



计算机集成制造系统 (CIMS) 的 可靠性建模与分析

喻明 吴澄 方崇智

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要

针对 CIMS 生产线的一般结构,并有工作站不可靠、有多种运行方式及有限缓冲库等特点,依据工作站的实际平均加工时间,提出了一种新的可靠性建模和分析方法。计算示例表明,这种方法较现有的方法适用面广,且计算量小。

关键词: 制造系统,可靠性,性能分析。

1 引言

CIMS 的生产线一般由多个可修工作站、中间缓冲库、自动小车及计算机控制系统组成。在一定的调度策略下,假设物料搬运过程无故障时,系统的可靠性则由工作站和缓冲库决定。现行的建模和可靠性分析方法主要有: 1) 基于马氏过程的方法^[1],因存在状态组合爆炸问题而难以求解高阶系统; 2) 分解法^[2],是用求解二级生产线的方法,对多级线逐级分解和全局迭代而求取数值解,只能求解中等规模的生产线,且有时解不收敛; 3) 工作站等效法^[3],则假设缓冲库的实际输入、输出速度可用其上下级工作站的额定生产速度近似,且仍服从负指数分布,求取系统的分析解; 4) 概率流平衡方法^[4],对工件输出流按概率分解后建立工作站和缓冲库的状态方程,从而求取系统的稳态解。

这里针对一般结构的高阶系统,按典型环节划分,建立了一种新的以工作站实际平均加工时间为状态变量的线性方程组模型,由此可容易地求解各工作站的生产率、可靠性指标和协调运行条件。这种方法较现有方法适用面广,且精度高、计算量小。

2 制造系统的建模

对于如图 1 所示的一般制造系统,假设工作站 M_i 的加工时间、故障间隔时间和修复时间均服从负指数分布,平均生产率为 ω_i ,平均失效率为 λ_i ,平均修复率为 μ_i ; 首级工作站不因缺料而空闲,末级工作站输出无阻塞。则考虑故障后, M_i 的平均加工时

间为

$$t'_i = (\lambda_i + \mu_i) / \mu_i \omega_i \quad (1)$$

当缓冲库容量有限时, 因空闲或阻塞现象而使 M_i 的实际加工时间 t'_i 增加, 其增加的时间相当于等待上下级工作站输出一个工件的时间, 即 t'_{i-1} 或 t'_{i+1} . 则

$$t'_i = t_i + \bar{p}_{i-1,s} p_{ib} t'_{i+1} + p_{i-1,s} \bar{p}_{ib} t'_{i-1} + p_{i-1,s} p_{ib} \cdot \max\{t'_{i-1}, t'_{i+1}\} \quad (2)$$

式中 $p_{i-1,s}$ 为缓冲库 B_{i-1} 空闲的概率, p_{ib} 为 B_i 阻塞的概率. 对于 B_i , 由文献 [3] 知:

$$\left. \begin{aligned} p_{is} &= (1 - \rho_i) / (1 - \rho_i^{k_i+1}), \bar{p}_{is} = 1 - p_{is}, \\ p_{ib} &= \rho_i^{k_i} (1 - \rho_i) / (1 - \rho_i^{k_i+1}), \bar{p}_{ib} = 1 - p_{ib}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 k_i 为 B_i 的容量, ρ_i 为 B_i 的输入/输出速度之比. 考虑到系统的鲁棒性, 在此用故障等效后的平均加工时间之比来近似, 即

$$\rho_i = \omega'_i / \omega'_{i+1} = t'_{i+1} / t'_i \quad (4)$$

至此, 已经建立了 M_i 的模型. 因(2)式是一个关于 t'_i, t'_{i+1} 和 t'_{i-1} 的线性方程, 则

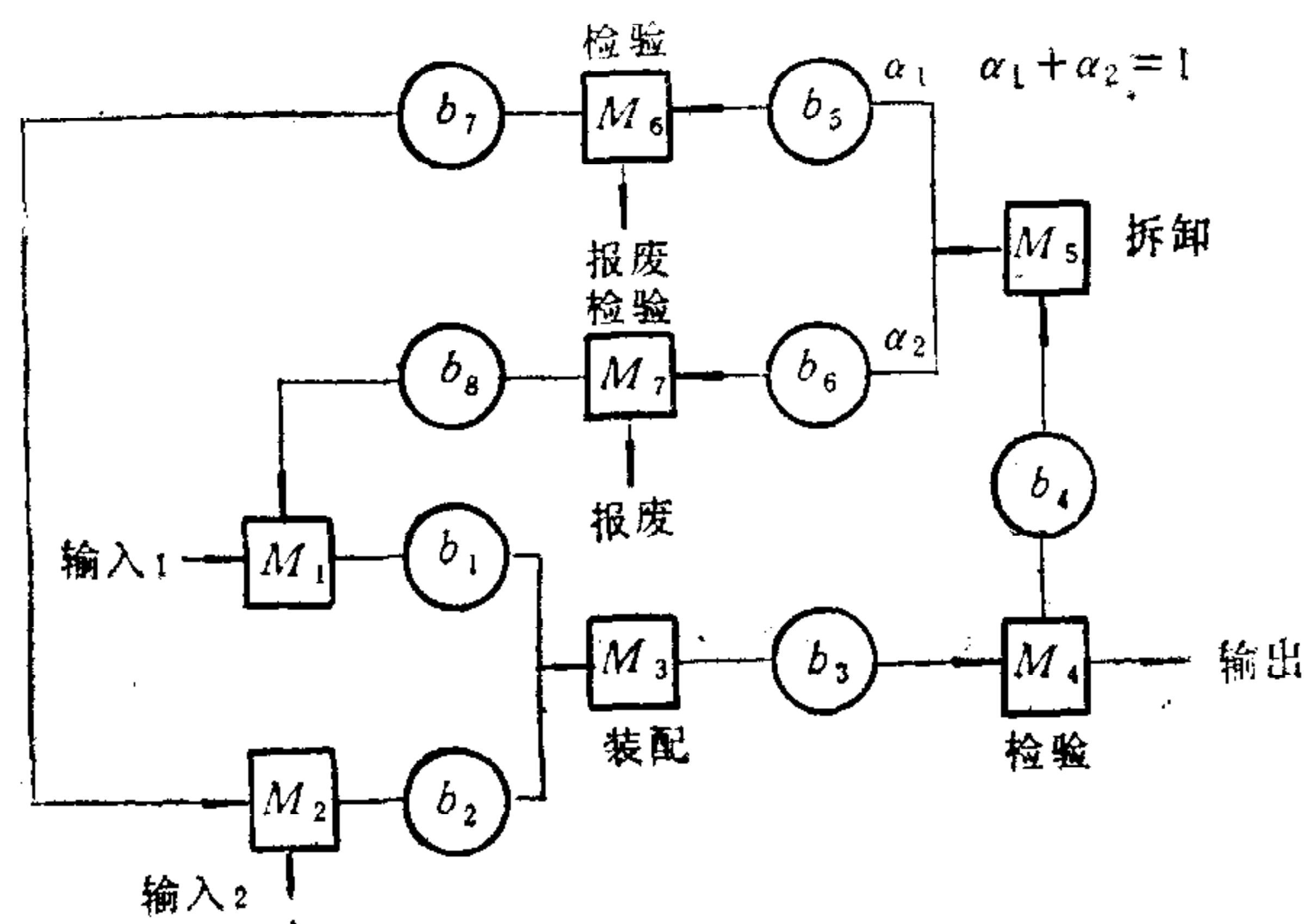


图 1 一般系统结构图

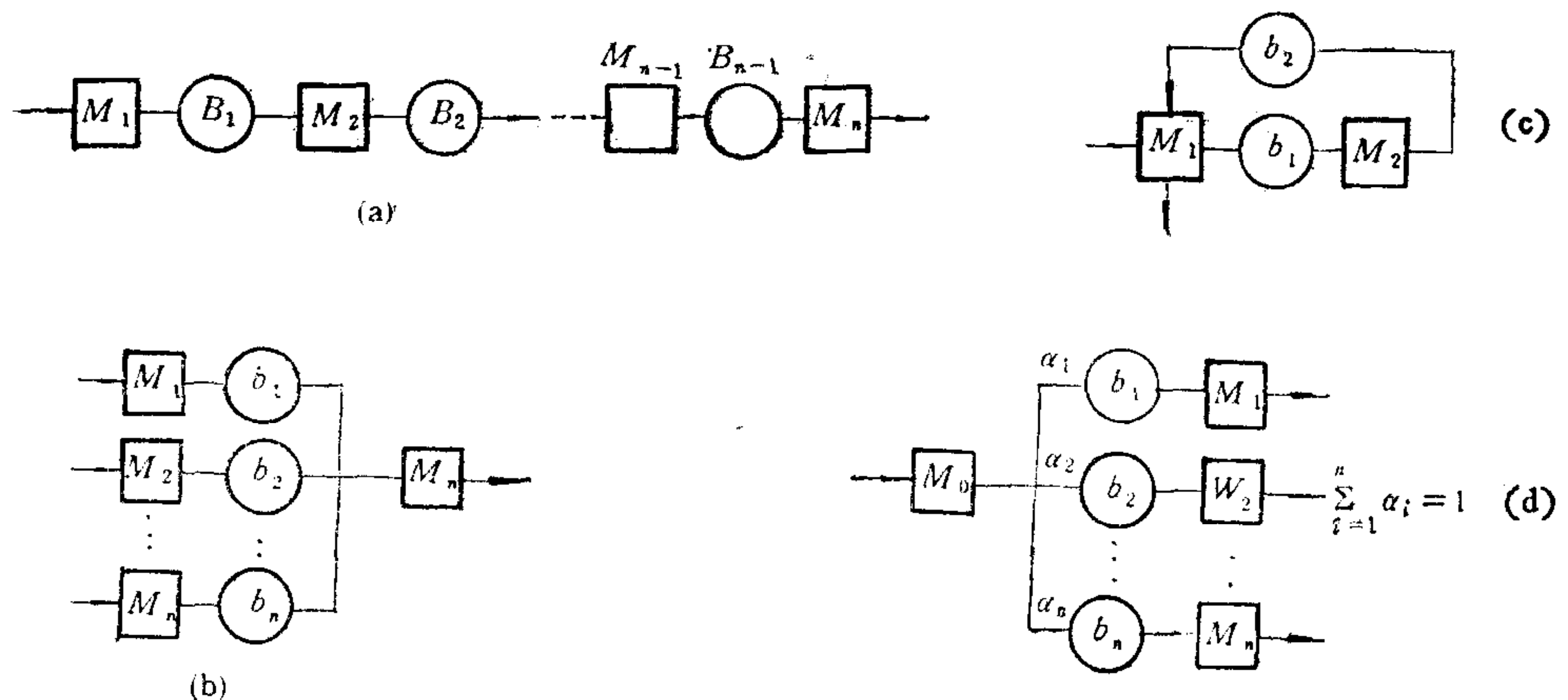


图 2 典型环节

联立 $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的所有模型就得到一个线性方程, 可求解出各工作站的实际平均加工时间.

对于如图 1 所示的一般结构系统, 可分解为图 2 所示的四种典型环节, 分别建模如下:

1) 流水线(图 2(a))

$$\begin{cases} t_1'' = t_1' + p_{1b} \cdot t_2'', \\ t_i'' = t_i' + \bar{p}_{i-1,s} p_{ib} t_{i+1}'' + p_{i-1,s} \bar{p}_{ib} \cdot t_{i-1}'' \\ \quad + p_{i-1,s} p_{ib} \cdot \max\{t_{i-1}'', t_{i+1}''\}, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ t_n'' = t_n' + p_{n-1,s} t_{n-1}''. \end{cases} \quad (5)$$

2) 装配线(图 2(b))

$$\begin{cases} t_i'' = t_i' + p_{ib} \cdot t_0'', \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ t_0'' = t_0' + \sum_{j=1}^{2^n-1} p_1 p_2 \cdots p_n \cdot \max\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}. \end{cases} \quad (6)$$

式中 j 为所有可能状态的编号, 若相应的 B_i 空, 则 $p_i = p_{is}$, $\xi_i = t_i''$; 否则 $p_i = \bar{p}_{is}$, $\xi_i = 0$.

3) 拆卸线(图 2(c))

$$\begin{cases} t_i'' = t_i' + p_{is} \cdot \frac{1}{\alpha_i} t_0'', \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ t_0'' = t_0' + \sum_{j=1}^{2^n-1} p_1 p_2 \cdots p_n \cdot \max\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}. \end{cases} \quad (7)$$

式中若 B_i 满, 则 $p_i = p_{ib}$, $\xi_i = t_i''/\alpha_i$, 其中 $\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1$; 否则 $p_i = p_{is}$, $\xi_i = 0$.

4) 检验、反馈环节(图 2(d))

$$\begin{cases} t_{11}'' = t_{11}' + p_{2s} p_{1b} t_2'' + p_3 t_{13}'', \\ t_{13}'' = t_{13}' + p_{2s} p_{1b} t_2'' + p_1 t_{11}'', \\ t_2'' = t_2' + p_{1s} p_{2b} t_{13}'' + p_{1s} \bar{p}_{2b} t_{11}'' + p_{1s} p_{2b} \cdot \max\{t_{11}'', t_{13}''\}. \end{cases} \quad (8)$$

式中 p_1 和 p_3 分别为 M_1 工作于输入和输出方式的概率. 故障等效后的生产率分别为 ω'_{11} 和 ω'_{13} , 则

$$\begin{cases} \omega'_{11} p_1 = \omega'_{13} p_3, \\ p_1 + p_3 = 1 - p_{2s} p_{1b}. \end{cases}$$

由此可求得

$$\begin{cases} p_1 = (1 - p_{2s} p_{1b}) / (1 + \omega'_{11} / \omega'_{13}), \\ p_3 = (1 - p_{2s} p_{1b}) / (1 + \omega'_{13} / \omega'_{11}). \end{cases} \quad (9)$$

而用于求解缓冲库概率的 M_1 的相对速度为

$$\omega_1^* = \omega_2' p_2 / (1 - p_{2s} p_{1b}) = \omega'_{11} \omega_2' / (\omega'_{11} + \omega'_{13}). \quad (10)$$

联立各典型环节的模型, 即可得到系统模型.

3 性能分析

系统的可用度是指系统稳态运行后, 在某一段时间内实际生产的产品数与应该生产的产品数之比, 则

$$A_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i). \quad (11)$$

式中 $A_i = \omega_i''/\omega_i$, 而 $\omega_i'' = 1/t_i''$. 对于有多种工作方式的工作站, 如图 2(d) 中的 M_1 , 则 $A_{M1} = 1 - (1 - A_1)(1 - A_3)$, 而 $A_1 = \omega_1''/\omega_1$, $A_3 = \omega_3''/\omega_3$.

系统生产率:

$$\omega_s = \min\{\omega_1'', \omega_2'', \dots, \omega_n''\}. \quad (12)$$

式中 $\omega_i'' = \min\{\omega_{i1}'', \omega_{i2}'', \dots, \omega_{in_i}''\}$ 对应于 M_i 的 n_i 个工作方式.

系统平均库存工件数:

$$N = \sum_{i=1}^{n_B} N_i = \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{j=1}^{k_i} j \rho_i^j (1 - \rho_i) / (1 - \rho_i^{k_i+1}). \quad (13)$$

式中 n_B 为系统中缓冲库的个数.

工件在线平均逗留时间:

$$\left. \begin{aligned} \text{对于流水线, } T_s &= \sum_{i=1}^n t_i'' + N/\omega_s; \\ \text{对于装配线和拆卸线, } T_{s,i} &= t_i'' + t_0'' + 1/\omega_s; \\ \text{对于检验和反馈环节, } T_s &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} t_j'' + N/\omega_s. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

这里 N 指反馈回路中的缓冲库个数.

4 系统协调运行的条件

协调运行是指系统中每两个相邻工作站之间无工件丢失现象, 即

$$\omega_i'' = \omega_{i+1}'', \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (15)$$

此时 $\rho_i = 1$, 可求得 $p_{is} = p_{ib} = 1/(k_i + 1)$, $\bar{p}_{is} = \bar{p}_{ib} = k_i/(k_i + 1)$. 据此可求出各典型环节系统的协调运行条件:

对于流水线

$$\left. \begin{aligned} \omega_1'' &= \omega_1' k_1 / (k_1 + 1), \\ \omega_i'' &= \omega_i' k_{i-1} k_i / (k_{i-1} + 1)(k_i + 1), \quad i = 2, \dots, n-1, \\ \omega_n'' &= \omega_n' k_{n-1} / (k_{n-1} + 1). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

则协调运行的条件为

$$\frac{\omega_1 \mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \frac{k_1}{k_1 + 1} = \frac{\omega_i \mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{k_{i-1} k_i}{(k_{i-1} + 1)(k_i + 1)}$$

$$= \frac{\omega_n \mu_n}{\lambda_n + \mu_n} \frac{k_{n-1}}{k_{n-1} + 1}, \quad i = 2, \dots, n-1. \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{对于装配线} \quad \omega'_i &= \omega'_i k_i / (k_i + 1), \quad i = 1, \dots, n, \\ \omega''_0 &= \omega'_0 \prod_{i=1}^n k_i / (k_i + 1). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

则协调运行的条件为

$$\frac{\omega_j \mu_j}{\lambda_j + \mu_j} = \frac{\omega_0 \mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \frac{k_i}{k_i + 1}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (19)$$

对于拆卸线

由 $\rho_i = 1/\alpha_i$, 有 $p_{is} = \alpha_i^{k_i}(1 - \alpha_i)/(1 - \alpha_i^{k_i+1})$ 和 $p_{ib} = (1 - \alpha_i)/(1 - \alpha_i^{k_i+1})$, 可导出:

$$\left. \begin{aligned} \omega''_0 &= \omega'_0 \prod_{i=1}^n (1 - \alpha_i) / (1 - \alpha_i^{k_i+1}), \\ \omega''_i &= \omega'_i (1 - \alpha_i^{k_i-1} + \alpha_i^{k_i} - \alpha_i^{k_i+1}) / (1 - \alpha_i^{k_i+1}), \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

则协调运行的条件为

$$\frac{\omega_0 \mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} \prod_{j=1}^n \frac{1 - \alpha_j}{1 - \alpha_j^{k_j+1}} = \frac{\omega_i \mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \frac{1 - \alpha_i^{k_i-1} + \alpha_i^{k_i} - \alpha_i^{k_i+1}}{1 - \alpha_i^{k_i+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (21)$$

对于检验和反馈环节

$$\begin{aligned} \text{由 } \rho_1 = \rho_2 = 1, \text{ 有 } p_1 &= \frac{1 - 1/(k_1 + 1)(k_2 + 1)}{1 + \omega_{11}/\omega_{13}} \\ \text{和} \quad p_3 &= \frac{1 - 1/(k_1 + 1)(k_2 + 1)}{1 + \omega_{13}/\omega_{11}}, \end{aligned}$$

可导出:

$$\left. \begin{aligned} \omega''_{11} &= \omega'_{11} p_1 = \omega'_{13} p_3 = \omega''_{13}, \\ \omega''_2 &= \omega'_2 k_1 k_2 / (k_1 + 1)(k_2 + 1). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

这与概率流平衡方法的结果^[4]一致。故协调运行的条件为

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{11} \mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \frac{1 - 1/(k_1 + 1)(k_2 + 1)}{1 + \omega_{11}/\omega_{13}} &= \frac{\omega_2 \mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \frac{k_1 k_2}{(k_1 + 1)(k_2 + 1)} \\ &= \frac{\omega_{13} \mu_3}{\lambda_3 + \mu_3} \frac{1 - 1/(k_1 + 1)(k_2 + 1)}{1 + \omega_{13}/\omega_{11}}. \end{aligned} \quad (23)$$

针对具体的系统结构, 联立以上各典型环节的协调运行条件, 即可得到一般系统的协调运行条件。

5 计算示例

例 1. 设有一条三级流水线, 如图 2(a) 所示, 系统参数见表 1。求解系统生产率和可用度。

解: 计算结果见表 1. 可见 $\omega_i = \min\{\omega_1'', \omega_2'', \omega_3''\} = 1.8188$, $A_i = 1 - (1 - A_1)(1 - A_2)(1 - A_3) = 0.9878$. 与文献[3]计算的结果 ($\omega_i = 1.8452, A_i = 0.9912$) 相比, 可以看出本文所提出的方法是可行的, 并有较好的精度.

表 1 系统参数及计算结果

系 统 参 数					本文的方法				文献[3]的方法			
工 作 站	M_1	M_2	M_3	备注	i'_i	0.2625	0.3556	0.5376	ρ_i	$\rho_1 = 1.3333 \quad \rho_2 = 1.5$		
参 数												
λ_i	0.001	0.002	0.003	$n = 3$	i''_i	0.4164	0.5498	0.5422	B_i	0.7297	0.6428	0.9912
μ_i	0.02	0.03	0.04	$k_1 = 8$	ω_i''	2.4015	1.8188	1.8443	A_i	0.7040	0.6164	0.9226
ω_i	4	3	2	$k_2 = 9$	A_i	0.6004	0.6063	0.9222	ω_i''	2.8160	1.8492	1.8452

例 2. 系统结构及参数同例 1, 但不给定 ω_1, ω_2 和 ω_3 , 要求进行合理化设计.

解: 按协调运行的条件求解, 将 λ_i, μ_i 及 k_i 代入(17)式有: $\omega_i = 0.8466\omega_1 = 0.75\omega_2 = 0.8372\omega_3$, 亦即 $\rho_1 = 0.8859, \rho_2 = 1.1130$; 若取 $\omega_2 = 3$, 则 $\omega_1 = 2.6577, \omega_3 = 2.6874$, 此时 $\omega_i = 2.2519$. 若按文献[3]的方法, 则需求解一个二元 17 次方程组, 计算结果为 $\rho_1 = 0.8811, \rho_2 = 1.1199$. 可见结果基本一致, 但本文的方法却简单得多.

6 结论

对于一般结构的制造系统, 本文提出了一种有效的建模及可靠性分析方法, 用以评价系统的生产率和可用度等性能. 并且得到了一种简单的协调运行条件. 这种方法计算量小, 还可应用于其它类似的随机服务系统.

参 考 文 献

- [1] Miriyala K, Viswanadaham N. Reliability Analysis of FMS. *the Int. J. of FMS* 1989, 2:145—162.
- [2] Gershwin S B. An Efficient Decomposition Method for the Approximate Evaluation of Tandem Queues with Finite Storage Space and Blocking. *O. R.*, 1987, 35:291—305.
- [3] 疏松桂. 带有缓冲库的综合制造系统分析及其可靠性研究. *自动化学报*, 1992, 18(1): 15—22.
- [4] 喻明, 吴澄. 多级生产线可靠性分析的一种新方法. *信息与控制*, 1993, 22(1): 1—5.

RELIABILITY MODELING AND ANALYSIS OF CIMS

YU MING WU CHENG FANG CHONGZHI

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT

In this paper a new method of reliability modeling and analysis based on the practical mean value of processing time of each workstation is proposed for general production systems with unreliable workstations, several work states and finite buffer capacities. The effectiveness of this method is shown by several numerical examples. This method has wider applications and requires less calculations than the existing ones.

Key words: Manufacturing system, reliability, performance analysis.