

故障条件下串并联生产系统的建模与仿真方法研究

胡 涛, 张岳君*, 方志梅, 林文文

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了解决当前生产系统产能评估方法中存在的不适用现象, 以串并联生产系统为对象, 提出一种基于设备状态更替的建模与仿真方法来计算故障条件下的系统产能. 系统建模将生产过程中的设备分为生产、等待、闲置和预防性维护4种状态, 通过不同状态的更替与在制品的变动构建起整个系统的运作. 数值实验表明, 在流水线条件下本文所提出的仿真方法与基于下一事件的仿真方法在计算结果上保持一致, 但是运算效率偏低. 在一般形式串并联生产系统条件下, 能观察到缓存空间对系统产出率的提升呈边际递减趋势, 而在缓存空间较少、阶段数量较多的情况下, 增加各阶段的设备数量可以使产能提升水平高于设备的增加倍率.

关键词: 串并联生产系统; 设备状态更替; 维护与故障; 仿真

中图分类号: F273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 01-0057-05

现代企业的生产系统常为多阶段配置形式, 如流水线、串并联生产线、装配生产线等, 多阶段系统的生产能力评估是企业运营管理的一个重要内容^[1]. 设备故障是影响生产系统性能的一个重要不确定因素, 当设备故障与系统运作相交交互以后, 其影响将变得非常复杂, 对应的研究点除了产能评估以外, 还包括多设备的维护策略^[2-3]、在制品的库存控制^[4]、缓存空间的分配^[5]、作业调度与维护的集成优化^[6]等.

多阶段生产系统的产能评估研究常以流水线为基础. Alferi等^[7]通过数学规划的方法评估了流水线产能. Abdul-Kader^[8]在多产品批量背景下采用规划方法建模了流水线运作过程. Sarvar^[9]采用仿真方法评估了预防性维护对流水线性质的影响. 王林等^[10]在定义流水线运作的基础上, 对预防性维护与缓存空间分配问题进行了联合优化. 张岳君等^[11]提出了一种计算不可靠流水线产能的近似方法. 这些研究的一个假设前提是, 流水线范围内的在制品加工顺序不发生变化, 从而可采用在制品流通的递推关系构建系统的运作. 而在串并联系统中, 在制品的生产顺序经常发生变化, 因此上

述流水线条件下的产能评估方法不具有适用性.

针对串并联生产系统研究中由于研究侧重点的差异, 有些文献可能会忽略系统的运作过程, 如张晓文等^[2]的计划决策过程中忽略了缓存空间对串并联系统的影响; Xia等^[12]仅考虑了串并联生产系统的维护问题. 生产系统工程领域的研究对象包括了一般形式串并联系统的配置, 但是建模方法多以马尔科夫链为主, 尚未引入维护领域较为多样的维护策略^[1], 对于一些复杂模型较为依赖仿真软件. 仿真软件能快速地建模串并联系统的结构配置, 并评估系统产能及其他指标, 但是仿真软件只能处理一些通用模型, 无法直接建模一些特殊的系统运作机制, 如生产设备采取了特定的预防性维护策略及较为多样的故障模式的情形, 往往要结合软件的二次开发才能完成.

针对上述产能评估方法存在不适用现象, 本文以串并联生产系统为研究对象, 引入常见的设备故障机制及预防性维护策略, 从系统运作机制的角度出发, 提出一种基于设备状态更替的仿真方法, 并进一步测试所提出方法的有效性与效率, 分析系统结构配置对产能的影响.

收稿日期: 2018-03-04.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ16G010002); 宁波市自然科学基金(2017A610141).

第一作者: 胡涛(1991-), 男, 湖北恩施人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 制造系统建模与仿真. E-mail: 1970538987@qq.com

*通信作者: 张岳君(1983-), 男, 浙江宁波人, 讲师, 主要研究方向: 制造系统的集成优化与控制. E-mail: zhangyuejun1@nbu.edu.cn

1 串并联生产系统的建模

1.1 问题描述

假设某一串并联生产系统包含 S 个阶段,第 s 个阶段由 p_s 台设备及缓冲空间 B_s 构成,如图1所示.将设备序号记为 $M(s,n)$,其中 $1 \leq s \leq S$, $1 \leq n \leq p_s$.不同阶段的设备均保持独立运作状态,当系统中某台设备发生故障停机时,同一阶段的其他设备能继续作业,同时缓存空间内的在制品也能在一定程度上确保上下游的正常生产和输出,有利于提升系统的生产能力.

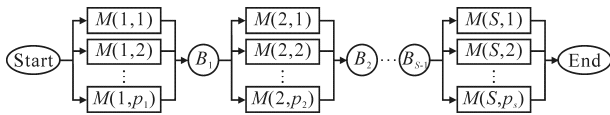


图1 串并联生产系统的配置结构

在生产过程中,在制品依次经过各阶段中的1台设备进行加工,完工后释放至缓存空间,完成最后一道工序后离开系统.第1阶段的设备在完成生产之前不会因为物料短缺而发生饥饿(Starving),最后阶段的设备在完成在制品加工后可立即取走而不发生阻塞(Blocking).当前设备的开始加工时间取决于上游在制品的到达时间及设备的可用时间,在制品的释放时间取决于当前设备的完工时间及下游的缓存空间是否空余.

设备故障的发生节点服从威布尔分布 $t \sim W[\beta_{sn}, \eta_{sn}]$,其中 $\beta_{sn} > 1$.发生故障后采取小修策略使设备修复如旧,不能够提升设备的可靠性.预防性维护周期 T_{sn} 通过最大化单台设备可用度 $A(t)_{sn}$ 的方法确定.在设备累积运行时间达到 T_{sn} 时才执行,设备可用度的表达式为:

$$A(t)_{sn} = \frac{t}{t + t_{sn}^{pm} + H(t)_{sn} t_{sn}^{mr}}, \quad (1)$$

其中: t 为设备 $M(s,n)$ 的实际运行时间; t_{sn}^{pm} 为预防性维护的单位时间; t_{sn}^{mr} 为小修所需的单位时间; $H(t)_{sn}$ 为维护周期内故障的期望次数.

在威布尔分布条件下,推导最优维护周期为:

$$T_{sn} = \eta \left[\frac{t_{sn}^{pm}}{t_{sn}^{mr}(\beta_{sn} - 1)} \right]^{1/\beta_{sn}}. \quad (2)$$

需要计算和评估的是一批产品 N 从开始生产到结束期间串并联系统的生产能力,采用产出率(T_{th})衡量(系统在单位时间内的产品生产数量).为

与文献[11]结果比较,产品在不同设备上的加工时间均设置为1 min,且在仿真部分设定所有设备具有相同的性能参数与预防性维护/小修时间.

1.2 设备状态的更替流程

从设备状态更替的角度对系统运作机制进行建模,生产过程中的设备处于生产、等待、闲置和预防性维护4种状态中的一种.生产(P)指在制品在设备上从开始加工到完工期间的一个状态阶段,生产期间发生的故障小修可视为在制品加工时间经过适当延长的一种生产形式.等待(W)指在制品完工后由于下游阻塞导致的延迟释放现象,期间设备将继续持有在制品而不能进行生产或预防性维护.闲置(I)指设备上的在制品释放以后,上游无在制品输入所导致的饥饿停机情形.当设备从上一次预防性维护后的累积运行时间达到 T_{sn} 时,对设备进行预防性维护(M),此时不进行在制品生产.

设备在单位步长整数倍节点 k 更替状态,图2定义了4种状态之间的判断与更替流程.“上游输入”取决于上游缓存空间内的在制品及上游设备所持有的已完工在制品数量之和是否大于/等于1,而“下游输出”取决于下游缓存空间内是否存在空位.各个缓存空间内的在制品数量在生产期间会发生变化,在“上游输入”和“下游输出”期间进行相应更新.

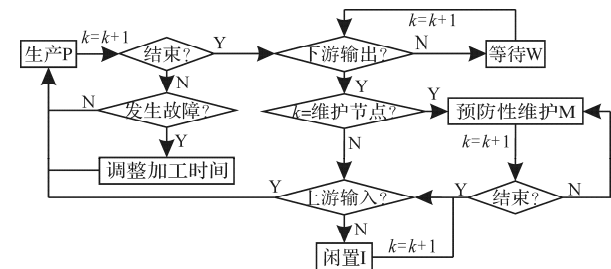


图2 设备状态的更替流程

1.3 串并联生产系统的运作

系统的运作由产品离开最后一个阶段所驱动,因此可按下游到上游的顺序关联前后阶段,而同一阶段范围内则按序号(或特定规则)来更替设备状态.在仿真过程中,设备的预防性维护节点和小修节点可根据产品数量与设备参数事先计算和生成.由于不能提前确定生产所需的时间,整个生产过程将预先估算一个较大的时间范围,在最后一个产品离开后确认实际的生产时间.基于设备状

态更替的系统运作过程如下:

```
Begin
    输入系统配置参数与设备的初始役龄;
    生成设备的预防性维护节点与故障节点;
    For  $k:=0$  to  $\text{big}M$  do
        For  $s:=S$  to 1 do
            For  $n:=1$  to  $p_s$  do
                更新设备  $M(s, n)$  状态
            End
        End
    End
    if (完成  $N$  个产品生产);
        Break
    End;
    计算系统产出率;
End
```

2 仿真实验与分析

2.1 流水线系统与基于下一事件仿真方法对比

首先以流水线系统为对象, 将本文所提的仿真方法与文献[11]中基于下一事件仿真方法进行对比. 以文献[11]仿真实验中的参数设置为基础, 所需生产的产品数量为 10 000 个, 实验过程将共享设备的随机故障节点与初始役龄. 2 种仿真方法均使用 C#语言编程, 计算机配置为: CPU 2.90 GHz, RAM 16 GB. 将给定参数组合条件下的 2 种方法对照运行 1 000 次. 仿真测试表明, 由于引用了相同的初始状态与故障节点, 2 种方法在不同系统配置条件下的产出率保持一致(图 3), 这意味着尽管在建模思想上存在差异, 基于设备状态更替的仿真方法能够准确反映流水线系统的运作.

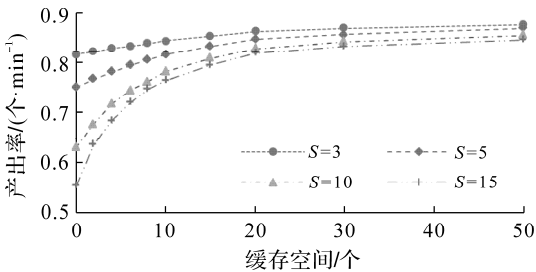


图 3 不同系统配置条件下流水线的产出率

图 4 给出了 $S=10, B_s=0$ 条件下产出率的分布与均值, 在显著水平 $\alpha=0.05$ 条件下仿真误差能控制在 0.1% 以内, 不同配置条件下仿真的有效性分析

参照文献[11]. 图 5 给出了一个预防性维护周期内不同产品的产出时间, 即不同产品完成最后阶段加工的时间. 由于设备初始役龄为 0, 设备前期的可靠性较好, 输出结果较为一致; 而随着生产过程的推进, 产出时间受随机故障的影响逐渐变大, 不同样本之间的差异性也随着扩大.

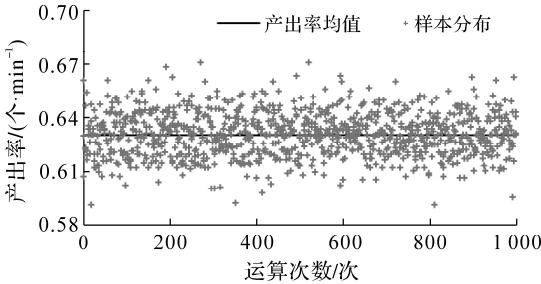


图 4 产出率的分布与均值($S=10, B_s=0$)

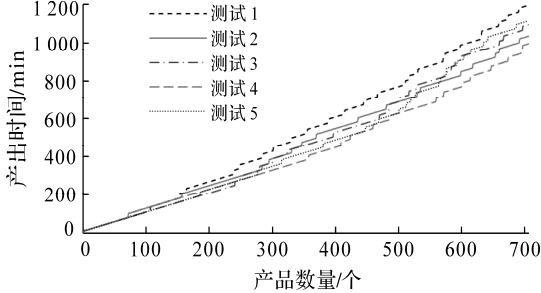


图 5 一个维护周期内不同产品的产出时间($S=10, B_s=0$)

表 1 统计了基于设备状态更替仿真方法(MSC)与基于下一事件仿真方法(NE)的运算时间. 在相同配置条件下前者的运算效率较低, 因为前者采用了步进的方法来推进整个生产过程, 需要定义大量数组来表征与设备相关的变量, 在每个步长

表 1 不同系统配置条件下 2 种仿真方法的运算时间 min

B_s	$S=3$		$S=5$		$S=10$	
	MSC	NE	MSC	NE	MSC	NE
0	0.67	0.16	1.58	0.28	3.24	0.59
2	0.67	0.16	1.57	0.27	3.28	0.58
4	0.67	0.16	1.55	0.28	3.29	0.58
6	0.67	0.15	1.57	0.27	3.27	0.58
8	0.67	0.15	1.57	0.28	3.26	0.58
10	0.68	0.16	1.56	0.27	3.26	0.58
15	0.70	0.15	1.57	0.27	3.23	0.59
20	0.66	0.15	1.56	0.27	3.23	0.59
30	0.65	0.16	1.56	0.27	3.25	0.59
50	0.65	0.16	1.56	0.27	3.29	0.59
0	0.67	0.16	1.58	0.28	3.24	0.59

节点上运算也更为复杂;而后者的仿真方法只需按照在制品的开始生产到离开公式开展递推即可,因此在变量规模和运算效率上优势明显.

2.2 一般形式的串并联生产系统

2.2.1 缓存空间的影响

在流水线系统的配置基础上,将每个阶段的设备数量分别调整为 $\{p_s=2\}$ 和 $\{p_s=3\}$ 两种形式,新增设备的性能保持不变.图6展示了2类串并联系统在不同配置条件下的产出率,与图3类似,缓存空间可以提升系统的产出率,但是这一增幅呈边际递减趋势,表明缓存空间的改进效果存在极限.

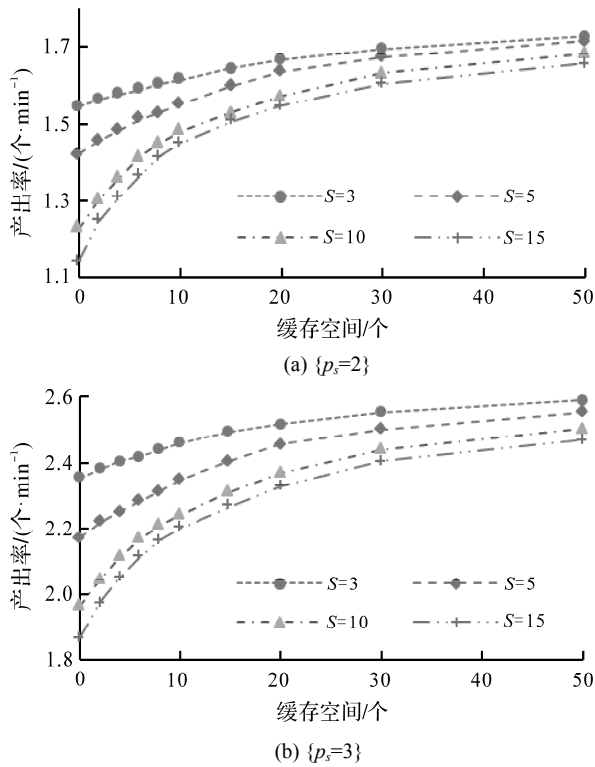


图6 不同系统配置条件下的系统产出率

2.2.2 串并联系统的效益分析

以图3中流水线的生产能力为基准,进一步考察各阶段设备数量调整为 $p_s=2$ 和 $p_s=3$ 后的产能提升水平,用比值 r 衡量:

$$r = \frac{T_{th}|\{p_s=m\}}{T_{th}|\{p_s=1\} \times m}, \quad m=2,3, \quad (3)$$

式中: r 为串并联生产系统与流水线的产能比除以设备的增加倍率,如果 $r>1$ 表明新增设备后的串并联配置形式优于构建几条独立流水线的方案.

图7(a)和(b)分别给出了不同设备数量条件下 r

的统计结果.由于 $S=3$ 和 $S=5$ 条件下的 r 值较为接近,为保持图的可读性省去了 $S=3$ 条件下的计算结果.多数情况下串并联系统的产能提升水平达不到设备数量的增加倍率,因为各阶段的缓存空间未获得同步的扩展.而在缓存空间较少、系统阶段数量较多的情况下,串并联系统的产能提升水平可以超过设备数量的增加倍率.这是因为在这种情况下,设备本身作为单一容量缓存空间的作用凸显,且并行阶段设备数量越多对产能的促进作用越明显.例如在 $B_s=0$, $S=15$ 条件下,图7(b)中所对应的 r 值为1.16,明显高于图7(a)中所对应的 r 值(1.03).这也表明即使在无缓存空间的条件下,通过单台设备可用度来推导系统整体产能的方法可能存在较大的偏差.

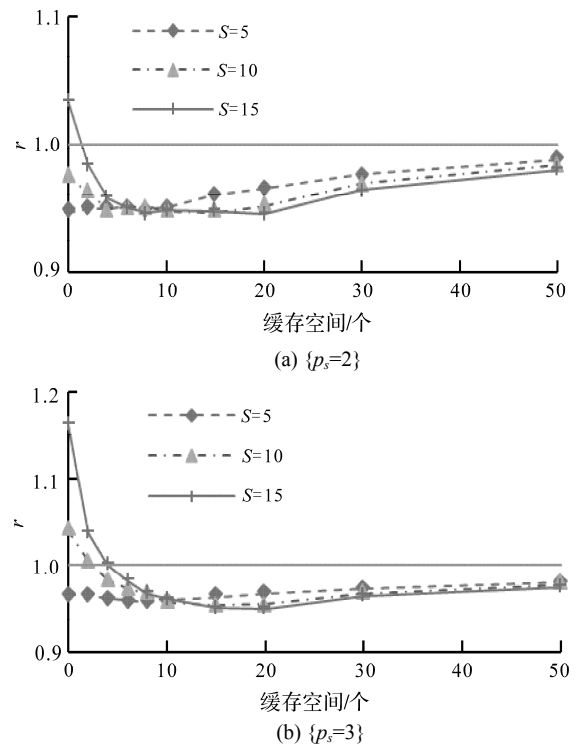


图7 不同系统配置条件下产出率比值

3 结语

本文提出了一种基于设备状态更替的建模与仿真方法来评估故障条件下串并联系统的产能,解决了当前多阶段生产系统产能评估研究中存在的不适用现象.数值实验表明,流水线条件下这一仿真方法在计算结果上可与基于下一事件的仿真方法保持一致,但在运行效率上存在较大差距.同

时,通过对串并联系统的仿真实验可以看到,缓存空间对产出率的促进作用仍呈边际递减趋势,而在缓存空间较少、阶段数量较多的情况下,增加各阶段设备数量的方式可以使系统的产能提升水平高于设备的增加倍率。

基于设备状态更替的仿真方法的扩展性较好,可以应用于其他复杂系统的配置结构,并可在此基础上引入设备生产率、产品质量、返修等一系列影响系统效率的要素。同时,也可以考虑将该仿真方法与生产计划、设施规划等优化问题进行集成,从而获取更有效的决策结果。

参考文献:

- [1] Li J, Meerkov S M, Zhang L. Production systems engineering: Problems, solutions, and applications[J]. *Annual Reviews in Control*, 2010, 34(1):73-88.
- [2] 张晓文, 孙小明, 蒋祖华, 等. 考虑生产线平衡的串—并联生产系统机会维护策略[J]. *上海交通大学学报(自然科学版)*, 2015, 49(5):702-707.
- [3] Gu X, Lee S, Ni J. Hidden maintenance opportunities in discrete and complex production lines[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(11):4353-4361.
- [4] Zequeira R I, Valdes J E, Berenguer C. Optimal buffer inventory and opportunistic preventive maintenance under random production capacity availability[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 111(2):686-696.
- [5] Nahas N. Buffer allocation and preventive maintenance optimization in unreliable production lines[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017, 28(1):85-93.
- [6] 张思源, 陆志强, 崔维伟. 考虑设备周期性维护的流水车间生产调度优化算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(6):1379-1387.
- [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. Modelling of multi-stage production lines with maintenance operations[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2008, 21(4):396-406.
- [10] 王林, 陆志强, 张岳君. 串行生产系统维护计划与缓冲分配的联合优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(5):1296-1304.
- [11] 张岳君, 方志梅, 陆阳冰. 设备故障条件下流水线产能评估方法研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2017, 30(4):1-5.
- [12] Xia T, Xi L, Zhou X, et al. Dynamic maintenance decision-making for series-parallel manufacturing system based on MAM-MTW methodology[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 221(1):231-240.

The approach of modelling and simulation for serial-parallel production system under machine failures

HU Tao, ZHANG Yue-jun*, FANG Zhi-mei, LIN Wen-wen

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To address the inapplicability of capacity evaluation methods for the production system, an approach to model and simulate the serial-parallel system based on the machine-state cycling is proposed. The machine state includes production, wait, idle and preventive maintenance. The production system is driven by the machine state cycling and the WIP number updating. The numerical test indicates that the present approach has the similar performance to the next-event simulation approach for the flow line, but the efficiency is much lower. While extending to the serial-parallel production system, it shows that the marginal impact of buffer capacity on the throughput diminishes. It is better to increase the parallel machine number in each stage when the system has larger stage number and smaller buffer capacity.

Key words: serial-parallel production system; machine-state cycling; maintenance and failure; simulation

(责任编辑 史小丽)