

航空发动机复杂曲面零件数控加工刀具轨迹规划研究分析

程耀楠, 安 硕, 张 悦, 李海超

(哈尔滨理工大学“高效切削及刀具”国家地方联合工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 整体叶盘等复杂曲面零件是航空发动机中的核心零件, 其数控加工技术中的关键是刀具轨迹的规划技术. 本文针对当今国内外复杂曲面的数控加工刀具轨迹规划的研究现状和发展进行了分析. 主要对复杂曲面数控加工中三种主要刀具的轨迹规划进行了对比分析, 并对刀具轨迹规划中的关键技术进行了分析, 包括: 轨迹拓扑、轨迹参数、干涉避免和刀轴控制的算法理论和适用特点, 并对刀具轨迹规划中的曲线插补和刀具组合方向进行了分析和展望, 为后续研究提升零件数控加工效率和质量打下了基础.

关键词: 复杂曲面; 刀具轨迹规划; 球头刀; 平底刀; 环形刀

中图分类号: TP391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2013)05-0030-07

Discussion and Analysis on the NC Machining Tool Path Planning of Aeroengine Complex Surface Parts

CHENG Yao-nan, AN Shuo, ZHANG Yue, LI Hai-chao

(The Key Lab of National and Local United Engineering for High-Efficiency Cutting and Tools, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Blisk and other complex surfaces parts are the core parts of aircraft engine parts, tool path planning technology is the key technology in CNC machining. This paper analyzes the current domestic and foreign research status and the development of the tool path planning for complex surface parts in NC machining. Comparative analysis is mainly carried out for three main tool path plans in complex surface machining, and the key techniques of tool path planning has also been analyzed, including: the algorithm theory and application features of track topology, trajectory parameters, interference avoidance and tool axis control. In addition, the development direction of curve interpolation and tool preferred combination in tool path planning techniques has been analyzed and previewed. These laid the foundation for subsequent work of complex surface parts high efficiency and high quality CNC machining.

Key words: complex surface; tool path planning; ball-end mill; flat-end mill; toroidal-end cutter

0 引 言

航空发动机标志着科技水平和工业基础的发展

高度. 在航空发达的国家中, 高推重比高性能综合发动机正在开发应用, 它具有耗油率低, 成本低, 短距起落, 高有效载荷和高巡航速度等优点^[1]. 而中国航空发动机从无到有, 一步一步走上了自主研发的

收稿日期: 2013-05-31

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX04001-081)

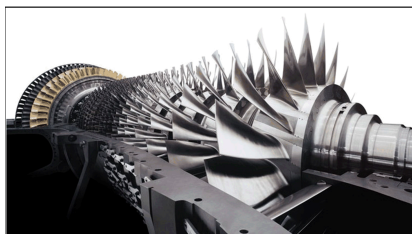
作者简介: 程耀楠(1977—), 男, 博士, 教授, E-mail: yaonancheng@163.com;

安 硕(1988—), 男, 硕士研究生;

张 悦(1990—), 女, 硕士研究生.

道路,虽然已经取得了很大的成绩,但与国外相关的先进技术水平相比存在着巨大差距.高性能发动机结构设计中具有大量复杂曲面零件,如图1所示.两种典型的复杂曲面零件.这些零件空间几何形状复杂且难以用数学表达式精确表示.在多轴数控加工技术中,其曲面成型难度大,加工精确度要求高,生产效率的需求不断提高,而且很多难加工材料被应用在这些零件中^[3],这些都增加了很多技术难题.

相关的多坐标数控加工刀具轨迹规划是其中重要的核心内容,刀具轨迹规划是复杂曲面零件多轴数控加工中很重要同时也是研究较为广泛深入的内容,刀具轨迹规划是否合理,直接关系到曲面的成型质量和能否在误差允许范围内获得最大的加工效率.多轴数控加工中,刀具轨迹规划的优劣直接影响零件加工精确度和加工效率^[4].但是国外在相关技术上对我国的严密封锁,限制了我国刀具轨迹规划相关研究的发展.因此,本文对复杂曲面零件数控加工刀具轨迹规划中的主要刀具类型和整体规划过程相关算法进行研究,为实现航天发动机复杂曲面零件的高效率、高精度的计算机辅助设计和计算机辅助制造一体化做好铺垫.



(a) 开式整体叶盘



(b) 轴流式整体叶轮

图1 航空发动机中的部分复杂曲面零件

1 刀具轨迹规划使用刀具对比分析

1.1 复杂曲面球头刀轨迹规划

复杂曲面零件数控加工刀具轨迹规划实际生产中,主要有球头刀、平底刀、环形刀等,常用刀具结构简图如图2所示.球头刀的优点是球头中心轴线始终在被加工面法向等距面上,使之保持与复杂曲面

之间的几何关系是不变的,这种特性称为法矢自适应性.这种优点使得刀具轨迹计算相对简单和成熟,干涉现象易于控制,特别适用于狭窄加工空间和轴线方向不单调的复杂曲面加工,得到了广泛的应用.但是,在实际加复杂曲面加工中刀具切削刃始终是点切削状态,伴随着走刀路径的进行,加工曲面的与切削刃的接触位置是不断变化的,这样导致实际切削速度不断改变,加之刀具球面端部顶点不参与实际切削,刀具切削过程端部切屑排除较慢,刀具易磨损,且磨损很不均匀,进一步影响加工误差;此外,为保证残余高度,行距不能太大,严重影响加工表面质量,加工效率和切削条件.

针对球头刀的不足,Suresh^[5]在复杂曲面数控加工中基于等残留高度的思想,根据数学分析的方法建立了参数函数关系,在球头刀的加工方面提高了加工效率.Lin^[6]在Suresh的基础上,采用曲面的二阶泰勒展开式进行数值分析,得出了复杂曲面的走刀步距和走刀步长的解析关系,加工精度得到了有效地控制,同时也实现了球头刀加工效率的提升.



图2 常用刀具结构简图

1.2 复杂曲面平底刀轨迹规划

由于平底刀自身刀具结构的特点,加工过程中刀具底部排屑和容屑效果好,通过调整刀具的侧倾角和后跟角,在垂直于切削方向的平面上,即可保证刀具不会干涉曲面,使平底刀可以更加适应被加工复杂曲面的形状,且刀具几何形状简单,切削效率较高.目前的研究热点是端铣加工中的刀具有效切削轮廓,其刀具轨迹的生成思路是把复杂的三维关系转化到二维关系上,能够得出复杂曲面与刀具切触点之间的关系,而切触点之间的关系无法得出.由于平底刀的切削刃与断面的交点为实际加工点,导致了刀具极易磨损,同时严重影响加工精确度.

在刀具轨迹计算中,平底刀与复杂曲面之间的几何关系较复杂, Lee^[7]在垂直步进方向上将切削轮廓视为椭圆,刀触点附近的轮廓近似为圆,以此半径来计算有效行距得出刀具轨迹.杨德武^[8]将平底刀和复杂曲面的切削轮廓近似为圆求出刀具扫掠面,通过该曲面与复杂曲面在步进方向上的曲率来就算

行距得出刀具轨迹. Vickers^[8] 研究, 同样的表面精度要求, 平底刀加工同样的复杂曲面, 切削效率是球头刀的 24 倍多. 因此, 平底刀具有明显的高效率优势, 但其有效切削轮廓的变化规律等仍然是刀具轨迹计算当中的难点.

1.3 复杂曲面环形刀轨迹规划

事实上, 平底刀和球头刀正是环形刀的特例. 环形刀结构特点为刀头端部有一 R 形刃形成的圆环面, 使得环形刀的 R 形切削刃在实际加工中圆环面的切削速度都是相同的, 因此, 环形刀的加工性能相比球头刀和平底刀更加稳定. 环形刀在加工复杂曲面的过程中, 可以使刀轴与曲面接触点的法矢保持一定的倾角, 这样可以提高切削速度, 改善加工效率和表面质量. 然而, 正由于环形刀的切削部分是一个环形曲面, 在切触点上刀具与曲面始终保持相切, 造成在切平面各个方向上环形刀都有可能过切加工曲面, 产生干涉问题.

由于环形刀兼有球头刀和平底刀的双重特点, 近年受到了国内外的高度关注, 例如波音、空客、美国空军等都投入了巨资进行环形刀的多轴加工复杂曲面的研究. 国外 Yoon^[9] 针对干涉问题, 在环形刀的圆环面和被加工复杂曲面的切触点处进行了二阶泰勒展开, 计算出了不发生干涉的充要条件和优化刀位的计算方法. 国内的陈良骥^[10] 将微分几何学应用到了环形刀轨迹生成方法中, 得出的优化刀位有效地控制了环形刀的干涉问题. 由于环形刀具轨迹规划的相关算法比较复杂性, 因此, 在实际加工中的应用受到了限制, 但其仍然是以后研究内容的热点和发展趋势.

2 刀具轨迹规划关键技术

2.1 刀具轨迹拓扑结构

刀具轨迹拓扑结构指加工过程中刀具相对于工件的运动方式, 可以说加工表面是由路径拓扑而成, 其直接关系到复杂曲面加工的效率和精确度. 然而, 现有大多以减小效率来达到精确度要求, 鲜有研究拓扑结构的影响. 常见的刀具轨迹拓扑结构有: Zig-zag 型或称之字型、环型和曲线填充型等其他拓扑结构, 其中, Zig-zag 型和环型拓构已广泛使用. 李世杰^[11] 研究了刀具路径拓扑对表面质量的影响, 得出了在环形拓扑路径下, 表面质量受复杂曲面参数曲线上切线斜率的影响, 而在 Zig-zag 型拓扑结构下, 表面质量受复杂曲面参数曲线斜率的影响. 曲

线填充型是连续的填充曲线表示刀触点路径. 其优点是具有良好的连续性和分布均匀性, 能有效减少切削过程中的空走和抬刀次数, 效率较高. 缺点是频繁变化的切削方向造成不断的变速, 影响了表面质量, 其很少实际应用, 如何将曲线填充型拓扑结构有效应用于复杂曲面的相关研究较少, 且如何在复杂曲面上生成自适应功能的拓扑结构, 算法较复杂, 有待进一步研究.

2.2 刀具轨迹参数算法

刀具轨迹规划时还需要确定两个重要的刀具轨迹参数: 行距和步长. 实际加工中刀具轨迹被离散成一系列的小线段, 通过线性插补近似成形, 这些小线段的长度就是步长; 行距代表相邻刀具轨迹之间的距离. 所以精确计算行距和步长是保证复杂曲面高效率和高精度加工的核心内容. 目前相关主要的规划算法有以下几种: 离散面法、等参数法、截面法和等残高法等.

2.2.1 离散面法

复杂曲面零件模型多是由数据点拟合而成, 这些数据点一般根据逆向工程采集得到, 离散面法主要思想是在一定的约束精确度条件下离散复杂曲面而得到的一个多面体, 然后用一组平行平面与这组离散面模型求交说的交线组来规划计算刀具路径, 步距即为每个离散面所截距离, 原理简图如图 3 所示. 其简化实质是求等平面组与离散面的相交问题. 该算法的特点是执行可靠稳定, 干涉检查速度较快. 难点是刀位点的准确性取决于多面体与被加工曲面的逼近程度. 离散面法是目前商业系统中应用较为广泛、计算相对稳定的刀触点轨迹生成方式之一.

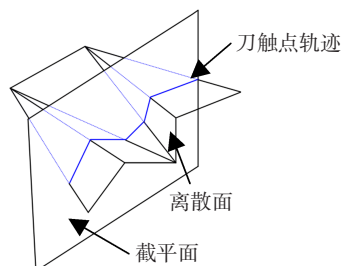


图3 离散面法示意图

2.2.2 等参数法

等参数法是复杂曲面最常用的一种刀具轨迹规划算法, 该算法通过参数曲面中固定一个参数不变, 另一个参数均匀变化规划计算刀具路径, 步距计算为相邻刀位点间距, 算法原理简图如图 4 所示. 其优点是原理简单、稳定性和可靠性高. 但是曲面在参数空间与欧氏几何空间之间的是非线性对应的关系,

特别是在加工参数线分布不均匀的曲面,此算法一般只适用于笛卡儿空间内较平的复杂曲面,生成的大量重复刀位会影响加工精度与效率. 国外 Lin^[12] 指出参数间距很小的时候,改进的算法行距计算采用二阶泰勒展开式和误差补偿方法,消除了冗余的刀具路径. 国内吴福忠^[13] 提出了基于等参数法的走刀步长追踪法,针对组合曲面合理化组织进行了加工刀具路径轨迹规划.

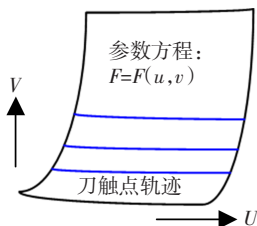


图4 等参数法示意图

2.2.3 截面法

截面法是所截取的面是复杂曲面或其偏置面,是用一组等距面截取此面得到一组截面线来规划计算刀具路径,等距面可以为平面也可以是柱面,原理简图如图5所示,常用的还可分为 CC(cutter contact)法和 CL(cutter location)法. CC法是将得到的截面线作为曲面上的二维刀触点轨迹,再将得到的刀触点轨迹根据刀具尺寸和曲面法矢转换为刀具路径,其难点在于复杂的求交和迭代运算需要较大的计算量. CC法规划的轨迹具有较高的加工效率,主要适应于那些参数线分布不均匀的曲面以及复杂组合曲面. CL法主要根据球头刀的法矢自适用性,主要通过迭代等方式直接保证刀具与被复杂曲面在等距面上相切而得到的一组刀具轨迹,并根据精度要求确定最大残余高度来计算等距面的间距,其整体加工效率一般. Ding^[14] 基于等照光度法对复杂曲面进行区域划分,截面的约束平面间距根据所划分的不同区域进行调整,是一种具有自适应的截面算法. 陈涛^[15] 提出了一种基于曲率的截平面法,通过曲面刀触点处法平面的曲率控制刀具后跟角的变化来规划刀位轨迹.

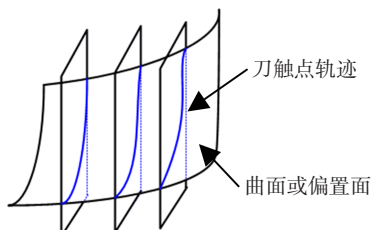


图5 截面线法示意图

2.2.4 等残高法

等残高法是针对球头刀提出的一种刀具轨迹规划方法,等残高法具备的基本条件是球头半径和残余高度精确度要求和初始的刀具轨迹. 其中残余高度 h 由刀触点的有效切削半径 r 和被加工复杂曲面的行距方向的法曲率 R 和行距 L 决定,几何关系简图如图6所示;而初始刀具路径根据曲面的最长边界曲线选定,为了简化计算可以进行离散处理,根据表面精确度要求视残余高度为恒定不变来计算行距等参数去搜索求出下一条轨迹线. 正是在设定切削行之间的残余高度相等的约束下,可以最大限度的利用了刀具的切削宽度,加工出的曲面残余高度均匀一致,对于高速铣削加工,有利于减小切削振动,加工表面质量最高,刀具轨迹最短,加工效率最高,其难点是相邻路径迭代算法复杂. 国外 Feng^[16] 论证了等残余高度线的切向量不平行与相邻的刀具路径,应用等残余方法思想根据刀位点迭代搜索能够快速计算出等残余高度点,同理得到相邻刀位轨迹线. 国内较早研究的杨勇生^[17] 提出了实质是等残余高度法的非均匀偏置法,通过控制残余高度,将一条等参数边界曲线作为初始轨迹,经过非均匀偏置生成下一条刀具轨迹.

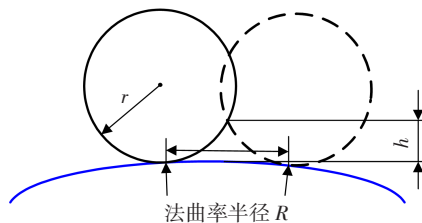


图6 残余高度几何关系简图

2.3 干涉处理

复杂曲面实际多轴加工中,由于刀轴方向的不不断变化,加工过程中极易发生刀具干涉. 最常见的干涉为: 全局干涉又称碰撞干涉,指机床主轴头或刀具体碰撞曲面的其它部位、夹具或床身;局部干涉,由于刀具尺寸或规划不合适导致刀具切入被加工曲面不该切除的部分产生过切或欠切,如图7所示为复杂曲面零件加工中的干涉示意图. 干涉处理首先要对干涉进行检测,然后是干涉的避免,本文研究主要归纳为以下几种方法.

1) 扫掠法. 扫掠法通过判定刀具扫描体与工件是否相交来确定是否发生干涉. 扫掠法适于更全面的考虑刀具运动过程中的碰撞情况,优点是可以处理动态干涉,缺点是刀具扫描体构造困难. 刀具扫描体的确定是其中的关键难点,目前一般采用包络理

论,用刀具运动包络面表示刀具运动所形成的扫掠体. Chiou^[18] 针对五轴加工相切公式首次提出了刀具扫掠体的显式表达式. 严思杰^[19] 通过建立刀具刃口回转面的数学模型,建立了五轴加工刀具刃口回转面包络的解析表达式. 朱利民^[20] 又利用双参数球族包络理论推导出刀具在一般空间运动的扫掠体包络面的解析方程.

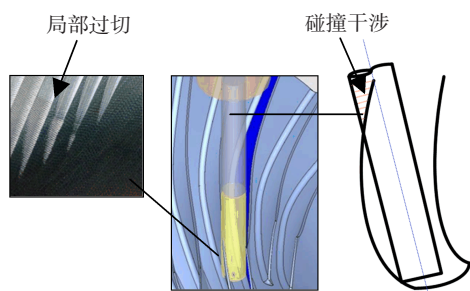


图7 刀具干涉

2) 距离算法. 采用距离法进行干涉检查的基本思路是基于物体间的最小有向距离为依据判断的. 蔡永林^[21] 用解析的方法直接判定刀具轴线与复杂曲面的最小距离是否小于刀具半径,小于则有干涉发生,并进行了修正. 全局干涉的判断是刀具曲面或主轴头部件与工件曲面之间的最小距离是否小于安全距离. 其研究主要集中在曲面与曲面只讲的最小距离问题上. 距离法的优点在于理论简单,较容易实现,便于干涉的修正. 缺点在于对于过于复杂的曲面间距离求解算法较复杂.

3) 凸包法. 此方法利用复杂曲面的凸包特性,将曲面分解成多面体,判定刀轴与多面体有无相交来检查干涉. 主要涉及非均匀有理 B 样条、Bezier 和 NURBS 曲线曲面. 特点是能快速的判定出干涉问题,但精度取决于多面体的逼近程度. Lee^[22] 采用此法在五轴加工中提出了两级判定干涉算法,即确定干涉粗判定后进入干涉精判定,明显提高了精度.

4) 层次包围盒法. 层次包围盒法的基本思想是判定对象的近似简化,把复杂的几何体采用几何特性简单的包围盒近似描述,构造树状层次结构逼近几何对象. 进行检查时首先检查对象的包围盒是否相交. 若不相交则它们所包围的对象不发生干涉,若相交还需要遍历子结点是否发生干涉,到达叶结点后再进行几何对象之间的精确碰撞检测. 其特点是相对简单,能快速判定出非干涉部分,可以提高检测的效率,但其包围盒的简化构造难度较大. Ding^[23] 采用 OBB 与八叉树法对五轴加工中的全局干涉进行了研究. 国内彭芳瑜^[24] 采用动态 OBB 层次包围

盒方法,通过包围盒分组以及运动趋势判断等手段,实现了全局干涉碰撞检测效率的提升.

2.4 刀轴矢量优化

刀轴矢量优化在复杂曲面多坐标加工中是至关重要的. 在保证不干涉的条件下,刀轴矢量的优化主要是优化有效的最大加工带宽和允许的最小残余高度,同时尽量优化刀轴矢量使其平滑过渡,来最后实现复杂曲面加工精度和效率的提高,其中刀轴矢量的光顺优化关系到加工过程的平稳性和运动学非线性误差. 目前主要的优化思路是:在构建的可行空间下,再进行刀轴矢量优化,其中可行空间即为无干涉和机床工作范围条件下的可行区域. 目前的大量相关研究主要在实现加工效率最大化和刀轴的光顺优化上. Lee^[25] 给出了在机床工作范围条件下,刀具切削宽度最大化的刀轴矢量确定算法,实现了无碰撞、无曲率干涉、无刀底干涉和加工效率的提高. 实际加工中后跟角和侧偏角决定了刀轴矢量,张莹^[26] 分析了加工带宽与刀轴倾角之间的函数关系,以最大化加工带宽为目的优化侧偏角,以曲率匹配原则自动计算满足局部可铣条件的后跟角. 针对刀轴的光顺优化研究,罗明^[27] 在构建的可行空间映射 C 空间下,基于机床运动学条件给出了刀轴矢量光顺优化算法. 毕庆贞^[28] 在给出的刀触点网格可行空间中,建立了刀轴矢量整体光顺模型与算法,此方法可以在进给和相邻行两个方向上达到了刀轴矢量的光顺.

3 刀具轨迹规划研究展望

3.1 NURBS 曲线插补

目前复杂曲面加工轨迹中大都将曲面曲线离散成大量的微小直线段去高精度的插补曲线,使得刀具路径难以按照理想的光顺轨迹走刀,大量的程序段数据量不仅会造成加工效率的降低,并且不断改变的实际进给速度也影响了表面质量. 如图8所示,在拐点处 NURBS 曲线插补和直线插补对比的刀具轨迹变化.

近些年来发展起来的研究热点 NURBS 曲线插补刀具轨迹,在一定的变化条件下加工速度改变较小甚至无需改变. 其可以改善上述缺点,不但提高加工精确度和表面质量,而且可极大地提高加工效率. 国外的试验研究表明,NURBS 曲线插补加工刀轨进给速度可以提升三成,程序量可达到传统直线圆弧插补程序量的 10 % 甚至 1 %^[29]. 现有五轴 NURBS

刀具轨迹的生成方法是将 G 代码转换为 NURBS 插补代码。陈良骥^[3]就是根据这一思路,采用一致的节点矢量,分别给出了刀位和方位的双插补样条,提出了插补方法和代码格式,应用 C++ 实现信息提取,使用数值分析方法实现即时插补,程序量大为减少,同时大幅改善了传统插补的加工效率和表面精确度。但是,现状是生成了 NURBS 刀具轨迹后,由于大部分数控系统不支持的原因,依然无法实现。已知国外的许多新型数控系统已经配备了先进的 NURBS 曲线插补功能,如: Siemens 的 840D、Fanuc 的 16i 等数控系统。而这样的关键核心技术是封锁的,国内的相关研究急需发展。

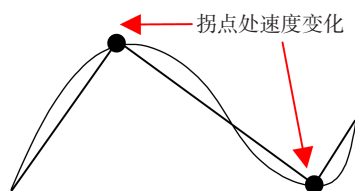


图8 直线插补和 NURBS 插补的刀具轨迹对比

3.2 刀具的智能优选组合

在复杂曲面零件刀具轨迹规划中,刀具选择是其中非常关键的一部分。刀具的选择关系着复杂曲面加工的相关算法应用和干涉问题,又影响着加工效率和表面质量。目前,刀具的类型和结构尺寸都是凭借研究人员的经验和初步的选择^[3],而非依据曲面分析和不同的加工方法去选择最合适的刀具。并且相关的以成本、效率为优化目标的刀具选择问题的研究还未成熟,特别是当前加工中心中的自动刀库系统的普及应用,当前依然鲜有商用 CAM 系统能够提供刀具优选的支持模块,仍需用户凭借经验去选择类型和输入参数。因此,研究加工刀具智能优化组合使复杂曲面刀具轨迹规划总体加工效果达到最佳应是一个重要的研究方向。

4 结 语

综上所述,复杂曲面规划的刀具轨迹使用刀具主要有球头、平底和环形旋转铣刀,虽然近年来在复杂曲面的非球头刀加工方面取得了很多的理论研究成果,但真正在工程中获得实际应用的却为数不多,应用最为广泛的仍然是球头刀;根据刀具轨迹参数计算方法的不同,目前应用比较广泛的算法有很多种,其中等残高法由于残余高度恒定约束的原因,使其兼有加工表面质量均匀和高效率的优点,应用较

为普及广泛;碰撞干涉的精确检测和修正在实际应用中仍然很难实现,而最现实的难点莫过于现有先进算法实现难度大且较难满足实际情况。因此,现阶段仍然需要将成熟的算法在计算机辅助设计和制造上去真正实现应用。随着航空发动机复杂曲面结构零件更加复杂,对高效率、高精度的数控加工中刀具轨迹规划研究提出了更高的挑战,面临与国外的巨大技术差距,我国在此研究领域还有待进一步提高。

参 考 文 献:

- [1] 马建宁, 杨海, 方红文, 等. 新一代航空发动机先进制造技术 [J]. 航空制造技术, 2008(3): 61-63.
- [2] 赵晓强. 航空难加工材料特点及其特殊加工方法 [J]. 航空制造技术, 2009(23): 50-51.
- [3] 任军学, 张定华, 王增强, 等. 整体叶盘数控加工技术研究 [J]. 航空学报, 2004, 25(2): 205-208.
- [4] SURESH K, YANG DC. Constant Scallop-height Machining of Free-form Surfaces [J]. Journal of Engineering for Industry, 1994, 116: 253-259.
- [5] LIN R, KOREN Y. Efficient Tool-path Planning for Machining Free-form Surfaces [J]. Journal of Engineering for Industry, 1996, 118: 20-28.
- [6] LEE YS. Non-isoparametric Tool Path Planning by Machining Strip Evaluation for 5-axis Sculptured Surface Machining [J]. Computer-Aided Design, 1998, 30: 559-570.
- [7] 杨德武, 彭芳瑜, 周云飞. 基于主曲率匹配的五坐标刀位轨迹优化 [J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(12): 8-11.
- [8] VICKERS GW, QUANK W. Ball-mills Versus End-mills for Curved Surface Machining [J]. Journal of Engineering for Industry, 1989, 111: 22-26.
- [9] YOON JH, POTTMAN NH, Lee YS. Locally Optimal Cutting Positions for 5-axis Sculptured Surface Machining [J]. Computer-Aided Design, 2003, 35: 69-81.
- [10] 陈良骥, 程俊伟, 王永章. 环形刀五轴数控加工刀具路径生成算法 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 205-212.
- [11] 李世杰, 田少华. 数控铣削中刀具路径的拓扑分析 [J]. 河北工业大学学报, 1998, 3: 70-74.
- [12] LIN R, KOREN Y. Efficient Tool-path Planning for Machining Free-form Surfaces [J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1996, 118(1): 20-28.
- [13] 吴福忠, 柯映林. 组合曲面参数线五坐标加工刀具轨迹的计算 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(10): 1247-1252.
- [14] DING S, MANNAN M, POO A, et al. Adaptive Iso-planar Tool-path Generation for Machining of Free-form Surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(2): 141-153.
- [15] 陈涛, 罗宏志, 钟毅芳, 等. 基于曲率的曲面加工刀位轨迹生成算法 [J]. 工程图学学报, 2001, 22(2): 29-34.
- [16] FENG H, LI H. Constant Scallop-height Tool-path Generation for

- Three-axis Sculptured Surface Machining [J]. Computer - Aided Design, 2002, 34(9): 647 - 654.
- [17] 杨勇生, 王珉. 复杂曲面数控加工中刀具轨迹生成的非均匀偏置法 [J]. 上海海运学院学报, 1999, 20(1): 11 - 15.
- [18] CHIOU CJ, LEE YS. Swept Surface Determination for Five-axis Numerical Control Machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 1497 ~ 1507.
- [19] 严思杰, 周云飞, 陈学东. 五轴 NC 加工中刀具运动包络面的计算 [J]. 中国机械工程, 2005, 16(23): 2120 - 2124.
- [20] 朱利民, 郑刚, 张小明, 等. 刀具空间运动扫描体包络面建模的双参数球族包络方法 [J]. 机械 工程学报, 2010, 46(5): 145 - 149.
- [21] 蔡永林, 席光, 樊宏周, 等. 曲面 5 轴加工中全局干涉检查与刀位修正 [J]. 机械 工程学报, 2002, 38(9): 131 - 135.
- [22] LEE Y, CHANG T. 2-phase Approach to Global Tool Inteference Avoidance in 5-axis Machining [J]. Computer-Aided Design, 1995, 27(10): 715 - 729.
- [23] DING S, MANNAN MA, POO AN. Oriented Bounding Box and Octree Based Global Interferenced Etection in 5-axis Machining of Free-form Surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(13): 1281 - 1294.
- [24] 彭芳瑜, 苏永春, 邹孝明, 等. 大型螺旋桨五轴加工中基于方向包围盒层次树的全局干涉碰撞检测 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(3): 304 - 307.
- [25] LEE RS, LEE JN. Interference-free Tool Orientation Determination by a Virtual Enveloping Element for five-axis Machining of a Free-form Surface [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, PartB: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(12): 1683 - 1693.
- [26] 张莹, 张定华, 吴宝海, 等. 复杂曲面环形刀五轴加工的自适应刀轴矢量优化方法 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(8): 945 - 948.
- [27] 罗明, 吴宝海, 李山, 等. 自由曲面五轴加工刀轴矢量的运动学优化方法 [J]. 机械 工程学报, 2009, 45(9): 158 - 163.
- [28] 毕庆贞, 王宇哈, 朱利民, 等. 刀触点网格上整体光顺五轴数控加工刀轴方向的模型与算法 [J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(10): 1159 - 1168.
- [29] YAU Hong-Taong, KUO Ming-Jen. NURBS Machining and Feed Rate Adjustment for High-speed Cutting of Complex Sculptured Surface [J]. International Journal of Production Research, 2001, 39(1): 21 - 41.
- [30] 陈良骥, 王永章, 富宏亚. 五轴联动双 NURBS 曲线的生成与插补方法研究 [J]. 机械 制造, 2006, 44(1): 67 - 70.
- [31] 黄久超, 刘献礼, 杨树财, 等. 基于 UG 的开式整体叶盘五坐标加工工艺方法 [J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(3): 30 - 33.

(编辑: 付长缨)

(上接第 29 页)

- [1] 吕品. PLC 和触摸屏组合控制系统的应用 [J]. 自动化与仪表, 2010, 31(8): 45 - 51.
- [2] 樊丽颖, 武俊峰, 刘宏亮, 等. 不确定系统的变采样控制 [J]. 电机与控制学报, 2011(11): 90 - 94.
- [3] 王会香, 孙全颖. 自动涂胶机械手的 PLC 控制 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7(3): 17 - 18.
- [4] 宋芳, 孙全颖. PLC 和电子称之间的通讯技术研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(4): 43 - 45.
- [5] 陈贤国, 陈格云, 顾佳琪, 等. 胶印机 PLC 与 HMI 信号接口的框架研究 [J]. 上海电气技术, 2011, 4(3): 26 - 30.
- [6] 张庆玲, 李玉昆. 基于 HMI 与 PLC 的液位监控实验系统设计 [J]. 实验技术与管理, 2011, 28(6): 79 - 81.
- [7] 韩克镇, 孙全颖, 王洪运. 基于 PLC 的光栅位移测量技术的研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005(5): 76 - 79.
- [8] 王洋, 曾雪琴, 范剑英. 汽车牌照字符识别系统设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(1): 90 - 95.
- [9] 李辉. 基于 PLC 和智能仪表的自动称重二级控制系统 [J]. 电气自动化, 2006, 28(2): 70 - 71.
- [10] 韦琦, 吴京辉. 基于独立分量分析的运动目标精确检测 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, 15(5): 40 - 44.
- [11] 李远伟, 王常虹, 伊国兴, 等. 涵道式无人机鲁棒控制系统设计 [J]. 电机与控制学报, 2010(9): 81 - 87.
- [12] 何朕, 饶丹, 王广雄, 等. 控制系统的脆弱性与鲁棒性 [J]. 电机与控制学报, 2011(4): 80 - 84.
- [13] 朱宝森, 王永红, 庞兵. 生产线用失重式连续配料称重系统设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(3): 32 - 36.

(编辑: 付长缨)