



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102608951 B

(45) 授权公告日 2014. 12. 17

(21) 申请号 201110027530. 1

(22) 申请日 2011. 01. 25

(73) 专利权人 沈阳机床(集团)设计研究院有限公司上海分公司

地址 200433 上海市杨浦区翔殷路 128 号上海理工大学科技园 1 号楼 2 楼

(72) 发明人 朱志浩 樊留群 齐党进 虞敏

(51) Int. Cl.

G05B 19/19(2006. 01)

审查员 潘宏伟

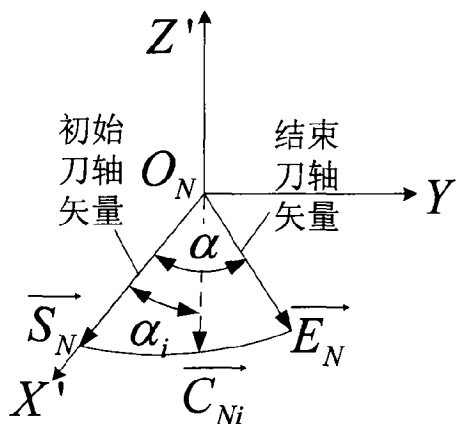
权利要求书1页 说明书3页 附图2页

(54) 发明名称

五轴联动刀轴矢量平面插补算法

(57) 摘要

本发明属于数控加工制造技术领域,具体是一种用于五轴联动数控机床进行圆周铣削时的刀轴插补算法,该算法能有效控制刀轴矢量在倾斜平面内的运动,消除了传统的因采用旋转角度线性插补而造成的非线性误差。算法首先根据矢量的定义和性质,构建新的坐标系;然后在新坐标系下,进行平面内圆弧插补,得到新的刀轴矢量;最后将这个新的刀轴矢量转换为机床坐标系下的刀轴矢量。通过该算法,结合旋转刀具中心点补偿(RTCP),能在控制刀尖点沿着编程轨迹运动的同时保持刀轴矢量始终在一平面内。该算法是为了消除圆周铣削倾斜面加工中的非线性误差而提出的,也可以应用在自由曲面的圆周铣削中。除此之外,该算法有助于优化端铣加工:一方面可以防止刀尖点的波动,提高加工精度;另一方面可以保证刀具不会偏离其有效切削刃,减少刀具的非正常磨损,进而改善工件的表面质量。



1. 一种用于控制五轴联动机床刀轴矢量保持在一个平面内的插补算法,其特征在于五轴联动数控机床进行圆周铣削倾斜面时,在新坐标系下建立新的刀轴矢量平面,在该平面内实现刀轴矢量的平面圆弧插补,控制刀轴矢量始终在该倾斜面内,消除旋转轴线性插补而造成的刀轴矢量偏离加工平面而产生的非线性误差。

其中,新的刀轴矢量平面是由程序段初始刀轴矢量 $\vec{S}_N(1,0,0)$ 和结束刀轴矢量 $\vec{E}_N(\cos\alpha, \sin\alpha, 0)$ 所构成的扇面。

2. 根据权利要求1所述的插补算法,其特征在于新坐标系的建立方法:以初始刀轴矢量为X轴,初始刀轴矢量和结束刀轴矢量的向量积为Z轴,然后以右手定则确定Y轴,建立新坐标系。

3. 根据权利要求1所述的插补算法,其特征在于新刀轴矢量平面的建立方法:计算程序段初始刀轴矢量和结束刀轴矢量在新坐标下的夹角 $\alpha$ , ( $0 \leq \alpha < \pi$ ),当 $\alpha = 0$ 时,不能构成平面,不对其进行圆弧插补;当 $\alpha \geq \pi$ 时,刀具将脱离待加工面,不属于圆周铣削范畴;当 $\alpha < \pi$ 时,初始刀轴矢量和结束刀轴矢量所构成的扇面即为新的刀轴矢量平面。

## 五轴联动刀轴矢量平面插补算法

### 技术领域

[0001] 本发明专利属于数控加工制造技术领域,具体是一种用于五轴联动数控机床在圆周铣削时的刀轴矢量插补算法。

### 背景技术

[0002] 在五轴联动机床加工自由曲面过程中,数控加工路径是通过刀尖点及其刀轴矢量的连续运动控制来完成。理想的情况是保持刀尖点沿曲面上的曲线运动,同时控制刀轴矢量根据曲面的形状摆动,以保持刀具在最佳的切削位置。但由于刀轴矢量的摆动,造成刀尖点偏移,进而引起加工误差。现有的大部分五轴机床都是采用 CAM 编程和后处理的方法来解决这一问题,即在程序段中,刀尖点和刀轴矢量都采用线性插补的方法。这在刀轴矢量摆动较小的情况下能有效地减少加工误差,但在加工圆周铣削倾斜面时,特别是空间平面有刀轴变化的加工中,如果还是以线性插补的方式对旋转轴角度进行插补,将出现过切现象,即实际成形面与腔体上表面的交线为一曲线,而不是理论上的空间直线(如图 1 所示)。

[0003] 其原因在于:当圆周铣削如图 1 所示的腔体内侧面时,待加工面是一个倾斜平面,刀尖点轨迹为一直线,按旋转轴角度线性插补方式进行铣削时,刀轴扫过的是一个曲面(如图 2(a) 所示)。由旋转轴角度线性插补算法可知,当圆周铣削倾斜侧面时,刀轴实际位置偏离了加工平面一个角度(如图 2(b) 所示),而且铣削所产生的非线性误差将随着刀具切削深度的增加而增加,即距离刀尖点越远,产生的过切/欠切越严重,最大非线性误差出现在腔体上表面。

[0004] 从上可以看出,加工圆周铣削倾斜面时产生非线性误差的原因在于在加工过程中,刀轴实际位置产生了变化。因此,本发明针对这种情况提出一种五轴联动刀轴矢量平面插补算法。

### 发明内容

[0005] 为了避免五轴联动数控机床在进行圆周铣削倾斜面时产生非线性误差,本发明专利提出一种刀轴矢量平面插补算法,该算法不仅能有效减少因旋转轴角度线性插补形成的非线性误差,还有助于提高端铣加工精度,减少刀具的非正常磨损。

[0006] 本发明专利的基本思想为:使刀轴在运行过程中始终保持在一个平面中。以该平面作为新的坐标平面,刀轴矢量平面插补算法就是在这个新坐标平面内进行平面圆弧插补和刀轴矢量坐标变换,得到原坐标系下的刀轴矢量。再结合旋转刀具中心点补偿(RTCP)对刀尖点进行控制,能有效控制刀尖点沿着加工路径运动。具体步骤如下:

[0007] 步骤(一):建立新的坐标系

[0008] 设工件坐标系(编程坐标系)为  $O_wXYZ$ ,刀轴矢量为  $\vec{C}_i(c_{xi}, c_{yi}, c_{zi})$ ,将刀轴矢量移动到工件坐标系原点成为固定向量,以初始刀轴矢量  $\vec{S}$  为  $X'$  轴,初始刀轴矢量和结束刀轴矢量的向量积  $\vec{S} \times \vec{E}$  为  $Z'$  轴,然后以右手定则确定  $Y'$  轴,建立新坐标系  $O_nX'Y'Z'$ (如图 3)。根据坐标转换公式,新旧坐标系间的存在如下关系:

$$[0009] \quad [P_w] = [\bar{U} \quad \bar{V} \quad \bar{W}] \cdot [P_N] \quad (1)$$

[0010] 其中,  $[P_w]$  为 P 点在工件坐标系下的坐标,  $[P_N]$  为 P 点在新坐标系下的坐标,  $\bar{U}(u_x, u_y, u_z)$ 、 $\bar{V}(v_x, v_y, v_z)$  和  $\bar{W}(w_x, w_y, w_z)$  为新坐标系下坐标轴单位向量在工件坐标系下矢量值, 而且具有如下关系:

$$[0011] \quad \begin{cases} \bar{U} = \bar{S} \\ \bar{V} = \bar{U} \times \bar{W} = \bar{S} \times (\bar{S} \times \bar{E}) \\ \bar{W} = \bar{S} \times \bar{E} \end{cases} \quad (2)$$

[0012] 设新坐标系下的刀轴矢量为  $\bar{C}_{Ni}$  ( $c_{xi}, c_{yi}, c_{zi}$ ), 则式 (1) 可以表示为

$$[0013] \quad \begin{bmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \\ c_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{ui} \\ c_{vi} \\ c_{wi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0014] 步骤 (二) 对新坐标系下的刀轴矢量进行平面内圆弧插补

[0015] (1). 计算在新的坐标系中的初始刀轴矢量和终点刀轴矢量间的夹角  $\alpha$ 。

$$[0016] \quad \alpha = \arccos(\bar{S} \cdot \bar{E}), (0 \leq \alpha < \pi) \quad (4)$$

[0017] 当  $\alpha = 0$  时, 保持原有刀轴矢量不变; 当  $\alpha \geq \pi$  时, 刀具将脱离待加工面, 不属于圆周铣削范畴; 当  $\alpha < \pi$  时, 初始刀轴矢量  $\bar{S}_N(1, 0, 0)$  和结束刀轴矢量  $\bar{E}_N(\cos \alpha, \sin \alpha, 0)$  所构成的扇面即为新的刀轴矢量平面 (在新坐标系的  $X'Y'$  平面内)。

[0018] (2). 对新刀轴矢量平面内的刀轴矢量  $\bar{C}_{Ni}$  (简称新刀轴矢量) 进行线性插补, 依据下式得到  $\bar{C}_{Ni}$  与初始刀轴矢量的夹角  $\alpha_i$

$$[0019] \quad \alpha_i = i \cdot \frac{\alpha}{n}, (n \text{ 为加工路径插补的段数}) \quad (5)$$

[0020] (3). 根据下式即可完成对新刀轴矢量的平面内圆弧插补。

$$[0021] \quad \begin{cases} u_i = \cos \alpha_i \\ v_i = \sin \alpha_i \\ w_i = 0 \end{cases}, (i=0, 1, \dots, n) \quad (6)$$

[0022] 步骤 (三) 得到工作坐标系下的刀轴矢量

[0023] 根据式 (2) 进行坐标变换得到工作坐标系下刀轴矢量  $\bar{C}_i(c_{xi}, c_{yi}, c_{zi})$  为:

$$[0024] \quad \begin{cases} c_{xi} = t_{xs} \cdot \cos \alpha_i - [t_{ys} \cdot (t_{xe} \cdot t_{ys} - t_{xs} \cdot t_{ye}) + t_{zs} \cdot (t_{xe} \cdot t_{zs} - t_{xs} \cdot t_{ze})] \cdot \sin \alpha_i \\ c_{yi} = t_{ys} \cdot \cos \alpha_i + [t_{xs} \cdot (t_{xe} \cdot t_{ys} - t_{xs} \cdot t_{ye}) - t_{zs} \cdot (t_{ye} \cdot t_{zs} - t_{ys} \cdot t_{ze})] \cdot \sin \alpha_i \\ c_{zi} = t_{zs} \cdot \cos \alpha_i + [t_{xs} \cdot (t_{xe} \cdot t_{zs} - t_{xs} \cdot t_{ze}) + t_{ys} \cdot (t_{ye} \cdot t_{zs} - t_{ys} \cdot t_{ze})] \cdot \sin \alpha_i \end{cases} \quad (7)$$

[0025] 其中  $t_{xs}, t_{ys}, t_{zs}, t_{xe}, t_{ye}, t_{ze}$  分别为加工初始位置和结束位置的刀轴矢量的坐标。

步骤 (四) 进行旋转刀具中心点补偿 RTCP 得到实际旋转轴的角度和直线轴的坐标

[0026] 这一步和普通五轴机床一样, 根据刀轴矢量计算出相应旋转轴的角度, 然后根据 RTCP 对刀尖点进行补偿, 补偿由于刀具的摆动造成的刀尖点的偏移。最后将这些数据发送给位置控制, 完成对刀具的运动控制。

附图说明

- [0027] 图 1 为腔体模型和测试结果示意图  
 [0028] 图 2 为旋转轴角度线性插补结果示意图  
 [0029] 图 3 为刀轴矢量旋转变换示意图  
 [0030] 图 4 为刀轴矢量平面插补原理示意图  
 [0031] 图 5 为腔体侧面铣削仿真结果示意图

### 具体实施方式

[0032] 下面通过一个实例进一步说明本发明的正确性和合理性。

[0033] 以图 1 所示腔体内侧面（此腔体内侧面为一倾斜面，采用圆周铣削工艺）为例，分别采用本插补算法和旋转轴角度插补算法对其进行加工仿真，以证明本插补算法的正确性和合理性。

[0034] 当采用双摆头机床进行圆周铣削如图 1 所示的腔体零件内侧斜面时，不采用插补算法将产生明显的加工误差。该零件的部分加工程序如下：

	N110 ...	说明
[0035]	N120 G1 X21.2132 Y-45 Z5 A3=0.4082 B3=-0.8660 C3=0.2887	;铣削初始位置坐标(21.2132,-45,5) ;及刀轴矢量(0.4082,-0.8660,0.2887)
	N130 X30 Y30 Z20 A3=0.5774 B3=0.5774 C3=0.5774	;铣削初始位置坐标(30,30,20) ;及刀轴矢量(0.5774,0.5774,0.5774)

[0036] 分别采用本插补算法和旋转轴角度插补算法，并通过 Matlab 对这两种算法进行仿真，得到仿真试验结果如图 5。

[0037] 由图 5(a) 可知，采用旋转轴角度线性插补算法，刀轴矢量偏离待加工面，刀轴扫过一个曲面，在实际铣削中产生过切。在本例中，最大线性误差出现在腔体上表面，最大过切 4.14mm；由图 5(b) 可知，采用本插补算法，刀轴矢量保持在这个倾斜面中，刀轴扫过一个平面，从图 5(c) 和 (d) 显而易见，与旋转轴角度线性插补方式相比，刀轴矢量平面插补修正了非线性误差，符合设计工艺要求。实际铣削验证的结果与仿真结果一致，本算法修正了原有的过切 / 欠切问题，加工表面符合设计要求。

[0038] 本测试采用的计算机为：Intel Pentium 4CPU 2.80GHz, 1.25G 内存。平面插补算法的插补次数为 1000 次，插补时间为 6.5758e-004s。

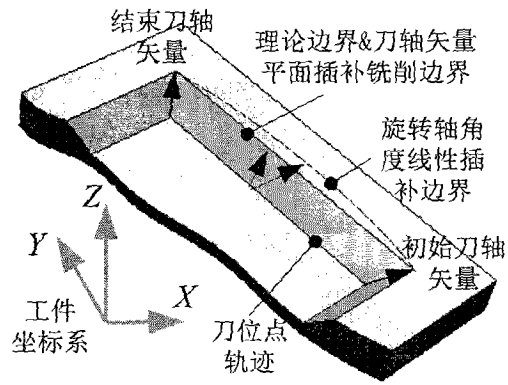


图 1

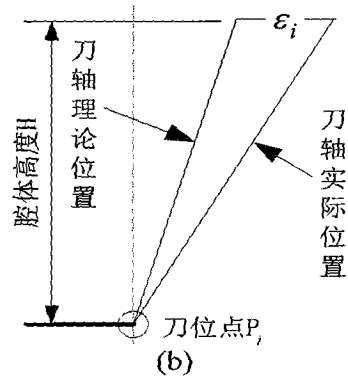
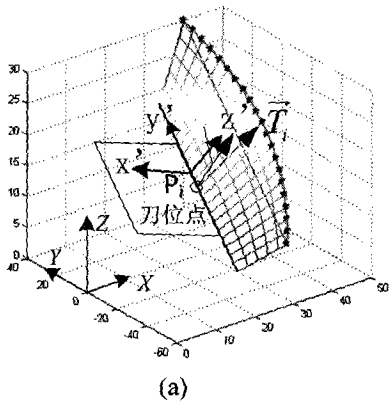


图 2

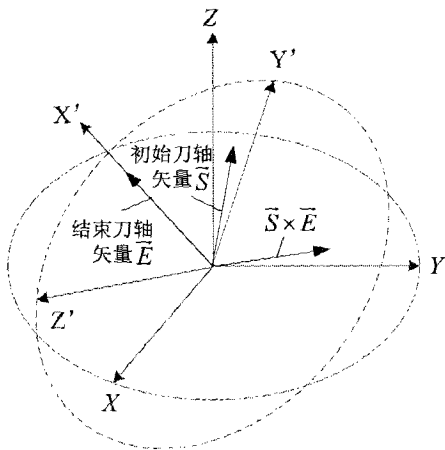


图 3

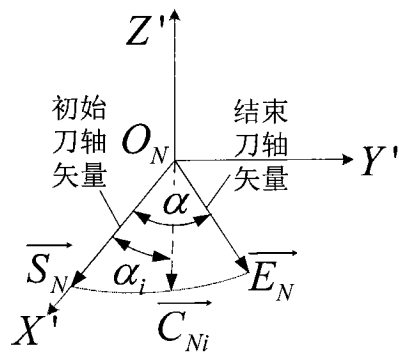
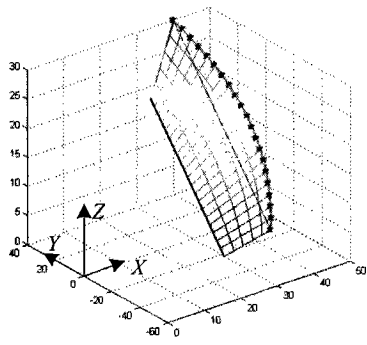
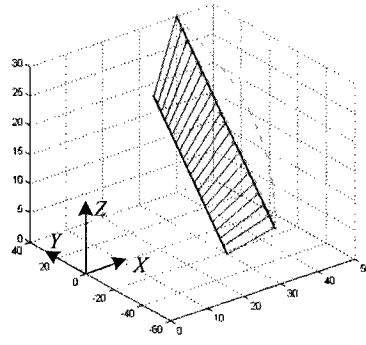


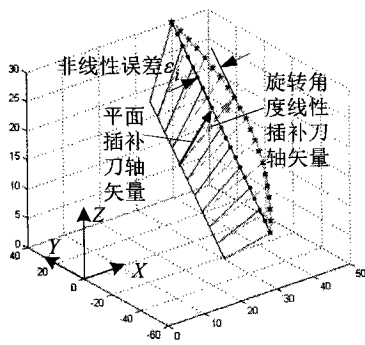
图 4



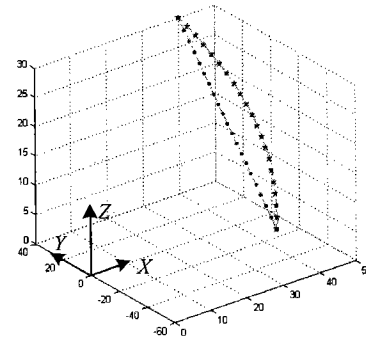
(a) 旋转角度线性插补仿真结果



(b) 刀轴矢量平面插补仿真结果



(c) 两种插补方式仿真结果对比



(d) 两种插补方式非线性误差对比

图 5