

文章编号:1000-582X(2010)04-037-06

# 考虑非线性误差补偿的五坐标数控加工 走刀步长改进算法

姬俊锋, 周来水, 安鲁陵, 张 臣

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

**摘 要:**研究了五坐标数控加工中特有的非线性误差,提出一种改进的五坐标数控加工走刀步长算法,在前置处理中即考虑补偿非线性误差。在走刀步长计算过程中,同时考虑弧弦逼近误差与非线性误差,将总的加工误差看作是刀轨参数的函数。该函数求导困难,难于通过给定误差直接计算走刀步长。对弦截法迭代格式进行改进,改进后的方法能够保证正确解在迭代过程中始终位于收敛区间内,并采用改进后的弦截法计算走刀步长。实例计算表明,所提出方法在计算走刀步长过程中能够对非线性误差进行有效的补偿,满足等加工误差要求,同时改进后的弦截法能够收敛到正确解,且收敛速度快,效率高。

**关键词:**计算机辅助制造;数控加工;五坐标;走刀步长

中图分类号: TG659; TP391

文献标志码: A

## A new determination method of tool step for 5-axis NC machining

Ji Jun-feng, ZHOU Lai-shui, AN Lu-ling, ZHANG Chen

(College of Mechanical and Electronic Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China)

**Abstract:** The peculiar non-linear error in the 5-axis NC machining is studied. An improved tool step determination method for the 5-axis NC machining is proposed, in which the non-linear error is compensated. Both the arc-chord error and the non-linear error are considered when computing the tool step, and the comprehensive error is taken as the function of the tool path parameter. Due to the difficulty of gaining the derivative of this function and the tool step according to the prescribed tolerance, the secant method is improved to guarantee the real solution locating in the converging range which is adopted to compute the tool step. The implementing example shows that the proposed method can compensate the non-linear error effectively with meeting the prescribed tolerance. The exact tool step can be gotten efficiently with the improved secant method.

**Key words:** computer aided manufacture; NC machining; 5-axis; tool step

在航空航天、汽车、造船等工业领域,五坐标数控加工得到了广泛的应用。与三坐标数控加工相比,五坐标数控加工具有着不可比拟的优势<sup>[1-2]</sup>。可

以加工如整体叶轮这种典型的复杂零件。但同时五坐标数控编程也要更加复杂。其中,对加工过程中的误差控制以及刀轴矢量的生成一直得到众多学者

收稿日期:2010-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50805078)

作者简介:姬俊锋(1981-),男,南京航空航天大学博士研究生,主要从事计算机辅助设计与制造、数控加工等研究,  
(E-mail)jjfll99@163.com。

极大关注<sup>[3-6]</sup>。

走刀步长的计算是数控编程中最基本的问题。走刀步长的计算有等参数、等步长、等误差等方法。本文采用等误差方法。所谓等误差方法,是指走刀过程中,任意段内的总加工误差均为允许加工误差。

文献[7]对走刀步长的计算进行了简化,在刀触点局部区域内将刀轨近似成圆弧,通过几何关系根据允许加工误差计算得到走刀步长。但没有给出参数步长的计算方法。文献[8]在将刀触点局部区域内刀轨近似成圆弧得到走刀步长后,根据一阶泰勒展式得到了参数步长。文献[9]通过刀触点位置的二阶偏导直接计算得到走刀步长,同样没有给出参数步长的计算方法。文献[10-11]同样将刀触点局部区域内刀轨近似成圆弧得到走刀步长,但在通过走刀步长计算参数步长过程中,采用了二阶泰勒展式,得到了更精确的结果。

以上方法均为直接法,即根据允许加工误差、刀具、曲面特征计算得到走刀步长,根据步长与刀轨参数之间的关系得到参数步长。在直接法中,通常需要两次近似,即通过加工误差计算走刀步长和通过走刀步长计算参数步长。一般来说,直接法适用于曲面曲率变化不大的情况,而当曲面曲率变化剧烈时,结果通常不是非常精确。

此外还有迭代法,即采用某种迭代格式,通过初始刀触点参数值及设定搜索范围,使得迭代解最终收敛到精确解。

二分法是经常使用的迭代方法<sup>[12-13]</sup>。文献[14]提出一种黄金分割法来计算走刀步长。这两种方法属于全局收敛的方法。

直接法适用于加工误差与走刀步长有明显解析关系或通过近似可以得到解析关系的情形。而迭代法无此限制。

文献[15]提出采用筛选法来计算走刀步长。

首先研究了五坐标数控加工中存在的非线性误差,考虑已有走刀步长计算方法中的不足,提出在走刀步长计算过程中即对该误差进行补偿。针对该误差计算复杂,不易求导的特点,对弦截法进行改进,并采用改进后的弦截法计算走刀步长。最后应用计算实例来说明了本文方法的有效性。

## 1 问题的提出

在五坐标数控加工中,由于旋转轴的加入,在加工中刀具刀触点的轨迹并不是预先离散的直线段,而是连接此直线段两端点的一段曲线。这条曲线与刀触点连线之间的偏差,就是五坐标数控加工中特

有的非线性误差<sup>[16]</sup>。如图 1 所示。图中  $\delta_t$  为弧弦逼近误差, $\delta_n$  即为非线性误差。

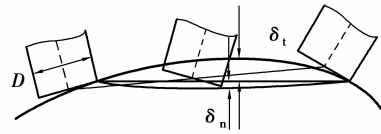


图 1 非线性误差示意图

五坐标数控加工过程中存在的非线性误差与实际五坐标数控机床结构有关。五坐标数控机床旋转或摆动机构的结构形式与尺寸均对该误差有影响,不同结构形式的数控机床所产生的非线性误差是不同的<sup>[17]</sup>。

目前已有的走刀步长计算方法并没有将该误差考虑在内。对其补偿是在后置处理过程中进行的<sup>[18-20]</sup>,首先计算非线性误差,若总加工误差超差,则在超差位置两相邻刀位点的中点插入一个新的刀位点。这存在以下几个问题:

1)CAM 系统生成的刀位文件(\*.cls)中,已经丢失了原始曲面的几何信息,难于计算非线性误差并分析非线性误差对总的加工误差的影响。不同曲面形式中非线性误差对总的加工误差的影响是不同的。如图 2 所示。

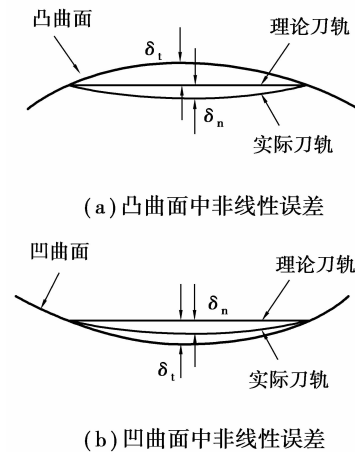


图 2 不同曲面形式中非线性误差

当曲面为凸曲面时,非线性误差的存在有可能使得总加工误差加剧;而当曲面为凹曲面时,非线性误差的存在反而会使得刀具多切除材料从而提高加工精度。

2)插入刀位点并不是最佳的解决方案,最终相邻刀位点之间总的加工误差可能会小于允许加工误差,这会增加代码量,降低效率,如图 3 所示。

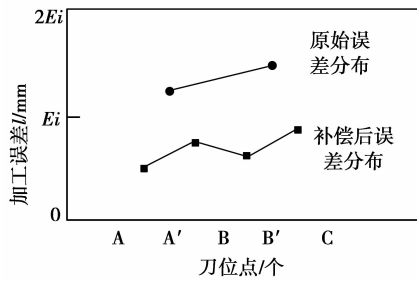


图 3 在后处理过程中补偿非线性误差

图中 A、B、C 为原始刀位点，A' 及 B' 为后插入刀位点。Ei 为允许加工误差。

3) 五坐标数控机床的转动轴行程一般有限。通常主转动轴 C 轴可以无限制的转动，但是另外一个转动轴 A 或 B 轴会有一定的转动限制。但在现有的 CAM 软件中，却并没有考虑到该点。例如使用 UG 在进行五坐标数控编程过程中，刀轴矢量可以指向空间任意方向。即使生成的刀位文件正确，但是由于机床的限制，也不能进行后置处理或者得到错误的后处理结果。机床的转动行程会影响刀轴矢量的计算，进而影响非线性误差的计算。

## 2 解决方法

提出一种新的五坐标数控加工走刀步长计算方法，在走刀步长计算过程中对该误差进行补偿。

首先在走刀步长计算前，规划不超过机床转动行程的刀轴矢量。在走刀步长计算过程中，计算非线性误差，并与弧弦逼近误差相结合，得到总的加工误差  $\delta$ ，并以此作为走刀步长计算的依据。即有

$$\delta = \delta_i + \delta_n \quad (1)$$

其中非线性误差的计算可采用已有文献中所给出方法<sup>[18-20]</sup>，在这里不再赘述。

根据曲面凹凸性，这里的叠加是有正负号之分的。令过切误差为正，而欠切误差为负。在其他条件确定的情况下， $\delta$  可以看作是曲线参数的函数。即有

$$\delta = \delta(u) \quad (2)$$

该函数复杂，难以计算其导数并通过给定误差计算其走刀步长，因此不适合采用直接算法来计算。在采用迭代法基础上，提出一种改进的弦截法来计算其走刀步长增量。该方法避免了复杂函数的求导，是一种超线性收敛方法，收敛速度快。

方法流程图如图 4 所示，提出方法可以解决 1 中所提存在的问题。

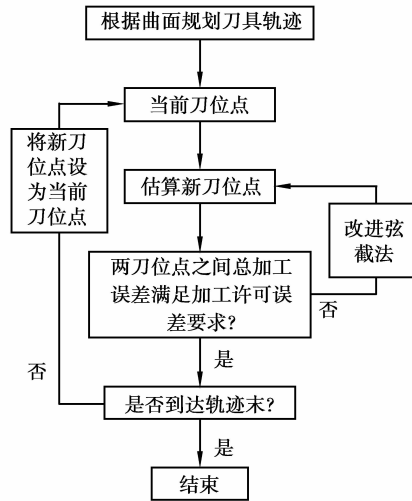


图 4 走刀步长计算方法流程图

## 3 改进弦截法计算走刀步长

标准弦截法迭代格式如下<sup>[21]</sup>：

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f(x_k) - f(x_{k-1})}(x_k - x_{k-1}) \quad (3)$$

式中  $x_k, x_{k-1}$  为已知方程  $f(x) = 0$  的两个近似根。

给定一条参数曲线为  $p = p(u)$ 。设当前刀触点为  $p(u_i)$ ，由该点计算下一刀触点  $p(u_{i+1})$ ，并使两点之间加工误差  $\delta$  不大于允许加工误差  $Ei$ 。 $p(u_i)$  与  $p(u_{i+1})$  之间的距离即为走刀步长。

由于在  $p(u_i)$  点处沿着参数增加和减小的方向上存在两个与  $p(u_i)$  之间加工误差为允许加工误差的点，直接采用该方法会导致收敛于错误的解。因此本文针对走刀步长的计算对其进行了改进，以保证迭代过程收敛于正确的解。

### 3.1 迭代范围的获得

设走刀方向为参数增加方向，即  $u_{i+1} > u_i$ 。首先确定  $u_{i+1}$  所在的解区间，即保证  $u_{i+1}$  在一个相对较小的初始区间范围。本文采用倍增搜索法得到该区间，步骤如下：

1) 初始刀触点位置的步长估计可根据允许加工误差  $Ei$  和步长之间的关系计算得到， $\Delta l = \sqrt{8\rho Ei}$ 。其中  $\rho$  为  $p(u_i)$  处沿走刀方向的曲率半径。结合  $p = p(u)$  在  $u_i$  一阶泰勒展开式，以弦长代替弧长，可得参数步长增量  $\Delta u = \Delta l / |\dot{p}(u_i)|$ ；其余刀触点位置可取  $\Delta u = u_{i+1} - u_i$ 。

2) 令  $u_{low} = u_i$ 。

3) 令  $u_{high} = u_{low} + \Delta u$ ，计算参数区间  $(u_i, u_{high})$  的加工误差  $\delta$ ，若  $\delta < Ei$ ，则  $u_{low} = u_{high}$ ， $\Delta u = \alpha \Delta u, \alpha \geq 1$ ，

转③。若  $\delta > Ei$ , 则循环结束。

区间  $(u_{low}, u_{high})$  便是下一刀触点  $p(u_{i+1})$  所位于的参数区间。

### 3.2 精确解的计算

设区间  $(u_i, u)$  之间误差  $\delta = \delta(u)$ ,  $u_{low} < u < u_{high}$ 。由上面的搜索过程可知, 在微小区间  $(u_{low}, u_{high})$  内可认为  $\delta$  是  $u$  单调增函数。

建立函数  $f(u) = \delta(u) - Ei$ 。令  $f(u) = 0$ , 则解一定位于区间  $(u_{low}, u_{high})$ , 且有唯一解。

修改弦截法如下:

步骤 1 计算

$$u = u_{high} - \frac{f(u_{high})}{f(u_{high}) - f(u_{low})}(u_{high} - u_{low})。 (4)$$

步骤 2 若  $|f(u_{high})| < \epsilon$ , 则  $u_{i+1} = u_{high}$  或者若  $|f(u_{low})| < \epsilon$ , 则  $u_{i+1} = u_{low}$ , 循环结束。否则若  $f(u) < 0$ , 令  $u_{low} = u$ ; 若  $f(u) > 0$ , 令  $u_{high} = u$ , 转步骤 1。

式中  $\epsilon$  为迭代要求精度。步骤 2 中经过修改的变量替换法则保证了正确解一直位于区间  $(u_{low}, u_{high})$ , 从而保证该过程收敛于正确的解。

## 4 计算实例

例 1: 以实验室所拥有的 UCP710 五坐标数控机床为例说明文中方法的有效性。该机床是一类工作台双转动五坐标数控机床。在 Vericut 软件上建立其理论工作结构。

为说明问题, 取一简单圆为例来生成刀轨, 如图 5 所示。

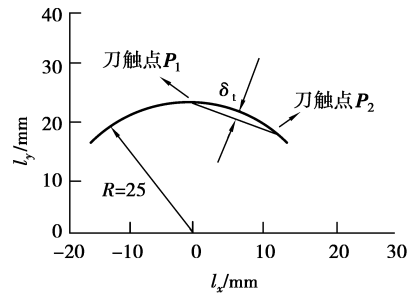


图 5 刀触点位置

设圆半径为 25 mm。圆心位于  $(0, 0)$ 。取  $\delta_i = 0.01$  mm, 如图中所示, 可得两相邻刀触点。该两刀触点坐标分别为  $P_1\{0, 25, 50\}$  及  $P_2\{1.744, 24.939, 50\}$ , 此时未加入刀轴矢量。为该两刀触点加入刀轴矢量, 如图 6 所示:

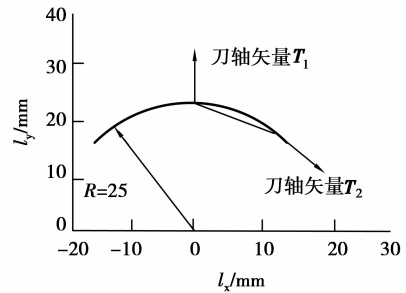


图 6 刀轴矢量方向

设刀轴矢量分别为  $T_1\{0, 1, 0\}$ ,  $T_2\{0.997, -0.070, 0\}$ 。加工刀具选择球头刀, 刀头半径为 5 mm。

采用该机床自带的后处理工具对该刀位数据进行后处理, 并采用 Vericut 进行机床仿真, 得到结果如图 7 所示。

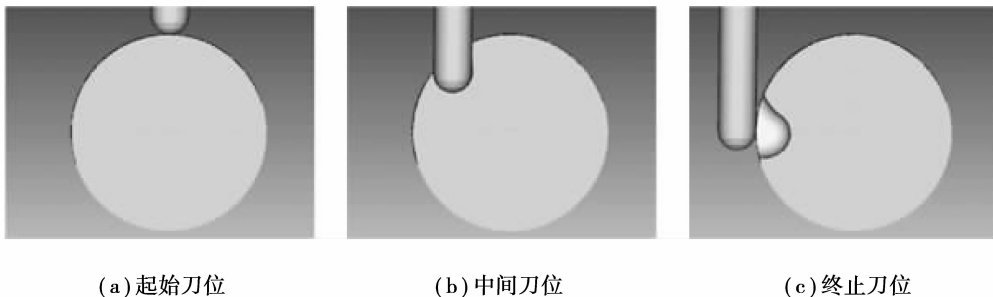


图 7 未考虑非线性误差刀轨加工仿真

如图 7(c) 中所示, 在加工过程中产生了巨大的偏差。由此可知, 该机床所带后处理工具中并不存在补偿非线性误差的程序。

采用文中方法, 在计算刀轨过程中考虑刀轴矢量及与其有关的非线性误差, 在这两个刀触点之间又计算得到数个刀触点。最终的仿真结果如图 8

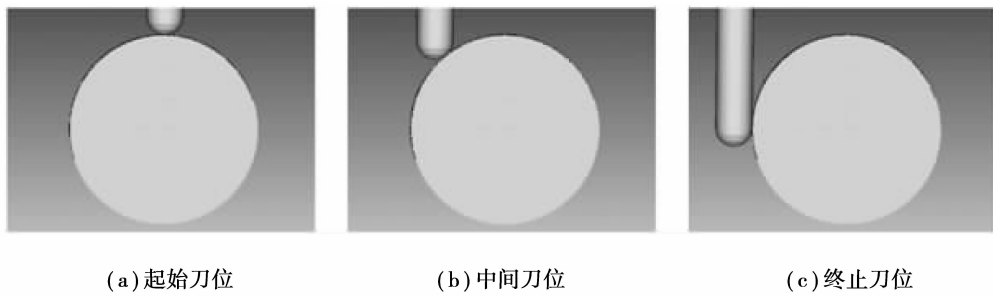


图 8 考虑非线性误差刀轨加工仿真

所示。

如图中所示,明显改善了图 8 中的过切现象。此例可以说明文中方法在前置处理过程中对非线性误差进行了补偿,即使当后处理过程不包括非线性误差校核,也能进行有效的处理。

例 2:以如图 9 所示一条叶片曲面截面线为验证实例,根据不同的允许加工误差分别采用文献[12](二分法)、文献[14](黄金分割法)中方法以及文中提出的改进弦截法来计算,计算结果如表 1 所示。

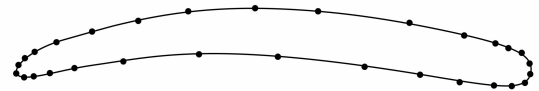


图 9 验证实例

图 9 中黑点标记位置为刀触点位置。从图中可以看出,刀触点分布符合前后缘位置稠密、而叶盆叶背位置稀疏的分布规律。

表 1 走刀步长计算方法比较

精度/mm	0.1		0.01		0.001	
	迭代次数	所需时间/s	迭代次数	所需时间/s	迭代次数	所需时间/s
文献[13]	724	0.007	2 405	0.021	7 652	0.065
文献[14]	530	0.009	1 628	0.026	4 647	0.077
本文方法	480	0.005	978	0.008	2 483	0.017

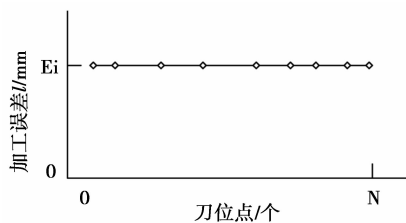


图 10 最大误差分布图

图 10 中为采用文中方法得到的最大误差分布图。从图中可以看出,可以将最大误差限制为允许加工误差。这既可以使得加工误差均匀,又可以减小程序的代码量。

文中算法与文献[12,14]中算法均可以实现刀具轨迹的等误差计算,三种算法得到的小直线段数基本是一致的,稍有差别是因为判断迭代终止时实际参数值与理论参数值不是完全重合的,而是在一

个误差范围内,取  $10^{-6}$  为迭代终止条件。

算法验证所使用 PC 机内存为 512 M,CPU 主频为 2.93 GHz。由表 1 可以看出,黄金分割法的迭代次数要比二分法少,但是平均所需时间却比二分法多。而随着精度的提高,文中算法所需迭代次数迅速降低,时间也少的多,效率比文献[13-14]中算法效率要高得多。

## 5 结 论

提出了一种考虑非线性误差补偿的五坐标数控加工走刀步长改进算法,主要研究成果如下:

- 1)提出了在走刀步长计算过程中即对非线性误差进行补偿的计算方法。该方法可充分利用零件的几何资源,计算非线性误差并分析该误差对总加工误差的影响,能够实现真正的等误差的刀具轨迹计算。
- 2)改进弦截法计算走刀步长。首先判断正确解

所在区间,通过修改迭代格式,在迭代过程中始终保证正确解在迭代区间内。该方法以差分代替微分,可以避免复杂函数的求导,收敛速度快,效率高。

#### 参考文献:

- [1] JHA B K, KUMAR A. Analysis of geometric errors associated with five-axis machining centre in improving the quality of cam profile[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(6): 629-636.
- [2] ERDOS G, MULLER M, XIROUCHAKIS P. Parametric tool correction algorithm for 5-axis machining [J]. *Advances in Engineering Software*, 2005, 36(10): 654-663.
- [3] HSU Y Y, WANG S S. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(1): 352-360.
- [4] LEE J H, LIU Y, YANG S H. Accuracy improvement of miniaturized machine tool: Geometric error modeling and compensation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(12/13): 1508-1516.
- [5] RADZEVICH S P. A closed-form solution to the problem of optimal tool-path generation for sculptured surface machining on multi-axis[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2006, 43(3/4): 222-243.
- [6] CHIOU J C J, LEE Y S. Optimal tool orientation for five-axis tool-end machining by swept envelope approach[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005, 127(4): 810-818.
- [7] CHEN T, YE P Q. A tool path generation strategy for sculptured surfaces machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 123(3): 369-373.
- [8] JUNG J Y. NC tool path generation for 5-axis machining of free formed surfaces [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2005, 16(1): 115-127.
- [9] YANG J Z, WANG Q F, HUANG Z D, et al. Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 47(3/4): 689-696.
- [10] LI C C, YOUNG H T. Integrated rough machining methodology for centrifugal impeller manufacturing [J]. *Internal Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 34(11-12): 1062-1071.
- [11] LIN R S, KOREN Y. Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces[J]. *Journal of engineering for industry*, 1996, 118(1): 20-28.
- [12] 张大卫, 张永, 阎兵, 等. 自由曲面数控加工刀具路径的自适应算法[J]. *天津大学学报*, 1997, 30(5): 607-610. ZHANG DA-WEI, ZHANG YONG, YAN BING, et al. Adaptive algorithm for tool path in NC machining of free form surface[J]. *Journal of Tianjin University*, 1997, 30(5): 607-610.
- [13] 王玉国. 数控雕刻加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [14] LI H, REMUS O, FATAN T, et al. An improved tool path discretization method for five-axis sculptured surface [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(9/10): 994-1000.
- [15] 白瑀. 叶片类零件高质高效数控加工编程技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [16] 张利波, 刘晓云, 张日敏. 五轴 NC 加工中的非线性误差分析及补偿[J]. *华中理工大学学报*, 1995, 23(2): 67-70. ZHANG LI-BO, LIU XIAO-YUN, ZHANG RI-MIN. A non-linear error analysis and compensation in five-axis NC machining[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1995, 23(2): 67-70.
- [17] 范冬青. 曲面数控加工中非线性误差的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
- [18] REMUS O, FATAN T, FENG H Y. Determination of geometry-based errors for interpolated tool paths in five-axis surface machining [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005, 127(1): 60-67.
- [19] HSU Y Y, WANG S S. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools [J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2007, 47(2): 352-360.
- [20] 周济, 周艳红. 数控加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [21] 张韵华, 奚梅成, 陈效群. 数值计算方法与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

(编辑 张小强)