

DOI:10.13196/j.cims.2015.04.012

基于尺度效应的介观尺度零件多工位 制造误差建模与分析

余璐云, 焦黎⁺, 王西彬, 张臣宏, 高守锋

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要:针对介观尺度零件制造过程中的加工精度控制问题,提出包括尺寸误差传递模型、多元统计过程控制和误差源诊断的加工精度控制体系,为精密微小零件多工序数字化制造提供了技术基础。通过研究介观尺度零件的特点及其在切削加工中的特性,提出基于微细切削尺度效应的工件变形和刀具变形引起的加工误差模型,构建了介观尺度零件尺寸误差传递的状态空间模型;在此基础上提出集成尺寸误差模型和多元统计过程控制的质量监控策略以及基于协方差分析的误差源诊断方法,实现了对介观尺度零件加工误差的诊断与加工精度的控制。以不锈钢工件微细槽铣削加工为例,验证了模型的有效性和可行性。

关键词:介观尺度零件;多工位;精度控制;误差流;尺寸误差建模;不锈钢工件

中图分类号:TH161⁺.11 **文献标识码:**A

Modeling and analysis for multi-stage manufacturing error of meso-scale parts based on size effect

YU Lu-yun, JIAO Li⁺, WANG Xi-bin, ZHANG Chen-hong, GAO Shou-feng

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the machining accuracy of meso-scale component with small size, high precision and various of error sources, a machining accuracy control system included dimensional variation model, Multivariate Statistical Process Control (MSPC) and error source diagnosis was put forward to provide technical basis for multi-stage digital manufacturing of meso-scale parts. Through analyzing the characteristics of meso-scale part in manufacturing, the machining errors model caused by workpieces deformation and tool deformation based on micro cutting scale effect was proposed, and the deviation state space model of meso-scale parts' dimensional error was constructed. A quality monitoring strategy with combination of variation model and MSPC and an error resource diagnosis method were raised to achieve the diagnosis of error and the control of machining accuracy. The effectiveness and feasibility of the model were proved by milling micro grooves in the stainless steel part.

Key words: meso-scale parts; multi-stage; accuracy control; variation stream; dimensional error modeling; stainless steel part

0 引言

介观尺度零件指尺寸范围介于微观与宏观之间的零件^[1],在生物医学、信息通讯、航空航天、国防军事以及高科技电子产品等领域都有广泛的应用^[2]。

由于该类零件尺寸较小、几何特征较多、精度要求高,一般需要经过多个工序才能完成加工,属于典型的多工序加工过程,且其加工过程中影响加工精度的误差源繁多,难以保证加工精度。

针对宏观尺度下的多工序加工误差分析与控制

收稿日期:2014-06-30;修订日期:2014-12-20。Received 30 June 2014; accepted 20 Dec. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51105035,51375055)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51105035,51375055).

问题,国内外学者进行了许多研究。Huang 等^[3]提出多工序加工过程误差传递的建模方法,将状态空间建模方法应用于多工序制造过程的误差预测;Tsung 等^[4]根据线性状态空间模型理论,利用群组指数加权移动平均控制图(Group Exponentially Weighted Moving Average, Group EWMA)方法,实现了对多工序制造过程的统计过程控制;美国密西根大学 HU^[5]研究了汽车车体装配误差的产生和传递情况,提出误差流(Stream of Variations, SoV)理论,为装配误差的预测和系统故障诊断提供了理论分析基础;美国“2 mm 工程”借助在线检测方法和数据驱动的质量控制方法,显著提高了车身装配质量监测和偏差源诊断能力^[6];刘明周等^[7]针对机械产品再制造装配过程质量控制问题,在分析机械产品再制造装配过程特点的基础上,提出面向机械产品再制造装配过程的动态工序质量控制模式;刘道玉等^[8]针对复杂产品的制造过程质量控制问题,提出一种面向多工序制造过程的 e-质量控制模式,为实现复杂零件的高精度、数字化加工提供了一条新途径。

上述研究推动了多工序误差建模和质量控制方法的发展,但都以发动机箱体等宏观零件为研究对象。在介观尺度加工误差研究方面,国内外也有一些相关的研究成果。WANG 等^[9]建立了微细铣削力预测模型,并对铣削力引起的刀具变形误差进行了分析;BOURNE^[10]通过有限元仿真和试验研究,分析了刀具变形误差对微槽侧壁位置误差的影响;ARIF 等^[11]使用球头铣刀对硅材料进行铣削加工,分析了由于夹具误差导致相同切削参数下的实际切削深度不一致而引起的加工误差;上海交通大学来新民等^[1,12]分析了微切削力、机床的定位精度对加工精度的影响,针对表面精度、加工效率、刀具磨损等进行了工艺优化;哈尔滨工业大学梁迎春等^[13-14]在国内较早地对介观尺度机械制造进行了探索,提出刀具和工件刚度、机床运动精度、主轴跳动等是影响微细切削中加工精度的重要因素,并采用有限元分析和铣削实验研究了微型铣床和刀具对微细铣削加工的影响规律。

由以上分析可见,近年来在介观尺度切削领域的研究主要集中在机理分析、工艺参数优化、微细刀具研究和微细切削力预测等方面,且多以实验方法为主^[15],在误差分析建模和精度控制方面还有待进一步探索。在切削力预测方面,Dimitri 等^[16]进行

了从宏观向微观成果转化的探讨。SoV 理论最初基于汽车车体装配的误差传递提出,主要应用于装配误差,而后 HUANG 等^[17]对其进行了改进,用状态空间模型来表示加工过程不同工序之间的误差逻辑关系,将 SoV 理论沿用到误差传递更复杂的机械加工领域。二者的共同之处都是基于误差在过程中的传递。介观尺度零件与宏观尺度零件的制造过程中,定位误差、基准误差、夹具误差等传统形式的误差是类似的,而在加工误差方面,由切削加工机理不同导致的具体的误差因素和计算方法存在差异。因此,本文从介观尺度零件的特点及其切削特性出发,建立了介观尺度零件的微切削加工精度控制体系,并基于 SoV 理论利用齐次坐标变换的方法,将介观尺度切削的尺度效应融入加工误差状态空间模型中,建立了误差传递的状态空间模型,对介观尺度零件加工过程的加工误差分析与控制进行了研究。

1 介观尺度零件微切削尺度效应

介观尺度零件微切削过程中,通常采用极小的进给量和切削厚度,尺度变化导致材料特性、成形机理及切削特性等方面出现异于宏观情况的变化,即出现尺度效应现象。当进给量减小至微米级时,切削比能和单位切削刀出现异常增大的现象,单位切削力出现非线性增大的现象。当切削厚度与切削刃口钝圆半径相当时,刀刃不能再看成是绝对锋利的,而应考虑刃口钝圆半径对切削的影响;当切削厚度远小于切削刃半径时,刀具经过时工件仅发生弹性变形;当切削厚度与切削刃半径接近时,由于实际的切削前角变为负角而发生犁切现象,此时工件产生弹塑性变形;当切削厚度再进一步增大时才会产生切屑,从而出现切屑不连续产生的现象。

可见,在进行介观尺度零件加工精度控制时,必须考虑宏观切削中忽略掉的一些因素对加工精度的影响,如刃口钝圆半径、最小切削厚度等。此外,由于零件尺度缩小,虽然切削过程中的力较小,但刀具与工件的刚度都较小,且随着切削的进行工件刚度呈动态变化,这势必影响最后的加工精度。因此,针对介观尺度零件微切削过程,定量分析并揭示加工过程中偏差流的传递规律,可以改变依赖经验对比的工艺控制方法,提高零件的加工精度。在介观尺度零件加工过程中,影响加工精度的误差源繁多,本文主要针对设备和加工方法两个方面造成的误差进行研究,即基于对机床、刀具、夹具和工艺方法等误

差源的分析, 建立介观尺度零件加工误差的分析模型和加工精度控制体系。

2 介观尺度零件加工精度控制体系

介观尺度零件一般具有复杂的结构特征, 需要经过多个工序才能完成加工, 属于典型的多品种、小批量生产模式。在数字化加工的工序流配置方法中, 江平宇等^[18]提出面向多工序流的零件聚类分析思路。基于此, 针对介观尺度零件加工多品种、小批量的特点, 本文提出基于零件关键特征的加工精度控制体系, 通过在整合工序处合理布置控制点, 实现对具有相似工序流的多个品种零件的统一控制。体系的总体结构如图 1 所示, 共包括如下功能:

(1) 数据采集与分析 主要进行包括介观切削特点、设备状态信息和工件质量信息等历史数据的存储、处理和分析, 切削数据通过基础实验获取, 设备及工件的相关数据通过历史数据库及加工过程中的传感网络获取, 通过本模块可以分析出关键产品特征 (Key Product Characteristics, KPC) 和关键控制特征

(Key Control Characteristics, KCC)^[19], 为误差传递建模、质量监控和误差源诊断提供数据支持。

(2) 制造误差预测 基于误差传递模型, 根据工艺系统信息及零件制造工艺信息预测零件的制造误差。

(3) 制造过程质量监控 通过对制造设备和被加工零件的状态进行监控, 根据工序质量诊断结果做出相应的处理, 若稳定则继续加工, 否则将数据传输到误差源诊断模块, 进行误差源识别。

(4) 误差源诊断 根据前面两个模块分析处理后传送来的数据进行误差传递建模, 以及基于模型分析的误差源诊断, 并将诊断结果反馈到工艺改进模块。

(5) 工艺调整与改进 基于误差源诊断结果对误差源进行消减, 改进工艺方案, 调整相应的控制参数, 同时优化配置工序流传感网络, 以通过最小的传感系统为之后的加工提供充足的有效信息, 避免数据冗余。

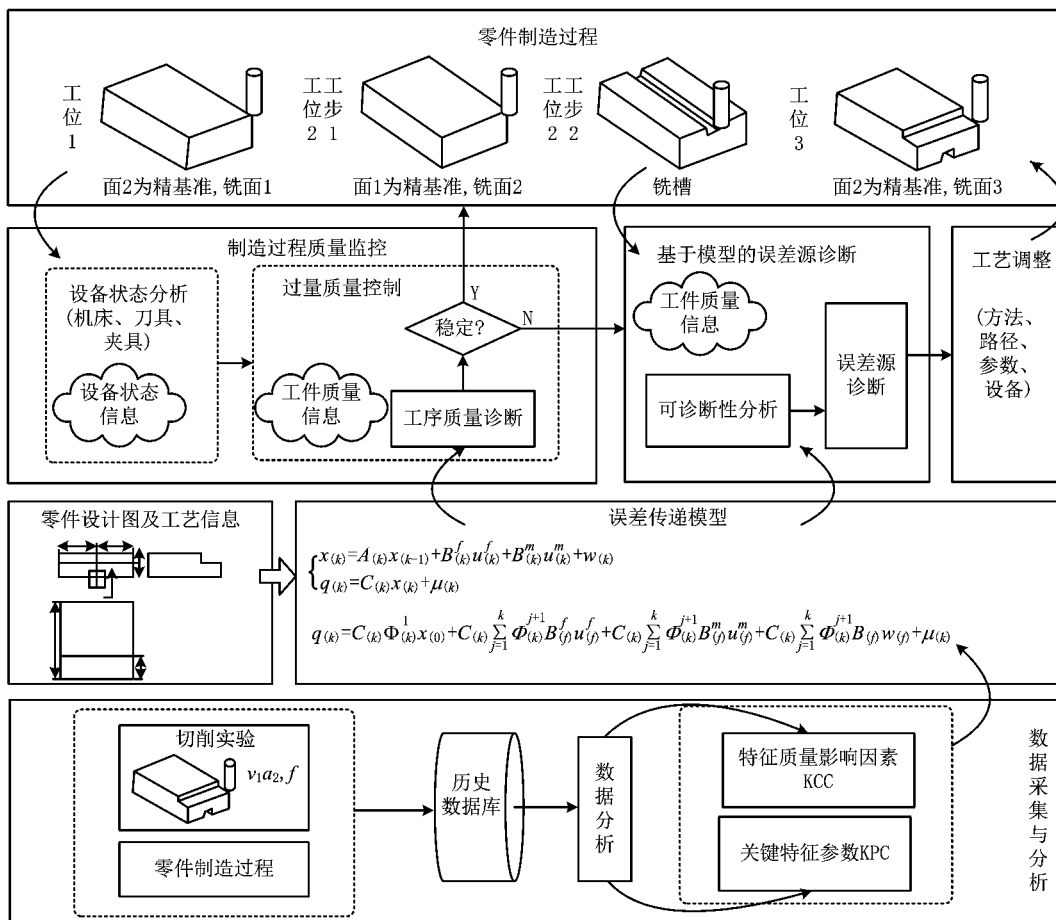


图1 介观尺度零件加工精度控制体系总体结构

3 加工精度控制体系实现的关键技术

SoV 理论能很好地反映各个工序之间的误差传递情况,基于此建立的状态空间模型常用于预测零件的尺寸误差。本文将介观尺度切削的尺度效应融入加工误差模型中,以介观尺度零件关键特征的加工精度为核心,通过分析加工误差累积以及传递机理的逻辑和数学表达,建立误差传递模型来描述误差源与加工精度之间的关系,从而预测工序流中产生的误差,建立包括误差预测、过程误差控制、误差溯源和工艺改进在内的加工精度控制体系。

3.1 动态工序流误差传递状态空间模型的构建

针对介观尺度零件加工的特点,以零件关键特征为线索,通过采用状态矢量表示的方法建立误差流模型,定量表达制造过程中的误差传递现象。

KPC 的误差集合记为 $q = \{q_k, k=1, 2, \dots, l\}$, l 为 KPC 的数量;KCC 的误差集合记为 $u = \{u_k, k=1, 2, \dots, s\}$, s 为 KCC 的数量;KPC 的质量决定于 KCC 的误差,因此二者之间的关系可表示为 $q = f(u)$ 。

以往的误差传递模型均以宏观零件为对象,因此加工误差常忽略不计,或者根据经验赋值进行计算。然而在介观尺度下,刀具尺寸较小,受力状态下易发生变形;而且很多情况下采用的切削量很小,导致尺度效应的发生,从而对加工过程产生很大的影响;同时随着加工的进行,工件的刚度呈动态变化,因此在对工件变形误差建模时需根据这种变化来建立相应的模型。介观尺度动态工序流误差传递模型如图 2 所示。

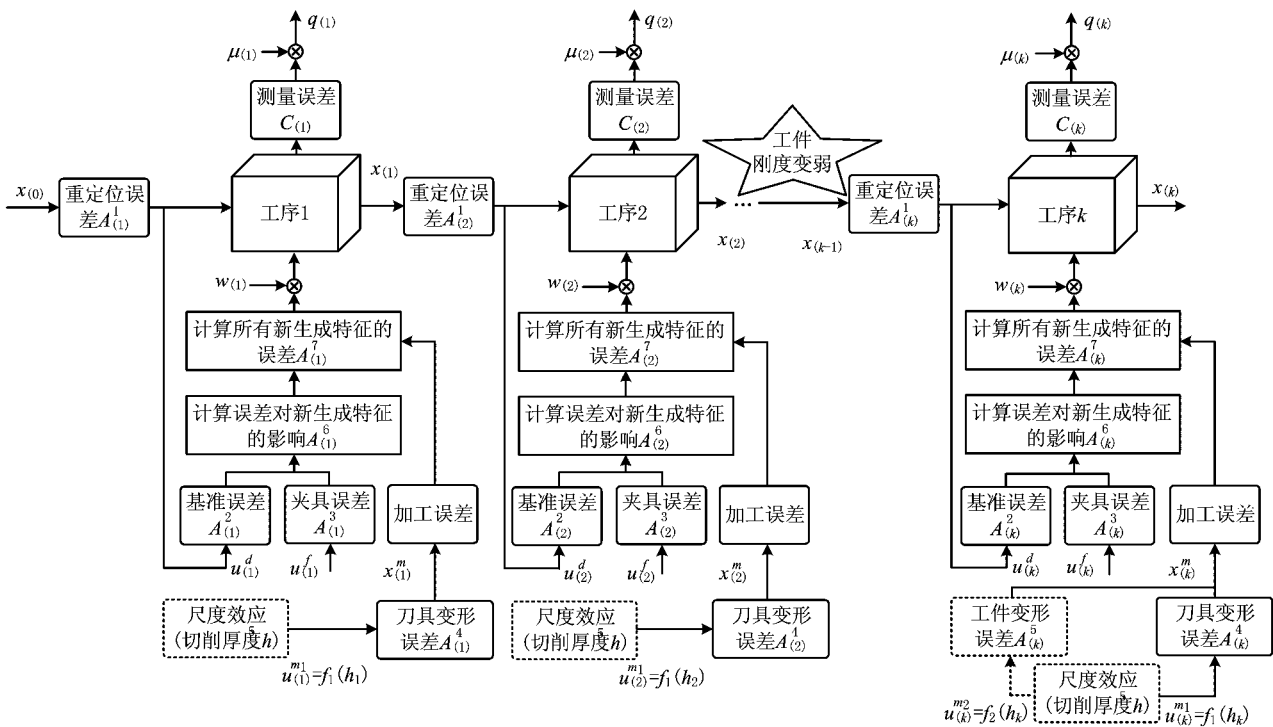


图2 动态工序流误差传递建模

图 2 中:第 k 道工序的加工特征制造误差 $x_{(k)}$ 主要由重定位误差 $x_{(k)}^1$ 、基准误差 $x_{(k)}^2$ 、夹具误差 $x_{(k)}^3$ 、刀具变形误差 $x_{(k)}^4$ 和工件变形误差 $x_{(k)}^5$ 引起,图中虚线框表示介观尺度加工中该误差模型随加工过程的进行而动态变化。

在介观尺度加工中,刀具和工件因切削力引起的刀具变形误差和工件变形误差是影响加工精度的关键因素。第 k 道工序中的刀具和工件受力变形量

可分别表示为 $u_{(k)}^1 = g_1(F_k)$, $u_{(k)}^2 = g_2(F_k)$, 其中 F_k 表示介观切削中的切削力。考虑到各个切削力的计算公式各有优缺点,不同情况下其预测精度也可能有所不同,应根据实际情况,自行选择最适合的切削力计算公式,以达到更高的预测精度。由于尺度效应会导致微切削中实际瞬时切削厚度发生变化,可通过实际瞬时切削厚度 h 来计算切削力大小,表示为 $F_k = g(h_k)$ 。

令 $f_i(h_k) = g_i[g(h_k)] (i=1, 2)$, 代入前式得到基于尺度效应的加工误差输入函数:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{(k)}^{m_1} &= g_1[g(h_k)] = f_1(h_k), \\ \mathbf{u}_{(k)}^{m_2} &= g_2[g(h_k)] = f_2(h_k). \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 刀具变形误差

设第 k 道工序中加工第 i 个特征面时刀具变形量为 $\mathbf{u}_{(k),i}^{m_1}$, 则其导致的加工误差可表示为

$$\mathbf{x}_{(k),i}^{m_1} = \mathbf{N}_{(k),i} \mathbf{u}_{(k),i}^{m_1} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{N}_{(k),i} = \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_{(k),i}^{\text{tool}})^T & -(\mathbf{R}_{(k),i}^{\text{tool}})^T \cdot \mathbf{t}_{(k),i}^{\text{tool}} \\ \mathbf{0} & (\mathbf{R}_{(k),i}^{\text{tool}})^T \end{bmatrix}$ 为第 k

道工序中加工第 i 个特征面时的刀具误差传递矩阵; $\mathbf{R}_{(k),i}^{\text{tool}}$ 和 $\mathbf{t}_{(k),i}^{\text{tool}}$ 分别为刀具坐标系到特征面坐标系的齐次变换矩阵中的旋转变换矩阵和平移变换矩阵。

因此, 第 k 道工序中所有加工特征面的刀具误差传递矩阵为 $\mathbf{A}_{(k)}^4 = [(\mathbf{N}_{(k),1})^T (\mathbf{N}_{(k),2})^T \dots (\mathbf{N}_{(k),l})^T]^T$, l 为工序 k 加工特征面的数量。

(2) 工件变形误差

设第 k 个工序中加工第 i 个特征面时工件变形量为 $\mathbf{u}_{(k),i}^{m_2}$, 则其导致的加工误差可表示为

$$\mathbf{x}_{(k),i}^{m_2} = \mathbf{M}_{(k),i} \mathbf{u}_{(k),i}^{m_2} \quad (3)$$

由于工件刚度随加工动态变化, 且加工误差与变形量正好相反, 定义

$$\mathbf{M}_{(k),i} = \begin{cases} -I, & \text{工件刚度不足导致变形较大;} \\ 0, & \text{工件刚度较大可忽略其变形。} \end{cases}$$

因此第 k 道工序中所有加工特征面的工件误差传递矩阵为 $\mathbf{A}_{(k)}^5 = [(\mathbf{M}_{(k),1})^T (\mathbf{M}_{(k),2})^T \dots (\mathbf{M}_{(k),r})^T]^T$ 。

基于微小误差理论, 针对介观尺度零件加工过程建立的误差传递状态空间模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{(k)} &= \mathbf{A}_{(k)} \mathbf{x}_{(k-1)} + \mathbf{B}_{(k)}^f \mathbf{u}_{(k)}^f + \mathbf{B}_{(k)}^m \mathbf{u}_{(k)}^m + \mathbf{w}_{(k)}; \\ \mathbf{q}_{(k)} &= \mathbf{C}_{(k)} \mathbf{x}_{(k)} + \boldsymbol{\mu}_{(k)}. \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A}_{(k)} = \mathbf{A}_{(k)}^1 + \mathbf{A}_{(k)}^7$, $\mathbf{A}_{(k)}^6 = \mathbf{A}_{(k)}^2 \mathbf{A}_{(k)}^1$, $\mathbf{B}_{(k)}^f = \mathbf{A}_{(k)}^7 \mathbf{A}_{(k)}^6$, $\mathbf{A}_{(k)}^3$, $\mathbf{B}_{(k)}^m = \mathbf{A}_{(k)}^7 [\mathbf{A}_{(k)}^4 \quad \mathbf{A}_{(k)}^5]$, $\mathbf{u}_{(k)}^f = [\mathbf{u}_{(k)}^{f_1} \quad \mathbf{u}_{(k)}^{f_2}]^T$, $\mathbf{u}_{(k)}^m = [\mathbf{u}_{(k)}^{m_1} \quad \mathbf{u}_{(k)}^{m_2}]^T$ 。 $\mathbf{A}_{(k)} \mathbf{x}_{(k-1)}$ 表示前道工序 $k-1$ 误差在当前工序 k 累积的误差; $\mathbf{B}_{(k)}^f \mathbf{u}_{(k)}^f$ 表示由于夹具误差引起的当前工序 k 处的制造误差; $\mathbf{B}_{(k)}^m \mathbf{u}_{(k)}^m$ 表示与切削过程直接相关的误差导致的加工误差; $\mathbf{C}_{(k)} \mathbf{x}_{(k)}$ 表示在不考虑测量误差时测量得到的 KPC 的误差值; $\mathbf{w}_{(k)}$ 为制造过程中的噪声, 用以表示其他误差源引起的误差, 独立于 $\mathbf{u}_{d(k)}$, $\mathbf{u}_{f(k)}$, $\mathbf{u}_{m(k)}$ 和 $\mathbf{x}_{(k-1)}$, 且 $\mathbf{w}_{(k)} \sim N(0, \mathbf{W}_i)$; $\boldsymbol{\mu}_{(k)}$ 为测量噪声, 独立于 $\mathbf{x}_{(k)}$, 且 $\boldsymbol{\mu}_{(k)} \sim N(0, \mathbf{U}_k)$ 。

式(4)描述了前道工序和本道工序的误差源与

本道工序产生的关键特征误差之间的关系, 将其线性化, 即可在仅已知系统矩阵的情况下对工序 k 的误差进行预测:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_{(k)} &= \mathbf{C}_{(k)} \boldsymbol{\Phi}_{(k)}^1 \mathbf{x}_{(0)} + \mathbf{C}_{(k)} \sum_{j=1}^k \boldsymbol{\Phi}_{(k)}^{j+1} \mathbf{B}_{(j)}^f \mathbf{u}_{(j)}^f + \\ &\mathbf{C}_{(k)} \sum_{j=1}^k \boldsymbol{\Phi}_{(k)}^{j+1} \mathbf{B}_{(j)}^m \mathbf{u}_{(j)}^m + \mathbf{C}_{(k)} \sum_{j=1}^k \boldsymbol{\Phi}_{(k)}^{j+1} \mathbf{w}_{(j)} + \boldsymbol{\mu}_{(k)}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}_{(k)}^j$ 为状态转移矩阵, $\boldsymbol{\Phi}_{(k)}^{j+1} = \mathbf{A}_{(k)} \mathbf{A}_{(k-1)} \dots \mathbf{A}_{(j+1)}$, $j=1, 2, \dots, k-1$, 当 $j=k$ 时, $\boldsymbol{\Phi}_{(k)}^{k+1} = \mathbf{I}$ 。

3.2 基于 MSPC 和 SoV 集成的质量控制策略

统计过程控制 (Statistical Process control, SPC) 利用过程波动的统计规律性对过程进行分析控制, 能较好地对加工过程的质量波动进行监控。然而传统的 SPC 只关注某个单独的工序, 没有考虑上流工序误差传递的影响。而且传统 SPC 不能处理较大的多元及自相关数据流, 在处理介观尺度复杂结构件这类工艺过程繁复的零件制造时, 该缺陷愈加明显。为了解决这个问题, 引入多元统计过程控制 (Multivariate SPC, MSPC) 技术。

介观尺度微小零件的尺寸偏差微小, 在如此微小的尺寸偏差情况下进行快速、准确地判断, 对失控状态及时进行报警, 必须使用在微小偏移情况下响应灵敏性高的控制图进行监测。鉴于多元指数加权移动平均 (Multivariate Exponentially Weighted Moving Average, MEWMA) 控制图突出的侦查能力和灵敏度, 且对微小偏移响应敏感, 故选择 MEWMA 控制图对零件的偏移进行监测。基于 MSPC 与 SoV 集成的质量控制策略执行框架如图 3 所示。

假设在工序 k 处进行监测, 可对工序 $k-i$ 的 KPC 进行测量, 也可根据某次测量结果对其后 i 个工序进行监测。根据 3.1 节的方法计算工序 k 的 KPC 的误差 $\mathbf{q}_{(k)}$, 将 SoV 模型计算输出的结果作为 MSPC 的数据来源, 建立基于 SoV 模型的 MSPC 控制图, 通过控制图判断制造过程的稳定性: 若加工过程稳定, 则继续下一工序的加工; 若加工过程不稳定, 则转入误差源诊断模块, 诊断出误差源后对 KCC 进行调整, 然后继续下一工序的加工。

设 l 个相关的 KPC 需要同时测量并控制, 且服从 l 元正态分布, $\mathbf{q}'_{(k-i)1}, \mathbf{q}'_{(k-i)2}, \dots, \mathbf{q}'_{(k-i)m}$ 为工序 $k-i$ 加工后, 来自总体协方差矩阵的相同 l 元正态分布的 m 个独立随机样本向量, 则全部样本数据 $\mathbf{q}'_{(k-i)}$ 可以用矩阵表示为

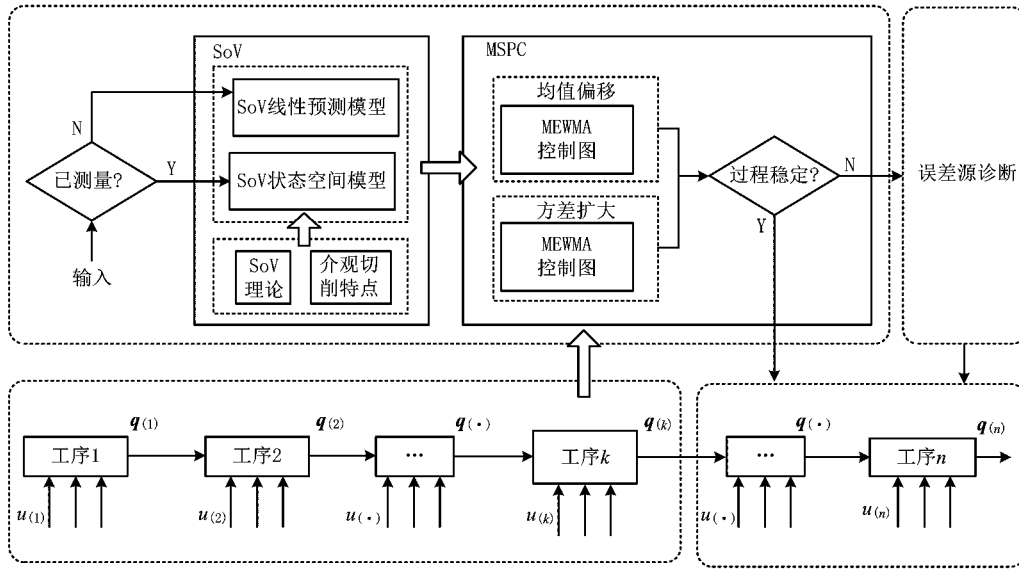


图3 MSPC与SoV集成的质量控制策略执行框架

$$q'_{(k-i)} = \begin{bmatrix} q'_{(k-i)1} \\ q'_{(k-i)2} \\ \vdots \\ q'_{(k-i)m} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} q'_{(k-i)11} & q'_{(k-i)12} & \cdots & q'_{(k-i)1l} \\ q'_{(k-i)21} & q'_{(k-i)22} & \cdots & q'_{(k-i)2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q'_{(k-i)m1} & q'_{(k-i)m2} & \cdots & q'_{(k-i)ml} \end{bmatrix}.$$

设模型预测值服从分布 $q_k \sim N_l(\mu_0, \Sigma)$, 则工序 k 处 KPC 的 MEWMA 控制图的统计量为

$$M_{(k)i} = (W_{(k)i} - \mu_0)^T (\Sigma_{W_{(k)i}}^{-1}) (W_{(k)i} - \mu_0). \quad (6)$$

式中: $\begin{cases} W_{(k)i} = r q_{(k)i} + (1-r)W_{(k)i-1} \\ W_{(k)0} = 0 \end{cases}$, r 为平滑系数,

$0 < r < 1$; $W_{(k)i}$ 为 l 维向量; $\Sigma_{W_{(k)i}}$ 为 $W_{(k)i}$ 的协方差矩阵, 且 $\Sigma_{W_{(k)i}} = \frac{r[1-(1-r)^{2i}]}{2-r} \Sigma$, 当 $i \rightarrow \infty$ 时可取近

似值 $\Sigma_{W_{(k)i}} = \frac{r}{2-r} \Sigma$.

根据特定受控时的平均运行长度可以计算控制线 UCL , 当 $M_{(k)i} > UCL$ 时, 说明均值超出界限, 即制造过程不受控, 发出警报。

3.3 误差源诊断

误差源诊断是实现闭环精度控制的一个重要环节, 通过误差源诊断可以发现导致加工精度超限的原因, 从而有针对性地改进工艺, 提高零件的加工精度。为了进行误差源工序诊断, 首先需要分析制造系统是否满足诊断要求。将式(5)中的误差源进行

合并, 得

$$q_{(k)} = C_{(k)} \Phi_{(k)}^1 x_{(0)} + C_{(k)} \sum_{j=1}^k \Phi_{(k)}^{j+1} [B_{(j)}^f \quad B_{(j)}^{m1} \quad B_{(j)}^{m2}] \begin{bmatrix} u_{(j)}^f \\ u_{(j)}^{m1} \\ u_{(j)}^{m2} \end{bmatrix} + C_{(k)} \sum_{j=1}^k \Phi_{(k)}^{j+1} w_{(j)} + \mu_{(k)}. \quad (7)$$

令 $C_{(k)} \sum_{j=1}^k \Phi_{(k)}^{j+1} B_{(j)} = \Gamma_k^i$, $C_{(k)} \sum_{j=1}^k \Phi_{(k)}^{j+1} B_{(j)} u_{(j)} = \Gamma_k^i U_k^i$, $C_{(k)} \Phi_{(k)}^1 = \Gamma_k^0$, $C_{(k)} \sum_{j=1}^k \Phi_{(k)}^{j+1} w_{(j)} + \mu_{(k)} = \varepsilon$, 得

$$q_{(k)} = \Gamma_k^0 x_{(0)} + [\Gamma_k^f \quad \Gamma_k^{m1} \quad \Gamma_k^{m2}] \begin{bmatrix} U_k^f \\ U_k^{m1} \\ U_k^{m2} \end{bmatrix} + \varepsilon. \quad (8)$$

令 $[U_k^f \quad U_k^{m1} \quad U_k^{m2}]^T = U_k$, 则所有工序的 KPC 误差传递矩阵为

$$\begin{bmatrix} q_{(1)} \\ q_{(2)} \\ \vdots \\ q_{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{(1)}^0 \\ \Gamma_{(2)}^0 \\ \vdots \\ \Gamma_{(k)}^0 \end{bmatrix} x_{(0)} + \begin{bmatrix} C_1 B_1 & 0 & \cdots & 0 \\ C_2 \Phi_2^2 B_2 & C_2 B_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ C_k \Phi_k^2 B_{(k)} & C_k \Phi_k^3 B_{(k)} & \cdots & C_k B_{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

记 $\gamma_i = \begin{bmatrix} 0 \\ C_i B_i \\ \vdots \\ C_k \Phi_i B_k \end{bmatrix}$, γ_i 为误差源 U_i 到各个工序

加工误差的映射。矩阵中向量 $\mathbf{0}$ 表示误差源 U_i 对前 $i-1$ 道工序的加工质量不产生影响。如果 γ_i 的秩 $r(\gamma_i) = s_i$ (s_i 为工序 i 处的误差源数), 即能够建立工序 i 的所有误差源与加工误差的联系, 则工序 i 处的误差源是可诊断的。显然, 如果对于所有 $1 \leq i \leq n$, 均满足 $r(\gamma_i) = s_i$, 则整个制造系统就是可诊断的。

可对诊断的工序 i 进行诊断, 将噪声项合并, 则式(4)可转化为线性形式:

$$q_{(i)} = H_{(i)} x_{(i-1)} + T_{(i)} u'_{(i)} + v_{(i)} \quad (10)$$

式中: $H_{(i)} = C_{(i)} A_{(i)}$, $T_{(i)} = C_{(i)} [B_{(i)} \quad B_{(i)}^m]$, $u'_{(i)} = [u_{(i)}^f \quad u_{(i)}^m]^T$, $v_{(i)} = C_{(i)} w_{(i)} + \mu_{(i)}$ 。理想情况下 $x_{(k-1)} = 0$, 在实际加工过程中 $x_{(k-1)}$ 服从正态分布, 因此和 v 一同看作噪声输入, 将其合并。则式(10)可进一步简记为 $q_{(i)} = T_{(i)} u'_{(i)} + \xi_{(i)}$, 写成协方差矩阵形式 $K^q = TK^u T^T + K^\xi$ 。

由以上分析可以看出, 误差源的方差与最终尺寸误差的方差存在关系。因此, 可以通过方差分析的方法找出误差源。在不考虑噪声影响的情况下, 假设各误差源相互独立, 且有 p 个可能误差源, 将其顺序调换后, 可以得到对应的协方差矩阵 $K^u = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_p^2, 0, \dots, 0)$ 。因此在获得工序 i 的测量结果后, 可通过参数估计得到可能误差源的均值和

方差, 再利用假设检验给出一定置信水平下可能的误差源。

设双边假设检验 $H_0 = \mu_1 - \mu_2 = 0, H_1 = \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ 。

由于总体方差未知, 确定检验量

$$T = \frac{\mu_1 - \mu_2}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t(n_1 + n_2 - 2) \quad (11)$$

式中: $S_w = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$; n_1 为正常样本数, n_2 为异常样本数; μ_1 和 μ_2 分别为正常情况和异常情况下各误差源的样本均值; S_1^2 和 S_2^2 分别为正常情况和异常情况下各误差源样本的方差; 检验量 T 服从自由度为 $n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。在显著性水平 α 下, 当检验量 T 处于拒绝域 $|T| \geq T_{\frac{\alpha}{2}}$ 时 H_0 不成立, 说明该误差源是导致工件特征尺寸异常的原因。

经过以上误差源分析, 即可实现对制造系统的误差源诊断, 其结果将作为工艺调整与改进的依据。

4 模型验证与分析

(1) 误差传递模型验证

误差传递模型是介观零件加工精度控制方法的基础, 该模型的准确性决定了精度控制体系的有效性。因此, 现以具体试验件的加工过程为例, 证明所提误差传递模型的有效性。工件的尺寸要求如图 4 所示, 材料为 310S 不锈钢。

采用直径为 2 mm 的硬质合金立铣刀进行槽 1 和槽 2 的铣削加工, 主轴转速 $n = 8\ 000$ r/min, 每齿进给量 $f_z = 0.004$ mm/z。工件加工顺序为: 首先以 C 面为主要定位基准, 铣削 A 面; 再以 A 面为主要

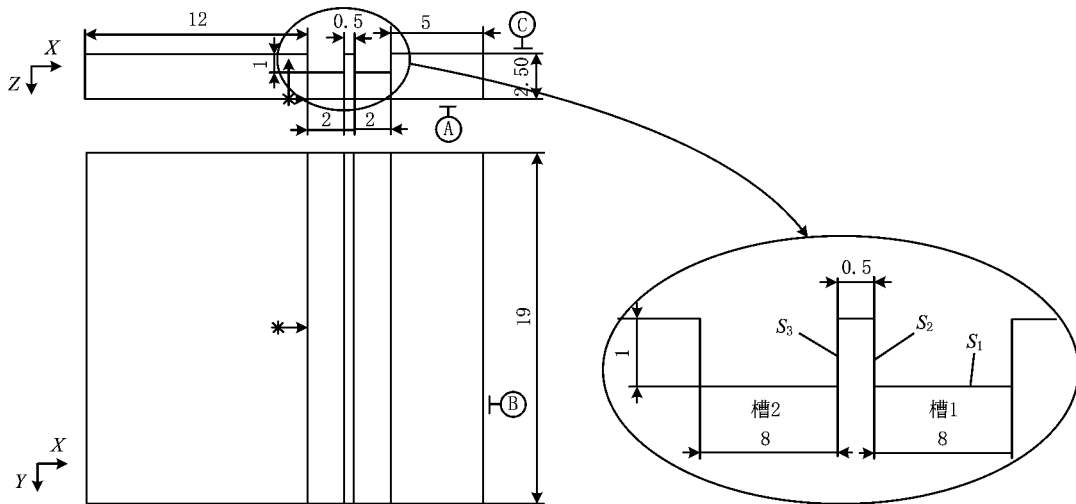


图4 零件尺寸图及局部放大图

定位基准,铣削槽 1 和槽 2。实验在 DMG 五轴加工中心上进行,工件使用专用夹具装夹,并共同固定在 Kistler 9257B 测力仪上,以便获取准确的三向铣削力。测力仪固定在机床工作台上,如图 5 所示,具体工序及要求如表 1 所示。

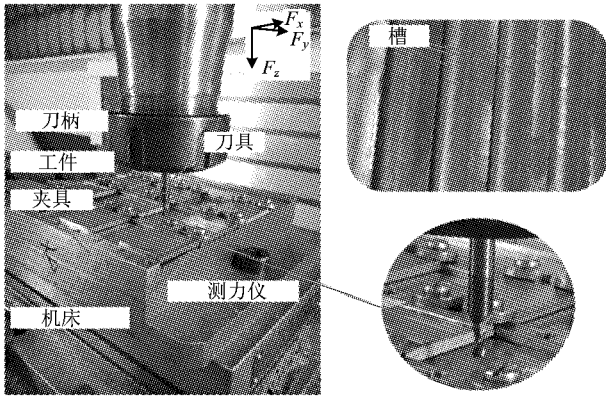


图5 实验装置图

表 1 工件加工工序

工序	定位基准	工艺描述	主要特征约束
1	C+B	铣削面 A	面 A 与面 C 的平行度
2	A+B	铣槽 1	面 S ₁ 与面 C 的平行度
		铣槽 2	面 S ₁ 和面 S ₂ 的垂直度 面 S ₃ 与面 S ₂ 的平行度

通过对制造系统及工序进行分析可知,工序 1 中影响零件制造精度的主要原因为夹具制造误差、基准误差和刀具变形误差,工序 2 加工的特征中面 S₁, S₂ 受夹具制造误差、基准误差和刀具变形误差的影响较大,而对于 S₃,除此之外,因为槽 1 处材料的去除影响了工件的刚度,所以工件变形误差也是面 S₃ 加工精度的主要影响因素。

坐标系定义及工件特征模型如表 2 所示。

表 2 工件主要特征模型

序号	特征	方向向量 n _i /rad	位置向量 p _i /mm
1	面 A	[0, π, 0]	[0, 0, -2.5]
2	面 B	[π/2, 0, 0]	[0, 6, -1.25]
3	面 C	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]
4	底面 S ₁	[0, 0, 0]	[0, 0, -1]
5	侧面 S ₂	[π/2, 0, 0]	[0, -1, -0.5]
6	侧面 S ₃	[-π/2, 0, 0]	[0, -1.5, -0.5]

铣削过程中的误差如下:

1) 夹具误差 $u_{(1)}^f = [0 \ 0 \ -0.01 \ 0 \ 0 \ 0]_{0_{6 \times 1}}^T$, $u_{(2)}^f = [0 \ 0 \ -0.01 \ 0 \ 0 \ 0]_{0_{6 \times 1}}^T$ 。

2) 根据实验所测的铣削力,取进给方向(即 Y 向)力的最大值 $F_x = 35.3 \text{ N}$,利用理论力学知识计算可得刀具变形误差:

$$u_{(1)}^d = 0,$$

$$u_{(2)}^d = [0 \ 0 \ 0.000 \ 438 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]_{0_{1 \times 12}}^T。$$

3) 根据实验所测铣削力,取垂直于进给方向(即 X 向)力的最大值 $F_x = 37.7 \text{ N}$,通过 MATLAB 仿真软件计算,得到工件变形误差预测值:

$$u_{(1)}^p = 0_{6 \times 1},$$

$$u_{(2)}^p = [0_{1 \times 12} \ 0 \ 0 \ -0.032 \ 5 \ -0.060 \ 7 \ 0 \ 0]^T。$$

4) 忽略其他误差源,令 $w_{(k)} = 0$ 。

工件加工后的特征如图 6 所示,其误差测量值与模型预测值对比如表 3 所示。

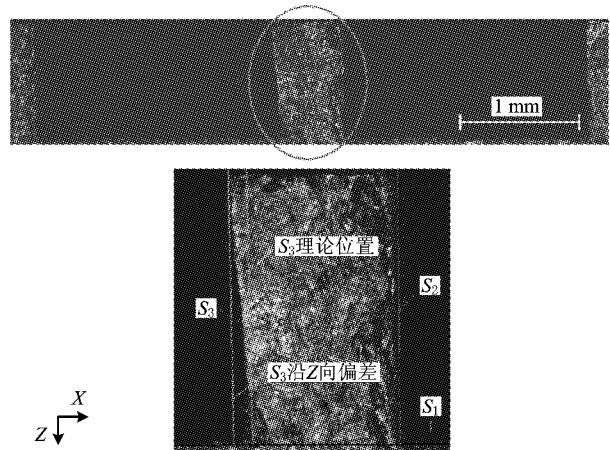


图6 零件加工后的主要特征

表 3 实测值与模型预测值对比

特征	S ₁ 到 C 的尺寸	S ₁ 与 C 的夹角/rad	S ₁ 与 S ₂ 的夹角/rad	S ₃ 到 S ₂ 的尺寸	S ₃ 与 S ₂ 的夹角/rad
测量值	1.011 2	0.001 2	1.572 9	0.532 9	0.046 9
预测值	1.010 3	0	1.570 8	0.532 5	0.060 6

由表 3 可以看出,实际加工得到的测量值与模型输出的预测值之间的差异较小,由此证明所建立的误差传递模型能够反映零件制造误差的主要误差源,并能有效预测出零件的制造误差。

(2) 质量监控模型及误差源诊断方法验证

为验证 3.2 节和 3.3 节理论的可行性,采用图 5 所示装置进行 10 组槽铣实验,切削参数为:主轴转速 $n=8\ 000 \text{ r/min}$,每齿进给量 $f_z=0.004 \text{ mm/z}$,轴向切深为 0.35 mm ;同时进行两组对比实验,在铣槽时引入定位基准误差 0.02 mm ,其他参数不变。每组实验采集三个样本值,选择槽的深度和宽

度尺寸作为 KPC 进行统计分析。根据式(6), 代入 12 组实验数据计算统计量 M , 控制图如图 7 所示。

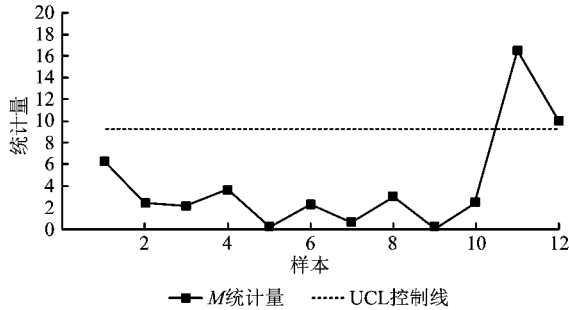


图7 槽铣试验控制图

由图 7 可见, 对于引入定位基准误差的后两组数据, 其统计量超出了控制线, 即控制图能及时反映异常现象。因此, 所述质量监控方法可以有效地对异常现象进行报警。

估计正常情况和异常情况下加工工件每道工序处可能误差源的均值和方差, 结果如表 4 所示。其中, 经初步分析可知, 影响槽深尺寸误差的误差源有夹具 Z 向误差、基准 Z 向误差及刀具 Z 向误差, 因此只计算这三个误差值的影响, 然后对结果进行双边假设检验。

根据式(11)计算检验量 T 的值, 其中: 正常样本数 $n_1=30$, 异常样本数 $n_2=6$; μ_1 和 μ_2 、 S_1^2 和 S_2^2 的值如表 4 所示, 计算结果如表 5 所示。根据表 5 的计算结果, 取显著性水平 $\alpha=0.05$, 则拒绝域为 $|T| \geq T_{\frac{\alpha}{2}}=2.032$, 显然工序 2 中的基准误差检验结果处于拒绝域中, 因此可以诊断出导致槽深不合格的误差源正是工序 2 的基准误差。

表 4 正常情况和异常情况下的误差源均值及方差估计

	正常情况			异常情况		
	夹具误差	基准误差	刀具误差	夹具误差	基准误差	刀具误差
工序 1 均值/ μm	2.72	4.1	—	2.91	3.75	—
工序 2 均值/ μm	3.13	3.35	0.140 5	3.27	23.12	0.172 2
工序 1 方差/ μm^2	0.041 0	0.038 1	—	0.045 4	0.045 4	—
工序 2 方差/ μm^2	0.045 3	0.032 2	0.002 0	0.048 9	0.046 1	0.002 3

表 5 尺寸误差均值显著性检验结果

T 值	夹具误差	基准误差	刀具误差
工序 1	-2.081 8	2.146 6	—
工序 2	-1.462 3	-238.890 4	-1.567 8

上述两个验证实例说明了本文提出的误差预测

模型、多元统计过程控制和误差源诊断的有效性, 从而为以这三项主要技术为主的精度控制系统提供了有力的支撑。

5 结束语

本文针对介观尺度零件的制造过程, 提出以误差传递模型为基础的加工精度控制体系, 主要包括数据采集与分析、基于尺寸误差传递模型的制造误差预测、基于多元统计过程控制的制造过程质量监控、基于协方差的误差源诊断和工艺调整与改进, 为精密微小零件多工序数字化制造提供了技术基础。针对介观零件切削过程中刀具刚度弱、工件刚度动态变化的特点以及微切削尺度效应的影响, 建立了微切削力引起的刀具变形和工件变形模型, 并运用误差流理论构建了基于微切削尺度效应的误差传递的状态空间模型, 为提高介观尺度零件的制造精度提供了一种理论研究方法。基于误差传递模型的预测功能, 提出多元统计过程控制的质量监控策略和误差源诊断方法, 可实现误差预测、工序稳定性判断和误差源诊断, 为加工精度的主动预防控制提供了技术支撑。最后通过微细槽铣削实例验证了所提精度控制系统的有效性和可行性。在介观尺度零件的制造过程中, 零件的精度影响因素繁多, 诸如热场等也是零件制造误差的来源。基于已有的研究, 后续可将这些因素的影响考虑到模型中, 进一步提高模型的精度。

参考文献:

- [1] LI Hongtao, LAI Xinmin, LI Chengfeng, et al. Development of meso-scale milling tool and its performance analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 162-167(in Chinese). [李红涛, 来新民, 李成锋, 等. 介观尺度微型铣床开发及性能试验[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 162-167.]
- [2] WANG Zhenlong. Micro machining technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 1-17(in Chinese). [王振龙. 微细加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 1-17.]
- [3] HUANG Q, SHI J. Stream of variation modeling and analysis of serial-parallel multistage manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3): 611-618.
- [4] TSUNG F, XIANG L. Multistage process control and monitoring via group EWMA schemes[C]// Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control. Washington, D. C., USA: IEEE, 2004: 1087-1092.
- [5] HU S J. Stream of variation theory for automotive body as-

- sembly[J]. *Annals of CIRP*, 1997, 46(1): 1-6.
- [6] LIN Zhongxin. Manufacturing quality control technology of auto body[M]. Beijing: China Machine Press, 2005 (in Chinese). [林忠钦. 汽车车身制造质量控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.]
- [7] LIU Mingzhou, WANG Qiang, ZHAO Zhibiao, et al. Dynamic assembly process quality control system for mechanical products remanufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(4): 817-824 (in Chinese). [刘明周, 王强, 赵志彪, 等. 机械产品再制造装配过程动态工序质量控制系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(4): 817-824.]
- [8] LIU Daoyu, JIANG Pingyu. E-quality control architecture for multistage machining processes[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(4): 782-790 (in Chinese). [刘道玉, 江平宇. 面向多工序制造过程的 e-质量控制体系结构研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(4): 782-790.]
- [9] WANG Shihming, CHEN Dafun, JANG Minchang, et al. Development of micro milling force model and cutting parameter optimization[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(S3): 851-858.
- [10] BOURNE K A. Development of a high-speed high-precision micro-groove cutting process[D]. Urbana-Champaign, Ill., USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [11] ARIF M, RAHMAN M, SAN W Y. An experimental investigation into micro ball end-milling of silicon[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(1): 52-61.
- [12] LAI Xinmin, LI Hongtao, LI Chengfeng, et al. Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(1): 1-14.
- [13] SUN Yazhou, LIANG Yingchun, CHENG Kai. Micro and meso-scale mechanical manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(5): 1-6 (in Chinese). [孙雅洲, 梁迎春, 程凯. 微米和中间尺度机械制造[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(5): 1-6.]
- [14] CHEN Wanqun, BAI Qingshun, LIANG Yingchun, et al. Research of micro milling machine and micro tool rigidity[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(S1): 1-6 (in Chinese). [陈万群, 白清顺, 梁迎春, 等. 微小型铣床及微刀具刚度的研究[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(S1): 1-6.]
- [15] ZHAO Yan. Processing foundation and experiments in micro-milling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese). [赵岩. 微细铣削工艺基础与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.]
- [16] DIMITRI G, GUILLAUME F, GÉRARD P, et al. From large-scale to micromachining: a review of force prediction models[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(1): 1-14.
- [17] HUANG Q, ZHOU N R, SHI J J. Stream of variation modeling and diagnosis of multi-station machining processes[C]// *Proceedings of 2000 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. New York, N. Y., USA: ASME, 2000: 81-88.
- [18] JIANG Pingyu, LIU Daoyu. The quality control method and technology of digital processing[M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese). [江平宇, 刘道玉. 数字化加工过程质量控制方法与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [19] KIM H P, JON M Q. Project management of complex and embedded systems: ensuring product integrity and program quality[M]. Boca Raton, Fla., USA: The Chemical Rubber Company Press, 2009.

作者简介:

余璐云(1990—),女,广西桂林人,硕士研究生,研究方向:数字化工艺、加工精度控制, E-mail: luyun_yu@sina. cn;

焦黎(1975—),女,河南郑州人,副教授,博士,研究方向:难加工材料先进加工技术、数字化工艺、磁流体抛光技术,通信作者, E-mail: jiaoli@bit. edu. cn;

王西彬(1958—),男,陕西彬县人,教授,博士,博士生导师,研究方向:难加工材料先进加工技术、工具工艺设计理论、过程检测和表面完整性的细微观评价等;

张臣宏(1991—),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向:加工精度仿真研究;

高守锋(1987—),男,山东潍坊人,博士研究生,研究方向:数字化工艺、加工精度控制。