

## 转角跟踪误差对膛线拉削精度影响的分析

朱同兴, 刘必标, 张天佑, 罗礁

(中国兵器工业第五八研究所数控事业部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 根据位置反馈控制系统的误差原理和缠角定义及其与膛线方程的关系, 分析了采用  $C=F(z)$  联动算法的 LK6/LK8 型数控深孔螺旋拉床拉削膛线过程中, 刀杆转角跟踪误差对于不同类型膛线缠角精度和宽度等指标的影响, 并给出了该误差与拉速、缠角、身管口径和伺服增益等参数关系的计算公式及降低其影响的应对措施。经实际使用表明: 该方法是正确的、有效的, 可为采用类似算法的深孔变截面沟槽拉削的误差分析提供参考。

**关键词:** 数控; 深孔拉床; 跟踪误差; 膛线; 缠角; 精度

**中图分类号:** O241.1 **文献标志码:** A

## Analysis on Influence from Following Error of Rotation Angle to Precision of Rifling Broaching

Zhu Tongxing, Liu Bibiao, Zhang Tianyou, Luo Jiao

(Dept. of CNC Engineering, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Based on the principle of error in position feedback control system, and the definition of the angle of twist and its relation with rifling equation, analyze influence from following error of tool bar rotation angle to indexes like angle of twist precision and width of different rifling, which are in the process of rifling broaching of the LK6/LK8 CNC deep-hole helical broaching machine when adopting  $C=F(z)$ , the linkage algorithm. Present computational formula between the following error and parameters such as pulling velocity, angle of twist, caliber of tube, servo gain, as well as measures to reduce its effect. The method is proved to be accuracy and effective during application, and could be made reference to error analysis of similar algorithm during broaches of the deep-hole variational section slot.

**Keywords:** numerical control; deep-hole broaching machine; following error; rifling; angle of twist; precision

### 0 引言

身管和膛线是线膛火炮设计与制造中的关键技术之一, 其加工精度将影响到身管的寿命、弹丸飞行的稳定性和对目标的命中率。膛线是在身管内壁通过拉削或者电解加工形成的绕身管轴线旋转、或凹下或凸起的螺旋线, 凹者称阴线, 凸者称阳线。

LK6/LK8 型数控深孔螺旋拉床(以下称 LK 拉床)工作时身管被固定不动, 刀片和拉刀头安装在刀杆上, 数控系统控制刀杆在(Z 轴)往复运动的同时控制主轴(C 轴)带动刀杆及拉刀按一定规律旋转, 从而拉削出所需要的膛线, 通过进刀(X 轴)或更换刀盘来控制拉削齿升量, 从而达到要求的阴线槽深度。通常有等齐、渐速和混合 3 种膛线, 其横截断面多为矩形或梯形, 用成型拉刀实现。工厂用缠角精度、阴线深度、阴线和阳线宽度以及阴线的粗糙度等指标来检验和评估膛线的加工质量。

### 1 缠角的定义

缠角  $\alpha$  的定义: 将身管沿其纵(轴)向展开成平面, 则膛线上某点的切线相对于身管轴线的倾角  $\alpha$

称为该点的缠角<sup>[1]</sup>, 如图 1。

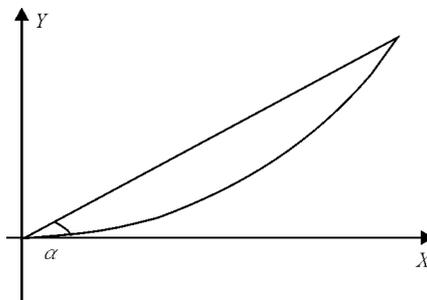


图 1 身管展开后的等齐和渐速膛线示意图

等齐膛线展开后是一条斜线; 渐速膛线展开后是二次曲线, 多为抛物线, 也有半立方抛物线; 混合膛线由等齐与渐速膛线二者分段组合而成。

### 2 反馈控制系统与位置跟踪误差

位置伺服常用反馈控制系统是用给定值与实际反馈值的差值作为控制输入, 直至二者误差值等于 0 时运动停止。设位置跟踪误差为  $e$ ,  $e$  与伺服系统的增益和带宽有关。一般而言  $e$  的大小与系统位置增益  $K_p$  成反比, 与跟踪速度  $V$  成正比。加大增益

可以有效减小  $e$ ，同时采用速度前馈控制还可以进一步减小  $e$  值甚至使  $e$  趋近于 0。对于具有  $N$  个位置联动轴的轮廓控制系统，零件加工的精度与控制的轮廓误差有关。而参与联动轴的跟踪误差和位置跟踪误差相差过大，是造成轮廓误差的主要因素之一，优化联动轴增益并使跟踪误差一致是减小轮廓误差的常用手段，显然同时联动轴数越多，这种优化与匹配越重要和越困难。虽然机床及其传动机构的刚性和精度越高越好，但因存在着非线性摩擦、背隙、死区和形变等，实际上无法达到理想的最佳值，这将限制伺服装置的增益、动态响应特性和稳定裕量的提高，从而限制了进给轴伺服刚度、最大运动加速度的提高和跟踪时的最小  $e$  值，对于像深孔螺旋拉床这样细而长的机床则更加突出。

LK 拉床可以配置成  $(Z, C, X)$  3 轴或者 2 轴  $(Z, C, \text{无进刀轴})$ ，采用位置全闭环控制。膛线缠角精度与  $Z$  和  $C$  轴的联动精度有关。有 3 种模式的位置-速度联动算法：

$$\begin{cases} Z = Z(t) \\ C = C(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$Z = F(c) \quad (2)$$

$$C = F(z) \quad (3)$$

式 (1) 中  $t$  是时间变量。与 LK 拉床配套的圣维 SKL3 型数控系统采用式 (3) 算法，即  $C$  轴位置按给定膛线规律跟踪  $Z$  轴位置的数字靠模联动算法<sup>[2]</sup>。进给轴整定为 I 型系统，即对于定位来说位置是无静差的 ( $e=0$ )，而做位置等速跟踪则存在恒定的跟踪误差  $e$ ，做变速跟踪则误差  $e$  为非恒定值<sup>[3]</sup>。(按数控机床坐标轴方向和跟踪误差的定义，返回过程中的  $e \leq 0$ ，拉削过程中的  $e \geq 0$ ，见图 2)。

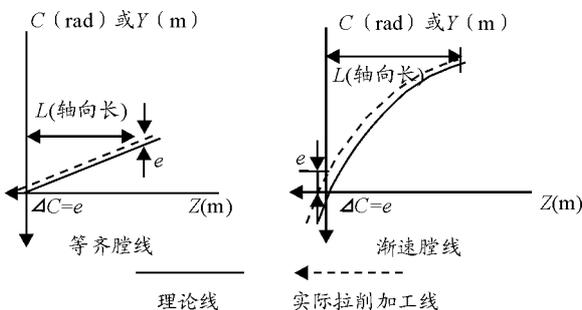


图 2 跟踪误差对膛线的影响

### 3 转角跟踪误差对膛线缠角的影响

如图 1，常用  $Y=F(X)$  来描述膛线弧长  $(Y)$  与其对应的轴向长度  $(X)$  之间的函数关系。SKL3 型数控系统内部运算使用的是  $C$  轴旋转角位移坐标和  $Z$  轴直

线位移坐标来动态描述转角  $(^\circ)$  与膛线轴向长度  $(\text{mm})$  之间的关系，即  $C=f(Z)$ ，这里  $Z$  即前述之  $X$ ，而  $C$  与  $Y$  的关系是通过身管内膛线在任一点相对于其始点的弧长和弧长与口径关系计算出来的，参见式 (10)，且在口径  $D$  不变的情况下转角  $C$  与弧长  $Y$  成正比，故为简单起见，可以用  $C-Z$  平面之膛线展开曲线来代替  $Y-X$  平面的膛线展开的曲线关系。图 2 表明了等齐和渐速膛线在  $C-Z$  平面上展开后轴向长度与旋转角度的关系图。

对于抛物线形渐速膛线，有表达式：

$$Y_j = K_j [(Z+a)^p - b] \quad (4)$$

对于等齐膛线，有表达式：

$$Y_D = K_d Z \quad (5)$$

其中： $Z$  为膛线有效轴向长度； $Y$  为对应  $Z$  的膛线弧长； $K_j, K_d, a, b$  为膛线参数，常数值； $p=2$  或  $1.5$ 。这里  $Z, Y, a, b$  的单位均为  $m$ 。

对式 (4)、式 (5) 分别求导，得：

$$Y_j' = pK_j(Z+a)^{p-1} \quad (6)$$

$$Y_D' = K_d \quad (7)$$

则渐速膛线在任一点缠角为：

$$\alpha = \arctg Y_j' = \arctg (pK_j(Z+a)^{p-1}) \quad (8)$$

而等速膛线在任一点的缠角为：

$$\alpha = \arctg Y_D' = \arctg K_d \quad (9)$$

由式 (8) 可知，渐速膛线的缠角随轴向位置  $Z$  而改变，在  $Z=0$  和  $Z=Z_{\max}$  处，分别是其初缠角和终缠角。式 (9) 反映出等齐膛线缠角从头至尾为恒值。又设身管口径为  $D, \text{mm}$ ；缠角为  $\alpha, (^\circ)$ ；膛线上任一点相对其始点的轴线实际长度为  $Z_i, \text{mm}$ ；对应  $Z_i$  的弧长为  $Y_i, \text{mm}$ ；对应  $Y_i$  的旋转角度为  $C_i$ ，无论哪种线型，均应满足：

$$C_i = 360 Y_i / \pi D \quad (10)$$

对于指定的身管， $D$  为已知值，即任一点转角  $C_i$  仅与相对于膛线起点的弧长  $Y_i$  有关。

对于任意线型的膛线，在膛线上任一点的缠角  $\alpha_i$  有：

$$\tan_i = Y_i' = [(\pi D / 360) dC / dZ] \quad (11)$$

由跟踪误差  $e$  的定义和图 2 可见，与  $Z_i$  对应点的  $C_i$  由于  $e$  的影响，实际转角应为  $C_{iF}$ ，且有：

$$C_{iF} = C_i + e_i \quad (12)$$

因此实际加工出的膛线在  $Z_i$  处的缠角有：

$$\tan_{iF} = [(\pi D / 360) dC_{iF} / dZ], \quad (13)$$

将式 (12) 代入式 (13)，整理后得：

$$\tan_{iF} = (\pi D / 360) (dC_i / dZ + de_i / dZ) \quad (14)$$

而转角跟踪误差可由下式计算：

$$e_i = (6V_z \tan_i) / \pi DK_{vc} \quad (15)$$

式中:  $e_i$  为位于膛线  $Z_i$  处的  $C$  轴转角跟踪误差;  $V_z$  为  $Z$  轴牵引(拉削)速度, mm/min;  $\tan_i$  为位于膛线  $Z_i$  处缠角理论正切值;  $K_{vc}$  为  $C$  轴速度误差系数<sup>[4]</sup>,  $s^{-1}$ 。

$K_{vc}$  与  $C$  轴开环总增益  $K$  相等<sup>[4]</sup>。对于优化完成的数控机床,  $K_{vc}$  是一个确定值, 可以通过计算或运行试验获得。

注意到式 (8) 和式 (9), 式 (15) 又可化为:

$$e_i = 6pV_z K_j (Z_i + a)^{p-1} / 10^3 \pi DK_{vc} \quad (16)$$

$$e_i = 6V_z K_d / \pi DK_{vc} \quad (17)$$

基于上述分析, 可得出如下结论:

1) 如果  $Z_i$  是实际值, 采用  $C=F(Z)$  算法使得  $Z$  轴的跟踪误差不会影响到缠角大小。2) 式 (14) 说明拉削出的膛线在任意点缠角的正切值由两数据项组成: 其中的  $dC_i/dZ(\leq 0)$  项和理论缠角正切值相对应, 而第二项  $de_i/dZ(\geq 0)$  就是由于转角跟踪误差的变化率所引起的缠角误差项。3) 对于等齐膛线, 当牵引  $Z$  轴速度恒定则旋转  $C$  轴转速也恒定, 那么  $C$  轴的跟踪误差  $e_i$  也是恒定的, 见式 (17), 即  $de_i=0$ , 故  $e$  对于实际膛线的缠角无影响。4) 对于渐速膛线, 即使牵引  $Z$  轴速度恒定, 但是  $C$  轴转速不会恒定, 其跟踪误差  $e_i$  也是变化的, 初、终缠角处对应最小和最大的转角偏差。故  $C$  轴跟踪误差对实际膛线的缠角是有影响的, 且实际缠角可能小于理论缠角值。5) 对于混合膛线, 它是等齐与渐速 2 种膛线连接的合成膛线, 由跟踪误差所引起的缠角误差可按等齐和渐速分段分析和估算, 文中不再赘述。

#### 4 降低跟踪误差对缠角和线宽影响的措施

由图 2 左图可见,  $C$  轴跟踪误差  $e$  相当于使膛线从起点至终点在身管的圆周上偏转了一个固定的角度  $\Delta C$ , 而图 2 右图渐速膛线的  $e_i$  即  $\Delta C_i$  却非恒定值。

由式 (15) 可见,  $e$  与拉削速度、缠角、身管口径、 $C$  轴开环增益  $K$  等参数有关。应在尽可能提高机床刚性、传动精度和  $Z$  轴速度稳定性等条件下, 按最苛刻的应用和最大缠角允差调整和优化  $C$  轴的开环总增益  $K$ , 以及适当添加速度前馈补偿量, 从而有效地提高  $C$  轴伺服性能指标和降低转角跟踪误差  $e$ 。而一旦机床调定后, 在相同允差和增益下, 缠角越大或口径越小, 则应适当地降低拉削速度  $V_z$ , 反之亦然。

等齐膛线的速度选择范围大, 只需保证每次拉

削循环速度路线一样, 则不仅每次循环重复的起点一致, 而且在整个拉削过程中的  $e$  保持不变, 则在膛线全长上由于跟踪所引起的缠角误差几乎为零。

将式 (16) 两边分别对  $Z$  求导后可见, 如果拉速稳定, 渐速膛线  $C$  轴跟踪误差的变化率在其全长上是一个恒定值 ( $p=2$ ) 或者越来越小 ( $p=1.5$ )。通过自动变增益控制、优化拉削和返回速度参数等手段, 不仅使缠角误差很小甚至可忽略不计, 而且使渐速膛线在初、终缠角处的转角偏差之差值被控制在工艺允许的范围, 还具备较高的加工效率。如果在拉削过程中改变速度, 理论上就将使变速后的膛线向之前轨迹左偏或右偏(与原来速度的差值方向和膛线的旋向有关), 造成阴线 and 阳线的宽度将随之改变, 严重者甚至产生类似“双眼皮”的台阶(当然重复定位误差大也会出现类似现象), 故要求在整个加工过程中自始至终使用同样的速度参数。使用高质量的拉刀, 采用合理与稳定的拉削速度、保证  $C$  轴旋转的平稳性, 是减小阴线槽粗糙度的几种重要措施。

由于膛线加工过程中拉削和返回速度设置的不同, 一般有返回速度  $V_1 > V_2$  (拉削速度), 故二者的跟踪误差不一样。换言之, 数控拉床高速返回与拉削轨迹有可能是不重合的, 这一点与老式的机械靠模拉床是不一样的, 后者因为靠模和转动硬联接的强制性, 2 次轨迹基本是一样的。为了刀具和身管的安全, 返回前必须确保将拉刀收回到给定的最低位置点(有进刀轴)或拆卸下拉刀盘(无进刀轴)。

#### 5 结束语

笔者对采用  $C=F(z)$  联动算法拉削膛线时, 刀杆转角跟踪误差对缠角等指标的影响进行了深入的分析, 提出了减小影响的措施, 经实际使用, 验证了笔者所述是正确、有效的, 且对采用类似算法的数控深孔拉槽机拉削变截面直线沟槽的误差分析也可提供一定的参考。

#### 参考文献:

- [1] 王靖君, 赫信鹏. 火炮概论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 48-49.
- [2] 朱同兴. 基于 VG7 和 AC 主轴电机的位置全闭环伺服系统[J]. 兵工自动化, 2008(7): 1-3.
- [3] 陆道政, 季新宝. 自动控制原理及设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 71-75.
- [4] 丛爽, 李泽湘. 实用运动控制技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 151-155.