数控机床加工渐开线齿形零件分析

大连橡胶塑料机械股份有限公司 （辽宁 116033） 王德旭 杨 建

近几年，我公司出现了较多的超规格或是非标准的齿形零件，特别是部分大模数的齿轮轴（m_n=32，z=14），更是加工的瓶颈，寻找外协加工较为困难，且需要投入较为昂贵的刀具成本。在机床展览会上，发现了多家的数控系统中有了渐开线齿形加工的子程序，并且观看了设备的加工表演，给了我们很大的启发，我们自己也开始尝试利用现有的4轴龙门加工中心进行齿轮和齿轮轴的数控加工，取得了成功。下面对加工过程进行分析，给出数控程序，供大家参考、研究。

利用数控加工齿形零件有两种方法，一种是固定轴（X、Y、Z三轴）球刀轮廓逼近法（简称固定轴法或球刀法），一种是旋转轴定位立铣刀展成法（简称旋转轴法或立铣刀法）。固定轴法是将零件固定在工作台上三轴铣削，铣好一个齿后，人工分度加工下一个齿，通过循环，完成整个零件的加工。旋转轴法是将零件装在分度盘上，齿形旋转适当角度并定位，用立铣刀的侧刃与齿面相切，通过纵向走刀的方法完成一段齿面的加工，然后旋转一定的角度并定位，加工齿面的另一段，最后包络出整个齿形。类似展成磨齿的方法。需要旋转轴参与加工，斜齿加工需要旋转轴参与联动，直齿时，旋转轴仅进行定位即可。

1. 固定轴球刀轮廓逼近法

使用球刀对齿形轮廓进行逼近，可以很容易地获得数控程序，刀具比较耐用，可用软件自动编程，也可手工编制宏程序。

自动编程操作起来比较简单，利用最基本的型腔铣即可以完成，但这一方法需要根据零件分别建立三维模型，并逐个进行编程。程序篇幅较长，数据量大，易读性不好，三维建模有难度，不利用于调整齿形参数，对刀具尺寸的要求高。这里不再详述。

宏程序是一种应用较为方便的编程方法，近几年发展较快，使用方便，灵活性较好，易于管理和保存。根据渐开线齿形的形成原理（见图1），在圆周上绘出一段所要加工的渐开线，让刀具圆弧上的一点与线上某一点M相切，刀具中心O'处在过切点所做的基圆切线NM的延长线上，通过半径R_x，计算出刀心O'的位置，利用R_x做变量，从齿形的齿根圆变化到齿顶圆，按计算出来的各刀心位置进行轴向走刀加工，可以得到整个渐开线齿形。

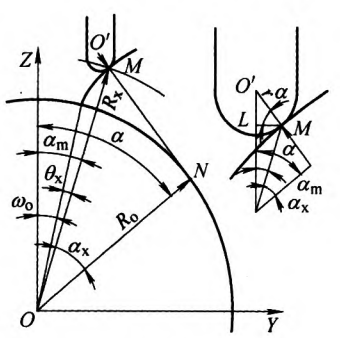


图 1

在程序中，刀具半径r和所要加工的齿形的公法线W作为两个可变常量，可以随时手动修改这两个常量的数值，来适应刀具尺寸，得到想要的齿形尺寸。

$\theta_x=\text{inv}\alpha_x=\tan\alpha_x-\alpha_x$；（任意点渐开线函数）

$\text{inv}\alpha_f=\tan\alpha_f-\alpha_f$；（分度圆渐开线函数，$\alpha_f$为分度圆压力角）

$\alpha=\omega_o+\theta_x+\alpha_x=\omega_o+\tan\alpha_x$；（任意点法向与$Y$轴夹角）

$\alpha_m=\omega_o+\theta_x=\omega_o+\tan\alpha_x-\alpha_x$；（任意点齿形半角）

$\omega_o=\omega_f-\text{inv}\alpha_f=\pi/(2z)-2\varepsilon\tan\alpha_f/z-\text{inv}\alpha_f$；（基圆齿根半角，$z$为齿数）

$\varepsilon=\{w/m-\cos\alpha_f[\pi(k-0.5)+z\text{inv}\alpha_f]\}/(2\sin\alpha_f)$；（变位系数，$m$为模数，$k$为跨齿数）

$\alpha_x=\arccos(R_o/R_x)$；（任意点压力角）

$Y_m=R_x\sin\alpha_m$；（M点Y坐标）

$Z_m=R_x\cos\alpha_m$；（M点Z坐标）

$Y_O'=Y_m+O'L=R_x\sin\alpha_m+r\sin\alpha$；（O′点$Y$坐标）

$Z_O'=Z_m-ML=R_x\cos\alpha_m-r\cos\alpha$；（O′点$Z$坐标）

将各参数带到计算式中即可以得到刀心点坐标，通过半径R_x变化，就可以得到齿面上各点，控制变化步距，可以得到不同的齿面残余高度，进而获得不同的齿面加工表面粗糙度。

任意点的残余高度（见图2）可以按下式近似计算

残余高度$=r-\mathrm{sqrt}[r^2-(0.5\Delta R_x/\cos\alpha_x)^2]$

式中，ΔR_x为半径的变化量。

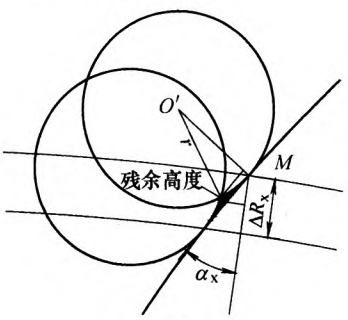


图 2

需要注意的是对于少齿数或是负变位的齿形，基圆可能在齿根圆以上，使用以上计算方法只能得到基圆以上的齿形，齿根圆到基圆这一段曲线应利用其他方法获得。常用的是过基圆与齿面的交点，做ω_0角度的斜线，再与齿根圆弧相切，得到一个完整的齿底。

编程前选择刀具需要考虑齿根圆角和齿根槽宽度，以便防止刀具干涉或过切。这一加工方法适用于中等模数和齿数的零件，对于小模数或多齿数的零件，会给刀具选择和加工效率带来较大影响。

对于粗加工，可以参照上述方法计算出坐标点，利用立铣刀进行开槽铣，将齿面留量铣成台阶状，再利用球刀进行一次半精加工，留小于0.5mm的精加工余量做精铣得到最终齿形。

球刀加工渐开线直齿的宏程序（基圆在齿根圆外）：

```
O1233；(工件的一个端面圆心为原点，一个齿槽对称轴为Z轴，工件轴线为 轴，刀具原点为球刀球心，加工单个齿槽)
    (变量赋值过程略)
    …
G00 G40 G90 G53 Z0 S1000 M3；
G54 X0 Y0 A0；
G00 X-#106；(#106为刀到零件端面的安全位置，即起刀位置)
Z#108；(Z轴定位在安全位置)
#1=#104；(#1为循环变量，#104为齿顶圆，从齿顶圆开始加工)
N100 WHILE[#1 GE #120] DO1；(#120为基圆直径)
(坐标位置计算略，见计算公式)
…
G01 Y#125 Z#126 F400.；(Y、Z轴进入加工位置)
X[#106+#118+#106]；(#118为工件长度，两个端面让出安全位置，正常加工)
Y-#125 Z#126；(Y、Z轴进入对侧齿面的加工位置)
X-#106;(回程加工对侧齿面)
#1=#1-#122；(#122为半径变化步距，计算下一点，开始循环加工)
END1；
G00 G90 Z500；(一个齿槽加工完成退回)
M30
```

2. 旋转轴定位立铣刀展成法

使用固定轴法加工时，零件原因较为简单，实际操作也不复杂，易于过程控制。但加工效率不高，特别对于大模数齿形时，由于是利用小圆弧来逼近渐开线，需要较密集的刀具轨迹。利用旋转轴定位立铣刀展成法加工，可以使用普通立铣刀，通过铣刀侧刃的直线逼近齿形的渐开线，可以极大地减少刀具轨迹数量，可以得到精确的齿形表面。

利用立铣刀展成加工的编程方法与上一方法类似，这里以宏程序为例，给出数学模型及编程方法（见图3、图4）。

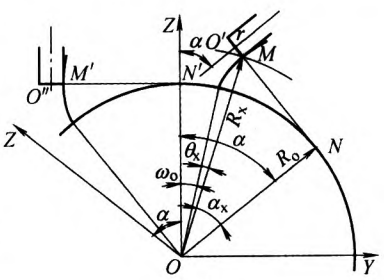


图 3

直接使用机床的立铣头或主轴，刀具中心线指向零件轴心，为了能够让铣刀侧刃能够与齿面相切，需要将铣刀在工件径向偏置一定距离$O'N$，同时工件也旋转一定的角度α，通过计算可以得到偏置值和旋转角。通过设定不同的偏置值和旋转角，利用轴向走刀，就可以加工出齿形的不同位置。如图3、图4所示，以切削点处的直径R_x做变量，从齿根圆变化到齿顶圆，就可以得到一

个完整的齿面。

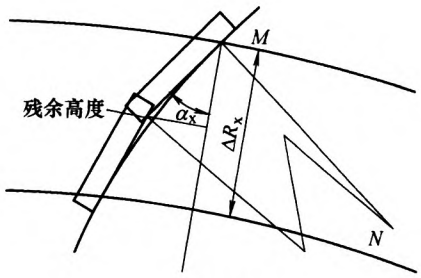


图 4

$Y=-(r+R_0\times \mathrm{tg}\alpha_x)$；（$O''$点$Y$坐标中）

$Z=R_0$；（O''点Z坐标）

将各参数带到计算式中即可以得到刀尖圆心点坐标，通过半径R_x逐渐变化，可以得到齿面上各点，控制变化步距，可以得到不同的齿面残余高度，进而获得不同的齿面加工表面粗糙度。

任意点的残余高度可以按下式近似计算

残余高度=sqrt[$(R_0\tan\alpha_x)^2+(0.5\Delta R_x/\cos\alpha_x)^2$]－$R_0\tan\alpha_x$

式中，ΔR_x为半径的变化量。

对于少齿数或是负变位的齿形，建立齿根部延伸曲线同上。如果使用这种方法，可以在加工$R_x=R_0$位置时，将Z轴坐标设为齿根圆半径R_n，即可以直接一次性加工出整个齿底。

立铣刀加工渐开线直齿的宏程序（基圆在齿根圆外）

O1233；(工件的一个端面圆心为原点，一个齿形对称轴为Z轴，工件轴线为X轴，刀具原点为球刀球心，加工单个齿形)

(变量赋值过程略)

…

G00 G40 G90 G53 Z0 S1000 M3；

G54 X0 Y0 A0；

G00 Z#108；(Z轴定位在安全位置)

#1=#104；(#1为循环变量，#104为齿顶圆，从齿顶圆开始加工)

N100 WHILE[#1 GE #120] DO 1；(#120为基圆直径)

(坐标位置计算略)

…

G00 G90 X-#106；(#106为刀到零件端面的安全位置，即起刀位置)

G01 Y#125 Z#120 A#128 F400；(Y、Z、A轴进入加工位置，A轴顺时针方向为正)

X[#106+#118+#106]；(#118为工件长度，两个端面让出安全位置，正常加工)

G00 Z#108；(Z轴抬起，准备回到起刀点，加工下一位置)

#1=#1-#122；(#122为半径变化步距，计算下一点，开始循环加工)

END 1；

G00 G90 Z500；(齿形一个面加工完成退回，准备加工另一个齿面)

G54 X0 Y0 A0；(开始加工另一个齿面)

G00 Z#108\；(Z轴定位在安全位置)

#1=#104；(#1为循环变量，#104为齿顶圆，从齿顶圆开始加工)

N200 WHILE[#1 GE #120] DO 2；(#120为基圆直径)

(坐标位置计算略，见计算公式，计算的转角和径向偏移值需要反向处理)

…

G00 G90 X-#106；(#106为刀到零件端面的安全位置，即起刀位置)

G01 Y#125 Z#120 A#128 F400；(Y、Z、A轴进入加工位置，A轴顺时针方向为正)

X[#106+#118+#106]；(#118为工件长度，两个端面让出安全位置，正常加工)

G00 Z#108；(Z轴抬起，准备回到起刀点，加工下一位置)

#1=#1-#122；(#122为半径变化步距，计算下一点，开始循环加工)

END 2；

G00 G90 Z500；(整个齿形加工完成退回)

M30

注：部分系统在定位A轴时，不会绝对方式任意定位（只会延一个方向旋转到下一个定位的解决，此时需要在程序中按自己的想法和情况适当处理一下）

为了提高刀具使用寿命和避免加工过程中台阶的出现，应考虑使用离开刀尖一定距离的侧刃，同时使用带R角的立铣刀，这样可以优化加工条件。也可以使用刀具的R角，加工出带圆角的齿根。推荐R角为0.3～0.4m（模数），此时考虑将刀尖圆心Z坐标设定为R_n，并且保证刀具的有效侧刃位置Z坐标小于R_0，以便切出正确的齿形，如图5所示。

部分齿形由于模数小，齿数多或者负变位较大，或者为长齿，会造成齿根部较为窄小，此时如果还使用普通的立铣刀加工，为了防止刀尖干涉，不得不选择直径较小、较长的铣

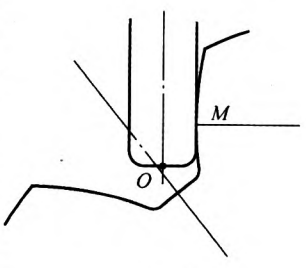


图 5

刀，这样会降低了刀具的刚性，影响加工效率和表面质量。为了解决这个问题，可以使用锥角铣刀，如图6所示，根据刀具锥角的大小（一般考虑将锥角确定为分度圆压角的2倍），将工件向相反的方向转过一半铣刀锥角，同样可以得到刀具侧刃与齿形相切，且刀具轴线与Z轴平行，只不过刀具半径需要根据实际的切削点的半径来计算。这一方法还可以通过刀具轴向微调来调整齿形厚度，而无需改变刀具直径尺寸。

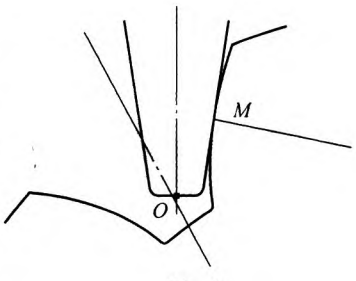


图 6

使用旋转轴法加工还有一个好处，可以通过在加工不同齿面位置时，进行Z向窜刀，充分利用立铣刀的最大长度上的刃口。在加工齿顶部时，通过轴向进刀，使用铣刀根部，加工齿根部时，通过轴向退刀，使用铣刀尖部。窜刀没有严格要求，可以从加工齿根到加工齿顶连续均匀进行，只要注意铣刀端部Z坐标大于$R_n\cos\alpha$即可（R_n为齿根圆），即防止刀具端刃过切到齿根部。对于使用锥立铣，同样可以进行Z向窜刀，但需要考虑的是在Y方向也需要根据铣刀锥角大小，计算出偏置量，即通过铣刀的斜向运动，确保铣刀的不同侧刃点都可以有效地与既定的齿形表面相切，而不产生过切或干涉。

使用旋转轴法加工齿形，特别适用于小模数或是多齿数的零件的加工，可以使用锥立铣刀解决小模数齿根槽窄小的问题。对于多齿数的零件，因渐开线的齿形较为平滑，通过较少的展成次数也可以得到较好的齿形表面质量。

旋转轴法加工齿形还可以进行拓展，将普通立铣刀换成三面刃盘铣刀（见图7），利用立铣头将刀具放在工件侧面，或是利用直角铣头将刀具放在工作上面，同样可以实现齿形的展成加工。如果零件的齿宽较小，可以使用大直径的三面刃盘铣刀，不用轴向走刀，直接做展成运动，在轴向不同位置做一次或几次即可以完成整个齿面的加工（类似于马格磨齿的方法），效率较高。这种方法的编程计算与使用立铣刀的类似，将Y轴与Z轴进行适当调换即可。

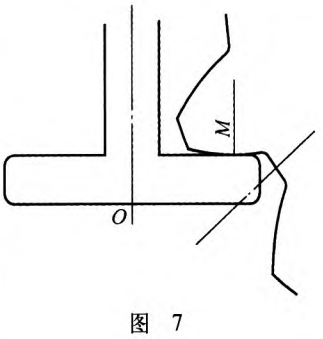


图 7

3. 结语

在普通数控机床上加工齿形零件不受零件状态的限制，可以用于软齿面零件的精加工，也可以用于硬齿面硬化前的粗加工，还可以用于硬齿面硬化后的精加工。其加工精度和效率主要受机床的精度、刚性和刀具材料影响，但影响因素较为简单。以上是以直齿为例进行的，如果想要加工斜齿，只需将法向上的切点转换到端面齿形上即可，通过端面压力角进行计算，公式类似，具体的计算方法可以参照复杂刀具设计手册上的相关内容，这里不于赘述。

这种加工思想可以很好地解决零件试制和特殊零件的加工问题，可以极大地节省工期及设备和刀具费用。在单件订单生产上有广泛的用武之地，对于大模数少齿数的齿轮加工效率更高。**MW**

（收稿日期：20130316）

硬质合金滚压工具

本单位生产硬质合金滚压工具已有30余年历史。滚压加工广泛运用于机械加工、液压、重型机械等行业，是一种对机械零件表面进行光整和强化的工艺，它利用硬质合金滚轮对工件表面施加压力，使其表面产生塑性变形，达到修整表面微观几何形状、降低表面粗糙度值的目的，同时可提高表面硬度。滚压后，使零件表面粗糙度值从R_a = 6.3～1.6μm降低到R_a = 0.8～0.1μm，实现以滚代磨。本单位还可根据用户要求，生产、加工各类异型硬质合金制品及硬质合金模具。

靖江市城北合力滚压技术服务部（原国营靖江汽车修造厂）

地　址：江苏靖江市真武河北路47号

联系人：蒋文宏　　手机：13327780598

邮　编：214500　　电话：0523－84832767

传　真：0523－82853000　E-mail：jwh@sina.com

广告查询编号：1008