

分形理论在制造决策 模型实验数据建模中的应用

孙棣华^①

刘卫宁^②

刘飞^③

(^① 重庆大学自动化学院, 重庆, 400044; ^② 重庆大学计算机科学与工程学院;

^③ 重庆大学机械工程学院; 第一作者 35岁, 男, 副教授, 博士)

摘要 运用分形理论的基本原理, 研究了制造决策映射模型实验数据建模中的模型分维, 并将基于分形的决策映射模型建模原理应用于断续切削加工过程决策映射模型的实验数据建模和分析。

关键词 决策; 模型; 分形; 制造系统

中国图书资料分类法分类号 TH166; TP11

制造决策模型

0 引言

切削

实验数据 建模

在制造系统决策的实践中, 利用实验数据建模是普遍采用的一种建立决策变量至决策属性指标间映射关系模型的方法。这一方面固然是由于实际工作中有许多实验数据可以利用, 另一方面也是由于在很多情况下应用解析方式从机理上建立这种映射关系模型会遇到许多难以克服的困难。

作者在文献[1]中提出了一种基于分形的决策映射模型建模原理, 在本文将进一步研究制造决策映射模型实验数据建模中的模型分维, 讨论模型之间的关系及其选择问题。以断续切削加工过程决策映射模型的实验数据建模和分析为例, 探讨这些理论结果的应用问题。

1 制造系统实验数据建模的模型分维

应用实验数据建模的一般步骤是: 首先大量地收集或采样由决策变量和决策属性指标组成的数据对, 然后再利用各种建模技术如统计分析、神经网络等建立映射关系模型。由于各种建模技术的出发点不同, 得到的映射关系模型必定存在着形式上和层次上的多样性, 于是就提出了这些模型间的关系如何及怎样选择利用这些模型的问题。

事实上, 应用实验数据建立的模型可以认为是对实际实验数据的一种近似。这样, 各种不同模型与实验数据之间必然存在着一定程度上的相似。根据分形理论, 可以将它们看作是映射模型空间上的一个广义分形, 可以用分维数来分析它们之间的关系^[1]。

· 收文日期 1997-08-28

机械制造系统工程国家重点实验室基金资助项目

模型的选择可以基于各种不同的标准,如模型的精度、规模、可理解性、运行速度及建模的便利性等。一般多选用模型的精度标准,通常以模型输出与实验数据的方差或标准差为指标。

模型输出与实验数据的方差或标准差只是从总体精度上反映了模型与实验数据的近似程度,不能刻划模型输出与实验数据在几何形状上相似的程度。而分形理论表明,分形集的分维数恰恰是对这种相似性的一个定量刻划指标。因此,用分维来作为模型选择的依据之一是合理的。

用分维来选择模型,实际上就是要计算各模型与实验数据的相似维数,从相似维数上的差异来判断各模型与实验数据的相似程度。根据分形理论^[2],对于某一尺度 r ,当模型输出与实验数据的空间距离大于 r 时,其概率 $P(r)$ 应正比于 r^{-D} ,这里 D 即为分维数。在 r 给定的条件下,可以用模型输出与实验数据的空间距离大于 r 的个数与总实验数据个数之比来近似 $P(r)$,于是可求得分维数为:

$$D = -\ln[P(r)]/\ln r \quad (1)$$

由于实验数据与其自身相似的分维数为:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} -\frac{\ln[P(r)]}{\ln r} = 1$$

因此,分维数与1的接近程度就刻划了各模型与实验数据相似的程度。当然,考虑到实验数据中一般均包含有随机干扰的成分,选择模型时还应考查各模型分维数的相对值。

下面给出通过分维计算来评判模型与实验数据整体相似程度的步骤:

① 采样或收集决策变量向量 X_{oj} 与属性指标向量 Y_{oj} ,组成数据对 (X_{oj}, Y_{oj}) , $j = 1, 2, \dots, N$. N 为数据对数;

② 对各模型,计算与决策变量 X_{oj} 相对应的属性指标 Y_{ij} ,形成数据对 (X_{oj}, Y_{ij}) , $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 1, 2, \dots, N$. M 为模型数, N 为数据对数;

③ 计算与各 X_{oj} 对应的 Y_{oj} 与 Y_{ij} 的空间距离,即 $|Y_{oj} - Y_{ij}| = e_{ij}$;

④ 对给定尺度 r ,计算 $e_{ij} > r$ 的概率 $P_i(r)$;

⑤ 对不同模型 i 计算其分维数 $D = -\ln[P_i(r)]/\ln r$;

⑥ 根据 D 与1的接近程度和各模型分维数的相对值评判模型与实验数据整体的相似程度。

2 应用与分析

断续切削是切削加工工艺中的一类重要切削方式。对带各类凹槽、孔等形状及其类似工件的切削加工均可归入这类切削方式。这类加工的特点是当刀具经过各种槽、孔时,工件对刀具有断续的脉冲式冲击。其示意图见图1。

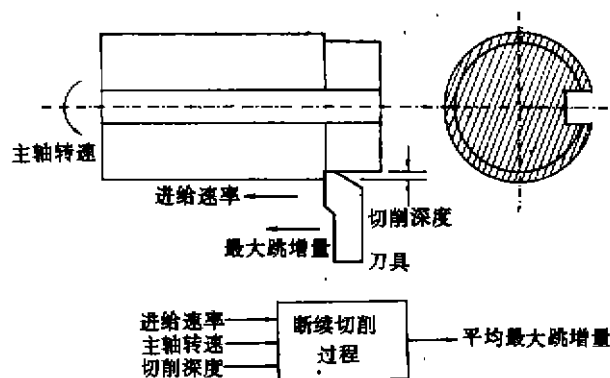


图1 断续切削过程

研究表明,对断续切削加工的工艺规划还存在着许多困难^[3]。例如,即使工件表面非常平滑,在一定的共振频率下,加工过程也会变得不稳定甚至造成刀具断裂。而切削加工过程中工件表面的不规则,更是使得复杂性、非线性和不确定性等因素交互影响,不易作出恰当的工艺规划和控制决策。对这种比较复杂的制造决策问题,应用制造系统决策框架,建立适当的决策映射模型,对于提高决策分析的有效性是十分有益的^[4]。

两个方面的问题值得注意:

1) 抽象与简化:映射模型应是对实际过程在保持其基本特征上的抽象和简化,为避免映射模型过于复杂,这种抽象与简化首先应是对决策变量和决策属性指标的简化。

2) 层次性:由于人在决策分析中具有从不同粒度层次上反复观察和分析同一问题的特点,这就要求建立的决策映射模型要处于与之对应的不同粒度层次上,以便于分析使用。

于是,对于断续切削加工过程,可以提取最能反映其工艺特征的决策变量和决策属性指标,其中决策变量选为主轴转速,进给速率和切削深度,决策属性指标选为平均最大跳增量,分别以 $V_s, V_f, h, \delta_{max}$ 表示,文献[3]用机械仿真器产生了上述变量和一个指标的实验数据,其取值范围和单位见表1。

表1 断续切削过程的决策变量与决策属性指标取值范围

	决策变量			决策属性指标
	$V_s/r \cdot \min^{-1}$	$V_f/mm \cdot r^{-1}$	h/mm	$\delta_{max}/\mu m$
最小值	500	0.1	0.4	23
最大值	1200	0.3	1.0	278

根据文献[1]提出的基于分形的决策映射模型建模原理,可应用这些数据建立断续切削加工过程决策映射关系模型,其过程可以简要地说明如下。

1) 建模识别 这是对决策问题的认识不断深化的过程。本阶段经分析比较得到的最终输出实际上就是确定断续切削过程中代表决策方案的三个决策变量(V_s, V_f, h)和代表决策效果的一个属性指标(δ_{max})。

2) 模型粒度空间搜索 本阶段应根据建模识别的结果,搜索确定建立的映射模型在由定性/定量粒度、模型分形元粒度和决策问题粒度三个要素构成的模型粒度空间中的位置。若决策采用回归分析技术建模,则应确定模型的结构,即是否分区、分为几个区及如何分区、采用非线性映射还是线性映射、模型选择几个参数等。

3) 模型分形元形成 若上阶段确定的结果是:分为4个区,用线性映射,每个区域内模型参数为4个,则可采用回归分析技术,应用实验数据分别对4个区域内的线性回归映射模型建模,建立的每一个模型即为分形元。

4) 模型的综合集成 本例中的综合集成变换算法十分简单,将加入分区条件判断的各分形元模型合在一起,即形成最终的决策映射模型。

上述过程只是应用基于分形的决策映射模型建模原理的一个非常简单的说明性例子。实际上,对于更复杂的过程这一建模原理更能显示其对建模过程的指导意义。

采用线性回归模型时,不同模型粒度(不同分区、不同参数个数)下,继续切削加工过程的8个决策映射模型见表2。

表 2 断续切削的模型及其分维数

模型 编号	分维数 $8 \leq r \leq 23$	模型 $\delta_{\max} = a \times V_s + b \times V_F + c \times h + d$									
		分区条件				a	b	c	d		
A	0.2270					0	0	0	98.2		
B	0.2502					0	478	0	1.8		
C	0.2576					0	506	0	-4.8		
D	0.3532					0	475	100	-69.6		
E	0.5209					0.02	300	127	-99.0		
F	0.6826			V_s	$V_s > 1022$	0.108	369	156	-217		
				> 850	$V_s \leq 1022$	-0.386	616	193	225		
				V_s	$V_s > 679$	0.383	452	70	-351		
				≤ 850	$V_s \leq 679$	-0.178	395	210	-19		
G	0.7262	$V_s > 890$		V_s	$V_s > 1103$	0.143	428	140	-256		
				> 1009	$V_s \leq 1103$	-0.198	398	113	132		
				V_s	$h > 0.706$	-0.482	711	158	331		
				≤ 1009	$h \leq 0.706$	-0.492	478	159	369		
		$V_s \leq 890$	V_s	$V_s > 770$		0.923	504	85	-302		
				$V_s > 705$		0.134	336	67	-147		
			$V_s \leq 770$	V_s	$V_s > 653$		-0.011	257	93	-38	
					V_s	$h > 0.647$	0.021	550	190	-156	
				≤ 705	≤ 653	$h \leq 0.647$	-0.103	416	153	-35	
			$V_s > 872$		V_s	$V_s > 1046$		0.168	378	135	-274
				V_s		$h > 0.826$	-0.446	770	83	354	
				≤ 1046		$h \leq 0.826$	-0.478	474	-143	371	
				$V_s \leq 872$	$V_s > 676$	V_s	$V_s > 801$	0.291	660	87	-317
						V_s	$h > 0.789$	0.384	401	100	-373
						≤ 801	$h \leq 0.789$	0.167	437	93	-205
$V_s \leq 676$	h	$h > 0.764$			-0.20	639	252	-97			
		> 0.656			$h \leq 0.764$	0.046	714	217	-230		
		h			$V_F > 0.192$	-0.248	303	156	69		
	≤ 0.656	$V_F \leq 0.192$	-0.083		425	93	-13				

应用前节给出的步骤,可以计算出各模型与实验数据相似程度的分维值,当选择尺度 r 在 8~23 间变化时,各模型的平均分维数见表 2。利用这些分维数可以分析各模型间的关系并作为选择模型的依据之一。

① 从总体上看,回归模型的结构越简单,分维数越小,与实验数据的相似性就越差。这反映了分析问题的粒度由细向粗的变化。当粒度很粗时,相似性很差,模型的性质已开始向定性的方面转化,如模型 A,模型 B,模型 C 等。

② 回归模型的结构完全一致时,不同的参数也会使模型与实验数据的相似程度有所差异,如模型 B 与模型 C。

③ 增加回归模型的分区数,亦即增加模型结构的复杂性,虽有助于提高模型与实验数据的相似程度,但到一定限度后,效果已不十分明显。

模型参数的个数 N 在一定程度上反映了模型结构的复杂性。如果将 $\ln N$ 作为度量模型复杂性的一个尺度, 则各模型的分维数 D 与复杂性 $\ln N$ 之间的关系见图 2。

从图 2 中可以看出, 分维数增加最快的部分在模型 D 与模型 F 之间, 模型 F 之后分维数的增加已不显著。这表明在选择模型时不必一味追求与实验数据的高度一致, 因为这会带来模型的极度复杂, 造成建模困难和模型运行的开销太大。

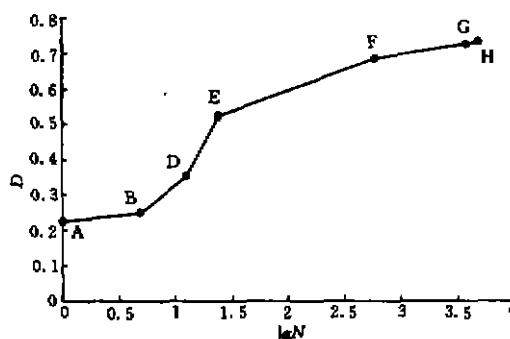


图 2 模型复杂性与分维数的关系

3 结 论

分维数是刻画各粒度层次下映射关系模型间在形状上相似程度的一个重要指标参数, 是对模型精度指标的一种必要补充。对于更客观地描述同一问题中各种映射模型间的关系提供了有力的工具, 可将其作为模型选择的依据之一。

对继续切削加工过程建模的模型关系分析和评价证实了上述观点以及文献[1]提出的基于分形的决策映射模型建模原理的合理性。

参 考 文 献

- 1 孙棣华, 刘卫宁, 刘飞. 基于分形理论的制造决策映射模型建模. 重庆大学学报, 1998, 21(4): 73~78
- 2 Falconer K. Fractal Geometry, Mathematical Foundations and Applications. John Wiley and Sons, 1990. 1~45
- 3 Lu S C Y, Tchong D K. Building Layered Models to Support Engineering Decision Making: A Machine Learning Approach. Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1991, 113: 1~9
- 4 刘飞, 孙棣华. 制造系统决策框架模型及其功能作用. 计算机集成制造系统, 1995, 1(2): 20~23

Application of the Fractal Theory in Modelling Decision-Making Models for Manufacturing by Using the Experimental Data

Sun Dihua Liu Weining Liu Fei

(College of Automation, Chongqing University)

ABSTRACT Based on the fractal theory, the fractal dimension of the decision-making mapping model for manufacturing by using the experimental data is studied. In modelling the decision-making mapping of the intermittent cutting process, the approach for modelling mapping models by the fractal theory and the fractal dimension of the models are discussed.

KEYWORDS decision-making; model; fractal; manufacturing system

(责任编辑 吕赛英)