{i,(sj),r}^{(n,m)}$$

2）工作站 Ⅲ 的稳态生产率为

$$W_{(\mathrm{III})}=\sum_{m=1}^{M+2}\sum_{n=0}^{N}\sum_{i=1}^{k_1l_1+1}\sum_{j=1}^{k_2l_2+1}\sum_{s=1}^{k_3}\sum_{r=1}^{l_3}\tilde{\tau}_{3s}^0\,\pi_{i,j,(sr)}^{(n,m)}.$$

3） 系统的稳态生产率为

$$W_s=W_{(\mathrm{II})}+W_{(\mathrm{III})}.$$

3.2 敏感度分析

设向量 $\boldsymbol{a}=(\alpha_1,\ \alpha_2,\cdots,\ \alpha_n)$，矩阵 $A=[a_{ij}]_{n\times n}$，则定义向量 $\boldsymbol{a}$ 的 l_1 范数为 $\|\boldsymbol{a}\|=\sum_{m=1}^{n}|\alpha_m|$，定义矩阵 A 的诱导范数为 $\|A\|=\max\limits_{\|\boldsymbol{x}\|=1}\|\boldsymbol{x}A\|$.

在这个 Clarke 型 CIMS 生产线中，由于各个工作站的周围环境具有一定的随机性，所以观察、测试和统计这些随机变动环境通常存在一定的误差. 因此我们有必要分析在这些误差下系统稳态指标的敏感度[4,8].

定理 7 设 (γ,Φ) 为任一 PH 分布的不可约表示，$(\gamma,\Phi+\Delta(\Phi))$ 为带有误差 $\Delta(\Phi)$ 的相关 PH 分布的不可约表示，$\Delta(\alpha^*)=\dfrac{\gamma\,[\Phi+\Delta(\Phi)]^{-1}}{\gamma\,[\Phi+\Delta(\Phi)]^{-1}e}-\dfrac{\gamma\,\Phi^{-1}}{\gamma\,\Phi^{-1}e}$，则总存在一个误差限界 $\delta>0$，当 $\|\Delta(\Phi)\|<\delta$ 时，恒有

$$\|\Delta(\alpha^*)\|<\frac{3\|\Phi^{-1}\|^2(\gamma\,\Phi^{-1}e+n\|\Phi^{-1}\|)}{(\gamma\,\Phi^{-1}e)^2}\|\Delta(\Phi)\|.$$

在定理 1 的条件下，若 $\Gamma_i,T_i(i=1,2,3)$ 的误差分别取为 $\Delta(\Gamma_i)$，$\Delta(T_i)$ 时，

$$\Delta(\sigma_i)=(\tau_i\otimes\Delta(\alpha_i^*),0)$$

$$\Delta(L_i)=\begin{bmatrix}\Delta(\Gamma_i)\oplus\Delta(T_i) & e^{(1)}\otimes\Delta T_i^0\\ [\beta_i\Delta(\tau_i^*)]\otimes\alpha_i & 0\end{bmatrix}$$

由上两式，我们可以给出 $\Delta(A_{mn})$，$0\leqslant m,n\leqslant N$，于是可得

$$\Delta(\boldsymbol{Q})=\begin{bmatrix} \Delta(A_{00}) & \Delta(A_{01}) & & & & & \\ \Delta(A_{10}) & \Delta(A_{11}) & \Delta(A_{12}) & & & & \\ \Delta(A_{20}) & 0 & \Delta(A_{22}) & \Delta(A_{23}) & \ddots & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \\ \Delta(A_{N-10}) & 0 & 0 & 0 & \cdots & \Delta(A_{N-1N-1}) & \Delta(A_{N-1N}) \\ \Delta(A_{N0}) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \Delta(A_{NN}) \end{bmatrix}$$

定理 8　设系统在平稳状态下,则总存在 $\delta>0$,当 $\|\Delta(\Gamma_i)\|<\delta$, $\|\Delta(T_i)\|<\delta$, $1\leqslant i\leqslant 3$ 时,恒有

1)系统稳态可用度的摄动界为

$$|\Delta(A_S)|\leqslant\frac{3}{2}\|\tilde{Q}^{-1}\|^2\|\Delta(Q)\|.$$

2)系统稳态故障频度的摄动界为

$$|\Delta(W_f)|\leqslant\frac{3}{2}\|\tilde{Q}^{-1}\|^2(\|\Gamma_3^0\|+\|T_3^0\|)\|\Delta(Q)\|.$$

3)系统稳态生产率的摄动界为,

$$|\Delta(W_S)|\leqslant\frac{3}{2}\|\tilde{Q}^{-1}\|^2(\|\Gamma_2^0\|+\|\Gamma_3^0\|)\|\Delta(Q)\|.$$

其中,$\tilde{Q}$是用 e_Q 去代换矩阵 Q 中任意一列元素后所得到的一个新矩阵.

4　结论

本文用 PH 分布描述了一类 Clarke 型 CIMS 生产线中的寿命和修理时间,给出了较一般 CIMS 可靠性研究中的线性结构及其相关的概率算法,把工作站的指数寿命假设推进到了非指数的 PH 寿命类中,得到了系统主要稳态指标对某些参数组的敏感度. 这些结果为我们进一步研究 CIMS 的可靠性问题提供了重要的理论依据.

参考文献

[1]　郑大钟,郑应平. 离散事件动态理论,现状和展望. 自动化学报,1992,**18**(2):129—142.

[2]　疏松桂. 带有缓冲库的综合制造系统(CIMS)分析及其可靠性的研究. 自动化学报,1992,**18**(1):15—22.

[3]　谭民,张立龙. 考虑缓冲库故障的 CIMS 生产线可靠性模型. 控制理论与应用,1993,**10**(2):235—240.

[4]　李泉林. 具有多层次变动环境的 CIMS 可靠性位相分析. 控制理论与应用,1994,**11**(6):758—763.

[5]　李泉林. 有相型寿命 G-PH 型 CIMS 生产线的可靠性研究. 控制与决策,1995,**10**(5):422—428.

[6]　Buzacott J A, Shanthikumar J G. Stochastic models of manufacturing systems. New Jersey:Prentice Hall, 1993.

[7]　Neuts M F. Matrix-geometric solution in stochastic models-an algorithm approach. The Johns Hopkins University Press, 1981.

[8]　李泉林,朱翼隽. 闸门式 PH 休假的 PH/PH/1/N 排队系统. 应用数学与计算学报,1993,**7**(2):33—40.

A RELIABILITY STUDY OF THE CLARKE TYPE CIMS PRODUCTION LINE WITH PHASE TYPE LIFE TIMES

LI QUANLIN
(*Institute of Applied Mathematics*, *Academia Sinica*, *Beijing* 100080)
TIAN NAISHUO
(*Dept. of Math.*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004)

Abstract This paper gives a detail reliability study of the Clarke type CIMS production line with phase type life time and two classes of finite intermediate buffers on different flexible machanisms. We give some hierarchical regularities of extensive working times of all work-pieces, give some algorithms formulas of reliability indices and production indices of CIMS production line by using two dimensions mark-value closed network, and give some sensitivity boundaries when the CIMS production line has some perturbed parameters.

Key words CIMS, phase type life time, reliability, queueing network, sensitivity.

李泉林 1964 年生,1988 年毕业于河北大学数学系,1991 年毕业于东北重型机械学院获硕士学位,1995 年到中国科学院应用数学研究所攻读博士学位. 主要研究兴趣:可靠性理论与应用,随机服务系统,CIMS 的相型理论,离散和连续事件动态系统,以及神经元网络等. 已在国内外发表论文 30 余篇.

田乃硕 54 岁,1966 年毕业于黑龙江大学数学系. 现任中国运筹学会排队论专业委员会副主任,燕山大学数理系教授. 主要研究方向:排队论及其随机模型. 已在国内外发表论文 40 余篇.