

控制与决策

Control and Decision

基于退化机器模型的分布式柔性生产系统:性能分析、任务调度及预测性维护

黄龙珠, 贾之阳, 王遵君, 田秀璇

引用本文:

黄龙珠, 贾之阳, 王遵君, 田秀璇. 基于退化机器模型的分布式柔性生产系统:性能分析、任务调度及预测性维护[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2641–2652.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2142>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化](#)

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance
控制与决策. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

[两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型](#)

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems
控制与决策. 2021, 36(6): 1377–1386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

[带峰值能耗约束流水线调度的协同群智能优化](#)

Cooperative memetic optimization for flowshop scheduling with peak power consumption constraint
控制与决策. 2021, 36(10): 2350–2358 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0429>

[基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题](#)

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem
控制与决策. 2021, 36(5): 1181–1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

[基于马尔可夫过程的多部件系统劣化状态空间划分模型](#)

Multi-component system state space partition model based on Markov process
控制与决策. 2021, 36(2): 418–428 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0480>

基于退化机器模型的分布式柔性生产系统: 性能分析、任务调度及预测性维护

黄龙珠^{1,2}, 贾之阳^{1,2†}, 王遵君^{1,2}, 田秀璇^{1,2}

(1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学
复杂系统智能控制与决策国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 在近些年的制造环境中, 由于市场对多品种、小批量定制产品需求的增加, 生产制造更加深入地向着柔性方向发展. 如何利用现有资源, 提高生产效率, 实时地对系统性能进行评估与预测, 并对基于小批量生产的实时调度进行优化改进, 在分布式柔性生产系统中具有重要的研究意义. 因此, 基于退化机器模型的多批次串行生产线的性能进行分析, 并对分布式生产系统进行任务调度及预测性维护. 具体地说, 对于具有退化机器模型及有限容量缓冲区的生产系统, 首先采用马尔科夫分析方法建立数学模型; 随后, 提出精确方法来计算此生产系统模型实时的性能指标, 并针对该模型下的调度问题, 设计最优完成时间指标优化算法; 此外, 提出基于退化机器模型的预测性维护策略以减少完成时间; 最后, 通过数值实验验证该算法的可行性和有效性.

关键词: 分布式调度; 智能制造; 退化机器; 性能评估; 暂态分析; 预测性维护

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2142

引用格式: 黄龙珠, 贾之阳, 王遵君, 等. 基于退化机器模型的分布式柔性生产系统: 性能分析、任务调度及预测性维护[J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2641-2652.

Distributed flexible systems with degenerate machines: Performance analysis, production scheduling, and predictive maintenance

HUANG Long-zhu^{1,2}, JIA Zhi-yang^{1,2†}, WANG Zun-jun^{1,2}, TIAN Xiu-xuan^{1,2}

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the modern manufacturing environment, the production systems develop towards a flexible direction due to the increasing of the market demands of multiple varieties and small batch-based customized products. In order to make better use of existing resources and improve production efficiency, real-time performance evaluation and prediction of real-time scheduling and optimization improvement based on small batch production have important research significance in distributed flexible production systems. This paper mainly studies the performance analysis of multi-batch serial production lines based on degenerate machines, and carries out task scheduling and predictive maintenance for the distributed production system. Specifically, for the production system with the degenerate machine model and the finite capacity buffer, the mathematical model is established using the Markov method firstly. Then, an accurate method is proposed to calculate the real-time performance indexes of the system based on the model, and an algorithm is designed to optimize the completion time index for the scheduling problem under the model. In addition, a predictive maintenance strategy is proposed to reduce the completion time for machines with degradation models. Finally, the feasibility and effectiveness of the mathematical model and algorithm are illustrated by numerical experiments.

Keywords: distributed scheduling; intelligent manufacturing; degenerate machine; performance evaluation; transient analysis; predictive maintenance

收稿日期: 2021-12-10; 录用日期: 2022-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62103042); 国家重点研发计划项目(2021YFB1714800); 北京市自然科学基金项目(4214076).

责任编辑: 梁樑.

†通讯作者. E-mail: zhiyang.jia@bit.edu.cn.

0 引言

调度问题的研究主要集中在资源的分配上,即针对不同的任务,制定相应的优化目标,最终找到最优或近似最优解.它要求在保证一定最优性能的前提下,对有限的人力、物力和时间进行科学合理的配置,使得生产过程能够更加高效地进行.在制造企业中,调度问题广泛存在.近年来,生产制造开始从集中式向分布式转变,多工厂生产环境下的生产调度问题,即分布式调度问题,受到越来越多的关注^[1-2].此外,预测有可能出现的故障情况并提前对设备进行维护,可以有效避免因机器故障而导致生产停滞的情况.在小批量、多品种的生产需求逐渐增加的现代制造系统中,考虑生产调度及预测性维护,可以降低运输、时间等资源成本,提高经济效益.

随着国家大力推进智能制造战略,对柔性生产系统评估实时性能具有重要意义.在暂态性能分析研究中,已有一些学者针对多种不同结构的机器模型的不同性能指标、系统特性等进行了研究,如文献[3]研究了具有专用缓冲区的柔性生产系统,文献[4]针对几何可靠性模型机器的柔性串行生产线系统进行了研究.但是,有关退化模型的暂态分析目前还没有相关研究.而机器状态退化可以在数字化生产中观察到,对系统运行和性能也有着显著的影响.一台机器在不同的工作状态下可能会以不同的概率发生故障.文献[5]的研究表明,运行在较差状态下的机器更容易发生故障,从而导致停机时间的延长,进而降低系统生产率,即机器不同的状态会导致不同的工作效率,从而影响生产率^[6-7].在实践中,根据不同机器的特征可以使用多个状态来识别和描述机器的状态^[8].已有部分学者使用退化机器模型来分析生产线的性能^[9-11].然而,在暂态性能的分析上,有关退化机器模型的研究还不足,而暂态过程在小批量生产中占据着至关重要的地位,因此,有必要对其做进一步的研究.

在经济全球化的背景下,合理地调度能够更充分利用各项资源,不同学者在调度优化算法上也有一定的研究成果.如整数规划、动态规划、回溯剪枝算法、分枝定界算法等数学方法鲁棒性好,能保证找到最优解,模拟退火算法^[12]、遗传算法^[13]、蚁群优化算法^[14]、粒子群算法^[15]等智能优化算法可较快求得近优解.随着制造环境日益复杂,多工厂、分布式制造成为一种常见的制造模式.分布式柔性调度问题(distributed flexible scheduling problem, DFSP)是基于不同工厂之间的合作生产,根据实际约束找出

最适合的调度方案.而用遍历法查找DFSP最优解难度较大,还需要耗费大量的时间和计算资源,是一个NP-难问题^[16].目前,针对分布式车间调度领域,相关学者研究了不同的调度问题,包括分布式并行机调度问题^[17],分布式作业车间调度问题^[18-19],分布式流水车间调度问题^[20],分布式置换流水车间调度问题^[16],分布式无等待流水车间调度^[21]等.而对于小批量多批次生产调度问题,由于解空间大,约束复杂,以及解空间的离散性,数学方法计算复杂、计算量大,本文选用智能优化算法求解.

此外,由于退化过程及环境条件复杂,许多工业系统,如运输系统、制造系统、能源生成系统和石油管网系统等,都不可避免地会发生故障.在生产系统中,这些故障可能会导致严重的后果,如大规模的生产损失、高维修成本以及对工人和环境的安全危害等.因此,能够有效地避免上述意外故障发生的预测性维护(predictive maintenance, PM)策略具有十分重要的研究价值.事实上,预先维护对生产能力、产品质量和生产盈利能力都有很大的影响.现代工业中,维护支出平均占总生产成本的28%^[22].在生产调度问题上,文献[23]设计算法求解生产调度及预测维护问题,文献[24]针对不同的维护规则研究单机调度问题.在基于退化机器模型的分布式柔性生产系统中,如何制定有效的维修策略至关重要,而现有针对其预测性维护的研究较少,需要做更加深入的研究.

本文建立了基于退化机器模型及有限缓冲区的分布式柔性系统模型,并提出相应的综合方法来解决在该模型基础下的性能分析、生产调度及预测性维护问题.具体而言,本文在小批量多品种产品生产的背景下,针对多工厂分布式系统,基于马尔科夫分析方法构建数学模型,推导出各性能指标的表达式;其次,针对上述系统模型,设计编码策略以求解最优完成时间调度问题;此外,通过设计预测性维护策略,进一步降低完成时间;最后,由数值实验验证表明,所提出的算法能较好地解决基于退化机器模型的分布式柔性生产问题.

1 模型假设及性能指标

1.1 符号定义

本文使用的符号含义如下所示:

A : 状态转移矩阵;

$b_{l,j}$: 第 l 条串行生产线的第 j 个缓冲区;

B_k : 第 k 批次产品总数;

$BL_{l,j}$: 第 l 条生产线生产第 j 台机器处于阻塞状态的概率;

$CR_{l,k}$: 第 l 条生产线生产第 k 批次产品的消耗率;
 CT_l : 第 l 条生产线最后 1 台机器完成最后批次所有产品生产的时间;
 $CT_{l,k}$: 第 l 条生产线最后 1 台机器完成第 k 批次所有产品生产的时间;
 D_i : 退化机器所处的状态;
 D_F : 退化机器处于故障状态;
 $f_{j,k}$: 第 j 台机器已完成生产的第 k 种工件总数;
 $h_{l,j}$: 第 l 条生产线第 j 个缓冲区中产品数量;
 K : 待加工产品种类;
 L : 分布式生产线总条数;
 $m_{l,j}$: 第 l 条生产线的第 j 台机器;
 M : 每条生产线机器总数;
 $N_{l,j}$: 第 l 条生产线上第 j 个缓冲区容量;
 N_{pre} : 维护状态总数;
 $P_{l,j}$: 第 l 条生产线的第 j 台机器的退化概率;
 $p_{d_{i,w}}$: 生产中机器从状态 D_i 转移到状态 D_w 的概率, 即 $P_{l,j}(i, w)$;
 $PR_{l,k}$: 第 l 条生产线生产第 k 批次产品的生产率;
 $s_{l,j}(n)$: 第 l 条生产线的第 j 台机器在 n 时刻所处状态;
 $S_v(n)$: n 时刻系统所处状态对应的状态序列号;
 S_q : 第 q 批次产品的最大状态数;
 S_{pre} : 维护状态最大状态数;
 S_{sum} : 生产系统最大状态数;
 $ST_{l,j}$: 第 l 条生产线生产第 j 台机器处于饥饿状态的概率;
 $t_{setup,k}$: 生产第 k 批次产品前需要对系统进行调整所需的调整时间;
 τ : 机器加工周期;
 u : 系统处于调整状态的剩余调整时间;
 W : 退化机器运行状态总数;
 $WIP_{l,j}$: 第 l 条生产线生产第 j 个缓冲区产品数量的概率;
 X : 系统状态的概率分布.

1.2 模型假设

本文考虑一种小批量、多批次的分布式生产结构, 如图 1 所示。
 梯形表示不同批次待加工工件 ($B_k, k = 1, 2, \dots, K$), 梯形上方括号中的 $t_{setup,k} (k = 1, 2, \dots, K)$ 表示不同批次之间系统所需的调整时间, 圆形表示机器 ($m_{l,j}, l = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, M$), 矩形表示缓冲区 ($b_{l,j}, l = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, M - 1$, 当前所能容纳最大工件容量为 $N_{l,j}, l = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2,$

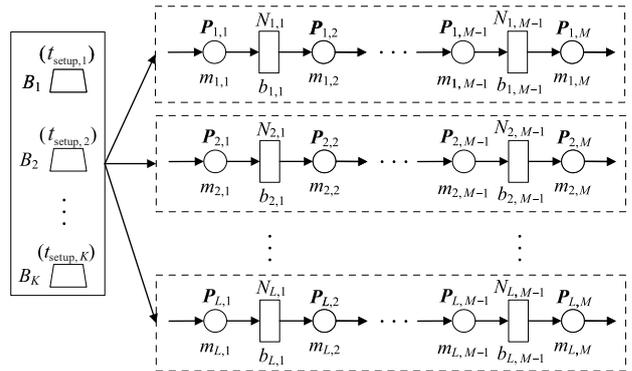


图 1 分布式串行生产结构

$\dots, M - 1$), 箭头的方向表示工件在系统中的流动方向, 虚线框表示结构相同但系统参数不同的生产线。每台机器都依照一定的退化规则, 有特定的工作状态及故障状态, 退化过程如图 2 所示。圆圈内的数字表示机器当前所处状态, 箭头方向表示机器状态的变化。

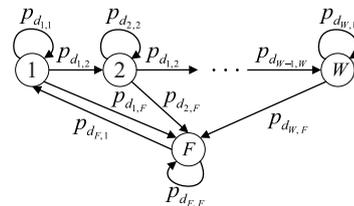


图 2 退化过程

下面对分布式串行生产系统做如下假设:

- 1) 上述生产系统由 L 条生产线组成, 每条生产线包括 M 台具有退化模型的机器和 $M - 1$ 个缓冲区, 缓冲区具有有限容量 $N_{l,j}$, 假设缓冲区占用容量在每个周期结束时才发生变化, 同时假设缓冲区工件流出采用先进先出原则。
- 2) 所有的机器都有恒定和相同的加工周期 τ , 所有机器完成一项操作的时间为一个周期, 以该加工周期为单位对整个生产过程进行分段。假定初始时刻为 0, 进入生产状态后, 以 τ 为单位时间, 在该单位时间内, 所有机器可完成一项操作。
- 3) 对具有退化模型的机器 $m_{l,j}$, 包括一个故障状态 D_F 和 W 个运行状态, 其中最佳运行状态为 D_1 , 最差运行状态为 D_W 。机器每完成一次生产操作, 该机器的状态都会以一定概率按照退化过程发生变化。
- 4) 当机器运行状态为 $D_i (i = 1, 2, \dots, W)$ 时, 它可以保持在当前的状态 D_i , 或者退化到下一个更差的状态 D_{i+1} , 或者在下一个时间周期中发生故障 D_F , 变化概率分别是 $p_{d_{i,i}}, p_{d_{i,i+1}}$ 和 $p_{d_{i,F}}$, 满足 $p_{d_{i,i}} + p_{d_{i,i+1}} + p_{d_{i,F}} = 1$ 。由实际情况, 假设机器在较差状态下运行更有可能出现故障, 即 $p_{i+1,F} > p_{i,F}, i = 1, 2, \dots, W - 1$ 。

5) 当机器处于故障状态 D_F 时, 在下一个循环开始时可以以概率 $p_{d_{F,1}}$ 返回最佳运行状态 D_1 , 或者以概率 $p_{d_{F,F}}$ 继续处于故障状态. 显然 $p_{d_{F,F}} + p_{d_{F,1}} = 1$.

6) 所有机器的退化过程都是独立的.

7) 在第 n 个加工周期开始时, 若机器 $m_{l,j}$ 前一个缓冲区 $h_{l,j-1}$ 在第 $n-1$ 个加工周期结束时工件数量为零且机器处于工作状态, 即 $h_{l,j-1}(n-1) = 0, s_{l,j}(n) \neq D_F$, 则该机器在第 n 个加工周期处于饥饿状态, 第 1 台机器不会处于饥饿状态.

8) 在第 n 个加工周期开始时, 若基于退化模型的机器 $m_{l,j}$ 下一个缓冲区 $h_{l,j+1}$ 在第 $n-1$ 个加工周期结束时工件数量达到最大 $N_{l,j+1}$, 当前机器处于工作状态且下一台机器处于故障状态, 即 $h_{l,j+1}(n) = N_{l,j+1}, s_{l,j}(n) \neq D_F, s_{l,j+1}(n) = D_F$, 则该机器在第 n 个加工周期处于阻塞状态, 最后 1 台机器不会处于阻塞状态.

注1 柔性制造的优势之一是同类甚至不同类型产品可以在同一条生产线上生产. 这在小批量生产中更能控制成本, 具有更大的优势. 在这类连续的生产任务之间, 生产前通常需要对机器进行调整以适应当前产品加工. 而生产任务规模较小时, 生产活动大多处于暂态过程, 此时稳态分析误差较大, 必须对此类生产进行实时性能分析.

注2 在许多具有小批量生产任务中可以观察到, 机器的调整操作是在系统级别上进行的, 即只有当前一批工件完成生产时才开始下一批次的加工. 因此, 尽管上游机器已经完成当前批次的加工, 但当生产系统中还有产品未完成时, 上游机器不需要开始加工下一批次.

1.3 性能指标

1) 生产率 $PR_{l,k}(n)$. 在第 n 个加工周期里, 第 l 条生产线的最后 1 台机器 m_M 成功加工完成第 k 种工件中某一个产品的期望.

2) 消耗率 $CR_{l,k}(n)$. 在第 n 个加工周期里, 第 l 条生产线的第 1 台机器 m_1 成功加工完成第 k 种工件中某一个产品的期望.

3) 完成时间 $CT_{l,k}$. 在第 n 个加工周期里, 第 l 条生产线的最后 1 台机器 m_M 成功加工完成第 k 种工件所有产品时, 生产线已完成加工周期数量的期望.

4) 在制品库存总量 $WIP_{l,j}(n)$. 在第 n 个加工周期内, 留存于生产线上的正在加工的产品个数的期望, 即当前时刻每个缓冲区 $b_{l,j}$ 中正在加工的产品个数的期望.

5) 饥饿率 $ST_{l,j}(n)$. 在第 n 个加工周期里, 第 j 台

机器目前为饥饿状态的概率.

6) 阻塞率 $BL_{l,j}(n)$. 在第 n 个加工周期里, 第 j 台机器目前为阻塞状态的概率.

2 模型分析及求解

对于分布式调度问题, 本文采用智能优化算法得到最优的分配方式, 一旦确定了具体的分配方式, 就能针对每条生产线计算性能指标, 研究实时系统性能. 考虑实际生产中对于交货时间十分重视, 优化目标选取 1.2 节性能指标中的完成时间, 优化问题即获得合理的分配方式使得每条生产线完成时间中的最大完成时间最短. 对于不同生产线, 仅待加工批次及系统参数不同, 在完成时间的计算方法上没有区别, 而该计算方法也是本文的主要工作.

以第 1 条生产线为例, 假定该生产线总计有 $Q(Q \in \{1, 2, \dots, K\})$ 批次工件被分配, 下面对不同生产线结构展开具体研究.

2.1 多批次单机生产线分析

当系统仅由一台机器组成时 (见图 3), 可采用马尔可夫分析方法构建系统的数学模型. 本文定义 $s_{1,1}(n)$ 表示退化机器 $m_{1,1}$ 在 n 时刻所处状态, $f_{1,q}(n)$ 表示在 n 时刻结束时机器加工完成的第 q 批次工件数量, u 表示当前剩余调整时间, 通过 $S_v(n) = (q, s_{1,1}(n), f_{1,q}(n), u)$ 表征该模型状态. 由该系统的实际意义可以得到总的状态数为

$$S_{\text{sum}} = \sum_{q=1}^Q ((W+1)B_q + t_{\text{setup},q}). \quad (1)$$

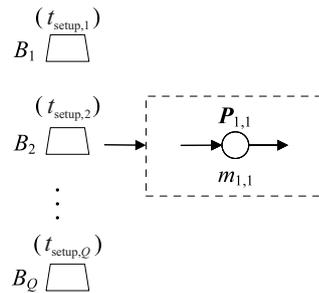


图3 多批次单机生产结构

S_v 代表对应状态按照具体排列后的状态序列号. 其中, 初始系统状态 S_1 为 $(1, D_1, 0, t_{\text{setup},1})$, 表示当前处于加工第 1 批次工件的调整阶段, 经过 $t_{\text{setup},1}$ 后开始该批次加工, 机器 $m_{1,1}$ 处于最佳运行状态 D_1 . 终止状态为 $(Q, s_{1,1}(n), B_Q, 0)$, $s_{1,1}(n) \in \{D_1, D_2, \dots, D_W, D_F\}$, 该终止状态表示当前已经加工完全部 Q 批次工件. 随后, 给出不同状态间的转移概率如下:

$$P[S(n+1)|S(n)] = 1,$$

$$\begin{aligned}
 &S(n) = (q, D_1, 0, u), \\
 &S(n+1) = (q, D_1, 0, u-1), \\
 &q = 1, 2, \dots, Q, u = 1, 2, \dots, t_{\text{setup},q}; \\
 &P[S(n+1)|S(n)] = \mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), s_{1,1}(n)), \\
 &S(n) = (q, s_{1,1}(n), f_{1,q}(n), 0), \\
 &S(n+1) = (q, s_{1,1}(n), f_{1,q}(n) + 1, 0), \\
 &q = 1, 2, \dots, Q, f_{1,q}(n) < B_q, \\
 &s_{1,1}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W; \\
 &P[S(n+1)|S(n)] = \mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1), \\
 &S(n) = (q, s_{1,1}(n), f_{1,q}(n), 0), \\
 &S(n+1) = (q, s_{1,1}(n) + 1, f_{1,q}(n) + 1, 0), \\
 &q = 1, 2, \dots, Q, f_{1,q}(n) < B_q, \\
 &s_{1,1}(n) = D_1, D_2, \dots, D_{W-1}; \\
 &P[S(n+1)|S(n)] = \mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), D_F), \\
 &S(n) = (q, s_{1,1}(n), f_{1,q}(n), 0), \\
 &S(n+1) = (q, F, f_{1,q}(n) + 1, 0), \\
 &q = 1, 2, \dots, Q, f_{1,q}(n) < B_q, \\
 &s_{1,1}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W; \\
 &P[S(n+1)|S(n)] = \mathbf{P}_{1,1}(D_F, D_F), \\
 &S(n) = (q, D_F, f_{1,q}(n), 0), \\
 &S(n+1) = (q, D_F, f_{1,q}(n), 0), \\
 &q = 1, 2, \dots, Q, f_{1,q}(n) < B_q; \\
 &P[S(n+1)|S(n)] = \mathbf{P}_{1,1}(D_F, 1), \\
 &S(n) = (q, D_F, f_{1,q}(n), 0), \\
 &S(n+1) = (q, D_1, f_{1,q}(n), 0), \\
 &q = 1, 2, \dots, Q, f_{1,q}(n) < B_q; \\
 &P[S(n+1)|S(n)] = 1, \\
 &S(n) = (q, s_{1,1}(n), B_q, 0), \\
 &S(n+1) = (q+1, D_1, 0, t_{\text{setup},q+1}), \\
 &q = 1, 2, \dots, Q-1, \\
 &s_{1,1}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F; \\
 &P[S(n+1)|S(n)] = 1, \\
 &S(n) = (Q, s_{1,1}(n), B_Q, 0), \\
 &S(n+1) = (Q, s_{1,1}(n), B_Q, 0), \\
 &s_{1,1}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F. \tag{2}
 \end{aligned}$$

由式(2)可得系统的状态转移矩阵 \mathbf{A} , 初始系统状态概率分布 $\mathbf{X}(0) = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$, 每个数值对应系统状态在当前时刻的概率, 下一时刻该系统模型各

状态的概率分布

$$\mathbf{X}(n+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(n). \tag{3}$$

根据上述初始状态概率分布 $\mathbf{X}(0)$ 和状态转移矩阵 \mathbf{A} , 得到各状态随时间变化的概率分布, 由此第 $q(q = 1, 2, \dots, Q)$ 批的系统性能指标为

$$\begin{aligned}
 &PR_{1,q}(n) = CR_{1,q}(n) = \\
 &P(m_{1,1} \text{在当前时刻处于工作状态且加工} \\
 &\text{完成第 } q \text{ 批次工件数量小于工件总数}) = \\
 &\mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1) \cdot P[(q, s_{1,1}(n), f_{1,q}(n), 0), \\
 &s_{1,1} = D_1, D_2, \dots, D_W, f_{1,q} < B_q]. \tag{4}
 \end{aligned}$$

第 q 批工件的完成时间为

$$\begin{aligned}
 &P_{ct_q}(n) = \\
 &P(m_{1,1} \text{在当前时刻处于工作状态且下一} \\
 &\text{时刻完成第 } q \text{ 批次工件的加工}) = \\
 &\mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1) \cdot P[(q, s_{1,1}(n), B_q - 1, 0), \\
 &s_{1,1}(n) \neq D_F, CT_{1,q} = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P_{ct_q}(n)]. \tag{5}
 \end{aligned}$$

对于单机系统, 不存在缓冲区, 且机器既不会被阻塞也不会处于饥饿状态, 因此, 所定义的性能指标都可以通过上述方程计算.

2.2 多批次双机生产线分析

考虑由两台机器组成的系统(见图4), 同样采用马尔可夫方法构建系统模型. 定义在第 n 个加工周期, $s_{1,j}(n)(j = 1, 2)$ 表示机器 $m_{1,j}(j = 1, 2)$ 所处状态, $f_{1,q}(n)$ 表示机器 $m_{1,2}$ 加工完成的第 k 批次工件数量, $h_{1,1}(n)$ 表示缓冲区 $b_{1,1}$ 内总的工件数量, u 表示当前剩余的调整时间. 由该系统的实际意义, 可以得到第 q 批次状态数 S_q 及总的状态数 S_{sum} 为

$$\begin{aligned}
 &S_q = (W + 1)^2 \cdot (N_{1,1} + 1) \cdot (B_q - N_{1,1}) + \\
 &\frac{(W + 1)^2 \cdot (N_{1,1} + 1) \cdot N_{1,1}}{2} + t_{\text{setup},q} + 3, \\
 &S_{\text{sum}} = \sum_{q=1}^Q S_q. \tag{6}
 \end{aligned}$$

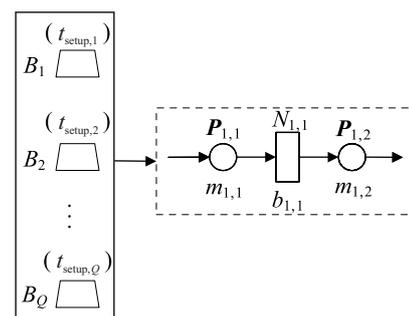


图4 多批次双机生产结构

下面通过上述定义的系统特征,用 $S_v(n) = (q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_2(n), h_{1,1}(n), u)$ 表征该模型系统状态. 初始状态 $(1, D_1, D_1, 0, 0, t_{\text{setup},1})$, 即经过 $t_{\text{setup},1}$ 个加工周期后开始第1批次工件的加工, 两台机器均处于最佳运行状态 D_1 , 缓冲区工件数量为零. 终止状态 $(Q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), B_Q, 0, 0)$, $s_{1,j}(n) \in \{D_1, D_2, \dots, D_W, D_F\}$, $j = 1, 2$, 即当前已经加工完全部 Q 批次工件.

给出不同状态间的转移概率如下(其中 $q = 1, 2, \dots, Q$, $u = 1, 2, \dots, t_{\text{setup},q}$):

$$\begin{aligned} S(n) &= (q, D_1, D_1, 0, 0, u), \\ S(n+1) &= (q, D_1, D_1, 0, 0, u-1), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= 1. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S(n) &= (q, D_1, D_1, 0, 0, 0), \\ S(n+1) &= (q, a, D_1, 0, 1, 0), \\ a &\in \{D_1, D_2, D_F\}, \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \mathbf{P}_{1,1}(D_1, a). \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S(n) &= (q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), 0, 0), \\ f(n) &= 1, 2, \dots, B_q - 1, \\ s_{1,1}(n) &\neq D_F, s_{1,2}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, \\ a &\in \{s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1, D_F\}, \\ S(n+1) &= (q, a, s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), 0, 0), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \mathbf{P}_{1,1}(D_F, a); \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} s_{1,1}(n) &= D_F, s_{1,2}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, \\ a &\in \{1, D_F\}, \\ S(n+1) &= (q, a, s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), 0, 0), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \mathbf{P}_{1,1}(D_F, a). \end{aligned} \quad (9b)$$

$$\begin{aligned} S(n) &= (q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), N_{1,1}, 0), \\ f(n) &= 1, 2, \dots, B_q - h_{1,1}(n) - 1, \\ s_{1,1}(n) &\neq D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\ a &\in \{s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1, D_F\}, \\ b &\in \{s_{1,2}(n), s_{1,2}(n) + 1, D_F\}, \\ S(n+1) &= (q, a, b, f_{1,q}(n) + 1, N_{1,1}, 0), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} &\mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), a) \cdot \mathbf{P}_{1,2}(s_{1,2}(n), b); \\ s_{1,1}(n) &= D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\ a &\in \{D_1, D_F\}, \\ b &\in \{s_{1,2}(n), s_{1,2}(n) + 1, D_F\}, \\ S(n+1) &= (q, a, b, f_{1,q}(n) + 1, N_{1,1} - 1, 0), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P[S(n+1)|S(n)] &= \\ &\mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), a) \cdot \mathbf{P}_{1,2}(s_{1,2}(n), b); \end{aligned} \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} s_{1,1}(n) &= D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, s_{1,2}(n) = D_F, \\ b &\in \{D_1, D_F\}, \\ S(n+1) &= (q, s_{1,1}(n), b, f_{1,q}(n), N_{1,1}, 0), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \mathbf{P}_{1,1}(s_{1,2}(n), b). \end{aligned} \quad (10c)$$

$$\begin{aligned} S(n) &= (k, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), B_q - h_{1,1}(n), h_{1,1}(n), 0), \\ 0 &< h_{1,1}(n) < N_{1,1}, \\ s_{1,1}(n) &= D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\ b &\in \{s_{1,2}(n), s_{1,2}(n) + 1, F\}, \\ S(n+1) &= (q, s_{1,1}(n), b, f_{1,q}(n), h_{1,1}(n) - 1, 0), \\ f(n) &= B_q - h_{1,1}(n) + 1, \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \mathbf{P}_{1,1}(D_F, a); \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} s_{1,1}(n) &= D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, s_{1,2}(n) = D_F, \\ b &\in \{D_1, D_F\}, \\ S(n+1) &= (q, s_{1,1}(n), b, B_q - h_{1,1}(n), h_{1,1}(n), 0), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \mathbf{P}_{1,1}(D_F, a). \end{aligned} \quad (11b)$$

$$\begin{aligned} S(n) &= (q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), h_{1,1}(n), 0), \\ f_{1,q}(n) + h_{1,1}(n) &< B_q, 0 < h_{1,1}(n) < N_{1,1}, \\ s_{1,1}(n) &\neq D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\ a &\in \{s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1, D_F\}, \\ b &\in \{s_{1,2}(n), s_{1,2}(n) + 1, D_F\}, \\ S(n+1) &= (q, a, b, f_{1,q}(n) + 1, h_{1,1}(n), 0), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \end{aligned} \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} &\mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), a) \cdot \mathbf{P}_{1,2}(s_{1,2}(n), b); \\ s_{1,1}(n) &= D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\ a &\in \{D_1, D_F\}, \\ b &\in \{s_{1,2}(n), s_{1,2}(n) + 1, D_F\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S(n+1) &= (q, a, b, f_{1,q}(n) + 1, h_{1,1}(n) - 1, 0), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \\ &\mathbf{P}_{1,1}(D_F, a) \cdot \mathbf{P}_{1,2}(s_{1,2}(n), b); \end{aligned} \quad (12b)$$

$$\begin{aligned} s_{1,1}(n) &\neq D_F, s_{1,2}(n) = D_F, \\ a &\in \{s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1, F\}, \\ b &\in \{D_1, D_F\}, \\ S(n+1) &= (q, a, b, f_{1,q}(n), h_{1,1}(n) + 1, 0), \\ P[S(n+1)|S(n)] &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\mathbf{P}_{1,1}(s_{1,1}(n), a) \cdot \mathbf{P}_{1,2}(D_F, b); \\ s_{1,1}(n) &= D_F, s_{1,2}(n) = D_F, \end{aligned} \quad (12c)$$

$$\begin{aligned}
 a &\in \{D_1, D_F\}, \\
 b &\in \{D_1, D_F\}, \\
 S(n+1) &= (q, a, b, f_{1,q}(n), h_{1,1}(n), 0), \\
 P[S(n+1)|S(n)] &= \\
 &P_{1,1}(D_F, a) \cdot P_{1,2}(D_F, b). \tag{12d}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S(n) &= (q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), B_q, 0, 0), \\
 q &= 1, 2, \dots, Q-1, \\
 S(n+1) &= (q+1, D_1, D_1, 0, 0, t_{\text{setup},q+1}), \\
 P[S(n+1)|S(n)] &= 1. \tag{13}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S(n) &= (q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), B_q, 0, 0), \\
 P[S(n)|S(n)] &= 1. \tag{14}
 \end{aligned}$$

初始系统状态概率分布 $\mathbf{X}(0) = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$, 同理, 由式(3)可以得到下一时刻系统状态的概率分布, 根据 $\mathbf{X}(0)$ 和状态转移矩阵 \mathbf{A} , 得到各状态随时间变化的概率分布, 由此第 $q (q = 1, 2, \dots, Q)$ 批的系统性能指标为

$$\begin{aligned}
 PR_q(n) &= \\
 &P(m_{1,2} \text{在当前时刻处于工作状态, 缓冲区 } b_{1,1} \text{ 非空} \\
 &\text{且 } m_{1,2} \text{ 加工完成的工件数小于第 } q \text{ 批次工件总数}) = \\
 &P_{1,2}(s_{1,2}(n), a) \cdot \\
 &P(q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), h_{1,1}(n), 0), \\
 &s_{1,1}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\
 &a \in \{s_{1,2}(n), s_{1,2}(n) + 1, D_F\}, \\
 &h_{1,1}(n) > 0, f_{1,q}(n) < B_q. \tag{15}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 CR_q(n) &= \\
 &P(m_{1,1} \text{在当前时刻处于工作状态, 缓冲区 } b_{1,1} \text{ 非满} \\
 &\text{且 } m_{1,1} \text{ 加工完成的工件数小于第 } q \text{ 批次工件总数}) = \\
 &P_a + P_b; \\
 P_a &= P_{1,1}(s_{1,1}(n), a) \cdot
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &P(q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), h_{1,1}(n), 0), \\
 &s_{1,1} \neq D_F, s_{1,2}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, \\
 &a \in \{s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1, D_F\}, \\
 &h_{1,1}(n) < N_{1,1}, h_{1,1}(n) + f_{1,q}(n) < B_q; \\
 P_b &= P_{1,1}(s_{1,1}(n), a) \cdot
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &P(k, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), N_{1,1}, 0), \\
 &s_{1,1}(n) \neq D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\
 &f_{1,q}(n) < B_q - N_{1,1},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a &\in \{s_{1,1}(n), s_{1,1}(n) + 1, D_F\}. \tag{16} \\
 P_{ct_k}(n) &= \\
 &P(m_{1,2} \text{在当前时刻处于工作状态, 缓冲区} \\
 &b_{1,1} \text{工件数量为1且 } m_{1,1} \text{ 加工完成的工件} \\
 &\text{数等于第 } q \text{ 批次工件总数} - 1) = \\
 &P_{1,2}(s_{1,2}(n), a)P(k, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), B_q - 1, 1, 0), \\
 &s_{1,1}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\
 &a \in \{s_{1,2}(n), s_{1,2}(n) + 1, D_F\},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 CT_{1,q} &= \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P_{ct_q}(n). \tag{17} \\
 WIP_q(n) &=
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\sum_{h=0}^{N_{1,1}} h \cdot P(m_{1,2} \text{缓冲区 } b_{1,1} \text{ 在当前时刻} \\
 &\text{工件数量为 } h \text{ 的概率}) = \\
 &\sum_{h=0}^{N_{1,1}} h \cdot P(q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), h_{1,1}(n), 0), \\
 &s_{1,1}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, \\
 &s_{1,2}(n) = D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, \\
 &h_{1,1}(n) + f_{1,q}(n) \leq B_q. \tag{18}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 BL_q(n) &= \\
 &P(\text{在当前时刻 } m_{1,1} \text{ 处于工作状态, } m_{1,2} \text{ 处于} \\
 &\text{故障状态, 缓冲区工件数量为 } N_{1,1} \text{ 且 } m_{1,1} \text{ 加工} \\
 &\text{完成的工件数小于第 } q \text{ 批次工件总数}) = \\
 &P(q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), N_{1,1}, 0), \\
 &s_{1,1}(n) \neq D_F, s_{1,2}(n) = D_F, \\
 &h_{1,1}(n) + f_{1,q}(n) < B_q. \tag{19}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ST_q(n) &= \\
 &P(\text{在当前时刻 } m_{1,1} \text{ 处于故障状态, } m_{1,2} \text{ 处于} \\
 &\text{工作状态, 缓冲区工件数量为0且 } m_{1,1} \text{ 加工} \\
 &\text{完成的工件数小于第 } q \text{ 批次工件总数}) = \\
 &P(q, s_{1,1}(n), s_{1,2}(n), f_{1,q}(n), 0, 0), \\
 &s_{1,1}(n) = D_F, s_{1,2}(n) \neq D_F, \\
 &h_{1,1}(n) + f_{1,q}(n) < B_q. \tag{20}
 \end{aligned}$$

为进一步说明该分析方法的有效性, 针对上述的多批次双退化机器生产系统, 给出具体的数值实例, 如图5所示. 总计3种产品待生产, 图5中缓冲区上的数字代表当前缓冲区最大容量, 两台机器的退化参数如下:

$$P_{1,1} = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.82 & 0.12 \\ 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0.75 & 0 & 0.25 \end{bmatrix},$$

$$P_{1,2} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.85 & 0.10 \\ 0 & 0.85 & 0.15 \\ 0.80 & 0 & 0.20 \end{bmatrix}.$$

其中 $P_{1,j}(i, w)(j = 1, 2)$ 表示第 j 台机器从状态 D_i 退化到状态 D_w 的概率。

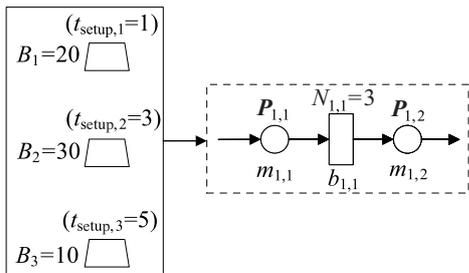
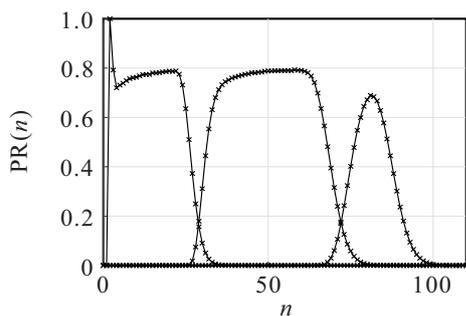


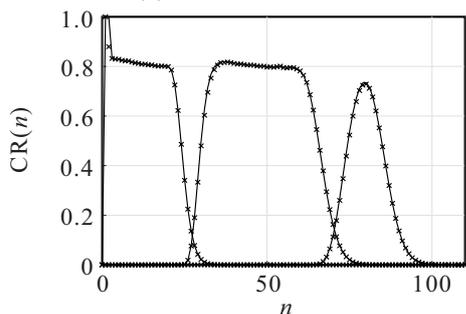
图5 多批次双退化机生产结构

针对所示多批次双机生产系统,采用2.2节所提出算法对系统进行分析并计算相关性能指标,为表明该方法的高精度,采用马尔科夫仿真方法与本文分析方法进行对比.实时性能指标评估实验结果如图6所示,本文所提出的精确分析算法对上述生产线的实时性能评估结果如实线所示,同时星号给出了系统性能的仿真结果,3种产品完成时间的精确分析及仿真结果如表1所示.

由图6可以明显看出,在小批量产品的生产中,每个生产批次仍可能或多或少达到稳态(生产率与消耗率相等),但瞬态过程在整个生产过程中占有不



(a) 多批次实时产品生产率



(b) 多批次实时原材料消耗率

图6 精确与仿真性能指标评估对比实验结果

表1 3种产品完成时间的精确分析及仿真结果

	B_1	B_2	B_3
$CT_{1,k}^{acc}$	27.5574	69.7357	88.5700
$CT_{1,k}^{sim}$	27.5569	69.7205	88.5598

可忽视的一部分.稳态分析中,由待加工工件数量除以对应生产速率的总和再加上相应的机器调整时间来预测完成时间,可能会导致生产任务完成时间预测错误.但采用前面章节的瞬态分析方法,从图6和表2中可以很容易地看到该方法结果精度较高,能够很好地预测系统相关性能.

2.3 多批次退化模型调度算法

前两小节具体分析了多批次单机和双机生产线的相关性能,给出了对应性能指标的计算方法.本文主要是提出基于退化机器模型分布式柔性系统的思想,并对单双机问题进行详细研究,而基于伯努利可靠模型的多机生产线在前期也有一定基础^[25],对于基于退化模型的多机生产线会在后续进一步研究.

相对而言,本文主要提出新的模型并对其进行分析,而优化算法并不是本文重点,因此选择经典的遗传算法(GA)说明该分布式调度问题可解,在算法方面的改进也会有后续研究.考虑图7所示的分布式双退化机生产结构,具体实现和数学分析如下.

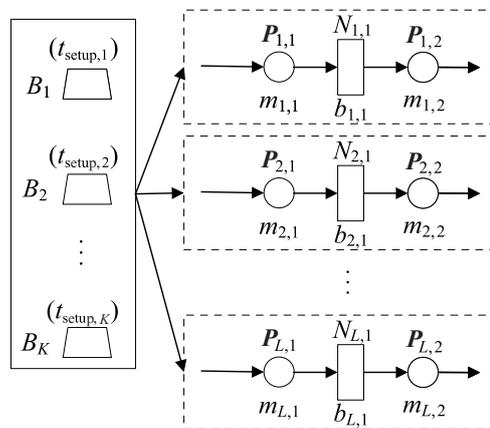


图7 分布式双退化机生产结构

首先根据系统参数设计编码.针对总计 K 批次的待加工工件确定编码长度为 K ,其中每个元素选取范围取决于生产线条数 L .例如,有3条生产线,6批待加工工件($L = 3, K = 6$),具体数据及编码方法如表2所示.

表2 3条生产线及6批待加工工件编码示例

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
B	25	45	30	60	50	20
t_{setup}	3	2	4	3	2	1
编码	1	3	1	2	2	3

可得到一组编码[1 3 1 2 2 3],对其进行解码,即 B_1, B_3 在第1条生产线上生产; B_4, B_5 在第2条生产线上生产; B_2, B_6 在第3条生产线上生产. 不同批次有相对应的调整时间需要考虑. 对于多台机器,需要加工的工件数量通常远超过装配线的总数 ($K \gg L$), 否则,该调度问题十分简单,可以直接遍历而不需要考虑用到智能优化方法.

对于分布式生产系统,考虑更有实际研究意义的完成时间作为优化对象,将每条生产线最后一批次工件完成时的工作时间中的最大值作为系统的完成时间,并以此为目标函数,使任务调度所需时间最短,适应度函数选取最大完成时间的倒数.

种群的初始质量对算法的整体优劣具有一定影响,这里对初始种群的生成进行相关操作:

- 1) 由待加工工件总批数除以生产线总数向下取整,得到每条生产线最少加工批次;
- 2) 剩余批次按照生产线顺序依次分配,确定每条生产线待加工工件总批数;
- 3) 随机打乱顺序,得出工件的不同加工顺序.

本文通过轮盘赌选择操作挑选出适应度最大的个体,利用交叉重组扩大搜索能力以及变异操作避免陷入局部最优解,最后在达到最大迭代次数时得到适应度函数最大解.

3 预测性维护

在第2节已经分析了多批次生产线各性能指标,采用遗传算法解决分布式柔性系统调度问题,得到一个较优的分配调度方案来优化完成时间. 为进一步降低完成时间,本节研究基于退化机器模型的生产系统的预测性维护策略. 预测性维护是在整个生产周期内,为提高系统生产率而提前进行的维护活动,预先制定合理的预测策略,能够提高生产率.

3.1 维护规则

由于第1.1节中定义的生产系统具有遍历马尔可夫链的特征,系统状态由所有缓冲区容量和所有被控制机器的状态组成,对于无记忆的退化可靠性模型,下面提出了基于系统状态的预测性维护策略. 在本文中,考虑由两台退化机器和一个有限容量缓冲区组成的生产系统,具体维护规则如下:

1) 缓冲区容量 $h_{1,1}(n) > r_1, r_1 < N_{1,1} - 1$ 时,对第1台机器进行维护;缓冲区容量 $h_{1,1}(n) < r_2$ 时,对第2台机器进行维护.

2) 第1台机器此时需要维护的状态 $s_{1,1}(n) = x_1, x_1 \in \{D_2, \dots, D_W\}$, 第2台机器此时需要维护的状态 $s_{1,1}(n) = x_2, x_2 \in \{D_2, \dots, D_W\}$.

3) 处于维护状态时,待维护机器不工作.

4) 维护完成需要一个加工周期,所维护机器的状态变为 $s_{1,j} = D_1, j \in \{1, 2\}$.

对于整个生产加工过程,在现有分析的基础上,以最小化完成时间为优化目标. 选取不同的维护状态会导致不同的最优完成时间,这里同样采用第2节的分析方法.

3.2 维护算法分析

首先确定维护参数 r_1, r_2, x_1, x_2 , 根据第3.1节中的维护规则选取满足条件维护的状态 S_{pre} , 所有有可能维护的状态数总计为 N_{pre} , 对应产生一组 $1 \cdot N_{pre}$ 维的向量(每个元素可取0或者1, 0表示该数组对应的状态不需要进行维护, 1表示该数组对应的状态需进行维护). 这里以第1台机器的维护为例, 对第2台机器的维护流程与之类似. 选取对第1台机器进行维护的相关状态如下:

$$\begin{aligned}
 S_i(n) &= (k, x_1, s_{1,2}(n), h_{1,1}(n), f_{1,k}(n), 0), \\
 k &= 1, 2, \dots, K, x_1 \in \{D_2, \dots, D_W\}, \\
 s_{1,2}(n) &= D_1, D_2, \dots, D_W, D_F, \\
 h_{1,1}(n) &> r_1, h_{1,1}(n) + f_{1,k}(n) < B_k, \\
 N_{pre} &= \sum_{k=1}^K (W+1)(N_{1,1} - r_1) \frac{2B_k - N_{1,1} - r_1 - 3}{2}, \\
 S_{pre} &= \sum_{n=1}^{N_{pre}} S_n. \tag{21}
 \end{aligned}$$

根据需要维护的状态在对应数组中置1完成编码操作,对数组中1所在位置对应的状态依次进行维护完成解码操作,根据需要维护的状态数目及所有有可能维护的状态总数随机生成初始种群,之后通过该方法进行编码、解码.

选取工件的完成时间作为适应度函数,首先根据维护状态对应的原始状态对系统状态转移矩阵进行调整,具体步骤如下.

1) 当前状态对应初始状态转移矩阵所在列置零.

2) 对第1台机器维护则按下列状态转移概率进行更新:

$$\begin{aligned}
 s_{1,2}(n) &= D_1, D_2, \dots, D_W, \\
 b &\in \{s_{1,2}(n), s_{1,2}(n) + 1, D_F\}, \\
 S(n+1) &= (k, D_1, b, f_{1,k}(n) + 1, h_{1,1}(n) - 1, 0), \\
 P[S(n+1)|S(n)] &= P_{1,2}(b, s_{1,2}(n)); \\
 s_{1,2}(n) &= D_F, \\
 b &\in \{D_1, D_F\}, \\
 S(n+1) &= (k, 1, b, f_{1,k}(n), h_{1,1}(n), 0),
 \end{aligned}$$

$$P[S(n+1)|S(n)] = \mathbf{P}_{1,1}(b, D_F). \quad (22)$$

若选定多个状态进行维护,则需要对不同维护参数确定的每一个待维护状态参照式(21)计算状态数,并由式(22)再次更新状态转移矩阵.随后,根据新的状态转移矩阵可以得出新的系统性能.对于不同需要维护的状态数通过遗传算法得到最优的完成时间.

假定对于一个具有双退化机器的生产模型,待加工工件批次为1,工件数为40,缓冲区容量为3,调整时间为1,两台机器的退化参数如下:

$$\mathbf{P}_{1,1} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.3 & 0 & 0.7 \end{bmatrix}; \mathbf{P}_{1,2} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.75 & 0.20 \\ 0 & 0.75 & 0.25 \\ 0.70 & 0 & 0.30 \end{bmatrix}.$$

根据第3.1节的退化规则,仅对第1台机器的最后1个工作状态进行维护,选定 $r_1 = 1, x_1 = D_W$,该实例总计有219种维护状态数,对于不同的维护状态数由前文分析可得最优完成时间.由该实验参数可知,随着维护状态数的增加,最优完成时间也在降低.这说明对于一些生产系统,该维护策略能够降低完成时间.但是,维护需要投入,维护操作越多,花费也越多,因此,需要根据实际情况选择合理的维护操作.

4 数值实验

基于以上分析,假设多批次双退化机分布式串行生产结构如图8所示.待加工工件批次为15,总共有3条生产线,每条生产线由两台具有退化模型的机器及一个有限容量的缓冲区组成.

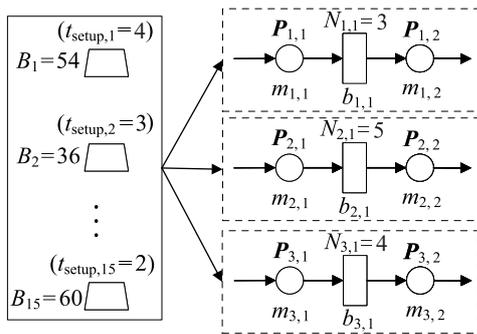


图8 多批次双机分布式串行生产结构

柔性生产线系统相关参数是随机等概率选取的,具体选取范围: $B_k \in \{20, 21, \dots, 100\}, t_{\text{setup},k} \in \{1, 2, \dots, 5\}$.基于此,实验选取 $B = (54, 36, 28, 49, 75, 66, 45, 24, 50, 88, 48, 72, 27, 55, 60), t_{\text{setup},k} = (4, 3, 5, 3, 4, 2, 1, 4, 4, 3, 2, 1, 5, 4, 2)$,每条生产线两台机器的退化参数如下:

$$\mathbf{P}_{1,1} = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.82 & 0.12 \\ 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0.75 & 0 & 0.25 \end{bmatrix}, \mathbf{P}_{1,2} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.85 & 0.10 \\ 0 & 0.85 & 0.15 \\ 0.80 & 0 & 0.20 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_{2,1} = \begin{bmatrix} 0.04 & 0.82 & 0.14 \\ 0 & 0.82 & 0.18 \\ 0.73 & 0 & 0.27 \end{bmatrix}, \mathbf{P}_{2,2} = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.86 & 0.12 \\ 0 & 0.83 & 0.17 \\ 0.78 & 0 & 0.22 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_{3,1} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.79 & 0.16 \\ 0 & 0.80 & 0.20 \\ 0.71 & 0 & 0.29 \end{bmatrix}, \mathbf{P}_{3,2} = \begin{bmatrix} 0.04 & 0.82 & 0.14 \\ 0 & 0.81 & 0.19 \\ 0.76 & 0 & 0.24 \end{bmatrix}.$$

基于第2节的分析方法,设定初始种群规模为100,迭代次数为20,交叉概率为0.9,变异概率为0.05.通过实验得到的最优生产分配编码为Code 1=(3, 2, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 3, 3, 2, 1, 2),对其进行解码(即在第1条生产线上加工的批次为 $B_5, B_6, B_7, B_8, B_{14}$,在第2条生产线上加工的批次为 $B_2, B_4, B_{10}, B_{13}, B_{15}$,在第3条生产线上加工的批次为 $B_1, B_3, B_9, B_{11}, B_{12}$).对于每条生产线($l = 1, 2, 3$)的实时生产率 PR_l 和消耗率 CR_l 如图9所示.

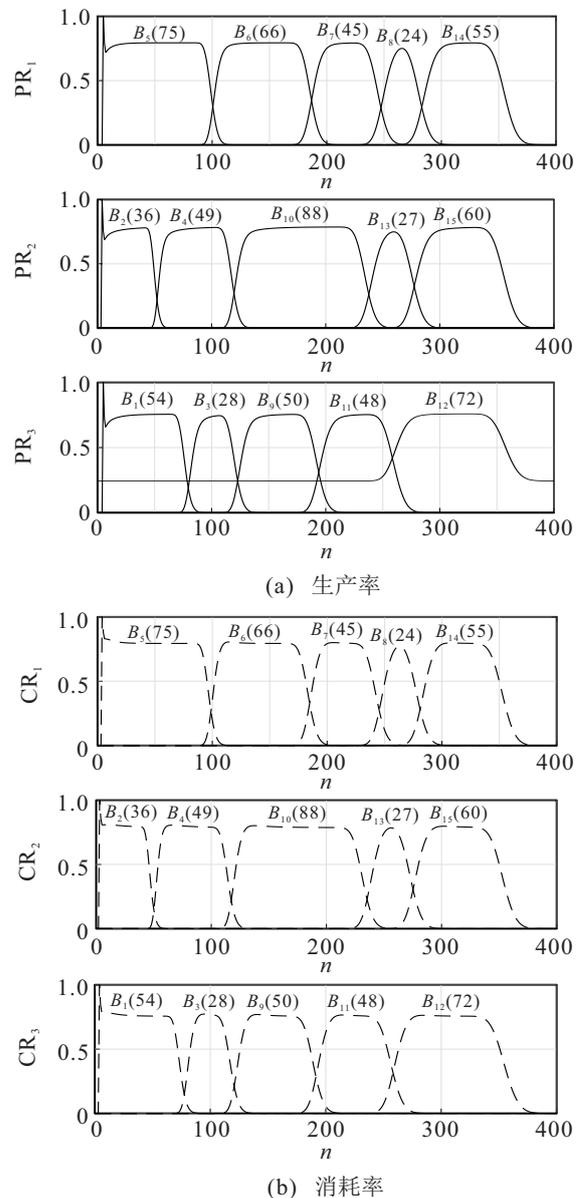


图9 每条生产线的实时生产率及消耗率

对比两种较为常见的分配方式: 工件按顺序依次循环分配给生产线1、2、3, 编码为Code 2= (1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 2, 3)、工件均匀分成3组, 前5批次工件在第1条生产线上加工, 第6~第10批次工件在第2条生产线上加工, 最后5批次工件在第3条生产线上加工, 编码为Code 3= (1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 3). 3种方式对应每条生产线完成时间及系统最大完成时间如表3所示. 实验结果表明, 对于小批量多品种工件, 该基于退化模型的分布式柔性生产线的数学分析方法是可行的, 可以利用本文所提出的算法求解基于退化模型的多批次生产调度问题.

表3 3种分配方式对应的完成时间

完成时间	生产线1	生产线2	生产线3	max(CT)
Code 1	355.8	357.2	358.4	358.4
Code 2	354.2	330.1	388.1	388.1
Code 3	330.8	371.7	369.6	371.7

5 结论

随着越来越多智能制造战略的推广和应用, 近年来柔性生产系统频繁出现. 通过对机器设备进行及时的调整, 柔性生产能够生产小批量、多品种的产品, 满足不同的加工定制要求. 在这种情况下, 由于大部分生产过程处于暂态, 传统的稳态分析方法已不再适用. 因此, 本文通过考虑基于退化机器模型的小批量分布式生产柔性生产系统, 研究了暂态性能分析问题. 具体而言, 针对基于退化模型的分布式柔性生产调度问题建立了数学模型, 可适应不同规模的退化机器调度问题; 通过马尔科夫方法准确推导状态转移矩阵方程, 给出了计算单机和双机生产线性指标的数学表达式; 提出了一种预测性维护方法, 有利于改善系统性能, 减短生产的完成时间; 针对该数学模型下的调度问题采用遗传算法优化完成时间, 并通过数值实验验证了所提出算法的有效性.

就目前工作而言, 有关分布式柔性生产系统还有很多工作等待进一步研究. 未来的研究工作包括多机生产线暂态性能分析问题, 对于具有其他机器可靠性模型的分布式生产系统及调度优化算法方面的改进也将被研究.

参考文献 (References)

[1] 王圣尧, 王凌, 许焯, 等. 求解混合流水车间调度问题的分布估计算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(3): 437-443.
(Wang S Y, Wang L, Xu Y, et al. An estimation of distribution algorithm for solving hybrid flow-shop

scheduling problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(3): 437-443.)

[2] Zhang G H, Xing K Y, Cao F. Scheduling distributed flowshops with flexible assembly and set-up time to minimise makespan[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(9): 3226-3244.

[3] Chen J C, Jia Z Y, Huang L Z, et al. Transient performance evaluation of flexible production lines with two bernoulli machines and dedicated buffers[C]. IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering. Hong Kong, 2020: 836-841.

[4] Jia Z Y, Zhang L. Serial production lines with geometric machines and finite production runs: Performance analysis and system-theoretic properties[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(8): 2247-2262.

[5] Lee S, Ni J. Joint decision making for maintenance and production scheduling of production systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(5/6/7/8): 1135-1146.

[6] Inman R R, Blumenfeld D E, Huang N J, et al. Survey of recent advances on the interface between production system design and quality[J]. IIE Transactions, 2013, 45(6): 557-574.

[7] Ju F, Li J S, Xiao G X, et al. Modeling, analysis, and improvement of integrated productivity and quality system in battery manufacturing[J]. IIE Transactions, 2015, 47(12): 1313-1328.

[8] Teti R, Jemielniak K, O' Donnell G, et al. Advanced monitoring of machining operations[J]. CIRP Annals, 2010, 59(2): 717-739.

[9] Cholette M E, Djurdjanovic D. Degradation modeling and monitoring of machines using operation-specific hidden Markov models[J]. IIE Transactions, 2014, 46(10): 1107-1123.

[10] Bian L K, Gebraeel N. Stochastic modeling and real-time prognostics for multi-component systems with degradation rate interactions[J]. IIE Transactions, 2014, 46(5): 470-482.

[11] Colledani M, Tolio T. Integrated quality, production logistics and maintenance analysis of multi-stage asynchronous manufacturing systems with degrading machines[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 455-458.

[12] 李金忠, 夏洁武, 曾小荃, 等. 多目标模拟退火算法及其应用研究进展[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(8): 77-88.
(Li J Z, Xia J W, Zeng X H, et al. Survey of multi-objective simulated annealing algorithm and its applications[J]. Computer Engineering & Science, 2013, 35(8): 77-88.)

[13] Bhosale K C, Pawar P J. Material flow optimisation of production planning and scheduling problem

- in flexible manufacturing system by real coded genetic algorithm (RCGA)[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2019, 31(2): 381-423.
- [14] 夏小云, 周育人. 蚁群优化算法的理论研究进展[J]. *智能系统学报*, 2016, 11(1): 27-36.
(Xia X Y, Zhou Y R. Advances in theoretical research of ant colony optimization[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2016, 11(1): 27-36.)
- [15] 刘小华, 林杰. 基于遗传粒子群混合算法的供应链调度优化[J]. *控制与决策*, 2011, 26(4): 501-506.
(Liu X H, Lin J. Scheduling optimization in supply chain based on GA-PSO hybrid algorithm[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(4): 501-506.)
- [16] 王凌, 邓瑾, 王圣尧. 分布式车间调度优化算法研究综述[J]. *控制与决策*, 2016, 31(1): 1-11.
(Wang L, Deng J, Wang S Y. Survey on optimization algorithms for distributed shop scheduling[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 1-11.)
- [17] Yazdani M, Gohari S, Naderi B. Multi-factory parallel machine problems: Improved mathematical models and artificial bee colony algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 81: 36-45.
- [18] Naderi B, Azab A. Modeling and heuristics for scheduling of distributed job shops[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(17): 7754-7763.
- [19] 吴锐, 郭顺生, 李益兵, 等. 改进人工蜂群算法求解分布式柔性作业车间调度问题[J]. *控制与决策*, 2019, 34(12): 2527-2536.
(Wu R, Guo S S, Li Y B, et al. Improved artificial bee colony algorithm for distributed and flexible job-shop scheduling problem[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(12): 2527-2536.)
- [20] Lin J, Zhang S. An effective hybrid biogeography-based optimization algorithm for the distributed assembly permutation flow-shop scheduling problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 97: 128-136.
- [21] Shao W S, Pi D C, Shao Z S. A Pareto-based estimation of distribution algorithm for solving multiobjective distributed no-wait flow-shop scheduling problem with sequence-dependent setup time[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(3): 1344-1360.
- [22] Wang W B. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 106: 165-178.
- [23] 吴秀丽, 张志强, 赵宁, 等. 超启发式文化基因算法优化生产与预维修集成调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(8): 1885-1896.
(Wu X L, Zhang Z Q, Zhao N, et al. Production scheduling and preventive maintenance plan optimization with hyper-heuristics memetic algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(8): 1885-1896.)
- [24] 吴慧, 王冰. 基于预防维护的单机调度问题[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 395-402.
(Wu H, Wang B. Single-machine scheduling problem with preventative maintenance activities[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(2): 395-402.)
- [25] Jia Z Y, Huang L Z, Chen J C. Order-reduced dynamic decoupling approach for performance evaluation of multitype and small-batch-based serial lines with adjustments and resets[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(3): 3902-3912.

作者简介

黄龙珠(1996—), 女, 硕士生, 从事生产系统性能分析与任务调度的研究, Email: longzhu.huang@bit.edu.cn;

贾之阳(1988—), 男, 特别副研究员, 博士, 从事复杂生产系统建模与优化的研究, E-mail: zhiyang.jia@bit.edu.cn;

王遵君(1998—), 男, 硕士生, 从事生产系统性能分析与任务调度的研究, E-mail: zunjun.wang@bit.edu.cn;

田秀璇(1999—), 女, 硕士生, 从事生产系统性能分析与任务调度的研究, Email: xiuxuan.tian@bit.edu.cn.