

数控机床动态轨迹误差的 MATLAB 仿真计算方法研究

郇 极 马维民

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院)

摘 要: 对数控铣床加工过程中的动态轨迹误差进行了研究, 介绍其产生原因和基于 MATLAB 的仿真计算方法, 并给出了 2 坐标和 4 坐标典型运动轨迹在不同进给速度下的动态轨迹误差的仿真建模和计算实例. 仿真结果表明, 高速铣削加工中的动态轨迹误差所引起的工件轮廓误差是不可忽略的误差因素.

关键词: 数控机床; 高速切削; 仿真; 轨迹误差; MATLAB

中图分类号: TP 334. 7

文献标识码: A **文章编号:** 1001-5965 (2003) 04-0299-04

最近几年, 高速铣削加工技术取得了重大突破, 已经进入实用阶段. 当前国际上高速数控铣床和加工中心的主轴转速已经达到 20000~40000 r/min. 为了配合主轴的转速, 机床进给速度也应该随之提高, 必须达到 40~80 m/min. 这一进给速度大大超过了传统的数控机床进给速度, 一般低于 10 m/min.

数控机床的进给运动由数字式随动控制系统产生. 系统中存在随动跟踪误差, 它与机床的运动速度和加工程序所控制的指令运动轨迹密切相关, 在本文中称轨迹误差. 在机床高速运动情况下, 特别是 4 坐标和 5 坐标机床, 随动跟踪误差对工件的轮廓精度影响极大, 是不可忽视的加工误差因素, 必须对其进行计算和预测. 由于数控机床位置控制器为三阶采样控制系统, 系统的指令是复杂的函数或多种函数组合的曲线, 计算非常复杂. 由于以前缺少普及和完善的仿真工具, 只有少数专业研究人员能够从事相关计算工作, 提供典型运动曲线和常规运动速度下的计算结果^[1,2], 供编写加工程序时参考. 这种情况已经不能适应当前高速数控加工的发展要求. 数控机床用户迫切需要在编写加工程序时, 能对机床动态轨迹误差做出计算和预测, 以便采取相应措施, 保证加工精度.

MATLAB 是一种国际上最流行和普及的科学和工程计算工具, 具有丰富和广泛的数据计算、图形处理和系统仿真功能. 已经逐步成为当今工

程和研究人员必须具备的基本工具之一. 使用 MATLAB, 用户可以在仿真进程中改变感兴趣的参数, 实时地观察系统行为的变化, 使用户摆脱了深奥数学推演的压力和繁琐编程的困扰. 具有简单、快捷、准确、通用的特点, 即使是非专业人员, 也可以轻松完成仿真工作. 本文研究利用 MATLAB 计算轨迹误差的方法, 并计算出典型 2 坐标和 4 坐标带主轴摆角的轨迹误差实例, 此方法也可以推广到 5 坐标加工机床, 它是一种易学和可靠的数控机床动态轨迹误差仿真方法.

1 数控机床的轨迹控制原理

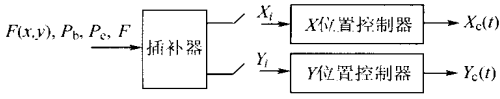
数控机床的轨迹控制由插补器和位置控制器完成. 以 2 坐标机床为例, 如图 1.

数控加工程序定义了工件轮廓的形状 $F(X, Y)$ (直线、圆弧、样条等)、起点 P_b 、终点 P_e 和进给速度 F . 插补器根据这些指令, 实时计算出轮廓控制点的位置 $P_i(X_i, Y_i)$. X_i 和 Y_i 是时间序列函数, $i=0, 1, 2, \dots$. X_i 和 Y_i 是位置控制器的指令值, 分别控制机床 X, Y 轴的位置控制器. 位置控制器将 X_i 和 Y_i 转换成机床的实际进给运动 $X_c(t)$ 、 $Y_c(t)$, 见图 1a. 每次插补计算所产生位置增量 dx 和 dy 取决于 F 和系统的插补周期 ΔT . 插补器的计算周期与位置控制器的采样控制周期同步, 通常为 1~8 ms. 见图 1b.

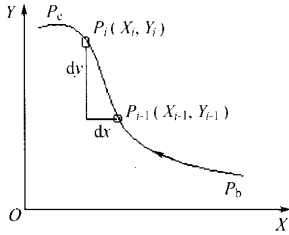
收稿日期: 2001-12-30

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (2001AA423210)

作者简介: 郇 极 (1953-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 100083, 北京.



a 轨迹控制原理图



b 插补示意图

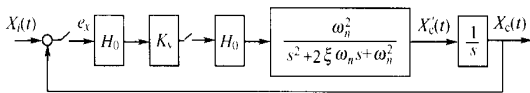
图1 2坐标数控机床轨迹控制

高速数控机床一般采用交流同步电机或直线电机驱动, 位置控制器的结构图和传递函数如图2a (以 x 轴为例). 它是一种采样控制位置随动系统. 典型中、小型数控铣床的位置控制器参数为: 频响 $\omega_n = 80 \sim 150 \text{ s}^{-1}$, 阻尼系数 $\xi = 0.8 \sim 0.9$, 位置增益 $K_v = 15 \sim 30 \text{ s}^{-1}$. 系统的位置跟踪误差与机床运动速度密切相关^[3]:

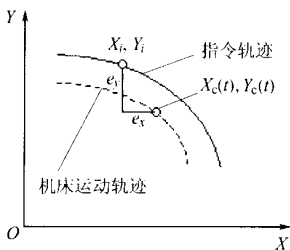
$$e_x = \frac{X}{K_v} \quad (1)$$

$$e_y = \frac{Y}{K_v} \quad (2)$$

插补点 X_i, Y_i 通过 e_x 和 e_y 产生进给轴运动 $X_c(t), Y_c(t)$, 因此插补后的指令轨迹与机床实际运动轨迹是不一致的, 它是高速加工时产生轨迹误差的主要理论误差. 如图2b.



a 位置控制器结构图



b 轨迹误差

图2 数控机床位置控制器和轨迹误差

2 用 MATLAB 仿真计算轨迹误差

2.1 SIMULINK 典型模块介绍

SIMULINK 是 MATLAB 中进行动态系统建模、

仿真和综合分析的集成软件包. 在 SIMULINK 提供的图形用户界面 GUI 上, 只要进行鼠标的简单拖放操作就可构造出复杂的仿真模型. 其中常用的模块有 Ramp 和 Sine Wave, Sum, Trigonometric Function, Zero-Order Hold, Gain, Transfer Fcn 以及 Integrator 等 (图3).

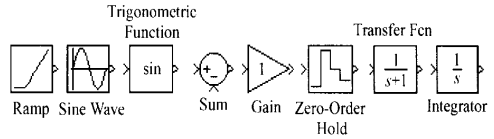


图3 SIMULINK 典型模块

2.2 系统建模

用 SIMULINK 的标准模块可以很方便地建立数控机床位置控制器的仿真模型. 图4为常见2坐标数控机床进给系统的 SIMULINK 模型.

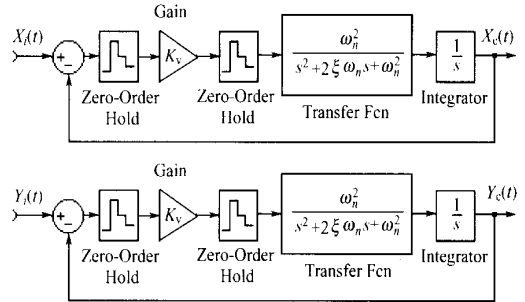


图4 用 SIMULINK 模块表示的 2 坐标位置控制器

本文选择一般中型数控机床位置控制器作为计算实例, 参数: $\omega_n = 120 \text{ s}^{-1}$, $\xi = 0.8$, $K_v = 20 \text{ s}^{-1}$, $\Delta T = 0.005 \text{ s}$.

2.3 输入建模

作为计算实例, 本文选择 3 种典型运动轨迹: 直线拐角 (2 坐标)、圆 (2 坐标) 以及带主轴摆角直线 (4 坐标), 用 MATLAB 进行误差仿真, 分别介绍如下.

2.3.1 仿真直线拐角指令输入函数

铣刀相对工件首先从 $P_b(0, 0)$ 点在 Y 方向上以速度 v 运动, 当输入指令到达 $(0, Y_e)$ 点后, Y 方向输入指令停止, X 方向输入指令开始作用至 $P_e(X_e, Y_e)$ 停止, $X_e = Y_e = 100 \text{ mm}$, 并设 $T_1 = Y_e/v$, $T_2 = (Y_e + X_e)/v$. 输入函数为两段 (见图5).

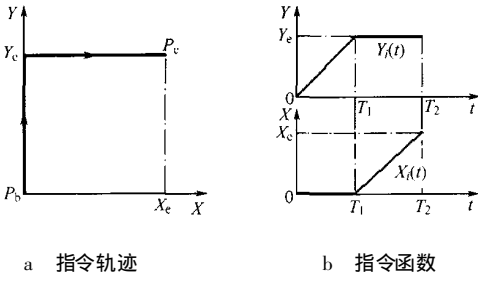
当 $t \in [0, T_1]$ 时,

$$X_i(t) = 0 \quad (3)$$

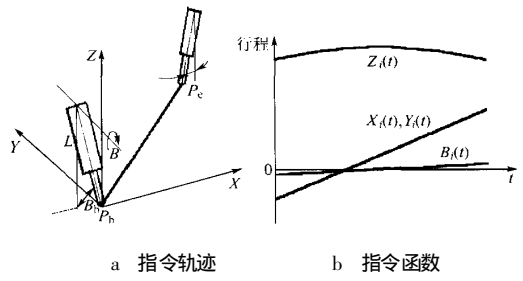
$$Y_i(t) = vt \quad (4)$$

当 $t \in [T_1, T_2]$ 时,

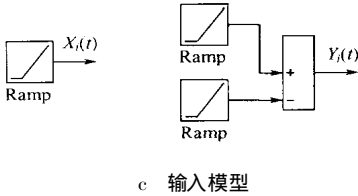
$$X_i(t) = vt \quad (5)$$



a 指令轨迹 b 指令函数



a 指令轨迹 b 指令函数



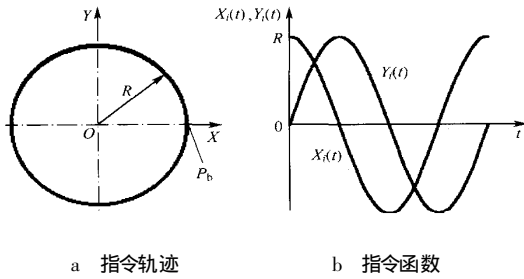
c 输入模型

图 5 直线拐角指令情况

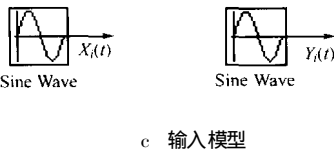
$$Y_i(t) = vt - v(t - Y_e/v) = Y_e \quad (6)$$

2. 3. 2 仿真圆弧指令输入函数

铣刀从 $P_b(R, 0)$ 点以 v 绕 O 点做圆弧运动 圆半径 $R=100\text{mm}$. 其 X 和 Y 方向运动指令为三角函数 (见图 6).



a 指令轨迹 b 指令函数



c 输入模型

图 6 圆弧指令情况

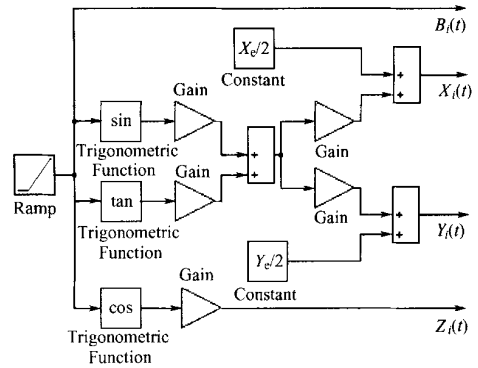
$$X_i(t) = R \cos(vt/R) \quad (7)$$

$$Y_i(t) = R \sin(vt/R) \quad (8)$$

需要在 X 轴的积分模块上设置初始值 $X_0=R$.

2. 3. 3 仿真带主轴摆角直线指令输入函数

指定刀尖运动轨迹为直线 P_bP_c ; 主轴可绕 B 轴旋转, 刀尖与 B 轴距离为 L ; 在起点 $P_b(X_b, Y_b, Z_b, B_b)$ 处 主轴与 Z 轴夹角为 B_b , 刀尖以 v 运动至终点 $P_c(X_c, Y_c, Z_c, B_c)$, 主轴与 Z 轴夹角均匀变化为 B_c ; 仿真数据如下所示: $P_b(0, 0, 0, -30)$, $P_c(200, 200, 0, 30)$, $L=500\text{mm}$. 设中间变量: $S = \sqrt{(X_c - X_b)^2 + (Y_c - Y_b)^2}$, $\theta = \arctan((Y_c - Y_b) / (X_c - X_b))$, $\alpha = B_c$. 输入函数方程为 (见图 7):



c 输入模型

图 7 带主轴摆角直线指令情况

$$B_i(t) = 2\alpha vt / S - \alpha \quad (9)$$

$$X_i(t) = [L \sin(2\alpha vt / S - \alpha) + S \tan(2\alpha vt / S - \alpha) / (2 \tan \alpha)] \cos \theta + X_e / 2 \quad (10)$$

$$Y_i(t) = [L \sin(2\alpha vt / S - \alpha) + S \tan(2\alpha vt / S - \alpha) / (2 \tan \alpha)] \sin \theta + Y_e / 2 \quad (11)$$

$$Z_i(t) = L \cos(2\alpha vt / S - \alpha) \quad (12)$$

需要在 B, X, Y, Z 轴的积分模块上设置初始值 B_0, X_0, Y_0, Z_0 :

$$B_0 = -\alpha \quad (13)$$

$$X_0 = (-L \sin \alpha - S/2) \cos \theta + X_e / 2 \quad (14)$$

$$Y_0 = (-L \sin \alpha - S/2) \sin \theta + Y_e / 2 \quad (15)$$

$$Z_0 = L \cos \alpha \quad (16)$$

2. 4 仿真实例结果

为了验证不同进给速度对轨迹误差的影响 本文选用 3 种进给速度, 分别为

$$v_1 = 10\text{m/min}$$

$$v_2 = 20\text{m/min}$$

$$v_3 = 40\text{m/min}$$

图 8a 为直线拐角指令输入的仿真结果. 在 3 种不同速度下, 最大轨迹误差 e 分别为 2.8mm, 5.2mm, 10mm.

图 8b 为圆弧指令输入的仿真结果. 在 3 种不同速度下, e 分别为 1.3mm, 0.5mm, 2mm (为表现轨迹误差 将其沿圆周方向放大 10 倍显示).

图 8c 为带主轴摆角直线指令输入的仿真结

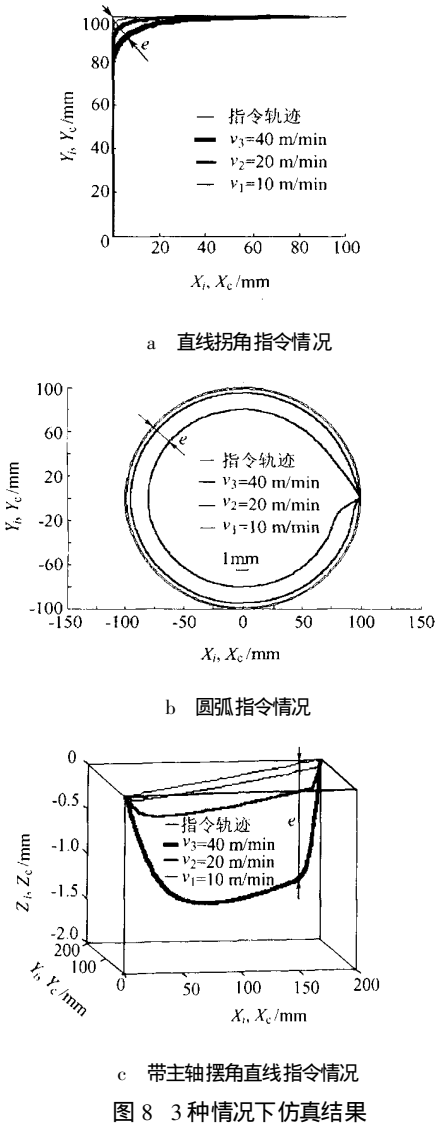


图8 3种情况下仿真结果

果. 在3种不同速度下, e 分别为0.04 mm, 0.35 mm, 1.4 mm. 利用这种方法, 也可以仿真5坐标加工的轨迹误差.

3 结论

本文研究了利用 MATLAB 对数控机床动态轨迹误差仿真的方法, 并计算了3种典型实例的动态轨迹误差. 可以看出: 在高速运动情况下该误差对工件的轮廓精度影响很大, 在机床开发和使用中必须对这一问题充分重视. 同时也证明 MATLAB 可以快速、精确地进行系统建模、仿真和分析, 是仿真预测数控机床动态轨迹误差的有效工具.

参考文献 (References)

- [1] Huan Ji. Bahnregelung zur Bahnherzeugung an numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1982
- [2] Pritschow G, Huan Ji. Methode zur Robotersimulation unter Berücksichtigung der schwingungsfähigen Mechanik und lageregelten Antriebe [J]. Robotersysteme, 1989, 5: 69~76
- [3] 李清新. 伺服系统与机床电气控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994
Li Qingxin. Servo system and electric control of machine tools [M]. Beijing: China Machine Press, 1994 (in Chinese)
- [4] 何克忠, 李伟. 计算机控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998
He Kezhong, Li Wei. Computer control system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998 (in Chinese)

Method for Calculating the Dynamic Path Error of NC Machine Tools Based on MATLAB

Huan Ji Ma Weimin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract: The sources of dynamic path error of NC machine tools during milling process are analyzed, a simulating method based on MATLAB is introduced. The simulating modules and calculating methods of some typical 2-axes and 4-axes tracks at different feed speeds are also described. The simulating results show that, during high speed milling process the dynamic path error of NC machine tools cannot be neglected.

Key words: numerically controlled machine; high-speed cutting; simulation; path error; MATLAB