

数控机床精度评价新方法

赵万华^{1,2}, 张俊^{1,2}, 刘辉^{1,2}, 杨晓君^{1,2}

(1.西安交通大学机械工程学院,西安 710049;2.西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049)

[摘要] 传统的定位精度与重复定位精度等指标是在准静态下评价数控机床(CNC)性能的,无法反映数控机床在运动和加工过程中的精度。首先从数控机床的数控、伺服、机械等环节在服役态下所表现出来的性能出发,提出一种对数控机床更有针对性的,以运动精度为指标的机床精度评价新方法,通过数控指令与运动轴实际位移的符合程度即运动精度来评价机床精度,然后给出了具体的评价指标,并提出了评价指标的测量方法。分析表明,这种新的机床运动精度描述评价方法能够系统、全面地评价数控机床关键性能的优劣。最后从数控、伺服和机械角度分别阐述了影响运动精度的因素。

[关键词] 数控机床;运动精度;评价指标;影响因素

[中图分类号] TG659 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)01-0093-06

1 前言

高速数控机床的高速、高加速度运动对伺服控制提出了更高的要求,如更高的控制带宽、更大的调速范围、更短的控制周期和测量周期等;而且大幅值、高频宽的驱动力、惯性力、切削力会激励起机械系统显著以及更高频率的振动。这使得由以上因素所引起的误差远超过其他误差(几何误差、热误差)而成为主导误差^[1,2]。同时由于工作条件的极端化,高速数控机床中控制-伺服驱动-机械间的多层次相互作用,即机电耦合行为更加突出,成为考察上述误差时必须考虑的重要因素^[3]。但目前数控机床研究中缺乏这方面的准确定义和系统的机理分析与权威的测量评价方法。

此外,在工程应用中,一般利用定位精度和重复定位精度来评价数控机床运动过程的精度,这是一种准静态的测量评价方法,无法表征数控机床在运动中的瞬态过程(启停、加减速、换向等)和稳态过程中的机床精度,尤其是随着对数控机床进给速度和精度要求的提高,这种准静态的测量方法和评价指标的弊病和不足就更加明显。为此本文首先

从数控机床的数控、伺服、机械等环节在服役态下所表现出来的性能出发,提出一种对数控机床更有针对性的,以运动精度为指标的机床精度评价新方法,通过数控指令与运动轴实际位移的符合程度即运动精度来评价机床精度,然后给出了具体的评价指标,并提出了评价指标的测量方法。分析表明,这种新的机床运动精度描述评价方法能够系统全面地评价数控机床关键性能的优劣。最后从数控、伺服和机械角度分别阐述了影响运动精度的因素。

2 数控机床精度分类及运动精度的定义

从外在表现来看,机床精度可以分为两大类:一类是由几何误差和热误差等引起的,与机床运动进给率大小无关的准静态精度;另一类是源于控制作用和加减速过程中的结构变形、振动,且随编程进给率大小的不同而变化的动态精度^[1]。

Koren在1983年指出,加工中的运动误差来源大致可以分为3类:第1类来自切削效应,即刀具变形、颤振和刀具-工件的热变形;第2类来自某些机械缺陷,如轴间不垂直、运动轴间隙、爬行;第3类来自控制与轴动态特性^[4]。在数控机床中,第3类误差

[收稿日期] 2012-10-10

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724407);国家科学重大专项(2010ZX04014-015);国家自然科学基金重点资助项目(51235009)

[作者简介] 赵万华(1965—),男,辽宁本溪人,教授,博士生导师,主要研究方向为高档数控机床机电集成技术;E-mail:whzhao@mail.xjtu.edu.cn

通常非常显著,事实上在高速定位系统中,机械或结构振动是影响轮廓性能的最重要的因素^[5]。

Schmitz在2008年指出,工件精度,即工件对尺寸与几何形状要求的符合程度,有4个主要来源,分别为几何误差、热变形误差、由控制与机械特性决定的跟随误差和由切削力引起的误差^[6]。值得注意的是,在文献[6]中所选的高速加工中心-刀柄-刀具组合与工艺参数下,由切削力引起的误差占主导(76%),这与文献[1]和文献[5]的结论不符。这一现象是由于文献[6]所采用的评价方法中稳态部分权重过大造成的,同时也说明准确的定义和统一的评价方法在研究与应用中的重要性。

基于以上研究,考虑到高速数控机床的特点,本文提出一种数控机床精度分类和各类误差的定量定义方法。如图1所示,数控机床的最终精度是设计工件的理想形状与加工获得的实际形状之间尺寸、形状的符合程度,即图1中曲面 $f(x, y, z)=0$ 与 $f^*(x, y, z)=0$ 的符合程度,通常用其法向偏差衡量,数学上某加工区域 Ω 的法向偏差指标 Δ_{total} 可近似按式(1)计算。应用中要注意综合考察小曲率部分、大曲率部分、转角部分、过象限部分的偏差,并根据产品特点为各部分赋以合适的权重,才能得到总的加工精度。

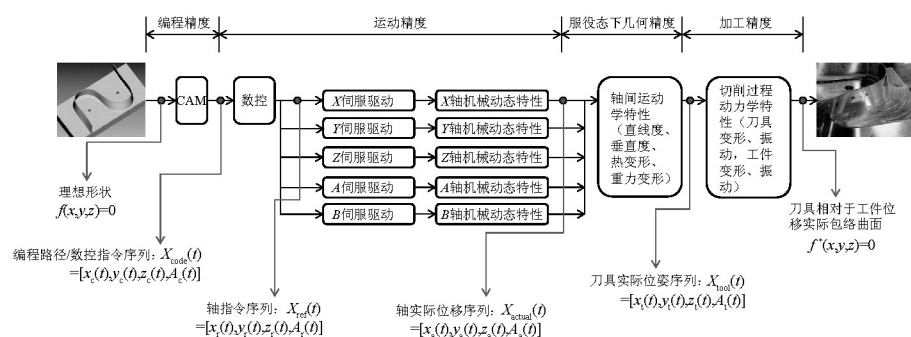


图1 数控机床的精度分类示意图

Fig.1 Classification of precisions in CNC machine tools

$$\Delta_{total} = \max_{i,j,k} \left(\min_{x,y,z} \sqrt{(x_{ij} - x)^2 + (y_{ij} - y)^2 + (z_{ik} - z)^2} \right) \quad (1)$$

式中, $(x_1, y_1, z_1) \in \Omega; f^*(x_1, y_1, z_1)=0; f(x, y, z)=0$ 。

在本文给出的机床精度结构下,数控机床共有

表1 数控机床中的4类精度情况

Table 1 Description of four types of precision in CNC machine tools

精度类别	定义	主要误差来源	主要影响因素	与速度、加速度的关系
编程精度	编程路径与理想曲面的符合程度	路径规划(空间离散)与轨迹规划(时间离散)	算法精度与路径、轨迹细分数	—
运动精度	数控指令与运动轴实际位移的符合程度	控制时延、运动轴机械振动及其相互作用	指令特性、控制算法、机械特性	误差直接正相关
几何精度	刀具实际位姿与按运动轴位移计算理想位姿的符合程度	单轴运动精度(直线度)与轴间位置、姿态精度	加工、装配、热变形	误差通过力作用间接弱相关
加工精度	切削条件下的刀具相对于位姿与同等条件下非切削时位姿的符合程度	刀具变形、振动,工件变形振动	工艺系统刚度、切削参数、刀具工件材料	误差直接相关,但较复杂

运动精度是数控指令与运动轴实际位移的符合程度,用相应的多维误差序列 $\Delta_{dynamic}(t)$ [式(2)]表征。

$$\begin{aligned} \Delta_{dynamic}(t) &= X_{actual}(t) - X_{code}(t) \\ &= [x_a(t) - x_c(t), y_a(t) - y_c(t), z_a(t) - z_c(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

运动精度的误差直接与机床运动速度、加速度正相关,不同于GB/T 17421.2—2000(ISO 230.2—2006)中规定的低速运动、稳定后测量的运动轴定位与重复定位精度。一般意义上的动态精度是指系统在随时间变化的输入作用下所具有的精度,在

给定输入作用下的该精度是指过渡过程中的最大动态偏差,而本文提出的运动精度描述更为广泛,评价更为全面。目前国内外尚无关于运动精度的定义、测量和评价标准。

3 数控机床运动精度的评价测量方法

3.1 运动精度的评价方法

由上节定义可知,运动精度可由多维误差序列 $\Delta_{\text{dynamic}}(t)$ 给出,但该序列不便于直接应用。简单的处理办法是取最大值(最大误差)或均方和(误差累积)进行评价^[6],但这样的评价方法掩盖了误差的不同表现形式及其对最终加工误差的贡献,而且极大地依赖于加工路径、参数的选择。本文依据动态精度相应误差的表现形式,通过稳态误差、瞬态误差、匀速段速度波动误差3类单项与考虑机床特点和工艺要求的运动精度综合指标进行评价。

3.1.1 稳态误差

运动精度中的单轴稳态误差是在缓变输入下由于实际位移输出滞后于位移指令而形成的跟随误差(见图2)。在稳态过程中,跟随时间滞后 T_{lag} 由加减速过程和伺服控制造成的滞后两部分构成, T_{lag} 不随输入指令的速度而变化。而由于时间滞后形成的位置跟随误差 δ_{track} 随指令速度成正比变化,即

$$\delta_{\text{track}} = v \cdot T_{\text{lag}} \quad (3)$$

式中, v 为稳态运行下的指令速度。

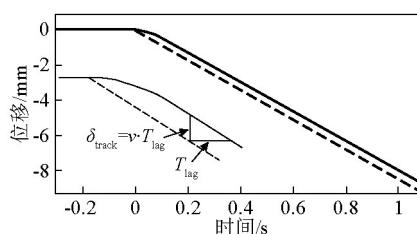


图2 单轴稳态跟随误差

Fig.2 Steady state following error of single axis

运动精度中的联动稳态误差部分是由参与联动各轴的稳态误差共同作用形成的轮廓误差的稳态部分,即稳态轮廓误差。在圆弧插补中用最大半径偏差 Δr_{max} 表征,在小曲率任意曲线中用最大法向偏差 δn_{max} 表征。

3.1.2 瞬态误差

单轴瞬态误差是运动轴在启停、换向过程中,由于指令的突变或者间隙、非线性摩擦的突变激励起系统振荡调整过程,由此引起的指令与实际位移

的偏差(见图3)。

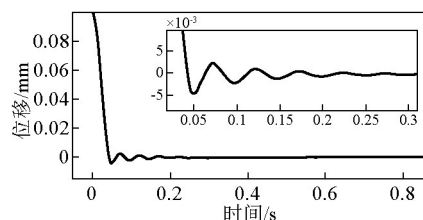


图3 准停过程中的振荡与瞬态误差

Fig.3 Vibration and transient error during positioning process

从频率角度来看,即当输入能量频宽大于机械动态特性带宽时,输入能量中超出机械带宽的有用的频率分量无法实现,形成瞬态误差:

$$\Delta x(t) = \int_{\omega_c}^{\omega_r} T(\omega)G(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (4)$$

式中, $T(\omega)$ 和 $G(\omega)$ 分别为输入能量特性与机械动态特性。

可以使用最大超调量 M_p 与调整时间 t_s 等指标衡量单轴动态误差。

联动瞬态误差是由单轴瞬态误差引起的,在转角、圆弧过象限以及曲率突变处产生的呈现振荡调整过程的指令与实际位移的偏差。以最大瞬态轮廓误差 δt_{max} 进行衡量。

3.1.3 匀速段速度波动误差

匀速段速度波动误差是在稳速指令下由于伺服推力/力矩波动、控制离散误差、摩擦与负载波动造成的实际速度与指令速度的偏差。用平均波动幅值 ΔV_{avg} 进行衡量。速度波动的频率、幅值将直接影响加工件的表面质量。

3.2 数控机床运动精度的测量

运动精度的测量,即多维误差序列 $\Delta_{\text{dynamic}}(t)$ [式(2)]的获取有两类方法:直接测量与间接测量。

直接测量方法采用编码器、光栅、激光干涉仪直接测量单轴的实际位移序列。优点是可以一次性准确地获得单轴误差序列。但在指令序列的采集及其与实际位移序列的时间同步上存在一定技术困难。

间接测量方法通过平面光栅、球杆仪、基准棒或基准球^[7]测量刀具与工件的相对位移轨迹,然后再从中分离出运动精度误差。优点是可以一次实验确定多轴误差,缺点是需要进行误差分离,且精度不如直接测量。分离方法包括:a. 利用各类误差外在特性的不同进行分离的方法,如利用几何误差的空间波长重复性高、运动误差的时间频率重复性高的特点分离几何误差与运动误差^[8]; b. 利用各类

敏感因素的不同合理设计实验进行分离的方法,如利用运动误差与速度正相关的特点从总误差中进行分离的方法^[1]。

此外,在一定的机械结构与参数下,通过不同的控制增益调整控制精度时,稳态误差、瞬态误差、匀速段速度波动误差的改善往往互相矛盾。而且,不同类型的机床,不同的工件,同一机床同一工件的不同加工阶段中对上述3项误差的要求侧重也是不一样的。因此,在实际测量时,需要考虑实际加工要求,权衡3项误差,设计运动精度综合指标 P_d [式(5)~式(8)],同时需要设计能够充分表现出3项误差的测试指令(见图4)。

$$E_s = \sum_{\text{稳态段}} \int [X_{\text{actual}}(t) - X_{\text{code}}(t)]^2 dt \quad (5)$$

$$E_t = \sum_{\text{瞬态段}} \int [X_{\text{actual}}(t) - X_{\text{code}}(t)]^2 dt \quad (6)$$

$$E_v = \sum_{\text{稳速段}} \int [V_{\text{actual}}(t) - \bar{V}]^2 dt \quad (7)$$

$$P_d = f|_{\text{加工要求}}(E_s, E_t, E_v) \quad (8)$$

式(7)中, V_{actual} 与 \bar{V} 分别为实际速度与平均速度。

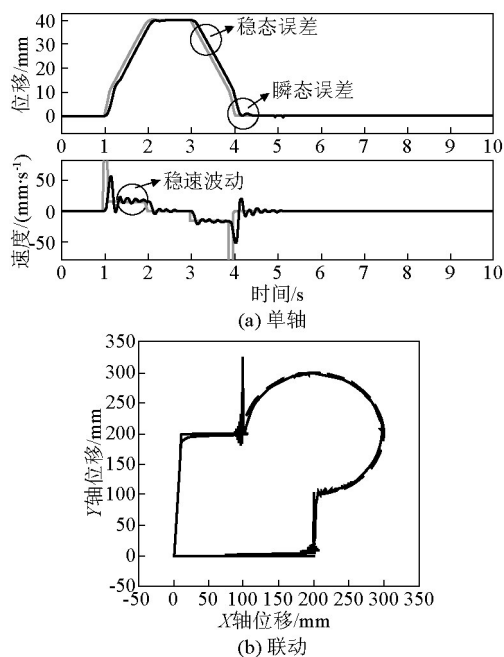


图4 运动精度综合测试用路径

Fig.4 Trajectories for comprehensive dynamic precision test

4 数控机床运动精度的影响因素

一方面,高速数控机床作为一般的伺服运动控制系统,影响数控机床运动精度的因素有数控及指令特性、伺服控制参数和机械动态特性;另一方面,高速数控机床不同于传统机床,其运动控制具有显著的机电耦合特征,机电耦合行为也成为高速数控机床运动精度的重要影响因素。

4.1 数控及指令特性

数控及指令特性对运动精度的影响因素分两类,一类是不依赖于运动轴伺服、机械特性的影响因素(即当控制对象具有理想比例特性时依然会产生误差的因素),如控制频率、误差寄存器位数、测量精度、加减速时间常数等。文献[9]定量给出了上述因素与运动精度的关系。

另一类是通过改变对被控对象的激励起作用的因素,如指令整形、轨迹规划和不同的加减速策略。文献[10]用优化控制理论统一了各种轨迹优化方法、指令整形方法、加减速方法,通过解析推导定量给出了各种方法所引起的定位运动残余振动幅值,及各种方法对被控对象参数(主导振动频率)变化的鲁棒性。需要指出的是,文献[10]中的方法有利于减少瞬态误差,但会增加稳态滞后误差,该稳态滞后误差可以通过采用伺服系统前馈控制部分消除。另外,通过巧妙设计的加减速策略^[11]能够完全消除加减速带来的时间滞后误差,但会增加瞬态误差,此时可以通过伺服控制中采用指令滤波或陷波滤波部分抑制。

4.2 伺服控制参数

Poo A N等早在1972年就使用简化模型(一阶惯性或纯积分),采用经典控制论的基础方法时域响应分析方法求解了直线与圆弧轮廓误差的解析表达,并基于解析解讨论了误差的来源以及参数的作用^[12]。

目前,对多轴联动运动精度的建模,即对多轴特别是五轴联动运动精度与单轴运动精度的关系模型的研究较少,且多停留在低阶(2阶)少轴数(3轴以下)阶段。很难用于分析高速数控机床伺服控制参数与多轴联动运动精度的关系。Altintas在2009年给出了五轴机床的轮廓误差模型,将轮廓误差定义为刀尖点的法向偏移和刀具的姿态偏差两部分,并用刚体动力学方法给出了误差模型,其中的机械系统采用1阶模型,伺服系统采用比例环节近似^[13]。

随着高速机床的发展以及广泛应用,对于高速数控机床所具有的高阶机械模型,伺服反馈、前馈、滤波作用下的运动精度与伺服控制参数的关系更加复杂,也更加紧密,需要从理论以及实验两方面入手,分析讨论伺服控制参数对运动精度的影响,实现伺服参数的优化设置。

4.3 机械动态特性

在传统机床研究中,机械系统往往被简化为1阶系统或2阶系统,此时影响运动精度的主要参数是惯性时延 T_m 或主导振动频率 ω_m ,根据文献[10]和文献[12]可以确定这些参数与运动精度的关系。

但在高速数控机床中,由于驱动力、切削力和

惯性力激励频宽的增大,机械系统的高阶共振频率将被激起,同时运动轴间的耦合作用将变得显著。图5是笔者团队构建的丝杠驱动单轴机械系统动力学模型及其频率特性验证。

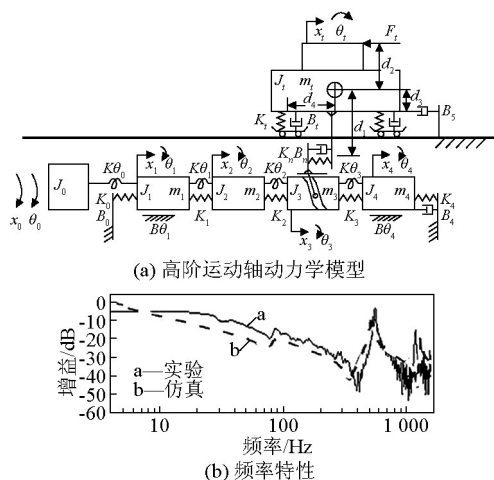


图5 高阶运动轴动力学模型与频率特性

Fig.5 Single axis' high order dynamic model and its frequency characteristics

4.4 机电耦合行为

研究指出,高速数控机床是典型的复杂机电系统。其中高速数控机床的典型代表直线电机进给系统,由于取消了中间所有机械传动环节,伺服特性与机械特性相互作用更加紧密,现象更加明显。笔者团队以永磁同步直线电机进给系统为研究对象,分别利用麦克斯韦张量法和达朗贝尔原理对进给系统伺服驱动力和机械执行机构进行了频域分析,发现如下机电耦合行为^[14]。

- 1) 机械系统具有多阶共振频率,且机械特性通过伺服刚度作用受伺服系统参数影响。
- 2) 伺服驱动输出力/力矩具有多谐波成分,且输出特性随机械负载的位移、速度变化^[15]。
- 3) 数控指令特性影响机械响应,同时通过测量扰动,机械特性又影响数控指令特性。

机电耦合行为将极大地影响高速数控机床的运动精度,由于伺服参数的不同以及外界干扰的影响,伺服推力频率特性将发生变化。某一条件下,当伺服推力某一频率和机械系统的某一阶固有频率相接近时,系统发生振荡,运动精度下降。以下给出初步分析结论。

4.4.1 稳态误差与控制增益上限

单轴进给系统在匀速或平稳变速运动时的稳态跟随误差^[12]:

$$\delta_{\text{track}} = \frac{V}{K_p} \quad (9)$$

式中, V 为运行速度; K_p 为位置环增益。

可见,增加 K_p 可以减小稳态跟随误差,但在工

程实践中,当 K_p 增大到某值后系统将会振荡,甚至失稳不能工作。文献[14]指出伺服控制参数提高的一个限制因素就是由于前述耦合行为3,即测量扰动引起的系统稳定域变化造成的。

4.4.2 能量频宽与机械带宽关系引起的瞬态误差分析

机械系统响应 $x(\omega)$ 与输入能量特性 $T(\omega)$ 以及机械动态特性 $G(\omega)$ 的关系为:

$$x(\omega) = T(\omega)G(\omega) \quad (10)$$

其时域响应为:

$$\begin{aligned} x(t) &= F^{-1}(T(\omega)G(\omega)) \\ &= \int_0^{\min(\omega_r, \omega_c)} T(\omega) G(\omega) e^{j\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (11)$$

当输入能量频宽大于机械动态特性带宽时,输入能量中有用的中频分量无法实现,形成瞬态误差:

$$\Delta x(t) = \int_{\omega_c}^{\omega_r} T(\omega)G(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (12)$$

图6给出了不同加减速参数下形成的不同频宽输入与机械带宽关系造成的最大瞬态误差。

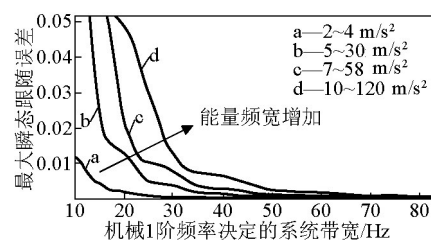


图6 瞬态误差与能量频宽和机械带宽的关系

Fig.6 The relationship of the transient error, the energy frequency width and the mechanical bandwidth

4.4.3 高频谐振引起的瞬态误差

机械的高阶共振往往是传动丝杠扭振、工作台柔性振动等,具有阻尼比小 (< 0.1)、共振峰值高的特点, $G(\omega)$ 的各阶共振频率有: $\omega_{G1}, \omega_{G2}, \dots, \omega_{Gn}$; 在加减速、转角、换向等运动突变处伺服驱动力谱频宽变大,加之推力波动等其他效应造成的高频分量, $T(\omega)$ 的各阶峰值频率有: $\omega_{T1}, \omega_{T2}, \dots, \omega_{Tm}$ 。当两者频率彼此接近时会产生共振,引起的共振峰值即瞬态误差:

$$|x(\omega)|_{\omega_r = \omega_c} = |T(\omega)|_{\omega_r} |G(\omega)|_{\omega_c} \quad (13)$$

该频率下的相角滞后:

$$\angle x(\omega)_{\omega_r = \omega_c} = \angle T(\omega)_{\omega_r} + \angle G(\omega)_{\omega_c} \quad (14)$$

若该滞后超过 180° 系统将失稳,即在此频率下形成持续、发散振荡。

5 结语

本文通过研究近期相关文献,结合笔者团队工作,对高速数控机床运动精度进行了系统概述。给出了一种新的数控机床精度分类、定义方法;提出了从

稳态误差、瞬态误差、匀速段速度波动误差3个方面对运动精度进行评价的方法,并针对实际测试情况,提出了考虑机床特点和工艺要求的综合指标评价方法;分析表明:这一新的机床运动精度描述评价方法能够系统全面地评价数控机床关键性能的优劣。

通过分析指出了机电耦合行为对高速数控机床运动精度有着重要影响。利用运动精度能够反映数控机床在设计制造以及加工过程中的核心技术。尤其随着数控机床速度、加速度的提高,机电耦合现象更加凸显,利用传统的定位精度和重复定位精度无法表征数控机床在运动和加工过程中的精度,运动精度的提出更加具有重要的意义。

参考文献

- [1] Andolfatto L, Lavernhe S, Mayer J R R. Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five axis high-speed machine tool [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51(10-11): 787-796.
- [2] Mohamed Slamani, Rene Mayer, Marek Balazinski, et al. Dynamic and geometric error assessment of an XYZ axis subset on five-axis high-speed machine tools using programmed and point constraint measurements [J]. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2010, 50(9-12): 1063-1073.
- [3] Zhao Wanhua, Zhang Jun, Liu Hui, et al. Analysis on spectrum characteristic of PMLSM feed drive systems oriented to motion precision [C]. *Proceedings of the 10th ICFDM, Chongqing*, 2012.
- [4] Koren Y. *Computer Control of Manufacturing Systems* [M]. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [5] Lee K, Ibaraki S, Matsubara A, et al. A servo parameter tuning method for high-speed NC machine tools based on contouring error measurement [C]// *Laser Metrology and Machine Performance VI, Proc. of LA MDAMAP, Huddersfield, England*, 2003.
- [6] Schmitz Tony L, Ziegert John C, Canning J Suzanne, et al. Case study: A comparison of error sources in high speed milling [J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(2): 126-133.
- [7] 洪迈生, 苏恒, 李济顺. 数控机床的运动精度诊断法[C]. 第十一届全国设备监测与诊断学术会议, 无锡, 2002.
- [8] Kono D, Matsubara A, Yamaji I, et al. High-precision machining by measurement and compensation of motion error [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(10): 1103-1110.
- [9] Nakamura M, Goto S, Kyura N. *Mechatronic Servo System Control* [M]. Translated by Zhang Tao. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [10] Dieulot J Y, Thimoumi I, Colas F, et al. Numerical aspects and performances of trajectory planning methods of flexible axes [J]. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 2006, 1(4): 35-44.
- [11] Cao Kun, Zhao Wanhua, Liu Hui. A novel acceleration/deceleration profile on the basis of the analysis of the motor torque frequency spectrum characteristic[C]. *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Houston, Texas, USA*, 2012.
- [12] Poo A N, Bollinger J G, Younkin G W. Dynamic error in type 1 contouring systems [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1972, IA-8(4): 477-484.
- [13] Sencer B, Altintas Y, Croft E. Modeling and control of contouring errors for five-axis machine tools-Part I: Modeling [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(3): 031006.1-031006.8.
- [14] Liu Hui, Yang Xiaojun, Zhao Wanhua, et al. Research on mechatronic coupling facts of linear motor feed drive system based on spectrum characteristics [C]. *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Houston, Texas, USA*, 2012.
- [15] Yang Xiaojun, Cao Kun, Zhao Wanhua, et al. An overall analysis of servo control system influence on frequency spectrum structure of linear motor thrust [C]. *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Houston, Texas, USA*, 2012.

New evaluation method on the precision of NC machine tools

Zhao Wanhua^{1,2}, Zhang Jun^{1,2}, Liu Hui^{1,2}, Yang Xiaojun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[Abstract] The performance of computerized numerical control (CNC) machine tool is evaluated by the traditional positioning error and the positioning repeatability, which is in quasi static and cannot reflect the precision of machine tool in the process of movement and machining. In this paper, a novel precision evaluation method which takes the dynamic precision as index is proposed for high-speed machine tool. The precision of machine tool is described through the consistence of the actual trajectory and the ideal command. The specific evaluation index of dynamic precision is provided. Meanwhile, the measure method of evaluation index is put forward. It can be obtained that this new evaluation method of machine tool precision can evaluate the quality of key performance in CNC machine tool systematically and roundly.

[Key words] NC machine tools; dynamic precision; evaluation index; impact factors