DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2008.13.007

自适应加工技术在整体叶盘制造中的应用

Application of Adaptive Machining Technology in Blisk Manufacturing

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室　张定华　张　莹　吴宝海　李　山　张莎莎

张定华

西北工业大学机电学院院长，现代设计与集成制造技术教育部重点实验室主任，教授，博士生导师，主要研究方向为高速切削工艺、多坐标数控加工理论、叶片叶盘类零件的高效精密数控加工及无损检测等。

自适应加工技术通过数控加工过程中加工区域提取、工件装夹定位、余量优化和变形误差的自适应控制，实现大飞机发动机整体叶盘的高效精密加工。它不仅能应用于整体叶盘复合制造工艺流程中的精密数控加工，还适合于叶盘、叶片类零件的修复及再制造加工，同时也是提高传统粗加工－半精加工－精加工效率和精度的有效方法。

作为大型飞机的心脏，大推力高涵道比涡扇发动机普遍采用了复合材料或钛合金空心宽弦叶片、整体叶盘、整体叶环、单晶叶片等先进技术。为确保我国大飞机研制的顺利进行，必须采用先进的理论和方法突破上述关键零部件制造难题。

自适应加工技术不仅能用于大飞机发动机整体叶盘复合制造工艺流程中的精密数控加工，还适用于先进叶片、叶盘类零件的修复及再制造加工，同时也是提高传统数控加工精度和效率的有效方法。

本文以大型飞机发动机整体叶盘为研究对象，结合其结构工艺特点和目前西北工业大学已经开展的研究工作，讨论自适应加工技术在整体叶盘生产和修复中的应用及其相关的关键技术。

整体叶盘的结构特点及制造工艺

整体叶盘是20世纪80年代中期西方发达国家在航空发动机设计中采用的最新的结构和气动布局形式。它将叶片和轮盘设计成一个整体的结构，省去了传统连接需要的榫头、榫槽和锁紧装置，减少了结构重量和零件数量，还避免了榫头气流损失，使发动机结构大为简化。同时，整体叶盘在气动布局上采用了新的宽弦、弯掠叶片和窄流道，从而进一步提高了气动效率。据国外报道，采用整体叶盘结构可使发动机重量减轻20%～30%，效率提高5%～10%，零件数量减少50%以上。因此，整体叶盘在先进发动机上得到了广泛应用。

与上述优点相对应，航空发动机

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

整体叶盘的制造工艺面临着非常严峻的挑战。由于整体叶盘结构复杂，加工精度要求高，叶片型面为空间自由曲面，形状复杂且通道开敞性差，而且为适应高温、高压、高转速的工作条件，整体叶盘广泛采用钛合金、粉末高温合金等高性能金属材料和钛基、钛铝化合物等先进复合材料，材料的可加工性差，造成整体叶盘的综合制造技术成为世界级的技术难题。

目前，整体叶盘制造主要采用几种复合制造工艺：精锻毛坯＋精密数控加工；焊接毛坯＋精密数控加工；高温合金整体精铸毛坯＋热等静压处理等。利用五坐标数控加工中心实现整体叶盘加工是目前航空发动机风扇及压气机整体叶盘研制的主要方法之一，其关键是需要解决数控编程中的通道五轴加工方式的确定、多约束加工干涉和复杂的刀轴矢量计算等技术问题，以及加工过程中的切削参数确定、颤振抑制、弱刚性系统变形控制等工艺问题。这种加工方法的显著优点是加工设备简单、精度高；缺点在于加工过程中要切削大量金属，加工效率低、周期长、成本高，因此不适于大型及超大型风扇的加工。

近年来，随着摩擦焊技术的迅速发展，线性摩擦焊技术已经应用于罗·罗、普惠等国外先进航空发动机制造厂家的整体叶盘加工中。采用线性摩擦焊加工整体叶盘时，首先分别加工单个叶片和轮毂，轮毂的轮缘处已作好连接叶片的凸座，而叶片根部作有较厚的裙边；第二步将叶片紧压在轮盘轮缘的凸座上，使其高频振荡，造成叶片底部表面与凸座表面间高速摩擦，产生足以使两者之间原子相互移动所需的高温，然后停止振荡并保持将叶片紧压在轮毂轮缘上，直到两者结合成一体为止；最后采用五坐标数控加工的方式将多余材料铣掉。

综合目前整体叶盘的制造方法可以看出，线性摩擦焊接方法具有节省材料、减少加工时间、综合性能高等优点，是目前最为理想的整体叶盘加工及修复的方法。就其实现过程而言，线性摩擦焊技术得到的是相当于已完成粗加工的毛坯，最后的精加工过程仍然需要五轴数控加工的方法实现。与传统的数控加工方法相比，这种复合工艺的显著优点在于可以节省大量的贵重金属，加工效率大幅提高。线性摩擦焊技术还可以将两种不同的材料焊接在一起，这样可以根据叶片和轮毂工作条件的不同选择相应的材料，转子性能及重量可进一步优化。

另外，与常规结构不同的是，整体叶盘应用面临的一大难题是叶盘的修复问题。由于发动机使用过程中不可避免地会遇到一些外物，特别是鸟打伤叶片的情况，采用常规的设计可以轻易地更换损伤的叶片，而整体叶盘这种结构却不能简单地更换叶片。因此如果没有方便而适用的损坏叶片修复方法，整体叶盘的应用就会受到限制。而利用线性摩擦焊技术，可以将损坏的叶片切去后再焊上新叶片，从而实现对被损坏叶片的修复。

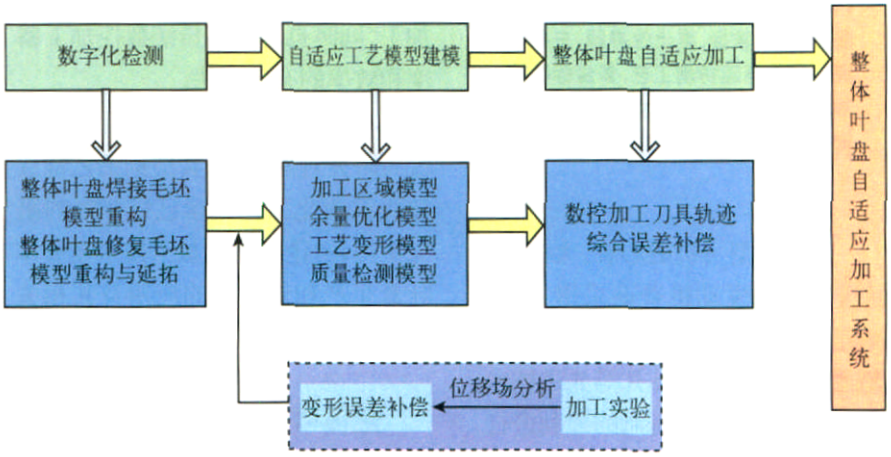
无论是整体叶盘的加工还是修复，线性摩擦焊过程相当于完成零件的粗加工过程，而更严格的加工精度、形状、位置要求需要最终的数控加工手段来保证。因此，研究如何在整体叶盘线性摩擦焊结果的基础上实现高效、高精和自动的数控加工成为航空领域的一项重要课题。与传统的数控加工工艺相比，前期焊接工艺对后期数控加工过程的影响主要表现在以下几个方面：

（1）由于焊接精度和装夹方式改变的影响，导致整体叶盘焊接毛坯的数控加工基准可能发生变化。

（2）焊接变形的影响使得不同叶片的变形程度与变形结果均存在差异，叶片焊接结果的一致性差，导致焊接毛坯数控加工过程定位困难和余量分布不均匀，从而影响整个叶盘的加工精度。

（3）在整体叶盘修复中，由于叶片零件的部分缺失，必须通过对已有模型的重构和延拓实现对缺失部分模型的重建。同时，叶盘在经过长时间运行后，其叶片的实际形状与理论模型之间存在差异，在重建缺失部分模型的过程中还必须充分考虑叶片实际模型与理论模型之间的变形，实现叶片修复部分与已有部分的光滑过渡。

（4）为满足整体叶盘加工及修复的高精度要求，数控加工过程中必须考虑前期变形（如焊接变形和叶盘运行导致的叶片形状变化）和数控加工变形的综合影响，并实现综合补



整体叶盘自适应加工系统

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

偿。

可以看出，与传统数控加工整体叶盘不同的是，焊接毛坯+数控加工这种复合制造工艺背景下整体叶盘的数控加工基准、余量分布、轨迹规划及变形误差补偿等均依赖于叶盘毛坯的实际结果。因此，利用数字化检测的手段对实际的叶盘毛坯进行快速测量和重构，并进一步实现数字化测量－模型重构－数控加工一体化的集成加工，是提高大飞机发动机整体叶盘的制造精度、加工效率和自动化水平的关键核心技术，这就是整体叶盘的自适应加工技术。

自适应加工技术的应用现状及系统框架

自适应加工技术实现了数字化检测、模型重构及配准、装夹定位及余量优化、数控加工等数字化制造领域多项技术的有机集成，是整体叶盘复合制造工艺背景下的一种系统解决方案。随着数字化检测技术的不断发展，其检测精度与速度已经能够满足现代生产流水线的需求，这为自适应加工技术的研究和应用创造了必备条件。基于毛坯的实际检测结果，通过模型重构来自动优化零件数控加工过程的装夹定位、余量分布和加工轨迹规划，并实现工艺变形和加工变形的综合补偿是整体叶盘自适应加工的本质所在。自适应加工技术不但涵盖了传统数控加工中的CAD/CAM技术、多轴数控编程技术，还涉及到数字化检测、逆向工程等多项相关技术，成为目前先进制造技术研究与应用中不可缺少的一部分。

近年来，国内外针对自适应加工技术在航空发动机制造中的应用开展了不同层次的研究工作。美国GE公司通过实时监测加工过程，利用后置处理器修改加工程序，完成了复杂铸件的自适应加工。英国Delcam公司利用自适应加工的思想通过对未知毛坯的在线测量，判断毛坯形状和余量分布，并自动计算零件的最优装夹方位。

大飞机航空发动机的研发将更加注重其设计、制造和维护过程中的可靠性、经济性和可维修性。因此，在大型客机及运输机发动机的设计制造过程中，自适应加工技术越来越多地应用到大型叶片及整体叶盘的修复加工中，其典型应用案例是欧盟第六框架下优先发展的航空空间项目——航空发动机涡轮部件的自动化修复系统（AROSATEC），该系统集成了德国BCT公司的自适应加工技术，改进部件修复过程，现已应用于德国的MTU公司及爱尔兰的SIFCO公司的叶片修复生产。

在国内，整体叶盘及线性摩擦焊技术的工程应用尚处于起步阶段。西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室在整体叶盘的五轴数控加工方面开展了大量的研究工作，积累了丰富的经验。不仅实现了整体叶盘冷加工的技术跨越，综合技术达到国际先进水平；而且，从“十五”计划开始，实验室在自然科学基金、航空基金等的支持下，同时开展了整体叶盘摩擦焊接装备及相关工艺的研究，在部分理论及技术方面的研究取得了重要进展。为尽快突破整体叶盘高效加工中的关键技术，实现整体

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

叶盘的工程化生产，实验室在自适应加工方面也已开展了预先研究工作。本文针对实验室开发的整体叶盘自适应加工系统的构成及涉及的若干关键技术进行简要介绍。

整体叶盘自适应加工系统主要有3个基本模块：一是数字化检测模块，测量当前加工零件的几何信息；二是自适应工艺模型建模模块，其主要功能不仅包括数控加工区域模型的建立，还包括余量优化模型、工艺变形模型以及质量检测模型的建立；三是自适应加工模块，目的是生成数控加工综合误差补偿的刀具轨迹。

自适应加工系统3个模块相互联系，通过文件的传递转换相互作用。其中，基于数字化检测的自适应工艺模型是自适应加工的基础。自适应工艺模型是描述加工零件加工区域、装夹方位、余量分布、变形控制和质量检测的统一模型。按照加工零件和工艺流程的不同，自适应工艺模型存在不同的表达形式，包括测量点集、三角网格、曲面特征、参数模型等，但都与加工零件的当前方位和形状相适应。根据自适应工艺模型规划加工轨迹，可实现整体叶盘的高效精密数控加工。

自适应加工系统涉及的关键技术

自适应加工系统是集数字化检测、自适应工艺建模、自适应加工于一体的整体叶盘复合制造工艺系统解决方案。在模型重构的基础上，通过分析、优化、变形等操作建立自适应工艺模型，可实现整体叶盘快速装夹和变形控制的高效精密数控加工，该系统涉及的关键技术主要有以下几方面：

1 模型重构与分析方法

模型重构与分析方法是自适应工艺模型建立的基本方法，用于整体叶盘的修复毛坯加工和质量检测。其中，快速精确地提取数控加工区域边界是整体叶盘叶片修复的关键技术问题。

目前，加工区域模型的建立主要有两种方法：一种是直接对比测量点集与理论模型，建立毛坯误差分布，提取待加工区域边界；另一种是根据数字化检测结果，先采用逆向工程中模型重构的方法建立待加工零件的无缺陷模型，再与检测结果对比，建立重构的模型误差分布，提取加工区域边界。

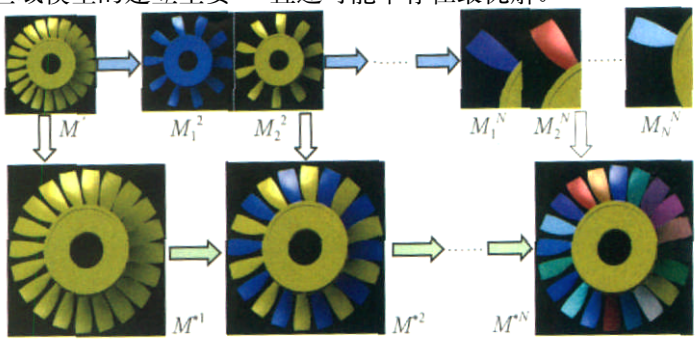
2 工件定位与余量优化技术

整体叶盘焊接毛坯由于形状复杂，装夹调整困难，采用一般夹具往往难以保证装夹和定位精度，而设计专用夹具则会导致成本高、周期长等问题。通常初步定位和夹紧后，利用机床检测功能来找正工件位置，并同时实现加工余量的优化分配。

根据余量分布的不同，工件快速装夹主要有两种方式：

一是针对整体叶盘的部分结构或区域加工，而其他部分可能已完成了加工或不需要加工，如叶片的叶尖修复加工或叶盘过渡区域加工等，为了保证加工的一致性，通过提取若干定位特征点计算坐标变换矩阵，实现整体叶盘的快速定位。此时的定位方法与数字化检测中的配准方法相同。

二是针对带余量的整体叶盘焊接毛坯加工，关键是找出加工坐标系和设计坐标系之间的坐标变换关系，通过迭代计算毛坯模型的测量点和数字设计模型的对应点之间的刚体变换来解决。但是，焊接变形引起各个叶片的变形均存在差异，在保证焊接毛坯和设计模型方位配准的同时，还必须增加“单个叶片余量分布尽可能均匀”的约束条件，这在一定程度上增加了优化求解算法的难度，并且还可能不存在最优解。



余量优化的自适应工艺模型建立过程

因此，本文提出基于轴对称原则的整体叶盘余量优化算法。在带约束遗传算法求解的基础上，建立余量优化自适应工艺模型，实现整体叶盘的快速装夹和精密数控加工。

设焊接整体叶盘毛坯的测量点集 $P=\{P_1,P_2,\cdots\cdots,P_n\}$，记设计坐标系中整体叶盘理论模型为 M，其中包含了 N 个叶片，自适应工艺模型建立算法主要过程如下：

(1) 建立叠加加工变形误差补偿的整体叶盘模型 M'；

(2) 以测量点集 P 与整体叶盘模型 M' 实现方位配准，若存在最优解，通过模型 M' 坐标变换建立自适应工艺模型 M^{*1}，退出；若不存在最优解，转到下一步；

(3) 按照轴对称原则提取整体叶盘部分模型 M_1^2，M_2^2，并同时划分测量点集 P 得 P_1，P_2，分别实现方位配准，判断是否存在最优解。若存在，建立自适应工艺模型 M^{*2}，退出；若不存在，进一步分解，直到以整体叶盘单个叶片作为方位配准对象，建立自适应工艺模型 M^{*N}。

3 工艺变形模型建模方法

在整体叶盘复合制造工艺加工中，由于前期工艺变形的影响，原始理论模型可能不再适用于最后的精密数控加工，如叶盘焊接的过渡区域和叶尖修复加工。此时的加工定位基准、轨迹分布等均依赖于前期工艺

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

加工结果——描述工艺变形的自适应模型，并且还必须保证过渡区域的光滑连接。

但是，整体叶盘叶片模型复杂多样，而且变形各不相同，同时，还存在一定的特征约束，如前后缘半径等，难以构造过渡模型。在数字化检测方式下，如何突破有限的测量数据精确表征工艺变形，并建立自适应工艺模型是自适应加工系统的关键技术问题。

因此，基于自由曲面变形技术，通过多尺度层次建模方法，实现测量点集、曲面特征、参数模型等不同层次数据表示之间的快速转换，建立复合制造工艺变形的自适应模型，为后续的精确变形误差补偿提供实测模型基础。

4 变形误差补偿技术

通常的CAD/CAM系统均以零件的理论模型进行刀具轨迹的规划和工艺参数选取，而在加工过程中，由于切削力的作用，刀具和工件均可能产生变形，导致实际加工表面与理论值之间存在较大误差，尤其是薄壁叶片类零件。另外，加工产生的残余应力也会引起变形误差。因此，研究薄壁零件加工变形误差补偿技术意义重大，同时也有必要创新集成到整体叶盘的自适应加工系统中。

针对薄壁零件数控加工变形控制研究，目前国内外的研究大多采用数值模拟技术分析加工的不同方面。当工件刚度远大于刀具刚度时，视工件为理想刚性，研究刀具变形对表面加工误差的影响。而从工件变形角度出发，可以通过加工试验，建立变形误差位移场，修正刀具轨迹，实施变形误差补偿。但是此时的误差分析缺少实测零件模型特征信息，无法实现精确的综合误差补偿。

自适应加工技术涵盖的变形误差控制不仅包括了前期工艺变形控制，而且还包括了加工过程的变形误差控制。因此，基于工艺变形的自适应工艺模型，在参数平面叠加双重变形误差，重新生成刀具轨迹，能够实现整体叶盘变形误差综合补偿的自适应加工。

结束语

自适应加工技术通过数控加工过程中加工区域提取、工件装夹定位、余量优化和变形误差的自适应控制，实现大飞机发动机整体叶盘的高效精密加工。它不仅能应用于整体叶盘复合制造工艺流程中的精密数控加工，还适合于叶盘、叶片类零件的修复及再制造加工，同时也是提高传统粗加工－半精加工－精加工效率和精度的有效方法。目前，西北工业大学已初步建立了整体叶盘自适应加工系统，并通过了试验验证，对大飞机发动机整体叶盘的复合工艺制造和修复再制造加工具有重要的实用价值。 （责编 晓霖）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net