



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

毕业设计（论文）

一类流线曲面数控铣削加工工艺研究

Research on CNC Milling Process of Streamline Surface

姓 名 李璿

学 院 机械工程学院

专 业 机械电子工程

指导教师 李传军

职 称 教授

完成时间 2020年05月25日

天津中德应用技术大学

本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

学位论文指导教师签名：

年 月 日

摘 要

本文首先对流线型曲面零件的几何工艺特征进行归纳和整理,然后建立典型叶片三维模型,对典型叶片进行数控铣削的三轴加工工艺设计及数控加工刀轨设计,根据叶片多轴数控加工的特点制定出合理的工艺路线,利用UG对刀具轨迹进行运算仿真,最后进行加工实验,完成典型叶片的数控铣削加工。

流线类零件是一般自由曲面的一种,一般为复杂难加工薄壁零件,其在航空航天及能源动力领域的广泛应用和关键作用,叶片几何形状对其性能有重要影响,决定了其对加工精度制造质量的重要性。故研究该类零件的加工过程和加工方法对提高加工效率以及质量等有极大的促进作用。叶片类零件一般为流线曲面,空间扭转大,加工困难,精密铸造锻造和数控加工技术为该类零件的主要方法,该类零件在建模过程中由于曲线曲面的拟合方式不同会引入误差,选用恰当的传输规范可减少该模型误差。其几何特征几乎都为空间扭转薄壁特征,颤振和变形在此类零件加工中应首要考虑,而寻找高效高质量的切削参数是此类零件加工技术研究的核心;加工中夹紧方式和夹紧力大小会对零件的精度产生较大影响;根据实验发现采用多轴联动数控加工可以一次安装定位,大大减少重复定位误差的影响,且可使刀轴以相对加工表面合适角度进行切削,得到较好的加工质量和切削效率。流线类曲面的加工方式和工艺参数集中于数控编程过程,更全面的刀轨生成算法和后处理方式是加工工艺的体现方式。

本文通过对叶片常规加工过程的描述和加工工艺的理论分析,分析了各种加工方案的优缺点,探讨了加工路径的合理生成,并且运用UG软件实现了上述过程。

关键词: 流线型曲面; 自由曲面; 叶片; 数控加工; 仿真

ABSTRACT

In this paper, the geometric process characteristics of streamlined surface parts are firstly summarized and sorted out, and then a three-dimensional model of typical blades is established, and the three-axis machining process design and CNC tool path design of typical blades are CNC milled. According to the multi-axis CNC machining of blades The characteristics of a reasonable process route are formulated, and the UG is used to simulate the tool path, and finally the machining experiment is carried out to complete the CNC milling of the typical blade.

Streamlined parts are a type of general free-form surface, which are generally complex and difficult-to-machine thin-walled parts. Its wide application and key role in the aerospace and energy power fields. The blade geometry has an important influence on its performance and determines its The importance of processing accuracy and manufacturing quality. Therefore, to study the processing process and processing methods of such parts, and to improve the processing efficiency and quality, have a great role in promoting aeroengines and ship power. The blade parts are generally streamlined surfaces, large space torsion, and difficult to process. Precision casting and forging and CNC machining techniques are the main methods of this type of parts. During the modeling process, errors will be introduced due to the different curve and surface fitting methods , Select the appropriate transmission specification can reduce the model error. Almost all of its geometric features are spatial torsion thin-walled features. Chattering and deformation should be considered first in the processing of such parts, and the search for efficient and high-quality cutting parameters is the core of the research on the processing technology of such parts; the clamping methods and The clamping force will have a greater impact on the accuracy of the parts; according to the experiment, it is found that multi-axis linkage CNC machining can be installed and positioned at one time, which greatly reduces the effect of repeated positioning errors, and can make the cutter shaft cut at an appropriate angle relative to the machining surface Get better processing quality and cutting efficiency. The processing methods and process parameters of streamlined surfaces are concentrated in the NC programming process, and a more comprehensive tool path generation algorithm and post-processing method are the embodiment of the processing technology.

This paper analyzes the advantages and disadvantages of various processing schemes through the description of the conventional processing of blades and the theoretical analysis of the processing technology, discusses the reasonable generation of processing paths, and uses UG software to achieve the above process.

Key words: Streamlined surface; Freeform; Blade; CNC Machining; Simulation

目 录

| | |
|-----------------------------|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 课题研究背景及意义 | 1 |
| 1.2 国内外研究现状 | 2 |
| 1.3 研究任务及方案 | 4 |
| 1.4 论文研究的主要内容和章节安排 | 5 |
| 第二章 叶片类零件的几何特征和加工工艺分析 | 7 |
| 2.1 叶片类零件的几何特征 | 7 |
| 2.2 叶片类零件的加工工艺分析 | 10 |
| 第三章 叶片类零件的建模和加工 | 13 |
| 3.1 叶片类零件的建模 | 13 |
| 3.2 典型叶片的加工 | 18 |
| 第四章 叶轮的五轴加工 | 43 |
| 4.1 五轴数控机床 | 43 |
| 4.2 叶轮的五轴加工模拟 | 43 |
| 第五章 总结和展望 | 54 |
| 5.1 总结 | 54 |
| 5.2 展望 | 55 |
| 参考文献 | 56 |
| 附 录 | 58 |
| 致 谢 | 62 |

第一章 绪论

流线是同一时刻不同流体质点所组成的曲线,它所体现出的是该时刻不同流体质点的速度方向。流线型设计^[1]对自然界高速滑行的鸟、鱼的形体的欣赏,以及对大自然界的自然生命科学的研究,广泛应用于飞机、汽车等交通工具的造型设计中,“流线型^[2]”也作为一个视觉样式名词在工业设计中被广泛使用。流线在外观上比较顺眼和平滑,且又比较漂亮宜人,为许多行业的设计师所青睐和喜欢。在与人的描述时通常把具有流线特征的曲线称之为流线型曲线,而流线型曲线所构成的面称为流线型曲面。

1.1 课题研究背景及意义

自由曲面^[3]是工程中最复杂、最经典、最常遇到的曲面。航空、造船、汽车、家用电器、机械制造和其他领域(例如飞机机翼和引擎叶片)的许多部分的形状,或者汽车表面的曲面,以及模具工件的表面都是自由曲面。工业产品的形状大致分为两类或由两类组成,一类仅包含基本分析表面,例如平面,圆柱表面,圆锥表面和称为基本表面的球形表面。大多数机械零件都属于此类。使用描述性几何图形和机械制图,可以完全表示和传输所有包含的几何图形信息。另一个不能由基本分析表面组成,而是由以复杂方式自由变化的所谓自由形式表面组成。例如,几何零件,例如飞机、汽车和轮船。自由形和自由形无法在描述性几何图形和机械制图中清楚地表示,这是工程师要解决的第一个问题。

自由曲面加工包括曲面建模、曲面平滑、轨迹规划和数控编程。其中,加工路径的生成是自由曲面加工的关键,对于形状复杂的自由曲面零件,解决 NC 路径生成中的干涉加工的方法也很重要。该过程概述如下:首先,在要加工的表面上规划刀具路径,确定合理的行走步骤,在给定步骤中检查是否有碰撞,消除碰撞,并在该步骤上确定所需的刀具点。沿着刀具路径,计算每个步骤的刀具位置,它们的有序集在要加工的表面上形成 CNC 刀具路径^[4]。

流线类零件是一般自由曲面的一种,一般为复杂难加工薄壁零件,其在航空航天及能源动力领域的广泛应用和关键作用,叶片几何形状对其性能有重要影响,决定了其对加工精度制造质量的重要性。故研究该类零件的加工过程和加工方法,和提高加工效率以及质量,对航空发动机、轮船动力等有极大的促进作用。

发动机是汽车的“心脏”,而航空发动机是飞机的“灵魂”。这是确定飞机性能的关键因素之一。它也是设备制造领域的顶级和最高端产品之一。其制造技术是业内最高的技术水平,是衡量国家科学技术水平,军事水平以及综合国力,寿命,性能和各种参数的重要标志之一,诸如的发动机参数高度依赖、叶片轮

廓设计和叶片制造水平。

叶片的特点是：结构复杂、品种繁多、几何精度高、加工困难、难以保证加工质量，在空间里表现为三维曲面、尺寸跨度大、承载能力强，一般来说，叶片的加工工作量占整台发动机加工工作量的 30%~40% 之间。

叶片类零件一般为流线曲面，空间扭转大，加工困难，精密铸造锻造和数控加工技术为该类产品的主要方法。叶片的数控加工方法从 20 世纪 70 年代开始研究，目前有侧铣、端铣、扫描铣等方式，实现途径有三轴加工、四轴加工和五轴联动加工。

数控铣床是在一般普通铣床的基础上发展起来的，两者的加工工艺基本相同，但数控铣床是靠程序控制的自动加工机床，其组成和结构与普通铣床有明显的区别。铣削是铣刀旋转做主运动，工件或铣刀做进给运动的切削加工方法，按主轴位置方向分为立式数控铣床和卧式数控铣床，按控制坐标联动轴数分为 2 轴联动数控铣床、2.5 轴联动数控铣床、3 轴联动数控铣床、3.5 轴联动数控铣床、4 轴联动数控铣床和 5 轴联动数控铣床等，数控铣削的工艺特点^[5]主要有以下几点：

①对零件加工的适应性强、灵活性好，能加工轮廓形状特别复杂或难以控制尺寸的零件；

②加工精度高，加工质量稳定可靠；

③生产效率高，工序相对集中。

加工对象广泛，可加工复杂结构件、复杂曲面、五面体等。

1.2 国内外研究现状

传统流线类曲面加工主要有毛坯制造和机械加工两大阶段，毛坯制造有铸造和锻造两大类，铸造工艺多用于涡轮工作叶片和导向器叶片，特别是空心叶片。早期的普通铸造叶片都留有加工余量，随着其发展已发展为熔模精密铸造，近些年发展起来的定向结晶和单晶铸造技术使铸造叶片强度大大提高。传统机械加工主要为榫头的加工、叶身型面的成形加工或仿形加工和安装板以及阻尼台、叶冠、轴颈的加工^[6]。

1.2.1 国内研究现状

如今，无论是军用航空发动机还是民用发动机，中国在发动机硬件和控制系统方面都落后于西方国家，具体表现在设计、材料、技术等方面。这导致航空发动机不可避免的问题，例如发动机寿命缩短，油耗低和稳定性差^[7]。经过多年在中国的研究和生产，昆仑系列发动机和预成型件，沈阳发动机设计研究院根据国家军事标准“航空涡轮喷气发动机和涡扇发动机通用规范”（GJB241-87）开发

了昆仑发动机。这是第一个发布的引擎。智能推力中推涡轮喷气发动机在 2002 年 7 月通过了 259 项国家严格评估，并通过了国家设计和定稿。单位面积上世界上最好的推力引擎。这种类型非常重要。这是中国航空工业发展史上的一个里程碑，已成为世界上第五个由中国自主发展的国家，从模仿，改进和改造进入了一个新的自我发展阶段^[8]。继美国，法国，俄罗斯和英国之后的航空发动机。“秦岭”发动机是通过引进英国 Spey MK202 发动机技术在中国组装而成的产品，由中国航空工业西安航空发动机（集团）公司生产。“秦岭”发动机的建成标志着中国航空发动机发展的新阶段。支持机器为“Hiho”（JB-7/JB7A）。“太行”发动机是中国 606 研制的，是国内第三代大型军用航空轮式风扇发动机，是第一台具有自主知识产权的高性能，高推力加力轮式风扇发动机。目前主要装备中国的第三代高性能 J-10 战斗机。

“十三”计划期间，“两机”项目的重大飞机发动机项目得到了全面实施。我们在整个行业中投入了数千亿美元的专项资金，旨在大幅加快相关行业的快速发展并突破飞机发动机。关键技术是促进发展先进战斗机，重型客机发动机，先进直升机发动机等产品，以及基础研究，技术和产品开发以及中国航空发动机产业体系自主创新要优化。

经过多年的发展和更新，中国的发动机工业已经提高了其设计和制造水平，但航空发动机是非常复杂的机器，其工作条件非常苛刻，内部条件恶劣。温度高且不断变化。高速并能承受各种环境或操作的影响。限制质量和体积，同时产生强推力。与国外知名制造商相比，它可以长时间可靠地运行，并且在许多方面都可以准确地调整控制^[9]。最明显的是，发动机加工与国外先进加工技术之间仍存在很大差距。例如，在整体叶轮的 5 轴铣削中，国外先进制造商的加工效率是国内加工效率的 2-3 倍。在侧面，国外使用 CNC 自动焊接，仍然使用国内的手工电弧焊后电弧方法^[10]。因此，提高设计和制造水平是促进中国发动机工业起飞的基础和关键，这尤其重要。

自 1970 年代以来，一直在研究刀片的 CNC 加工方法。随着数控机床的出现，刀片制造技术发生了重大变化。采用高精度 CNC 技术加工的刀片具有高精度，短制造周期和极大的加工灵活性。用于加工刀片的机床主要是 5 轴联动 CNC 机床，有些还使用 3 轴或 4 轴联动 CNC 机床。航空发动机涵道比，推力重量比和使用寿命的不断提高，导致叶片结构更加复杂，尺寸更大，材料处理更加困难以及对精度的要求更高。新结构和采用新材料对叶片制造技术提出了更严格的要求^[11]。

1.2.2 国外研究现状

如今，全球所有知名的发动机制造公司都在研究其叶片制造技术，并利用许多人力资源，财力和物力来追求低成本，低污染，高效率 and 高质量。投资先进的叶片制造技术可以满足航空发动机的需求。国外知名发动机制造商包括通用电气（GE），CFM International 国际航空发动机，普惠（Platt & Whitney）发动机，劳斯莱斯以及这些公司生产的发动机。当今世界上先进水平的航空发动机具有出色的产品质量和高性能的可靠性。

通用电气（GE）是世界上最大的综合动力和设备制造商，它以其可靠性和成本效益而闻名，被认为是业界最佳的发动机。GE90 是世界上功能最强大的单引擎民航发动机。

罗尔斯·罗伊斯，也称为劳斯莱斯（Rolls-Royce），在英语中缩写为 RR，在涡扇发动机领域中仅次于 GE，在发动机市场中占有很高的份额。A3330/340 系列中使用的“Ryida”500/700 系列是世界上最安静的客机，是 RR 的杰作。

普惠公司（英文缩写 PW）是举世闻名的直升机轮式发动机，民航和军用涡轮螺旋桨/涡扇发动机（例如 F-15 和 F-16 的标准输出）的制造商。F100 是 PW 之一，而美国最先进的战斗机 F119 发动机 F119 和 F-35 发动机 F135 也是 PW。

如今，世界上许多著名的发动机制造公司都在投入大量的人力，财力和物力来研究叶片制造技术，并追求低成本，高质量，高效率 and 低污染。投资先进的叶片制造技术可以满足航空发动机叶片制造需求。今天，中国的航空发动机制造公司在叶片切割工艺，抛光工艺，制造软件，支撑和夹紧装置等许多方面都存在一些迫切的问题。

目前国内外航空发动机叶片制造中的关键技术^[12]研究如下：

- 1.叶片高效精密加工专用工装设计与制造；
- 2.叶片加工过程颤振与变形控制技术；
- 3.叶片高效切削技术；
- 4.叶片的自适应加工技术；
- 5.叶片加工的在机测量技术；
- 6.叶片表面完整性控制技术；
- 7.叶片高效精密数控加工专用工艺软件系统；
- 8.叶片自动化、智能化生产线技术。

1.3 研究任务及方案

- 1.对叶片类零件的几何工艺特征进行分析，了解该类零件的工艺特点；
- 2.使用 UG 建立某航空发动机风扇叶片整体三维模型，掌握此类零件建模的

方法和问题，以及模型对之后加工的影响；

3.复杂曲面三轴数控加工工艺路径规划和刀轨的计算方法研究，并对加工方案的具体工序进行设计；

4.利用 UG 加工模块对扇叶叶片进行数控铣削的三轴加工工艺设计及数控加工刀轨设计，对不同加工方案进行设计和仿真优化，得到优化方案和参数进行实验；

5.通过 UG 对典型叶片刀具轨迹进行后处理，在针对所使用的具体机床对后处理文件进行优化，得到用于加工的 G 代码程序；

6.进行航空发动机叶片数控铣削加工实验，掌握机床操作，记录实验数据和问题；

7.最后对不同的加工工艺完成典型叶片进行对比分析，得出适合的加工工艺。

1.4 论文研究的主要内容和章节安排

首先分析进行叶片类零件的几何工艺特征进行，并且进行归纳和整理，然后建立典型叶片三维模型，对典型叶片进行数控铣削的三轴加工工艺设计及数控加工刀轨设计，根据叶片多轴数控加工的特点制定出合理的工艺路线，利用 UG 对刀具轨迹进行运算仿真，最后进行加工实验，完成典型叶片的数控铣削加工。

本论文共分为五章：

1.绪论。对流线类零件进行简介，介绍了航空发动机的加工方法的发展历史和发展趋势、叶片类零件的多轴数控加工现状和本论文研究的目的和意义，最后对本文的内容和章节安排进行了说明。

2.叶片类零件的几何特征和工艺分析。对叶片类零件的几何工艺特征进行分析，了解该类零件的工艺特点；复杂曲面五轴数控加工工艺路径规划和刀轨的计算方法研究，并对加工方案的具体工序进行设计。

3.叶片类零件的建模和加工。使用 UG 建立某航空发动机风扇叶片整体三维模型，掌握此类零件建模的方法和问题，以及模型对之后加工的影响；利用 UG 加工模块对扇叶叶片进行数控铣削的三轴加工工艺设计及数控加工刀轨设计，对不同加工方案进行设计和仿真优化，得到优化方案和参数；通过 UG 对典型叶片刀具轨迹进行后处理，在针对所使用的具体机床对后处理文件进行优化，得到用于加工的 G 代码程序；进行扇叶叶片数控铣削加工实验，掌握机床操作，记录实验数据和问题。

4.叶轮的加工。对叶轮的加工使用 UG 已有的加工模板对叶轮进行加工仿真。

5.总结和展望。对本文以作的工作进行了总结，并对今后需要做的工作进行说明。

第二章 叶片类零件的几何特征和加工工艺分析

2.1 叶片类零件的几何特征

叶片类零件主要以航空发动机叶片为主要代表，而叶片类零件的加工又代表着加工制造业最先进水平，此外，叶片类零件在其他领域中也都充当着关键角色，分别在汽轮机叶片、涡轮风扇叶片、螺旋桨上，此文档就这几类领域中的叶片类零件的几何特征和加工工艺特征进行了归纳。

2.1.1 航空发动机叶片

发动机是飞机的心脏，而叶片又是发动机重中之重的一个零件，现状全世界各个国家的发动机种类很多，主流的发动机种类：1) 涡轮喷气发动机（WP）（图 2-1）；2) 涡轮螺桨发动机（WJ）；3) 涡轮风扇发动机（WS）（图 2-2）；4) 涡轮轴发动机(WZ)；5) 活塞发动机（HS）。

涡轮喷气发动机简称为“涡轮喷气发动机”。它们通常包括进气口，压缩机，燃烧室，涡轮机和尾喷嘴。一些军用发动机在涡轮和尾喷嘴之间还具有加力口。涡轮喷气发动机是热力发动机。在运行期间，必须首先通过进气口吸入空气。随着飞行速度的变化，压缩机将进气速度控制在适当的范围内，从而增加进气压力。压缩机主要是风扇叶片的形式。叶片的旋转作用在气流上，这增加了气流的压力和温度。之后，高压气流进入燃烧室，燃烧室中的燃料喷嘴喷射燃料，将其与空气混合并点燃，以产生高温高压气体，然后将其排放到后部。当高温高压气体流过高压涡轮时，一些内部能量会膨胀为涡轮的机械能，从而使涡轮旋转。由于高压涡轮与压缩机安装在同一根轴上，因此它使压缩机旋转以反复对进气进行加压。最终，从高压涡轮流出的高温高压气体在尾喷嘴处继续膨胀，并从尾喷嘴以高速向后排出。该速度比流向发动机的空气流快得多，后者在发动机上产生反作用力以使飞机前进。

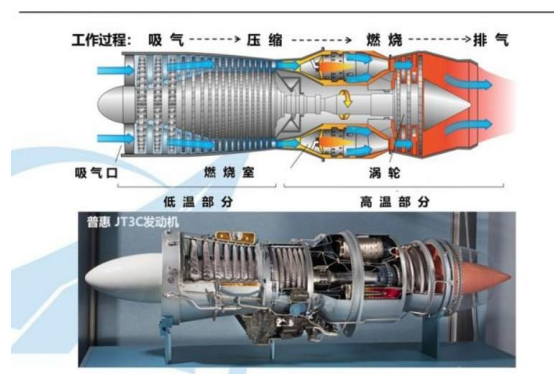


图2-1 涡喷发动机

涡轮喷气发动机具有高空，高速度和设计简单的优点，并且是之前已被实际使用的涡轮发动机的主要类型。然而，随着涡轮喷气发动机的推力继续增加，有必要增加涡轮前面的气体温度和增压比，这会增加排气速度并损失动能，从而降低推力和燃料消耗。有矛盾。为了满足不同设计的要求，涡轮喷气发动机在随后的几十年中经历了一系列技术进步和升级。通过不同类型的派生变体，它们可以满足军事和民用领域的不同需求。

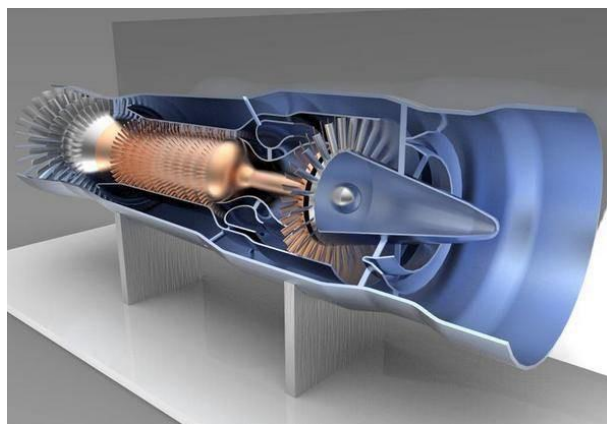


图2-2 涡扇发动机

2.1.2 汽轮机叶片

叶片是汽轮机的关键零件，又是最精细、最重要的零件之一，它起着将蒸汽的动能转换为机械能的作用，汽轮机叶片按型面几何可分为直叶片和扭曲叶片，就其整体结构可将之分为叶身、叶顶和叶根三个组成部分。直叶片的截面曲率半径相同，可用成形刀具加工，如图 2-3 所示；扭曲叶片类似于航空发动机叶片，为变截面扭转曲面。



图2-3 汽轮机叶片

汽轮机（图 2-4）工作于高温、高压、易腐蚀的环境，特别是动叶片还要承受离心力、蒸汽弯曲应力以及复杂的振动应力，故材料多为耐高温高压以及化学稳定性好的材料，叶片多采用 1Cr13、2Cr13、1Cr11MoV 及 1Cr12WMoV 等不锈钢材料，但机械加工困难。



图 2-4 汽轮机

2.1.3 涡轮风扇

涡轮风扇(图 2-5),又被称为离心式风扇,经常被运用在个人电脑散热领域,人们习惯将小型离心风扇称为涡轮风扇。涡轮风扇有其特殊性,它的气体流向垂直于转轴,而在其他常见的轴流风扇中,气体流向是与转轴平行的。与传统的散热风扇相比较,离心风扇的优点就很明显,在更小的空间占用下输出更大的风量,从而进一步提升散热效果。与普通的风扇相比较,离心风机扇叶的加工精度要求更高,更为的不易加工,并且在叶轮有积灰或高速运转时发出的噪音也更大。现在随着 CPU 功耗不断改善与下降, CPU 涡轮风扇逐渐被大口径的低转速普通轴流静音风扇所取代,但在高性能显卡尤其是公版显卡(例如英伟达 GTX2080Ti、TITAN)散热器上仍然经常使用。



图 2-5 涡轮风扇

离心式风扇的动力来源是由电机带动叶轮旋转，叶轮中的叶片迫使气体旋转，对气体做功，使其动量增加，气体在离心力的作用下，向叶轮四周甩出，通过涡型机壳将动能转换成压力能，当叶轮内的气体排出后，叶轮内的压力低于进风管内压力，新的气体在压力差的作用下吸入叶轮，气体就连续不断的从风扇内排出。

2.1.4 螺旋桨

螺旋桨（图 2-6）俗称车叶，通常装于船的尾部，根据船尾桨数目（ Z_p ）的多少，将船划分为单桨船和多桨船。

螺旋桨通常由桨叶和桨毂构成。螺旋桨与船尾轴联接部分叫桨毂，它一般为锥体型，为减小水阻力，在桨毂后端加一整流罩（毂帽），与桨毂形成一光滑流线体。桨叶固定在桨毂上，螺旋桨一般有 2-6 片桨叶，桨叶数（ Z ）越多，桨的振动越小。

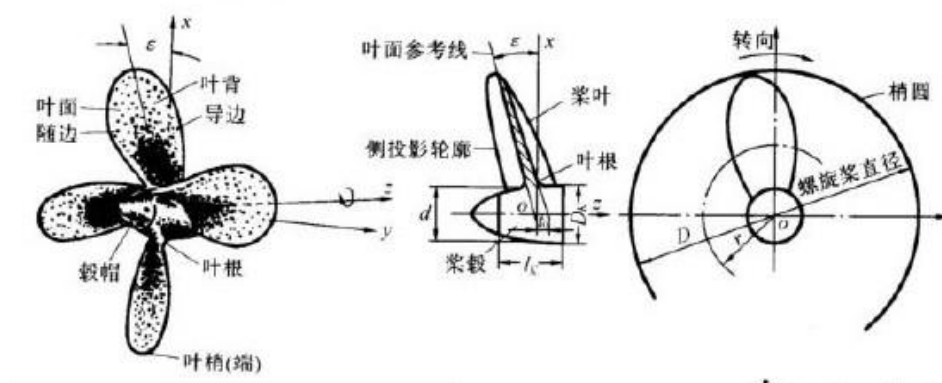


图 2-6 螺旋桨

2.2 叶片类零件的加工工艺分析

叶片类零件是飞机发动机的核心零件，广泛应用与航空、航天和兵器制造等领域，正因为其结构复杂，制造难度大，叶片的加工一直是数控领域具有挑战性和可操作性大的课题，工序复杂，加工工艺正在不断的改进^[13]。

2.2.1 叶片几何工艺分析

以航空发动机一级钛合金风扇叶片为例,该叶片属于典型的薄壁复杂曲面零件。叶片主要有叶身、榫板、榫根三部分组成。叶身的表面是由三维自由曲面生成。叶身部分分为叶盆、叶背、前缘头（进气边）、后缘头（排气边）^[14]。下图 2-7 为本文所采用的航空发动机叶片图：

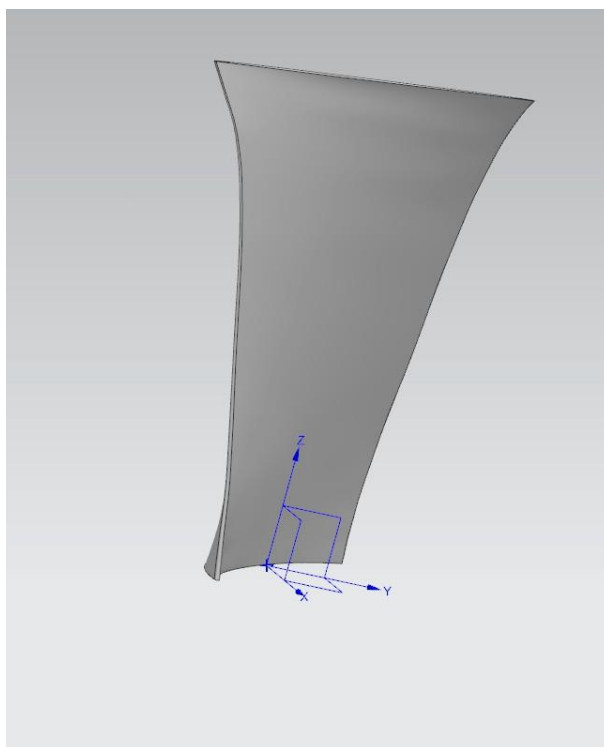


图 2-7 叶片三维图

叶根处弦长 58.1mm,叶尖处弦长 77.7mm,叶根处最大厚度 6mm,叶尖处 2mm,叶身高 92.0496mm,叶片本身的刚性并不好,属于薄壁曲面零件,在加工中极容易产生变形,高速加工时极易发生颤振现象,并且对定位装夹的精度要求很高,对形状位置精度和尺寸精度要求也很高,因此必须在机床调整、夹具装夹设计和加工工艺和参数等方面做适当的调整,以减小叶片加工过程的变形,以此达到规定的加工要求。按设计图纸型面和凸肩的尺寸公差要求^[15],余量控制在 0.1mm 以内,并用三坐标检测,应该符合形状、尺寸和余量要求。

在本文中所采用的毛坯料为铝合金,它的特征为:强度、硬度较低,导热系数高,切削温度有限,化学磨损很小,属于易加工材料,宜进行高速切削。又因为铝合金材料的熔点较低,温升后塑形增大,表面粗糙度较大,高温高压下容易粘刀,采用方形毛坯进行加工,毛坯完全包含叶片,采用数控加工中心将毛坯制成完整叶片。由于叶片厚度很小,材料的去除率会很大,加工过程会产生大量的切削热,因此高速或大进给加工要注意冷却。

从以上分析不难看出,该叶片属于薄壁零件,曲面精度高,结构元素和加工元素复杂,导致数控加工工艺复杂、编程难度明显增大。

2.2.2 工艺路线的拟订

叶片数控加工技术是以已经经过锻造的毛坯为基础,经过粗加工、半精加工、精加工^[16]等多道加工工序,以数控铣削加工方式将叶型加工至最终所要求的尺寸。与传统抛光工艺相比,叶片数控加工技术要实现叶身曲面“无余量”数控加工,对数控加工工艺技术和编程技术有更高的要求,首先必须解决叶片的多次装夹精确定位和各种情况变形控制等工艺难题。

叶片铣削的一般工艺:

- 1.选择毛坯:根据零件图纸的要求,依据强度选择铸造或锻造毛坯。本文为了加工简便采取铝料。
- 2.毛坯的去料加工:为了缩短加工时间,提高加工效率,一般所采用的去料方式为手工去料。
- 3.叶片的粗加工:在保证加工余量的前提下,尽可能的采取直径大的刀具和更快速的方式迅速去除大部分材料。
- 4.对基准面的精加工:为了保证装夹基准和以后加工的基准,首先我们应当完成基准面的精加工。
- 5.试切:对于一般的零件而言,采取仿真的方法验证即可,但是对于高成本零件和重要零件,通过试切获得切削参数并加工出一个试件是保证加工成功的一个重要环节。
- 6.精加工:通过一次或少数几次走刀去除所有应加工材料。
- 7.研磨:为了去除加工痕迹和获取叶片的表面光洁度,需要钳工或研磨进行最终加工。

以上步骤是数控铣削叶片的一般过程,在实际加工中,我们可以根据我们所要加工的具体叶片增加或删除某些步骤^[17]。

第三章 叶片类零件的建模和加工

3.1 叶片类零件的建模

目前主流的发动机叶片数学模型建立方法^[18]：1) 基于物理模型的曲面造型方法；2) 基于偏微分方程（PDE）的曲面造型方法；3) 流曲线曲面造型。

3.1.1 曲线曲面拟合原理概述

现代图形造型技术中，曲线拟合是一个重要的部分，是曲面拟合的基础。现着重对三次样条与参数样条、孔斯曲面、贝齐尔曲线与曲面、B 样条与 NURBS 三次曲线拟合进行比较，述这几种方法的原理及其算法，基于实例分析了上述几种拟合方法的特性，以分析拟合方法的适用场合，从而为图形造型中曲线拟合的方法选用作出更好的选择。

1、三次样条曲线与参数样条曲线

三次样条曲线是用 3 次多项式进行分段拟合，不但可以保证曲线上斜率的连续变化，还可以保证曲率的连续变化。三次样条曲线的局限性在于：局部修改牵涉到整个样条的重新计算，不能阶段具有垂直切线的问题，当曲线中加油直线时拟合效果不好。三次参数样条曲线是对三次样条曲线的改进，利用曲线各分量的参数方程来共同表示曲线，具有几何不变性，并且可以处理无穷大斜率问题以及大挠度问题。

2、孔斯曲面

孔斯曲面是 Coons 在 1964 年提出的曲面构造方法，基本思想是将所要描述的曲面看作是由若干个曲面片光滑拼接而成的，每个曲面片一般用四条边界曲线来定义。

3、贝塞尔曲线^[19]与曲面

贝塞尔曲线和曲面是一种构造曲线和曲面的逼近方法，该曲线或曲面不通过所有的给定点，也不考虑切矢和扭矢，而是用曲线外或曲面外的点定义曲线和曲面，可通过控制点的移动直观地控制曲线形状，具有良好的几何性质，适用于曲线设计。

4、B 样条与 NURBS^[20]三次曲线拟合

B 样条曲线继承了贝齐尔曲线的直观性等优良属性，又克服了贝齐尔方法的不足之处。有理 B 样条方法统一了自由型曲线曲面和解析曲线曲面的表达，非均匀有理 B 样条方法简称 NURBS，曲线曲面函数式分别为：

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u)W_i V_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u)W_i} \quad u \in [0,1]$$

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{j,l}(w) B_{i,k}(u) W_{i,j} V_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{j,l}(w) B_{i,k}(u) W_{i,j}} \quad u \in [0,1]$$

已成为曲线曲面造型的国际标准，可以精确表示规则曲线与曲面，并把规则曲面与自由曲面统一在一起，增加了额外自由度以利于曲线曲面的形状控制，计算也更稳定。

3.1.2 叶片的建模

参数化建模^{[21][22]}，一般是指建模对象的结构形状比较定型，可以用一组参数来约束尺寸关系，参数与建模对象的控制尺寸有明显的对应，通过参数的修改可以改变设计结果。图形化参数建模的实现一般有 4 种方法：1) 利用变量驱动图形；2) Excel 表驱动图形；3) 尺寸驱动图形；4) 用户元素驱动图形。

3.1.2.1 截面线的创建

一、原始数据整理

本文研究所采用的零件是某航空发动机风扇叶片，是典型的流线曲面，整个曲面基于点云数据，对点云数据进行预处理，进而将曲面重构等技术对涡轮叶片的轴截面特性进行分析以及叶型进行拟合，为已知的 22 个截面线的坐标值。由于图纸的数据量大，将所有坐标值录入为 Excel 表格形式，利用 Excel 表格进行建模^[23]，方便后期建模过程中修改和重建。

二、各截面曲线建立

创建截面曲线采用拟合曲线的方法进行创建，为计算方便采用 3 次分段曲线（实际运用中一般采取 3 次，简单容易计算，拟合圆润），并且将拟合公差设置在 0.001mm，坐标点数据采取批量导入的方式，具体步骤如下：

1、将第一个截面曲线坐标值单独从 Excel 表格中导出来，并保存为.txt 文件格式。

| 名称 | 修改日期 | 类型 | 大小 |
|-----------|-----------------|------|------|
| 0-0.txt | 2020/3/16 12:05 | 文本文档 | 4 KB |
| 1-1.txt | 2020/3/16 12:06 | 文本文档 | 4 KB |
| 2-2.txt | 2020/3/17 20:32 | 文本文档 | 5 KB |
| 3-3.txt | 2020/4/1 2:08 | 文本文档 | 4 KB |
| 4-4.txt | 2020/4/1 1:44 | 文本文档 | 4 KB |
| 5-5.txt | 2020/4/1 1:45 | 文本文档 | 5 KB |
| 6-6.txt | 2020/4/1 1:46 | 文本文档 | 4 KB |
| 7-7.txt | 2020/4/1 2:15 | 文本文档 | 4 KB |
| 8-8.txt | 2020/4/1 1:49 | 文本文档 | 4 KB |
| 9-9.txt | 2020/4/1 1:50 | 文本文档 | 5 KB |
| 10-10.txt | 2020/4/1 1:51 | 文本文档 | 4 KB |
| 11-11.txt | 2020/4/1 1:54 | 文本文档 | 4 KB |
| 12-12.txt | 2020/4/1 2:37 | 文本文档 | 4 KB |
| 13-13.txt | 2020/4/1 2:52 | 文本文档 | 4 KB |
| 14-14.txt | 2020/4/1 3:04 | 文本文档 | 4 KB |
| 15-15.txt | 2020/4/1 3:12 | 文本文档 | 4 KB |
| 16-16.txt | 2020/4/1 3:17 | 文本文档 | 4 KB |
| 17-17.txt | 2020/4/1 1:57 | 文本文档 | 4 KB |
| 18-18.txt | 2020/4/1 1:58 | 文本文档 | 4 KB |
| 19-19.txt | 2020/4/1 1:59 | 文本文档 | 4 KB |

图3-1 叶片截面曲线点数据

2、选择 UG, 文件——导入——文件中的点, 选择之前建好对应的.txt 文件。



图3-2 导入坐标点

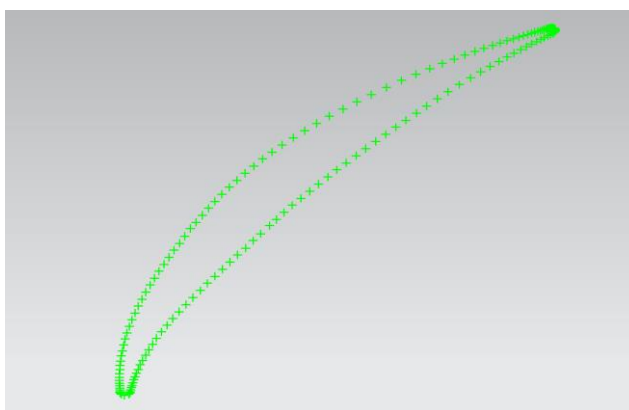


图3-3 导入点

3、采取拟合曲线的方式, 生成一条开式曲线, 再编辑该曲线, 使其为封闭曲线。

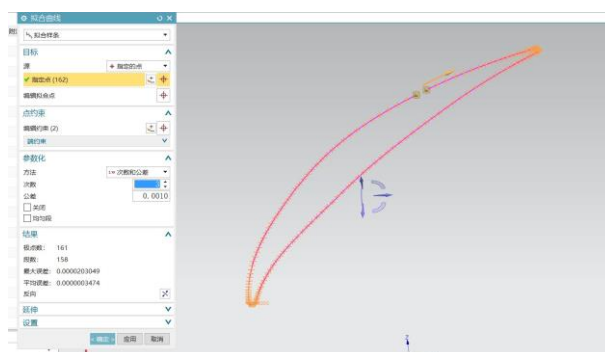


图3-4 拟合曲线

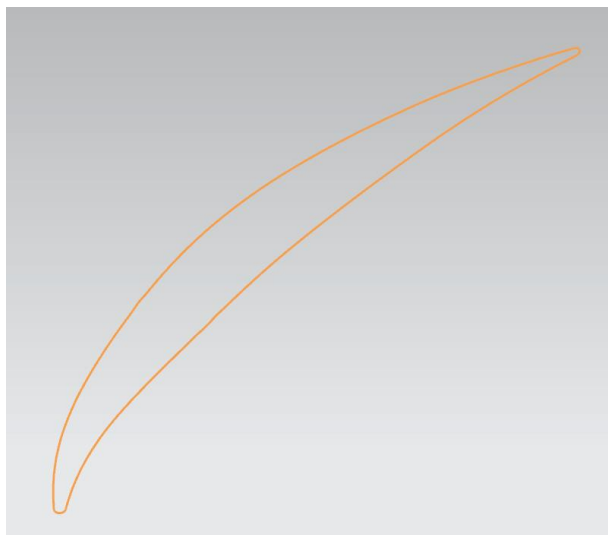


图3-5 编辑曲线

4、按这种方法依次创建剩余的 21 条截面曲线。

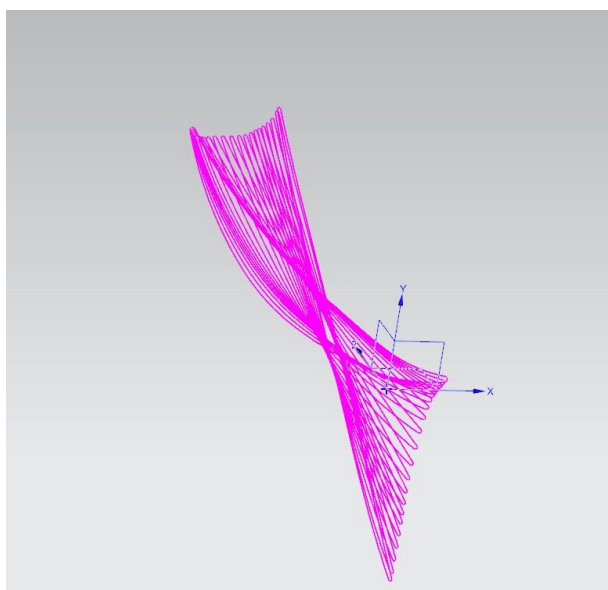


图3-6 叶片的22个截面曲线

3.1.2.2 叶片曲面的创建

一、曲面创建

由于原始数据为云点数据，已知各个截面曲线，故选择“通过曲线组”创建叶片的曲面。创建的具体过程如下：

1、选择“通过曲线组”，依次拾取各截面曲线，注意一个完整曲线即为一层，选择之后添加新的一层，并注意拾取的曲线方向，以避免曲面的扭曲。

2、对齐方式有三种，分别为参数对齐、弧长对齐和简单对齐，参数对齐在这里指截面法向方向坐标的对齐，故在这里我们选择参数对齐。

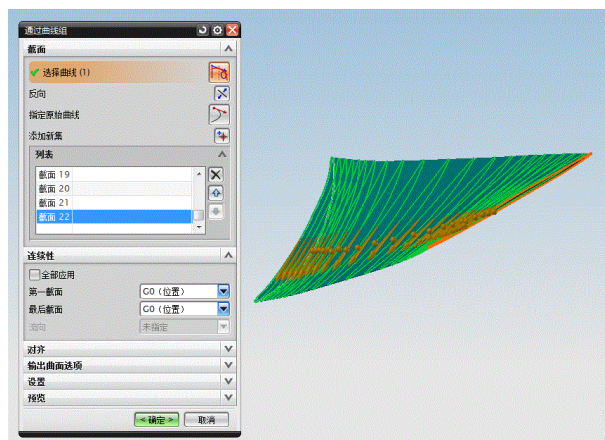


图 3-7 叶片截面线拾取

3、曲面的输出形式选择实体，重新建模选择无，补片个数选择多个，这个对应于孔斯曲面的多片曲面。

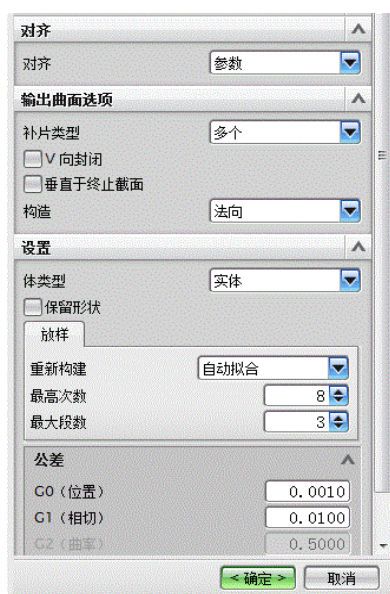


图 3-8 曲面参数设置

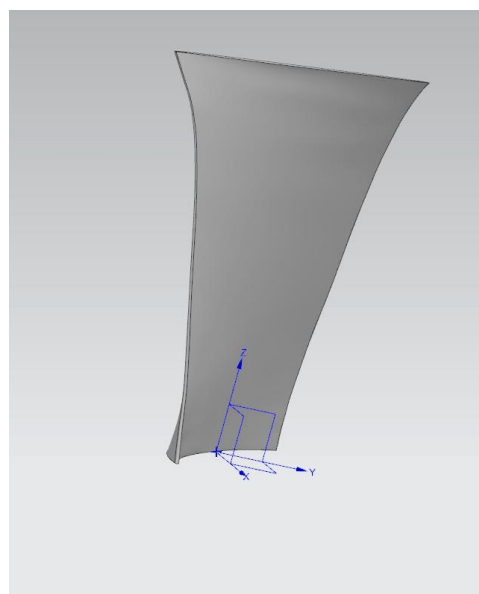


图 3-9 叶片曲面创建

二、叶片曲面分析与检查

一般情况下，由于数据精度问题可能造成构造出的曲面在过度部分曲率变化剧烈，甚至出现扭曲现象，曲面质量不是很好，但是用于数控加工的曲面模型都要求曲面平滑光滑，否则直接影响加工后表面质量。我们是采取 NURBS 曲面逼近的方法进行曲面造型，由于 UG 目前只有曲线优化，没有曲面优化模块，可以

通过后期二次开发进行优化，本文对此暂不考虑。

3.2 典型叶片的加工

叶片的加工方法五花八门，种类繁多，数目繁多，采用数控加工中心等高效加工设备对操作者的技术水平要求高，而且生产准备工作量大大提升。叶片的自动编程加工设计，在 UG 的加工 CAM 模块中主要用到了型腔铣、固定轮廓铣、多流道清根，刀具轨迹设计的重点除了切削模式的选择，还在于切削参数的设计和非切削参数的设计。本论文方案一的叶片加工采取了工序集中的工艺路线，这种工序的优点在于：

- 1.提高了各个表面间的位置精度；
- 2.减少了工人数量和生成面积；
- 3.缩短了工艺路线和辅助时间。

3.2.1 叶片的加工工序

本文采用三轴机床，以三轴联动加工中心对叶片的加工，以此来研究其加工过程中的加工特点以及问题。通过对叶片的几何、工艺特征分析，结合一般零件和流线曲面零件加工路线，划分加工阶段，确定基准的选择，进而制定出加工方案。

粗加工阶段和半精加工阶段：因为要去除的余量很大，故采用立铣刀或者圆鼻铣刀使切削部分主要集中在刀具侧刃上，以此来提高切削部分的线速度。初步选用直径为 16mm 的镶片刀，刀尖圆角为 0.8mm，刀柄型号为 BT40，记为 1 号刀。

精加工阶段：由于加工过程都要沿着叶片表面进行型面加工，沿固定轮廓进行切削，故都采用球头刀，预先选用 8mm 的球头刀，又因为实训室的刀具有限，故选用直径为 12mm 的球头刀，螺旋角 60° ，刀柄型号为 BT40，记为 3 号刀。

清根阶段：由于有垂直于工件的侧壁，故清根时采取 D12 的立铣刀，刀柄型号为 BT40，记为 2 号刀。

叶片的装夹方案与加工基准：选择方坯的表面作为定位的夹紧面，利用液压虎钳的钳口进行夹紧，加工原点选方坯的左后顶点，坐标轴与机床坐标一致，由于选择了方坯表面作为基准面，因为方坯的表面的平面和各表面之间的平行度、垂直度都要求很高，所以加工之前要对液压虎钳进行找平，也可采取叶片加工采用压板两端压紧方式，加工时由于刀轨可能在工件下表面之下，为防止刀具破坏工作台，也避免刀具 Z 向到达软限位，采用把工件放在一垫块上压紧加工的方式。

本文所介绍的两种方案中具体的加工工序的设计，针对数控加工的突出特点，哥加工工序的按排之下，确定各个加工工序中的基准、走刀方式、安装定位及夹具、切削用量、刀具等，本文重点介绍切削参数、非切削移动和转速进给。

3.2.1.1 方案一

方案一（表 3-1）式初步方案，为了减少多次装夹定位的误差，首先对叶盆进行加工，先粗加工，在半精加工，在精加工，最后进行清根；在对叶背进行加工，先粗加工，在半精加工，在精加工，最后进行清根。

表3-1 叶片加工方案一路线

| 工序号 | 工序名称 | 工序内容 | 安装 | 刀具 | 转速 /rpm | 进给 /mmpm |
|-----|--------------|---|-----|---------|------------|-------------|
| 0 | 方坯加工 | 加工 200mm*80mm*30mm 的 方坯 | | | | |
| 10 | 叶盆粗加工 | 用 1 号刀对叶盆进行 粗加工，采用型腔 铣。 | 第一次 | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 20 | 叶盆半精 加工 1 | 使用 1 号刀，对叶盆 型面进行曲面加工， 采取型腔铣，使半精 加工的余量均匀。 | | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 30 | 叶盆半精 加工 2 | 使用 1 号刀，对叶盆 型面进行曲面加工， 采取固定轮廓铣，使 半精加工的余量均 匀。 | | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 40 | 叶盆精加工 | 使用 3 号刀，利用球 头刀对叶盆曲面进行 精加工，采取固定轮 廓铣。 | | B12 | 2500 | 800 |
| 50 | 叶盆侧壁 加工 | 使用 2 号刀，对叶盆 型面的侧壁进行加 工，采取多刀路清 根。 | | D12 | 2500 | 1000 |
| 60 | 叶背粗加工 | 翻转安装，用 1 号刀 对叶背进行粗加工， 采取固定轮廓铣。 | 第二次 | D16R0.8 | 2200 | 1000 |

| 工序号 | 工序名称 | 工序内容 | 安装 | 刀具 | 转速 /rpm | 进给 /mmpm |
|-----|----------|---|----|---------|------------|-------------|
| 70 | 叶背半精加工 1 | 使用 1 号刀，对叶背型面进行曲面加工，采取型腔铣，使半精加工的余量均匀。 | | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 80 | 叶背半精加工 | 使用 1 号刀，对叶背型面进行曲面加工，采取固定轮廓铣，使半精加工的余量均匀。 | | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 90 | 叶背精加工 | 使用 3 号刀，对叶背精选精加工，采用固定轮廓铣。 | | B12 | 2500 | 800 |
| 100 | 叶背侧壁加工 | 使用 2 号刀，对叶背型面的侧壁进行加工，采取多刀路清根。 | | D12 | 2500 | 1000 |
| 110 | 检验 | 利用三坐标对叶片精选测量。 | | | | |

工序 0: 方坯加工

毛坯为 6061 号铝合金，通过在虎钳上定位夹紧，用 $\Phi 40\text{mm}$ 的大盘刀加工各个端面，平面铣切削参数： $n=1800\text{r/min}$ ， $a_e=25\text{mm}$ ， $a_p=0.3\text{mm}$ ， $f=500\text{mm/min}$ 。侧面立铣的切削参数： $n=1800\text{r/min}$ ， $a_e=0.5\text{mm}$ ， $a_p=2\text{mm}$ ， $f=500\text{mm/min}$ 。

工序 10: 叶盆粗加工

利用双虎钳夹紧毛坯，利用百分表对毛坯 XY 方向进行找正调平，对叶盆进行粗加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采用型腔铣的方式，刀轨设置方法为 MILL_ROUGH,沿叶片轮廓按层切削顺铣，底部余量 1mm，侧面余量 1mm。

工序 20: 叶盆半精加工 1

对叶盆进行半精加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采取型腔铣，刀轨设置方法为 MILL_SEMI_FINISH，切削参数的空间范围里的过程工件采取使用基于层的，底部余量 0.3mm，侧面余量 0.3mm。

工序 30: 叶盆半精加工 2

对叶盆进行半精加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采取固定轮廓铣，刀

轨设置方法为 MILL_SEMI_FINISH，驱动方法为区域铣削，底部余量 0.3mm，侧面余量 0.3mm。

工序 40：叶盆精加工

对叶盆进行精加工，选择 3 号刀 B12，走刀方式采取固定轮廓铣，刀轨设置方法为 MILL_FINISH，驱动方法为区域铣削，底部余量 0mm，侧面余量 0mm。

工序 50：叶盆侧壁加工

叶盆的侧壁加工也就是清根操作，选择 2 号刀，走到方式为多刀路清根，刀轨设置方法为 MILL_FINISH，底部余量 0mm，侧面余量 0mm。

工序 60：叶背粗加工

翻转安装，利用双虎钳夹紧毛坯，利用百分表对毛坯 XY 方向进行找正调平，对叶背进行粗加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采用型腔铣的方式，刀轨设置方法为 MILL_ROUGH,沿叶片轮廓按层切削顺铣，底部余量 1mm，侧面余量 1mm。

工序 70：叶背半精加工 1

对叶背进行半精加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采取型腔铣，刀轨设置方法为 MILL_SEMI_FINISH，切削参数的空间范围里的过程工件采取使用基于层的，底部余量 0.3mm，侧面余量 0.3mm。

工序 80：叶背半精加工 2

对叶背进行半精加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采取固定轮廓铣，刀轨设置方法为 MILL_SEMI_FINISH，驱动方法为区域铣削，底部余量 0.3mm，侧面余量 0.3mm。

工序 90：叶背精加工

对叶背进行精加工，选择 3 号刀 B12，走刀方式采取固定轮廓铣，刀轨设置方法为 MILL_FINISH，驱动方法为区域铣削，底部余量 0mm，侧面余量 0mm。

工序 100：叶背侧壁加工

叶盆的侧壁加工也就是清根操作，选择 2 号刀，走到方式为多刀路清根，刀轨设置方法为 MILL_FINISH，底部余量 0mm，侧面余量 0mm。

工序 110：检验

采用三坐标对已加工完的叶片进行尺寸和轮廓度等检验。

3.2.1.2 方案二

方案二（表 3-2）与方案一比较之下，不同的是为了减小切除量过大而引起的颤动挤削变形，先分别对叶盆和叶背进行粗加工，在分别对叶背和叶盆进行半精加工，最后对叶盆和叶背精加工，进行了多次安装。

表3-2 叶片加工方案二路线

| 工序号 | 工序名称 | 工序内容 | 安装 | 刀具 | 转速 /rpm | 进给 /mmpm |
|-----|--------------|---|-----|---------|------------|-------------|
| 0 | 方坯加工 | 加工 200mm*80mm*30mm 的 方坯 | | | | |
| 10 | 叶盆粗加工 | 用 1 号刀对叶盆进行 粗加工，采用型腔 铣。 | 第一次 | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 20 | 叶背粗加工 | 翻转安装，用 1 号刀 对叶背进行粗加工， 采取固定轮廓铣。 | 第二次 | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 30 | 叶背半精 加工 1 | 使用 1 号刀，对叶背 型面进行曲面加工， 采取型腔铣，使半精 加工的余量均匀。 | | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 40 | 叶背半精 加工 | 使用 1 号刀，对叶背 型面进行曲面加工， 采取固定轮廓铣，使 半精加工的余量均 匀。 | | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 50 | 叶盆半精 加工 1 | 使用 1 号刀，对叶盆 型面进行曲面加工， 采取型腔铣，使半精 加工的余量均匀。 | 第三次 | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 60 | 叶盆半精 加工 2 | 使用 1 号刀，对叶盆 型面进行曲面加工， 采取固定轮廓铣，使 半精加工的余量均 匀。 | | D16R0.8 | 2200 | 1000 |
| 70 | 叶盆精加工 | 使用 3 号刀，利用球 头刀对叶盆曲面进行 精加工，采取固定轮 廓铣。 | | B12 | 2500 | 800 |
| 80 | 叶盆侧壁 加工 | 使用 2 号刀，对叶盆 型面的侧壁进行加 工，采取多刀路清 根。 | | D12 | 2500 | 1000 |

| 工序号 | 工序名称 | 工序内容 | 安装 | 刀具 | 转速 /rpm | 进给 /mmpm |
|-----|--------|-------------------------------|-----|-----|------------|-------------|
| 90 | 叶背精加工 | 使用 3 号刀，对叶背精选精加工，采用固定轮廓铣。 | 第四次 | B12 | 2500 | 800 |
| 100 | 叶背侧壁加工 | 使用 2 号刀，对叶背型面的侧壁进行加工，采取多刀路清根。 | | D12 | 2500 | 1000 |
| 110 | 检验 | 利用三坐标对叶片精选测量。 | | | | |

工序 0：方坯加工

毛坯为 6061 号铝合金，通过在虎钳上定位夹紧，用 $\Phi 40\text{mm}$ 的大盘刀加工各个端面，平面铣削切削参数： $n=1800\text{r/min}$ ， $a_e=25\text{mm}$ ， $a_p=0.3\text{mm}$ ， $f=500\text{mm/min}$ 。侧面立铣的切削参数： $n=1800\text{r/min}$ ， $a_e=0.5\text{mm}$ ， $a_p=2\text{mm}$ ， $f=500\text{mm/min}$ 。

工序 10：叶盆粗加工

利用双虎钳夹紧毛坯，利用百分表对毛坯 XY 方向进行找正调平，对叶盆进行粗加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采用型腔铣的方式，刀轨设置方法为 MILL_ROUGH,沿叶片轮廓按层切削顺铣，底部余量 1mm，侧面余量 1mm。

工序 20：叶背粗加工

翻转安装，利用双虎钳夹紧毛坯，利用百分表对毛坯 XY 方向进行找正调平，对叶背进行粗加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采用型腔铣的方式，刀轨设置方法为 MILL_ROUGH,沿叶片轮廓按层切削顺铣，底部余量 1mm，侧面余量 1mm。

工序 30：叶背半精加工 1

对叶背进行半精加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采取型腔铣，刀轨设置方法为 MILL_SEMI_FINISH，切削参数的空间范围里的过程工件采取使用基于层的，底部余量 0.3mm，侧面余量 0.3mm。

工序 40：叶背半精加工 2

对叶背进行半精加工，选择 1 号刀 D16R0.8，走刀方式采取固定轮廓铣，刀轨设置方法为 MILL_SEMI_FINISH，驱动方法为区域铣削，底部余量 0.3mm，侧面余量 0.3mm。

工序 50: 叶盆半精加工 1

对叶盆进行半精加工, 选择 1 号刀 D16R0.8, 走刀方式采取型腔铣, 刀轨设置方法为 MILL_SEMI_FINISH, 切削参数的空间范围里的过程工件采取使用基于层的, 底部余量 0.3mm, 侧面余量 0.3mm。

工序 60: 叶盆半精加工 2

对叶盆进行半精加工, 选择 1 号刀 D16R0.8, 走刀方式采取固定轮廓铣, 刀轨设置方法为 MILL_SEMI_FINISH, 驱动方法为区域铣削, 底部余量 0.3mm, 侧面余量 0.3mm。

工序 70: 叶盆精加工

对叶盆进行精加工, 选择 3 号刀 B12, 走刀方式采取固定轮廓铣, 刀轨设置方法为 MILL_FINISH, 驱动方法为区域铣削, 底部余量 0mm, 侧面余量 0mm。

工序 80: 叶盆侧壁加工

叶盆的侧壁加工也就是清根操作, 选择 2 号刀, 走到方式为多刀路清根, 刀轨设置方法为 MILL_FINISH, 底部余量 0mm, 侧面余量 0mm。

工序 90: 叶背精加工

对叶背进行精加工, 选择 3 号刀 B12, 走刀方式采取固定轮廓铣, 刀轨设置方法为 MILL_FINISH, 驱动方法为区域铣削, 底部余量 0mm, 侧面余量 0mm。

工序 100: 叶背侧壁加工

叶盆的侧壁加工也就是清根操作, 选择 2 号刀, 走到方式为多刀路清根, 刀轨设置方法为 MILL_FINISH, 底部余量 0mm, 侧面余量 0mm。

工序 110 检验

采用三坐标对已加工完的叶片进行尺寸和轮廓度等检验。

3.2.2 叶片加工的数控编程

使用 UG 对叶片的加工进行自动化编程设计时, 主要运用到的方法有型腔铣、固定轮廓铣和多流道清根, 刀具轨迹设计的重点除了切削方式外, 还在于切削参数的设计而非切削参数的设计, 下面以方案二为例, 详细介绍刀具轨迹的规划过程以及参数的选择。

1. 创建毛坯几何体

进入电极模块，创建包容块（图 3-10），采取中心和长度的方式，创建一个 20mm*80mm*30mm 的包容块，即为毛坯（图 3-11）。



图 3-10 创建包容块

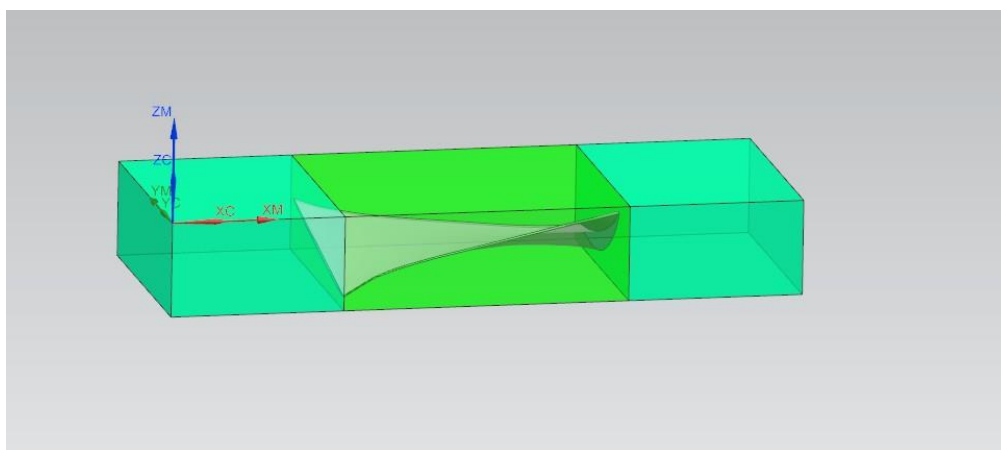


图 3-11 毛坯包容块

2.定向 WCS 到新的坐标系

单击工具栏“WCS 定向”按钮，弹出 CYCS 对话框（图 3-12），选择毛坯左下角定点，采取原点、X 点、Y 点的方式创建坐标系，单击确定按钮。将坐标定在这个位置上是为了与加工坐标系相一致，这样可以减少加工时对刀出现的麻烦。

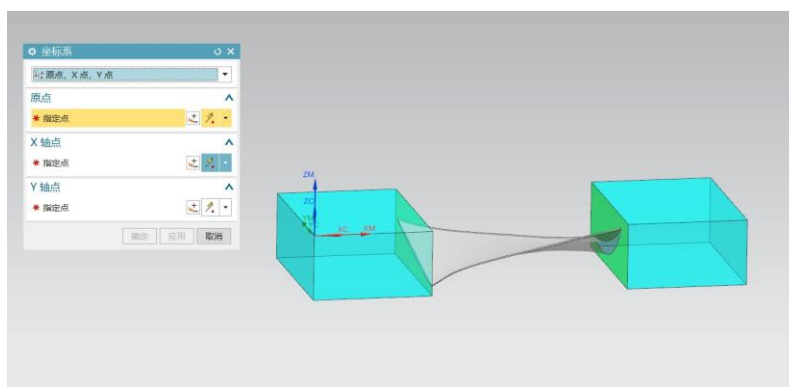


图3-12 WCS 坐标

3.进入加工环境

单击工具栏“开始”→“加工”命令，弹出“加工环境”对话框，选择“mill-contour”命令，单击确定，开始进入加工环境。

4.指定机床坐标系与参考坐标系

建坐标系的原则就是尽量避免与斜顶、滑块同侧，以免相互干涉。

在工序导航器里空白处右键选择“几何视图”，双击打开“MCS-MILL”，弹出“MCS 铣削”对话框（图 3-13），单击“CYCS”对话框按钮，选择毛坯左上角定点，绕 ZC 轴顺时针旋转九十度，单击确定。在“参考坐标系”里勾选“链接 RCS 与 MCS”命令，为了让加工坐标系与建模坐标系相一致，以免加工时出现撞刀问题，“安全距离”里输入“20”，单击确定，完成机床坐标系和参考坐标系的指定。

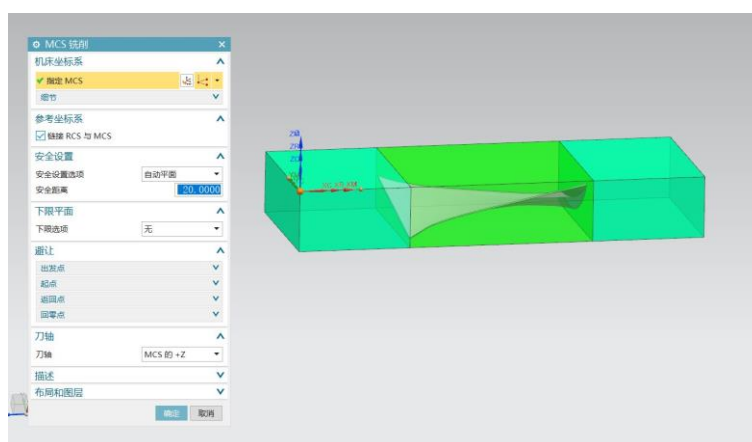


图3-13 机床坐标系与参考坐标系

5.指定部件和毛坯

双击打开“WORKPIECE”,弹出“工件”对话框,单击“指定部件”按钮指定部件几何体,单击“指定毛坯”按钮指定毛坯几何体,单击确定,完成对部件几何体(图 3-14)与毛坯几何体的指定(图 3-15)。

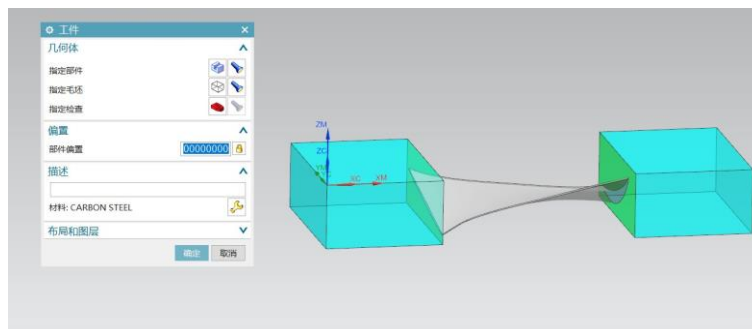


图3-14 指定部件几何体

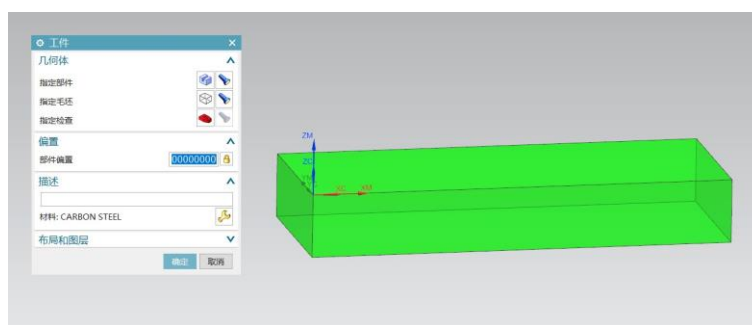


图3-15 指定毛坯几何体

6.创建刀具

机加工中刀具的选择会根据工件材料、形状、技术要求和加工工艺的多样性来选择,因为我所加工的材料是铝合金,因此选择的刀具均为硬质合金材质其型号依据型芯形状来决定,为减少换刀提高加工效率分别用 D16R0.8 的飞刀、B12 的球刀和 D12 的平刀。

在工序导航器里右击选择“机床视图”,单击工具栏“创建刀具”按钮创建第一把刀具,在“类型”里选择“mill-contour”,“刀具子类型”里选择“MILL”,名称为“D16R0.8”,单击确定;在弹出的对话框“直径”里输入 16,“下半径”里输入 0.8,“长度”里输入 45,“刀刃长度”里输入 10,“刀具号”、“补偿寄存器”和“刀具补偿寄存器”里全部输入 1,单击确定,完成第一把到的创建;

单击工具栏“创建刀具”按钮创建第二把刀具,在“类型”里选择“mill-contour”,刀具子类型里选择“MILL”,名称为“D12”,单击确定;在弹出的对话框“直径”里输入 12,“长度”输入 45,“刀刃长度”输入 20,“刀具号”、“补偿寄存器”和

“刀具补偿寄存器”里全部输入 2，单击确定，完成第二把刀的创建；

单击工具栏“创建刀具”按钮创建第三把刀具，在“类型”里选择“mill-contour”，“刀具子类型”里选择“BALL-MILL”，名称为 B12，单击确定；在弹出的对话框“直径”里输入 12，“长度”输入 45，“刀刃长度”输入 20，“刀具号”、“补偿寄存器”和刀“具补偿寄存器”里全部输入 3，单击确定，完成第三把刀的创建。

7.创建工序

(1) 粗加工阶段（图 3-16，3-17，3-18，3-19）

在工序导航器里右键选择“程序顺序视图”，单击工具栏“创建工序”按钮创建第一道工序，在“类型”里选择“mill-contour”，在“工序子类型”里选择“型腔铣”，“程序”里选择“PROGRAM”，“刀具”里选择 D16R0.8，“几何体”里选择“MCS_YEPEN”，“方法”里选择“MILL-ROUGH”，单击确定，弹出型腔铣对话框；点击“方法”编辑按钮，弹出铣削粗加工对话框，将部件余量设置为 1mm，单击确定；在“切削模式”里选择往复，这是为了有更简洁的走刀路线，减少不必要的抬刀，提高加工效率；“平面直径百分比”里输入 60，此为走刀行距，“最大距离”里输入 1，此为切深；单击“切削参数”按钮，弹出“切削参数”对话框，在“切削顺序”里选择深度优先，“刀路方向”选择向内，单击确定；单击“非切削移动”按钮，弹出“非切削移动”对话框，在“进刀类型”里选择沿形状斜进刀，“斜坡角”里输入 1，单击确定；单击“进给率和速度”按钮，弹出“进给率和速度”对话框，勾选主轴转速，并输入 2200，进给率里“切削”输入 1000，进刀输入百分之 25，单击确定，单击“生成”按钮生成刀具路径轨迹，单击“确认”按钮进行实体仿真。

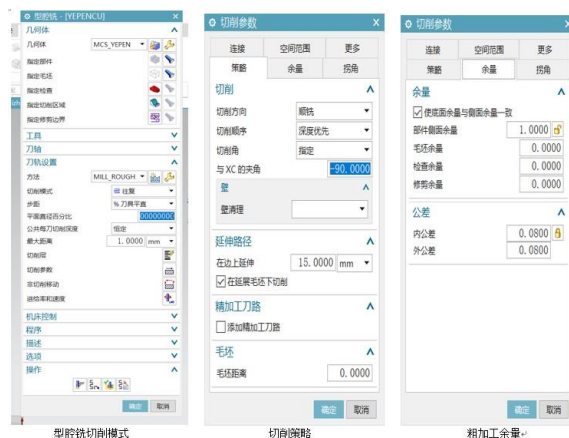


图3-16 叶盆粗加工切削模式及参数设置



图3-17 叶盆粗加工非切削参数和速度进给设置

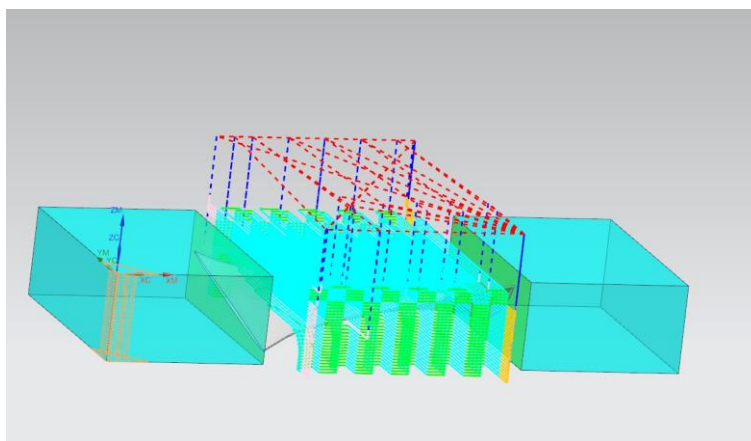


图3-18 叶盆粗加工刀路轨迹

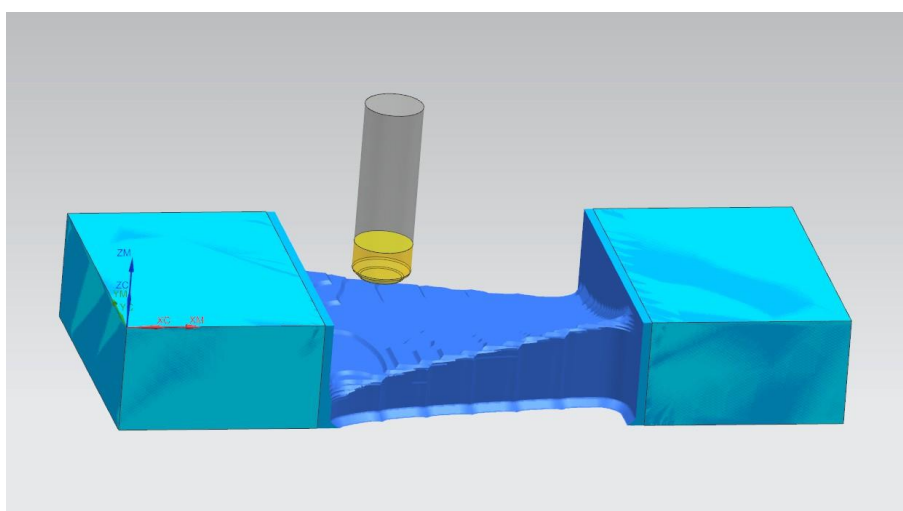


图3-19 叶盆粗加工过程仿真

叶背的粗加工，选择型腔铣类型，选择 D16R0.8 刀具、MILL_YEBEI 几何体、MILL_ROUGH 加工方法，叶盆的粗加工设置与叶背的相同，生成刀轨，仿真加工，确认刀轨。

(2) 半精加工阶段

叶背半精加工 1（图 3-20, 3-21, 3-22, 3-23）：单击工具栏“创建工序”按钮创建工序，在“类型”里选择“mill-contour”，在“工序子类型”里选择“型腔铣”，“程序”里选择“PROGRAM”，“刀具”里选择 D16R0.8，“几何体”里选择“WCS_YEBEI”，“方法”里选择“MILL_SEMI-FINISH”，单击确定，弹出型腔铣对话框，单击“方法”编辑按钮，弹出铣削粗加工对话框，在“部件余量”里输入 0.3，单击确定；在“切削模式”里选择往复，“平面直径百分比”里输入 60，“最大距离”里输入 1；单击“切削参数”按钮，弹出“切削参数”对话框，在“切削顺序”里选择深度优先，“刀路方向”选择向内，点击“空间余量”选项卡，在“处理中的工件”中选择“使用基于层”单击确定；单击“非切削移动”按钮，弹出“非切削移动”对话框，在“进刀类型”里选择沿形状斜进刀，“斜坡角”里输入 1，单击确定；单击“进给率和转速”按钮，弹出“进给率和转速”对话框，勾选主轴转速，输入 2200，进给率里“切削”输入 1000，进刀速率输入 25%，单击确定，单击“生成”按钮生成刀路轨迹，单击“确认”按钮进行实体仿真。

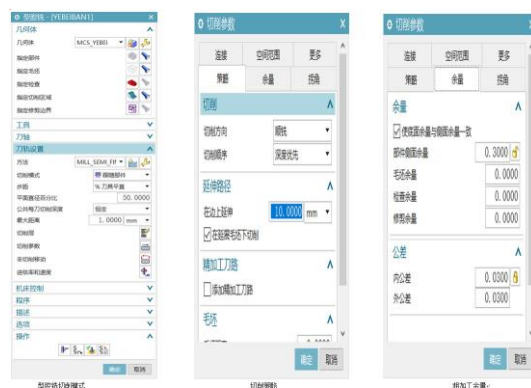


图3-20 叶背半精加工1 切削模式及参数设置



图3-21 叶背半精加工非切削参数和速度进给设置

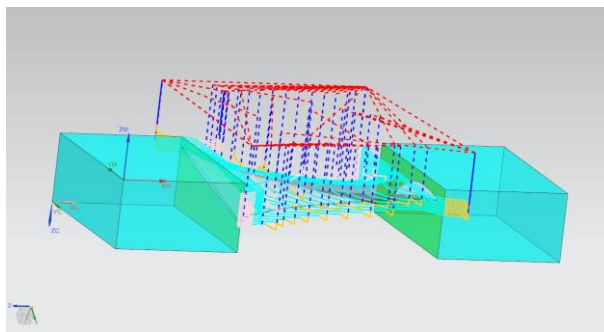


图3-22 叶背半精加工1 刀轨

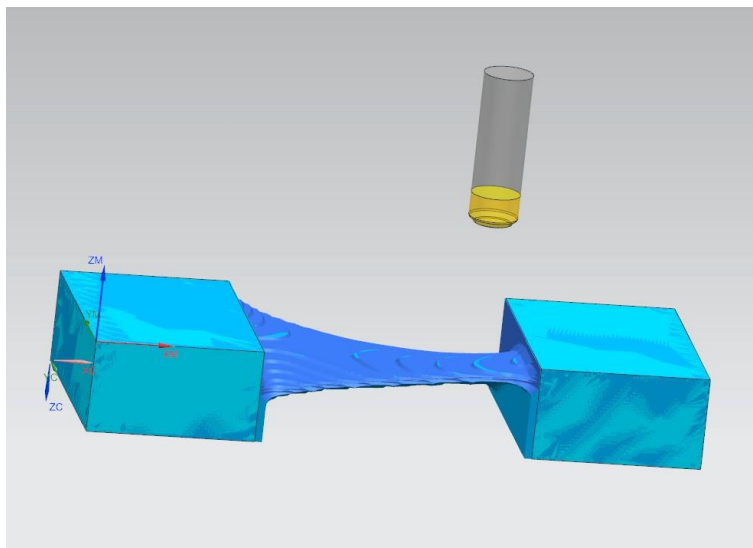


图3-23 叶背半精加工1 过程仿真

叶背半精加工 2（图 3-24，3-25，3-26，3-27）：单击工具栏“创建工序”按钮创建工序，在“类型”里选择“mill-contour”，在“工序子类型”里选择“固定轮廓铣”，“程序”里选择 PROGRAM，“刀具”里选择 D16R0.8，“几何体”里选择 WCS_YEBEI，“方法”里选择 MILL-SEMI-FINISH，单击确定，弹出其对话框，单击“指定切削区域”选择型叶背曲面，点击确定，驱动方法中的“方法”选择“区域铣削”，点击确定弹出“区域铣削驱动方法”对话框，将切削模式设置为“往复”，切削方向设为“顺铣”，步距设为“恒定”，最大距离设为 0.4，步距已应用设为“在部件上”，切削角设为“自动”点击确定；点击刀轨设置中方法后面的“编辑”按钮，将弹出对话框中的部件余量设置为 0.3，点击确定，之后点击“切削参数”按钮，弹出其对话框，切削方向选择“顺铣”，刀路方向选择“向内”，点击确定；点击进给率和速度，在其对话框中勾选主轴转速并设定为 2200，进给率中的“切削”设置为 1000，设置“更多”中的“进刀”为 25，点击确定；点击“生成”按钮生成刀路轨迹，单击“确定”按钮进行实体仿真。



图3-24 叶背半精加工2 驱动方法设置



图3-25 切削参数



图 3-26 进刀方式、转速和进给

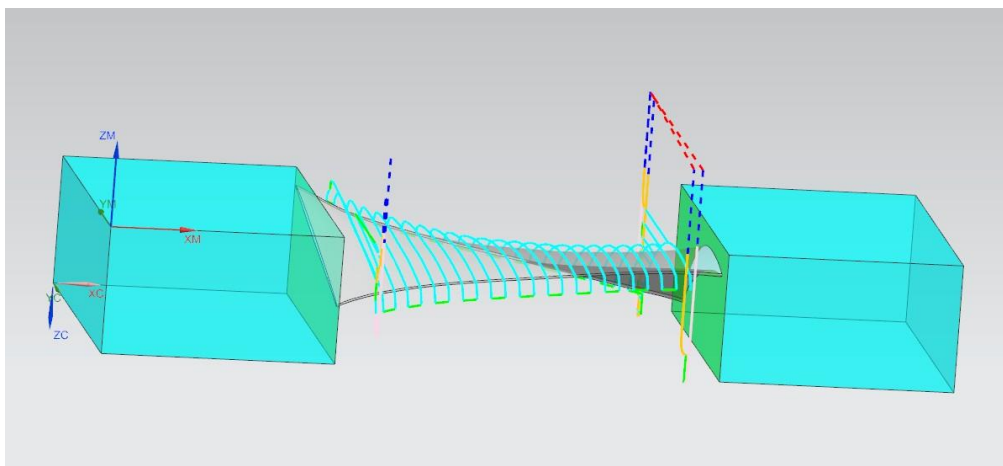


图 3-27 叶背半精加工刀轨

叶盆半精加工与叶背的半精加工一样，也是分为 2 层进行，每一层的参数设置与叶盆的完全相同，这里就不再进行多余的阐述。

（3）精加工阶段

叶盆曲面精加工（图 3-28, 3-29, 3-30, 3-31, 3-32）：点击创建工序，选择区域铣削方式，选择 D12mm 球头刀、MILL_YEPEN 几何体、MILL_FINISH 加工方法，进入区域铣削对话框，“程序”里选择 PROGRAM，“刀具”里选择 B12，“几何体”里选择 WORKPIECE，“方法”里选择 MILL-FINISH，单击确定，弹出其对话框，单击“指定切削区域”选择叶片曲面，点击确定，驱动方法中的“方法”选择“区域铣削”，点击确定弹出“区域铣削驱动方法”对话框，将切削模式设置为“往复”，步距设为 5% 的平面直径百分比，点击确定；之后点击“切削参数”按钮，弹出其对话框，切削方向选择“顺铣”，刀路方向选择“向内”，点击确定；点击进给率和速度，在其对话框中勾选主轴转速并设定为 2500，进给率中的“切削”设置为 800，设置“更多”中的“进刀”为 25，点击确定；点击“生成”按钮生成刀路轨迹，单击“确定”按钮进行实体仿真。



图 3-28 叶盆精加工驱动方法设置



图 3-29 切削参数



图 3-30 进刀方式、转速和进给

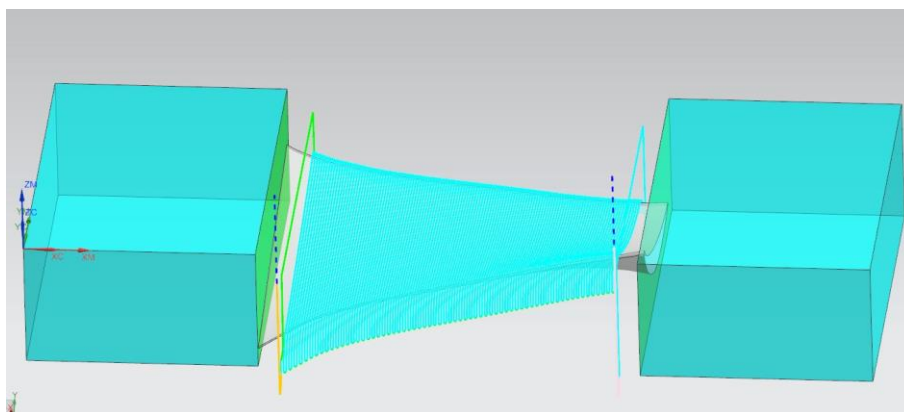


图 3-31 叶盆精加工刀路轨迹

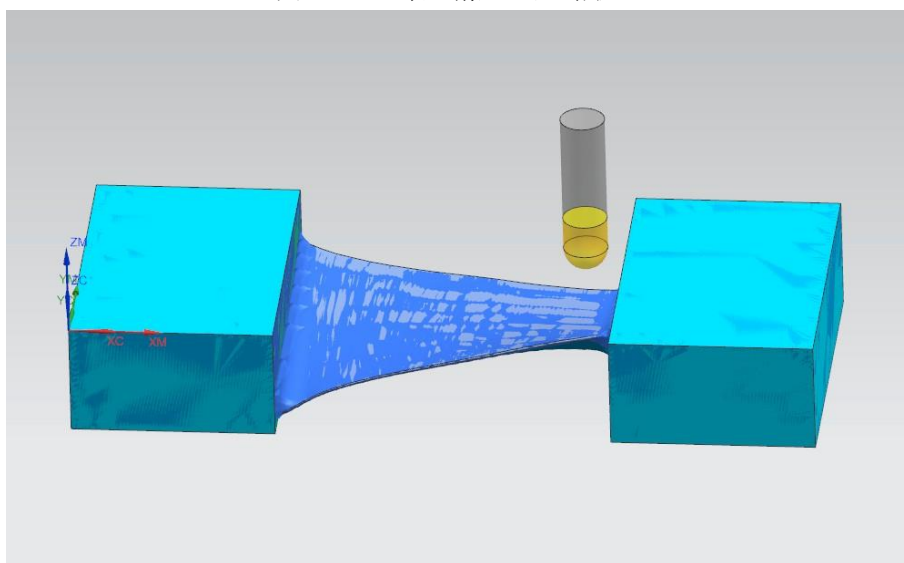


图 3-32 叶盆精加工仿真

叶盆清根处理(图 3-33, 3-34, 3-35): 同样创建工序 在“类型”里选择“mill-contour”, 在“工序子类型”里选择“多刀路清根”, “程序”里选择 PROGRAM, “刀具”里选择 D12, “几何体”里选择 MCS_YEPEN, “方法”里选择 MILL-FINISH, 单击确定, 弹出多刀路清根对话框; 单击“指定切削区域”按钮, 选中侧壁面, 单击确定, 驱动设置里的非陡峭切削模式选择单向, 步距为 2.5, 单击“进给率和转速”按钮, 在弹出的对话框中勾选主轴转速并将其设置为 2500, 进给率设置为 1000, 进刀输入百分之 25, 单击确定, 单击“生成”按钮生成刀路轨迹, 单击“确认”按钮进行实体仿真。



图 3-33 参数设置

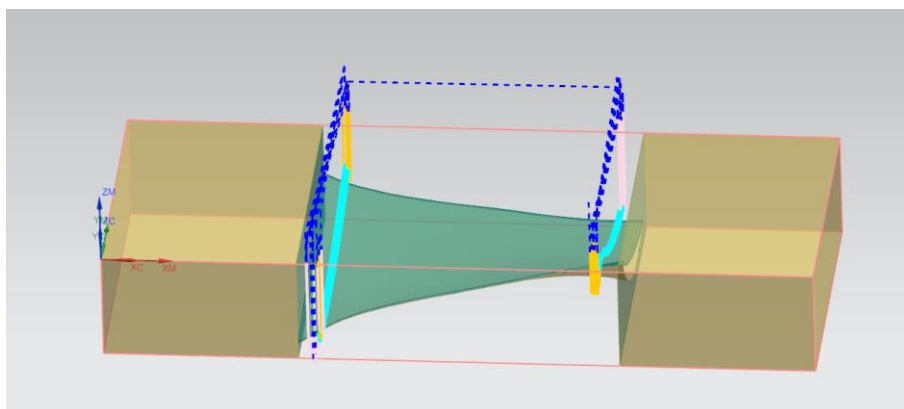


图 3-34 多刀路清根刀路轨迹

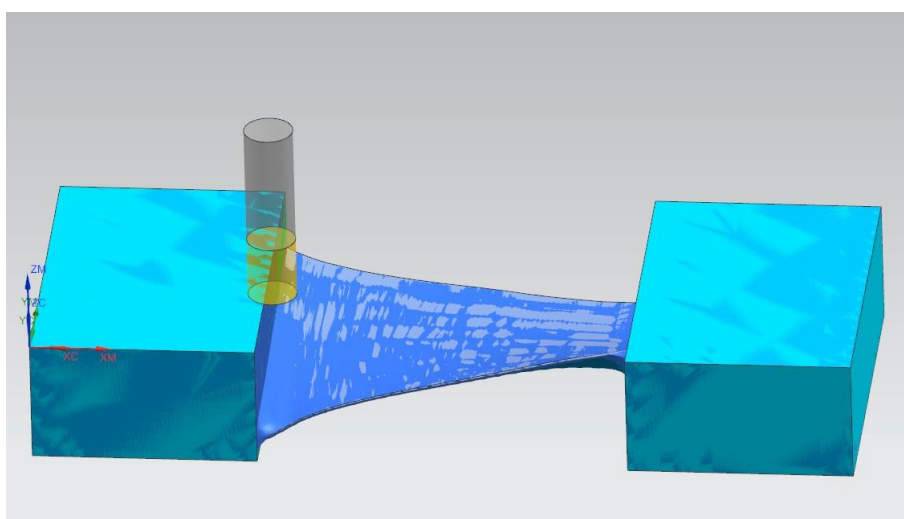


图 3-35 清根仿真

叶盆精加工与叶背精加工相同，不做过多说明。

3.2.3 叶片数控加工实验

1. 实验设备

数控加工中心是从数控铣床发展而来。两者的加工工艺基本相同，与数控铣床的最大区别在于加工中心具有刀库，能实现自动换刀，通过在刀库上安装不同用途的刀具，可在一次装夹中通过自动换刀装置改变主轴上的加工刀具，实现多种加工功能。就本校加工中心来说，机床的开机顺序为先打开墙上的总开关，打开气泵开关，然后打开机床总电源开关给机床上电然后打开操作面板上的系统电源，最后等到系统界面呈现以后旋下急停按钮。等机床打开且稳定以后首先给机床回归零点，然后把相对坐标设零，避免 Z 轴对刀时刀补输错导致撞刀

本论文所采用的是 DMC635V 式三轴加工中心（图 3-36），是一台沈阳机床股份有限公司生产的经典型立式三轴加工中心，是通用型加工中心，刀具夹紧方式为拉钉夹紧，刀柄型号为 BT40。



图 3-36 DMV635V 加工中心

加工工具（图 3-37, 3-38）有 D16 飞刀刀杆、D16R0.8 飞刀刀片、D12 平刀、D12 球刀、D16 刀套、D12 刀套、D16 加强刀柄夹头、D12 普通刀柄夹头、BT40 钻夹头、刀柄夹头扳手、钻夹头扳手、Z 轴对刀仪、D10 机械式寻边器、锁刀器，其工具图如下：



图 1 飞刀刀杆



图 2 飞刀刀片



图 5 D16 刀套



图 6 D12 刀套



图 3 D12 平刀



图 4 B12 球刀



图 7 D16 加强刀柄夹头



图 8 D12 普通刀柄夹头

图 3-37 刀具

图 3-38 刀柄

2.叶片数控铣削加工 NC 后处理及优化

在工序导航器程序顺序视图中选中单个程序然后右键选择“后处理”，由于没有专用的后处理文件，就在后处理配置中选择“mill_3axis_Sinumerik_840D_mm.pui”配置文件，命名为 DMC635V，自动生成机床识别的代码（图 3-39），例如：

```

%
N0010 G40 G17 G90 G70
N0020 G91 G28 Z0.0
N0030 T01 M06
N0040 G00 G90 X5.2603 Y3.7402 S2200 M03
N0050 G43 Z.8268 H01
N0060 Z.0787
N0070 G01 Z-.0394 F9.8 M08
N0080 Y3.4252
N0090 Y-.2756 F78.7
N0100 X4.9949
N0110 Y3.4252
N0120 X4.7295
N0130 Y-.2756
N0140 X4.4641
N0150 Y3.4252
N0160 X4.1987
N0170 Y-.2756
N0180 X3.9334
N0190 Y3.4252
N0200 X3.668
N0210 Y-.2756
N0220 X3.4026
N0230 Y3.4252
N0240 X3.1372
N0250 Y-.2756
N0260 X2.8718
N0270 Y3.4252
N0280 X2.6064
N0290 Y-.2756
N0300 Y-.5906 F39.4
N0310 Z.0787
N0320 G00 Z.8268
N0330 X5.2985 Y3.7767
N0340 Z.0394
N0350 G01 Z-.0787 F9.8
M360 Y3.4617
    
```

图 3-39 NC 代码生成

由于生成的 G 代码与 FANUC Oi-MC 不完全匹配，故作了如下修改：

①将文件中自动换刀方式（M6），在实验中则采用的手动换刀，故将其换刀相关指令删除。

②后处理 G 代码采用用小直线段拟合所有的曲线、圆弧及直线，而其调用的缓冲模态指令 CYCLE832()在 FANUC Oi-MC 中不支持，而是采用 G64 预读缓冲指令，故将 CYCLE832()相关代码删除，在 G01 前激活 G64 模态指令。

3.加工过程

1) 对刀与寻边（图 3-40）

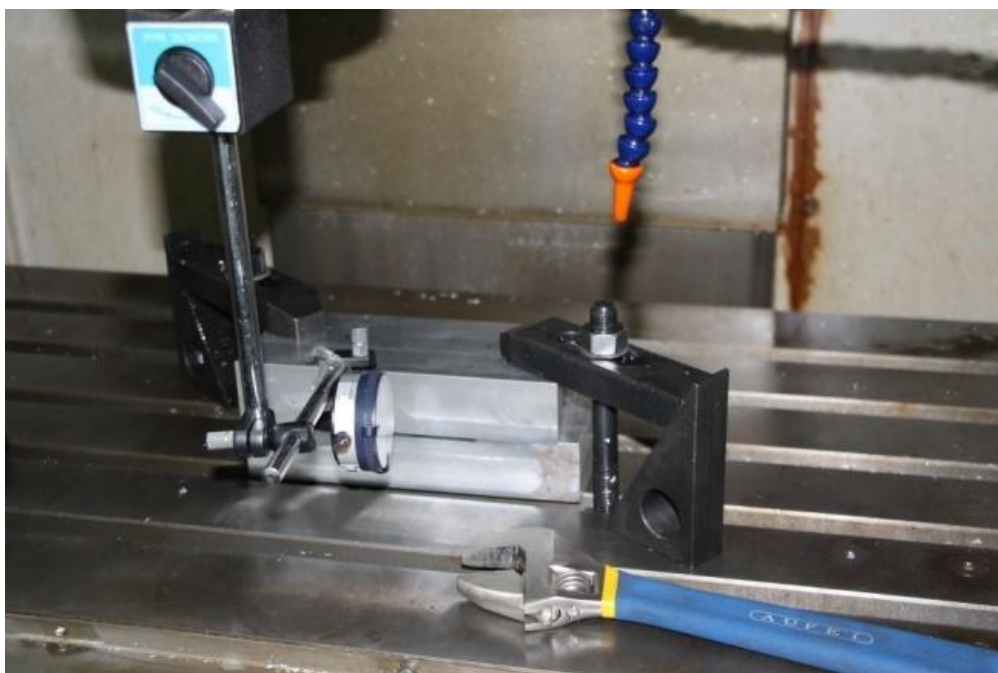


图 3-40 工件找正

①量块间接试刀法

我们可以采用对刀块，也可采用滚刀法对刀，采用一个精度很高、硬度很高的标准量块（塞尺）或工具，本实验中选用一把立铣刀，利用螺旋测微器测得其直径为 12.000mm，精度很高，作为塞尺。使其轻轻在刀具和工件表面之间滑动，以刚好通过为对刀位置，若不能通过则向外退半个距离，未接触时向内进半个距离，直至调整到手轮的最小该变量（即机床的最小定位精度），最后将量块厚度补偿到工件坐标系偏置中既可，分别记下 X、Y、Z 对刀时各自对应的坐标。

这种方法既可避免工件的划伤，又不会对刀刃造成损伤，而且对刀精度可到机床精度，安全快捷，适用于各种刀具的对刀。

②直接试切工件法

该方法是将刀具以低速旋转，移动刀具直至在工作表面切出微小切屑，认为此时对应方向上的坐标为对应的偏置坐标。为避免切出少量切屑对工作表面有影响，还可在工件上吸附一张薄纸，以刀具将纸片切破或移动为对刀点。

无论切除工件表面还是切出纸片，都有一个与真实偏置的偏差，只不过是一个过切，一个少切，并且对于球头刀的刀尖对刀，由于开始切除时现象不明显，往往造成过切现象。这种方法操作简单，在粗加工中常常用到。

2) 叶盆和叶背的粗加工（图 3-41，3-42）

将毛坯进行安装定位，导入加工工序，由于 G 代码文件较大，所以采取在线读取程序的方法进行加工。



图 3-41 叶盆粗加工

将工件翻转进行安装定位，方法同叶背粗加工中。



图 3-42 叶背粗加工

3) 叶背和叶盆的半精加工（图 3-43）



图 3-43 叶背半精加工

4) 叶盆和叶背的精加工（图 3-44）

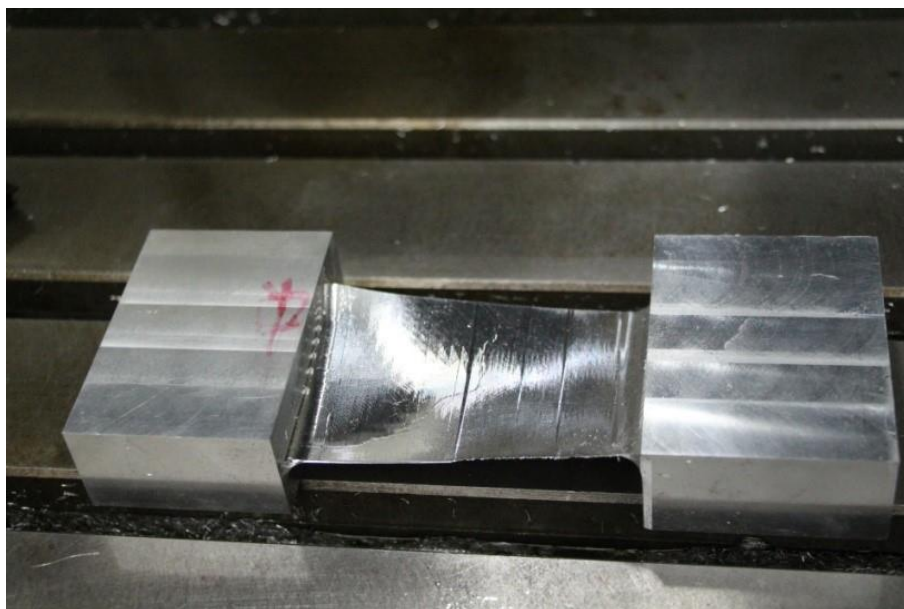


图 3-44 叶盆精加工

3.2.4 叶片加工的误差来源分析

（1）机床的系统空间误差

1)由于承载变形误差、热误差和结构几何误差引起刀具与弓箭作用点上的相对位置偏差所引起的加工误差；

2) 由于位置检测误差、进给传动机构误差和伺服系统的跟踪误差等引起的位移误差。

（2）叶片和夹具系统的位置误差

由于由于工件材质不均、切削热和叶片装夹弹性变形等塑性变形引起的误差。

（3）刀具系统的位置误差

由换刀、多次对刀定位、道具的尺寸调整误差、磨损、热伸缩、受力变形和热伸长等因素引起的加工误差。

（4）外界干扰误差

指运行工况的波动和环境条件的扰动所引起的随机误差。

（5）编程计算误差

生成刀位轨迹时采用的是直线或圆弧逼近理论表面是的逼近误差，并未采取B样条曲线（NURBS）插补。

加工误差的权重随机床的种类、叶片结构和工作状态有所改变，但是对于我们本文所加工的叶片而言，弹塑性变形误差是影响加工质量和效率的主要因素。

第四章 叶轮的五轴加工

4.1 五轴数控机床

我们平常所熟悉的数控机床有三个轴，分别为 X、Y、Z，这三个轴都是直线坐标轴，多轴指的是在一台数控机床上至少具备一个第四旋转轴，通常我们所说的多轴数控加工最起码指的是四轴以上的数控加工，多轴联动中最具代表性的是 5 轴数控加工。而多轴数控机床与普通的三轴数控机床不同的是，多轴数控机床则将数控铣、数控镗、数控车、数控钻等功能结合在了一起，工件进行一次装夹后，可以对工件进行铣、车、镗、车等多个工序，有效的避免了由于工件多次装夹所引起的定位误差，并且可以缩短生产周期，提高加工效率和加工精度，伴随着我国“十三五”计划之后，对叶轮的加工制造技术有了更高的要求，随之也对加工中心的加工能力和加工效率提出了更高的要求，因此，多轴数控加工技术得到了空前的发展。



大连科德 KMC600S UMT 车铣复合五轴机床

4.2 叶轮的五轴加工模拟

整体叶轮结构复杂，叶轮流道既深而且还窄，叶片弯扭度大，且叶片还薄，选用的材料韧性大，属于典型的难加工零件。叶轮的数控加工^[24]路线一般来说包括一下几个步骤，毛坯锻造、流道粗加工、叶片粗加工、叶片精加工、分流叶片

精加工，叶根圆角精加工、轮毂精加工和叶片抛光等几个阶段，其中最耗时、材料去除量最大的是粗加工阶段，约占材料总去除量的 70% 以上，由此可以看出粗加工的加工效率决定了整个叶轮的加工效率，粗加工的加工质量影响了后续叶轮的精加工。

整体叶轮的实体造型主要包括创建叶片实体和轮毂实体两部分，本文并不对叶轮的三维建模进行研究，只研究了叶轮的加工模拟。

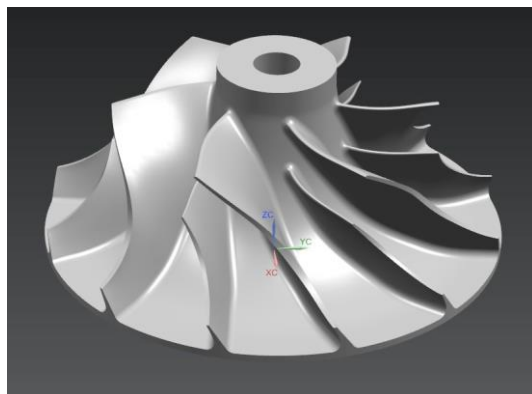


图 4-1 叶轮 1

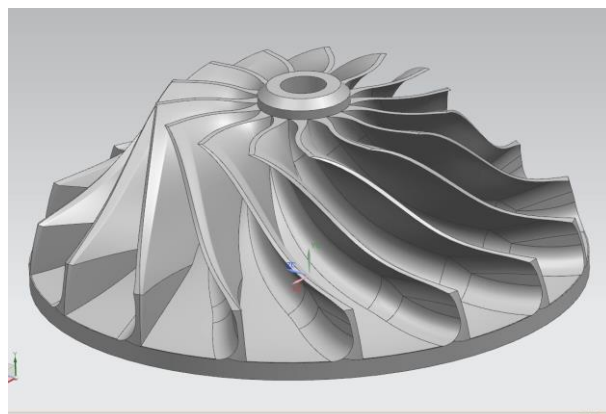


图 4-2 叶轮 2

由于在 UG12.0 中已经有内置的叶轮加工模板，我们参考现有的模板，加工工序分为以下几个步骤，首先为叶片流道粗加工，使用 B8 的球头刀对叶轮进行开粗加工，其次对叶片进行精加工，使用 B4 的球头刀，再然后是分流叶片的精加工，也使用 B4 的球头刀，再然后是轮毂的精加工，同样使用的刀具为 B4 的球头刀，最后是叶根圆角精加工，使用 B4 的球头刀，具体如下：

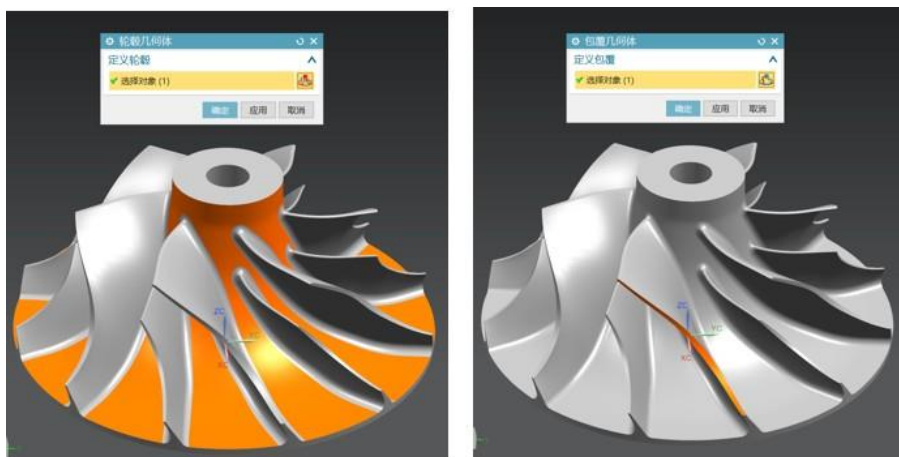
1、指定 MCS、毛坯和几何体：与之前的三轴叶片步骤基本相同，不同之处在于在主几何体下创建了 6 个叶片几何体（图 4-3），分别指定了叶轮的轮毂（图 4-4）、包覆（图 4-4）、叶片（图 4-5）、叶根圆角（图 4-5）、分流叶片（图 4-6）。



叶片几何体

指定几何体

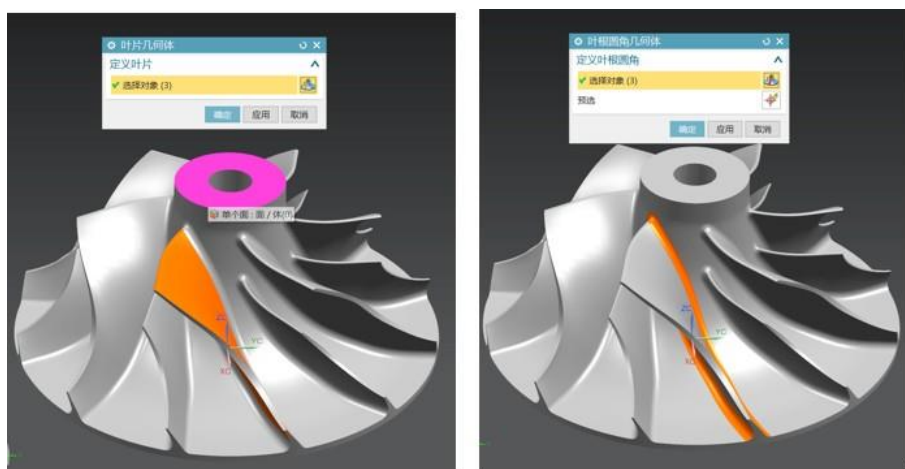
图 4-3 叶片几何体



指定轮毂

指定包覆

图 4-4 指定轮毂和包覆



指定叶片

指定叶根圆角

图 4-5 指定叶片和叶根圆角

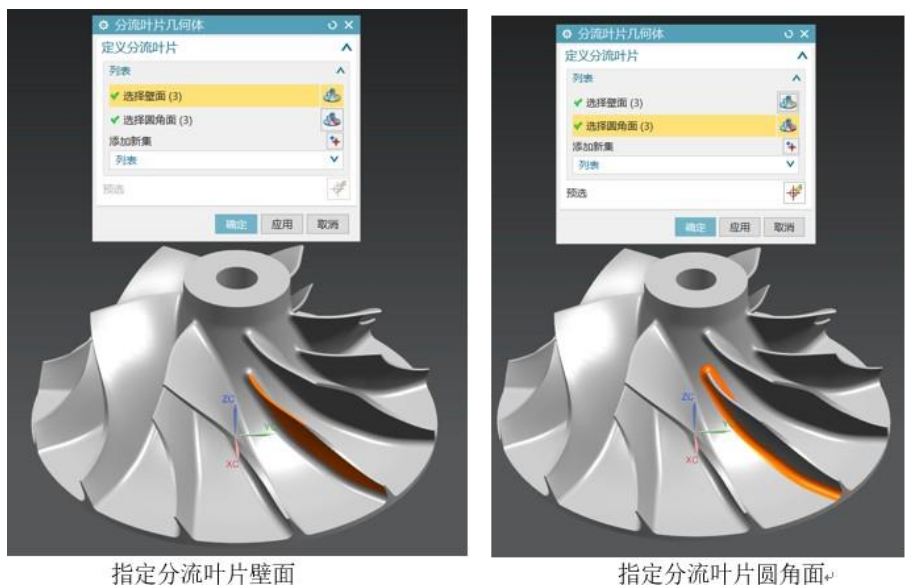


图 4-6 指定分流叶片

以上步骤为一个一叶片的几何体指定，其余五个与之相同，复制改叶片就行。

2、叶片流道粗加工：击创建工序，选择 mill_multi_blade(叶片的多轴加工)，工序类型选择为 IMPELLER_ROUGH（叶轮粗加工），刀具选择 B8 的球头刀，几何体选择创建的 YEPIAN1,驱动方法采取叶片粗加工，前缘选择沿部件轴，切削模式选择往复上升，切削方式选择顺铣，步距选择恒定，最大步距为 40%，转速设置为 14000rpm，进给为 4500mm/m，生成刀路轨迹。



图 4-7 工序创建



图 4-8 驱动方式、转速和进给

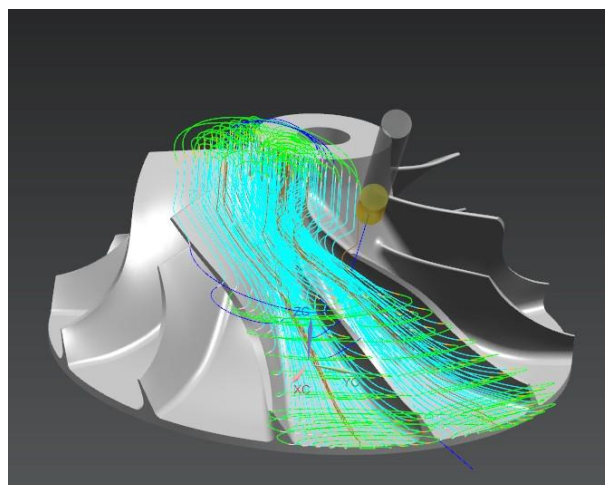


图 4-9 叶轮叶片 1 粗加工刀路轨迹

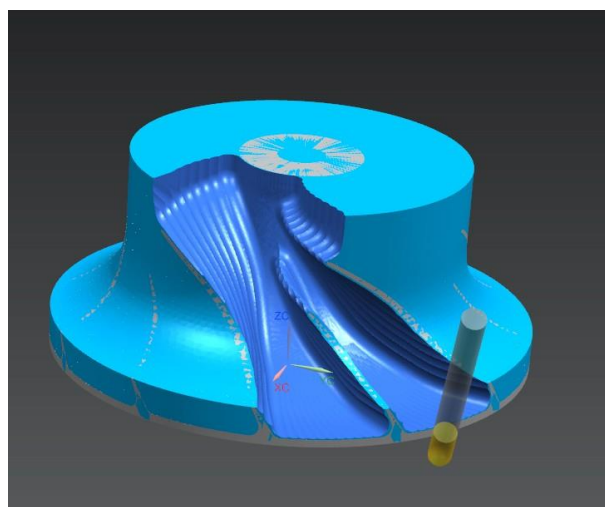


图 4-10 叶轮叶片 1 加工仿真

3、叶片的精加工：点击创建工序，选择 mill_multi_blade(叶片的多轴加工)，工序类型选择为 IMPELLER_BLADE_FINISH（叶片精铣），刀具选择 B4 的球头刀，几何体选择创建的 YEPIAN1,驱动方法采取叶片精加工，要精加工的几何体选择叶片 1，要切削的面选择左面、右面和前缘，切削模式选择单向，切削方式选择顺铣，起点为后缘，转速设置为 18000rpm，进给为 4000mmpm，生成刀路轨迹。



图 4-11 驱动方式、转速和进给

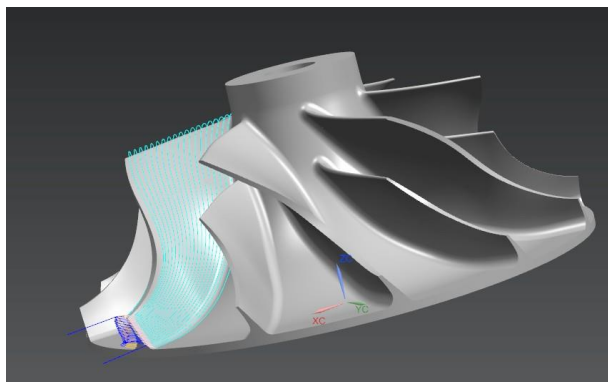


图 4-12 叶轮叶片 1 精加工刀路轨迹

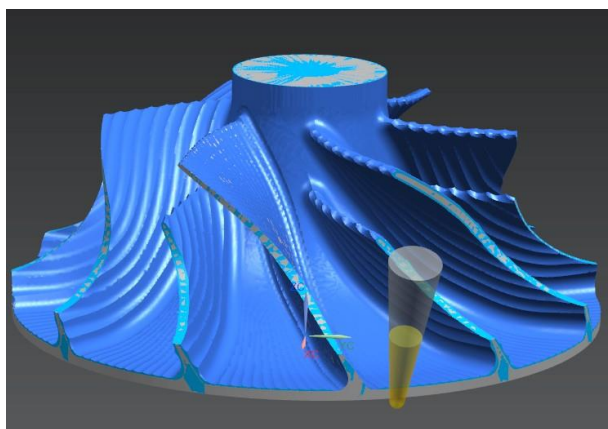


图 4-13 叶轮叶片 1 精加工仿真

4、分流叶片的精加工：点击创建工序，选择 mill_multi_blade(叶片的多轴加工)，工序类型选择为 IMPELLER_BLADE_FINISH（叶片精铣），刀具选择 B4 的球头刀，几何体选择创建的 YEPIAN1,驱动方法采取叶片精加工，要精加工的几何体选择分流叶片 1，要切削的面选择左面、右面和前缘，切削模式选择单向，切削方式选择顺铣，起点为后缘，转速设置为 18000rpm，进给为 6000mmpm，生成刀路轨迹。



图 4-14 参数设置

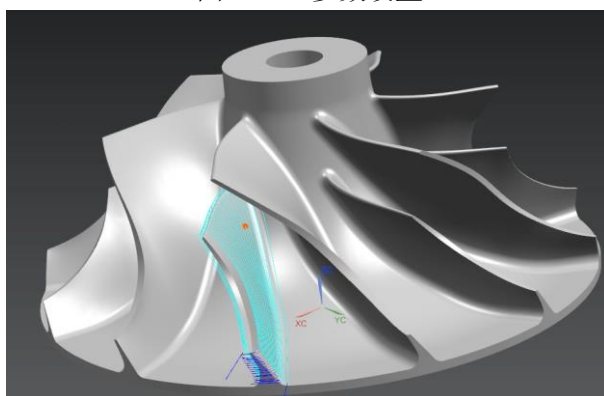


图 4-15 叶轮分流叶片 1 刀路轨迹

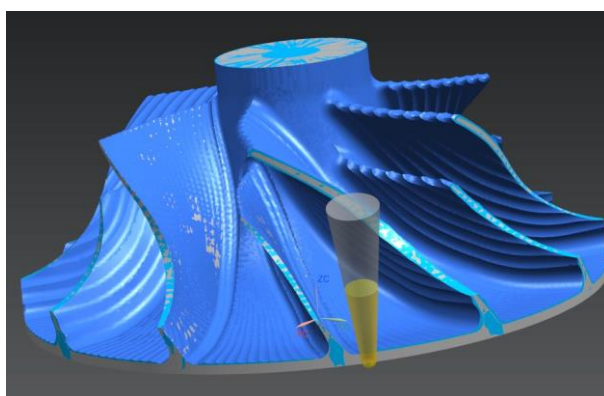


图 4-16 叶轮分流叶片 1 加工仿真

5、轮毂精加工：点击创建工序，选择 mill_multi_blade(叶片的多轴加工)，工序类型选择为 IMPELLER_HUB_FINISH（轮毂精加工），刀具选择 B4 的球头刀，几何体选择创建的 YEPIAN1,驱动方法采取轮毂精加工，前缘选择沿部件轴，切削模式选择往复上升，切削方式选择混合，步距选择恒定，最大步距为 20%，转速设置为 18000rpm，进给为 6000mmpm，生成刀路轨迹。



图 4-17 参数设置

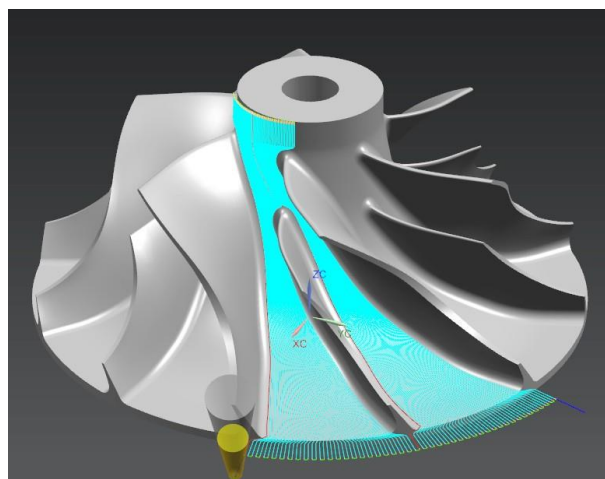


图 4-18 轮毂精加工刀路轨迹

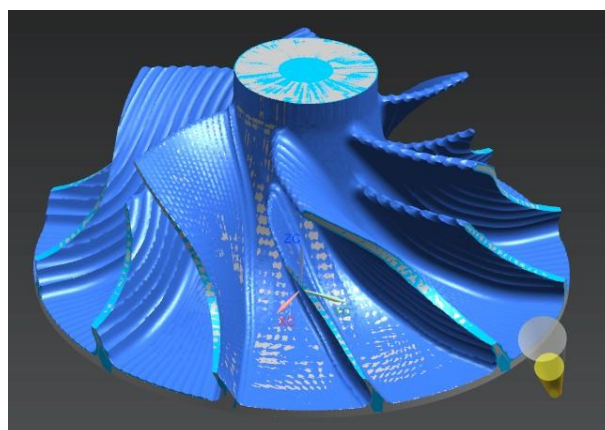


图 4-19 轮毂精加工仿真

6、叶片和分流叶片圆角精加工：点击创建工序，选择 mill_multi_blade(叶片的多轴加工)，工序类型选择为 IMPELLER_BLEND_FINISH(叶根圆角精加工)，刀具选择 B4 的球头刀，几何体选择创建的 YEPIAN1,驱动方法采取圆角精铣，前缘选择沿部件轴，切削模式选择往复上升，切削方式选择混合，步距选择恒定，最大步距为 20%，转速设置为 18000rpm，进给为 6000mmpm，生成刀路轨迹。



圆角精加工驱动方式

转速和进给

图4-20 叶片圆角精加工驱动方式、转速和进给

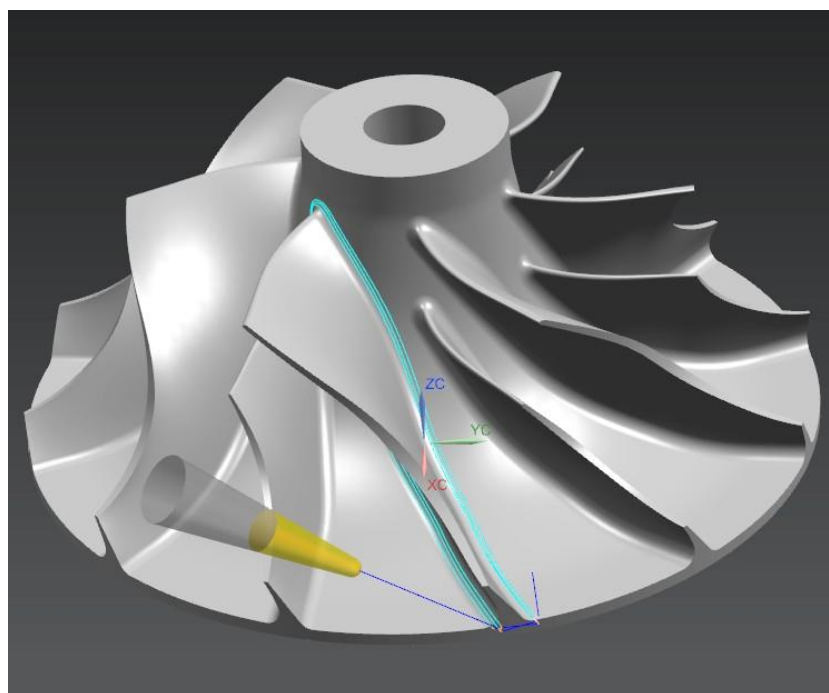


图 4-21 叶片圆角精加工刀路轨迹

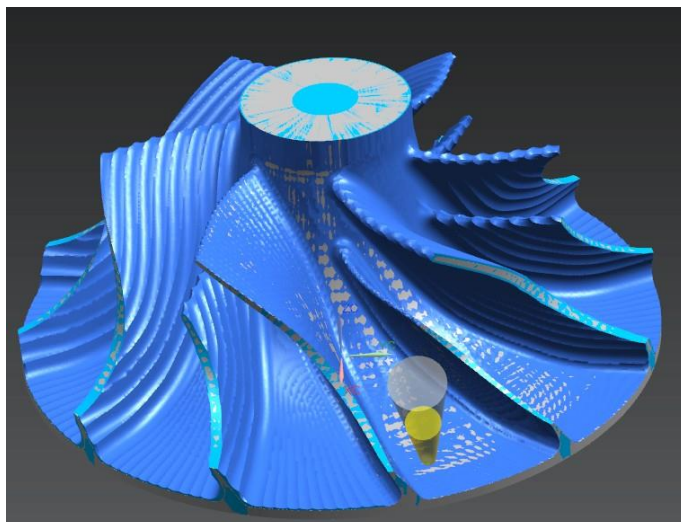


图 4-22 叶片圆角精加工仿真



圆角精加工驱动方式

转速和进给

图 4-23 分流叶片参数设置

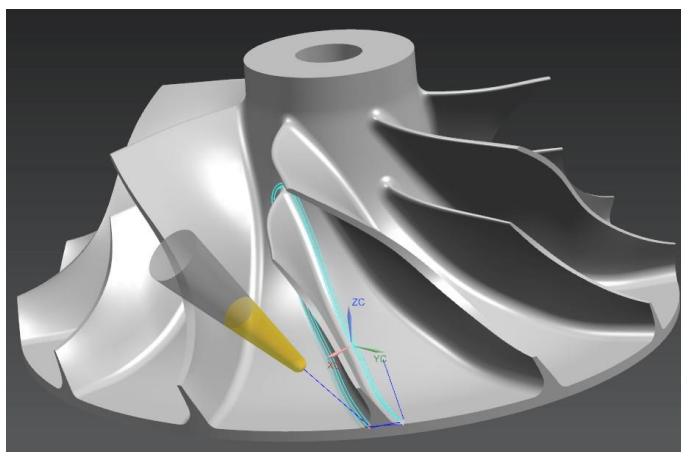


图 4-24 分流叶片圆角精加工刀路轨迹

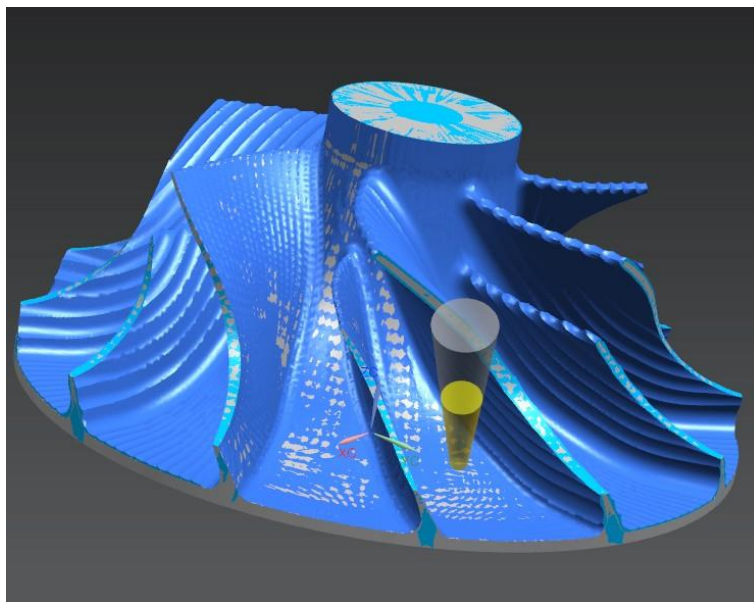


图 4-25 分流叶片圆角精加工仿真

以上步骤为一个叶片的加工过程，其余五个叶片复制即可，这里不做过多的阐述。

第五章 总结和展望

本文以某航空发动机转子的叶片为例，在对其进行深入的分析后，进行了叶片的 UG 三维建模，数控加工工艺，数控路径规划，刀具轨迹验证等方面的内容进行了比较深入的分析研究。

该类零件在建模过程中由于曲线曲面的拟合方式不同会引入误差，选用恰当的传输规范可减少该模型误差。其几何特征几乎都为空间扭转薄壁特征，颤振和变形在此类零件加工中应首要考虑，而寻找高效高质量的切削参数是此类零件加工技术研究的核心；加工中夹紧方式和夹紧力大小会对零件的精度产生较大影响；根据实验发现采用多轴联动数控加工可以一次安装定位，大大减少重复定位误差的影响，且可使刀轴以相对加工表面合适角度进行切削，得到较好的加工质量和切削效率。流线类曲面的加工方式和工艺参数集中于数控编程过程，更全面的刀轨生成算法和后处理方式是加工工艺的体现方式。

5.1 总结

1. 零件建模方式的误差

从理论上来说，对航空发动机叶片数学模型建立方法的研究必不可少，但是由于各种建模方法的不同，曲线曲面拟合方式的不同，最终所得到的叶片曲面形状也会有着微小差异，曲面的光顺性、曲率连续性差别较大，这种差别的介入，对于后期的数控编程的刀路轨迹的生成也会有这一定的影响，从而引入的模型误差。

2. 安装定位基准的选择

由于航空发动机叶片类零件对精度的要求都很高，但是我们在采取三轴数控铣床的时候，一个叶片的加工会存在很多次的装夹，会存在重复定位误差，而且对加工精度的影响会很大，而采用 4 轴或 5 轴一次安装定位可省略重复定位，大大提高叶片的加工精度；对于整体叶轮和整体叶盘的加工，则只能采用 5 轴联动进行加工。

3. 薄壁特征加工工艺

薄壁零件的切削用量直接影响其加工变形，与常规零件加工不同，制定加工工艺时要根据薄壁的厚度采用合适的切深和切宽，提高转速来减小切削力，减小受力变形。

4. 安装定位基准的选择

由于叶片类零件精度要求都很高，采用三轴加工时机床刚性好，但有重复定位误差存在，对加工精度影响很大，需要设计专用夹具来保证定位基准精度，适

用于大批量单个叶片零件的加工；对于小批量叶片生产，采用 4 轴或 5 轴一次安装定位可省略重复定位，大大提高叶片的加工精度；对于整体叶轮和整体叶盘的加工，则只能采用 5 轴联动进行加工。

5. 夹紧力方式和大小

对于两端夹紧的安装方式（例如三轴加工和四轴两端夹紧机构），夹紧力的位置应保证加工过程加持可靠，且对工件变形影响小；夹紧力大小应根据切削力大小设置，过大过小都会对加工质量产生影响。叶片的薄壁特征使这种变形显得更明显。

5.2 展望和问题

1. 对于叶片类零件可以制定行业的零件数据传输标准，零件信息不仅包含了各个点的坐标，而且说明拟合方式及其参数，保证传递过程中的一致性，减小设计与制造间传递误差和建模误差。

2. 由于叶片的薄壁特征，对于易发生颤振的叶尖和叶根处，可先进行颤振分析和预测，指导切深切宽等参数的选择，保证加工过程的稳定性和加工质量，并在此基础上提高精加工效率。

3. 在保证加工稳定和加工质量的前提下，提高主轴转速、采用较大每齿进给量以提高精加工进给率，减少安装次数和对刀次数，减少刀具中移刀次数，可以减少叶片数控加工时间。

参考文献

- [1] 彭亚, 肖丽. 现代艺术设计简史 [M]. 上海科学技术文献出版社, 2015.7.
- [2] 林崇德, 姜璐, 王德胜. 中国成人教育百科全书·物理·机电 [M]. 南海出版公司, 1994.
- [3] 全荣. 五坐标联动数控技术 [M]. 湖南: 湖南科学技术出版社, 1995.
- [4] 林洁琼. 自由曲面分片研抛与轨迹规划的研究 [M]. 吉林大学, 2015.
- [5] 张定华. 数控加工手册, 第 3 卷 [M]. 化学工业出版社, 2013.11.
- [6] 郭文有. 航空制造工程手册: 发动机叶片工艺 [M]. 航空工业出版社, 1997.12.
- [7] 游华云, 叶佩青, 杨开明等. 制造技术与机床 [J]. 机床工业需要发展五轴数控技术, 2002.12: 25-28.
- [8] 林胜. 5 轴数控机床发展与应用 [J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(4): 1-6.
- [9] 刘卫华. 近十年来压缩机技术研究动向 [J]. 压缩机技术, 1988(4): 33-35.
- [10] 植田勋. 离心式压缩机三元叶轮加工程序 [J]. 飞机发动机技术, 1986(6): 49-51.
- [11] 刘维伟, 张定华. 航空发动机薄壁叶片精密数控加工技术研究 [J]. 机械科学与技术, 2004, 23(3): 329-331.
- [12] 李海宁, 史耀耀. 航空发动机风扇/压气机叶片 _ 制造关键技术 [J]. 航空制造技术, 2013, 16: 34-37.
- [13] Susan X Li, Robert B Jeard[J]. 5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter, 1994, 26(3): 165-178.
- [14] 任秉澄. 空间自由曲面非球头刀加工轨迹自动生成的新原理和计算方法 [J]. 机械工程学报, 1994, 30(6): 21-26.
- [15] H.C.Kuo, B.Y.Ren, Y.Y.Tang, W.Y.Dzan. Geometry models for improving NC machining efficiency and accuracy of propeller with constant pitch[J]. J.Chin.Soc.Mech.Eng, 1999, 20(5):389-395.
- [16] 柯明扬. 机械制造工艺学 [M]. 北京航空航天大学出版社, 1996.
- [17] 焦健斌, 刘华明, 韩向利. 半开式叶轮数控加工工艺分析 [J]. 制造技术与机床, 1995(6):15-18.
- [18] 张小粉, 白, 王永明. 叶片参数化设计方法与建模过程研究[J]. 内燃机与配件, 2019(06):13- 15.
- [19] Edie Miglio, Nicola Parolini, Anna Scotti, Christian Vergara. Curve Freeform[M]. Springer, 2019.8.
- [20] M.Pourazady, X.X. Direct manipulations of B-spline and NURBS curves[J].

- Advances in Engineering Software Volume , 2000.2, 31(2): 107-118.
- [21] 王锦红, 邵明. 基于 UG 软件参数化建模技术的应用 [J]. 现代制造工程, 2003, 14(2):29-30.
- [22] 禹诚. 基于 UG 的产品参数化设计方法 [J]. 中国机械工程, 2003, 14(S1): 19-21.
- [23] KUANG W. Development of parametric part family system based on UG and excel parameter form [C] [R], WenZhou :Proceedings of the EEE 10th International Conference, 2009.
- [24] 周艳红, 周济, 周云飞. 五坐标数控加工的理论误差分析与控制 [J]. 机械工程学报, 1995, 35(5): 54-57.

附录

附录 1 叶片加工程序代码

%

N0010 G40 G17

G90 G70 N0020

G91 G28 Z0.0

N0030 T01 M06

N0040 G00 G90 X5.2603 Y3.7402

S2200 M03 N0050 G43 Z.8268

H01

N0060 Z.0787

N0070 G01 Z-.0394

F9.8 M08 N0080

Y3.4252

N0090

Y-.2756

F78.7 N0100

X4.9949

N0110

Y3.4252

N0120

X4.7295

N0130

Y-.2756

N0140

X4.4641

N0150

Y3.4252

N0490

Y-.3121

N0500

X3.5598

N0510

Y3.4617

N0520

X3.3114

.....

.....

.....

N5850 G03 X2.6537 Y-.1123 I.504

J-1.5822 N5860 G01 X2.5673

Y-.1536

N5870 Y-.315

N5880

Y-.6299

F39.4 N5890

Z-1.0236

N5900 G00

Z.8268

N5910

X5.2981

N6050

X4.0568

Y.1584 N6060

Y-.315

N6070

X3.808

5 N6080

Y.1274

N6090

X3.5603

Y.0965 N6100

Y-.315

N6110

X3.312

N6120

Y.0595

N6130 G03 X3.0638 Y.0113 I.9878

J-5.7612 N6140 G01 Y-.315

N6150

X2.815

5 N6160

Y-.0513

N6170 G03 X2.6537 Y-.1123 I.504 J-1.5822

N6180 G01 X2.5673

Y-.1536 N6190

Y-.315

N6200

Y-.6299

F39.4 N6210

Z-1.063

N6220 G00

Z.8268

N6230 M02

%

致谢

光阴似箭，岁月如梭，两年的大学生生活转瞬即逝！临近离别，总易感怀，最应感谢，便是在悄然逝去的两年时光里各位老师的辛勤教诲，除去课堂所学的理论知识，诸位老师严谨的治学理论，务实的工作态度更是令我感触颇深，也让我懂得唯有脚踏实地、勤奋向上方能拥有丰盈的人生，在此，尤其要特别感谢我的指导老师李教授，李老师学识渊博，德高行优，对待学生更是认真负责、关怀备至，两年的本科学习，李老师的言传身教早已成为我日后学习的楷模表率。在论文的写作过程中，从确定研究方向到撰写开题报告，从设计论文提纲再到终稿修改润色，李老师严格把关，循循善诱。文章一字一句，无不浸透着李老师辛勤的汗水。

同时，也感谢给予我大力支持和帮助的机械系老师和图书馆的工作人员，感谢曾经帮助和关心过我、曾陪我一起走过每一段难忘时光的各位老师、朋友、同校老乡和大学同学们。

回首大学四年，我们一起走过的路，有过欢笑也有过泪水；我相信，大学四年必将成为我生命中最重要、最难忘的一个阶段。因此，我感谢机械学院对我的悉心培养和正确引导；在今后的工作中，我将以此为动力，用实际行动来报答母校、来证明自己！另一方面，我也要特别感谢育我养我的辛劳父母，感谢他们的养育之恩，感谢他们在学习生活上长期以来对我的关爱和支持！

最后，在此，向全体论文评阅和答辩委员会的老师们致以最诚挚的谢意！