文章编号：1000-8608(2013)05-0749-06

基于客户不满意度的单机干扰管理模型研究

姜 洋*[1]， 孙 伟[1]， 丁秋雷[2]， 张 旭[1]

（1.大连理工大学 机械工程学院，辽宁 大连 116024；
2.东北财经大学 工商管理学院，辽宁 大连 116025）

摘要： 针对干扰事件导致单机调度难以顺利实施这一难题，运用干扰管理思想，建立了字典序的多目标干扰管理模型.模型从客户不满意度的角度对单机调度系统承受的扰动进行了度量，并采用改进的蚁群算法对该模型求解.实例证明，该模型与已有的解决干扰事件的重调度模型相比，得到的调整方案可以使调度系统承受的扰动更小.

关键词： 单机调度；干扰管理；客户不满意度；完工时间
中图分类号： TP301 **文献标志码：** A

0 引 言

单机调度(single machine scheduling，SMS)问题在生产调度中十分重要，它不但可以作为其他调度问题的理论基础，而且对其进行深入研究还可以更好地理解复杂多机调度问题.再者，多机调度问题有时候也可以归结为单机调度问题来处理，例如作业车间中的某台瓶颈机调度问题，就可以归结为单机调度问题.因此，无论从理论还是实践上看，单机调度问题的研究都具有十分重要的意义.

单机调度过程中，经常会发生干扰事件，如机器故障、突然断电、紧急订单的加入等，使得初始调度方案受到影响，甚至变得不可行，此时将会严重影响加工企业的生产成本及运作效率.因此，如何有效、快速地生成调整方案，使干扰事件对调度系统影响最小，是单机调度问题中的核心和难点.干扰管理[1](disruption management)正是一种致力于实时求解上述问题的方法论，目前已成为国际上前沿性的研究方向.根据干扰事件的性质和实际问题的特点，干扰管理方法在初始调度方案的基础上，通过局部优化和调整，快速生成使单机调度系统扰动最小的调整方案.

干扰管理方法自从提出以来，已经被成功应用到了供应链[2-3]、物流[4-5]和航空[6-7]等多个领域.在单机调度研究上，Qi等[8]提出一种处理随机干扰事件或可预测干扰事件的方法.该方法与其他调度方法的不同之处在于：用成本偏差来度量调整方案与初始方案之间的扰动.严培胜等[9]讨论了可分配交付时间的单机调度干扰管理问题，采用不同方法得到了问题的最优解或近似最优解.Abumaizar等[10]提出了处理机器干扰的算法，并从效率和稳定性两方面说明其优势.Lee等[11]讨论了机器调度受到干扰事件影响导致加工中断的情况，并采用干扰管理方法使总加权完工时间和最小.Yang等[12]研究了针对干扰事件的修复方案，该方案既适应环境带来的改变，更接近于初始调度方案.曹晓刚等[13]讨论了基于干扰管理的单机调度问题，重点研究了在原始调度中考虑加权最短加工时间(weighted shortest processing time，WSPT)规则的情形.Wang等[14]研究了当干扰事件可以预测时的单机调度问题，重点讨论了单机环境下初始最优加工时间表是基于加权折扣最短加工时间(weighted discounted shortest processing time，WDSPT)规则的问题.以上学者为解决单机调度干扰问题开辟了新的思路，但是，由于单机调度是一个典型的“人-机”系统，现有研究过分重视物力、财力的调整与优化，而忽略了客户利益，从而导致寻得的最优解往往

收稿日期： 2012-07-04； **修回日期：** 2013-08-05.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(71301020)；国家科技部国际科技合作项目(2011DFB71670).
作者简介： 姜 洋*(1981-)，女，博士生，E-mail：jiangyang928@163.com；孙 伟(1967-)，男，教授，博士生导师.

在实践中并不可行. 因此,针对单机调度干扰管理这一多目标的优化难题,如何把客户因素考虑在内,形成一个可以尽快恢复调度系统正常运行的、多方满意的调整方案,是该领域目前存在的难点问题.

本文运用干扰管理思想,在初始调度方案的基础上,以客户不满意度的偏离作为扰动度量指标,构建单机调度受扰问题的干扰管理模型,并采用改进的蚁群算法 —— 混合蚁群算法,对上述模型进行求解,以期为单机调度过程中干扰事件的处理提供决策支持.

1 单机干扰管理模型研究

单机调度问题可以描述为 n 个工件在一台机器上按照一定的加工方案进行加工. 当初始调度方案制订之后,加工企业需要进行大量的准备工作,如原材料的准备、工作人员的分配等. 初始调度方案受干扰事件影响不再最优或不可行时,制订的新的调整方案势必会对上述准备工作进行相应的调整,此时不但会给加工企业造成一定的经济损失,而且也会给企业造成一定的交付延迟危机. 因此,如何使调整方案尽可能地不偏离初始调度方案,使调度系统受到的扰动影响最小,是本文研究的关键内容.

1.1 扰动度量

客户不满意度能够描述客户的受扰程度,是系统扰动程度的重要度量指标. 当工件能够在订单规定的交付期内交付时,客户的不满意度最低;当工件不能在订单规定的交付期内交付时,随着延迟时间的增加,客户不满意度将随之提高,当超过客户的容忍交付时间时,客户不满意度达到最高值,为 1.

综上,对客户不满意度与工件的完工时间两者的关系进行描述,如图 1 所示.

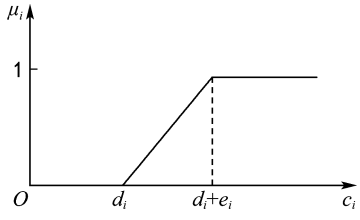


图 1 针对交付时间的客户不满意度函数

Fig. 1 Function of customer dissatisfaction for due time

从图 1 可知,客户不满意度函数可以用下式表示:

$$\mu_i(c_i)=\begin{cases}0;\ c_i\leqslant d_i\\ \dfrac{c_i-d_i}{e_i};\ d_i<c_i\leqslant d_i+e_i\\ 1;c_i>d_i+e_i\end{cases}\quad(1)$$

V 为工件集合,$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$,n 为工件个数;e_i 为 v_i 交货时间的容忍量;d_i 为 v_i 的工期;$\mu_i(c_i)$ 为与 v_i 相对应的客户不满意度,$i=1,2,\cdots,n$.

式(1)是单一客户关于工件交付期的不满意度的度量公式. 对于调度系统中所有客户的整体不满意度度量,需要根据企业的实际情况进行.

1.2 初始调度方案的数学模型

单机调度问题的每项任务都有加工时间、交付时间等参数. 假设需要满足以下约束条件:

(1)工件加工过程中不允许中断或者抢占;

(2)机器只能加工已经到达的工件;

(3)机器在任何时刻都只能对一个工件进行加工;

(4)工件只有一道加工工序.

基于以上描述,建立的单机调度问题的初始调度方案数学模型如下:

$$\begin{aligned}&\min\ \sum_{i=1}^{n}c_i\\ &\text{s.t. } c_i\geqslant r_i+p_i;\ i=1,2,\cdots,n\\ &\quad c_j-c_i+M(1-x_{ij})\geqslant p_i;\\ &\qquad i\neq j,i=1,2,\cdots,n,j=1,2,\cdots,n\\ &\quad c_i-c_j+Mx_{ij}\geqslant p_j;\\ &\qquad i\neq j,i=1,2,\cdots,n,j=1,2,\cdots,n\end{aligned}\quad(2)$$

式中:c_i 为 v_i 的完工时间;p_i 为 v_i 的加工时间;r_i 为 v_i 的到达时刻;M 为一个很大的正数;x_{ij} 为序变量,可以表示为

$$x_{ij}=\begin{cases}1;& v_i\text{ 在 }v_j\text{ 前面进行加工}\\ 0;& \text{其他}\end{cases}$$

在上述数学模型中,目标函数目的是获得一个令所有工件总完工时间和最短的最优加工顺序;第 1 个条件式保证工件到达后机器才开始加工工件;第 2、3 个条件式决定每个工件的先后加工顺序.

1.3 单机干扰管理模型

当系统发生扰动后,本节以 1.2 的模型为基础,建立单机干扰管理模型. 补充界定如下:

(1)对剩余的工件(包括扰动发生时正在加工但没有完成的工件)进行重新加工；

(2)单机调度的初始方案已知；

(3)假设工件 i 的到达时刻 r_i 为 0；

(4)将扰动事件结束的时刻设定为调整方案的“0”时刻.

根据初始调度方案，建立的单机干扰管理的字典序多目标规划(lexicographic multiple goal programming)模型如下：

$$\min L = \mathrm{P}_1: \sum_{i=1}^{m}(\mu(c_i)-\mu(\bar{c}_i)) \quad \mathrm{P}_2: \sum_{i=1}^{m} c_i$$

$$\text{s.t. } c_i \geqslant r_i + p_i;\ i = 1,2,\cdots,m$$

$$c_j - c_i + M(1-x_{ij}) \geqslant p_i;$$

$$i \neq j, i = 1,2,\cdots,m, j = 1,2,\cdots,m$$

$$c_i - c_j + Mx_{ij} \geqslant p_j;$$

$$i \neq j, i = 1,2,\cdots,m, j = 1,2,\cdots,m \quad (3)$$

式中：m 为未完成的工件个数，$m = n-k+1$；V' 为未完成的工件集，$V' = \{v'_1, v'_2, \cdots, v'_m\}$；$v_k$ 为扰动发生时正在加工的工件，$1 \leqslant k \leqslant n$；$\delta$ 为扰动持续的时间；δ_1 为 v_k 已经加工的时间；$\bar{c}_i$ 为未发生扰动时 v'_i 的完工时间，表示为

$$\bar{c}_i = -(\delta+\delta_1) + p_1 + p_2 + \cdots + p_i = -(\delta+\delta_1) + c_i;\ i = 1,2,\cdots,m$$

$h(k+h-1)$ 为扰动发生后，对未完成工件的重新标记，$1 \leqslant h \leqslant m$，其中 $k+h-1$ 为该工件在初始方案中的顺序，如图 2 所示.

上述模型中，式(3)中目标函数表示调整方案尽可能地不偏离初始调度方案，使系统的扰动程度最小，其中第 1 项表示调整方案与初始方案不满意度差值的和，第 2 项表示剩余工件的总完工时间和，P_1、P_2 为不同指标的优先级，实际应用中，可根据决策者的偏好以及客观情况灵活更替；第 1 个条件式确保机器在工件到达后才能加工工件；第 2、3 个条件式决定每个工件的先后加工顺序.

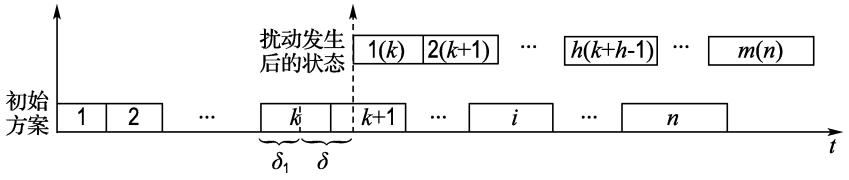


图 2　扰动发生后的状态

Fig. 2　The status after disruption event occurred

2　干扰管理模型的求解

由于单机调度问题的干扰管理模型是一个 NP-hard 问题，且含有多个目标函数，该模型的求解十分困难. 蚁群算法因其具有分布式计算、启发搜索和正反馈等优点，可以有效地应用到上述问题的求解. 但是，为了提高蚁群算法的搜索速度和防止局部最优，本文提出了混合蚁群算法(hybrid ant colony optimization，HACO).

2.1　HACO 的基本原理

HACO 主要通过个体交叉和变异、信息素的调整、集成其他算法等方法来改善算法.

2.1.1　最优个体的交叉及变异　遗传算法的交叉和变异操作，可以有效地提高种群的多样性，防止算法早熟. 因此，为了克服蚁群算法易陷入局部最优的缺点，本文将最优个体的交叉及变异操作应用到蚁群算法中.

(1)交叉操作

假设最优个体编码为 N1，次优个体编码为 N2. 当算法搜索趋向停滞时，对上述两个个体进行交叉操作，交叉规则如下：

随机设定交叉段的起始位置和长度. 假设 N1：M1|M2|M3，N2：H1|H2|H3，M2 和 H2 分别为 N1 和 N2 的交叉段.

将 H2 插入到 N1 中，位于 M2 前面，形成编码 N3：M1|H2|M2|M3.

在 N3 中，删除 M1、M2、M3 中与 H2 重复的编码，形成一个新的编码 N3.

采用同上的方法应用到 N2 上，形成一个新的编码 N4.

将 N1、N2、N3、N4 进行比较，选出一个最优的编码.

(2)变异操作

通过变异操作使最优路径上一段或几段子路

径上的信息素降低,以使算法可以跳出此路径去寻找更好的路径.实验表明,变异有助于摆脱局部最优值.

2.1.2 信息素的调整 由于蚁群一般会选择在信息量较强的路径上运动,这就使得那些离最优解较远的其他路径上的信息素不能得到有效的增强,从而影响蚁群寻找更优解.为了解决上述问题,本文提出了一种将随机性选择和确定性选择相结合的搜索方法.该搜索算法为了获得更好的解空间,减少了最优和最差路径间的信息量差距,并提高了随机选择的选择概率.

在某次搜索后,经过信息素的更新,边上的信息量可能产生大小不均的情况,本文采用最值蚂蚁算法[15]中的方法,控制边信息素在$[\tau_{\min},\tau_{\max}]$,以保证算法在搜索初期可以有较好的搜索范围.

信息素挥发系数$1-\rho$是算法的重要参数,过大或者过小都对算法的性能产生影响,本文采用自适应改变ρ的值以解决上述问题[16].

2.1.3 其他算法的集成 蚁群算法具有很强的耦合性,易与传统的启发式算法结合.交换法是一种通过交换路径来改善求解结果的方法,最初只应用在车辆路径领域.根据交换法的思想,本文提出了一种新的方法——2-opt 交换法,实现对单机调度问题的求解.2-opt 交换法采用调换任意两个工件的加工顺序来保证算法搜索到更好的解.

2.2 HACO 的求解步骤

HACO 求解干扰管理模型的主要步骤如下:

步骤 1 置迭代计数器$n_c=0$.初始化各控制参数,设找到全局最优解B_{global}.

步骤 2 找出每一只蚂蚁所有未完成的任务,并按照式(4),从中选择蚂蚁在工序i的任务j:

$$j=\begin{cases}\arg\max\limits_{j\notin tabu_k}[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}[\eta_{ij}(t)]^{\beta}; & q\leqslant p_t\\ \text{random } j\notin tabu_k; & \text{其他}\end{cases}\tag{4}$$

式中:$tabu_k(k=1,2,\cdots,m)$为禁忌表,记录蚂蚁k当前所有完成的任务;τ_{ij}表示边(i,j)的信息素浓度;η_{ij}表示启发式信息;α、β为信息素浓度和启发式信息的相对重要性;q是一个随机数,$q\in[0,1]$;p_t是确定性选择的概率,它随着进化过程进行动态调整,初始值为$p_0=1$.

步骤 3 当已经完成搜索的蚂蚁总数小于m,返回步骤 2;否则,执行步骤 4.

步骤 4 根据式(3)目标函数中的第一优先层次,获得最优解集$B_{\text{local}i}(i=1,2,\cdots,d)$,其中$d$是最优解的个数.

步骤 5 根据目标函数第一优先层次最优解集,通过式(3)得到第二优先层次,从而得到本次搜索的最优解B_{local},并保存最优排序表.

步骤 6 对B_{local}分别进行交叉和 2-opt 交换操作,以更新B_{local}和最优排序表.

步骤 7 采用小随机概率保证后置边上的信息素为最小值,重新计算B_{local}并更新排序表.

步骤 8 对所有边上的信息素按下式动态更新:

$$\tau_{ij}^{\text{new}}=\rho\tau_{ij}^{\text{old}}+\Delta\tau_{ij}$$

$$\Delta\tau_{ij}=\begin{cases}\dfrac{Q}{B_{\text{local}}}; & e(i,j)\in B_{\text{local}}\\ 0; & \text{其他}\end{cases}\tag{5}$$

式中:Q是一个常数;$1-\rho$是信息素挥发系数,随进化过程动态调整,初始值是 1.

步骤 9 将B_{local}与B_{global}进行比较,如果$B_{\text{local}}<B_{\text{global}}$,则置$B_{\text{global}}=B_{\text{local}}$,并更新最优排序表.

步骤 10 当迭代到一定次数时,为更好地对解空间进行搜索,对p_t和ρ分别进行动态调整:

$$p_t=\begin{cases}0.95p_{t-1}; & 0.95p_{t-1}\geqslant p_{\min}\\ p_{\min}; & \text{其他}\end{cases}\tag{6}$$

$$\rho_n=\begin{cases}0.95\rho_{n-1}; & 0.95\rho_{n-1}\geqslant \rho_{\min}\\ \rho_{\min}; & \text{其他}\end{cases}\tag{7}$$

式中:$p_{\min}$、$\rho_{\min}$分别为p_t和ρ的最小值.

步骤 11 如果n_c小于最大迭代次数,将禁忌表清空,然后跳回步骤 2;否则,算法结束.

3 案例验证

目前,单机调度干扰管理问题还没有标准的测试数据库.为了验证本文方法的有效性,本文假设了一个单机调度受扰问题的案例.这个案例的初始调度方案采用最短加工时间(shortest processing time, SPT)优先规则对所有工件进行排序.

3.1 案例描述

在生产车间中,有 10 个工件需要在车间中的一台瓶颈机上进行加工,工件的详细参数如表 1 所示.已知初始调度方案中,最优加工顺序为 1→2→3→4→5→6→7→8→9→10.

表 1　工件的参数表

Tab. 1　Parameters of jobs

工件	p_i/h	d_i/h	e_i/h
1	2	4	4
2	4	7	10
3	4	16	5
4	5	6	9
5	7	11	8
6	9	15	2
7	10	10	7
8	11	14	9
9	13	15	4
10	15	17	8

3.2　实验结果

当第 3 个工件已经加工 $\delta_1=1$ h 时，该机器发生故障，故障持续的时间为 $\delta=3$ h. 将机器恢复的时间定为“0”时刻，对包括工件 3 在内的剩余 8 个工件进行重新编号.

假设目标函数的重要程度依次为客户不满意度和完工时间和. 本文方法得到的结果与重调度方法得到的结果如表 2 所示.

表 2　结果比较

Tab. 2　Results comparison

方法	工件加工顺序	客户不满意度的扰动	完工时间和/h
本文方法	4→5→3→6→7→8→9→10	0	272
重调度方法	3→4→5→6→7→8→9→10	0.833 3	268

3.3　对比分析

通过对表 2 的结果进行分析，可以得出如下结论：

(1)从客户不满意度度量指标看，本文方法的结果为 0，重调度方法的结果为 0.833 3. 当企业以客户不满意度为首要目标函数时，本文方法优于重调度方法，表明在降低客户不满意度上结果较为理想.

(2)从完工时间和度量指标看，本文方法与重调度方法得到的结果相比多加工了 4 h，但是两者相差不大.

综上所述，当企业将客户不满意度作为企业首先考虑的目标时，与全局重调度方法相比，本文方法以牺牲较小的完工时间换来了客户不满意度较大程度的降低. 虽然从短期看，工件完工时间的增加提高了企业的生产成本，但是从长远看，企业以牺牲较小的完工时间，换来了客户对企业忠诚度的提高，并且可以吸引更多的新客户，从而提高了企业在业界的口碑，符合企业长久发展的需要.

4　结　论

(1)提出基于客户不满意度的扰动度量方法，为衡量单机调度这一复杂“人-机”系统所承受的扰动提供了一个新的思路，有助于提高求解复杂决策问题的科学性和实用性.

(2)构建单机调度的多目标干扰管理模型，为寻找扰动最小的调整方案提供新手段，有利于促进多学科间的交叉与渗透.

该模型通过对目标进行逐级优化，并灵活地调整各个目标的优先级别，能够权衡各方利益，得出多方满意的调整方案，克服了构建单机调度干扰管理模型时，现有研究成果难以满足其多目标性和高度复杂性的缺陷，有利于提高加工企业的决策效率.

由于单机调度是多机调度的特殊形式，为了提高普遍性和适用性，将本文方法进一步深化，使其应用于多机调度问题，是下一步研究的重点.

参考文献：

[1] YU Gang, QI Xiang-tong. **Disruption Management: Framework, Models and Applications** [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2004.

[2] Wakolbinger T, Cruz J M. Supply chain disruption risk management through strategic information acquisition and sharing and risk-sharing contracts [J]. **International Journal of Production Research**, 2011, **49**(13): 4063-4084.

[3] Friesz T L. Supply chain disruption and risk management [J]. **Transportation Research Part B: Methodological**, 2011, **45**(8): 1125-1127.

[4] DING Qiu-lei, HU Xiang-pei, WANG Yun-zeng. A model of disruption management for solving delivery delay [J]. **Smart Innovation, Systems and Technologies**, 2010, **4**: 227-237.

[5] Mu Q, Fu Z, Lysgaard J, *et al*. Disruption management of the vehicle routing problem with vehicle breakdown [J]. **Journal of the Operational Research Society**, 2011, **62**(4): 742-749.

[6] Clausen J, Larsen A, Larsen J, *et al*. Disruption management in the airline industry — concepts,

models and methods [J]. **Computers & Operations Research**, 2010, **37**(5):809-821.

[7] Castro A J M, Oliveira E. A new concept for disruption management in airline operations control [J]. **Journal of Aerospace Engineering**, 2011, **225**(G3):269-290.

[8] QI Xiang-tong, Bard J F, YU Gang. Disruption management for machine scheduling: the case of SPT schedules [J]. **International Journal of Production Economics**, 2006, **103**(1):166-184.

[9] 严培胜,邓 薇,高成修. 单机排序中带可分配工期的总误工问题的应急管理[J]. 高校应用数学学报: A 辑, 2004, **19**(S1):543-549.
YAN Pei-sheng, DENG Wei, GAO Cheng-xiu. Disruption management for single machine scheduling with assignable due dates to total tardiness [J]. **Applied Mathematics a Journal of Chinese Universities: Ser. A**, 2004, **19**(S1): 543-549. (in Chinese)

[10] Abumaizar R J, Svestka J A. Rescheduling job shops under random disruptions [J]. **International Journal of Production Research**, 1997, **35**(7):2065-2082.

[11] Lee C Y, YU Gang. Parallel-machine scheduling under potential disruption [J]. **Optimization Letters**, 2008, **2**(1):27-37.

[12] YANG Jian, QI Xiang-tong, YU Gang. Disruption management in production planning [J]. **Naval Research Logistics**, 2005, **52**(5):420-442.

[13] 曹晓刚,闻 卉,黄崇超. 单机排序中关于完工前总损失的应急管理[J]. 数学物理学报, 2009, **29A**(4):940-948.
CAO Xiao-gang, WEN Hui, HUANG Chong-chao. Disruption management for single machine scheduling on total loss before completion [J]. **Acta Mathematica Scientia**, 2009, **29A**(4):940-948. (in Chinese)

[14] WANG Jian-jun, LIU Feng, HE Ping. Rescheduling under predictive disruption of WSPT schedule for single machine scheduling [J]. **ICIC Express Letters**, 2010, **4**(2):467-472.

[15] Stützle T, Hoos H. Improvements on the ant system: introducing the MAX-MIN ant system [M] // Smith G D, Steele N C, Albrecht R F. **Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms**. Vienna: Springer, 1998:245-249.

[16] 王 颖,谢剑英. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, **14**(1):31-33.
WANG Ying, XIE Jian-ying. An adaptive ant colony optimization algorithm and simulation [J]. **Journal of System Simulation**, 2002, **14**(1):31-33. (in Chinese)

Model study of disruption management based on customer dissatisfaction in single machine scheduling

JIANG Yang*[1], SUN Wei[1], DING Qiu-lei[2], ZHANG Xu[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Business Administration, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China)

Abstract: When the machine encounters disruptions in single machine scheduling, it is usually difficult to generate a new revising plan dynamically to minimize the negative impact. In order to solve the difficult problem, a lexicographic multi-objective disruption management model based on the methodology of disruption management is presented to handle the disruptions. This model adopts customer dissatisfaction to measure the deviation. An improved ant colony optimization is put forward to solve the model. The computational results prove that the model got lower system disturbance than existing global rescheduling model.

Key words: single machine scheduling; disruption management; customer dissatisfaction; completion time