

引文格式: 吕盾, 张佳辉, 王大伟, 等. 国产数控机床动态精度技术现状与对策[J]. 航空制造技术, 2022, 65(6): 22-33.

LÜ Dun, ZHANG Jiahui, WANG Dawei, et al. Technical status and countermeasures of dynamic accuracy of domestic CNC machine tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(6): 22-33.

国产数控机床动态精度技术现状与对策*

吕盾¹, 张佳辉¹, 王大伟², 成群林³, 赵万华¹, 卢秉恒¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054;

2. 科德数控股份有限公司, 大连 116600;

3. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

[摘要] 高档数控机床是支撑航空、航天及能源工程等领域零件加工的关键装备。当前我国已经可以设计和制造各种结构型式的高档数控机床,但是机床的性能与国外先进产品相比仍然存在一定差距,其中高速下的动态误差大是主要差距之一。将动态误差定义为进给轴执行器末端位置相对于指令位置的偏差,并划分为闭环内动态误差和闭环外动态误差两部分。以某国产数控机床为对象,对动态误差进行测量和分离,呈现出动态误差的各种表现形式。在此基础上,有针对性地分析各种形式动态误差的成因,归纳国内外相关研究工作,指出围绕动态误差我国需要聚焦的研究方向。

关键词: 数控机床; 动态误差; 多轴机床; 高速机床; 高速高精加工

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.06.022



吕盾

副教授, 博士, 研究方向为数控机床动态精度。

高档数控机床一般指高速精密多轴联动数控机床,用于航空结构件、航天薄壁件及燃气轮机叶片等复杂零件的加工,是支撑航空、航天及能源工程等领域复杂零件加工的关键装备。多轴联动数控机床的基本任务是驱动刀具和工件相对运动,形成目标联动轨迹,并保证目标联动轨迹相对于指令轨迹的误差满足要求^[1]。目标联动轨迹相对于指令轨迹的偏差与数控机床的定位误差、几何误差及跟随误差等误差形式均相关^[2]。定位误差和几何误差为机床在不运动或低速运动下呈现的静态/准静态误差,这两类误差与机床的空间参数相关。跟随误差是在机床运动中产生的误差,与各轴运动参数相关。

长期以来,在数控机床的购置和使用中,一般仅根据国家/国际标准要求关注几何误差等静态/准静态

误差指标和尺寸规格等技术参数。然而,复杂零件多轴联动高速加工中,数控机床的动态误差远超过静态/准静态误差,是产生加工误差的主要因素。Slamani等^[3]的研究表明,当进给速度较低时,几何误差是引起机床误差的主要原因;当进给速度增加到10m/min时,动态误差占到机床误差的80%。Schmitz等^[4]的研究表明,当进给速度由150mm/min提高到8000mm/min时,动态误差几乎增大1倍。因此,即使数控机床的定位误差和几何误差等静态/准静态误差合格,也并不一定能满足机床联动轨迹误差及零件加工误差要求,必须考虑动态误差的影响。

实现高速下的高动态精度,一直是国际机床研究中的热点和具有挑战性的问题。自德国斯图加特大学Heisel等^[5]分析了高速进给中存在

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775421); 上海市自然科学基金(21ZR1427600)。

的动力学激励源及其对零件加工质量的影响后,国际上已经开展了不少关于动态误差的研究工作,先进的机床制造商也在积极推出一些动态误差的控制功能。

国内数控机床经过数十年的发展,取得了大量的研究成果,已经可以设计和制造各种结构形式的高档机床^[6]。但是,在机床动态误差的研究方面,一直缺少系统性的研究成果,尚不能对高速高精加工能力的提升提供理论支持。在复杂零件的实际加工中,往往采用极低的进给速度、加速度及加加速度^[7],以牺牲加工效率的方式来保证机床动态精度和零件加工精度^[8]。例如,目前国内在航空结构件的多轴联动加工中,为了保证联动轨迹精度,数控机床进给速度、加速度及加加速度等运动参数的设置,与同类结构型式、相近规格的进口数控机床相比存在数量级上的差距^[9]。

表1总结了动态误差技术国内外研究现状。通过控制单轴动态误差来控制轨迹误差,是国际上机床轨迹控制采用的主流做法,因此所列举的相关技术均针对单轴的动态误差。在单轴动态误差不能有效控制时,采用交叉耦合及各轴伺服特性匹配等方法,对各轴动态误差进行协调控制,是实现轨迹误差控制的另一个基本思路,同样受到国内外学者的广泛关注和研究。但是,在机床实际加工中,该方法并未得到应用,因此未予提及。

综上所述,高速下的动态误差是当前国产机床面临的主要性能差距之一,动态误差的系统性研究是我国亟需开展的工作。本文基于国产科德KMC600S UMT五轴铣车立式复合加工中心Y轴动态误差的测量和分离结果,有针对性地分析不同形式动态误差的成因,总结动态误差的国内外研究工作及核心技术,在此基础上提出我国需要聚焦的研究方向,为系统性部署动态误差研究工作提供依据。

1 动态误差的定义和构成

数控机床的动态误差成因复杂,国际上长期以来都没有形成明确的定义。多轴数控机床各个进给轴的伺服控制彼此独立,分别带动刀具或工作台沿各自进给方向运动。为控制联动合成轨迹的误差,工程上的主流策略是分别独立控制各个进给轴的刀具或工作台等末端位置,使各个进给方向上末端位置相对于指令位置的偏差在轨迹各处都足够小。因此,联动轨迹误差控制的实质是单轴末端位置相对于指令位置偏差的控制,如图1所示。

基于上述分析,赵万华等^[10]将动态误差定义为数控机床进给运动过程中,进给轴末端位置相对于数控系统插补生成指令位置的偏离程度。

多轴数控机床虽然各个进给轴在控制上是彼此独立的,但是在结构上却是相互耦合的,总有某个(某几个)进给轴背负着其他进给轴运动。这种结构上的耦合,造成某个(某几个)进给轴的光栅等反馈检测元件无法安装在刀具等执行器末端,造成光栅检测点(闭环控制点)与执行器末端之间的机械环节位于闭环控制外,无法接受伺服的直接控制,处

表1 动态误差技术现状

Table 1 Summary of current status of dynamic error technology

| 动态误差 | 动态误差表现形式 | | | 成因 | 技术现状 | | | 研究优先级 |
|---------|----------|---------------|---------------------|--|------|---------------|----------|-------|
| | 表现形式 | 对应运动过程 | 相关性 | | 数控系统 | 伺服驱动 | 机械结构 | |
| 闭环内动态误差 | 瞬态 | 加减速过程 | 速度相关; 加速度相关; 加加速度相关 | 伺服系统对指令的滞后与衰减 | 指令平滑 | 前馈+滤波; 提高伺服带宽 | | 高 |
| | 稳态 | 匀速过程 | 速度相关 | 伺服系统对指令的滞后 | — | 前馈; 消除相位滞后 | | 已解决 |
| 闭环外动态误差 | 瞬态 | 加减速过程 | 加速度相关; 加加速度相关 | 惯性力/力矩引起的机械结构弹性变形 | 预测补偿 | | 偏置距离优化 | 高 |
| | 稳态 | 匀速过程 | 速度相关 | 惯性力/力矩撤销后,机械结构的残留弹性变形 | | | | 低 |
| | 振动 | 加减速过程 匀速过程 | 加加速度相关 | 惯性力/力矩激励引起的机械结构振动 惯性力/力矩激励撤销后,机械结构的残留振动 | 指令平滑 | — | 动态特性主动设计 | 高 |

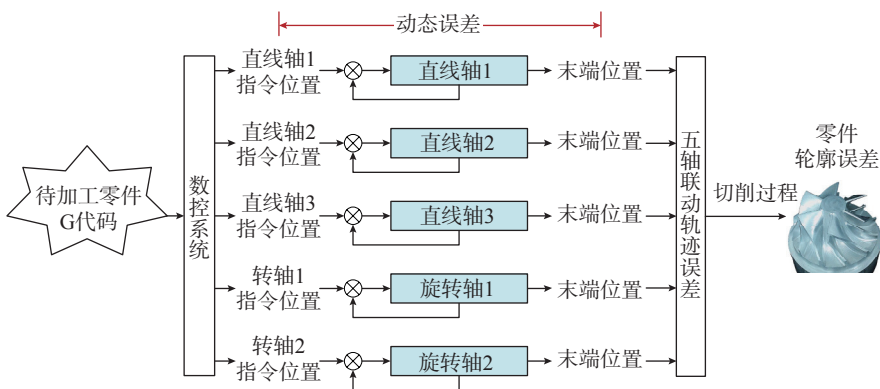


图1 单轴动态误差与五轴联动轨迹误差的关系

Fig.1 Relationship between dynamic error of individual axis and five-axis trajectory error

于不可测与不可控的开环状态。基于上述考虑, Lyu 等^[11]以光栅检测点为界,进一步将单轴动态误差划分为闭环内动态误差和闭环外动态误差两个部分。闭环内动态误差是进给运动中光栅检测点位置相对于指令位置的偏差(一般称作跟随误差);闭环外动态误差是进给运动中执行器末端位置相对于光栅检测点位置的偏差。另外,为便于区分,以下将执行器末端位置相对于指令位置的偏差称为末端动态误差。

图2所示为某龙门/动柱式双摆头结构五轴机床Y轴的伺服控制与机械结构。该机床Y轴的机械环节最多,除自身的机械传动环节外,还串联了Z轴、A轴和C轴的机械环节。按照上述定义,动态误差为该轴执行器末端位置相对于指令位置的偏差。该机床Y轴伺服系统为闭环控制,采用光栅尺检测并反馈位置信号。由于结构的限制,光栅尺无法安装在执行器末端附近,造成指令输入点与光栅检测点之间的机械环节位于闭环控制内,接受伺服的直接控制,产生闭环内动态误差;而光栅检测点与执行器末端点之间的滑板、滑鞍、转轴及摆头等机械环节位于闭环控制外,无法直接接受伺服的控制,产生闭环外动态误差。图2中末端位置是目标控制位置,但是光栅检测点是伺服的实际控制位置。要满足联动轨迹误差要求,必须考虑单轴末端动态误差。

对于光栅等反馈元件可以安装在执行器末端附近的进给轴,如图3中驱动工作台旋转的C轴,可将圆光栅检测点(闭环控制点)位置等同于末端位置,此时无需考虑闭环外动态误差。

动态误差的成因众多,非线性摩擦^[12]、传动间隙^[13]、电机谐波力/力矩^[14-16]、切削力的瞬态部分^[17-18]、指令速度、加速度及加加速度^[19]等都会引起动态误差。然而,无论动态误差的成因是什么,单轴动态误差都是通过闭环控制点或末端点对联动轨

迹误差产生影响的。对于图3中C轴,单轴动态误差体现为环内动态误差;对于图2中Y轴,单轴动态误差体现为环内动态误差和环外动态误差。因此,将动态误差定义为末端位置相对于指令位置的偏差,将其划分为环内动态误差和环外动态误差两部分,将动态误差表征在闭环控制点和末端点上,既符合数控机床通过单轴控制实现轨迹控制的基本逻辑,又符合多轴数控机床伺服控制彼此独立、机械结构相互耦合的特征,还能全面表征各种成因下的单轴动态误差。

指令速度、加速度及加加速度引起的动态误差,是国内学术研究中长期未予足够重视的方向,也是工业现场中制约加工效率提升的突出问题,因此,本文对动态误差的分析限定于指令进给速度、加速度及加加速度引起的动态误差。

动态误差的成因复杂,表现形式各异。为了有针对性地分析动态误差成因,总结动态误差技术现状,对国产科德KMC600S UMT五轴铣车

立式复合加工中心Y轴动态误差进行了测量和分离,以呈现动态误差的整体样貌和各类表现形式。

2 闭环内动态误差的表现形式及技术现状

2.1 闭环内动态误差的表现形式及相关性分析

测量得到的闭环内动态误差随时间的变化曲线及其与指令速度的关系如图4所示。

闭环内动态误差是光栅检测点位置相对于指令位置的滞后,其随时间的变化趋势与指令速度随时间的变化趋势相反。闭环内动态误差为正值对应进给轴反向运动过程,负值对应进给轴正向运动过程。从图4可以看出,闭环内动态误差表现为瞬态和稳态两种形式。加减速段的闭环内动态误差随时间及指令速度的变化而变化,表现为瞬态形式。匀速段的闭环内动态误差不随时间变化,表现为稳态形式。

利用动态误差分离方法,对闭环

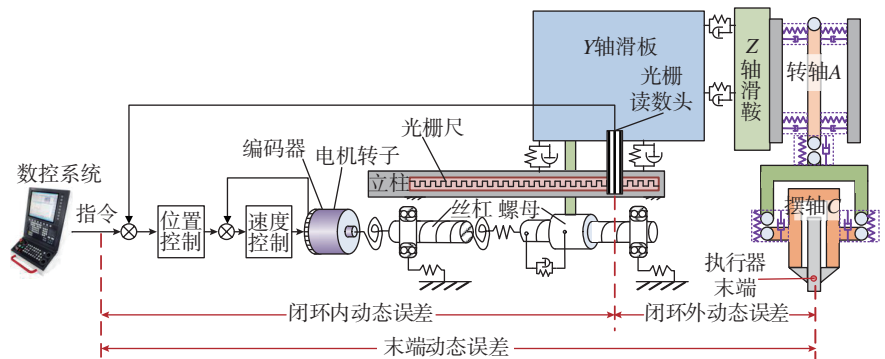


图2 光栅检测点远离末端的单轴动态误差构成

Fig.2 Dynamic error composition of the individual axis in which effector end is far from linear encoder detection point

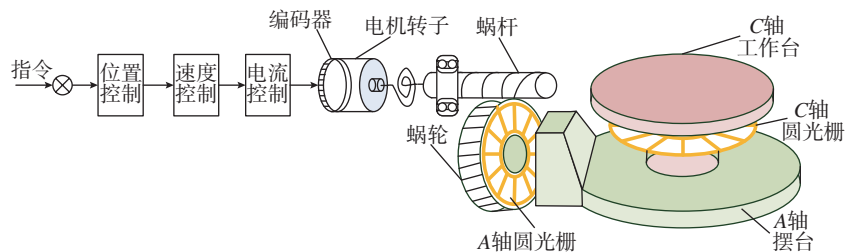


图3 光栅检测点靠近末端点的进给轴(C轴)示意图

Fig.3 Individual axis (C-axis) in which effector end is close to circle encoder detection point

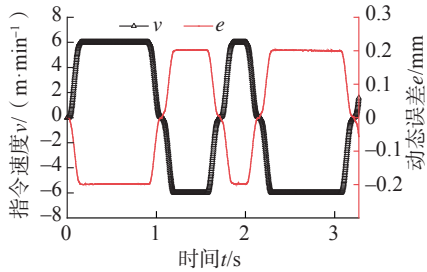


图4 指令速度与闭环内动态误差对比

Fig.4 Comparison between setpoints velocity and dynamic error inner closed-loop

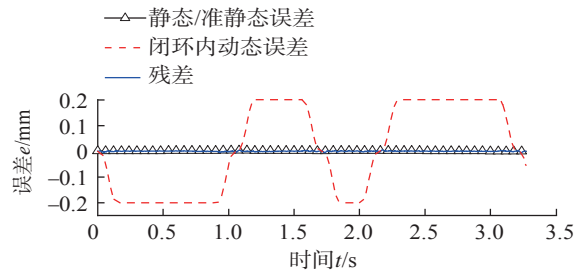
内动态误差中与指令速度、加速度和加加速度相关的分量进行分离,结果如式(1)所示,即

$$e_{in}(t) = 7.466 \times 10^{-5} + 2.484 \times 10^{-5} y(t) - 3.337 \times 10^{-2} v(t) - 1.998 \times 10^{-3} a(t) - 5.947 \times 10^{-5} j(t) + o(t) \quad (1)$$

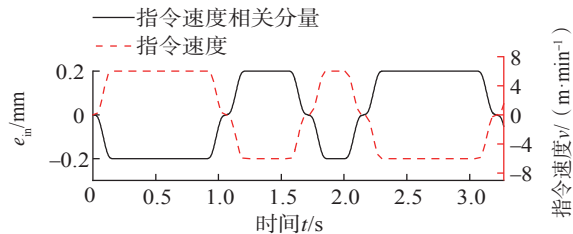
式中, e_{in} 为闭环内动态误差; y 为位置; v 为速度; a 为加速度; j 为加加速度; o 为残余小量。

图5(a)展示了测量结果中包含的由几何误差等静态/准静态因素产生的误差(式(1)中的第1、2项)、与指令速度/加速度/加加速度相关的动态误差(式(1)中的第3~5项)及残差。可以看出,动态误差远大于静态/准静态因素产生的误差及残差,表明测量得到的误差主要为动态误差,静态/准静态因素引起的误差占比很小,可以忽略。

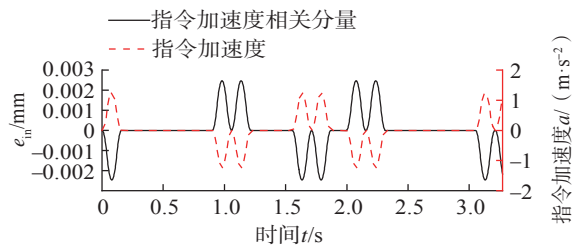
图5(b)展示了闭环内动态误差的指令速度相关分量与指令速度的关系;图5(c)展示了闭环内动态误差的指令加速度相关分量与指令加速度的关系;图5(d)展示了闭环内动态误差的指令加加速度相关分量与指令加加速度的关系。可以看出,闭环内动态误差在匀速段呈稳态形式,在加减速段呈瞬态形式。在匀速段,稳态形式动态误差主要与指令速度相关。在加减速段,瞬态形式动态误差与指令速度、加速度及加加速度均相关。指令速度是瞬态形式动态误差的主导因素,指令加速度和加加速度是次要因素,后两者对瞬态形式动态误差的贡献在量级上相近。



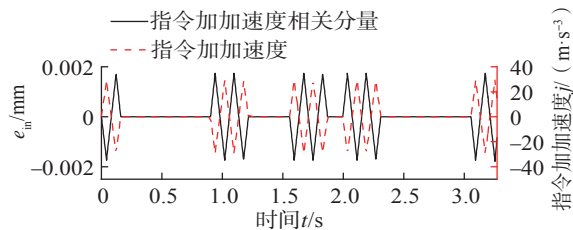
(a) 分离结果



(b) 指令速度相关分量



(c) 指令加速度相关分量



(d) 指令加加速度相关分量

图5 闭环内动态误差与指令速度、加速度和加加速度的相关分量

Fig.5 Correlation components of dynamic error inner closed-loop with setpoints velocity, acceleration and jerk

就本测试结果而言,匀速段的稳态形式动态误差大于加减速段的瞬态形式动态误差。随着对指令速度导致稳态形式动态误差控制能力的增强,或者指令加速度和加加速度的提高,指令加速度和加加速度引起的瞬态形式动态误差可能超过指令速度引起的稳态形式动态误差,成为闭环内动态误差的主要贡献因素。

2.2 闭环内动态误差的成因分析及技术现状

闭环内稳态形式动态误差对应

匀速过程,与指令速度相关,由伺服控制造成的相位滞后引起。

闭环内瞬态形式动态误差对应加减速过程,与指令速度、加速度及加加速度相关,其大小随时间变化。瞬态形式动态误差主要源于伺服进给系统对指令中高频分量的衰减。输入到伺服进给系统的指令包含不同频率成分的分量。随着指令速度、加速度及加加速度的提高,指令中的高频分量也往往增多。当指令频带宽度大于伺服进给系统带宽时,指令

中频率高出伺服带宽的分量被伺服进给系统衰减,无法准确响应和实现,造成瞬态形式动态误差。

“前馈控制器+滤波控制器”是减小稳态和瞬态形式动态误差的基本控制方法。前馈控制器主要用于减小相位滞后,消除稳态形式动态误差。零相差跟踪控制器是前馈控制器研究中的代表性成果,由美国加利福尼亚大学伯克利分校 Tomizuka^[20]提出。零相差跟踪控制器依赖于系统模型的准确性^[21],系统参数的变化和干扰会造成控制作用的失效。工程上多采用速度前馈控制器,避免对于模型准确性的依赖。

滤波控制器的主要作用是抑制限制伺服带宽提高的机械模态,提高伺服带宽,降低瞬态形式动态误差。在腔体、隔框类航空结构件加工中,当进给速度为40m/min、加速度为2g时,伺服带宽需要达到100Hz才能有效控制瞬态形式动态误差^[22-23]。对于滚珠丝杠进给系统,伺服带宽一般只能达到30~50Hz^[23-24]。因此,研究先进控制方法,提高伺服带宽,受到了世界各国机床研究团队的重视。当前,国内航空航天零件加工用机床的伺服带宽往往只有10~30Hz,还不能有效支撑零件的高速高效加工,相关研究工作对国内具有更加重要的理论和工程意义。

对于典型的滚珠丝杠进给系统,联轴器的扭转模态、丝杠的一阶轴向振动模态、丝杠的一阶和二阶扭转振动模态等都可能成为限制伺服带宽提高的因素。针对这些限制因素,美国佛罗里达大学科研团队采用模态滤波器,通过零极点对消方法补偿两个扭转振动模态^[25],将滚珠丝杠进给系统的伺服带宽提高到100Hz。加拿大滑铁卢大学科研团队采用自适应滑模控制器抑制滚珠丝杠进给系统一阶轴向振动模态^[26],采用陷波滤波器抑制一阶和二阶扭转振动模态^[27],结合摩擦补偿及主动阻尼,

将伺服带宽提高到200Hz以上,在进给速度为60m/min、加速度为1g的条件下,将闭环内动态误差控制到1.6 μ m。德国斯图加特大学科研团队在传统的P-PI级联控制框架上增加了工作台速度控制环^[28],将电机和工作台的速度差(丝杠振动)反馈给速度控制器,将位置环带宽提高了80%^[29]。美国俄勒冈大学 Sencer等^[30]提出了负载端反馈控制方法实现振动抑制及带宽提高。Dai等^[31]分析了跟随误差与前馈控制器、反馈控制器及参考轨迹的关系,提出了加加速度前馈控制策略。Wang等^[32]研究了模型预测控制方法对不同频率输入信号的跟随能力。

国内西安交通大学赵万华教授团队^[33]采用零相差与模态滤波综合控制策略,当进给速度为30m/min、加速度为1g时,将闭环内动态误差由传统PID控制策略下的16.486mm大幅降低到15.5 μ m。针对长传动链摆头主轴对高加速启停指令响应能力低、启停时间长的问题,提出模态滤波器与双T网络陷波滤波器综合控制策略,将伺服控制带宽由12Hz提高到110Hz^[34]。针对多轴数控机床中串联轴引入低阶模态造成跟随误差难以控制的问题,提出一种模态滤波器与陷波滤波器的综合控制策略^[35]。此外,该团队从非同位控制的角度分析了带宽受限的原因^[36]。数控机床进给系统在闭环控制下是典型的非同位控制系统。进给轴的位置反馈点与电机驱动点不在同一位置,其间的动力学特性引起非同相振动,造成失稳,限制带宽提高。采用峰值滤波器将非同相振动调整为同相振动,提高了速度环增益,消除了非同位控制对位置环的不利影响。

伴随着这些理论研究形成的技术成果,国际上先进的数控企业,如西门子、海德汉和发那科等,已经在数控系统及伺服驱动中形成了丰富的前馈与滤波功能模块,对高速下闭环

内动态误差的控制达到了较高水平。

国产数控系统或伺服驱动也已广泛配置了速度前馈等前馈控制器,有效降低了与指令速度相关的稳态形式动态误差。在实现了稳态形式动态误差较小的情况下,瞬态形式动态误差的控制已经变成突出问题,此时可进一步针对低频、中频及高频机械模态,选择模态滤波、陷波滤波及峰值滤波等控制器,来降低瞬态形式动态误差。国内高端数控机床制造企业在瞬态跟随误差控制方面也在持续追赶超越,不断丰富控制功能和模块。例如,五轴数控机床制造企业大连科德,除了具备基本的前馈与陷波滤波功能外,已经开发具备了通用二阶滤波器模块,可以实现模态滤波及峰值滤波等功能,有效控制了高速高加速下的闭环内动态误差。

闭环内瞬态形式动态误差与指令速度、加速度及加加速度相关,对指令速度、加速度和加加速度轨迹进行平滑,减少指令中的高频成分,降低指令频宽,是从指令侧控制瞬态形式动态误差的基本方法。该部分相关研究在下节叙述。

综上所述,闭环内动态误差成由于伺服控制造成的相位滞后和带宽限制。针对闭环内动态误差,国外的研究已经非常成熟,形成了以前馈控制器、陷波滤波器、模态滤波器及滑模控制器等为代表的控制策略,并已向商业应用。此外,为适应未来更高速加工需求,国外研究机构仍然不断探索进一步提高伺服带宽的先进控制策略,如工作台速度控制及负载端反馈控制等。

国内,稳态形式闭环内动态误差的控制问题已经解决。瞬态形式闭环内动态误差控制策略中,当前走向应用的主要为陷波滤波控制器。模态滤波器等控制策略仍需要进行工程化研究,面向未来更高速加工需求的先进控制策略研究也需继续加强。

3 闭环外动态误差的表现形式及技术现状

3.1 闭环外动态误差的表现形式及相关性分析

图6展示了测量得到闭环外动态误差随时间变化的曲线及其与指令速度的关系。可以看出,闭环外动态误差表现为瞬态、稳态和振动3种形式。在加减速段,闭环外动态误差随时间剧烈变化,表现为瞬态形式;在匀速段,闭环外动态误差保持稳定,表现为稳态形式;此外,在瞬态和稳态形式的曲线上还叠加着振动形式。闭环外动态误差为负值表示末端位置靠近光栅安装位置,闭环外机械结构被压缩,反之亦然。

利用动态误差分离方法对闭环外动态误差中与指令速度、加速度和加加速度相关的分量进行分离,结果如式(2)所示,即

$$e_{\text{out}}(t) = -4.673 \times 10^{-4} - 1.338 \times 10^{-5} y(t) - 1.752 \times 10^{-3} v(t) - 1.817 \times 10^{-2} a(t) + 9.700 \times 10^{-5} j(t) + o(t) \quad (2)$$

式中, e_{out} 为闭环外动态误差; y 为位置; v 为速度; a 为加速度; j 为加加速度; o 为残余小量。

图7(a)展示了测量结果中包含的由几何误差等静态/准静态因素产生的误差(式(2)中的第1、2项)、与指令速度/加速度/加加速度相关的动态误差(式(2)中的第3~5项)及残差。可以看出,动态误差远大于静态/准静态因素产生的误差,表明测量得到的误差主要为动态误差。

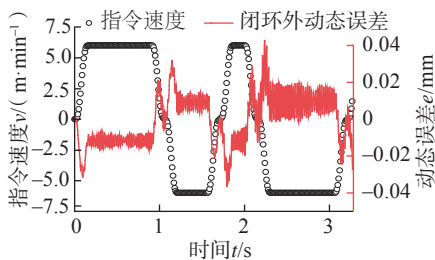


图6 指令速度与闭环外动态误差对比

Fig.6 Comparison between setpoints velocity and dynamic error outer closed-loop

差,静态/准静态因素引起的误差占比很小,可以忽略。残差中包含明显的振动,式(2)所示方法未分离出闭环外动态误差中包含的振动形式,将其遗留在残差中。

图7(b)展示了闭环外动态误差的指令速度相关分量与指令速度的关系;图7(c)展示了闭环外动态误差的指令加速度相关分量与指令加速度的关系;图7(d)展示了闭环外动态误差的指令加加速度相关分量与指令加加速度的关系。可以看出,瞬态形式动态误差明显大于稳态形式,是闭环外动态误差的主要贡

献量。瞬态形式的闭环外动态误差与指令速度、加速度和加加速度均相关。就本测量结果而言,指令加速度对瞬态形式动态误差的贡献最大,较指令速度和加加速度高1~2个数量级。

采用FFT方法对闭环外动态误差测量结果及指令加速度作频谱分析,如图8所示。可以看出,两者在低频段的频率成分重合,说明闭环外动态误差中的振动形式是由指令加速度变化产生的惯性力/力矩激励引起。闭环外动态误差测量结果频谱中,存在42Hz的振动频率。指令加速度频谱中不存在该频率,该频率

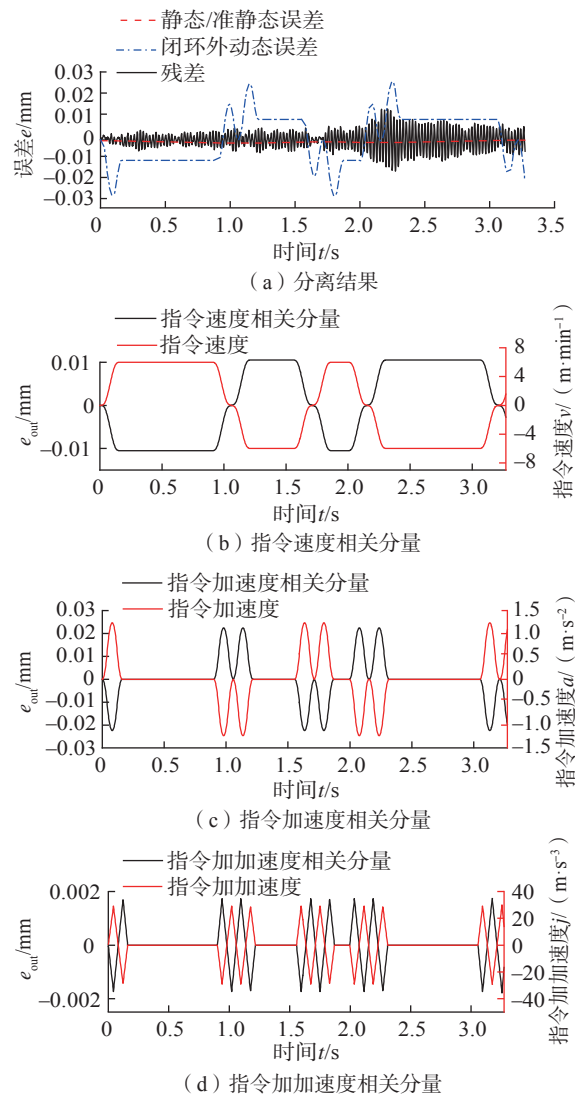


图7 闭环外动态误差与指令速度、加速度和加加速度的相关分量

Fig.7 Correlation components of dynamic error outer closed-loop with setpoints velocity, acceleration and jerk

的振动由其他激励源产生。

3.2 闭环外动态误差的成因分析及技术现状

3.2.1 闭环外动态误差的瞬态和稳态形式

在加减速段,闭环外动态误差表现为瞬态形式,是由于惯性力/力矩作用在闭环外机械结构上,产生的弹性变形所致。瞬态形式的闭环外动态误差与指令速度、加速度及加加速度直接相关,指令加速度是主导因素。

在匀速段,闭环外动态误差表现为稳态形式,与指令速度相关。当进入匀速段,加减速引起的惯性力/力矩撤销,闭环外机械结构的弹性变形趋向恢复。此时弹性恢复力与进给轴的驱动力和摩擦力平衡,导致闭环外机械结构仍然保持一定残留弹性变形量。

龙门及动柱结构机床易于产生弹性变形^[37]。在加减速过程中,这类机床进给轴的驱动力和惯性力不在一条线上(驱动力与构件重心存在偏置),导致进给轴产生惯性力矩,引起闭环外机械环节的弹性变形^[38]。这类弹性变形不仅会引起进给方向的动态误差,还会产生垂直于进给方向的动态误差,如图9所示。第4节所述测量方案可测得沿进给方向的动态误差 ΔY ,沿垂直方向的动态误差 ΔZ 未测量。

闭环外动态误差不受伺服的直接控制,需通过建立动力学模型、外加传感器及测量等手段,采用基于模

型的控制^[37]、末端位置估计^[39-40]及补偿^[41-42]等方法来减小这部分误差。意大利米兰理工大学 Parenti 等^[37]提出了基于模型的补偿方法,通过模型预测执行器末端的误差,并采用前馈方法进行补偿。西班牙 IK4 研究联盟工业生产与制造技术中心(IK4-IDEKO)的 Zatarain 等^[39]在执行器末端附件安装加速度传感器,通过状态空间观测器预测执行器末端位置,将预测位置作为位置反馈信号。德国莱布尼茨-汉诺威大学 Denkena 等^[40]设计了卡尔曼滤波器,接受外加激光测振仪测量的刀具振动及光栅尺反馈等数据,预测刀尖点的位置,将其值输出给位置反馈。德国斯图加特大学科研团队提出了末端动态误差预测模型^[43],通过安装在末端的光学传感器测量数据辨识模型参数。瑞士联邦理工学院科研团队采用 R-Test 测量了闭环外机械环节的动态误差^[41],将惯性力引起的弹性变形分为 inertial Cross-Talk 和 inertial In-Talk 两类,并基于对 Cross-Talk 误差的实际测量数据,对该误差进行离线补偿^[42]。西班牙巴斯克大学 Ansoategui 等^[44]建立了加加速度与末端动态误差之间的预测模型,通过对加加速度优化减小末端动态误差。

在上述理论研究的基础上,对闭环外动态误差进行测量和补偿逐步走向了工程应用,国际上一些先进的数控系统厂商陆续推出了一

些补偿功能。德国海德汉推出了加速度相关的刀尖点位置误差补偿功能(Compensation of acceleration-dependent position errors at the center point, CTC); 西门子推出了俯仰补偿(Nodding compensation)功能。但是这些功能均在 2D002 出口列表项,限制向欧盟外国家出口。

国内高校和企业也在积极开展相关研究和应用工作。西安交通大学赵万华教授团队^[45]建立了考虑惯性力的三轴龙门机床动力学模型,分析了加减速过程中的耦合合力对闭环外动态误差的影响。Lyu 等^[46]采用激光干涉仪测量末端动态误差,分析了月亮形轨迹加工中光栅检测点轨迹与末端轨迹的显著差异。大连科德研究了闭环外动态误差的测试与分离方法,为实施补偿策略奠定了基础。

闭环外动态误差源于惯性力/力矩作用下机械结构的弹性变形,除了对闭环外动态误差进行估计、测量及补偿外,研究机械结构偏置距离与惯性力矩及弹性变形之间的数学关系,分析偏置距离对弹性变形的影响规律,建立机床结构优化设计方法,也是降低闭环外动态误差可以采取的一个方案。

综上所述,国外在瞬态形式闭环外动态误差研究方面已经取得了一定的成果,其中补偿控制方法已经走向商业应用。国内在相关研究上处于起步阶段^[47],与国外相比约有 10 年的

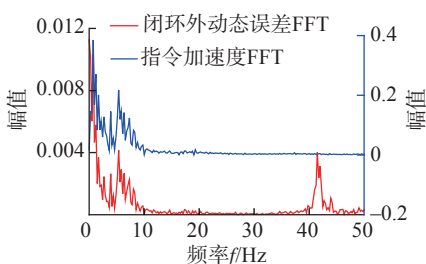


图8 指令加加速度与闭环外动态误差的频谱对比

Fig.8 Spectral comparison between setpoints jerk and dynamic error outer closed-loop

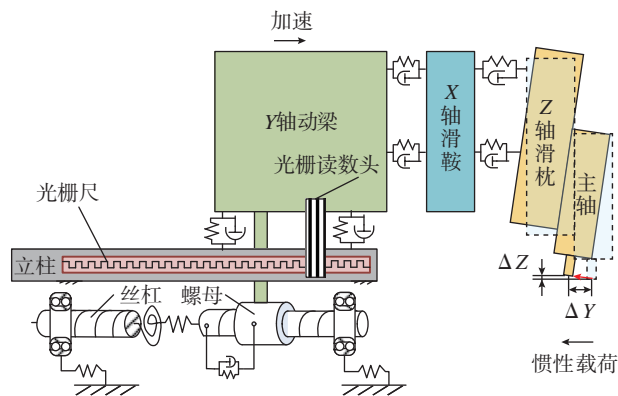


图9 闭环外机械结构弹性变形产生的动态误差示意图

Fig.9 Dynamic error caused by elastic deformation of mechanical structure outer closed-loop

差距,在应用上基本处于空白状态。

3.2.2 闭环外动态误差的振动形式

加速度变化造成惯性力/力矩的变化,是一种动力学激励源,可以激起机械振动。在加减速段,振动形式动态误差由惯性力/力矩激励激起闭环外机械结构模态引起。在匀速段,惯性力/力矩激励撤销,闭环外动态误差的振动形式为遗留在机械结构上的残留振动。

振动形式动态误差源于惯性力/力矩激起的机械结构振动。因此,消除指令中包含的激励频率(即消除惯性力/力矩激励源),避免机械结构中可被激起的机械模态,是解决该问题的两个基本思路。

在消除指令中包含的激励频率方面,参数曲线插补^[48-49]、连续小直线段刀具路径的全局^[50]或局部拐角^[51]光滑处理、加速度/加加速度限制和连续等加减速策略^[52-58]、指令整形和滤波^[59-62]等方法,均可以产生更为平滑的指令,有利于消除加减速过程中惯性力变化激起的机械振动。与此同时,平滑后指令的频宽也可减小,有利于实现闭环内的动态精度。目前,国际先进的数控系统,如FANUC 30i、SIEMENS 840D和HEIDENHAIN TNC640等均已具备B样条和NURBS曲线插补、圆角过渡和曲线拟合、运动参数限制、加加速度限制加速度策略和前瞻等功能。国内,如科德GNC61和华中848D等数控系统,也具有上述功能,实现对指令的平滑和激励成分的限制。

对指令加速度和加加速度轨迹进行平滑,减少指令中的高频成分,避免激励源,是当前国内外采用的主要方法,然而这些方法通过降低或限制进给速度、加速度及加加速度来消除激励源,牺牲了加工效率^[30]。面向机械环节,研究机械动态特性主动设计与调控方法,使机械模态避开指令激励频率,也是需要考虑的研究方向。

综上所述,国内外在指令平滑相

关研究中都开展了大量工作,形成了大量算法。国外,不少算法已经走向工程应用,形成了主动振动抑制等功能模块。国内,基于形成的算法成果,需进一步加强工程化研究。

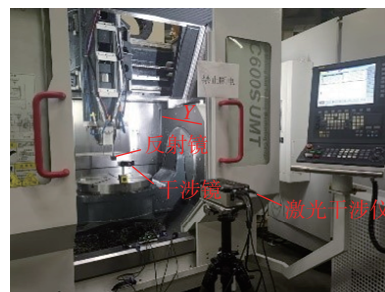
4 国产某五轴数控机床Y轴动态误差测量与分离实例

静态/准静态误差可以通过激光干涉仪、球杆仪及R-test等仪器直接检出。动态误差,长期以来由于缺少明确的定义和相应的检测仪器,一直没有有效的检测方法。为此,航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司宋智勇^[63]提出通过加工并检测S形试件来间接检测五轴机床动态误差的方法。目前,S形试件已得到行业的广泛认可和应用,并已纳入ISO10791—7标准^[64]。S形试件的加工误差反映了工艺系统的综合误差。目前,基于S形试件的检测结果,还不能分离各轴动态误差的大小。此外,在S形缘条加工中,目前仅规定了进给速度和主轴转速,并未规定加速度及加加速度等参数,也未严格限制加工时间。基于S形试件加工误差,还不能对各类形式动态误差进行具体评估。因此,本研究设计了单轴动态误差测量方法,呈现指令速度、加速度及加加速度输入下动态误差的表现形式。

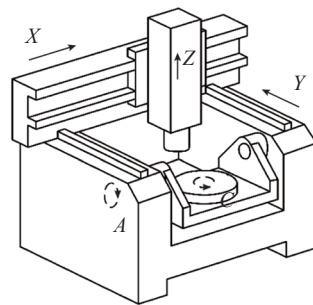
4.1 动态误差的测量方法

测量机床为科德KMC600S UMT五轴铣车立式复合加工中心,如图10(a)所示。该机床为龙门结构,Y、X和Z 3个直线轴驱动刀具,A和C两个旋转轴驱动工件,如图10(b)所示。该机床Y轴背负X和Z轴运动,机械传动环节多,光栅检测点远离执行器末端(刀具),是具有闭环内动态误差和闭环外动态误差的典型进给轴结构,因此选择该轴进行动态误差测量。

为充分显示出闭环内和闭环外动态误差,选用变幅值M序列激励



(a) 机床动态精度测量照片



(b) 测量机床运动结构

图10 测量机床照片及其运动结构
Fig.10 Measured machine tool and its kinematic structure

信号生成G代码,输入数控系统使Y轴作“正向加速—正向匀速—正向减速—反向加速—反向匀速—反向减速”的周期性强激励运动。在Y轴运动中,采集数控系统插补后输入到伺服进给系统的指令位移、光栅反馈位移和执行器末端位移。3个位移均沿Y轴进给方向。指令位移为数控系统插补输出的指令序列;光栅反馈位移由光栅尺测量;执行器末端位移由KEDE激光干涉仪测量,反光镜安装在主轴头上,可以测量执行器末端位移,如图10(a)所示。上述3个位移由科德GNC61数控系统同步采集,采样周期为2ms。

4.2 动态误差的分离方法

根据数控系统采集到的3个位移,可得末端动态误差 e_{end} ,并分离闭环内动态误差 e_{in} 及闭环外动态误差 e_{out} ,如式(3)所示。末端动态误差为末端位移与指令位移之差;闭环内动态误差为光栅反馈位移与指令位移之差;闭环外动态误差为末端位移与光栅反馈位移之差。

$$\begin{cases} e_{\text{end}}(t) = D_3(t) - D_1(t) \\ e_{\text{in}}(t) = D_2(t) - D_1(t) \\ e_{\text{out}}(t) = D_3(t) - D_2(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $D_1(t)$ 、 $D_2(t)$ 和 $D_3(t)$ 分别为测得的节点 1、2 和 3 的位移; t 为时间。

运动中, 提取连续的两个运动周期, 其指令位移、速度、加速度及加加速度随时间的变化曲线如图 11 所示(s 为指令位移, v 为指令速度, a 为指令加速度, j 为指令加加速度)。测量采用的指令速度、加速度及加加速度参数依据国内现场实际情况而设置。测量采用的速度变化范围为 $-6 \sim 6 \text{ m/min}$, 略高于 S 形试件 S 缘条加工规定的最高工进进给速度 5 m/min 。此外, 加速度和加加速度

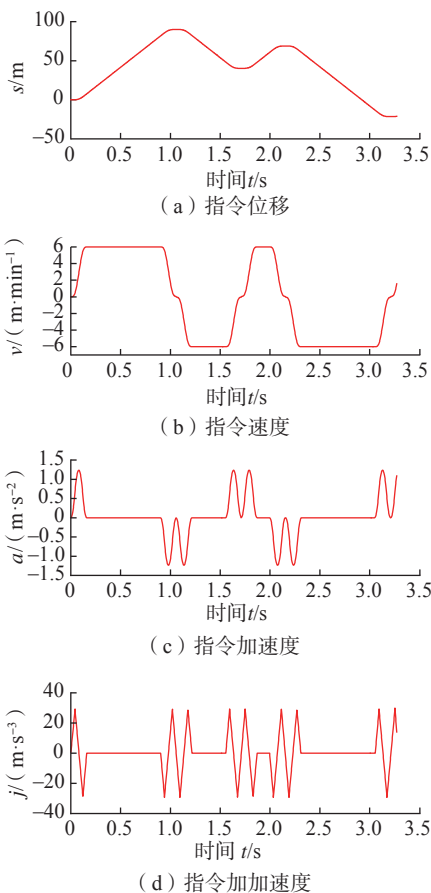


图 11 Y 轴激励运动中指令位移、速度、加速度和加加速度随时间的变化

Fig.11 Change of setpoints displacement, velocity, acceleration and jerk with time in Y-axis excitation motion

变化范围分别为 $-1.23 \sim 1.23 \text{ m/s}^2$ 和 $-30 \sim 30 \text{ m/s}^3$, 与当前航空企业用国产机床参数设置保持量级相同。提取这两个运动周期中的 3 个节点位移, 根据式 (3) 可计算末端动态误差, 分离闭环内和闭环外动态误差。

李学伟^[65]建立了跟随误差与进给速度、加速度和加加速度的关系, 如式 (4) 所示, 即

$$e(t) = k_0 + k_1 y(t) + k_2 v(t) + k_3 a(t) + k_4 j(t) + o(t) \quad (4)$$

式中, y 、 v 、 a 、 j 分别为指令位移、速度、加速度和加加速度; t 为时间; k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为待定系数; o 为残差。

根据式 (4), 采用多元线性回归分析法, 辨识 k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 这些待定系数, 可以分离出动态误差中分别与指令速度、加速度和加加速度相关的分量。 $k_2 v(t)$ 、 $k_3 a(t)$ 和 $k_4 j(t)$ 分别表示与指令速度、加速度和加加速度相关的分量; $k_0 + k_1 y(t)$ 与动态误差无关, 是由静态/准静态因素产生的误差。

4.3 环内动态误差和环外动态误差分离结果

图 12 所示为末端动态误差及其根据式 (3) 分离得到的闭环内动态误差和闭环外动态误差分量。可以看出, 末端动态误差是闭环内动态误差和闭环外动态误差的叠加, 表现为大小随时间变化并伴随振动的形式。末端动态误差随时间的变化趋势与闭环内动态误差随时间的变化趋势一致, 表明闭环内动态误差是末端动态误差的主要来源。闭环外动态误差表现出更明显的振动形式, 是使末端动态误差呈

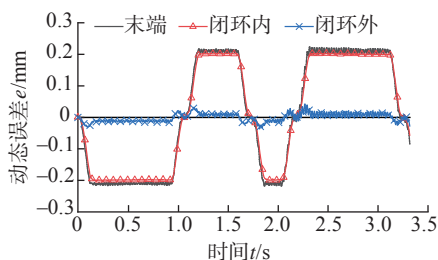


图 12 末端、闭环内及闭环外动态误差
Fig.12 Dynamic error at effector end, inner and outer closed-loop

现振动形式的主要贡献因素。

就本测量结果而言, 闭环内动态误差数值明显大于闭环外动态误差, 是影响末端动态误差大小的主要因素。但是, 随着闭环控制效果的加强, 闭环内动态误差可进一步减小, 此时闭环外动态误差会变得显著, 成为影响末端动态误差不可忽略的因素。

闭环内动态误差的分离结果如式 (1) 和图 5 所示, 闭环外动态误差的分离结果如式 (2) 和图 7 所示。

5 结论

随着“中国制造 2025”国家战略及“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项等国家项目的实施, 我国在高档数控机床研制方面取得了许多重大进展, 解决了高速、高精、多轴联动等高档数控机床“从无到有”的问题。如何实现“从有到强”, 提升高档数控机床的性能, 已成为亟需解决的主要问题。当前, 国产机床在高速进给下的动态精度仍然与国际先进机床有一定差距, 是需要提升的主要性能之一。国际工业已经进入 4.0 时代, 加强动态精度研究, 补足 2.0 及 3.0 时代的短板, 是我国追赶超越国际先进水平面临的紧迫任务。

本文将数控机床动态误差定义为进给轴在进给运动过程中执行器末端的实际位置与指令位置之差(末端动态误差)。根据光栅安装位置, 将末端动态误差分解为闭环内动态误差(跟随误差)和闭环外动态误差两部分。通过对科德 KMC600S UMT 五轴铣车立式复合加工中心 Y 轴的末端、闭环内和闭环外动态误差的测量和分离, 呈现了动态误差的表现形式及与指令速度、加速度和加加速度的相关性。在此基础上, 针对不同表现形式动态误差, 分析了动态误差的成因, 综述了国内外相关研究工作, 总结了动态误差技术现状。

末端动态误差为闭环内动态误差与闭环外动态误差的叠加。高的末端

动态精度靠高的闭环内动态精度和闭环外动态精度保证。要实现高的末端动态精度,需要聚焦以下研究方向。

(1) 针对闭环内动态误差。

a. 瞬态形式动态误差对应加减速过程,与指令速度、加速度及加加速度相关,其成因是高速高加速下指令频率宽大于伺服进给系统带宽。为减小瞬态形式动态误差,面向数控系统,研究以指令频率为约束的指令平滑方法;面向伺服驱动,研究提升伺服带宽的先进控制策略;面向机械结构,针对机械动态特性对伺服性能提升的限制因素,研究传动部件选型及装配工艺对机械动态特性的影响规律,研究传动部件设计与装配工艺规范。

b. 稳态形式动态误差对应匀速过程,与指令速度相关,成因是伺服进给系统对输入指令的滞后。稳态形式动态误差的研究国际上已经成熟,国内数控机床也已具有速度前馈等功能模块,可以较好地消除稳态形式动态误差。

(2) 针对闭环外动态误差。

a. 加减速过程的瞬态形式动态误差明显大于匀速过程的稳态形式动态误差,是“油水”最大、需要优先控制的误差。为减小瞬态形式动态误差,面向数控系统,研究动态误差与指令加速度的关系模型,建立动态误差的补偿方法;面向伺服驱动,研究末端动态误差的预测及控制方法;面向机械结构,研究进给轴驱动位置与重心之间偏置距离对机械弹性变形量的影响规律,以及结构件与结合部刚度对弹性变形量的影响规律,建立以加减速过程中惯性力矩最优及机床刚度最优为约束的机械结构优化方法。

b. 振动形式动态误差在加减速过程和匀速过程都存在,与指令加加速度相关,成因在于惯性力/力矩激励激起的机械结构振动与振动残留。为消除机械结构振动引起的动态误差,面向数控系统,以减少指令加加速

度高频成分,减少惯性力/力矩激励源为目标,研究G代码平滑、指令平滑及指令滤波等方法;面向机械结构,以避免存在指令激励频率模态为目标,研究机械结构模态优化方法。

动态误差的研究涉及数控系统、伺服驱动及机械结构3个环节。国内,围绕数控系统和伺服驱动已经形成了一些算法和功能模块,但是围绕机械结构,与动态精度相关的研究仍然较少。因此,以指令速度、加速度和加加速度为约束,考虑伺服控制能力,优化机械模态,更值得国内研究机构 and 机床企业重视。

高速高精是加工领域的永恒目标,高速下的高动态精度是这一目标的直接体现。高速不仅意味着具有高的指令速度,还要有高的指令加速度和加加速度。高速可以体现在编程进给率上,易被熟知和控制。高加速和高加加速度往往不被关注,但又恰恰是影响高速下动态精度的决定性因素。

单轴动态误差与指令速度、加速度及加加速度相关。零件的刀具路径不同,插补后各轴的指令速度、加速度及加加速度也不同。因此,数控机床各轴呈现的动态误差及联动轨迹误差与零件的刀具路径具有相关性。以充分发挥机床动态误差控制能力为目标,优化刀具路径,从具体零件刀具路径优化入手将加工工艺与机床动态误差结合,是值得关注的研究方向。

参考文献

- [1] 吕盾,刘青,刘沛,等.五轴机床加工零件轮廓误差预测方法[J].西安交通大学学报,2020,54(2):9-15.
- [2] 吕盾,罗世有,王大伟,等.考虑几何误差和跟随误差的五轴联动轨迹误差预测方法[J].西安交通大学学报,2021,55(10):38-49.
- [3] LÜ Dun, LIU Qing, LIU Pei, et al. Contour error prediction method of part for five-axis machining[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(2): 9-15.
- [4] 吕盾,刘青,刘沛,等.考虑几何误差和跟随误差的五轴联动轨迹误差预测方法[J].西安交通大学学报,2021,55(10):38-49.
- [5] LÜ Dun, LUO Shiyong, WANG Dawei, et al. A trajectory error prediction method considering geometric errors and tracking errors for five-axis machine tools[J]. Journal of Xi'an

Jiaotong University, 2021, 55(10): 38-49.

[3] SLAMANI M, MAYER R, BALAZINSKI M, et al. Dynamic and geometric error assessment of an XYZ axis subset on five-axis high-speed machine tools using programmed end point constraint measurements[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(9-12): 1063-1073.

[4] SCHMITZ T L, ZIEGERT J C, CANNING J S, et al. Case study: A comparison of error sources in high-speed milling[J]. Precision Engineering, 2008, 32(2): 126-133.

[5] HEISEL U, FEINAUER A. Dynamic influence on workpiece quality in high speed milling[J]. CIRP Annals, 1999, 48(1): 321-324.

[6] 陈虎.数控机床五轴技术的选择[J].金属加工(冷加工),2017(5):VIII,1-4.

CHEN Hu. Selection of five-axis technology for CNC machine tools[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2017(5): VIII, 1-4.

[7] 赵万华,张星,吕盾,等.国产数控机床的技术现状与对策[J].航空制造技术,2016,59(9):16-22.

ZHAO Wanhua, ZHANG Xing, LÜ Dun, et al. Technical status and strategies for domestic CNC machine tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(9): 16-22.

[8] 吕盾,宋彦宏,刘艺柱,等.速度、加速度及加加速度对S形线条加工时间的影响[J/OL].航空制造技术,[2021-06-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4387.V.20210611.1452.015.html>.

LÜ Dun, SONG Yanhong, LIU Yizhu, et al. Influence of feed velocity, acceleration and acceleration establishment time on processing time of S-shaped fillet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, [2021-06-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4387.V.20210611.1452.015.html>.

[9] 中华人民共和国科学技术部.国家科技重大专项科技报告:五轴联动数控加工中心技术规范研究和制定[R].北京:中华人民共和国科学技术部,2019.

Ministry of Science and Technology of People's Republic of China. Technical report of national science and technology major project: Investigation and establishment on technical standards for five-axis machine tools[R]. Beijing: Ministry of Science and Technology of People's Republic of China, 2019.

[10] 赵万华,张俊,刘辉,等.数控机床精度评价新方法[J].中国工程科学,2013,15(1):93-98.

ZHAO Wanhua, ZHANG Jun, LIU Hui, et al. New evaluation method on the precision of NC machine tools[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(1): 93-98.

[11] LYU D, LIU Q, LIU H, et al. Dynamic error of CNC machine tools: A state-

of-the-art review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5-6): 1869-1891.

[12] HUANG X Y, ZHAO F, MEI X S, et al. A novel triple-stage friction compensation for a feed system based on electromechanical characteristics[J]. Precision Engineering, 2019, 56: 113-122.

[13] YANG X, LU D, ZHANG J, et al. Analysis on steady-state vibration induced by backlash in machine tool rotary table[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(22): 4163-4171.

[14] YANG X J, LU D, MA C F, et al. Analysis on the multi-dimensional spectrum of the thrust force for the linear motor feed drive system in machine tools[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 68-79.

[15] LIANG T, LU D, YANG X J, et al. Feed fluctuation of ball screw feed systems and its effects on part surface quality[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 1-9.

[16] YANG X J, LU D, ZHANG J, et al. Investigation on the displacement fluctuation of the linear motor feed system considering the linear encoder vibration[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 98: 33-40.

[17] MUTILBA U, GOMEZ-ACEDO E, KORTABERRIA G, et al. Traceability of on-machine tool measurement: A review[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1605.

[18] SCHMITZ T, ZIEGERT J. Examination of surface location error due to phasing of cutter vibrations[J]. Precision Engineering, 1999, 23(1): 51-62.

[19] TAJIMA S, SENCER B. Global tool-path smoothing for CNC machine tools with uninterrupted acceleration[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 121: 81-95.

[20] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 109(1): 65-68.

[21] RAHAMAN M, SEETHALER R, YELLOWLEY I. A new approach to contour error control in high speed machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88: 42-50.

[22] SMITH D A. Wide bandwidth control of high-speed milling machine feed drives[D]. Gainesville: University of Florida, 1999.

[23] PRITSCHOW G. On the influence of the velocity gain factor on the path deviation[J]. CIRP Annals, 1996, 45(1): 367-371.

[24] ALTINTAS Y, VERL A, BRECHER C, et al. Machine tool feed drives[J]. CIRP Annals, 2011, 60(2): 779-796.

[25] CHEN Y C, TLUSTY J. Effect of

low-friction guideways and lead-screw flexibility on dynamics of high-speed machines[J]. CIRP Annals, 1995, 44(1): 353-356.

[26] KAMALZADEH A, ERKORKMAZ K. Compensation of axial vibrations in ball screw drives[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 373-378.

[27] ERKORKMAZ K, KAMALZADEH A. High bandwidth control of ball screw drives[J]. CIRP Annals, 2006, 55(1): 393-398.

[28] SUN Z, PRITSCHOW G, LECHLER A. Enhancement of feed drive dynamics using additional table speed feedback[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 357-360.

[29] SUN Z, ZAHN P, VERL A, et al. A new control principle to increase the bandwidth of feed drives with large inertia ratio[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5-8): 1747-1752.

[30] SENCER B, DUMANLI A. Optimal control of flexible drives with load side feedback[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 357-360.

[31] DAI L Y, LI X, ZHU Y, et al. The generation mechanism of tracking error during acceleration or deceleration phase in ultraprecision motion systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7109-7119.

[32] WANG Y Z, GENG Y Q, YAN Y D, et al. Robust model predictive control of a micro machine tool for tracking a periodic force signal[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2020, 41(6): 2037-2047.

[33] 吕盾, 李润泽, 刘辉, 等. 数控机床高速高加速进给下的跟随误差控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 25-31.

LÜ Dun, LI RUNZE, LIU HUI, et al. A control strategy of tracking errors for numerical control machine tools at high speed and acceleration feeding[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 25-31.

[34] 吕盾, 张天宇, 郑贝贝, 等. 长传动链摆头主轴高加速度启停控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(23): 210-215.

LÜ Dun, ZHANG Tianyu, ZHENG Beibei, et al. Control strategy of long-chain tilting head spindle for high-acceleration starts and stops[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(23): 210-215.

[35] 吕盾, 刘硕, 赵艳超, 等. 具有串联轴伺服进给系统的跟随误差控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 34-44.

LÜ Dun, LIU Shuo, ZHAO Yanchao, et al. Tracking error control strategy for servo feed system connected with series axis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 34-44.

[36] LIU H, ZHANG J, ZHAO W H. An intelligent non-collocated control strategy for ball-screw feed drives with dynamic variations[J]. Engineering, 2017, 3(5): 641-647.

[37] PARENTI P, ALBERTELLI P, CAU N, et al. A mechatronic study on a model-

based compensation of inertial vibration in high speed machine tool[J]. Journal of Machine Engineering, 2011, 11(4): 91-104.

[38] DONG C S, ZHANG C, WANG B, et al. Prediction and compensation of dynamic errors for coordinate measuring machines[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(3): 509-514.

[39] ZATARAIN M, RUIZ DE ARGANDOÑA I, ILLARRAMENDI A, et al. New control techniques based on state space observers for improving the precision and dynamic behaviour of machine tools[J]. CIRP Annals, 2005, 54(1): 393-396.

[40] DENKENA B, OVERMEYER L, LITWINSKI K M, et al. Compensation of geometrical deviations via model based-observers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(5-8): 989-998.

[41] THOMA S M, HAAS T, NGUYEN H, et al. In-and cross-talk evaluation of different machine concepts[C]//Proceedings of 11th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, Coordinate Measuring Machine and Machine Tool Performance. Huddersfield, 2015: 160-169.

[42] STEINLIN M, WEIKERT S, WEGENER K. Open loop inertial cross-talk compensation based on measurement data[C]//Proceedings of 25th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering. Atlanta: American Society for Precision Engineering, 2010: 101-104.

[43] KECK A, SAWODNY O, GRONLE M, et al. Model-based compensation of dynamic errors in measuring machines and machine tools[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(5): 2252-2262.

[44] ANSOATEGUI I, CAMPA F J. Mechatronic model based jerk optimization in servodrives with compliant load[C]//Proceedings of the 7th European Conference on Mechanism Science. Berlin: Springer International Publishing, 2018.

[45] WANG L, LIU H T, YANG L, et al. The effect of axis coupling on machine tool dynamics determined by tool deviation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88: 71-81.

[46] LYU D, LIU Q, LUO S Y, et al. The influence of dynamic error outside servo-loop on the trajectory error[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(5-6): 1517-1525.

[47] 李杰, 谢福贵, 刘辛军, 等. 五轴数控机床空间定位精度改善方法研究现状[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 113-128.

LI Jie, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. Analysis on the research status of volumetric

positioning accuracy improvement methods for five-axis NC machine tools[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(7): 113–128.

[48] CHENG M Y, TSAI M C, KUO J C. Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(7): 801–813.

[49] LAI J Y, LIN K Y, TSENG S J, et al. On the development of a parametric interpolator with confined chord error, feedrate, acceleration and jerk[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 37(1–2): 104–121.

[50] LIN M T, LEE M C, LEE J C, et al. A look-ahead interpolator with curve fitting algorithm for five-axis tool path[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Piscataway: IEEE, 2016: 189–194.

[51] SHI J, BI Q Z, ZHU L M, et al. Corner rounding of linear five-axis tool path by dual PH curves blending[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 88: 223–236.

[52] FENG J C, LI Y H, WANG Y H, et al. Design of a real-time adaptive NURBS interpolator with axis acceleration limit[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 48(1–4): 227–241.

[53] QIAO Z F, WANG H H, LIU Z Z, et al. Nanoscale trajectory planning with flexible Acc/Dec and look-ahead method[J].

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5–8): 1377–1387.

[54] ZHAO H, ZHU L M, DING H. A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 65: 88–98.

[55] LIU M, HUANG Y, YIN L, et al. Development and implementation of a NURBS interpolator with smooth feedrate scheduling for CNC machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 87: 1–15.

[56] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design. Part I: Jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(9): 1323–1345.

[57] NAM S H, YANG M Y. A study on a generalized parametric interpolator with real-time jerk-limited acceleration[J]. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(1): 27–36.

[58] WANG Y S, YANG D S, GAI R L, et al. Design of trigonometric velocity scheduling algorithm based on pre-interpolation and look-ahead interpolation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 96: 94–105.

[59] LIU X B, AHMAD F, YAMAZAKI K, et al. Adaptive interpolation scheme for NURBS curves with the integration of machining dynamics[J]. *International Journal of Machine*

Tools and Manufacture, 2005, 45(4–5): 433–444.

[60] SINGER N C, SEERING W P. Preshaping command inputs to reduce system vibration[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1990, 112(1): 76–82.

[61] ALTINTAS Y, KHOSH DARREGI M R. Contour error control of CNC machine tools with vibration avoidance[J]. *CIRP Annals*, 2012, 61(1): 335–338.

[62] JONES S D, ULSOY A G. An approach to control input shaping with application to coordinate measuring machines[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1999, 121(2): 242–247.

[63] 宋智勇. 基于直纹曲面试件的五轴机床精度检验方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.

SONG Zhiyong. Research on accuracy inspection method of five axis machine tool based on ruled surface test pieces[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

[64] International Organization for Standardization. Test conditions for machining centres—Part 7: Accuracy of finished test piece: ISO/DIS 10791–7:2018(E)[S]. Genève: ISO, 2018.

[65] 李学伟. 高速数控机床加工轨迹误差预测及补偿方法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.

LI Xuewei. Research on prediction and compensation method of trajectory error of high speed CNC machine tools[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013.

Technical Status and Countermeasures of Dynamic Accuracy of Domestic CNC Machine Tools

LÜ Dun¹, ZHANG Jiahui¹, WANG Dawei², CHENG Qunlin³, ZHAO Wanhua¹, LU Bingheng¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;

2. KEDE Numerical Control Co., Ltd., Dalian 116600, China;

3. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

[ABSTRACT] High-end CNC machine tools are key equipment supporting machining of the parts in aviation, aerospace and energy engineering fields. At present, China has been able to design and manufacture various types of high-end machine tools, but there are still performance gaps compared with foreign advanced products. A major gap is the dynamic error at high speed. Dynamic error is defined as the deviation from the effector end position to the setpoints position, which is further divided into the dynamic error inner servo-loop and dynamic error outer servo-loop. By measuring and separating dynamic error of a domestic machine tool, the forms of the two components of the dynamic error can be presented. On this basis, special analysis on the causes of all kinds of the forms of the dynamic errors are conducted. In addition, the critical technologies of dynamic error at home and abroad are summarized. Finally, the research directions that needs focus in China around dynamic error are proposed.

Keywords: CNC machine tools; Dynamic error; Multi-axis machine tools; High-speed machine tools; High speed and high precision machining

(责编 逸飞)