

侧铣加工表面形貌仿真与验证

■ 武汉华中数控股份有限公司（湖北 430023） 江哲夫 薛 聪

摘要：以圆柱立铣刀铣削过程中表面形貌缺陷为研究对象，分析两个联动轴铣削过程中跟随误差波动与表面形貌缺陷之间的关系。建立一种以两个轴的跟随误差波动和加工指令数据为数据支持的数控铣削过程表面形貌物理仿真模型。同时使用表面轮廓综合测量仪对零件加工表面形貌进行测量，对物理仿真模型进行验证。

加工表面是由刀具和工件的几种相对运动合成作用而产生在工件表面上的残留痕迹。加工表面的几何形状和纹理统称为表面形貌，它不仅与切削加工的工艺参数和机床结构的动力学特性、刀具和工件的材料以及力学特性有关，而且还与伺服驱动器的控制、电动机的齿槽效应有关。

在数控加工过程中，由于机床的物理结构特性，轴在运行过程中必然存在延迟，轴运动的实际位置与指令位置存在差值，即跟随误差。跟随误差会对零件加工的轮廓误差产生影响。跟随误差的大小与机床轴的运行速度有关，由于电动机齿槽效应的存在，引起机床轴运行速度波动，最终导致跟随误差的波动。在固定速度运动过程中，跟随误差存在波动情况。

以往的研究主要集中在跟随误差对加工零件轮廓误差之间的关系，而本文着重研究两轴联动过程中跟随误差波动对工件加工表面形貌的影响。通过提取跟随误差数据中的跟随误差波动，对跟随误差波动进行频谱分析，将

频谱中幅值较高部分的幅值、频率和相位作为参数，仿真出跟随误差波动表达式，最终获得表面形貌。通过测量实际加工表面，得到实际表面成形波动，与仿真表面形貌进行对比验证。

1. 单轴恒速跟随误差仿真

机床运动过程中的实际位置 $X(t)$ 与指令位置 $X_0(t)$ 和跟随误差 $E(t)$ 的关系如下

$$X(t) = X_0(t) + E(t) \quad (1)$$

跟随误差是随机床运行速度变化而变化的，在变速运动过程中，跟随误差也是时刻在变化的，在恒速过程中，跟随误差基本恒定在一个固定的值。受到电动机齿槽效应的影响，跟随误差波动情况普遍存在。所以，将跟随误差 $E(t)$ 的成分由主成分 $E_0(t)$ 和跟随误差波动 $\varepsilon(t)$ 组成

$$E(t) = E_0(t) + \varepsilon(t) \quad (2)$$

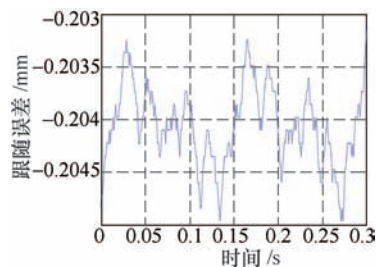
跟随误差的主成分 $E_0(t)$ 与指令速度 $v_0(t)$ 成正比例关系，则两者关系如下

$$E_0(t) = K \times v_0(t) \quad (3)$$

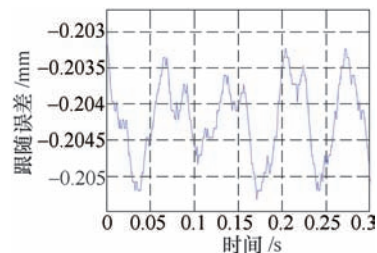
式(3)中的 K 与电动机伺服

驱动器有关，对于不同的伺服驱动器和伺服参数的设置， K 值各不相同；对于伺服驱动器型号相同且伺服参数相同的两个轴， K 值基本一致，一般数控机床铣床 X 轴和 Y 轴伺服驱动器型号和伺服参数设置完全相同。

在恒速过程，将一组以恒定速度沿 45° 斜线加工的数据进行分析。恒速过程中，式(2)中跟随误差的主成分 $E_0(t)$ 为恒定值，如图1所示，跟随误差波动波峰波谷最大差值在 $2\mu\text{m}$ 左右。



(a) X轴



(b) Y轴

图1 斜线加工X轴和Y轴跟随误差

跟随误差波动呈周期性变化,将跟随误差波动 $\varepsilon(t)$ 进行傅里叶变换(FFT),求出它的幅频特性曲线和相频特性曲线,如图2所示,将其中的主要幅值较大的频率成分提取出仿真原始信号,再取其中的一些高频成分作为信号的噪声 $\sigma(t)$,通过式(4)表示信号。

$$\varepsilon(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) + \dots + \sigma(t) \quad (4)$$

将X轴和Y轴中跟随误差频FFT中幅值最高和次高的频率提取,如附表所示。将附表中对应的频率、幅值和相位作为参数代入式(4)中得到仿真的跟随误差波动表达式。再代入式(3),在式(3)中,由于加工指令为恒速45°斜线,所以X轴的指令速度 $v_{0x}(t)$ 和Y轴的指令速度 $v_{0y}(t)$

关系为

$$v_{0x}(t) = v_{0y}(t) = v \quad (5)$$

由(5)式可得到仿真跟随误差表达式

$$E_x(t) = K \times v + 2.9 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 0.11) + 2.7 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 15.6 \times t - 0.026) + \sigma_x(t) \quad (6)$$

$$E_y(t) = K \times v + 5.9 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 1.14) + 5.5 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 15.6 \times t - 2.9) + \sigma_y(t) \quad (7)$$

主频率成分的频率、幅值和相位表

轴号	X轴		Y轴	
	第一主频	第二主频	第一主频	第二主频
频率/Hz	7.8	15.6	13.7	15.6
幅值/ μm	0.29	0.27	0.59	0.55
相位/(°)	-0.11	-0.026	-1.14	-2.9

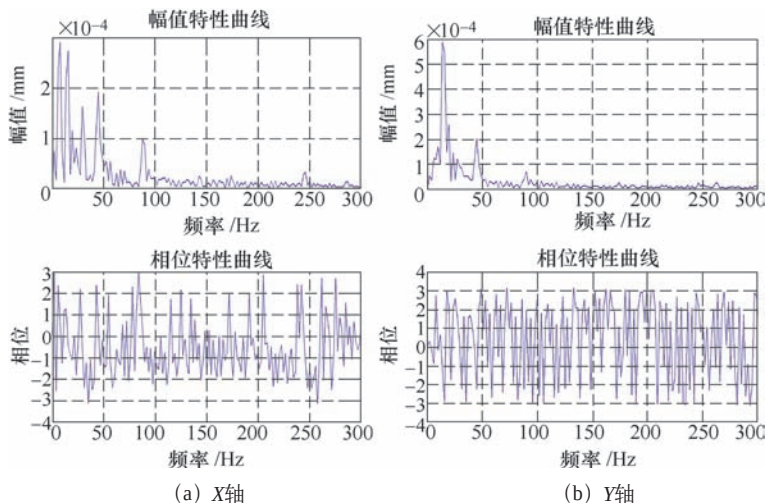


图2 斜线加工X轴和Y轴跟随误差的幅频和相频特性曲线

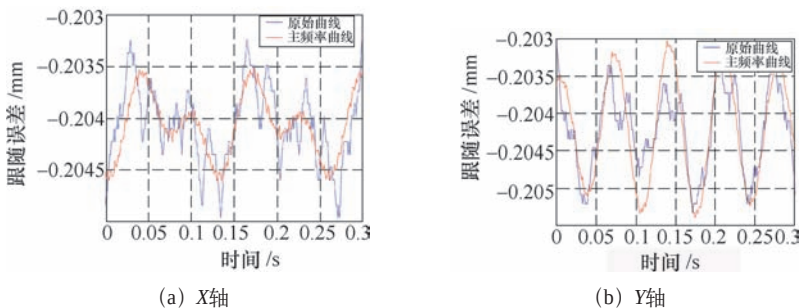


图3 斜线加工X轴和Y轴跟随误差原始信号和仿真信号

斜线加工X轴和Y轴跟随误差原始信号和仿真信号结果如图3所示。

2. 单轴变速跟随误差仿真

在变速过程中,对一组圆弧加工数据进行分析,圆弧半径为 R ,加工进给速度为 v 。由式(3)可得,跟随误差主成分

$$E_{0x}(t) = K \times v_{0x}(t) = K \times v \times \sin\left(\frac{v}{R}t\right) \quad (8)$$

$$E_{0y}(t) = K \times v_{0y}(t) = K \times v \times \cos\left(\frac{v}{R}t\right) \quad (9)$$

跟随误差原始信号和主成分的比较如图4所示。

从跟随误差原始信号中除去跟随误差主成分,提取出跟随误差原始波动数据。如图5所示,跟随误差波动最大差值为 $1.2\mu\text{m}$,将跟随误差波动FFT中两个最大幅值的频率提取,添加一些高频成分作为噪声,仿真跟随误差波动 $\varepsilon(t)$ 。

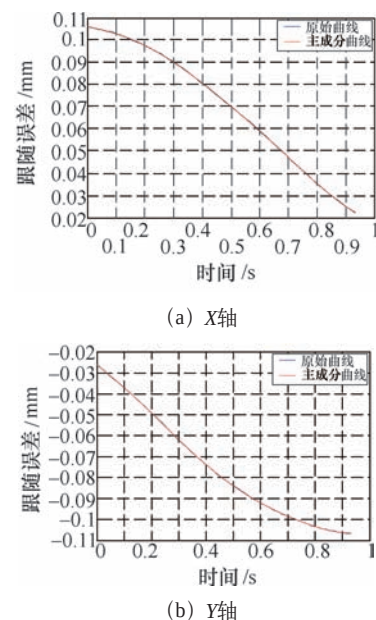


图4 圆弧加工X轴和Y轴跟随误差原始信号与跟随误差主成分

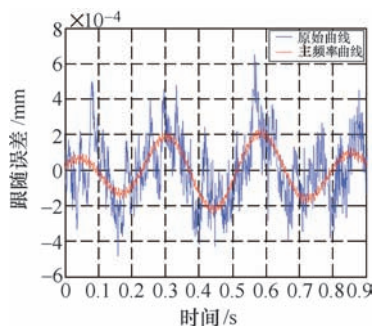
$$\varepsilon_x(t) = 1.3 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 3.9 \times t + 1.39) + 8.8 \times 10^{-5} \sin(2\pi \times 3.9 \times t - 1.54) + \sigma_x(t) \quad (10)$$

$$\varepsilon_y(t) = K \times v + 1.1 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 2.9 \times t - 3.49) + 1.1 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 5.58) + \sigma_y(t) \quad (11)$$

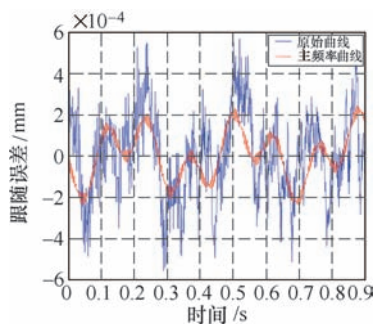
将式(10)和式(11)代入式(8)与式(9)中,得到仿真跟随误差

$$E_x(t) = K \times v \times \sin\left(\frac{v}{R}t\right) + 2.9 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 0.11) + 2.7 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 15.6 \times t - 0.026) + \sigma_x(t) \quad (12)$$

$$E_y(t) = K \times v \times \cos\left(\frac{v}{R}t\right) + 5.9 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 1.14) + 5.5 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 15.6 \times t - 2.9) + \sigma_y(t) \quad (13)$$



(a) X轴



(b) Y轴

图5 圆弧加工X轴和Y轴跟随误差原始信号和仿真信号

3. 仿真表面形貌

跟随误差仿真完成,根据式(1)可以得到实际位置数据,将X轴和Y轴仿真实位置数据对应,得到仿真实表面形貌。

恒速加工过程,指令加工轨迹为45°斜线,将式(6)和式(7)带入式(1)得

$$X_x(t) = X_{0x}(t) + K \times v + 2.9 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 0.11) + 2.7 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 15.6 \times t - 0.026) + \sigma_x(t) \quad (14)$$

$$X_y(t) = X_{0y}(t) + K \times v + 5.9 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 1.14) + 5.5 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 15.6 \times t - 2.9) + \sigma_y(t) \quad (15)$$

将式(14)作为仿真实位置的X轴坐标,将式(15)作为仿真实位置的Y轴坐标做图,表面成形波动放大显示,如图6所示。

图6斜线加工中红色仿真实位置,是将表面成形波动放大300倍后得到的,可以观察表面成形波动呈周期性变化。

在变速过程中,指令加工轨迹为一段圆弧,将式(12)和式(13)带入式(1)得到

$$X_x(t) = X_{0x}(t) + K \times v \times \sin\left(\frac{v}{R}t\right) + 2.9 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 0.11) + 2.7 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 15.6 \times t - 0.026) + \sigma_x(t) \quad (16)$$

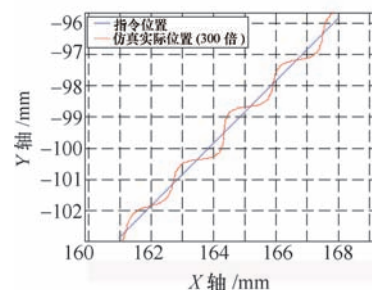


图6 斜线加工指令位置和仿真实位置(放大300倍)

$$X_y(t) = K \times v \times \cos\left(\frac{v}{R}t\right)$$

$$+ 5.9 \times 10^{-4} \times \sin(2\pi \times 7.8 \times t - 1.14) + 5.5 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 15.6 \times t - 2.9) + \sigma_y(t) \quad (17)$$

将式(16)作为仿真实位置的X轴坐标,将式(17)作为仿真实位置的Y轴坐标做图,表面成形波动放大显示,如图7所示。图7中圆弧加工中红色仿真实位置,将表面成形波动放大2000倍后,可以观察到表面成形波动呈周期性变化。

4. 仿真表面形貌与实际加工表面形貌验证

为验证仿真表面形貌的仿真情况与实际情况的相符程度,以实际加工45°斜线为例进行验证,证明跟随误差波动情况引起表面形貌缺陷。如图8所示,加工的是一个八面体,其中一个斜45°的平面上存在周期性的波动。

图6红色曲线为加工斜线45°

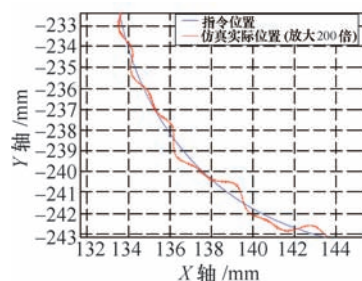


图7 圆弧加工指令位置和仿真实位置(放大2000倍)

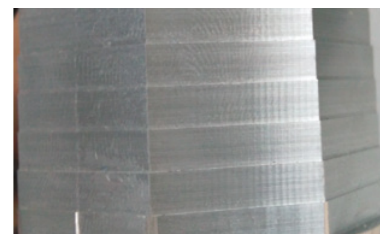


图8 实际加工零件以及零件表面相貌缺陷

仿真实际位置,将曲线反向旋转45°得到表面成形波动曲线,如图9所示。使用Form Taylor PGI830表面轮廓综合测量仪获得表面实际成形波动情况。通过观察图9,对比Taylor表面轮廓测量仪和仿真表面成形波动曲线,得出仿真成形波动曲线只是实际成形曲线成分中的一部分,实际表面成形波动还有许多复杂成分。

将图9中的两组数据,通过指令加工速度 $v=2\ 000\text{mm/min}$ 转换为表面成形波动与时间相关的数据,通过FFT变换得到图10所示结果。对比两者数据中频率成分,仿真数据中15.63Hz的频率与测量数据中14.29Hz的频率,频率相近、幅值相近且分别为两组数据的最大幅值。实际加工表面成形波动成分复杂,仿真模型得到实际加工表面成形波动中幅值最大成分,可以认为侧铣加工表面形貌缺陷是造成跟随误差波动的主要原因。

5. 结语

与以往的模型相比,该模型综合考虑了跟随误差的波动情况

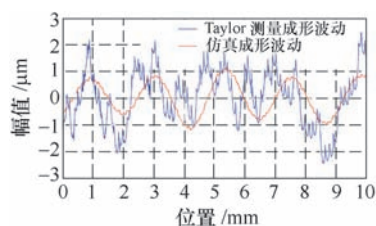


图9 Taylor表面轮廓测量仪和仿真表面成形波动

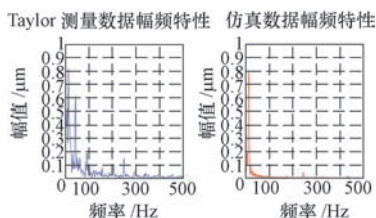


图10 测量数据和仿真数据幅频特性对比

对加工表面形貌的综合影响。该模型通过实际加工采集单轴跟随误差数据和加工指令数据作为模型的数据输入,得到仿真表面形貌。与实际测量表面形貌相比,仿真模型与实际表面形貌中的主要成分基本吻合,跟随误差波动是引起表面形貌缺陷的主要原因。此模型对于仿真表面成形提供了重要方法,同样对于研究表面形貌缺陷与跟随误差波动关系具有重要意义,对于解决表面形貌缺陷具有指导作用。

本文受到“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题(2013ZX04001-081)资助。

参考文献:

- [1] 孙建仁,胡赤兵,黄建龙. CNC机床伺服特性对轮廓误差的影响机理[J]. 机床与液压, 2009, 37 (3) : 31-33.
- [2] 孙兴伟,董蔚,王可,等. 数控机床伺服系统跟随误差对加工轮廓的影响[J]. 制造技术与机

床, 2010 (6) : 76-78.

- [3] 高彤. 铣削加工表面形貌及端铣加工变形仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学机电学院, 2004.
- [4] 徐安平. 考虑刀杆柔性的数控铣削过程物理仿真研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 1998.
- [5] 徐安平,曲云霞,段国林,等. 基于工件网格划分的周铣加工表面形貌仿真算法[J]. 西安交通大学学报, 2001 (35) : 502-505.
- [6] 徐安平,张大卫,黄田,等. 柔性螺旋立铣刀数控铣削表面形貌物理仿真模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000 (12) : 262-266.
- [7] 吴警. 微细铣削加工表面形貌仿真与分析[D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2013.

MW (收稿日期: 20160412)

2016年7月中国制造业PMI为49.9%

国家统计局与中国物流与采购联合会公布的调查数据显示,2016年7月,中国制造业采购经理指数(PMI)为49.9%,比6月下降0.1个百分点,微低于临界点。

分企业规模看,大型企业PMI为51.2%,比6月上升0.2个百分点,持续高于临界点;中、小型企业PMI分别为48.9%和46.9%,比6月下降0.2和0.5个百分点,连续两个月回落,均低于临界点。

从分类指数看,在构成制造业PMI的5个分类指数中,生产指数、新订单指数、供应商配送时间指数高于临界点,从业人员指数和原材料库存指数低于临界点。生产指数为52.1%,比6月回落0.4个百分点,高于临界点,表明制造业生产继续保持增长,增速有所放缓。

新订单指数为50.4%,虽比6月微落0.1个百分点,仍保持在临界点之上,表明制造业市场需求增速略有放慢。

从业人员指数为48.2%,比6月回升0.3个百分点,低于临界点,表明制造业企业用工量降幅小幅收窄。