

考虑缓冲区故障的 CIMS 生产线可靠性模型

谭 民

张立龙

(中国科学院自动化研究所·北京, 100080) (郑州大学数学系, 450052)

摘要: 本文对考虑缓冲区故障的多级 CIMS 生产线的可靠性问题进行了研究, 分析了缓冲区故障对生产线运行的影响, 求出了系统稳态可用度及稳态生产率, 并用一数值例子进行了说明.

关键词: 缓冲区; 状态; 可靠性; 故障

1 引言

计算机集成制造系统可靠性问题的研究是保证系统正常运行不可缺少的一部分, 目前这项研究已经取得了不少成果. 文献[1, 2]对多级可修 CIMS 生产线问题进行了研究, 从不同的方面建立了分析多级 CIMS 生产线可靠性模型, 求得了系统可靠性的指标, 并对 CIMS 生产线可靠性研究的一些方法给出了介绍, 文献[1]把缓冲区的状态简化为空、不空、满、不满四种状态, 并结合中间工作站构成了一等效工作站模型, 连接所有的等效工作站可求出整个生产线的稳态可用度和生产率; 文献[2]从生产线正常工作状态出发, 对各个工作站故障和正常工作情况进行了讨论, 得出了正常工作的概率, 然后在几种状态下对缓冲区的工作情况给以分析, 求出缓冲区在几种情形下处于不空状态的概率, 进而分析整个生产线的工作情况, 得到了稳态可用度及生产率的解析表达式; 另外, 文献[3]对缓冲区状态进行了简化, 把容量为 K 的缓冲区的 $K+1$ 个状态简化为全空、有工件、全满三个状态, 并结合工作站的情况对缓冲区处在各种状态下的概率进行了求解, 提出了状态简化的三个定理. 上面这些讨论中都假定缓冲区在运行时不发生故障, 得到了比较好的结果, 实际生产的缓冲区在运行中也会发生故障, 它对前后级工作站的运行是有影响的, 因而有必要考虑缓冲区发生故障所造成的影响.

本文对带有缓冲区故障的两级和多级 CIMS 生产线的可靠性问题进行了研究, 首先分析工作站与缓冲区的工作及故障情况, 列出它们的状态转移方程, 求解各状态的概率, 然后分别对工作站及缓冲区造成的影响进行讨论, 最后考虑整个生产线运行, 求解生产线的可靠性指标.

2 两级生产线的分析

设 $M_i (i=1, 2)$ 为可修工作站, 它的失效率、修复率、生产率分别为 $\lambda_i, \mu_i, \omega_i$, 均服从指数分布; B 为缓冲区, 它的容量为 K , 它的失效率和修复率分别为 λ_0, μ_0 , 其结构如图 1.

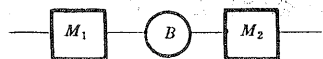


图 1 两级生产线的结构

为了分析问题的需要, 首先给定一些假设:

- 1) 工作站和缓冲区发生故障可及时修理, 修复后如新, 并且任一工作站(或缓冲区)发生故障时, 其它部分不再发生故障, 即不会有两个部分同时发生故障。
- 2) 工件从缓冲区中取出或存入的时间很短, 可忽略不计。
- 3) 首级工作站不饥饿(即有足够的原材料), 末级工作站不阻塞(即有足够大的成品库)。
- 4) 随机变量之间相互统计独立。

2.1 工作站和缓冲区的状态分析

对于两级生产线, 工作站和缓冲区的状态可定义为:

状态 0: M_1, M_2, B 都正常工作, 状态 1: M_1 故障, M_2 和 B 正常,

状态 2: M_2 故障, M_1 和 B 正常, 状态 3: B 故障, M_1 和 M_2 正常。

状态转移如图 2。

状态转移概率方程

$$\dot{P}_0 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_0)P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 + \mu_0 P_3,$$

$$\dot{P}_1 = \lambda_1 P_0 - \mu_1 P_1,$$

$$\dot{P}_2 = \lambda_2 P_0 - \mu_2 P_2,$$

$$\dot{P}_3 = \lambda_0 P_0 - \mu_0 P_3,$$

$$\sum_{i=0}^3 P_i = 1.$$

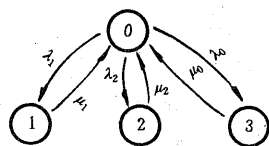


图 2 两级生产线状态转移图

对于 CIMS 生产线, 我们分析稳态运行的情况, 令 $\dot{P}_i = 0 (i=0, 1, 2, 3)$, 并解稳态方程得

$$P_0 = 1 / (1 + \lambda_1 / \mu_1 + \lambda_2 / \mu_2 + \lambda_0 / \mu_0),$$

$$P_1 = (\lambda_1 / \mu_1) P_0,$$

$$P_2 = (\lambda_2 / \mu_2) P_0,$$

$$P_3 = (\lambda_0 / \mu_0) P_0.$$

那么状态 0 的概率 $P_{M0} = 1 / (1 + \sum_{i=1}^3 \lambda_i / \mu_i)$, 状态 1 的概率为 $P_{M1} = (\lambda_1 / \mu_1) P_{M0}$ 。

另外, 在状态 0 的情况下, 生产线的稳态生产率为 $\omega' = \min(\omega_1, \omega_2)$, 这时工作站 M_2 不空闲的概率 $P_{00} = \omega' / \omega_2$ 。

2.2 缓冲区状态分析

这里我们讨论上面状态 1 (M_1 故障, M_2 和 B 都正常工作) 情况下缓冲区内工件的情况, 因为容量为 K , 所以缓冲区内有工件的状态应为: 全空、有一个工件、有二个工件、...、有 $K-1$ 个工件、全满共 $K+1$ 个状态, 其状态转移如图 3。

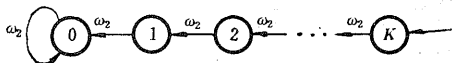


图 3 缓冲区状态转移图

状态转移方程为

$$\dot{P}_0 = -\omega_2 P_0 + \omega_2 P_1,$$

$$\dot{P}_1 = -\omega_2 P_1 + \omega_2 P_2,$$

...

$$\dot{P}_{K-1} = -\omega_2 P_{K-1} + \omega_2 P_K,$$

$$\sum_{i=0}^K P_i = 1.$$

稳态情形时,令 $P_i=0 (i=0,1,2,\dots,K-1)$,得到

$$P_K = P_{K-1} = \dots = P_1 = P_0 = 1/(K+1).$$

在这种情况下,缓冲区不空的概率为

$$P_{B1} = 1 - P_0 = K/(K+1).$$

2.3 两级生产线的分析

- 两级生产线正常工作的状态包括: 1) M_1, M_2, B 都正常工作,且工作站 M_2 不空闲;
2) 当 M_1 故障 M_2 和 B 正常工作时,缓冲区 B 不空,且工作站 M_2 不空闲.

那么两级生产线的稳态可用度为

$$\begin{aligned} A &= P_{M0}P_{00} + P_{M1}P_{B1} \\ &= \frac{\omega'/\omega_2 + (\lambda_1/\mu_1)K/(K+1)}{1 + \sum_{i=0}^2 \lambda_i/\mu_i}. \end{aligned}$$

下面对结果进行一些分析.

1) 缓冲区容量 K 对 A 的影响

i) 当 K 增加时,很明显 A 也增加.说明缓冲区容量的增加,使得生产线的稳态可用度增加了,这同实际情况是相符合的, K 的增加使得工作站之间的耦合减弱,稳态可用度就增加.

ii) 当 $K=0$ 时, $A_0 = (\omega'/\omega_2)/(1 + \sum_{i=0}^2 \lambda_i/\mu_i)$,这是刚性连接情况下的系统稳态可用度.

iii) 当 $K=\infty$ 时, $A_\infty = (\omega'/\omega_2 + \lambda_1/\mu_1)/(1 + \sum_{i=0}^2 \lambda_i/\mu_i)$,这是无限缓冲区的情况.

2) 缓冲区故障对 A 的影响

从表达式中可知,若缓冲区容易发生故障,即 λ_0 增加,那么 A 就减小.若缓冲区完全可靠,不会发生故障,即 $\lambda_0=0$,得到

$$A = \frac{\omega'/\omega_2 + (\lambda_1/\mu_1)K(K+1)}{1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2}.$$

这同文献[2]中的结论是一样的.

3 多级生产线可靠性分析

设 $M_i (i=1,2,\dots,n)$ 为可修工作站,它的失效率、修复率和生产率分别为 $\lambda_i, \mu_i, \omega_i$,均服从指数分布; $B_i (i=1,2,\dots,n-1)$ 为缓冲区,它的容量为 K_i ,它的失效率和修复率分别为 λ_{0i} 和 μ_{0i} ,其结构如图 4 所示,假设条件与两级情况的一样.

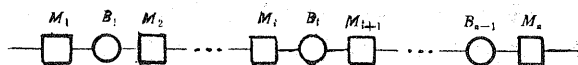


图 4 多级生产线结构

3.1 工作站和缓冲区的状态分析

对于 n 个工作站, $n-1$ 个缓冲区,它的状态共有 $2n$ 个.

状态 0: 所有的 M_i 和 B_i 都正常工作,

状态 i : M_i 故障,其它都正常, ($i=1,2,\dots,n$),

状态 $n+j$: B_j 故障,其它都正常, ($j=1,2,\dots,n-1$).

那么状态转移如图 5.

状态转移的概率方程为:

$$\dot{P}_0 = - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{0j} \right) P_0 + \sum_{i=1}^n \mu_i P_i + \sum_{j=1}^{n-1} \mu_{0j} P_{n+j},$$

$$\dot{P}_1 = \lambda_1 P_0 - \mu_1 P_1,$$

$$\dots \dots$$

$$\dot{P}_n = \lambda_n P_0 - \mu_n P_n,$$

$$\dot{P}_{n+1} = \lambda_{0,1} P_0 - \mu_{0,1} P_{n+1},$$

$$\dots \dots$$

$$\dot{P}_{2n-1} = \lambda_{0,n-1} P_0 - \mu_{0,n-1} P_{2n-1},$$

$$\sum_{i=0}^{2n-1} P_i = 1.$$

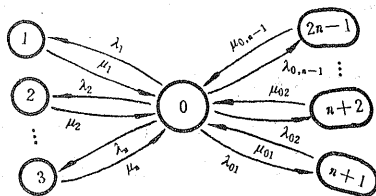


图 5 多级生产线的状态转移图

对于 CIMS 生产线, 我们分析它的稳态运行情况.

令 $\dot{P}_i = 0 (i = 0, 1, 2, \dots, 2n-1)$, 解稳态方程组得

$$P_0 = 1 / \left(1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i / \mu_i + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{0j} / \mu_{0j} \right),$$

$$P_i = (\lambda_i / \mu_i) P_0, \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

$$P_{n+j} = (\lambda_{0j} / \mu_{0j}) P_0, \quad (j = 1, 2, \dots, n-1).$$

这样我们可以得到状态 0 的概率

$$P_{M0} = 1 / \left(1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i / \mu_i + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{0j} / \mu_{0j} \right),$$

状态 i 的概率为

$$P_{Mi} = (\lambda_i / \mu_i) P_{M0},$$

状态 $n+j$ 的概率为

$$P_{M,n+j} = (\lambda_{0j} / \mu_{0j}) P_{M0}.$$

下面我们讨论一下在几种情况下工作站 M_n 不空闲运行的情况.

在状态 0 的情况下, 生产线的稳态生产率 $\omega^0 = \min \{ \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \}$, 这时工作站 M_n 不空闲的概率为 $P_{00} = \omega^0 / \omega_n$;

在状态 i 的情况下, 令 $\omega^i = \min \{ \omega_{i+1}, \omega_{i+2}, \dots, \omega_n \}$, 这时工作站 M_n 不空闲的概率为 $P_{0i} = \omega^i / \omega_n$; $i = 1, 2, \dots, n-1$.

在状态 $n+j$ 的情况下, 令 $\omega^{j+1} = \min \{ \omega_{j+2}, \omega_{j+3}, \dots, \omega_n \}$, 这时工作站 M_n 不空闲的概率为 $P_{0j} = \omega^{j+1} / \omega_n$; $j = 1, 2, \dots, n-2$.

3.2 缓冲区状态分析

1) 当第 i 个工作站故障, 其它正常工作, 分析 $B_i (i = 1, 2, \dots, n-1)$ 内的工件情况, 这时共有 $K_i + 1$ 个状态, 状态转移如图 6.

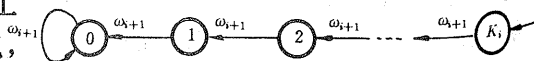


图 6 缓冲区状态转移图

同两级生产线的分析一样, 可以得到缓冲区 B_i 不空的概率为

$$P_{Bi} = K_i / (K_i + 1).$$

2) 当第 $j (j = 1, 2, \dots, n-2)$ 个缓冲区 B_j 故障时, 由于没有工件提供, 所以工作站 M_{j+1} 停工, 那么我们分析缓冲区 B_{j+1} 的状态. 同上面的分析一样, 我们可以得到这种情况下, 缓冲区 B_{j+1} 不空的概率为

$$P_{B,j+1} = K_{j+1}/(K_{j+1} + 1).$$

3.3 多级生产线分析

多级生产线正常工作的状态包括: 1) 所有的 M_i, B_i 都正常工作, 且工件站 M_n 不空闲; 2) 当第 i 个工作站故障, 其它正常时, 第 i 个缓冲区不空, ($i=1, 2, \dots, n-1$), 且工作站 M_n 不空闲; 3) 当第 j 个缓冲区故障, 其它正常时, 第 $j+1$ ($j=1, 2, \dots, n-2$) 个缓冲区不空, 且工作站 M_n 不空闲, 那么系统的稳态可用度为

$$A = P_{M0}P_{00} + \sum_{i=1}^{n-1} P_{M_i}P_{B_i}P_{0i} + \sum_{j=1}^{n-2} P_{M_{n+j}}P_{B_{j+1}}P_{0j}$$

$$= \frac{\omega^0/\omega_n + \sum_{i=1}^{n-1} (\lambda_i/\mu_i)(\omega^i/\omega_n)K_i/(K_i + 1) + \sum_{j=1}^{n-2} (\lambda_{0j}/\mu_{0j})(\omega^{j+1}/\omega_n)K_{j+1}/(K_{j+1} + 1)}{1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i/\mu_i + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{0j}/\mu_{0j}}.$$

系统的稳态生产率为

$$\bar{\omega} = A \min\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}.$$

工件在生产线上平均加工时间为

$$T = 1/\bar{\omega}.$$

3.4 结果的一些分析

1) K_i 对 A 的影响

从稳态可用度的表达式中可以看到, 任一 K_i 增加时, A 都增加, 体现了设置缓冲区的作用.

当所有的 $K_i=0$ 时, 这是刚性连接的情况,

$$A_0 = (\omega^0/\omega_n)/(1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i/\mu_i + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{0j}/\mu_{0j}).$$

当所有的 $K_i \rightarrow \infty$ 时, 这是无限缓冲区的情况,

$$A_\infty = \frac{\omega^0/\omega_n + \sum_{i=1}^{n-1} (\lambda_i/\mu_i)(\omega^i/\omega_n) + \sum_{j=1}^{n-2} (\lambda_{0j}/\mu_{0j})(\omega^{j+1}/\omega_n)}{1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i/\mu_i + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{0j}/\mu_{0j}}.$$

很明显 $A_0 < A < A_\infty$.

2) 缓冲区故障的影响

假如所有的缓冲区都是完全可靠的, 即 $\lambda_{0j}=0$ ($j=1, 2, \dots, n-1$), 那么可以得到

$$A = \frac{\omega^0/\omega_n + \sum_{i=1}^{n-1} (\lambda_i/\mu_i)(\omega^i/\omega_n)K_i/(K_i + 1)}{1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i/\mu_i}.$$

这与文献[2]不考虑缓冲区故障所得到的结果完全一样.

4 举例说明

设有一 CIMS 三级生产线, 工作站和缓冲区的参数分别为: $\lambda_1=0.001, \lambda_2=0.002, \lambda_3=0.003, \lambda_{01}=0.0005, \lambda_{02}=0.0006, \mu_1=0.01, \mu_2=0.02, \mu_3=0.03, \mu_{01}=0.005, \mu_{02}=0.006, \omega_1=3, \omega_2=2, \omega_3=2, K_1=10, K_2=8$, 求解系统的稳态可用度及生产率.

对于这一问题, 我们直接利用稳态可用度的公式代入数值得到.

系统稳态可用度为 $A=0.846$.

系统稳态生产率为 $\bar{\omega}=1.692$.

工件在生产线上平均加工时间为 $T=0.591$.

5 结束语

本文对考虑缓冲区的多级 CIMS 生产线的可靠性问题进行了研究. 首先分析了工作站和缓冲区的故障及工作情况, 然后计算了工作站故障和缓冲区故障情况下, 后级缓冲区不空的概率, 最后对整个多级生产线正常工作的状态进行了讨论, 计算出了多级 CIMS 生产线的稳态可用度及稳态生产率.

缓冲区出现故障同工作站出现故障一样, 都是不可避免的, 因为缓冲区也可以被看成为一个工作站, 只是它不加工工件, 而是起传递工件的作用. 因此本文对缓冲区的故障同工作站故障一样进行了分析, 得到了比较好的结果.

CIMS 生产线的可靠性问题是很复杂的, 这项研究工作还是很有意义的.

参 考 文 献

- [1] 疏松桂. 带有缓冲库的综合制造系统(CIMS)分析及其可靠性研究. 自动化学报, 1992, 18(1): 15—22
- [2] 谭民. 多级 CIMS 生产线可靠性分析. 信息与控制, 1991 年增刊
- [3] 谭民, 疏松桂, 张立龙. CIMS 生产线中缓冲区状态及可靠性分析. 1991 年控制理论及其应用年会论文集, 1991

The Reliability Model on Multi-Stage CIMS Production Line with the Failure of Buffer

TAN Min

(Institute of Automation, Academia Sinica • Beijing, 100080, PRC)

ZHANG Lilong

(Department of Mathematics, Zhengzhou University • Zhengzhou, 450052, PRC)

Abstract: This paper introduces the reliability model on multi-stage CIMS production line with failure of buffer. An illustrative example is presented.

Key words: buffer; state; reliability; failure

本文作者简介

谭 民 1962 年生. 1986 年毕业于清华大学自动化系, 获工学学士, 1990 年获中国科学院自动化所工学博士. 主要研究兴趣包括控制系统故障诊断, 控制系统可靠性, 863 高技术 CIMS 可靠性以及神经网络等.

张立龙 1942 年生. 1967 年毕业于华东师范大学数学系, 1981 年在郑州大学数学系获理学硕士学位. 一直从事现代控制理论研究, 近年来致力于最优控制, 可靠性以及东海海洋温跃层机制的研究.