

# 可变轴曲面轮廓铣在异型薄壁零件加工中的应用

## Application of Variable Axis Curved Contour Milling in Special Thin Wall Part Machining

黄河水利职业技术学院 赵彦华 李玮珑  
洛阳电光设备研究所 董晓 吴晓鸣

**[摘要]** 针对异型薄壁零件这一典型零件, 讨论了可变轴曲面轮廓铣在数控程序设计及加工中的应用, 研究了可变轴曲面轮廓铣在整个加工编程流程中各主要参数的功能和应用特点。

**关键词:** 异型薄壁零件 数控加工 可变轴轮廓铣 UG 软件

**[ABSTRACT]** The application of the variable axis curved contour milling in NC program design and machining is discussed according to the special thin wall part. The functions and application characteristics of the main parameters of the variable axis curved contour milling are researched in the whole machining program flow, so accepted parts can be machined.

**Keywords:** Special thin wall part NC machining Variable axis curved contour milling UG software

自 20 世纪中期以来, 头盔显示器的作用和应用在国内外日益受到广泛的关注。头盔显示器安装在飞行员头盔上, 由于受到安装部位(飞行员头部及颈部)承载能力的限制, 要求所研制的双目头盔必须是微型的和重量很轻的装置, 而零件的轻型化势必使零件结构打破传统, 造成零件形状异形、薄壁刚性差等问题, 而传统加工方法很难实现这一点。经调研, 采用 UG 软件作为数控程序设计平台, 以此为基础进行数控程序编制和加工仿真可以达到令人满意的结果。

某异型薄壁零件是头盔显示器中一个重要的零件(外形见图 1), 对头盔性能起到关键作用。该零件尺寸较小, 结构复杂(有 4 个复杂曲面), 零件壁很薄, 特别是加工内部扇贝面时容刀空间小, 因此必须采用五轴联动的数控机床进行加工。

五轴数控加工主要解决自由曲面的加工。在数控加工中, 曲面分为解析曲面和自由曲面

2 类。解析曲面是用数学方程式描述的曲面, 如螺旋面等, 数控加工程序的编制难度不是很大。自由曲面是用列表坐标点描述的曲面。由于这些由试验或测绘取得的点列之间没有一定的联结规律, 因此数学模型的建立、数控程序的编制、切削加工等比较麻烦, 故制造这类曲面难度较大。本零件的 4 个曲面都属于自由曲面。

### 1 可变轴轮廓铣概述

UG 软件是 CAD/CAM 一体化的软件, 它的 CAM 部分为用户提供了一种交互式编程产生精确加工轨迹的方法, 能生成刀具位置源文件(CLSF)。用户通过观察刀具运动来图形化编辑刀轨, 并进行图形化修改, 最终的刀位源文件经过机床后置处理生成加工用的 G 代码程序。

UG 软件加工模块中的可变轴轮廓铣是一个能完全规定五轴联动的加工模块。可变轴轮廓铣用于零件型面的精加工。通过控制刀具轴投射方向和驱动方法, 可变轴轮廓铣可以生成复杂零件的加工轨迹。

刀轨创建需要 2 个步骤, 第一步从驱动几何体上产生驱动点, 第二步将驱动点沿投射方向投射到零件几何体上。

驱动点可以从零件几何体的局部或整个零件几何体上产生, 或从与加工零件不相关的其他几何体上



图 1 某异型薄壁零件外形  
Fig.1 Shape of a special thin wall

产生。然后,将这些点投射到零件几何体上。刀轨输出时有一个内部运算过程,即将刀具从驱动点沿投射方向移动,直到接触零件几何体。输出的位置点可能和投射到零件上的驱动点重合,或者如果零件几何体的其他部位接触到了刀具,阻碍了刀具到达投射点并投射到零件几何体上的位置点,则将输出一个新的点,从而忽略这个驱动点。

## 2 可变轴轮廓铣在加工中的应用

某异型薄壁零件的加工难点是不完整圆环的加工和内外扇贝面的加工,这里主要讨论用可变轴轮廓铣进行扇贝面加工的方法。由于圆环内扇贝面为凹曲面,曲率变化大,受斜面上不完整圆环限制导致加工时的容刀空间很小,常规加工方法很难实现,只有编制五轴联动的数控程序才能准确地加工出符合设计要求的曲面,解决刀具与斜面不完整圆环的干涉问题;对于外形扇贝面,由于没有干涉部分,可以用固定轴方法解决。

用可变轴轮廓铣方法加工内外扇贝面的步骤如下:

### (1) 数学模型的建立。

异型薄壁零件的数学模型建立分为 2 部分:先根据理论数据确定斜圆环和水平圆环存在空间的位置关系和连接内外扇贝面的构造。

经对光路分析,对于确定 2 个圆环的位置关系可采用如下方法:通过已知尺寸换算出斜圆环的圆心相对于水平圆环的圆心位置尺寸;做出水平圆环,将坐标系确定在水平圆环的圆心;将当前坐标系 XY 平面通过平移,转换到与水平面成 45° 夹角的平面上;用已算出的坐标点值在转换后的坐标系中确定实际的斜圆环位置。

曲面造型的方法:在用 UG 软件进行三维造型时,一般采用草图和特征造型;在遇到曲面时,需要通过曲线、特征造型、自由特征造型等模块综合应用才可实现。

针对该零件 2 个圆环之间的内曲面造型(由于内曲面形似扇贝称之为扇贝面),可通过如下方法加以实现:首先,抽取斜圆环的边界线;然后,测量出斜圆环边界最底点投影水平面的坐标点,利用此点和水平面上的圆环直径在水平面内做一椭圆;最后,通过曲线模块中的修剪功能将抽取的边界线和椭圆分别等分,进入自由特征造型模块界面,选用其中的规则曲面(规则)小模块,通过上面的边界线和椭圆拉出曲

面,再用特征造型中的布尔运算及其他功能将曲面进一步修剪作出所需要的曲面。

而对该零件 2 个圆环之间的外侧曲面造型,则相对简单:抽取 2 个圆环边界线,考虑截面孔位置及孔壁厚度和外观,适当截取,创建纵向引导线;同样可采用自由特征造型模块中的规则曲面(规则)小模块构造所需要的外形曲面。

### (2) 坐标系的确定。

UG 软件为用户提供了强大的坐标系设定功能,包括绝对坐标系、工作坐标系和加工坐标系。数学模型的建立以工作坐标系为基础,刀位文件的生成以加工坐标系为基准。

建立加工坐标系有以下几点原则:尽量使加工基准与设计基准重合,使加工基准有利于操作者对刀,使加工坐标系与工作坐标系重合。

根据以上原则,在建模和编程时将加工坐标系与工作坐标系重合。然而传统加工零点的设置方法是相对独立的,没有将转台中心联系起来,无法实现多面连续加工及多轴(四轴以上)联动加工。经过对机床结构的进一步分析,将加工零点设置到转台中心即可。具体加工零点设置如下:

先确定零件工作坐标系在零件上的位置,然后将零件在工作台上装夹牢固,测量出零件工作坐标系零点在机床坐标系中的坐标值。测量出机床工作台转台中心在机床坐标系中的坐标值,并在机床验收单中推算出 A 轴在机床坐标系中的 Z 向值,求出零件零点对机床工作台转台中心的差值。在 UG 的零件图中,通过上面求出的差值将零件的工作坐标系零点偏置到机床工作台转台中心位置,进入加工界面,将加工坐标系设置成与工作坐标系一致。

### (3) 刀具选择。

对于复杂曲面构成凸凹加工区域,很难确定选用铣刀大小。过小,则走刀次数增加,严重地影响加工效率,同时刀的强度也受到影响,容易发生断刀;过大,虽然加工速度有很大的提高,但是对于曲面的曲率半径较小位置,由于刀具直径过大而无法加工到零件的实际表面,产生欠切。可见,准确选择铣刀大小,对零件加工十分重要。

对于刀具的选择,笔者应用 UG 软件中的分析(Analysis)选项中的最小半径(Minimum Radius)功能,直接分析出最小曲率半径为 4mm。选择大的刀具,产生的切削力也相应增大,由于本零件为薄壁、精密,为减少加工中的切削力变形及刀具的足够的刚性,对于

加工凹曲面根据实际情况选用了直径为 8mm 的球头刀。刀具尺寸及类型可在 UG 软件加工制造模块 Create Tool 功能中创建。

#### (4) 驱动方法。

驱动方法即驱动点产生的方法。UG 软件加工模块中的驱动方法的选择是比较重要的,可变轴曲面轮廓铣提供了线点、边界、螺旋、刀轨、径向切削、曲面区域等 7 种驱动方法。根据扇贝面的表面特点,选择曲面区域驱动方法较好。

曲面区域驱动方法用于在选择的驱动曲面上去创建阵列分布的驱动点,也就是说可以通过驱动面投影方式生成加工面上的刀位轨迹。这种驱动方法适用于加工非常复杂的曲面,它同时提供了对刀具轴和投射矢量的附加控制。曲面区域驱动方法可以选择零件几何体作为驱动几何体,也可以从其他几何体上产生驱动点,这样无论加工面是否连续或属于何种类型,UG 都能产生令人满意的刀位轨迹。其过程是先在驱动面上生成驱动点轨迹,然后沿着投影矢量将驱动点轨迹投影到加工面上,得到加工面的真实刀具轨迹。

驱动面一般应选择单一曲面,并且为了使刀具轨迹与参数线方向一致,驱动面应尽量作到与加工面平行或接近平行,这样能更好地保证加工表面面形及精度。

基于以上原则,考虑加工面为封闭的凹曲面,且周边轮廓圆环内边界不能过切,这里就选择加工对象为驱动几何体,这样使驱动面与加工面参数线一致,并且不使加工区域过切。切削方向选择沿曲面横向运动,这样可使切削余量均匀;切削类型选择 ZIG-ZAG 双向往复切削方式,这样既可以避免工作台只向一个方向旋转产生超程,又可以提高效率。

#### (5) 过切处理。

为了保证加工区域周边轮廓不发生切。需要设定检查几何体 (CHECK GEOMETRY): 因被加工区域为封闭区域,需要选择检查几何体来防止加工中出现过切现象;选择斜圆环内小环内面为检查几何体;通过仿真发现加上检查几何体后被加工区域变小了,经过检查发现检查几何体 EDIT 菜单中有一个 CUSTOM DATA 子菜单,进入到 CUSTOM DATA 子菜单中,其中第二项为 STOCK 余量,有 2 个设置。一是 CHECK STOCK 检查体余量默认值为零,二是 ADDED SAFE CLEARANCE 附加安全间隙默认值为 3;将附加安全间隙默认值改为零,或将检查体余量赋值,将附加安全间隙默认值为零,即可使被加工区域完全加工又不

出现过切。

#### (6) 刀轴驱动方法的确定。

刀轴方向的确定对一个加工的生成非常重要,合理的刀轴方向可以提高加工精度及效率,反之则会带来加工不便,甚至无法生成加工操作。在加工异型薄壁零件曲面时,为避免干涉,需采用变刀轴(刀轴的正向为刀尖指向刀柄)。UG 为用户提供固定和可变的刀具轴驱动方法,固定刀具轴驱动方法是在加工时使刀具轴方向始终与指定矢量平行;而可变刀具轴驱动方法可以在刀具沿刀轨运动时不断改变刀具轴方向。UG 的可变轴轮廓铣提供了 I、J、K、直线、端点、两点等 6 种固定刀轴驱动方法,同时还提供了 18 种可变轴驱动方法,主要有以下 6 种:

点和线刀具轴:是用聚焦 1 个或 1 条线的方法定义的刀具轴,分为远离点、朝向点、远离线与朝向线 4 种;远离和朝向是相对一矢量方向而言的。远离点,适合于凸曲面或近似的凸曲面加工,点为法矢交点附近;朝向点,适合于凹曲面的加工,点为法矢交点附近;远离线,适合于近似外圆柱面的加工;朝向线,适合于近似内圆柱面的加工。

法向刀具轴:保持刀具轴在每个接触点上总是垂直于零件加工几何体、驱动几何体或者旋转轴(四轴加工)。当加工的零件形状(即法向)不是剧烈的变化时,只是最理想的定义刀具轴方法。

相对刀具轴:保持刀具轴在每个接触点上总是垂直于零件加工几何体、驱动几何体或者旋转轴(四轴加工),并且用于给刀具轴定义引导角和倾角。

双四轴:可以对 ZIG 和 ZAG 切削方分别定义旋转角、引导角和倾角。

直纹面驱动刀具轴:保持刀具轴平行于驱动几何体;使用这种方法时,驱动几何体引导刀具侧刃,零件几何体引导刀具底部;直纹面驱动刀具轴只适用于驱动几何体为直纹面的情况,因为驱动几何体的直纹面方向确定直纹面驱动的投射矢量方向。

根据加工对象是封闭区域,且是凹曲面,凹曲面内各点法向近似朝向某一点,因此刀具轴方向选择朝向点,该点为曲面上各点法矢近似交点,比法矢交点远,这样刀轴摆动幅度小,避免过切和机床加工时转台摆动超程。

#### (7) 切削参数。

切削参数中较为重要的有加工余量、加工步距、加工行距、加工后的残留高度等,选择这些参数需要综合考虑加工精度及加工效率。使用可变轴轮廓铣编

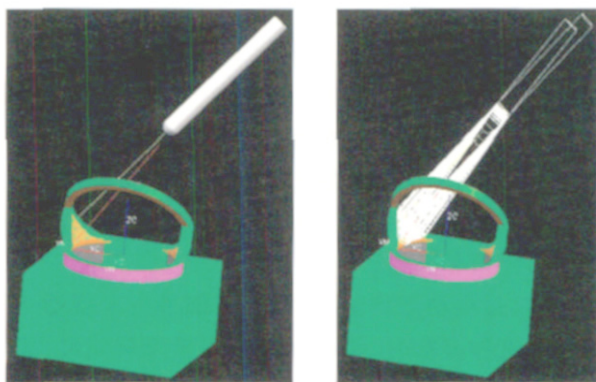
过程中, 设定工件内容差为 0.01, 外容差为 0.01, 余量为 0; 加工步距用于控制沿驱动线产生的驱动点的间距, 加工步距根据曲面曲率大小选择控制值, 这里选用公差方式, 公差值设为 0.01mm; 加工行距用于控制连续刀轨间的距离, 一般选用残留高度或排刀数目来控制, 这里选用残留高度方式, 设定值为 0.01mm。一般粗加工切削步距中的 TOLERANCE 公差及切削行距中的毛刺高度选择大一点, 精加工小一点。

### (8) 可变轴曲面轮廓加工后置处理程序设置。

后置处理程序是机床加工代码生成器。在做多面加工及多轴联动加工时, 需要编辑机床类型选项, 将其设定为 3 个直线轴和 2 个旋转轴。另外, 在后置命令选项中, 需要确定加工零点相对第 4 轴的位置和第 4 轴相对与第 5 轴的位置, 而且要考虑方向性。这样, 在做多面加工及多轴联动加工时, 才能生成正确的机床加工代码。这里需要指明一点, 工作台绕 Z 轴旋转的旋转轴为第 5 轴, 绕 X 轴旋转的旋转轴为第 4 轴。

这种多面加工方法减少了装夹次数, 因而提高了生产效率, 同时也消除了多次装夹产生的装夹误差, 提高了产品的加工精度。

经后置处理的五轴加工刀位轨迹如图 2(a)、(b) 所示。



(a) 刀具切入轨迹

(b) 刀位轨迹

图 2 UG 软件生成的刀具切入轨迹和刀位轨迹

Fig.2 Tool cut-in path and position path generated with UG software

## 3 结束语

采用可变轴轮廓铣进行异型薄壁零件精加工, 解决了该零件尺寸较小、结构复杂、壁薄且容刀空间小等问题。这种多面加工方法减少了装夹次数, 因而提高了生产效率, 同时也消除了多次装夹产生的装夹误差, 提高了产品的加工精度。 (责编 金卯)

(上接第76页)

切削能力。分析原因可以发现, 进给速度是关键磨粒顶端最锋利的部分被磨平以后, 磨粒钝化, 由于砂带基体本身具有一定柔性, 在较高的进给速度下磨削不充分, 限制了砂带的磨削能力。

考察第二组和第三组正常磨削的曲线发现, 初期磨损消耗, 超过 0.2mm, 进入定常磨损阶段至砂带磨钝, 却只消耗了接近 0.1mm 高的磨粒, 60°磨粒的总高度为 0.6mm, 考虑被基体把持的部分, 磨粒出露高度约为 0.4mm, 实际有效消耗的占出露高度的 25%, 磨粒出露高度得不到有效利用, 反映出静电植砂技术没有解决磨粒等高性排布问题。

## 3 结论

(1) 砂带磨削钛合金过程具有显著的初期磨损阶段和定常磨损阶段。

(2) 砂带使用可分为 2 个步骤, 首先根据砂带牌号采用适宜切深高速进给使砂带迅速而准确地度过初期磨损阶段, 然后在定常磨损阶段, 宜采用小切深快进给的用量组合, 提高砂带使用寿命, 同时提高加工精度的稳定性。

(3) 砂带磨粒排布的等高性优劣是砂带寿命高低的决定性因素。

## 参 考 文 献

- [1] Axinte D A, Kritmanord M, Axinte M. Investigations on belt polishing of heat-resistant titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 166: 398-404.
- [2] 李迎, 徐鸿钧, 王珉. 砂带磨削 300M 钢的试验研究. *航空精密制造技术*, 1996, (32): 12-15.
- [3] 钟华珍, 阳小民. 关于砂带磨损的研究. *磨料磨具与磨削*, 1991, 5(65): 4-9.
- [4] Sung-San Cho, Yong-Kyoon Ryu, Seung-Young Lee. Curved surface finishing with flexible abrasive tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42: 229-236.
- [5] Xu Xipeng, Yu Yiqing, Huang Hui. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel alloy. *Wear*, 2003, 255: 1 421-1 426.
- [6] 龚正. 砂带磨削的机理及砂带磨损的探讨. *上海第二工业大学学报*, 1991(1): 32-35.
- [7] 朱凯旋, 黄云, 陈延君, 等. 强力砂带磨削试验机床的研究和设计. *机械制造*, 2006(3): 25-28.
- [8] 刘兆平. 40Mn2 钢高强度结构钢强力砂带磨削研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

(责编 金卯)