锥形内螺纹数控铣削加工的数学建模与编程

河北机电职业技术学院 （邢台 054048） 陈文杰

螺纹铣削加工与传统螺纹加工相比，在加工精度、加工效率等方面具有很大的优势，且加工时不受螺纹结构和螺纹旋向的限制，如一把螺纹铣刀可加工多种不同旋向的内、外螺纹。对于不允许有过渡螺纹或退刀槽的结构，采用传统的车削方法或丝锥、板牙都很难加工，但采用数控铣削却十分容易实现。此外，螺纹铣刀的寿命是丝锥的十几倍甚至数十倍，而且在数控铣削螺纹过程中，对螺纹直径尺寸的调整极为方便，这更是采用丝锥、板牙难以做到的。由于螺纹铣削加工的诸多优势，目前发达国家的大批量螺纹生产较广泛地采用了铣削工艺。

尺寸较大的内螺纹，一般在数控镗铣类机床上采用旋风铣削加工。其加工原理为：螺纹成形铣刀高速旋转，其刀尖回转圆始终与内螺纹大径处于内接状态，与此同时，刀具绕工件孔轴线作螺旋运动，螺旋运动由数控机床的螺旋插补功能来实现。对于盲孔螺纹，为防止加工到孔底部时，加工部位被切屑遮盖，切屑堆积与刀具产生干涉，旋风铣削时采用从孔底向外加工的走刀方向。

1. 螺纹铣削加工刀具

螺纹铣削加工使用的刀具多种多样，有单刃的，有多刃的，有单刃多齿的，有多刃多齿的，其中多刃、多齿数控螺纹铣刀加工效率最高。下面介绍几种常见的螺纹铣刀。

（1）圆柱螺纹铣刀 圆柱螺纹铣刀的外形很像是圆柱立铣刀与螺纹丝锥的结合体，但它的螺纹切削刃与丝锥不同，刀具上无螺旋升程，加工中的螺旋升程靠机床运动实现。由于这种特殊结构，使该刀具既可加工右旋螺纹，也可加工左旋螺纹，但不适用于加工较大螺距的螺纹。

（2）机夹螺纹铣刀 机夹螺纹铣刀适用于较大直径（如大于25mm）的螺纹加工。其特点是刀片易于制造，价格较低，有的螺纹刀片可双面切削，但抗冲击性能较整体螺纹铣刀稍差。因此，该刀具常用于加工铝合金材料。若安装两个刀片，则为机夹双刃多齿螺纹铣刀。三角刀片一般为双面刀片，可正转、反转进行铣削加工。

2. 直螺纹工艺

对于尺寸较大的直螺纹，数控加工较为简单。不管用单刃刀具，还是多刃刀具，在数控镗铣床上按照上述原理，采用圆弧插补编程都可以实现。如图1所示尺寸，已知刀具直径为20mm，单线右旋螺纹螺距为2mm，螺纹加工起点刀具中心距离回转中心40mm。考虑到加工质量，在X、Y平面内，刀具首先定位到原点，然后沿轨迹切向切入；在Z方向，刀具切出工件轮廓2mm，保证螺纹完整，则加工螺纹总圈数为51圈。加工程序为：

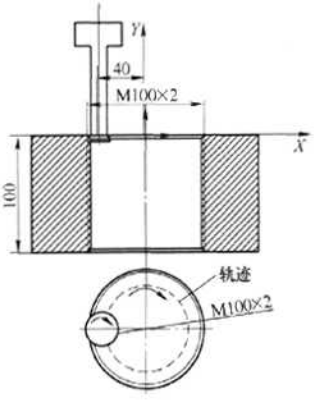


图 1

```
O0001
G90 G40 G80 G49
G54 G00 X0 Y0
Z100
M03 S2000
Z10
G01 Z0 F1000
G02 X-40 Y0 R20
M98 P0002 L51
```

```
G01 X0 Y0
Z100
M30
O0002
G92
G02  I-40  Z-2
M99
```

3. 锥螺纹工艺

对于锥形内螺纹，编程较为复杂，只利用圆弧插补无法完成，必须借助宏程序编程。下面以如图 2 所示内螺纹为例，进行编程。已知刀具直径为 20mm，锥螺纹锥度为 10°，所以轴向螺距为 2mm，右旋，螺纹的起始半径为 50mm，螺纹加工起点刀具中心距离回转中心 $b=40$mm。轨迹 1 为刀具在 Z 轴方向进给坐标轨迹，轨迹 2 为刀具在 X、Y 向进给轨迹，轨迹 3 为螺纹铣削加工前的切入、切出轨迹。

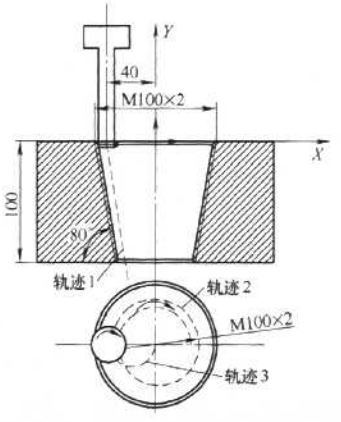


图 2

（1）编程分析　锥螺纹加工时，刀具的实际轨迹为在锥面上的等距螺旋线，需要刀具进行三轴联动。刀具中心每转过 360°，刀具在轴向（Z 轴负向）移动一个螺距 $P=2$mm。同时，刀具中心在 X、Y 平面内与回转中心的距离缩短 μ，P 与 μ 的关系为：$\mu/P=\tan10°$。对刀具回转角度进行适当的 n 等分，n 等分的前提要保证加工质量，则每一等份 $\delta=\dfrac{360°}{n}$，那么，刀具每转过 δ，刀具中心在 X、Y、Z 方向的移动量均与 δ 存在一定的关系，找出关系式，运用宏程序功能就可以实现编程加工。

（2）数学建模　结合图示尺寸计算如下

设　　$n=360$

$$\delta=\frac{360°}{n}=\frac{360°}{360}=1°$$

刀具每转过一个 δ，在 Z 轴方向刀具中心就移动 Δz

$$z'=\Delta z=\frac{P}{360}=\frac{2}{360}$$

$$\mu=P\tan10°$$

则：刀具每转过一个 δ，刀具中心距离回转中心就减少 Δr。

$$\Delta r=\frac{P\tan10°}{360}$$

$$r'=b-\frac{P\tan10°}{360}=40-\frac{P\tan10°}{360}$$

$$x'=r'\cos\delta \qquad y'=r'\sin\delta$$

（3）数控编程　考虑到加工质量，在 X、Y 平面内，刀具首先定位到原点，然后沿轨迹 2 切向切入；在 Z 方向，刀具沿轨迹 1 切出工件轮廓 2mm，保证螺纹完整，则加工螺纹总圈数为 51 圈。选择 × × × × 刀具，则程序如下：

```
O0003
G90 G40 G80 G49
G54 G00 X0 Y0
Z100
M03 S2000
Z10
G01 Z0 F1000
G02 X-40 Y0 R20
G65 P0004 I2 J10 K40 D51
G01X0 Y0
G00 Z100
M30
O0004
#1 = #4/360
#2 = #4 * TAN#5
#3 = #2/360
#31 = 0
#32 = 0
WHILE [ #31LE#7 ] DO1
WHILE [ #32LE360 ] DO2
#32 = #32 + 1
#11 = #3 * #32
#12 = 40 - #11
#13 = #2 * #31 + #12
```

```
#14 = #1 * #32
#21 = #13 * SIN [#32]
#22 = #13 * COS [#32]
#23 = 2 * #31 + #14
G01 X#21 Y#22 Z#23
END2
#32 = 0
#31 = #31 + 1
END1
M99
```

4. 结语

旋风铣削法来加工大型精密内螺纹，能严格控制中径公差，加工精度好，效率高。采用子程序技术，用参数 *I*、*J*、*K* 代替语句中的数码和数值，能适用于不同直径、不同螺距、不同深度的螺纹加工，对于不同类型的螺纹，只需修改程序中的参数即可，具有一定的通用性。程序按刀具中心轨迹编写，所以不需要使用刀补功能，程序简单，修改方便。

以下内容为本刊审稿专家对螺纹铣削的精彩点评，现整理如下，供读者借鉴。

专家点评：对于图 1 的螺纹铣削，也可直接使用 FANUC 0*i* - M 系列螺纹切削功能 G33（不同于车床），只不过将车刀变为铣刀即可，增加主轴指令即可，不必使用宏程序或子程序。如图 3 所示。

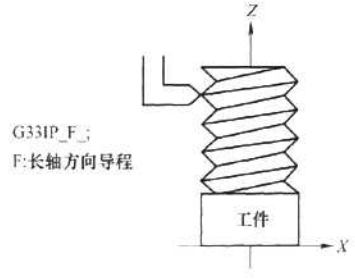


图 3

```
G90 G40 G80 G49
G54 G00 X0 Y0
Z100
M03 S2000
Z10
G01 Z0 F1000
G33 Z - 100. F2
G01 X0 Y0
Z100
M30
```

实际上现代数控螺纹加工效率最高的是以下两种：

（1）滚压头数控加工　例如北京减振器厂从澳大利亚引进的减振器螺纹加工技术就是滚压加工，优点是被加工金属属于冷挤压变形，螺纹表面金相组织以呈带状分布的奥氏体为主，螺纹强度比车、铣的都高。但是内螺纹加工的确行不通。如图 4 所示。

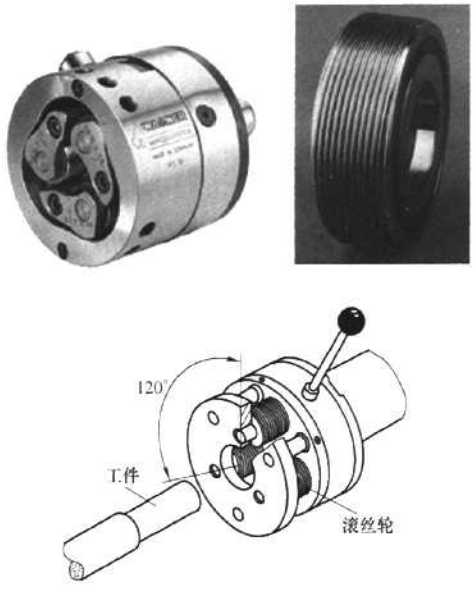


图 4　滚丝头滚丝

（2）成形螺纹车刀　例如石油钢管锥管螺纹数控车削采用“组合成形车刀”数控加工（见图 5），效率非常高。

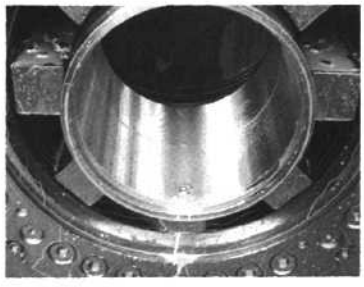


图 5

目前西门子和 FANUC 系统都可以方便地提供“锥螺纹加工”、“鼓型螺纹加工”的 G 代码程序指令，对于本文的案例若可以采用立式车床的话，可以直接采用这些指令加工。请读者参考。**MW**

（收稿日期：20101114）