连续物料智能制造可修生产线的建模、分析及设计*

疏松桂

(中国科学院自动化研究所, 100080)

摘 要 本文对带有缓冲库的连续物料智能制造可修生产线进行了研究,提出两种建模、分析方法.其一是参考前文[6]提出的离散工件等效工作站模型,采取连续物料离散化措施,将继续工作系统转化为连续工作系统,较好地解决物料流的阻塞和饥饿的问题.从而得出一系列的性能指标,如缓冲库的额定容量及稳态存料水平,工作站及系统的生产率、可用度、有效度、以及物料在生产线中的逗留时间等,并根据物料流守恒定律,推导出系统有解的充要条件.其二是提出一个启发式方法.以生产线上物料流动力学出发,探讨缓冲库的存料状态,从而导出与离散法相同的结果.最后举出一个输油管道应用实例,阐明本文提出的两种方法都可以直接用于工程设计.

关键词 智能制造系统(IMS),计算机处理制造系统(CPMS),计算机综合制造系统(CIMS)

1 引言

由于计算机科学及智能控制技术发展很快,未来工厂自动化的实现,要逐渐从计算机集成制造(CIM)向智能计算机集成制造(ICIM)过渡,这是国际公认的制造工业发展的趋势.

关于随机离散工件生产线已有不少的研究成果,大多数是引用马尔可夫状态转移方法分析求解.连续物料制造生产线则迥然不同,这里物料流及缓冲库储存状态是连续的,加工时间是确定的,不能直接用马尔可夫链去描述.国外已有一些文献[1-5]研究了这类问题,但基本是属于两级系统或基于两级系统的分析方法,来处理多级系统问题,推导及计算过程复杂,计算工作量大,三级以上都只能得出近似解.

国内还很少有人讨论连续物料制造可修生产线问题.本文在文献[6,7,8]随机离散工件系统研究的基础上,探讨具有缓冲库的连续物料生产线问题,提出两种新方法,得到异途同归的结果.一是离散化方法,对连续物料进行离散化,则可引用文献[6]的等效工作站的模型,分析设计.二是启发式方法,直接对缓冲库储存状态演变过程进行分析,则可得出稳态储存状态概率,从而推导出工作站及系统的一系列性能指标,如缓冲库的额定容量及稳态存料水平,工作站及系统的生产率,可用度,有效度,以及物料在生产线中的逗留时间等.最后举出实际工业生产设计例题,阐明方法的应用.

* 第二届全国智能专家讨论会论文集,1994 年 8 月.

2 连续物料智能制造可修生产线

设有一多级连续物料制造系统如图 1 所示.

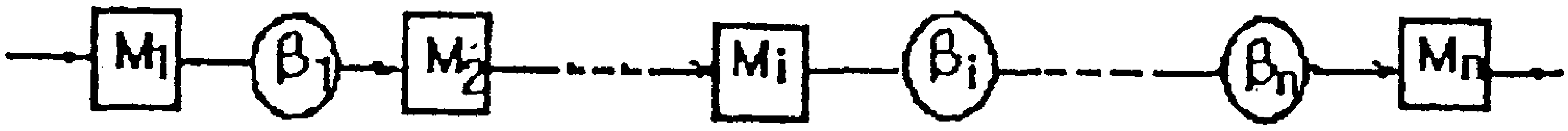

图 1　连续物料制造生产线

其中 M_i 表示第 i 工作站, β_i 表示第 i 缓冲器 $(i=1,2,\cdots\cdots,n)$

本文的建模及分析的方法, 是采用文献[6]“等效工作站”的指导思想, 搭起框架, 然后针对连续物料流的特点, 寻求分析解.

1.1 假设条件

现提出下面 6 条基本假设条件作为本文建模, 分析及设计的依据:

(1) 第 i 工作站额定生产率 ω_i (每小时立方米) 是确定型的连续量 $(i=1,2,\cdots\cdots,n)$

(2) 工作站出现故障 (包括缓冲故障在内) 均得到及时地修理, 修复后则恢复正常工作性能. 故障时间和修复时间服从失效率 λ_i 和修复率 μ_i 的指数分布.

(3) 在第 i 工作站停车修理期间, 当上游站感到阻塞时, 则停车待命, 下游站感到缺料时, 亦停车待命 (这种非修理性停车, 不影响其他工作站的正常生产. 如不停车也是空转).

(4) 正常设计为均匀生产线, 即 $\omega_i=\omega_{i+1}$. 在受到外界干扰的情况下, 如果 $\omega_i>\omega_{i+1}$, 直到第 i 缓冲库接近装满时, 则上游工作站降低生产率 ω_i, 按下游站 ω_{i+1} 生产. 反之, 如果 $\omega_i<\omega_{i+1}$, 直至第 i 缓冲库接近放空时, 则下游工作站降低生产率 ω_{i+1}, 按上游站 ω_i 生产 (这样不停车保持物料流基本平衡, 可以通过智能控制实现).

(5) 工作站故障是状态型的, 即在停车时不发生失效, 在运行时也不因负荷波动而改变故障率 λ_i 的大小.

(6) 首站不缺料 (即供料充足), 末站不阻塞 (即成品库足够大).

1.2 中间缓冲库状态分析

由于物料不是离散而是连续的, 所以不能用件数而只有用体积或重量表示产量的大小. 如第 i 工作站生产率 ω_i 的单位为每小时立方米.

定义. 第 i 缓冲库有库存的概率为剩余库存(Surplus)加上输入容量减去输出容量大于零, 而小于或等于额定 (设计) 容量的概率, 即

$$P_{\overline{O_i}}=P\{V_i\ge\omega_i t_i-\omega_{i+1}t_{i+1}+V_{is}>0\}\tag{1}$$

第 i 缓冲库有空腔的概率为剩余库存容量加上输入容量减去输出容量小于额定容量, 而大于或等于零的概率, 即

$$P_{\overline{K_i}}=P\{V_i>\omega_i t_i-\omega_{i+1}t_{i+1}+V_{is}\ge 0\}\tag{1a}$$

其中 t_i 和 t_{i+1} 分别表示第 i 和第 $i+1$ 工作站的累积运行时间; V_i 表示第 i 缓冲库的额定容量; V_{is} 表示第 i 缓冲库的剩余库存容量.

现在的问题是如何确定上列二式中的 $P_{\overline{O_i}}$ 和 $P_{\overline{K_i}}$ 的数值. 下面提出两种办法, 可以比较选用:

(1)离散化方法:文献[6]根据离散工件随机加工时间,分析了在两个可靠工作站之间的缓冲库储存状态. 本文讨论的问题是连续物料确定加工时间,即 ω_i 是恒定的连续流. 但考虑到工作站机器的失效时间和修复时间的长短仍是随机的,即是工作站随机继续加工,带来库存量随机起落,在空与满之间摆动,以至工作站产生随机阻塞和饥饿现象,只是这种失效频率比离散工件加工频率要小得相当多. 但从长时间来看,缓冲库的状态概率还是可以近似地引用文献[6]推导的结果,即

$$\left.\begin{aligned} P_{O_i}^- &= \frac{\rho_i(1-\rho_i^{K_i})}{1-\rho_i^{K_i+1}} \\ P_{K_i}^- &= \frac{1-\rho_i^{K_i}}{1-\rho_i^{K_i+1}} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

又中间库平均库存量为

$$MK_i = \frac{\rho_i - (K_i+1)\rho_i^{K_i+1} + K_i\rho_i^{K_i+2}}{1-\rho_s-\rho_i^{K_i+1}+\rho_i^{K_i+2}} \tag{3}$$

其中 $\rho_i = \dfrac{\omega_i}{\omega_{i+1}}$,为第 i 工作站每单位时间完成加工物料的离散分数(相当于离散工件的件数). 由于这里讨论的是连续物料(加工后的物料不能在机器上停留),所以 K_i 可以从零开始连续变化,不一定取整数.

现在还有一个问题就是如何选定中间缓冲库额定容量 V_i 的大小?一般工程设计是采用均匀生产线,即 $\rho_i = \dfrac{\omega_i}{\omega_{i+1}} = 1$, 于是从(2)式可得

$$P_{O_i} = P_{K_i} = \frac{K_i}{K_i+1} \tag{2a}$$

如果 $K_i >> 1$,则

$$P_{\overline{O_L}} = P_{\overline{K_i}} = 1 \tag{2b}$$

又当 $\rho_i = 1$ 时,则从(3)式,可得

$$MK_i = \frac{K_i}{2}\ (\text{容积}) \tag{3a}$$

上式表明平均库存量处于半满状态,缓冲库中储存物料是用于上游机器修理期间维持下游工件站继续生产,其空位是用于下游机器修理期间维持上游工作站继续生产. 比较合理的设计,可以平均修理时间,$MTTR_i = \dfrac{1}{\mu_i}$ 为准,于是平均缓冲库剩余容量为:

$$V_{is} = \frac{1}{\mu_i}\omega_i \tag{4}$$

平均缓冲库的额定容量为

$$V_i = \frac{\omega_i}{\mu_i} + \frac{\omega_{i+1}}{\mu_{i+1}} \tag{5}$$

在均匀生产线中,则

$$V_i = \frac{2\omega_i}{\mu_i} \qquad (i = 1,2,\cdots,n-1) \tag{5a}$$

(2) 启发式方法：生产线开车以后，第 i 缓冲库储存量的变化率为(按工作站可靠的情况)

$\dot{V}_i(t)=(\omega_i-\omega_{i+1})$，经过积分，则得

$$V_i(t)=\int_0^i(\omega_i-\omega_{i+1})dt=(\omega_i-\omega_{i+1})t+V_{is} \tag{6}$$

如 $\omega_i>\omega_{i+1}$，则当第 i 缓冲库达到全满 (V_i) 时

$$t=\frac{V_i-V_{is}}{\omega_i-\omega_{i+1}} \tag{6a}$$

于是引用假设条件(4)，在各站不发生故障的情况，则从第 $n-1$ 缓冲库起向上游逐个充满，直到所有中间库全满，各库也就不存在缺料问题，即

$$P^-_{O_1}=P^-_{O_2}=\cdots\cdots=P^-_{O_{n-1}}=1 \tag{7}$$

同理，如 $\omega_i<\omega_{i+1}$，则从第 $n-1$ 缓冲库起向上游逐个放空，直到所有中间库都接近放空时，各库也就不存在阻塞现象，即

$$P^-_{K_1}=P^-_{K_2}=\cdots=P^-_{K_{n-1}}=1 \tag{7b}$$

当然，如果修理时间超过一定界限时，使得 $\frac{1}{\mu_i}>\frac{V_{is}}{\omega_i}$，则会发生饥饿或阻塞现象.

如 $\omega_i=\omega_{i+1}$，则从公式(1)和(1a)，有 $t_i=t_{i+1}$ (同时工作)，可以直接得到(7)和(7b)

1.3 等效工作站

按照文献[6]—[8]的定义，称上游不缺料(有库存)，下游不阻塞(有空腔)的工作站为等效工作站，也就是把上下游缓冲库对所夹工作站的影响融合于一体所构成的工作站. 这对连续物料讲也是适用的.

令 P_{ai} 代表第 i 工作站完好的概率(即工作站本身的可用度)； $B_i=P^-_{O_{(i-1)}}P^-_{K_i}$ 代表第 $(i-1)$ 缓冲库有库存，同时第 i 缓冲库有空腔的概率(即前后缓冲库相对所夹工作站 i 而言的可用度).

于是第 i 等效工作站可以分解有以下五种状态概率

$$\left.\begin{array}{ll}P_{1i}=P_{\overline{O(i-1)}}P_{\overline{Ki}}\,P_{ai}=B_iP_{ai}=A'_i=E_i, & \\ \text{代表第 } i \text{ 等效工作站正常工作的概率(即第 } i \text{ 等效工作站的可用度，也是有效度)} & \\ P_{2i}=P^-_{O_{(i-1)}}P_{K_i}P_{ai}, & \text{代表阻塞停车概率}\\ P_{3i}=P_{O_{(i-1)}}P^-_{K_i}P_{ai}, & \text{代表缺料停车概率}\\ P_{4i}=P_{O_{(i-1)}}P_{K_i}P_{ai}, & \text{代表阻塞又缺料停车概率}\\ P_{5i}=P_{bi}, & \text{代表机器失效停车修理概率}\end{array}\right\} \tag{8}$$

以上五种概率的总和为全概率，即

$$\sum_{j=1}^{5}P_{ji}=[P^-_{O_{(i-1)}}P^-_{K_i}+P^-_{O_{(i-1)}}P_{K_i}+P_{O_{(i-1)}}P^-_{K_i}+P_{O_{(i-1)}}P_{K_i}]P_{ai}+P_{bi}=1 \tag{8a}$$

不难证明：上式左边方括号内的数值等于 1，于是有

$$P_{ai}+P_{bi}=1 \tag{8b}$$

根据假设条件(2)和(5),可得机器失效停车修理的马尔可夫状态转移公式为

$$\dot{P}_{bi} = \lambda_i P_{1i} - \mu_i P_{bi} \tag{9}$$

联解公式(8b)和(9),并令(9)式左边等于零,得静态解如下:

$$\left.\begin{aligned} P_{ai} &= \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i B_i} \quad \text{(机器完好的概率)} \\ P_{bi} &= \frac{\lambda_i B_i}{\mu_i + \lambda_i B_i} \quad \text{(机器失效停车修理概率)} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

从公式(8)和(10)得第 i 等效工作站平均生产率为

$$W_i = A_i'\omega_i = P_{1i}\omega = B_i P_{ai}\omega_i = \frac{\omega_i \mu_i B_i}{\mu_i + \lambda_i B_i} \text{ 米}^3/\text{小时} \tag{11}$$

第 i 工作站额定(设计)生产率为

$$\omega_i = \frac{W_i}{A_i'} = \frac{W_i(\mu_i + \lambda_i B_i)}{\mu_i B_i} \text{ 米}^3/\text{小时} \tag{11a}$$

如为可靠工作站,则令 λ_i 为零,以上各式都可用(如 $W_i = \beta_i \omega_i$)

如为孤立工作站(即缓冲库容量非常大),则以上各式仍然适用(只要令 $B_i = 1$,表明既不阻塞,又不饥饿).

1.4 等效智能制造生产线

根据物料流平衡的原理(即物料守恒定律),可知在稳态时系统生产率 W_s 和各级等效工作站生产率 W_1 都相等,即从(11)式,可得

$$W_s = W_i = E_i \omega_i = A_i'\omega_i = \frac{\omega_i \mu_i B_i}{\mu_i + \lambda_i B_i}, (i = 1,2,\cdots,n) \tag{12}$$

这样,图 1 生产线可转化成等效生产线,如图 2 所示:

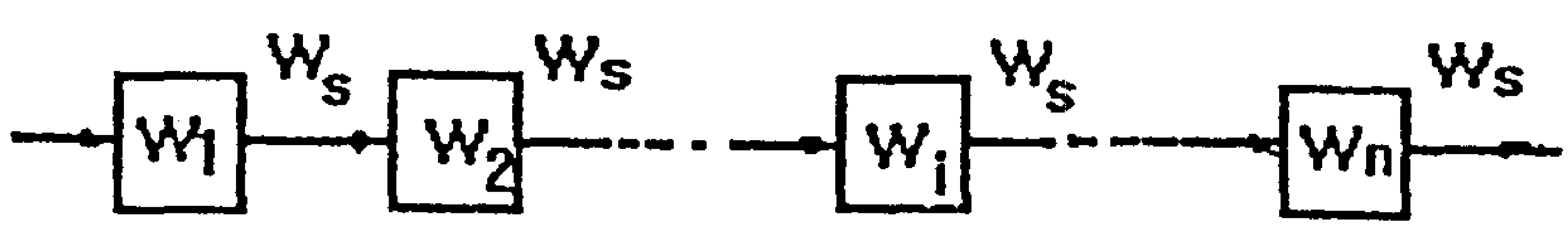

图 2 等效生产线

因为各等效工作站都已将停车状态(包括阻塞,饥饿和修理)排除在外,所以图 2 生产线在(12)式条件满足的情况下,则会连续不停地生产.

引用文献[6]—[8]系统可用度的定义,缓冲库起到将串联系统转化为并联的作用,所以有

$$A_s = \bigcup_{i=1}^{n} A_i' = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - A_i') \tag{13}$$

同时,可得系统平均有效度为

$$E_s = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{W_i}{\omega_i} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} E_i \tag{14}$$

当然,(12)式的有解是有一定条件.

现在先讨论均匀生产线的情况,也就是 $\omega_i = \omega_{i+1}$ 和 $K_i = K_{i+1}$,即 $\beta_i = \dfrac{\omega_i}{\omega_{i+1}}$ 和 $B_i = B_{i+1}$,

于是得(12)式有解的充要条件为

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i}=\frac{\lambda_{i+1}}{\mu_{i+1}} \tag{15}$$

上列条件可以通过选择机型(调整)或改进修复率来实现. 后者如配备适当修理人力及工具, 则可以调整 μ_i 的大小以满足(15)式的要求, 这样也就达到了最优设计的条件[8]. 另一种情况, 如果限于外部条件不能实现均匀生产线的设计, 比如旧厂的改造, 则

$$W_i=\frac{\omega_i\mu_i B_i}{\mu_i+\lambda_i B_i}\neq\frac{\omega_{i+1}\mu_{i+1}B_{i+1}}{\mu_{i+1}+\lambda_{i+1}B_{i+1}}=W_{i+1}$$

于是最小生产率的等效工作站起着瓶颈的作用, 所以我们只能采用下式进行生产

$$W_s=\min\{W_i\} \tag{16}$$

应用实例

例 1. 设有一输油管道由四个可修油泵站和三个中间缓冲库串联组成. 首站不缺料, 末站不阻塞. 要求系统生产率 W_s 为每小时 500 立方米. 给定的数据如下:

i	1	2	3	4	备注
λ_i	0.002	0.002	0.002	0.002	
μ_i	0.08	0.08	0.08	0.08	

求解:

(1) 各级油泵站额定(设计)生产率 ω_s

(2) 各级缓冲库的额定容量 V_i

(3) 各级平均库存量 MK_i

(4) 系统最大可用度 A_S

(5) 系统有效度 E_S

解法 1. 离散化方法(按均匀生产线设计)

平均失效修复周期时间 $T=\frac{1}{\lambda_i}+\frac{1}{\mu_i}=500+12.5=512.5$ 小时

假定离散分数 $K_i=500\quad(i=1,2,3)$

在 $\rho_i=1$ 时, $B_1=P_{K_1}^-=\frac{K_1}{K_1+1}=\frac{500}{500+1}\approx 1=B_4$ (对称)

$$B_2=P_{O_1}^-P_{K_2}^-=\left(\frac{K_1}{K_1+1}\right)\left(\frac{K_2}{K_2+2}\right)\approx 1=B_3$$

从公式(12)得

$$E_i=A_i'=\frac{\mu_i B_i}{\mu_i+\lambda_i B_i}=\frac{0.08\times 1}{0.08+0.002\times 1}=0.9756$$

$$\omega_i=\frac{W_s}{E_2}=\frac{500}{0.9756}=512.5\text{ 米}^3/\text{小时} \qquad \text{(答数 1)}$$

从(5a)式, 得各个缓冲库的额定容量为

$$V_i = \frac{2\omega_i}{\mu_i} = \frac{2\times 512.5}{0.08} = 12812.5\text{米}^2 \qquad \text{(答数 2)}$$

每 K_i 容积 $= \frac{V_i}{K_i} = 25.625$ 米^3.

从(4)式，得各库平均库存量为

$$MK_i = V_{is} = \frac{1}{\mu_i}\omega_i = \frac{512.5}{0.08} = 6406.25\text{米}^3 = \frac{K_i}{2}\ (\text{容积}) \qquad \text{(答数 3)}$$

引用(13)式,得系统可用度

$$A_s = 1-(1-0.9756)^4 = 0.9999996 \qquad \text{(答数 4)}$$

引用(14)式,得系统有效度

$$E_s = \frac{1}{4}\sum_1^4 \frac{500}{512.5} = 0.9756 \qquad \text{(答数 5)}$$

解法 2 启发式方法(按均匀生产线设计)

当 $\rho_i = \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}} = 1$，则(6)式化为

$$V_i(\infty) = V_i \qquad \text{(稳态剩余库存)}$$

上式表明在工作站无故障的情况下,而 $\omega_i = \omega_{i+1}$ 时,则中间缓冲库的库存不因系统的运转而改变,即既有库存又有空腔,于是有

$$P_{O_i}^- = P_{K_i}^- = 1 \quad \text{和} \quad B_i = 1 \quad (i = 1,2,\cdots,n)$$

将上式代入有关公式,则得与解法 1 同样的答案.

结束语

本文对具有缓冲库的连续工料智能加工可修生产线进行了研究,提出了一种简捷易行的启发式方法,较好地解决了这个难题. 同时改进以前对离散工件制造系统提出的等效工作站模型,还是可以借鉴处理本文的问题. 主要成果如下:

(1)提出离散化方法,对缓冲库容量进行离散化,则可引用离散系统的研究成果解决连续工料加工生产线问题.

(2)新提出的启发式方法. 从工料流平衡原理出发,导出 $P_{O_i}^-$ 和 $P_{K_i}^-$，同样可以得出生产线主要指标的分析解.

(3)用智能控制方法构造均匀生产线,保持生产线中工料流平衡,避免了非机器失效而产生的缺料和阻塞现象.

(4)缓冲库容量的大小不是绝对唯一的选择,只能根据生产实践经验,合理地配置(见(5a)式).

(5)推导出连续工料加工生产线设计的最优解,基本与离散生产线是一致的[8].

(6)本文提出的启发式方法,基本也可以用于解决加工时间确定的离散工件加工生产线问题.

(7)这里所提出两种方法可以直接用于具有缓冲库的连续工料加工生产线的设计问

题. 如第 3 节的应用实例所示.

参 考 文 献

1 De Koster, M.B.M,Estimation of Line Efficiency by aggregation. *International Journal of Production Research*, 25,615 — 626,1987

2. Glassey,C.R, and Y.Hong, Analysis of Behavious of an Unreliable n — Stage Transfer Line with (n-1) Inter-Stage Storage Buffers *Int. J. Prod. Res.* 31, 3, 519 — 530, 1993

3. Dallery. Y, R. David, and X.L.Xie, Approximate Analysis of Transfer Lines with Unreliable Machines and Finite Buffers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34, 9, September, 1989

4. Wijngaard, J, The Effect of Inter-Stage Buffer Storage on the Output of two Unreliable Production Units in series, with Different Production Rates. *AIIE Transaction*. II, 42 — 47,1979.

5. De Koster, M.B. M, An Improved Algorithm to Approximate the Behavious of Flow Lines. *Int. J. Prod.* Res. 26, 4, 691-700, 1988.

6. 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》.18 卷 1 期 1992 年.

7. 疏松桂 谭民. 非串行 CIMS 生产线可靠性建模、分析与综合,《自动化学报》.20 卷 6 期,641 — 649,1994 年

8. 疏松桂 计算机综合制造系统优化设计的研究. 全国控制理论与应用学术年会论文集. 1993 年 10 月于武汉