

控制与决策

Control and Decision

两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型

甘婕, 张文字, 王磊, 张晓红

引用本文:

甘婕, 张文字, 王磊, 等. 两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 1377–1386.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题](#)

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time

控制与决策. 2021, 36(6): 1387–1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681>

[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>

[基于随机系数回归模型的退化过程及维修策略](#)

Degradation process and maintenance planning based on random coefficient regression model

控制与决策. 2021, 36(3): 754–760 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1087>

[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>

[基于多班教学优化的多目标分布式混合流水车间调度](#)

Multi-class teaching-learning-based optimization for multi-objective distributed hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(2): 303–313 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0549>

两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型

甘 婕[†], 张文宇, 王 磊, 张晓红

(1. 太原科技大学 工业与系统工程研究所, 太原 030024; 2. 装备制造业创新发展研究中心, 太原 030024)

摘 要: 为了解决生产调度过程中由系统维护维修产生的资源闲置和时间成本增加问题, 将系统维修与生产调度联合建模. 在众多学者将系统作为整体进行生产调度与维修研究的基础上, 考虑系统内各组成部件之间的复杂关系. 针对具有经济相关性的两部件系统, 以调度作业加工顺序、预防性维修阈值、机会维修阈值作为决策变量, 考虑到两部件同时维修比单部件独立维修更为经济, 将机会维修引入到建模之中, 制订机会维修、预防性维修、故障后更换的视情维修与生产调度结合的联合策略, 通过劣化状态空间划分法给出生产调度过程中所有维修组合及其对应维修概率, 推导出联合概率密度函数, 建立以最小化总加权期望完成时间为目标的联合优化模型. 通过数值实验和灵敏度分析验证所提出的策略及模型的有效性.

关键词: 两部件系统; 视情维修; 生产调度; 机会维修; 劣化状态空间划分; 联合优化模型

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1357

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 甘婕, 张文宇, 王磊, 等. 两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1377-1386.

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems

GAN Jie[†], ZHANG Wen-yu, WANG Lei, ZHANG Xiao-hong

(1. Division of Industrial and System Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Research Centre for Innovation and Development of Equipment Manufacturing Industry, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to solve the problem of resource idleness and time cost increase caused by system maintenance in the production scheduling process, the system maintenance and production scheduling are modelled jointly. On the basis of many scholars' research on production scheduling and maintenance, this paper considers the complex relationship among the components in the system. Focusing on a system composed of two components with economic relevance, the processing order, preventive maintenance threshold and opportunistic maintenance threshold of scheduling jobs are taken as decision variables. At the same time, considering that the simultaneous maintenance of two components is more economical than the independent maintenance of a single component, the opportunistic maintenance is introduced into the modelling. The joint strategy of condition based maintenance and production scheduling is formulated, which contains opportunistic maintenance, preventive maintenance and corrective maintenance. All the possible maintenance requirement during the production scheduling process and their corresponding probabilities is presented, as well as the joint probability density is derived using the deterioration state space partition method. A joint optimization model is established to minimize the total weighted expected completion time. Numerical experiments and sensitivity analyses are conducted to verify the validation of the proposed strategy and established model.

Keywords: two-component systems; condition based maintenance; production scheduling; opportunistic maintenance; deterioration state space partition method; joint optimization model

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2020-01-14.

基金项目: 山西省自然科学基金项目(201801D121166); 山西省高校科技创新项目(201802091); 国家自然科学基金青年科学基金项目(71701140, 61703297); 太原科技大学校博士启动基金项目(20162021); 山西省高等学校人文社会科学重点研究基地项目(201801032); 山西省重点研发计划项目(201703D111011).

责任编辑: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: ganjies_cn@sina.com.

0 引言

生产调度在制造业中承担着重要的角色,已成为企业提高资源利用率、降低生产成本进而获得最大收益的关键环节,因此得到了国内外诸多学者的广泛关注^[1-2]. 在传统调度的研究中,常常假设系统持续可用,然而,在实际加工过程中,生产系统会随着不断的运行而出现老化、磨损等劣化现象,若没有及时安排维修会导致设备故障,造成生产任务的延误;同时,系统的运行状况会直接影响生产效率,进而影响企业收益. 为了解决此类问题,有学者开始对生产调度过程中系统的维护维修问题进行研究.

系统维修与作业调度相互制约且互相影响,二者联合优化问题是工业生产领域的一个重要研究方向. 文献[3]以单设备系统为研究对象,考虑了系统维护维修与生产调度的集成问题,通过实验结果对比显示,将二者集成考虑后单位时间费用率平均降低近80%;文献[4]研究了与文献[3]一样的联合优化问题,考虑了不同的约束条件和优化目标,结果显示,与传统方法相比,联合优化后成本可节约10%;在此基础上文献[5]以最小化总加权期望完成时间为目标,采用故障更换、预防性视情维修、小修相结合的维修策略,进行了生产调度与设备维修的联合策略研究;文献[6]考虑了系统的劣化状态及虚拟役龄,将预防性维修决策与生产调度联合研究,建立了以总期望成本最小为目标的集成模型;文献[7]以调度作业完工时间最小为目标,对生产调度和维修决策问题进行了分析;文献[8]采用了基于设备劣化状态的控制限策略,并考虑了冲击模式的系统劣化过程,研究了随机柔性JobShop调度的集成问题;文献[9]主要对生产调度与系统维修中的鲁棒性进行了研究;沿着该思路,文献[10]引入了系统性能可靠性约束,将系统的鲁棒性和稳定性作为模型优化的目标;文献[11]以最小化完工时间作为优化目标,对流水线生产与预防性维护集成调度进行了研究.

目前将生产调度和系统维修二者集成研究的文献较多,但诸多学者在对生产调度和系统维修研究时,大都将单机生产系统看成一个整体,并未考虑系统内各部件之间的相互关系. 然而,随着现代工业的发展,生产系统结构变得越来越复杂,诸多单机生产系统是由两个及以上的关键部件组成,各个组成部件间存在较强的依赖关系,任意部件的运行状况都会对整个生产系统的运行产生影响,并间接影响调度作业的正常加工. 因此,考虑设备中各关键部件的运行状态并安排恰当的维修活动,对于研究设备的健康状态及系统整体生产运作具有重要意义.

随着科学技术的发展,加工过程中系统的劣化状态或表示劣化程度的状态参数可通过现代传感、监测技术直接或间接获得^[12],根据系统劣化状态安排维修活动的视情维修策略(condition-based maintenance, CBM)逐渐被人们熟知并应用于实际当中. 文献[13]以两部件系统为研究对象,制定了预防更换、机会更换与故障更换结合的维修策略,并基于半更新理论建立了平均费用率模型;文献[14]以部件维修为切入点,考虑了部件因老化而不能完全维修的情况,建立了串联系统可用度分析模型;文献[15]同样以两部件串联系统为研究对象,假设当部件劣化状态大于事先定义的故障阈值时,部件不会马上发生故障,而是继续劣化到下一个检测或维修时刻,并建立了多控制限视情维修优化模型.

此后的文献开始向多部件研究扩展,文献[16]在对多部件系统维修的研究中引入了机会维修,并通过对比证明了机会维修的存在可节约大量时间及费用;文献[17]与文献[15]做了相同的假设,但对设备劣化运行安排了成本惩罚;文献[18]分析了影响部件退化速度的因素,建立了以单位时间费用率最小为目标的多部件系统退化过程解析模型;文献[19]在对多部件系统维修策略优化研究中,将最优方程转化为线性规划问题,采用聚合迭代算法进行了优化求解,建立了多部件系统折扣准则模型.

在前人的研究中,针对多部件系统的维护维修较为常见,但将多部件维修与生产调度的联合研究却未见报道,然而在现实生产过程中系统维修与生产调度相互影响,二者结合紧密,故本文以此为研究契机,在单机调度与维修集成的基础上考虑设备内部各部件之间的经济依赖关系,针对由两关键部件组成的单机生产系统,提出机会维修、预防性维修、故障后更换的混合视情维修与生产调度结合的联合策略,利用劣化状态空间划分的方法表示两部件系统在生产调度过程中存在的维修活动组合,并在推导出概率密度函数的基础上求出各维修组合发生的概率,建立以最小化总加权期望完成时间为目标的两部件视情维修与生产调度联合优化模型,最后通过对比及灵敏度分析验证所建模型的有效性.

1 系统描述

1.1 系统劣化特征及假设

本文关注的是由两个独立同分布的关键部件组成的单机生产系统,每个部件在其生命周期内遭受连续的磨损累积劣化,其劣化水平是一个可通过检测获取的随机物理量,服从Gamma连续随机分布,且系统中任意一个部件的故障都会导致系统故障. 相关假

设如下:

1) 任意离散时刻 $t = k\Delta t (k \in N)$ 检测到部件 m 的劣化状态为 z_t^m , 用 $(z_k^m)_{k \in N}$ 表示该部件在无穷多个离散时刻 t 的劣化过程.

2) 当 $t = 0$ 时, $z_0^m = 0$ 表示在初始时刻部件 m 处于全新状态.

3) 设部件 m 的劣化增量 $\Delta z_k^m = z_k^m - z_{k-1}^m (k \in N)$ 是非负、稳定、独立且服从概率密度函数为 $f(z)$ 的随机变量, 在 t 个时间单位内, 其劣化增量的概率密度函数为 $f(z)$ 的 t 次卷积, 记为 $f^{(t)}(z)$.

1.2 符号定义

决策变量定义如下:

x_{ij} : 生产调度的决策变量;

D_P : 预防性维修阈值, 即预防性维修的决策变量;

D_O : 机会维修阈值, 即机会维修的决策变量.

其他符号定义如下:

n : 待加工作业的总数量;

m : 系统中部件编号;

d : 系统中部件编号 ($d \neq m$);

i : 调度序列中待加工作业的编号;

j : 作业自身的编号;

p_j : 作业 j 的加工时间;

ω_j : 作业 j 的权值;

$p_{[i]}$: 调度序列中, 第 i 项作业的加工时间;

$\omega_{[i]}$: 调度序列中, 第 i 项作业的权值;

$c_{[i]}$: 调度序列中, 第 i 项作业的完成时间(确定的情况);

$C_{[i]}$: 调度序列中, 第 i 项作业的完成时间(随机的情况);

D_F : 故障后更换阈值;

$z_{[i]}^m$: 调度序列中, 第 i 项作业完成时部件 m 的劣化值.

1.3 联合优化策略

基于不可续的调度问题, 设定在每项调度作业完成之后对系统进行检测, 根据检测情况安排相应的维修活动. D_O 、 D_P 、 D_F 分别为机会维修阈值、预防性维修阈值、故障更换阈值, 且满足 $0 < D_O < D_P < D_F$. 针对两部件系统, 联合优化策略如下.

第 i 项调度作业完成后:

1) 若任意部件 m 的劣化状态 $z_{[i]}^m$ 超过其故障更换阈值 D_F , 则对该部件进行故障更换, 更换时间为 t_{CM} , 更换后该部件恢复为全新.

2) 若任意部件 m 的劣化状态 $z_{[i]}^m$ 满足 $D_P < z_{[i]}^m < D_F$, 则进行非完美预防性维修, 预防性维修时

间为 t_{PM} , 维修后该部件状态恢复到好于当前状态的某一非新状态, 即当前部件劣化状态为 $z_{[i]}^m$, 维修后劣化状态随机回退到 $\eta_{[i]}^m z_{[i]}^m$. 其中, $\eta_{[i]}^m$ 为劣化量的回退因子, 设定 $\eta_{[i]}^m$ 服从 $(0, 0.5)$ 的均匀分布, 表示为 $\eta_{[i]}^m \sim U(0, 0.5)$.

3) 在任意部件 m 进行预防性维修或故障更换的同时, 若部件 $d (d \neq m)$ 的检测状态满足 $D_O < z_{[i]}^d < D_P$, 则对其进行机会维修, 机会维修效果为非完美维修, 且维修时间与预防性维修时间相同; 但由于机会维修提前结束了部件的可运行寿命, 为了在目标函数中体现该损失, 将成本损失折合到时间域内, 给予每单位劣化量的时间惩罚为 t_d .

4) 若两个部件的劣化状态都低于相应的预防性维修阈值, 则不安排维修活动, 继续加工下一项作业, 其劣化状态在完成上一项作业的基础上继续劣化; 考虑到不同的维修方式花费的维修时间不同, 故当有两个部件同时维修时, 总维修时间按维修时间最长计算. 系统的运行和维修过程如图 1 所示.

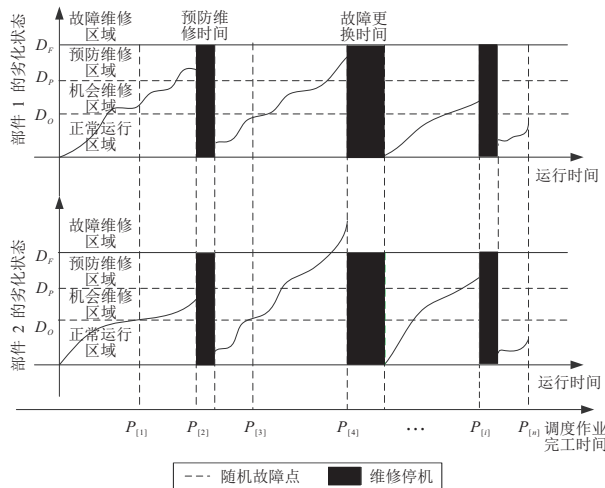


图 1 两部件系统视情维修与生产调度联合决策

图 1 中 $p_{[1]} \sim p_{[n]}$ 分别代表第 1 项到第 n 项调度作业的加工时间. 在 $p_{[1]}$ 时刻, 没有部件需要维修; $p_{[2]}$ 时刻, 部件 1 需要预防性维修, 由于部件 2 的劣化状态满足机会维修条件, 同时对其进行机会维修; 在 $p_{[4]}$ 时刻, 由于部件 2 处于故障维修区域, 对其进行故障更换, 同时检测到部件 1 的劣化状态满足预防维修条件, 因此, 部件 2 的更换与部件 1 的预防性维修活动同时进行.

2 联合优化模型

2.1 生产调度模型

假设调度序列中同一位置在同一时刻只能加工一项作业, 所有作业在加工过程中不允许被其他作业或维修活动中断, 系统在整个调度过程中始终可用, 且加工过程中出现的故障可在加工作业结束后进行

维修(即软故障). 生产调度决策变量表达式为

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 项调度作业为作业 } j; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$. 第 i 项调度作业的加工时间为

$$p_{[i]} = \sum_{j=1}^n p_j x_{ij}. \quad (2)$$

第 i 项调度作业的权值为

$$\omega_{[i]} = \sum_{j=1}^n \omega_j x_{ij}. \quad (3)$$

第 i 项调度作业的完成时间为

$$c_{[i]} = \sum_{k=1}^i p_k. \quad (4)$$

生产调度模型表示如下:

$$f = \min \sum_{i=1}^n (\omega_{[i]} c_{[i]}). \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

$$x_{ij} = 0, 1, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

式(5)为生产调度模型的优化目标;式(6)~式(8)为目标函数约束条件,分别表示调度序列中任意位置只能安排一项加工作业,且每项加工作业只能在一个位置上进行加工.该模型以最小化总加权期望完成时间为目标,但并未考虑由于作业调度过程中设备的停机维修而产生的系统不可用时间,故在此基础上引入视情维修,将两部件系统视情维修与生产调度联合建模.

2.2 两部件视情维修与生产调度的联合优化模型

在两部件视情维修与生产调度的联合模型研究中, a, b, h 分别表示进行故障更换、预防维修、机会维修的部件个数,以最小化总加权期望完成时间为目标,第 i 项加工作业的完成时间包括作业加工时间及系统维修时间,其具体表达式为

$$E(C_{[i]}) = \sum_{k=1}^i \{ p_{[k]} + \sum_{1 \leq a+b+h \leq 2} (I_{(a>0)} t_{CM} + I_{(a=0 \& b>0)} t_{PM} + I_{(a>0 \text{ or } b>0 \& h>0)} t_d(D_P - D_O)) P_{C_a P_b O_h[k]} \}. \quad (9)$$

其中: $p_{[k]}$ 表示第 k 项作业的加工时间; $P_{C_a P_b O_h[k]}$ 表示第 k 项作业完成时维修需求组合 $C_a P_b O_h$ 发生的

概率. 考虑到当有两个部件同时进行某种维修时,维修时间按较长的计算,并且只计算一次,故引入指示函数 $I_A(x)$, 定义 $I_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A; \\ 0, & x \notin A. \end{cases}$ 当 $a > 0$ 时,即

有部件进行故障更换,此时无论故障更换的部件个数 a 取 1 还是 2,指示函数 $I_{(a>0)}$ 只取 1,故 $I_{(a>0)} t_{CM}$ 表示部件故障更换的时间;同理, $I_{(a=0 \& b>0)} t_{PM}$ 表示部件预防性维修的时间; $I_{[(a>0 \text{ or } b>0) \& h>0]} t_d(D_P - D_O)$ 表示安排机会维修而给予的惩罚时间. 建立两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型如下:

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_{[i]} E(C_{[i]}). \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

$$x_{ij} = 0, 1, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

$$0 < D_O < D_P < D_F. \quad (14)$$

式(10)为优化目标,即最小化调度作业的总加权期望完成时间;式(11)~式(13)同式(6)~式(8)为目标函数的约束条件;式(14)为维修活动阈值的取值范围.

3 劣化状态空间划分及概率计算

3.1 劣化状态空间划分

在图1中,根据维修阈值将部件劣化状态划分为正常运行区 ($0 \sim D_O$)、机会维修区 ($D_O \sim D_P$)、预防维修区 ($D_P \sim D_F$) 和故障更换区 ($D_F \sim \infty$). 在每个作业完成时对部件劣化状态进行检测,根据劣化状态所处的区域安排不同的维修活动,分别为 $0 \sim D_O$ 区域内不维修、 $D_O \sim D_P$ 区域内进行机会维修、 $D_P \sim D_F$ 区域内进行预防性维修、 $D_F \sim \infty$ 区域内进行故障更换. 在两部件系统的劣化状态划分中,部件的维修阈值线相互交叉,产生了更多不同的区域^[20],具体空间划分见图2.

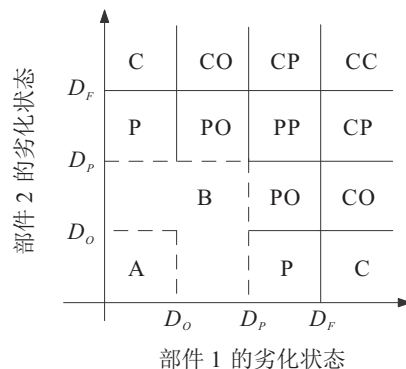


图2 两部件系统劣化状态空间划分

图2给出了两部件系统劣化状态空间划分,不同区域表示不同的维修活动组合. 区域A为两部件劣化状态均处于 $0 \sim D_O$,系统正常运行;区域B处于机会维修区,即有一个或两个部件等待机会维修,当有部件预防维修或故障更换时才能给予机会对其进行维修;各维修组合通过分解形式表示, $C_1P_0O_0$ 简化为C,表示只有一个部件进行故障更换, $C_1P_0O_1$ 简化为CO,表示一个部件进行故障更换且一个部件进行机会维修.

在具体的建模计算过程中,维修需求组合及对应概率是计算的关键,而维修需求分组概率计算的基础为系统概率密度函数的推导,下面在假设系统概率密度函数存在且为 $\pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2)$ 的情况下,给出两部件系统各种维修组合及相应概率的计算式.

3.2 维修需求分组概率计算

设定两部件劣化过程服从Gamma随机分布, $\Omega(z_{[i]}^m)$ 表示部件 m 在第 i 项调度作业完成时的概率密度函数. 考虑维修情况下的系统概率密度函数为两部件各自概率密度函数的乘积,即 $\pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) = \Omega(z_{[i]}^1)\Omega(z_{[i]}^2)$;下面将对存在的维修组合概率计算进行具体说明.

根据维修活动对应的维修阈值对系统概率密度函数进行积分,可得第 i 项调度作业完成时维修需求组合 $C_0P_1O_0$ 发生的概率

$$P_{C_0P_1O_0[i]} = \int_0^{D_O} \int_{D_P}^{D_F} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2 + \int_{D_P}^{D_F} \int_0^{D_O} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (15)$$

根据上述分析过程,同理得到其他维修组合的概率计算如下:

$$P_{C_0P_1O_1[i]} = \int_{D_P}^{D_F} \int_{D_O}^{D_F} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2 +$$

$$\int_{D_O}^{D_P} \int_{D_P}^{D_F} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (16)$$

$$P_{C_0P_2O_0[i]} = \int_{D_P}^{D_F} \int_{D_P}^{D_F} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (17)$$

$$P_{C_1P_0O_0[i]} = \int_{D_F}^{\infty} \int_0^{D_O} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2 + \int_0^{D_O} \int_{D_F}^{\infty} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (18)$$

$$P_{C_1P_0O_1[i]} = \int_{D_O}^{D_P} \int_{D_F}^{\infty} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2 + \int_{D_F}^{\infty} \int_{D_O}^{D_P} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (19)$$

$$P_{C_1P_1O_0[i]} = \int_{D_P}^{D_F} \int_{D_F}^{\infty} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2 + \int_{D_F}^{\infty} \int_{D_P}^{D_F} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (20)$$

$$P_{C_2P_0O_0[i]} = \int_{D_F}^{\infty} \int_{D_F}^{\infty} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (21)$$

系统中各维修组合及对应的概率已经得到,但该计算均是假设系统的概率密度函数存在且为 $\pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2)$ 的情况下得出的,故下面将对系统的概率密度函数进行推导.

3.3 概率密度函数推导

当 $i = 1$ 时,第1项调度作业完成,系统运行时间为 $p_{[1]}$,此时检测到部件 m 的劣化状态为 $z_{[1]}^m$,劣化值的增量为 $z_{[1]}^m - z_{[0]}^m$,此时系统概率密度函数表示为

$$\pi(z_{[1]}^1, z_{[1]}^2) = \Omega(z_{[1]}^1)\Omega(z_{[1]}^2). \quad (22)$$

其中

$$\Omega(z_{[1]}^1) = f^{(p_{[1]})}(z_{[1]}^1 - z_{[0]}^1), \quad (23)$$

$$\Omega(z_{[1]}^2) = f^{(p_{[1]})}(z_{[1]}^2 - z_{[0]}^2). \quad (24)$$

当 $i = 2$ 时,第2项调度作业完成,系统在第1项作业完成或维修后运行了 $p_{[2]}$ 个时间单位,两部件劣化值分别达到 $z_{[2]}^1, z_{[2]}^2$,此时的概率密度函数 $\Omega(z_{[2]}^m)$ 需考虑第1项调度作业完成时系统的劣化情况和进行过的维修活动,第1项作业加工完成时根据两部件的劣化状态 $z_{[1]}^m$ 可知系统存在的维修情况,详见图3.

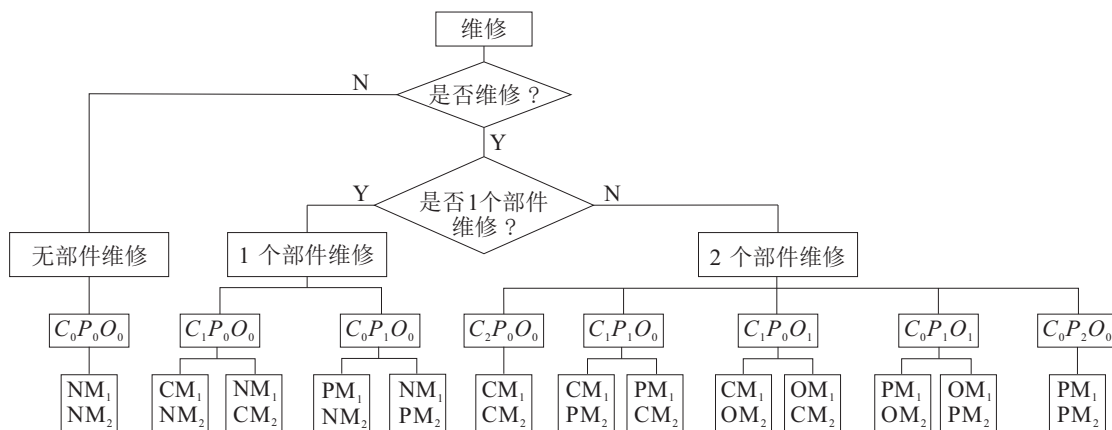


图3 第1项调度作业完成时两部件可能的维修活动组合

图3列出了第1项调度作业完成时系统存在的维修情况,将其分为无部件维修(设定为情况1)和有部件维修(设定为情况2),有部件维修分为1个部件维修和2个部件维修.根据存在的维修活动情况,可将第2项作业完成时系统概率密度函数表示为

$$\begin{aligned} \pi(z_{[2]}^1, z_{[2]}^2) = & \\ & \pi_{C_0P_0O_0} + \pi_{C_1P_0O_0} + \pi_{C_0P_1O_0} + \pi_{C_2P_0O_0} + \\ & \pi_{C_1P_1O_0} + \pi_{C_1P_0O_1} + \pi_{C_0P_1O_1} + \pi_{C_0P_2O_0}. \quad (25) \end{aligned}$$

其中: $\pi_{C_0P_0O_0}$ 表示第1项调度作业完成时系统无部件维修的概率密度函数; $\pi_{C_1P_0O_0} + \pi_{C_0P_1O_0}$ 表示存在一个部件维修的概率密度函数; $\pi_{C_2P_0O_0} + \pi_{C_1P_1O_0} + \pi_{C_1P_0O_1} + \pi_{C_0P_1O_1} + \pi_{C_0P_2O_0}$ 表示两个部件维修的概率密度函数.以部件 m 为例,下面将针对以上情况进行具体分析.

情况1 系统在第1项调度作业加工完成后,无部件需要维修.说明两部件的劣化状态均处于 $(0, D_P)$ 区间内,第2项调度作业开始,系统运行了 $p_{[2]}$ 个时间单位,部件劣化状态达到 $z_{[2]}^m$,此时需考虑:

1) 当 $z_{[2]}^m < D_P$ 时,由于第1项调度作业完成时部件没有被维修,有 $0 < z_{[1]}^m < z_{[2]}^m$ 成立,第2项作业加工开始时,系统不被维修的概率可表示为 $\int_0^{z_{[2]}^m} \Omega(z_{[1]}^m) dz_{[1]}^m$;

2) 当 $z_{[2]}^m > D_P$ 时,由于第1项调度作业完成部件未安排任何维修活动,有 $0 < z_{[1]}^m < D_P$ 成立,第2项调度作业开始时,系统不被维修的概率可表示为 $\int_0^{D_P} \Omega(z_{[1]}^m) dz_{[1]}^m$.

总之,系统在第2项调度作业开始之前无部件维修的概率表示为 $\int_0^{\min(z_{[2]}^m, D_P)} \Omega(z_{[1]}^m) dz_{[1]}^m$,部件继续劣化 $p_{[2]}$ 个时间单位,并达到 $z_{[2]}^m$ 的概率密度函数为 $f^{(p_{[2]})}(z_{[2]}^m - z_{[1]}^m)$.因此,在第1项调度作业完成时两部件均未安排维修活动的概率密度函数表示为

$$\begin{aligned} \Omega(z_{[2]}^m) = & \\ & \int_0^{\min(z_{[2]}^m, D_P)} \Omega(z_{[1]}^m) f^{(p_{[2]})}(z_{[2]}^m - z_{[1]}^m) dz_{[1]}^m. \quad (26) \end{aligned}$$

情况2 系统在第1项调度作业加工完成后,有部件需要维修,维修活动分为以下两种情况:

1) 假设部件 m 进行了故障更换,则可知部件在第1项调度作业加工完成时劣化状态在 (D_F, ∞) 范围内,维修概率表示为 $\int_{D_F}^{\infty} \Omega(z_{[1]}^m) dz_{[1]}^m$,故障更换后部件劣化状态为0,系统运行 $p_{[2]}$ 个时间单位后,劣化状态从0劣化到 $z_{[2]}^m$ 的概率密度为 $f^{(p_{[2]})}(z_{[2]}^m)$.因此,第1项调度作业加工完成时部件进行了故障更换的

概率密度为

$$\Omega(z_{[2]}^m) = \int_{D_F}^{\infty} \Omega(z_{[1]}^m) dz_{[1]}^m f^{(p_{[2]})}(z_{[2]}^m). \quad (27)$$

2) 假设部件 m 进行了预防性维修,同理得到其维修概率为 $\int_{D_P}^{D_F} \Omega(z_{[1]}^m) dz_{[1]}^m$,预防性维修后劣化状态回退到 $\eta_{[1]}^m z_{[1]}^m$,系统继续运行 $p_{[2]}$ 个时间单位后,劣化状态到 $z_{[2]}^m$ 的概率密度为 $f^{(p_{[2]})}(z_{[2]}^m - \eta_{[1]}^m z_{[1]}^m)$.因此,第1项调度作业加工完成时进行预防性维修的概率密度表示为

$$\Omega(z_{[2]}^m) = \int_{D_P}^{D_F} \Omega(z_{[1]}^m) dz_{[1]}^m f^{(p_{[2]})}(z_{[2]}^m - \eta_{[1]}^m z_{[1]}^m). \quad (28)$$

至此已经得到部件在第1项调度作业完成时维修与不维修情况所对应的概率密度函数,而系统的概率密度为两部件存在的所有维修组合所对应的概率密度函数相加所得,根据图3所列第1项调度作业完成时两部件系统存在的各种维修组合,可将系统概率密度函数表示如下:

1) 没有部件维修,表示为 $(NM_{[1]}^1, NM_{[1]}^2)$,其概率密度函数表示为

$$\pi_{C_0P_0O_0} = \Omega_{NM_{[1]}^1} \Omega_{NM_{[1]}^2}. \quad (29)$$

其中: $\Omega_{NM_{[1]}^1}$ 表示第1项调度作业完成时部件1不维修的概率密度函数; $\Omega_{NM_{[1]}^1} \Omega_{NM_{[1]}^2}$ 表示没有部件维修时系统的概率密度函数.

2) 一个部件的维修包含情况: $(CM_{[1]}^1, NM_{[1]}^2)$, $(NM_{[1]}^1, CM_{[1]}^2)$, $(PM_{[1]}^1, NM_{[1]}^2)$, $(NM_{[1]}^1, PM_{[1]}^2)$,其概率密度函数表示为

$$\begin{aligned} \pi_{C_1P_0O_0} + \pi_{C_0P_1O_0} = & \\ & \Omega_{CM_{[1]}^1} \Omega_{NM_{[1]}^2} + \Omega_{NM_{[1]}^1} \Omega_{CM_{[1]}^2} + \\ & \Omega_{PM_{[1]}^1} \Omega_{NM_{[1]}^2} + \Omega_{NM_{[1]}^1} \Omega_{PM_{[1]}^2}. \quad (30) \end{aligned}$$

3) 同理可以得到两个部件维修包含的情况,其概率密度函数表示为

$$\begin{aligned} \pi_{C_2P_0O_0} + \pi_{C_1P_1O_0} + \pi_{C_1P_0O_1} + \pi_{C_0P_1O_1} + \pi_{C_0P_2O_0} = & \\ & \Omega_{CM_{[1]}^1} \Omega_{CM_{[1]}^2} + \Omega_{CM_{[1]}^1} \Omega_{PM_{[1]}^2} + \Omega_{PM_{[1]}^1} \Omega_{CM_{[1]}^2} + \\ & \Omega_{CM_{[1]}^1} \Omega_{OM_{[1]}^2} + \Omega_{OM_{[1]}^1} \Omega_{CM_{[1]}^2} + \Omega_{PM_{[1]}^1} \Omega_{OM_{[1]}^2} + \\ & \Omega_{OM_{[1]}^1} \Omega_{PM_{[1]}^2} + \Omega_{PM_{[1]}^1} \Omega_{PM_{[1]}^2}. \quad (31) \end{aligned}$$

同时可以得到部件 m 在第 i 项调度作业完成时存在的各维修活动所对应的概率密度

$$\Omega_{CM_{[i]}^m} = \int_{D_F}^{\infty} \Omega(z_{[i-1]}^m) dz_{[i-1]}^m f^{(p_{[i]})}(z_{[i]}^m), \quad (32)$$

$$\Omega_{PM_{[i]}^m} =$$

$$\int_{D_P}^{D_F} \Omega(z_{[i-1]}^m) dz_{[i-1]}^m f^{(p_{[i]})}(z_{[i]}^m - \eta_{[i-1]}^m z_{[i-1]}^m), \quad (33)$$

$$\Omega_{OM_{[i]}^m} = \int_{D_O}^{D_P} \Omega(z_{[i-1]}^m) dz_{[i-1]}^m f^{(p_{[i]})}(z_{[i]}^m - \eta_{[i-1]}^m z_{[i-1]}^m), \quad (34)$$

$$\Omega_{NM_{[i]}^m} = \int_0^{\min(z_{[i]}^m, D_O)} \Omega(z_{[i-1]}^m) dz_{[i-1]}^m \times f^{(p_{[i]})}(z_{[i]}^m - z_{[i-1]}^m). \quad (35)$$

因为系统的概率密度为各维修组合的概率密度求和,而各维修组合的概率密度为两部件各自概率密度乘积,将部件在情况1、情况2中所推导出的概率密度函数计算结果代入式(25),提取公因式并化简,得到第2项调度作业加工完成后系统劣化状态达到 $z_{[2]}^m$ 的概率密度

$$\pi(z_{[2]}^1, z_{[2]}^2) = I_{[2]} + II_{[2]} + III_{[2]}. \quad (36)$$

其中

$$I_{[2]} = \Omega_{OM_{[2]}^1} (\Omega_{CM_{[2]}^2} + \Omega_{PM_{[2]}^2}), \quad (37)$$

$$II_{[2]} = \Omega_{NM_{[2]}^1} (\Omega_{CM_{[2]}^2} + \Omega_{PM_{[2]}^2} + \Omega_{NM_{[2]}^2}), \quad (38)$$

$$III_{[2]} = (\Omega_{CM_{[2]}^1} + \Omega_{PM_{[2]}^1}) \times (\Omega_{CM_{[2]}^2} + \Omega_{PM_{[2]}^2} + \Omega_{OM_{[2]}^2} + \Omega_{NM_{[2]}^2}). \quad (39)$$

至此,第2项调度作业完成时系统的劣化状态达到 $z_{[2]}^m$ 的概率密度函数已求出,因为每项作业完成时部件可能存在的维修活动都为图3中所列情况,依此类推,根据第*i*-1项调度作业加工完成后系统劣化到 $z_{[i-1]}^m$ 时可能存在的维修和不维修情况,得到第*i*项调度作业加工完成时系统的概率密度函数计算通式

$$\pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) = I_{[i]} + II_{[i]} + III_{[i]}. \quad (40)$$

其中

$$I_{[i]} = \Omega_{OM_{[i]}^1} (\Omega_{CM_{[i]}^2} + \Omega_{PM_{[i]}^2}), \quad (41)$$

$$II_{[i]} = \Omega_{NM_{[i]}^1} (\Omega_{CM_{[i]}^2} + \Omega_{PM_{[i]}^2} + \Omega_{NM_{[i]}^2}), \quad (42)$$

$$III_{[i]} = (\Omega_{CM_{[i]}^1} + \Omega_{PM_{[i]}^1}) \times (\Omega_{CM_{[i]}^2} + \Omega_{PM_{[i]}^2} + \Omega_{OM_{[i]}^2} + \Omega_{NM_{[i]}^2}). \quad (43)$$

至此系统的联合概率密度函数已得到,将其代回到概率计算式中可得各维修组合概率,将概率计算结果代入目标函数中即可得到相应目标值。

4 算例分析

设定故障更换阈值 $D_F = 10$;单位时间内部件劣化值的增量 Δz 服从参数为(3.5, 0.25)的Gamma分布,即 $\Delta z \sim \Gamma(3.5, 0.25)$; $t_d = 1$; $t_{PM} = 3$; $t_{CM} = 10$ 。

此算例分析的运行环境为Windows 7,设备处理

器为Inter(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2 @ 2.10 GHz,内存(RAM)为32.0 GB,实验运行平台为Matlab 2016a.遗传算法的运行参数统一设置为:种群大小为25,最大遗传代数为100,交叉概率为0.8,变异概率为0.1,代沟为0.8,模拟次数为20。

4.1 两种联合策略优化结果对比

在前人维修与生产调度的联合优化建模中,多应用预防维修与故障更换结合的维修策略,即在调度作业完成时进行检测,若有部件劣化状态处于 (D_P, ∞) 内,则对该部件进行预防性维修或故障更换,其余部件不做处理;以两部件为例,生产调度与系统维修一次实现过程如图4所示,整个过程不考虑机会维修,将此维修策略定义为联合策略1,本文考虑机会维修的策略定义为联合策略2。

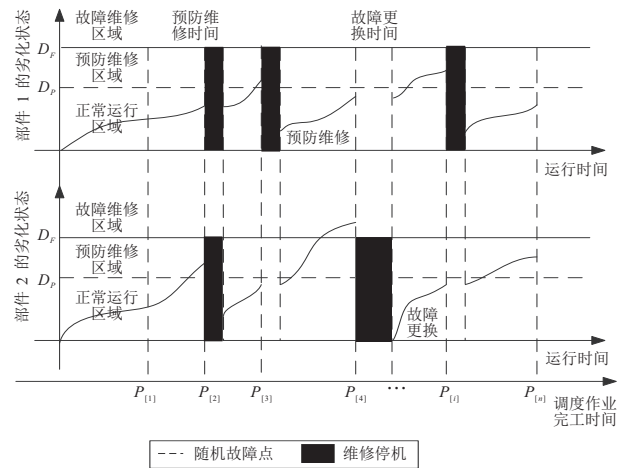


图4 采用联合策略1的两部件维修与调度

在 $p_{[1]}$ 时刻,没有部件需要维修; $p_{[2]}$ 时刻,部件2进行预防性维修,系统停机,部件1闲置等待;到 $p_{[3]}$ 时刻,部件1进行预防性维修,系统停机,部件2闲置等待;到 $p_{[4]}$ 时刻,部件2进行故障更换,系统停机,部件1再次闲置等待;之后每个作业完成时根据部件劣化状态安排相应的维修活动.整个过程中由于没有考虑机会维修导致系统多次停机,机器或部件多次闲置等待,造成时间和资源的浪费。

根据联合策略1所得第*k*项加工作业的期望完成时间

$$E(C_{[i]}) = \sum_{k=1}^i \left\{ p_{[k]} + \sum_{1 \leq a+b \leq 2} (I_{(a>0)} t_{CM} + I_{(a=0 \& b>0)} t_{PM}) \times P_{C_a P_b [k]} \right\}. \quad (44)$$

关于第*k*项调度作业完成时维修组合 $C_a P_b$ 发生概率 $P_{C_a P_b [k]}$ 的分析过程类似于本文3.2节,计算思路为两部件在只有故障更换和预防性维修两种维修

活动时,存在的维修活动组合为 C_0P_1 、 C_0P_2 、 C_1P_0 、 C_1P_1 和 C_2P_0 五种,根据不同维修活动所对应的维修阈值对概率密度函数进行积分,得到概率计算结果为

$$P_{C_0P_1[i]} = \int_0^{D_P} \int_{D_F}^{D_F} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2 + \int_{D_F}^{D_F} \int_0^{D_P} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (45)$$

$$P_{C_0P_2[i]} = \int_{D_P}^{D_P} \int_{D_F}^{D_F} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (46)$$

$$P_{C_1P_0[i]} = \int_{D_F}^{\infty} \int_0^{D_P} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2 + \int_0^{D_P} \int_{D_F}^{\infty} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (47)$$

$$P_{C_1P_1[i]} = \int_{D_P}^{D_P} \int_{D_F}^{\infty} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2 + \int_{D_F}^{\infty} \int_{D_P}^{D_P} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (48)$$

$$P_{C_2P_0[i]} = \int_{D_F}^{\infty} \int_{D_F}^{\infty} \pi(z_{[i]}^1, z_{[i]}^2) dz_{[i]}^1 dz_{[i]}^2. \quad (49)$$

同样以最小化加权期望总完成时间为目标函数,根据联合策略1建立两部件系统维修与生产调度联合优化模型(同式(10)).

设定 n 项调度作业加工时间为服从 $1 \sim 7$ 均匀分布的随机数,即 $p_j \sim U(1, 7)$;加工作业对应的权值为服从 $1 \sim 10$ 均匀分布的随机整数,即 $\omega_j \sim U(1, 10)$.调度作业加工时间与其对应权值如表1所示.

表1 调度作业加工时间与其对应权值

j	p_j	ω_j	j	p_j	ω_j
1	4.60	8	6	4.71	7
2	6.32	2	7	3.62	4
3	1.51	1	8	5.81	2
4	3.24	4	9	1.88	9
5	6.27	6	10	4.82	5

取表1中调度作业的加工时间及所对应的权值,根据联合策略1所建模型进行优化后所得结果如表2所示.

表2 联合策略1对应的优化结果

调度序列	D_P	目标值
4-1-6-5-9-7-10-3-8-2	6.73	286.82

本文采用联合策略2进行建模求解,联合决策模型见2.2节,同样取表1中调度作业的加工时间及所对应的权值,根据联合策略2所建模型进行优化后得到的结果如表3所示.

表3 联合策略2对应的优化结果

调度序列	D_P	D_O	目标值
10-2-5-6-3-1-4-8-7-9	5.80	3.19	224.87

比较表2与表3在两种不同联合策略下所得的优化结果,采用联合策略2所建模型得到的调度作业加权总完成时间为224.87,比采用联合策略1所建模型得到的加权总完成时间286.82降低了61.95.在两部件系统中,当任意部件进行维修活动时,对其他部件检测并安排相应机会维修活动,可减少剩余部件停机闲置时间,进而降低系统加工作业总完成时间,提高系统效率.因此,将两部件系统视情维修与生产调度联合研究可以获得更优的目标值.

为了证实本文根据联合策略2所建模型在较长的时间宽度下仍具备有效性,同时说明在不同加工作业规模下依然优于根据联合策略1所建模型,故随机产生了30项、50项、100项加工作业时间 p_j 及对应权值 ω_j ,通过遗传算法进行优化,优化结果如表4所示.

表4 不同加工规模下两种联合策略建模优化结果

规模	策略1	策略2	降低值
30项	874.07	751.72	122.35
50项	1435.83	1237.26	198.57
100项	2972.41	2582.65	389.76

在表4中列出了不同加工规模下两种联合策略对应的优化结果,根据表4中数据可以看出,30项调度作业根据联合策略1建模优化结果为874.07,同等条件下根据联合策略2所建模型优化结果为751.72,相比降低了122.35.当作业规模扩大到50项、100项时,根据联合策略2对应的优化结果比联合策略1对应的优化结果分别降低了198.57和389.76.结果表明,当视情维修与生产调度进行联合决策时,所得调度作业加权期望总完成时间更小,并且随着调度作业规模增大效果更为明显,验证了所建模型的有效性.

4.2 灵敏度分析

在数值实验中,由于参数值的不同会对目标函数结果产生不同程度的影响,下面将从预防性维修时间与故障更换时间比值和部件劣化速度两方面对模型灵敏度进行分析.

两种联合策略的对比中,均涉及预防性维修时间和故障更换时间,对其值更改会对决策变量甚至目标函数产生影响.在其他参数不变的情况下,仍取表1中调度作业加工时间及所对应的权值,设置预防性维修时间与故障更换时间比值为1/10、5/10、9/10,用遗传算法进行优化,结果如表5所示.

表5 t_{PM}/t_{CM} 对优化结果的影响

t_{PM}/t_{CM}	D_P	D_O	调度序列	目标值
1/10	4.21	2.87	4-9-2-6-5-1-10-7-8-3	201.35
5/10	6.94	4.56	5-9-4-7-8-1-10-6-2-3	258.27
9/10	9.27	5.98	9-8-6-10-5-2-7-4-3-1	312.78

由表5可知,随着预防性维修时间与故障更换时间比值逐渐增大(即部件预防性维修时间逐渐逼近故障更换时间),目标函数值逐渐增大。

当 t_{PM}/t_{CM} 为1/10时,由于 t_{PM} 远小于 t_{CM} ,进行预防性维修花费的时间远小于故障更换的时间,为了避免故障的发生,得到的优化结果中预防性维修阈值为4.21,相比其他情况下较低,而预防性维修阈值较低会增加部件预防性维修的概率,部件频繁进行预防性维修,进而提高系统的可用度。

当 t_{PM}/t_{CM} 为5/10时,目标值由201.35增加到258.27,与 $t_{PM}/t_{CM} = 1/10$ 相比,进行预防性维修花费的时间增多,预防性维修阈值 D_P 也随之增大,由4.21增加到6.94,以降低进行预防性维修的概率,调度序列自适应调整,以得到最优的目标值。

随着 t_{PM}/t_{CM} 比值的增大,当 $t_{PM}/t_{CM} = 9/10$ 时,部件预防性维修花费的时间与故障更换时间接近,为了降低进行预防性维修的概率,得到的优化结果中 D_P 为9.27,与故障更换阈值10接近,调度序列自适应调整,以得到最优的加权期望完成时间。

α 是表示设备或部件劣化速度的参数,其数值的增大或减小即对应设备或部件劣化速度的加快或减慢。为了表明所建模型对劣化速度不同的设备依然适用,在其他参数不变的情况下,取 α 值分别为2.5、3.5、4.5,使用遗传算法进行优化,优化结果如表6所示。

表6 α 对优化结果的影响

α	D_P	D_O	调度序列	目标值
2.5	5.97	3.45	1-2-8-5-4-9-3-7-6-10	197.46
3.5	5.80	3.19	10-2-5-6-3-1-4-8-7-9	224.87
4.5	6.24	4.22	10-9-8-3-5-7-1-2-6-4	277.38

比较不同 α 值对应的优化结果可知,当 α 由2.5变为4.5时,目标值由197.46变为277.38,增加了79.92,即随着 α 的增大,部件劣化速度加快,目标函数值随之增大。预防性阈值、机会维修阈值与调度作业序列自适应调整,以获得更优的目标值。

通过以上分析可知,所建模型对预防性维修时间与故障更换时间比值 t_{PM}/t_{CM} 和部件劣化速度 α 都有良好的灵敏度,表明了联合模型的有效性。

5 结论

本文主要针对生产调度过程中系统维护维修产生的资源闲置和时间成本增加问题,将两部件系统视情维修与生产调度进行联合决策研究。针对具有经济相关性的两部件单机生产系统,在系统维修过程中考虑作业调度,提出了机会维修、预防性维修、故障后更换的混合视情维修与生产调度结合的联合策略,以调度作业的作业顺序、预防性维修阈值、机会维修阈值作为决策变量,通过劣化状态空间划分法表示了调度作业所有维修组合,得到了各维修组合对应概率的计算式,建立了以最小化总加权期望完成时间为目标的两部件视情维修与生产调度联合优化模型。最后对所建模型进行了数值分析,通过不同联合策略的优化结果对比以及参数的灵敏度分析,验证了所建模型的有效性。

本文的研究主要针对两部件系统视情维修与生产调度进行联合建模优化,基于该思路,可以将研究向多部件维修与生产调度集成建模扩展。

参考文献(References)

- [1] Liu B, Xie M, Xu Z G, et al. An imperfect maintenance policy for mission-oriented systems subject to degradation and external shocks[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 102(10): 21-32.
- [2] Kang K C, Subramaniam V. Integrated control policy of production and preventive maintenance for a deteriorating manufacturing system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 118(2): 266-277.
- [3] Pandey D, Kulkarni M S, Vrat P. A methodology for joint optimization for maintenance planning process quality and production scheduling[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61(4): 1098-1106.
- [4] Tambe P P, Kulkarni M S. A superimposition based approach for maintenance and quality plan optimization with production schedule, availability repair time and detection time constraints for a single machine[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 37(1): 17-32.
- [5] 甘婕, 曾建潮. 考虑劣化状态的单机调度与维修决策联合模型[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 513-520. (Gan J, Zeng J C. Integrated model of single machine scheduling and maintenance decision for degrading state systems[J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 513-520.)
- [6] Liu Q, Dong M, Chen F F. Single-machine-based joint optimization of predictive maintenance planning and production scheduling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 51(9): 238-247.
- [7] Cui W W, Lu Z Q. Minimizing the makespan on a

- single machine with flexible maintenances and jobs' release dates[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 80(12): 11-22.
- [8] Rahmati S H A, Ahmadi A, Govindan K. A novel integrated condition-based maintenance and stochastic flexible job shop scheduling problem: Simulation-based optimization approach[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 269(3): 583-621.
- [9] Cui W W, Lu Z, Pan E S. Integrated production scheduling and maintenance policy for robustness in a single machine[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 47(2): 81-91.
- [10] Lu Z Q, Cui W W, Han X L. Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 80(12): 236-244.
- [11] 周炳海, 刘子龙. 考虑衰退的流水车间生产与预防性维护集成调度方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(5): 1272-1278.
(Zhou B H, Liu Z L. Integrated scheduling method of production and preventive maintenance in flow shops with degradation[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(5): 1272-1278.)
- [12] 兰筱琳, 黄茂兴. 工业4.0背景下中国制造业转型升级的现实条件与发展策略[J]. *中国矿业大学学报: 社会科学版*, 2018, 20(5): 47-59.
(Lan X L, Huang M X. The realistic conditions and development strategies of China's manufacturing industry transformation and upgrading of manufacturing industry under the background of industry 4.0[J]. *Journal of China University of Mining & Technology: Social Sciences*, 2018, 20(5): 47-59.)
- [13] 张晓红, 曾建潮. 基于状态空间分割的两部件系统机会维修优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(6): 1547-1560.
(Zhang X H, Zeng J C. State space partition based optimization of the opportunistic preventive maintenance of two-unit systems[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(6): 1547-1560.)
- [14] 李志强, 徐廷学, 顾钧元, 等. 考虑老化因素的串联系统不完全维修决策优化[J]. *控制与决策*, 2019, 34(4): 827-833.
(Li Z Q, Xu T X, Gu J Y, et al. Optimal maintenance policies for series systems under imperfect repair considering aging factor[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(4): 827-833.)
- [15] Castanier B, Grall A, Bérenguer C. A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2005, 87(1): 109-120.
- [16] 徐波, 韩学山, 孙宏斌, 等. 一种适用于发电机组的机会维修模型[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 120-129.
(Xu B, Han X S, Sun H B, et al. A new opportunistic maintenance optimization model for power generating unit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 120-129.)
- [17] Zhu Q, Hao P, Houtum G J V. A condition-based maintenance policy for multi-component systems with a high maintenance setup cost[J]. *Or Spectrum*, 2015, 37(4): 1007-1035.
- [18] 杨志远, 赵建民, 程中华. 退化相关多部件系统预防性维修决策模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(4): 823-832.
(Yang Z Y, Zhao J M, Cheng Z H. Preventive maintenance decision model of multi-component system with degradation interaction[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(4): 823-832.)
- [19] 姚运志, 孟晨, 王成, 等. 基于聚合算法的失效相关多部件系统维修策略优化[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(2): 482-488.
(Yao Y Z, Meng C, Wang C, et al. Optimal maintenance strategy for multi-component system with failure interactions based on aggregation algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(2): 482-488.)
- [20] Zhang X H, Zeng J C. Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 262(2): 479-498.

作者简介

甘婕(1976—), 女, 副教授, 博士, 从事复杂系统优化调度及健康管理等研究, E-mail: ganjies_cn@sina.com;

张文字(1994—), 男, 硕士生, 从事复杂系统优化调度及健康管理的研究, E-mail: 1161589626@qq.com;

王磊(1993—), 男, 硕士生, 从事复杂系统优化调度及健康管理的研究, E-mail: 38112803@qq.com;

张晓红(1980—), 女, 副教授, 博士, 从事复杂系统预测与健康管理及其应用等研究, E-mail: zhangxiaohong1111@126.com.

(责任编辑: 闫妍)