

# 基于状态熵模型的单元制造系统复杂性研究

张志峰<sup>1</sup> 谢奉军<sup>1</sup> 肖人彬<sup>2</sup>

1. 南昌航空大学, 南昌, 330063      2. 华中科技大学, 武汉, 430074

**摘要:**研究了制造系统的复杂性与效用的相互关系, 提出效用随复杂性变化的函数关系并绘制出效用随复杂性变化的曲线。依据制造系统复杂性对效用的影响, 分析复杂性在制造系统中的发展趋势, 即制造系统的复杂度在反复调整中呈现不断增大的趋势。根据信息熵原理, 分别建立单元制造系统的静态熵模型、动态熵模型, 作为度量单元制造系统的复杂性的工具, 并对制造系统的状态认定进行了说明。实例求解验证了单元制造系统状态熵模型度量系统复杂性的有效性与实用性。

**关键词:**单元制造; 复杂性; 状态熵; 效用

**中图分类号:**F279.21      **文章编号:**1004—132X(2009)19—2332—05

## Study on Complexity of Cellular Manufacturing Based on State Entropy Models

Zhang Zhifeng<sup>1</sup> Xie Fengjun<sup>1</sup> Xiao Renbin<sup>2</sup>

1. Nanchang Hangkong University, Nanchang, 330063

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

**Abstract:** A utility function for complexity was proposed and its curve was drawn according to the mutual relationship between the complexity and utility in a manufacturing system. The trend that the system become more and more complex was analysed based on the influence of complexity on utility. From the information— theoretical point of view, the models of the static entropy and the dynamic entropy of cellular manufacturing systems were developed and the cognizance of the states of manufacturing resources was also illustrated. Finally, an example was used to demonstrate the validity of the proposed methodology.

**Key words:** cellular manufacturing; complexity; state entropy; utility

## 0 引言

当前, 制造企业都运行在一个充满竞争、内外环境不断改变的复杂系统中, 企业必须具有解决多种产品在相应设备上通过不同加工路线迅速加工生产的能力, 以此来应对快速多变的市场与客户的不同需求, 但这种快速反应的结果就是带来了制造系统的结构与运行复杂度的不断增大。因此, 如何应对制造系统日益凸现的结构与运行复杂性, 并有效地控制和利用其为制造企业服务, 已成为近年来制造领域共同关注的问题之一<sup>[1]</sup>。

单元制造 (cellular manufacturing) 作为当今一种先进生产方式已在众多制造企业得到了不同程度的应用, 而传统的制造企业也可以通过技术改造等方式实现单元制造, 本文以单元制造系统为对象, 对其结构与运行复杂性进行分析研究。

1948年 Shannon<sup>[2]</sup> 首先提出用熵来度量信息量。对于一个给定的制造系统来说, 每一个制造资源的状态是由制造系统的工艺结构 (包括制造系统的元素组成、加工产品的品种与数量、产品工艺路线及其他选项等) 及其运行状况决定的, 因

此, Karp 等<sup>[3]</sup> 认为, 如果能够确定地描述制造资源的工艺结构及其运行状态所需信息量的大小, 就可以达到对制造资源的状态信息进行测度和评价的目的。Deshmukh 等<sup>[4]</sup> 指出, 制造系统的复杂性是制造系统难以被理解、描述、预测和控制的状态, 从信息熵观点看, 它就是指描述制造系统状态所预期需要的信息量。Drestke<sup>[5]</sup> 也将熵用于描述制造系统复杂性, 认为在制造系统中, 设备状态数越多, 其熵值及复杂度越高。Efstathiou<sup>[6]</sup> 也证明了系统熵等于复杂度, 表示用以描述和控制系统状态信息量的总和。Checkland<sup>[7]</sup> 指出制造系统内所计算的信息不同于其普通含义, 它同其复杂性有着关联。

综合以上文献可以看出, 通过对制造系统内元素状态所需信息量的大小的度量, 就可以定量地分析制造系统的复杂度, 进而达到对制造系统实施状态的预测和控制的目的。但在上述研究中, 研究者都是通过建立不同的熵模型对制造系统的复杂性进行度量, 并没有定性分析说明复杂性对制造系统的利弊影响, 即复杂性与效用的相互关系以及制造系统复杂性的发展变化趋势; 另外, 对于代表当今先进生产方式之一的单元制造系统, 也缺乏对其复杂性的深入研究。

本文首先对制造系统复杂性的效用进行深入分析,通过制造系统复杂性与效用函数的相互关系及其随时间的发展变化趋势来说明复杂性对制造系统的影响;然后,依据信息熵原理,分别建立单元制造系统的静态熵模型和动态熵模型,以此对单元制造系统的复杂性进行度量;最后,通过实例的计算求解来说明单元制造的状态熵模型度量制造系统复杂性的有效性和实用性。

### 1 制造系统复杂性及效用分析

由上面的分析可知,通过对制造系统内元素状态所需信息量的大小的度量,就可以对制造系统的复杂性进行预测和控制。由于制造系统的复杂性描述了制造系统状态预期所需要的信息量,其大小说明了制造系统的结构与运行状态的不确定性和不可预测性,因此,理解与掌握制造系统的复杂性内涵,对有效预测和控制制造系统的运行有着重要的意义。

#### 1.1 制造系统复杂性与效用函数

复杂性对制造系统来说并不是一个绝对的概念。也就是说,复杂度大的制造系统并不一定对系统不利;相反地,复杂度小的制造系统也不一定就对系统有利。例如,对一个只有几台设备和几种产品的制造系统来说,由于其产品结构简单,加工路线确定,因此在加工过程中系统的可变因素少,状态稳定,造成系统的复杂度小,利于系统状态的管理和控制;但如果制造系统由于外部需求的改变,增加了产品的种类与数量,此时,由于加工系统设备结构单一,柔性差,因此很难完成对这一需求变化的快速反应,其结果就造成复杂度小的制造系统无法完成加工任务。为解决这一问题,只有增加系统的设备及其配套设施,提高系统的加工制造柔性,这样就相应地增大了系统的结构与运行复杂度。

由以上分析可以看出,对于一个给定的制造系统来说,复杂性既有有利的一面,如复杂度大的系统可以缓冲消化由于系统内外部的突然变化引起的不良影响;也有不利的一面,如复杂度过大,系统的不确定性和可预测性差,则系统状态将难以被管理和控制。由于效用反映了决策人对实际价值的一种偏好,因此我们用效用来表达制造系统复杂性的价值关系。对于制造企业来说,在初期由于复杂度小,并且企业决策人通常对风险的态度也是一个肯定的趋势,即决策人表现为风险追求,根据效用函数的性质,其效用曲线表现为凸函数<sup>[8]</sup>;而当企业系统的效用达到最大后,随着复

杂度的增大,决策人表现为风险厌恶,其效用曲线表现为凹函数。由此,我们可以绘制出制造系统的复杂度与效用的函数变化关系图,见图1。

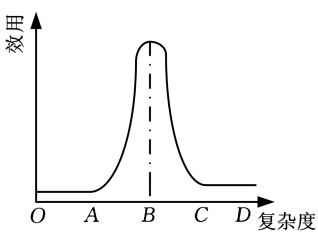


图1 制造系统复杂度与效用函数关系示意图

从图1可以看出,在OA阶段,即制造业发展的初期或平稳期,由于系统生产结构简单或者系统处于常规运行阶段,系统复杂度小,同时系统的生产能力也没有得到最大的发挥,因此制造系统的效用也处于较低的水平;AB阶段,由于内外部环境的突变,系统原有的简单或平衡状态被打破,系统的生产能力逐渐提升,随着复杂度的增大,系统的效用也逐渐增大,在B点达到最大;到BC阶段,当系统的复杂度还在增大时,由于生产任务或生产状态已经超过系统的最大能力或者系统的最佳生产能力,制造系统的效用则随着复杂度的增大而迅速降低;到CD阶段后,系统根据实际情况进行了生产调整,使得生产情况与复杂性相适应,效用与复杂性的关系又进入了下一个变化周期。

#### 1.2 制造系统复杂性趋势

通过上面制造系统复杂性与效用函数关系的分析可以看出,制造系统正是在不断处理复杂性与效用的关系中发展变化的。对制造系统复杂性分析研究的目的是为了控制和适度地降低复杂性,使之与制造系统的生产能力相适应,从而达到效用的最大化。

制造系统对复杂性的管理就是要使系统按预定的调度计划信息运行。如果系统按预计的调度计划生产运行,我们称制造系统处于受控状态;当系统由于内外环境的变化而使调度计划信息发生偏离时(如临时产品的加工,设备故障等),系统则暂时处于相对失控状态,但此时系统的效用可能是正效用,也可能是负效用,比如,由于客户需求增加而追加产品的加工时,对系统是有利的行为,此时应该尽快调整生产,使系统的复杂性重新处于受控状态;如果是由于设备等的故障造成的失控,则对系统是不利的行为,应尽量避免。通过制造系统复杂性与效用的相互关系分析,还可以绘出复杂度随时间的变化趋势图,见图2。

从图2可以看出,制造系统为了获得最大的效用而使系统的复杂度不断增大,但当所达的效用超过了系统的承受能力时,系统必须降低复杂

度,使系统处于受控状态,最后到达一个相对平衡的状态;当系统再次发生变化时,为了获得较大的效用,复杂度又被增大,周而复始地进入下一个周期。但是由于制造系统随着时间的推移,面临的竞争愈加激烈,所处环境更为复杂,因此复杂度总体的变化趋势还是在不断增大,即在图 2 中表现为不断上升的过程。

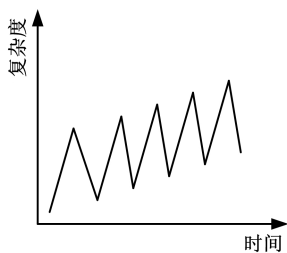


图 2 制造系统复杂度随时间变化趋势示意图

## 2 单元制造状态熵模型

为了建立单元制造系统的状态熵模型,首先,我们对制造系统的状态熵进行定义:描述制造系统在静止状态下每个制造资源预期拥有的状态所需信息量为静态熵,记做  $H_s$ ;描述制造系统在运行过程中各资源的实际状态所需信息量为动态熵,记做  $H_d$ 。这样,只要确定制造系统的静态熵和动态熵的大小,就可以掌握制造资源的运行情况。由 Shannon 信息熵理论可知,系统熵值越大,表明系统状态的不确定性和不可预测性越大,理解它需要掌握的信息越多。因此,通过对制造系统状态熵值的测度来实现对系统状态信息的定量分析,从而更加准确地理解与把握制造系统结构和运行状态的复杂性特征。

### 2.1 单元制造系统特性

由于本文以单元制造系统为研究对象,因此,首先对单元制造系统的特性进行描述。

单元制造是依据成组技术(group technology)原理,以工作单元(workcell)为基本组成,通过对加工设备和作业人员的 U 形布置进行单一产品或多个产品族生产的生产方式,它对降低成本、提高质量、增加制造柔性极为有效。单元制造在一些制造业先进的国家中已经得到了较为广泛的应用,如在德国,40% 的制造型企业已经引入了单元制造系统<sup>[9]</sup>。

工作单元是单元制造的基本组成单位。一个工作单元由加工设备、作业人员和工序间在制品转运设备等组成<sup>[10]</sup>。通常一个工作单元的加工设备被布置成 U 形,作业人员可以在 U 形的工作区域内对不同的设备进行灵活迅速的操作。单元化制造系统不同于传统生产系统递阶式的管理结构和过细、固定的分工方式,每一个相对可以独立的制造单元都可以形成相对独立的制造系统的一个

组成单位,再由若干单元通过网络进行生产管理和协调。

可以看出,单元化制造系统具有独立自主、分布管理、相互约束、协调合作的特点<sup>[11-13]</sup>。采用单元化生产技术可以降低制造系统结构和控制的复杂性,提高设备的利用率,缩短工件的制造周期,使企业取得良好的系统效益。

### 2.2 单元制造静态熵模型

为了导出单元制造系统的静态熵模型,首先引出信息熵定义。

设离散型随机变量  $X$  具有  $n$  个可能的取值  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,且取各值的概率分别为  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ ,则  $X$  的熵定义为

$$E(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i \quad p_i \geq 0, \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (1)$$

如果  $X$  表示一个系统, $x_i$  和  $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$  表示该系统  $n$  个可能的状态及  $n$  个状态发生的概率,则  $E(X)$  为系统  $X$  的信息熵,即描述系统  $X$  时的信息量。 $E(X)$  亦刻画了系统  $X$  不确定性大小,信息熵越大,系统不确定性越大。

式(1)所描述信息熵具有以下特征:①当  $p_i$  中只有一个为 1 且其他均为 0 时,系统信息熵最小,即  $E(X) = 0$ ,此时  $X$  是完全确定性系统;②当系统各状态等概率分布时(即  $p_i = 1/n$ ),系统信息熵最大,且  $E(X) = \lg n$ ,此时  $X$  具有最大不确定性;③任何引起  $p_i$  均等化的系统变化将导致系统不确定性增大,信息熵增大。

根据以上信息熵定义,设某单元制造系统有  $n$  个制造单元,其中第  $k$  个单元内有  $m (m \geq 1)$  个制造资源,其中第  $i$  个资源预期拥有的状态数为  $S_i$ ,且各个资源之间的状态独立。当只有一台机器对一种零件进行一种加工时,这台机器的状态可以用正在加工的产品及空闲时间来定义,由式(1)可得,资源  $i$  的静态熵计算式为

$$H_s = - \sum_{j=1}^{S_i} p_{ij} \lg p_{ij} \quad 1 \leq j \leq S_i, \sum_{j=1}^{S_i} p_{ij} = 1 \quad (2)$$

式中, $p_{ij}$  为资源  $i$  处于预期状态  $j$  的概率。

根据信息熵特性,则单元内  $m$  台资源的静态熵模型为

$$H_s = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{S_i} p_{ij} \lg p_{ij} \quad (3)$$

由该模型可知,对整个制造系统资源状态的控制就转变成了对各个加工单元状态的控制,这样就降低了整个系统的结构复杂性。如果从整体的角度来看待制造单元,那么只需计划和控制整个制造单元的状态,无需掌握单元内每个资源的状态。如果一台机器在运转,那么整个单元处于

运行状态,如果一台机器出现故障,则整个单元处于闲置状态。

评价制造系统结构复杂性的关键是对系统内制造资源状态进行认定。例如,对一离散制造系统,如果只考虑加工设备的负荷问题,则各设备可能的状态可取“产品装配”、“工装调整”、“设备维护”和“设备空闲”等离散事件;如果还考虑各产品的具体生产情况,则可以进一步将各设备状态定义为“装配产品 A”、“加工产品 B”、“产品 A 工装调整”及“产品 B 工装调整”等。由于单元制造系统的静态工艺结构本质上决定了系统可能发生的状态及数量,因此也就决定了单元制造系统的静态熵大小。

### 2.3 单元制造动态熵模型

静态熵只考虑了制造系统预期发生的状态,而动态熵则描述了系统在运行过程中实际发生的状态。单元制造系统的实际状态可分为两类,一类是按计划预期发生的正常状态(受控状态),另一类是发生偏离的异常状态(失控状态,如设备故障、操作超时等)。

根据式(1)、式(2)可相应得出单元制造系统的动态熵计算公式:

$$H'_d = - \sum_{j=1}^{S'_i} p'_{ij} \ln p'_{ij} \quad 1 \leq i \leq S'_i, \quad \sum_{j=1}^{S'_i} p'_{ij} = 1 \quad (4)$$

式中,  $S'_i$  为资源  $i$  在制造系统运行过程中实际发生的状态数;  $p'_{ij}$  为资源  $i$  处于实际状态  $j$  的概率。

设单元制造系统中所有资源的受控状态概率为  $p$ , 其余为失控状态, 资源  $i$  的失控状态数为  $n_i$ , 则整个单元制造系统的动态熵模型为

$$H_d = -p \ln p - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} p'_{ij} \ln p'_{ij} \quad (5)$$

式(5)中的第2项为制造系统运行过程中由于偏离预期状态而产生的动态熵,它表示了单元制造系统在运行过程中的不确定性程度。我们也可以将其整理成

$$H_d = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} p'_{ij} \ln p'_{ij} \quad (6)$$

这里概率  $p'_{ij}$  是实际测量值,而不是进度表中的估计值。同样,  $S'_i$  也是实测值,因为有可能出现失控情况(如机器故障或等待)。

### 2.4 单元制造平均时间熵

对单元制造系统的运行状况产生影响的另一个重要因素是各元素的计划持续时间。前面我们所建立的熵模型是系统的现时熵。一般认为,一个状态迅速改变的系,其复杂性程度高于状态在数小时或数天才变化一次的系,需要对其进度不断实施监控。

我们用  $\Delta_i$  表示设备  $i$  处于某一状态的最短持续时间,式(6)可以改进为平均时间熵的算式:

$$\phi_d = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\Delta_i} \sum_{j=1}^{S'_i} p'_{ij} \ln p'_{ij} \quad (7)$$

式中,  $\phi_d$  为结构平均时间熵。

上述熵模型的建立是在对多设备制造系统的计划与监控的前提下进行的,因此,编写进度计划和进行过程监控尤其重要。若单元制造系统内作业能被预先安排,则设备的所有状态都可定义,即可对不同生产结构进行评价与比较。但定义状态参量时,必须与所需研究的问题性质以及计划的精确度一致。如果精度要求低,观察状态的数量和频度都应减少,这适用于结构复杂性程度较低的制造系统。

## 3 单元制造复杂性实例分析

为说明所建单元制造状态熵模型的求解过程以及实施单元制造对系统复杂性的降低程度,下面应用实例进行说明。

设某制造加工车间有加工设备 20 台 ( $m = 20$ ),待加工零件分为 4 个大类 100 个产品。在实施单元制造之前,车间的设备实行自由式布置,每个零件都要经过其中某个设备的加工处理,其设备布置图见图 3(注:尽管图 3 中设备按次序编号,但其中设备之间并无先后顺序,即自由式布置)。

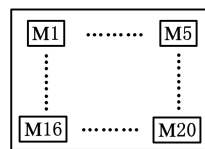


图 3 车间设备自由式布置图

由于生产组织的随机性,因此任意设备的可能状态(包括调度空闲状态)数目为 101 个,而某台设备处于某一状态的实现概率  $p_{ij} = 1/101$ 。为计算方便,这里我们假设车间制造系统的调度均按计划实行,即制造系统的静态熵与其动态熵相同,由此只需计算其中的一个。

由式(3)及式(6)可得

$$H_d = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{S'_i} p_{ij} \ln p_{ij} = - \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{101} \frac{1}{101} \ln \frac{1}{101} = 133 \text{ bit}$$

为提高生产效率,车间实施单元制造。实施后,设备根据产品的四大类结构组成 5 个加工单元(C1~C5),每个制造单元 4 台加工设备(M1~M20),工作单元的加工设备被布置成 U 形,其设备布置图见图 4。

单元制造后,产品也实行成组加工,因此每个加工单元加工 20 件零件。由此,每台设备的可能状态数为 21,因此其  $p_{ij} = 1/21$ 。根据 2.2 节的分

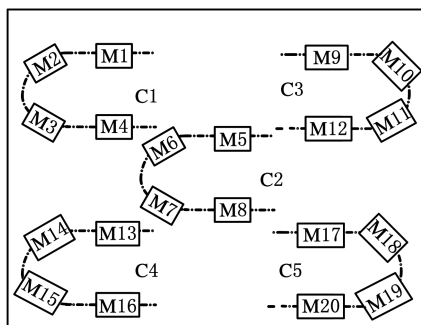


图 4 车间设备单元制造布置图

析,由于实施单元制造后,对整个制造系统资源状态的控制就转变成了对各个加工单元状态的控制。从整体的角度来看待制造单元,只需计划和控制整个制造单元的状态,无需掌握单元内每个资源的的状态。如果 1 台机器在运转,那么整个单元处于运行状态,如果 1 台机器出现故障,则整个单元处于闲置状态。

由式(3)及式(6)可得

$$H'_d = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{s_i} p_{ij} \lg p_{ij} = - \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{21} \frac{1}{21} \lg \frac{1}{21} = 22 \text{bit}$$

通过计算可以看出,制造系统在实施单元制造后,其状态熵值大大降低,其降低程度为  $\frac{H_d - H'_d}{H'_d} = 83\%$ ,也就是说制造系统的复杂度得到了有效降低,从而使得对制造系统的控制更为简单和高效。

#### 4 分析和讨论

通过以上的分析及计算结果可以看出,对于一个给定的制造系统来说,复杂性既有有利的一面,如复杂度大的系统可以缓冲消化由于系统内外部的突然变化引起的不良影响;也有不利的一面,如复杂度过大,系统的不确定性和可预测性差,则系统状态将难以被管理和控制。因此,对于制造系统复杂性的管理就变得尤为重要。这可以从两个方面进行有效的调整。其一,尽量使制造系统的日常运转按照预定的调度计划信息运行。如果系统按预计的调度计划生产运行,则制造系统处于受控状态,那么系统的内外环境发生偏离的机会则大大减小,也就是减小了动态熵模型中的第二项运行熵大小,从而减小了制造系统的复杂度;其二,对制造系统的工艺结构(包括制造系统的元素组成、加工产品的品种与数量、产品工艺路线及其他选项等)进行优化,尽量采用先进的生产方式,如单元制造、成组加工、优化加工路线等,以降低制造系统的结构复杂性,从而减小整个系统的复杂性状态。

#### 参考文献:

- [1] Frizelle G, Richards H. Tackling Industrial Complexity: the Ideas that Make a Difference[C]//Proceedings of the 2nd International Conference of Manufacturing Complexity Network, Cambridge, UK, 2002. Cambridge, 2002: 549-555.
- [2] Shannon C. A Mathematical Theory of Communication[J]. Bell Syst. Tetch. J., 1948, 27: 379-423.
- [3] Karp A, Ronen B. Improving Shop Floor Control: an Entropy Model Approach[J]. International Journal of Production Research, 1992, 30(4): 923-938.
- [4] Deshmukh A V, Talavage J J, Barash M M. Complexity in Manufacturing Systems, Part 1: Analysis of Static Complexity[J]. IIE Transaction, 1998, 30(10): 645-655.
- [5] Dretske F I. Knowledge and the Flow of Information. the David Hume Series, Philosophy and Cognitive Science Reissues[M]. San Francisco: CSLI Publications, 1999.
- [6] Efstathiou J. The Utility of Complexity[J]. Manufacturing Engineer, 2002, 81(2): 73-76.
- [7] Checkland P. Systems Thinking, Systems Practice [M]. Chichester: Wiley, 1993.
- [8] Hershey J C, Kunreuther C H. Sources of Bias in Assessment Procedures for Utility Functions[J]. Management Science, 1982, 28: 936-954.
- [9] Gunter L, Philip S, Juergen W. Innovation in Production: the Adoption and Impacts of New Manufacturing Concepts in German Industry[M]. Heidelberg: Physica-Verlag, 1999.
- [10] Heragu S S, Kakututi S R. Grouping and Placement of Machine Cells[J]. IIE Transactions, 1997, 29: 561-571.
- [11] Burton I. Flexibility Is Key to Automated Material Transport System for Manufacturing Cells[J]. Industrial Engineering, 1983, 11: 58-64.
- [12] Richarde B. A Design Methodology for Configuration of Manufacturing Cell[J]. Computers Ind. Engng., 1998, 34(1): 63-75.
- [13] Jay H, Barry R. Operations Management[M]. New York: Prentice-Hall, Inc., 2001.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 张志峰, 男, 1974 年生。南昌航空大学经济管理学院讲师。主要研究方向为生产物流优化及信息熵理论。发表论文 6 篇。谢奉军, 男, 1973 年生。南昌航空大学经济管理学院副教授。肖人彬, 男, 1965 年生。华中科技大学 CAD 中心教授、博士研究生导师。