

设备故障条件下流水线产能评估方法研究

张岳君¹, 方志梅¹, 陆阳冰²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 上海集装箱码头实业有限公司, 上海 200940)

摘要: 为提升流水线产能评估的有效性, 采用基于设备运作的故障发生机制生成故障节点, 并按照可用度最大化原则确立预防性维护周期, 采用抽样仿真方法评估流水线系统的产能, 同时提出一种基于故障期望次数的近似方法以提升产能的评估效率. 仿真实验表明, 流水线产出率与系统配置密切相关, 设备数量越少, 缓存空间越大, 对应的产出率就越高, 但设备数量与缓存空间的边际影响逐渐下降; 而近似方法获得的产出率估值与仿真值之间的偏差可基本控制在 5% 以内, 评估准确性具有一定优势.

关键词: 流水线; 预防性维护; 故障; 缓存; 仿真

中图分类号: TH181

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 04-0001-05

流水线系统在制造行业的应用非常广泛, 此类系统主要由多台串行布置的生产设备与前后阶段之间的缓存空间组成(图 1), 并可在此基础上进一步衍生出形式多样的结构配置^[1]. 在流水线系统的运作过程中, 设备受到上游供应、下游输出及设备自身状态的影响而间断性地进行生产. 由于系统中包含一定数量的在制品及其缓存空间, 当中间某台设备发生停机后也能在一定程度上保证系统中其他设备的正常生产和输出, 有利于提升系统的生产能力.

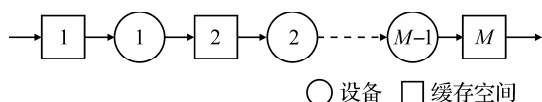


图 1 包含缓存空间的流水线系统

设备故障是影响制造系统性能的重要不确定因素之一, 当设备故障与流水线的系统配置、生产环境及运作机制交互后, 对应研究热点包括流水线系统的设备维护策略^[2]、在制品水平控制^[3]、缓存空间分配问题^[4]、作业调度与维护的集成优化^[5]等. 其中产能评估是历来研究的重要内容^[6]. 后续也有 Alferi 等^[7]尝试通过数学规划方法来评估流水线产能, Abdul-Kader^[8]在多产品批量背景下采用规

划方法建模流水线运作, Sarvar^[9]采用仿真方法评估测试设备维护对流水线性能的影响. 然而涉及可靠性工程领域常见的预防性维护策略却研究较少, 降低了其在现实环境中的适用性. 针对这一不足, 本文在文献[9]基础上对设备故障条件下流水线产能评估方法展开研究, 采用基于设备运作的故障发生机制来生成故障节点, 并按照可用度最大化原则确立预防性维护周期, 恢复不断下降的设备状态. 同时, 通过系统的抽样仿真评估流水线产能, 分析其有效性以及对系统配置的影响, 并进一步提出和测试一种基于故障期望次数的近似方法, 以提升产能的评估效率.

1 流水线的产能评估方法

在产能评估研究中, 通常将故障发生机制分为基于设备运作和基于时间间隔两类^[1]. 由于前者在工业环境中的发生情景更为广泛, 因此采用该类机制来建模设备劣化.

1.1 故障类型与预防性维护策略

假设某条流水线系统由 M 台串行设备组成, 不同阶段的设备 m 相互独立, 连续设备之间包含一定的缓存空间 B_m . 设备的故障发生节点服从威

布尔分布 $t \sim W[\beta_m, \eta_m]$, 其中, t 指设备的实际运行时间, $\beta_m > 1$, 在发生故障后可采取小修策略使设备修复如旧.

由于发生故障后仅采取事后小修措施, 设备劣化程度与故障频率将随生产的推进而不断加剧, 导致设备可用度和生产效率逐渐下降, 因此常通过预防性维护来改进设备状态. 周期性的维护策略在生产领域较为常见^[9], 维护周期 T_m 可通过最大化单台设备可用度方法确定, 可用度表达式为:

$$A_m = \frac{t}{t + t_{m,pm} + H(t)_m t_{m,mr}}, \quad (1)$$

式中, $t_{m,pm}$ 为预防性维护的单位时间; $t_{m,mr}$ 为小修的单位时间; $H(t)_m$ 为维护周期内故障的期望次数, 由故障分布类型 $f(t)_m$ 计算获得. 威布尔分布条件下, 可根据(1)式推导最优维护周期:

$$T_m = \eta_m \left[\frac{t_{m,pm}}{t_{m,mr}(\beta_m - 1)} \right]^{1/\beta_m}. \quad (2)$$

为了与基于设备运作的故障发生机制相对应, 需对原先固定周期的维护策略进行适当调整, 即当设定的累积运行时间 t 达到 T_m 时才执行预防性维护, 此时维护周期将根据故障发生情景柔性变动, 但维护周期内的设备运行时间和产品生产数量保持不变. 假定在制品在设备上的单位加工时间为 a_m , 维护周期内的生产量为 $\theta_m = \lceil T_m / a_m \rceil$, 而设备的初始役龄为 $\tau_m^0 (< T_m)$, 此时可用 0~1 变量 u_{jm} 表示在制品 j 生产之前是否进行维护:

$$u_{jm} = \begin{cases} 1, j = i\theta_m - \lceil \tau_m^0 / a_m \rceil, \\ 0, \text{其他}. \end{cases} \quad (3)$$

役龄 z_{jm} 指设备在当前维护周期内的实际运作时间, 是评估设备劣化进程和故障抽样的基础. 确立预防性维护节点以后, 可进一步计算完成在制品 j 后的设备役龄:

$$z_{jm} = (1 - u_{jm})z_{j-1,m} + a_m. \quad (4)$$

1.2 流水线的运作机制

流水线运作过程中, 在制品依次经过每台设备进行加工及相应的缓存空间, 直至完成最后一道工序离开系统, 系统的第一台设备不会因物料短缺而发生饥饿, 最后一台设备完成在制品加工后可立即取走而不发生阻塞. 预防性维护节点按照(3)式的计算方法事先确定, 当 $u_{jm} = 1$ 时, 设备将在完成上个在制品生产后立即实施维护活动, 而

在生产环节发生故障时, 可在设备修复后继续原先的生产进程. 设第 j 个在制品在设备 m 上的加工开始时间为 p_{jm} , 则 p_{jm} 取决于上游设备中 j 的完工时间 $q_{j,m-1}$ 、当前设备中 $j-1$ 的完工时间 $q_{j-1,m}$ 以及当前设备的预防性维护节点:

$$p_{jm} = \max \{q_{j,m-1}, q_{j-1,m} + u_{jm}t_{m,pm}\}. \quad (5)$$

如果 $q_{j,m-1} > q_{j-1,m} + u_{jm}t_{m,pm}$, 将引起设备 m 的饥饿问题, 反之, 若 $q_{j,m-1} < q_{j-1,m} + u_{jm}t_{m,pm}$, 则上游完工在制品将在缓存空间 B_{m-1} 或设备 $m-1$ 上等待.

如果设备 m 的下游缓存空间 B_m 未发生阻塞, 那么在制品 j 可在加工完成后立即离开该设备, 其离开时间 q_{jm} 将取决于开始加工时间及潜在的故障; 若下游缓存空间饱和, 那么只有当设备 $m+1$ 的在制品 $j - B_m - 1$ 离开和确认的预防性维护以后, j 才能离开设备 m , 其离开时间为:

$$q_{jm} = \max \{p_{jm} + a_m + v_{jm}t_m^{mr}, q_{j-B_m-1,m+1} + u_{j-B_m,m+1}t_{m+1,pm}\}, \quad (6)$$

其中, v_{jm} 为 0~1 变量, 表示在制品生产期间是否发生故障, 由设备故障的抽样决定. 最后, 可根据(5)~(6)式递推关系构建起整个流水线的运作机制.

产出率是衡量制造系统产能的关键指标之一, 本文研究的流水线属于非马尔科夫形式, 表示其如果不进行预防性维护, 则系统性能将不断下降, 也就是说系统状态将呈趋势性变化. 并受到预防性维护决策结果的影响, 因此这里将其定义为最后一台设备在单位时间内的产出量, 进而可根据流水线完成一定量产品 x 所需时间来计算系统的产出率:

$$R_{TH} = \frac{1}{q_{xM} / x} = \frac{x}{q_{xM}}. \quad (7)$$

1.3 产能评估的近似方法

抽样仿真是评估不确定环境下系统产能的常用方法之一, 但是仿真过程通常较为耗时, 因此提出一种基于故障期望次数的近似方法来提升产能评估效率. 该近似方法主要根据已确立的预防性维护计划与当前生产进程来计算设备的故障期望次数, 当此期望次数累积为 1 时, 在对应节点处插入故障节点. 故障节点的具体确定方法如下:

Step1 计算 j 生产期间故障的累积期望次数,

$$\pi_{jm} = \pi_{j-1,m} + H(z_{jm})_m - (1 - u_{jm})H(z_{j-1,m})_m.$$

Step2 如果 $\pi_{jm} \geq 1$, 设置 $v_{jm} = 1$, $\pi_{jm} = 0$, 否

则 $v_{jm} = 0$.

Step3 如果未完成生产, $j = j + 1$, 返回 Step1; 否则结束故障节点生成.

在确立设备的故障节点后, 可按照前文的递推关系式计算获得产品生产时间与系统的产出率估值. 注意上述方法不是根据故障的期望次数表达式 $H(t)_m = 1$ 来直接推导故障的节点, 这是因为 2 个连续故障节点之间可能包含一次或多次预防性维护, 而不一定属于同一维护周期(图 2), 只能根据设备役龄依次计算故障的期望次数.

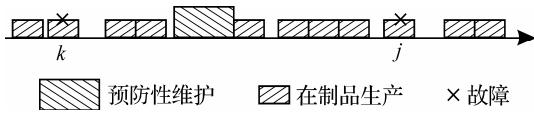


图2 故障节点确定方法示意图

设备可用度 A_m 是衡量其性能的重要指标之一, 单设备条件下可建立起可用度与产出率之间的关系 $R_{TH,m} = A_m / a_m$. 对于流水线系统而言, 单设备(如瓶颈部位)的产出率 $R_{TH,m}$ 将是系统产出率的上限, 但由于其缺乏系统整体的配置与运作机制, 无法充分表征系统的性能, 因此下文将分析基于可用度来评估系统产能的不足.

2 仿真实验与分析

2.1 参数设置

仿真过程中各阶段设备的在制品加工时间为 $a_m = 1$, 产品生产数量为 $x = 10\,000$, 即为终止型仿真测试, 给定参数组合条件下系统将随机抽样 1 000 次, 这里设置的产品生产数量和抽样次数超过文献[9]中设定值, 有助于提升输出结果稳定性.

仿真实验的目的是为了确认仿真结果的有效性, 并分析流水线配置对产能敏感度的影响, 系统配置包括设备数量和缓存空间两个方面. 为确保仿真结果的可比性, 这里设置系统中不同阶段设备的性能、缓存空间大小及维护时间等均保持一致, $M \in \{3, 5, 7, 10\}$, $B_m \in \{0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 50\}$, $\beta_m = 2$, $\eta_m = 500$, $t_{m,pm} = 40$, $t_{m,mr} = 20$. 上述参数设置过程中, 设备数量主要在单台设备基础上等距递增(除 $M=10$), 而缓存空间的增长对产能的影响通常呈边际递减趋势, 因此逐步扩大此参数间的差距以便更好地观察产能的变化趋势. 另外, 在仿真有效性分析中, 测试中设备的初始役龄设置为 $\tau_m^0 =$

500, 而在验证近似方法的有效性时, 对应的初始役龄 τ_m^0 将随机生成.

由于本文研究的流水线系统包含设定的预防性维护策略, 无法通过一些商用软件直接进行仿真, 因此, 根据前文构建的系统运作机制, 用 C# 语言编制仿真程序完成产能评估. 在 CPU 2.90 GHz RAM 16 GB 配置的计算机上, 仿真时间根据设备数量的差异从 2.7 s 到 80.6 s 不等, 缓存空间对运行时间的影响不大, 而近似方法在确立故障节点后, 只需运行系统运作 1 次即可, 运作时间约为仿真过程的 1/1 000, 评估所需时间更短.

2.2 仿真的有效性分析

图 3 为 2 次抽样测试结果, 表明系统的产出率均值在仿真过程中将逐步达到稳定状态. 表 1 统计了给定初始状态条件下, 不同系统配置对应的产出率均值、变异系数及误差, 后 2 个指标体现了产出率的方差水平. 变异系数(Coefficient of variance, CV)是标准差与均值的比值, 用来衡量仿真结果的变动程度, 表 1 中产出率变异系数在 0.72~1.82% 之间, 表明随机故障对系统运作的扰动影响较为平稳. 在显著水平 $\alpha=0.05$ 条件下, 按照产出率服从正态分布的特点, 抽样误差均能控制在 $\varepsilon \leq 0.1\%$, 表明经过 1 000 次抽样仿真后得到的产出率估值较为精确. 在给定设备数量条件下, 变异系数、误差水平均随缓存空间的增加而逐渐下降, 表明缓存空间有利于提升系统的稳定性、降低故障的干扰.

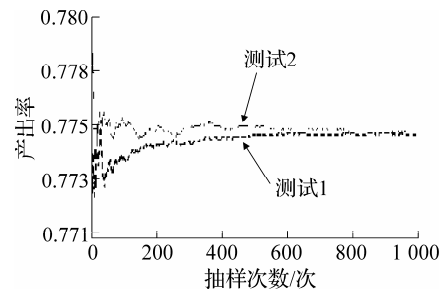


图3 产出率均值的收敛过程($M=10, B_m=10$)

2.3 系统配置的影响分析

由表 1 可以观察到系统产能与设备数量、缓存空间密切相关, 并呈趋势性变化, 设备越少、缓存空间越大, 产出率就越高, 反之则越低. 图 4 对表 1 中产出率变化趋势做了更加有效的比较, 不同设备数量条件下, 缓冲空间对系统效率的改进效果呈边际递减趋势. 这是因为缓存空间主要从产品流

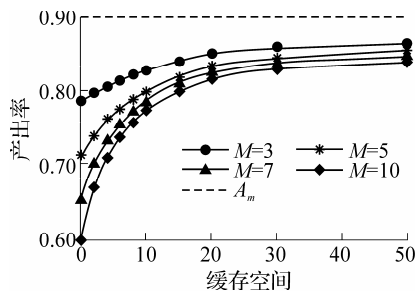


图4 不同缓存空间条件下系统产出率

通的角度避免由于上下游在制品输入/输出不及时导致的停机,但缓存空间不能提高设备生产效率,且其改进效果极限.在给定缓存空间条件下,设备数量增加对产出率的影响也呈现边际递减趋势,如设备从1台($R_{TH} = A_m$)增加至3台比从3台增加至5台所引起的产出率降幅更明显,这是因为尽管新增设备会扩大系统的不确定性,降低其性能,但

会增强故障/维护活动的同步性,一定程度上降低了新增设备的负面影响.

2.4 近似方法的有效性测试

这里进一步测试近似方法的产出率估值与仿真值之间的偏差.按照可用度最大化准则可计算获得最优维护周期约707个单位时间,在 $[0,707]$ 之间随机生成初始役龄 τ_m^0 ,不同系统配置的偏差水平将分别测试20次.表2统计与偏差相关的指标,除个别情形以外,两者偏差均值可基本控制在5%以内,在评估精度上具有一定优势.而近似方法的产出率整体上要高于仿真值,这是因为前者故障节点分布较为规律和均衡,增强了故障/维护活动的协同性,降低了故障不确定性对系统运作的影响,同时近似方法也未考虑故障节点确立过程中的截余因素影响,这些对提升系统的产出率估值

表1 产出率均值、变异系数与误差($\alpha=0.05$)统计

B_m	$M=3$			$M=5$			$M=10$			$M=15$		
	R_{TH}	CV/%	ε /%	R_{TH}	CV/%	ε /%	R_{TH}	CV/%	ε /%	R_{TH}	CV/%	ε /%
0	0.787 2	1.52	0.09	0.714 0	1.68	0.10	0.602 5	1.66	0.10	0.546 4	1.46	0.09
2	0.797 2	1.38	0.09	0.741 0	1.48	0.09	0.671 6	1.34	0.08	0.641 3	1.09	0.07
4	0.806 0	1.36	0.08	0.761 7	1.31	0.08	0.711 6	1.12	0.07	0.691 5	1.01	0.06
6	0.814 1	1.23	0.08	0.778 5	1.16	0.07	0.740 1	1.08	0.07	0.723 7	0.97	0.06
8	0.821 1	1.22	0.08	0.791 2	1.14	0.07	0.759 4	1.05	0.07	0.745 1	0.94	0.06
10	0.827 5	1.21	0.07	0.802 0	1.00	0.06	0.774 9	0.90	0.06	0.762 1	0.92	0.06
15	0.839 3	1.07	0.07	0.820 7	0.97	0.06	0.799 9	0.88	0.05	0.789 2	0.76	0.05
20	0.848 9	1.06	0.07	0.834 2	0.84	0.05	0.816 4	0.86	0.05	0.806 5	0.74	0.05
30	0.856 1	0.93	0.06	0.844 5	0.83	0.05	0.829 3	0.72	0.04	0.819 1	0.73	0.05
50	0.863 9	0.93	0.06	0.854 6	0.82	0.05	0.839 1	0.72	0.04	0.827 5	0.73	0.04

表2 近似方法产出率的偏差统计

B_m	$M=3$			$M=5$			$M=10$			$M=15$			%
	最大	最小	均值	最大	最小	均值	最大	最小	均值	最大	最小	均值	
0	7.95	3.33	4.61	10.43	3.93	6.56	11.52	4.78	8.24	11.73	1.52	6.89	
2	7.22	2.75	4.35	8.98	3.41	5.54	9.14	-0.30	4.54	6.49	-3.08	3.16	
4	6.66	2.37	4.12	8.36	1.96	4.35	8.22	-3.52	3.33	7.95	-4.33	2.60	
6	6.25	2.13	4.03	6.75	1.99	3.81	7.01	-4.26	2.74	7.80	-4.13	2.65	
8	5.99	2.03	3.82	5.69	1.88	3.65	5.68	-4.86	2.87	7.50	-2.44	3.06	
10	5.79	2.04	3.78	6.94	1.55	3.81	7.17	-2.28	2.95	7.41	-0.34	3.34	
15	5.53	1.79	3.62	6.09	0.74	3.73	7.87	-3.27	3.07	8.06	0.83	4.01	
20	6.07	1.45	3.61	7.55	0.50	4.09	8.99	-3.52	3.57	7.30	0.11	4.40	
30	5.79	0.95	3.16	6.38	-0.16	3.51	7.97	-0.27	3.48	7.59	0.71	4.34	
50	5.24	1.27	3.39	6.06	1.74	3.93	6.13	2.57	4.00	7.02	2.56	4.54	

均会产生一定影响。

3 结语

根据流水线系统的实际运作情形,采用常见的基于设备运作的故障发生机制,实现了预防性维护策略与生产环境的有效结合。仿真实验表明,系统产出率与系统配置密切相关,设备数量越少,缓存空间越大,对应产出率就越高,反之就越低。为提升产出率评估的效率,进一步提出了一种基于故障期望次数的近似计算方法,数值实验表明,近似方法的产出率估值与仿真值的偏差可基本控制在5%以内,在评估准确性方面具有优势。

本文重点研究分析了流水线产能的影响因素与近似计算方法的有效性,但未对系统中相关要素的配置与维护活动进行优化。流水线条件下设备的预防性维护与缓存空间是影响系统性能的重要因素,而产能评估将是两者优化决策的基础,因此基于产能评估的维护决策与缓存空间分配是下一步的研究方向,而结合本文的近似方法则有助于提升问题的优化效率。

参考文献:

- [1] LI J, MEERKOV S M. Production Systems Engineering [M]. New York: Springer Presses, 2009:62-68.
- [2] 周晓军, 沈炜冰, 奚立峰, 等. 一种考虑修复非新的多设备串行系统机会维护动态决策模型[J]. 上海交通大学学报. 2007, 41(5):769-773.
- [3] GAN S, ZHANG Z, ZHOU Y, et al. Intermediate buffer analysis for a production system[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(20/21):8785-8795.
- [4] LI L, QIAN Y, YANG Y M, et al. A fast algorithm for buffer allocation problem[J]. International Journal of Production Research, 2015, 54(11):3243-3255.
- [5] 周炳海, 蒋舒宇, 王世进, 等. 集成生产与预防性维护的流水线车间调度算法[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(3):32-35.
- [6] LI J S, MEERKOV S M, ZHANG L, et al. Production systems engineering: Problems, solutions, and applications[C]. Proceeding of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Moscow, Russia, 2009.
- [7] ALFERI A, MATTA A. Mathematical programming formulations for approximate simulation of multistage production systems[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 219(3):773-783.
- [8] ABDUL-KADER W. Capacity improvement of an unreliable production line: An analytical approach[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(6):1695-1712.
- [9] SARVAR M. Modeling of multi-stage production lines with maintenance operations[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2008, 21(4):396-406.

Production line throughput evaluation method with machine failures

ZHANG Yue-jun¹, FANG Zhi-mei¹, LU Yang-bing²

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Shanghai Container Terminal Industry Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

Abstract: In order to improve the effectiveness of capacity evaluation for the production line, the operation-dependent failure is adopted to model the failure distribution, and the preventive maintenance is implemented to restore machine state during the production process. Simulation approach is used to evaluate the throughput, and an approximate method based on the expected failure number is also proposed to improve the evaluation efficiency. The numerical experiment shows that the throughput is closely related to the system configuration. The less machine number and the larger buffer size, the higher throughput, but the marginal impact decreases. The test also indicates that at different initial age, the average deviation between the approximate method and the simulation is less than 5% in most cases, which suggests the acceptable accuracy.

Key words: production line; preventive maintenance; failure; buffer; simulation

(责任编辑 章践立)