

文章编号:1671-6833(2009)02-0107-05

五轴 CNC 系统中有效降低非线性误差的两种方法

陈良骥

(郑州航空工业管理学院 机电工程学院,河南 郑州 450015)

摘 要: 针对五轴数控(CNC)加工由于刀具摆动使得刀尖运动存在的非线性误差问题,建立了该误差的数学模型,提出了两种有效降低该误差的方法:第一种方法对理想线性刀尖轨迹而非数控程序段给定的数据进行插补,对插补点进行坐标变换计算插补器输出的运动控制命令;第二种方法对数控程序段直接插补但将该点对应的刀尖点投影到理想刀尖轨迹上,将投影点进行坐标变换计算机床各轴运动坐标。实例计算表明,利用所提出的方法能将非线性摆动误差降低到 $1\ \mu\text{m}$ 以下,且计算时间($35.6\ \mu\text{s}$)满足数控系统实时性要求。

关键词: 计算机数控;五轴线性插补;刀尖轨迹;非线性误差

中图分类号: TH 161⁺.2

文献标识码: A

0 引言

数控机床特别是五轴数控机床在机械制造业中的广泛应用极大地提高了零部件的加工精度和效率。数控加工过程中引起误差的因素有很多^[1-3],国内外相关研究中多为对数控机床几何及热误差进行建模并提出了相应的降低误差的方法^[1-7],从机床主体制造精度的角度去研究降低加工误差的方法。现行文献在数控系统走刀位置控制方面的研究较少,文献[8]和[9]对五轴数控加工过程中的非线性误差进行了初步尝试,但并没有从数控系统中的插补算法角度来研究探讨减小误差的方法。

线性插补是五轴联动机床数控系统最基本轨迹控制功能。线性程序段输入系统后由线性插补器进行实时插补运算后输出5个运动控制坐标给5个伺服轴。但由于两个旋转坐标的介入,使得刀尖点的运动轨迹并非直线而是一种比较复杂的非线性曲线。相对于理论上要求的直线轨迹,产生了刀尖点的轨迹误差。在自行开发研制五轴联动数控系统时发现,当一段线性程序段的起点和终点间距以及旋转角坐标差较大时,这种刀尖点的轨迹误差也更为突出,直接导致加工误差或刀具与工件间产生碰撞和干涉。笔者将针对该问题提出

相应的解决办法以提高系统的轮廓控制精度。

1 非线性误差产生机理与建模

五轴数控编程时无论哪种结构形式的五轴机床一般都假定工件静止而刀具相对工件运动。如图1所示, O_s 、 T_s 和 O_e 、 T_e 分别为程序段起点和终点处刀尖点矢量、刀具轴向方位单位矢量(均为 $o_w-x_wy_wz_w$ 工件坐标系 w 中的表达),经过后处理程序可得在机床坐标系 $o_m-x_my_mz_m$ 下的各轴起点和终点运动坐标 $(X_s, Y_s, Z_s, A_s, C_s)$ 和 $(X_e, Y_e, Z_e, A_e, C_e)$,即生成如下数控程序段:

N0100 ...XX YY ZZ AA CC;

N0110 G01XX YY ZZ AA CC;

上述程序段输入数控系统由系统中的线性插补模块进行插补计算输出机床各轴在机床坐标系下的运动坐标。因此,起点和终点间形成的直线段为数控系统实际插补的路径。实际上,该路径应为刀具旋转、摆动的中心点的运动轨迹,本文将该路径称为虚拟路径。插补该虚拟路径时,由于刀具的旋转和摆动以及摆长的存在会使得实际的刀尖轨迹为一条非线性轨迹,与数控编程时编程人员预期的理想直线刀尖轨迹并不重合,二者间形成偏差 e 即为五轴数控系统中的非线性误差。

收稿日期:2008-10-27;修订日期:2009-01-07

基金资助:航空科学基金资助项目(2008ZE55003)

作者简介:陈良骥(1978-),男,四川邻水人,郑州航空工业管理学院副教授,博士,研究方向为五轴数控系统与数控加工, E-mail: chenjiacielj@163.com.

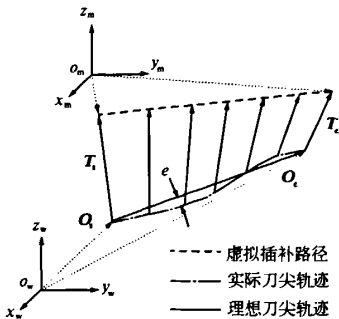


图1 五轴线性插补误差的产生

Fig. 1 Error producing of 5-axis linear interpolation

假设插补图1中的虚拟路径共需 n 个插补周期,即对应 $n-1$ 个插补中间点形成机床5个轴的运动坐标 $(X_i, Y_i, Z_i, A_i, C_i)$, $1 \leq i \leq n-1$,又假定 4×4 齐次坐标矩阵 mM_w 表示从机床坐标系 m 坐标变换到工件坐标系 w 所需的坐标变换矩阵,根据文献[10]的推导和论述,矩阵 mM_w 一般应为关于机床五轴运动坐标的函数,即

$${}^mM_w = {}^mM_w(X_i, Y_i, Z_i, A_i, C_i) \quad (1)$$

如果已知刀尖点在机床坐标系 m 中的 4×1 齐次坐标 $[O_m \ 1]^T$,则根据机器人学中的 D-H 方法可求得加工过程中实际刀尖点的齐次坐标

$$P_i = [O_i \ 1]^T = {}^mM_w [O_m \ 1]^T \quad (2)$$

通过对 O_i 插值或拟合的方法即可求得实际刀尖轨迹 P 的近似表示.理想刀尖轨迹为 O_i 和 O_e 形成的一条直线 R (图1中的粗实线部分),则可建立如下非线性误差的模型

$$e = \max \{ \|P - R\| \} \quad (3)$$

2 降低非线性误差的方法

针对数控系统软件线性插补时的误差问题,笔者提出如下两种降低非线性误差的方法.

2.1 理想刀尖轨迹插补法

在插补前数据准备时,首先应用式(2)将程序段中的数据 $(X_i, Y_i, Z_i, A_i, C_i)$ 和 $(X_e, Y_e, Z_e, A_e, C_e)$ 分别转化成工件坐标系下的 O_i 和 O_e .然后对 O_i 和 O_e 形成的理想刀尖轨迹 R (为一直线)进行实时插补得到工件坐标系下的插补点 O_{wi} (并同时转角 A 和 C 的插补计算得 A_i 和 C_i).由于工件坐标系到机床坐标系的齐次坐标变换矩阵 mM_w 和机床坐标系到工件坐标系的齐次坐标变换矩阵 wM_m 互为逆矩阵,即

$${}^wM_m = [{}^mM_w]^{-1} \quad (4)$$

用该矩阵左乘 O_{wi} 的齐次坐标即可求得对应的在机床坐标系下的机床各平动轴的运动坐标

$$[X_i \ Y_i \ Z_i \ 1]^T = {}^mM_w [O_{wi} \ 1]^T \quad (5)$$

将 $(X_i, Y_i, Z_i, A_i, C_i)$ 作为线性插补器的输出给伺服系统.

经过上述处理后刀尖将沿着一条近似于直线的轨迹运动,和理想刀尖轨迹间的误差将得到大幅降低,如图2所示.该方法的计算流程如图3所示.

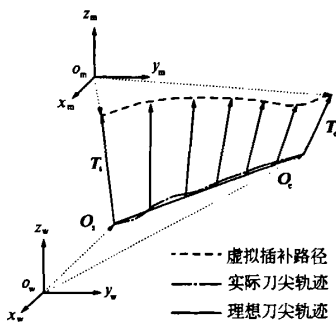


图2 理想刀尖轨迹插补法模型

Fig. 2 Model of interpolating an ideal tool-tip path

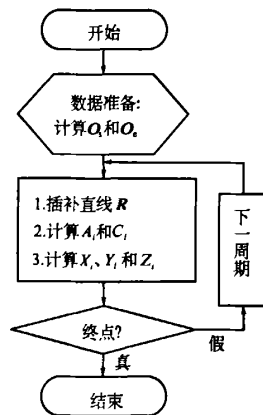


图3 理想刀尖轨迹插补法流程

Fig. 3 Flowchart of interpolating an ideal tool-tip path

2.2 矢量投影法

对图1中的虚拟路径进行插补得到第 i 个插补点 $(X_i, Y_i, Z_i, A_i, C_i)$,由式(2)可计算出该点在 w 系下对应的刀尖点 P_i (以 4×1 齐次坐标形式表达).如图4所示, O_i 为刀尖点 P_i 在 w 系下的坐标点矢量(三维),将 O_i 与 O_e 形成的矢量向理想刀尖轨迹 R (由点 O_i 和 O_e 形成的线段)投影,投影点矢量为 Q_i ,显然

$$\|O_i - Q_i\| = e_i \quad (6)$$

根据矢量内积的定义可知,

$$(O_e - O_i) \cdot (O_i - O_e) = \|O_e - O_i\| \times \|Q_i - O_i\| \quad (7)$$

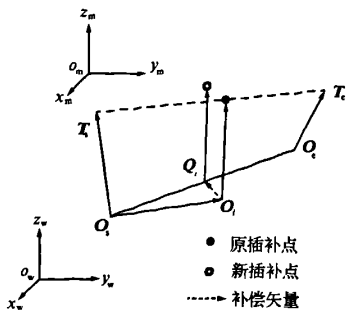


图4 矢量投影法原理

Fig. 4 Principle of vector projection method

所以,

$$\|Q_i - O_s\| = \frac{O_c - O_s}{\|O_c - O_s\|} \cdot (O_i - O_s) \quad (8)$$

可得投影点:

$$Q_i = O_s + \frac{\|Q_i - O_s\|}{\|O_c - O_s\|} \cdot (O_c - O_s) \quad (9)$$

同样通过坐标变换可求得 Q_i 对应的新插补点在机床坐标系下的坐标

$$[X_i^* \ Y_i^* \ Z_i^* \ 1]^T = {}^mM_w [Q_i \ 1]^T \quad (10)$$

插补器输出 $(X_i^*, Y_i^*, Z_i^*, A_i, C_i)$ 给各伺服轴.

列出该方法的计算流程如图5所示.

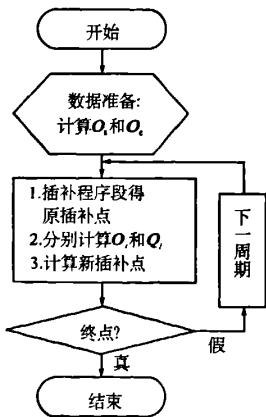


图5 矢量投影法计算流程

Fig. 5 Calculating process of vector projection method

3 实例计算与结果分析

3.1 机床及其运动学模型

以图6所示的双转台型五轴机床为例进行说明,该机床分为刀具端运动链(床身1→Z轴7→刀具8)和工件端运动链(床身1→Y轴2→X轴3→A轴转台4→C轴转台5→工件6).在床身1、Y轴2、X轴3、A轴转台4、C轴转台5、工件6和刀具8上分别建立坐标系 m 、 y 、 x 、 a 、 c 、 w 和 t ,如图7

所示,其中虚线表示在该方向有转动或平动.

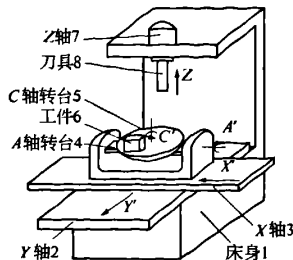


图6 双转台类型五轴铣床

Fig. 6 Two-rotating-table type of 5-axis milling machine

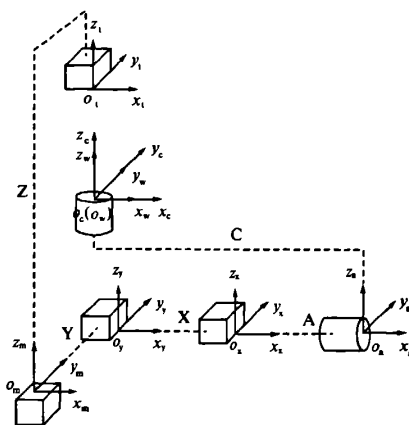


图7 各运动坐标系的建立

Fig. 7 Foundation of all motion coordination systems

建立各坐标系后,参考文献[10]中提出的方法可得 mM_m 和 $[O_m \ 1]^T$ 分别为

$${}^mM_m = \begin{bmatrix} \cos C_i & -\cos A_i \sin C_i & \sin A_i \sin C_i & X_i \cos C_i - Y_i \cos A_i \sin C_i \\ \sin C_i & \cos A_i \cos C_i & -\sin A_i \cos C_i & X_i \sin C_i + Y_i \cos A_i \cos C_i \\ 0 & \sin A_i & \cos A_i & Y_i \sin A_i - b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

和

$$[O_m \ 1]^T = [0 \ 0 \ a + b + Z_i \ 1]^T \quad (12)$$

式中: a 表示加工初始时刻刀尖点与 C 轴转台台面的垂直距离; b 表示 C 轴转台台面中心与 A、C 轴交点间的距离.

3.2 计算条件给定

在 VC++ 环境下编程实现了本文提出的两种误差实时补偿方法. 设定的机床参数如下: $a = 450 \text{ mm}$, $b = 150 \text{ mm}$, 插补周期 $T = 1 \text{ ms}$. 为进行比较分析说明,现列出 (I) 和 (II) 两段五轴线性插补程序段代码:

(I) N0100 ... X50 Y50 Z - 340.2 A30 C90

```
F12000;
N0110 G01X - 100 Y29.54 Z - 389.21 A36
C90;
( II ) N0100 ... X50 Y50 Z - 340.2 A30 C90
F12000;
N0110 G01X36.61 Y229.46 Z - 563.75 A45
C240;
```

以上两段代码的 O_1 和 O_2 都为 (86.6, 50, 100) 和 (100, -100, 37.894), 唯一的差别之处是: (I) 段中刀具的摆动幅度较小, 而 (II) 段刀具摆动幅度较大。

3.3 计算结果与对比分析

(1) 无误差补偿插补以上两段数控程序。取 30 个插补周期插补 (I) 段时, 误差曲线如图 8 所示, 最大误差约 1.5 mm。相同的方法插补 (II) 段时误差最大可达上百毫米。出现这种这种情况的原因就在于 (II) 段刀具的摆动幅度较大, 引起的刀尖点位置偏差也相对较大。这就提醒我们在进行五轴数控编程时, 应尽可能地避免相邻线性程序段间的转角差过大。而且即便该转角差不大时, 仍有误差 (如 (I) 段), 这就需要 CNC 系统的插补模块具备降低非线性误差的能力。

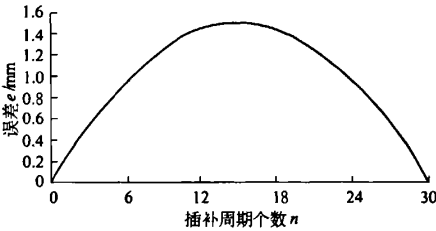


图 8 不用本文方法插补 (I) 段的非线性误差
Fig.8 The nonlinear error of (I) without the proposed methods

(2) 采用本文 2.2 节中提出的矢量投影误差实时补偿插补时 (采用理想刀尖轨迹插补补偿方法得到的数据基本相同): 取 30 个和 60 个周期插补 (I) 段得到如图 9 所示的误差曲线; 取 60 个和 100 个周期插补 (II) 段得到如图 10 所示的误差曲线。

可以看出, 无论哪种线性插补程序段, 经过本文提出的误差补偿方法插补后刀尖轨迹误差都大大减小, 而且随着插补周期个数的增加, 该轨迹误差也会随之减小, 表明每个插补周期进给步长越小, 补偿后的刀尖轨迹误差也越小。限于篇幅, 现将其他一些主要的参数列于表 1。

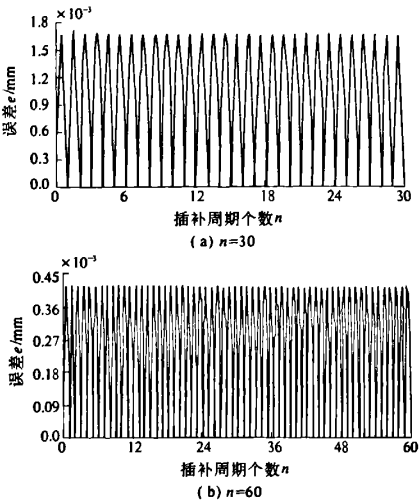


图 9 用本文方法插补 (I) 段的非线性误差
Fig.9 The nonlinear error of (I) with the proposed methods

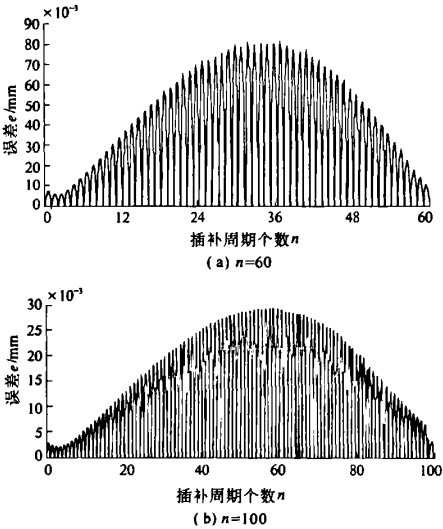


图 10 用本文方法插补 (II) 段的非线性误差
Fig.10 The nonlinear error of (II) with the proposed methods

表 1 主要参数对比

Tab.1 Compare of the main parameters

插补段	本文方法		不用本文方法	
	$n = 60$ ($\Delta l = 2.7 \text{ mm}$)	$n = 814$ ($\Delta l = 0.2 \text{ mm}$)	e_{\max} /mm	T_{run} /μs
(I)	$e_{\max}/\mu\text{m}$ 0.42 $T_{\text{run}}/\mu\text{s}$ 35.6	$e_{\max}/\mu\text{m}$ 0.035 $T_{\text{run}}/\mu\text{s}$ 35.6	1.5	13.3
(II)	80.00 35.6	0.710 35.6	116.5	13.3

注: Δl 表示每个插补周期的进给步长; n 表示插补周期个数, 其中 $n = 814$ 为插补周期的实际个数 (对应的进给步长为 0.2 mm); e_{\max} 表示刀尖轨迹偏离误差的最大值; T_{run} 表示每次插补计算的时间。

4 结论

(1) 由于刀具的摆动会使得五轴 CNC 系统的线性插补器输出的刀尖点轨迹偏离理想的线性刀尖轨迹,而且刀具摆动幅度较大时偏离误差也会越大。

(2) 理想刀尖轨迹插补法直接对刀尖线性路径进行插补,而矢量投影法对线性程序段进行插补后将对应的刀尖点投影到理想刀尖轨迹上。这两种方法都需进行机床五个轴运动坐标的逆向求解。因此,通过使 CNC 系统具备坐标变换能力并在五轴线性插补算法中添加笔者提出两种方法可有效降低刀尖轨迹偏离误差,提高了 CNC 系统轨迹控制精度。

参考文献:

- [1] 陈书涵,严宏志,明兴祖,等.六轴五联动螺旋锥齿轮磨床误差建模与分析[J].中国机械工程,2008,19(3):288-294.
- [2] 李欢玲,缪群华,赵宇,等.基于多体系统理论的五轴加工中心几何误差建模[J].中国制造业信息化,2007,36(19):16-19.
- [3] 沈金华,李永祥,鲁志政,等.数控车床几何和热误差综合实时补偿方法应用[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(1):163-166.
- [4] 郭红旗,赵小松,刘又午,等.四轴联动加工中心回转轴几何误差参数的辨识及测量[J].天津大学学报,2001,34(4):463-466.
- [5] 赵小松,方沂,章青,等.四轴联动加工中心误差补偿技术的研究[J].中国机械工程,2000,11(6):637-639.
- [6] 刘廷章,卢秉恒,李涤尘,等.基于神经网络的复杂曲面加工误差控制[J].中国机械工程,1996,7(6):21-23.
- [7] 刘延斌,韩秀英.一种五轴数控机床的综合误差建模与补偿[J].制造技术与机床,2007,(11):35-38.
- [8] 张利波,刘晓云,张曰敏.五轴 NC 加工中非线性误差分析及补偿[J].华中理工大学学报,1995,23(2):67-70.
- [9] 吴大中,王宇晗,冯景春,等.五坐标数控加工的非线性运动误差分析与控制[J].上海交通大学学报,2007,41(10):1608-1612.
- [10] 卢晓勇,侯伯杰,蒋文兵,等.螺旋锥齿轮数控加工中的后置处理[J].郑州大学学报:工学版,2002,(3):16-19.

Two Methods of Reducing Nonlinear Error in 5-axis CNC System

CHEN Liang - ji

(School of Mechatronics Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Aiming at problem of nonlinear error of tool - tip track caused by cutter rotating in 5 - axis computer numerically controlled (CNC) machining, producing mechanism and mathematical model of the error were firstly analyzed and established respectively and two methods of reducing error were presented. In the first method, ideal linear tool - tip path not data given in NC program was interpolated and interpolating points were converted to motion controlling instructions as output of interpolator. The second one directly interpolated the NC program, and the corresponding tool - tip of the interpolating point was projected to ideal linear tool - tip path. The projection point was transformed to the motion coordinates of axes of machine tool. Through the actual example, it is indicated that the nonlinear error were less than $1\text{ }\mu\text{m}$ with the proposed methods and the runtime of the methods, $35.6\mu\text{s}$, was able to meet the real - time requirement of NC system.

Key words: CNC; 5-axis linear interpolation; tool - tip path; nonlinear error