

doi: 10.7690/bgzdh.2022.07.009

基于 PLC 的运动机构螺距误差补偿方法

李天添, 陈泳睿, 曹亦盛, 钟金龙

(中国兵器装备集团自动化研究所智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高压机运行精度与稳定性, 设计一种适用于倍福 PLC 的螺距误差补偿方法。依据激光干涉仪测量设备进给轴运行范围内不同点位的误差值, 计算出对应位置的补偿值, 通过相应算法实现对设备轴的定位进行补偿, 从而提高进给控制精度。结果表明: 该方法对设备轴螺距误差有显著改善, 明显提升设备轴控制精度。

关键词: 倍福 PLC; TwinCAT; 螺距误差补偿

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Compensation Method of Pitch Error of Motion Mechanism Based on PLC

Li Tiantian, Chen Yongrui, Cao Yisheng, Zhong Jinlong

(Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the running accuracy and stability of the compressor, a pitch error compensation method suitable for Beckhoff PLC is designed. The compensation value of the corresponding position is calculated according to the error value of different points in the operation range of the feed shaft of the laser interferometer measurement equipment, and the positioning compensation of the equipment shaft is realized through the corresponding algorithm, so that the feed control accuracy is improved. The results show that the method can significantly improve the pitch error of the equipment axis, and significantly enhance the control accuracy of the equipment axis.

Keywords: Beckhoff PLC; TwinCAT; pitch error compensation

0 引言

一般设备进给轴的机械传动结构均由滚珠丝杠、齿轮组等传动部件组成。各传动部件在制造和装配过程中都存在一定的误差, 从而造成传动过程中存在误差。究其原因有 2 方面: 1) 传动部件生产过程中受加工工艺、精度等影响, 存在尺寸等各种误差; 2) 装配过程中, 传动部件拉伸、变形以及装配平行度等问题也会引起目标值偏差^[1-2]; 传动链正/反向运动时, 传动部件之间需要间隙才能正常地运行, 螺距误差和齿轮间隙是避免不了的。这种螺距误差或间隙的累计会严重影响传动链末级的精度。

为提高设备精度, 需要对误差进行参数补偿。螺距误差补偿基本方法: 按照优先考虑机械调整, 分析误差形状及其补偿方法和特点后, 进行软件系统内误差补偿。

笔者以一台进给定位精度要求较高的电伺服压机(以下简称压机)为研究实验平台, 以提高压机运行精度与稳定性为目标, 利用激光干涉仪测得误差数据, 进行数据分析并计算各目标位置误差补偿数据, 通过全新设计的补偿算法对压机伺服轴补偿,

使得压机定位精度达到理想精度要求。

1 实验平台简介

1.1 机械结构组成

如图 1 所示, 压机机械部分主要由左侧的检测工位以及右侧的校形粘接工位 2 部分构成。检测工位主要是进行压装前后的准备工作与校形后的检测; 待检测完后再进行涂胶, 锁紧工件准备进行压装。校形粘接工位主要是负责工件压制校形以及粘接压装动作。

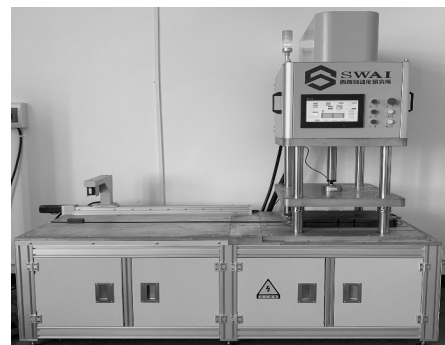


图 1 压机整体结构

校形粘接工位采用电机带动丝杆进行压装, 四

收稿日期: 2022-03-27; 修回日期: 2022-04-26

作者简介: 李天添(1995—), 男, 河南人, 从事电气自动化控制研究。E-mail: 1127951722@qq.com。

周设置有 4 根导向柱，保证压机升降及压制过程中的稳定性。压机伺服系统采用位置工作模式实现压头下压行程的控制，并在压头部位设置有压力传感器，使得整个系统同时具备压力控制和位置控制功能。PLC 和伺服驱动系统共同实现压装过程中压力、位置的全闭环控制^[3]。

检测工位机构采取悬臂式检测，光学检测传感器安装于检测臂上，伺服电动机推动线性模组进行检测动作，检测工件校形情况。传感器采用点检测，主要测量悬臂端与工件中间位置高度差，依次测量工件上悬臂端两点与工件中心一点，以此作为校形情况的依据。

1.2 控制系统组成

压机选用德国倍福 CX9020 嵌入式控制器作为基本控制核心，通过 8 通道数字量输入模块 EL1008、8 通道数字量输出模块 EL2008、4 通道模拟量输入模块 EL3174 以及 EtherCAT 耦合器 EK1110 等完成对外部信号的采集、处理和工艺过程的自动控制等功能。低压配电元器件包括供电线路中的断路器、继电器、直流电源部件以及电机线路的保护性元器件等，实现对线路的通断控制和元器件的保护。外设包含各类传感器、按钮、指示灯等，完成工艺过程中相关信号的检测、信息的指示等功能。选用台达触摸屏实现人机交互功能，为操作者提供操作手段和友好的人机界面。压机控制系统总体架构如图 2 所示。

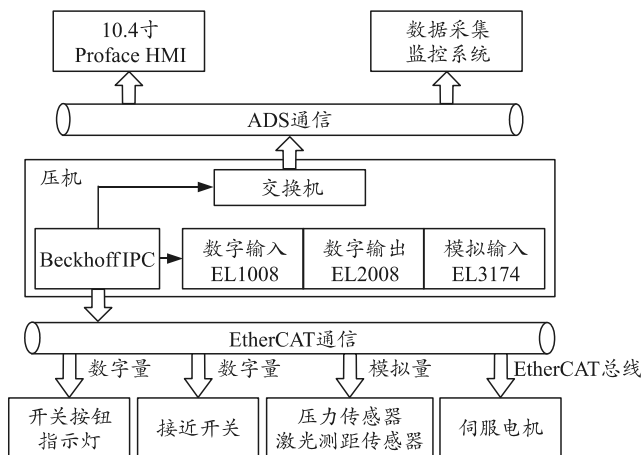


图 2 压机控制系统构成框架

利用倍福嵌入式控制器的 TwinCAT 软件平台，通过 EtherCAT 通信实现对伺服电机运动控制以及数字/模拟量的采集和控制^[4]。触摸屏通过 ADS 通信与倍福 PLC 信息交互，从而实现人机交互，来完成设备参数的读写、现场调试以及设备状态监控等

功能，并通过远程 ADS 与上层数据采集系统通信，实现对设备远程监控以及数字化管理。

2 螺距误差的补偿

由于压机工艺的要求，压机检测工位以及校形压装工位 2 个伺服轴要求精度较高。经双频激光干涉仪测试，2 个伺服轴的精度并不能达到指标要求，迫切需要进行螺距误差补偿。

2.1 螺距误差的补偿方式选择

螺距误差补偿方式有 2 种：1) 借助配置在机床上的实时位置检测系统检测得到的位置数据，控制机床运动轴定位的方法。该方式有实时的位置反馈，可显著提高定位精度，但对机床系统的要求较高。2) 先将螺距误差的补偿值输入数控系统，数控系统会根据补偿值对不同目标位置进行对应的补偿，实现螺距误差的补偿^[5]。

实验平台压机采用倍福嵌入式控制器，由于其性能及成本限制并无实时位置检测功能，故只能选择第 2 种方式。

2.2 螺距误差的测量

要进行螺距误差补偿，首先要进行螺距误差的测量，然后分析相应数据计算补偿值，才能进行补偿。在进行螺距误差测量时，首先在没有进行补偿情况下，将轴线测量行程分成等长的 n 段，每一段的长度为 L ，设备轴按照设置的长度进行运动，用激光干涉仪测量出各个目标位置，然后分析定位误差、重复定位误差等精度指标。若测出精度达到要求，则无需补偿；反之，则必须进行误差补偿^[6-7]。

笔者在上述测试流程基础上，在行程两端设置长度为 L_1 的区域，以便于压机伺服轴测量反向间隙。以上方案确定后在压机控制器中编写一段循环的测试程序，控制伺服轴从起点出发以设定速度平稳运动至 $-L_1$ ，然后反向依次运动至 0 、 L 、 $2L$ 、 \dots 、 nL 、 $nL+L_1$ ，再反向依次运动回起点，然后循环上述步骤。每运动完一段设定距离，停留 3 s 或 5 s 给激光干涉仪测量数据。循环 3~5 次，完成激光干涉仪数据采集工作。伺服轴运动路径如图 3 所示。

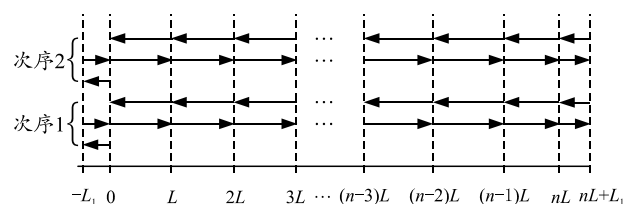


图 3 伺服轴运动路径

笔者采用雷尼绍 XL-80 双频激光干涉仪系统作为本次实验精度检测工具，该激光干涉仪系统主要由激光干涉仪、三角支架、光学镜组、温度传感器、震动传感器以及安装相应软件的笔记本电脑组成，其技术性能 MPE: $\pm(0.03+0.5L) \mu\text{m}$ ，测试环境温度 20.5 °C、相对湿度 50%。

完成激光干涉光学安装架设、光学镜组对光、温度震动传感器安装等一系列准备工作后，根据上述步骤对压机检测工位伺服轴(以下简称水平轴)和校形粘接工位伺服轴(以下简称垂直轴)分别进行精度检测。设定水平轴和垂直轴测量行程分别为 600、300 mm，全测量行程分为 10 段，每段长度分别为 60、30 mm，每个轴测试 3 个循环。经激光干涉仪系统测量后输出的未补偿水平轴正、反偏差数据以及精度数据如表 1—3 所示。

表 1 水平轴正向偏差 μm

目标/mm	1	2	3	平均	标准偏差
0	-1.300	-1.600	-1.500	-1.467	0.153
60	-2.100	-1.400	-1.500	-1.667	0.379
120	-2.000	-2.000	-1.500	-1.833	0.289
180	-3.000	-3.200	-3.100	-3.100	0.100
240	-4.500	-4.700	-3.300	-4.167	0.757
300	-4.300	-4.000	-3.700	-4.000	0.300
360	-6.200	-6.300	-6.000	-6.167	0.153
420	-7.000	-7.200	-7.500	-7.233	0.252
480	-6.600	-6.800	-6.100	-6.500	0.361
540	-7.100	-7.400	-7.300	-7.267	0.153
600	-7.500	-7.100	-7.300	-7.300	0.200

表 2 水平轴反向偏差 μm

目标/mm	1	2	3	平均	标准偏差
0	0	-0.600	-1.000	-0.533	0.503
60	-2.100	-2.200	-1.400	-1.900	0.436
120	-2.300	-2.000	-1.200	-1.833	0.569
180	-4.000	-3.500	-2.900	-3.467	0.551
240	-3.900	-4.100	-3.400	-3.800	0.361
300	-3.600	-3.500	-3.100	-3.400	0.265
360	-6.700	-6.300	-6.700	-6.567	0.231
420	-8.100	-7.900	-7.200	-7.733	0.473
480	-7.000	-6.800	-6.400	-6.733	0.306
540	-6.500	-7.000	-6.300	-6.600	0.361
600	-7.700	-7.500	-7.100	-7.433	0.306

表 3 水平轴精度 μm

参数类型	参数值	参数类型	参数值
均偏差范围 M	6.483	反向差值 B	0.933
系统偏差 E	7.200	定位精度 A \uparrow	9.152
单向重复 R \uparrow	2.274	定位精度 A \downarrow	6.827
单向重复 R \downarrow	3.029	定位精度	9.152

由上述数据绘制未补偿水平轴偏差分析曲线如图 4 所示。

由图 4 可看出：水平轴误差随着运动距离的增加不断增加，最大误差为 9 μm 左右；3 次测试正、反方向偏差折线接近重叠，可见重复定位精度较好

且没有明显反向间隙；由于累计误差存在，偏差值随着运动距离增加不断增大。

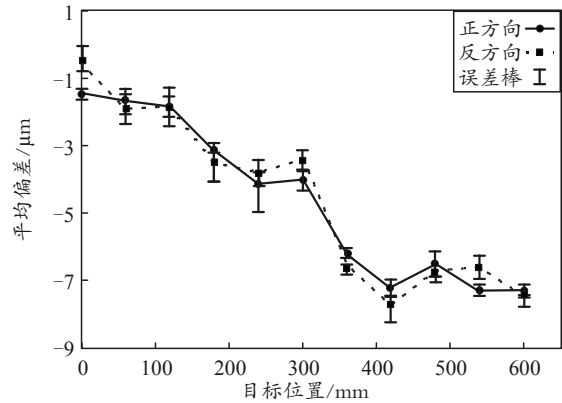


图 4 未补偿水平轴偏差分析曲线

经激光干涉仪系统测量后输出的未补偿垂直轴正、反向偏差数据精度数据如表 4—6 所示。

表 4 垂直轴正方向偏差 μm

目标/mm	1	2	3	平均	标准偏差
0	43.000	41.700	42.200	42.300	0.656
30	-10.500	-8.600	-7.300	-8.800	1.609
60	-69.400	-68.800	-68.800	-69.000	0.346
90	-126.500	-124.800	-124.600	-125.300	1.044
120	-161.100	-159.100	-158.400	-159.533	1.401
150	-158.500	-156.700	-156.000	-157.067	1.290
180	-187.300	-185.100	-183.900	-185.433	1.724
210	-219.500	-218.100	-218.300	-218.633	0.757
240	-234.200	-233.400	-234.900	-234.167	0.751
270	-253.100	-252.900	-253.300	-253.100	0.200
300	-259.700	-258.800	-259.100	-259.200	0.458

表 5 垂直轴反方向偏差 μm

目标/mm	1	2	3	平均	标准偏差
0	-16.900	-15.800	-15.700	-16.133	0.660
30	-415.100	-414.500	-414.450	-414.700	0.346
60	-427.900	-427.200	-427.200	-427.433	0.404
90	-440.000	-437.900	-438.700	-438.867	1.060
120	-470.600	-469.500	-469.800	-469.967	0.569
150	-504.200	-503.300	-503.100	-503.533	0.586
180	-511.500	-510.700	-510.100	-510.767	0.702
210	-545.800	-543.600	-543.400	-544.267	1.332
240	-589.700	-588.600	-588.000	-588.767	0.862
270	-639.200	-641.100	-639.900	-640.067	0.961
300	-751.200	-749.200	-749.900	-750.100	1.015

表 6 垂直轴精度 μm

参数类型	参数值	参数类型	参数值
均偏差范围 M	517.733	反向差值 B	490.900
系统偏差 E	792.400	定位精度 A \uparrow	737.328
单向重复 R \uparrow	5.327	定位精度 A \downarrow	303.728
单向重复 R \downarrow	6.897	定位精度	795.741

由上述数据绘制未补偿垂直轴偏差如图 5 所示。

由图 5 可以看出：垂直轴误差随着运动距离的增加不断增加，最大误差接近 800 μm 左右；正向误差折线与反向误差折线明显分离，存在较大的反

向间隙，但单方向偏差折线几乎重叠，可见其单方向重复定位精度较好；垂直轴同样存在累计误差。

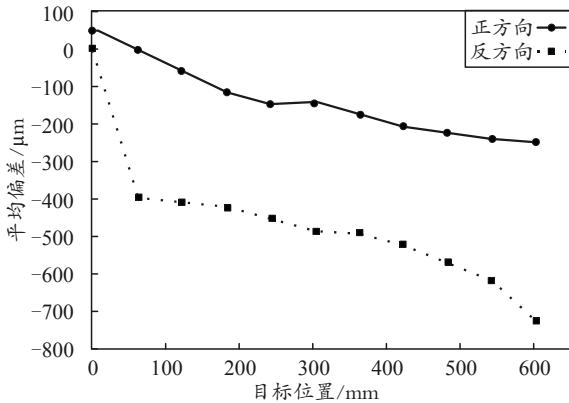


图 5 未补偿垂直轴偏差分析曲线

2.3 螺距误差的补偿

针对传统数控设备螺距误差补偿可以直接在其数控系统内输入相应补偿值，依据数控系统内螺距补偿算法直接对设备进行补偿。笔者的实验平台并非数控设备，只能通过倍福控制器的编程软件 TwinCAT 编程实现。要想实现螺距误差补偿，要使用的运动功能块为 MC_PositionCorrectionLimiter。其输入输出示意图如图 6 所示。

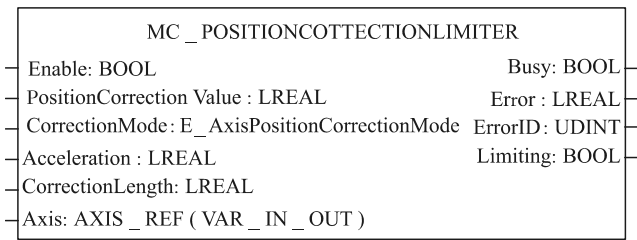


图 6 功能块

在进行补偿时，若采用增量螺距补偿，补偿值只有在目标位置时才会变更，这样的补偿值是突变，使得伺服轴运行不平滑，会影响设备运行的稳定性^[8]。在 2 个目标位置间采用拟合直线，使得补偿值实时变化，在整个行程运动过程中较为平滑的改变。增量补偿示意图如图 7 所示。

根据水平轴误差计算出均值补偿表，由于其基

本无反向间隙，故选择单向补偿，即正向补偿和反向补偿采用相同补偿数据。水平轴在第 n 段动态补偿值如下：

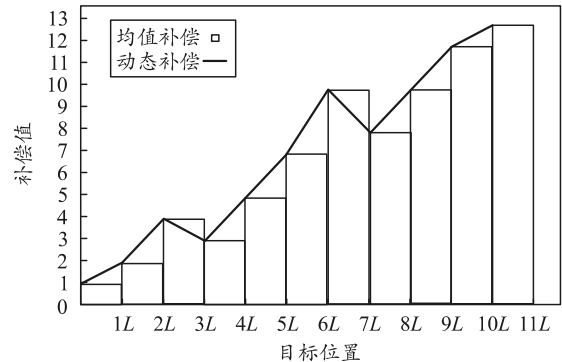


图 7 增量补偿

$$A = a_{n-1} + (X - (n-1)L)(a_n - a_{n-1})/L \quad (1)$$

式中： A 为伺服轴运行时的动态补偿值； a_n 为第 n 个目标位置的补偿值； X 为伺服轴当前坐标； L 为分段长度。

而垂直轴存在较大的反向间隙，只能对垂直轴分别进行正方向补偿和反方向补偿，且在其反向要对反向间隙进行补偿。垂直轴动态补偿值如下：

$$A = \begin{cases} (X + L_1)a_0/L_1 & X \in (L_1, 0) \\ a_{n-1} + (X - (n-1)L)(a_n - a_{n-1})/L & X \in (0, L_n) \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \begin{cases} \frac{X - (n-1)L}{L}(b_n - b_{n-1}) + b_{n-1} & X \in (0, nL) \\ -b_n \frac{X - nL}{L_1} + b_n & X \in (nL, nL + L_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中： A 为伺服轴运行时的动态补偿值； a_n 为第 n 个目标位置的正向补偿值； b_n 为第 n 个目标位置的正向补偿值； X 为伺服轴当前坐标； L 为分段长度。

3 螺距误差补偿结果

据上述补偿算法，在 PLC 内进行编程，并根据初始偏差测量得到的补偿值对伺服轴补偿。补偿后重新进行激光干涉仪测量误差，测得水平轴正、反偏差数据以及精度数据如表 7—9 所示。

表 7 补偿后水平轴正向偏差

目标/mm	1	2	3	4	5	平均	标准偏差
0	-0.056	0.644	0.867	0.090	-0.777	0.154	0.645
60	1.095	1.289	0.137	-0.375	0.614	0.552	0.684
120	1.193	0.897	0.565	-0.983	-0.429	0.249	0.920
180	1.462	1.681	0.688	0.816	1.547	1.239	0.453
240	0.358	0.475	-0.637	-0.555	-0.609	-0.194	0.559
300	1.512	2.245	1.503	1.962	2.838	2.012	0.559
360	1.015	1.377	1.218	0.448	0.981	1.008	0.352
420	2.347	2.119	1.000	1.160	1.615	1.648	0.585
480	2.213	2.189	2.022	2.308	2.456	2.238	0.160
540	0.088	0.626	0.142	0.378	0.512	0.349	0.232
600	1.783	2.229	1.543	1.899	2.107	1.912	0.270

表 8 补偿后水平轴反向偏差

目标/mm	1	2	3	4	5	平均	标准偏差
0	0.987	1.250	0.646	-0.096	-1.913	0.175	1.272
60	2.248	1.519	0.591	1.484	1.708	1.510	0.598
120	1.002	1.117	-0.614	-0.133	0.259	0.326	0.738
180	1.571	1.607	1.623	1.580	-0.896	1.097	1.114
240	0.382	0.687	-0.471	-0.508	-0.248	-0.032	0.537
300	2.827	2.703	2.486	2.968	3.391	2.875	0.338
360	2.395	2.669	2.400	3.229	2.340	2.607	0.371
420	2.474	2.711	2.278	2.302	2.736	2.500	0.218
480	2.517	3.215	3.047	3.117	3.116	3.002	0.278
540	0.535	1.116	0.181	0.583	1.197	0.722	0.427
600	2.230	2.731	2.209	2.458	2.959	2.517	0.325

表 9 补偿后水平轴精度

参数类型	参数值	参数类型	参数值
均偏差范围 M	2.733	反向差值 B	1.599
系统偏差 E	3.196	定位精度 A↑	4.721
单向重复 R↑	3.682	定位精度 A↓	5.927
单向重复 R↓	5.087	定位精度	5.927

上述数据绘制补偿后水平轴偏差分析曲线如图 8 所示。

由下图可看出：经过补偿后的水平轴，均偏差范围、系统偏差较未补偿时均有小幅度减小，定位精度由 9 μm 提升至 5.9 μm；误差曲线有所改善，随着运动距离增加偏差值不再逐渐增大，而是趋于

平稳，累计误差对水平轴误差影响得到改善。

补偿后的垂直轴，经激光干涉仪系统检测后输出偏差数据如表 10—12 所示。

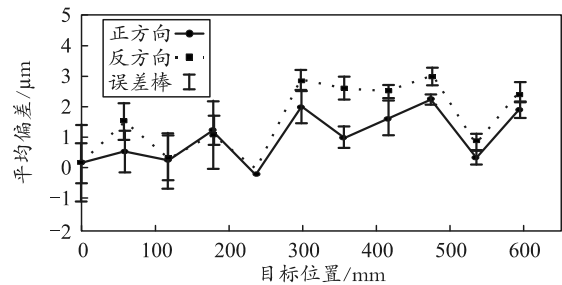


图 8 补偿后水平轴偏差分析曲线

表 10 补偿后垂直轴正向偏差

目标/mm	1	2	3	4	5	平均	标准偏差
0	2.740	2.310	2.280	2.650	2.540	2.504	0.204
30	16.460	14.050	14.390	14.460	14.840	14.840	0.948
60	17.240	17.420	17.000	16.720	16.820	17.040	0.290
90	19.930	17.780	17.600	16.650	16.610	17.714	1.349
120	21.060	19.780	19.810	19.030	19.290	19.794	0.781
150	22.400	21.880	21.760	20.990	21.730	21.752	0.504
180	22.680	21.100	21.410	19.920	19.070	20.836	1.393
210	22.040	21.830	20.960	20.820	21.230	21.376	0.536
240	24.390	24.060	22.840	23.090	22.600	23.396	0.785
270	19.850	19.650	19.730	19.430	20.320	19.796	0.331
300	19.630	18.620	19.670	18.970	19.130	19.204	0.447

表 11 补偿后垂直轴反向偏差

目标/mm	次序	2	3	4	5	平均	标准偏差
0	-2.500	-2.670	-3.160	-3.170	-2.840	-2.868	0.297
30	5.730	4.810	4.150	3.770	3.750	4.442	0.838
60	-11.940	-12.880	-12.540	-12.640	-12.280	-12.456	0.360
90	-8.670	-6.160	-9.790	-9.760	-8.880	-8.652	1.482
120	-8.880	-7.530	-10.150	-11.400	-10.420	-9.676	1.499
150	-9.770	-9.320	-10.240	-10.740	-10.610	-10.136	0.592
180	-8.820	-7.650	-9.550	-10.370	-10.260	-9.330	1.127
210	-10.620	-10.520	-9.110	-9.830	-9.450	-9.906	0.658
240	15.920	17.040	18.250	18.170	18.810	17.638	1.155
270	3.840	4.920	5.530	5.570	5.630	5.098	0.759
300	-11.120	-10.910	-10.180	-10.280	-11.640	-10.826	0.607

表 12 补偿后垂直轴精度

参数类型	参数值	参数类型	参数值
均偏差范围 M	20.699	反向差值 B	31.888
系统偏差 E	35.852	定位精度 A↑	22.870
单向重复 R↑	5.570	定位精度 A↓	33.125
单向重复 R↓	5.996	定位精度	38.142

上述数据绘制补偿后垂直轴偏差分析曲线如图 9 所示。

由下图可看出：垂直轴经过补偿后除重复定位精度变化不大，其各项偏差均有大幅改善，反向偏差由 490.9 μm 减小至 31.888 μm，定位精度由 785.741 μm 提高至 38.142 μm。可见经过笔者方法进行补偿后能够显著减小轴线反向偏差，提高定位精度。