

航空复杂曲面加工精度预测及影响因素分析

王伟^{1,2}, 张信³, 郑从志¹, 赵旭东¹, 边志远¹, 姜忠¹

(1. 电子科技大学机械电子工程学院 成都 611731; 2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 成都 610092;
3. 中国电子科技集团公司第三十研究所 成都 610041)

【摘要】在综合考虑机床动静态因素的基础上,建立了各运动轴伺服运动模型和多体联动模型,给出了刀具的实际运动位置和姿态,基于包络理论求解了零件实际铣削成形点、线和层面,采用曲面造型方法构建出零件型面的综合误差。以复杂非可展曲面——“S”试件为例,进行了加工误差的预测和分析,给出了位置环、速度环等机床重要参数对工件铣削精度的影响,并通过切削试验后的数据回归分析予以验证。该平台的搭建为实现航空关键零件加工精度预测提供了技术支撑,依据计算结果可实时调整机床的动态参数,评估机床的加工状态。

关键词 精度预测; 航空整体结构件; 动态误差; 多轴数控机床; 精度建模

中图分类号 TH161.5

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.05.027

Analysis for Machining Precision Prediction and Influencing Factors of Complex Surface in Aviation

WANG Wei^{1,2}, ZHANG Xin³, ZHENG Cong-zhi¹, ZHAO Xu-dong¹, BIAN Zhi-yuan¹, and JIANG Zhong¹

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;
2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial(Group) Co. Ltd Chengdu 610092;
3. NO.30 Institute of China Electronic Technology Corporation Chengdu 610041)

Abstract Part accuracy in high-speed NC machining is often difficult to control, especial for large structure aviation. Small changes in some dynamic factors may lead to errors exceeding the allowable value. A method integrated machine on dynamic error factors and static geometric errors is presented to build the surface data of actual workpiece. Each servo axis movement is simulated and composed by kinematics of the joint bodies of the machine for calculating the actual position and attitude of the tool. The actual milling point is solved by the envelope theory and the final part of the surface is obtained by the surface forming method. A case study is analyzed through the "S" specimen sample, which is verified the composition of surface methods and get the milling error in influence of dynamic factors, such as the gap, the position loop and speed loop. This method can estimate the milling accuracy on large parts in advance, and help to adjust the dynamic parameters of the complex servo system. It provides a basis for better precision control effect and economic costs.

Key words accuracy prediction; aerospace monolithic component; dynamic error; multi-axis CNC machine; precision modeling

航空制造业是高端制造的重要组成部分,为保证航空结构件的加工质量,提高生产效率,国内外航空制造企业普遍采用多轴高速机床整体铣削的方法。然而,航空整体结构件尺寸较大,传统的机床采用的试切-调整-再试切方法,调整周期长,缺乏科学指导;并且航空件的切削成本较高,极大地浪费了生产力^[1-2]。另一方面,航空件的外形协调条件

一般要求很高,对机床的加工性能提出了更高的要求。目前,ISO标准中的机床精度检测仅限于静态或低速条件下的几何精度、定位精度检测,尚未建立多轴机床工作条件下动态精度的测试规范,无法校验多轴机床的加工性能^[3]。航空件的加工精度受机床动态误差和静态误差两方面的影响,由于缺乏机床动态因素的测试方法,使得航空整体结构件的加

收稿日期: 2013-04-18; 修回日期: 2014-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51205048); 中国博士后科学基金(2013M542265)

作者简介: 王伟(1980-),男,博士,副教授,主要从事多轴机床精度检测理论方面的研究。

工精度控制成为难点。传统数控机床中静态几何误差对工件精度的影响很大,评估方法也较为成熟,文献[4-5]将多体运动学理论用于分析数控机床的几何误差,较好地解决了机床多体系统误差建模及补偿。多轴高速加工与普通数控加工有很大的不同,文献[6]通过试验发现,高速加工中心动态因素引起的表面误差(SLE)对工件精度的影响远大于静态几何误差和热误差。文献[7-8]通过研究高速加工的薄壁件铣削稳定性问题,指出如果对加工参数控制不当,加工过程中动力学参数的微小变化可能导致超过工件容许的误差产生。

因此,仅研究数控机床的几何精度已很难满足高速高精度的加工要求。近年来,国内外学者开始致力于建立机床运动机构的动态模型。文献[9]研究了具有高速度和高加速度的进给驱动机构动力学行为,根据其动力学特性开发了我国自主知识产权的机床伺服控制方法和数控运动指令;文献[10]建立了高速机床主轴系统动力学模型,通过对高速车削中心的性能试验验证了理论建模的正确性;文献[11-12]研究了高速铣削动力学中的稳定性问题,对铣削过程的再生效应进行了深入的探讨,上述研究工作为实现机床的动态误差预测奠定了基础。高速高精度机床的动态加工过程是机床机械、伺服、刀具切削等的整体联动过程,为精确描述零件的铣削精度,不仅要考虑静态的机床部件几何误差,还要对各运动

机构的动态行为进行研究,综合分析各因素叠加对机床加工精度的影响。

1 多轴高速机床完整运动链系统建模

1.1 机床加工误差源分析

五轴联动机床的加工误差来源包括几何误差、热变形误差、伺服控制系统误差以及载荷误差4大类^[13],如图1所示。其中的几何精度、定位精度通常是在没有切削载荷下机床不运动或运动速度很低的工况下检测的,一般称为静态精度。静态精度主要取决于机床上的零部件制造与装配精度,如主轴及其轴承、丝杠螺母、齿轮、床身、箱体等,为保证加工出的零件能达到所需的精度,国家对各类通用机床都制订有静态的检测标准,尤其是多轴高速机床,其部件制造和检测标准近乎苛刻,一定程度上保证了机床的有效精度。静态精度只能在有限层面上反映机床的加工精度,在实际工作状态下,还有一系列因素会影响工件加工精度,如工作中机床部件会产生热变形,在切削力作用下产生的振动和变形等,在实际切削条件下由于载荷、温升、振动等作用机床精度变化,称为机床的动态因素。研究表明,多轴机床高速铣削时切削力较小,切削时可带走大量的热,高速机床的动态误差主要是由于切削过程中机械、控制系统的整体联动而产生的,机床的基本运动结构以及伺服系统各轴的协调能力与性能是影响机床动态精度的主要因素^[14]。

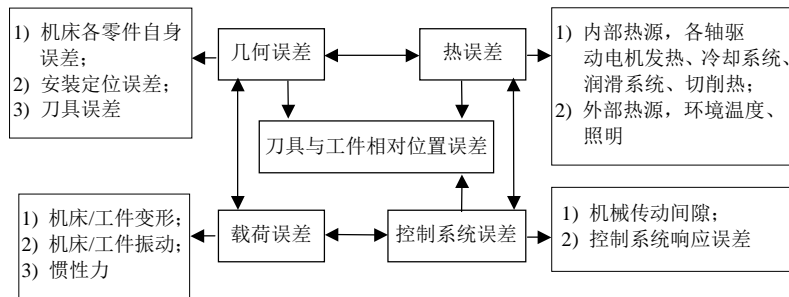


图1 五轴联动数控机床加工误差源

1.2 机床机械伺服运动系统建模

图2所示为机床机械、控制系统的Matlab/Simulink运动仿真模型,包含了位置环、速度环、伺服电机和机械环节,各个基本环节可由传递函数中相应的比例、积分或微分函数表示。对于单轴伺服运动,输入的机床运动指令经位置环节、速度环节、电机环节,最终驱动机械环节。

根据零件的数控加工工艺,可计算出各运动的位置指令 $\dot{P}(X, Y, Z, A, B)$,然后由伺服进给系统以

这些控制点序列为目标进行随动跟踪控制。运动仿真模型输入各运动轴的理想后置指令,得到实际的输出轨迹,实际与理想之差的轮廓跟踪误差可表示为:

$$e = T_{out} - T_{ref} = \frac{\dot{P}(X, Y, Z, A, B)}{K_{pp}} \quad (1)$$

式中, $\dot{P}(X, Y, Z, A, B)$ 表示五坐标运动轴的速度; K_{pp} 表示位置增益。由于进给伺服系统的存在,动态轨迹误差不可避免,但通过改变动态参数对跟踪误差进行分析,可更好地控制数控机床的加工精度。

各运动轴参数的不匹配以及机械、电气运动的不协调都将产生过大的跟随误差, 并导致轮廓误差的产生, 最终表现在产品的精度得不到有效控制。需要注意的是, 输入运动仿真模型时需要区分刀具中心点指令和各运动轴指令, 由于高档数控机床普遍采用RTCP的刀具中心点编程, 故在输入指令时需要进

行如下的转换, 以AB表示刀具两摆机床为例, 即有:

$$\begin{cases} x_{\text{点}} = x_{\text{轴}} + L \cos(A) \sin(B) \\ y_{\text{点}} = y_{\text{轴}} - L \sin(A) \\ z_{\text{点}} = z_{\text{轴}} + L \cos(A) \cos(B) \end{cases} \quad (2)$$

式中, L 表示刀具的长度; A 、 B 为机床转角指令。

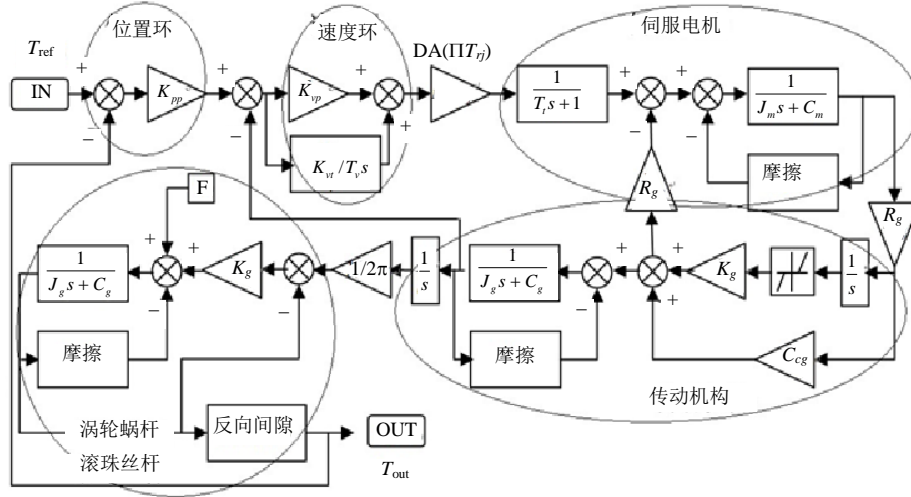


图2 机床Matlab/Simulink运动仿真模型图

1.3 多轴联动动静态因素耦合运动建模

伺服动态模型中产生的是各运动轴轨迹, 刀具的运动位姿是由实时的各轴轨迹联动构成的, 其联动法则就是多体运动学。以图3所示的刀具AB两摆机床拓扑结构为例, 其建模流程如下:

1) 根据多轴数控机床的拓扑结构, 用低序列体阵列来描述机床各部件的关联关系。

首先设定惯性参考系, 以固定不动的工件参考系为 B_0 , 然后远离 B_0 的方向按自然增长数列, 依次为各体编号, 低序列矩阵可以通过下列计算公式得到。任选体 B_j 为系统中任意典型体, 体 B_j 的 n 阶低序体的序号定义为:

$$L^n(j) = I \quad (3)$$

式中, L 为低序体算子。

体 B_j 为体 B_i 的 n 阶高序体, 满足:

$$L^n(j) = L(L^{n-1}(j)) \quad (4)$$

初始条件为:

$$L^0(j) = j, L^n(0) = 0 \quad (5)$$

根据上面定义, 可以计算出机床的各阶低序体阵列。

2) 用齐次特征矩阵来表示各部件之间的理想运动特征和误差运动特征。

多体系统中的典型体 B_j 相对其相邻体 B_i 的理想运动等价于两个坐标系 $S_j(O_j: x_j, y_j, z_j)$ 和

$S_i(O_i: x_i, y_i, z_i)$ 的理想运动, 令三维空间中的点 q 在两坐标系中的矢量表示分别为 r_j 和 r_i , 则两者之间的理想特征矩阵可以表示为:

$$R_j = T_{ij} R_i \quad (6)$$

式中, T_{ij} 为 S_i 到 S_j 的4×4阶齐次坐标变换矩阵, 由体 B_j 和 B_i 之间可能的相对运动构成。在实际建模中, 空间运动机床各轴还要引入运动误差特征矩阵。一般来说, 各运动部件在空间都有3个方向平动垂直度误差 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) 和3个方向旋转的角位移误差 ($\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma$), 在构建误差特征矩阵中, 将动态因素引起的各轴实际运动轨迹误差与机床部件误差叠加, 总误差特征矩阵由各种形式的基本误差矩阵相乘得到, 可表示为:

$$R'_j = T'_{ij} R'_i = T_{ij\Delta x} T_{ij\Delta y} T_{ij\Delta z} T_{ij\Delta \alpha} T_{ij\Delta \beta} T_{ij\Delta \gamma} R'_i \quad (7)$$

3) 计算刀具具体在工件子坐标系中的位置和姿态, 完整地推导出刀具在有误差运动机床下的成形约束方程。

根据图3的机床拓扑结构, 刀具实际运动的表达式为:

$$P_5 = T'_{54} T'_{54} T'_{43} T'_{43} T'_{32} T'_{32} T'_{21} T'_{21} T'_{10} P_1 \quad (8)$$

式中, P_i 为在机床末端A转角坐标系下刀具的位姿矢量, 由机床的动态因素与静态几何精度相叠加, 实时代入式(8)中, 综合描述出机床工作状态下刀具的实际运动位置和姿态, 从而完整给出工件成形过程中刀具的运动轨迹。

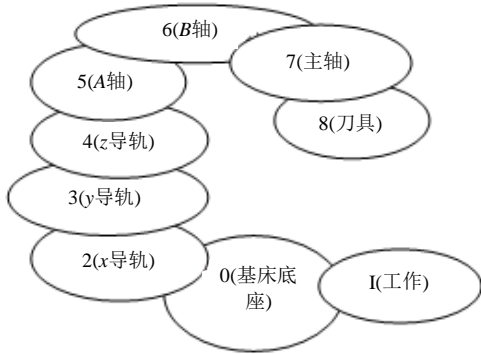


图3 AB刀具两摆的机床拓扑结构图

2 航空整体结构件铣削型面构建

2.1 基于包络理论的零件铣削成形点计算

根据刀具的实际位姿和切削路径构建出切削型面是获取零件铣削型面和加工误差的关键。由于刀具铣削半径的存在，零件型面上的实际成形点位于刀具切削圆的包络线上，因此，还需要基于包络原理求解工件切削型面的实际成形点，实际成形点可以由以下公式计算得出：

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2=R^2 \quad (9)$$

$$(x-x_0)\mathbf{I}+(y-y_0)\mathbf{J}+(z-z_0)\mathbf{K}=0 \quad (10)$$

$$(x-x_0)(x'_0-x_0)+(y-y_0)(y'_0-y_0)+(z-z_0)(z'_0-z_0)=0 \quad (11)$$

式中， (x, y, z) 表示铣削型面的实际成形点； (x_0, y_0, z_0) 表示当前的刀具末端中心点位置； \mathbf{I} 、 \mathbf{J} 、 \mathbf{K} 表示当前的刀具的姿态向量； (x'_0, y'_0, z'_0) 表示前一时刻刀具末端中心点位置。

式(9)表示铣削型面的实际成形点在刀具中心点的半径圆上，式(10)表示铣削型面的实际成形点应与刀具切削向量垂直，式(11)表示铣削型面的实际成形点与前后时刻刀具进给移动向量垂直。一般来说，通过联立求解上述3个方程，可以得到内外两个包络点，而在某一个时刻，切削零件上只可能有一个成形点，成形点的选取需要借助刀具与工件实时位置判断。

2.2 航空件整体铣削型面构建

铣削加工时通常沿刀柄的轴线方向设定有固定的铣削层高度，将铣削成形点沿刀柄姿态向量拉伸，即得到铣削层面上的各个成形点，则有：

$$\begin{cases} x_j = h\mathbf{I_line} + \text{envelop_}x_j \\ y_j = h\mathbf{J_line} + \text{envelop_}y_j \\ z_j = h\mathbf{K_line} + \text{envelop_}z_j \end{cases} \quad (12)$$

式中， $\text{envelop_}x_j$ ， $\text{envelop_}y_j$ ， $\text{envelop_}z_j$ 是铣削

成形点坐标； h 是数据密化的间距； $\mathbf{I_line}$ ， $\mathbf{J_line}$ ， $\mathbf{K_line}$ 是刀具实际姿态向量。在机床动态静态误差的作用下，刀具的姿态向量也会发生偏转，应该由实际得到的刀具位姿做数据处理。各个层面的数据相互叠加，最终构成工件的实际铣削型面，如图4所示是零件铣削型面的生成流程，最终零件的加工误差计算可以由理想型面数据与实际型面数据对比得到。

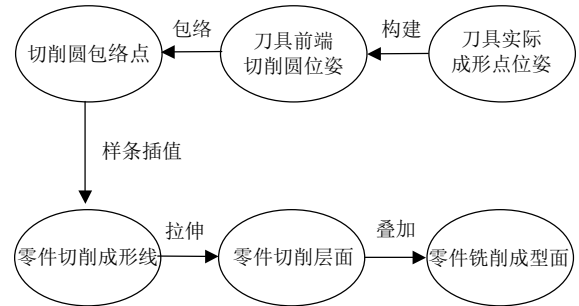


图4 零件铣削型面的生成过程

3 基于S试件的航空结构件铣削误差示例

3.1 “S”试件铣削型面构建

“S”试件是航空领域中广泛使用的可用于检测五轴机床加工精度的测试试件^[15]，如图5所示，试件采用上、下两条扭曲的类S型三阶样条曲线生成直纹面，壁厚3 mm，可反映五轴数控机床加工的动态特性，由刀具的切削指令和路径构建出“S”试件的铣削型面是分析机床加工误差影响因素的关键。

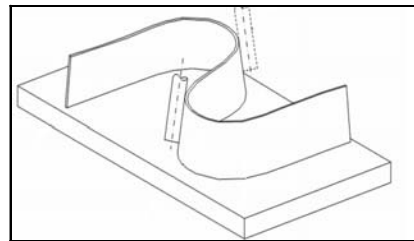


图5 “S”试件

按照2.2节铣削型面的构建路线，将“S”试件理想后置指令输入Simulink仿真模型，改变不同动态误差因素可以获得机床不同状态下，各运动轴实际轨迹；代入机床的多体综合模型，可以计算刀具实际的位置和姿态，通过包络理论求解试件的实际铣削成形点。如图6所示为刀具铣削“S”试件过程中的切削包络计算，圆环表示不同时刻下刀具的切削圆，工件成形点由切削圆的内侧构成，“S”试件切削线、铣削层面通过各成形点沿刀具实际姿态向量按照切削深度3 mm拉伸获得，将各层“S”试件切削型面数据叠加，即为最终的“S”试件实际型面。

如图7所示为重构后的“S”试件曲面轮廓, 可以表示出“S”试件切削型面上的误差分布。

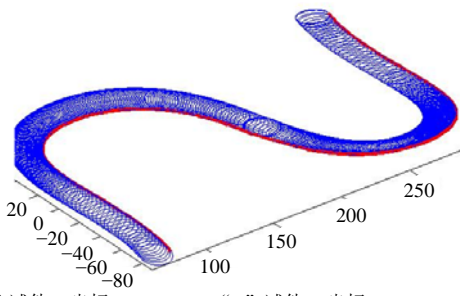


图6 包络算法求解“S”试件切削的实际成形点

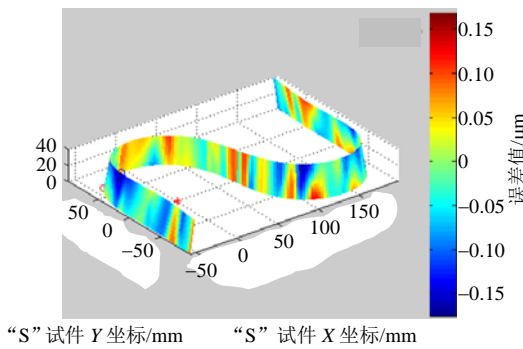


图7 “S”试件铣削数据型面

3.2 机床动静态因素与S试件型面误差映射关系

为便于描述“S”型面的误差分布, 在不同高度上做“S”试件的平面截取线, 依据仿真平台, 提取分析各层截取线上点的法向误差分布。图8、图9分别是改变机床动态因素中的X轴位置环增益和B轴速度环时间常数, 得到的“S”试件在高度22.5 mm处截取线的法向误差分布规律, 图中横坐标为截取线上成形点的序列号, 纵坐标为该点下的法向误差值。由图8、图9可知, 位置环增益、速度环时间常数的变动体现为型面法向误差的整体变化, 其中位置环增益与“S”截线的法向误差呈现负相关关系, 即位置环增益变大导致S件型面误差变小; 而速度环时间常数变大则型面误差变大, 二者基本呈正相关关系。

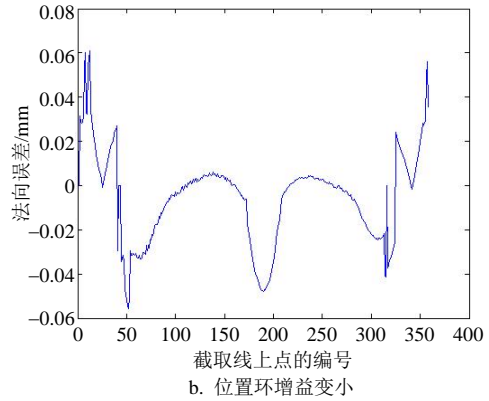
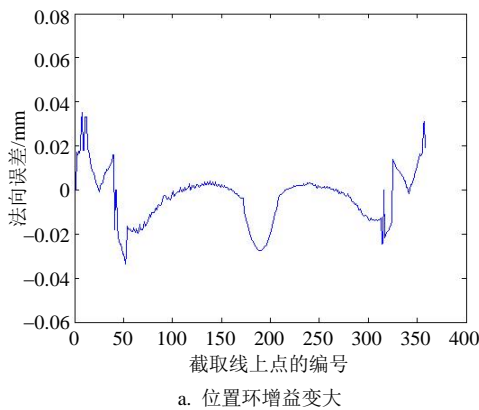


图8 “S”试件型面误差分布

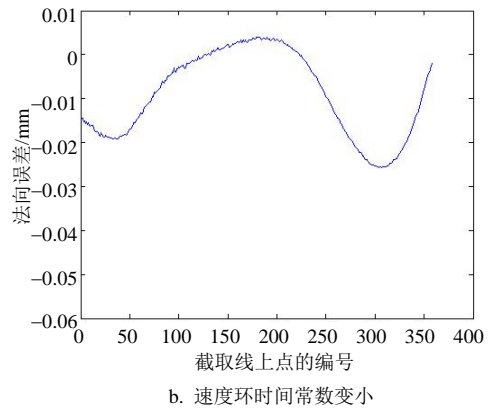
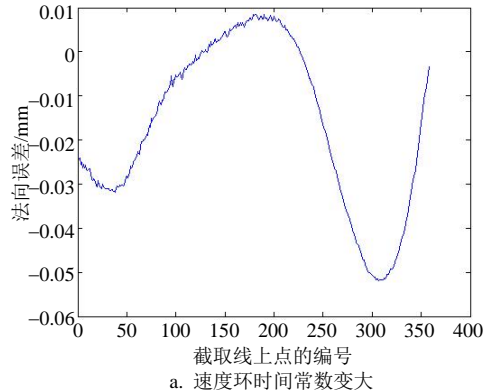


图9 “S”试件型面误差分布

3.3 基于正交实验设计的“S”试件切削及预测结果校验

为进一步验证误差综合预测平台结果的正确性, 以及X、A位置环增益、Y、B轴速度环时间常数、X、A轴加速度及轴间异面误差共7个动态因素对加工精度的影响, 进行了“S”试件切削实验, 切削后的S型面采用三坐标机测量误差分布。

3.3.1 “S”试件切削方案设计

因素水平如表1所示。由于动态因素众多, 如果对7个因素逐一进行水平变化实验, 假定每个因素的水平变化为2个, 至少 $2^7=128$ 次试件切削。为此, 本文基于正交试验理论设计切削实验, 如表2所示, 通

过标准正交实验安排实验,对7个因素同时变化开展试验,只需做8次实验。

表1 因素水平表

因素	水平	
	1	2
X轴位置环增益/(%)	30	-50
A轴位置环增益/(%)	30	-50
Y轴速度环时间常数/(%)	50	-30
B轴速度环时间常数/(%)	50	-30
X轴加速度/(%)	50	-50
A轴加速度/(%)	50	-50
A轴B轴异面X方向/mm	0.2	-0.2

表2 实验设计实施表 $L_8(2^7)$

实验号	因素						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

本文的实验采用某国产五轴联动数控铣床,毛坯材料为铝合金,型号为7075-T7451,精加工刀具为右旋棒铣刀,刀具直径20 mm,采用分层侧铣加工方法,沿刀具轴线方向自上而下按每层3 mm进行精加工铣削。根据正交实验表,改变位置环增益等相关动态因素的水平值,共进行8次实验,最终得到8个“S”件,如图10所示。实验结束后,利用三坐标测量机测得“S”试件在高度22.5 mm处截取线数数据点的法向误差,如图11所示。



图10 “S”试件加工



图11 “S”试件误差测量

3.3.2 试验结果分析

按照正交试验设计所得到的实验结果,经过SPSS统计学软件做专门的回归分析,建立起多元的输入(机床各动态因素指标)和输出(“S”型面各点法向误差值)之间的关联关系。分析各实验因素单独、耦合变动时对应“S”型面法向误差的定性规律。同时通过线性回归系数可以得到各实验因素对“S”型面法向误差影响的权重。

多元线性回归是考察多个自变量与实验指标的变化规律的一种方法,其主要思路就是利用实验的方法建立起因变量与多个自变量之间的线性回归模型。假设实验过程中引入了 n 个可控的自变量,即 x_1, x_2, \dots, x_n 。于是多元线性回归模型可以表达为:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_n x_{in} + \varepsilon_i \quad (13)$$

式中, y_i 是指标观测值; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 是线性回归系数,是回归分析的主要内容,通过最小二乘法估计得到; $\{x_m\}$ 是第 i 次实验考查的 n 个可控自变量; ε_i 是实验过程中的随机误差。

利用三坐标测量机所测法向误差数据进行回归分析,求得回归方程。基于回归方程,进一步分析单个动态因素对“S”件法向误差的影响。通过回归分析,剥离出单一因素影响下,“S”件法向误差测量值。如图12所示,本文分别例举了位置环增益和速度环时间常数两个因素独立影响下,“S”件法向误差分布情况。从图中可以看到,实际测量误差值远大于仿真误差,这是由于仿真平台未考虑机床热变形等其他因素的影响。机床在实际加工过程中还受到其他未知因素的影响,因而导致“S”件的实测误差值偏大,但是,其误差的分布规律与3.2节仿真平台的分析结果基本吻合,验证了该仿真平台的准确性。

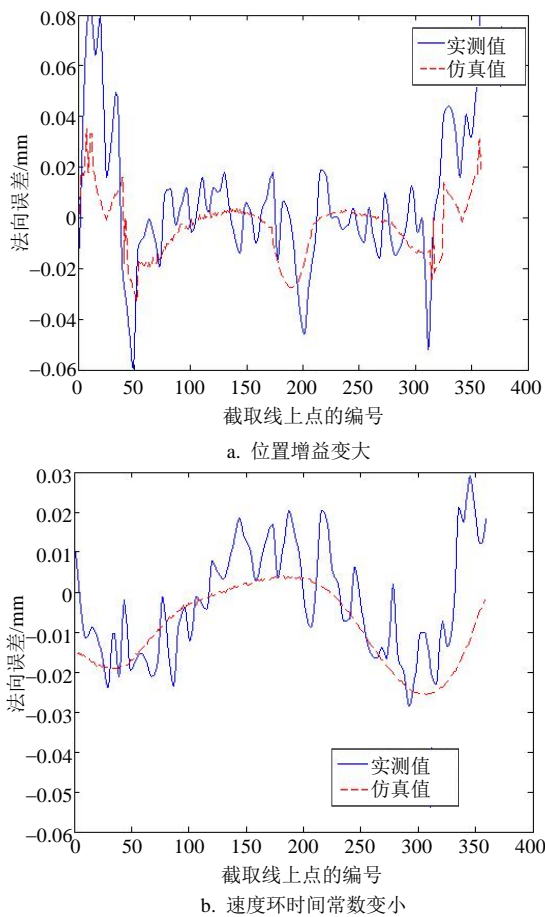


图12 实验与仿真结果对比

4 结论

航空结构件薄壁、低刚度特性,使得多轴数控加工中精度控制成为难点,铣削过程中机床微小的因素变化都可能导致零件超过允许误差的产生。本文通过研究多轴机床加工主要误差源,提出耦合机床动静因素构建零件实际铣削型面的方法,由各运动轴伺服运动模型和多体运动模型构建机床完整的运动链系统模型,由包络理论求解零件的铣削成形点、线和层面,最终获得零件的铣削精度。以航空“S”试件为例,给出了“S”试件加工精度和机床动静态因素的映射关系,并在切削实验中予以验证。该平台可以实现航空结构件铣削精度的预估,根据计算结果可用于评估机床的加工状态,从而为机床复杂的因素调整提供了科学依据;与此同时,在获取机床动静态因素和型面铣削精度映射关系后,可根据现有零件的误差分布研究辨识出机床影响因素的方法,因而具有更好的精度控制效果和科学的指导意义。

参考文献

[1] 宋清华. 高速铣削稳定性及加工精度研究[D]. 济南: 山

东大学, 2009.

SONG Qing-hua. High-speed milling stability and machining accuracy[D]. Jinan: Shangdong University, 2009.

[2] 喻允风, 颜松华, 颜柏华. 大型数控机床精度检测的探讨[J]. 机械研究与应用, 2008, 21(4): 109-111.

YU Yun-feng, YAN Song-hua, YAN Bai-hua. Discussion on precision check of large-scale CNC machine tool[J]. Mechanical Research & Application, 2008, 21(4): 109-111.

[3] LIN R S, HU C W. Modeling of the dynamic contour error of five-axis CNC machine tools[J]. ASME Dynamic Systems Control and Control Division, 1999(67): 861-868.

[4] 康念辉, 李圣怡, 郑子文. 基于多体系统理论的非球面磨削误差模型与补偿技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 143-149.

KANG Nian-hui, LI Sheng-yi, ZHENG Zi-wen. Error model and compensation technology of aspheric grinding based on multibody system theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 143-149.

[5] 张虎, 周云飞, 唐小琦, 等. 多轴数控机床几何误差的软件补偿技术[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 58-70.

ZHANG Hu, ZHOU Yun-fei, TANG Xiao-qi, et al. Software compensation technique of the volumetric errors of CNC machining centers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(11): 58-70.

[6] SCHMITZ T L, ZIEGERT J C, ZAPATA R. Part accuracy in high-speed machining: Preliminary results[C]//Proceeding of MESC 2006. Ypsilanti, USA: [s.n.], 2006.

[7] SONG Q H, WAN Y, AI X, et al. Novel method for dynamic optimization of stability in high-speed milling system[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 26(3): 184-191.

[8] 汤爱君, 刘战强. 铣刀参数对薄壁零件铣削稳定性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学), 2009, 37(2): 29-34.

TANG Ai-jun, LIU Zhan-qiang. Effect of milling cutter parameters on milling stability of thin-wall parts[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(2): 29-34.

[9] 周勇, 陈吉红, 彭芳瑜. 高速高精度数控进给驱动的机电联合系统仿真[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(2): 135-139.

ZHOU Yong, CHEN Ji-hong, PENG Fang-yu. Mechatronic integrated system simulation for a high-speed and high-precision CNC feed drive[J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(2): 135-139.

[10] ZHANG Y M, LIN X L, WANG X D, et al. The study on the dynamic characteristic of high speed machine tool and experiment validate[J]. Material Science Forum, 2004, 471: 765-769.

[11] DING Y, ZHU L M, ZHANG X J, et al. Numerical integration method for prediction of milling stability[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering Transactions of the ASME, 2011, 133(3): 31-40.

[12] 戚厚军, 张大卫, 蔡玉俊, 等. 低刚度铣削工艺系统的弹性铣削力建模方法[J]. 天津大学学报, 2010, 43(2): 143-148.

QI Hou-jun, ZHANG Da-wei, CAI Yu-jun, et al. Modeling methodology of flexible milling force for low-rigidity processing system during high speed milling[J]. Journal of

Tianjin University, 2010, 43(2): 143-148.

- [13] TRAN H D, SU J C, CLAUDET A A. Quantification of uncertainty in machining operations for on-machine acceptance[R]. USA: Sandia National Laboratories, 2008.
- [14] MASAOMI T, DAISUKE Y, KEIZO U, et al. Evaluation of synchronous motion in five-axis machining centers with a tilting rotary table[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2007, 1(1): 24-35.
- [15] SONG Z Y, CUI Y W. S-shape detection test piece and a detection method for detection the precision of the numerical control milling machine: USA, US8061052B2 [P]. 2010-01-07.

编辑 黄莘