生产物流系统瓶颈资源排产研究

□文／杨思东 刘敏

企业进行生产物流系统组织研究的目的是为了提高生产物流系统的产出率，例如进行产品组合优化、进行缓冲保护等等，但是跟系统产出率关系最为密切的还是资源排产优化部分，因此瓶颈排产成了基于ERP和TOC的生产物流系统的另一关键技术。按照系统论的观点，系统的效率取决于其瓶颈环节的效率。要想发挥系统的效率必须从瓶颈环节出发，充分利用系统中的瓶颈资源。本文旨在研究如何利用启发式算法对生产物流系统的瓶颈资源进行排产，并通过实例进行验证。

按"瓶颈"本来的含义，在一个生产系统中制约产出量的、生产能力最低的环节就是瓶颈，所以在一个系统中瓶颈只有一个。本文讨论的是瓶颈为一台设备下的排序问题。

在实际的生产调度和计划管理中，绝大多数情况需要综合考虑一个作业排序的多个性能指标，如延误交工时间最短、延期交工零件最小、零件平均加工时间最短等，即需要求解多目标函数的最优或近似最优加工顺序。这将增加问题求解难度。

为了找到解决问题的方法，本文在解决瓶颈资源排产问题时采用了多工件多目标排序的模糊产生式方法。该方法根据人工智能的产生式搜索原理，将各种求解单一目标最优或近似最优排序的启发式算法作为产生式规则，利用具有非线性隶属度函数的最小模糊算子为测试条件，从而得到一种求解一台设备n个工件的多目标排序的算法。它在搜索同时满足多个目标排序时，将根据条件测试结果，选择相应的启发式规则，对记录搜索状态的数据库进行操作，使搜索能沿着那些被认为是最有希望的区段扩展。

问题建模

设：有n个工件$J_1、J_2、\Lambda、J_n$在一台设备上加工。其各自的加工时间为$P_1、P_2、\Lambda、P_n$：应交工日期为$d_1、d_2、\Lambda、d_n$。以数字1，2，…，n的排列$\bar{\omega}=(\omega_1、\omega_2、\Lambda、\omega_n)$，表示某一加工次序；用$\int_i(\bar{\omega})$表示排列$(\bar{\omega})$下第i个性能指标的值，$i\in I=\{1,2,\Lambda,r\}$。于是，问题归结为寻求某一排列$\bar{\omega}$使广义综合集结函数$F(\bar{\omega})=U(\int_1(\omega),\int_2(\omega),\Lambda,\int_r(\omega))$达到最小。即

$$\min_{\omega\in\Omega}\{F(\omega)=U(\int_1(\omega),\int_2(\omega),\Lambda,\int_r(\omega))\} \qquad (1)$$

其中Ω是$J=\{J_1,J_2,\Lambda,J_n\}$的全排列集合，共有n！个元素；为目标函数，使$F(\bar{\omega})$达到最小的排列$\bar{\omega}'$称为最优排列。

人们在生产实践中，已总结出一台设备排序问题的上百条性能指标和相应的启发式算法，通过将这些启发式算法当作搜索规则，用来求解多目标作业排序。每条规则都相对独立，可根据实际需要随时进行补充和修改。通常在排产过程中主要考虑的问题就是延期。理想的状态是不出现延期，我们希望寻找到最小延期时间下的排产计划，最大限度的降低延期情况的发生。因此将工件延期交工时间最短和延期交工工件最少的启发式算法作为我们的搜索规则。

工件延期交工时间。

若仅考虑一个目标函数$\int_1(\bar{\omega})$为工件总的延误交工时间，于是，问题就变成如何将$J_1、J_2、\Lambda、J_n$安排一个加工顺序，使总延误时间最短。

令L_i表示工件J_i在任何顺序下的延误时间，C_i为在该顺序下J_i的完工时间。若$d_i\ge C_i$显然J_i的延误时间$L_i=0$；若$d_i<C_i$，则$L_i=C_i-d_i$，所以，

$$L_i=\max(0,C_i-d_i)=\max\{C_i,d_i\}-d_i,\quad i=1,\Lambda,n \qquad (2)$$

因此，上述问题可表述为

$$\min_{\omega\in\Omega}\int_1(\bar{\omega})=\min_{\omega\in\Omega}\sum_{i=1}^{n}L_i^{\bar{\omega}}=\min_{\omega\in\Omega}\left(\sum_{i=1}^{n}\max\{C_i^{\bar{\omega}},d_i\}\quad\sum_{i=1}^{n}d_i^{\omega}\right)$$

2、延期交工零件个数最少。

若仅考虑目标函数$\int_2(\bar{\omega})$为延期交工零件个数，应如何将$J_1、J_2、\Lambda、J_n$安排一个加工顺序，使总的延期交工零件个数最少。同样令C_i为J_i在任一顺序下的完工时间，$C_i=\sum_{k=1}^{i}p_k$。定义：

$$D_i=\begin{cases}1 & C_i-d_i>0\\ 0 & C_i-d_i\le 0\end{cases} \qquad (4)$$

目标是寻找某一$\bar{\omega}$，使$\int_2(\bar{\omega})$为最小。

$$\min_{\omega\in\Omega}\int_2(\bar{\omega})=\min_{\omega\in\Omega}\sum_{i=1}^{n}D_i^{\bar{\omega}} \qquad (4)$$

其中，$D_i^{\bar{\omega}}$为在ω下的D_i值。

算法

启发式算法

解决延期交工时间问题步骤如下：

(a)开始时令W=0，取使n个数

$$\max\{p_i,d_i\}\qquad i=1,2,\Lambda,n \qquad (6)$$

中达到最小的工件排在第一位，记为J_{ω_1}

(b)假设$(\omega_1,\omega_2,\Lambda,\omega_k)$已取定，令$W=p_{\omega_1}+p_{\omega_2}+\Lambda+p_{\omega_k}$，并取使n−k个数

$$\max\{W+p_i,d_i\}\qquad 1\le i\le n,\ i\ne\omega_1,\omega_2,\Lambda,\omega_k \qquad (7)$$

中达到最小的工件排在k+1位，记为$J_{\omega_{k+1}}$。

(c)令k+1→k，返回第二步，直到k=n为止。

解决延期交工工件数量问题步骤如下：

(a)将J_1,J_2,Λ,J_n按其应交工期 从小到大排列，即

$$d_1^{\omega'}\le d_2^{\omega'}\le\Lambda\ d_n^{\omega'} \qquad (8)$$

ω'称为初始排列。

(b)从ω'中找到第一个须延期交工的零件，记为$J1^{\omega_1}$。若无这种零件，ω'就是最优排列。

(c)从$J_1^{\omega_1},J_2^{\omega_1},\cdots,J_1^{\omega_1}$中除去加工时间最长的零件 $J_k^{\omega_1}$，即$P_k^{\omega_1}=\max_i p_i^{\omega'}(i=1,2,\Lambda,l)$，然后，对$J_1^{\omega_1},J_2^{\omega_1},\cdots,J_{k-1}^{\omega_1},J_{k+1}^{\omega_1},\cdots,J_n^{\omega_1}$这n−1个零件继续施行第二步。如此循环，每次循环就除去一个延期交工的零件，直到余下的零件中再没有需延期交工的零件为止。

模糊测试条件

利用Leberling H．提出的最小模糊算子为测试条件，产生式系统将根据条件测试结果给出启发信息，选择相应的操作规则，使搜索沿着那些被认为是最有希望的区段扩展；为了计算最有希望的节点，采取了双曲正切隶属度函数作为估价函数；确定加权系数 。

最小模糊算子

前面描述的多目标排序问题

$$\min_{\bar\omega\in\Omega}\{F(\bar\omega)=U(\int_1(\bar\omega),\int_2(\bar\omega),\Lambda,\int_r(\bar\omega))\} \quad (9)$$

若将其所有目标函数以其相应的隶属度函数表征：

目标函数 → 隶属度函数

$\int_1(\bar\omega)$ $\mu_{\int_1}(\bar\omega)$

M M

$\int_r(\bar\omega)$ $\mu_{\int_r}(\bar\omega)$

则任务就是要通过它们相应的隶属度函数找出同时满足所有目标函数的解。广义综合集结函数

$$\mu_D(\bar\omega)=\mu_D(\mu_{\int_1}(\bar\omega),\mu_{\int_1}(\bar\omega),\Lambda,\mu_{\int_r}(\bar\omega)) \quad (10)$$

式(9)变为$\min_{\bar\omega\in\Omega}\{\mu_D(\bar\omega)=\mu_D(\mu_{\int_1}(\bar\omega),\mu_{\int_1}(\bar\omega),\Lambda,\mu_{\int_r}(\bar\omega))\}$ (11)

定义$\bar\omega^*$是∈Ω(11)的最优解，当且仅当

$$\bigwedge_{\bar\omega\in\Omega}\mu_D(\bar\omega)\le\mu_D(\bar\omega^*) \quad (12)$$

为了确定广义综合集结函数$\mu_D(\bar\omega)$引入Zadeh的最小模糊算子[4]：$\bigwedge_{\bar\omega\in\Omega}\mu_D(\bar\omega):=\min_j(\mu_{\int_j}(\bar\omega))=\min(\mu_{\int_1}(\bar\omega),\Lambda,\mu_{\int_r}(\bar\omega))$

于是得到极大极小问题

$\max_{\bar\omega}\min_j(\mu_{\int_j}(\bar\omega))\quad \bar\omega\in\Omega,\quad j=1,\Lambda,r$ (14)并假设

对每个目标$\int_1,\Lambda,\int_j,\Lambda,\int_r$均存在一个唯一确定的最优解$\bar\omega_1^0,\Lambda,\bar\omega_j^0,\Lambda,\bar\omega_r^0$即

$$\begin{aligned}\bigwedge_{\bar\omega\in\Omega}\int_1(\bar\omega)\ge\int_1(\bar\omega_1^0):&=\int_1^0,\Lambda,\int_j(\bar\omega)\ge\int_j(\bar\omega_j^0):\\&=\int_j^0,\Lambda,\int_r(\bar\omega)\ge\int_r(\bar\omega_r^0):\\&=\int_r^0\end{aligned} \quad (15)$$

对于各目标函数的最优函解以下关系成立：

$\omega_j^0\ne\omega_i^0,\quad i\ne j,\quad i,j=1,\Lambda,r$

目标函数的隶属度函数

采用了双曲正切函数作为目标函数的隶属度函数，以便对搜索过程中出现的各个节点给出综合估价。对第j个目标函数$\int_j(\bar\omega)(j=1,\Lambda,r)$对应的双曲正切隶属度函数定义如下：

$$\begin{cases}\mu_{\int_j}(\bar\omega)=\frac{1}{2}\tanh(Y)+\frac{1}{2}=\frac{1}{2}\cdot\frac{e^Y-e^{-Y}}{e^Y-e^{-Y}}+\frac{1}{2}\\ Y=\frac{1}{2}\left[(\int_j^m+\int_j^0)-\int_j(\bar\omega)\right]\cdot\alpha_j\end{cases} \quad (16)$$

其中：$\int_j^m=\max\{\int_j(\bar\omega_1^0),\Lambda,\int_j(\bar\omega_{j-1}^0),\int_j(\bar\omega_{j+1}^0),\Lambda,\int_j(\bar\omega_r^0)\}$，$\alpha_j$是一参量。

参数矢量α的确定

参数$\alpha=\{\alpha_1,\alpha_2,\Lambda,\alpha_r\}^T$是人为指定的一组矢量。在非确定性环境中，它们可根据人们对各自目标函数的重视程度或根据益损期望值具体确定。如果已知各性能指标的效用值，它们就是一组加权系数。

在未知目标函数的损益期望值和效用值时，可按优化潜力进行加权处理，即

$$\begin{cases}\alpha_1+\alpha_2+\Lambda+\alpha_r=1\\ \dfrac{\alpha_1}{\alpha_2}=\dfrac{\int_2^m-\int_2^0}{\int_1^m-\int_1^0}\\ \mathrm{M}\qquad\mathrm{M}\\ \dfrac{\alpha_{r-1}}{\alpha_r}=\dfrac{\int_r^m-\int_r^0}{\int_{r-1}^m-\int_{r-1}^0}\end{cases}$$

发式搜索策略

产生式系统采用启发式搜索策略：

用前述的单目标启发式算法$R_1,R_2,\Lambda\ R_r$；分别求出各指标函数的最优解或近似最优解：$\bar\omega_1^0$，$\bar\omega_2^0$，Λ；$\bar\omega_r^0$及其性能指标：$\int_1^0,\int_2^0,\Lambda,\int_r^0$。并根据(15)，(17)计算$\int_i^m$及

α_j。$j\in I=\{1,2,\Lambda,r\}$。

将工件J_1,J_2,Λ,J_n按其交工期d_1,d_2,Λ,d_n从小到大排列，得到初始顺序$\bar\omega^{-1}$，放入记忆搜索状态的数据库中，记为$DB^{\bar\omega^1}$。

为了确定最优或近似最优排列$\bar\omega^*$中的第i个工件，对记忆排列$\bar\omega^{i-1}$的数据库状态$DB^{\bar\omega^{i-1}}$，分别应用$R_1,R_2,\Lambda\ R_r$，得到r个排列$\bar\omega_1^i,\bar\omega_2^i,\Lambda,\bar\omega_r^i$。

分别计算$\int_1(\bar\omega_1^i),\int_2(\bar\omega_2^i),\Lambda,\int_r(\bar\omega_r^i)$及$\mu_{\int_1}(\bar\omega_1^i),\mu_{\int_2}(\bar\omega_2^i),\Lambda,\mu_{\int_r}(\bar\omega_r^i)$。

求出满足(14)式的$\bar\omega_l^i$，(=1，…，)并放入数据库，记为$DB^{\bar\omega^i}$。这时数据库$DB^{\bar\omega^i}$将把$\bar\omega_l^i$的第个工件作为最优或近似最优排列$\bar\omega^*$中的第个工件确定下来。这相当于根据条件测试满足(14)，选择适当的规则(R^l)进行操作。

令=1，返回(3)直至=n为止。数据库$DB_{\bar\omega^n}$中记录的即为满足多目标函数的最优或近似最优排列$\bar\omega^*$。

应用实例

应用实例求解两个目标函数[$\int_1(\bar\omega)$——最小延误时间；$\int_2(\bar\omega)$——最少延期工件]的排序问题。结果表明，模糊产生式系统不仅能得到同时满足两个性能指标的折衷解，而且许多情况下还可以改善单目标排序解的精度。

[例] 工件J1≤≤8)的加工时间及应交工期，如表1所示。

表1 加工时间及应交工期

工件	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8
加工时间	15	10	8	20	5	14	6	28
应交工期	33	30	10	20	13	22	27	35

目标启发式算法的解分别是：

$\omega_{[1]}=(J_3,J_5,J_6,J_7,J_2,J_1,J_4,J_8)$

$\omega_{[2]}=(J_3,J_5,J_7,J_2,J_8,J_4,J_6,J_1)$

模糊式产生系统的解为：

$\omega_{PF}=(J_3,J_5,J_7,J_2,J_6,J_1,J_4,J_8)$

它们各自的性能指标，如表2所示。

表2 性能指标

排序性能指标	求解方法		
	最小化延误时间算法	最小化延误工件个数算法	模糊产生式系统
总延误时间 f1(ω)	178	221	175
延期工件个数 f2(ω)	6	4	4

小结

应用模糊产生式系统的多目标排序优化算法，研究了单一瓶颈设备下关键零件的排序问题，并取得了较好的效果。而且目标可以根据具体的要求进行扩展。该研究对其他类似的问题也有很好的参考价值。

作者单位：苏州经贸职业技术学院工商系

（编辑/陈亚南）