数控铣床几何误差测量与反向间隙补偿试验

申晓龙[1],胡佳英[1],张明军[2]

1. 湖南工业职业技术学院,长沙 410208
2. 湖南大学机械与运载工程学院,长沙 410082

摘要　研究数控铣床几何误差检测及其补偿技术,对高速数控铣床工作空间中的平面误差场的检测、建模和补偿技术进行了比较系统和深入的探讨。对几何误差的基本特性,在单轴轴向运用高精度的 HEIDENHAIN 直线光栅进行了试验验证。结果表明,在满足基本测试条件下,误差的基本特性成立,这为提供新的误差测量方法打下了基础;针对数控铣床运动过程中的反向间隙,提出了插补运动综合几何误差的间隙补偿技术和算法,数据处理后的测量结果显示反向间隙可以很好地得到补偿。

关键词　数控铣床;几何误差;反向间隙;定位误差;检测与补偿

中图分类号　TG659　　**文献标识码**　A　　**doi**　10.3981/j.issn.1000-7857.2011.35.012

Experimental of Geometric Error Measurement and Backlash Compensation of CNC Milling Machine

SHEN Xiaolong[1], HU Jiaying[1], ZHANG Mingjun[2]

1. *Hunan Industry Polytechnic, Changsha 410208, China*
2. *College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China*

Abstract　Generally, the geometric error of CNC milling machine has a great effect on the synthetical precision of a machine tool. In this paper, the measuring and compensating technologies of the geometric error of CNC milling machine were investigated. The measurement, model and compensation of the plane error field in the working space of high-speed CNC milling machine were discussed systematically. The basic feature of the geometric error was verified by using the high accuracy linear grating along the single axial direction experimentally. Following, the backlash compensation algorithm of the synthetical geometric error of interpolation movement and the evaluation system of position accuracy were proposed for the backlash during CNC milling machine processing. The result indicates that the basic feature of error is established and provides a basis for putting forward the new error measurement method under the essential measuring condition. The backlash could be well compensated.

Keywords　CNC milling machine; geometric error; backlash; position error; measurement and compensation

0　引言

数控铣床因具有柔性好、自动化程度高、加工误差小等优点在现代制造业中得到广泛应用和迅速发展,数控机床的加工精度是衡量数控机床工作性能的重要指标。误差的测量是误差补偿的基础与关键,通过误差补偿不仅可以提高数控机床制造的精度等级,同时也可以对现有数控机床的精度进行升级。为了获得准确的机床工作空间的误差值,本文对湖南工业职业技术学院 3 轴数控铣床多轴改装后的 VC600 机床的几何误差进行测量及反向间隙误差补偿,以期为误差建模和提高高速数控铣床的加工精度创造条件。

1　试验设备与测试系统

1.1　试验设备

试验研究设备是湖南工业职业技术学院数控车间 1 台

收稿日期:2011-09-30;修回日期:2011-11-08

基金项目:湖南省科技厅科技计划项目(2011GK3090);湖南省教育厅科学研究项目(11C0448);湖南工业职业技术学院自然科学科研项目(GYKYZ201004)

作者简介:申晓龙,副教授,研究方向为机械工程、数控技术,电子信箱:shenxl64@126.com

经过改装了的具有 3 联动运动的数控铣削加工机床,型号为 VC600,该机床 3 轴行程长度(x×y×z)为 600mm×410mm×510mm。测量时选用较低进给速度 f=60mm/min,以避免进给速度对测量结果造成影响。每次测量时,为使机床达到相对平衡状态,消除温度变化对机床误差的影响,事先启动机床空运行 2h[1-2]。将机床置于单独的实验室内,周围环境中没有震动和干扰源,室内试验温度保持在(20±0.5)℃[3]。图 1 为试验所用设备 VC600 数控铣削加工机床。

图 1　VC600 数控铣削机床

Fig. 1　VC600 CNC milling machine

1.2　VM203 测试系统

图 2 为 VM203 测试系统示意图,其主要部件是 HEIDENHAIN 公司于 2005 年研制出的干涉型敞开式光栅尺,该光栅尺由分离的扫描光栅和带尺光栅组成。测量时,磁性部件和连接在主轴上的连接件吸合,带尺光栅固定在铣床工作台上并与所测轴线找正。

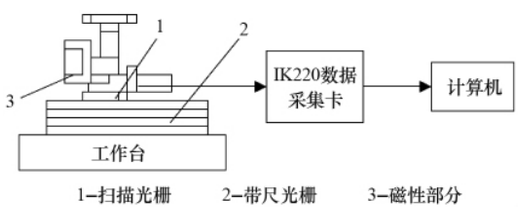


图 2　VM203 测试系统示意

Fig. 2　Schematic diagram of VM203 measuring system

铣床工作台沿轴线运动时,扫描光栅和带尺光栅相对运动,将输出信号周期设定为 3μm,通过 IK220 数据采集卡将实际测量值输入计算机。VM203 测试系统装置分辨率为 0.05μm,测量误差小于 0.5μm。根据数控铣床工作台长度可以选取合适长度的带尺光栅,本试验使用的带尺光栅长度为 750mm,可以满足 VC600 数控铣削机床实际测量的需要。

2　几何误差测量试验与结果分析

2.1　几何误差测量试验方法

选取数控铣床坐标原点为测量的起点,设计测量路径,分别取机床坐标轴 x、y 方向上的不同点作为目标位置,见图 3。使用 VM203 直线光栅测量系统可以测出一维方向上任意 2 个指令位置之间的实际位移值。采用图 3 中路径 1 时可直接测量出目标点的实际位移。按照路径 2—路径 7 时,对目标点的实际位移进行分段测量,每当运行到箭头位置,就记录对应指令位置的实际位置[4];然后数控机床回 0,运行到上 1 次箭头位置处,光栅尺读数清 0,再从该位置开始,继续向下 1 个目标方向运动,如此反复直到最终到达目标位置为止。

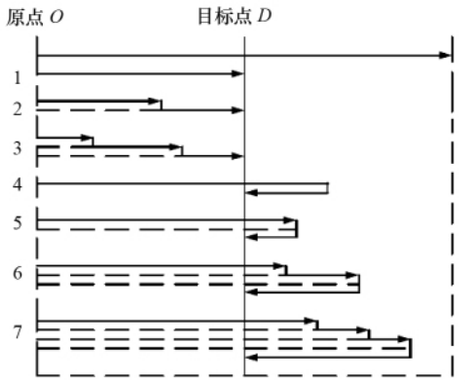


图 3　几何误差测量试验路径

Fig. 3　Testing paths of geometric error measurement

2.2　几何误差测量试验数据统计与分析

2.2.1　x 轴直线方向的测量

假设目标点 $x(400)$表示指令位置 x=400mm,测量路径实际中间点如下。

(1) $x(0)\rightarrow x(400)$,表示指令位置从 x=0 运行到 x=400mm,以下类同。

(2) $x(0)\rightarrow x(250)$,$x(250)\rightarrow x(400)$。

(3) $x(0)\rightarrow x(200)$,$x(200)\rightarrow x(300)$,$x(300)\rightarrow x(400)$。

(4) $x(0)\rightarrow x(500)\rightarrow x(400)$。

(5) $x(0)\rightarrow x(450)$,$x(450)\rightarrow x(400)$。

(6) $x(0)\rightarrow x(500)$,$x(500)\rightarrow x(550)$,$x(550)\rightarrow x(400)$。

(7) $x(0)\rightarrow x(480)$,$x(480)\rightarrow x(500)$,$x(500)\rightarrow x(560)$,$x(560)\rightarrow x(400)$。

上述每个路径测量 5 次,求其平均测量值。测量装置如图 4 所示,部分实际测量数值见表 1—表 3。表 1 为路径 1 和

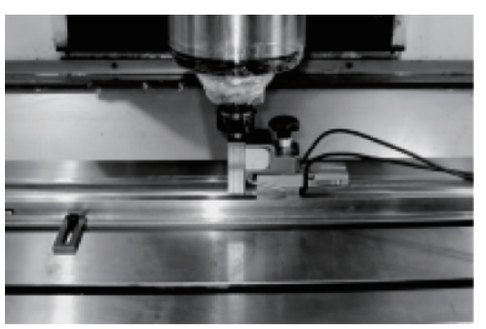


图 4　x 轴方向光栅测量装置

Fig. 4　Grating measuring device at x axis direction

路径 2 的测量结果,表 2 为路径 7 的测量结果。

表 1　x 轴方向路径 1 和路径 2 的测量结果(单位:mm)

Table 1　Measurement results of No. 1 and No. 2 paths at x axis direction (unit: mm)

路径 1		路径 2		
测量次数	$x(0)\to x(400)$	测量次数	$x(0)\to x(250)$	$x(250)\to x(400)$
1	399.9894	1	249.9944	149.9945
2	399.9896	2	249.9947	149.9943
3	399.9895	3	249.9946	149.9942
4	399.9894	4	249.9944	149.9945
5	399.9897	5	249.9944	149.9944
平均值	399.9895	平均值	249.9945	149.9944

表 2　x 轴方向路径 7 的测量结果(单位:mm)

Table 2　Measurement results of No. 7 path at x axis direction (unit: mm)

测量次数	$x(0)\to x(480)$	$x(480)\to x(500)$	$x(500)\to x(560)$	$x(560)\to x(400)$
1	479.9875	19.9996	59.9989	−159.9974
2	479.9874	19.9995	59.9990	−159.9972
3	479.9874	19.9995	59.9990	−159.9972
4	479.9875	19.9994	59.9989	−159.9973
5	479.9875	19.9994	59.9990	−159.9973
平均值	479.9875	19.9995	59.9990	−159.9973

x 轴方向上路径 3—路径 6 的实际测量结果数值表略。根据以上测量结果,按照误差相对性进行合成处理,将路径 1—路径 7 测量 5 次的平均值列出,见表 3。

表 3　x 轴方向路径 1—路径 7 测量结果的平均值

Table 3　Measurement results of No. 1—No. 7 paths at x axis direction

测量路径	测量结果/mm
1	399.9895
2	399.9889
3	399.9883
4	399.9881
5	399.9884
6	399.9885
7	399.9887

2.2.2　y 轴直线方向的测量

假设目标点 $y(240)$ 表示指令位置 y=240mm,路径 1—路径 7 的实际测量位置的中间点如下。

(1) $y(0)\to y(240)$。

(2) $y(0)\to y(130)$,$y(130)\to y(240)$。

(3) $y(0)\to y(80)$,$y(80)\to y(160)$,$y(160)\to y(240)$。

(4) $y(0)\to y(340)\to y(240)$。

(5) $y(0)\to y(290)$,$y(290)\to y(240)$。

(6) $y(0)\to y(260)$,$y(260)\to y(350)$,$y(350)\to y(240)$。

(7) $y(0)\to y(280)$,$y(280)\to y(320)$,$y(320)\to y(370)$,$y(370)\to y(240)$。

同 x 方向上测量,上述 y 方向上每个路径测量 5 次,求其平均测量值。测量装置如图 5 所示,部分实际测量数值见表 4—表 6,y 轴方向上路径 1—路径 3、路径 7 的实际测量结果数值表略。

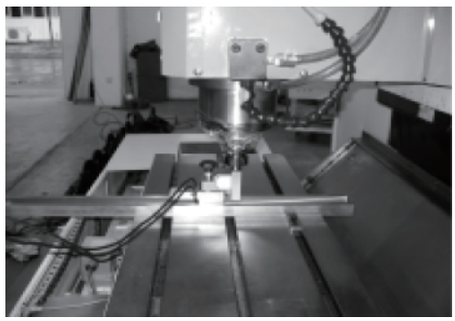


图 5　y 轴方向光栅测量装置

Fig. 5　Grating measuring device at y axis directions

表 4　y 轴方向路径 4 和路径 5 的测量结果(单位:mm)

Table 4　Measurement results of No. 4 and No. 5 paths at y axis direction (unit: mm)

路径 4		路径 5		
测量次数	$y(0)\to y(340)\to y(240)$	测量次数	$y(0)\to y(290)$	$y(290)\to y(240)$
1	239.9938	1	339.9900	−99.9958
2	239.9934	2	339.9898	−99.9954
3	239.9936	3	339.9898	−99.9955
4	239.9935	4	339.9896	−99.9954
5	239.9936	5	339.9897	−99.9954
平均值	239.9936	平均值	339.9898	−99.9955

表 5　y 轴方向路径 6 的测量结果(单位:mm)

Table 5　Measurement results of No. 6 path at y axis direction (unit: mm)

测量次数	$y(0)\to y(260)$	$y(260)\to y(350)$	$y(350)\to y(240)$
1	259.9928	89.9964	−109.9966
2	259.9926	89.9964	−109.9964
3	259.9926	89.9962	−109.9964
4	259.9928	89.9963	−109.9967
5	259.9926	19.9994	−109.9966
平均值	259.9927	89.9963	−109.9965

根据 y 轴直线方向的实际测量结果，与 x 轴直线方向一样,按照误差相对性进行合成,路径 1—路径 7 测量 5 次的平均值见表 6。

表 6　y 轴方向路径 1—路径 7 测量结果的平均值

Table 6　Measurement results of No. 1 to No. 7 paths at y axis direction

测量路径	测量结果/mm
1	239.9932
2	239.9921
3	239.9931
4	239.9936
5	239.9943
6	239.9925
7	239.9934

2.2.3　测量结果分析

(1) 测量结果表明,机床具有较好的重复性,同一段位移 5 次测试的最大值和最小值的误差在 0—0.5μm 范围内。

(2) 在 x 轴直线方向的测量,选取 x=400mm 时:

路径 1 直接测量的误差值为 (400−399.9895)mm×1000=10.5μm。

路径 2 的相对测量的末端误差值为(400−399.9889)mm×1000=11.1μm。

同理，计算路径 3—路径 7 的相对测量的末端误差值分别为 11.7,11.9,11.6,11.5,11.3μm。

相对测量末端误差和直接测量的最大误差为 11.9μm−10.5μm=1.4μm;最小误差为 11.1μm−10.5μm=0.6μm;相对测量产生的误差占直接测量结果的最大百分比为 1.4÷10.5=13.3%。

相对测量误差占直接测量的比例在 1/5 范围内，可见该测量方法对测量结果的影响不大,证明了 x 轴方向误差的相对特性。

(3) 在 y 轴直线方向的测量,选取 y=240mm 时:

路径 1 的直接测量的误差值为 (240−239.9932)mm×1000=6.8μm。

路径 2 的相对测量的末端误差值 (240−239.9921)mm×1000=7.9μm。

同理，计算路径 3—路径 7 的相对测量的末端误差值分别为 6.9,6.4,5.7,7.5,6.6μm。

相对测量末端误差和直接测量的最大误差为 7.9μm−6.8μm=1.1μm;最小误差为 5.7μm−6.8μm=−1.1μm。相对测量产生的误差所占直接测量结果的最大百分比为 1.1÷6.8=16.2%。在 y 轴方向对测量结果影响不大,也证明了在 y 轴方向误差的相对特性。

3　反向间隙误差测量与补偿

3.1　反向间隙误差补偿思路

反向间隙存在于各运动坐标轴上,轴的运动方向改变时反向间隙就会表现出来。由于丝杆的磨损和装配不同,全轴上反向间隙会不一致,需将丝杆按等间隙值分成几段[5-6]。反向间隙存在的主要原因是驱动轴的丝杠副以及丝杠支撑轴承与轴承座之间存在间隙，反向间隙受温度变化影响很小。试验表明,反向间隙在轴的 2 端附近有变化而在中间变化不大。下面用二维平面运动说明反向间隙对加工运动的影响。

图 6 表示刀具编程运动轨迹在 x_ix_j 平面内从 P_0 运动到 P_5,认为只在 x_i 轴方向发生运动方向的改变,而在 x_j 方向不改变运动方向。设 $x_{i,n}$ 为 x_i 方向上点 n 的坐标,$e(x_{i,n})$为点 x_i 的反向误差。刀具的编程运动轨迹为 $P_0\to P_1\to P_2\to P_3\to P_4\to P_5$。因反向间隙影响,实际的运动轨迹为 $P_0\to P_1\to P_2\to P'_2\to P'_3\to P'_4\to P'_{4n}\to P_5$。如果用反向间隙对刀具驱动程序的指令进行补偿修正,使刀具沿补偿后的路径 $P_0\to P_1\to P_{2c}\to P_{3c}\to P_{4c}\to P_4\to P_5$ 运动,则实际的运动路径就可实现 $P_0\to P_1\to P_2\to P_3\to P_4\to P_5$。

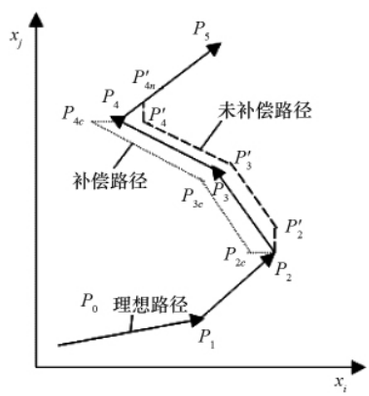


图 6　反向误差和补偿

Fig. 6　Backlash error and compensation

图 6 中反向间隙的补偿包括了全部的 4 种可能情形[7-8]:

(1) $x_{i,n+1}\geqslant x_{i,n}$ 且 $x_{i,n}\geqslant x_{i,n-1}$,$P_0\to P_1\to P_2$;

(2) $x_{i,n+1}\leqslant x_{i,n}$ 且 $x_{i,n}\geqslant x_{i,n-1}$,$P_1\to P_2\to P_3$;

(3) $x_{i,n+1}\leqslant x_{i,n}$ 且 $x_{i,n}\leqslant x_{i,n-1}$,$P_2\to P_3\to P_4$;

(4) $x_{i,n+1}\geqslant x_{i,n}$ 且 $x_{i,n}\leqslant x_{i,n-1}$,$P_3\to P_4\to P_5$。

数控铣床在 x_i 正方向运动,反向误差为 0;负向运动时反向误差为 $e(x_{i,n})$。即当运动直线在 x_i 方向上的斜率为正时,其目标值不受反向误差的影响;运动直线在 x_i 方向上的斜率为负时,要对目标点在 x_i 方向的分量进行反向误差修正。

3.2　反向间隙误差补偿算法

给定目标值的集合和其反向误差$\{x_{i,n}\}$,其中 i=1,2,3;n=1,2,⋯,m。

$\{e(x_{i,n})\}$,i=1,2,3 而 n=1,2,⋯,m/* 每轴上的反向误差 */

start:

```
move to point 0;
for n=1 to (n−1);
{for i=1 to 3; /*for each case*/
  {if ((x_{i,n+1}≥x_{i,n})&&(x_{i,n}≥x_{i,n−1})); /*case 1*/
  then [ no backlash compensation];
  if ((x_{i,n+1}≤x_{i,n})&&(x_{i,n}≥x_{i,n−1})); /*case 2*/
  then [ Move to x_{i,n}
        Move to (x_{i,n}−e(x_{i,n}))
        Move to (x_{i,n+1}−e(x_{i,n+1}))];
  if ((x_{i,n+1}≤x_{i,n})&&(x_{i,n}≤x_{i,n−1})); /*case 3*/
  then [Move to (x_{i,n+1}−e(x_{i,n+1}))];
  if ((x_{i,n+1}≤x_{i,n})&&(x_{i,n}≥x_{i,n−1})); /*case 4*/
  then [Move to x_{i,n}
      Move to x_{i,n+1}];
  };
};
```

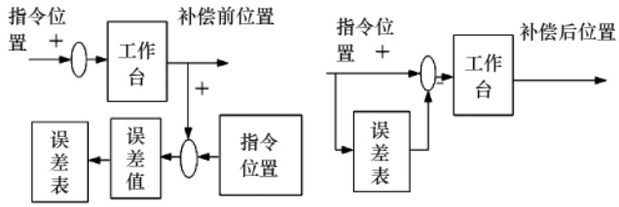
以上算法是对沿轴反方向的运动进行修正,其修正量为反向误差的大小。对向前(正向)的运动,数控铣床的运动仅在由负向转正向时的转折点上进行反向误差修正。

数控加工中心加工前,各轴需进行回 0 操作,回 0 方式常有 2 种:(1) 回 0 后的最终运动方向与运动轴正向一致;(2) 回 0 后的最终运动方向与运动轴正向相反[9]。当最终运动方向与运动轴正向一致时,算法同上;相反时,其修正过程与上也正好相反。

根据上面的补偿技术和算法就能把反向误差的补偿引入到数控铣床的加工误差补偿中。当把反向误差补偿算法与其他误差补偿的算法集成在一起时,反向误差的补偿需在其他误差补偿引入后才能进行。对圆弧,需将整个圆弧分割为属于单一象限的多个线段后才能引入反向误差的补偿。

3.3　反向间隙误差测量补偿过程

数控机床的反向间隙导致机床工作空间上点的误差,并且误差与趋近该点的方向有关[10]。误差的测量和补偿应对同一基准点进行,一般选取机床的回 0 点为补偿和测量的基准点。对机床反向间隙误差进行测量和补偿,可为平面误差测量和补偿奠定基础[11-12]。为提高系统的通用性,采用光栅尺测量方法,应用 HEIDENHAIN 公司的 VM203 测量系统,测量和补偿流程见图 7。



(a) 测量阶段
(a) Measurement procedure

(b) 补偿阶段
(b) Compensation procedure

图 7　反向间隙误差测量补偿流程

Fig. 7　Measurement and compensation procedures of the backlash error

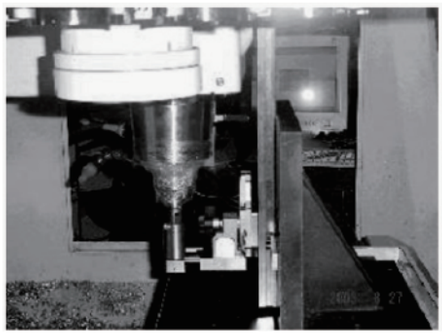


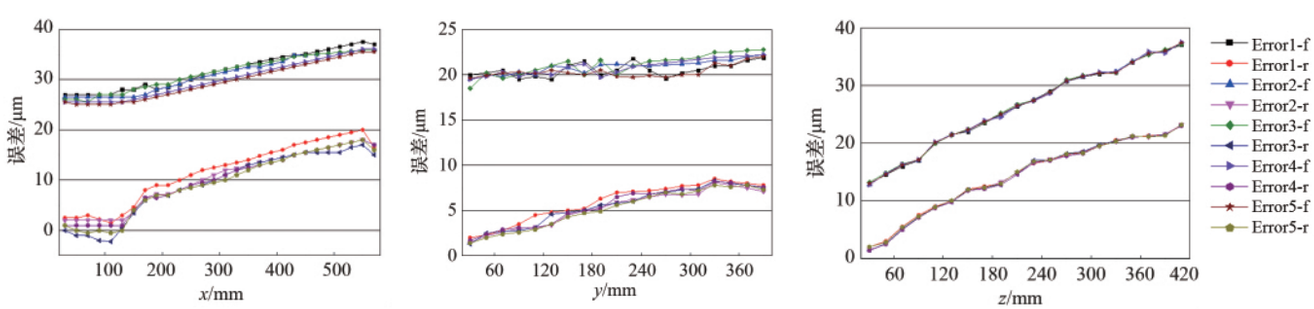
图 8　z 轴方向定位误差测量装置

Fig. 8　Device for measuring the position errors at z axis direction

3.4　反向间隙误差测量、补偿试验数据统计与分析

测量 x、y 轴定位误差的设备安装方法同图 5 和图 6,图 8 为测量 z 轴定位误差的设备安装方法。

按照测量轴的位置进行测量,每个轴循环测量 5 次,分别得到 x 轴、y 轴和 z 轴的定位误差,见图 9。其中,"Error1-f"表示机床被测轴第 1 次正向运动的位置精度测量结果;"Error1-r"表示机床被测轴第 1 次反向运动位置精度测量结果,依此类推。



(a) x 轴
(a) x axis

(b) y 轴
(b) y axis

(c) z 轴
(c) z axis

图 9　x、y、z 轴方向定位误差

Fig. 9　Position errors at x, y, z axes directions

图 10 是反向间隙测量结果,其中 B_{ex}、B_{ey} 和 B_{ez} 分别表示 x、y 和 z 轴的反向间隙数值。可见,反向间隙不是常数,各轴不同位置处的反向间隙数值也不一样。

图 11 是反向间隙补偿后的测量结果。在 x、y 轴上同一位置点,5 次循环测量所得的误差数值变化在 2μm 范围内;由于安装误差的影响,在 z 轴同一点 5 次循环测量所得的误差数值变化在 5μm 范围内。与补偿前 x、y、z 轴的测量结果相比,反向间隙已被很好地补偿。实际应用时,可根据需要进一步依据补偿后的测量数值进行二次或多次反向间隙的补偿,补偿后轴线上同一点的多次测量误差可控制在 1μm 内,这也说明该数控铣床具有很好的重复精度。

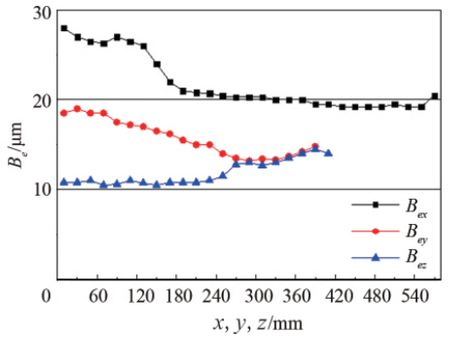
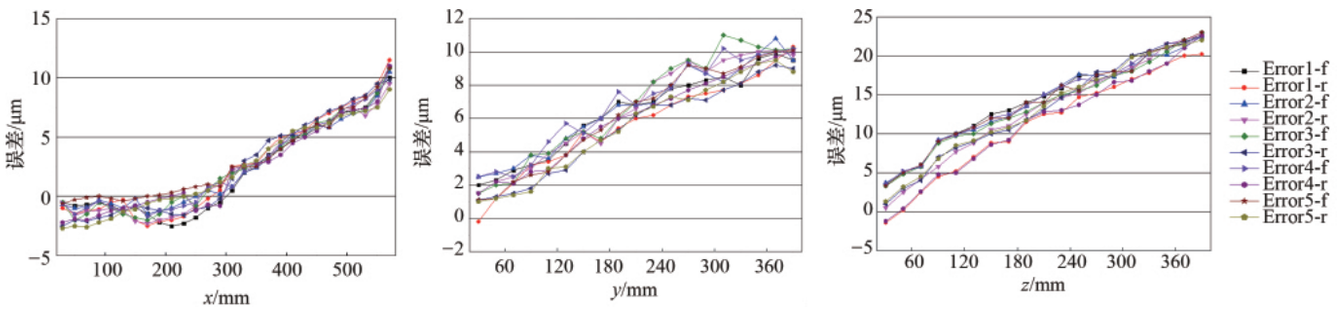


图 10　x、y 和 z 轴反向间隙 B_e

Fig. 10　Backlash B_e at x, y and z axes directions



(a) x 轴　　(b) y 轴　　(c) z 轴

(a) x axis　　(b) y axis　　(c) z axis

图 11　补偿反向间隙后 x、y、z 轴定位误差

Fig. 11　Position errors at x, y, z axes directions after compensation of backlash

4　结论

(1) 对 x、y 方向上单轴几何误差测量试验数据的统计与分析表明,相对测量误差占直接测量的比例在 1/5 范围内,可见这种测量方法对测量结果的影响不大,证明了在 x、y 轴方向误差的相对特性。依据误差的特性,采用新的测量方法可获得数控铣床工作平面上指令位置点的误差值,为误差建模打下基础。

(2) 针对数控铣床运动过程中的反向间隙,提出了插补运动综合几何误差补偿过程中的间隙补偿技术和算法,经补偿数据处理后的测量结果显示数控铣床反向间隙可以很好地得到补偿。

参考文献(References)

[1] Chen G Q, Yuan J X, Ni J. A displacement measurement approach for machine geometric error assessment [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(1): 149–161.

[2] Toshiyuki T, Hironori N, Tomizo K. Development of a ball step-gauge and an interferometer stepper used for ball-plate calibration[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(2): 214–221.

[3] Schmitz. T, Matthew D, Dutterer B, *et al*. The application of high-speed CNC machining to prototype production [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(8): 1209–1228.

[4] Kamahora K. Development of a new artifact for the calibration of large scale instruments[J]. *Measurement*, 2001, 30(2): 139–143.

[5] 洪迈生, 苏恒. 数控机床的运动精度诊断-评述与对策[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 91–94.
Hong Maisheng. Su Heng. *J Mech Eng*, 2002, 38(2): 91–94.

[6] 张虎, 周云飞, 唐小琦, 等. 数控机床定位误差的软件补偿技术 [J]. 华中理工大学学报, 2001, 29(4): 47–49.
Zhang Hu, Zhou Yunfei, Tang Xiaoqi, *et al*. *J Huazhong Uni Sci Technol*, 2001, 29(4): 47–49.

[7] Qiu H, Li Y, Li Y B. A new method and device for motion accuracy measurement of NC machine tools. Part 1: Principle and equipment[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41 (4): 521–534.

[8] 申晓龙, 张来希, 胡佳英. 加工长杆异型螺杆数控铣床的开发与应用[J]. 科技导报, 2011, 29(26): 61–66.
Shen Xiaolong, Zhang Laixi, Hu Jiaying. *Science and Technology Review*, 2011, 29(26): 61–66.

[9] Chen G Q. Rapid volumetric error mapping and compensation for a three-axis machine center[D]. Ann Arbor: Michigen University, 2000.

[10] Jywe W Y, Liu C H. Application of ball bar and genetic algorithms for CNC lathe contouring compensation [J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(3): 189–195.

[11] 刘焕牢, 李斌, 师汉民, 等. 嵌入式数控机床位置精度评定及误差补偿系统[J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(10): 31–33.
Liu Huanlao, Li Bin, Shi Hanmin, *et al*. *J Huazhong Uni Sci Technol*, 2004, 32(10): 31–33.

[12] 苏恒, 洪迈生. 机床主轴径向误差运动在线检测与信号处理[J]. 机械工程学报, 2002, 38(6): 56–60.
Su Heng, Hong Maisheng. *J Mech Eng*, 2002, 38(6): 56–60.

(责任编辑　孙秀云,代丽)