

新型非圆轴数控加工系统的设计与实现

吴献钢* 黄大贵 陈 畅

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054)

【摘要】提出了一种新型的非圆轴数控加工系统,用于横截面为非圆形状的轴类零件加工。在由凸轮驱动机械式微进给机构的基础上,利用仿射变换构建了一种新型的极坐标插补算法,可实现任意非圆轴的加工成形。与其他同类系统相比,该系统具有切削力大、精度高、柔性好等优点。

关键词 数控; 活塞; 中凸变椭圆; 非圆加工; 微进给机构; 插补

中图分类号 TG51; TH16 文献标识码 A

Design and Implementation for a New NC Machining System of Non-Circular Shafts

Wu Xiangang Huang Dagui Chen Chang

(School of Electromechanical Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A new kind of NC system for machining shafts with non-circular cross-section is proposed in this paper. On the basis of a special micro-feed mechanism, which is driven by a simple cam, a new polar coordinate interpolation algorithm, which is based on affine transformation, is presented. By this method, shafts with any non-circular cross-section can be machined. Comparing with other similar systems, it possesses such advantages as: larger cutting force, better flexibility and higher precision et al.

Key words numeric control; piston; convex and vari-elliptical; non-circular cross-section; micro-feed mechanism; interpolation

一些轴类机械零件因工作性能要求,其横截面常设计成非圆形状,最典型的应用是在内燃机上广泛采用的中凸变椭圆活塞,这种活塞的裙部的横截面呈椭圆或者类椭圆形状,且椭圆度沿活塞轴向变化,轴(纵)截面型线为一条中部外凸的曲线^[1]。

国内外现有的非圆零件数控加工技术中^[2-5],大多采用了位置伺服控制下的电磁吸铁或者直线电机直接驱动刀架进行车削。电磁吸铁式微进给刀架输出力大,频响特性好,但行程较小,电磁线圈发热会导致非线性误差的产生。直线电机在实际应用中的某些场合还存在输出力较小、受突加负载影响大等问题。

本文提出的非圆轴数控加工系统采用软、硬靠模相结合的方法,集中了数控单元和机械机构的优点,使用一种简单的凸轮靠模,拟合加工各种非圆截面轮廓线。采用刀架结构和刀具使得机床同时具有车床和铣床的特点,只需更换一下刀具,可以进行磨削,特别适合切削高硬度和其他切削抗力较大的材料,能够直接加工非圆立体靠模。

1 伺服机构

非圆轴数控加工系统包含X、Z、U 三套各自独立方向的进给机构,其加工方式如图1所示。其中U轴由

2003年4月16日收稿

* 男 28岁 硕士 助教 主要从事数控技术方面的研究

一个凸轮靠模驱动，专门用于径向的微量往复进给，主轴上同轴安装的编码器，用于检测主轴旋转的零位信号和角位移，进而控制U轴的动作。刀具结构不同于普通的车刀，可以在电机驱动下绕自身轴线回转，如图2所示。

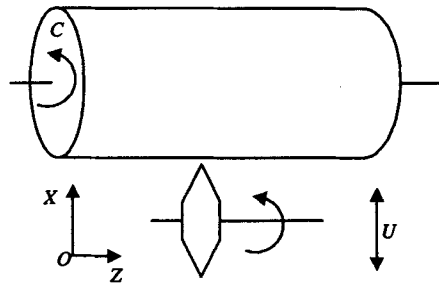


图1 加工方式

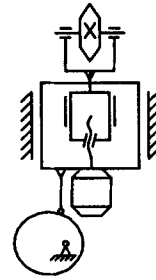


图2 U轴与X轴结构示意图

2 控制算法

2.1 非圆横截面型线成形方法

在裙高为 z 的横截面上，(椭圆)目标曲线表示为 $r = r(a, z) (0 \leq a < \pi)^{[2]}$ ， a 表示主轴转角， r 为其极半径(目标位置点到主轴回转中心的距离)，如图3所示。椭圆的长半轴为 r_{max} ，短半轴为 r_{min} 。

假设采用偏心距为 h ，半径为 rr 的偏心轮作凸轮，刀具的切削点在凸轮驱动下作U轴方向的往复运动，设 q 为凸轮的转角，则凸轮的一个升降循环中，刀具切削点到主轴回转中心的距离表示为 $r = D(q) (0 \leq q < 2\pi)$ ，如图4所示。

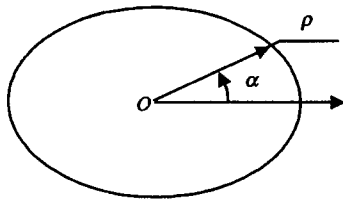


图3 目标椭圆的坐标定义

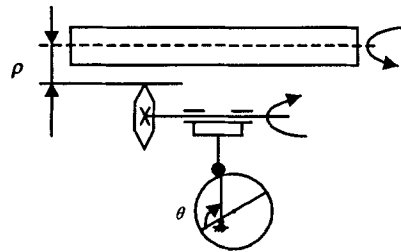


图4 凸轮转角-刀具位置曲线的坐标定义

可以用数学函数式精确表达为

$$D(q) = x_0 - (-h \cos q + \sqrt{rr^2 - h^2 \sin^2 q} - rr + h) \quad 0 \leq q < 2\pi \quad (1)$$

从图5中可以看出，椭圆曲线(即主轴转角-目标位置曲线) $r = r(a, z) (0 \leq a < \pi)$ 与凸轮转角-刀具位置曲线 $r = D(q) (0 \leq q < 2\pi)$ 具有一定相似性^[6]。如果满足条件：

- 1) $2h > (r_{max} - r_{min})$ ，即凸轮的偏心量大于椭圆的长短半轴之差的一半；
- 2) $x_0 - 2h = R_{min}$ ，即凸轮-刀具曲线的最小值顶点与目标类椭圆曲线最小值顶点平齐(称等高或 r 坐标相等)。

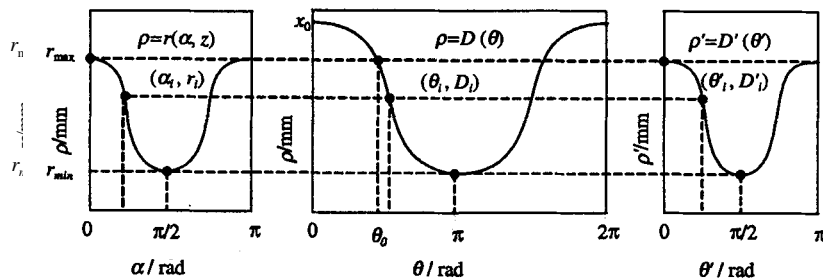


图5 仿射变换图

根据介值定理，目标曲线 $r = r(a, z) (0 \leq a < \pi)$ 上任意一点 (a_i, r_i) 都能在凸轮转角-刀具位置曲线 $r = D(q) (0 \leq q < 2\pi)$ 上找到唯一“等高”对应点 (q_i, D_i) ，使得 $D_i = r_i$ 。可以控制U轴电机，当主轴转动到

a_i 位置时, 使凸轮旋转到 q_i , 刀具切削点就正好切到 r_i 的位置。主轴回转一周, 刀具切削点位置就随主轴转角的变化形成一条目标轮廓线的插补曲线。

一般情况下认为主轴匀速转动, 假设其角速度为 $w_{\text{主轴}}$, 则主轴从 a_i 旋转 a_{i+1} 到所需时间为 $\Delta T_i = (a_{i+1} - a_i) / w_{\text{主轴}}$ 。在这段时间内, 如果能控制凸轮匀速地从 q_i 旋转至 q_{i+1} , 那么加工出来的曲线必然经过两点 (a_i, r_i) 和 (a_{i+1}, r_{i+1}) , 所以要求凸轮转速

$$w_i = \Delta q_i / \Delta T_i = w_{\text{主轴}} (\Delta q_i / \Delta a_i)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta q_i &= q_{i+1} - q_i \\ \Delta a &= a_{i+1} - a_i \end{aligned}$$

若设 a 是区间 $[a_i, a_{i+1}]$ 上的任意角, 应有

$$a = a_i + w_{\text{主轴}} t \quad 0 \leq t \leq \Delta T_i$$

此时凸轮的转角为

$$q = q_i + w_i t = q_i + w_i (a - a_i) / w_{\text{主轴}}$$

刀具切削点在 t 时刻的位置是

$$r = D(q) = D[q_i + w_i (a - a_i) / w_{\text{主轴}}] \quad (2)$$

即刀具切削点在凸轮驱动下形成的横截面插补曲线段。

上述推导之后, 可把提炼该过程上升为更纯粹的数学变换。根据解析几何中的平面仿射坐标变换为

$$\begin{cases} x' = l_1 x + l_2 y + a \\ y' = m_1 x + m_2 y + b \end{cases} \begin{vmatrix} l_1 & m_1 \\ l_2 & m_2 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (3)$$

把坐标系 qOr 仿射变换为 $q'O'r'$ 坐标系。已知 qOr 坐标系中的点 (q_i, D_i) 和 (q_{i+1}, D_{i+1}) 分别对应 $q'O'r'$ 坐标系下仿射点 (a_i, r_i) 和 (a_{i+1}, r_{i+1}) 且有 $r_i = D_i, r_{i+1} = D_{i+1}$ 。

根据前面的已知条件, 可以看出在仿射变换方程中的系数: $l_2=0, m_1=0, m_2=0, b=0$, 求解下面方程

$$\begin{cases} a_i = l_1 q_i + a \\ a_{i+1} = l_1 q_{i+1} + a \end{cases} \quad (4)$$

解得

$$\begin{cases} l_1 = \frac{a_{i+1} - a_i}{q_{i+1} - q_i} \\ a = a_i - \frac{a_{i+1} - a_i}{q_{i+1} - q_i} q_i \end{cases} \quad (5)$$

把求出的系数带入上面的方程, 得到矩阵形式的转换表达式为

$$[q' \ r' \ 1] = [q \ r \ 1] \times \begin{bmatrix} \frac{\Delta a_i}{\Delta q_i} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a_i - q_i \frac{\Delta a_i}{\Delta q_i} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

qOr 平面下函数曲线 $r = D(q)$ 仿射变换为 $q'O'r'$ 坐标系下的曲线 $r' = D'(q')$, 把 q' 视为 a , 可以看出式(6)、式(2)两种变换实际上完全等价。

沿着目标类椭圆曲线逐段采用以上方法进行仿射变换, 可得到完整的插补曲线, 当节点取得越密, 则插补曲线就越逼近目标曲线。

2.2 变椭圆度的处理方法

对于中凸变椭圆活塞, 横截面的椭圆度随裙高的变化而线性变化, 即目标曲线 $r = r(a, z)$ ($0 \leq a \leq \pi$) 随着 z 的变化而变化(形状、极值点), 当仿射变换的条件式(2)不满足的时候, 如图6所示, 可通过控制 x 轴电机, 调整刀具开始作往复振动的初始位置 x_0 , 使凸轮转角-刀具位置曲线与目标曲线的最小值点等高。

本文所提出的系统中, 凸轮是由 U 轴电机单独驱动的, 凸轮回转一周, 刀具径向位置往复振动一次, 但

刀具往复振动的初始位置(坐标)则是由X轴来控制。图5、图6中的 x_0 是一个由X轴电机带动小拖板控制的位置变量。凸轮的偏心距 h 、几何半径 r 决定了凸轮转角-刀具位置曲线的形状,曲线可随着 x_0 的变化上下平移。选用偏心量足够大的凸轮,控制X轴电机,调整刀具开始作往复振动的初始位置,使凸轮-刀具曲线上的 $x_0 = r_{\min} + 2h$, 就可以对不同横截面实现仿射变换。

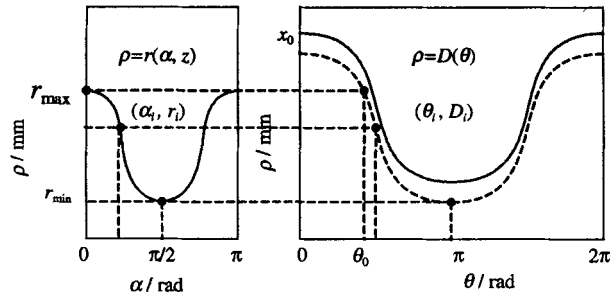


图6 变椭圆度的处理

3 结 论

本文提出的新型非圆轴数控加工系统可实现非圆加工中大推力、微进给、大行程的和谐统一。采用本文提出的回转坐标和往复平动坐标之间的曲线式插补方法,可实现任意非圆横截面的加工成形。特别适合切削抗力大,精度高的场合,加工中凸变椭圆活塞的立体靠模就是其典型的应用实例。与目前现有的非圆轴数控加工方式比较,本文所提出的系统采用了基于凸轮的机械式的微进给机构,能产生更大的切削力,刚性更好,刀具可以根据需要更换,既可铣削,又可磨削,如果关闭负责微进给的U轴,还可以进行普通两轴的数控车削,体现了良好的柔性。试验机床的加工形状精度达到并且超过了0.05 mm。

参 考 文 献

- [1] 何培杰,周国柱,张建钢. 数控非圆车削中的三种微进给刀架[J]. 上海机床, 2000, 11(1): 20-23
- [2] 潘尚峰,张 嵘,马 骋,等. 数控车削中凸变椭圆型面的成形方法[J]. 中国机械工程, 2001, 12(8): 911-914
- [3] 王大庆,丁崇生,葛思华. 中凸变椭圆活塞加工数控车床数控系统的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2000, 42(4): 38-42
- [4] Alter, David M, Tsao, *et al.* Two-dimensional exact model matching with application to repetitive control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME 1994, 116(1): 30-33
- [5] Alter, David M Tsao, *et al.* Dynamic control of the turning process using direct drive linear motor actuators[C]. Proceedings of the American Control Conference 1992, 1: 24-26
- [6] 刘廷章,王军杰,卢秉恒,等. 一种实现复杂型线软靠模加工的方法[J]. 制造业自动化, 1996, 18(1): 44-46

编 辑 孙晓丹