航空结构件铣削加工表面波纹度特征提取与研究

王洪乐[1]，王家序[1,2]，周青华[1]，熊青春[1,3]，张磊[1]

（1.四川大学 空天科学与工程学院，成都 610065；2.重庆大学 机械传动国家重点实验室，重庆 400044；3.成都飞机工业（集团）有限公司，成都 610092）

摘 要：目的 由于航空结构件壁薄、结构复杂和刚度低等原因，在多轴联动铣削加工过程中，其表面容易出现波纹度等加工纹理缺陷。准确提取、评价铣削表面波纹度，为控制和消除结构件铣削表面波纹度提供可视化参考依据。**方法** 提出了一种频谱分析和小波分析相结合的方法。首先对已加工的航空结构件的铣削表面综合形貌进行频谱分析，依据表面形貌划分依据，确定各表面成分有效信息的频率段范围；再采用 Daubechies 小波分解原表面形貌特征，把含有不同频率成分的信息分解到互不重叠的频率段上；利用 Mallat 快速算法，计算出各逼近系数和小波系数，并对有效频率段进行重构，以实现表面形貌特征不同频率成分的提取，进而获取表面波纹度的形貌特征信息。**结果** 针对某型航空结构件的铣削表面，采用文中方法提取到的波纹度形貌特征信息与粗糙度轮廓仪测量的结果基本吻合，验证了该方法的正确性。**结论** 对于提取铣削表面波纹度特征信息，采用频谱分析和小波分析相结合的方法是可行且有效的。

关键词：航空结构件；表面波纹度；频谱分析；Daubechies 小波分析；Mallat 算法

中图分类号：TG54 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2016)09-0154-09

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.024

Characteristic Extraction and Study of the Surface Waviness of Aircraft Structure Components in Milling Process

WANG Hong-le[1], *WANG Jia-xu*[1,2], *ZHOU Qing-hua*[1], *XIONG Qing-chun*[1,3], *ZHANG Lei*[1]

(1.School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2.State Key Laboratory of Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3.AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd, Chengdu 610092, China)

ABSTRACT: Objective Multiple-axis machining may cause surface texture defects, like waviness, on complex aeronautical structure components, which have the characteristics of thin walls, complex structure and low stiffness etc. In order to control and eliminate milling surface waviness, accurately obtaining and evaluating the parameters of the waviness can supply visual reference for them. **Methods** A method combining frequency spectrum analysis and wavelet analysis was proposed in this paper.

收稿日期：2016-03-05；修订日期：2016-05-03

Received：2016-03-05；**Revised**：2016-05-03

基金项目：国家自然科学基金项目（51435001）；中航工业产学研专项项目（cxy2013CD36）

Fund：Supported by National Natural Science Foundation of China (51435001); AVIC Enterprise University and Research Special Project (cxy2013CD36)

作者简介：王洪乐（1988—），男，硕士研究生，研究方向为复杂航空结构件表面质量控制。

Biography：WANG Hong-le (1988—), Male, Master, Research focus: control of surface quality for complex aircraft structure component.

通讯作者：王家序（1954—），男，教授，博士生导师，研究方向为摩擦学原理。

Corresponding author：WANG Jia-xu (1954—), Male, Professor, Doctor supervisor, Research focus: tribology principle.

Frequency spectrum analysis was firstly conducted to study the comprehensive surface topography to find the frequency band range of valid topography information based on the condition of surface topography characteristics. Then, the original surface topography was decomposed by Daubechies wavelet technique. The information containing different frequency components was arranged into the non-overlapping frequency bands. Approximation coefficients and wavelet coefficients were calculated through the Mallat algorithm and the different frequency components in surface topography characteristics were extracted. Finally surface waviness characteristic information was obtained. **Results** The extracted surface waviness from an aircraft structure component by the proposed method was compared with the measurement data of a surface profiler. Good agreement was obtained between the results of the two methods, demonstrating the correctness of the proposed method. **Conclusion** The proposed method is effective for extracting the waviness information on the milling surface.

KEY WORDS: aircraft structure components; surface waviness; frequency spectrum analysis; Daubechies wavelet; Mallat algorithm

随着航空加工制造业的飞速发展，对航空结构件的铣削表面形貌加工精度提出了更高的要求。目前多数复杂航空结构件在五轴联动数控铣削加工中，由于其壁薄、结构复杂和刚度低等原因，其表面容易出现波纹度等加工纹理缺陷。以某大型钛合金航空结构件为例，其毛坯价值高达数百万元，在铣削加工中，开闭角转换的多轴联动区域和曲率变化较大的部位容易产生表面波纹度等缺陷，并带有一定的不确定性，给加工质量带来了巨大的风险[1]。因此探索从航空结构件铣削加工表面形貌特征中分离并提取表面波纹度的方法，为控制并消除复杂航空结构件铣削表面波纹度误差和后续数控加工工艺的改进提供依据，具有较大的工程实用价值。提取表面波纹度的传统方法是 GB/T 16747—2009[2]中规定的高斯滤波器法，但该方法受截止波长的参数选择不唯一和采样评定轮廓长度过长两方面的限制，模型的稳健性较低。蒋光锐[3]针对冷轧薄板表面波纹度进行了高斯滤波、指数滤波和多项式滤波三种评定方法对比，结果表明滤波方式和测量长度对波纹度的计算结果影响显著。因此，从理论上提出一种有效且通用的方法来分离航空结构件的综合形貌中的表面波纹度误差显得异常重要。

目前，国内针对机械加工表面粗糙度理论的研究比较成熟，而对波纹度的研究较少，且多数集中在磨削方面。翁泽宇[4]给出了磨削颤振和表面波纹度之间的相互关系，磨削深度是影响磨削颤振和磨削表面波纹度的主导因素。李立杰[5]指出在磨削加工中，工艺参数是产生疏波的主因，主轴的自激振动是产生密波的主因。盛晓敏[6]指出在陶瓷材料高效平面磨削中，砂轮线速度和进给速度是影响磨削颤振与表面波纹度的主导因素。研究人员对波纹度的影响因素进行了大量研究，但缺少对表面波纹度特征的分离和提取过程。表面波纹度特征是波纹度产生机理的外在反映，通过分析其波形信息，可以探究切削中刀具的振颤和切削参数与该型结构件的吻合度。针对机械加工表面形貌中粗糙度的特征提取与评价，研究人员大多采用了小波分析的方法。陈庆虎[7—9]给出了一条包括曲面轮廓线、形位误差及波纹度等信息的小波评定基准线（面），提高了表面粗糙度的评价精度。王晓强[10]针对轴承表面形貌特征，提出了二代提升小波用于滤波的方法，获取了精确度较高的表面粗糙度信息。黄美发[11]用 B 样条函数构造出 B 样条小波基准线，实现了表面轮廓与基准线的分离。因此，可以尝试将小波分析用于表面波纹度误差的提取。由于不需要小波评定基准线，因此，分解层数的确定和重构过程中各频段的划分依据成为提取表面波纹度的关键。

为了确定有效信息的频率段范围，频谱分析被引入到噪声等复杂信号分析中用来计算有效频段。Yoshida[12]指出频谱分析对于认清采样信号中的高频、中频和低频频率段非常有效。Lu[13]提出对于掺杂有干扰信号的有效信息提取，需要进行功率谱密度分析，从频率的角度分析出有效和无效频率段。陈东菊[14]用功率谱密度分析了车床液压主轴系统不平衡与表面波纹度之间的关系。

已知文献对复杂航空结构件铣削加工表面波纹度特征提取方法的研究较少。表面波纹度的产生不仅仅局限于磨削或车削工艺中，采用多轴联动铣削加工的复杂航空结构件（框、梁、壁板和叶片等），由于摆角矢量轴或多轴联动的不稳定运动状态和数

控机床的微观低频颤振（或切削加工的再生颤振[15]）都会导致表面波纹等加工纹理缺陷的产生。且该部分波动纹路较国家标准（GB/T 16747—2009）[2]和美国标准（ASMEB 46.1—2009）[17]中的小，对航空结构件的使用寿命造成不可预估的影响。本文结合小波变换的滤波提取特性，对波纹度特征进行提取。拟首先对待分析铣削表面进行频谱分析，确定有效信息和频率段范围；然后采用“最优 Daubechies 小波”和“Mallat 快速算法”对表面形貌特征进行分解与重构，确定分解层数；最后从表面形貌特征中提取出表面波纹度波形。利用实例，将本文方法预测结果与测量结果进行比较，以验证此方法的准确性。

1　表面波纹度特征数学模型

1.1　表面波纹度数学模型

对于高精度、高质量的航空结构件铣削加工曲面，其表面粗糙度虽已达到 R_a=0.8 μm，但仍然存在表面波纹度误差（如图 1 所示[16]），大大削弱了结构件的疲劳寿命性能。

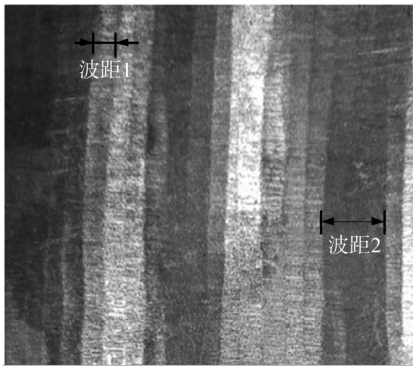


图 1　某型结构件表面微观形貌

Fig.1 Surface micro-topography of certain structure components

表面综合形貌误差包括[17]：1）表面形状误差信息，其波高与波距的比值大于 1:1000，位于被采集信号的低频段；2）表面波纹度信息，其波距一般在 1~10 mm 之间，波高与波距的比值介于 1:50 至 1:1000 之间，位于综合形貌的中频波段；3）表面粗糙度信息，其波高与波距的比值小于 1:50，位于高频波段。大多数航空结构件多轴铣削表面粗糙度集中在 1.6 或 0.8 甚至更低。建立表面综合形貌的数学模型可以表示为：

$$f(x)=f_{\mathrm{xzwc}}(x)+f_{\mathrm{bwd}}(x)+f_{\mathrm{ccd}}(x) \tag{1}$$

式中：$f(x)$，$f_{\mathrm{xzwc}}(x)$，$f_{\mathrm{bwd}}(x)$和$f_{\mathrm{ccd}}(x)$分别为所采集表面的综合形貌、形状误差、波纹度和粗糙度信息。对工件已加工表面中的三个形貌函数作 Fourier[18]变换得：

$$F_{\mathrm{xzwc}}(\omega)=\begin{cases}F(\omega),0\le|\omega|<\omega_0\\0,\mathrm{else}\end{cases} \tag{2}$$

$$F_{\mathrm{bwd}}(\omega)=\begin{cases}F(\omega),\omega_0\le|\omega|\le\omega_1\\0,\mathrm{else}\end{cases} \tag{3}$$

$$F_{\mathrm{ccd}}(\omega)=\begin{cases}F(\omega),\omega_1<|\omega|\le\Omega\\0,\mathrm{else}\end{cases} \tag{4}$$

其中$\omega\in\{0\le\omega_0<\omega_1\le\Omega\}$。表面形貌特征的频率段划分如图 2 所示。

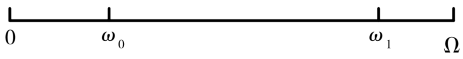


图 2　表面形貌特征的频率段划分

Fig.2 Frequency bands in surface topography characteristics

1.2　Daubechies 小波构造

构造 Daubechies 小波[19—20]，并实现对原表面形貌特征函数的分解与重构。Daubechies 系列小波是 1988 年比利时数学家 I.Daubechies[21]构造的，由于其具有支集紧、“变焦”和正交等特性，使其在图像处理以及信号分析中具有广泛应用。

$L^2(R)$为平方可积函数集，且$f_j(x)\in L^2(R)$，$\{V_j\}_{j\in Z}$为$L^2(R)$的正交多分辨率分析，V_j代表第 j 个逼近子空间，W_j是V_j在V_{j+1}中的正交补空间（$V_{j+1}=V_j\oplus W_j$）。

$$V_j=Closepan\left\{\phi_{j,n}(x)=2^{j/2}\phi_{j,n}\left(2^jx-n\right);n\in Z\right\} \tag{5}$$

$$W_j=Closepan\left\{\varphi_{j,n}(x)=2^{j/2}\varphi_{j,n}\left(2^jx-n\right);n\in Z\right\} \tag{6}$$

则$\{\phi_{j,n}(x)\}_{k\in Z}$和$\{\varphi_{j,n}(x)\}_{k\in Z}$分别构成$V_j$和$W_j$的标准正交基。

Daubechies 系列小波的尺度函数$\phi(x)$和小波函数$\varphi(x)$，两者之间满足以下二维尺度关系：

$$\begin{cases}\phi(x)=\sqrt{2}\sum\limits_{k\in Z}h_k\phi(2x-k)\\\varphi(x)=\sqrt{2}\sum\limits_{k\in Z}g_k\phi(2x-k)\end{cases} \tag{7}$$

式中：h_k为低通滤波器系数，$h_k=2[\phi(x),$

$\phi(2x-k)]=2\int_{-\infty}^{\infty}\phi(x)\overline{\phi(2x-k)}\mathrm{d}x$；$g_k$ 为高通滤波器系数，$g_k=(-1)^k\bar{h}_{1-k}$。

由采样得到的表面轮廓 $f(x)\in\{V_j\}_{j\in Z}$，舍去不满足平方可积条件的函数值。$f_j(x)$ 为函数 $f(x)$ 的多尺度逼近，$C_{j,k}$ 为函数 $f_j(x)$ 的逼近系数。

$$C_{j,k}=\sum_{k\in Z}h_{n-2k}C_{j-1,n} \tag{8}$$

在同一尺度下，与 $f_j(x)$ 对应的细节函数 $s_j(x)$，构成小波子空间 $\{W_j\}_{j\in Z}$，其小波系数 $D_{j,k}$ 满足式(9)。

$$D_{j,k}=\sum_{k\in Z}g_{n-2k}D_{j-1,n} \tag{9}$$

在尺度空间 V_j 内系数 $C_{j,k}=\int_{-\infty}^{\infty}f(x)2^{j/2}\phi_{j,k}\cdot(2^jx-k)\mathrm{d}t$ 满足式（10）。

$$f_j(x)=\sum_{k\in Z}C_{j,k}\phi_{j,k}(2^jx-k) \tag{10}$$

在小波子空间 W_j 内小波系数 $D_{j,k}=\int_{-\infty}^{\infty}s_j(x)2^{j/2}\varphi_{j,k}(2^jx-k)\mathrm{d}t$ 满足式（11）。

$$s_j(x)=\sum_{k\in Z}D_{j,k}\varphi_{j,k}(2^jx-k) \tag{11}$$

则 $f(x)$ 分解算法为：

$$\begin{cases}C_{j-1,k}=\sum_{k\in Z}h_{n-2k}C_{j,n}\\ D_{j-1,k}=\sum_{k\in Z}g_{n-2k}C_{j,n}\end{cases} \tag{12}$$

可得出待测表面轮廓形貌函数的分解算法为：

$$f(x)=f_1(x)+s_1(x)=\cdots=f_n(x)+s_n(x)+s_{n-1}(x)+\cdots+s_2(x)+s_1(x) \tag{13}$$

式中：$f_j(x)$ 为低频信号；$s_j(x)$ 为高频信号。将原始形貌特征进行 n 层分解，如图 3 所示。有的

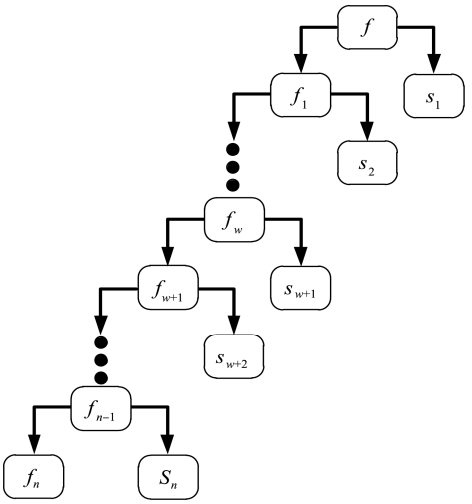


图 3　原函数的 n 层分解示意

Fig.3 n-layers decomposition of the original function

研究者将 $f_n(x)$ 作为小波评定基准[22]，得到表面粗糙度，但在提取表面波纹度时，没有小波评定基准线（面），需要根据频谱分析中的分界频率来划分确定分解和重构。

$f_j(x)$ 和 $s_j(x)$ 的重构算法为：

$$C_{j,k}=\sum_{k\in Z}h_{n-2k}C_{j-1,n}+\sum_{k\in Z}g_{n-2k}D_{j-1,n} \tag{14}$$

对各个有效频率段函数进行重构得：

$$F_{\mathrm{xzwc}}(\omega)=f_n(x)+s_n(x)+\cdots+s_{n-i}(x) \tag{15}$$

$$F_{\mathrm{bwd}}(\omega)=s_{n-i-1}(x)+\cdots+s_{n-i-j}(x) \tag{16}$$

$$F_{\mathrm{ccd}}(\omega)=s_{n-i-j-1}(x)+s_{n-i-j-2}(x)+\cdots+s_1(x) \tag{17}$$

采样得到的表面轮廓函数 $f(t)$ 是由一系列的 $f(nT)$ 离散采样信号叠加在一起的。T 为采样间隔，由文献[19]中的定理可知：

$$s_{-k}(\omega)=\begin{cases}F(\omega),\Omega/2^k\le|\omega|<\Omega/2^{k-1}\\ 0,\mathrm{else}\end{cases}\quad k=1,2,\cdots,N \tag{18}$$

式（16）和（17）可化为：

$$F_{\mathrm{bwd}}(\omega)=s_{n-i-1}(x)+\cdots+s_{n-i-j}(x)=\begin{cases}F(\omega),\Omega/2^{n-i}\le|\omega|<\Omega/2^{n-i-j-1}\\ 0,\mathrm{else}\end{cases} \tag{19}$$

$$F_{\mathrm{ccd}}(\omega)=s_{n-i-j-1}(x)+s_{n-i-j-2}(x)+\cdots+s_1(x)=\begin{cases}F(\omega),\Omega/2^{n-i-j-1}\le|\omega|<\Omega\\ 0,\mathrm{else}\end{cases} \tag{20}$$

对式（19）和（20）中的 i，j 和 n 取整数且需满足下式：

$$\begin{cases}\Omega/2^i\le\omega_1<\Omega/2^{i-1}\\ \Omega/2^{i+j}\le\omega_0<\Omega/2^{i+j-1}\\ n\ge i+j+1\end{cases} \tag{21}$$

1.3　Mallat 快速算法

在上述分解算法中，$f_j(x)$ 与 $s_j(x)$ 是 $f_{j-1}(x)$ 在尺度空间 V_j 与小波子空间 W_j 中的逼近（低频）与细节（高频），要想利用 $C_{j+1,k}$，h_k 和 g_k 实现式（13）的分解，必须计算逼近系数 $C_{j,k}$ 和小波系数 $D_{j,k}$。利用 Mallat 快速分解算法[20]可以快速实现式（13）的分解过程。

$$C_{j,k}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{n\in Z}C_{j+1,n}\overline{h_{n-2k}} \tag{22}$$

$$D_{j,k}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{n\in Z}C_{j+1,n}\overline{g_{n-2k}} \tag{23}$$

对于式（15）—（17），基于 Mallat 快速重构算法[20]，利用 $C_{j,k}$、$D_{j,k}$、h_k 和 g_k 来计算逼近系数 $C_{j+1,k}$ 和小波系数 $D_{j+1,k}$，可实现快速重构形状误差、表面波纹度和表面粗糙度。

$$\tilde{C}_{j+1,k}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{n\in Z}C_{j,(k-n)/2}h_n \tag{24}$$

$$\tilde{D}_{j+1,k}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{n\in Z}D_{j,(k-n)/2}g_n \tag{25}$$

$$C_{j+1,k}=\tilde{C}_{j+1,k}+\tilde{D}_{j+1,k} \tag{26}$$

2　模拟演算与实验验证

2.1　模拟演算

用已知函数(27)分别模拟工件表面形状轮廓误差、表面波纹度和表面粗糙度，同时加入随机数组，那么工件表面综合形貌误差见式(28)。

$$\begin{cases} g_1(t)=17\sqrt{1-((i-118)/163)^2} \\ g_2(t)=2\sin(2\pi i/15) \\ g_3(t)=0.7\sin(13\pi i/1.9) \end{cases} \tag{27}$$

$$f(t)=g_1(t)+g_2(t)+g_3(t)+\mathrm{rand}(t) \tag{28}$$

在函数 $f(t)$ 原有的范围，设定采样频率为 100 Hz（采样长度 l_r、评定长度 l_n 和采样间隔 Δ 等参数不考虑），先进行频谱分析，如图 4 所示。由于快速 Fourier 变换后得到对称图形，此处仅显示一半。对凸出的区域 1 和 2 放大显示（如图 5 所示），中频段存在 4.4 Hz 的波纹度信息，高频段存在 29 Hz

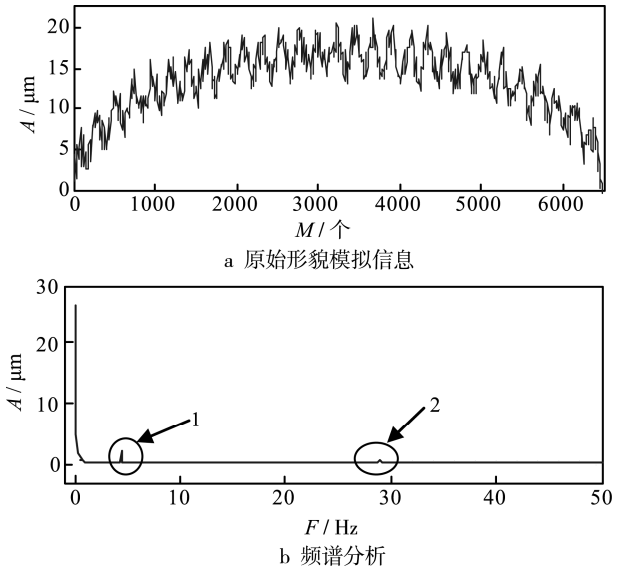


图 4　模拟表面综合形貌和其频谱分析结果

Fig.4 Simulated comprehensive surface topography and the result of spectrum analysis: a) simulated comprehensive surface topography, b) spectrum analysis

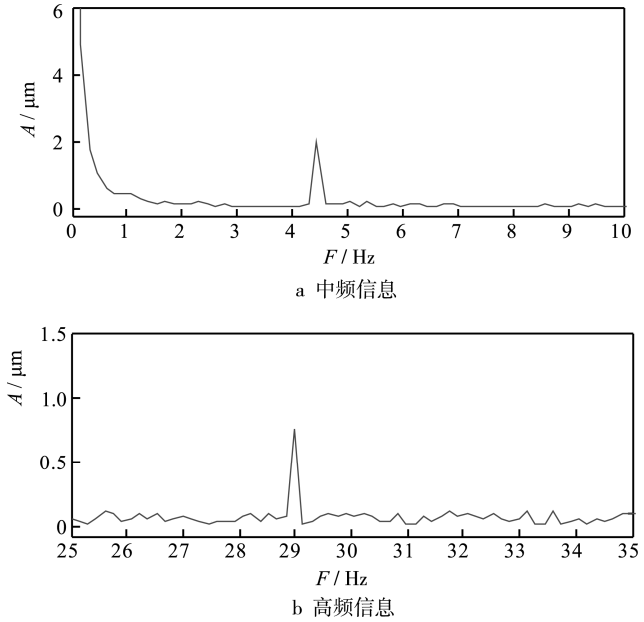


图 5　中频和高频信息放大显示

Fig.5 The magnification of medium and high frequency: a) medium frequency information, b) high frequency information

的粗糙度信息。

图 4 和图 5 说明，在整个采样点集中含有 3 个频率段的信号，分别为 0.2、4.4、29 Hz，满足频率的划分。利用 Db5 小波对原表面形貌进行 5 层分解（如图 6 所示），低频信号即为表面形状误差，高频信号为表面粗糙度，余下的中频信号为表面波纹度。因此，在进行重构时，将高频信号对应的分界频率 ω_1 向上重构，得到表面粗糙度信息；将低频信号对应的分界频率 ω_0 向下与最底低频层信号进行重构，即为表面形状误差；将剩下 ω_1 与 ω_0 间频率层进行重构，得到表面波纹度信息。波纹度幅值都在 2 μm 以内，与给定的函数相符（图 7b），粗糙度幅值都在 0.5 μm 上下，与给定的函数基本一致（图 7c），验证了该方法是有效的。

2.2　实际加工表面实验验证

针对中航工业某飞机公司的大型 A/B 摆角龙门数控铣床加工的复杂型面航空薄壁结构件，由于结构件自身属性和加工工艺的特殊性，铣削加工表面整体粗糙度已达 R_a=0.8 μm，但某些区域仍然存在波纹度等加工纹理缺陷，如图 1 所示。若该结构件用于普通机械工程装配，则已经满足要求；若用于航空发动机的转子等部位，则会大大削弱疲劳寿命性能，因此必须对其表面波纹度误差进一步研究。采用数显式显微镜（放大 50 倍）观察发现有较规

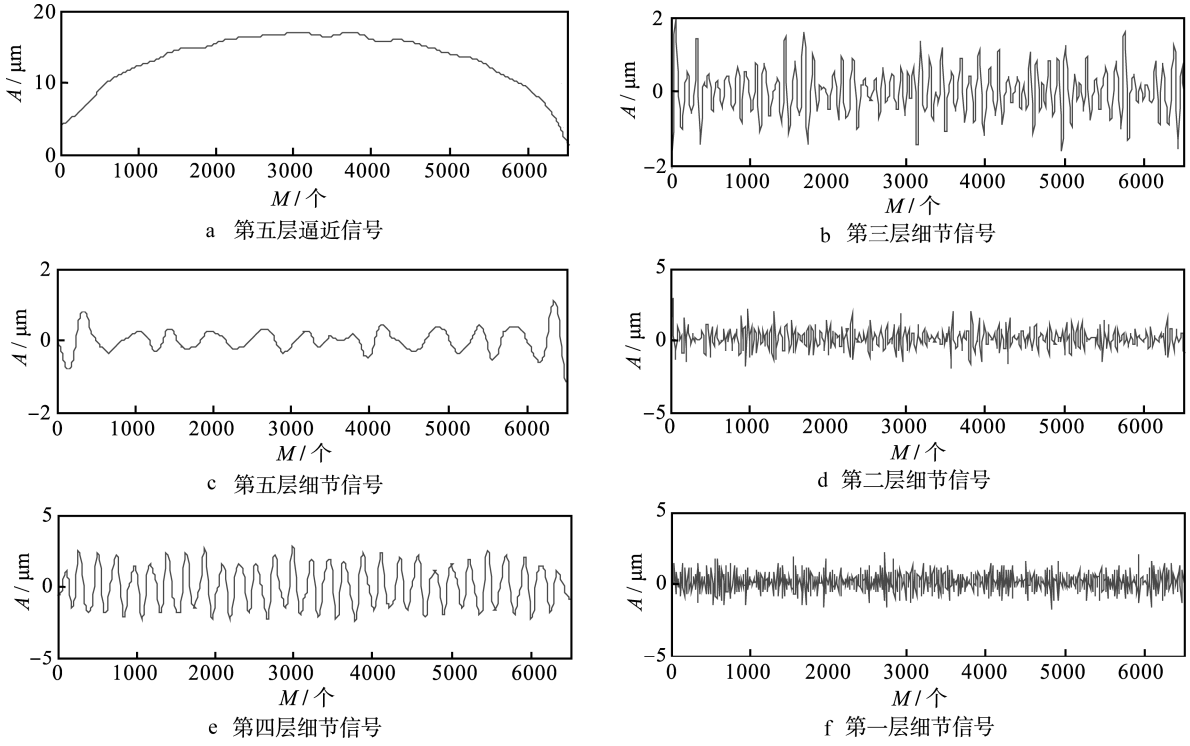


图 6　表面形貌分解图

Fig.6 Detail sketch of surface topography

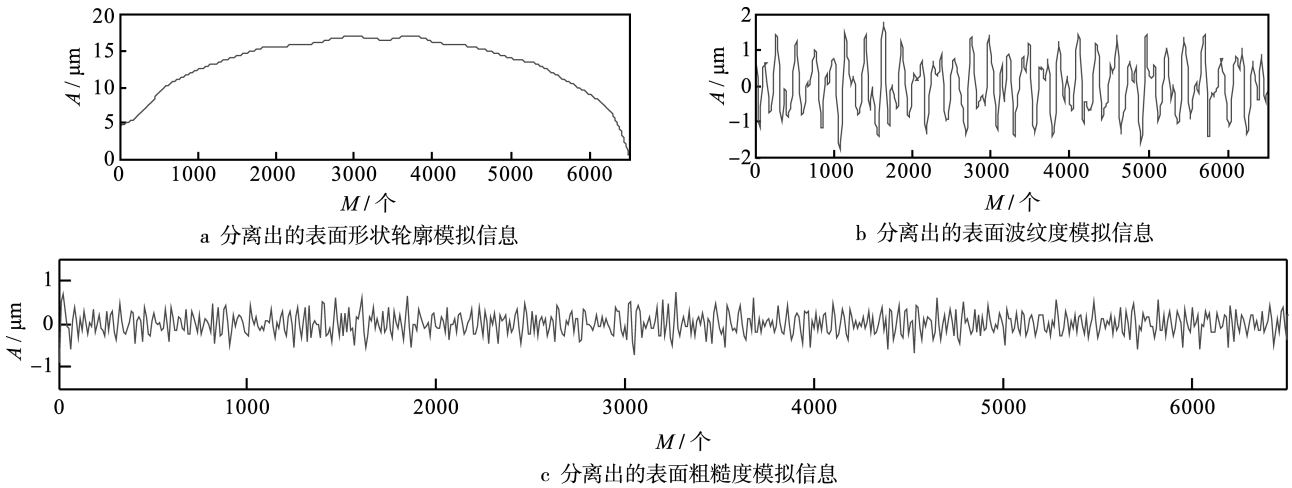


图 7　本文算法的结果

Fig.7 Result of the presented method: a) extracted surface profile information, b) extracted surface waviness information, c) extracted surface roughness information

则的波动纹路(波距一约为 0.9 mm 和波距二约为 3.2 mm) 和紊乱的波动条纹等。采用英国 Taylor-Hobson 公司的 PGI830 表面粗糙度轮廓仪[23],对其进行表面形貌特征的信息采样,如图 8 所示,其参数设定为:探针移动速度 100 μm/s，采样长度 l_r=0.5 mm，评定长度 l_n=4.5 mm，采样间隔 Δ=1.0 μm，跨越波距一和少部分波距二位置采集表面轮廓形貌上的 2100 个点数。

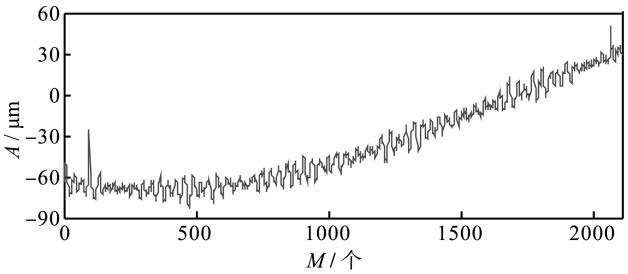


图 8　测得表面的综合形貌

Fig.8 Measuring the comprehensive surface topography

对采样信息进行频谱分析，如图 9 所示，并对

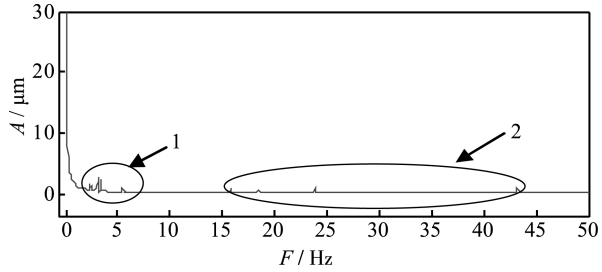
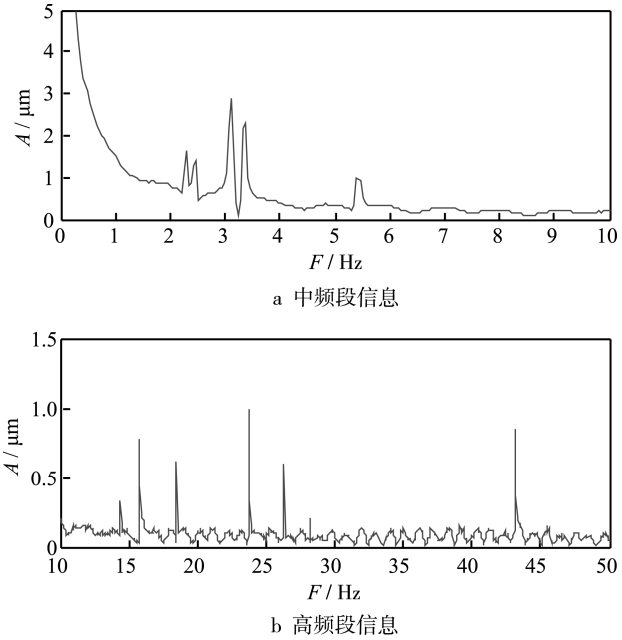


图 9　测得表面综合形貌特征频谱分析结果

Fig.9 The result of frequency spectrum analysis of surface topography

其中的区域 1 和 2 放大显示，如图 10 所示。由图 10a 可知，处于中频率段范围内的表面形貌信息，频率都集中在 2.2~5.5 Hz 之间，其对应的幅值在 1.0~3.8 μm 之间。由图 10b 可知，高频范围内的表面形貌信息频率集中在 14.5~44 Hz 之间，其对应的表面形貌变化幅值集中在 0.2~0.9 μm 之间。依照 1.1 小节给出的表面波纹度的定义参数，该测量部分的理论波纹度计算波高介于 0.9~10 μm 之间。综合考虑该表面总体粗糙度参数为 0.8，结合频谱分析结果，则实际波纹度的波高为 1.0~5 μm，该实际波高与预测结果比较接近。

采样频率为 100 Hz，样本最大频率为 50 Hz，采用 Daubechies 小波 Db5 进行分解，中心频率为 1.5625 Hz，能够满足频谱分析（图 10a）的结果，实现样本表面形貌的分解。高通滤波器系数 $h_k \in$



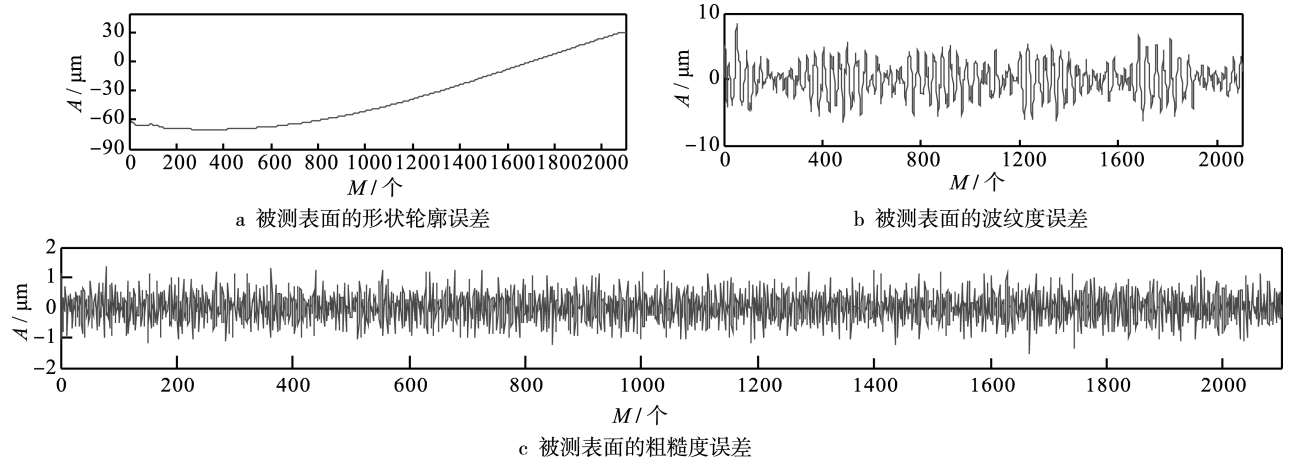
a 中频段信息

b 高频段信息

图 10　中频和高频信息放大显示

Fig.10 The magnification of Medium and High frequency: a) Medium frequency information, b) High frequency information

$\{0.475\,846\,0, 0.819\,652\,1, -0.215\,018\,5, -0.076\,643\,1, 0.410\,377\,4\}$，然后根据不同频率段范围内的波形进行重构，逼近系数 $C_{j,k} \in \{0.482\,962\,9, 0.836\,516\,3, 0.224\,143\,8, -0.129\,409\,5\}$，分别获得表面形状轮廓误差、表面波纹度和表面粗糙度（如图 11 所示）。



a 被测表面的形状轮廓误差

b 被测表面的波纹度误差

c 被测表面的粗糙度误差

图 11　本文算法的实验结果

Fig.11 Experimental result of the presented method: a) simulated surface profile of the measured surface, b) simulated surface waviness of the measured surface, c) simulated surface roughness of the measured surface

对重构后的表面波纹度（W_a）与粗糙度（R_a）做统计分析，如表 1 和表 2。表 1 中有效的统计点数为 2073 个（边界位置因为奇异特性被隔离了），有 4.62%点的波动幅值与粗糙度近似，大部分的波纹度振动幅值集中在 1~3.5 μm 之间。表 2 中有效的统计点数为 2088 个，波动幅度在 0.8 μm 以下的占 83.76%，有 11.48%的点数接近 0.8 μm。该工艺加工出的该型结构件，虽粗糙度满足要求，但仍存

在表面波纹度振幅较大的缺陷，使其疲劳寿命降低。

表 1　表面波纹度参数统计分析结果

Tab.1 Statistical information of the surface waviness parameter

振幅 A/μm	点数 M	占比/%
$\|A\|>4$	52	2.48
$3.5<\|A\|\leq4$	65	3.10
$3<\|A\|\leq3.5$	185	8.81
$2.5<\|A\|\leq3$	214	10.19
$2<\|A\|\leq2.5$	391	18.62
$1.5<\|A\|\leq2$	518	24.67
$1<\|A\|\leq1.5$	551	26.24
$0<\|A\|\leq1$	97	4.62

表 2　表面粗糙度参数统计分析结果

Tab.2 Statistical information of the surface roughness parameter

振幅 A/μm	点数 M	占比/%
$\|A\|>1.2$	27	1.29
$1.0<\|A\|\leq1.2$	61	2.90
$0.8<\|A\|\leq1.0$	241	11.48
$0.6<\|A\|\leq0.8$	412	19.62
$0.4<\|A\|\leq0.6$	725	34.52
$0.2<\|A\|\leq0.4$	516	24.57
$0<\|A\|\leq0.2$	106	5.05

在该薄壁工件上随机选取 8 个位置，用 PGI830 进行形貌参数（R_a 和 W_a）的测量，其结果如表 3 所示。其表面粗糙度都处于 1 μm 以下，与表 2 结果一致；表面波纹度在 1~5 μm 之间，与表 1 结果基本一致，该结果验证了本文方法提取的表面波纹度是正确的。因此，依据波纹度的波形和变化趋势，为进一步分析表面波纹度的产生原因和采取相应的控制措施提供了参考依据。

表 3　用 PGI830 测得的表面粗糙度和波纹度参数结果

Tab.3 Surface roughness and waviness parameters measured by PGI830　μm

位置	R_a	W_a
1	0.388	3.5295
2	0.622	1.912
3	0.437	2.7543
4	0.695	1.9211
5	0.743	5.6410
6	0.584	0.6447
7	0.968	1.3951
8	0.713	3.0376
均值	0.643 75	2.604 413

3　结论

基于 Daubechies 系列小波的分解与重构，并结合频谱分析，运用 Daubechies 小波和 Mallat 算法，将有铣削纹理缺陷的航空结构件表面综合形貌信息进行分解，并对各有效频率段范围内的波形进行重构，提取出表面波纹度信息，实现了表面综合形貌的分离。利用该方法的预测结果与实验结果基本吻合，验证了该方法提取表面波纹度特征的正确性。该方法对于研究复杂航空结构件在铣削加工过程中产生表面波纹度误差的成因机理、结构件的整体设计和铣削加工工艺改进具有较好的指导价值，同时也可以将该方法应用于常规零件表面形貌特征信息的深入分析研究中。

参考文献

[1] 韩雄, 汤立民. 大型航空结构件数控加工装备与先进加工技术[J]. 航空制造技术, 2009(1): 44—47.
HAN Xiong, TANG Li-min. NC Machining Equipment and Advanced Machining Technology for Large Aircraft Component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(1): 44—47.

[2] GB/T 16747—2009, 产品几何技术规范(GPS) 表面结构轮廓法表面波纹度词汇[S].
GB/T 16747—2009, Geometrical Product Specification (GPS)-Surface Texture: Profile Method-Surface Waviness Terms[S].

[3] 蒋光锐, 滕华湘, 张浩, 等. 冷轧薄板表面波纹度评价标准研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 112—115.
JIANG Guang-rui, TENG Hua-xiang, ZHANG Hao, et al. Study on Measurement Standards of Waviness on Cold Rolled Sheet[J]. Surface Technology, 2013, 42(5):112—115.

[4] 翁泽宇, 丁红钢, 郭明飞, 等.平面磨削颤振试验研究[J]. 机械强度, 2006, 28(1): 25—28.
WENG Ze-yu, DING Hong-gang, GUO Ming-fei, et al. Experimental Investigation of Grinding Chatter in Surface Grinding Process[J]. Journal of Mechanical Strength. 2006, 28(1):25—28.

[5] 李立杰. 工程陶瓷平面磨削表面波纹度和动态特性的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
LI Li-jie. Experimental Research on Surface Waviness and Dynamic Characteristics of Engineering Ceramics in Surface Grinding[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.

[6] 盛晓敏, 资嘉磊, 宓海青, 等. 工程陶瓷高效平面磨削表面波纹度试验研究[J]. 工程设计学报, 2006, 13(6): 421—425.
SHENG Xiao-min, ZI Jia-lei, MEI Hai-qing, et al. Research on Surface Waviness of Advanced Ceramics in High Efficiency Surface Grinding[J].Journal of Engineering Design. 2006, 13(6): 421—425.

[7] 陈庆虎, 李柱. 表面粗糙度评定的小波基准线[J]. 计量学报, 1998, 19(4): 254—257.
CHEN Qing-hu, LI Zhu. Wavelet Reference Line for Surface Roughness Evaluation[J]. ACTA Metrologica Sinica, 1998, 19(4): 254—257.

[8] CHEN Qing-hu, YANG Shu-nian, LI Zhu. Surface Roughness Evaluation by Using Wavelets Analysis[J]. Precision Engineering, 1999, 23: 209—212.

[9] 陈庆虎, 李柱. 表面粗糙度提取的小波频谱法[J]. 机械工程学报, 1999, 35(3): 41—43.
CHEN Qing-hu, LI Zhu. Method of Wavelet for Picking up Surface Roughness[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(3): 41—43.

[10] 王晓强, 李艳娜, 崔凤奎, 等. 基于二代小波的表面粗糙度信息提取[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2015, 36(3): 14—17.
WANG Xiao-qiang, LI Yan-na, CUI Feng-kui, et al. Extraction of Surface Roughness Information Based on Second Generation Wavelet Transform[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science. 2015, 36(3): 14—17.

[11] 黄美发, 陈磊磊, 宫文峰, 等. 表面形貌评定的 B 样条小波基准线的实现[J]. 机械设计, 2013, 30(1): 10—13.
HUANG Mei-fa, CHEN Lei-lei, GONG Wen-feng, et al. Realization of B-spline Wavelet Reference Line for the Surface Topography Evaluation[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(1): 10—13.

[12] YOSHIDA K. Power Spectral Density Peak Estimation from Broadband Data[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 312(4/5): 893—905.

[13] LU F, KENNED D, WILLIAM F W, et al. Symplectic Analysis of Vertical Random Vibration for Coupled Vehicle-track Systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 317(1/2): 236—249.

[14] 陈东菊, 范晋伟, 李海涌, 等. 超精密加工中表面波纹度与主轴系统不平衡关系[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1)191—198.
CHEN Dong-ju, FAN Jin-wei, LI Hai-yong, et al. Relationship between Waviness in Ultra-precision Machining and Spindle Unbalance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 191—198.

[15] 张大卫, 何家祥, 徐燕申, 等. 动态切削中振动频率和切削转速的关系[J]. 天津大学学报, 1994, 27(4): 517—520.
ZHANG Da-wei, HE Jia-xiang, XU Yan-shen, et al. The Study on the Relationship Between Vibration Frequency and Cutting Rotation Speed in Dynamic Cutting Process [J]. Journal of Tianjin University, 1994, 27(4): 517—520.

[16] 赵波. S 形检验试件数控侧铣振动分析及加工表面质量研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
ZHAO Bo. S Shape Test Specimen CNC Side Milling Vibration Analysis and Machining Surface Quality Research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.

[17] ASME B46.1—2009, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay) [S].

[18] RONALD N B. The Fourier Transform and Its Applications[M]. New York: McGraw Hill, 2000.

[19] 冉启文, 谭立英. 小波分析与分数傅里叶变换及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 31—39.
RAN Qi-wen, TAN Li-ying. Wavelet Analysis and Fractional Fourier Transform and Applications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 31—39.

[20] 樊启斌. 小波分析[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008: 115—127.
FAN Qi-bin. Wavelet Analysis[M].Wuhan: Wuhan University Press, 2008: 115—127.

[21] DAUBECHIES I. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets[J]. Communications on Pure and Applied Math, 1988, 41(7): 909—996.

[22] 张志航, 崔海, 丁海娟, 等. MWEDM 表面三维粗糙度的小波评定基准面[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(9): 1185—1189.
ZHANG Zhi-hang, CUI Hai, DING Hai-juan, et al. The Reference Plane by Wavelets for 3D Roughness Evaluation of Micro Wire Electrical Discharge Machining (MWEDM)[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(9): 1185—1189.

[23] PERTON M, AUDOIN B, PAN Y D,et al. Surface Finish Measurement Methods and Instrumentation[J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(12): R175—R195.