

五轴数控加工的刀具路径规划与动力学仿真

丁汉^①, 毕庆贞^②, 朱利民^②, 熊有伦^①

① 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074;

② 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200030

E-mail: dinghan@mail.hust.edu.cn

2009-10-09 收稿, 2009-12-29 接受

国家重点基础研究发展计划(2005CB724103)和国家自然科学基金重点项目(50835004)资助

摘要 五轴数控加工是航空、航天、能源和国防等领域中高效加工复杂零件的有效手段, 是提升我国制造水平的技术突破口. 从五轴数控加工的优势出发, 描述在刀具路径规划、几何-力学集成仿真和动力学仿真三个方面的关键问题, 重点介绍基于可达性的刀轴方向优化、三阶点接触和线接触成形刀位规划、刀具包络面解析法求解和加工过程稳定性分析等方面的最近研究进展, 分析存在的问题, 并展望未来的发展趋势.

关键词

五轴数控

刀具路径

几何-力学集成仿真

动力学仿真

传统的三轴数控加工通过控制刀具平动来完成零件的加工, 五轴数控机床是由三轴机床增加两个旋转自由度构成, 利用这两个旋转轴, 五轴数控机床可以使刀具处于工作空间内的任意方向. 五轴数控加工的优势主要通过控制刀轴方向实现, 具体体现在: (1) 改变刀轴方向可以避免刀具和零件干涉, 实现整体叶轮和螺旋桨等复杂曲面零件的加工; (2) 通过调整刀轴方向能够更好地匹配刀具几何与工件曲面, 增加有效切宽, 实现大型敞口类曲面零件的高效加工; (3) 控制刀轴方向可以改善加工条件, 如在加工叶轮根部等曲率较大的区域时, 只能用刚度较低的小半径刀具, 选择合理的刀轴方向, 可以缩短刀具悬伸量, 控制刀轴方向还可以控制刀具参与切削的区域, 降低切削力和减少刀具磨损, 提高加工表面质量.

五轴数控加工具有上述优势的同时也带来了新的挑战, 由于旋转运动的引入, 刀轴姿态更加灵活, 在机床坐标系下难以直观想象出刀具相对于工件的运动, 增加了刀具路径规划的难度, 而且刀具上各点的进给速度并不相同, 加工条件瞬时变化, 使切削力预测和动力学问题更加复杂. 目前的研究工作主要体现在 3 个方面^[1]: 刀具路径规划、加工过程的几何-力学集成仿真和动力学仿真, 如图 1 所示. 刀具路径

规划是根据零件模型、加工方案和误差要求生成刀具相对于工件运动轨迹的过程, 生成的刀具路径对加工质量和加工效率有决定性的作用, 是加工过程几何-力学集成仿真的基础. 几何-力学集成仿真中的几何是指材料去除过程中刀具与工件之间的切削几何, 集成仿真是指集成切削几何和切削力模型来预测加工过程中的动态切削力, 是基于切削力规划进给率、预测和补偿刀具与工件变形等工作的基础, 也可以为动力学仿真提供力学信息. 动力学仿真是在切削力、机床-刀具-工件系统动力学特性基础上预测加工过程稳定性和工件表面形貌的过程, 是根据加工过程的动态特性优化工艺参数和刀具路径的基础.

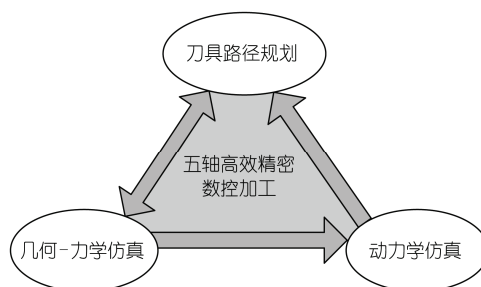


图1 五轴数控加工工艺的关键问题

英文版见: Ding H, Bi Q Z, Zhu L M, et al. Tool path generation and simulation of dynamic cutting process for five-axis NC machining. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-3247-8

国内外对五轴数控加工进行了大量的理论和应用研究, 目前已有通用 CAM 软件(如 UG 和 Catia)、专用 CAM 软件(如加工叶轮的 Max 和加工叶片的 TurboSoft)和动力学仿真软件(如 CutterPro). 欧盟在 2001 年开展了“Flamingo (flank milling optimization)”项目, 联合了 SNECMA, Rolls Royce, Dassault Systèmes 等著名公司和高校研究了高效侧铣加工方法. 美国联合技术公司、普惠(Pratt & Whitney)公司和 Concepts NREC 公司一直在研究五轴高效精密加工技术. 国内也开发了如开目、5BDM 和 DynaCut 等软件, 但在理论研究和应用方面尚处于起步阶段.

目前的商业软件在刀具路径规划和仿真方面提供了丰富的策略, 但在智能性、工艺性和计算效率等方面还不完善, 如刀轴方向控制策略主要依靠编程人员的输入, 难以做到自动优化刀轴方向来同时满足干涉避免、宽行加工、刀具路径整体光顺和缩短刀具长度等需求; 在动力学仿真方面主要针对三轴数控加工, 亟需针对五轴高速加工的切削力和切削过程动力学建模与仿真.

1 刀具路径规划

刀具路径规划是数控编程的核心技术, 在复杂曲面五轴高效加工的刀具路径规划中, 最大的难点是除满足几何约束外, 还需要考虑加工过程中的动态特性和物理因素, 尤其对于难加工材料的工件, 动态特性和物理因素很大程度上决定了加工效率和加工质量, 是在刀具路径规划阶段必须考虑的. 规划刀具路径时, 需要在保证无干涉前提下, 通过调整刀轴方向来扩大刀具有效切削面积、改善工艺条件.

1.1 干涉避免

干涉避免是加工复杂曲面零件时需要首先考虑的几何约束, 目前的无干涉刀位规划方法可以分为先生成后检测的规划方法和基于可达性的规划方法. 先生成后检测是指先生成刀具路径然后检测干涉, 通过调整刀轴方向来避免干涉, 如图 2 所示; 而基于可达性的刀具路径规划方法是直接在可达空间中生成无干涉刀具路径, 如图 3 所示.

先生成后检测方法的工作集中在干涉检查和刀轴方向调整两方面. 数控程序中刀位点一般有几万行甚至十几万行, 干涉检查往往花费大量的计算时间和资源, 因此研究重点在提高全局干涉检查的效

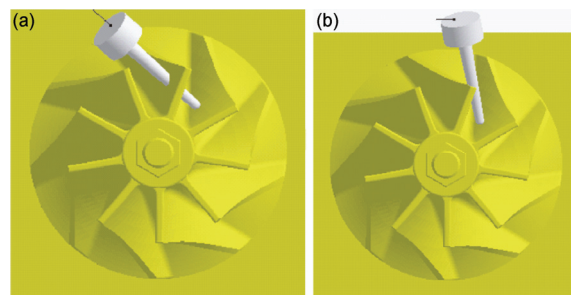


图 2 先生成后调整的干涉避免方法^[2]

(a) 干涉发生; (b) 调整刀轴方向

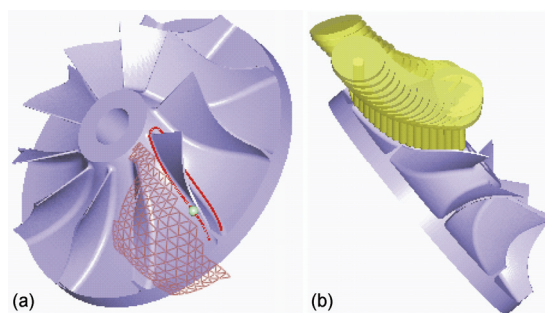


图 3 基于可达性的干涉避免方法

(a) 可达方向锥; (b) 无干涉刀具路径

率方面^[2,3]. 在加工复杂零件时, 先生成后检测方法往往需要反复的检查干涉和调整刀轴方向, 在这个过程中主要考虑几何约束, 难以根据工艺需求优化刀轴方向.

基于可达性的规划方法首先在离散的刀触点处计算出刀具的可达方向锥, 然后在可达方向中规划刀具路径, 这种方法的优点是可以直接判断零件的可加工性, 减少甚至可以避免对刀具路径进行反复的调整和检测, 因此能够在刀具无干涉空间中优化刀具路径, 例如可以根据机床运动学性能优化刀轴方向, 克服在优化刀轴方向时难以避免全局干涉的难题. 但在加工复杂零件时, 障碍物模型往往由十几万甚至几十万个多边形组成, 计算可达刀轴方向往往需要庞大的计算资源和时间, 所以研究的重点集中在如何快速计算刀具可达方向锥方面, 主要有 C(configuration space)空间法^[4,5]和可视锥法^[6-10]. C-空间法的关键是如何将障碍物表面快速映射到 C-空间, 计算效率是该类算法的主要问题. Wang 等人^[5]的计算结果表明, 当障碍物模型包含 10000 个三角形时, 即使不考虑刀柄的干涉检查, 计算可达方向锥的时

间会达到 1190.33 min. 为了提高计算效率, 先忽略刀具半径, 把刀具抽象为一根从刀位点出发的射线, 可达性问题就转化为可视性问题. 本文作者^[6-8]用 C-空间方法描述了刀具的可视锥, 利用图形学中的消隐算法提出了 3 种提高可视锥计算速度的策略, 并提出了基于可视锥的曲面可制造性分析方法. 但可视性没有考虑刀具和刀柄的半径, 仅仅是刀具无干涉的必要条件, 因此需要耗时的后处理来进行精确的干涉检查^[9]. 如果将加工曲面和干涉检查面做等距偏置, 球头刀的可达性问题可以等效为可视性问题^[10], 但是引出的等距面计算是一项复杂的任务, 而且该方法仍然无法准确考虑刀柄的半径, 只适用于球头刀, 因此很难有通用性. 本文作者^[11,12]推广了传统可视锥的概念, 提出了高效计算刀具全局可达方向锥的方法, 具有近似线性的时间复杂度. 对于工业中常用的平底铣刀和圆环铣刀, 根据刀触点、曲面外法线方向和刀轴方向一般能够确定唯一的刀位点, 当沿刀轴方向的反方向观察刀位点时, 刀具的全局可达问题可以等价为圆盘面和圆锥面的完全可视问题, 利用图形显卡(GPU)中的遮挡查询功能可以快速检测该圆盘和圆锥面的完全可视性, 进而判断刀具的完全可达性. 表 1 对比了 3 种算法的计算时间, 可以发现, 当输入障碍物模型的三角形数和刀轴方向数都是文献[9]中的 10 多倍时, 基于 GPU 算法的计算时间仅为文献[9]中算法的 2%, 单个刀位的平均计算时间小于文献[9]中算法的 2%. 即使输入三角形个数大于文献[3]的 10 倍, 基于 GPU 算法的单个刀位平均检测时间小于文献[3]中算法的 3%.

1.2 加工效率

五轴数控加工至今仍广泛采用球头刀, 球头刀加工刀位规划简单, 但效率比较低, 而非球头刀通过调整其位置和姿态, 可以使刀触点轨迹线附近带状区域内的刀具包络曲面充分逼近理论设计曲面, 从而显著提高给定精度下的加工带宽, 在加工平坦、敞

口类曲面时能充分发挥五轴联动机床的潜力, 成为近些年来研究的热点. 研究工作主要集中在平底刀和圆环刀的端铣加工, 以及圆柱刀和圆锥刀的侧铣加工. 端铣加工中依靠点接触成形, 通过增大刀具的有效切削面积可以获得高材料去除率, 提高加工效率, 而侧铣加工中使用线接触成形, 直接实现宽行加工.

五轴数控加工的成形原理为单参数面族包络原理, 真实的加工误差为刀具包络面相对于工件曲面的法向误差. 由于只有在所有刀位都确定之后才能计算刀具包络面^[13,14], 因此如何在单个刀位规划的时候考虑刀具包络面与工件曲面之间的偏差是个非常关键的问题, 它直接关系到刀位计算的精度. 由于操作上的难度及复杂性, 多数文献都采用了近似的简化处理^[15], 将刀位规划转化为单个刀位下, 刀具曲面与工件曲面间的优化逼近问题, 给出的各种刀位优化模型并不能真实地反映实际加工过程, 并且现有的方法仅仅适合某种曲面或某种刀具的刀位计算, 在通用性、可操作性、稳定性或加工精度方面还有许多需要改进的地方.

针对端铣加工, 王小椿等人^[15-17]相继从刀具包络面与设计曲面在刀触点处高阶切触的角度研究了刀位规划问题. 王小椿等人^[15]提出了中凹盘形铣刀的密切曲率法, 在垂直于进给方向的法截面中, 由刀尖轨迹圆形成的包络面与理论曲面的法截线具有相同的 1~3 阶导数, 从而在保持精度的情况下, 加大了每次走刀的加工带宽. Rao 等人^[16]通过讨论设计曲面与刀具包络面的曲率匹配, 给出了消除平底刀五轴加工自由曲面的局部干涉的方法. 上述两种方法均是基于刀具包络面的局部近似模型进行刀位优化, 但仅适用于盘形铣刀或平头刀, 而不能扩展到其他类型的刀具. Gong 等人^[17]建立了描述刀具曲面、刀具包络面和设计曲面之间关系的模型, 提出了带状密切意义下刀具包络面逼近设计曲面的原理与方法. 该方法适用于一般的回转刀具, 但它是建立在刀具包络面的二阶局部重建的基础上的, 仅能做到刀具包络面与工件曲面的二阶切触. 对于五轴加工而言, 理

表 1 可达空间计算时间的对比

方法	计算平台	输入模型			计算时间	单个刀位的 平均计算时间
		三角形	刀位点	刀轴方向		
Sarma 等人 ^[9]	SGI 工作站, Dual CPU 250M	10665	1500	80	51.63 min	2.58×10^{-2} s
Elber 等人 ^[3]	CPU 2.4G, RAM 512M	12600	50000	1	61.61 s	1.23×10^{-3} s
本文作者的方法 ^[12]	CPU 2.4G, RAM 512M	139754	2000	1026	60.53 s	2.95×10^{-5} s

论上可以实现两者的三阶切触,因此二阶模型未能充分发挥五轴联动加工的潜力。这些方法的理论模型也互不兼容,并且均是将切触条件转化为等式方程,然后严格计算出满足切触条件的刀位。但在实际应用中,由于刀具和设计曲面的复杂性,以及无干涉约束、机床工作空间约束以及刀具路径光顺性约束的存在,往往无法实现精确的高阶切触加工。本文作者^[18,19]研究了两线接触曲面间的几何学特性,刀具包络面的基本条件是沿特征线和刀触点轨迹线分别与刀具曲面和设计曲面线接触,提出了回转刀具扫描包络面的局部重建原理。建立了由单个刀位重建刀具包络面局部三阶近似曲面的数学模型,刻画了刀具曲面、刀具包络面与设计曲面在刀触点邻域内的三阶微分关系,在此基础上提出了非球头刀宽行五轴数控加工自由曲面的刀位规划新方法——三阶切触法。该方法通过优化刀具的前倾角和侧倾角使得在刀触点处刀具包络曲面与设计曲面达到三阶切触,适用于任意回转面刀具、任意设计曲面及各种加工方式,并且可以自然地处理各种几何学和运动学约束。采用环心圆半径为 10 mm,母圆半径为 2.5 mm 的圆环刀加工某螺旋面,在某一刀触点处限定加工误差 δ 为 0.005, 0.01 mm 时,3 种刀位(球头刀一阶切触、圆环刀二阶、三阶切触)的加工带宽如表 2 所示,可以看出三阶切触加工实现了刀具包络曲面与设计曲面的局部最佳逼近,即使与二阶切触加工相比也显著提高了加工效率。

针对侧铣加工, Lartigue 等人^[20]首次从控制整体误差入手研究了刀位优化问题,通过调整轴迹面使得刀具包络面在最小二乘意义下逼近设计曲面,但他们所采用的误差度量经过了一定的简化。针对柱刀加工, Gong 等人^[21]应用等距包容原理将该问题转化为轴迹面向设计曲面的等距面的最小二乘逼近问题。这种方法不拘泥于局部误差的大小,而是着眼于控制刀具面族包络在整体上向设计曲面的逼近误差,因此被称为整体优化方法。虽然最小二乘曲面拟合可以直接沿用曲面反求的有关理论和方法,从计算的角度来说更容易实现,但是不符合 ISO 和 ANSI 标准推荐的轮廓度误差评定准则,而且这两种方法不能处理无过切约束,不适用于半精加工规划。此外,包络面与设计曲面间的法向误差的解析描述以及轴迹面形状改变对法向误差的影响等基础问题也没有很好地解决。本文作者^[22,23]将柱刀侧铣加工刀具路

表 2 加工带宽比较

加工误差 δ/mm	球头刀 ($R=5.5\text{ mm}$)	环刀二阶密切	环刀三阶密切
0.005	0.69	2.48	5.28
0.01	0.98	3.12	6.14

径整体优化问题归结为刀具包络面向设计曲面的最佳一致逼近问题,定义了点-轴迹面法向误差函数,并推导出其关于轴迹面形状控制参数的一阶梯度和二阶海色矩阵表达式,在此基础上构造了高效的离散点云轴迹面逼近算法,应用于非可展直纹面的侧铣加工,几何精度比国际上现有的方法提高了 30% 以上,并且可以自然地处理无过切约束,对比结果如表 3 所示。这一方法利用了柱刀包络面与其轴迹面互为等距面这一几何性质,因此无法推广应用于锥刀的情形。在某些应用场合下,锥刀可在保证刚性的前提下实现端部的小半径切削,从而避免刀具端部与工件的干涉以及小半径柱刀刚性不足的困难,因此关于锥刀侧铣加工的刀位优化方法近年来引起重视。本文作者^[24,25]基于刀具包络面的双参数球族包络表示,提出了无须构造包络面而直接计算其与设计曲面间法向误差的方法,并推导出法向误差关于刀轴迹面形状控制参数的一阶梯度表达式,揭示了刀位微小调整对设计曲面和刀具包络面间整体逼近误差的影响规律,在此基础上构造了基于导数信息的刀具包络面向设计曲面的离散点云的最佳一致逼近算法,实现了圆锥刀五轴侧铣加工刀具路径的整体优化。有关理论和方法同样也适用于一般回转刀具的侧铣加工规划。以圆锥刀侧铣加工某叶轮叶片为例,叶片直纹面的两条边界曲线均为 3 次 B 样条曲线,圆锥刀的底面圆半径为 6.25 mm,高度为 30 mm,半锥角为 10°。在待加工直纹面上均匀选取 50×100 个离散点。由 Chiou 的方法^[26]生成初始轴迹面,此时刀具包络面与设计曲面间的最大过切量为 0.0896 mm,最大欠切量为 0.0239 mm,对轴迹面进行优化后,最大过切量和欠切量分别减小到 0.0062 和 0.0061 mm,可以看出刀具路径整体优化显著提高了零件的几何精度。

表 3 几种不同方法结果的比较^{a)}

	RRD ^[27]	MBM ^[28]	Gong 等人 ^[21]	本文作者的方法 ^[22]
最大欠切量/mm	0.220	0.264	0.093(0.228)	0.068(0.228)
最大过切量/mm	0.220	0.211	0.119(0.172)	0.067(0.172)

a) 括号中的为优化前的结果

1.3 工艺条件改善

高速加工对刀具轨迹的光顺性和加工系统的整体刚度提出了更高的要求. 刀轴方向光顺性和刀具长度影响五轴数控加工过程的动态特性; 不同刀轴方向也会改变有效切削速度等切削参数, 影响切削力等物理因素. 在刀具路径规划中需要综合这些因素, 改善工艺条件.

(i) 刀轴方向光顺. 刀轴方向的光顺性对运动学非线性误差、加工效率、进给运动平稳性和切削条件^[29,30]都有直接的影响, 因此刀轴方向的光顺性是评价刀具路径的一个重要指标. 刀轴方向光顺性的度量可以在机床坐标系中、工件坐标系中或者进给坐标系中定义, 分别对应机床旋转轴的运动、刀轴方向相对于工件的变化和切削条件的变化.

现有研究中大多考虑机床坐标系下的度量, Kersting 等人^[31]研究了在自由 C-空间中根据机床坐标系下的度量光顺刀轴方向的方法. Castagnetti 等人^[29]以旋转轴进给运动的平稳性和加工效率为目标定义了机床坐标系下的度量, 证明优化刀轴方向后可以明显缩短加工时间. 本文作者^[11,12]研究了在刀轴可行空间中整体光顺刀轴方向的算法, 该算法考虑了相邻刀位之间的角速度约束, 把刀轴方向整体光顺问题定义为离散域的约束最优化问题, 用有向图的最短路径算法求解该优化问题获得了整体光顺的刀具路径.

根据工件坐标系下的度量光顺刀轴方向的方法主要集中在 NURBS 刀具路径规划方面, Dassault 公司^[32]研究了用双样条曲线描述五轴加工刀具路径的方式, 通过插值获得光滑的刀轴方向. Siemens 的 840D 数控系统推出了支持等距双 NURBS 刀具路径的接口, 刀轴方向为球面上的有理样条曲线, 保证了刀轴方向的光滑. 本文作者^{[1][33]}提出了生成等距双 NURBS 刀具路径的方法, 基于“点-线”运动学, 引入对偶四元数超平面描述刀具位形空间, 将“离散刀位→连续刀具路径”生成问题转化为对偶四元数空间中的平面插值型曲线设计问题, 采用 B 样条曲线设计出有理运动表达形式的刀具路径, 可方便地转化为固定间距双 NURBS 曲线的表达形式.

进给坐标系下的度量反映了切削条件的变化, 根据进给坐标系下的度量光顺刀轴方向有助于实现切削力平滑. Ozturk 等人^[34]针对球头铣刀加工分析了刀轴方向与切削力的关系, 证明刀轴方向对球头铣刀的加工质量有明显影响. 本文作者^[30,35]提出了在刀触点网格上整体光顺刀轴方向的算法, 该算法综合考虑了工件坐标系下、机床坐标系下和进给坐标系下的三种度量, 可以同时保证沿进给方向和相邻行方向上刀轴方向的整体光顺性, 而且只需要计算刀触点网格上的刀具可达方向锥, 具有较高的计算效率, 仿真表明, 整体优化刀轴方向可以提高加工效率, 使机床进给运动更加平稳, 有利于实现加工过程中切削力的平滑.

(ii) 缩短刀具长度. 可以用更短的刀具加工复杂零件是五轴数控加工的一个重要优势, 缩短刀具悬伸长度可以提高整个加工系统的刚度. 刀具最短安全长度一般在数控程序仿真阶段计算, 如数控仿真软件 Vericut 在 6.2 版本中提供了计算安全最短刀具长度的功能. 在仿真过程中计算安全最短刀具长度需要首先规划出刀具路径, 只能针对已有刀具路径计算安全的刀具悬伸量, 然而在加工复杂零件时, 安全最短的刀具长度往往由刀轴方向决定, 因此应该在刀具路径规划阶段考虑刀具的安全最短长度.

如何在规划五轴数控加工刀具路径时考虑安全最短刀具长度, 在现有研究中考虑较少. Morimoto 等人^[10]针对球头铣刀的固定角度加工提出了调整刀轴方向来缩短刀具长度的算法, 该方法需要首先求被加工曲面和干涉检查曲面的等距偏置面, 而且在计算安全刀具长度时过于保守. 本文作者^[36]在基于 GPU 检测刀具可达性的基础上, 提出了计算可达方向上安全最短刀具长度的方法, 为 3+2 数控加工提供了高效的刀具安全长度规划方法. 在此基础上, 进一步探索了以刀具长度最短为目标的五轴联动数控加工刀具路径规划算法^[37,38], 以刀具路径的无干涉和相邻刀位之间刀轴方向的光顺性作为约束, 把刀具长度优化问题转化为约束组合优化问题, 并给出了有效的求解方法.

2 几何-力学集成仿真

动态切削力仿真是物理仿真的基础, 在进给速

1) Zhang X M, Zhu L M, Ding H, et al. Kinematic generation of ruled surface based on rational motion of line and point-line. Comput Aided Geom D, (Submitted)

度、主轴转速等切削参数优化,切削颤振预报,加工过程自适应控制,刀具磨损和破损监测,加工表面形貌预测,加工误差分析与补偿中有着广泛的应用.几何-力学集成仿真是根据材料去除过程中的瞬时切削条件来预测动态切削力,包含切削力系数和瞬时切削几何两方面的工作,其中切削力系数一般采用实验标定的方法求得^[39,40],因此主要工作为刀具扫描体和刀具-工件切削几何建模.

2.1 几何仿真与切削力预测的集成

刀具扫描体建模的关键是求解其包络面.对于五轴运动下的刀具扫描体包络面的建模,目前常用的方法是数值法^[41],包括 Jacobian 秩亏损方法、扫描微分方程方法、隐式建模方法及 Minkowski 和方法,这些方法需要数值求解高阶常微分方程或超越方程,计算量很大. Chiou 等人^[42]推导了环刀和由上、下锥面和中间环面组成的 APT 刀具在五轴线性插补运动下的瞬时特征线的求解公式. Du 和 Ye 等人^[43,44]通过引入瞬时标架和刚体速度表示简化了 Chiou 的结果.之后, Chiou 等^[45]通过引入刀触点处的瞬时标架得到了 APT 刀具在一般空间刚体运动下的瞬时特征线的求解公式.上述方法需要逐点计算包络面上的点,解的判别过程比较复杂.本文作者^[13,14]提出了两种回转刀具切削刃扫描面的解析表达方法: (1) 将锥刀、鼓刀和环刀的切削刃回转面表示为单参数可变半径球族的包络面,利用双参数球族包络理论推导出了这 3 种刀具在一般空间运动下的扫描体包络面及其单位外法矢的解析表达式; (2) 应用包络条件和刚体运动的速度表示方法推导出任意回转刀具在一般空间运动下扫描包络面特征线的解析表达式,在方法上具有无须引入附加瞬时标架、公式简洁明了的优点.

刀具-工件的切削几何是五轴加工铣削力仿真的基础.目前常用的切削几何建模方法主要分为实体建模法、解析模型法和离散几何建模法 3 类: (1) 实体建模法, Altintas 等人^[46]采用 ACIS 实体建模工具确定五轴侧铣加工圆锥铣刀与工件的瞬时啮合状态和切厚; (2) 解析模型法, Elbestaw 等人^[47,48]将刀刃曲线表示为 NURBS 曲线,通过计算该曲线与工件几何的相交确定瞬时参与切削的刀刃微元与瞬时切厚; (3) 离散几何建模法, Jerard 等^[40]使用扩展的 Z-buffer 方法表示工件几何,通过刀具扫描体与 Z-buffer 单元的相交关系计算瞬时啮合区域与瞬时切厚.

2.2 切削力约束下的进给率规划

在五轴铣削过程几何-力学集成仿真的基础上,可以根据切削力优化进给率.目前商用 CAM 软件的进给率优化算法均基于体积分析(也称为材料去除率).在这种传统的方法中,通常把进给率设置为反比于瞬时材料去除率或者与材料去除率成指数函数关系.该方法的两个主要缺点是: (1) 瞬时材料去除率虽然从一定程度上可以反映切削力的大小,但不能反映切削力的方向,故基于材料去除率的进给率优化不能反映切削力的本质; (2) 由这种方法规划出的进给率所产生的切削力的大小难以保持恒定.针对基于材料去除率规划进给率的缺点, Bailey 等人^[47,48]提出了基于切削力模型的五轴加工进给率规划方法. Erdim 等人^[49]对基于切削力模型的与基于材料去除率模型的两种进给率优化策略做了详细比较研究.本文作者^[50]提出了切削力约束的五轴数控侧铣加工进给率离线规划方法: 基于机床各轴立方样条多项式插补格式,建立以各轴相邻位置点之间的时间序列为设计变量,以各轴相邻位置点之间的运行时间序列之和极小为目标函数,以各轴的速度、加速度、跃度极限为约束,同时以刀具切削过程中的最大切削力小于阈值值为约束的优化模型,并以全局最优算法求解获取最优进给率.该方法适用于自由曲面粗加工及直纹面或类直纹面曲面半精加工.

3 加工过程动力学仿真

五轴铣削过程动力学仿真是为加工过程工艺优化提供过程状态变量的时间历程数据,核心工作包括动力学建模、加工过程稳定性分析和工艺参数优化.

3.1 动力学建模

刀具-工件系统结构动力学模型分为: (1) 刀具-工件耦合振动模型,对于薄板类零件加工, Ratchev 的研究小组^[51]提出了基于 FEM 的薄板-刀具耦合振动模型; Kovacs 等人^[52]提出了基于解析法建模的薄板类零件铣削振动模型.然而,对于薄壳类零件铣削加工,工件振动模型、刀具-工件耦合振动模型极少见诸国际期刊. (2) 工件-夹具接触动力学建模, Hu 等人^[53]在柔性多体动力学框架下,使用集总参数模型分析了夹具的动态稳定性; Kapoor 等人^[54]研究了夹具-工件动态摩擦接触模型,并分析了该动态效应对加工性能的影响; Rong 等人^[55]在 FEM 的框架下,建立了夹具-工

件接触模型,并完成了接触刚度矩阵实验辨识的工作.另一方面,Melkote等人^[56]分析了加工过程工件-刀具动态效应(工件惯量、刚度、频率等特性在铣刀去除材料过程中的时变特性)对夹持动态稳定性的影响.

3.2 加工过程稳定性分析

在刀具-工件系统结构动力学模型基础上,目前铣削过程动力学分析的工作主要集中在颤振分析上.切削过程颤振分为再生型颤振、模态耦合性颤振等,一般认为再生型颤振先于模态耦合性颤振发生.常用颤振稳定性分析方法的对比如表4所示,Altintas等人^[57]利用切削力系数 Fourier 展开给出了铣削加工颤振预测模型(ZOA法),其精度取决于切削力变化趋势和 Fourier 项数,对于多齿刀具和径向切深较大的加工方式非常有效,而对于少齿刀具及径向切深小的加工方式则缺乏足够的精度. Altintas 的小组^[58]在近年又提出了多频率法,可以用于小径向切深的铣削稳定性预报. Bayly 等人^[59]结合刀具自由振动解析解和刀具-工件接触过程振动近似解,发展出时域有限元方法(TFEA)用以预测铣削系统颤振,但该方法主要适用于预报小径向切深铣削的稳定性,而对于大径向切深情形有较大误差. Insperger 等人^[60]通过离散时滞项并对周期系数项做零阶平均处理将加工动力学时滞方程转化成一系列自治常微分方程,即所谓的半离散方法,可用于预测颤振发生,其精度取决于离散步长,计算量与多频率法接近^[61],都远大于 ZOA 法. 该方法是同时适用于大径向切深与小径向切深铣削稳定性预报的通用方法. 本文作者^[62]提出了基于直接积分格式的全离散法铣削稳定性预报方法,先将考虑再生效应的线性周期单时滞系统的响应表示为积分形式,在对单周期做等间距离散后,将响应中的 Duhamel 积分项内的时变项(包括周期系数项、时滞项和状态项)在每一时间小区间上做同步线性插值,再据此构造出逼近原连续系统的离散动力系统,获得该离散动力系统转移矩阵的特征值,并

根据 Floquet 定理,由特征值的模的大小判断系统是否稳定. 该方法是适用于大径向切深与小径向切深铣削稳定性高精度预报的通用方法,且有比半离散法更高的计算效率,因为在扫描“转速-切深”参数对平面时,在扫描切深的循环层中无需计算矩阵指数函数. 算例表明,在保证数值精度的前提下,与半离散法相比,全离散法对于单自由度铣削系统稳定性预报的计算效率可以提高约 75%,对于两自由度铣削系统则可提高约 60%.

3.3 工艺参数优化

关于无颤振工艺参数优化的工作主要集中于三轴加工, Budak 等人^[63]提出了无颤振最大材料去除率目标下的最优轴向与径向切深对的计算方法, Altintas 等人^[64]提出了基于铣削过程仿真和颤振稳定性预报的 NC 主轴转速和进给率优化方法. 现有的稳定性预测模型和五轴铣削加工工艺参数优化都是基于确定参数的动力学模型,这种方法没有将切削系统参数的不确定性引入到工艺参数规划中,不能反映真实的加工状况,因此获得的工艺参数不是真实的最优解,仍然可能导致颤振发生. 刀具-工件结构的物理参数和几何参数包含很多不确定性,物理参数如弹性模量和泊松比,几何参数如工件的厚度及其他几何尺寸. 对铣削中的不确定问题,以前多是从控制角度来研究^[65],设计控制器补偿切削过程中的切削力模型和切削力-进给非线性因素中存在的误差. 目前,国际上针对不确定参数的数控铣削过程动力学建模工作很少,本文作者^[66-68]提出了考虑加工过程不确定参数的五轴铣削工艺参数鲁棒优化方法,考虑加工过程中的不确定因素,利用区间代数,基于灵敏度分析,求解铣削颤振稳定图的上下界和刀具动态响应的上下界,建立工艺参数鲁棒优化模型,将带有不确定参数的多目标优化问题转化为确定参数的单目标优化问题优化求解. 与确定参数模型的结果相比,鲁棒优化模型求解得到的结果保证了复杂曲

表4 铣削稳定性判别方法的对比

分类	方法	适用范围		计算量
		小径向切深	大径向切深	
频域法	ZOA 法 ^[57]	否	是	最小
	多频域法 ^[58]	是	是	大
	时域有限元 ^[59]	是	否	小
时域法	半离散法 ^[60]	是	是	大
	本文作者的方法 ^[62]	是	是	小

面五轴铣削的稳定性。

4 展望

五轴数控加工是航空、航天、能源和国防等领域中高效加工复杂零件的有效手段,是提升我国制造水平的技术突破口。国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划和科技重大专项中都把五轴数控加工的基础理论和共性技术列为重点研究方向,结合国家重大需求和制造科学前沿,五轴高效精密数控加工将来的研究方向如下:

(1) 完整的数控加工过程动力学仿真模型。动力学仿真是实现高效精密加工的理论基础,当前的研究多集中在“机床-刀具-工件-夹具”系统的一些子系统,迄今未见报道一个相对完整的“刀具-工件-夹具”动力学模型,以及其在工艺参数微扰动下的动态响应对最终零件质量的详细分析。再如,现有加工过程振动分析的思路都是“结构动力学”的,即忽略了铣刀做大范围刚体运动与刀具振动的耦合效应对曲面加工精度的影响,而实际情况是,由于旋转运动的引入,五轴加工中刀具相对于工件做变进给运动,按照“柔性多体动力学”理论,刀具大范围刚体运动影响刀具弹性小变形,要更准确地预报已加工工件表面形貌,必须首先界定这种耦合效应对曲面加工精度的影响。

(2) 设计-加工-测量一体化制造方法。考虑到五轴加工中时变的切削条件和诸多不确定性因素,单次加工往往难以满足产品在几何精度和物理性能方面的高要求,集设计-加工-测量于一体的闭环加工模式是解决这一难题的重要手段,是数字化制造的前沿方向,它包含工艺规划和加工仿真、曲面信息获取和数据分析、质量评价和面形再设计等环节,其中物理性能和几何形貌的快速原位测量技术、基于数学物理方程反演的多源约束面形再设计理论、补偿加工时材料去除量的精确估计方法、考虑工艺系统动态特性与加工过程物理约束的五轴加工工艺规划方法是挑战性的课题。

(3) 五轴铣削成形过程多物理场仿真方法。高性能复杂零件对表面质量提出了更高的要求,在五轴铣削加工切削力仿真基础上的成形过程多物理场仿真成为新的研究热点,它通过对零件宏/微性能的定量预测,为加工过程控制和工艺参数优化提供理论依据。目前的多物理场仿真主要针对车铣或者三轴数控加工,如何在切削条件时变的五轴数控加工中实现高效的物理仿真是挑战性的难题。具体内容包括:制造过程中复合能场的数字化描述与定量表征;工艺系统和工艺过程参数对零件宏/微观性能的影响规律;制造过程中复杂物理行为的定量预测和调控;加工工艺优化与加工过程控制的新方法。

参考文献

- 1 Ding H, Xiong Y L. Computational manufacturing. Prog Nat Sci, 2002, 12: 8—16
- 2 Wang Q H, Li J R, Zhou R R. Graphics-assisted approach to rapid collision detection for multi-axis machining. Int J Adv Manuf Tech, 2006, 30: 853—863
- 3 Ilushin O, Elber G, Halperin D, et al. Precise global collision detection in multi-axis NC-machining. Comput Aided Design, 2005, 37: 909—920
- 4 Morishige K, Takeuchi Y, Kase K. Tool path generation using C-space for 5-axis control machining. J Manuf Sci E-T ASME, 1999, 121: 144—149
- 5 Wang J, Roberts C A, Danielson S. Local and global accessibility evaluation with tool geometry. Comput Aided Des Appl, 2007, 4: 19—29
- 6 Yin Z P, Ding H, Xiong Y L. Visibility theory and algorithms with application to manufacturing processes. Int J Prod Res, 2000, 38: 2891—2909
- 7 尹周平, 丁汉, 熊有伦. 基于可视锥的可接近性分析方法及其应用. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2003, 33: 979—988
- 8 Yang W Y, Ding H, Xiong Y L. Manufacturability analysis for a sculptured surface using visibility cone computation. Int J Adv Manuf Tech, 1999, 15: 317—321
- 9 Balasubramaniam M, Laxmiprasad P, Sarma S, et al. Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation. Comput Aided Design, 2000, 32: 261—277
- 10 Morimoto K, Inui M. A GPU based algorithm for determining the optimal cutting direction in deep mold machining. In: ISAM-IEEE Int Symp Assem Manuf, Michigan USA, 2007, 203—208
- 11 丁汉, 毕庆贞, 王宇晗, 等. 五轴数控加工光滑无干涉刀具路径的规划方法. 中国知识产权局, 专利授权号: ZL200710045183.9, 2007-08-23

- 12 Bi Q Z, Wang Y H, Ding H. A GPU-based algorithm for generating collisionfree and orientation-smooth five-axis finishing tool paths of a ball-end cutter. *Int J Prod Res*, 2010, 48: 1105—1124
- 13 Zhu L M, Zheng G, Ding H. Formulating the swept envelope of rotary cutter undergoing general spatial motion for multi-axis NC machining. *Int J Mach Tool Manu*, 2009, 49: 199—202
- 14 Zhu L M, Zhang X M, Zheng G, et al. Analytical expression of the swept surface of a Rotary cutter using the envelope theory of sphere congruence. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2009, 131: 44—56
- 15 王小椿, 吴序堂, 李艳斌. 密切曲率法——一种自由曲面加工的新概念. *西安交通大学学报*, 1992, 26: 51—58
- 16 Rao A, Sarma R. On local gouging in five-axis sculptured surface machining using flat-end tools. *Comput Aided Design*, 2000, 32: 409—420
- 17 Gong H, Cao L X, Liu J. Second order approximation of tool envelope surface for 5-axis machining with single point contact. *Comput Aided Design*, 2008, 40: 604—615
- 18 Zhu L M, Ding H, Xiong Y L. Third Order Point Contact Approach for Five-Axis Sculptured Surface Machining Using Non-ball End Tolls-Part I: Third Order Approximation of Tool Envelope Surface. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2010, 53: 1904—1912
- 19 Zhu L M, Ding H, Xiong Y L. Third order point contact approach for five-axis sculptured surface machining using non-ball end tools-Part II: Tool positioning strategy. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2010, 53: 2190—2197
- 20 Lartigue C, Duc E, Affouard A. Tool path deformation in 5-axis flank milling using envelope surface. *Comput Aided Design*, 2003, 35: 375—382
- 21 Gong H, Cao L X, Liu J. Improved positioning of cylindrical cutter for flank milling ruled surfaces. *Comput Aided Design*, 2005, 37: 1205—1213
- 22 Ding H, Zhu L M. Global optimization of tool path for five-axis flank milling with a cylindrical cutter. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 2449—2459
- 23 Ding Y, Zhu L M, Ding H. Semidefinite programming for Chebyshev fitting of spatial straight line with applications to cutter location planning and tolerance evaluation. *Precis Eng*, 2007, 31: 364—368
- 24 Zhu L M, Zheng G, Ding H. Global optimization of fool path for five-axis flank malling with a conical cutter. *Comput Aided Design*, 2010, 42: 903—910
- 25 Zhang X M, Zhu L M, Zheng G, et al. Tool path optimization for flank milling ruled surface based on the distance function. *Int J Prod Res*, 2010, doi: 10.108000207540902993019
- 26 Chiou C J. Accurate tool position for five-axis ruled surface machining by swept envelope approach. *Comput Aided Design*, 2004, 36: 967—974
- 27 Redonnet J M, Rubio W, Dessein G. Side milling of ruled surfaces: Optimum positioning of the milling cutter and calculation of interference. *Int J Adv Manuf Tech*, 1998, 14: 459—465
- 28 Menzel C, Bedi S, Mann S. Triple tangent flank milling of ruled surfaces. *Comput Aided Design*, 2004, 36: 289—296
- 29 Castagnetti C, Duc E, Ray P. The Domain of admissible orientation concept: A new method for five-axis tool path optimisation. *Comput Aided Design*, 2008, 40: 938—950
- 30 Bi Q Z, Wang Y H, Zhu L M, et al. Wholly smoothing cutter orientations for five-axis NC machining based on cutter contact point mesh. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2010, 53: 1294—1303
- 31 Kersting P, Zabel A. Optimizing NC-tool paths for simultaneous five-axis milling based on multi-population multi-objective evolutionary algorithms. *Adv Eng Softw*, 2009, 40: 452—463
- 32 Langeron J M, Duc E, Lartigue C, et al. A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves. *Comput Aided Design*, 2004, 36: 1219—1229
- 33 Bi Q Z, Zhu L M, Wang Y H, et al. Analytical envelope surface representation of a conical cutter undergoing rational motion. *Int J Adv Manuf Tech*, 2010, 47: 719—730
- 34 Ozturk E, Budak E. Modeling of 5-axis milling processes. *Mach Sci Tech*, 2007, 11: 287—311
- 35 丁汉, 毕庆贞, 朱利民, 等. 五轴数控加工可达性分析和刀具路径规划软件 SurfMilling V1.0. 中国版权保护中心, 软件著作权受理号: 2009R11S035961
- 36 Bi Q Z, Ding H, Wang Y H. Safe and short tool length generation for 3+2 axis NC machining of a ball-end cutter using graphics hardware. *Lect Notes Artif Intell*, 2008, 5315: 348—355
- 37 毕庆贞, 丁汉, 王宇晗, 等. 五轴数控加工安全最短刀具长度的规划方法. 中国知识产权局, 专利受理号: 200810039198.9, 专利公开号: CN101303583, 2008-06-19
- 38 Bi Q Z, Wang Y H, Zhu L M, et al. Generating collision-free tool orientations for 5-axis NC machining with a short ball-end cutter. *Int J Prod Res*, 2010, doi: 10.1080/00207540903436679
- 39 Budak E, Ozlu E. Development of a thermomechanical cutting process model for machining process simulations. *CIRP Ann-Manuf Tech*,

- 2008, 57: 97—100
- 40 Fussell B K, Jerard R B, Hemmett J G. Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining. *Comput Aided Design*, 2003, 35: 333—346
 - 41 Abdel-Malek K, Blackmore D, Joy K. Swept volumes: Foundations, perspectives, and applications. *Int J Shaping Model*, 2006, 12: 87—127
 - 42 Chiou C J, Lee Y S. Swept surface determination for five-axis numerical control machining. *Int J Mach Tool Manu*, 2002, 42: 1497—1507
 - 43 Du S, Surmann T, Webber O, et al. Formulating swept profiles for five-axis tool motions. *Int J Mach Tool Manu*, 2005, 45: 849—861
 - 44 Ye T, Xiong C H. Geometric parameter optimization in multi-axis machining. *Comput Aided Design*, 2008, 40: 879—890
 - 45 Chiou J C J, Lee Y S. Optimal tool orientation for five-axis tool-end machining by swept envelope approach. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2005, 127: 810—818
 - 46 Larue A, Altintas Y. Simulation of flank milling processes. *Int J Mach Tool Manu*, 2005, 45: 549—559
 - 47 Bailey T, Elbestawi M A, El-Wardany T I, et al. Generic simulation approach for multi-axis machining, Part 1: Modeling methodology. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2002, 124: 624—633
 - 48 Bailey T, Elbestawi M A, El-Wardany T I, et al. Generic simulation approach for multi-axis machining, Part 2: Model calibration and feed rate scheduling. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2002, 124: 634—642
 - 49 Erdim H, Lazoglu I, Kaymakci M. Free-form surface machining and comparing feedrate scheduling strategies. *Mach Sci Tech*, 2007, 11: 117—133
 - 50 丁汉, 丁烨, 朱利民, 等. 五轴数控侧铣加工进给率离线规划方法. 中国知识产权局, 专利受理号: 200910046724.9, 专利公开号: CN101497140, 2009-08-05
 - 51 Ratchev S, Liu S, Becker A A. Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts. *J Mater Process Tech*, 2005, 162: 673—681
 - 52 Meshreki M, Kovacs J, Attia H, et al. Dynamics modeling and analysis of thin-walled aerospace structures for fixture design in multi-axis milling. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2008, 130: 031011
 - 53 Liao Y J G, Hu S J. Flexible multibody dynamics based fixture-workpiece analysis model for fixturing stability. *Int J Mach Tool Manu*, 2000, 40: 343—362
 - 54 Fang B, DeVor R E, Kapoor S G. Influence of friction damping on workpiece-fixture system dynamics and machining stability. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2002, 124: 226—234
 - 55 Zheng Y, Rong Y, Hou Z. Contact stiffness identification for computer-aided fixture design. *Trans North Am Manuf Res Inst SME*, 2006, 34: 189—196
 - 56 Deng H, Melkote S N. Modeling of fixturing dynamic stability accounting for material removal effect. *Trans North Am Manuf Res Inst SME*, 2005, 33: 289—296
 - 57 Altintas Y, Budak E. analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Ann-Manuf Tech*, 1995, 44: 357—362
 - 58 Merdol S D, Altintas Y. Multi frequency solution of chatter stability for low immersion milling. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2004, 126: 459—466
 - 59 Bayly P V, Halley J E, Mann B P, et al. Stability of interrupted cutting by temporal finite element analysis. In: *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 6C, 2001, 2361—2370
 - 60 Insperger T, Stépán G. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay. *Int J Numer Meth Eng*, 2004, 61: 117—141
 - 61 Altintas Y, Stepan G, Merdol D, et al. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain. *CIRP Ann-Manuf Techn*, 2008, 1: 35—44
 - 62 Ding Y, Zhu L M, Zhang X J, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability. *Int J Mach Tool Manu*, 2010, 50: 502—509
 - 63 Budak E, Tekeli A. Maximizing chatter free material removal rate in milling through optimal selection of axial and radial depth of cut pairs. *CIRP Ann-Manuf Tech*, 2005, 54: 353—356
 - 64 Altintas Y, Merdol S. Virtual high performance milling. *CIRP Ann-Manuf Tech*, 2007, 56: 81—84
 - 65 Kim S, Landers R, Ulsoy A. Robust machining force control with process compensation. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2003, 125: 423—430
 - 66 Zhang X M, Ding H, Chen S H. Interval finite element method for dynamic response of closed-loop system with uncertain parameter. *Int J Numer Meth Eng*, 2007, 70: 543—562
 - 67 Zhang X M, Ding H. Design optimization for dynamic response of vibration mechanical system with uncertain parameters using convex model. *J Sound Vib*, 2008, 318: 406—415
 - 68 丁汉, 张小明, 朱利民, 等. 刀具模态参数不确定的曲面五轴数控工艺参数优化方法. 中国知识产权局, 专利受理号: 2009100-46725.3, 专利公开号: CN101493686, 2009-02-26