实现更高效的数控加工


刘仁春

提升数控机床复杂曲面零件加工效率

中航工业空空导弹研究院凯迈机电公司
（河南洛阳　471003）　刘仁春　袁维涛

对于复杂零件的加工表面，粗加工的主要目的是切除大量的加工材料；半精加工指粗加工切削之后，到精加工切削余量之前的切削，主要是切除粗加工留下的不均匀的材料余量；精加工主要是保证零件的最终尺寸，切除半精加工留下的基本均匀的极少的余量。本文从加工工艺方案、刀具控制、走刀路线和进给速度的自动优化、高速切削以及自适应控制、加工机床、数控程序编制、加工过程的仿真等方面研究复杂曲面的加工优化方法，主要有以下几个方面。

1. 复杂曲面加工方法

（1）宽行加工方法　依据宏域曲率吻合的原则，利用公差带原理，采用圆环刀宽行线接触加工代替球头刀窄行点接触加工，实现复杂曲面数控加工优化。

（2）侧铣加工代替点加工　点铣的问题在于消耗的时间多，加工后表面会留下带有刻痕的扇贝面，需要再投入很多时间进行抛光，才能提高加工质量。据统计，这种加工方法的手工加工时间占到总加工时间的40%～50%导致成本大幅度增加。

侧铣可以认为是宽行加工的特例。与点铣相比，侧铣有很多优点，如节省加工时间，降低成本，加工表面质量好等。但侧铣有一定的局限，加工表面为直纹面。

（3）插铣加工法　插铣加工是复杂曲面金属曲面切削实现高切除率的有效方法之一。对难加工材料的曲面加工、切槽加工以及刀具悬伸长度较大的加工，插铣法的加工效率远远高于常规的铣削方法。在需要快速切除大量金属材料时，采用插铣加工时间大幅缩短。此外，插铣加工还具有以下优点：①侧向力小，减小了零件的变形。②加工中作用于铣床的径向切削力较低，使主轴刚度不高的机床仍可使用而不影响工件的加工质量。③刀具悬伸长度较大，适合工件深槽的加工，也适合于对高温合金等难切削的材料进行切槽加工。

插铣法最大的特点是非常适合粗加工，特别是适合于有复杂几何形状航空零件（叶轮）的粗加工，可以从顶部一直铣削到根部，铣削深度可达250mm而不会发生振颤或扭曲变形，加工效率高，是粗加工复杂曲面航空零件的优选方法之一。

（4）刀路轨迹优化　复杂曲面加工的刀路轨迹设计非常重要，对于圆柱端面凸轮的几何形状，采用多层加工方法，对于余量较大的区域进行局部加工，完成了对复杂曲面凹槽加工的预先处理后，再采用小尺寸刀具对复杂曲面进行加工，平衡粗加工、半精加工、精加工的加工用量。

对于曲面不同的部位采取不同的刀轨设计，如加工圆柱端面凸轮凹槽、圆柱端面凸轮突出部、凸凹过渡处等可分别采取不同的走刀方法，灵活应用侧铣、点铣等方法，从而提高加工效率。

（5）进给率优化　复杂曲面加工中，在刀具路径中对每一次切削进给率设定非常重要，加工前确定和设置最佳进给率很困难。不适合的进给率会导致切削刃崩刃，夹具损坏或划伤零件，通常进给率

大小是考虑刀具寿命和所能出现的最差的切削条件。

当切削时遇到最大切削量和最恶劣切削条件时，使用这些最差条件下的进给率是合适的。但是通常条件下，多次走刀都采用这种最差条件下的进给率得不偿失，进给速度过低，切削效率降低，切削效率降低，成本增加，零件表面质量恶化。

最好的办法是，切削量大时，刀具进给率降低；切削量小时，进给率相应地提高。因此，要根据实时切削量的不同，选择进给不同的进给率，而无需改变轨迹，实现切削加工进给率的动态优化。

（6）五轴加工刀轴运动控制方法　五坐标加工，由于具有5个自由度，刀具可以在空间运动，就可以加工出极其复杂的形状。然而，刀具运动控制不当，不仅增大加工误差，表面质量降低，而刀轴与工件之间还可能发生干涉。

在实际加工中，应根据加工表面的形状，选择适当的限制方法控制加工运动中刀具投射矢量，使得刀具运动方向变化均匀，以控制刀轴变化的剧烈程度，有效地提高加工质量。

（7）高速切削加工　高速切削加工能有效地提高加工效率和质量，降低成本，缩短开发周期。高速切削不仅是切削速度的提高，而是需要制造技术全面进步才能达到切削速度和进给率的成倍提高，并带动传统切削工艺的变革和创新。因此，刀具轨迹需要重新优化，通过特殊的高速铣功能，如限制逆铣、圆弧转角、螺旋切削、圆弧进刀和退刀、转角区进给速率控制等，实现最大化的进给速率。在高速铣切削工艺中，要尽量减少退刀、刀具重新定位和重新进给等动作。

2. 加工工序合理安排

复杂曲面类零件加工时，需要根据后续工序安排将毛坯先进行预加工。先去除大余量，中间工序根据需要可以安排合适的热处理时效工序，对加工中生成的应力进行释放。仔细研究工序间的相互影响，必要时需要在零件上增加工艺台、工艺孔、工艺定位面辅助对零件进行快速的定位、找正和测量。在机床上设置快速装夹定位用的工装夹具，以便方便完成零件在机床上的装夹。首先在编制程序和工序设计中工艺基准和设计零件的基准尽可能重合，原点设置方式统一，尽量减少加工过程的换刀次数；其次在工装夹具上设置刀具和坐标系定位块，避免发生刀具和坐标系错误。

设置刀具对刀块，并且通过编程将刀具信息调入程序，在后置处理过程中自动增加刀具的检测程序，如果检测结果有异常则终止后续加工，采用对刀仪自动对刀具相关参数进行检测。调整相关刀具程序直至故障消除才可以继续加工。

3. 加工机床的选择与运用

从机床－夹具－刀具组成的工艺系统来看，高转速机床动静刚度较高、机床热稳定的影响需进行控制，尽量将影响控制在不影响零件加工的范围；加工中心机床进行复杂曲面零件加工时最好选择闭环控制系统。加工中心机床应配有高压冷却系统对零件进行充分冷却。

夹具需要既有高的夹持力又需要有足够的刚度，避免在加工中因机床切削零件过程中发生振动，影响零件加工表面粗糙度和尺寸精度，甚至有发生刀具、零件损坏的风险。刀具方面需要注意选择适合进行高速加工的刀具，一般选择为耐磨带涂层的硬质合金铣刀。我公司现场使用的有山特维克可乐满、山高等品牌刀具加工效果较好；刀柄选择为双面定位并且进行动平衡过的BBT或HSK刀柄提高高速加工时刀具系统的稳定性。减小机床－夹具－刀具组成的工艺系统原因对零件加工质量和效率的不利影响。

4. 数控程序的编制与优化

曲面类零件加工需要在3～5轴的机床上进行加工，这样就需要我们根据零件的几何形状和尺寸选择具体的加工方式，一般的原则是能保证加工质量的情况时，尽量选择轴数少的加工中心机床进行加工。这样可以不用选择昂贵的五轴设备，节省设备投资就可以完成加工任务。并且可以减少编程的困难，同时节省数控程序运行时间，提高加工效率。

数控程序的编制实现方式：①用UG、Crel.0、CATIA等三维软件进行建模然后，用以上

实现更高效的数控加工



模型蜗壳的高效数控加工技术

四川省德阳市东方电机研究试验中心 （618000） 王健伟

我公司生产的水轮机电站模型中通流部件主要是由蜗壳、肘管、扩散管以及支墩等零件组成。该通流部件的加工往往采用传统的焊接拼装工艺，就是按照通流部件的单线图将等厚的钢板在卷筒机上卷压成形，然后将它们一块块焊接拼装起来。这样导致的结果是焊缝高低不平，表面粗糙度差，需要花费大量的手工作业来进行抛光、打磨，因此工人劳动强度大，生产效率很低，生产周期长，而且几何尺寸也不能得到有效的保证，从而影响到了水轮机模型的整体效率，越来越不能满足现代水轮机电站模型的水力试验需求。

随着计算机硬、软件技术和其他科学技术的进步与发展，CAD/CAM技术日趋强大和完善，它的应用范围也在不断扩大。数控加工是CAD/CAM技术中最能明显发挥效益的生产环节之一。现代制造技术和控制技术的快速发展，使得数控加工技术也在不断得到更新和提高，它在制造业中的重要地位也越来越凸现，在生产加工过程中所占的比重也越来越大。

为了提高水轮机电站模型通流部件中蜗壳的加工质量和效率，我们在考虑了现有的数控加工设备和CAD/CAM系统软件后，决定将模型蜗壳的生产加工实现数控化。

设备的选择

蜗壳的结构特点是精度要求高，加工尺寸大，许多重要的孔和加工面位于三维立体空间位置，这给加工和测量都带来很大的困难。某窝壳的加工尺寸为1 583mm×1 509mm，尺寸较大。它上面的很多测压孔和把合孔都位于三维立体空间位置，而且把合螺纹孔以及定位销孔的位置也都要求数控加工来保证装配时的相对位置。

软件的后置程序生成加工程序进行加工。②手工编程对于曲面加工来说需要进行数学建模，然后根据零件加工要求结合仿真软件验证手工编程的加工误差进行程序调整。相对而言，手工编程简单的可以采用数学公式来完成，复杂的尤其是对不规则曲面采用宏程序编制程序。用数学方法编制的程序逻辑结构严谨，程序段精炼，加工时程序占用机床内存较少，机床执行程序的效率较高。但对编程者的数学建模能力要求较高。比较以上两种编程实现方式，如果对于曲面复杂手工编程较困难的一般采用三维软件进行建模然后，可以用相关软件的后置程序生成加工程序进行加工；如果曲面零件可以手工编程还是尽量采用数学方法编制的程序或宏程序，这样对提高加工效率有好处。

5. 加工过程仿真模拟（CAD/CAM）

使用UG、Cre1.0、CATIA等三维软件进行建模，然后用以上软件的后置程序生成加工程序进行加工。Vericut或Cimatron是进行数控程序模拟、仿真、验证和优化的软件，可以替代我们检验NC程序运行过程，还可以用设计模型与仿真加工模型的比对功能，定量分析仿真加工模型。选用相应的数控系统和机床类型，利用仿真软件的自动对比功能，将三维软件编程或宏程序加工的零件和三维软件建立的模型对比，符合图样要求。最后将编好的程序在数控机床上进行加工，就可得到合格的产品。

MW（收稿日期：20130622）