

五轴数控加工非线性误差分析及控制策略^{*}

Five-Axis CNC Machining Nonlinear Error Analysis and Control Strategy

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 刘本刚 王碧玲
9 3 0 5 7 部 队 机 务 处 王 石
沈 阳 高 精 数 控 技 术 有 限 公 司 郑 缪 默

[摘要] 理论分析与仿真结果表明:旋转轴线性插补可以完成复杂结构件的五轴联动加工,且速度变化平滑,但刀轴矢量形成的曲面偏离加工表面引起非线性加工误差。矢量插补虽然可以避免旋转轴插补运动产生的非线性误差,但速度波动大,甚至导致机床剧烈振动,引起伺服和系统报警。结合航空薄壁件加工试验对旋转轴插补运动产生的非线性误差进行了分析,并对矢量插补存在的问题给出了改进策略。

关键词: 五轴联动 误差分析 旋转轴 平面矢量插补 航空薄壁件加工

[ABSTRACT] Theoretical analysis and simulation results show that the rotational axis linear interpolation can complete the complex structure by five-axis machining, and the speed changing is smoother, but the deviation of surface of tool axis vector from machined surface leads to nonlinear error. Vector interpolation can avoid nonlinear error of rotation axis interpolation movement, but the speed fluctuation is big, and even leads to severe vibration of machine and servo alarms. In view of the above problems, improvement strategies are put forward. Finally, the test of thin-wall part of aircraft is used to analyze the nonlinear error by rotation axis interpolation. At the end of the article, the improvement strategy is given.

Keywords: 5-axis Error analysis Rotary axes Plane interpolation of tool orientation Machining of aircraft thin-wall part

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.15.065

五轴联动数控加工技术是实现复杂自由曲面加工的关键技术,在航空制造领域的应用极为广泛。但是,五轴加工中实际刀轨常偏离加工表面引起非线性误差^[1],如航空薄壁件外轮廓加工时,表面产生周期性的起伏,这是由于旋转轴插补运动在与走刀方向垂直的平面内引起的非线性误差造成的。樊曙天等^[2]通过集成 RTCP

功能使系统实时进行线性补偿,有效地减小了旋转轴插补在走刀平面内引起的非线性误差。杨旭静等^[3]提出了通过限制两相邻刀位点之间刀轴矢量夹角的方法来控制在走刀垂直的平面内的非线性误差的大小,但此方法随着控制精度提高,程序段数量剧增,增加了数控系统的处理时间,并且无法消除该非线性误差。樊留群等^[4]提出了刀轴矢量平面插补算法,通过仿真验证该方法从根本上解决了旋转轴插补在与走刀垂直的平面内引起的非线性误差,但未提及该插补算法下旋转轴角度和转速变化的连续性及平滑性等问题。文中所讨论的旋转轴插补算法均属于数控系统内部插补运算方法。

本文对常用的两种旋转轴插补方法在与走刀方向垂直的平面内引起的非线性误差进行研究的基础上,通过实例对旋转轴插补过程进行仿真,重点分析刀具姿态误差、旋转轴角度和转速的变化情况,结合航空薄壁件加工试验对旋转轴插补运动产生的非线性误差进行分析,并对矢量插补存在的问题给出了改进策略。

1 非线性加工误差

数控加工用微小线段逼近编程曲线,因此实际加工中刀轨总是有一定的偏差^[5],根据引起的原因不同,分为线性误差与非线性误差。线性误差实质是数控加工用微小直线段来逼近编程曲线产生的偏差,与被加工表面的曲率及程序段长度等有直接关系。

在有转动轴的数控系统通过分段非直线运动逼近加工曲面,照此进行插补运动时所需理想运动包络出来一段波纹起伏的曲面与光滑的编程曲面之间的偏差称为非线性误差^[6]。其中,在与走刀方向垂直的平面内的非线性误差是由于旋转轴运动坐标(角度)与刀轴矢量之间的非线性关系使刀轴矢量在插补时偏离了编程曲面造成的,如图1所示, q 为编程刀轴矢量, q' 为插补刀轴矢量, θ 为两者之间的偏差角。与线性误差的根本区别是非线性误差产生在插补程序段内,而不是在整条刀轨上。

2 旋转轴插补运动引起的非线性误差分析

本文以A、C双转台五轴数控机床为例对旋转轴插

^{*} “高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项(2013ZX04012-021)资助。

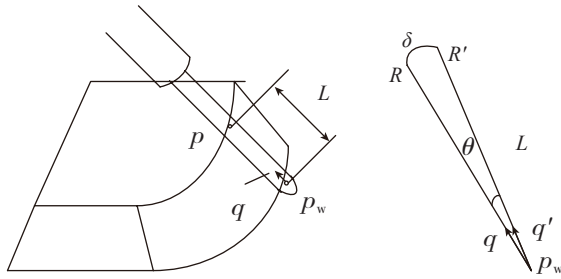


图1 非线性误差示意图

Fig.1 Nonlinear error diagram

补运动进行分析。

2.1 A、C 五轴机床运动学模型

五坐标加工时, CAM 编程软件生成的刀位数据包括刀位矢量 p 和刀轴矢量 q 。其中, 刀位矢量表示刀具刀尖点的位置, 刀轴矢量表示当前刀具的空间姿态。

机床坐标系之间的变换关系, 如图 2 所示, 设坐标系 O_m_XYZ 为机床坐标系, 与 A 轴固连, 原点为两回转轴的交点; O_w_XYZ 为工件坐标系与工件固联; 与刀具固联的 $O_t_X_tY_tZ_t$ 称为刀具坐标系, 原点在刀尖点上。在工件坐标系下, 两回转轴交点 O_m 的位置矢量记为 $r_m(m_x, m_y, m_z)$, 假设编程刀轨上任意点 $P(p, q)$, 刀位矢量为 $r_p = p_w(p_x, p_y, p_z)$, 刀轴矢量为 $q(i, j, k)$ 。机床旋转轴为 A 轴和 C 轴, 对应的运动坐标分别为 a 和 c 。记机床平动轴相对于初始状态 (C 轴轴线与主轴平行) 的位置为 $r_s(s_x, s_y, s_z)$ 。

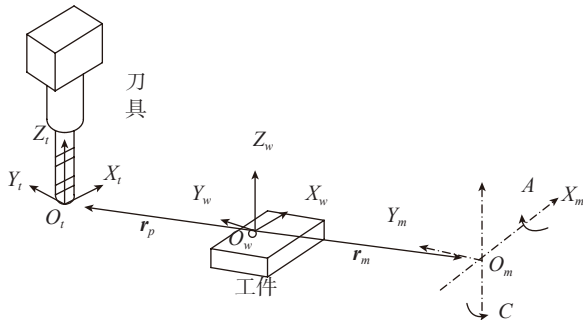


图2 A、C 双转台机床坐标系之间的变换关系

Fig.2 Transformation relationship between A, C two rotary table machine coordinate system

根据机床坐标系之间的变换关系, 该机床的运动学模型^[7]:

$$p_w = T(r_m)\text{rot}(-c)(\text{rot}(-a)T(r_s - r_m)[0, 0, 0, 1]^T, \quad (1)$$

$$i = \sin a \sin c,$$

$$j = \sin a \cos c,$$

$$k = \cos a.$$

经逆变换, 该机床进给轴的运动坐标为:

$$p_w = T(r_m)(\text{rot}(-c)(\text{rot}(-a))^T T(p_w - r_m)[0, 0, 0, 1]^T,$$

$$a = k_a \arccos(k),$$

$$c = \arctan\left(\frac{i}{j}\right) - k_c \pi, \quad (2)$$

式中, T, R 分别为平移和回转运动的齐次坐标变换矩阵; a 为 A 轴旋转角度; c 为 C 轴旋转角度; k_a 为常数, $k_a = -1, 1$; k_c 为系数, $k_c = 0, 1$ 。

2.2 旋转轴角度线性插补及非线性误差分析

在编程后处理阶段, CAM 根据刀位数据按照式 (2) 计算进给轴的运动坐标, 并生成加工程序。数控系统根据加工程序, 在相邻刀位点之间进行插补计算, 由伺服驱动器根据插补值驱动旋转轴电机控制刀具在刀位点之间运动时的空间姿态。

旋转轴按旋转角度进行线性插值的方式, 称为旋转轴角度线性插补^[8], 简称线性插补。线性插补策略如下: 假设程序段始点 S 和终点 E 的刀轴矢量分别为 $q_s(s_i, s_j, s_k)$ 和 $q_e(e_i, e_j, e_k)$, 位置矢量分别为 $p_s(s_x, s_y, s_z)$ 和 $p_e(e_x, e_y, e_z)$, 运动坐标分别为 $L_s(s_x, s_y, s_z, a_s, c_s)$ 和 $L_e(e_x, e_y, e_z, a_e, c_e)$ 。在程序段内分别对 A、C 轴对应的旋转角度进行 n 等分, 即

$$\Delta a = \frac{a_e - a_s}{n},$$

$$\Delta c = \frac{c_e - c_s}{n}, \quad (3)$$

式中, i 为程序段总线性插补段数。

数控加工时, 数控系统将下式计算出的角度值不断发送给旋转轴伺服驱动器, 由其控制 A、C 轴伺服电机准确到达插补值。

$$a_{i+1} = a_i + \Delta a,$$

$$c_{i+1} = c_i + \Delta c, \quad (4)$$

式中, i 为当前插补点序号。

线性插补通过控制旋转角度的线性变化完成旋转轴的插补运动, 因此旋转轴转速变化平滑。但是由于旋转轴角度与刀轴矢量之间的非线性关系, 在线性插补运动过程中, 刀轴矢量不是线性变化的, 即插补过程中的刀轴矢量不在由相邻刀位点的始点刀轴矢量和终点刀轴矢量确定的矢量平面内, 该平面是通过将终点刀轴矢量进行平移, 保证终点刀轴矢量与始点刀轴矢量的起点重合时两者形成的平面。因此, 线性插补时, 刀轴矢量会偏离加工表面产生非线性误差。如图 3 所示是加工型腔内表面时刀轴矢量的变化示意图, 由于内表面为斜面, 此时矢量平面即为该斜面, 图中虚线为线性插补运动过程中刀轴矢量与零件上表面的交线。

2.3 平面矢量插补及非线性误差分析

平面矢量插补算法是旋转轴在相邻刀位点之间插补时, 保证刀轴矢量按线性变化, 即始终在程序段始点刀轴矢量和终点刀轴矢量所确定的矢量平面 (该平面定

义同上)内。矢量插补原理如图4所示,矢量插补由于保证插补过程中刀轴矢量不会偏离编程平面,完全修正了旋转轴角度线性插补产生的非线性误差。但是由公式(2)可知,当刀轴矢量均匀变化时,旋转轴角度按非线性变化,容易产生冲击,且刀轴矢量在奇异点(0,0,1)附近(如 $j \rightarrow 0, c \rightarrow \infty$)的微小变化,可导致旋转轴角度和转速发生急剧变化、产生跨象限等问题,引起机床剧烈震动,导致伺服报警,甚至破坏机床运动机构。矢量插补控制策略如图5所示。

以表1中的加工程序段为例,使用MATLAB分别对线性插补和矢量插补过程进行仿真,重点分析旋转轴插补运动过程中刀具姿态误差、旋转轴角位移和角速度的变化情况,仿真结果对比如图6~11所示。

仿真结果(见图6)表明使用线性插补时,刀轴矢量

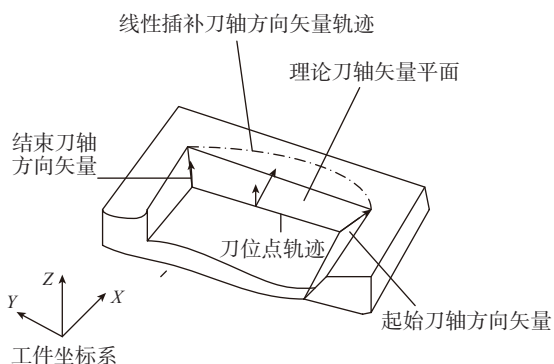


图3 Linear interpolation diagram of rotation axis angle

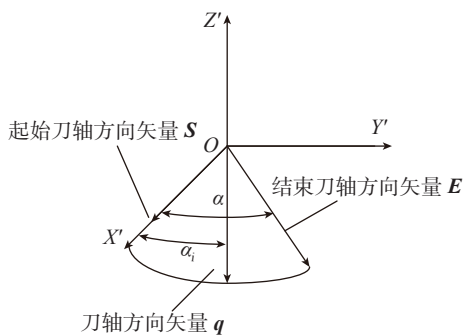


图4 Interpolation principle diagram of cutter axis vector plane

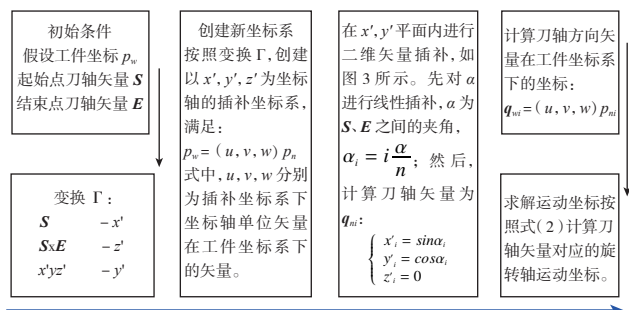


图5 Interpolation control strategy of rotation axis vector

除在程序段始点和终点位置与编程刀轴矢量相同外,整个插补运动过程(程序段内)中刀轴矢量偏离加工表面,且偏移角度最大值发生在程序段中间附近(见图7)。因此,在实际加工时会发生过切或欠切,并且在中间位置过切或欠切量最大,在整条刀轨上表现为周期性的起伏。由于在程序段内旋转轴角度按照相同比例变化,所以旋转轴角度及旋转速度能够实现连续、平滑的变化(见图8~11)。

表1 加工程序段

程序	备注
N1030G01X23.763 Y-45.12Z4.5A45.0087° C89.0002°	刀位矢量(23.763, -45.12, 4.5) 刀轴矢量(0.7071, -0.0123, 0.707)
N1040G01X31.7 Y20Z16.071A45.0087° C-89.0002°	刀位矢量(31.7, 20, 16.071) 刀轴矢量(-0.7071, -0.0123, 0.707)

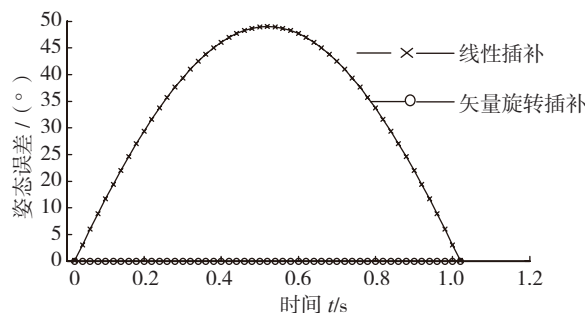


图6 刀具姿态误差分布图
Fig.6 Tool posture error distribution

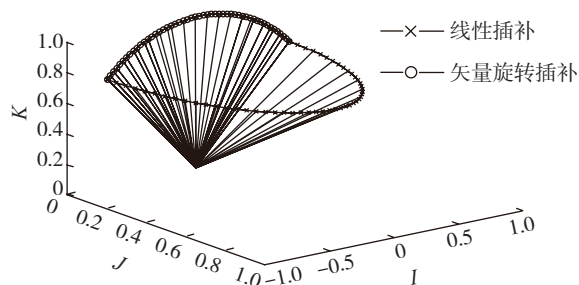


图7 空间刀具姿态示意图
Fig.7 Space tool posture diagram

由图6、7可知,矢量插补很好地修正了线性插补引起的非线性加工误差,能够有效解决五轴加工曲面过程产生圆弧型过切或欠切现象,但是旋转轴角位移(见图8,9)和转速(见图10,11)的仿真结果表明,矢量插补时旋转轴角位移变化显著,转速波动明显,为严重非线性变化,影响零件表面加工质量,尤其是在奇异点附近转速急剧变化甚至突变,易引起机床剧烈振动,导致伺服驱动或系统报警,甚至破坏机床运动机构。

针对矢量插补的特点,使用矢量插补加工航空结构

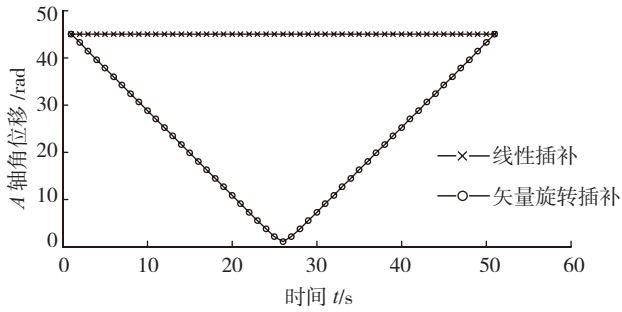


图8 A轴角位移曲线
Fig.8 A shaft angular displacement curve

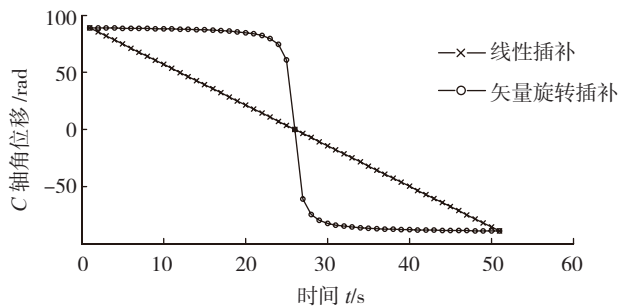


图9 C轴角位移曲线
Fig.9 C shaft angular displacement curve

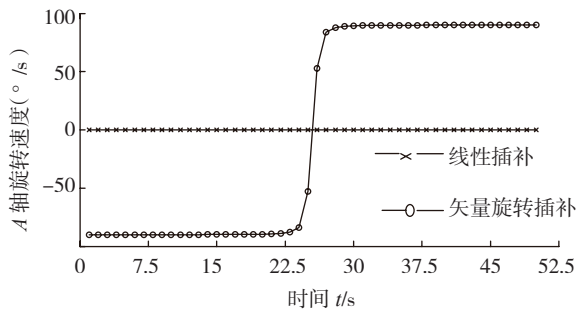


图10 A轴角速度曲线
Fig.10 A shaft angular velocity curve

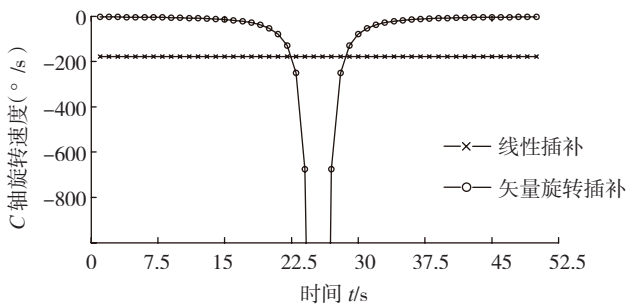


图11 C轴角速度曲线
Fig.11 C shaft angular velocity curve

件时,工艺员在编程中应注意以下问题:(1)数控加工进给速度不能太大,否则引起刀轴矢量变化大,导致旋转轴角度和转速急剧变化,使机床承受较大的冲击,影响结构件表面加工质量。(2)避免跨象限问题。总之,

矢量插补很好地修正了非线性加工误差,可通过控制切削参数在一定程度上防止旋转轴转速的急剧变化,解决了航空复杂结构件精加工的难题,但是加工效率低,在奇异点附近旋转轴转速发生突变,无法保证运动的平滑性。因此,数控系统需进一步完善旋转轴插补策略,克服矢量插补的局限性。如数控系统通过预读数控程序,使用“智能检测模块”计算并发现加工程序段中存在的奇异点,并在奇异点附近采用线性插补避免旋转轴转速剧烈变化,而其他区域则采用矢量插补避免非线性加工误差,实现精加工要求。

3 结论

(1)以A、C双转台五轴数控加工为例,对常用的旋转轴插补策略及引起的非线性误差进行了理论分析,并结合实例对两种常见的旋转轴插补方法进行了仿真分析,仿真结果表明了理论分析的正确性。

(2)分析结果表明旋转轴旋转角度线性插补引起非线性加工误差,导致零件发生过切或欠切,无法满足航空结构件精加工要求;旋转轴矢量插补很好地修正了该非线性误差,但运动过程中旋转轴速度波动明显,影响表面加工质量,且在奇异区域附近转速急剧变化,易引起机床剧烈振动,导致伺服和系统报警,破坏机床运动机构。

(3)航空结构件加工试验结果进一步表明:航空薄壁件精加工只有采用矢量插补,才能保证加工精度,但是需对矢量插补运动性能做进一步研究,使旋转轴转速尽量满足平滑性要求,避免产生过大冲击,以获得更好的表面加工质量,对此本文分别从编程和数控系统的角度提出了改进策略。

参考文献

- [1] 郑颺默,林许,盖荣丽,等.五轴数控系统旋转轴快速平滑插补控制策略.机械工程学报,2012,47(9):107-111.
- [2] 樊曙天,杨伟平.双转台五坐标机床RTCP功能的研究.制造技术与机床,2009,12:74-77.
- [3] 杨旭静,周元生,陈泽忠,等.五轴数控加工中旋转轴运动引起的非线性误差分析及控制,2012,48(3):140-146.
- [4] 樊留群,齐党进,沈斌,等.五轴联动刀轴矢量平面插补算法.机械工程学报,2012,47(19):158-162.
- [5] 叶佩青,赵慎良.微小直线的连续插补控制算法研究.中国机械工程,2004,15(15):1354-1356.
- [6] 盖丽蓉,林许,黄艳,等.五轴联动数控加工中的微小直线段插补方法.小型微型计算机系统,2009,30(12):2374-2377.
- [7] 周艳红,周济,周云飞,等.五坐标数控加工的理论误差分析与控制.机械工程学报,1999,35(5):54-57.
- [8] 武跃,王宇晗,毕庆贞.五轴联动数控加工中旋转角的优化和选择.组合机床与自动化加工技术,2009(5):1-5. (责编 春早)