

④

18-23

基于分形的机加工零件 表面几何精度与性能分析

廖小云 雷闻宇
(重庆大学机械工程学院, 重庆, 400044)

TH161.12

摘要 对机加工表面轮廓误差提出一种先进行线性回归和非线性回归,再用 Weierstrass-Mandelbrot 分形函数获得分形参数的新的分析方法;据此建立描述加工表面公差带内误差精细结构的最小特征集;用最小特征集再构出表面轮廓形貌,建立基于分形的零件性能与误差结构关系的分析方法。并附有计算实例。

关键词 几何精度;公差;分形;性能分析

中国图书资料分类法分类号 TH161.12

机械加工

0 引言

零件

机械零件表面几何精度与其质量、性能、成本等有着直接关系,是产品制造过程中严格控制的几何参数^[1]。虽然人们在几何精度的一些重要方面,如公差的表达、分析、检测与控制等取得很多成果,但对零件几何精度与其性能之间关系分析的研究还相当薄弱^[2],特别是对机加工零件表面几何精度仍然采用基于经典的数理统计学方法得出的粗糙度来表达,然而这些参数强烈地依赖于测量尺度和取样长度,没有唯一性^[3],这给进一步研究几何精度与性能、成本等之间的关系造成很大困难。

近几年来,基于分形几何的表面形貌分析与评定方法受到人们的广泛关注,有关研究已取得很大进展,其目的是获得不依赖测量尺度和取样长度的表面分形表征参数,建立更一般的表面接触摩擦磨损模型,进行有关性能分析^[3]。很多文献^[1,2,4,7]采用 Weierstrass-Mandelbrot 函数(简称 W-M 函数)来分析机加工表面轮廓,提出了一些分形参数的计算方法,并进行轮廓模拟,但没有对表面加工误差结构特征进行较准确的描述。文献[5]用分形布朗运动来分析零件加工表面形貌,并以动力润滑滑动轴承为例研究其形面分形参数对承载能力的影响,但重构出的零件加工表面形貌有较大误差;文献[6]提出了用分形几何与小波理论研究形状公差的方法,虽建立了表面形貌分形特性的小波分析与重构方法,但如何获得较准确的分形参数,理论上还需进一步研究。

作者提出了一种新的基于 W-M 函数机加工表面几何精度的分析方法,即对机加工表面轮廓测量数据先进行线性回归和非线性回归,再用 W-M 分形函数获得分形参数;并据

- 收文日期 1998-06-18
国家自然科学基金资助课题(批文号 59805022)
第一作者:男,1968年生,讲师

此建立描述表面加工误差结构的最小特征参数,以较准确地实现形面轮廓重构;最后以滚珠轴承为例研究了不同误差结构分形特性参数对零件轴向荷载的影响。

1 基于分形的加工表面几何精度误差结构分析

1.1 机加工表面误差分析

在机械零件机加工过程中,加工系统会对零件表面形貌产生一系列误差,而它们常具有一些基本特征,如线性误差、周期误差等,因此零件形面公差带内误差结构呈现出很复杂的特征,而这些特征对零件性能有影响。所以有必要对零件形面公差带内误差结构进行检测、精细分析和表达。

假定引起零件形面公差带内误差结构特征变化的加工机制是相互独立的,于是根据叠加原理将形面加工误差 $y(x)$ 表达为

$$y(x) = y_l(x) + y_p(x) + y_i(x) \quad (1)$$

这里, $y_l(x)$ 、 $y_p(x)$ 、 $y_i(x)$ 分别是线性度、周期性和不规则误差成分, x 为测量坐标。

作者分别用线性回归、非线性回归和分形几何的方法获得表征线性度、周期性和不规则误差成分的特征参数估计值。

1.1.1 线性度参数提取

线性度参数描述的是机加工表面轮廓误差测量数据呈线性变化的成分。对加工轮廓测量数据应用线性回归的方法可获得线性度参数的估计值。

线性度成分表达为

$$y_l(x) = y_0 + s_i^* x \quad (2)$$

其中, y_0 为 j 截距, s_i 为斜率。

表征线性成分的最小特征参数集为

$$L_e = \{y_0, s_i\} \quad (3)$$

1.1.2 周期性参数提取

周期性参数是对机加工表面轮廓误差测量数据呈周期性变化成分的刻画。对加工轮廓测量数据应用非线性回归的方法可获得周期性参数的估计值。周期性成分表达为

$$y_p(x) = y_0 + d_a \sin(2f_r x/L) \quad (4)$$

这里, y_0 为偏移量, d_a 为幅度, f_r 为频率, L 为取样长度。

表征周期性成分的最小特征参数集为

$$P = \{y_0, d_a, f_r\} \quad (5)$$

1.1.3 基于 W-M 分形函数的加工误差不规则部分表征

机加工表面轮廓误差的不规则部分变化复杂,很难用一般的数学模型来分析和建模。大量的实验观察表明,当对机加工表面轮廓重复放大时,其更精细的结构不断出现,而且轮廓永远不光滑,在任何点均不存在切线;同时,轮廓放大时,放大后的表面和原始表面的概率分

布非常相似。因此,机加工表面轮廓常常呈现出统计上的自相似自仿射特性。分形几何中的W-M函数满足连续性、处处不可微性和自仿射性等所有的数学特性,可用来分析机加工表面轮廓形貌。本文就根据W-M函数获得误差中不规则部分的表征参数。

轮廓误差中不规则用W-M函数表示

$$y_i(x) = G^{(D-1)} \sum_{n=n_1}^{\infty} \cos(2r^n x / r^{(2-D)n}) \quad (1 < D < 2, r > 1) \quad (6)$$

上式中, $y_i(x)$ 为误差非规则成分, G 为特征长度尺度系数, 灰分形维数, r 为某合适值(一般取 $r = 1.50$), r^n 决定 $y_i(x)$ 的频谱, $r^n = 1/L$ (L 为取样长度) 对应于最低截止频率。因此, 表征不规则部分 $y_i(x)$ 的最小特征参数集是

$$I = \{D, G, n1\} \quad (7)$$

由(4)可得W-M的功率谱为

$$S(\omega) = G^{2(D-1)} / (2W^{(r-2D)} \ln r) \quad (W \text{ 为频率}) \quad (8)$$

由上式明显看出,在双对数坐标系中, $S(W)$ 与 W 呈直线关系。直线的斜率($-K$) 与 $y_i(x)$ 的分数维 D 有关, 截距(S_0) 与分形参数 G 有关。因此, W-M函数表达的精细误差成分的特征参数 D 和 G 均与频率 W 无关, 是尺度独立的。

研究表明,分形维数 D 反应了表面形貌的“陡峭”形态。为求得 D 和 G , 我们可对不规则部分 $y_i(x)$ 实施FFT变换, 作出其对数功率谱图, 并计算出平均斜率($-K$) 和截距(S_0), 并与式(8)比较, 即可得

分形维数 D

$$D = (5 - K)/2$$

特征尺度 G

$$G = e^{\frac{S_0 + K \ln r^2}{2(D-1)}}$$

1.2 刻划表面几何精度的最小特征集

根据1.1节对表面轮廓误差测量数据的分离和相应的分析, 我们得到表征形面轮廓几何精度的最小特征集

$$\Omega = L \cup P \cup I \quad (9)$$

这个最小特征集刻划了公差带内误差结构特征, 反应了几何精度的精细成分; 同时, 通过这些参数, 我们可方便地应用式(2)、(4)、(6)、(1) 重构出机加工表面轮廓形貌。

1.3 实例: 表面轮廓加工误差分析与重构

应用上述方法, 笔者在微机上用Turbo C语言编制了相应的分析程序, 对某钢制零件磨削加工表面轮廓的一段测量数据进行了加工误差结构分析和重构。图1是原始轮廓误差测量数据; 图2是FFT变换求得的不规则部分的对数功率谱图, 平均斜率 $K = 2.1$ 。表1为计算出的刻划表面几何精度的最小特征参数集。

根据最小特征参数集重构出的形面轮廓误差曲线, 如图3所示。比较图1和图3, 其曲线形态非常相近, 说明本文所建立的最小特征集可描述表面加工几何精度, 它反应公差带内误差结构特征, 并可用它来重构表面轮廓形貌。

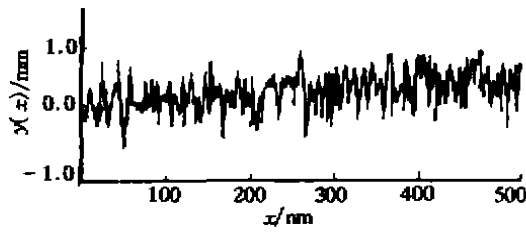


图 1 原始轮廓误差测量数据

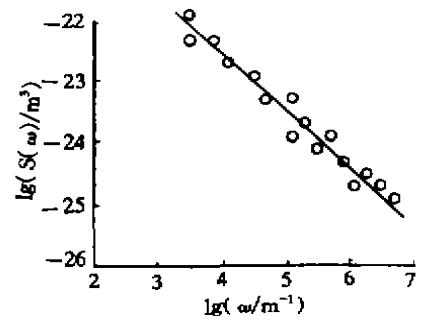


图 2 不规则部分的对数功率谱图(平均斜率 $K = 2.1$)

表 1 刻划表面几何精度的最小特征参数集

线性度参数	λ_0/mm 0.000142	λ 0.000012	
周期参数	λ_0/mm 0.0015	d_c/mm -0.002	$f_c/256 \text{ Hz}$ 30
分形参数	D 1.45	G/mm $1.77 e^{-7}$	nl -15.38

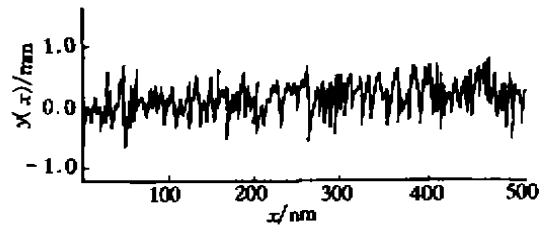


图 3 重构出的形面轮廓误差曲线

2 基于分形参数的零件表面几何精度与性能分析

建立基于分形参数的描述零件形面加工误差精细结构的最小特征参数集 Ω , 与其他有关公差理论和方法比较, 其最大优点在于能方便地进行几何精度与性能关系分析。这里, 以滚珠轴承为例说明利用最小特征参数集进行分析的方法。在机械设备中, 轴承通常是起支撑和(或)约束运动的作用。对滚珠轴承来说, 外圈圆度误差对轴承的承载力有较大影响, 是造成振动、使轴承疲劳破坏的一个主要原因。设计时通常给出圆度公差值, 但公差带内误差结构对轴承性能是有较大影响的。

如图 4 所示的滚珠轴承^[6], 外圈固定, 有 N 个滚珠, 能承受轴向力和径向力, 中速运转, 忽略惯性力。有关参数如下: 滚珠个数 $N = 16$, 滚珠直径 $d = 1.40 \text{ mm}$, 节圆直径 $d = 6.75 \text{ mm}$, 轴向力 $F = 1000 \text{ N}$, 转速 1800 r/min , 接触变形量 $S_0 = 0.0092 \text{ mm}$, 综合刚度系数 $K = 9.56 \times 10^9 \text{ Nm}^{2/3}$, 压力角 $\alpha = 18.8^\circ$ 。

根据赫芝接触理论, 在轴承工作过程中滚珠 i 所受荷载 Q_i 是其接触变形量 S_i 的函数

$$Q_i = K^* S_i^{2/3} \quad (10)$$

其中, K 为接触综合刚度系数。

接触变形量 S_i 由两部分组成

$$S_i = S_0 + S_i(t) \quad (11)$$

式中 S_0 对应与无几何误差的变形量, $S_i(t)$ 则与外圈圆度误差结构有关。

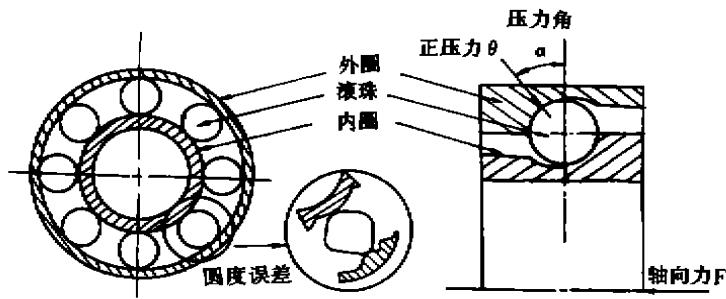


图 4 滚珠轴承

接触综合刚度系数 K 也随 $S_i(t)$ 变化, 抽取出常量部分, 仍记为 K , 将(11) 式改写为

$$Q = KS_0^{3/2} \{1 + 3S_i(t)/(2S_0) + 3S_i^2(t)/(8S_0)\} \quad (12)$$

于是, 轴承所受的轴向载荷为

$$F_a = \sum_i Q \sin \alpha \quad (13)$$

由上式可计算出轴承运转中任意时刻 $t \in [0, T/N)$ (T 为运转周期) 的轴向载荷。

表 2 轴承外圈轮廓误差特征参数

特征参数	轮廓 (a)	轮廓 (b)
$\gamma_0 / \mu m$	1.0524	
S_i	0.002 047	
γ_0 / mm		0.001 527
d_n / mm		-0.020 05
$f_r / 256 \text{ Hz}$		30.0
D	1.27	2.40
G / mm	4.5×10^{-1}	5.2×10^{-1}
nl	-15.36	-15.36

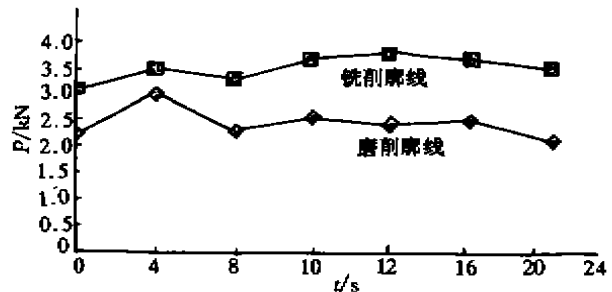


图 5 不同外圈圆度误差结构的轴承轴向载荷比较

为考查不同外圈圆度误差结构对轴承轴向载荷的影响, 我们分别对两个用磨削和铣削得到的轴承外圈轮廓误差进行分析, 其最小特征参数如表 2 所示; 用第 2 节所述的重构方法, 分别综合出轮廓误差形貌, 然后根据式(13) 计算出任意时刻的轴向载荷, 结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 铣削轮廓 (b) 带来的轴向荷载比磨削轮廓 (a) 的要大, 那么相应的轴承外圈所受的接触应力, 前者就比后者大。其根本原因在于铣削轮廓 (b) 的精细结构没有磨削轮廓 (a) 的“好”, 前者分维数 $D=2.40$, 且有周期性误差, 而后者的分维数 $D=1.27$, 仅有线性度误差, 反应出前者比后者“陡峭”得多。因此, 采用合适的加工方法和工艺过程, 改善零件公差带内误差结构, 将对零件性能指标产生重大影响。

3 结束语

作者根据分形几何的方法,对机加工零件表面轮廓误差形貌先进行线性回归和非线性回归,再用W-M分形函数获得分形参数的分析方法,并据此建立了描述表面加工误差结构的最小特征参数集,来表达公差带内误差结构特征,以较准确地实现形面轮廓重构;最后以滚珠轴承为例研究了不同加工方法所产生的误差结构特性参数对零件轴向荷载的影响。研究表明了作者所建立的基于误差结构最小特征参数集进行几何精度与性能之间关系分析是可行的。

参 考 文 献

- 1 Ganti S. Generalized Fractal Analysis and its Application to engineering Surface. *Wear*, 1995, 180: 17~34
- 2 葛世荣. 粗糙表面的分形特性与分形表达研究. *摩擦学学报*, 1997, 17(1): 73~80
- 3 贺林, 朱军. 粗糙表面接触分形模型的提出与发展. *摩擦学学报*, 1996, 16(4): 378~384
- 4 He L, Zhu J. the Fractal Character of Processed Metal Surfaces. *Wear*, 1997, 208: 17~34
- 5 Srinivasan R S. Geometric Tolerancing in Mechanical Design Using Fractal-based Parameters. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1995, 117(1): 203~205
- 6 Srinivasan R S. A Form tolerancing theory Using Fractals and Wavelets. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1997, 119(2)
- 7 袁长良. 表面微观形貌的分形表征及模拟. *中国机械工程*, 1997, 8(5): 78~80
- 8 Zhang H C. Tolerancing Techniques; The State-of-the Art. *International Journal of production Research*, 1992, 30(9): 2111~2135

The Geometric precision and Performance Analysis for machining Surface based on Fractals

Liao Xiaoyun Lei Wenyu

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University)

ABSTRACT A new analysis method for machining surface profile error is presented in this paper. The linear regression and nonlinear regression are first applied respectively, and then the Weierstrass-Mandelbrot fractal function is used to obtain the fractal parameters of machining profiles. A minimal parameter set which depicts the machining surface geometric precision is set up, and the surface profile can be reconstructed using these parameters, and an analysis method for part performance and its tolerance structure is proposed. Examples are provided to illustrate the method is feasible and effective.

KEYWORDS geometric precision; tolerance; fractals; performance analysis

(责任编辑 钟学恒)