

# 五轴数控机床进给系统动态误差影响因素分析

李亨

(通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司 辽宁 沈阳 110142)

**摘要:** 数控机床可以代表我国精密制造水平,其精度与可靠性可以决定零件质量与安全性。提高对数控机床精确度的关注度,对推动我国制造业发展有着非常大的帮助。而进给系统动态误差可以决定数控机床加工精度,不同因素会对进给系统动态误差产生影响。五轴数控机床科技含量高、精准度高,主要用于完成复杂曲面加工,在我国高精尖行业中占有举足轻重的地位。因此本文以五轴数控机床为研究对象,对其进给系统动态误差影响因素展开详细分析,为从业人员开展机床检测与调整提供参考意见。

**关键词:** 五轴数控机床; 进给系统; 动态误差; 影响因素

## 0 引言

计算机控制技术等先进技术的飞速发展,使得误差补偿技术以及复杂工况应对能力得到了进一步提升,为我国工业发展提供了更多的可能性。目前我国高档数控机床正在向高效率、高速度、高精度方向发展,因此进给系统动态误差就变得至关重要。为提高伺服进给系统仿真模型准确度,了解不同因素对进给系统动态误差的影响是非常重要的。对于五轴数控机床而言,由于其负责工作内容不同,其所配备电动机驱动器频率带宽存在一定差异,导致所产生误差也存在一定差异。本文通过建模方式对五轴数控机床动态误差影响因素展开详细分析,以提高五轴数控机床精度。

## 1 五轴数控机床运动学建模

为确保本文研究顺利完成,笔者选择双转台五轴数控机床为研究对象,在研究过程中,借助D-H法建模原理完成运动学建模<sup>[1]</sup>。

在三维空间中,可以借助 $4 \times 4$ 齐次变换矩阵表达双转台五轴数控机床相邻部件之间的变换,具体表达公式如公式(1)所示。

$$\begin{aligned} \text{Trans}(X, Y, Z) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{Rot}(X, A) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A & 0 \\ 0 & \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Rot}(Z, C) = \begin{bmatrix} \cos C & -\sin C & 0 & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

当机床床身为基座时,机床将存在工件传动链与刀具传动链两条工作链。其中工件传动链为机床床身时,其运行步骤为:床身→Y轴→X轴→A轴→C轴→工件;当刀具传动链为机床床身时,其运行步骤为:床身→立柱→Z轴→刀具<sup>[2]</sup>。

结合传动链工作顺序,可以完成刀具坐标系与工件坐标系二者之间的转换。其中运动链坐标系如图1所示。以A、C两轴轴线交点为原点,完成机床坐标系( $O_m-X_mY_mZ_m$ )构建,位移方向与右手笛卡尔坐标系移动方式相匹配,转动方式遵循右手螺旋定则,其余坐标系方向设置参考机床坐标系。为降低后续运动学求解难度,笔者将X、Y、Z、A四轴固连坐标系原点设置为机床坐标系,C轴坐标系( $O_c-X_cY_cZ_c$ )原点处于C轴转台表面中心位置。工件坐标系( $O_w-X_wY_wZ_w$ )原点为待加工工件上表面中心,刀具坐标系( $O_t-X_tY_tZ_t$ )原点为刀心位置。

在初始状态时,刀具坐标系与工件坐标系完全重合,刀具位置向量为 $(0, 0, 0, 1)^T$ ,刀轴姿态向量为 $(0, 0, 1, 0)^T$ ,参考总坐标完成矩阵转换,再分别右乘刀具坐标系中的刀具位置向量与刀轴姿态矢量,就可以获得机床运动学模型,具体表达式如公式(2)所示。

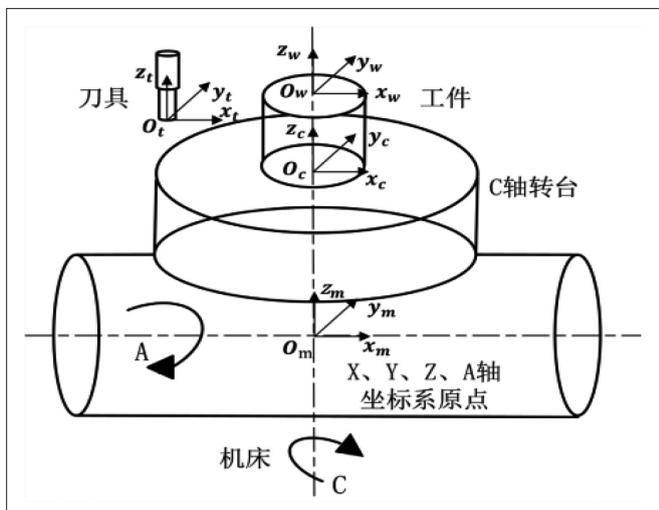


图1 双转台五轴数控机床坐标系示意图

$$\begin{cases} x = X \cdot \cos C - Y \cdot \sin C \cdot \cos A + Z \cdot \sin A \cdot \sin C - x_c \\ y = X \cdot \sin C + Y \cdot \cos C \cdot \cos A - Z \cdot \sin A \cdot \cos C - y_c \\ z = Y \cdot \sin A + Z \cdot \cos A - Hh - z_c \\ i = \sin A \cdot \sin C \\ j = -\sin A \cdot \cos C \\ k = \cos A \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x_c$ 、 $y_c$ 、 $z_c$  - 工件坐标系原点在C轴坐标系中的对应坐标。

## 2 五轴数控机床进给模型

目前，在数控机床控制系统中，经典的比例积分微分（PID）控制策略仍然占据主导地位，系统由位置控制环、速度控制环和电流控制环组成。为了使进给系统的输出能够满足零件的加工速度与精度要求，进给系统应有定位精度高、速度调节快的能力<sup>[3]</sup>。本文所采用的控制模型中位置环采用P控制，速度环采用PI控制，电流环采用P控制，基于PID控制

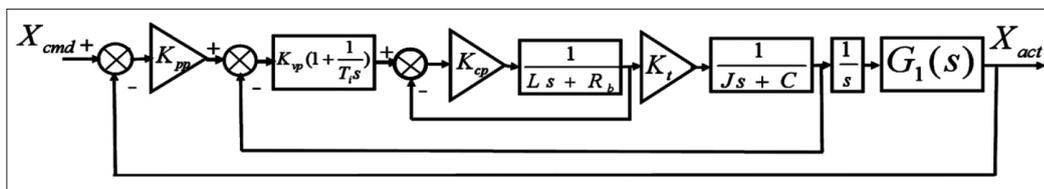


图2 直线轴进给系统结构框图

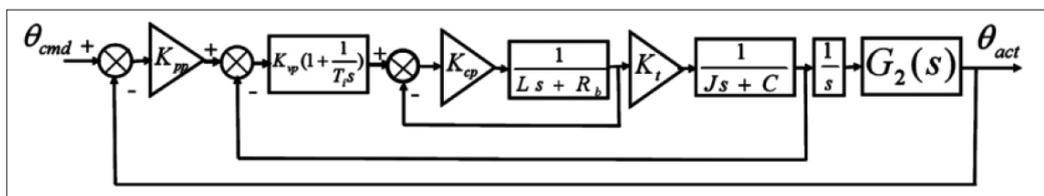


图3 旋转轴进给系统结构框图

原理分别建立直线轴和旋转轴伺服进给系统的传递函数模型，如图2、图3所示。

在图2、图3中，其中， $K_{pp}$ 代表位置环增益， $K_{vp}$ 代表速度环增益， $T_i$ 代表速度环积分时间常数， $K_{cp}$ 代表电流环增益， $L$ 代表电动机等效电感， $R_b$ 代表电动机等效阻值， $K_t$ 代表力矩系数， $J$ 代表等效惯量， $C$ 代表阻尼系数， $G_1(s)$ 与 $G_2(s)$ 分别代表直线轴和旋转轴机械传动部分的传递函数。

## 3 直线轴X轴与旋转轴C轴联动工作轨迹

目前，从业人员常使用圆轨迹完成数控机床精度检验，其原因为该轨迹非常直观，分析难度低<sup>[4]</sup>。即本文选择双转台五轴数控机床直线轴X与旋转轴C联动加工x-y平面内的圆轨迹为研究对象，并展开分析，具体刀具路线如图4所示。 $P_0(x_0, y_0)$ 为圆心， $r$ 为圆轨迹半径， $P_i(x_i, y_i)$ 为圆轨迹刀位点， $\phi$ 代表圆轨迹点 $P_i(x_i, y_i)$ 相对坐标起点 $P_0(x_0, y_0)$ 所经过圆心角。以C轴转台的中心作为x-y平面内工件坐标系原点，借助符号O代表，C轴转角借助符号

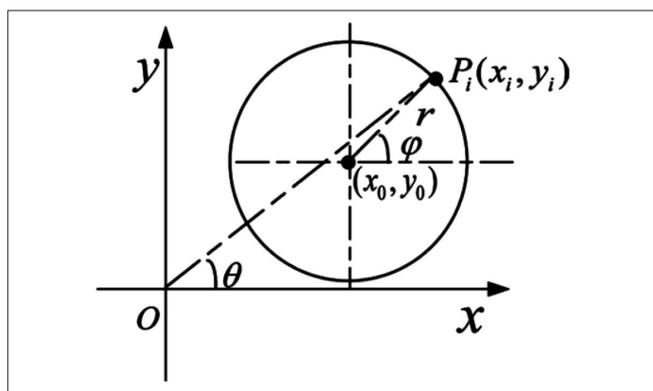


图4 X轴、C轴联动加工圆轨迹示意图

$\theta$ 代表。

借助公式(3)可以获取圆形轨迹中刀位点工件坐标：

$$\begin{cases} x_i = x_0 + r \cos \phi \\ y_i = y_0 + r \sin \phi \end{cases} \quad (3)$$

此时，将C轴转盘表面中心当做x-y平面工件坐标系中的原点O，并将其定义为 $P_0(x_0, y_0)$ ，将刀位坐标带入公式，可以获得简化的X

轴、C轴联动运动模型,由于Y轴、Z轴、A轴并未进行运动,因此将其定义为0,具体转换式如公式(4)所示:

$$\begin{cases} X_i = -|\vec{P}_i| \cdot \cos(C_i) \\ Y_i = -|\vec{P}_i| \cdot \sin(C_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $X_i$ 、 $C_i$ —各轴机械坐标。

通过转换得到各轴输入指令,如公式(5)所示:

$$\begin{cases} X_i = |\vec{P}_i| \cos(C_i) \\ C_i = \arctan(Y_i/X_i) \end{cases} \quad (5)$$

由于在具体工作时,进给系统会产生动态跟随误差( $\Delta C$ ,  $\Delta X$ ),此时可以获得运动轴具体位置,如方式(6)所示:

$$\begin{cases} X_a = -|\vec{P}_a| \cdot \cos(C_a) \\ Y_a = -|\vec{P}_a| \cdot \sin(C_a) \end{cases} \quad (6)$$

此时,通过公式(4)与公式(6)可以获得具体刀位点坐标( $x_a$ ,  $y_a$ ),进而获得实际圆轨迹半径 $R_d$ 。具体如公式(7)所示:

$$\begin{cases} x_a = x_0 + R_d \cdot \cos(\varphi) \\ y_a = y_0 + R_d \cdot \sin(\varphi) \end{cases} \quad (7)$$

此时理想半径与实际半径差值即为轮廓误差,如公式(8)所示:

$$\Delta R = R_d - r \quad (8)$$

## 4 进给系统动态误差影响因素仿真结果分析

### 4.1 位置环增益对动态误差的影响

设定圆的空间轨迹半径 $r=60\text{mm}$ , $x_0=100\text{mm}$ ,对每一行G代码中的进给速度进行处理,得到刀具实际进给速度为匀速的圆轨迹程序。在机床中运行程序获取实际插补信息,将其处理后导入

到仿真模型中,可以得到仿真动态跟随误差和轮廓误差,分析两轴位置环增益同时减小、不变、增大三种情况下的单轴的动态误差与圆轨迹轮廓误差变化<sup>[5]</sup>。位置环增益对跟随误差影响效果图和不同位置环增益时圆轨迹轮廓误差极坐标图如图5、图6所示。

由图5和图6不难看出,在速度不变的情况下,两轴的位置环增益越大,两轴的动态跟随误差越小。随着位置环增益的增大,轮廓的过切、欠切现象得到改善,但是对轮廓误差的影响较小,仅通过改变位置环增益提升单轴的跟随精度不能消除较大的轮廓误差。为了便于观察,本文轮廓误差图都在原始轮廓误差的基础上增大了1mm。可以得出结论,两轴的伺服匹配才是影响圆轨迹轮廓误差的主要因素,若两轴的位置环增益不匹配时,圆轨迹就会存在圆度误差,变为长轴 $45^\circ$ 或者 $135^\circ$ 方向的椭圆或者花生形状。

### 4.2 速度对动态误差的影响

同样,以X轴和C轴联动加工圆轨迹,设定圆的空间轨迹半径 $r=60\text{mm}$ , $x_0=100\text{mm}$ 。在机床中运行程序获取不同速度时的实际插补信息,将其处理后导入到仿真模型中,得到不同速度时圆轨迹轮廓误差变化情况,选取速度 $f$ 分别为 $900\text{mm/min}$ 、 $1200\text{mm/min}$ 、 $1800\text{mm/min}$ 时,动态跟随误差与轮廓误差的变化。在圆轨迹运动的过程中,速度增加,会导致各轴的跟随误差会变大,轮廓误差也呈上升趋势。当速度达到 $1800\text{mm/min}$ 时,最大轮廓误差

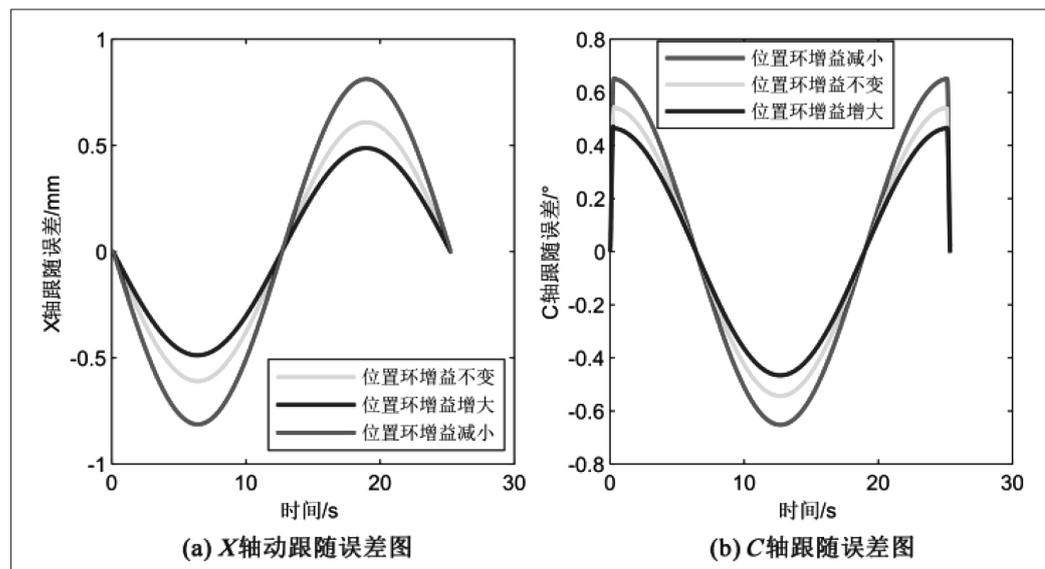


图5 位置环增益对跟随误差影响效果图

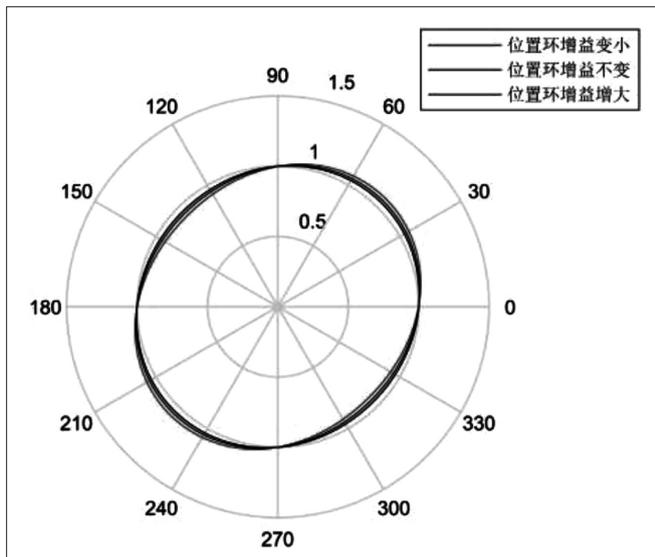


图6 不同位置环增益时圆轨迹轮廓误差极坐标图

为0.1mm左右。由此可见速度对动态误差的影响是显著的，但在实际生产中，过低的加工速度会导致生产效率降低。因此在零件加工过程中，在保证加工精度的同时，应尽可能提高速度，提高效率。

## 5 结语

加工精度是影响机床性能和产品质量的主要难题，也是制约国家精密制造能力的重要因素。本文以五轴数控机床为对象，针对提升机床精度进行了研究。并且随着科技的发展，精密的仪器和零件在生产实践中占据的分量逐渐增加，在数控机床这种

精密机器精度不断提高的同时，必须控制内外界环境的随机影响因素在微小范围内变化，以保证产品质量，本文通过建模方式为从业人员降低数控机床误差提供了更多的可能性。

## 参考文献：

- [1] 刘琪, 卢红, 张新宝, 等. 基于机电-刚柔混合的H型双驱进给系统状态相关动态特性分析[J/OL]. 机械工程学报:1-12[2023-03-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20221026.1604.042.html>.
- [2] 王昊, 龙新华, 杜家楠. 数控机床电机-斜齿轮齿条耦合进给系统动态特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(01):34-40+55.
- [3] 赫巍巍, 王立平, 关立文, 等. 一种分析伺服进给系统动态误差的新方法[J]. 机械设计与制造, 2021(10):159-164+168.
- [4] 程军涛, 刘康华, 李雪晓, 等. 数控机床进给系统定位误差建模及模糊评判[J]. 机床与液压, 2021, 49(13):85-88.
- [5] 卢成伟, 吴铨洋, 钱博增, 等. 数控机床机电-刚柔耦合特性分析下的进给系统动态运动误差溯源方法[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(10):1577-1584.

作者简介: 李享(1983.12-), 男, 汉族, 辽宁沈阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 计算机科学与技术(数控方向)、机械设计及理论。