

纳米级超精密切削表面粗糙度 若干影响因素分析

赵惠英 蒋庄德 田世杰

(西安交通大学精密工程研究所 西安 710049)

摘要:介绍了 W-M 函数和分形分维数的结构函数法求法,采用分形理论对影响纳米级超精密切削表面质量的若干因素进行了初步分析,并进行了相关的试验和统计分析,特别是对其中主要的影响因素及其影响程度进行了分析,得出并验证了集合与子集的分维数求法及其影响关系,并对将上述理论应用于设计实际的相关问题进行了探讨。

关键词:分形理论 结构函数 集合与子集 纳米级超精密切削 表面质量

中图分类号:TH161

0 前言

随着超精密机床加工精度不断向纳米级加工水平逼近,进行纳米级超精密加工机理及其相关理论研究的需求日益迫切。纳米级超精密切削是指加工表面粗糙度为 0.1~10.0 nm、加工精度不超过 100 nm 的切削过程。纳米级超精密切削加工表面质量是考核纳米级超精密切削加工的主要技术指标之一,是机床(包括机床主要部件及其制造工艺)、刀具、被切工件材质、切削机理和切削工艺等技术水平的综合反映。目前,在主轴轴向圆跳动和径向圆跳动精度不超过 0.02 μm,溜板直线度不超过 0.1 μm/200 mm,刀具刃口圆弧半径不超过 20 nm 等条件下,一般加工表面的粗糙度已经达到不超过 2.5 nm。

现在光学、航空航天、惯导系统和集成电路等高新技术领域表面粗糙度已要求 ≤0.1 nm,如何保证超精密加工的表面质量达到纳米级和亚纳米级,这是目前亟待解决的问题。在超精密切削中的加工表面微观轮廓具有连续性,将表面微观轮廓逐步放大,将可看到更加精细的微观轮廓结构。经典的表面质量评价方法是建立在传统的几何学基础上的理论,除了表面极少数极值信息外,许多有用信息被忽略掉了,未能将整个表面形貌特征对工作质量的影响和各加工因素对表面质量的影响程度全面反映出来。

基于分形理论的纳米级超精密车削过程的研究,即是在分析研究超精密切削表面质量的基础上,对机床(主要部件结构和制造工艺)、刀具、使用环境和切削工艺等对加工表面质量的进行定量分析影

响程度,进而可提出相应的改进措施。

1 分形理论

Mandelbrot 在 1986 年描述分形理论^[1]:“分形是指由各个部分组成的形态,每个部分以某种方式与整体相似(自相似性)”。换言之,以各个局部组成的整体,均以其局部的某些特征在整体相关特征中具有一定映射如下。

(1) 分形理论可以是几何图形,也可以是由“功能”(或信息)架起的数学模型。

(2) 自相似可以是严格的,也可以是统计意义上的相似。

(3) 自相似有层次上的差异。

(4) 相似性有级别(即使用生成元的次数或放大倍数)上的差异,级别相差越大,相似性越差。可以用无标度区间表示,自然界中的分形往往具有一个最小标度和最大标度,在无标度区内,才存在分形规律。

1.1 Weierstrass-Mandelbrot 函数

Weierstrass 函数针对工程表面的分形计算是一种比较贴近的方法,其主要思想是:任意曲线均可以由无穷的三角函数叠加而成。Mandelbrot 于 1982 年在原 Weierstrass 函数基础上提出 Weierstrass-Mandelbrot(W-M)函数^[1]

$$W(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(1 - \exp(ib^n t)) \exp(i\varphi_n)}{b^{(2-D)n}} \quad (1)$$

式中 b, t ——比例系数

φ_n ——任意相位

D ——分形维数

显然,函数对于 t 来说处处连续的,但又处处不可微分。令 $\varphi_n=0$,函数 $W(t)$ 的实部

$$C(t) = \text{Re}W(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(1 - \cos b^n t)}{b^{(2-D)n}} \quad (2)$$

将函数的自变量 t 乘以比例系数 b , 则

$$C(bt) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(1 - \cos b^{n+1} t)}{b^{(2-D)(n+1)}} = b^{(2-D)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(1 - \cos b^{n+1} t)}{b^{(2-D)(n+1)}} \quad (3)$$

令 $m=n+1$, 得

$$C(bt) = b^{(2-D)} C(t) \quad (4)$$

由式(4)可以看出, W-M 函数具有自相似性。如果一段 $C(t)$ 曲线已知, 则整个 t 定义域的 $C(t)$ 均可以得出, 只要在 t 上乘以恰当的缩放比即可^[2]。

分形维数 D 的物理含义: 它反映了加工表面所具有的复杂结构的多少及这些结构的微细程度, 或者说是复杂结构在整个表面所占能量的相对大小。分形维数越大, 表面中非规则的结构越多并且结构越精细。

1.2 采用结构函数法计算分形维数

将表面轮廓曲线视为一个时间序列 $z(x)$, 则具有分形特征的时间序列能使其采样数据的结构函数满足^[3]

$$s(\tau) = [z(x + \tau) - z(x)]^2 = C\tau^{4-2D} \quad (5)$$

式中 $[z(x + \tau) - z(x)]^2$ ——方差的算术平均值

τ ——数据间隔的任意选择值

针对若干尺度 τ 对轮廓曲线的离散信号计算出相应的 $s(\tau)$, 然后在对数坐标中得 $\lg s - \lg \tau$ 直线的斜率 k , 则分形维数 D 与斜率 k 的转换关系为

$$D = 2 - \frac{k}{2} \quad (6)$$

采用结构函数计算分形维数的优点是计算量小, 计算精度比功率谱法高, 计算数据可直接从表面轮廓数据中获得。

1.3 集合及其子集的分形关系

如果表面粗糙度为集合 B , 则刀具形状为集合 A_1 , 主轴精度为集合 A_2 , 溜板振动为集合 A_3 , 工艺参数为集合 A_4, \dots , 加工表面粗糙度基本由于刀具形状、主轴精度、溜板振动、工艺参数等的影响而形成, 从这个意义上理解, 各子集 $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$, 等都含在集合 B 中, 则

$$B \supset A_1 \quad B \supset A_2 \quad B \supset A_3 \quad B \supset A_4$$

对于各集合的分形维数满足下列性质^[4]:

单调性: 若 $A_i \subset B$, 则

$$\dim_H A_i \leq \dim_H B_i$$

可数稳定性: 或 $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$, 为一可数序列集序列, 则

$$\dim_H \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i = \sup_{1 \leq i \leq \infty} \{ \dim_H A_i \} \quad (7)$$

光滑集: 若光滑集 F 为 R^n 中的光滑(即连续可微) m 维流形(即 m 维曲面), $\dim_H F = m$ 。特别地, 光滑曲线分形维数为 1, 光滑曲面分形维数为 2, 可作为评定偏离的基准。

表面粗糙度提高的必要条件是其分形维数的降低, 降低表面粗糙度分形维数的主要措施是降低分形维数高的组成部分的分形维数, 作为纳米级加工, 其线分形维数将逐渐接近于 1。

2 试验

在超精密切削中, 很多因素都对表面加工质量有影响。如刀具形状、主轴精度、溜板振动和工艺参数等。由于加工表面质量已进入纳米量级, 各种影响因素都不能忽视, 应逐一进行分析^[4]。

2.1 不同床身、不同隔振条件下的切削试验

从断裂机理研究中发现, 在超精密切削中其切削面作用厚度约是 $1 \sim 1\,000$ 分子量级, 按一般材料, 其断裂层面高约 $0.01 \sim 1.00 \text{ nm}$ ^[6]。针对不同材料, 在北京机床研究所的三台超精密、高精度数控车床上进行了不同加工试验, 试验是在不同振动条件、不同主轴转速、不同进给速度条件下进行的, 部分试验条件及统计处理后的结果见表 1。切削工件表面粗糙度是采用美国 VEECO 公司的原子力显微镜进行测量的, 该仪器分辨率为 0.2 nm 。经过试验证明, 相同条件下的切削表面粗糙度是具有统计规律的, 床身材料与隔振措施起关键作用。图 1 为 CKG-300 高精度数控车床加工件的表面轮廓局部曲线之一, 经数据处理后, 其表面粗糙度 $R_a = 25 \text{ nm}$ 。

表 1 不同床身、不同隔振条件切削试验

机床型号	JCS-027	FYGC400	CKG300
床身材料	大理石	树脂混凝土	铸铁
隔振措施	高精度空气隔振	精密空气隔振	无
转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	1 200	1 200	1 200
表面粗糙度 R_a/nm	2.5	12	25

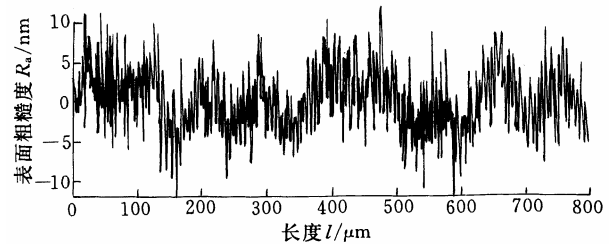


图 1 加工件表面粗糙度局部曲线

2.2 振动试验

在纳米级超精密加工中, 振动是影响加工表面

质量的主要因素之一,图 2 是几种床身的溜板振动曲线,该床身的材料分别为大理石、树脂混凝土和树脂砂铸铁床身。

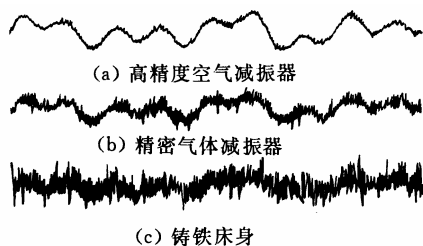


图 2 基于各种减振床身的溜板振动曲线

图 2a 床身是大理石材料床身,床身支撑采用高精度空气减振器,这样不仅有效隔离了外界振动,而且大理石床身也有效吸收了部分振动,从而减小了其振动曲线的微细结构。

图 2b 床身材料为树脂混凝土,床身支撑采用精密气体减振器。这样隔离了部分外界振动,而且树脂混凝土床身也有效吸收了部分振动,部分高频分量被抑制,减小了其振动曲线的部分微细结构。图 2c 床身材料为铸铁,隔振和吸振效果均不理想。

从中可以看出,其曲线噪声越大,从物理意义上理解既是表明其振动规律的复杂性和也是反映其隔振效果。隔振措施有效则可降低外界振动干扰,床身振动曲线噪声低,未采取隔振措施则床身振动曲线噪声高。

2.3 主轴精度试验

图 3 为典型空气静压主轴回转精度曲线图。

由该图可以看出,其曲线基本属于三角函数规律,由于其回转精度为 50 nm,所以宏观观察噪声较低,但从纳米级微观观察有许多不规则和复杂的噪声,这些均会对表面加工质量产生影响。

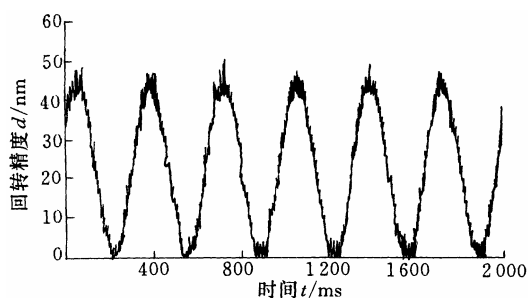


图 3 主轴回转精度曲线图

3 分析与讨论

针对图 1 加工件表面粗糙度测试曲线,根据式(5)计算得到结构函数拟合图(见图 4),同时可得拟合曲线的斜率 k 。

$$k = 0.126$$

由式(6)

$$D = 2 - \frac{k}{2}$$

则

$$D = 2 - \frac{0.126}{2} = 1.937$$

由分形维数 $D = 1.937$ 可知,在该试切加工件的表面粗糙度局部的曲线中,基本接近于 2,说明存在着很多复杂的、不规则的微细结构,这些微细结构是造成加工件表面粗糙度低的主要原因,造成这些微细结构的因素很多,应从各方面因素的分形维数中进行试验分析。

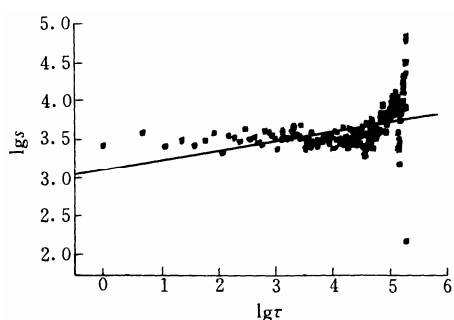


图 4 表面粗糙度结构函数 $\lg s - \lg \tau$ 图

针对图 2c 中 CKG-300 高精度数控车床的溜板振动试验曲线,由结构函数法计算得到的 $\lg s - \lg \tau$ 曲线(见图 5)并得到

$$k_c = 0.217$$

由式(6),则

$$D_c = 2 - \frac{0.217}{2} = 1.89$$

由于分形维数 $D_c = 1.89$,说明该铸铁材料的床身,其隔振和吸振效果均不理想,没有吸收和抑制大部分振动,该振动曲线的分形维数较高,其分形维数接近 2,从 1.3 集合与子集的分形关系可知,该因素是影响表面粗糙度的主要因素。

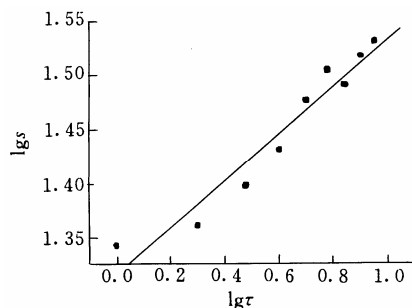


图 5 结构函数 $\lg s - \lg \tau$ 曲线

对图 2a、b 两种溜板振动曲线也进行了分形维数计算, $D_a = 1.095$, $D_b = 1.664$ 。从以上试验可以看

出, 振动曲线的分形维数越大, 其曲线复杂结构越多, 从物理意义上理解即是其振动形态和多自由度振动的复杂性和其隔振效果。隔振措施可有效则可降低外界振动干扰, 降低床身振动曲线噪声。

根据上述分析可知, 分形维数越高其微细结构越复杂, 其影响的复杂性和不规则性也更复杂, 通过对各部分分形维数的分析, 基于 1.3 集合及其子集的分形关系找出部件分形维数大的因素并逐一采取抑制措施, 进而可以有效地提高加工表面粗糙度。从前述讨论可知表面粗糙度提高的必要条件是其分形维数的降低, 表面轮廓分形维数降低的理论依据是在加工过程中各相关因素的分形维数的降低。

同理, 工艺参数、系统稳定性等也具有类似的规律性, 同样可以采用分形理论对其进行分析。从表 2 可以看出, 溜板振动的分形维数极为接近表面粗糙度的分形维数。

表 2 表面粗糙度若干因素分形维数

	溜板振动 D	主轴分形维数 D	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
分形维数 D	a 1.095	1.12	1.372
	b 1.664	1.12	1.451
	c 1.89	1.12	1.937

从表 2 可知, CKG-300 高精度数控车床的溜板振动分形维数为 1.89, 依据 1.3 集合与子集的分形关系

$$\dim_H \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i = \sup_{1 \leq i \leq \infty} \{ \dim_H A_i \}$$

则

$$\dim_H(A_{D_c}) = 1.89$$

由此可知溜板振动是表面粗糙度分形维数高的主要影响因素。

为降低溜板振动分形维数采取了以下措施, 床身材料采取大理石材料, 床身支撑采用高精度空气减震器, 这样有效隔离了外界振动, 大理石床身也吸收了部分振动; 同时在床身设计和溜板设计方面进行了特殊隔振设计, 通过改进降低了该振动曲线的分形维数。改进设计后的分形维数 $D_a=1.095$ 。

对新设计的纳米级超精密机床的其他方面也进行了相应的改进, 并在刀具、切削工艺、隔振措施和环境条件等方面进行了创新和改进^[7], 经过试切工件的加工表面粗糙度 R_a 达到 0.997 nm。图 6 是北京机床研究所的超精密机床加工工件的检测曲线图, 检测仪器为美国 Zygo 公司生产的激光干涉仪。

在试验中特别是在上述比较试验中特征尺寸需要引起重视, 尽管分形几何理论原则不依赖于特征尺寸, 但所有测量均是在一定尺度下进行的, 所得曲线均是一定尺度下的规律。

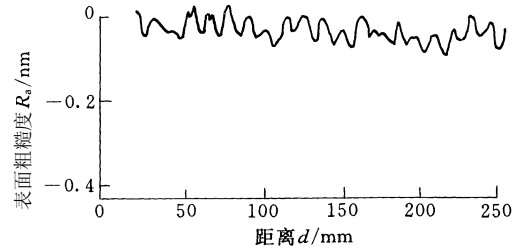


图 6 表面粗糙度检测结果

在试验中, 对于复杂结构和微细结构采用分形理论分析和处理, 比较贴近实际情况, 而对于规律性较强的因素仍符合经典力学理论。因此, 在实际分析试验中, 对于复杂结构和微细结构, 采用分形理论进行分析的同时, 仍须注意经典理论的应用。

4 结论

在纳米级超精密加工过程中, 有很多复杂因素对加工表面质量具有随机性、无序性的影响, 通过对纳米级超精密加工表面质量相关的分形理论的应用, 进行了相关的试验和统计分析, 特别是对其中主要的影响因素及其影响程度进行了分析, 得出了集合与子集的分维数求法及其影响关系, 并结合经典机床制造技术基础理论分析其影响原因, 进而可以采取针对性很强的改进措施。

利用集合与子集的分形关系, 可以将纳米级超精密切削加工的表面加工质量与机床(机床主要部件和制造工艺)、刀具和切削机理、切削工艺、振动与隔振的分形关系量化计算出来。对该机床、机床主要部件、制造工艺、刀具、使用环境和切削工艺的研究提供相应的理论依据, 对更深层次超精密机床的发展将起到促进作用。

参 考 文 献

- 1 费斌. 典型机械加工表面及其粘着磨损中分形理论研究: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1997
- 2 Majumdar A, Lien C L. Fractal characterization and simulation of rough surface. *Wear*, 1990, 136: 313~327
- 3 葛世荣, 索双富. 表面轮廓分维数计算方法的研究. *摩擦学学报*, 1997, 17(4): 354~361
- 4 肯尼思·法尔科内. 分形几何——数学基础及其应用. 沈阳: 东北大学出版社, 2001
- 5 王海容. 分形几何应用于机械加工表面形貌的研究: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1998
- 6 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构. 北京: 科学出版社, 2002

7 Toshimichi Moriwaki. 超精密加工的实验分析. Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., 1995, 29(4): 68~69

ANALYSIS ON SOME FACTORS INFLUENCING SURFACE QUALITY NANOSCALE ULTRA-PRECISION CUTTING

Zhao Huiying Jiang Zhuangde Tian Shijie
(Precision Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

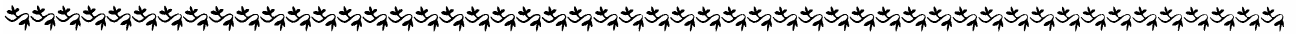
Abstract: The W-M fractal function and the structure-function method for determining fractal dimensions are introduced.

Some factors of influencing the surface quality in the nanoscale cutting are analyzed by the fractal theory. A series of testing and statistical analysis for the nanoscale cutting surface are done, and the major influence factors on the surface quality are especially analyzed in quantity. The determining method of the fractal dimensions for a set and its subsets and the relation between them are obtained and checked. Some issues on the application of the theory above in the real design are discussed.

Key words: Fractal theory Structure function Set and subset Nanoscale ultra-precision cutting Surface quality

作者简介: 赵惠英, 男, 1959 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超精密加工与测量技术。

E-mail: zhao huiying@bjjm.com.cn



《机械工程学报》被 EI 收录论文目次 (2003 年第 4 期)

复杂机电系统的全局耦合建模方法及仿真研究	王艾伦 钟 掘 (1)
基于层次概率模糊认知图的产品拆卸序列研究	潘晓勇 骆祥峰 刘光复等 (6)
机器人关节间隙误差分析	宋月娥 吴 林 戴 明 (11)
车铣运动的矢量建模	姜增辉 贾春德 (15)
基于功能推理机制研究复杂机械产品的概念设计	张国全 钟毅芳 何 海 (19)
模糊回归理论在 QFD 系统建模中的应用研究	陈以增 唐加福 任立义等 (25)
颗粒增强铝基复合材料滑动摩擦行为的载荷依赖性	翟洪祥 杨 勇 黄振莺 (30)
冷却对换热器内湍流流动的影响	李国祥 毛华永 李 娜 (35)
大型钢结构系统广义强度失效模式分析方法研究	徐格宁 王建民 高有山等 (39)
移动机器人四杆地形感知机构的设计	徐正飞 杨汝清 翁新华 (44)
非回转对称拉深中材料流动变形规律的研究	鄂大辛 水野高爾 (49)
梯度功能陶瓷刀具的热应力分析	王永国 艾 兴 李兆前等 (53)
四辊冷带轧机非线性参激振动的研究	陈勇辉 史铁林 杨叔子 (56)
提高焊接接头疲劳强度的低相变点焊条和超声冲击方法	王文先 霍立兴 王东坡等 (61)
基于模糊优化辨识模块化机器人关节动力学参数	刘晓平 彭朝阳 刘玉刚等 (66)
环境激励下金属带式无级变速传动系统的试验模态研究	杨 为 冯培恩 秦大同 (71)
射流电沉积快速成形技术基础试验研究	赵剑峰 黄因慧 吴安德 (75)
焊接车间数据集市和数据挖掘的研究	李 迪 张春华 赖乙宗 (79)
基于软件体系结构的秦氏模型智能虚拟控件集成框架的研究	汤宝平 谢亭亭 周传德等 (83)
组合三角 Bézier 曲面的延伸	赵东福 许澍虹 柯映林 (87)
基于线性插补加工零刃带螺旋回转面刀具的精度研究	姚 斌 吴序堂 毛世民等 (92)
储能飞轮转子轴承系统动力学设计与试验研究	戴兴建 卫海岗 沈祖培 (97)
φ3 800 mm 鲁奇式加压气化炉壳体的焊接	迟永军 (102)
基于 Marr 理论的机器人视觉光电混合处理系统人脸识别研究	余 杨 黄惟一 (108)
气体辅助注射成形充模流动数值模拟的研究	辛 勇 阮雪榆 何成宏等 (112)
旋转横向流膜器环隙压力测试系统的研究	黄维菊 陈文梅 魏 星等 (116)
一种新型的机器人移动结构	苏学成 樊炳辉 江 浩等 (120)
螺旋槽干运行非接触气体密封的理论分析与试验	徐万孚 刘雨川 李广宇等 (124)
弧焊过程电信号的小波包分析	薛家祥 易志平 (128)
反求工程中复杂曲面数字化重构关键技术的研究	齐从谦 陈亚洲 甘 屹等 (131)
迷宫气封三维非定常流场及转子动特性数值仿真	李雪松 黄典贵 李久华等 (136)
变系数移距变位方法及其在非圆齿轮传动中的应用	谭伟明 (141)
储能飞轮过盈/脱落过程研究	杨鼎宁 邹经湘 (145)
涡旋压缩机型线的误差灵敏度与径向啮合间隙的相关分析	樊 灵 靳春梅 屈宗长等 (151)
利用喷射器回收原油挥发气的装置及其应用实例	金良安 刘学武 李志义等 (155)