FANUC 32*i*圆锥插补功能的扩展与应用

德州联合石油机械有限公司　（山东　253034）　侯祖刚　魏开龙　王泽涛

摘要： FANUC 32*i*数控系统中，新增圆锥插补功能，刀路均匀流畅，使一些相对复杂的曲线路径在手工编程中成为现实，广泛应用于旋转类曲面的铣削加工，取得了很好的加工效果，以锥螺纹和球窝曲面编程为例，介绍圆锥插补功能的扩展与运用。

在FANUC 32*i*数控系统中，G02/G03指令被赋予更多的功能，除了常规的圆弧插补和螺旋线插补外，通过指定旋转次数或者每转的半径增量值，即可进行平面螺线插补，在此螺线插补的基础上再增加一个垂直于圆弧平面的直线轴运动，即可进行圆锥插补。圆锥插补的刀具路径，几乎适用于所用旋转曲面的精铣加工，整条路径由一组规律变化的锥螺旋线组成，路径中没有进给速度和进给方向的突然转变，从下刀到抬刀一气呵成，刀路行距均匀，简洁流畅，具有不可比拟的优势。

FANUC数控系统早期的0*i*版本，注重于系统的兼容性和稳定性，一般只配置标准的插补功能，将一些特殊的曲线编程寄托于用户宏程序的使用与开发。掌握宏程序需要较高的数学知识和逻辑思维能力，令很多编程员望而怯步，无奈之余，只能借助于自动编程软件。FANUC 32*i*站在普通用户的角度，增加了很多实用功能，其中的圆锥插补可以说是一次跨时代的进步，使一些相对复杂的曲线路径在手工编程中成为现实。以锥螺纹和球窝曲面为例，谈谈圆锥插补的扩展与运用，希望对大家有所帮助。

1. 锥螺纹

锥螺纹铣削一直是数控编程的难点。与直螺纹的区别在于：螺旋线沿导程方向延伸的同时，半径因锥角作用逐渐放大或缩小。受此影响，每一圈螺旋线的起点和终点都不在同一圆柱面上，很难用标准的螺旋线插补编程。即使一些主流的编程软件也没有什么捷径，普遍采用等分直线段拟合螺旋线的方法，理论上勉强可以接受。

实际加工中存在一定的轮廓误差，在线段的连接处，刀具出现短暂的停滞，反映在螺纹牙型表面上，是一圈断断续续的接刀痕迹，低配置的数控机床尤为明显。数控高手各显其能，灵活运用宏程序推出了很多锥螺纹编程方法，不足之处是必须更改相关的参数，受系统版本和机床性能的限制，存在很大的风险和差异。FANUC32*i*系统的圆锥插补功能彻底解决了这一难题，螺纹部分一个程序段就可以搞定，数控机床像执行普通螺旋线指令一样，轻松自如地完成锥螺纹铣削，既省去了软件编程的长篇大作，又避免了宏程序的复杂运算，有效扩展了手工编程的范围。

和台阶的长度，然后根据测量的结果使用磨耗补偿功能，让跳步有效直接进行一次半精车，然后再测量补偿，直至最终达到零件的加工精度。

5. 结语

该编程方法的优势在于“不跳进行粗加工，跳就进行精加工”，和传统编程方法相比具有编程直观，操作简便的特点。其他数控车指令如G72、G73以及数控铣床的编程与操作也可参照于此。**MW**

（收稿日期：20150417）

编程格式：G17 G02/G03 X_ Y_ Z_ I_ J_ K_ Q_ L_ F_

X_ Y_ Z_是指锥螺纹终点的坐标值；I_ J_ 从螺旋起点到中心的矢量值，与圆弧插补相同；K_ 螺旋线旋转一周的高度增减值；Q_ 螺旋线旋转一周的半径增减值；L_ 重复次数（不带小数点的正值）；F_ 进给速度；当I/J/K与Q、L发生定义冲突时，可视情况省略其中的两项。

以图1特制油管扣为例，设工件上表面与锥孔中心线为G54加工坐标系原点。选用ϕ30mm单齿螺纹铣刀，主轴正转，自下而上顺铣加工，程序中的螺纹终点坐标值，按螺距和锥度的整数倍进行圆整处理，省略*Q*半径增减值，由系统自动计算，程序如下：

```
T02 M06；
M03 S1000；
G17 G54 G90 G40 G49 G0 X0 Y0；
G0 G43 Z-60 H02；(下刀至螺纹起始深度)
G41 X28.5 Y-5 D02；（启动刀具半径补偿）
G03 X33.5 Y0 R5 F300；（圆弧切入至螺纹径向尺寸）
G03 X35.47 Y0 Z3.5 I-33.5 J0 K2.54 L25 F300；（圆锥插补铣削螺纹）
G0 G40 X0 Y0；（在安全高度直接退刀）
G91 G28 Z0；
M5 M30；
```

铣削螺纹锥孔，与铣削锥螺纹没有太大的区别，同样适用于圆锥插补，只不过螺旋线的行距更密一些，此时只需将螺纹铣刀更换为镗刀或者立铣刀，重新设置圆锥插补的两个参数即可，注意螺旋线的开始方向改为自上而下顺铣，因为螺纹孔的铣削方式与螺纹的旋向无关。顺铣的效果要好一些，自上而下加工便于观察和测量，根据实践经验和机床验证，螺旋线行距*K*=0.2mm,即可以得到很好的锥孔精度。为了便于装配和操作安全，螺纹锥孔一般都要求45°倒角，我们可以参照锥孔格式，再增加一段45°圆锥插补，修改*Q*=*K*，即可完成孔口倒角（见图2）。本例中选用ϕ30mm立铣刀，自上而下顺铣加工锥孔，程序如下：

```
T01 M06；
M03 S1000；
G17 G54 G90 G40 G49 G0 X0 Y0；
G0 G43 Z4.0 H01；
G01 G41 X34.0 Y-5 D01；（启动刀具半径补偿）
G03 X32.0 Y0 Z-60 I-34.0 J0 K0.2 F500；（圆锥插补铣削螺纹锥孔,省略Q、L值，由系统自动计算）
G03 X27.0 Y-5 R5 F500；（圆弧切出方式退刀）
G0 G40 X0 Y0；（取消半径补偿）
G0 Z1.0；（退刀至安全高度）
G01 G41 X38.2 Y0 F300；（进给至孔口倒角尺寸）
G03 X35.2 Y0 Z-2 I-38.2 J0 Q0.2 K0.2 F500；（圆锥插补铣削45°倒角）
G0 G40 X0 Y0；（取消半径补偿）
G91 G28 Z0；
M5 M30；
```

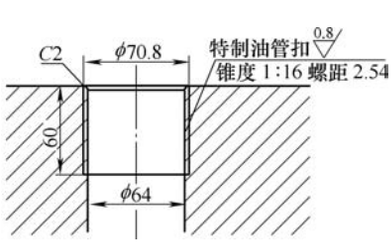

图1　特制油管扣锥螺纹

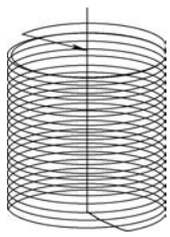

图2　锥螺纹铣削路径

经螺纹测量仪和标准扣规双重检验，铣削后的锥螺纹表面精度和各项尺寸均符合图样要求，圆锥插补不仅降低了编程难度，加工效率也在原来的基础上提高了一倍。

2. 球窝曲面

球窝又称凹形半球面（见图3），主要应用于钢球定位和万向轴连接，工厂多采用数控铣削的方法，用小直径的球头铣刀，通过编程路径去铣削较大直径的球窝。选择什么样的切削方式才能达到光洁圆滑、没有瑕疵的球面效果，是编程思路的关键。MasterCAM编程软件中，适用于球窝铣削的最佳路径是流线刀路中的螺旋线切削方式，这是真正意义上的3D等步距加工。可惜的是：软件采用等分三维线段拟合螺旋线的方法，加工中存在一些弊端。认真研究FANUC 32*i*系统的圆锥插补功能，与其有着惊人的相似之处，扩展思路，能否灵活应用于球窝曲面的精加工？答案是肯定的。

前面的锥螺纹铣削案例中，圆锥插补中的行距保持不变，半径也自始至终按固定值增减变化。球窝不同于锥孔，依靠固定的编程格式很难做到，编程的关键是解决相邻两圈锥螺旋线半径和深度不断变化的问题。我们可以将宏程序变量融入圆锥插补，

根据球窝曲面的特征，以*XOZ*平面的切削点起始角度为单位，将流线刀路等分为90圈首尾相连的锥螺旋线，以变量控制圆锥插补中的行距和半径变化值，即可以达到快捷编程的目的（见图4）。

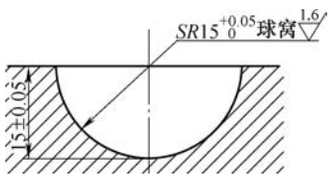

图3　球窝曲面

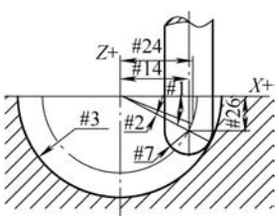

图4　球窝编程示意图

以图3*SR*15mm球窝为例，选用ϕ12mm球头铣刀，以球心为刀位点直接按刀具运动轨迹编程，设定工件球窝中心为G54坐标系零点，按*XOZ*平面内切削点起始角度为自变量，由上至下精铣加工，程序如下：

#1=0 （切削点起始角度值）

#2=1 （角度步进值）

#3=15 (球窝半径)

#7=6 (球头铣刀半径)

T01 M06；

M03 S2000；

G17 G54 G90 G40 G49 G0 X0 Y0；

G0 G43 Z0 H01；（起始高度）

G01 X[#3-#7-3] Y-3 F300；

G03 X[#3-#7] Y0 R3 F300； (圆弧切入进刀)

N10 #24=[#3-#7]×COS#1；（螺旋线起点*X*坐标值计算）

#14=[#3-#7]×COS[#1+#2]；（螺旋线终点*X*坐标值计算）

#26=[#3-#7]×SIN[#1+#2]；（螺旋线终点*Z*坐标值计算）

G03 X#14 Y0 Z-#26 I-#24 J0 L1 F300；

（圆锥插补铣削一圈，省略*K*、*Q*值，由系统自动计算）

#1=#1+#2； （角度变量递增）

IF [#1 LE 90] GOTO 10；（终止条件比较）

G91 G28 Z0；

M5 M30；

通过刀具运行轨迹（见图5）可以看出，圆锥插补沿着球窝圆周方向生成流线切削刀路，可以精确控制曲面的残脊高度和整体误差。球头铣刀以球窝最大半径方向为起始点，沿锥螺旋线切削至球窝底部。没有刀具停顿和切削方向的转变，没有进刀、退刀留下的痕迹，铣削过程中，球头铣刀的切削刃始终与球窝加工曲面保持切点接触，背吃刀量一致，进给速度均匀，就像削苹果一样，达到很好的加工效果。编程的巧妙之处在于圆锥插补与宏程序变量的完美结合，在圆锥插补的格式中设置变量，对变量赋值并设定相互之间的数学方程式与逻辑关系，一圈锥螺旋线恰好是一个加工循环，系统有足够的时间进行处理和运算，程序执行过程更加流畅。经批量加工和追踪检验，球窝轮廓精度和表面粗糙度值全部符合技术要求，创造出很高的经济效益。

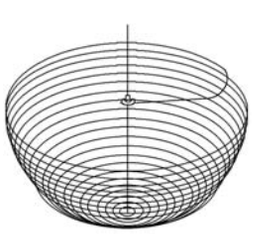

图5　球窝精加工刀具轨迹

3. 注意事项

圆锥插补过程中，基于系统设置的加减速功能有效，越靠近螺旋中心，进给速度越慢，当螺旋线旋转一周的半径增减值较大时，编程时尽量不使用刀具半径补偿，而是直接对刀位点运动轨迹编程，这样可以避免不必要的错误和报警。当程序指定的螺旋线终点位置与系统根据（*I*/*J*/*K*/*Q*/*L*）自动计算出的实际位置存在偏差，并超过参数（NO.3471）设定的范围时，会出现（PS5123）报警，程序停止运行。解决方法：①对圆锥插补中的各项数值进行圆整处理，有关联的设置尽量保持整倍函数关系。如果指定的圆心矢量 *I*/*J*/*K*与半径增量值*Q*及重复次数*L*存在不可调和的矛盾时，可以省略其中的两个，由系统自行计算。②在参数（NO.3471）中设定较大的允许偏差值。即使程序中存在一定的计算误差，也不影响正常运行。

参考文献：

[1] 北京发那科技术中心.FANUC 32I加工中心系统用户手册[Z].北京：北京发那科机电有限公司，2010.

[2]（美）斯密德.FANUC数控系统宏程序及编程技巧[M].北京：机械工业出版社，2011.

[3] 陈海舟.数控铣削宏程序及应用实例[M].北京：机械工业出版社，2011.

[4] 刘力键.数控加工编程与操作[M].北京：清华大学出版社，2007.

MW (收稿日期：20150317)