

离心压缩机三元叶轮铣削加工技术新路径

■ 沈阳鼓风机集团工艺部编程室副主任 雍建华

摘要：离心压缩机用三元叶轮一般都采用不锈钢等难加工材料，所以其加工效率不高且加工相对困难。本文详细介绍了整个离心压缩机用三元叶轮的铣制加工工艺及编程方法，具有国家发明专利的“3+2直线轴高速铣”加工方法将传统方法的加工效率提高了1倍左右，而且可以减小设备主轴所承受的切削力，延长设备使用寿命并可有效地降低刀具使用成本，为不锈钢三元叶轮的加工开辟了一个全新的思路。



离心压缩机用三元叶轮特点

被誉为“国家砝码”的沈鼓集团已具备百万吨乙烯压缩机组、千万吨炼油装置、10万空

分、大型PTA、大型LNG、大型长输管线压缩机、150t大推力往复压缩机，以及AP1000核主泵、核二级泵、核三级泵和国防海军装备用泵等重大技术装备研发

制造能力，大型离心压缩机总体设计制造技术已达到国际先进水平。

离心压缩机作为一种工业装备现已广泛应用于石油石化、天然气输送、金属冶炼等与国民经济息息相关的重要领域。作为离心压缩机的核心部件，三元叶轮的加工质量直接影响到离心压缩机的性能和效率。

作为沈鼓集团主要产品的离心式压缩机是透平压缩机的一种，主要靠叶轮旋转使气体介质获得一定的动能，气体介质在扩压器和隔板的作用下将原动机的机械能转化成气体的动能，并使气体压力升高。一般离心式

气轮机气动性能与效率功能实现的直接作用部件，其非常大地决定了发动机和燃气轮机的功能性，多年来其材料技术、结构技术改变从来没有停止过。伴随着零件材料与结构的创新性发展，其制造技术也呈现了多学科与多个领域的技术复合，其中包含着

成型的实现，也包含加工效率、成本等综合效益方面的需求，无论哪一个方面技术的突破，都能够推动产品专业的进步，进而极大地影响发动机和燃气轮机整体制造技术的进步。我们相信，只要发动机和燃气轮机原理功能不发生变化，叶片与叶轮制造技术

的发展与进步则仍然不会停止，进而继续极大地影响发动机和燃气轮机技术的发展与进步。

参考文献：

[1] 刘艳，等. 叶片制造技术[M]. 北京：科学出版社，2002.

MW (收稿日期：20170620)

压缩机都用于工作介质流量比较大的工况，例如合成乙烯、甲醇尿素、天然气输送以及石油精炼等能源化工行业。由于离心式压缩机需要长时间连续工作，所以其设计、制造的技术要求相对较高，尤其作为离心压缩机核心部件的三元叶轮，它的加工精度及加工质量直接影响整套机组的性能，所以三元叶轮被形象地称作离心压缩机的“心脏”，那么如何能够在短周期内制造出精度更高且制造成本更低的三元叶轮是亟待我们工程技术人员研究和解决的一道难题。

加工三元叶轮常用的五轴加工设备及CAM软件

随着计算机行业的不断发展，CAD/CAM技术也有了大幅提高，一些计算机辅助设计制造软件如SIEMENS NX、Hypermill、Powermill、Mastercam等主流CAD/CAM软件都在不断推陈出新，数控加工中心也正朝着高速度、高精度的趋势发展，这样也就给三元叶轮制造技术带来了新的技术方向。三元叶轮的加工制造技术在近10

年有了飞跃式的进步，传统的叶轮是采用铸造方法，形成叶轮毛坯，然后进行半精车加工，再进行铣制加工，形成叶轮。铸造的叶轮的优点是铸造成本低，加工周期短，但是也会有强度较低、加工精度无法满足设计要求等劣势。

为了满足大型石油石化、大空分、长输管线等工况的应用要求，我集团三元叶轮的设计朝着高强度和高线速度方向发展，目前我集团的三元叶轮主要采用三件焊接、锻件铣制焊接和整体铣制三种制造方法。铣制叶轮主要采用不锈钢锻件毛坯，在毛坯车削完成之后，通过综合应用美国NREC公司开发的MAX-PAC软件以及德国OPENMIND公司的Hypermill软件来完成三元叶轮的造型及铣制刀具路径规划，再利用五轴联动加工中心进行铣制。为了能够满足各类三元叶轮的最优化工艺铣制加工，已配备了现在世界上主流应用的各种结构形式的五坐标加工中心，如瑞士STARRAG公司的叶轮专用五坐标加工中心（见图1）、意大利PAMA公司的立式装夹五坐标加

工中心以及德国DMG公司的龙门式五坐标加工中心等。

三元叶轮的铣削加工方法按照工艺方法主要分为流道粗加工、圆头精加工、叶片精加工和轮毂精加工。叶片的精加工主要有侧刃接触加工法和点接触加工法：侧刃铣加工主要是加工直纹面三元叶轮，利用刀具的侧刃进行铣削，用成型的方法加工出三元叶轮的叶片；点接触加工法主要用于自由曲面的叶轮，生成的叶轮加工轨迹主要是沿着叶片的流线方向走刀，分层行切加工三元叶片曲面（见图2）。国内外一些学者和科研人员对采用不同刀具进行侧铣加工也在不断探索，针对轨迹的优化问题提出了一系列优化算法，例如空间填充曲线算法、构造空间探索算法、主轴算法、网格生成算法和多点加工算法等。

三元叶轮“3+2”高速铣削工艺方案

在三元叶轮加工刀具方面，我集团现已基本完成了由传统高速钢铣削技术向硬质合金铣削技术过渡，高速钢刀具的缺点是线速度低、刚性差、耐热性差，加工时的每齿进给量小，容易振动并产生过切，但是相对价格比较便宜，刀具的韧性好，不易断裂。在粗加工时，主要采用高速钢刀具进行五轴联动的方法开



图1 STARRAG五坐标加工中心

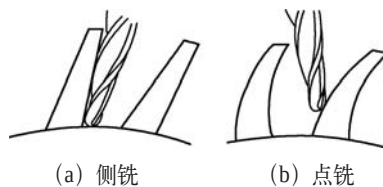


图 2

粗。通过与欧美等先进生产企业进行技术交流，并针对我集团现有三元叶轮结构的深入研究，我们研制了“3+2直线轴”高速铣削加工三元叶轮的工艺方法，并申请了国家发明专利。

该工艺方案在加工大直径三元叶轮时现采用可转位的硬质合金镶齿刀具，这种刀具使用硬质合金材料，可以使用比高速钢刀具大很多的线速度和每齿进给量，而且这种刀具的刚性很好，加工过程中不易产生过切，而且加工效率可以大幅度地提高。在加工过程中，我们引入了模具加工的定轴开粗的思想，这一方法可以提高五轴设备的精度，进而实现了高速铣削加工，实现了高速度、高精度的叶轮加工。

传统方法加工三元叶轮在粗加工的时候利用的是高速钢刀具五轴联动加工，这种加工工艺是利用刀具进行大切深、小进给的方式进行切削，产生的切削力比较大，刀具容易变形，刀具进给非常小，金属去除效率低，而且会损伤机床的主轴。

高速铣加工方法是指利用整

体硬质合金刀具代替传统的高速钢刀具，利用小切深、大进给的加工方式进行切削，这样在提高加工效率的同时，也可以减小机床主轴所受的切削力，既保护了设备，又使三元叶轮的加工效率得到了跨越性的提高。

以直径为1 400mm的不锈钢三元叶轮为例，在利用Hypermill软件编程时，选用硬质合金机夹式刀片（见图3），刀具的线速度可达到130m/s左右，刀具的每齿进给量可以达到0.2~0.3mm/z，而传统的高速钢刀具的线速度只能达到10m左右，刀具的每齿进给量最大可以达到0.1mm/z。

本文所提到的高速铣加工是使用“3+2”方法的高速铣加工，就是先将机床的2个旋转轴摆好一个角度后将旋转轴锁死，然后只利用3个直线轴的移动进行加工。将旋转轴锁死后，机床的刚性得到了很大的提高，所以在加工时可以使用更大的刀具和更大的进给速度，进而提高三元叶轮的粗加工效率。

利用Hypermill软件编程加工三元叶轮时，首先需要将已经做

好的三元叶轮的“.IGS模型”导入到软件中，由于三元叶轮在开粗时主要是去掉2个叶片间的大面积余量，所以采用高速铣方法一层一层地去除。在导入叶轮的三维模型之后则需要定义1把加工时使用的刀具（见图4）。

由于“3+2”高速铣方法是一种固定刀轴矢量的加工方法，那么在定义好所用的刀具之后就需要根据加工经验选择一个适合的刀轴矢量。一般选择的原则是要方便刀具进刀，并且可以大面积地去除加工余量，这样做的益处是可以尽量控制选择刀轴数量的次数，提高编程和加工的效率。在选择刀具矢量后需要定义切削范围、每层切深及安全平面等加工参数，之后就可以计算刀具轨迹了（见图5）。

Hypermill软件提供了一个用于软件内部模拟的模块（见图6），在该模块中我们在定义了加工时使用的机床后，可以模拟出加工时机床和工件以及刀具的相对位置情况，使编程者可以通过实际加工情况调整刀轴角度等相关参数。

在软件内部仿真无误的情况下，即可通过软件的后置处理器



图3 机夹式硬质合金铣刀

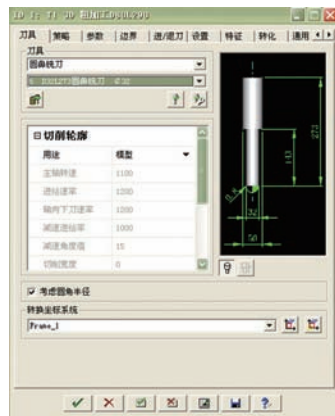


图4 Hypermill中定义的刀具

根据指定的设备输出相应的加工程序。

同样以上述直径为1 400mm的不锈钢三元叶轮为例,在粗加工时使用“3+2轴高速铣”方法配以硬质合金刀具,在精加工叶片和精加工轮毂时利用MAX-5软件编写五轴联动加工程序,可以将原20h/天×45天=900h的加工周

期缩短为20h/天×25天=500h,几乎使加工效率提高至原来的2倍。

为了适应不同类型三元叶轮的加工制造要求,我集团也会根据叶轮的结构选择不同的三元叶轮的铣制方法,除了上述的将叶片铣制在叶轮轴盘的结构,还可以将三元叶轮的叶片铣制在盖盘上(见图7),对于有特殊性能和

工况要求的机组,还会选择三元叶轮的整体铣制加工。

结语

近些年,我国多轴数控加工技术不断发展,但是与欧洲、美国和日本等国家和地区的先进制造技术相比还有一定差距,作为从事三元叶轮数控编程工作的工程技术人员,我们还会在三元叶轮的插铣加工及摆线铣削方向上不断钻研进取,争取使我国在该领域早日赶超国际先进水平。

参考文献:

- [1] 全荣. 五坐标联动数控技术[M]. 湖南: 湖南科学技术出版社, 2002.
- [2] 王喆, 杨青, 查建宁. 基于八叉树的三维干涉检验系统[J]. 机械设计, 2002 (12): 26-27.
- [3] 王爱玲, 沈兴全. 现代数控编程技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 梁钺. 五轴联动数控机床技术现状与发展趋势[J]. 机械制造, 2010 (1): 5-7.
- [5] YANG Yuan. Thermal error mode analysis and robust modeling for error compensation on a CNC turning center[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39 (9): 1367-1381.
- [6] 刘雄伟, 等. 数控加工理论与编程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 方向, 彭群生. 多轴数控加工中刀具包络面的计算[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12 (08): 609-613.

MW (收稿日期: 20170620)

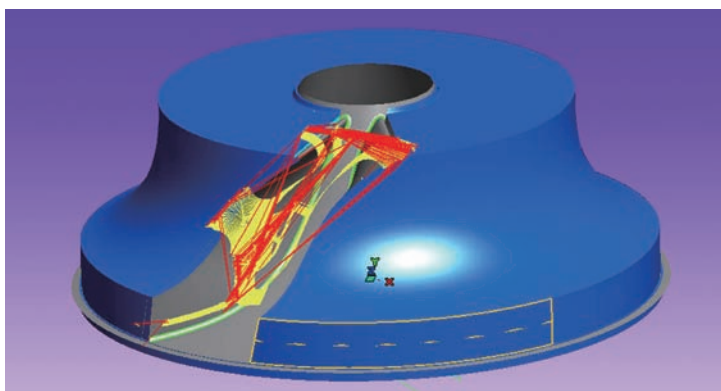


图5 计算生成的刀具轨迹

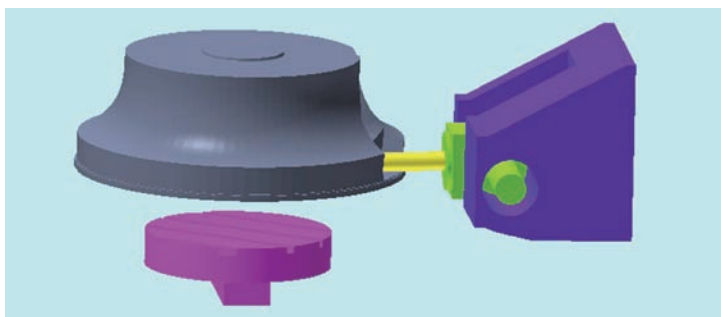


图6 Hypermill软件的仿真功能



图7 叶片铣制在盖盘上的三元叶轮