

整体叶轮电火花加工技术研究*

Study on Electrical Discharge Machining Technology of Integral Impeller

北京市电加工研究所 杨大勇 李艳 杨立光 任连生 王淑凤 伏金娟 刘建勇
清华大学精密仪器与机械学系 李勇



杨大勇

研究员,清华大学博士后,北京市电加工研究所所长,北京市优秀共产党员,享受政府特殊津贴。入选北京市“新世纪百千万人才工程”,承担了国家科技重大专项2项和国家863重点计划1项。主持开发了五轴联动数控电火花加工机床系列产品,拥有发明专利2项,获2011年“中国机械工业科学技术奖一等奖”。主持开发了多种难加工材料复杂曲面零件五轴联动精密电火花加工工艺。

整体叶轮叶片型面复杂,机械加工空间有限,加工精度要求高,动力学性能要求良好,已成为当前机械制造领域的难点之一。目前,数控铣削、

整体叶轮因其材料难于切削、叶片型面复杂等因素,其加工一直都是机械制造业的难题。本文针对叶片的结构特点,结合复杂曲面造型理论,利用 SolidWorks 软件进行了整体叶轮造型研究。针对分体电极容易形成搭接台阶、叶片成形精度低的缺点,设计了适合整体叶轮加工的整体式电极,该电极具有叶片型面成形精度高、能源消耗低的优点。

精密铸造在整体叶轮加工中得到较多的应用。但是,数控铣削对难切削材料、小通道叶片进行加工时,由于受刀具刚性限制很难加工;精密铸造生产过程复杂,技术难度大,废品率高,只适用于可铸合金。电火花加工利用放电产生的瞬时高温,将与电极相对的工件表面熔化,逐渐蚀除材料,达到加工的目的。因而,电火花加工在无切削力、不受工件硬度限制方面有着其他加工方法所无法比拟的优势^[1-3]。

电火花加工整体叶轮所采用的电极可设计成分体形式和整体形式,电极形式直接影响着被加工零件的精度。分体电极加工容易在叶片型面上形成搭接台阶,使叶片型面产生轮廓度误差,从而影响整体叶轮的成形精度。本文充分利用 SolidWorks 软件强大的三维造型功能建立了整体叶轮的三维模型,结合整体叶轮的

结构特点设计了整体式电极;针对工件和电极安装形式的不同讨论了两种加工方案;为了避免电极加工过程中干涉问题的出现,对电极运动进行了模拟,并进行了干涉检查;最后对成形电极的制造工艺进行了研究。

整体叶轮造型

整体叶轮由轮毂和沿周向均布的叶片所组成。叶片造型是整体叶轮造型的关键,通常叶片的型面数据是依据非定常三维黏性流体模型进行复杂的数值计算,并经试验修正后得到的,一般无法用解析式表达,而是通过给定叶片若干截面型值点来描述的。叶片三维造型的基本方法是:点→线→面,由离散的数据点生成截面曲线,由截面曲线按一定规则生成曲面。SolidWorks 采用 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 方

* 国家科技重大专项课题(2009ZX04003-022),北京市博士后工作经费(2011ZZ-56)资助。

法进行曲面造型^[4]。NURBS实现了二次解析几何和自由曲线曲面的统一,通过局部改变控制点或权因子即可以调整局部的曲线曲面形状,而不影响其他部分,具有良好的几何性质^[5]。

定义 k 次NURBS曲线的表达式:

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}, \quad (1)$$

其中, ω_i ($i=0,1,\dots,n$)为与控制点相联系的权因子; $N_{i,k}(u)$ 是由节点矢量 $U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ 按德布尔——考克斯递推公式决定的 k 次B样条基函数。在实际应用中,为了使样条首末端点与控制顶点重合,常取两端节点矢量 $u_0=u_1=\dots=u_k=0$, $u_{n+1}=u_{n+2}=\dots=u_{n+k+1}=1$,且曲线定义域 $u \in [0, 1]$ 。

$k \times l$ 次NURBS曲面的有理分式表示为:

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}, \quad (2)$$

其中,控制顶点 $d_{i,j}$, $i=0,1,\dots,m$; $j=0,1,\dots,n$ 呈矩形阵列,形成一个控制网格; $\omega_{i,j}$ 为与顶点 $d_{i,j}$ 相联系的权因子; $N_{i,k}(u)$, $i=0,1,\dots,m$ 和 $N_{j,l}(v)$, $j=0,1,\dots,n$ 分别为 u 向 k 次和 v 向 l 次的B样条基函数。

结合NURBS函数的特点,叶片造型时由已知型值点反算控制点,再用参数方法进行曲线和曲面造型。因为由叶片截面数据所生成的叶根为平面,而叶根与轮毂外表面相交的部分为圆柱面,为了将叶根和轮毂衔接起来,人为添加与叶根截面曲线相同的截面曲线,使叶片沿叶高方向变长。然后将叶片与轮毂合并,并将叶片进行圆周阵列,形成整体叶轮,如图1所示。

成形电极设计

电火花加工整体叶轮通常采用铣削法和成形拷贝法。电火花铣削

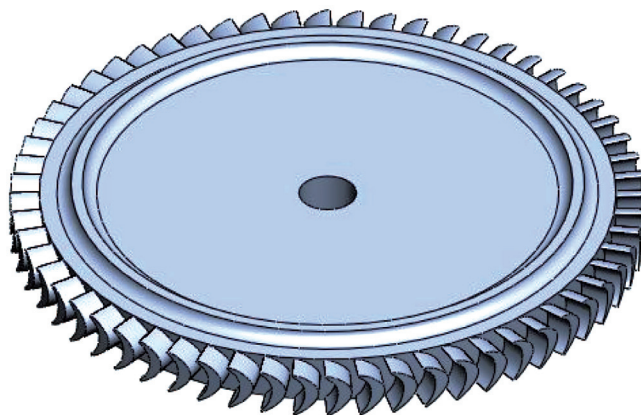


图1 整体叶轮

法一般采用球电极或者圆片电极,优点是电极制造简单,缺点是叶片成形精度低,电极损耗快。成形拷贝法采用与叶片型面完全贴合的成形电极进行拷贝加工,叶片成形精度较高,是加工整体叶轮的有效方法。采用成形拷贝法加工时电极的设计原则是:(1)所设计的电极型面要与叶片型面、轮毂外圆面相一致;(2)所设计的电极要充分考虑到放电间隙的影响,对电极型面进行相应的偏移处理;(3)所设计的电极要能够无过切地由加工初始位置运动到加工终止位置;(4)所设计的电极要有利于提高加工效率,减少能源消耗;(5)电极设计时要充分考虑到安装和找正的方便。

电极进给方向是电极设计时需要考虑的重要因素,结合整体叶轮的特点,选用叶片造型时所使用的叶轮径向作为加工时电极的进给方向。现有的技术是对电极加工部分进行适当剖分,采用分体电极加工整体叶轮(见图2)。但是,当电极从涡轮盘的两侧进行加工时,容易在叶片型面的重合处形成搭接台阶,从而影响叶片的成形精度。而采用整体电极加工整体叶轮(见图3),可有效避免搭接台阶,提高加工效率。由于电火花加工是一种非接触式加工,工具电极和工件之间存在一定的放电间隙 $\delta^{[6]}$,在设计电极时需要将电极型面进

行偏移处理,使电极型面和整体叶轮型面之间存在放电间隙。综合考虑电极的型面精度、安装及找正的方便性,设计电极如图4所示。

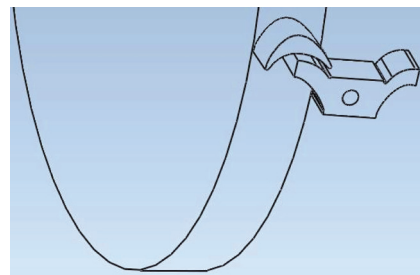


图2 分体电极加工

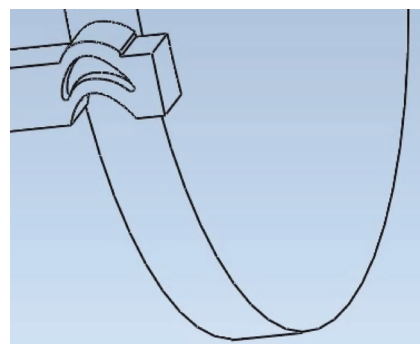


图3 整体电极加工

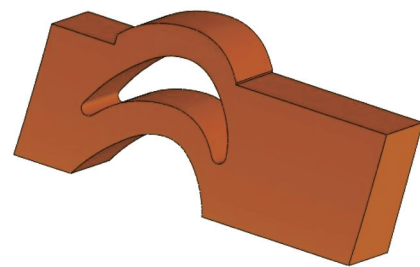


图4 电极模型

加工方案选择

应用 N850 型五轴联动精密数控电火花成形机床(见图 5)对整体叶轮进行加工,该机床具有 X 、 Y 、 Z 3 个直线运动轴, A 轴(W 轴)和 C 轴(U 轴)两个分度旋转轴。

电火花加工时,电极首先沿整体叶轮径向进给拷贝出单个叶片,然后,电极或者整体叶轮分度旋转,拷贝下一个叶片。根据分度旋转形式的不同设计了两种加工方案:第一种是电极直线进给加工完成一个叶片后, A 轴转台带动整体叶轮旋转进入下一个叶片的加工过程(见图 6);第二种是整体叶轮固定不动,电极直线进给加工完成一个叶片后,利用 C 轴带动电极旋转,进入下一个叶片的加工过程(见图 7)。虽然两种加工方案均能完成叶片及轮毂外圆的拷贝工作,但是采用第一种加工方案时,整体叶轮安装和找正比较困难,而且数控转台主轴上施加的负载将使主轴产生一定变形,从而影响定位精度;而采用第二种加工方案时,不需要借助于专门的数控转台旋转叶轮,从而避免了整体叶轮自身重力对转台造成的偏转影响。综合考虑以上因素,优先选择第二种加工方案。

电极运动模拟

在进行电火花加工试验之前,需要进行电极运动模拟,以预知实际加工中可能出现的问题,减少整体叶轮报废的几率。根据所设计的电极运动轨迹,利用 SolidWorks 动画运动算例模块设置线性马达和旋转马达,驱动电极运动,进行加工仿真。通过观察单个叶片加工时电极由初始位置(见图 8)运动到终止位置(见图 9)的整个运动过程,可以及时发现电极和整体叶轮的干涉情况。如果发生干涉,则需要重新设置电极的运动轨迹或者重新设计电极,直至仿真过程中电极和整体叶轮不发生干涉为止。



图5 N850电火花机床

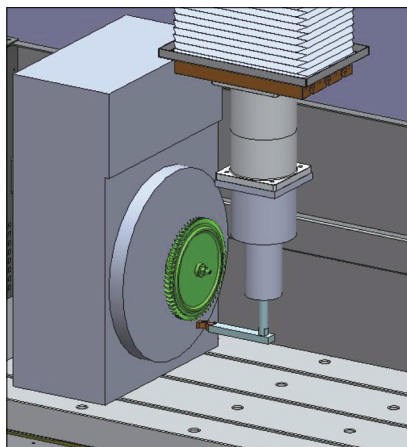


图6 A轴转台带动整体叶轮旋转

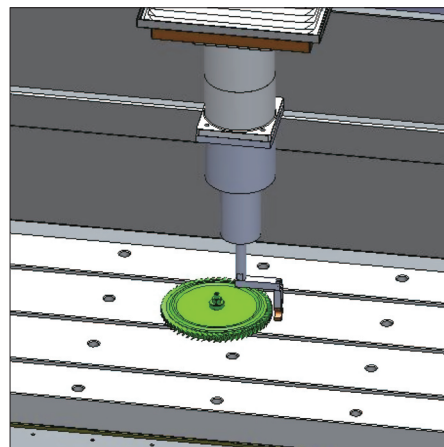


图7 C轴带动电极旋转

成形电极制造

成形电极的制造方法主要有以下几种:机械加工法、精密铸造法、粉末冶金成形法和电火花线切割法。机械加工法的优点是通过机械铣削完成电极的加工,可加工复杂形状的电极,缺点是周期长、成本高;精密铸造法虽然节省材料,但是工艺成本高;粉末冶金成形法虽然周期短,但是电极电火花加工性能低;电火花线切割利用脉冲火花放电产生局部瞬间高温蚀除材料,电极和工件属于非接触式加工,几乎没有宏观作用

力,加工出来的电极精度高。整体叶轮材料采用高温合金,综合考虑电极损耗、加工稳定性和加工速度,选用紫铜作为电极材料。由于采用机械加工法应力较大,电极容易产生变形,本文选用应力小而精度高的电火花线切割方法。电极线切割加工示意图如图 10 所示。

采用慢走丝线切割机床完成电极加工的所有工序。为了提高电极的制造效率,节约电极材料,可一次加工多个电极,根据电极的形状对电极进行排列组合。首先,采用慢走丝线切割机床把电极毛坯切割成图 10

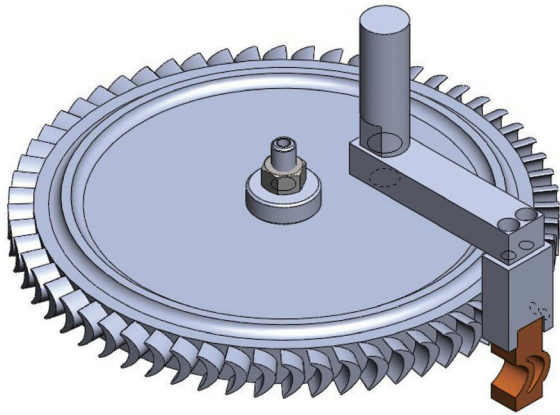


图8 电极进给运动初始位置

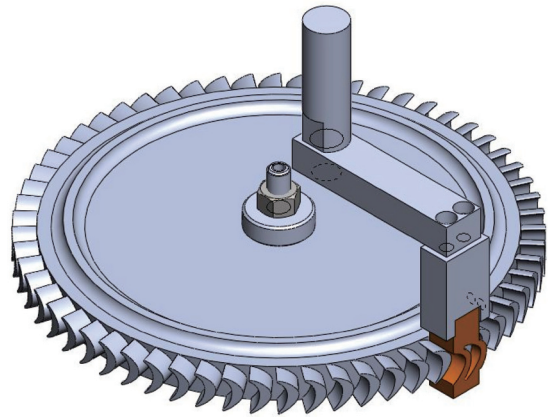


图9 电极进给运动终止位置

所示的长方体形状,完成各定位基准面的加工。其次,加工穿丝孔。后续慢走丝切割电极之前,需要在电极内孔的中间位置加工穿丝孔。然后,按图 10 所示安装电极毛坯,毛坯长度方向与 X 轴平行,宽度方向与 Y 轴

可以采用三坐标测量机或者专门的复杂型面精度检测设备进行检测,也可以利用电火花加工机床的接触感知功能对电极型面精度进行检测。经精度检验合格后的电极尽可能采用专用装置进行保存,以防止电极转

度高、能源消耗低的优点。通过对 A 轴转台带动整体叶轮旋转和 C 轴带动电极旋转两种不同的加工方案进行比较分析,得出优先选择 C 轴带动电极旋转加工方案的结论。通过电极运动模拟,验证了既定运动轨迹的正确性,从而避免了加工过程中电极将整体叶轮过切即干涉情况的发生。最后,介绍了慢走丝线切割电极的加工方法,采用电极成组制造的方法节约了电极材料,提高了电极的制造效率。

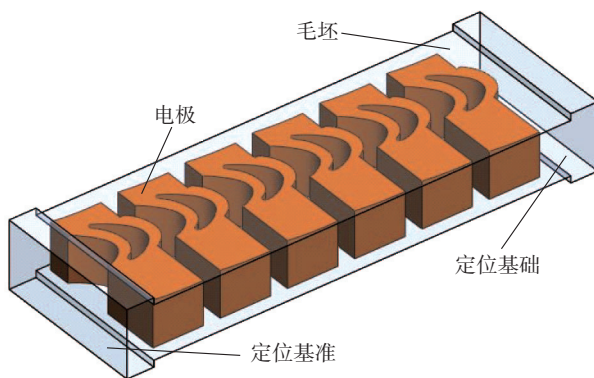


图10 电极线切割加工示意图

平行,完成电极型面加工。最后,将毛坯绕 X 轴旋转 90°,定位找正,切割轮毂外圆面和电极定位基准面,完成电极加工。

电极型面加工中采用“割一修三”的加工工艺,即线切割三次完成需要加工的型面,第一次线切割去除大部分的余量,第二次线切割去除十几 μm 的余量,第三次进行光整加工,去除几个 μm 的余量,获得良好的表面质量。电极的制造精度直接影响到整体叶轮的成形精度,因此,在电极加工完成后,应对关键尺寸进行检测。对于电极型面的精度测量,

移过程中及存放过程中的变形问题,并且做到电极轻拿轻放,保证电极的精度稳定性。

结束语

整体叶轮因其材料难于切削、叶片型面复杂等因素,其加工一直都是机械制造业的难题。本文针对叶片的结构特点,结合复杂曲面造型理论,利用 SolidWorks 软件进行了整体叶轮造型研究。针对分体电极容易形成搭接台阶、叶片成形精度低的缺点,设计了适合整体叶轮加工的整体式电极,该电极具有叶片型面成形精

参考文献

- [1] 杨大勇,伏金娟.电火花成形加工技术及其发展动向.航空制造技术,2010(5):43-46.
- [2] Izquierdo B, S  nchez J A, Plaza S, et al. On the characterization of the heat input for thermal modeling of the EDM process. Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining, Shanghai, China, 2010: 27-32.
- [3] Abbas N M, Solomon D G, Bahari Md F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7-8): 1214-1228.
- [4] 胡仁喜,郭军,王仁广. Solidworks 2005 中文版机械设计高级应用实例.北京:机械工业出版社,2005.
- [5] 朱心雄.自由曲线曲面造型技术.北京:科学出版社,2000.
- [6] 曹凤国.电火花加工技术.北京:化学工业出版社,2005.

(责编 小城 亦非)