

高速高精度数控系统

若干控制技术的原理分析和应用进展*

Control Technology Principle of High-Speed and High-Accuracy NC System and Application Progress

南京航空航天大学机电学院 游有鹏 张礼兵 何 均



游有鹏

南京航空航天大学机电学院教授, 博士生导师, 机械电子研究所副所长。主要从事数控技术、微操作机器人、机电一体化控制与应用等教学与科研工作, 先后承担国家自然科学基金和国防预研 4 项, 主持省部级基金及攻关 6 项, 获省、部科技进步二等奖 1 次、三等奖 2 次, 发表论文 50 余篇, 是“机床数控技术”国家精品课程主持人。

为满足现代航空、汽车以及模具制造业等对零件形状、加工精度、表面质量和加工效率等不断提高的要求, 高速高精度数控加工已成为主流切削加工方式。相应地、高速高精度

高速高精度数控系统的研究与开发, 必须以现代制造业的发展需求为导向, 综合应用机械运动学、动力学、信号检测与处理、现代机电控制等理论以及当代微电子技术的新成果、新手段, 不断丰富和拓展现代数控技术的原理与设计方法, 提高研究与开发水平, 促进我国高性能数控系统的自主创新能力。

数控机床也得到日益重视。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》把“高档数控机床与基础制造装备重大专项”作为 16 个国家科技重大专项之一, 明确提出了发展我国高档数控机床的目标。高档数控机床的发展与应用对数控系统提出了更高要求, 其中高速高精度运动控制成为现代数控系统的关键技术, 已得到国内外普遍关注, 并从理论方法到实际应用进行了大量的研究和实践, 有效推动了高档数控机床的技术进步。

加减速技术

数控加工的目标是实现高速度、高精度和高效率加工。如何保证在机床运动平稳的前提下, 实现以过渡过程时间最短为目标的最优加减速控制规律, 使机床具有满足高速加工

要求的加减速特性, 是加减速研究的关键问题。加减速控制方案通常有前加减速控制和后加减速控制 2 种: 前加减速控制(见图 1)一般位于插补之前、插补预处理之后, 加减速控制的对象是指令进给速度; 后加减速控制(见图 2)通常在插补器之后、伺服控制器之前, 控制各运动轴的进给速度等。后加减速控制无需计算减速点, 算法相对简单, 但如果每个运动轴的伺服增益不同, 容易造成较大的轨迹轮廓误差, 影响运动精度。因此, 目前主要应用前加减速控制技术。

加减速控制方法可以归纳为传统加减速法和柔性加减速法: 传统加减速法有梯形加减速法和指数加减速法等方法; 柔性加减速法有三角函数加减速法、S 曲线加减速法和多项式加减速法等。传统的梯形和指数加减速由于存在加速度突变而

* 国家自然科学基金(50975144)资助项目。

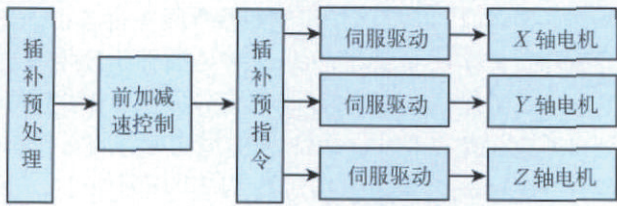


图1 前加减速控制模型

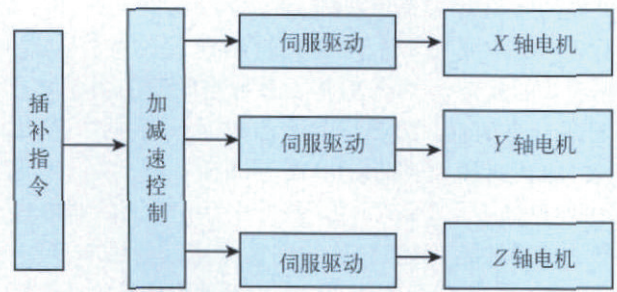


图2 后加减速控制模型

影响运动平稳性,柔性加减速由于加速度连续,在高速加工中倍受关注。

1 梯形加减速控制方法

梯形加减速控制的模型简单,容易实现,机床响应较快,效率比较高;但也存在明显的不足:一是不能和伺服电机特性进行很好的匹配,使电机特性难以充分发挥;二是在加减速阶段的起点、终点处,加速度存在跳变,这必将对机床运动产生冲击,影响机床运动的平稳性和轨迹精度。为此,部分系统通过滑动平均滤波器来解决加速度的跳变问题。这种加减速控制方法多用于启停、进退刀等辅助运动中,也可用于经济型数控系统,但不宜用于高速高精度数控系统。

2 S曲线加减速控制方法

S曲线加减速控制方法^[1]是指在加减速时,使其加速度的导数(加加速度)为常数,通过对加加速度控制来限制对机床的冲击和振动,并通过加速度和加加速度2个物理量的参数设定或编程设定来实现柔性加减速控制,以适应机床不同的工况。一个完整的S曲线加减速过程由7个阶段组成:加加速段、匀加速段、减加速段、匀减速段、加减速段、匀减速段和减减速段,如图3所示。在实际加工过程中,S曲线加减速未必包含上述完整的7个阶段,这随系统设定

的最大速度、最大加速度、加加速度、起点和终点的速度以及实际加工路径的长短而异。S曲线加减速控制的特点是加减速阶段的加速度分段连续线性变化,但是在加减速阶段的起点、终点处加加速度有突变,可以通过限制加加速度大小来减小对机床冲击。因此,适用于高速高精度数控系统,如德国的PA8000、华中“世纪星”系列和大连光洋GTP8000E系列高档数控系统等均具有S曲线加减速功能。

3 多项式加减速控制方法

为进一步限制和改善S曲线柔性加减速控制方法中存在的加加速度不连续可能引起的机床运动冲击和振动,可以通过构造多项式加减速控制曲线使加加速度连续,并随时间满足分段线性关系,或是时间的二次或三次多项式关系。因此,此方法得到的位移至少是关于时间的四次多项式,甚至是更高次的多项式。

大连理工大学赵国勇等提出的四次多项式柔性加减速控制法^[2],可始终保证在高速运动过程中速度、加速度和加加速度曲线连续,避免了在高速运动过程中对机床产生冲击和振动(见图4)。该柔性加减速控制法比S曲线加减速控制方法具有更好的柔性,因此理论上更适用于高速高

精度数控系统,但也大大增加了速度规划运算的复杂性,进而影响了算法实现的实时性。上海交通大学则提出了基于正弦/余弦曲线的加减速控制,该方法可以方便地保证其各阶导数(即加速度、加加速度等)的连续性,有利于改善运动平稳性,但加速度、加加速度等参数的调整不太方便。

连续短线段加工技术

复杂型面的数控加工普遍采用CAM编程,其中加工刀轨被粗插补生成大量的短线段,如果采用常规的每线段升降速,势必使机床运动速度的频繁启停,导致加工效率低下、表面加工质量差。因此,连续短线段加工技术已成为高性能数控系统中必须解决的实际问题。目前,短线段连续加工的方法主要有直接过渡法、曲线过渡法和曲线拟合法,并与前瞻速度规划相结合。

直接过渡法^[3-4]根据系统的最大速度、最大加速度、加工线段的长度、数控系统的插补周期和相邻两线段之间的夹角等约束条件来确定最佳的转接速度。直接过渡法存在着自身的不足:一是在转接点处精度控

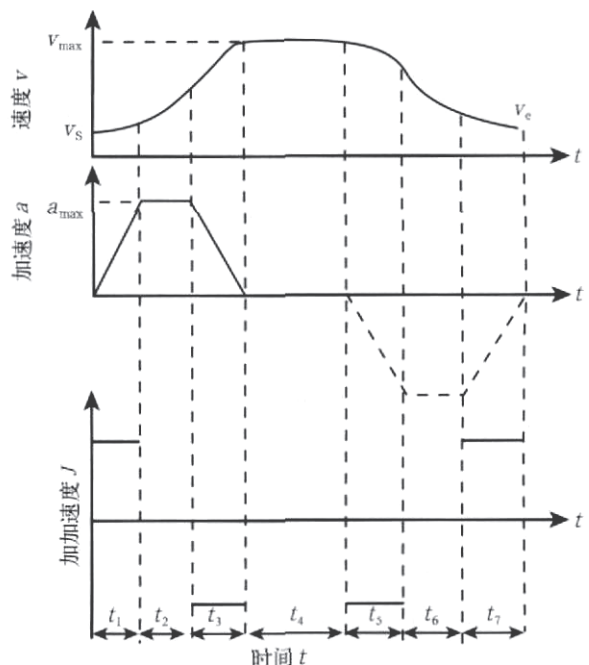


图3 S曲线加减速控制方法

制比较困难,为了保证精度,只能采取保守控制,所以转接速度较低;二是转换点确定困难,速度波动难以预测,不利于对连续短线段进行柔性加减速加工。但是,直接过渡法计算简单,前瞻目的明确,易于工程实现,因此目前应用较为广泛。

针对直接过渡法在转接速度和转接平稳性方面存在的不足,提出了误差控制下的曲线过渡法,主要有圆弧过渡^[5]和参数样条过渡^[6]两种。与直接转接法相比,它们均能提升转接速度,提高加工效率,并改善运动的平稳性。相比之下,圆弧过渡算法简单、实现简便,但转接精度稍差;而参数样条过渡可通过控制参数样条的仿射不变量以减小曲线过渡误差,但算法稍复杂。

曲线拟合法通过在一定误差范围内用样条曲线拟合来还原原来的轮廓信息,将连续的短线段拟合成光滑的曲线,进而利用曲线直接插补技术实现连续加工。拟合的线型有多种,如NURBS拟合^[7]和五次参数样条曲线^[8]等。该方法与前瞻结合便于实现平滑的速度控制,但在拟合过程中样条曲线节点信息的计算复杂,不利于在线实现,多采用离线拟合。

为实现连续短线段加工的升降速控制,无论采用何种转接方法,在确定转接点的速度限制后,还必须应用轨迹前瞻技术进行速度规划。前瞻的基本思想是在实时插补的同时

向前预插补一段距离,判断此距离内是否存在需提前减速的路径段,若存在在减速段且该段的长度小于其所理论减速距离要求时,重新自适应前瞻确定减速点的实际位置;当数控系统实时插补到该减速点时,将自动执行减速,以保证各转接点处的运动速度都能满足转接速度限制。由于加工轨迹的任意性、加减速规律的复杂性,前瞻算法的计算量往往比较大。研究轨迹通用、计算高效、加减速最优的前瞻算法是目前的主要目标。

目前实际应用的转接方法以直接过渡法为主。华中数控世纪星HNC-21M/T系列、PA8000及其派生的GTP8000E系列和HI800系列数控系统均具有小线段连续高速加工功能,乐创LT09M加工中心数控系统的连续小线段加工速度可以达到6m/min。

参数曲线插补技术

NURBS参数曲线插补是现代高档数控系统的标志性功能之一,目前国际上已有FANUC30i、Sinumerik840D和三菱等少数高档数控系统支持NURBS插补,NUM公司的Axium Power数控系统支持多项式插补和NURBS插补,国内广数GSK21M等数控系统也具有样条曲线插补功能。

参数曲线插补技术的发展经历了等参数间隔插补、恒进给速度插补和自适应插补3个阶段。

等参数间隔插补(如等间隔B样条曲线插补方法^[9]),将插补过程中的参数间隔 Δu 设置为常数,采用前向差分算法计算坐标轴增量。这种算法根据插补精度要求选择参数间隔,当插补精度要求

较高时,相应的参数间隔也较小,因此能够较好地满足插补精度要求。但是,由于参数域空间与笛卡尔空间的不一致性,参数域内的等间隔会造成笛卡尔空间中的每相邻插补之间的插补距离不相等,从而给进给速度造成波动。

为避免进给速度的意外波动,可采用基于参数空间的Taylor展开法进行参数曲线插补,包括一阶、二阶Taylor展开的插补器^[10-11]。考虑到Taylor展开中存在的高阶截断误差,对进给速度稳定性的影响,可进一步采用NURBS曲线插补的补偿算法^[12]和变进给插补的Taylor系数分析方法^[13]。此外,将“反馈”的概念引入到NURBS曲线的插补计算,提出的“预估器-修正器”方法^[14]进一步改善了进给速度稳定性。采用带有前瞻功能NURBS曲线自适应插补,以及采用加加速度限制的曲线插补算法^[15-17]等,可以使进给速度随着曲线曲率的变化而自适应的平滑调整,使NURBS曲线插补应用于高速高精度的加工控制成为可能。采用具有加加速度前瞻控制插补算法完成某NURBS曲线插补的应用效果如图5和图6所示。其中图5为采用NURBS曲线图形,图6为得到的速度、加速度以及插补弓高误差分布图。可见算法具有良好的插补精度和运动平稳性。

为把NURBS插补的优良特性扩展应用于五轴数控加工控制,在基本的刀轨NURBS曲线的基础上,引入刀轴矢NURBS表示法,形成基于双NURBS插补的五轴数控加工控制方法^[18],不仅使插补精度和速度平稳性较传统的五轴插补获得显著改善,而且将五坐标数控加工时必需的逆机床运动变换转移至机床控制器中实现,简化了零件加工编程,这样不同结构形式五坐标数控机床的加工控制只需更换相应的逆机床运动变换程序模块,而不必对零件加工程序

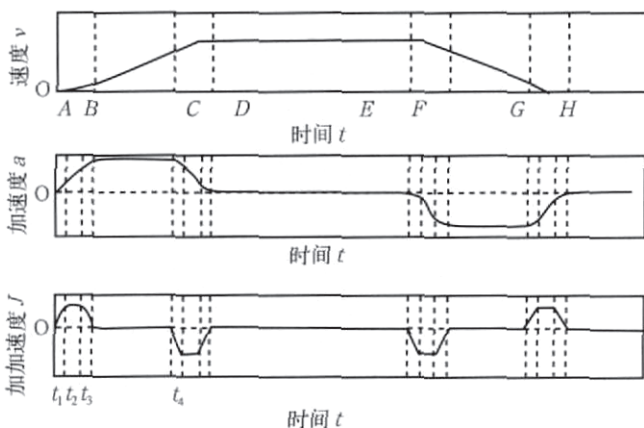


图4 四次多项式加减速方法

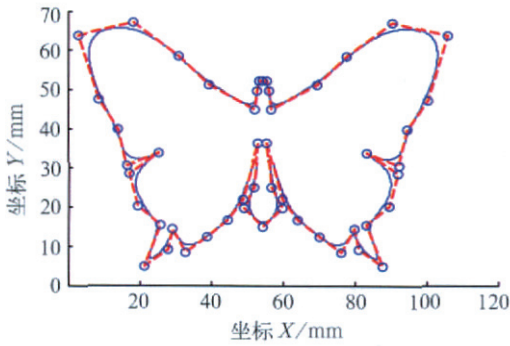


图5 NURBS曲线图形

做任何修改。

轮廓误差补偿技术

为提高复杂型面加工的轮廓精度,轮廓误差补偿已成为现代高性能数控系统研发的关键技术之一。轮廓误差是指刀具的实际位置距离指定轨迹在轨迹法线方向上的偏差。轮廓误差的控制方法包括单轴跟随误差控制和多轴交叉耦合控制。

单轴跟随误差控制主要通过采用各种先进控制技术来提高伺服系统的跟随性能,以改善独立轴的动态位置控制性能。目前伺服系统中应用较多仍是以PID为基础的各种改进的控制算法,如前馈零相差跟踪控制、前馈增益补偿滤波器及自适应控制算法等。但是这些控制属于开环,抗干扰能力较差,为此在闭环系统基础上建立干扰观测器,可大大提高系统的干扰抑制能力和鲁棒性。单轴跟随误差控制方法从理论上可在很大程度上提高轮廓的加工精度,但实际伺服系统由于包含机械、电气等多种非线性环节,因此跟随误差只能得到有限的控制。

数控加工的实际轮廓是由各坐标轴合成运动形成的,轮廓精度的提

高仅凭单轴位置伺服系统性能的改善是不够的;另一方面,减小轮廓误差未必需要跟随误差为零,应该综合考虑各个轴的运动情况。多轴交叉耦合控制通过检测或估算出各个轴轮廓误差的大小,然后进行协调控制补偿轮廓误差,在不改变各个轴位置控制环的前提下,根据单轴的跟踪误差补偿各个轴轮廓误差。在建立轮廓误差补偿模型的基础上,先后提出了变增益交叉耦合控制器、自适应进给率的轮廓控制技术和线性交叉耦合控制算法,使轮廓精度得到进一步的改善。此外,采用新型的高精度位置检测元件与方法、机床几何误差与热变形误差的检测与补偿技术,也是提高加工精度的必要措施和有效途径。目前NUM公司 Axium Power 数控系统具有跟随误差控制功能,FANUC 高档数控系统具有轮廓误差控制功能,MAZAK 的 Super Mold Maker 2000- μ 利 Sodik 的纳米加工机床 Ultra Nano100 具有高精度纳米轮廓控制功能。

结束语

高速高精度数控加工是现代制造业的发展主流,研究与开发高速高精度数控系统是发展高性能数控机床的迫切需要。高速高精度运动控制作为高性能数控系统的关键技术,是现代运动控制理论与先进微电子技术相结合的成果。高速高精度数控系统的研究与开发,必须以现代制造业的发展需求为导向,综合应用机械运动学、动力学、信号检测与处理、现代机电控制等理论以及当代微电子技术的新成果、新手段,不断丰富和拓展现代数控技术的原理与设计方法,提高研究与开发水平,促进我国高性能数控系统的自主创新能力。

本文有参考文献 18 篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 岩石)

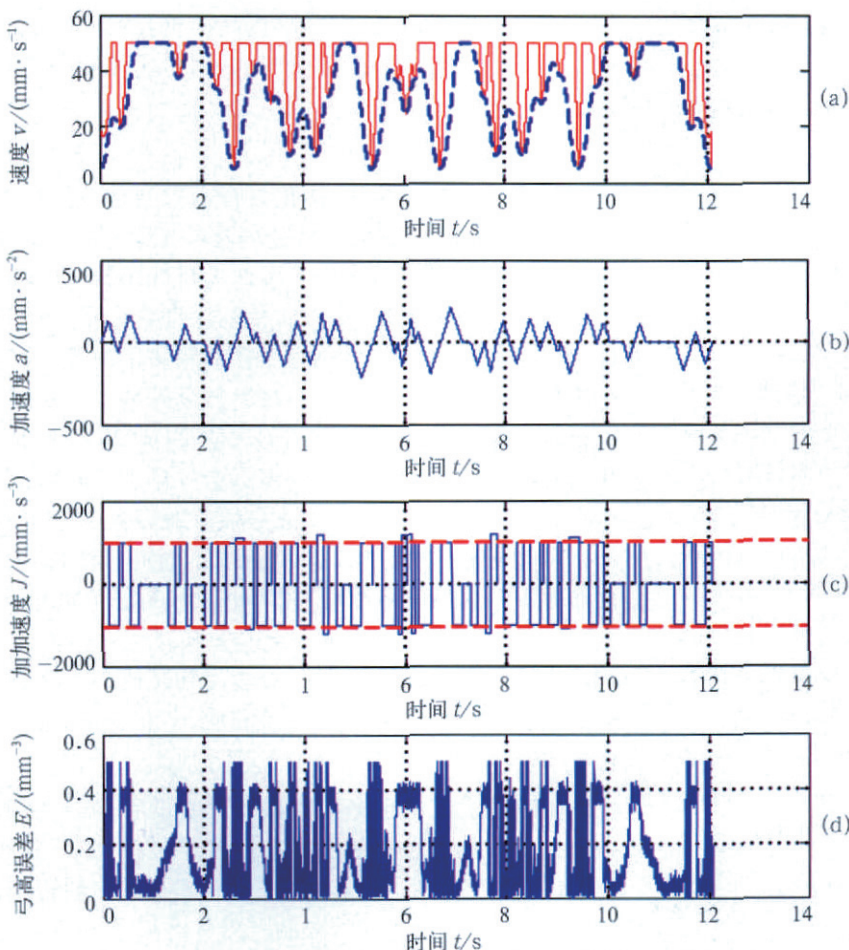


图6 插补速度、加速度、加加速度及弓高误差分布