DOI: 10.3901/JME.2013.13.108

五轴端铣 3D 刀补中运动突变的处理*

王 峰^{1,2} 林 洵² 郑颢默² 冯金金³ 杨 磊^{2,4} 张 函^{1,2}

(1. 中国科学院大学 北京 100039;

2. 中国科学院沈阳计算技术研究所高档数控国家工程研究中心 沈阳 110168;

3. 中国电子科技集团公司第 15 研究所 北京 100083;

4. 中国科学技术大学计算机科学与技术学院 合肥 230027)

摘要: 五轴联动数控系统执行端铣 3D 刀具半径补偿功能时,当刀轴矢量与曲面法矢量非常接近时,相邻插补点处的半径补偿矢量会出现转角过大的现象,从而引起机床直线轴的速度突变。在建立切触点到刀心点再到机床轴的传递关系的基础上,分析半径补偿矢量存在奇异解并引起机床轴运动突变的原因。以平底刀为例给出相应的控制算法。通过旋转优化奇异区域内各插补点处半径补偿矢量的位置,消除相邻半径补偿矢量反向的极限现象;通过插值进一步降低速度突变程度,使各轴速度都降至最大允许值以内。与直接使用相邻插补周期的半径补偿矢量进行赋值的方法相比,该算法通用性更高,对突变的效果更好。仿真试验证明了该算法的正确性和有效性。

关键词: 五轴加工 3D 刀具半径补偿 奇异点 运动控制

中图分类号: TP391

Control Algorithm for Drastic Motion During 3D Cutter Radius Compensation in Five-axis End Milling

WANG Feng^{1,2} LIN Hu² ZHENG Liaomo² FENG Jinjin³ YANG Lei^{2,4} ZHANG Han^{1,2}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039;

2. National Engineering Research Center for High-End CNC, Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168;

3. The 15th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100083;

4. School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract: When the five-axis CNC system executes the 3D cutter radius compensation function, the angle between two adjacent radius compensation vectors would be very large if the tool axis vector nearly coincides with the normal vector. This phenomenon will cause the linear axis moving drastically. The reason for this phenomenon is analyzed based on building the transmission relation from the cutter contact point to the cutter location point, and then to the machine axis. The algorithm is advanced, by taking the flat-bottomed tool as an example, to control the severe motion. By optimizing the direction of the radius compensation vectors in the singular area, the phenomenon that two adjacent radius compensation vectors point to opposite direction is eliminated. Further, the speed of the linear axis could reduce into the allowed range by interpolating new points. Compared with the assignment method with the adjacent radius compensation vector, such algorithm has higher generality and better effect. A simulation experiment is performed to verify the correctness and the effectiveness of this algorithm.

Key words: Five-axis machining 3D cutter radius compensation Singular point Motion control

0 前言

五轴联动数控加工由于加工灵活,材料去除率

高,在复杂自由曲面产品的加工制造中具有显著优势,因此广泛应用于航空航天、舰船制造、汽车制造等领域^[1-2]。但五轴加工程序编制复杂,往往需要借助昂贵的辅助软件来完成,得到的 NC 代码严重依赖于 CAM 中使用的标准刀具半径。目前,根据国际标准 ISO6983 进行开发的二维刀具半径补偿功能(G41/G42)已经在数控系统中得到很好的应用。但

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划,2011CB302400)和国家科技重大专项(2011ZX04016-071)资助项目。20121114 收到初稿,20130402 收到修改稿

对于五轴加工来说, 由于刀具方向不断变化以及加工工艺的多样化, ISO6983 中所提供的信息已无法完成五轴加工所需的 3D 刀具半径补偿工作^[3-5]。因此发展系统级别的 3D 刀具半径补偿技术成为五轴数控领域的重点和难点。国外的高端数控系统目前已经具备了较为完善的 3D 刀具半径补偿功能, 如 Siemens 840D 中的 3D TRC 功能^[6], Fanuc 的五轴加工刀具补偿功能^[7]。在实际加工中, 机床操作人员就可以使用(与 CAM 中计算 NC 轨迹时所使用的刀具不同的)略微小一些的刀具; 此外, 若刀具出现轻微磨损, 也无须重新更换刀具, 重新生成刀具路径, 从而提高了编程效率, 节约了加工成本^[8]。国产系统也逐步具备一定的半径补偿功能, 但与国外先进数控系统相比仍有很大差距, 因此对 3D 半径补偿算法的研究近年来逐渐引起人们的关注。胡自化等^[9-10]介绍了侧铣加工的半径补偿方法。洪海涛等^[11-12]介绍了端铣加工的半径补偿方法。但整体而言, 涉及五轴 3D 刀补方面的文献仍然较少, 研究的范围也主要集中在对于补偿矢量的求解方面。在利用平底刀和环形刀进行端铣加工时, 若刀轴矢量与加工表面的法矢量夹角小于一定值, 会导致相邻半径补偿矢量的方向发生过大偏转, 进而造成此处的机床运动速度过快。若机床速度超过特定值, 会影响加工精度, 对机床机械结构造成损害。因此需要对端铣 3D 刀补过程中的运动突变现象进行控制。而目前尚未检索到国内这方面的相关文献。

在针对端铣 3D 刀补运动突变问题的研究中, 国外为数不多的公开文献资料将刀轴矢量与曲面法线重合的加工点称为奇异点^[13-14]。另一方面, 数学上将无法由通解得到但仍然符合微分方程的解称为奇异解。而当刀轴矢量与曲面法线重合时, 半径补偿矢量无法由通式得出(球头刀例外), 符合数学上的定义。因此, 根据前人文献资料, 结合数学定义, 同时考虑到与五轴加工机构奇异点相区别^[15-16], 本文将此时的加工位置称为半径补偿奇异点(下文简称奇异点), 同时称奇异点附近区域为奇异区域, 奇异点处的刀轴姿态为奇异姿态。

对于如何控制奇异区域内的运动突变, 西门子 Sinumerik 840D 采用在奇异点附近进行线性插值的方法来控制机床的运动速度, 但算法的具体细节并不公开^[13]。OTSUKI 等^[14]提出将当前插补周期的半径补偿矢量赋值给前一周期, 因此奇异区域内相邻半径补偿矢量夹角降为 0, 从而消除运动突变。这种处理算法较为简便, 但通用性不高, 原因是该方法容易在奇异区域与正常区域的边界处产生新的突变, 而且不能保证半径补偿矢量始终由切触点指向刀心点, 影响了补偿精度。本文在前人的基础上, 提出一种新的控制算法, 先通过矢量旋转方式对奇异区域内的半径补偿矢量进行优化, 然后进行插值

限速, 从而消除半径补偿矢量奇异点附近的机床运动突变。

本文结构安排如下: 第 1 节首先介绍了五轴 CNC 系统 3D 半径补偿功能的执行过程。在第 2 节和第 3 节分别介绍五轴运动学变换过程和端铣 3D 半径补偿过程。第 4 节对半径补偿矢量求解过程中存在的突变现象进行分析。第 5 节给出相应的控制算法。第 6 节通过仿真实例对突变现象进行进一步说明, 并通过与已有方法进行比较验证本文控制算法的有效性。

1 五轴数控系统 3D 半径补偿功能

通常, 零件加工程序仅需要刀具中心点位置信息以及用旋转轴指令或矢量指令指定的刀具方向信息即可。但在使用五轴 3D 刀具半径补偿功能进行加工时, 工件程序需要包含切触点位置矢量信息、刀具方向矢量信息以及当前位置法线方向信息, 才能满足实时半径补偿功能的需要。

数控系统运动控制器首先将工件程序指令进行解析, 然后根据指定的刀尖点速度和插补周期对轨迹进行预插补。之后结合刀具参数求解各插补点处的半径补偿矢量, 并以此计算刀心点位置坐标。接着根据机床结构配置参数确定相应的运动学转换关系, 并通过逆向运动学变换将刀位信息转换成轴信息。最后使用三次样条曲线对各轴的运动段进行精插补生成最终轴指令。五轴 CNC 控制器中的实时刀具半径补偿执行过程如图 1 所示。

图 1 控制器中的刀具半径补偿执行过程

如图 1 所示, 半径补偿矢量计算、刀心点位置计算和逆向运动学转换是半径补偿功能的核心部分。下面分别加以介绍。

2 五轴机床的运动学变换

五轴机床运动学变换是五轴加工的基础, 它将

工件坐标系下的刀位点坐标与机床坐标系下的机床坐标联系起来。根据五轴机床的运动链和参数配置,可以通过矩阵平移和旋转的方式建立相应的正向反向运动学变换。

本文以图 2 所示的 AC 双转台机床为例进行分析。设刀具坐标系为 $O_t x_t y_t z_t$; 工件坐标系坐标为 $O_w x_w y_w z_w$, 工件坐标系下的刀具位置矢量为 $\mathbf{u}_w=(u_{wx}, u_{wy}, u_{wz})^T$, 刀具方向矢量为 $\mathbf{q}_w=(q_x, q_y, q_z)^T$; 机床坐标系 $O_m x_m y_m z_m$, 机床直线轴对应的线性运动矢量为 $\mathbf{u}_m=(u_{mx}, u_{my}, u_{mz})^T$, 机床旋转轴为 A 和 C, 对应的机床转角分别为 α 和 γ 。AC 双转台五轴机床的正向运动学方程, 如式(1)所示

$$\begin{pmatrix} q_x & u_{wx} \\ q_y & u_{wy} \\ q_z & u_{wz} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T}(t_x, t_y, t_z) \mathbf{R}_Z(-\gamma) \mathbf{R}_X(-\alpha) \times \mathbf{T}(u_{mx} - t_x, u_{my} - t_y, u_{mz} - t_z) \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 (t_x, t_y, t_z) ——工件坐标系原点到 AC 轴旋转中心的偏移矢量

$\mathbf{T}$ ——平移运动的齐次坐标变换矩阵

$\mathbf{R}_Z(-\gamma)$ ——绕机床 z 轴旋转 $-\gamma$ 角的齐次坐标变换矩阵

$\mathbf{R}_X(-\alpha)$ ——绕机床 x 轴旋转 $-\alpha$ 角的齐次坐标变换矩阵

图 2 AC 双转台五轴机床结构示意图

由式(1)得到 AC 双转台五轴机床的反向运动学方程如式(2)所示

$$\begin{cases} u_{mx} = (u_{wx} - t_x) \cos \gamma - (u_{wy} - t_y) \sin \gamma + t_x \\ u_{my} = (u_{wy} - t_y) \cos \alpha \sin \gamma + \\ \quad (u_{wz} - t_z) \cos \alpha \cos \gamma - (u_{wx} - t_x) \sin \alpha + t_y \\ u_{mz} = (u_{wz} - t_z) \sin \alpha \sin \gamma + \\ \quad (u_{wy} - t_y) \sin \alpha \cos \gamma + (u_{wx} - t_x) \cos \alpha + t_z \\ \alpha = \arccos q_z \quad 0 \leq \alpha \leq \pi \\ \gamma = \arctan 2(q_x, q_y) \quad -\pi < \gamma \leq \pi \end{cases} \quad (2)$$

3 五轴端铣 3D 刀具补偿

机床运动学变换中刀具坐标系的原点定义在刀心点, 而当半径补偿功能开启时, 刀具路径实际是切触点的轨迹。通过半径补偿矢量可以建立切触点到刀心点的映射关系。

下面分别给出端铣加工中常用的三种刀具——球头刀、平底刀和环形刀的刀具半径补偿矢量计算方法, 如图 3 所示。

图 3 三种刀具示意图

设 $\mathbf{p}$ 为切触点位置矢量, $\mathbf{u}$ 为刀心点位置矢量, $\mathbf{n}$ 为加工表面法矢量, $\mathbf{q}$ 是刀轴方向矢量, $\mathbf{r}$ 是半径补偿矢量。其中表面法矢量、刀轴矢量以及补偿矢量均为单位矢量。另设 R_1 是球头刀的刀具半径, R_2 是平底刀的刀具半径, R_3 是环形刀的刀具半径, R_4 为环形刀的刃口半径。

采用球头刀进行加工时, 由于刀具始终与加工表面相切, 因此半径补偿矢量就是表面法矢量, 即 $\mathbf{r}=\mathbf{n}$, 见图 3a。切触点到刀心点的位置映射关系为

$$\mathbf{u} = \mathbf{p} + R_1 \mathbf{n} \quad (3)$$

采用平底刀和环形刀进行加工时, 半径补偿矢量需要由刀轴矢量和表面法矢量计算得到。

对于平底刀, 半径补偿矢量

$$\mathbf{r} = \frac{(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}}{|(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}|} \quad (4)$$

切触点到刀心点的位置映射关系为

$$\mathbf{u} = \mathbf{p} + R_2 \mathbf{r} = \mathbf{p} + R_2 \frac{(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}}{|(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}|} \quad (5)$$

对于环形刀, 由图 3c 可见, 其半径补偿矢量由切触点指向刃口中心的矢量 $\mathbf{r}_a$ 与刃口中心指向刀心点的矢量 $\mathbf{r}_b$ 相加得到。因此环形刀的半径补偿矢量

$$\begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{r}_a + \mathbf{r}_b \\ \mathbf{r}_a = \mathbf{n} \\ \mathbf{r}_b = \frac{(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}}{|(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}|} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)得到环形刀切触点与刀心点的位置映射关系

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{p} + R_4 \mathbf{r}_a + (R_3 - R_4) \mathbf{r}_b = \\ &= \mathbf{p} + R_4 \mathbf{n} + (R_3 - R_4) \frac{(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}}{|(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}|} \end{aligned} \quad (7)$$

由上可知, 利用切触点坐标和半径补偿矢量可以计算得到当前刀心点坐标, 进而通过式(2)所示的反向运动学变换方程计算出机床各轴的运动坐标。

4 半径补偿过程中的运动突变

对于平底刀, 由式(4)可推导出式(8)

$$\mathbf{r} = \frac{(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}}{|(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}|} = \frac{(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}}{|\mathbf{q}|^2 |\mathbf{n}| \sin \theta} = \frac{(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}}{\sin \theta} \quad (8)$$

式中, θ 表示刀轴矢量同曲面法矢量的夹角。为便于描述, 设 $\mathbf{w} = (\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}$, 由于

$$\lim_{\mathbf{u} \rightarrow \mathbf{n}} \mathbf{w} = \mathbf{0} \quad \lim_{\mathbf{u} \rightarrow \mathbf{n}} \sin \theta = 0 \quad (9)$$

可知, 当刀轴矢量与曲面法矢量重合时, 半径补偿矢量 $\mathbf{r}$ 无法由通式得到, 此时 $\mathbf{r}$ 的解为长度等于零方向任意的零矢量。因此刀轴矢量与法矢量重合的点即为奇异点。在刀轴矢量 $\mathbf{q}$ 与曲面法矢量 $\mathbf{n}$ 之间的夹角由一个相对较大的值向 0 逼近的过程中, 由于半径补偿矢量 $\mathbf{r}$ 的分子分母都逼近 0, 导致式(8)的求解不稳定, 在某个位置 $\mathbf{r}$ 方向发生突变, 奇异点左右相邻的半径补偿矢量甚至完全反向, 夹角接近 180° 。这样, 尽管规划时得到的刀尖点速度是均匀稳定的, 但是由于半径补偿矢量夹角过大, 导致反向运动学变换得到的直线轴速度发生突变, 如图 4 所示。

图 4 半径补偿矢量方向突变

半径补偿奇异点附近存在以下两个特征: 刀轴矢量与法矢量非常接近; 各插补点处法矢量近似相等。由于奇异区域范围很小, 为便于分析, 认为局部法矢量方向不变。

对于环形刀, 由于其半径补偿矢量中存在分量 $\mathbf{r}_b = [(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}] / |(\mathbf{q} \times \mathbf{n}) \times \mathbf{q}|$, 因此也存在奇异点, 在奇异点附近, 直线轴会发生运动突变。

对于球头刀, 由式(3)知, 半径补偿矢量始终等于曲面法矢量, 因此球头刀不存在补偿奇异点。同时由于曲面法矢量连续变化, 因此相邻半径补偿矢量的夹角较小, 不会出现运动突变。

下文以平底刀为例, 针对奇异区域内的运动突变现象给出相应的控制算法。

5 运动突变控制

根据刀尖点设定速度和插补周期来计算相邻刀位点之间的插补段数 N , 同时计算当前刀位点处刀轴矢量与曲面法矢量之间的夹角, 若夹角小于设定值, 认为加工进入奇异区域。在奇异区域以外, 由插补得到的刀轴矢量和曲面法矢量可以直接计算出各插补点处的半径补偿矢量, 如式(4)所示。而奇异区域内, 采用如下步骤来求解半径补偿矢量。

(1) 记录进入奇异区域时的起始半径补偿矢量 $\mathbf{r}_s$ 和离开奇异区域时的终止半径补偿矢量 $\mathbf{r}_e$; 记录进入奇异区域时的起始刀轴矢量 $\mathbf{q}_s$ 和离开奇异区域时的终止刀轴矢量 $\mathbf{q}_e$, 按照矢量旋转方式求各插补点处的刀轴矢量 $\mathbf{q}_i$, 方法如下所述。

如图 5 所示, 以不共面的矢量 $\mathbf{e}_y = \mathbf{q}_s$, $\mathbf{e}_z = (\mathbf{q}_s \times \mathbf{q}_e) / |\mathbf{q}_s \times \mathbf{q}_e|$, $\mathbf{e}_x = (\mathbf{e}_y \times \mathbf{e}_z) / |\mathbf{e}_y \times \mathbf{e}_z|$ 作为一组基, 构成局部坐标系的 x 轴、 y 轴和 z 轴。显然, 在该局部坐标系中, $\mathbf{q}_s$ 绕 z 轴旋转到 $\mathbf{q}_e$, 形成一个扫掠面 Γ 。由于工件坐标系到局部坐标系的过渡矩阵为 $\mathbf{E} = (\mathbf{e}_x^T, \mathbf{e}_y^T, \mathbf{e}_z^T)^T$, 因此 $\mathbf{q}_i$ 的求解公式为

$$\mathbf{t}_i = \mathbf{E} \begin{pmatrix} \cos(i\omega/N) & -\sin(i\omega/N) & 0 \\ \sin(i\omega/N) & \cos(i\omega/N) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$0 \leq i \leq N$$

式中, $\omega = \arccos(\mathbf{q}_s \cdot \mathbf{q}_e)$ 。

(2) 记录法矢量 $\mathbf{n}_m$ 。如图 5 所示。图 5 中 A 表示与 Γ 面垂直的平面, 由于奇异区域内法矢量与刀轴矢量非常接近, 因此近似认为 $\mathbf{n}_m$ 在 Γ 面内。

图 5 刀轴矢量旋转

(3) 通过式(11)求得 $\mathbf{r}_s$ 和 $\mathbf{r}_e$ 在 Λ 上的投影单位矢量 $\mathbf{r}'_s$, $\mathbf{r}'_e$, 如图 6 所示。

$$\begin{cases} \mathbf{r}'_s = [(\mathbf{n}_m \times \mathbf{r}_s) \times \mathbf{n}_m] / |(\mathbf{n}_m \times \mathbf{r}_s) \times \mathbf{n}_m| \\ \mathbf{r}'_e = [(\mathbf{n}_m \times \mathbf{r}_e) \times \mathbf{n}_m] / |(\mathbf{n}_m \times \mathbf{r}_e) \times \mathbf{n}_m| \end{cases} \quad (11)$$

图 6 起点终点半径补偿矢量投影

在 Λ 面内, 根据插补段数 N 将 $\mathbf{r}'_s$ 围绕 $\mathbf{n}_m$ 旋转到 $\mathbf{r}'_e$, 每个插补点对应一个 $\mathbf{r}'_i$, 方法类似式(10)。

在第 i 个插补点处, 以 $\mathbf{r}'_i$ 为 x 轴, $\mathbf{q}_i \times \mathbf{r}'_i$ 为 y 轴建立局部坐标系(z 轴可由 x 轴和 y 轴得到)。计算 $\mathbf{r}'_i$ 与 $\mathbf{q}_i$ 的夹角 μ , 将 $\mathbf{r}'_i$ 绕 y 轴逆时针旋转 $\mu - \pi/2$, 至与 $\mathbf{q}_i$ 垂直。旋转得到的 $\mathbf{r}_i$ 作为第 i 个插补点处最终的半径补偿矢量。如图 7 所示。

图 7 构造新的半径补偿矢量

由上述方法得到的半径补偿矢量可以保证与刀轴矢量垂直。克服了直接给半径补偿矢量赋相邻值造成其与刀轴矢量不相垂直的问题, 从而保证半径补偿矢量可以始终由切触点指向刀心点。

(4) 前三步已经可以将相邻半径补偿矢量的夹角大大降低, 不会出现相差接近 180° 的极限情况。第四步根据各轴最大钳制速度对奇异区域内的各轴行程进行进一步调整。设各直线轴最大钳制速度分别为 v_{mx} , v_{my} , v_{mz} ; 半径补偿矢量调整后相邻点各

直线轴的速度为 v_x , v_y , v_z 。若直线轴速度超过允许值, 则通过插入新的刀位指令(包括切触点坐标、刀轴方向矢量以及半径补偿矢量)将原来相邻点构成的区间分为 m 段。为满足各直线轴速度小于其钳制速度限制, m 的取值为

$$m = \max \left(\left\lceil \frac{v_x}{v_{mx}} \right\rceil, \left\lceil \frac{v_y}{v_{my}} \right\rceil, \left\lceil \frac{v_z}{v_{mz}} \right\rceil \right) \quad (12)$$

由于旋转轴取值只与刀轴方向有关, 因此不会因半径补偿矢量方向变化导致运动突变, 因此不需要考虑旋转轴的速度限制。

对切触点的插值方法如下

$$\mathbf{u}_{wi} = \mathbf{u}_{w1} + \frac{\mathbf{u}_{w2} - \mathbf{u}_{w1}}{m} i \quad 0 \leq i \leq m \quad (13)$$

式中, $\mathbf{u}_{wi}$ 表示新插入的切触点, $\mathbf{u}_{w1}$ 和 $\mathbf{u}_{w2}$ 分别表示原来相邻的两个切触点。

刀轴和半径补偿矢量的插值方法类似式(10)。

6 仿真试验

下面通过仿真试验来说明半径补偿奇异点附近的运动突变, 并对控制算法进行验证。设定当刀轴矢量同法矢量夹角小于 0.01° 时, 加工进入奇异区域。各直线轴最大允许速度为 220 mm/s 。

图 8 所示为一条待加工直线。下表对应给出了该路径上的切触点坐标、刀轴矢量以及法矢量。从图 9 可以看出该段路径上刀轴矢量同法矢量的夹角变化, 越向中间, 二者夹角越小, 也就说明加工越接近于奇异点。由上文分析可知, 当刀轴矢量与法矢量间的夹角趋向于 0 时, 容易造成半径补偿矢量求解不稳定。其中第 18、19 刀位点分别处于奇异点的两端, 因此刀具相对法矢量的倾斜方向变化较大(类似图 4), 可以判断在这一区间进行插补时半径补偿矢量方向会发生突变。由图 10 可见, 相邻插补点的半径补偿矢量大部分都以很小的转角变化, 但是在奇异点两端半径补偿矢量却几乎完全反向。经过运动学转换可以得到各插补点处机床轴的运动坐标。图 11a 给出半径补偿矢量的夹角变化, 图 11b 给出了直线轴合成运动的速度变化。由图 11 可知, 在半径补偿矢量几乎反向的插补周期, 轴速发生了剧烈突变。

图 8 工件坐标系下的待加工直线

图 10 工件坐标系下各插补点的半径补偿矢量

图 9 刀轴矢量同法矢量夹角

图 11 半径补偿矢量变化与轴速变化对照图

表 切触点、刀轴矢量以及法矢量

序号	切触点坐标			刀轴方向矢量			曲面法矢量		
	p_x/mm	p_y/mm	p_z/mm	q_x	q_y	q_z	n_x	n_y	n_z
1	17.010 7	-13.408 1	21.757 1	-0.009 9	0.080 0	0.996 7	-0.008 9	0.080 0	0.996 8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
18	20.052 5	-13.407 6	22.302 3	-0.000 3	0.080 0	0.996 8	-0.000 2	0.080 0	0.996 8
19	20.231 4	-13.407 6	22.334 4	0.000 3	0.080 0	0.996 8	0.000 2	0.080 0	0.996 8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
36	23.273 2	-13.407 1	22.879 6	0.009 9	0.080 0	0.996 7	0.008 9	0.080 0	0.996 8

按照第 5 节中步骤(1)~(3)先对奇异区域内的半径补偿矢量进行调整,可以使相邻半径补偿矢量的最大夹角由 179.95° 降至 52.75° ,直线轴合成速度的最大值因此由 $4\,972\text{ mm/s}$ 降至 $2\,201\text{ mm/s}$,突变得到了初步控制。再经过步骤(4)的插值处理,最大速度降至 208 mm/s 。运动突变得到了有效控制。处理前后的速度对比如图 12 所示。

由于旋转法先大幅度降低了奇异点左右半径补偿矢量之间的夹角,因此比起直接插值,先优化半径补偿矢量方向再插值可以减少插点数量。若直接采用插值法,需要新增 35 个点才能保证轴速在允许范围内。而先优化半径补偿矢量再插值只需 25 个点。由于插值过密会影响加工效率,而且容易引起刀具的颤振和顿刀现象^[17],因此应当在满足速度精

度要求的同时尽量减少插点数量。

图 12 速度控制效果对照

下面对奇异区域内的半径补偿矢量分别采用文

献[14]中的直接赋值法与本文中的旋转法进行处理,然后经反向运动学变换得到机床轴的运动。从图 13 可以看到,采用直接赋值法导致新的半径补偿矢量同刀轴方向矢量不再垂直,这会使得半径补偿矢量不再由切触点指向刀心点,补偿精度下降。而旋转法保证优化后的刀轴矢量始终与刀轴方向矢量垂直(中间的波动是由于计算中舍入误差造成)。

图 13 两种算法处理后半径补偿矢量同刀轴矢量夹角

另外从图 14 可以看到,直接赋值法并没有有效降低速度突变,只是将突变的位置由一段区间转移到了另一个区间。而旋转法可以大大降低奇异区域内的速度突变。

图 14 两种速度控制算法效果对照

7 结论

(1) 对五轴 CNC 系统执行实时 3D 刀补功能时存在的半径补偿奇异点现象进行了分析。在此基础上给出一种消除奇异区域内运动突变的处理算法,从而提高系统的半径补偿精度,避免补偿功能执行中速度突变对机床部件造成的损伤。

(2) 采用旋转法对奇异区域内的半径补偿矢量进行优化定位,保证优化过程中半径补偿矢量始终与刀轴矢量垂直,从而确保其始终由切触点指向刀心点。同时旋转定位后相邻半径补偿矢量的夹角不存在接近 180° 的极限情况,而是降为锐角,从而初步降低了奇异区域内的运动突变。

(3) 将半径补偿矢量优化和插值法相结合,可以有效降低奇异区域内的运动突变,从而提高加工质量,避免对工件和机床部件造成损伤,同时可以尽量减少插值数量,避免插值过密对加工稳定性和平滑性产生影响。

参 考 文 献

- [1] 樊留群, 齐党进, 沈斌, 等. 五轴联动刀轴矢量平面插补算法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 158-162.
FAN Liuqun, QI Dangjin, SHEN Bin, et al. Plane interpolation of tool orientation algorithm for 5-axis circumference milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 158-162.
- [2] 郑颢默, 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[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 105-111.
ZHENG Liaomo, LIN Hu, GAI Rongli, et al. Fast smooth interpolation control strategy of rotary axes for five-axis CNC systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 105-111.
- [3] SUH S H, CHEON S U. A framework for an intelligent CNC and data model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(10): 727-735.
- [4] 刘鹏玉, 石广田. 基于 ISO6983 与 ISO14649 标准的数控系统对比研究[J]. 机械工程与自动化, 2005(2): 116-119.
LIU Pengyu, SHI Guangtian. Contrastive research on CNC system based on ISO6983 and ISO14649[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2005(2): 116-119.
- [5] 李慧, 胡自化, 孔马斌, 等. 支持 STEP-NC 和 ISO6983 双重标准的开放式数控系统原型设计[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(9): 1225-1230, 1235.
LI Hui, HU Zihua, KONG Mabin, et al. Design of an open CNC system prototype supporting STEP-NC and ISO6983 standards[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(9): 1225-1230, 1235.
- [6] SIEMENS. Sinumerik 840D sl/828D job planning[M]. Moonhafen: SIEMENS, 2009.

- [7] FANUC. Fanuc series 30i/300i/300is-model A, Fanuc series 31i/310i/310is-model A5, Fanuc series 31i/310i/310is-model A, Fanuc series 32i/320i/320is-model A, user's manual (common to lathe system/machining center system)[M]. Tokyo: FANUC, 2004.
- [8] SIEMENS. Sinumerik 840D sl/828D job planning[M]. Moonhafen: SIEMENS, 2010.
- [9] 胡自化, 张平, 杨冬香, 等. 三轴数控侧铣空间刀具半径补偿算法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 138-144. HU Zihua, ZHANG Ping, YANG Dongxiang, et al. Tool radius compensation algorithm for three-axis NC peripheral milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 138-144.
- [10] 杨富枝, 林浒, 郑颺默, 等. 五轴侧铣加工空间刀具半径补偿研究[J]. 制造技术与机床, 2010(11): 82-88. YANG Fuzhi, LIN Hu, ZHENG Liaomo, et al. Research on the space tool radius compensation for five-axis flank milling[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2010(11): 82-88.
- [11] 洪海涛, 于东, 张立先, 等. 五轴端铣加工中 3D 刀具半径补偿研究[J]. 中国机械工程, 2009(20): 1770-1774. HONG Haitao, YU Dong, ZHANG Lixian, et al. Research on 3D cutter radius compensation for 5-axis end milling[J]. China Mechanical Engineering, 2009(20): 1770-1774.
- [12] 陈良骥, 王永章. 五轴联动数控加工中的刀具补偿方法[J]. 制造技术与机床, 2008(2): 22-25. CHEN Liangji, WANG Yongzhang. Tool compensation in five-axis CNC machining[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2008(2): 22-25.
- [13] SIEMENS. Sinumerik 840D sl/840Di sl/840D/ 840Di/ 810D special functions: 3D tool radius compensation (W5), function manual[M]. Moonhafen: SIEMENS, 2006.
- [14] OTSUKI T, IDE S, MIYAZAKI T. Numerical control method for five-axis processing machine: Europe, 08154972.7[P]. 2008-11-19.
- [15] AFFOUARD A, DUC E, LARTIGUE C, et al. Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(4): 415-425.
- [16] 王峰, 林浒, 刘峰, 等. 五轴加工奇异区域内的刀具路径优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 172-180. WANG Feng, LIN Hu, LIU Feng, et al. Tool path optimization of five-axis machining in singular area[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 172-180.
- [17] 王丹, 陈志同, 陈五一. 五轴加工中非线性误差的检测和处理方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(9): 1003-1006. WANG Dan, CHEN Zhitong, CHEN Wuyi. Detection and control of non-linear errors in 5-axis machining[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(9): 1003-1006.

作者简介: 王峰(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高档数控技术。

E-mail: wfeng@sict.ac.cn

林浒, 男, 1955 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为数控技术与实时系统。

E-mail: linhu@sict.ac.cn

郑颺默, 男, 1982 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为数控技术。

E-mail: zhengliaomo@sict.ac.cn

冯金金, 女, 1986 年出生。主要研究方向为计算机仿真技术。

E-mail: jinjin_dlut@163.com

杨磊, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为总线技术。

E-mail: xenosaga@mail.ustc.edu.cn

张函, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为数控技术。

E-mail: zhanghan@sict.ac.cn