

文章编号:1000-582X(2004)011-004-04

大升角内螺旋槽加工新方法*

王光建,梁锡昌

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:大升角、小尺寸内螺旋槽的加工存在诸多干涉,其加工是一个难题。在分析了不同加工情况如平行轴加工、交错轴加工,使用不同加工刀具时,刀具的回转面截形的设计和计算;提出了使用圆弧刀具进行逼近加工的方法,经计算分析表明,只要在允许误差范围内,此方法是可行的;在此基础上,利用典型软件如I-DEAS软件的Program files功能、UG软件的加工模块,针对不同加工情况进行了螺旋槽加工的计算机仿真,如刀具路径仿真,加工误差分析,检验刀具设计的正确性等。

关键词:螺旋槽加工;刀具设计;加工仿真

中图分类号:TH164

文献标识码:A

圆柱螺旋面在机械传动及机构中应用十分广泛,典型的有如:航空机翼旋转作动器;刀具的螺旋容削槽;丝杆、蜗杆;逆滚动螺旋机构^[1]。其加工方法一般采用成型盘状刀具或指状刀具通过铣削或车(拉)削进行加工螺旋面。即已知工件的螺旋槽和螺旋参数,设计出加工螺旋槽铣刀或砂轮的轴向截形,然后用此截形的回转刀具进行加工。在加工时,工件与刀具之间的相对运动为工件或刀具一方面沿Z轴进给,同时绕Z轴旋转,从而包络出螺旋面。

在加工内螺旋槽,尤其是加工小尺寸、大升角内螺旋槽时,由于空间的限制,存在如下干涉:

1) 指状刀具或盘状刀具加工时,刀杆与工件端面的干涉(图1、图2);

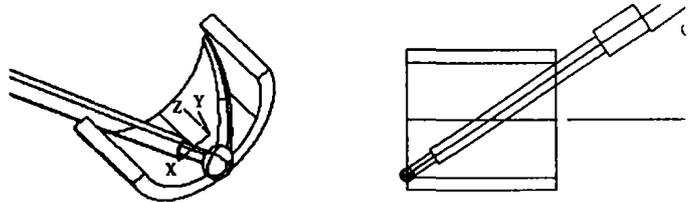


图1 盘状砂轮加工时的干涉 图2 指状刀具加工时的干涉

2) 当刀具半径太小时,刀杆底部与工件内表面的干涉(图3),因此需要对刀轴矢量的角度进行调整,从而进一步对刀具截形进行计算,或根据刀具截形验算工件截形。作者主要针对小尺寸($\phi 25$)、大升角(45°)内螺旋槽加工刀具的设计,成型加工和逼近加工进行

研究,该螺旋槽用于大升角的滚动螺旋副。

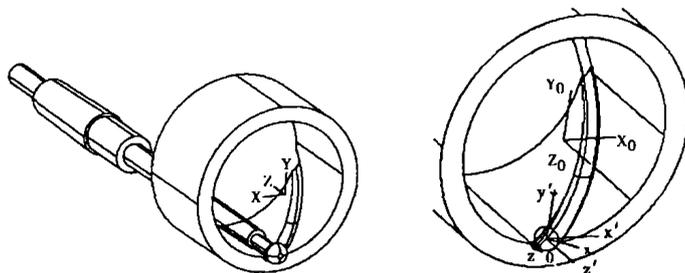


图3 刀杆与工件内表面干涉 图4 螺旋面坐标系

1 刀具回转面截形的常用设计方法

已知工件螺旋面方程,常用设计方法为:

1) 经典的原始方法是用作图法,这种方法既费时,精度又不高。尤其是当工件端截形由一批离散点组成,螺旋角又较大时,要在一张二维纸面上寻求三维共扼点是很困难的^[2]。

2) 利用三维CAD软件,如AUTOCAD,UG或IDEAS进行空间作图法设计,找出工件和铣刀的空间共扼点。这和方法(1)相比,可以利用CAD软件本身的一些模块,方便地求出空间切点,效率和精度都要高。

3) 利用解析法进行求解。根据螺旋面的方程式,加工安装参数,刀具回转面与工件螺旋面的接触条件,求出解析方程式,再进行求解。有时已知工件的截形求刀具回转面轴截形;或已知刀具轴截形,校验螺旋面

* 收稿日期:2004-09-09

基金项目:国家863机器人技术主题资助项目(2002AA423140)

作者简介:王光建(1973-),男,四川渠县人,重庆大学博士研究生,主要从事机械制造,机电传动,机器人控制等领域的研究。

截形。这种方法的缺点是：当在求解方程式时，可能是超越方程式，需要应用数值法求解，如牛顿迭代法求解，其解与迭代初值，迭代收敛性直接相关，不一定满足要求。其工件端面截形较为复杂时，更是如此。

4) 反求法，通常的加工是利用刀具加工工件。而反求法即假设工件已经加工好，而把刀具作为被加工件，使已加工工件对刀具毛坯进行加工。具体方法是在 CAD 软件上进行二次开发，或使用接口语言，进行布尔运算。

如果工件截形为给定的离散点时，也可利用解析式求解^[3]，归根到底这种方法还是解析法。

2 刀具截形的设计计算

对于上述小尺寸、大升角内螺旋槽加工，在粗加工时，可以在数控机床上，采用拉削加工；淬火后，则可以采用盘状砂轮或指状砂轮进行磨削加工；如果硬度不很高的情况下可以使用旋转锉进行加工。使用盘状砂轮或指状砂轮时，则需要进行刀具设计计算。在进行刀具设计时，首先要考虑砂轮杆和工件不发生干涉的条件，然后进行刀具（铣刀或砂轮）的截形设计。

2.1 圆螺旋面方程式

该螺旋槽是用于大升角的滚动螺旋副，因此，其螺旋面的形成可以看成圆弧沿螺旋线且垂直于螺旋线方向移动而包络而成的，该圆弧为螺旋面母线。

如图 4 所示，在坐标系 (x, y, z) 中，圆弧母线的方程式为： $l(u) = (rcos u, rsin u, 0, 1)$ 。

坐标系 (x, y, z) 与 (x', y', z') 的 z 轴与 z' 轴的夹角为 α ；坐标系 (x', y', z') 与坐标系 (X_0, Y_0, Z_0) 的 $x'z'$ 平面与 XZ 平面距离为 L ，则从 (x, y, z) 到 (x', y', z') 的座标变换矩阵和 (x', y', z') 到 (X_0, Y_0, Z_0) 的变换矩阵分别为：

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & L & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则坐标系 (x, y, z) 到 (X_0, Y_0, Z_0) 的变换矩阵为：

$$T_3 = T_1 T_2$$

则在坐标系 (X_0, Y_0, Z_0) 中的母线方程为：

$$r(u) = [x_0(u), y_0(u), z_0(u)] = l(u) T_3$$

则螺旋面相当于坐标系 (x, y, z) 中的母线绕坐标系 (X_0, Y_0, Z_0) Z_0 轴作旋转 θ 的运动，同时沿 Z 轴移动 $P\theta$ 的运动，其变换矩阵为 T_4 ：

则螺旋面方程为：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0(u) \\ y_0(u) \\ z_0(u) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} r\cos u \cos\alpha \cos\theta - (r\sin u + L)\sin\theta \\ r\cos u \cos\alpha \sin\theta + (r\sin u + L)\cos\theta \\ - r\cos u \sin\alpha + P\theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中： $T_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & P\theta & 1 \end{bmatrix}$

2.2 当刀杆轴线与工件轴线平行时，刀具的逼近加工

当设螺旋面点坐标的 z 坐标为 0 时，可求出螺旋面的端截形，工件螺旋面的端面截形如图 5 所示，此时

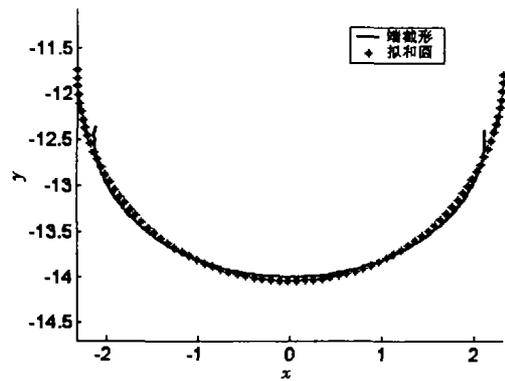


图 5 螺旋面的端截形与拟合圆对比图

若用最小二乘法将端截形用一个圆进行拟合，只要控制在误差允许范围内，则此时刀具端截形为直径为此拟合圆直径，其回转面轴截形可为一个较小的过渡圆弧。在刀杆不发生干涉（与工件内壁），刀具厚度足够薄时，此方法是可行的，可以通过仿真来确定加工精度等是否满足要求。

2.3 工件轴线与刀杆轴线为交错轴线加工时的加工

当交错轴加工时，其交错角度以不发生干涉，便于安装为主要考虑因素。图 1, 2, 3 为加工安装时的极限位置。刀具回转面轴截形需要通过计算来确定。其刀具截形的计算需要根据刀具回转面与工件螺旋面的接触条件来求解。

根据螺旋面是和刀具回转面相切的接触线条件，即在刀具回转面与工件螺旋面的接触点处有公共的法矢量；相对运动速度与公法线垂直。可表示为：

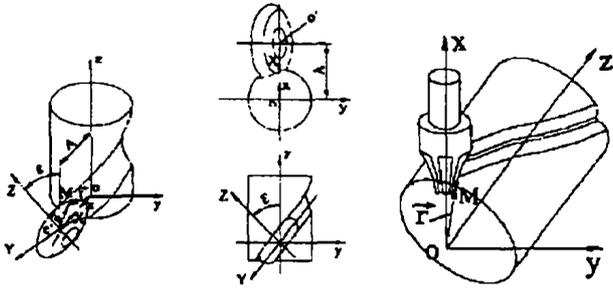
$$\omega'(\vec{k}' \times \vec{r}') \cdot \vec{n} = (\vec{k}' \times \vec{r}') \cdot \vec{n} = 0$$

其中： ω' 为刀具回转角速度。

上式表示刀具坐标系上作螺旋面的矢径 \vec{r}' 和螺旋面上该点的法线 \vec{n} 以及刀具的轴线 \vec{k}' 共面，则该点在接触线上。

2.3.1 盘状刀具截形的计算

如图 6 所示，工件坐标系和刀具坐标系分别为， $(0-x, y, z)$ 和 $(0'-X, Y, Z)$ ，刀具轴线与工件轴线的夹角为 ε ，其接触线方程式^[4-5]：



(a) 盘状刀具加工坐标系 (b) 指状刀具加工坐标系
图6 盘状刀具及指状刀具坐标系与工件坐标系

$z \cdot n_x + A \cdot ctg\varepsilon \cdot n_y + (A - x + pctg\varepsilon) \cdot n_z = 0$
联立方程(2),及求出接触线。

求解接触线方程,由于方程式已知 μ, α, ε ,代入方程式,则接触线方程式为:

$C_0 \sin\theta + C_1 \cos\theta + A_3 \theta \sin\theta + A_4 \theta \cos\theta + A_5 \theta - B = 0$
上式为超越方程,较难求出解析式,可采用牛顿迭代法求解。令:

$$f = C_0 \sin\theta + C_1 \cos\theta + A_3 \theta \sin\theta + A_4 \theta \cos\theta + A_5 \theta - B$$

求导得:

$$f' = C_0 \cos\theta - C_1 \sin\theta + A_3 \theta \cos\theta + A_3 \sin\theta - A_4 \theta \sin\theta + A_4 \cos\theta + A_5$$

则根据牛顿迭代公式代入进行求解:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \frac{f(\theta_k)}{f'(\theta_k)}$$

当取适当初值,且:

$\left[\frac{f(\theta_k) f''(\theta_k)}{[f'(\theta_k)]^2} \right] < 1$, 则牛顿迭代收敛。由解得的值代

入螺旋面方程,求得螺旋面与刀具空间接触线的接触点。再变换到工具坐标系:

$$\begin{cases} X = a - x \\ Y = -\cos\varepsilon - z \sin\varepsilon \\ Z = -y \sin\varepsilon + z \cos\varepsilon \end{cases}, \text{求得工具廓形的对应点坐标}$$

$$\text{标} \begin{cases} R = \sqrt{X^2 + Y^2} \\ Z = z \end{cases}$$

在上述的接触线方程式比较复杂,在误差范围内,可以考虑将端截形拟和成一个圆,来简化计算。

2.3.2 指状刀具的计算

指状刀具与工件坐标系关系如图,刀具的 z 轴与工件 Z 轴夹角为 α ,因此 x 轴与 X 轴的交角也为 α ,则从 $(0-x, y, z)$ 和 $(0'-X, Y, Z)$ 坐标系的转换矩阵为:

$$T_{10} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ m & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由接触线条件式得: $\omega'(\vec{k} \times \vec{r}') \cdot \vec{n} = (\vec{k}' \times \vec{r}') \cdot \vec{n} = 0$

同理,解超越方程,求得工具廓形的对应点坐标^[6-9]。
如果指状刀具的 X 轴线与工件 x 轴线不重合时,其情况要复杂一点,其转换矩阵不同。

3 内螺旋槽加工仿真

内螺旋槽加工的仿真,通常使用两种方法:

1) 通过实体造型和布尔运算,模拟刀具与工件的相对运动;

2) 利用现有CAM软件进行加工仿真。作者通过利用I-DEAS, Unigraphics软件进行了加工仿真。

3.1 利用I-DEAS软件进行加工仿真

利用Program Files是I-DEAS命令的外部文件,可以使用程序或用户定义的变量,包括屏幕位置,用户IO,数学或逻辑表达式,外部文件IO等许多强大功能。他在重现I-DEAS命令,自动执行重复任务及用户定义的命令等是十分有用的,可以通过创建(create)或执行(run)程序文件来实现许多功能。可根据指定的格式,符号,定义变量表达式等对程序文件进行编辑,以实现更多的功能。

具体步骤是:根据有关参数实体建模后,利用刀具与工件不断进行布尔减运算,从而形成要求的螺旋槽。最后利用I-DEAS软件的其它功能进行误差分析,参数修正等。图7所示为利用程序文件模拟加工示意图。

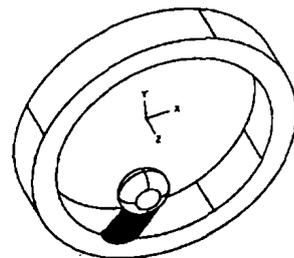


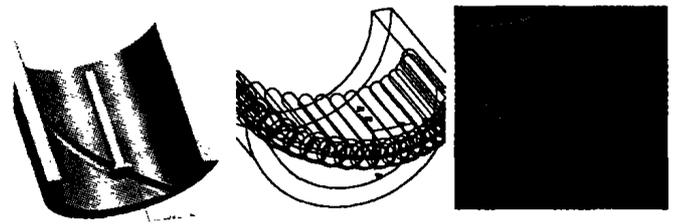
图7 利用Program Files进行仿真示意图

3.2 利用Unigraphics软件进行加工仿真

3.2.1 当刀杆与工件轴平行时的加工仿真

使用UG中的固定轴加工(Fixed Contour)进行仿真。仿真步骤为:

1) 根据设计好的刀具(铣刀或砂轮等)和安装参数,完成实体建模;



(a) 安装示意图 (b) 刀具轨迹 (c) 加工结果

图8 固定轴加工(Fixed Contour)仿真

2)使用刀具路径的驱动方法,刀具中心路径为距离螺旋面中心螺旋线法向距离为刀具半径的一条曲线;

3)进行刀具路径及加工校验(verify),按照要求的精度进行加工形状和精度比较(compare);其比较结果可以小面体(IPW)形式表示,过切区域(Gouge)和残余区域(Excess)均可以小面体形式产生表示。

图8中分别表示加工原理,刀具路径,和加工后的曲面形状,仿真证明,所设计的刀具符合加工要求。

3.2.2 当刀杆与工件轴为交错轴时的加工仿真

此时,要实现刀具绕工件轴线移动与旋转,因此需要使用变轴加工(VARIABLE-CONTOUR),此时刀轴矢量需要绕工件轴线旋转。与平行轴加工相比,仍然

使用刀具路径驱动,但刀轴矢量使用插补方式(interpolate),即在刀具路径上计算出若干轴矢量,只要数量合适,其插补精度是足够的。最后校验功能与前述相同。图9中分别表示加工原理,计算出的刀轴矢量,刀具路径,和加工后的曲面形状。

以上螺旋面法线的计算,刀具中心轨迹计算等,可使用 Matlab 语言进行辅助计算。需要说明的是,实际的刀具路径,是以刀具底端中心的路径,因此计算出的刀具中心轨迹,还需要沿刀轴偏置一个距离。

参考文献:

- [1] 梁锡昌. 特种螺旋传动机构的研究[J]. 机械工程学报, 2003, (39)10:106-110.
- [2] 奚威. 设计螺旋槽成形铣刀的 CAD 方法[J]. 工具技术, 1995, (29)12:11-13.
- [3] 吴序堂. 根据离散点计算螺旋面刀具截形原理[J]. 工具技术, 1990, 24(6):1-5.
- [4] 肖涤尘, 梁锡昌. 修形渐开螺旋面成形刀具 CAD[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1990, 13(1):13-22.
- [5] 吴序堂. 齿轮啮合原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1983.
- [6] 陈惟荣. 齿轮啮合理论[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1986.
- [7] 苏步青等. 实用微分几何引论[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [8] 乐兑谦. 金属切削刀具. 北京:机械工业出版社, 1986.
- [9] 陈志杰. 金属切削刀具向量计算方法[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 1997.

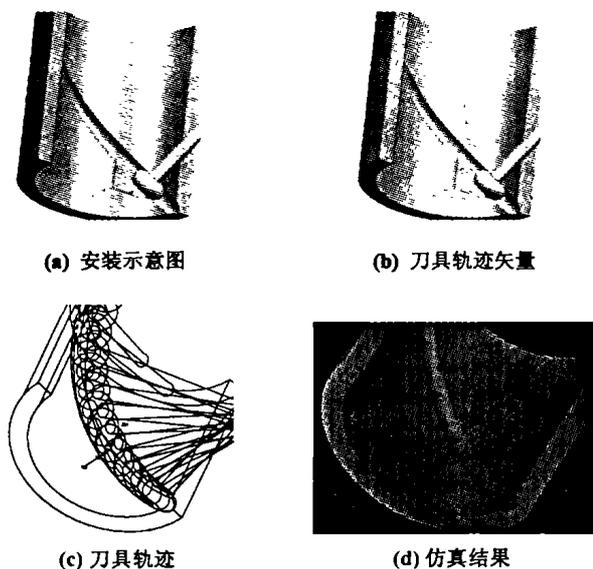


图9 变轴加工(VARIABLE-CONTOUR)仿真

New Method of Machining Internal Spiral Groove of a Big Lift Angle

WANG Guang-jian, LIANG Xi-chang

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, China, 400030)

Abstract: There exists much interference in machining internal spiral groove with big lift angle and small size, which is a difficult problem. The design and calculation of tool section is analyzed in this paper while different cutters are utilized to machine the groove when the tool axis is parallel or skew to that of the work piece. The approximating method of using circular-arc cutter is put forward, which is proved by the calculation and analysis to be a feasible method within range of the permissible error. The digital simulation of machining internal spiral groove which is finished by different methods, such as simulation of tool path, error analysis, verification of the cutter design and so on, has been done through typical software such as the Program files function of I-DEAS and the Manufacturing Module of UG.

Key words: machining spiral groove; cutter design; simulation of machining