五轴加工中非线性误差的检测和处理方法

王 丹 陈志同 陈五一

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 非线性误差是多轴数控加工中加工误差的重要来源,在多轴加工中不可避免. 在对前人工作分析的基础上,提出了一种在机床后置处理中减小机床过大非线性误差的算法,该方法通过对机床旋转轴的变化量进行监测,找出存在过大非线性误差的刀位点,并使用线性插值的方法进行修正. 对修正前后的变化量进行了对比,结果显示该方法能显著的减小加工的非线性误差. 同时该方法计算过程简单并且可以统一处理机床的一般非线性误差和后置奇异点处的非线性误差. 仿真结果亦表明此方法切实可行.

关 键 词: 加工; 插补; 误差检测; 机床

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)09-1003-04

Detection and control of non-linear errors in 5-axis machining

Wang Dan Chen Zhitong Chen Wuyi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Non-linear error is an important source of the machining error in multi-axis numerical controlled machining and it is unavoidable. A new strategy to deal with the non-linear error was proposed based on the analysis of former work. In the new strategy the tool positions with large non-linear errors were found out by detecting the movements of rotatory axes of the 5-axis machine tool and then the non-linear errors were compensated by linear interpolation. Comparison work between the original data and compensated data was done and the results show that the proposed strategy could notablely reduce the non-linear error. The strategy proposed could deal with non-linear errors of both general type and the special type which occur at singular position of the machine tool. Simulation results indicate the simplicity and feasibility of the strategy.

Key words: machining; interpolation; error detection; machine tools

在多坐标加工中,由于旋转运动的影响,机床各轴线性插补的合成运动会使实际刀位运动偏离编程直线,该误差称为非线性加工误差[1]. 在现阶段,五坐标数控加工是实现复杂曲面加工的主要手段. 在以线性插补为主要插补手段的五坐标数控加工中,连续的刀位轨迹以一系列很小的直线来逼近,之后由五坐标机床通过插补来实现被加工曲面的近似包络成型,在五坐标插补过程中,由于旋转轴运动的存在,非线性误差不可避免.

1 非线性误差的分类和处理

过大的非线性误差可以根据产生原因的不同分为2种:一种是由于加工生成刀轨本身设计步长过大而产生的非线性误差[2-6];另一种是由于机床后置处理反解运动学存在奇异解而产生的非线性误差[7-10].

1.1 大步长引发的非线性误差

通常各类文献中提到的非线性误差,指的是上述的第1种情况(图1a、图1b),文献[2,5]对五轴数控加工中的误差进行分析,建立了数学模型,并通过代数方法给出了各坐标轴引起误差之间的关系,最后给出了补偿的策略. 文献[3]对五坐标加工中的非线性误差进行了较严格的分析,得出了具有适用于多种刀具的加工误差估算公

收稿日期: 2007-08-02

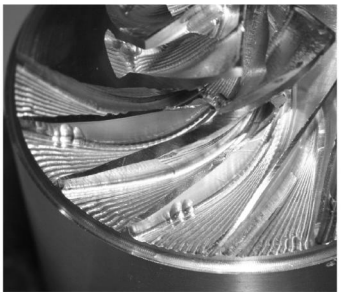
基金项目: 中国航空第一集团创新基金资助项目(CX03007)

作者简介: 王 丹(1982-),男,河北定州人,博士生, wangpick@163.com.

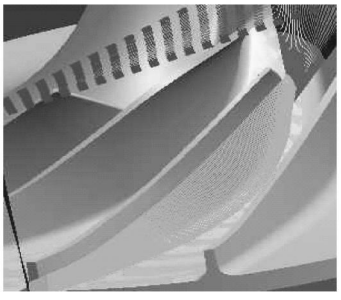
式,并给出了根据加工误差推算走刀步长的方法.文献[4]以基于宏域几何的包络理论为基础对非线性误差进行了系统深入的研究.

1.2 反解运动学引发的非线性误差

加工过程中过大的非线性误差的另一类特殊情况是由于机床反解运动学存在奇异解而产生的非线性误差(图 1c、图 1d),这种情况下机床的转/摆轴急速转动,很容易产生过切.文献[7]通过在奇异位置的最短路径搜索的方法来寻求加工刀轨的最优路径,以避免过大的非线性误差,但是此方法只适合在粗加工和高速加工中;文献[8]将刀轨用 B样条描述,通过直接修改插补奇异点附近的刀轨来避免奇异现象;文献[9]通过在奇异点处插补刀位点的方法来避免奇异过程产生的过切,但是文中并没有对过大非线性误差的检测方法;文献[10]通过对机床初始设置的调整,使反解运动学计算绕开机床的奇异点,从而获得优化的刀位,此方法虽然可行,但是要求设计工件相应的夹具.



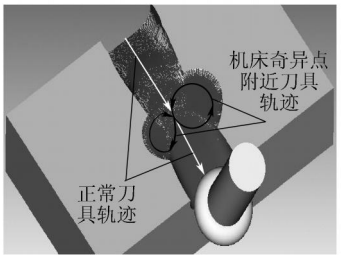
a 叶轮叶片加工中的啃切现象



b 叶轮叶片加工刀位轨迹



c 实际加工刀具轨迹及加工效果



d Vericut仿真中生成的刀心点轨迹

图 1 加工中的机床反解运动学奇异实例

图 1a、图 1b中由于刀轴转动步长过大,加工过程中产生了过切,如图 1c、图 1d所示,由于机床反解运动学奇异解的存在,加工过程中当 k值很接近 1时,仿真中出现了严重的过切(图 1d),加工中机床做减速处理后,产生的过切仍然十分明显,见图 1c.

虽然机床的 2种过大非线性误差产生的原因不同,对加工效果的影响程度也有所不同,但都造成了机床旋转轴的较大变化.本文在对前人方法的归纳研究基础上,通过对机床后置处理的分析,提出了一种对非线性进行误差检测以及处理的方法.本方法对上述 2类非线性误差都适用.

2 非线性误差的检测和处理方法

2.1 非线性误差的检测

五轴加工中,为了得到加工质量较高的型面,在刀轨的生成过程中,步长和刀轴矢量变化应该尽量的均匀平滑.若曲面的局部曲率很大(如叶片类零件的进排气边)或者加工的走刀步长较大(高速加工和粗加工),后置产生的数控程序会产生较大的非线性误差;如果加工空间内存在反解运动学奇异点后果会更加严重.本文以 MIKRON W74CH双转台的五坐标数控加工机床为例来说明这类误差的产生.设在当前加工坐标系下的刀位点的坐标为 (x, y, z, i, j, k),机床各个轴的运动为 (X, Y, Z, A, C),可以得到机床的反解运动学方程组:

$$[i \quad j \quad k]^{\mathrm{T}} = \mathrm{R}(Z, C)\,\mathrm{R}(X, A)\,[0 \quad 0 \quad 1]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

其中 $\mathrm{R}(Z, C)$和 $\mathrm{R}(X, A)$分别表示绕 Z和 X的旋转矩阵,由式(1)可以得到

$$\left.\begin{aligned} \cos A &= k \\ i\cos C + j\sin C &= 0 \\ -i\sin C + j\cos C &= -\sin A \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned} A &= \arccos k \\ \sin C &= i/\sqrt{1-k^2} \\ \cos C &= -j/\sqrt{1-k^2} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

可以看到当 $k = \pm 1$时,C角取值不定,产生奇异解.表 1为刀位点数据,表 2为相应的 G代码.

表 1　原始刀位点数据分析　　mm

刀位点	x	y	z	i	j	k
1	- 191. 395 8	2. 638 4	7. 225 2	0. 028 586	0. 104 879	0. 994 07
2	- 191. 397 8	4. 820 9	7. 208 0	0. 024 950	0. 071 236	0. 997 14
3	- 191. 399 8	7. 001 6	7. 265 8	0. 020 937	0. 035 732	0. 999 14
4	- 191. 401 8	9. 178 8	7. 402 1	0. 016 502	- 0. 001 056	0. 999 86
5	- 191. 403 7	11. 350 8	7. 618 2	0. 011 639	- 0. 036 377	0. 999 27
6	- 191. 405 7	13. 515 9	7. 909 3	0. 006 393	- 0. 068 922	0. 997 60
7	- 191. 407 8	15. 672 6	8. 269 4	0. 000 876	- 0. 099 039	0. 995 08

表 2　后置后的 G代码

刀位点	G标识	X /mm	Y /mm	Z /mm	A / (°)	C / (°)
1	G01	- 185. 354	- 60. 918	- 16. 695	- 6. 241	- 15. 246
2	G01	- 182. 232	- 68. 075	- 10. 059	- 4. 329	- 19. 303
3	G01	- 168. 679	- 95. 989	- 3. 442	- 2. 374	- 30. 368
4	G01	3. 065	- 193. 74	1. 49	- 0. 947	- 93. 662
5	G01	178. 841	- 74. 04	- 1. 423	- 2. 189	- 162. 258
6	G01	189. 339	- 39. 881	- 5. 988	- 3. 969	- 174. 7
7	G01	191. 262	- 29. 687	- 10. 452	- 5. 684	- 179. 493

由仿真和计算结果可以看到,当刀轴矢量的分量 k由 0. 999 14变化到 0. 999 27时,在相邻的 3个刀位点中刀轴的 C角变化了 131. 89 °,而且 k的值越趋近于 1的点,C角的变化越剧烈,有时这个角度可能要达到 180 °,由于 C角的剧烈变化而引起的非线性误差非常显著 (图 2、图 3),严重影响了被加工曲面的表面质量.

由表 2中的 G代码的各轴的变化量可以看出,第 4点和第 3点、第 5点相比,X, Y, C轴的变化量很大,通过计算可以发现 C轴的变化量很大是由于第 3、第 4点之间刀轴在 XY平面上的投影发生了相变,即由第 1象限转到了第 4象限,而第 4轴的大变化量造成了 X, Y轴的变化量的增大. 文献 [2]指出,对非线性误差的大小影响起重要作用的是 A和 C转角的变化,因此为了检测过大的刀位误差,本文采用了对机床第 4、第 5轴运动角度进行监测以确定非线性误差较大的刀位点. 计算公式为式 (4)、式 (5),设 l为刀位点的个数,共有 n个刀位点.

$$\Delta\bar{C}_l = \frac{\sum_{i=0}^{l}(C_i - C_{i-1})}{l} \qquad l = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (4)$$

$$\xi_l = \frac{\Delta C_l - \Delta\bar{C}_l}{\Delta\bar{C}_l} \qquad l = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (5)$$

可以通过 ξ_l的值来确定非线性误差是否过大 (本文中取 $\xi_{max} = 2\ 0$). 对于表 1中的数据根据式 (4) 和式 (5)计算得到 ξ(图 4). 由图 3可以看出在位于 a和 b之间的第 17～20刀位点的刀轴转角过大,这些点会产生较大的刀位非线性误差,图 5的仿真结果也和检测结果相吻合.

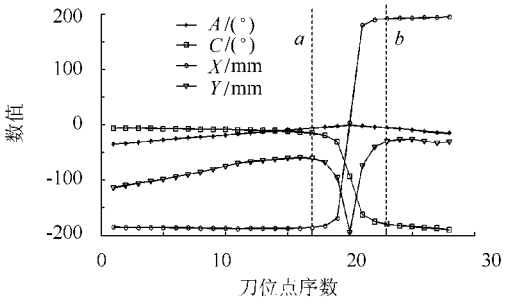


图 2　各轴原始数值变化曲线

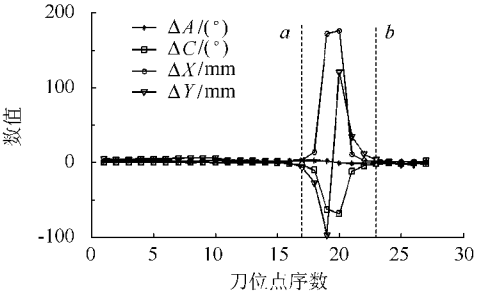


图 3　各轴原始数值增量变化曲线

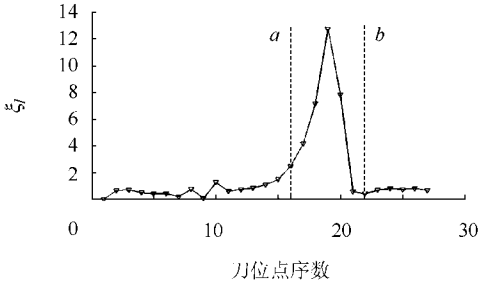


图 4　C轴数据的原始相对增量

2 2　非线性误差的处理方法

对于非线性误差的处理方法文献 [6 - 10]中都有论述,现在对于非线性误差的处理方法主要是刀位点加密法和四元插值法[6],但是对于整体

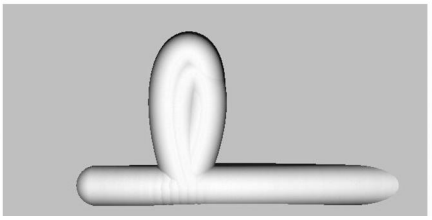


图 5 原始数据代码仿真结果

加密刀位点的方法,其计算量大或判断过程复杂,所以本文采用了刀轨的局部加密的方法,即针对非线性误差过大的位置进行刀轨加密,减小非线性误差.

当由 2.1节中提出的方法检测到后置生成的G代码中有非线性误差过大的刀位点时,需要对有问题的刀位点进行插值处理,以减小刀位轨迹的非线性误差. 插值的准则是使插值后的机床各轴的运动变化更加均匀,不产生刀轴的急剧变化,而且处理这些刀位点时的插值点的密度不能超过机床的运动学极限,否则会引起刀具的颤振和顿刀等现象,因此在加密刀位时也应该考虑机床的加速性能. 为此本文进行综合考虑,对旋转轴的绝对值和相对变化值都进行控制. 插补的方法如式(6)、式(7)所示.

$$C(t) = C_i + \frac{C_{i+1} - C_i}{\mathrm{mod}\left(\frac{C_{i+1} - C_i}{\varepsilon}\right)} t$$

$$t = 1, 2, 3, \cdots, \mathrm{mod}\left(\frac{C_{i+1} - C_i}{\varepsilon}\right) \qquad (6)$$

$$A(t) = A_i + \frac{A_{i+1} - A_i}{\mathrm{mod}\left(\frac{C_{i+1} - C_i}{\varepsilon}\right)} t$$

$$t = 1, 2, 3, \cdots, \mathrm{mod}\left(\frac{C_{i+1} - C_i}{\varepsilon}\right) \qquad (7)$$

其中 ε是一个确定的不大于机床运动分辨率的小值,ε的确定必须同时满足 2个旋转轴的要求. 程序的流程图如图 6所示. 运用此方法插补表 1中的刀轨以后得到优化的 G代码,在处理进程中限制 C轴的最大变化量为 10.°

由图 7~图 10中插补后的数据分析可以看出插补刀位点后,原来变化剧烈的 C转轴变化减小到 10以下,相对变化比例也减小到原来的一半.

由图 10所示的 Vericut的仿真结果可以看出,刀轨的非线性误差有明显的减小,加工质量得到提高. 如果机床的加速度性能允许,采用更小的 C轴变化量可以得到更好的效果.

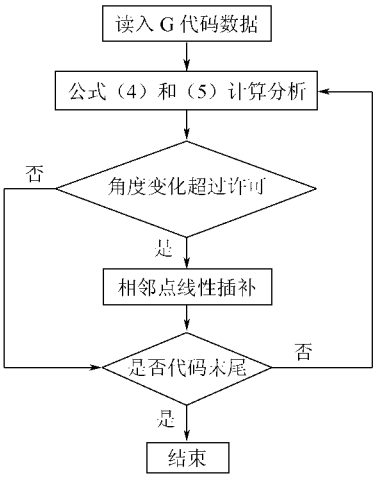


图 6 插补过程程序流程

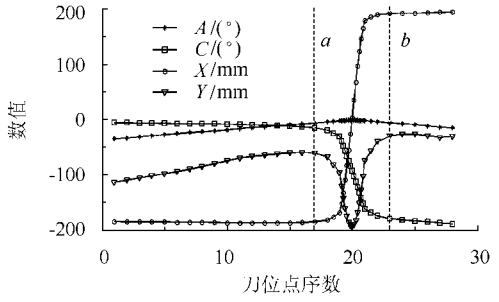


图 7 插补后机床各轴变化曲线

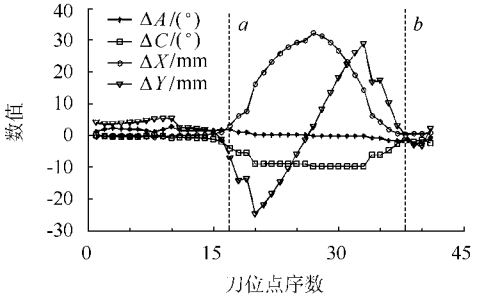


图 8 插补后机床各轴增量变化曲线

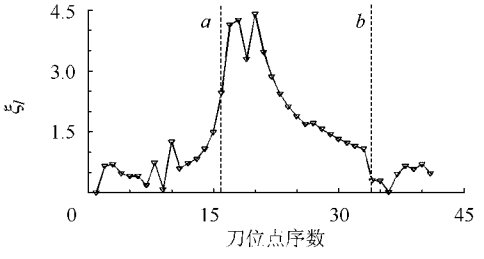


图 9 插补后 C轴数据的相对增量

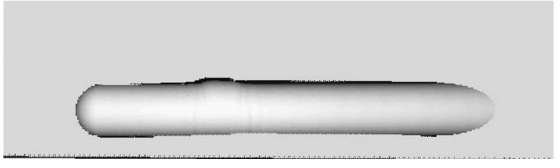


图 10 插补后的仿真结果

(下转第 1091页)

形.塑性变形的不一致性导致了轴向端面产生鱼尾形状的轴向宽展.在此研究基础上进一步分析了环件残余应力分布规律,即芯辊进给速度较小时,环件表面呈残余压应力,心部呈残余拉应力;芯辊进给速度较大时,表面为残余拉应力,往心部方向依次呈压应力和拉应力,这样的残余应力分布不利于环件的抗疲劳能力,因此在实际生产实践中不能一味追求生产效率而忽视后期环件的疲劳寿命.消除和减小轧制后环件的残余应力是解决环件加工变形问题的根本所在,因此基于本文分析得出的残余应力分布规律,进一步研究环件的时效技术与方法是下一步研究工作的重点.

参考文献 (References)

[1] 米谷茂. 残余应力的产生和对策 [M]. 北京:机械工业出版社, 1983: 210-214
Mi Gumao. The produce and countermeasure of residual stress [M]. Beijing: China Machine Press, 1983: 210-214 (in Chinese)

[2] Wang Min, Yang He, Sun Zhichao, et al. Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16: 1274-1280

[3] 华林,黄兴高,朱春东. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2001: 7-8
Hua Lin, Huang Xingao, Zhu Chundong. Theory and technology of ring rolling[M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 7-8 (in Chinese)

[4] 李兰云,杨合,郭良刚,等. 芯辊进给速度对环件冷轧工艺的影响规律 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 809-811
Li Lanyun, Yang He, Guo Lianggang, et al. Effect of feed velocity of mandrel on cold ring roll process[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(7): 809-811 (in Chinese)

[5] 方博武. 金属冷热加工的残余应力 [M]. 北京:高等教育出版社, 1991: 84-86
Fang Bowu. Residual stress of metal cold-thermal manufacture [M]. Beijing: China Higher Education Press, 1991: 84-86 (in Chinese)

[6] 赵丽丽,张以都. 预拉伸板轧制拉伸残余应力的计算机仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(7): 605-609
Zhao Lili, Zhang Yidu. Computer simulation of residual stress for cold rolling prestretching board[J]. Jounal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(7): 606-609 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)

(上接第 1006页)

3 结束语

五轴加工过程中由于曲面表面问题或走刀步长较长而带来的非线性误差严重影响着被加工曲面的表面质量.五轴加工中奇异点处的加工误差是非线性误差的一种极端情况.本文提出了一种通过监测刀轴变化来检测并修正非线性误差的方法.该方法可以应用于处理由刀轴的变化量过大而带来的非线性误差问题,通过对刀轴变化的监测可以避免刀轨整体加密带来的过大的计算量,从而减少了计算时间,提高了加工效率.仿真结果表明了该方法的有效性.

参考文献 (References)

[1] 周济,周艳红. 数控加工技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2002: 200
Zhou Ji, Zhou Yanhong. Technology of NC machining [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 200 (in Chinese)

[2] Bohez E L J. Compensating for systematic errors in 5-axis NC machining[J]. Computer Aided Design, 2002, 34(5): 391 - 403

[3] 周济,周艳红. 五坐标数控加工的理论误差分析与控制 [J]. 机械工程学报, 1999, 35(5): 54 - 57
Zhou Ji, Zhou Yanhong. Analysis and control of the theoretical error in five-axis NC machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(5): 54 - 57 (in Chinese)

[4] 范冬青,张洪. 曲面数控加工中的非线性误差 [J]. 机械设计与制造, 2004, 35(4): 35 - 37
Fan Dongqing, Zhang Hong. Non-linear error in the NC machining of free surface [J]. Machinery Design & Manufacture, 2004, 35(4): 35 - 37 (in Chinese)

[5] Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. Error compensation in machine tools-a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(9): 1235 - 56

[6] Ho Mingche, Hwang Yeanren, Hu Chang-hsia. Five-axis tool orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(4): 1259 - 1267

[7] Munlin M, Makhanov S S, Bohez E L J. Optimization of rotations of a five-axis milling machine near stationary points[J]. Computer Aided Design, 2003, 36(7): 1117 - 1128

[8] 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

[9] Knut Sørby. Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 299 - 306

[10] Anotaipaiboon W, Makhanov S S, Bohez E L J. Optimal setup for five-axis machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(9): 964 - 977

(责任编辑:文丽芳)