

文章编号: 1000-8152(2000)02-0255-04

可变生产率的两级串行生产线可靠性分析*

孙钰 谭民

(中国科学院自动化研究所复杂系统工程学开放实验室·北京, 100080)

F406.2

摘要: 制造系统的生产线由多个机器组合而成,可以有多种表现形式,各机器可以根据生产的实际情形改变生产率.从系统可靠性的角度出发,当机器以较低的生产率工作时可靠性较高.这样,提出一种能提高系统可靠性同时又能使各机器相互协调而提高生产线性能的策略就显得十分必要.本文讨论了可变生产率的串行生产线模型,对机器、缓冲区及生产线的运行状态进行了研究,从机理上分析了生产线的运行状况,得到了分析生产线性能指标的解析解;稳态生产率,并以稳态生产率为指标对这种生产线加以控制,从而进行优化.

关键词: 制造系统; 变生产率; 稳态有效度; 稳态生产率

文献标识码: A

串行生产线 可靠性分析

Reliability Analysis of a Transfer Line with Machines of Variable Processing Rates

SUN Yu and TAN Min

(Lab of Engineering Sciences for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences · Beijing, 100080, P. R. China)

Abstract: The production lines in a manufacturing system are composed of several machines and they can take many different forms with the various combinations of machines. In practice, the machines in a production line have variable processing rates which can be changed according to the practical operation states of the system. From the point of view of reliability, machines usually are fare more reliable when working at a relatively low production rate. Thus proposing a strategy, which can improve both the reliability and the performance of the systems becomes significant. This paper presents a transfer line model in which machines are of variable processing rates. The states of machines, the buffer and the line and the operation mechanism of the systems are studied. As a result, the steady-state production rate of the system is obtained in an analytical form based on which the optimization control scheme of the line is discussed.

Key words: manufacturing systems; variable processing rates; steady-state availability; steady-state production rate

1 引言(Introduction)

制造系统的可靠性研究对于保证系统的正常、高效运行具有重要意义,国内外很多学者已经提出了很多不同的分析方法,Buzaccott^[1]给出了近似分析方法;Gershwin^[2]提出了分解(decomposition)的分析方法,这种方法的基本思想是将一条长的生产线分解成多个两级生产线加以分析;Ancelin and Semery 提出了集结(aggregation)的分析方法,这种方法是从短的生产线入手,逐级增加形成一条长的生产线;Gershwin 在[3]一书中对生产系统的可靠性以及调度问题做了总结和探索性的工作;另外,文献[4]中提出了等效工作站的分析方法,这种方法的基本思想是将机器前面

缓冲库有库存的状态和后面缓冲库有空位的状态合并到机器中,从而构成了一个可修的等效机器,把缺料空闲停车和因阻塞而停车排除于机器维修之外;文献[5]中提出了流守恒的分析方法等等.串行生产线本身也可以有不同的运作形式,如文献[6]中对一类运行规则的串行线进行了讨论.

在实际的生产线中,各机器的生产率一般是可变的.从系统可靠性的角度出发,机器以较低的生产率工作时可靠性较高.这样,如果各机器能够根据生产线的运行情况改变自身的生产率并相互协调,这个可靠性更高且更具灵活性的生产线性能会大大改善与提高.本文提出了一种变生产率的串行生产线模型,

* 基金项目:本项目受国家攀登计划和国家自然科学基金(69975022)资助.

收稿日期:1998-08-10; 收修改稿日期:1999-03-24.

在这种变生产率的串行生产线中,前后两级机器能根据二者之间缓冲区中工件的数目来改变生产率,即当缓冲区中工件数较多时,前一级机器以低生产率工作,而后一级机器以高生产率工作,这样可以减少由缓冲区全满引起的前一级机器阻塞现象的发生,同时也提高了前一级机器的可靠度;当缓冲区中工件数较少时,前一级机器以高生产率工作,而后一级机器以低生产率工作,这样可以减少由缓冲区全空引起的后一级机器饥饿现象的发生,同时也提高了后一级机器的可靠度。

本文通过分析缓冲区及生产线的运行状态,得到了分析生产线性能指标的解析解;稳态生产率;对模型分析的有效性在文中的数值例子中得以体现。进一步,文中讨论了对阈值开关 m (含义请见下面模型定义)的控制,以稳态生产率为指标对生产线进行了优化设计,并以数值例子进行了详细说明与讨论。

2 建模 (Modeling)

可变生产率的两级串行生产线模型如图 1 所示:

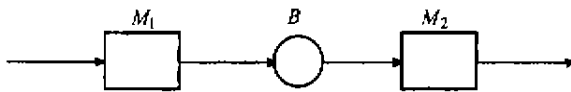


图 1 两级变生产率串行生产线

Fig. 1 Transfer line with two machines of variable processing rates

图中 M_i 表示第 i ($i = 1, 2$) 个可修机器, B 表示缓冲区, 它的容量为 K (包括 M_2 上的一个工件); 缓冲区中的实际工件数用 x 表示 ($x = 1, 2, \dots, K$); 机器 M_i 的生产率如下所示:

$$M_1 \text{ 的生产率} = \begin{cases} \omega_{11}, & x < m, \\ \omega_{12}, & x \geq m, \end{cases} \quad (\omega_{11} > \omega_{12})$$

$$M_2 \text{ 的生产率} = \begin{cases} \omega_{21}, & x \leq m, \\ \omega_{22}, & x > m. \end{cases} \quad (\omega_{21} > \omega_{22})$$

其中 m 为阈值开关, 即 $x = m$ 时系统各机器的生产率发生切换, 也就是说, 当缓冲区中工件数小于 m 时, M_1 以较大的生产率 ω_{11} 加工工件, M_2 以较小的生产率 ω_{21} 加工工件, 而当缓冲区中工件数大于 m 时, M_1 以较小的生产率 ω_{12} 加工工件, M_2 以较大

的生产率 ω_{22} 加工工件; 机器 M_i 的修理时间、失效时间分别服从各自参数的指数分布, 系统参数如表 1 所示:

表 1 系统参数表

Table 1 Parameters of the system			
机器	生产率	失效率	修复率
M_1	ω_{11}	λ_{11}	μ_{11}
	ω_{12}	λ_{12}	μ_{12}
M_2	ω_{21}	λ_{21}	μ_{21}
	ω_{22}	λ_{22}	μ_{22}

为了分析问题方便, 作以下假设:

1) 任一机器停车待命期间 (无论阻塞或饥饿) 都不会失效, 即机器 M_1, M_2 的故障类型为 ODF (Operation-Dependent Failure);

2) 生产线首级不饥饿, 即有足够多的原料; 末级机器输出无阻塞, 即有足够大的成品库;

3) 缓冲库传递工件过程无故障, 而且工件在缓冲库中的传输时间不计;

4) 同一时刻, 二个以上事件自然发生的概率为 0, 例如在一个时刻缓冲区中工件数由 i 变成 $i + 2$ 是不可能发生的; 但由于控制系统的强制切换, 可以存在如 $P_{11, 21, i-1} P_{12, 21, i}$ 之间的转移概率, 这属于控制系统的强制切换而非自然发生的事件。

3 分析 (Analysis)

首先利用疏松桂^[4]等效工作站方法, 将失效等效于机器上, 得到机器的等效生产率如下:

$$\begin{cases} \omega'_{11} = \omega_{11} \times \frac{\mu_{11}}{\mu_{11} + \lambda_{11}}, & \omega'_{12} = \omega_{12} \times \frac{\mu_{12}}{\mu_{12} + \lambda_{12}}; \\ \omega'_{21} = \omega_{21} \times \frac{\mu_{21}}{\mu_{21} + \lambda_{21}}, & \omega'_{22} = \omega_{22} \times \frac{\mu_{22}}{\mu_{22} + \lambda_{22}}; \end{cases} \quad (1)$$

这样, 系统中各机器以各自的等效生产率工作。

3.1 缓冲区状态分析 (Analysis of states of the buffer)

生产线中缓冲区状态是分析生产线的关键, 根据各机器生产率服从指数分布的假设, 可以对缓冲区行为进行很好的描述。缓冲区的状态包括 0 个工件、1 个工件、2 个工件... K 个工件, 共 $K + 1$ 个状态, 缓冲区状态转移图如图 2 所示:

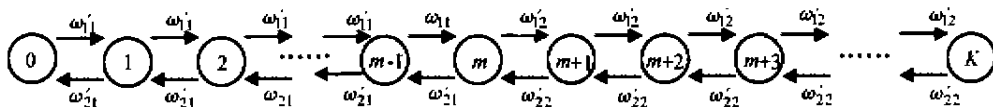


图 2 缓冲区状态转移图

Fig. 2 Transition diagram of states of the buffer

列写缓冲区状态方程:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\omega_{11}'P_0 + \omega_{21}'P_1, \\ \frac{dP_1}{dt} = \omega_{11}'P_0 + \omega_{21}'P_2 - (\omega_{11}' + \omega_{21}')P_1, \\ \vdots \\ \frac{dP_{m-1}}{dt} = \omega_{11}'P_{m-2} + \omega_{21}'P_m - (\omega_{11}' + \omega_{21}')P_{m-1}, \\ \frac{dP_m}{dt} = \omega_{11}'P_{m-1} + \omega_{22}'P_{m+1} - (\omega_{12}' + \omega_{21}')P_m, \\ \frac{dP_{m+1}}{dt} = \omega_{12}'P_m + \omega_{22}'P_{m+2} - (\omega_{12}' + \omega_{22}')P_{m+1}, \\ \frac{dP_{m+2}}{dt} = \omega_{12}'P_{m+1} + \omega_{22}'P_{m+3} - (\omega_{12}' + \omega_{22}')P_{m+2}, \\ \vdots \\ \frac{dP_k}{dt} = \omega_{12}'P_{k-1} - \omega_{22}'P_k, \\ \sum_{j=0}^k P_j = 1. \end{cases} \quad (2)$$

当系统达稳态时,令状态方程左边的导数项 $\frac{dP_i}{dt} = 0$ ($i = 0, 1, 2, \dots, K$), 可以推导出:

$$P_0 = \frac{\rho_f^{K-m}(1-\rho_f)(1-\rho_r)}{\rho_f^{K-m}(1-\rho_f^{m+1})(1-\rho_r) + \rho_f^m(1-\rho_f)(1-\rho_r^{K-m})}$$

其中

$$\rho_f = \frac{\omega_{11}'}{\omega_{21}'}, \quad \rho_r = \frac{\omega_{22}'}{\omega_{12}'}, \quad (3)$$

那么

$$P_i = \rho_f^i P_0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$P_j = \frac{\rho_r^{j-m}}{\rho_f^{j-m}} P_0, \quad j = m+1, \dots, K,$$

这样,缓冲区处于各状态的稳态概率得解.

3.2 生产线性能分析 (Performance analysis of the line)

对于生产线的分析,人们比较关心的性能指标是稳态有效度和稳态生产率,下面给出稳态有效度和稳态生产率相关的定义以及对文中模型稳态生产率的解析表达式.

1) 机器 M_i 的稳态有效度.

在制造系统中,机器 M_i 的稳态有效度 E_i 是指在时间间隔 t 内,机器 M_i 加工工件的概率,即在时间间隔 t 内,机器 M_i 正在工作,既不阻塞也不饥饿的概率,用式子表示为:

$$E_i = \text{prob}(\alpha_i = 1, n_{i-1} > 0, n_i < K_i),$$

其中 α_i 表示机器 M_i 的状态, $\alpha_i = 1$ 表示机器 M_i 正常工作, $\alpha_i = 0$ 表示机器 M_i 已失效在修理; n_i ($i = 1, 2, \dots$) 表示缓冲库 B_i 中工件个数.

2) 机器 M_i 的稳态生产率.

$$\omega_{M_i} = \omega_i E_i = \omega_i \text{prob}(\alpha_i = 1, n_{i-1} > 0, n_i < K_i),$$

其中 ω_i 表示机器 M_i 的生产率.

3) 生产线的稳态生产率.

生产线的稳态生产率,指当系统处于稳态时,单位时间内机器输出工件(不含返工)的平均个数.对于可变生产率串行生产线.

4) 机器 M_1 的稳态生产率.

$$\omega_{M_1} = \omega_{11}'[1 - \sum_{i=m}^k P_i] + \omega_{12}'[1 - \sum_{i=0}^{m-1} P_i - P_k], \quad (4)$$

5) 机器 M_2 的稳态生产率.

$$\omega_{M_2} = \omega_{21}'[1 - \sum_{i=m+1}^k P_i - P_0] + \omega_{22}'[1 - \sum_{i=0}^m P_i], \quad (5)$$

6) 生产线稳态生产率 ω_{MS} .

$\omega_{MS} = \omega_{M_2}$, 若生产线中各机器都不存在生产率的改变,则由文献[5]流守恒分析有: $\omega_{MS} = \omega_{M_1} = \omega_{M_2}$; 但在各机器生产率发生改变的生产线中,当 $x = m$ 时,控制系统的强制切换破坏了“流守恒”,故 ω_{M_1} 不再等于 ω_{M_2} .

3.3 计算示例 (Numerical example)

设有图1所示的生产线,缓冲区 B 的容量 $K = 8$, 两个机器的生产率、失效率、修复率在表2中列出:

表2 算例参数表

Table 2 Parameters of the illustrative system			
机器	生产率	失效率	修复率
M_1	$\omega_{11} = 4$	$\lambda_{11} = 0.003$	$\mu_{11} = 0.01$
	$\omega_{12} = 1$	$\lambda_{12} = 0.002$	$\mu_{12} = 0.01$
M_2	$\omega_{21} = 1$	$\lambda_{21} = 0.002$	$\mu_{21} = 0.03$
	$\omega_{22} = 4$	$\lambda_{22} = 0.003$	$\mu_{22} = 0.02$

注:从系统可靠性角度可知,机器高速运行时具有较高的故障概率,故 $\lambda_{11} > \lambda_{12}, \lambda_{21} < \lambda_{22}$.

生产线的阈值开关 $m = 2$, 试对生产线加以分析. 首先根据(1)得到机器的等效生产率:

$$\omega_{11}' = 3.077, \quad \omega_{12}' = 0.833,$$

$$\omega_{21}' = 0.938, \quad \omega_{22}' = 3.478.$$

利用上面提出的缓冲区分析方法,根据(2)有:

$$P_0 = 0.054, \quad P_1 = 0.178, \quad P_2 = 0.584,$$

$$P_3 = 0.140, \quad P_4 = 0.034, \quad P_5 = 0.008,$$

$$P_6 = 0.002, \quad P_7 = 0.0005, \quad P_8 = 0.0001.$$

再根据(5),可得生产线稳态生产率:

$$\omega_{MS} = \omega_{M_2} = 1.354.$$

本文的解析解分析方法在缓冲区容量增大时,简单易行的优势会逐渐显示出来,而用列写系统全状态方程的方法加以分析就很不方便.

4 优化(Optimization)

机器生产率可变会给生产线带来更大的灵活性,但如何使各机器相互协调,以使生产线性能得到最大的改善与提高,关键取决于阈值开关 m 的设定.此处的优化是指在给定系统各参数后(包括 K),对阈值开关 m 加以控制,以稳态生产率为指标,对生产线进行优化设计,使 ω_{MS} 达到最大,使这种可变生产率的生产线模型发挥最大的作用.我们运用文中缓冲区分析法得出的解析表达式,便于编制程序,可以利用各种优化算法从中择优,使生产线的设计得到优化.

下面以一个数值例子加以说明.仍以 3.3 中的示例作为例子,系统参数仍如表 2 所示,则生产线的稳态生产率 ω_{MS} 随阈值开关 m 的变化如图 3 所示.

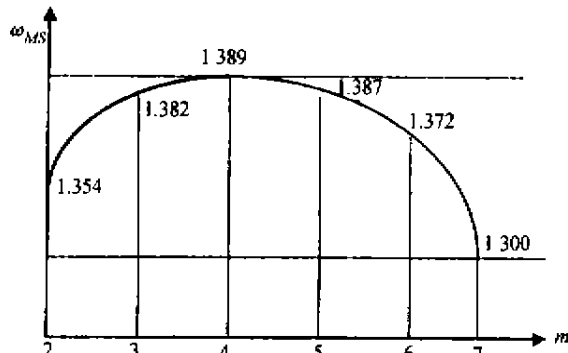


图3 生产线的稳态生产率 ω_{MS} 随阈值开关 m 的变化

Fig. 3 Variation of the steady-state production rate ω_{MS} along with m

故生产线的阈值开关 m 应确定为 4, 这时生产线的稳态生产率 ω_{MS} 最大, 系统性能最优.

5 结束语(Conclusion)

本文对可变生产率串行生产线进行了讨论和分析, 得到了生产线性能指标的解析解. 通过对阈值开关 m 的设定, 协调改变各机器的生产率, 使生产线更具有灵活性. 这种模型和分析的结果可用于生产线的优化设计, 以提高系统可靠性并改善生产线的性能.

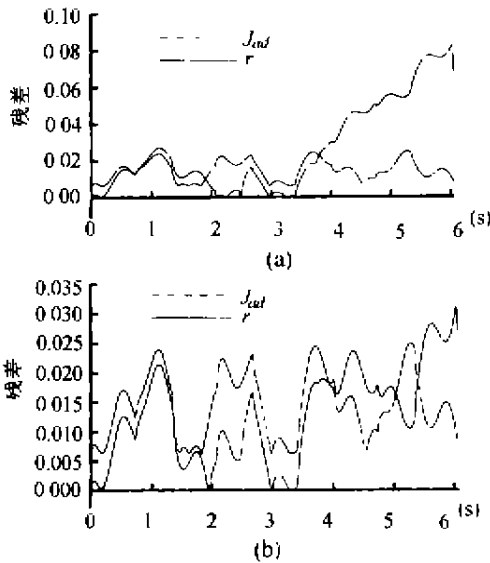
参考文献(References)

- [1] Buzzcott J A. The effect of station breakdown and random processing times on the capacity of flow line with in-process storage [J]. AIIE Transactions, 1972, 4(4): 308 - 312
- [2] Gershwint S B. An efficient decomposition method for the approximate evaluation of tandem queues with finite storage space and blocking [J]. Oper. Res., 1987, 35(2): 291 - 305
- [3] Stanly B. Gershwint, MIT, Manufacturing Systems Engineering [M]. PTR Prentice Hall, 1994
- [4] 疏松桂. 带有缓冲库的 CIMS 分析及其可靠性研究 [J]. 自动化学报, 1992, 18(1): 15 - 22
- [5] 谭民. 允许机器失效的串行生产线流守恒分析方法 [J]. 自动化学报, 1998, 24(1): 24 - 29
- [6] 谭民, 疏松桂, 张立龙. 考虑一类运行规则的两级生产线的可靠性分析 [J]. 自动化学报, 1995, 21(6): 721 - 724

本文作者简介

孙 钰 1974 年生, 1996 年毕业于大连理工大学自动化系, 1996 年~1999 年于北京中国科学院自动化研究所复杂系统工程学开放实验室攻读硕士学位. 研究兴趣为随机网络分析和微机器人控制与应用.

谭 民 见本刊 2000 年第 2 期第 239 页.

图4 角位移传感器故障 f_{θ} 下的残差Fig. 4 The detection residuals in case of the angular-displacement sensor fault f_{θ} .

从图3和图4看出,除了对极小幅值故障图3(b),4(b)没有检测出来或延迟检测出来外,故障检测系统能快速、有效和可靠地检测出突变性和缓变故障.总之,检测结果表明:基于舵机简化模型观测器的故障检测方法是有效故障检测方法,能检测出故障的大小和形状等特征.采用自适应阈值,可在一定程度上实现鲁棒故障检测,可快速地检测出比较小的故障,不但能检测出突变故障,也能检测出缓变故障发生.但由于观测器残差信号受控制信号周期特征、模型降阶误差、负载干扰、流量压力干扰等影响,在故障检测过程中,还存在极小故障难以检测出或有漏报和延迟,因此还须寻求更有效的检测方法.

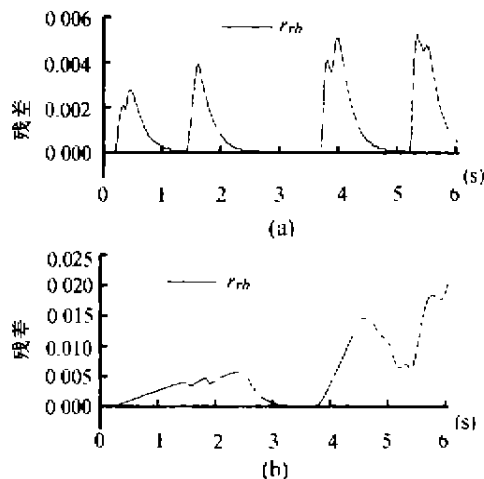


图5 干扰补偿下,突变和缓变故障下的残差

Fig. 5 After using disturbance compensation, the detection residuals in case of the abrupt and drift faults

6.5 干扰补偿下的故障检测结果 (Simulation results using both disturbance compensation and adaptive threshold)

在同样的仿真条件下,采用干扰补偿方法,对图3(b),图4(b)所示情况进行再检测,结果如图5所示.

从图5看出,采用干扰补偿方法,即使不采用自适应阈值,检测系统也能更快速、有效地检测出极小幅值和缓变故障,特别是能检测出多故障及故障的形状特征,为实现故障的诊断和分离提供可靠的条件.因此,在干扰信号可测量的情况下,采用干扰补偿方法的检测方法是一有效方法.

7 结论 (Conclusion)

仿真结果表明:基于舵机简化模型观测器和自适应阈值的故障检测方法是有效的.该检测方法,不仅能检测出小幅值突变、缓变故障,而且能检测出多故障.采用干扰补偿方法,可更有效快速的检测出极小幅值故障,特别是可检测出故障的形状特征,为故障的诊断和容错提供有效途径.

参考文献 (References)

- [1] Watton J. Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Fluid Power Systems[M]. Wales Cadif, 1992
- [2] Chow E Y and Willsky A S. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1984, 29(7):603-614
- [3] Frank P M. Enhancement of robustness in observer-based fault detection[J]. International Journal Control, 1995, 59(4):955-981
- [4] Chen J, Patton R J and Zhang H Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters[J]. International Journal Control, 1996, 63(1):85-105
- [5] Emami-Naeini A, Akhter M M and Rock S M. Effect of model uncertainty on failure detection—the threshold selector[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(12):1106-1115

本文作者简介

董选明 1963年生,现为中国科学院自动化所复杂系统开放实验室博士后.目前研究方向:可重构容错控制,鲁棒故障诊断,FDIA等.

谭民 1962年生,现为研究员,博士生导师,中国科学院自动化研究所复杂系统工程开放实验室主任.研究兴趣为故障诊断与可靠性、复杂系统控制理论及应用,制造系统以及先进机器人控制等.

袁丽华 1935年生,现为北京航空航天大学自动控制系教授,博士生导师.研究方向:状态监测与故障诊断,优化设计,流体传动及控制等.

王占林 1935年生,现为北京航空航天大学自动控制系教授,博士生导师.研究方向:自动控制,流体传动及控制等.