

制造信息系统动力学模型及混沌特性分析*

张小花¹, 陈 玮²

(1. 仲恺农业工程学院 机电学院, 广州 510225; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510640)

摘要: 针对制造信息系统的混沌现象难以确定的问题, 采用定性和定量相结合的方法进行研究。根据自组织理论在合理假设情况下建立了以三个主要的宏观序参量为参变量的制造信息系统决策层动力学模型, 利用迭代方法求出系统演化在相空间的轨线分岔图, 找出系统走向混沌的道路和出现混沌时相应参变量状态。企业的初始条件不同, 其演化的结果不同, 且当生产效率的权重值提高到某一数值时出现了混沌现象。通过搜集企业生产效率数据, 应用 MATLAB 软件基于小数据量方法求出其最大 Lyapunov 值, 验证了制造信息系统的混沌特性。

关键词: 制造信息系统; 混沌; 非线性动力学; 分岔

中图分类号: TH166; TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-2978-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.045

Dynamics modeling of manufacturing information system and analysis of chaos

ZHANG Xiao-hua¹, CHEN Wei²

(1. School of Electrical & Mechanical Engineering, Zhongkai University of Agriculture & Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To solve the problem that chaos of manufacturing information system is hard to determine, qualitative and quantitative method was used. The model of decision-making layer in manufacturing information system was built by three main macro order parameters as control variable and the relations between the states was represented by automaton model. Fork graph which depicted the tracks of the system's evolution was drawn by the iterated methods, which would find the way to chaos and the states of related variables when being at chaos. The results show the evolution trajectory is different with when the initial condition changed, and the chaos will arise when weight of production efficiency added to some value. collected the locale production datas, and simulated the largest Lyapunov exponents by MATLAB software on the basis of small data sets methods, which proved the system lie in chaos.

Key words: manufacturing information system; chaos; nonlinear dynamics; fork

0 引言

制造信息系统是人造复杂系统, 存在混沌现象^[1-3], 如企业突然破产等就是典型的混沌现象。混沌理论是研究非线性系统的一种重要工具。应用混沌理论研究制造信息系统的演化过程属于交叉学科问题, 也是前沿性研究课题, 目前国内外虽有相关研究, 但研究的成果大多局限于应用混沌理论的某些概念定性分析说明企业中的某些现象和问题。例如文献[4]应用混沌理论说明了企业系统中风险行为产生与发展的特征; 文献[5]则在管理运筹学领域研究了若干混沌问题, 如排队系统、库存系统、计划调度系统等在不同的管理决策规则时, 也会产生队列、库存量、计划调度的混沌。国内对制造系统的研究最几年进展也比较缓慢, 主要集中在混沌环境下制造系统的体系结构及风险预警机制^[6-8]。但是从系统的角度和决策的角度研究并不多见。制造信息系统作为一个远离平衡态的、开放的、非线性耗散结构, 具有非线性系统动力学的一般特征, 但是它又注入了人的因素, 具有内在随机性。这就需要根据其特点应用非线性科学的混沌理论与方法加以研究。如何

把混沌理论和制造信息系统通过动力学模型统一起来, 是一个非常重要而艰巨的工作。本文尝试利用复杂性理论采用定性和定量相结合的方法来揭示制造信息系统这类人造复杂非线性系统演化的真实规律。主要从下面几个方面进行探讨:

a) 在一定的假设条件下, 建立以三个主要的宏观序参量为参变量的制造信息系统决策层动力学模型, 利用迭代方法求出系统演化在相空间的轨线分岔图, 找出系统走向混沌的道路和出现混沌时相应参变量状态。

b) 从收集到的企业数据应用仿真软件对制造信息的特征量进行非线性特性分析, 主要是采用混沌时间序列分析方法求出关联维数和最大 Lyapunov 指数, 以实例验证其混沌特性。

c) 对非线性特性进行物理解释, 通过应用数学和仿真的方法对动力学模型进行求解后, 结合实际例子, 解释这些解对制造信息系统分别意味着什么, 从而较深入地了解制造信息系统出现混沌的实质。

由于制造信息系统是个多层次的复杂系统, 要对其总体的非线性进行分析非常困难, 本文在建模时只选取较关键层次即决策层进行分析。

收稿日期: 2011-12-14; **修回日期:** 2012-01-24 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60843001); 广东省自然科学基金资助项目(S2011040002781)

作者简介: 张小花(1979-), 女, 江西丰城人, 讲师, 博士, 主要研究方向为系统建模与仿真、分形与混沌(janemmy2000@163.com); 陈玮(1963-), 女, 浙江温州人, 教授, 博士, 主要研究方向为机电一体化、智能控制、制造业信息化。

1 制造信息系统决策层非线性动力学方程的建立

从文献[9]可知,制造信息系统能满足自组织发生的条件,而制造信息系统要自组织地运行,必须通过宏观序参量作用下的系统单元之间的非线性作用来实现。制造信息系统在与环境交互的演化过程中,根据自身条件所确定的发展目标便是系统的宏观序参量。序参量既作为描述自组织系统有序演化的机制,又作为描述自组织系统有序演化过程的一个参量,一旦通过要素的相互作用而产生,就会支配要素的行为。本文为了研究制造信息系统的演化过程,在假设其他序参量对系统的演化作用较小前提下,只选取制造信息系统演化过程中形成的有代表性的三个序参量之间的关系进行研究,分别为产品质量、生产效率、生产成本。由于这三个变量的量纲不一样,如生产效率量纲是件/小时,而成本的量纲是元/件,因此考虑用一个无量纲的数值来进行表达。本文量的权重值。变量的权重值表达其在总目标中占到的比重。其取值范围用[0,1]来表示。质量权重用 w_1 表示,生产效率权重用 w_2 表示,成本权重用 w_3 表示, w_n 表示当前权重值, w_{n+1} 表示下一个阶段的权重值,生产效率、成本和产品质量的序参量之间的权重都是互相影响的,用 w_{ab} 表示变量 a 对 b 权重的影响。因此,提高产品质量、提高生产效率和降低成本三者之间的权重关系通式为

$$\begin{cases} w_{1(n+1)} = w_{1n} + w_{21} + w_{31} \\ w_{2(n+1)} = w_{2n} + w_{12} + w_{32} \\ w_{3(n+1)} = w_{3n} + w_{13} + w_{23} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中表达的只是这三个变量之间的抽象关系,针对不同的实际系统,要求其之间的具体关系,由于没有具体的经验公式,只能通过历史数据的拟合来确定。而要建立实际系统的数学模型,则首先需要收集实际系统的数据,根据实测数据拟合出模型的待定参数。数据拟合的主要方法是最小二乘法。通过历史数据得到生产效率、成本和质量在同一时刻的一组数据对 $(w_{1i}, w_{2i}, w_{3i}) (i = 1, 2, \dots, n)$, 然后用一类与数据的背景材料规律相适应的解析表达式在一定意义下最佳地逼近或拟合已知数据。有许多衡量拟合优度的标准,最常用的一种做法是选择参数使得拟合模型与实际观测值在各点的残差 $e_k = y_k - f(x_k, c)$ 的加权平方和达到最小,此时所求曲线称做在加权最小二乘意义下对数据的拟合曲线。对于非线性模型,要借助求解非线性方程组或用最优化方法求得所需参数才能得到拟合曲线,称之为非线性最小二乘拟合。用最小二乘法求拟合曲线首先要确定拟合模型 $f(w_1, w_2, w_3, c)$ 。一般来说,根据各学科的知识可以大致确定函数的所属类,若不具备这些知识,则通常从问题的运动规律及给定数据的散点图来确定拟合曲线的形式。本文依据文献[7]对工业培训中心的质量、效率和成本的曲线图拟合,可以得到其关系曲线模型表达为

$$\begin{cases} w_1 = w_2^{0.5} - w_3 \\ w_2 = c_1 w_1 + w_1^{0.8} - w_3 \\ w_3 = c_2 w_1 + w_1^{0.8} - w_2^{0.5} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $c = (c_1, c_2)$ 是需要确定的系数。

由式(2)可看出,实际上只要确定方程组中后两式的参数即可。要确定参数 c 需要通过相关数据应用 MATLAB 软件进行曲线拟合,应用非线性最小二乘原理可以得出其曲线图和相关参数值。本文通过工业培训中心已有的历史数据,应用 MATLAB 软件进行数据拟合,根据拟合后的曲线得出其参数方程,得到参数值 $c_1 = c_2 = 0.3$,源程序省略。最后得出产品质量、生产效率和成本三者之间的权重关系为

$$\begin{cases} w_{1(n+1)} = w_{1n} + \sqrt{w_{2n}} - w_{3n} \\ w_{2(n+1)} = w_{2n} + 0.3w_{1n} + \sqrt{w_{1n}^4} - w_{3n} \\ w_{3(n+1)} = w_{3n} + 0.3w_{1n} + \sqrt{w_{1n}^4} - \sqrt{w_{2n}} \end{cases} \quad (3)$$

2 非线性特性分析

在建立了制造信息系统决策层的数学模型后,应用非线性动力学的相关知识对其进行分析,找出其可能出现的混沌特征。分岔图能定量地描述出系统在某个控制变量的影响下在某个点会出现分岔,从而走向混沌。

以其中任一状态变量作为控制变量,研究在该宏观序参量的影响下系统的演化过程。假定以生产效率作为控制变量,质量和成本的序参量值取初始值为 $(0.45, 0.55)$, 在此基础上,通过 MATLAB 软件进行仿真,为了更好地分析其特性,其前 400 个暂态值忽略,得出生产效率对质量权重影响的分岔图如图 1 所示。从图 1 可以看出,当考虑生产效率提高的目标值时,制造信息系统会通过自组织的作用不断改变其他变量的权重值。当生产效率 w_2 逐渐提高,在 $[0, 0.16]$ 间变化时,质量处于波动状态,但不会因走向混沌而出现无序;当 $w_2 = 0.16$ 时,质量发生分岔现象,系统进入周期解的混沌状态,它是以周期行为与混沌现象交替出现的间歇突发性道路通向混沌的。这就表明,当生产效率权重值提高 16%,则该制造信息系统会走向一种新的过程——混沌产生了。

图 2 对图 1 的 $[0.4, 0.7]$ 间的区域图形进行放大后发现,该图形具有分形结构,系统的演化具有不同时间标度的自相似性。

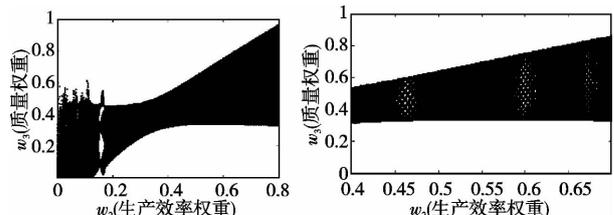


图1 初始值(0.45,0.55)下,质量随生产效率动态变化的分岔图

图2 图1中[0.4,0.7]间的放大图

当质量和成本的权重初始值取 $(0.58, 0.42)$ 时,它的效率对质量的影响如图 3 所示。与图 1 比较,并没有分岔现象发生。由此可以看出,该系统对初值条件具有敏感依赖性,不同的初值条件,可能导致系统走向不同的演化。同样,研究在初始权重值为 $(0.45, 0.55)$ 的情况下,生产效率对成本的影响,如图 4 所示。

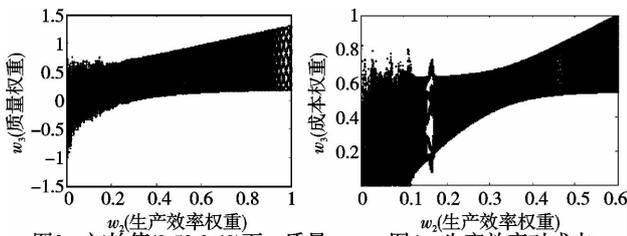


图3 初始值(0.58,0.42)下,质量随生产效率动态变量的分岔图

图4 生产效率对成本影响的分岔图

对照图 4 和 2 可以看出,它们的分岔图是一致的,这更有力量验证了当决策层重点考虑生产效率,且把生产效率的权重提高 16%,质量和成本这两个宏观序参量都将出现混沌,即出现无序或不可控情况。

用涨落的观点来分析制造信息系统产生的混沌现象。在图中的[0,0.16]段,系统处于近平衡区,此时 w2 较小,控制变量和系统的状态一一对应,这是由于在近平衡区域,系统能使内部的涨落和外部的扰动衰减下来,力求恢复原来的平衡态。当 w2 超过一个临界值时,系统状态变得不稳定,涨落或外界扰动的作用再不能被衰减,系统离开原来的状态,进入分岔状态,当分岔到一定阶段,在涨落因素的作用下,系统进入混沌状态。涨落在系统整个演化过程中起到了道路选择者的作用。系统在分岔之前,即在平衡状态或近平衡状态,这种偏移是一种破坏稳定有序的干扰,起着消极作用,在以前的认识中,人们都认识到了这种消极作用,通过各种手段来抑制涨落。然而,在远离平衡态的非线性区,这种随机的涨落中蕴涵着非常积极的因素,是形成新的稳定有序状态的杠杆,系统演化到远离平衡的非线性区,通过涨落发生突变,产生一种有序的结构。

3 基于相空间重构的混沌时间序列分析验证

上面得到的制造信息系统决策层动力学模型是在假设其他序参量发生作用较小的情况下,仅仅用三个序参量之间的相互关系建立动力学模型。而实际上对于大量的复杂的非线性动力学系统,一般是不可能直接建立起解析形式的完备数学模型。这其中一个重要原因是由于系统结构参数和边界条件的时变性和复杂性,往往难以用数学公式来表示;另一原因是制造信息系统的自组织过程是由许多序参量相互影响、相互作用的过程,对其直接用方程组表达出来是相当困难的。而实际上制造信息系统的自组织过程是由许多序参量相互影响、相互作用的过程。根据 Packard 提出的重构相空间理论^[10],决定系统动态演化行为的某一状态变量的时间序列均包含了系统所有状态变量长期演化的行为。因此,可以通过确定系统长期演化的任一单变量时间序列来研究系统的混沌行为,这就是时间序列方法。时间序列分析的理论和方法的研究,离不开实际生产应用。由于制造信息系统单元之间的非线性作用,因此,仅靠常规的线性方法是做不到的,而混沌时间序列分析是一种很好的方法。制造企业中有大量的历史观测数据,通过这些时间序列可以探索制造信息系统的演化规律。

3.1 相空间重构

相空间重构不仅能够保留制造信息系统的动力学特性和几何性质,而且也是制造信息系统关联维数、Lyapunov 指数计算的关键。重构相空间的关键在于时间延迟 τ 和嵌入空间维数 m 的选取。本文根据某工厂 2009 年和 2010 年电装车间室内一线的每日生产效率数据得到其时间序列。这些数据是线

内效率,所谓线内效率是由于人员的因素发生的效率,它去除了受设备和物料的影响效率。通过互信息法和 CAO 氏方法来实现,求得其最佳延迟时间和最小嵌入维数为 1 和 6。

3.2 关联维数

相空间重构后,就可以进行混沌特征不变量的计算来判断系统是否具有混沌特性。混沌系统吸引子的维数是分数维的,这是判断系统是否为混沌的一个重要特征。关联维数是比较常用的特征量,揭示了吸引子自相似结构的重要特征,即非线性系统演化中最具有本质意义的不变性,目前已经发展了许多求关联维数的方法。其中由 Grassberger 等人提出的从时间序列来计算吸引子的关联维数方法(GP 算法)是最常用的方法,图 5 是 G-P 算法求关联维数。

在图 5 中首先判断其 m 值,即最小嵌入维数值,当确定了最小嵌入维数后,对该最小嵌入维数所在曲线中的直线部分进行线性拟合,其所得斜率就是关联维数。图 5 中从左到右下的嵌入维数依次为 1~10,从仿真中得到的 $d(m)$ 数值($\log r - \log C(r)$ 的斜率)可看出,当维数的值从 1 增加到 6 时, $d(m)$ 数值变化比较大,从图 5 中也反映出这三条曲线相差比较远。当再增加维数到 7,则 $d(m)$ 数值变化比较小,可以认定该最小嵌入维数为 6,用最小二乘法拟合该曲线中的直线,此直线的斜率就是关联维数的估算值。计算得到的 $d(m)$ 数值是 3.77,即关联维数为 3.77,为分数维,说明该系统最终会出现混沌现象。

3.3 最大 Lyapunov 指数

如果制造信息系统对初始条件具有敏感依赖性,则其对初始条件引入的不确定性存在迅速放大机制,系统状态的相邻轨线随时间的偏离逐渐加大,系统的最大 Lyapunov 指数为正。计算制造信息系统的最大 Lyapunov 指数是制造信息系统混沌特性的主要判据。小数据量算法对于制造信息系统的混沌特性判别具有重要的实际作用。本文根据前面收集的生产效率数据,采用小数据量方法来求最大 Lyapunov 指数。

由于前面已经重构相空间,得到最小嵌入维数和最佳延迟时间,因此求最大 Lyapunov 指数的步骤可以简化为:

- a) 选取嵌入空间中生产效率时间序列中的一点 Y_i , 并找出与之距离小于 ϵ 的所有邻近点,追踪其经过了时间 i 之后的位置 $y(i)$ 。
- b) 不断改变 i 值,求出相应的 $y(i)$ 值,并找出线性良好的区域,求其斜率,该斜率就是制造信息系统的最大 Lyapunov 指数的估计值。

在上述步骤中得到图 6。其中直线的斜率就是最大 Lyapunov 指数。MATLAB 算得其结果为 0.0704,为正值,因此可以看出,制造信息系统的演化过程中会发生混沌现象。

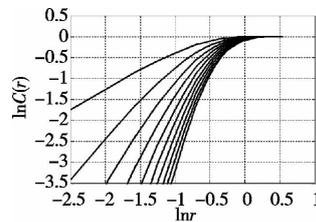


图5 G-P算法求关联维数

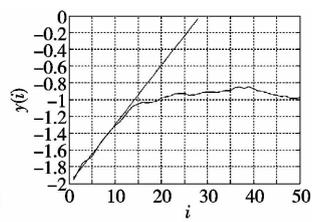


图6 最大Lyapunov指数

4 结束语

为了研究制造信息系统中是否存在混沌现象,本文采用了

定性和定量相结合的方法研究制造信息系统宏观是否存在混沌现象。针对实际系统,在合理假设情况下建立了决策层三个宏观序参量权重之间的动力学模型,并对混沌特征量进行了分析。结果表明,当生产效率的权重值提高到某一数值时,在决策层出现了混沌现象。这意味着当企业特别追求某一个单纯目标时系统将走向混沌。为了对制造信息系统的混沌特性进行实际验证,利用某企业2009—2010年的生产效率数据,应用混沌时间序列分析方法对其混沌特性进行分析。通过对关联维数和Lyapunov指数等特征量的分析,验证了制造信息系统的混沌特性。将这一方法用来对具有大量参变量但又不能都进行采样的制造信息系统的混沌分析进行实例验证,具有很好的效果。

对于制造信息系统这样的复杂系统,本文的模型仅反映了某一个方面,且研究结果仍属于理论的阶段,还有待于进一步实例验证。本文需要深入研究的问题很多,理论上的深度、体系上的广度均有待拓展。展望未来,本文还需在以下几个方面进行研究:

a)随着系统动力学方法的不断完善,制造信息系统的结构特点及其决策层映射模型的动态参数还需更准确描述,并且期望能够找到一个普适性的决策层模型以及希望能构建更高维的制造信息系统动力学模型。

b)由于本文模型的构建是建立在已有的数据检验结果之上并进行修正而得,还需要利用大量数据进行有效性检验。

c)对制造信息系统的混沌研究的最终目标是为了利用混沌或控制混沌,因此,本文后续工作还将对制造信息系统的混沌控制和同步进行深入研究。

参考文献:

- [1] CHRYSSOULOUNIS G, GIANNELLOS N, PAPA KOSTAS N. Chaos theory in production scheduling [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 51(1): 381-383.
- [2] 朱其忠, 于艺杰. 企业发展过程中的分形与混沌现象 [J]. *生产力研究*, 2009(11): 33-35.
- [3] KATZORKE I, PIKOVSKY A. Chaos and complexity in simple model of production dynamic [J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2000, 5(3): 179-187.
- [4] ALFRARO M D, SEPULVEDA J M. Chaotic behavior in manufacturing systems [J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 101(1): 150-158.
- [5] BARTHOLDI J J, EISENSTEIN D D, LIM Y F. Deterministic chaos in a model of discrete manufacturing [J]. *Naval Research Logistics*, 2009, 56(4): 293-299.
- [6] GU X J, QI G N, HU Y H. The research of the CIMS bionic reference architecture (BRA) in chaos environment [C] // Proc of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. 2005: 1021-1026.
- [7] 徐浩鸣. 混沌学与协同学在我国制造业产业组织的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
- [8] 姜继娇, 杨乃定, 贾晓霞. 基于混沌理论的企业集成风险预警机制研究 [J]. *科学与科学技术管理*, 2003(10): 97-101.
- [9] 张开升. 基于复杂性科学的现代制造信息系统自组织过程建模研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2007: 389-410.
- [10] 刘秉正, 彭建华. 非线性动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.