

碳纤维复合材料表面形貌测量采样条件研究

王 渊 何维军 赵福令

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点试验室,大连 116024)

文 摘 采样条件的确定对表面微观几何形状误差评定的准确性有重要影响。针对现实中用户依据自身经验选择采样条件的不确定性,提出了一种能够客观判定最佳采样条件的方法。基于二维功率频谱分析,考虑奈奎斯特采样定理与混叠效应,提出一个归一近似因子来确定合适采样条件。经实验验证其适用于碳纤维复合材料表面形貌测量,研究证明用较大采样间距多次测量加工后工件的表面形貌,取粗糙度值的平均值或 S_a 、 S_p 和 S_v 取最大值来评定其表面质量更合理。

关键词 二维频谱分析,采样条件,碳纤维复合材料,表面形貌

Sample Conditions of Measurement of Carbon Fibre Composite Surface Topography

Wang Yuan He Weijun Zhao Fuling

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract Determination of sample conditions is of great influence on the surface assessment of microscopic geometry error. Aimed at the uncertainty in selecting sample conditions for the users depending only on their own experience, one method that can determine appropriate sample conditions objectively was developed. Based on 2D spectral analysis and considering the Nyquist sampling theorem and aliasing effect, a normalized proximity factor was proposed to determine proper sample conditions. Experiments validate it applies to the measurement of surface of carbon fibre composites. Results indicate that it is more reasonable to measure the surface of machined workpieces several times with larger sample space and select the mean or maximal values of roughness.

Key words 2D spectral analysis, Sample conditions, Carbon fibre composite, Surface topography

1 引言

碳纤维复合材料以其耐高温、耐磨损等优良特性在航空航天等高新技术领域被用于关键零部件的制造,但由于其结构的非均质性和明显的各向异性,加工后表面存在多种缺陷,形貌复杂多变,传统的基于轮廓线的测量及评定不能全面反映复合材料切削表面微观形貌特征,以至于得出的结论与实际情况会产生误差。现如今,三维测量技术已广泛应用于科学实验和工业生产中,但是至今还没有指导选择最佳采样条件的标准文件发布;用户通常根据自身经验来选择采样条件,存在主观性,无法保证不同用户总可以选出合

理采样条件。当采样间距过小,则采集到的数据高度相关,评定一个区域需要大量数据点,测量费时而且效果不一定理想;相反,采样间距过大,则采样数据高度不相关,造成表面的空间信息或间距关系失真,评定结果出现错误。

自 20 世纪 80 年代数字探针仪器广泛应用,国内外学者一直在研究如何决定表面测量最合理采样条件。Tsukada 和 Sasajima^[1]提出一种基于表面高度随机分布假设,在表面轮廓线上决定最佳采样间距方法,其判定标准是数字表面与真实连续表面的差值变化小于某一预定值。它的主要问题是只考虑数字表

收稿日期:2008-06-23;修回日期:2008-09-04

基金项目:国家自然科学基金(50875036)

作者简介:王渊,1983 年出生,硕士研究生,主要从事碳纤维复合材料切削工艺及表面形貌的测量与评定。E-mail:flzhao@dlut.edu.cn

面与真实表面的幅度连续性,而忽略了由于离散采样造成的空间失真。由于混叠效应的存在,差的采样条件会造成粗糙度成分空间关系的失真。Lin 等人^[2]考虑混叠效应,应用二维功率频谱分析来选择合适采样条件,决定表面形貌测量合适频率带宽的标准是奈奎斯特频率所在值的累积频谱功率达到总功率的95%。其问题是不管采样间距如何选择,即使已经发生大量混叠,95%累积功率极限条件依然能够满足。另一缺点为采样点数量根据功能需要预先选择,而根据不同采样点数量得出的合适采样间距结果有时会不一样。另外,上述学者的研究对象都是各向同性的金属加工后表面,没有涉及到各向异性的复合材料加工表面的测量。

本文针对碳纤维复合材料加工后表面形貌,采用二维功率频谱分析,考虑混叠效应与奈奎斯特采样定理,提出了一种能够客观确定三维表面形貌测量的最佳采样条件的方法。

2 频谱分析确定采样条件方法

要计算工程表面的二维功率谱,直接用周期图法来估计功率谱是最有效和广泛使用的方法。功率谱可以用傅里叶变换的形式来计算,即

$$G(f_x, f_y) = \lim_{L_x, L_y \rightarrow \infty} F(f_x, f_y) F^*(f_x, f_y) = \lim_{L_x, L_y \rightarrow \infty} |F(f_x, f_y)|^2 \quad (1)$$

式中, f_x 和 f_y 分别是 x 和 y 两个垂直方向的空间频率, L_x 和 L_y 分别是在 x 和 y 方向上 3D 连续表面的长度, $F^*(f_x, f_y)$ 表示傅里叶变换的共轭。

近似离散二维功率谱可用下式求得

$$G(f_p, f_q) = |F(f_p, f_q)|^2 \quad (p = 0, 1, \dots, M-1; q = 0, 1, \dots, N-1; f_p = \frac{p}{\Delta x M}, f_q = \frac{q}{\Delta y N}) \quad (2)$$

式中, f_p 和 f_q 分别是 x 和 y 方向的离散空间频率, Δx 和 Δy 分别是 x 和 y 方向的采样间距, M 和 N 为对应的采样点数。

表面形貌的二维傅里叶变换及功率谱的性质见文献[3]。

将同一频率的功率谱值相加,可得到其相应的沿某一方向的功率谱,见图1。

图2所示为沿频率轴的归一累积功率频谱,计算公式如下:

$$u(f_k) = \frac{\sum_{i=0}^k G(f_i)}{\sum_{i=0}^{N/2} G(f_i)} \times 100\%, (k = 0, 1, \dots, N/2) \quad (3)$$

如果采样间距合适,80%的累积频谱功率将明显位于奈奎斯特频率 $f_c = 1/(2\Delta)$ 以下,为合理控制表

面频谱的混叠现象,阈值设置在 $1/8 f_c$, 即 $f_a = f_c/8$ 。可通过检查80%累积功率水平离参考位置 f_a 最近来决定合适采样条件^[4]。如果对于间距 Δ_i 和采样点数 N_i 的各种组合80%累积功率水平的频率值假定在 f_{ij} , 合适采样条件可由如下公式获得:

$$\text{所有 } u_{ij}(f_k) = 80\%, \min \left[C_{ij} = \frac{f_{ij} - f_a}{f_c} \right] \quad (4)$$

式中, C_{ij} 为归一近似因子,表示 f_{ij} 接近 f_a 的程度。近似因子 C_{ij} 的绝对值越小,80%累积功率水平离 f_a 越近。

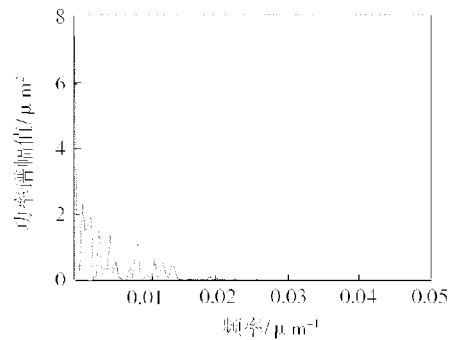


图1 表面功率频谱

Fig.1 Power spectrum of surface

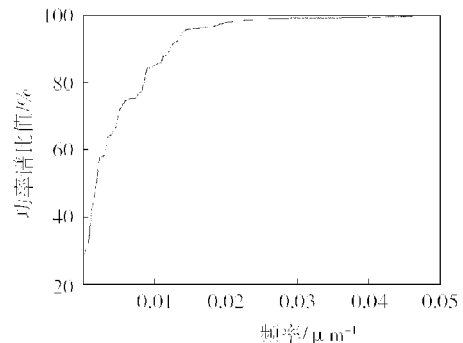


图2 表面累积功率频谱

Fig.2 Cumulative power spectrum of surface

假定满足公式(4)的 f_{ij} 的值为 f_p 。当使用合适的探针测量时,总能够找到很小的 $\min[C_{ij}]$ 值,即 $\min[C_{ij}] < 1/16$ 。但是,当测量工件的探针半径太大或者采样间距太大, f_p 会位于 $f_c/2$, 此时近似因子 C_{ij} 总是正数, $\min[C_{ij}]$ 值大约为 $7/16$ 。如果采样间距太小, f_p 趋向0, 则近似因子 C_{ij} 总是负数, 大约为 $-1/8$ 。

理论上, $\min[C_{ij}]$ 主要是采样间距 Δ 的函数,与采样点数量独立。这一特性表明,对于不同数量的采样点,选择由公式(4)决定采样间距,总能找到较小的近似因子 C_{ij} 值。但是需要注意的是,完全由公式(4)决定得到的采样点数量可能不稳定,不满足工件功能和仪器等其他要求。因此,选择采样点数量需要综合考虑其他条件。

3 实验与讨论

实验采用 TalyScan150 三维扫描仪非接触测量,因工件重要形貌特征在表面所有方向处于同一刻度,

设采样间距 Δx 、 Δy 在正交方向(x 和 y)上相等;其表面粗糙度 S_a 值为几微米,故实验的初始最小采样间距为 $5\ \mu\text{m}$,采样面积为 $8\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$,即采样矩阵 $1\ 600 \times 1\ 600$ 。频谱分析时对表面不同位置进行计算,作 2~4 次算术平均,以减少周期图法频谱估计的统计偏差及表面不同位置的频谱差别。为减少功率泄露引起的频谱失真,对采样数据进行二维快速傅里叶转换前,添加二维 Blackman 窗滤波处理。

3.1 不同复合材料加工表面采样条件确定

分别对 C/C 和 C/Ph 复合材料工件铣削后表面进行测量,所用 C/C 为三向正交结构,C/Ph 为多向铺层结构。分析所得的归一近似因子 C 值见表 1~表 2。由表 1~表 2 可见,对于所研究的工件表面,间距取 $5\ \mu\text{m}$ 时,所有 C 值皆小于零,此时累积功率频谱中 f_p 趋向 0,表明间距过小,所得数据高度相关;间距取 $50\ \mu\text{m}$ 时, C 值远远大于 0.0625,表明间距过大,所得采样点缺少统计意义,而且忽略表面的很多细微结构,会造成表面粗糙度失真。而同一列中的 C 值均近似,表明对不同采样点数量,间距 Δ 选择较稳定。

表 1 C/C 加工表面计算所得近似因子 C 值

Tab.1 Proximity factor C calculated from C/C composites

采样矩阵	C			
	$5\ \mu\text{m}$	$10\ \mu\text{m}$	$20\ \mu\text{m}$	$50\ \mu\text{m}$
128×128	-0.0620	0.0224	0.1921	0.3335
256×256	-0.0630	0.0399	0.1372	
512×512	-0.0550	0.0652		
1024×1024	-0.0750			

表 2 C/Ph 加工表面计算所得近似因子 C 值

Tab.2 Proximity factor C calculated from C/Ph composites

采样矩阵	C			
	$5\ \mu\text{m}$	$10\ \mu\text{m}$	$20\ \mu\text{m}$	$50\ \mu\text{m}$
128×128	-0.0935	-0.0596	0.0387	0.0994
256×256	-0.0924	-0.0619	0.0701	
512×512	-0.0960	-0.0719		
1024×1024	-0.0961			

对照公式(4),并考虑 C 值的稳定性及仪器测量时间等其他要求,上述工件的合理采样条件为:C/C 工件, $\Delta = 10\ \mu\text{m}$,采样矩阵为 256×256 ;C/Ph 工件, $\Delta = 20\ \mu\text{m}$,采样矩阵为 128×128 。

3.2 确定合适采样条件方法的验证

为验证该方法确定采样条件的正确性及适用性,可将利用合适采样条件得到的表面粗糙度值与初始采样条件及某一不适当采样条件得到的表面粗糙度值作对比,结果见表 3。由表 3 可见,每个工件的前两者数值近似相等,而与第三者差值较大,这说明本文确定采样条件方法对碳纤维复合材料表面的适用性及有效性,可以用较大采样间距与较小采样矩阵来采集表面信息,以评定整个工件表面的粗糙度情况,而过小的间距和过大的面积没有必要。另外,通过 C 值与 0.0625 的差值,可估计间距的不适当程度及粗糙度值的偏差情况,具有相当的客观性;同时可知,采用某个统一的采样间距来测量不同切削参数加工后表面并不合理,会造成测量结果的失真。

表 3 不同采样条件的加工表面粗糙度值¹⁾

Tab.3 Values of surface roughness for different sample conditions

工件	$\Delta/\mu\text{m}$	采样矩阵	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	$S_t/\mu\text{m}$	$S_p/\mu\text{m}$	$S_v/\mu\text{m}$	S_{sk}	S_{ku}
C/C	10	256×256	4.22	5.87	124	33.9	90	-2.04	15.1
	5	1600×1600	4.19	6.21	148	50.8	96.8	-1.91	16.9
	20	128×128	2.98	4.41	88.0	26.3	61.7	-0.536	8.17
C/Ph	20	128×128	3.69	4.80	79.2	38.9	40.3	-0.430	5.24
	5	1600×1600	3.82	4.99	83.1	40.6	42.5	-0.336	4.64
	50	128×128	2.62	3.45	48.7	27.1	21.6	-0.905	6.07

注:1) S_a 为表面算术平均偏差, S_q 为表面均方根偏差, S_t 为表面总高度, S_p 为峰顶最大高度, S_v 为谷底最大深度, S_{sk} 为表面高度分布的偏斜度, S_{ku} 为表面高度分布的峭度^[5]。

考虑到碳纤维复合材料工件表面的复杂性,采用合适采样条件对工件进行多次测试并进行对比验证,即 C/C 工件, $\Delta = 10\ \mu\text{m}$,采样矩阵为 256×256 ;C/Ph 工件, $\Delta = 20\ \mu\text{m}$,采样矩阵为 128×128 。对工件的 3 处区域测量,所得表面粗糙度值见表 4。由表 4 可见,3 处测量区域的粗糙度值有差异,特别是高度参

数 S_t 、 S_p 和 S_v ;但比不合理采样条件所得粗糙度值接近采样间距 $5\ \mu\text{m}$ 的初始粗糙度值。这是由复合材料工件的本身特性决定的,由于与树脂基体性质不同的碳纤维增强体的存在导致材料具有各向异性,与金属材料相比其加工时表面容易产生纤维伸长、拉松变形、纤维沿长度方向暴露或掉脱、纤维-基体脱粘、层

间破坏、裂纹、基体熔化等多种缺陷^[6],表面微观结构复杂,各区域有差别。对3组粗糙度值进行平均处理,并与初始粗糙度值比较,发现除高度参数 S_t 、 S_p 和 S_v 以外,其平均值与初始粗糙度值相近;而3次测量的 S_t 、 S_p 和 S_v 值的最大值与初始粗糙度值相近。

由此可知,对于各向异性的碳纤维复合材料加工后表面,应采用合适采样条件进行多次测量, S_a 、 S_q 、 S_{sk} 和 S_{ku} 等粗糙度参数取其平均值,而 S_t 、 S_p 和 S_v 取其最大值,以此来评定其表面质量更合理。

表4 合适采样条件所得表面粗糙度

Tab.4 Values of surface roughness for proper sample conditions

工件	测量区域	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	$S_t/\mu\text{m}$	$S_p/\mu\text{m}$	$S_v/\mu\text{m}$	S_{sk}	S_{ku}
C/C	1	4.22	5.87	124	33.9	90.0	-2.04	15.1
	2	4.46	6.20	135	48.3	87.8	-1.33	9.9
	3	3.82	5.81	139	41.8	95.1	-2.69	27.6
	平均值	4.167	5.96	132.67	41.3	90.967	-2.02	17.533
C/Ph	1	3.69	4.80	79.2	38.9	40.3	-0.43	5.24
	2	3.86	5.02	73.6	37.0	36.7	-0.246	4.01
	3	3.33	4.31	76.9	39.7	37.2	-0.451	4.29
	平均值	3.627	4.71	76.567	38.533	38.067	-0.376	4.513

4 结论

提出了一种客观判定最佳采样条件的方法,该方法基于二维功率频谱分析,考虑混叠效应与奈奎斯特采样定理,提出一个归一近似因子来确定最佳采样条件。通过将此方法应用于不同碳纤维复合材料加工后表面,已证明其适用性和有效性,并可得出如下结论:相同参数加工后工件各区域粗糙度有差异,采用合适采样条件多次测量更合理, S_a 、 S_q 、 S_{sk} 和 S_{ku} 等粗糙度参数取其平均值,而 S_t 、 S_p 和 S_v 取其最大值,以此来评定其表面质量。

参考文献

- 1 Tsukada T, Sasajima K. An optimal sampling interval for digitising surface asperity profiles. *Wear*, 1982; 83: 119 ~ 128
- 2 Lin T Y, Blunt L, Stout K J. Determination of proper frequency bandwidth for 3D topography measurement using spectral analysis. Part I: isotropic surfaces. *Wear*, 1993; 166(2): 221 ~ 232

- 3 Dong W P, Stout K J. Two-dimensional fast fourier transform and power spectrum for surface roughness in three dimensions. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B: Journal of Engineering Manufacture*, 1995; 1 209: 381 ~ 391

- 4 Dong W P, Mainsah E, Stout K J. Determination of appropriate sampling conditions for three-dimensional microtopography measurement. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996; 36(12): 1 347 ~ 1 362

- 5 Dong W P, Sullivan P J, Stout K J. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. *Wear*, 1994; 178(1 ~ 2): 29 ~ 43

- 6 全燕鸣, 叶邦彦. 复合材料的切削加工表面结构与表面粗糙度. *复合材料学报*, 2001; 18(4): 128 ~ 132

(编辑 李洪泉)

(上接第74页)

- 6 邱灵, 杨春利, 林三宝. 高频脉冲变极性焊接工艺性能研究. *焊接*, 2007; (7): 35 ~ 38
- 7 齐铂金, 从保强. 超快变换方波复合脉冲电流变极性弧焊电源装置: 中国, 200710120834.6[P]. 2008-02-20
- 8 屠海令, 干勇. 金属材料理化测试全书. 北京: 化学工业出版社, 2006
- 9 姚君山, 周万盛. 铝及铝合金的焊接. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 10 赵家瑞, 孙栋, 胡绳荪等. 高频脉冲 TIG 电弧的阳极

行为. *焊接学报*, 1992; 13(1): 59 ~ 66

- 11 Cook G E, Eassa E H. The effect of high frequency pulsing of a welding arc. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985; 1A-21(5): 1 294 ~ 1 299

- 12 安藤弘平, 长谷川光雄著. 施雨湘译. 焊接电弧现象. 北京: 机械工业出版社, 1985

- 13 何德坪, 陈锋, 舒光翼. 振动干扰波形对枝晶生长的影响. *人工晶体学报*, 1989; 18(4): 262 ~ 266

(编辑 吴坚)