

Mastercam和VERICUT在汽轮机叶片四轴加工和仿真中的应用

张成林

中车大连机车车辆有限公司 辽宁大连 116000

摘要：针对工业汽轮机叶片，利用四轴联动加工中心，对四轴数控加工相关技术进行了探索，通过自动编程软件的合理运用，使叶片加工更高效。

关键词：四轴联动；汽轮机叶片；Mastercam编程；VERICUT仿真；加工效率

1 序言

四轴联动加工中心比传统的三轴联动加工中心增加了旋转轴，三轴即X、Y、Z三根直线轴，第四轴一般是旋转的A轴，即刀轴和工件的表面法线形成夹角，可以扩大加工范围，在加工不规则曲面或结构复杂的零件时，可使切削刀具以最佳姿态接近工件，实时调整旋转轴角度，从而达到高精度。在多角度和曲面形状复杂零件的加工中，目前国产机床应用已较为广泛，其价格相对较低，维护费用相对于进口机床也较低，这对于中小型企业尤为关键。

对汽轮机性能和寿命有直接影响的是工业汽轮机叶片，它是汽轮机的核心部件。传统的三轴加工方法难以满足叶片复杂曲面的加工需求，而四轴加

工技术通过增加一个旋转轴，使得加工变得更加高效和精准。Mastercam软件提供多种四轴加工功能，是较为先进的计算机辅助制造（CAM）工具^[1]。本文研究了基于Mastercam软件的汽轮机叶片四轴加工工艺及其效率，通过理论分析和实际案例，探讨其在实际应用中的优势及对生产效率的提升作用。

2 汽轮机叶片的结构及工艺分析

扭叶片（见图1）和直叶片（见图2）均为工业汽轮机动叶片，直叶片主要特点是结构简单、制造成本较低以及从叶根到叶冠的型线不变。扭叶片则由叶根至叶冠为不规则型线，具有扭转的曲面叶身，其型面的加工是制约叶片生产效率和产品质量提升的瓶颈。因为叶片型面是由复杂的自由曲面构

在钻头切削路径策略的规划，根据孔深需预先设置好加工方式，再在软件中依次定义。本文结合实际加工操作中的切削路径，介绍了在软件中如何实现走刀方式的设置。利用CAM软件规划刀具的走刀路径、生成NC代码，能更高效、准确且安全地实现数控代码的编制，以减少在加工时操作人员手动输入程序的情况，为数控程序的高效编制提供参考。

参考文献：

[1] 陈俐华，武文革，于大国，等. 深孔加工技术工艺分析[J]. 工具技术，2022，56（8）：56-62.

[2] 陈丹. 基于机械加工的深孔加工技术研究[J]. 现代制造技术与装备，2022，58（8）：143-145.

[3] 赵东辉. 基于机械加工的深孔加工技术探析[J]. 科技创新与应用，2019（20）：138-139.

[4] 李瑞. 基于UG的模块孔加工过程分析[J]. 电子技术与软件工程，2018（17）：70-71.

[5] 张晓东，韩策. 航空复杂壳体零件深孔加工技术研究[J]. 航空制造技术，2017（15）：50-57.

MW 20241010

成,对几何精度要求较高,所以传统加工方式无法满足叶片加工的精度要求。本文围绕扭叶片在四轴联动加工中心上的高效加工进行重点阐述^[2]。



图1 扭叶片

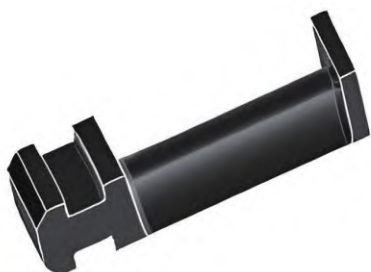


图2 直叶片

扭叶片形状复杂,结构为空间自由曲面,手工编程过于繁琐,因此需要使用CAD/CAM自动编程软件,并适合使用五轴联动数控机床加工。但对于大多数中小型企业而言,可能因为经济原因没有购买五轴机床。不过,利用四轴联动加工中心结合自

动编程软件,可加工大部分叶片和需要多角度加工的复杂零件。

立式加工中心的第四轴是指数控分度头,此部件不仅提高了加工效率,还大大降低了成本。有了数控分度头很多产品的加工都可得到提质增效,可以弥补三轴机床不能一次装夹完成加工的弊端,减少了装夹次数,降低了因多次装夹而产生的定位误差,从而提高了加工效率,同时也可以使产品通过旋转实现多面加工,将较复杂的部件加工得更加精细。目前,国内的四轴机床已经开始普及,主要应用于航空航天、汽车和模具制造等领域。

通过分析叶片的结构(见图3)可以发现,叶片的形状是曲率和扭转变化较大的复杂空间曲面,属于典型的薄壁件。因为叶片是重要部件,工作环境恶劣,是汽轮机动力装置,所以精度要求较高,质量要求也较高。其工作性能与叶片表面质量有直接关系,对整机性能可能产生影响。

此叶片主要用于汽轮机发动机,加工后对表面粗糙度和轮廓精度要求极高。由于叶片较长且壁薄,所以合理编制加工程序以及选择合适的切削参数与刀具成为加工此叶片的核心技术。

采用四轴联动加工中心进行叶片加工,叶片三维模型如图4所示,叶片一端为矩形,另一端为圆柱形。

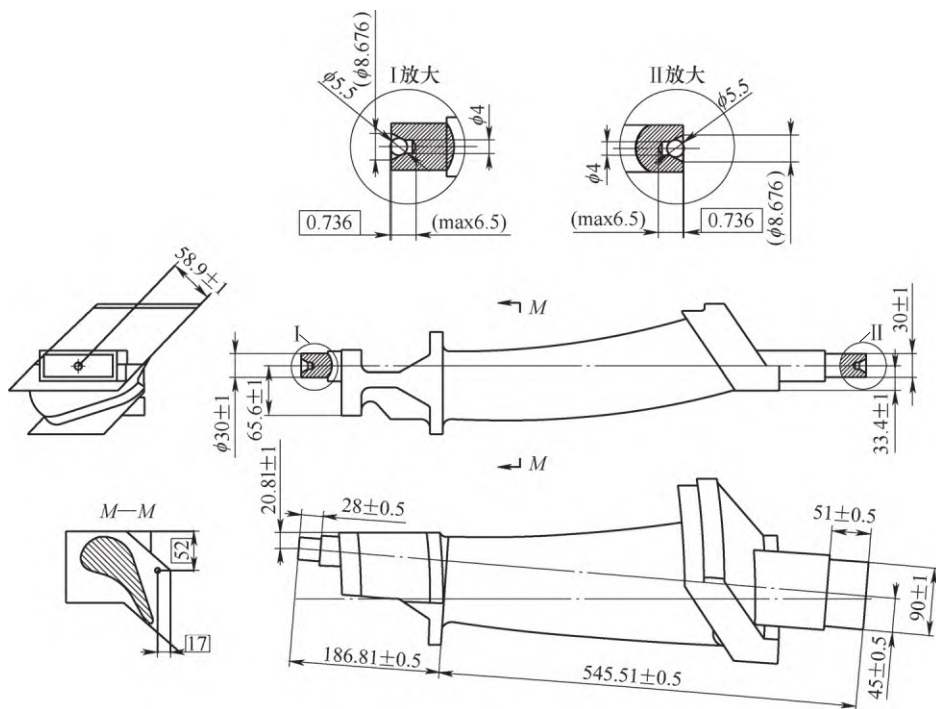


图3 叶片结构

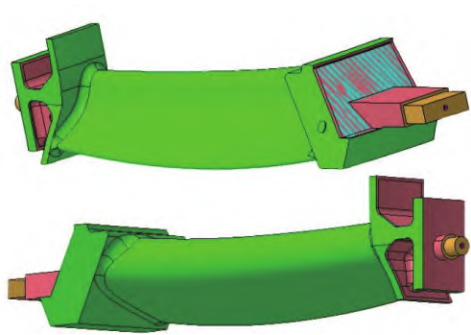


图4 叶片三维模型

先在卧式加工中心将两端基准加工出来并钻出中心定位孔。然后将矩形端通过工装夹持在四轴联动加工中心卡盘上，圆柱端通过尾座顶尖和工装保证其刚性，避免加工中因刚性不足产生振刀现象。

加工工艺流程是按照每个切面角度的叶片分别设定固定角度的定轴粗加工，即将叶片余量较大的位置进行三轴定向粗加工，然后通过四轴联动对叶片的各个曲面进行半精加工和精加工，最终将两端的叶柄部分进行单独的精加工。

3 叶片的CAM编程

3.1 叶片粗加工

叶片多截面扭曲，其汽道截面既有变化，又有叶根到叶冠的扭曲。根据叶片型面和两端叶柄的变化，确定A轴的固定角度。因为粗加工工序以效率优先，所以选用大余量切削。但在加工工艺参数的设定上，要特别注意避免叶冠和叶身圆角的干扰，以及切削后变形的问题。为解决这些问题，选择了直径为32mm的镶片立铣刀，用于去除无法四轴联动加工的两端及型面的干涉位置。第四轴分 -100° 、 -35° 、 0° 、 90° 、 115° 和 180° 角度定轴粗加工，粗加工刀路如图5所示。

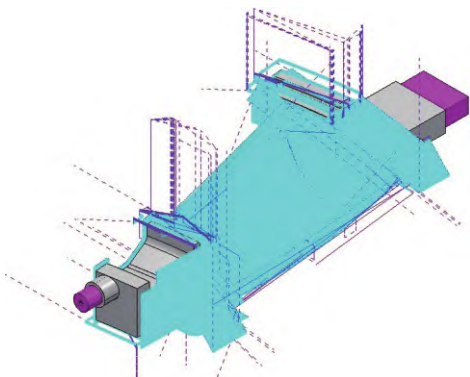


图5 粗加工刀路

3.2 叶片半精加工

半精加工时主要考虑粗加工工件去掉大余量后可能产生的变形，在半精加工中进行修正，给精加工留出均匀余量。使用 $\phi 26\text{mm} R5\text{mm}$ 的牛鼻刀，在保证残余高度符合工艺要求的同时，减少背吃刀量，切削速度比粗加工更快。

3.3 叶片精加工

编制精加工刀具路径，要确保叶片表面达到所需的精度和表面粗糙度。由多个变截面曲线混合而成的汽道部分，其边缘最薄的位置厚度 $<0.6\text{mm}$ ，叶片的曲度发生了很大的变化，在加工时需要设置可变的刀具引导角。

Mastercam软件提供了多种精加工策略，此例中采用统一的多轴刀路，通过设置相应的切削用量和刀轴控制，指定渐变方式，行距之间采用螺旋式，采用四轴联动加工方式，连续旋转A轴，选用 $\phi 16\text{mm}$ 涂层硬质合金球头铣刀。统一多轴编程设置如图6所示，可以减少空行程，重复切削，从而实现快速旋转，提高加工效率，实现高质量的表面加工。

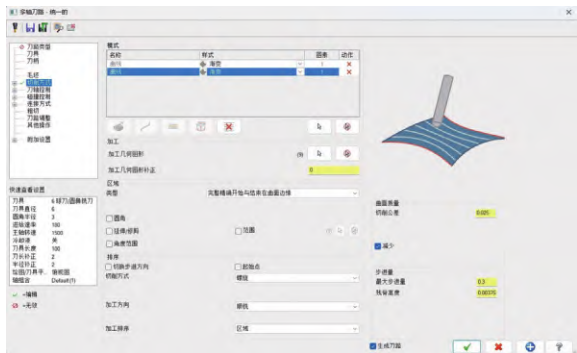


图6 统一多轴编程设置

在Mastercam软件中依次选择刀具路径→多轴加工→统一多轴→选择叶片两条曲线驱动→驱动样式为渐变→选择加工几何图形叶片的曲面→刀轴的输出方式为四轴→刀轴控制为倾斜曲面，选择直径为16mm的球刀进行加工，精加工步距为0.3mm，螺旋进给，编制出的精加工刀具轨迹如图7所示。

3.4 进给速度优化

在多轴加工中，必须动态控制刀具的切削速度，即根据刀具的空间位置和刀轴矢量的变化来调整各切削点的速度，从而达到恒定的功率加工。由于每个切削点到工件旋转中心的距离不同，所以为确保加工精度，需进行速度动态控制^[3]（见图8）。

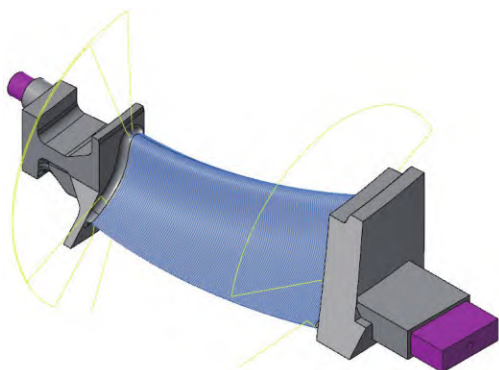


图7 精加工刀具轨迹

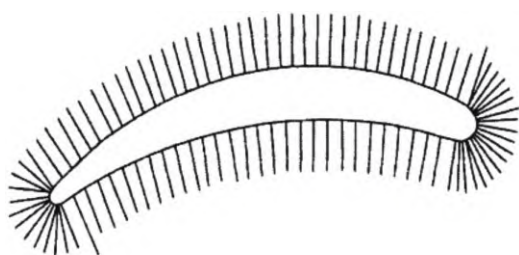


图8 速度动态控制

通过分析叶片截面可知，在旋转轴A轴转动速度较慢、直线轴行程较短且运动速度较快的条件下，曲面曲率变化较平缓，且曲面方向变化较快。但在进、排汽边缘，曲率变化剧烈，A轴在加工时旋转较快，加上直线轴行程较大，会造成伺服系统动力不足而带动系统整体转速下降^[4]，此时铣刀等效走刀路径如图9所示。

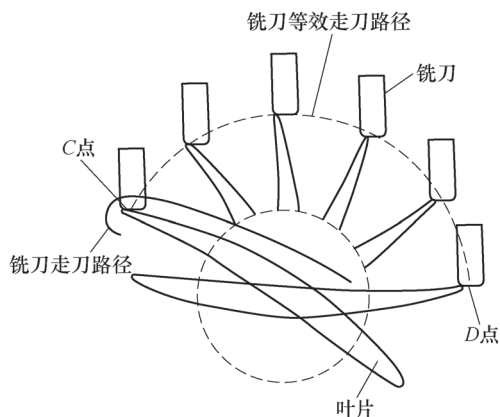


图9 铣刀等效走刀路径

3.5 优化提升效率

机床速度动态调整：在曲率变化较小的区域如叶盆、叶背等处降低进给速度；在进、排汽边缘等曲率变化较大的区域提高进给速度，以弥补机床的动力不足。在编程时设定2000m/min的进给速度，依次选择刀路调整→进给速度控制区→选择进汽和排

汽边缘图形→提高进给速度，设置界面如图10所示。



图10 刀路调整进给速度设置界面

根据实际加工的表面质量调整前后缘圆弧进给速度，如图11所示。调整后的进给速度，在满足表面质量要求的同时，有效提高加工效率，可大幅度提高进、排汽边缘加工的速度。

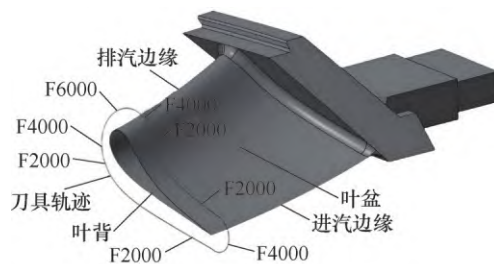


图11 进给速度调整

4 叶片的仿真模拟

Mastercam软件提供了强大的仿真校验功能，以验证刀轨的正确性，防止过切现象的发生。先将坯料尺寸通过“毛坯设定”功能进行设置，再利用“实体仿真”功能对切削过程进行模拟，如图12所示。

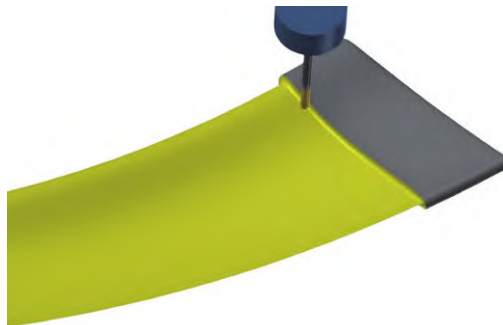


图12 叶片实体仿真

在很大程度上，数控加工的质量和效率是依靠程序的合理性来决定的。当使用Mastercam软件进行仿真加工时，叶片是否存在干涉现象，刀具是否与工装或机床发生过干涉，以及刀具参数是否适宜

等，都可以被观察清楚。

5 后置处理

Mastercam系统中的后置处理模块分为两大类，一类专用，一类通用。专用后置处理模块是将刀位文件通过专用模块转换为各自机床所适用的编码，从而设计成专用的后置处理模块，供特定机床使用。通用型后置处理模块，先读取刀位文件和机床数据文件，然后按照机床数据描述的形式，将刀位文件编译转换成NC码，适用于数控机床。

Mastercam定义刀路后生成的NCI文件是固定的，需要使用不同的后置处理格式文件（*.PST）才能生成最终的NC程序，从而生成不同的NC格式程序代码。软件提供多种后置处理文件，适用于不同的数控系统，如“FAUNC_0IMF_4X_VMC_M.PST”四轴机床，适用于FANUC系统，这些文件的扩展被称为PST，定义了加工参数、NC程序格式、辅助指令和接口功能等^[5]。通过“执行选择的操作进行后处理”操作，系统可自动生成NC程序。

6 VERICUT模拟验证加工

VERICUT软件是CNC数控加工仿真系统，该软件可以模拟数控车床、铣床、加工中心、线切割机床和多轴机床等设备的加工过程，具有真实的3D实体显示效果，允许对切削模型进行尺寸测量，并可保存切削模型以备在检验和之后的工序中使用^[6]。通过软件仿真，可省去试切这种方式，避免浪费时间和成本。

叶片VERICUT模拟验证如图13所示，首先选择数控系统、四轴联动加工中心，设置Mastercam软件编程所用的刀具和毛坯，载入使用Mastercam后置处理生成的NC编码，设置程序零点，检验后置处理生成的NC编码，点击模拟操作，模拟整个加工过程。

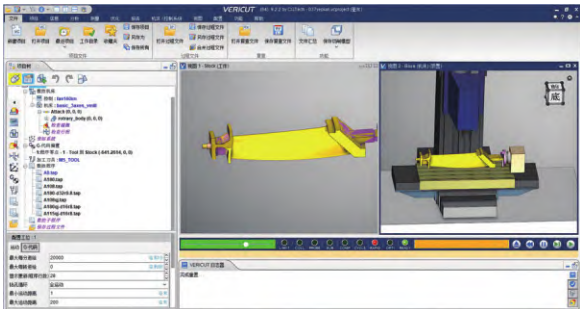


图13 叶片VERICUT模拟验证

7 机床实际加工

叶片型面的程序体积较大，而NC机床的存储空间有限，因此可利用CF卡DNC在线加工功能，将后置处理的NC程序储存在CF卡内，并将叶片装入四轴夹具内，建立工件坐标系，并设定相应的刀具长度，此叶片在机床的实际加工如图14所示。



图14 叶片在机床实际加工

8 结束语

本项目充分展示了四轴联动加工中心和Mastercam在汽轮机叶片加工中的应用，在一次装夹完成叶身型面加工的同时，设备利用率也得到了提高，使得后续打磨工序的工作量明显降低，同时也显著提高了加工质量和生产效率。另外，Mastercam的四轴编程和VERICUT的仿真验证在叶片制造中的应用，可避免试切，使得企业在生产方面的投入大幅下降，而且此方案为仅配备四轴联动加工中心的企业提供了有效的解决方案和参考。

参考文献：

- [1] 高淑娟. 中文版Mastercam 2022数控加工从入门到精通[M]. 北京：机械工业出版社，2022.
- [2] 张新苗. 提高四联动加工中心上叶片加工效率的研究和实现[J]. 科技创新与应用，2015（19）：22-23.
- [3] 刘永刚. MasterCAM在叶片零件四联动数控加工中的应用[J]. CAD/CAM与制造业信息化，2006（1）：64-66.
- [4] 何正琛，位忠生，门正兴，等. 提高叶片四轴联动加工效率的研究[J]. 工具技术，2023，57（6）：107-110.
- [5] 赵熹. 基于Master CAM叶片零件的四联动数控加工[J]. 模具技术，2008（1）：54-57.
- [6] 杨胜群. VERICUT数控加工仿真技术[M]. 2版. 北京：清华大学出版社，2013.