等牙顶宽变螺距螺杆的数控四轴铣削加工

广东省工商高级技工学校 （乐昌 512200） 张 延

变螺距螺杆在实际生产中应用并不鲜见，如在塑料、橡胶、造纸等行业使用的挤出螺杆，饮料罐装机械中的定距分隔定时供给装置等。此外，变螺距螺杆在航空机械、船舶工业及医疗器械等领域都有相当关键的应用。所以，对于此类螺杆的设计与加工，也日益成为机械工程人员需要攻关的课题之一。

如图1所示为一种用于挤压设备中的挤压螺杆，因此类螺杆螺距大，笔者尝试用车削的方法进行加工，发现加工难度大且不容易保证精度与表面粗糙度要求，采用立式四轴加工中心铣削则效率可提高很多且表面粗糙度值较小。笔者同时还发现，对于铣削等牙顶宽的螺杆使用软件编程，反而导致工作量变大（如后置处理方面及多番数学建模）或精度难以保证，相比之下，用宏程序编写此类程序则相对简短直观，加工柔性较强。

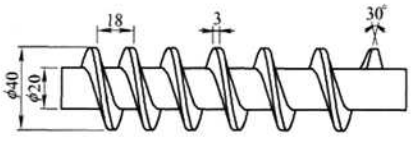


图1 等牙顶宽变螺距螺杆

一、等牙顶宽变螺距螺杆结构分析

已知此变螺距螺杆为右旋螺杆（见图1），材料为45钢，其初始螺距为18mm，螺距增量为2mm，螺旋线圈数为6，牙顶宽为3mm，其螺距的排列符合等差数列规律

$$P_n = P_1 + (n-1)K \qquad (1)$$

式中 n——螺旋线圈数，$n=6$；

P_n——第 n 圈螺旋线的螺距（mm）；

P_1——初始螺距（mm）；

K——螺距增量（mm）。

将已知条件代入得最大螺距为

$$P_n = 18 + (6-1) \times 2 = 28(\text{mm})$$

螺旋线上任意点至起始点在螺杆轴线方向上的距离为 S_n，其符合等差数列前 n 项和公式，则

$$S_n = nP_1 + \frac{n(n-1)}{2}K \qquad (2)$$

将已知条件代入得螺旋部分轴向总长为

$$S_6 = 18 \times 6 + \frac{6 \times (6-1)}{2} \times 2 = 138(\text{mm})$$

二、加工工艺方案

1. 基本加工方法

采用四轴立式加工中心（西门子 SINUMERIK 802D 系统）进行铣削，通过 X 轴与 A 轴的联动控制来实现铣削螺旋槽，通过 X 轴与 Z 轴的联动来实现用分层斜进法进行铣削。具体为预先把加工余量分为若干层（图2中的梯形为螺杆中一个牙槽的总余量），由外至内分层加工（层数可由铣刀背吃刀量确定），各层加工沿梯形牙槽左侧向下斜进；而每层又分为若干刀进行加工（各刀数由铣刀侧吃刀量确定），使得每刀铣削时的用量基本相同，降低了加工难度。

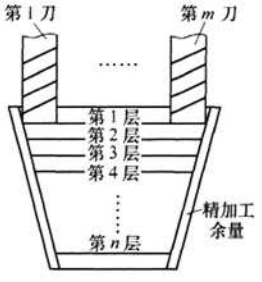


图2 分层斜进铣削法图解

2. 实现等牙顶宽变螺距螺杆的关键工艺处理

（1）结合运用微分方法及等差数列式（2）的方法，可编辑出铣削变螺距螺旋线的宏程序主体。

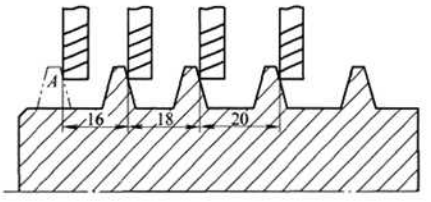
（2）车削时，由于在螺纹切削的开始及结束部分 X 轴及 Z 轴有加减速过程，因此应在实际的螺纹起点与结束点留出螺纹引入长度与引出长度的距离，否则容易造

成过切。这时设引入段为一个螺距，引出段为半个螺距，由于是变螺距螺杆，所以螺纹引入段长度（或称引入段螺距）l 应取

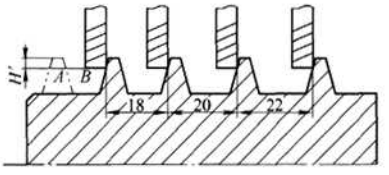
$$l = P_1 - K = 18 - 2 = 16\ (\text{mm})$$

加工时，总螺旋圈数为 $n = 6 + 1 + 0.5 = 7.5$。

（3）分层铣削加工螺纹余量时，往往需分数刀进行拓宽。加工等槽宽螺杆时只要经计算平移起刀点，就可实现“拓宽”槽宽的目的。但加工等牙宽变螺距螺杆时则不容易实现，因为不可能使铣刀在加工过程中刀具直径“自动变大”，所以只能另辟蹊径。如图 3 所示，刀



（a）分层斜进法各层加工刀具左极限位置（第一刀）



（b）分层斜进法各层加工刀具右极限位置（第 m 刀）

图 3

具由右至左（即 X 轴正方向）进给时，从刀具在某层加工的第一刀和最后一刀刀具的极限位置可以看出，其加工时掠过的螺距同样符合等差数列排列，但初始螺距是不同的。在左极限位置即第一刀加工时初始螺距为 16mm，而右极限位置即最后一刀初始螺距为 18mm，相差一个螺距增量 2mm，由此可知：①每层切削时各刀初始螺距介于 16 ~ 18mm 之间，各刀初始螺距呈等差数列，如螺距增量为 2mm，每层分 5 刀时，其公差为 $2 \div 5 = 0.4$（mm），螺距分别为第一刀 16mm，第二刀 16.4mm，第三刀 16.8mm……以此类推。②铣刀各起刀点的 X 值介于 AB 之间，如每层分 5 刀时，仍如初始螺距一样，各起刀点 X 值仍呈等差数列，公差为 $AB/5$，而

$$AB = P - S - 2H'\tan\frac{\theta}{2} - D$$

式中 P——螺距（mm）；

D——刀具直径（mm）；

S——牙顶宽度（mm）；

θ——牙型角（图 3 所示为 30°）（°）；

H'——图 3b 中所示长度（mm）。

所以在分层加工时，每层的走刀要同时修改起刀点及初始螺距才可以，这也是解决车铣此类等牙宽变螺距螺杆问题的关键所在。图 3 中虚线螺牙是为了明确引入段螺距，实际加工中并不存在。

3. 装夹方法

此工件为细长螺杆，为增强其刚性，故采用在第四轴（A 轴）上一夹一顶的方法进行装夹。

4. 刀具选择

粗加工时，选用硬质合金 YT15 四刃平底立铣刀。由已知计算得最小牙底宽为 7.64mm，所以刀具直径应小于 7.64mm，可选 6mm 平刀；精加工时，选择 R3mm 球刀精加工螺牙两侧，6mm 平刀精加工牙槽底及清根。

5. 切削用量的选择

粗加工时，由《金属切削速查速算手册》查得每齿进给量 $f_z = 0.03$mm/z，切削速度 $v_c = 120$m/min，背吃刀量 $a_p = 1$mm，但考虑到有全径切削的情况及工艺系统刚性较差，避免切削时振动，故根据经验降低切削速度及进给量。最终选择 $f_z = 0.02$mm/z，$v_c = 50$m/min，则有

$$\text{主轴转速 } n = \frac{1\,000v_c}{\pi d} = \frac{50 \times 1\,000}{3.14 \times 6} = 2\,654\ (\text{r/min})$$

圆整后为 2 650r/min。

$$\text{进给速度 } v_f = f_z zn = 0.02 \times 4 \times 2\,650 = 212\ (\text{mm/min})$$

精加工时，经计算可选择 $n = 5\,000$r/min，$v_f = 300$mm/min。

6. 工艺路线

（1）6mm 平刀开始粗加工，螺牙两侧及底边留余量 0.2mm。牙高 $H = 10$mm，背吃刀量 $a_p = 1$mm，径向分 10 层（$n = 10$）加工；又由式（1）可知其最大螺距为 28mm，牙顶宽 3mm，经计算得到最大牙底宽为 19.64mm，则粗加工时每层加工至少为 4 刀，故设定每层分 4 刀（$m = 4$）加工。

（2）R3mm 球刀精加工侧面，6mm 平刀精加工底面及清根，如图 4 所示。图中 R11 与 R107 均为宏程序中参数而非尺寸。

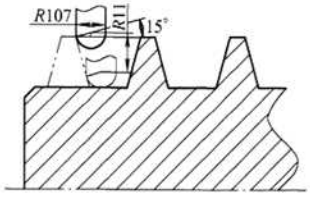


图4 精加工

三、程序的编辑

（1）加工采用手工编制多重循环的宏程序，径向分层为一重循环，轴向走刀为二重循环，变螺距螺旋线为三重循环，所以此程序总共为三重嵌套宏程序。为方便编程可先画程序框图（文中略）再行编程。

（2）以 O 为编程原点，编写宏程序（见图5）。

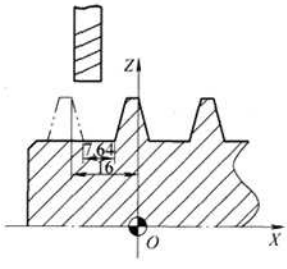


图5 加工开始

（3）粗加工程序及其简要说明如下：

O7502（粗加工程序）

G91G28Z0

T1 M6（ϕ6mm 平刀）

G90G54G00X0Y0A0M3S2650

G00X－20.0ZA0

R3＝40（螺杆大径）

R11＝9.8（螺纹牙高/粗加工余量，牙底留0.2mm余量）

R21＝5（径向加工层数）

R23＝6（轴向加工刀数）

R18＝18（初始螺距）

R19＝3.4（牙顶宽，牙两侧各留0.2mm余量）

R20＝30（牙型角）

R13＝7.5（螺旋总圈数）

R6＝2（螺距增量）

R7＝6（铣刀直径）

R8＝R18－R6（引入段基本螺距）

R17＝R8－R19－2＊TAN（R20/2）＊R11（引入段螺距槽底宽）

R22＝R11/R21（径向每层切削深度 $h=H/U$）

R1＝1（径向分层序数 n）

MAKE2：IF R1＞R21 GOTOF MARK1（若 $R1 \leqslant U$ 层执行循环体1程序）

R100＝R3/2－R22＊R1（径向分层加工时各层的 Z 坐标）

R106＝－R8＋R7/2＋R22＊R1＊TAN（R20/2）（径向分层加工时各层起刀点的 X 坐标）

R2＝1（各层轴向走刀序数 m）

MAKE4：IF R2＞R23 GOTOF MAKE3（若 $R2 \leqslant W$ 刀执行循环体2程序）

R105＝R11－R22＊R1（中间变量 $H-hn$）

R24＝R105＊TAN（R20/2）＊2＋R17－R7（各层加工时第一刀与最后一刀切削起点右移总量 Q）

R25＝R24/（R23－1）（中间变量 $Q/(W-1)$）

R26＝R25＊（R2－1）（各层加工时各刀轴向右移量）

R101＝R106＋R26（各刀切削起点的 X 坐标）

R27＝R6/（R23－1）（螺距增量 $K/(W-1)$）

R28＝R8＋R27＊（R2－1）（各刀初始螺距）

G00 X＝R101（刀具 X 快速定位）

G00Z25（下刀）

G01Z＝R100 F400（进刀到切削起点）

R4＝0（螺旋圈数）

MAKE6：IF R4＞R13 GOTOF MAKE5（若 $R4 \leqslant m$ 圈执行循环体3程序）

R102＝R4＊360.（螺旋圈数化为所对应的角度）

R103＝R28＊R4＋R4＊（R4－1）＊R6/2＋R101（切削终点的 X 坐标）

G64 G01 X＝R103 A＝R102 F210（执行加工）

R4＝R4＋0.02（螺旋圈数自增）

GOTOB MAKE6

MAKE5：G00 Z25.0（抬刀）

G00 A0（A 轴回零）

R2＝R2＋1（刀序数自增）

GOTOB MAKE4

MAKE3：R1＝R1＋1（层序数自增）

GOTOB MAKE2

MAKE1：G00 Z80

G00X0Y0

M5

M2

（4）精加工时，以球刀球心为刀位点进行对刀，程序仍可参照粗加工程序编写，除需修改切削用量之外，

西门子 802C 配超同步主轴驱动器实现刚性攻螺纹功能

深圳市捷甬达实业有限公司 （广东 518111） 罗勇刚 陈 浩

西门子 802C 数控系统和超同步主轴伺服驱动器在经济型数控机床上有着广泛的应用，一般用于简单的铣削和车削加工。随着用户对经济型数控机床功能要求的提升，越来越多的客户要求实现刚性攻螺纹、主轴分度等特殊功能，本文介绍了西门子 802C 数控系统和超同步主轴伺服驱动器在数控铣床上实现刚性攻螺纹功能的方法。

1. 硬件连接

系统与主轴驱动器硬件连接如图 1 所示，西门子 802C 输出信号控制主轴伺服驱动的运转使能、运转方向、刚性攻螺纹、准停、外部报警输入等信号，驱动器发出的驱动器准备就绪信号、准停完成、驱动器故障等信号通过接口 X101 输入系统，主轴转速由 -10V ~ +10V 模拟电压控制。

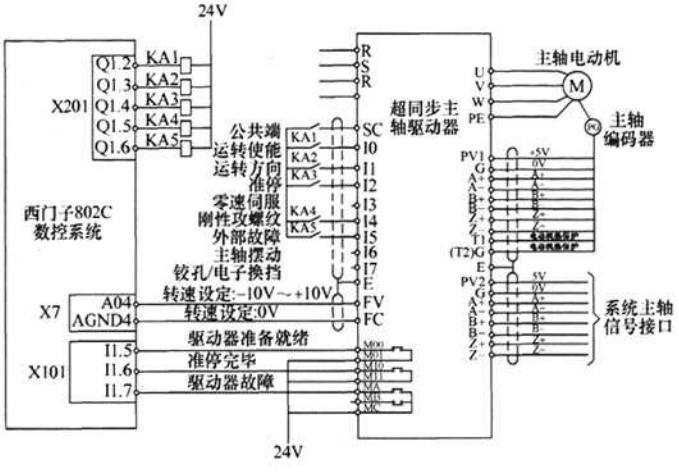


图 1

2. 功能实现

普及型数控系统配通用性伺服主轴实现刚性攻螺纹还需修改：①首末层间 Z 向距离（如R11 = 10 + R7 * SIN（R20/2）/2 - R7/2，下划线部分意为与粗加工不同之处，其中相关参量计算可参照图 5，下同）。②径向加工层数R21 = 10）。③轴向加工刀数（R23 = 2）。④球刀参与切削的实际 X 向直径（如R107 = R7 * COS（R20/2））。⑤径向分层加工时各层的 Z 坐标（如R100 = R3/2 - R22 * R1 + R7 * SIN（R20/2）/2）。⑥各刀切削起点的 X 坐标［如 R101 = R106 + R26 -（R7 - R107）/2］。

（5）精加工及清根可参照粗加工程序及以上参量（具体程序略）。

四、结语

（1）在实际加工时，与 X 轴联动的第四轴可能出现断续转动现象（如使用西门子 SINUMERIK 802D 系统加工时会出现），使用连续切削指令 G64 可有效解决这一现象。

（2）因四轴加工是工件旋转会产生较大背向顶力，加工中可用两刃铣刀开粗，避免旋转的背向刀顶崩刀具；也可以编程时让刀具在 Y 向偏移一个刀具半径，但这样会影响加工精度。

（3）加工梯形螺纹牙时，可先选择大直径刀开粗到一定直径，后选择小直径刀开粗到牙底部，此法可适当提高加工效率。

（4）使用此程序虽可顺利完成试切削，但在实际加工中还有很多工艺问题值得进一步探讨和实践。**MW**

（收稿日期：20100910）