

制造工程中的自演进系统

张伯鹏 郁鼎文
清华大学, 北京, 100084

摘要:阐述了基于内部信息差的自演进系统的特点和利用自演进技术改善制造装备和工艺技术的可能性。论述了两种具有固有自组织机制的自演进系统, 包括车间设备状态模型自演进系统和平面加工自演进系统。阐述了一种具有嵌入自组织机制的自演进系统, 即龙门铣床横梁重力变位补偿自演进系统。指出遗传算法是实现嵌入自组织机制的有效算法, 必要时也可以采用穷举或实时试探算法实现嵌入自组织机制。

关键词:自组织机制; 自演进系统; 遗传算法; 内部信息差
中图分类号: TG61 **文章编号:** 1004-132X(2008)02-0178-05

Self-evolutionary Systems in Manufacturing Engineering

Zhang Bopeng Yu Dingwen
Tsinghua University, Beijing, 100084

Abstract: The characteristics of self-evolutionary systems based on the internal difference of information and possibilities for improving manufacturing equipment and technology with self-evolutionary technology were explained briefly. Two kinds of self-evolutionary system with inherent self-organization mechanism were explained including a self-evolutionary system for shop equipment state model and a plane machining self-evolutionary system. A self-evolutionary system with embedded self-organization mechanism was explained, which was a gravitational deformation compensation self-evolutionary system for large gantry milling machine tools. It is pointed out that genetic algorithm is effective for realizing the embedded self-organization mechanism, and real time step by step or trial and error methods may also be adopted for realizing the embedded self-organization mechanism if necessary.

Key words: self-organization mechanism; self-evolutionary system; genetic algorithm; internal difference of information

0 引言

自演进是某些动力学系统具有的一种相对自

主的行为, 它的基本特点如下: ①系统的状态在过程中不断演变; ②演变是趋近确定的目标的, 即演进; ③演进的目标是相对自确定的, 演进行为是相对自主的, 即自演进。自演进系统的目标和行为都取决于系统内部。自演进系统是一种具有固有或人工嵌入自组织机制的系统, 自组织机制在一

收稿日期: 2006-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375081); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2003CB716204)

[3] Yang S H, Kim K H, Park Y K, et al. Error Analysis and Compensation for the Volumetric Errors of a Vertical Machining Center Using a Hemispherical Belix Ball Bar Test [J]. International Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(7-8): 495-500.
[4] Okafor A C, Ertekin Y M. Derivation of Machine Tool Error Models and Error Compensation Procedure for Three Axes Vertical Machining Center using Rigid Body Kinematics [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1199-1213.
[5] Rahman M, Heikkala J, Lappalainen K. Modeling, Measurement and Error Compensation of Multi-axis Machine Tools. Part I: Theory [J]. International

Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1535-1546.
[6] 刘又午, 刘丽冰, 赵小松, 等. 数控机床误差补偿技术研究[J]. 中国机械工程, 1998, 9(12): 48-52.
[7] 任永强, 杨建国, 窦小龙, 等. 五轴数控机床综合误差建模分析[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(1): 70-75.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:汪世益, 男, 1963 年生。南京工业大学机械与动力工程学院博士研究生, 安徽工业大学机械工程学院副教授。研究方向为机电一体化、数控技术。获省部级科学技术奖 3 项。发表论文 27 篇。黄筱调, 男, 1952 年生。南京工业大学机械与动力工程学院教授、博士研究生导师。顾伯勤, 男, 1957 年生。南京工业大学机械与动力工程学院教授、博士研究生导师。钱森力, 男, 1958 年生。马鞍山方圆回转支承有限责任公司董事长、总经理。

定的系统结构基础上,利用相关的内部信息差自主减熵增序,使系统的构造和性能在统计意义上不断趋近自确定的目标。自演进系统是一种超越定义的系统。

从工程应用角度看,可以将自组织的结果视为自生成,将自组织的过程视为自演进,自生成和自演进都源于自组织。自生成系统、自演进系统都是自组织系统。有关机械加工精度自组织的研究可见文献[1,2]。

1 制造工程中的两种自演进系统

制造工程中的各种自演进系统,大致可以归总为两类。

(1)具有固有自组织机制的制造工程自演进系统。这类制造工程自演进系统,在特定的结构和作业条件下呈现固有的自组织机制。目标是相对自确定的,当目标是设备运行可靠性或加工精度时,这类自演进系统就可以用于改善设备运行状态和获取高机械加工精度。研究这类系统的自演进行为,有助于改善设备维修和精密加工方法。

(2)具有嵌入自组织机制的制造工程自演进系统。这类制造工程自演进系统的自组织机制由人工嵌入,其目的是使系统的某些状态在利用相关内部信息差的基础上朝自确定的目标逐步趋近。这个目标可以是一个具体数值或是达到相对最优为止。制造工程系统中,由于存在着各种原因导致绩效降低和误差产生等问题,构建具有嵌入自组织机制的制造工程自演进系统,为这类问题的解决提供了一个有效的途径。

2 具有固有自组织机制的制造工程自演进系统

2.1 车间设备状态模型的自演进

车间设备状态在一定使用和维修条件下随时间间隔(周、月份或季度等)的变化而变化,一种简化的状态变化模型是设定 n 时刻车间设备可能的状态有三种:全部设备正常运行的状态 s_1 和相应的状态概率为 $P_{s_1}(n)$;部分设备带病运行但是尚无设备出现故障的状态 s_2 和状态概率 $P_{s_2}(n)$;部分设备出现故障的状态 s_3 和状态概率 $P_{s_3}(n)$ 。其中, $P_{s_1}(n) + P_{s_2}(n) + P_{s_3}(n) = 1$ 。

车间设备类型、设备操作水平、设备监控和保养水平特别是车间设备维修能力等综合形成能力可以用相邻时间间隔车间设备状态转移概率矩阵 Q 表示:

$$Q = \begin{bmatrix} p_{s_1 s_1} & p_{s_1 s_2} & p_{s_1 s_3} \\ p_{s_2 s_1} & p_{s_2 s_2} & p_{s_2 s_3} \\ p_{s_3 s_1} & p_{s_3 s_2} & p_{s_3 s_3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} p_{s_1 s_1} + p_{s_1 s_2} + p_{s_1 s_3} &= 1 \\ p_{s_2 s_1} + p_{s_2 s_2} + p_{s_2 s_3} &= 1 \\ p_{s_3 s_1} + p_{s_3 s_2} + p_{s_3 s_3} &= 1 \end{aligned}$$

车间能力越强, Q 中的三个元素 $p_{s_1 s_1}$ 、 $p_{s_2 s_1}$ 、 $p_{s_3 s_1}$ 越接近于 1。当车间具有完善的能力时, Q 为

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

这时无无论初始车间设备状态如何,都会一步转换到目标状态 s_1 并保持在此目标状态上。

当能力为以下两种形式:

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad Q_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表明车间能力无力恢复设备正常运行状态。这时无无论初始车间设备状态如何,都会转移到状态 s_2 或状态 s_3 , 并保持在此非目标状态上。

设定 Q 不变(现实车间状态 Q 是会改变的)。以全部设备正常运行作为车间的目标,即 $P_g = [1 \ 0 \ 0]$ 。在 n 个时间间隔上,实际车间设备状态概率 $P_s(n) = [P_{s_1}(n) \ P_{s_2}(n) \ P_{s_3}(n)]$, 这两个状态概率信息的差别为 $P_g - P_s(n)$, 基于 $P_g - P_s(n)$ 的车间设备状态信息差 $I_{DMI}(n)$ 定义为

$$I_{DMI}(n) = |1 - P_{s_1}(n)| + |0 - P_{s_2}(n)| + |0 - P_{s_3}(n)| \quad (2)$$

车间处于目标设备状态时, $I_{DMI}(n) = 0$; 否则, $2 \geq I_{DMI}(n) > 0$, $I_{DMI}(n)$ 值愈大, 车间设备状态偏离目标状态愈远。

$I_{DMI}(n)$ 在某种意义上是一种宏观使能量, 利用 $I_{DMI}(n)$ 及其负反馈可以合理配置车间设备类型、提高设备操作水平、实施设备状态监测并及时消除潜在的故障、改善车间设备维修能力等, 力求提高车间能力使 Q 接近 Q_1 , 保持 $I_{DMI}(n)$ 为零值或较小值。

设车间的初始设备状态概率 $P_s(0) = [P_{s_1}(0) \ P_{s_2}(0) \ P_{s_3}(0)]$ 为已知, 经过 n 个时间间隔的状态转移后的车间设备状态概率为 $P_s(n) = [P_{s_1}(n) \ P_{s_2}(n) \ P_{s_3}(n)]$, $n = 1, 2, \dots$ 。由于 $P_s(n) = P_s(n-1)Q$, 所以有

$$\left. \begin{aligned} P_{s_1}(n) &= P_{s_1}(n-1)p_{s_1 s_1} + P_{s_2}(n-1)p_{s_2 s_1} + P_{s_3}(n-1)p_{s_3 s_1} \\ P_{s_2}(n) &= P_{s_1}(n-1)p_{s_1 s_2} + P_{s_2}(n-1)p_{s_2 s_2} + P_{s_3}(n-1)p_{s_3 s_2} \\ P_{s_3}(n) &= P_{s_1}(n-1)p_{s_1 s_3} + P_{s_2}(n-1)p_{s_2 s_3} + P_{s_3}(n-1)p_{s_3 s_3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

用完全各态历经的马尔可夫过程表述的上述车间设备状态概率转移模型,其特点是经过若干次转移后,极限状态概率 $P_s(\infty) = [P_{s_1}(\infty) \ P_{s_2}(\infty) \ P_{s_3}(\infty)]$ 将仅取决于状态转移概率矩阵 Q ,而和初始状态概率 $P_s(0)$ 无关^[3]。具有 3 个未知量的 $P_s(\infty)$ 满足有唯一解的 4 个方程:

$$\left. \begin{aligned} P_{s_1}(\infty) + P_{s_2}(\infty) + P_{s_3}(\infty) &= 1 \\ P_{s_1}(\infty) &= P_{s_1}(\infty)p_{s_1s_1} + \\ &\quad P_{s_2}(\infty)p_{s_2s_1} + P_{s_3}(\infty)p_{s_3s_1} \\ P_{s_2}(\infty) &= P_{s_1}(\infty)p_{s_1s_2} + \\ &\quad P_{s_2}(\infty)p_{s_2s_2} + P_{s_3}(\infty)p_{s_3s_2} \\ P_{s_3}(\infty) &= P_{s_1}(\infty)p_{s_1s_3} + \\ &\quad P_{s_2}(\infty)p_{s_2s_3} + P_{s_3}(\infty)p_{s_3s_3} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上述车间设备状态概率模型具有自演进的特点,表现为车间设备状态概率随时间演变,这一演变不断进化趋近由设备状态转移概率矩阵 Q 决定的极限状态概率 $P_s(\infty)$ 。

以一个案例说明该模型的自演进。设车间初始设备状态概率为 $P_s(0) = [1 \ 0 \ 0]$,但是车间能力不健全,相应的车间设备状态转移概率矩阵 Q 为

$$Q = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 2/6 & 3/6 & 1/6 \\ 2/10 & 4/10 & 4/10 \end{bmatrix}$$

此后车间设备状态概率依式(3)将不断演进,趋近极限状态概率 $P_s(\infty)$ 如表 1 所示。

表 1 车间设备状态概率演进

$P_{s_1}(n)$	1	0.3333	0.2888	0.2933	0.2953	0.2957	0.2957	...
$P_{s_2}(n)$	0	0.3333	0.4111	0.4218	0.4226	0.4225	0.4225	...
$P_{s_3}(n)$	0	0.3333	0.2999	0.2848	0.2820	0.2816	0.2816	...
n	0	1	2	3	4	5	6	...

表 1 显示车间设备状态概率经过几个时间间隔即接近极限状态概率 $P_s(\infty)$ 。表明由于车间能力不健全, Q 决定了极限状态概率 $P_s(\infty)$ 中, $P_{s_2}(\infty) = 0.4225$ 为最大;说明为了改善车间设备状态,重要的是提高车间能力。车间具有完善的能力,即使现时车间设备状态偏离目标,也会通过自组织机制较快自演进到目标状态;反之,若车间能力不健全,即使现时达标的车间设备状态,也会较快自演进偏离目标状态。

2.2 具有固有自组织机制的三平板平面精度自演进系统

三块平板型面通过合理的互研铲刮,可以得到具有目标平面精度的基准平面。

任意二平板型面作准随机互研运动可铲刮掉

型面上的高点,如此重复多次达到全贴合的两个型面必定为曲率半径绝对值相等的内外球面。当曲率半径为 ∞ 时两型面即为平面。

将三块平板的型面轮番交替作上述互研铲刮,可能的结果是:① 三块平板的型面都是内球面或外球面,则任意两型面间不可能都有全贴合;② 若三块平板的型面有一个或二个为平面,而其他型面为内球面或外球面,则任意两型面间也不可能都有全贴合;③ 三块平板的型面均为平面时,任意两型面间才都有全贴合。

获得平板型面目标平面精度的充要条件是平板数目 $N = 3$,因为当 $N = 1$ 时,无意义;当 $N = 2$ 时,上述通过互研铲刮可以得到全贴合的型面,但是不能保证得到平面;当 $N = 3$ 时,任意两型面间都有全贴合时,上述三块平板的型面均将为具有目标平面精度的基准平面;当 $N \geq 4$ 时,不必要。

平面精度自演进系统包括三块平板型面、合理选择互研铲刮型面的平面精度自组织机制、互研铲刮和平面精度检测等环节,如图 1 所示。系统中不存在平面精度源^[1]。

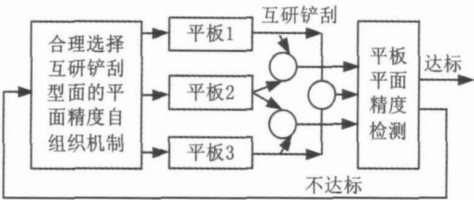


图 1 三平板型面互研铲刮型间的平面精度自组织系统

三块平板型面目标平面精度自演进的特点如下:三块平板的型面状态在互研铲刮过程中不断演变;三块平板通过合理有序地对研铲刮,平面精度逐步趋近自确定的目标平面精度。在图 1 系统中,目标精度是相对自定的,演进是相对自主的,表现为自演进。

曲率半径绝对值为 r 的球面可以表述为

$$X(\theta, \varphi) = (r \sin \theta \cos \varphi, r \sin \theta \sin \varphi, r \cos \theta) \quad (5)$$

式中, X 为映照; θ 为余纬度; φ 为经度。

只有当相接触的两块平板型面都可以用同一个式(5)表述,即这两个曲面为曲率半径绝对值相等的内外球面时,才可以作全贴合的准随机相对运动。

互研铲刮需要不断加大三块平板型面球面的曲率半径 r_1 、 r_2 、 r_3 ,为此互研铲刮过程中需要保证:① 每次有效地互研铲刮的目的是球面传递或加大球面曲率半径;② 各个型面的曲率半径单调增加;③ 当 r_1 趋近 ∞ 、 r_2 趋近 ∞ 和 r_3 趋近 ∞ 同时得到满足时,三块平板的型面将均为基准平面,它们之间将互相有全贴合。

的液压出力装置的出力集合。

图 4 是具有嵌入自组织机制的横梁重力变位补偿自演进系统,其特点是每次更换作业后,就重新设置参数启动遗传算法,优化液压出力装置的补偿出力,使作业 x 的各个作业头位置的向下变位目标 G 最小。

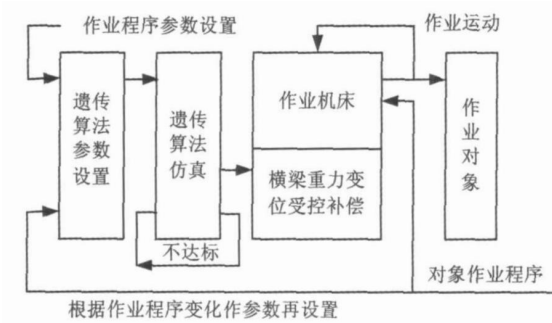


图 4 横梁重力变位补偿自演进系统

遗传算法仿真步骤如下:① 根据作业 x 的作业程序,确定作业头在横梁上的 $y(x)$ 个位置;② 选择遗传算法的参数,包括编码方式、复制门槛、交换对象及交换地点、变异概率、优化标准等;③ 优化变量为 $\{F_{1y(x)}, F_{2y(x)}, F_{3y(x)}\}$;④ 选择优化变量的种群数量,各个种群初始值在优化变量的可能出力范围内选定;⑤ 计算 $\delta_{y(x)}$,确定许用值 $\delta = -9\mu\text{m}$;⑥ 取 $\delta_{y(x)} - \delta$ 作为适应度函数;⑦ 根据适应度函数判断是否达到优化目标 G ,如达标则终止;⑧ 如未达标,则实施种群的进化复制,准随机交换、变异;⑨ 返回步骤 ⑤。

3.2.4 横梁重力变位补偿自演进的仿真

结合某企业的大型龙门铣床,对图 4 系统的自演进作了仿真。结构仿真参数如下:箱形横梁内设置辅助支撑梁;横梁及辅助支撑梁的立柱支撑点距离为 8.8m;横梁断面高为 2.1m、宽为 1.43m、垂直壁厚为 50mm、水平壁厚为 65mm;横梁自重为 259.6kN,作业头自重为 98kN;三个液压出力装置布置在横梁中点及左右对称位置上,相邻液压出力装置间的距离为 2m;作业头在横梁上的位置则取决于作业程序;作业 x 为在对象上铣削 3m 宽、若干米长的平面,端面铣刀直径为 350mm,横向进刀量为 335mm。

遗传算法主要运行参数为:种群数量 50、优化收敛标准为无改进迭代 50 代、交叉概率 0.5、变异概率 0.01。

上述横梁结构作业头位置重力变位补偿自演进的仿真结果如表 2 所示,表 2 中列出了箱形横

梁在各个作业头位置的无补偿重力变位量 $\epsilon_{y(x)}^x$ 和有补偿重力变位量 $\delta_{y(x)}^x$,它们直接影响作业精度。表中 L 为作业头距横梁左支点距离。

表 2 仿真结果

$L(\text{mm})$	$\epsilon_{y(x)}^x(\mu\text{m})$	$\delta_{y(x)}^x(\mu\text{m})$
3060	-89	-9
3395	-95	-9
3730	-100	-9
4065	-103	-9
4400	-104	-9
4735	-103	-9
5070	-100	-9
5405	-95	-9
5740	-89	-9

仿真结果指出,在横梁作业头不同位置上,重力变位补偿自演进系统可以将横梁作业头位置的重力变位均减小至 $-9\mu\text{m}$,仅为企业现行工件平面度允差的 20%,显著减小了横梁变位引起的作业误差^[7]。

参考文献:

[1] 张伯鹏.制造信息学应用——机械加工精度自组织研究[J].中国机械工程,2002,13(4):344-347.
[2] 张世琪,李迎,孙宇,等.现代制造引论[M].北京:科学出版社,2003.
[3] Howard R A. Dynamic Programming and Markov Processes[M]. New York: the Technology Press, 1960.
[4] Holland J H. Adaptation in Nature and Artificial Systems[M]. Ann Arbor: the University of Michigan Press, 1975.
[5] Goldberg D E. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning[M]. New York: Addison Wesley, 1989.
[6] 朱剑英.智能系统非经典数学方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2001.
[7] 张伯鹏,张年松.机床横梁重力变位的自演进补偿研究[J].清华大学学报(自然科学版),2006,46(2): 191-193.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:张伯鹏,男,1932 年生。清华大学精密仪器与机械学系教授、博士研究生导师。主要研究方向为制造工程与科学。发表论文 80 余篇。郁鼎文,男,1962 年生。清华大学精密仪器与机械学系副教授。