

带冠整体式涡轮盘的 CAD/CAM^{*}

赵万生¹, 吴 湘¹, 詹涵菁¹, 田继安², 陈济轮², 孟凡新²

(1. 哈尔滨工业大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

摘 要: 大推力液体火箭发动机逐渐采用带冠整体涡轮叶盘替代不带冠叶盘, 以提高推重比、可靠性。为了解决带冠整体涡轮盘加工存在的技术难点, 开发了叶盘加工专用 CAD/CAM 软件模块——TBCam, 并以此作为辅助工具, 对某液氢液氧发动机氧泵转子一级叶盘进行了加工实验。实验证明, TBCam 解决了叶盘电火花加工中电极设计、电极加工和叶盘加工轨迹搜索等技术疑难, 显著缩短了加工准备时间, 实现了高精度加工。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 涡轮泵; 带冠涡轮; 电火花加工; 样条函数; 计算机辅助设计

中图分类号: V434.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 04-0380-04

CAD/CAM of rimed blisks

ZHAO Wan-sheng¹, WU Xiang¹, ZHAN Han-jing¹, TIAN Ji-an², CHEN Ji-lun², MENG Fan-xin²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;

2. The Capital Aerospace Machinery Corp., Beijing 100076, China)

Abstract: In order to improve thrust-weight ratio and reliability, rimed turbine blisks tend to replace blisks without rim in large thrust liquid rocket engine. To manufacture rimed blisks, a specific CAD/CAM module——TBCam was developed. An experiment on a rimed turbine blisks of a liquid rocket engine was conducted. It proved that TBCam can be helpful in design and manufacturing electrode, searching trace of manufacturing blisks, and it reduces readiness time remarkably, and realizes high precision processing.

Key words: Liquid propellant rocket engine; Turbine pump; Shrouded turbine; Spark machining; Spline function; Computer aided design

1 引 言

大推力液体火箭发动机的涡轮泵采用带冠整体涡轮转子替代不带冠涡轮, 解决了不带冠涡轮存在的三个问题: (1) 叶片与壳体之间间隙大, 叶轮前后压差较小, 无法平衡几万牛以上的轴向力; (2) 工作介质泄露严重, 工作效率低; (3) 叶片强度低, 高速旋转时转子的可靠性差。因此, 使用带冠涡轮转子的火箭发动机的推重比、可靠性等性能都有提高^[1]。

带冠转子制造难度极大, 直到现在, 制造技术仍未得到彻底突破。其技术难点为: (1) 转子材质为高温合金或超耐热合金等难加工材料(如 Ti 合金、GH4169 等); (2) 结构形状复杂, 加工区域为半封闭结

构、流体通道狭小而弯曲, 叶片轮廓斜率变化大; (3) 叶盆、叶背为自由曲面, 建模难度大; (4) 转子为音叉结构, 通常有两级(或更多)涡轮组成, 各级之间的距离近, 加工时运动空间非常有限; (5) 弯扭叶型的叶片沿叶高方向存在扭曲现象, 不易成型。对于这样型面复杂的零件, 精加工无法用传统的切削加工实现, 只能用特种加工方法, 如电火花加工。前苏联制造能源号的涡轮转子就是用电火花加工^[2]。

为了实施电火花加工, 必须首先设计并加工电极, 然后通过某种算法搜索电火花加工至关重要的电极运动轨迹。所有工作都是建立在涡轮叶盘精确三维造型的基础上。为完成上述复杂的计算、设计过程, 作者对 Solidworks 进行二次开发, 设计了一套叶盘

* 收稿日期: 2002-08-08; 修订日期: 2002-11-25。

作者简介: 赵万生 (1957—), 男, 博士, 教授, 研究领域为现代制造技术。E-mail: zhaows@sparkle.hit.edu.cn

加工专用 CAD/CAM 软件模块——TBCam。

2 带冠整体式涡轮叶盘的造型

2.1 叶型的分类

涡轮叶盘随工况不同而差异很大,叶型千差万别,从叶盆和叶背型面来考察,可分为:直纹叶盘和弯扭叶盘。直纹叶盘沿叶高方向的叶片截面形状相同、位置一致。除直纹叶盘外,其余均称为弯扭叶盘。

2.2 叶型描述的原始数据

无论是直纹叶盘还是弯扭叶盘,都是通过叶型控制点及其连接方式、盘身图纸来描述的。叶型控制点的剖面设置及叶型坐标点的设置参见 HB 5647-98。为了保证流体具有良好的流动特性,设计要求叶片型面各点圆滑过渡。从数学角度来解释,就是叶片型面须满足至少 2 阶导数连续^[3]。

2.3 叶型廓线的三次 B 样条插值密化

设计给定的叶型廓线型值点比较稀疏,为了得到较理想的叶型,在进行叶片造型前应对叶型廓线进行插值密化。插入的密化点也应满足至少 2 阶导数连续,参数化三次 B 样条插值是最佳选择^[4]。

对均匀节点分划 $\Delta: u_i = i (i = 1, 2, \dots, N-1)$ 对应的 3 次均匀 B 样条曲线的分段表达式(第 i 段)展开成矩阵形式为:

$$S_i(u) = \begin{bmatrix} 1 & u & u^2 & u^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/6 & 2/3 & 1/6 & 0 \\ -1/2 & 0 & 1/2 & 0 \\ 1/2 & -1 & 1/2 & 0 \\ -1/6 & 1/2 & -1/2 & 1/6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix}$$

i 为样条分段表达式序号($i = 1, 2, \dots, N-1$); u 为参数样条函数的参数($0 \leq u \leq 1$); V_i 为样条曲线控制点。样条曲线必须满足插值条件:通过所有的叶片截面型值点 x_i , 即 $S_i(0) = x_i, i = 1, 2, \dots, N-1$ 。曲线的封闭性要求 $x_1 = x_N$, 并要求在叶型曲线的任何地方都满足至少 2 阶导数连续,由此可导出 $N+2$ 个方程,方程组的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} 1/6 & 2/3 & 1/6 & & & \\ & 1/6 & 2/3 & 1/6 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & 1/6 & 2/3 & 1/6 \\ & & & & & 1/6 & 2/3 & 1/6 \\ -1/2 & 0 & 1/2 & & & 1/2 & 0 & -1/2 \\ 1 & -2 & 1 & & & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{N-1} \\ V_N \\ V_{N+1} \\ V_{N+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

解上式可得样条控制点 V_i , 代入 $S_i(u)$ 就得到叶片截面上完整、封闭的叶型曲线。

2.4 涡轮转子的三维重构

在得到叶型各截面上足够密化型值点之后,可调 TBCam 的叶盘造型模块进行三维重构。TBCam 首先自动完成各叶型截面的草图添加、绘制,在各截面之间进行放样,重构出三维的叶片;然后对盘身及叶冠进行三维造型;最终将叶片、盘身、叶冠和转子轴组合起来,形成一个三维的整体转子零件。

3 电极的 CAD/CAM

3.1 电极毛坯设计

为简化设计, TBCam 选用长方体作为毛坯形状,具体尺寸由用户根据流体通道情况来确定,但应遵循以下原则: (1) 毛坯应能充满整个流体通道; (2) 留有足够的电极杆装夹位置和定位基准; (3) 电极悬臂尽量小,以减少误差。用户把选好的毛坯尺寸录入到 TBCam, 就可自动生成电极毛坯的三维实体。

3.2 电极造型

叶盘最终采用成形电极进行型面拷贝加工,所以电极必须存在 4 个型面与叶盘流体通道的叶盆、叶背、叶冠和轮毂完全重合。

首先在 Solidworks 中建立一个空的装配图文档,将电极毛坯和叶盘调入,让叶盘的坐标系与装配图坐标系(相当于机床坐标系)重合;调整电极毛坯的位置,使它占据叶盘顶端的整个流体通道(将来叶盘加工的工作通道),通道内不允许存在任何空隙,并且电极安装孔中心与通道重心在 Y 轴上坐标相同,在 X 轴上尽量接近,但应保证电极杆与叶盘不产生干涉。此位置就是 EDM 加工时,电极完全进入到流体通道时的位姿。然后调用 TBCam 的电极 CAD 模块,对电极毛坯进行布尔运算,原理如下:

若点 (x, y, z) 属于实体 P , 则 $P(x, y, z) = 1$; 否则 $P(x, y, z) = 0$ 。根据以上定义,有:

$$P_e = \overline{p_b(x, y, z)}, (x, y, z) \in P_{\text{blank}}$$

其中: P_e 为电极的任意点; P_{blank} 为电极毛坯的任意点; P_b 为叶盘上的点。上式的几何意义是:在电极毛坯区域内的点,如果属于叶盘则不属于电极,如果不属于叶盘则属于电极。

上式运算得到的是电极的中间结果,体现为 Solidworks 的一个零件。用户根据过渡零件的三维图像和实际的工艺条件对过渡零件进行适当的修改。最后,得到型面正确、工艺性好的电极三维实体零件。

3.3 加工电极数控代码的自动生成

为了完成电极零件加工, TBCam 提供了电极加工数控代码自动生成模块, 其目标机床为慢走丝线切割机床(WEDM) 和数控铣削机床(MILLING)。

对于加工直纹叶盘的电极, 可以证明其各个型面均为直纹面, 可用 WEDM 直接终加工成型, 只需提供 WEDM 的数控代码和相关的工艺文档。

加工弯扭叶盘的电极, 对应于叶盆和叶背的型面均非直纹面, 无法通过 WEDM 直接终加工成型。因此, 需要提供 WEDM 的数控代码用于电极预成型和直纹型面的终加工成型; 还需要提供多轴数控铣削的数控代码, 用于终加工成型对应与叶盆、叶背的型面。

自动生成的数控代码经过后置处理, 变换成针对特定机床的数控程序, 就可拷贝到机床上加工。

4 涡轮叶盘加工轨迹的搜索

为了控制电极完成流体通道各型面的拷贝加工, 必须计算出一条正确、合理的电极运动轨迹, 保证整个加工过程中电极和叶盘不发生干涉现象。由于电极和流体通道均为自由曲面, 加工轨迹无法通过简单的几何运算来确定, 需要专用的 CAM 软件来搜索计算。TBCam 提供了较完善的加工轨迹搜索模块, 其中包括两种搜索模式: 自动模式和人工模式。

4.1 轨迹搜索的基本思想

TBCam 采用反向搜索的思想: 以电极完全进入到流体通道的最终位姿为起点, 搜索能把电极无干涉地运动到叶盘区域外的轨迹, 就是需要的正确轨迹。

4.2 轨迹搜索的过程

轨迹搜索的过程包括以下顺序完成的步骤。

(1) 设定目标机床的轴数、传动链等结构信息。搜索过程中, 电极与叶盘的运动和机床上实际加工时的运动完全相同。

(2) 设置电极的起始位姿, 即电极造型时所处的位姿。必须保证电极完全处于流体通道里, 并且电极与叶盘之间不存在干涉现象。

(3) 设定搜索参数。为了控制搜索过程顺利进行, 必须正确选择一系列相关参数, 其中包括: 搜索步长、搜索方式(联动或逐轴)、回退算法和终止条件等。另外, 对于人工模式需指定各轴的搜索次序; 对于自动模式需指定各轴的搜索优先级。

(4) 启动搜索。搜索启动后, 电极相对于叶盘以设定的步长运动, 每改变一次位姿, 做一次干涉检查, 然后根据路径规划算法确定下一步移动的方向。整

个搜索过程均在 Solidworks 环境下完成, 用户可从显示屏上观察到搜索过程中电极和叶盘的三维位置情况, 有利于用户对搜索进程的了解, 也是进行人工干预的依据之一。

手动模式下, 按指定的搜索次序在各轴上移(转)动电极, 如发现干涉, 则按选定的算法回退; 接着改变移动方向, 重复上述过程。用户可随时暂停搜索进程, 根据电极和叶盘的三维视觉情况修改相关参数, 然后从断点开始继续搜索。既发挥了计算机运算精确、快速的特长, 又充分融入了人的综合判断的能力, 使搜索进程迅速向有利的方向发展。

自动模式下, 电极运动完全由路径规划算法控制。路径规划算法中定义了“接近系数”的概念, 它体现了电极与叶盘的接近程度。规划算法搜索一条接近系数最小的路径作为电极的运动轨迹, 即运动过程中保持电极的位姿始终处于流体通道的中心。自动搜索无需用户干预, 可自动找到一条正确的可行路径; 当然, 用户也可随时暂停搜索, 修改相关参数, 然后从断点接着继续搜索。由于路径规划算法需要进行大量的运算, 所以自动模式耗时长、效率低, 只适合于叶片型面极度复杂, 人无法正确判断的场合。

(5) 代码的后置处理。轨迹搜索完毕, 调用 EDM 后置处理模块, 选择目标机床, 将自动整理 G 代码和辅助代码, 生成适合目标机床运行的数控程序。

4.3 加工代码仿真

为验证将要在机床上运行的数控程序(通过 TBCam 生成, 或者手工编写), TBCam 提供了加工代码仿真模块。

仿真前需要设定的参数包括: 数控代码的文件名、目标机床型号、插补精度、是否进行干涉检查等。仿真模块首先读入数控代码, 然后进行词法分析、语法检查、语义分析, 最后由插补执行模块控制电极和叶盘逐行完成数控代码描述的运动, 同时根据用户的要求进行干涉检查, 如出现干涉现象就终止仿真, 报告发生干涉的代码、当前坐标及干涉部位。整个仿真过程均在图形环境下实现, 用户可实时地变换不同的视角, 清楚地观察到电极和叶盘的位置关系, 更深入地了解将要进行的实际加工。

5 加工实验

在 TBCam 软件模块的辅助下, 对某液氢液氧火箭发动机的氧泵转子一级带冠叶盘(以下简称一级叶盘)进行了加工实验, 实验过程如图 1。

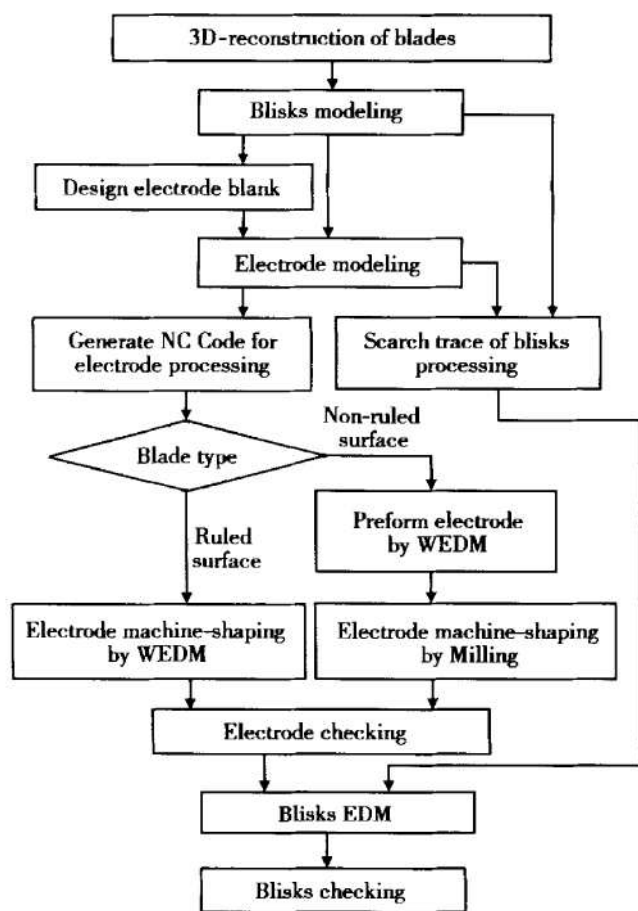


Fig. 1 Flowchart of experiment on manufacturing blisks

一级叶盘是直纹叶盘, 叶片数较多, 轮毂半径较小, 叶片稠度大, 弯曲严重, 叶片相互遮蔽, 流体通道最窄处只有 1.7mm 左右, 加工工艺性很差, 加工难度极大。

5.1 电极的加工

在 TBCam 的辅助下, 经分析每个通道最少要用四个电极才能完成加工。电极在 Sodick A500W 线切割机床上加工, 工艺过程如下: (1) 切割长方体毛坯; (2) 在毛坯上钻安装孔的预孔; (3) 以毛坯底面为基准, 切割对应于轮毂和叶冠的型面; (4) 以毛坯侧面为基准, 一次装夹切割安装孔、定位基准面和对应于叶盆、叶背的型面。合理的工艺方案和高精度的机床保证了电极的型面精度控制在 0.01mm 以内。

5.2 叶盘的加工

在 Solidworks 环境下通过 TBCam 搜索确定可行的加工轨迹, 经后置处理生成完整的数控代码。一级叶盘采用 5 轴联动电火花加工机床加工。工艺过程如

下: (1) 安装调整电极杆, 要求工作部位径向跳动小于 0.002mm。 (2) 安装调整电极, 要求电极基准面在 X 方向和 Z 方向上小于 0.004/20mm。 (3) 安装调整叶盘毛坯, 要求在叶冠处径向跳动小于 0.01mm, 端面跳动小于 0.01mm。 (4) 设定电极的初始位姿, 要求与数控程序的起点完全吻合。 (5) 加工分粗、精两道工序, 粗加工选用无损耗电极, 加工 4 个通道后换电极; 精加工选用较小的电极, 加工 8 个通道后换电极。叶盘加工后, 经初步检验基本符合设计要求。

6 结 论

本文详细介绍了在 Solidworks 环境中二次开发的叶盘加工专用 CAD/CAM 模块——TBCam, 并以此作为辅助工具, 对典型零件(某液氢液氧发动机氧泵转子一级叶盘)进行了加工实验, 结果符合图纸要求。

TBCam 继承了 Solidworks 直观、友好的界面风格, 所有工作都建立在三维实体造型基础上, 真正反映了电极和叶盘之间的空间位置关系, 用户可变换视角观察; 能自动进行电极造型, 自动选择电极的加工方案并生成相应的数控代码, 叶盘加工轨迹搜索以直观、快捷的方式自动生成数控代码; 显著地缩短了加工准备的时间(可在一天之内完成), 解决了国内带冠叶盘加工困难的问题。

TBCam 操作简便, 与生产实际非常接近, 易于理解, 对工艺人员要求低(无需了解算法知识), 是工厂生产迫切需要的一套无缝的 CAD/CAM 软件。

参考文献:

- [1] 顾明初. 加快大推力氢氧发动机研制 迎接 21 世纪[J]. 导弹与航天运载技术, 2000(1).
- [2] 田继安. 双级带冠叶片涡轮转子的电火花加工工艺[A]. 北京: 2001 年中国机械工程学会年会论文集[C]. 2001.
- [3] 詹涵菁. 带冠扭叶片涡轮叶 CAD/CAM 与加工仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [4] 朱心雄, 王拉柱, 朱本富, 等. 自由曲面曲线造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

(编辑 梅 瑛)