



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

## 本科生毕业设计

基于双转台五轴机床的叶轮加工方法研究

**Research on Impeller Machining Method Based on  
Double Turntable Five Axis Machine Tool**

姓 名 裴佳桐

学 院 机械工程学院

专 业 机械电子工程

指导教师 李巍

职 称 讲师

完成时间 2021 年 6 月

**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 responsibility 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

随着工业 4.0 的兴起，制造业快速向高精尖方向发展，在航空航天、造船、汽车、模具等现代工业中，所要加工的工件种类越来越复杂，五轴数控机床是加工连续、平滑、复杂曲面工件的最重要工具之一。五轴数控机床的典型结构之一是双转台类型，企业在双转台五轴机床的应用过程中，难以进行有效性、功能性的验证，尤其是五轴机床对于给定参数叶轮的可加工性、机床整体运动功能性等方面，难以进行有效验证。针对于此上问题，开展五轴机床空间运动性研究，在空间中进行有效性加工范围分析，以进行双转台五轴机床在空间中的路径边缘范围确定与部分曲面零部件的可加工性确定。

本次论文中利用三维软件进行物理机床的仿真模型搭建，确立出五轴机床传动系统的三维模型，并对此机床模型进行了空间运动学建模与正逆求解，通过三维模型的运动轨迹来进行空间范围五轴各个行程的确定，最后进行试切工件，通过加工出合格曲面工件验证了结果的正确性。利用仿真结果验证运动学计算结果，利用真实加工结果验证仿真结果，使得本次实验结构形成闭环。

本次论文求解出五轴双转台机床的运动学正逆解，在过程中利用 NURBS 曲线正确建立出叶轮模型，验证了叶轮叶片的可加工性。通过在 NX 机电概念设计模块的仿真验证，来进行运动区间曲线的获取，再通过真实机床加工，通过选择正确的刀具、转速参数及刀路轨迹，加工出符合标准的叶轮，达成实验的预期效果。

**关键词：**运动学正逆解；NURBS 曲线；五轴机床；MCD；叶轮加工

## ABSTRACT

With the rise of industry 4.0, the manufacturing industry is developing rapidly to high-precision direction. In modern industries such as aerospace, shipbuilding, automobile, mold and so on, the types of work piece to be processed are becoming more and more complex. Five axis CNC machine tool is one of the most important tools to process continuous, smooth and complex surface work pieces. One of the typical structures of five axis CNC machine tools is the dual turntable type. In the application process of dual turntable five axis machine tools, it is difficult to verify the effectiveness and functionality, especially in the aspects of the machining ability of given parameters impeller and the overall motion functionality of the machine tools. In order to solve this problem, the spatial mobility of the five axis machine tool is studied, and the effective machining range is analyzed in space, so as to determine the path marginal range of the double turntable five axis machine tool in space and the machining ability of some surface parts.

In this paper, 3D software is used to build the simulation model of the physical machine tool, and the 3D model of the transmission system of the five axis machine tool is established, and the spatial kinematics modeling and solution of the machine tool model are carried out. Through the motion trajectory of the 3D model, the five axis travel of the spatial range is determined, and finally the work piece is cut, and the accuracy report of the work piece is analyzed and verified. The correctness of the results is verified. The simulation results are used to verify the kinematic calculation results, and the real machining results are used to verify the simulation results, which makes the experiment more reasonable.

In this paper, the forward and inverse kinematics of the five axis double turntable machine tool is solved. In the process, the impeller model is correctly established by using NURBS curve, which verifies the mach-inability of the impeller blade. Through the simulation verification in NX microelectronic conceptual design module, the movement interval curve is obtained, and then through the real machine tool processing, through the selection of the correct tool, speed parameters and tool path path path, the standard impeller is processed, and the expected effect of the experiment is achieved.

**Key words:** Inverse kinematics; Maximum machining range; Five axis machine tool; MCD; Impeller machining

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 主要研究内容和技术路线.....	3
第二章 理论建模.....	5
2.1 整体叶轮建模.....	5
2.2 五轴机床运动学模型分析.....	11
2.3 运动学正逆解模型.....	14
第三章 数字双胞胎调试与仿真验证.....	17
3.1 机床型号与三维模型的确立.....	17
3.2 NX 机电概念设计模块设置.....	19
3.3 数控系统连接.....	22
3.4 仿真轨迹验证.....	24
第四章 真实加工与结果验证.....	26
4.1 叶轮加工规划.....	26
4.2 五轴刀路后置处理研究.....	30
4.3 整体叶轮加工验证.....	30
第五章 总结与展望.....	32
5.1 总结.....	32
5.2 展望.....	33
参考文献.....	34
致 谢.....	35
附 录.....	36
附录一 中文译文及外文资料.....	36
附录二 Matlab 程序.....	41

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

随着工业 4.0 的兴起，制造业快速向高精尖方向发展，在航空航天、造船、汽车、模具等现代工业中，所要加工的工件种类越来越复杂，对机床类型的要求也越来越严格。在加工过程方面，五轴数控机床的加工工艺合理、粗糙度好，效率高、表面质量好。因此五轴数控机床是加工复杂曲面工件的最重要工具之一。目前，复杂曲面工件的加工轨迹被工业软件分解为一系列空间直线和空间圆弧，通过相应的机床后置处理生成适合本机床结构的数控代码，最后在数控系统中进行插补处理并带动机床进行切削，从而加工出符合精度要求的复杂工件。在此过程中，需要确定五轴机床的机床加工曲线是否符合机床加工范围。

五轴数控机床的典型结构之一是双转台结构，双转台五轴数控机床的空间曲面运动是由三个平动坐标 X、Y、Z 和两个转动坐标 B、C 联合进行的，根据双转台五轴数控机床的结构形式，机床通过 B、C 两个旋转轴带动工作台进行转动，再通过 X、Y、Z 三个直线轴的进给运动，实现五轴机床对空间复杂零件的加工。

企业在双转台五轴机床的设计过程中，难以进行有效性、功能性的验证，尤其是对于双转台五轴机床对于给定参数叶轮的可加工性研究、机床整体运动功能性等方面，难以进行有效验证。针对于此上问题，开展五轴机床空间运动性研究，在空间中进行有效性加工分析，以进行双转台五轴机床在空间中的路径边缘范围确定与部分零部件加工范围确定。

通过确定五轴机床的最大加工尺寸，可有效确定带有复杂曲面工件的尺寸，在一定程度上完善机床研究体系，可帮助企业在五轴机床设计时规范工件最大尺寸。在传统加工中工作人员探知五轴加工时复杂曲率工件的曲率空间有两种方法，一者是由之前工作人员用此机床加工过类似工件；二者是初次加工时需要用笔计算加工工件的曲率最大点，了解五轴机床对此种工件的加工效果。第一种方法不具有普遍性，第二种方法耗时长，在计算运动学逆解时，容易出现多组奇异点，导致加工出来的精度存疑。

在本次论文中利用 NX 确立出双转台五轴数控机床传动系统的三维模型，并对此机床模型进行了空间运动学建模与求解，通过三维模型的运动轨迹来进行工件曲率空间的计算。利用此方法具有普遍适用性，并可回避奇异点、死点，可直观看出机床运动轨迹，并可随机调整，但需注意建立三维模型需与实际机床行程完全一样，这样能保证方案的合理性，仿真法的优势在于可随时进行调整，无需进行多次手工计算，就可验证出曲率最大的运行空间。最后试切合适尺寸的带有复杂曲面的工件，通过加工出合格的曲面工件验证了结果的正确性，在此过程中为企业了解双转台五轴机床的最大加工尺寸提供了借鉴思路与方法。

在此过程中同时运用了机床数字孪生技术,目前技术较为成熟的为 SIEMENS 公司的机电概念设计系统(MCD)。MCD 是西门子工业软件 NX 中集成的一个机电设计模块。基于 MCD 平台可将各个技术工种的工作整合在一起,促进协同开发,对于将要开发的产品同时将系统设定、电气调试、机械本身加工制造同时进行,以满足“工业 4.0”背景下多种机电一体化产品的概念设计到系统仿真验证的开发过程。在本论文验算过程中,利用了 MCD,与真实数控系统连接,进行仿真结果验证,利用此数字孪生技术,对机床进行虚实联合调试,使得计算出来的结果更加合理。

## 1.2 国内外研究现状

经检索与查看文献,未发现国内外关于双转台五轴机床在空间中的路径边界范围确定与部分零部件加工范围确定的研究。但发现类似技术观点可以借鉴。

王俊彦提出了一种新型五坐标联动加工的龙门式混联机床的机构设计方案,在此方案中利用机床几何关系和解析矢量法构建出机床位置逆解方程,并利用 Matlab 对此逆解方程进行了数学求解<sup>[1]</sup>。汪雨蓉利用“重用已有相似刀具轨迹”的方法,研究出 B 样条自由曲面的数控加工路径规划方案<sup>[2]</sup>。何文杰提出了五轴双 NURBS 刀具路径拟合及插补算法,并以双转台五轴数控机床为例,分析了其逆解结果<sup>[3]</sup>。张大远提出了一种无碰撞、且可提高机床旋转轴运动光顺性的刀轴优化方法<sup>[4]</sup>。张风磊对高速进给下曲面加工的刀位轨迹进行研究,推导出刀位数据点与机床各运动轴坐标点的数学关系<sup>[5]</sup>。

此上研究成果对于双转台五轴机床的位置逆解及其刀位轨迹分析提供了思路,可确定机床最大曲率空间内的刀具姿态。

董金龙以 NX 为平台进行叶轮零件的建模及加工轨迹规划,最后加工出零件精度在 0.15mm 以内,过切在 0.10mm 以内<sup>[6]</sup>。王爱增针对 B 样条曲线的光顺问题,研究出一种曲率单调变化的 B 样条曲线的构造方法<sup>[7]</sup>。庞飞彪对复杂轮廓曲线的加工刀具路径规划及实时插补进行了深入研究<sup>[8]</sup>。黄杰将三轴与五轴类比,从路径光顺到速度规划的角度对五轴机床的性能进行了求解<sup>[9]</sup>。张士尉设计了一种基于 S 型加减速曲线的误差修正方法,有利于插补算法的研究<sup>[10]</sup>。段爱玲通过在原始型值点两侧增加新型值点的方法得到一种改进后的 B 样条曲线拟合算法,来提高曲线的拟合精度<sup>[11]</sup>。

此上研究成果为本课题在加工时采用的曲率方法提出了借鉴思路,为本次加工出具有光顺曲面的工件提供了构造方法,在一定程度帮助了产品建模与工件精度的提高。

唐佳利用五轴联动机床的坐标变换,搭建了五轴设备的精准零部件模型,进行了多刚体物理建模,并开展坐标变换仿真,验证了仿真模型的正确性<sup>[12]</sup>。Sonia Pérez-Díaz 研究了有理平移曲面的参数化,有利于本文曲面的建模<sup>[13]</sup>。Gudrun Albrecht 研究了一种新型的曲线插值方法,并构造出一条新型 B 样条曲线<sup>[14]</sup>。有国内学者通过研究矩阵变换,实现机床坐标与编程坐标的坐标转换,并对避免奇异位置提供了一种解决方案<sup>[15]</sup>。Jianmeng Zhang 提出了一种自由曲面五轴铣削的刀具规划方法,提高了加工效率<sup>[16]</sup>。董佑浩对球铣刀铣削力进行了仿真预测,得到了铣削力对叶片加工的影响规律<sup>[17]</sup>。

陈宝玉从后置处理、切削参数优化等多方面对整体叶轮五轴加工进行了研究<sup>[18]</sup>。Hui Wang 对加工工艺的切削力进行建模研究，预测切削力对材料的状态影响<sup>[19]</sup>。Yang Jiang 提出一种平滑插补方法来实现刀具轴矢量的连续运动，提高曲面加工精度<sup>[20]</sup>。

本次论文利用运动学方程求出双转台五轴机床的刀具位置正逆解，利用 MCD 与真实数控系统连接来建立三维模型仿真运动，观察运动趋势避免奇异点的产生，最终试切工件。通过检验工件精度验证方案求解的合理性，此上研究成果与本论文研究在某种程度上有相同之处，具有启发意义。

### 1.3 主要研究内容和技术路线

#### 1.3.1 技术路线

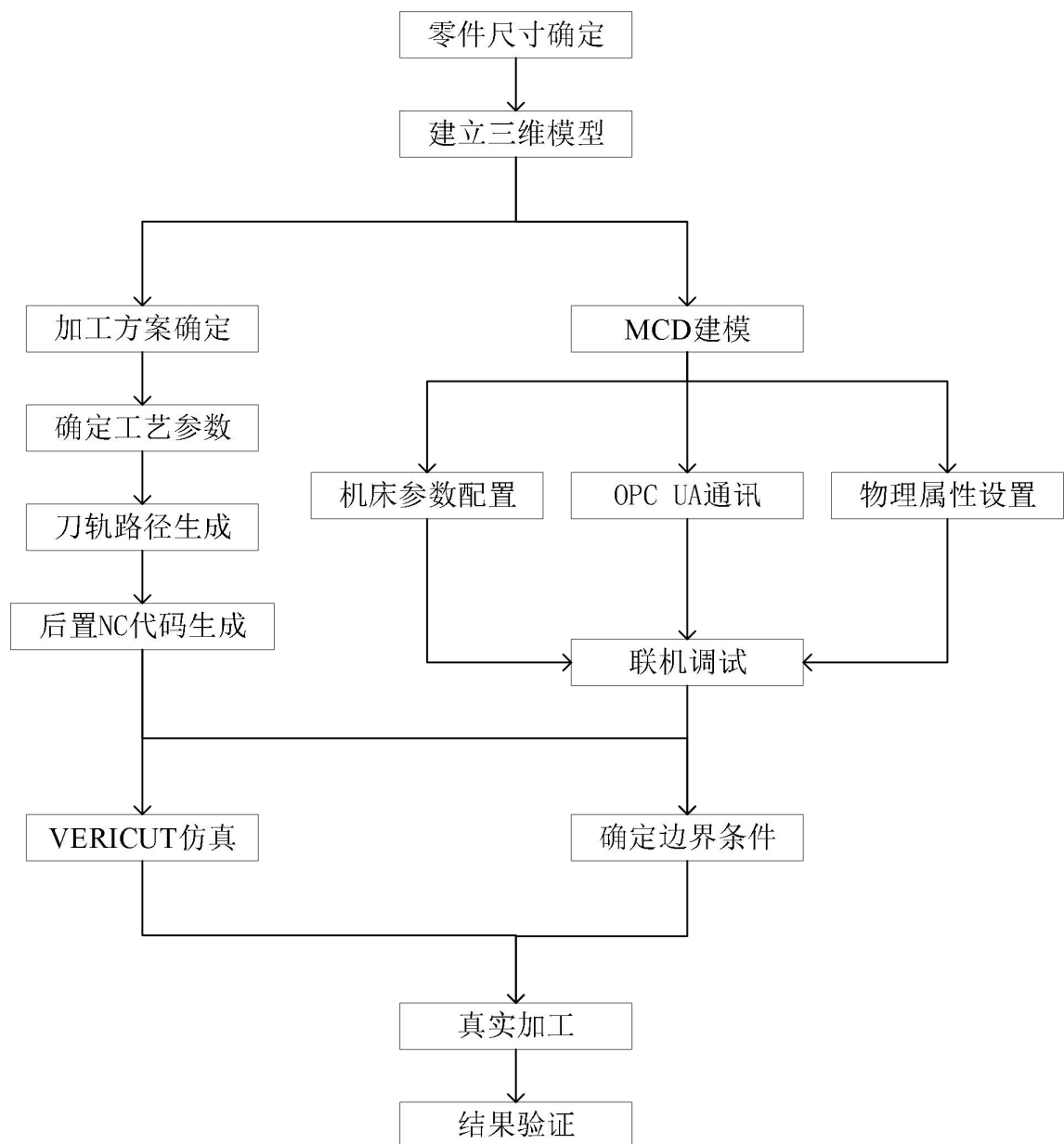


图 1-1 技术路线

技术路线如图 1-1 所示。通过确定零件尺寸，建立出零件的三维模型，在技术路线左侧确定加工方案、工艺参数并生成刀具路径，通过后置处理生成 NC 代码，在右侧进行 MCD 建模，通过设置机床参数、设置 MCD 物理属性、配置 OPC UA 通讯参数，进行联机调试，确定连接的正确性。最后将后置生成的 NC 代码进行 VERICUT 仿真与 MCD 边界条件的确定，确定叶轮叶片的完整性和各轴运动轨迹曲线不存在撞机风险，最终进行真实加工，进行结果验证，验证此方法的正确性。

### 1.3.2 主要研究内容

(1)针对双回转台五轴机床三维模型，进行空间运动学建模与求解，用以进行五轴机床的叶轮的可加工性研究。

(2)使用双回转台五轴机床模型，进行空间运动范围仿真。

(3)使用空间范围运动结果作为依据，试切一个包含空间曲线或曲面的零件，作为结果的验证工作。

## 第二章 理论建模

### 2.1 整体叶轮建模

经过课题理论分析，并阅读相关文献，本次论文选用一种叶轮曲面零件，叶轮主要由压力面、吸力面、包覆面、流道面、前后缘组成，其中，叶轮主体是由叶片加之轮毂组成，在轮毂上分布含有复杂曲面的叶片，转动叶片与轮毂表面形成开放的空间，此空间称为流道空间，在叶片与轮毂的连接部位，存在两者的相交部分，此部分称为圆角表面。此部分的作用是确保整体叶轮形状的光顺平滑。叶片的上侧称之为前缘，下侧称之为后缘。叶轮的具体形状如图 2-1 所示。

在研究过程中，查阅相关资料，叶片的直纹曲面是由两条不相交的驱动曲线通过 NURBS 曲线拟合，生成直纹曲面，与轮毂相交的叫做叶根曲线，另一条称为叶顶曲线，通过叶根曲线与叶顶曲线的拟合，可以生成正确的叶片曲面叶型。本文通过给定的空间有序数据点来拟合出叶根与叶顶的控制点，通过控制点正确建立出叶轮的整体三维模型。

在造型过程中，运用了 NX 的 B 样条曲线，通过有序数据点的拟合，达到了叶片正确建模的效果，运用自由曲面理论正确建立出三维模型。

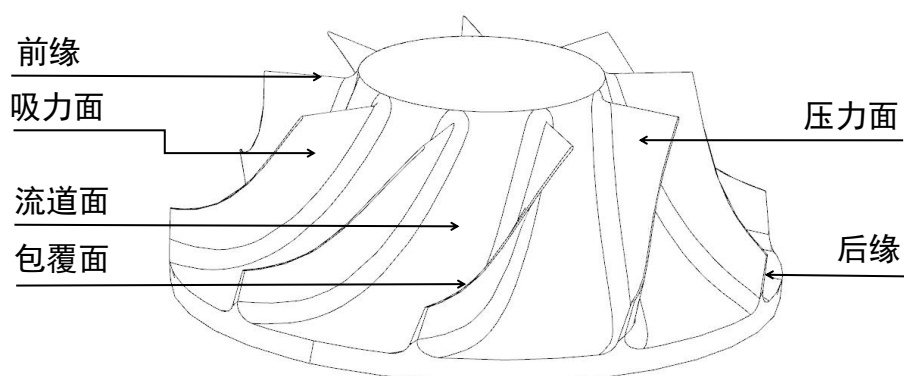


图 2-1 整体叶轮的具体形状

#### 2.1.1 NURBS 曲线基本概念

在目前的曲面造型技术中，曲线的生成可以通过正向运算和反向运算来实现。在曲线正向运算过程中需要输入拟合曲线的控制顶点；反向求解过程需要输入曲线上的多组数据点来拟合出空间曲线。

本文采用的是曲线的反向运算过程，给定已有的数据来拟合曲线，通过 NURBS 进行拟合需要曲线的控制顶点，实现了叶片的参数化建模，利用给定参数建立出正确叶片形状。

NURBS 曲线是 B 样条曲线在四维空间的推广，NURBS 曲线可以表示为分段有理多项式函数，阶次为  $p$  次，如式(2-1)所示。

$$\bar{C} = \frac{\sum_i^n N_{i,p}(u)w_i\bar{d}_i}{\sum_i^n N_{i,p}(u)w_i} \quad (2-1)$$

$N_{i,p}(u)$ 为  $p$  次规范 B 样条曲线数学函数， $\bar{d}_i$  是公式所需的控制顶点， $w_i$  是控制顶点  $\bar{d}_i$  的权因子。基函数递归函数如式(2-2)所示：

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_{i-1} \leq u \leq u_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \end{cases} \quad (2-2)$$

在基函数递归公式中， $N_{i,k}$  的  $i$  表示序号， $p$  表示次数， $u_i$  为节点， $U=[U_0,U_1,\dots,U_m]$  为节点向量。

基函数递推方式如图 2-2 所示：

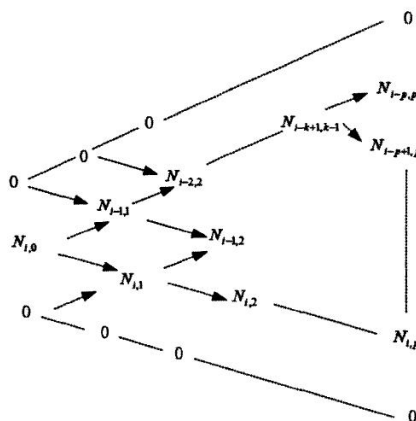


图 2-2 基函数的递推式

### 2.1.2 NURBS 曲线拟合

NURBS 的曲线拟合方法通常是利用给出的空间数据点来构造出需要的空间曲线，在此过程中，利用 NURBS 进行所需曲线数据的插值处理。

NURBS 曲线插值的整体运算步骤如下：

- (1)输入数据点  $p_i$  及其权值  $h_i$ ， $i=1,2,\dots,n$ ；
- (2)确定节点矢量  $U=[u_0,u_1,\dots,u_{n+2k}]$ ；

(3)解出曲线的控制顶点的权值  $w_i, i=1,2,\dots,n+k-1$ ;

(4)计算  $a_i, b_i, c_i, p_h$ , 并将其结果带入到方程组中, 进行数学求解, 可求解求出所需的控制顶点  $d_i, i=1,2,\dots,n+k-1$ ;

(5)将节点矢量  $U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+2k}]$ 、曲线的控制顶点  $d_i$  及权因子  $w_i$ , 带入上述公式可求解出有  $n+1$  个曲线的型值点  $p_i (i=1,2,\dots,n)$  的 NURBS 曲线。

上述计算节点矢量的具体求解过程如下:

将所需要的数据点  $p_i (i=1,2,\dots,m)$  进行数据拟合, 在此过程中, 需要进行节点矢量的求解, 本文采用的是反算过程, 将曲线进行插值, 存在有  $m$  段曲线,  $n+1$  段控制顶点  $d_i(i=1,2,\dots,n)$ , 其中  $n=m+k-1$ , 节点矢量为  $U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ 。

曲线定义域:

$$u \in [u_k, u_{k+1}] = [0, 1], u_0 = u_1 = \dots = u_k = 0, u_{n+1} = u_{n+2} = \dots = u_{k+n+1} = 1。$$

需要对给定的数据点进行处理, 从而能确定出与给定数据点  $p_i(i=1,2,\dots,n)$  相对应的参数值  $u_{k+i}(i=1,2,\dots,n)$ , 本次论文利用累计弦长法来进行数据点的处理, 方法满足式(2-3):

$$\begin{cases} u_0 = 0 \\ u_i = u_{i-1} + |\Delta p_{i-1}|, \quad i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (2-3)$$

其中  $\Delta p_{i-1}$  为向前差分矢量  $\Delta p_k = \Delta p_{k+1} - \Delta p_k$  的弦长矢量, 即: 将每一个节点区间的长度与曲线上的插值后每段的弦长相互对应, 从而进行数据点的处理。

上述曲线两端边界条件的具体确定方法如下:

本次论文要拟合空间曲线, 取曲线的阶次为 3 次, 节点矢量  $U=[u_0, u_1, \dots, u_{i+6}]$ , 可以求解出未知的矢量方程组如式(2-4)所示:

$$p(u_{3+i}) = \sum_{j=0}^{n+2} d_j \cdot N_{j,3}(u_{3+i}) = p_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (2-4)$$

在此方程中需要补充边界条件, 补充的边界条件如下:

(1)切矢条件

补充切矢条件, 它具有固定的切线方向, 这样首末端就有如下附加方程, 其中  $p'_0$  和



求解上述的线性方程组，进行数学运算，就可以求解全部未知的控制顶点集合  $d_i$ 。

### 2.1.3 叶轮模型的生成

已知给定的空间有序序列点集合  $p_i(i=1,2,\dots,m)$ ，如表 2-1 所示，通过 2.1.2 给出的 NURBS 曲线运算方程组，将给定的数据点进行参数化处理，计算各个节点的节点向量，并且求解出曲线的各个控制点，在 Matlab 中建立数学运算模型，将数据点读取导入，可争取求解出各个控制点的空间坐标，具体的控制点空间坐标集合如表 2-2 所示。

表 2-1 已知给定的空间有序序列点

序号	叶顶曲线			叶底曲线		
	X/(mm)	Y/(mm)	Z/(mm)	X/(mm)	Y/(mm)	Z/(mm)
1	35.515	-21.597	44.149	11.690	-12.681	46.682
2	36.724	-19.511	42.849	13.778	-10.857	44.222
3	37.889	-17.381	41.511	15.579	-9.048	41.526
4	38.761	-15.219	40.088	17.118	-7.217	38.646
5	39.538	-13.070	38.603	18.549	-5.707	35.601
6	40.221	-10.899	37.062	19.972	-4.273	32.522
7	40.801	-8.738	35.488	21.552	-3.013	29.408
8	41.310	-6.651	33.778	23.371	-1.891	26.378
9	41.803	-4.639	31.977	25.438	-0.829	23.492
10	42.345	-2.731	30.089	27.687	0.312	20.782
11	43.011	-0.918	28.141	30.132	1.590	18.209
12	43.841	0.788	26.172	32.718	3.038	16.091
13	44.931	2.402	24.227	35.429	4.621	14.109
14	46.345	3.837	22.382	38.303	6.161	12.322
15	48.023	5.148	20.661	41.409	7.471	10.828
16	49.903	6.401	19.112	44.710	8.819	9.732
17	51.959	7.541	17.721	48.008	10.278	8.998
18	54.199	8.606	16.527	51.388	11.759	8.693
19	56.603	9.558	15.569	54.799	13.198	8.648
20	59.049	10.469	14.851	58.174	14.771	8.721

根据表述 NURBS 建模方法，对各组序列点坐标值进行参数化，计算各节点向量。将得到的控制点集合拟合空间曲线，在此过程中，将两条曲线的端点连接，并绕着叶顶线移动，拟合出空间曲面，即叶轮叶片的直纹面，如图 2-3 所示，最终，通过 Matlab 生成的叶轮模型，如图 2-4 所示。

表 2-2 控制点空间坐标集合

序号	叶顶			叶底		
	X/(mm)	Y/(mm)	Z/(mm)	X/(mm)	Y/(mm)	Z/(mm)
1	35.522	-21.594	44.155	11.686	-12.675	46.677
2	35.522	-21.594	44.173	11.686	-12.675	46.695
3	36.952	-19.195	42.654	14.177	-10.584	43.884
4	37.778	-17.467	41.569	15.543	-9.121	41.666
5	38.784	-15.198	40.093	17.161	-7.248	38.649
6	39.557	-13.072	38.611	18.552	-5.699	35.642
7	40.236	-10.902	37.062	19.935	-4.230	32.515
8	40.812	-8.728	35.497	21.509	-2.984	29.399
9	41.310	-6.629	33.801	23.323	-1.877	26.356
10	41.795	-4.623	31.996	25.409	-0.838	23.470
11	42.328	-2.712	30.102	27.651	0.277	20.733
12	42.974	-0.908	28.140	30.106	1.553	18.257
13	43.794	0.804	26.160	32.700	3.021	16.045
14	44.867	2.430	24.222	35.417	4.609	14.088
15	46.289	3.863	22.356	38.228	6.220	12.269
16	47.977	5.161	20.627	41.396	7.445	10.764
17	49.877	6.401	19.065	44.681	8.809	9.661
18	51.909	7.546	17.690	47.964	10.261	8.932
19	54.282	8.649	16.470	51.527	11.844	8.655
20	56.163	9.428	15.623	54.297	12.924	8.626
21	59.076	10.474	14.848	58.185	14.769	8.719
22	59.058	10.474	14.848	58.167	14.769	8.719

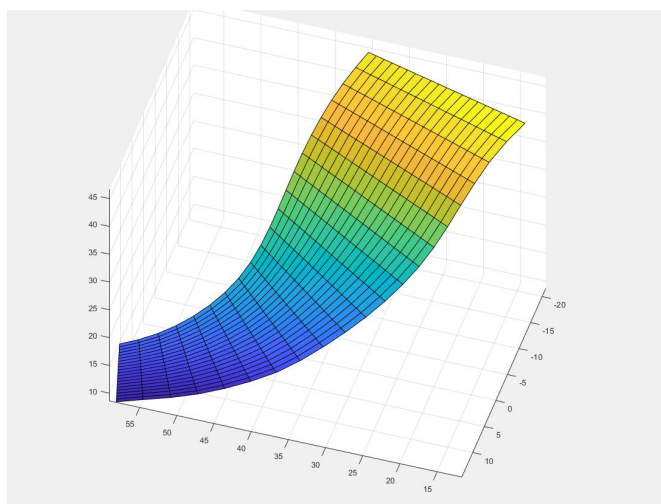


图 2-3 NURBS 叶片直纹面曲面建模

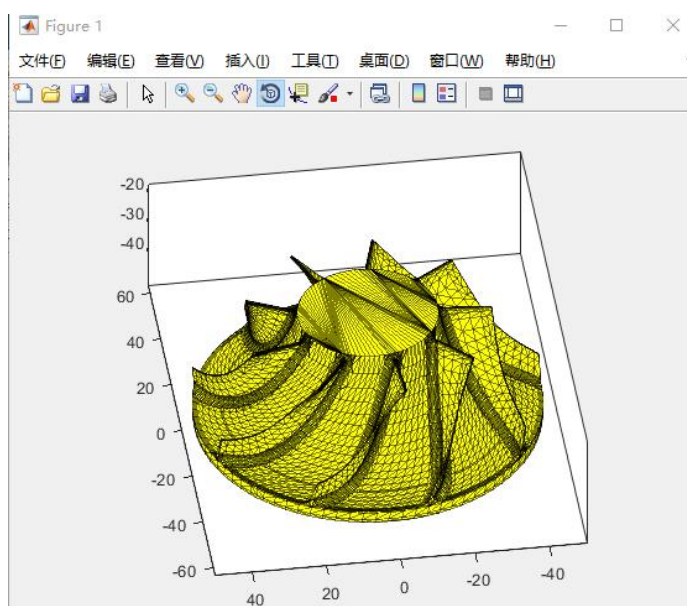


图 2-4 整体叶轮建模

## 2.2 五轴机床运动学模型分析

五轴联动数控机床运动学建模需要机床的真实结构，就是将数控机床的不同坐标系进行矩阵转换，进行机床的运行学建模使得机床路径切削更加合理准确，对于刀具轨迹与实际加工路径能有充分的了解，通过前置处理和后置处理，把 CAM 软件中的刀位点生成出实际机床刀具轨迹，在此过程中，需要确立机床不同结构的运算模型，通过多段轨迹点拟合出实际机床的运动路线。前置处理是可以不考虑机床的结构和工作空间，最终在工件坐标系下生成包含刀具位置的数据文件；数控系统的后处理与前处理不同，是根据现有机床的具体结构和工作空间，将前处理刀具位置的数据文件转换为机床坐标系中各坐标轴的运动位移量。后处理是机床运动学建模的重点，机床坐标

系间的运动变换是后处理的难点和重点。本节研究 X 轴、Y 轴、Z 轴、B 轴和 C 轴的坐标变换，最终建立起运动学正解与逆解的数学模型。

### 2.2.1 齐次坐标变换

$$Rot(X,A)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A & 0 \\ 0 & \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

$$Rot(Y,B)=\begin{bmatrix} \cos B & 0 & \sin B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

$$Rot(Z,C)=\begin{bmatrix} \cos C & -\sin C & 0 & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$$Trans(X,Y,Z)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

通过研究双转台五轴机床的具体形式，得出其次变换矩阵如式(2-14)至式(2-17)所示，后期可以通过变换矩阵来进行实际机床的坐标系转换，建立起正确的数学模型。

### 2.2.2 五轴机床运动学建模原理

五轴机床拥有 3 个直线轴（X、Y、Z）和 2 个绕着直线轴旋转的旋转轴，有三种形式，即 AC、BC、AB，其中结构形式可分为双摆头、双转台、单转台单摆头。

五轴机床身主要涉及如下坐标系：

**机床坐标系：**机床原有坐标系，用来确定工件坐标系的基本坐标系，用于确定刀具和工件位置的位置，是符合右手法则的坐标系统；

**工件坐标系：**与编程坐标系统相同的坐标系统，即在刀具位置文件中提供刀具在工件坐标系统中的姿态和位置。程序工作人员可以根据情况的不同而确定不同的工件坐标系的起始点。具体情况：当机床夹紧工件，工件坐标系轴的方向应与机床坐标轴的方向一致，并应具有一定的对应关系；

**加工坐标系：**基于确定加工位置起始点的坐标系。进行刀具加工的起始点为程序的初始原点，即：程序的起始坐标点。通过进行坐标转化，刀具加工的起始点与工件坐标系原点重合，加工坐标系坐标轴方向与机床坐标系一致。

五轴联动机床的坐标转化从加工零件转换为起点，然后转移到工作台，然后从工作台转到床身，床身通过工作台或者直接到刀具；创建一个相应的坐标系统，计算出机床从工件到刀具变换矩阵，将工件坐标系与刀具的坐标值建立联系。在此过程中，换刀机械手与床身的坐标是不变的，而五轴机床的工件坐标系是运动的，实际机床的运动结构是工件坐标系统相对于固定床身的系统进行平移旋转复合运动，在过程中，需要确定方向的正反，在真实结构中，属于工件进行相对移动，计算时取方向为负向，刀具进行移动时，取方向为正向，这样可以准确表示出工件坐标、实际刀具坐标之间的坐标转换矩阵。

具体双转台五轴联动机床结构如下：

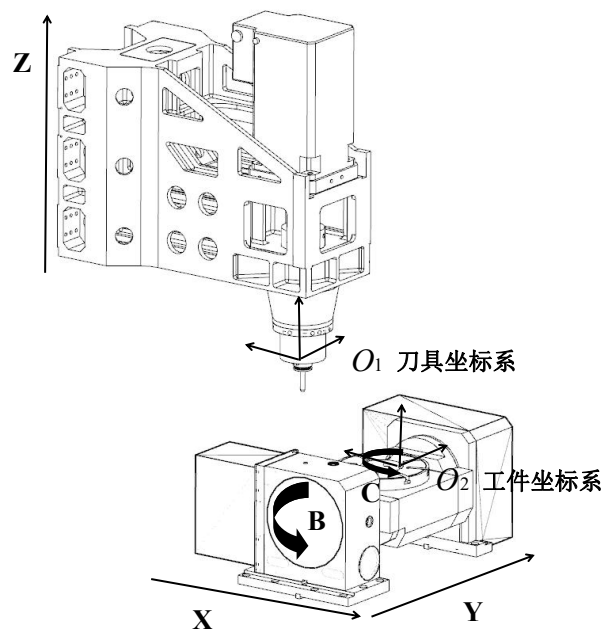


图 2-5 双转台五轴联动机床结构图

取决于机床的具体参数、位置关系、轴数，不同机床的结构可以得出不同的运动学公式。本次论文利用双转台五轴数控机床进行运动学分析，根据机床的实际情况，确定好具体的行程，可以求解出机床三维模型的运动学公式。

双转台五轴机床坐标系统转化传递链为：工件坐标系-C 轴-B 轴-X 轴-Y 轴-床身-Z 轴-刀具坐标系。根据传递链建立每个关节的坐标系，在坐标系转化过程中建立运动学计算公式，使此机床运动学模型的分析与计算过程更加完整。

结合双转台五轴机床的具体形式，并根据尺寸链的传递形式，可以得到运动学正逆解模型，在过程中，得出了由工件坐标系向刀具坐标系的具体转化的矩阵方程，对于机床结构的不同需要建立正确的矩阵，可以方便后期的刀路规划。

## 2.3 运动学正逆解模型

### 2.3.1 基于齐次坐标变换矩阵的运动学正解模型

求解机床的运动学正解需要将 X 轴、Y 轴、Z 轴、B 轴、C 轴的相对位置关系，将 5 个轴的直线旋转运动转化为工件坐标系下的刀心位置与刀轴矢量，进行齐次坐标的转化，求解出工件与刀具坐标系统的转化矩阵 T，如式(2-18)所示：

$$T = \text{Trans}(-X_1, -Y_1, -Z_1) \cdot \text{Rot}(X, -B) \cdot \text{Rot}(Z, -C) \cdot \text{Trans}(0, 0, -Z_2) \cdot \text{Trans}(-X, -Y, Z) \cdot \text{Trans}(X_3, Y_3, Z_3) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos C & \cos B \sin C & \sin B \sin C & (X_3 - X) \cos C + (Y_3 - Y) \cos B \sin C + (Z_3 + Z - Z_2) \sin B \sin C - X_1 \\ -\sin C & \cos B \cos C & \sin B \cos C & -(X_3 - X) \sin C + (Y_3 - Y) \cos B \cos C + (Z_3 + Z - Z_2) \sin B \cos C - Y_1 \\ 0 & -\sin B & \cos B & -(Y_3 - Y) \sin B + (Z_3 + Z - Z_2) \cos B - Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

设初始刀心位置矢量为  $[0, 0, 0, 1]^T$ ，刀轴矢量为  $[0, 0, 1, 0]^T$ ，转换后刀心位置坐标为：

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_3 - X) \cos C + (Y_3 - Y) \cos B \sin C + (Z_3 + Z - Z_2) \sin B \sin C - X_1 \\ -(X_3 - X) \sin C + (Y_3 - Y) \cos B \cos C + (Z_3 + Z - Z_2) \sin B \cos C - Y_1 \\ -(Y_3 - Y) \sin B + (Z_3 + Z - Z_2) \cos B - Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

转换后刀轴矢量为：

$$\begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \\ 1 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin B \sin C \\ \sin B \cos C \\ \cos B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

### 2.3.2 基于齐次坐标变换矩阵的运动学逆解模型

运动学逆解模型是将工件坐标系下的刀心位置和刀轴矢量转化为五个进给轴的运动位置。已知工件坐标系下的刀心位置坐标和刀轴矢量，求五个轴的运动位置 X、Y、Z、B、C。

三个平移轴的运动量如式(2-21)所示：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos C & \sin C & 0 \\ -\cos B \sin C & -\cos B \cos C & \sin B \\ \sin B \sin C & \sin B \cos C & \cos C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x + X_1 \\ P_y + Y_1 \\ P_z + Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_2 + Z_3 \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

两个旋转轴的运动量如式(2-22)至式(2-23)所示：

$$B = \arccos Q_z \quad (2-22)$$

$$C = \arctan(Q_x/Q_y) \quad (2-23)$$

为验证上述坐标转换算法的正确性，下面以前面建立的整体叶轮为例，采用 NX 编制的刀具轨迹并得到相应的刀位点和刀轴矢量文件，通过数学运算，按照本文算法进行坐标变换并建立对应的后置处理文件。

通过采集 NX 中加工前置处理中的刀具位置点数据，利用本文算法进行计算，确定出 B 轴和 C 轴的刀轴矢量，通过与真实机床正确后置处理后的数控 NC 代码中刀轴矢量的比对，验证了此数学模型的正确性，具体的矢量参数如表 2-3 所示。

表 2-3 刀轴矢量的对比

B、C 角度	NX 刀轴矢量	实际刀轴矢量
B58.8083, C32.3689	0.7225, 0.4579, 0.5179	0.72252, 0.45798, 0.51790
B58.8069, C32.3731	0.7224, 0.4580, 0.5179	0.72248, 0.45802, 0.51792
B58.8066, C32.3756	0.7224, 0.4580, 0.5179	0.72245, 0.45805, 0.51790
B58.8065, C32.3751	0.7225, 0.4579, 0.5179	0.72252, 0.45798, 0.51793
B58.8054, C32.3752	0.7224, 0.4580, 0.5179	0.72246, 0.45804, 0.51793

将处理前后的轨迹部分刀位点进行比较，如表 2-4 所示，并将处理前的刀位点数据导入到 Matlab 中对生成的刀具轨迹进行验证。用 Matlab 进行理论运算后生成的轨迹线如图 2-6 所示，利用 SinuTrain 进行加工程序的验证，生成的轨迹线如图 2-7 所示。可以得到结论经过后置处理的加工轨迹是正确的，从而验证了建立本文建立的坐标转换算法的求解方式的可行性。

表 2-4 刀位点的比较

未处理的刀位点坐标 (mm)	后处理的刀位点坐标 (mm)
34.927, 5.552, -13.832	X34.92680, Y5.55242, Z-13.83198
33.969, 7.103, -12.068	X33.96917, Y7.10284, Z-12.06834
32.831, 9.114, -9.690	X32.83146, Y9.11396, Z-9.69002
31.622, 11.380, -7.018	X31.62249, Y11.3801, Z-7.01794
30.890, 12.765, -5.413	X30.89041, Y12.76464, Z-5.41309

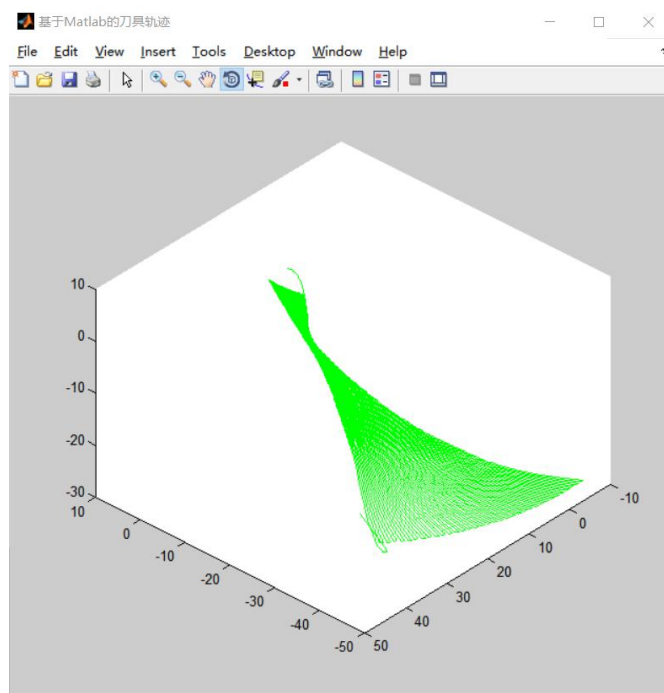


图 2-6 基于 Matlab 的刀具轨迹

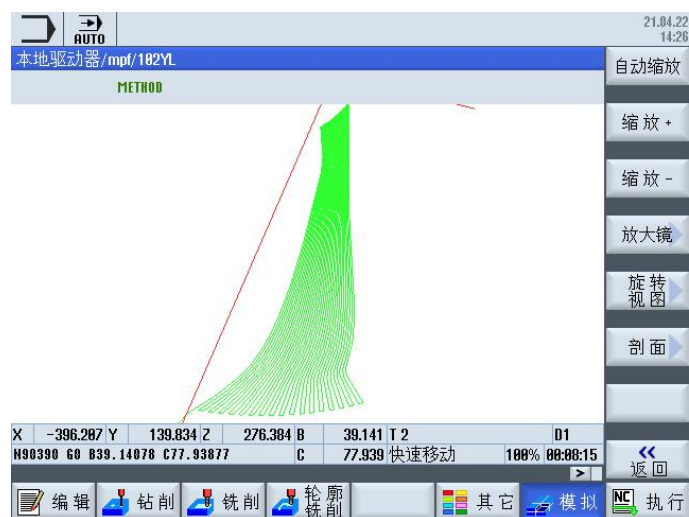


图 2-7 SinuTrain 后置刀具轨迹仿真

### 2.3.3 小结

本章对整体叶轮五轴制造技术开展相关研究，进行了叶轮建模与本次机床的运动学分析，并利用 Matlab 进行五轴机床可达空间的求解。

(1)研究了曲面理论，采用了 NURBS 进行叶轮数据点的演算，计算出叶根与叶顶线的空间曲线点，拟合出叶片的直纹曲面，满足叶轮正确建模的要求。

(2)分析机床结构特点，对五轴加工进行运动学建模，并进行运动学正逆解计算，求解刀位点与移动轴及转动轴间的关系，借助 Matlab 软件将进行刀位点的计算，通过与实际加工点位比对，验证了模型的正确性。

### 第三章 数字双胞胎调试与仿真验证

#### 3.1 机床型号与三维模型的确立



图 3-1 亚龙 YL569 双回转台式五轴数控加工中心

本文研究对象为亚龙 YL569 双回转台式五轴数控加工中心，采用高精度双回转工作台，并配备西门子 840Ds1 数控系统，具有多轴联动功能，可以达到复杂曲面零件的加工所需。此研究对象适用于机械加工、精密件加工、航天高端零件的加工，符合本次论文具有曲面叶片结构叶轮的加工要求。

亚龙 YL569 外形如图 3-1 所示，主要参数见表 3-2。

表 3-1 亚龙 YL569 加工中心主要参数

序号	单位	参数
1	机床 X/Y/Z 直线行程(mm)	500/300/500
2	B 轴摆角(°)	-11~100
3	C 轴旋转范围(°)	n*360
4	机床工作台面积(mm)	700*420
6	主轴额定功率(kW)	8
7	主轴最高转速(r/min)	9000
8	刀库容量(把)	16
7	机床外形尺寸(mm)	4200*2800*3200
8	主轴锥孔	BT40

本机床系统采用 SINUMERIK 840Dsl，具有模块化、开放性、灵活性和统一的结构。它拥有可视化界面并进行了网络系统功能集成。SINUMERIK 840Dsl 数控系统提供了大量系统参数，通过调节系统参数，选用机床功能，设置软限位等行程，以下为本次机床系统参数设置，为五轴联动双摇篮式五轴机床。

表 3-2 机床相关参数的设置

参数号	含义	设定值	参数号	含义	设定值
10000[0]	\$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB	MX1	20080[0]	\$MC_AXCONF_CHANAX _NAME_TAB	X
10000[1]	\$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB	MY1	20080[1]	\$MC_AXCONF_CHANAX _NAME_TAB	Y
10000[2]	\$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB	MZ1	20080[2]	\$MC_AXCONF_CHANAX _NAME_TAB	Z
10000[3]	\$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB	MB1	20080[3]	\$MC_AXCONF_CHANAX _NAME_TAB	B
10000[4]	\$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB	MC1	20080[4]	\$MC_AXCONF_CHANAX _NAME_TAB	C
10000[5]	\$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB	MSP1	20080[5]	\$MC_AXCONF_CHANAX _NAME_TAB	SP
20070[0]	\$MC_AXCONF_ MACHAX_USED	1	36100	\$MA_POS_LIMIT _MINUS	-250/-150 /-250
20070[1]	\$MC_AXCONF_ MACHAX_USED	2	36110	\$MA_POS_LIMIT _PLUS	250/150 /250
20070[2]	\$MC_AXCONF_ MACHAX_USED	3	30330	\$MA_MODULO _RANGE	-11/360
20070[3]	\$MC_AXCONF_ MACHAX_USED	4	30340	\$MA_MODULO _RANGE_START	110/360
20070[4]	\$MC_AXCONF_ MACHAX_USED	5	30310	\$MA_ROT _IS_MODULO	0/1
20070[5]	\$MC_AXCONF_ MACHAX_USED	6	30320	\$MA_DISPLAY _IS_MODULO	0/1

依照上述条件限制，进行机床参数设置，控制三维模型行程，在 NX 中确立模型与真实形成一致，达到实验空间一致的效果。

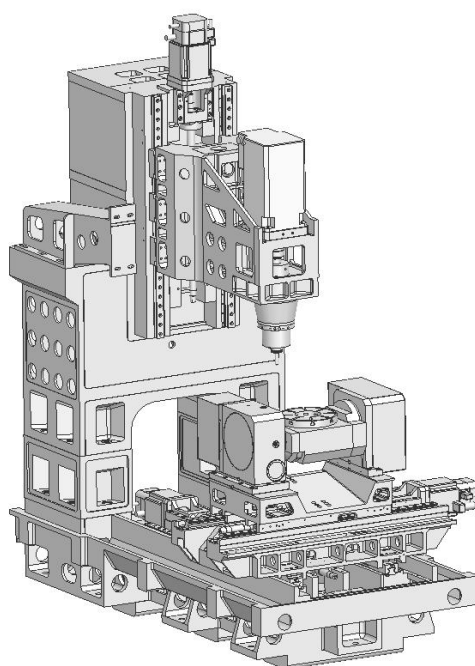


图 3-2 双转台五轴加工中心三维模型

## 3.2 NX 机电概念设计模块设置

### 3.2.1 刚体的设置

将所有需要运动的部件都需要设为刚体，设置为 X,Y,Z,B,C,本文以 X 轴直线轴为例，进行刚体设置，如图 3-3 所示。

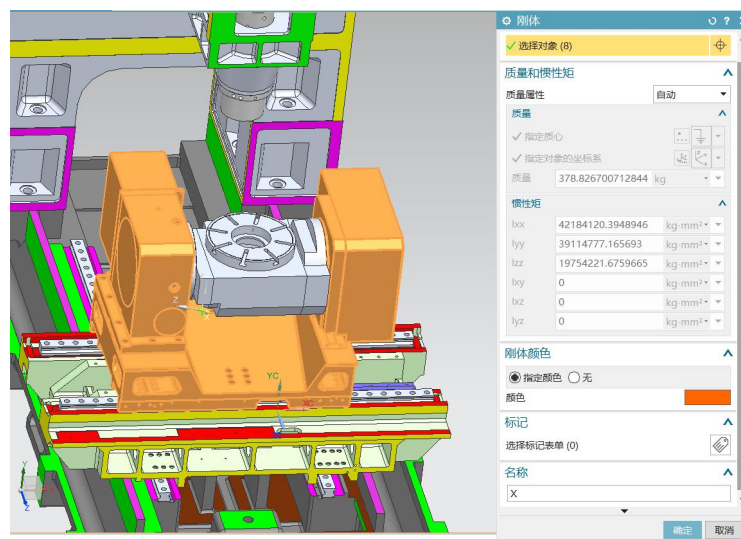


图 3-3 X 轴直线轴刚体设置

### 3.2.2 进行运动副设置

每个刚体都有其自身的约束，按照真实的物理关系进行设置，对 X、Y、Z 进行滑动副设置，对 SP、B、C 进行铰链副设置，最终设置结果如图 3-4 所示。

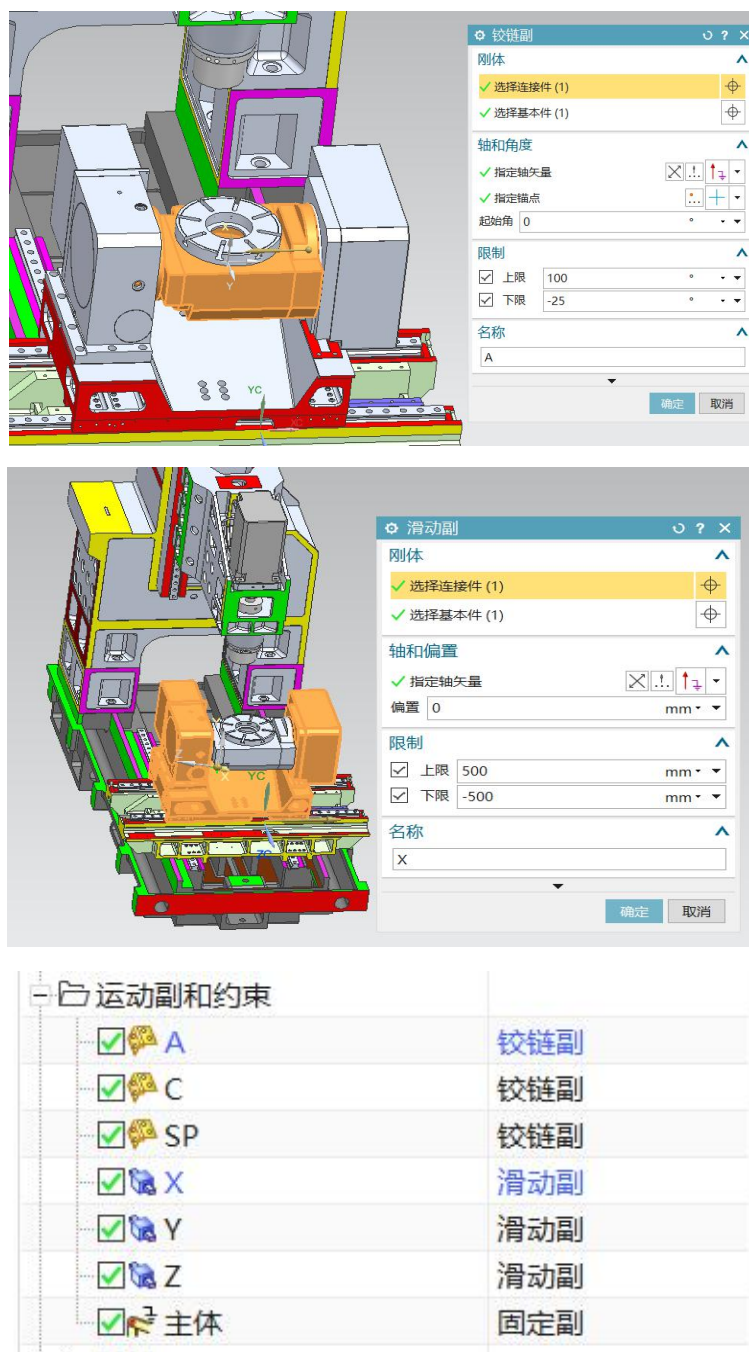


图 3-4 运动副的设置效果

### 3.2.3 传感器和执行器的设置

在对机床控制过程中，需要接收运动载体的状态，例如主轴是否夹持刀具，需要设置传感器。同时，需对各个轴进行控制，因此要对各轴设置位置或者速度进行设置。对 X、Y、Z、B、C、SP 分别设置控制传感器，将 X、Y、Z、B、C 设置位置传感器，SP 设置为速度传感器，传感器可以监控模型所需信息，设置结果如图 3-5 所示。

传感器和执行器		
<input checked="" type="checkbox"/>	A_PC(1)	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/>	C_PC(1)	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/>	SP_SC(1)	速度控制
<input checked="" type="checkbox"/>	X_PC(1)	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/>	Y_PC(1)	位置控制
<input checked="" type="checkbox"/>	Z_PC(1)	位置控制

图 3-5 传感器和执行器的设置效果

### 3.2.4 建立信号源

信号源的位置的作用是用于接收外围或者 NC 的信号来控制机床，例如各轴的位置信息和机床的反馈信号，如何采集限位信号等等。该信号来自于 OPC UA 的信号，与真实数控系统的信息一致，设置结果如图 3-6 所示。



图 3-6 传感器和执行器的设置效果

### 3.2.4 建立信号连接与映射

信号源的连接主要用于将 MCD 的信号源和 OPC UA 的信号进行连接，建立信号连接，通过信号映射，将实际数控系统与虚拟软件三维模型连接在一起，运行数控程序，三维模型进行实时运动，设置效果如图 3-7 所示。

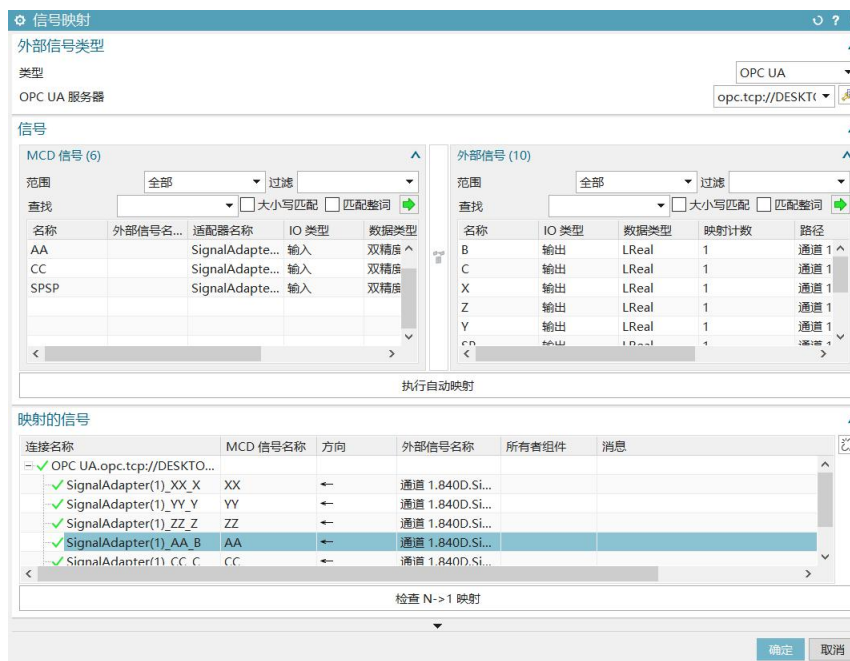


图 3-7 信号连接与映射的设置效果

通过上述条件，将 MCD 设置完好，此步骤将虚拟机床的物理性质与真实机床一致，设置效果如图 3-8 所示。

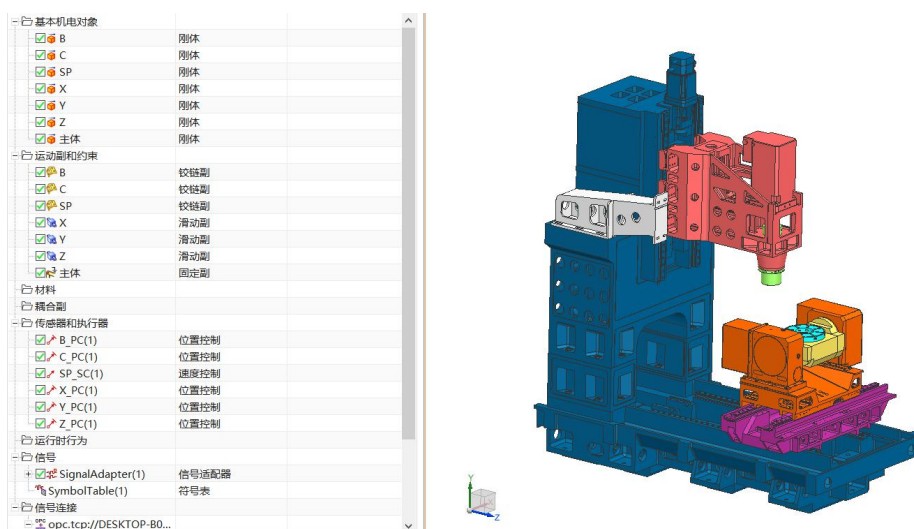


图 3-8 MCD 设置完成

### 3.3 数控系统连接

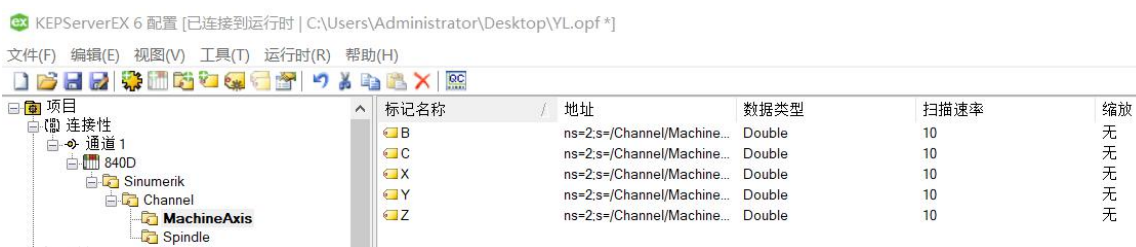


图 3-9 OPC UA 匹配数控系统站点设置

本文采用 OPC UA 服务器，软件的版本是 KEPServer EX6，KEPServerEX OPC 通过采集需要的各类控制系统的数 据，含 PLC、单片机等，通过与控制系统进行数据交互，通过通讯协议进行数据的传输，如图 3-9 所示。在此过程中，需要开发包括各种驱动程序、组件和各种通信协议。获得包括 SINUMERIK 840DsI 在内的西门子数字控制系统的数 据更容易、更方便。同时，KEPServer EX OPC 服务器可以通过合格的 OPC 或系统接口连续访问用户应用程序。KEPServerEX OPC 服务器的任务是从程序和系统获取数据，转换为标准通信协议（OPC 或 DDE），使得所有用户都能够接受和理解这些数据。

KEPServerEX 是业界的先进连接平台。通过该平台的设计，用户可以直观地监控用户界面连接、管理、不同的自动化设备和软件应用，KEPServerEX 利用 OPC 通讯协议（自动化行业相互操作性标准）和以 IT 为中心的通信协议（例如 SNMP、ODBC、Web 服务）向用户提供采集到的工业数据。这个平台的开发和测试是为了满足用户的性能、可靠性和易用性的要求。

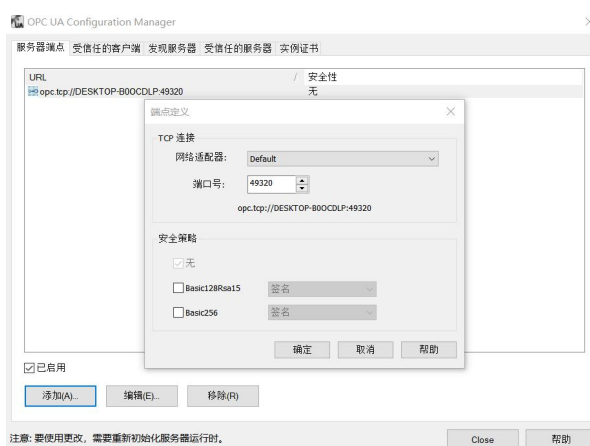


图 3-10 站点 IP 设置

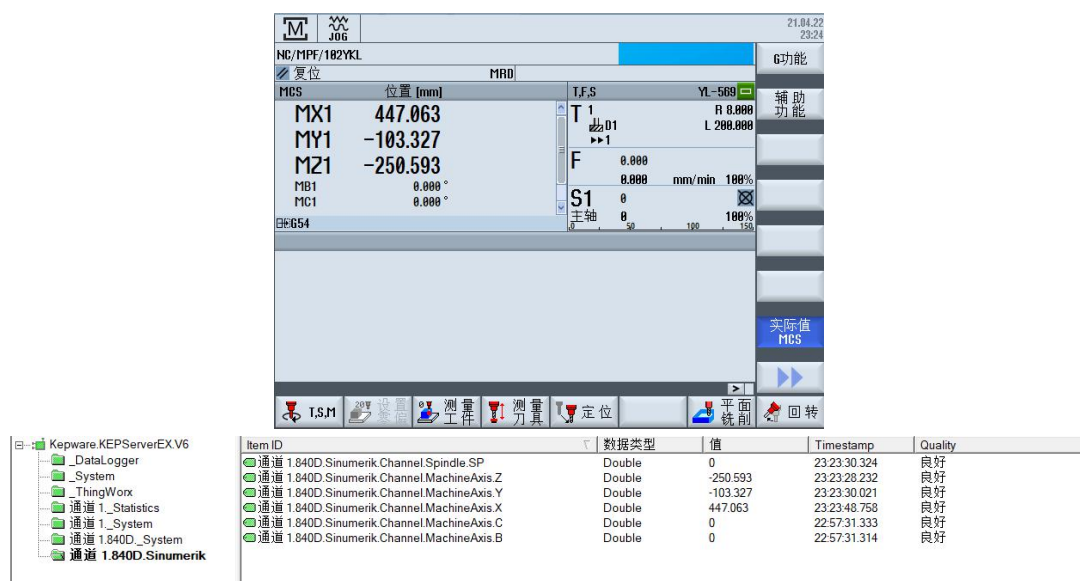


图 3-11 站点进行 SinuTrain 信号检测

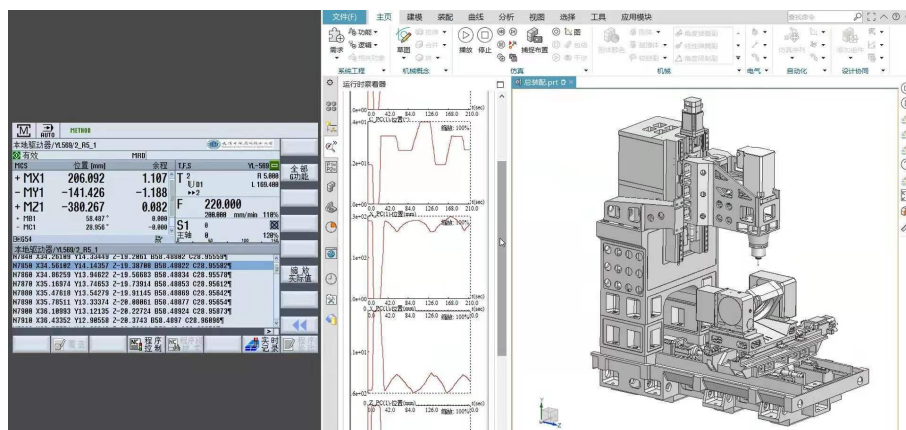


图 3-12 整体连接运动效果图

通过 OPC 通讯，建立 OPC UA 站点，利用 OPC Server 服务器，设置 IP 为 192.168.3.12，选用 SIEMENS 底层协议，通过传递西门子内部变量信号，达到 SINUMERIK NC 与 MCD 中连接的效果如图 3-10 至图 3-12 所示。

### 3.4 仿真轨迹验证

进行叶轮轨迹的验证，将 X 位置、Y 位置、Z 位置、B 位置、C 位置、SP 速度分别加入到运行时查看器中，进行虚拟调试，检测位置和速度数据，添加 X 轴如图 3-13 所示，出现 X 轴信息采集框如图 3-14 所示，运行加工程序如图 3-15 所示，进行多个轴的位置实时采集，确保程序在机床真实行程范围内，采集效果如图 3-16 所示。

X_PC(1)						
轴					X	
速度	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		200.000000	mm/s
位置	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		300.000000	mm
活动的					true	
限制加速度					true	
加速度	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		10000.000...	mm/s <sup>2</sup>
减速度	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		10000.000...	mm/s <sup>2</sup>
限制加加速度					false	
加加速度	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0.000000	mm/s <sup>3</sup>
过载					false	
力						
x	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0.000000	N
y	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0.000000	N
z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0.000000	N
限制力					false	
限制正向力	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0.000000	N
限制反向力	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0.000000	N

图 3-13 X 轴位置添加

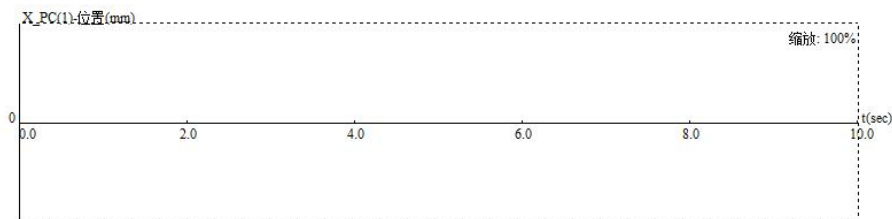


图 3-14 X 轴位置信息采集

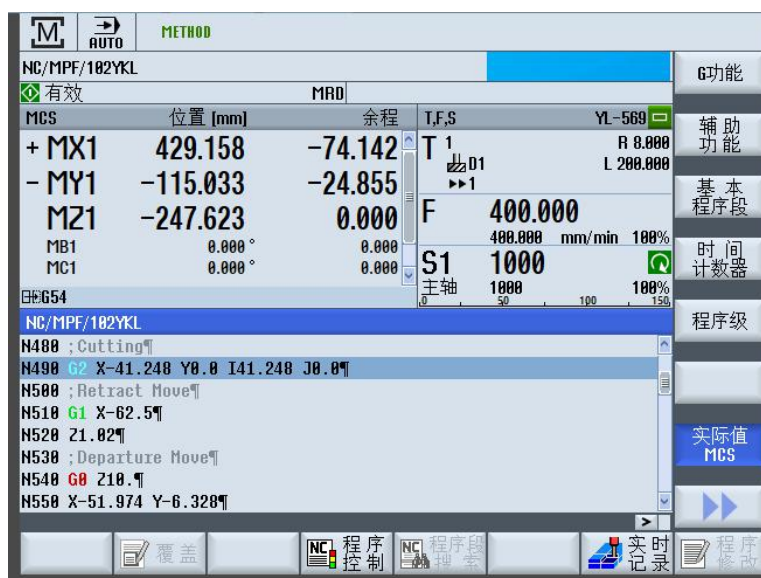


图 3-15 加工程序运行

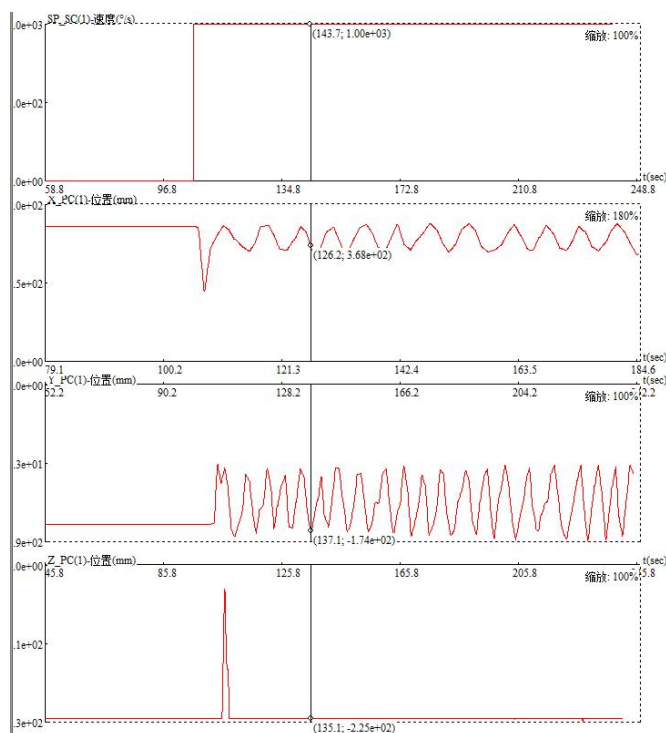


图 3-16 多轴位置速度信息采集

## 第四章 真实加工与结果验证

### 4.1 叶轮加工规划

整体叶轮的加工难度较大，需要严格控制刀路轨迹、工艺参数等，在加工过程中要符合工艺要求，叶轮的生产制造流程如图 4-1 所示。

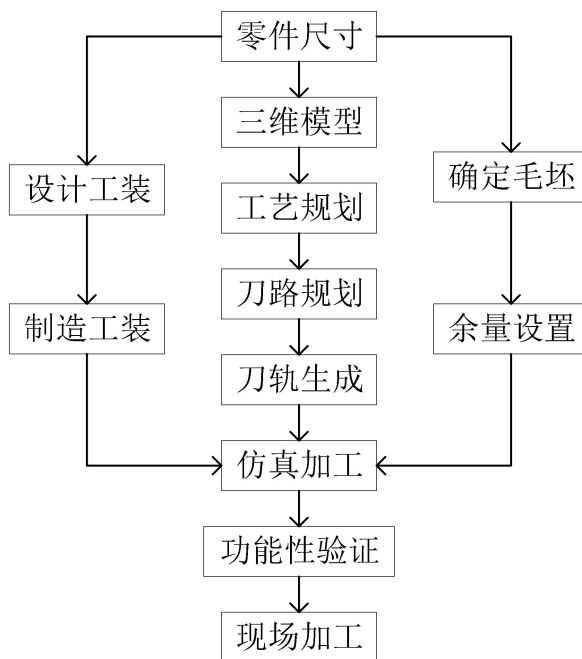


图 4-1 整体叶轮制造流程

#### 4.1.1 加工工艺方案设定

整体叶轮模型形状如图 4-2 所示，在加工叶轮曲面需要注意叶片的叶型复杂，在五轴加工时，刀具伸出的长度长，刀具容易出现折断现象，在 CAM 软件中编程，需合理规划刀路，注意进给与切削步距。

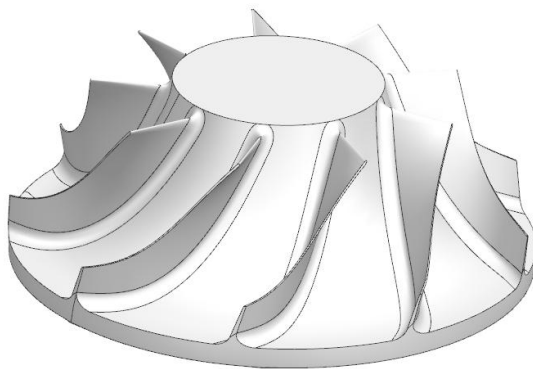


图 4-2 整体叶轮模型

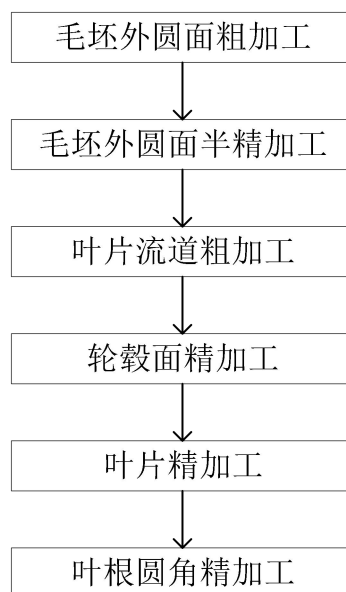


图 4-3 加工工艺路线

整体叶轮工艺规划如图 4-3，其中铣刀种类选择、切削步距、尺寸选择、工艺参数设定等见表 4-1。选择机床为亚龙 YL569，系统为 SINUMERIK 840Dsl 系统。

表 4-1 叶轮加工刀具选择

序号	加工工序名称	刀具种类	切削步距	主轴转速 (rpm)	进给率 (mm pm)
1	毛坯粗加工	Φ 20 平底立铣刀	1.5	2000	500
2	毛坯半精加工	Φ 10 球头铣刀	0.5	3000	200
3	叶片流道粗加工	Φ 6 球头铣刀	0.8	5000	500
4	轮毂精加工	Φ 6 球头铣刀	0.2	5000	200
5	叶片精加工	Φ 4 球头铣刀	0.2	8000	200
6	圆角精加工	Φ 4 球头铣刀	0.2	8000	200

#### 4.1.2 整体叶轮工艺数控编程

叶轮叶片曲面复杂，存在着数控加工程序 NC 代码行数多、编程困难繁琐、人工编程无法实现等问题，因此需使用专业的 CAM 编程软件对刀具运动轨迹进行设计，轨迹走刀设计方案见表 4-2。

表 4-2 加工阶段的走刀方式

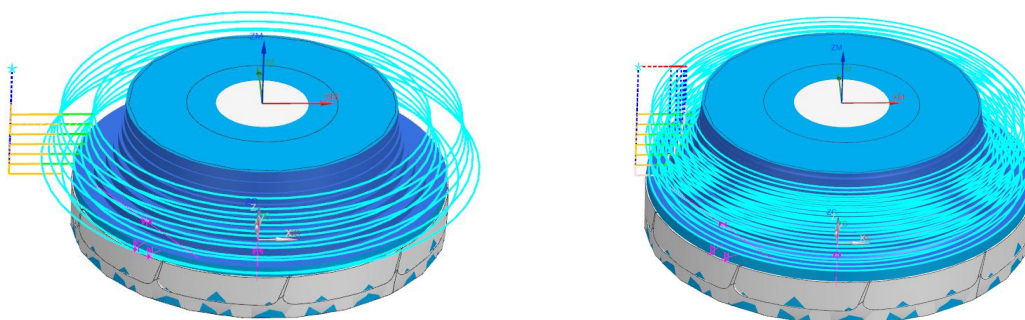
序号	切削描述	切削工艺
1	螺旋进给	毛坯粗加工
2	螺旋进给	毛坯半精加工
3	沿叶片方向往复上升	叶片流道粗加工
4	沿叶片方向往复上升	轮毂精加工
5	以叶片为驱动，单向切削	叶片精加工
6	以较低的圆角边为驱动，加工叶根圆角	圆角精加工

### 4.1.3 加工刀轨的生成

利用 NX CAM 进行刀具轨迹的生成，利用叶轮编程功能，选择不同的进给速率、主轴速率进行叶轮的加工处理，其中进行毛坯的加工，毛坯料如图 4-4 所示，具体刀路如图 4-5 所示，刀具设定完成界面如图 4-6 所示。

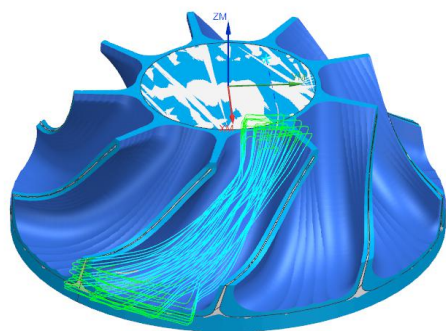


图 4-4 加工毛坯件原料

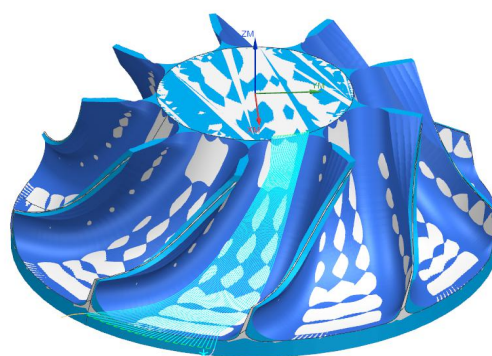


(a) 整体叶轮毛坯粗加工

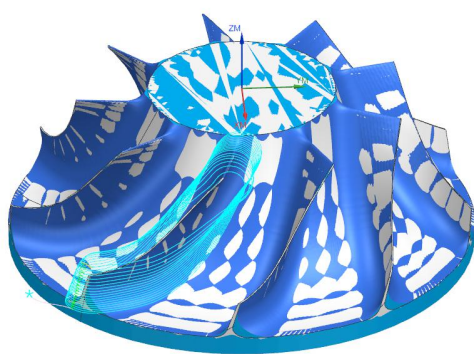
(b) 整体叶轮毛坯半精加工



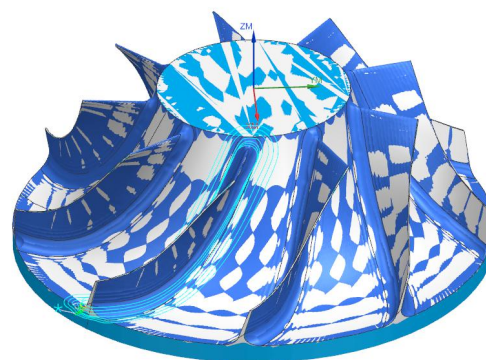
(c) 叶片流道粗加工刀轨



(d) 轮毂精加工刀轨



(e) 叶片精加工刀轨



(f) 圆角精加工刀轨

图 4-5 叶轮加工过程

✓ R8_MP						10:54:18	
✓ CAVITY_MILL_1		✓	R8	1		10:54:06	WORK
✓ R8						00:01:49	
✓ CAVITY_MILL		✓	R8	1		00:01:49	WORK
▢ R5_1						03:42:11	
✓ IMPELLER_ROUGH_1		✓	UG...	2		00:37:00	2
✓ IMPELLER_ROUGH...		↺	UG...	2		00:37:00	2
✓ IMPELLER_ROUGH...		↺	UG...	2		00:37:00	2
✓ IMPELLER_ROUGH...		↺	UG...	2		00:37:00	2
✓ IMPELLER_ROUGH...		↺	UG...	2		00:37:00	2
✓ IMPELLER_ROUGH...		↺	UG...	2		00:37:00	2
▢ R5_2						01:35:58	
✓ IMPELLER_HUB_FL...		✓	UG...	2		00:16:00	2
✓ IMPELLER_HUB_FL...		↺	UG...	2		00:16:00	2
✓ IMPELLER_HUB_FL...		↺	UG...	2		00:16:00	2
✓ IMPELLER_HUB_FL...		↺	UG...	2		00:16:00	2
✓ IMPELLER_HUB_FL...		↺	UG...	2		00:16:00	2
✓ IMPELLER_HUB_FL...		↺	UG...	2		00:16:00	2
▢ R5_3						00:53:40	
✓ IMPELLER_BLADE_F...		✓	UG...	2		00:08:57	2
✓ IMPELLER_BLADE_F...		↺	UG...	2		00:08:57	2
✓ IMPELLER_BLADE_F...		↺	UG...	2		00:08:57	2
✓ IMPELLER_BLADE_F...		↺	UG...	2		00:08:57	2
✓ IMPELLER_BLADE_F...		↺	UG...	2		00:08:57	2
✓ IMPELLER_BLADE_F...		↺	UG...	2		00:08:57	2
✓ R2_1						00:51:10	
✓ IMPELLER_BLEND_...		✓	UG...	3		00:08:30	2
✓ IMPELLER_BLEND ...		↺	UG...	3		00:08:30	2

图 4-6 刀具设定完成界面

## 4.2 五轴刀路后置处理研究

在五轴数控加工中，需要加工的曲面形状复杂，导致所需的铣刀的运动轨迹抽象，给手工 NC 编程带来很大的困难，工作量巨大。采用 NX 进行编程，在刀轨操作的参数设定时，叶片是自由曲面，需要进行坐标变换和空间几何变换，导致 NC 代码比较复杂，因此有必要开发刀轨的后处理程序。后置处理程序是指将以工件为参考系统的刀具轨迹信息，转化为数控系统可执行的 NC 数控程序。

本章内容以双转台五轴机床亚龙 YL569 为研究对象，分析五轴机床结构及运动学关系。运用 NX 进行后处理设置程序的生成，将刀位信息坐标点转译成 NC 指令代码。已有后处理源文件如图 4-7 所示。

YL569tjzd_SINUMERIK840D.cdl	2019/4/30 12:13	CDL 文件
YL569tjzd_SINUMERIK840D.def	2019/4/30 12:13	DEF 文件
YL569tjzd_SINUMERIK840D.pui	2019/4/30 12:13	PUI 文件
YL569tjzd_SINUMERIK840D.tcl	2019/4/30 12:13	TCL 文件

图 4-7 后处理源文件

## 4.3 整体叶轮加工验证

按照上述流程，进行刀具刀轨的设置，设置合适的进给参数与主轴转速，利用 MCD 和软件进行后置处理后的数控 NC 代码的仿真验证，验证了给定参数叶轮的可加工性。

在加工准备工作中，选用直径为 90mm、高度为 35mm 的铝料，采用机床三爪卡盘进行装夹，通过调节机床卡爪的具体位置，能正确卡住毛坯料，确保装夹正确。机床选型：双转台五轴机床亚龙 YL569，具体性能指标见上表，后置处理后用 VERICUT 9 仿真中间加工过程，如图 4-8、图 4-9 所示。

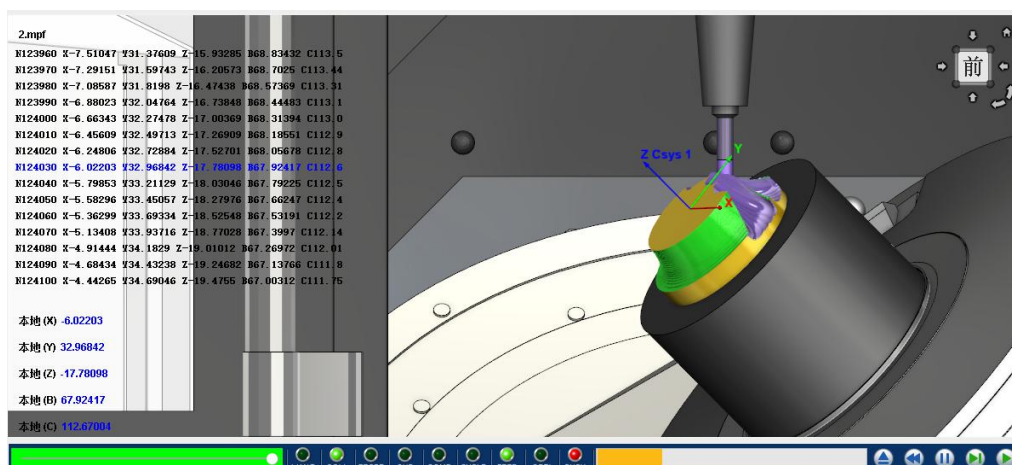


图 4-8 VERICUT 仿真流道粗加工过程

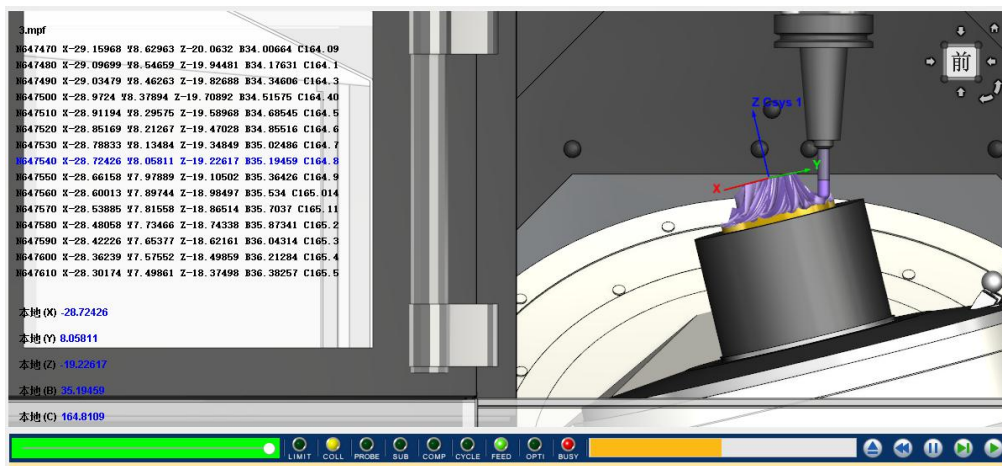


图 4-9 VERICUT 仿真轮毂精加工过程

加工结果：根据上述工艺规划，进行切削加工，对工艺规划、刀路轨迹、后处理程序合理性进行分析验证,最终确立了实验方法的正确性，真实加工过程如图 4-10 所示，加工后的整体叶轮成品如图 4-11 所示。



图 4-10 整体叶轮的加工过程

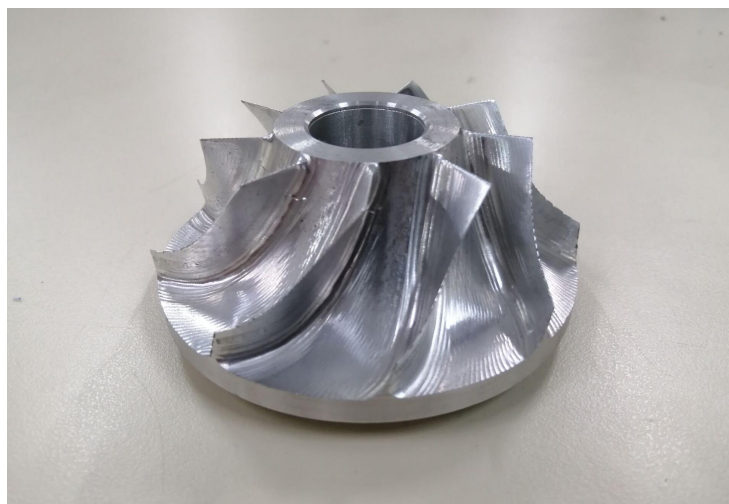


图 4-11 精加工的整体叶轮

## 第五章 总结与展望

### 5.1 总结

论文以双转台五轴数控机床为研究主体，研究了一种基于给定参数叶轮制造的双转台五轴机床加工方法。通过给定参数来进行叶轮模型的建立，通过对 NURBS 曲线研究，利用 Matlab 进行控制点计算，建立出符合要求的叶轮。通过 MCD、OPC 调试，对 NX 三维模型进行物理属性定义，通过对 KEPServerEX 进行站点设置，建立 OPC UA 站点，实现 SINUMERIK 840Dsl 与虚拟机床的联动，可以达到对真实程序仿真的效果。在 MCD 中可输出 X、Y、Z、B、C 的运动范围曲线，有效避免了叶轮加工轨迹超出机床有效行程的问题。在此过程中，选取了一种优化的加工方案，通过选择合适的加工轨迹与进给切削速率，使得机床仿真刀具轨迹未出现碰撞且符合加工精度需求。对加工叶轮的精度检验，达到了加工需求，验证了此方法的可行性。此论文提出了一种新型的基于给定参数叶轮制造的双转台五轴机床加工技术路线，并以实验加以验证。

课题研究所完成的工作如下：

(1)进行 NURBS 曲线理论分析，建立双转台五轴数控机床的运动学模型，进行了理论计算的刀位点和刀具矢量与后置处理后程序轨迹点的分析比对，正确建立了给定参数的所需叶轮模型，同时验证了运动学模型的正确性。

(2)对实验机床硬件条件进行了分析，通过对 SINUMERIK 840Dsl 进行参数设定，OPC 站点配置，与 NX 中三维模型进行了联机调试，达到了虚实互动效果。验证了生成的刀具加工程序，通过在软件中正确收集程序 X、Y、Z、B、C 的运动范围曲线，有效避免真实机床超程撞机的危险，此仿真为真实数控系统联机，仿真范围合理性达到要求所需。

(3)进行了叶轮真实加工，选择合适的加工方案，通过对工艺规划、刀路规划、余量设置来进行分析，在 NX 中进行仿真加工，确定刀轨符合需求。通过后置处理，生成所需 NC 代码文件，检验真实机床参数、零点、系统变量、通讯连接正确无误后，按照机床加工的操作流程进行真实机床的加工，最后对叶轮模型的进行精度检测，验证了此方法的合理正确性。

### 5.2 展望

在本论文过程中虽完成了对于叶轮产品的建模分析，但加工方案仍然可以进行优化，达到更高的精度需求，且对 NURBS 曲线的研究仍然停留在应用阶段，后期可以提供一种 NURBS 曲线优化方法来进行高精度叶片建模。在 MCD 中进行了实时运动范围的监控，避免了机床超程，后续可以进行机床运行学性能分析，完善对于双转台五轴机床对于给定参数叶轮的加工方案，确保加工精度，便于企业进行此类曲面零件的加工准备。

通过本次毕业验证了一种基于给定参数叶轮制造的双转台五轴机床加工方法的可行性，由此引发了如下展望：

(1)NURBS 曲线在加工制造过程中的应用，如何能够提高加工精度，是否可以优化曲线来进行机床与机器人的精度检验，提出一种基于速度和轨迹的精度检验方法。

(2)可否通过 SIEMENS PDPS 软件进行产线级别的调试，在虚拟调试时加入预定优化轨迹，预留程序接口调用运动学模型验证产线级别虚拟调试的正确性。

(3)在虚拟调试如何实现空间点位的实时抓取，有利于产品前期的建模、规划、程序调试、机床性能分析。

## 参考文献

- [1] 王俊彦, 苗鸿宾, 倪璟. 新型龙门式五轴联动混联机床机构设计及位置逆解研究[J]. 机械传动, 2017, 41(01):31-35+121.
- [2] 汪雨蓉. 自由曲面数控加工刀具轨迹重用研究[D]. 兰州理工大学, 2018.
- [3] 何文杰. 五轴双 NURBS 刀具路径拟合及其插补算法研究[D]. 合肥工业大学, 2018.
- [4] 张道远. 基于驱动约束的五轴数控加工刀轴优化方法[D]. 大连理工大学, 2017.
- [5] 张风磊. 运动学特性约束下曲面高速进给数控加工轨迹规划[D]. 北京交通大学, 2017.
- [6] 董金龙, 于天彪, 李俊财, 陈豪. 基于 NX 和 Vericut 的开式整体叶轮加工仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(08):117-120.
- [7] 王爱增, 何川, 赵罡. 基于曲率单调变化的空间非均匀三次 B 样条曲线的构造方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(01):140-146.
- [8] 庞飞彪. 复杂轮廓曲线零件高质量加工技术的研究[D]. 西安建筑科技大学, 2020
- [9] 黄杰. 五轴加工实时刀具路径光滑与进给速度规划方法研究[D]. 上海交通大学, 2018.
- [10] 张士尉. 数控系统速度平滑插补算法的研究[D]. 中国计量大学, 2018.
- [11] 段爱玲. B 样条曲线生成逼近及其数控编程加工[D]. 兰州交通大学, 2018.
- [12] 唐佳, 韩鹏飞, 蔡晔敏, 冷星环. 双转台五轴机床加工代码的转换与应用[J]. 机床与液压, 2020, 48(15):127-132.
- [13] Sonia Pérez-Díaz, Li-Yong Shen. Parameterization of rational translational surfaces[J]. Theoretical Computer Science, 2020, 835.
- [14] Gudrun Albrecht, Carolina Vittoria Beccari, Lucia Romani. Spatial Pythagorean-Hodograph B-Spline Curves and 3D point data interpolation[J]. Computer Aided Geometric Design, 2020, 80.
- [15] 赖啸. 五轴机床的运动学与奇异位置研究[J]. 机械强度, 2018, 40(05):1253-1257.
- [16] Jianmeng Zhang, Rong Mo, Neng Wan, Chao Xia. Tool path planning for five-axis flank milling of free-form surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020(prepublish).
- [17] 董佑浩. 整体叶轮侧铣加工变形研究[D]. 山东大学, 2020.
- [18] 陈宝玉. 整体叶轮五轴加工仿真及切削参数优化研究[D]. 西安科技大学, 2019.
- [19] Hui Wang, Dongzhe Zhang, Yunze Li, Weilong Cong. The effects of elliptical ultrasonic vibration in surface machining of CFRP Composites using rotary ultrasonic machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(11).
- [20] Yang Jiang, Jiang Han, Lian Xia, Lei Lu, Xiaoqing Tian, Haijun Liu. A decoupled five-axis local smoothing interpolation method to achieve continuous acceleration of tool axis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111(1-2).

## 致 谢

本文主要研究了基于给定参数叶轮制造的双转台五轴机床加工方法，在研究设计的过程中遇到了很多困难，在这里感谢所有在毕业设计中给予我帮助的老师与同学们。首先，感谢李巍老师对我进行毕业设计指导，在毕业设计的过程中我遇到了很多困难，比如：叶轮的选型、加工方案的设计、西门子数控系统的调试等。以往遇到困难时，多多少少带有畏难情绪而不愿积极解决，通过这次毕业设计，增强了我克服困难的信心。在跟随李巍老师做毕业设计的一年来，我在学到专业知识的同时，更珍贵的是见识到李巍老师处事的格局。这段时间里，是我大学最煎熬的时期，面临着很多问题，比如就业、竞赛等，虽然很困难，但自己一步一步都走过来了，感谢这段时间陪伴我的同学，感谢新会同学对我的支持，感谢舍友天奇、子航、响哥、子峰、佳林这四年来对我的包容，感谢晨姐在我每次迷茫时对我的支持与鼓励，感谢戈老师对我的开解与帮助，一路走来，很有感慨，大一懵懂、大二开始有自己的目标、大三坚定了信念、大四又看到了下一个要攀登的高峰，追求时痛苦，坎坷曲折，结果大多都不完美，但我从不后悔四年来的选择，在四年来我见识到很多优秀的老师，比如韩金玉老师的细心负责，启祥老师精湛的技术、无私的帮助，左老师做事严谨的态度，很感谢齐书记、霍书记和李传军老师对我的认可，还有与杨老师相处很愉快。自己文学水平有限，但真情实感流露，最后希望学校越来越好、学弟学妹越来越强、格局越来越大，致谢一路走来的朋友们，思想的碰撞是我最宝贵的财富，大学以来收获的是开拓的勇气、不畏困难的决心、还有持之以恒的坚持，这些是我未来继续走下去的财富。最终感恩我的父母姐姐，感恩父母姐姐对我二十年来生活与求学的支持，家人的支持是我前行的动力，希望我以后可以不负你们的支持。

愿家人老师朋友身体健康、平安吉祥、事业有成。

## 附录

### 附录一 中文译文及外文资料

#### 自由曲面五轴侧铣刀具轨迹规划

##### 摘要

侧铣是一种有效的去除自由坯材料的工艺。在传统方法中，侧铣路径的生成解决了直纹曲面与自由曲面之间的误差逼近问题。不同于减小逼近误差，本文尽可能地解决了要加工面与设计面之间的误差问题。机床将运动学引入瞬时啮合轮廓的建立，将复杂的空间相交在一组复杂曲面上进行。为了确保机加工表面有效，瞬时啮合轮廓误差限制在公差带。为了提高加工效率，通过调整切削用量，尽可能地增加每条路径的加工区域接触点和刀具方向。为此，建立了铣削路径生成的优化模型，并用该模型进行了求解粒子群优化算法。最后，以压气机叶片为例验证了该方法的有效性。

关键词：五轴加工 侧铣 自由曲面 敬业度模型

##### 1.简介

通常采用五轴机床加工自由曲面。采用球头铣刀进行端铣加工常见于自由曲面加工。然而这一过程的效率受到刀具和工件之间的点接触面积的限制。因此，侧铣的接触面积更大，有助于提高加工效率。遗憾的是，侧铣轨迹生成技术还不成熟。有必要进一步进行研究。公差是加工表面的误差限制。计算机辅助设计领域的学者正在关注如何建立刀具路径规划模型。

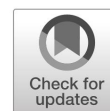
比较权威的学者切削曲面用的近似自由曲面方法，这个能尽可能减少它们之间的偏差。但是，如果刀具方向是根据对于直纹面的母线，过切是不可避免，因为表面是不可展的。在侧铣中，在齿廓上用切割工具进行材料去除。与端铣相比，侧铣使获得更大的加工区域成为可能。然而，侧铣的优点往往是有限的在实践中由于路径规划不当。五轴侧铣路径生成被认为是一项至关重要的任务，特别是对于复杂的几何形状。理想的路径规划需要在满足公差要求的同时，满足更高的加工效率。

##### 2.文献综述

自由曲面是一种复杂的曲面，在工程中很常见。工程上，以前的许多文献对自由曲面的五轴侧铣都进行了研究。早期研究重点研究了如何利用直纹线逼近自由曲面来减少了曲面拟合之间已加工表面和待切割表面的近似误差。Chen 等人<sup>[1]</sup>提出待加工表面可近似为直线 B 样条张量积形式的曲面，加工出的弯曲叶轮完全符合。Fan 等人<sup>[2]</sup>找到了单轴叶轮在粗加工阶段，可围绕弯曲叶轮表面的连续表面叶片，接近待切割表面半精铣中的连续段直表面。Chu 等人<sup>[3]</sup>得出近似于规则曲面连续二次可展 Bezier 面片 G1 连续，刀具末端沿边界移动板块的曲线，五轴侧刀具轨迹规划将铣削问题转化为几何造型问题。Gershon 等人<sup>[4]</sup>提出了一种五轴侧铣方案对于基于自动分段直纹曲面近似

的自由曲面，精确生成的曲面光洁度满足严格公差要求，但是，曲面必须是凸的或马鞍形。类似地，Han 等人<sup>[5]</sup>估计自由曲面采用分段直纹曲面，近似成像误差由等倾角控制，选择了合适工具和生成工具的方法并给出了路径，除了通过逼近待加工表面生成刀具轨迹外，还优化了刀具之间的接触关系并考虑了表面效应。Liu 等人<sup>[6]</sup>提出了点偏移（SPO）和双点偏移（DPO）算法用于五轴圆柱铣刀的刀位计算，在 SPO 中，只有一个刀具接触点，刀具轴与 B 样条曲线的切向量平行，B 样条曲线的曲率较小，后者计算刀具允许刀具在两点接触待加工表面的位置。三点偏移法由 Redonnet 等人提出<sup>[7]</sup>，改进的定位圆锥刀具的特点是有两个切点以及待切割表面和所述待切割表面之间的一个接触点切割机。但该方法需要用有限元法求解七个方程七个未知值。在此基础上，Monies 等人<sup>[8]</sup>优化了沿不可展曲面方向的刀具轨迹。锥形刀具与母线接触与设计面的两个方向相切。Bedi 等人<sup>[9]</sup>允许刀具的周边接触表面的两个方向，比前者放宽了条件限制，但错误增加。Hsieh and Chu<sup>[10]</sup>允许使用联系位置使边界曲线沿法线、切线和双法向扩大可行域。错误是定义为过切和咬边的重量和用粒子群优化算法（PSO）计算合适的刀具位置。Chen 等人<sup>[11]</sup>提出了一种方法基于最大铣削带的后刀面铣削路径规划，以及刀具为复杂母线的筒形刀具。另外，也有学者对刀具轨迹进行了生成通过对刀具运动包络线的研究，实现了侧铣加工。Gong<sup>[12,13]</sup>建立了包络线模型来转化问题路径规划的最小二乘逼近问题来进行离散点处的刀具包络面研究和设计面刀具位置。在本研究中，局部刀具干涉在五轴侧铣也被考虑在内。Yan 等人<sup>[14]</sup>利用 DPO 算法得到初始刀位，并对其进行优化，通过三维变换调整两点。因此，刀具方向表示为一个函数有六个变量。刀具运动的逼近问题将不可展直纹面的包络分解为变量的优化。Zhu 等人<sup>[15]</sup>评估了设计面和刀具包络面之间的误差通过一组点和圆锥刀具轨迹规划对五轴侧铣进行了推广。在下面的研究<sup>[16]</sup>中，一个优化刀具轨迹和刀具的模型通过表示万能工具的扫掠包络线，导出了五轴侧铣的形状作为球形扫掠面的旋转工具。Gong 等人<sup>[17]</sup>建议球头锥形刀具应与轮毂相切叶轮侧铣加工表面。本文考虑了非负误差约束，即不存在过切地区。基于这一思想，设计曲面之间的误差通过调整刀具轨迹使刀具运动包络线最小化。Yan 等人<sup>[18]</sup>提出了一种计算刀具误差的方法基于包络原理的定位来大大提高了五轴加工误差的计算效率。

综上所述，刀具轨迹规划是五轴侧铣加工的重要内容，刀具运动包络线是评价刀具轨迹是否合格的重要依据。



## Tool path planning for five-axis flank milling of free-form surfaces

Jianmeng Zhang<sup>1</sup> · Rong Mo<sup>1</sup> · Neng Wan<sup>1</sup> · Chao Xia<sup>1</sup>

Received: 11 September 2019 / Accepted: 31 March 2020  
© Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2020

### Abstract

Flank milling is an efficient process to remove materials from free-form billet. In conventional, its path generation addressed the approximation error between the ruled surface and free-form to-be-cut surface. Different from reducing the approximation error as much as possible, the error between the machined surface and the design surface is addressed in this paper. The machine tool kinematics is introduced into the establishment of the instantaneous engagement. The complex spatial engagements are represented on a group of planes. In order to ensure that the machined surface is valid, the instantaneous engagements are limited in the tolerance band. To improve the efficiency, the machining region of each path is increased as much as possible by adjusting the contact points and tool orientations. Therefore, an optimization model to generate a milling path is established and solved by the particle swarm optimization algorithm. At last, the proposed method is verified on a compressor blade.

**Keywords** Five-axis machining · Flank milling · Free-form surface · Engagement model

### 1 Introduction

Five-axis machine tools are always used to fabricate the free-form to-be-cut surface. End milling with ball-end cutter is common in the free-form surface machining. However, the efficiency of this process is limited by the point contact between the tool and the workpiece. Therefore, the flank milling becomes an alternative process because the contact area is larger. It helps to promote machining efficiency. Regrettably, path generation about flank milling is not a mature technology. It is necessary to discuss further.

The tolerance is the limitation for the machined surface. The scholar in computer-aided design scope paid attention to construct a model for planning tool path. A group of ruled surfaces are used to approximate the free-form surface. The deviation between them is reduced as much as possible. However, if the cutter orientation is determined according to the generatrix of the ruled surface, the overcut is inevitable due to the surface is non-developable.

In flank milling, material removal occurs at the profile of the cutting tool. Compared with end milling, flank milling

makes it possible to get larger machining region in general. However, the advantages of flank milling are often limited by poor path planning in practice. Five-axis flank milling path generation is considered a crucial task, especially for complex geometric shapes. An ideal path planning needs to satisfy higher processing efficiency while meeting the tolerance requirements.

### 2 Literature review

Free-form surfaces are complex surfaces that are common in engineering, and 5-axis flank milling of free-form surface has been researched in many previous literatures. Early researches focus on how to approximate the free-form surface by ruled surface and reduce the approximation error between the fitting surface and the to-be-cut surface. Chen et al. [1] proposed that the to-be-machined surface can be approximated to a straight surface in the form of a B-spline tensor product. To machine the curved impeller completely, Fan et al. [2] fitted the single continuous surface blade that can surround the curved impeller surface in roughing stage and approximated the to-be-cut surface by continuous segment straight surfaces in semi-finishing milling. Chu et al. [3] approximated a ruled surface with consecutive quadratic developable Bezier patches with G1 continuity, and the tool end moves along the boundary curve of the patches. The tool path planning for five-axis side

✉ Neng Wan  
wanneng@nwpu.edu.cn

<sup>1</sup> Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, Shaanxi, China

milling is transformed into a geometric modeling problem. Gershon et al. [4] presented a five-axis flank milling scheme for free-form surface based on automatic piecewise ruled surface approximation, with accurate resulting surface finish that satisfies tight tolerances. However, the surface must be convex or saddle-like shape. Similarly, Han et al. [5] approximated free-form surface by piecewise ruled surfaces, and the approximation error was controlled by the iso-inclination angle. Methods for selecting appropriate tools and generating tool paths also were presented.

Except generating the tool path by approximating the to-be-machined surface, the contact relationship between the tool and surface was also considered. Liu et al. [6] proposed single point offset (SPO) and double point offset (DPO) algorithms for the cutter location calculation of five-axis cylindrical milling. There is one cutter-contact point and the tool axis is parallel to the tangent vector of B-spline curve with smaller normal curvature in SPO, whereas the latter calculates the cutter locations by allowing that the cutter contacts the to-be machined surface at two points. The three point offset method is presented by Redonnet et al. [7]. Improved positioning of the conical cutter is characterized by two points of tangency and one point of contact between the to-be-cut surface and the cutter. But the method needs to solve seven equations with seven unknown values. Based on that, Monies et al. [8] optimized tool path along the directrices of non-developable surface. The conical tool is in contact with the generatrix and tangent to two directrices of design surface. Bedi et al. [9] allowed the peripheral of the cutting tool to touch two directrices of the surface, relaxing the limit than the former but the error increased. Hsieh and Chu [10] allowed contact locations to deviate the boundary curves along the normal, tangent, and bi-normal directions to enlarge the feasible region. The error is defined as a weight sum of overcut and undercut, and the most suitable cutter location calculated by the particle swarm optimization (PSO) algorithm. Chen et al. [11] proposed a method of flank milling path planning with the max milling band, and the cutter tool is barrel cutter with complex generatrix.

In addition, some scholars have generated the tool path of flank milling by studying the tool motion envelope. Gong [12, 13] built up the envelope model to transform the problem of path planning into the least squares approximation problem of the tool envelope surface and the design surface at the discrete cutter location. In this research, local tool interference in 5-axis flank milling is also taken into account. Yan et al. [14] obtained the initial cutter orientation by DPO and optimized it by adjusting the two points through three-dimensional translations. Thus, the cutter orientation is represented as a function with six variables. The approximation problem of tool motion envelope to non-developable ruled surface is decomposed into the optimization of variables. Zhu et al. [15] evaluated the error between the design surface and tool envelope surface by means of a group of points, and conical tool path planning

for 5-axis flank milling was promoted. In the following research [16], a model for optimizing the tool path and cutter shape of the five-axis side milling simultaneously was developed by representing the sweep envelope of the universal rotary tool as a spherical sweep surface. Gong et al. [17] promoted that ball-end conical cutter should be tangent to the hub surface in flank milling of impeller. Nonnegative-error constraint was considered in this paper; that is, there is no overcut region. Based on this idea, the error between designed surface and tool motion envelope is minimized by adjusting tool path. Yan et al. [18] proposed a method to calculate the error of tool location based on envelope principle; the computational efficiency of the error in five-axis machining is greatly improved.

In summary, the tool path planning is important for five-axis flank milling, and the tool motion envelope is a significant basis for valuing whether the tool path is accredited.

### 3 Instantaneous engagement model of free-form surface flank milling

Based on tool motion envelope, the instantaneous engagement model is built up in this part; it represents the material removed at a certain instant.

#### 3.1 Cylindrical cutter model

In flank milling, the profile of a cutting tool does the major cutting. It is obvious that the peripheral of a cylindrical cutter is a surface of revolution which determined by the generatrix  $L(s)$ . In the coordinate system  $W_T(O_T-X_TY_TZ_T)$ ,  $L(s)$  is represented as

$$L(s) = (1-s)V_0 + sV_1, 0 \leq s \leq 1, \quad (1)$$

where  $V_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$  and  $V_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$  are two end points of the tool part with cutting ability, and  $s$  is the parameter of the profile curve (see Fig. 1).

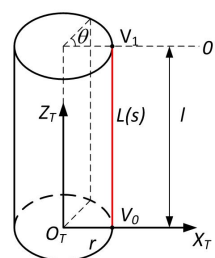


Fig. 1 Cutting-able part of cylindrical cutter and its surface model

In addition, the radius of the cutter is  $r$  and the length of cutting edges is  $l$ . The profile of the cylindrical cutter is defined as

$$S^T(s, \theta) = \begin{bmatrix} r \cos \theta \\ r \sin \theta \\ sl \\ 1 \end{bmatrix}, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq s \leq 1. \quad (2)$$

### 3.2 Scattered model of billet surface and to-be-cut surface

Except for the tool model, billet surface and to-be-cut surface are also needed to build up instantaneous engagement model.

In this paper, to-be-cut surface is a free-form surface (see Fig. 2). In practice, it is obtained by offsetting the design surface along its normal vector. To-be-cut surface can be represented as

$$S^D(u, v) = \sum_{i=0}^{M_D} \sum_{j=0}^{N_D} N_i(u) \cdot N_j(v) \cdot V_{i,j}, 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (3)$$

in the design coordinate system  $W_D (O_D-X_D Y_D Z_D)$ .

The billet surface is the result of previous working procedure. In this paper, it is represented as the nominal machining result from pre-process such as rough milling, and the relationship of billet surface, to-be-cut surface, and design surface is shown in Fig. 3. In the coordinate system  $W_D$ , the billet surface is expressed as

$$S^B(u, v) = \sum_{i=0}^{M_B} \sum_{j=0}^{N_B} N_i(u) \cdot N_j(v) \cdot V_{i,j}, 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (4)$$

The billet surface and to-be-cut surface are built up in the workpiece coordinate system  $W_W (O_W-X_W Y_W Z_W)$ . The transformation matrix  $T_D^W$  transforms the coordinate system  $W_D (O_D-X_D Y_D Z_D)$  to the workpiece coordinate system. To-be-cut surface in  $W_W$  is represented as

$$S_W^D = T_D^W \cdot S^D \quad (5)$$

and the billet surface is represented as

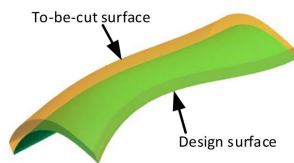


Fig. 2 To-be-cut surface and design surface

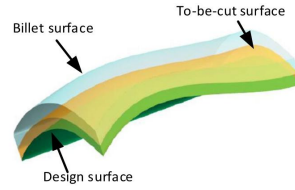


Fig. 3 The relationship of billet surface, to-be-cut surface, and design surface

$$S_W^B = T_D^W \cdot S^B \quad (6)$$

In the workpiece coordinate system  $W_W (O_W-X_W Y_W Z_W)$ , a set of parallel planes  $\Gamma_i$  perpendicular to the  $Z_W$  axis are defined (see Fig. 4a). The plane  $\Gamma_i$  corresponds to a  $Z_W$  value of  $z_i$ , so it is denoted as

$$\Gamma_i: f(x, y) = z_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

The intersecting curve of  $\Gamma_i$  and to-be-cut surface are represented as

$$C_i^D = (S_W^D \cap f(x, y) = z_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

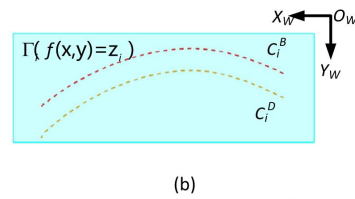
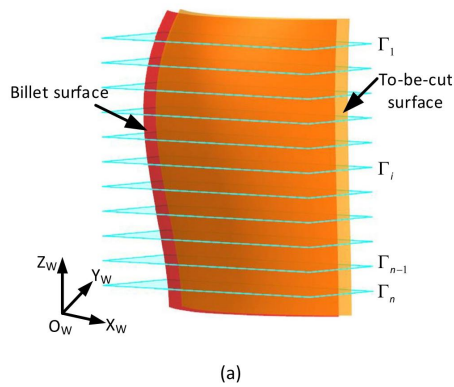


Fig. 4 a Parallel planes  $\Gamma_i$ , and b the intersections  $C_i^B$  and  $C_i^D$

## 附录二 Matlab 程序

```

% 给定一组数据点,即型值点,反求其控制顶点,并构造通过这些型值点的 3D NURBS
曲线,首末型值点与控制顶点重合,称为 NURBS 曲线插值
% 具有 n 个型值点的 k 次 NURBS 插值曲线,将有 n+2 个未知控制顶点,首末节点取
重复度 r=k+1,从而具有 n+2+k+1 个节点
% 三次 NURBS 曲线的首末节点取重复度 r=k+1=4, u1=u2=u3=u4=0,
Un+3=Un+4=Un+5=Un+6=1
clear
pt1=load('C:\Users\Administrator\Desktop\MATLAB\01.txt');
pt2=load('C:\Users\Administrator\Desktop\MATLAB\02.txt');
[row1,column1]=size(pt1); %每行代表一个型值点,采用列向量表示 x,y,z,便于求解
[row2,column2]=size(pt2);
n=length(pt1); %型值点数量
k=3; %样条阶数
U1=zeros(1,n+k+3); %节点矢量
U2=zeros(1,n+k+3); %节点矢量
%计算节点矢量
if(column1 == 2) % 2D curve
    x1=pt1(:,1);
    y1=pt1(:,2);
    x2=pt2(:,1);
    y2=pt2(:,2);
else % 3D curve
    x1=pt1(:,1);
    y1=pt1(:,2);
    z1=pt1(:,3);
    x2=pt2(:,1);
    y2=pt2(:,2);
    z2=pt2(:,3);
end
%n 个数据点,利用规范累积弦长法进行型值点参数化处理
temp1=zeros(1,n-1);
temp2=zeros(1,n-1);
for i=1:n-1 %n 个数据点, n-1 段弦长
    if(column1 == 2) % 2D curve

```

```

temp1(i)=sqrt((x1(i+1)-x1(i))^2+(y1(i+1)-y1(i))^2);
else % 3D curve
temp1(i)=sqrt((x1(i+1)-x1(i))^2+(y1(i+1)-y1(i))^2+(z1(i+1)-z1(i))^2);
temp2(i)=sqrt((x2(i+1)-x2(i))^2+(y2(i+1)-y2(i))^2+(z2(i+1)-z2(i))^2);
end
end
sumtemp1=sum(temp1);%顺序相邻两型值点之间距离的和,即总弦长
sumtemp2=sum(temp2);
for i=1:k+1 %前 k+1 个节点为 0
    U1(i)=0;
    U2(i)=0;
end
for i=n+k:n+k+3 %后 k+1 个节点为 1
    U1(i)=1;
    U2(i)=1;
end
%n 个数据点, 内节点为 n-2 个, U(k+1)作为初始值
for i=k+1:n+k-2
    U1(i+1)=U1(i)+temp1(i-k)/sumtemp1; %n-1 段弦长, U (k+1) 到 U (n+k) n 节点
    U2(i+1)=U2(i)+temp2(i-k)/sumtemp2;
end
end
%反算 n+2 个控制点, 采用切矢边界
%控制顶点的首末端点和给定型值点的首末端点重合
if(column1 == 2)
    dpt11=[0 1];%给定首数据点切矢
    dpt1n=[-1 0];%给定末数据点切矢
    dpt21=[0 1];%给定首数据点切矢
    dpt2n=[-1 0];%给定末数据点切矢
else
    dpt11=[0 0 1];%给定首数据点切矢
    dpt1n=[-1 0 0];%给定末数据点切矢
    dpt21=[0 0 1];%给定首数据点切矢
    dpt2n=[-1 0 0];%给定末数据点切矢
end
end
dU1=zeros(1,n+k+3); %节点增量,  $\Delta U=U_{i+1}-U_i$ 

```

```

dU2=zeros(1,n+k+3);
for i=k+1:n+k-1
    dU1(i)=U1(i+1)-U1(i);
    dU2(i)=U2(i+1)-U2(i);
end
%求解线性方程组获得控制顶点向量，A*D=E,A 为系数矩阵，元素为 B 样条基函数的
值；D 是控制顶点列向量；E 是列向量
A1=zeros(n);
A2=zeros(n);
if(column1 == 2)
    E1=zeros(n,2); %2D curve
    E2=zeros(n,2);
else
    E1=zeros(n,3); %3D curve
    E2=zeros(n,3);
end
A1(1,1)=1; %切矢条件 a1=1,b1=c1=0
A1(n,n)=1; %切矢条件 an=bn=0,cn=1
E1(1,:)=pt1(1,:)+(dU1(4)/3)*dpt11; %首端点条件
E1(n,:)=pt1(n,:)-(dU1(n+2)/3)*dpt1n; %末端点条件
A2(1,1)=1; %切矢条件 a1=1,b1=c1=0
A2(n,n)=1; %切矢条件 an=bn=0,cn=1
E2(1,:)=pt2(1,:)+(dU2(4)/3)*dpt21; %首端点条件
E2(n,:)=pt2(n,:)-(dU2(n+2)/3)*dpt2n; %末端点条件
%计算系数矩阵 A 的元素 a,b,c 以及列向量 E 的元素 e 的值
for i=2:n-1
    A1(i,i-1)=dU1(i+3).^2/(dU1(i+1)+dU1(i+2)+dU1(i+3)); %a 的值
    A1(i,i)=dU1(i+3)*(dU1(i+1)+dU1(i+2))/(dU1(i+1)+dU1(i+2)+dU1(i+3))+...
        dU1(i+2)*(dU1(i+3)+dU1(i+4))/(dU1(i+2)+dU1(i+3)+dU1(i+4)); %b 的值
    A1(i,i+1)=dU1(i+2).^2/(dU1(i+2)+dU1(i+3)+dU1(i+4)); %c 的值
    E1(i,:)=(dU1(i+2)+dU1(i+3))*pt1(i,:); %e 的值
    A2(i,i-1)=dU2(i+3).^2/(dU2(i+1)+dU2(i+2)+dU2(i+3)); %a 的值
    A2(i,i)=dU2(i+3)*(dU2(i+1)+dU2(i+2))/(dU2(i+1)+dU2(i+2)+dU2(i+3))+...
        dU2(i+2)*(dU2(i+3)+dU2(i+4))/(dU2(i+2)+dU2(i+3)+dU2(i+4)); %b 的值
    A2(i,i+1)=dU2(i+2).^2/(dU2(i+2)+dU2(i+3)+dU2(i+4)); %c 的值

```

```

        E2(i,:)=(dU2(i+2)+dU2(i+3))*pt2(i,:);           %e 的值
    end
    D1=A1\E1;           %解方程组，获得去除首末端点的控制顶点向量
    D1=[pt1(1,:);D1;pt1(n,:)]; %控制顶点向量，控制顶点比数据点多两个，加上首末端点
    [s1,t1]=size(D1);   %s: 控制点数量
    D2=A2\E2;           %解方程组，获得去除首末端点的控制顶点向量
    D2=[pt2(1,:);D2;pt2(n,:)]; %控制顶点向量，控制顶点比数据点多两个，首末端点
    [s2,t2]=size(D2);   %s: 控制点数量
    %NURBS_toolbox 库调用实例
    %使用 NURBS_toolbox 库函数绘制 NURBS 曲线函数
    pt1s=[D1(:,1)';D1(:,2)';D1(:,3)']; %nrbmak 函数采用的行向量存储 x,y,z 坐标，上述程序
        是采用列向量存储 x,y,z 坐标，在此进行转换
    crv1=nrbmak(pt1s,U1);
    nrplot(crv1,1000); %第二个参数是插值点的数量，值越大，NURBS 曲线越光滑
    pt2s=[D2(:,1)';D2(:,2)';D2(:,3)'];
    crv2=nrbmak(pt2s,U2);
    nrplot(crv2,1000); %第二个参数是插值点的数量，值越大，NURBS 曲线越光滑
    %绘制给定型值点、控制点及其 NURBS 曲线
    if(column1 == 2) %2D curve
        plot(pt1(:,1),pt1(:,2),'*r'); %绘制型值点
        plot(pt2(:,1),pt2(:,2),'*r');
        hold on;
        plot(D1(:,1),D1(:,2),'b-o'); %绘制控制点
        plot(D2(:,1),D2(:,2),'b-o');
        hold on;
        plot(P2(:,1),P2(:,2),'r'); %绘制 NURBS 曲线
        plot(P2(:,1),P2(:,2),'r');
        nrplot(crv1,1000); %使用 NURBS_toolbox 库函数绘制 NURBS 曲线
        nrplot(crv2,1000);
        hold on;
    else %3D curve
        srf=nrbruled(crv1,crv2);
        nrplot(srf,[20,20]); %绘制 NURBS 曲面
        hold on;
    end
end

```