



数控机床垂直误差 补偿技术



1 数控机床空间误差及测量

2 数控机床空间误差补偿

3 垂直度误差及影响

4 垂直度误差补偿技术

5 市场推广应用典型案例

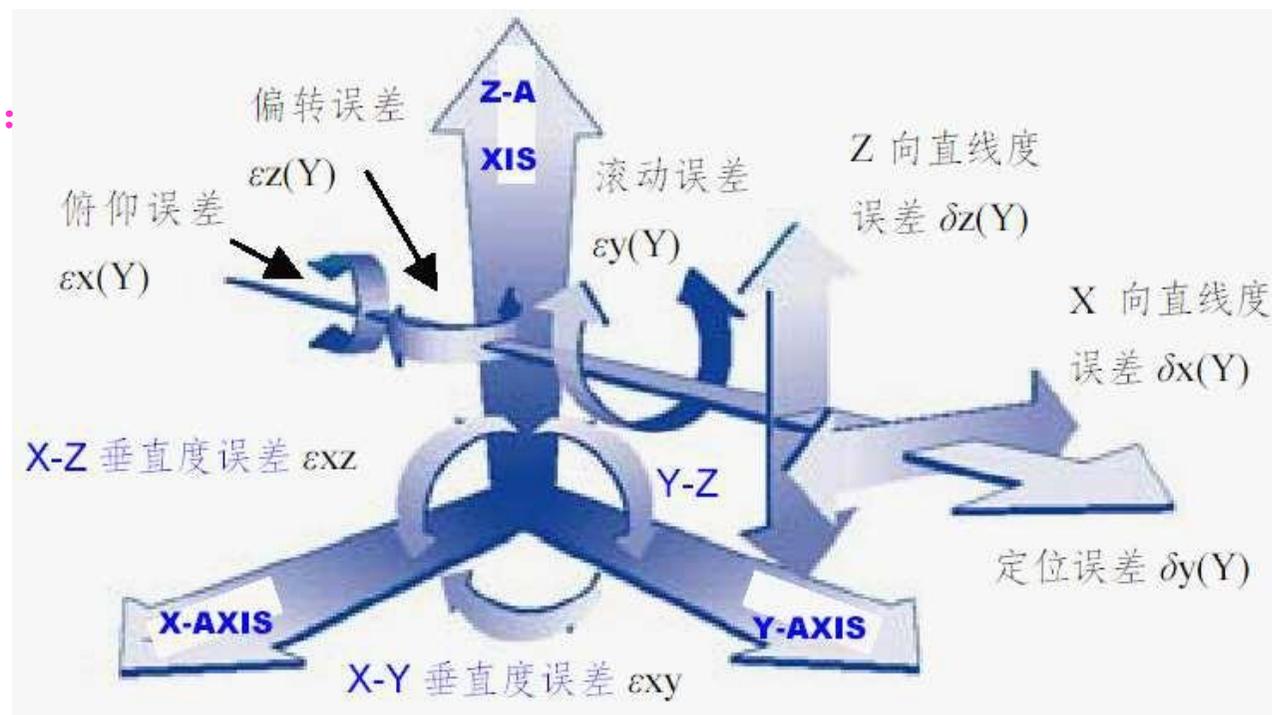


数控机床空间误差及测量 | 空间误差定义

数控机床（三轴）的空间误差是机床在其加工空间体积范围内的空间（X、Y、Z）坐标的定位精度。数控机床（三轴）的空间误差是机床二十一项误差的综合反映。

机床空间误差元素21项：

- (1) 线性位移误差3项
- (2) 直线度误差6项
- (3) 垂直度误差3项
- (4) 滚转误差3项
- (5) 偏摆误差3项
- (6) 俯仰误差3项



数控机床空间误差及测量 | 空间误差测量

测量方法1：单项误差逐次测量（如雷尼绍的空间误差测量方法）

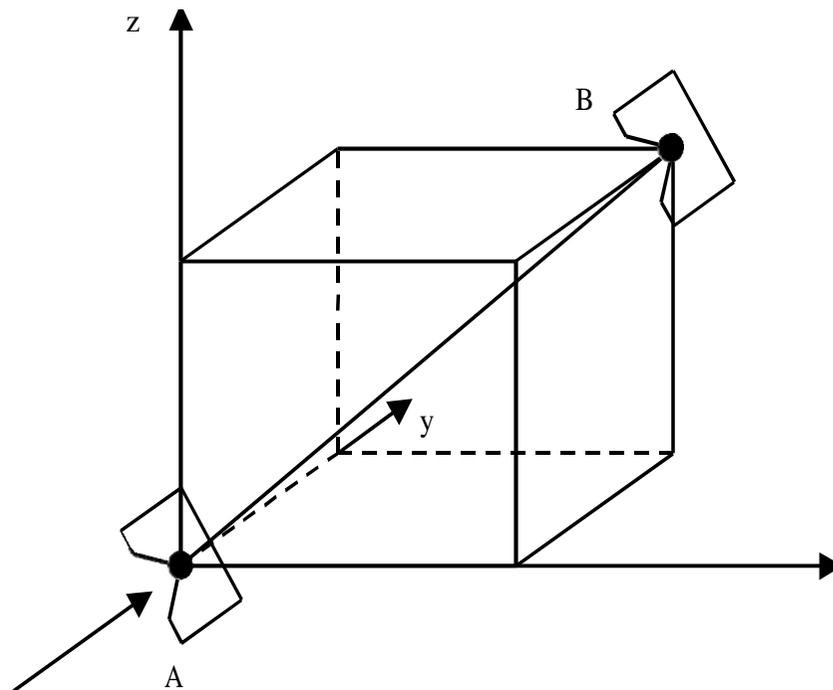
- XL-80激光干涉仪：分别测量线性位移、直线度、俯仰角、扭摆角等
- QC20-W球杆仪：测量各轴间的垂直度
- RX10转台：测量并提供回转工作台的转角精度的测量与补偿
- 电子水平仪：测量机床滚摆等参数。



数控机床空间误差及测量 | 空间误差测量

测量方法2：体对角线测量（如美国光动的分布步进对角线测量）

美国机械工程师协会标准，第 5.9.2 节（利用对角线位移测量体积性能）
表述了“通过测量机床沿体对角线的位移精度可以迅速地评估体积精度”。



数控机床空间误差补偿 | 空间误差补偿的来源

空间误差补偿技术一直应用于三坐标测量机上，以保证三坐标测量机作为计量器具而对其较高的精度要求；而其机械制造与电器调试的精度难以满足相关要求。一般三坐标测量机都经过补偿，使其能满足完成高精度测量的需要。

随着数控机床技术的不断发展，对机床精度的要求也越来越高。现有机床精度单从机械设计和硬件制造上来考虑，成为制约行业发展的一个普遍问题。作为三坐标测量机行业中引领测量技术先锋的英国（Renishaw）公司，在将其三坐标测量机UCC控制器中“空间误差补偿技术”成功应用十多年后，针对Fanuc、Siemens等数控系统，新近推出“空间误差补偿技术”。

以雷尼绍成熟的激光干涉仪和球杆仪作为测试基础，向市场推出RVC-Fanuc和RVC-Siemens两套空间误差修正软件，以配合具备三维空间补偿选项的采用Fanuc或Siemens数控系统的加工中心、数控镗铣和龙门机床来提高其空间精度。

数控机床空间误差补偿 | 雷尼绍空间误差补偿软件

- 1 雷尼绍的空间误差补偿软件
- 目前雷尼绍的空间误差补偿软件只适用于高端数控系统Siemens 840D s1和Fanuc 31i；其中：
 - (1) 针对Fanuc 31i系统推出RVC-Fanuc空间误差补偿软件
 - (2) 针对Siemens 840D系统推出RVC-Siemens空间误差补偿软件

数控机床空间误差补偿 | 雷尼绍空间误差补偿软件

- 2 高端数控系统对应的支持这种空间误差补偿的功能模块
- 目前雷尼绍的空间误差补偿软件只适用于高端数控系统Siemens 840D s1和Fanuc 31i；其中：
 - (1) Fanuc 31i系统：三维误差补偿功能模块
 - (2) Siemens 840D s1系统：VCS功能模块

数控机床空间误差补偿 | 空间误差补偿的难点

- 空间误差补偿实施前，必须用球杆仪对机床综合精度状况进行评估，若机床存在较大的反向跃冲、伺服不匹等电器误差，则即使进行空间误差补偿，也对该机床加工精度改善不大。在进行空间误差补偿前将机床电器误差调整为次要精度问题尤为必要。重复精度不好的机床即使进行空间误差补偿，补偿效果也不明显。
- 对于精度要求 $5\mu\text{m}$ 级的机床，必须对其使用环境应该按三坐标测量机的使用环境来要求，否则机床自身因环境变化而带来的精度变化将会在某种程度上削弱空间误差补偿的效果，而实际机床使用现场的环境要按照三坐标测量机的使用环境来控制难度很大。

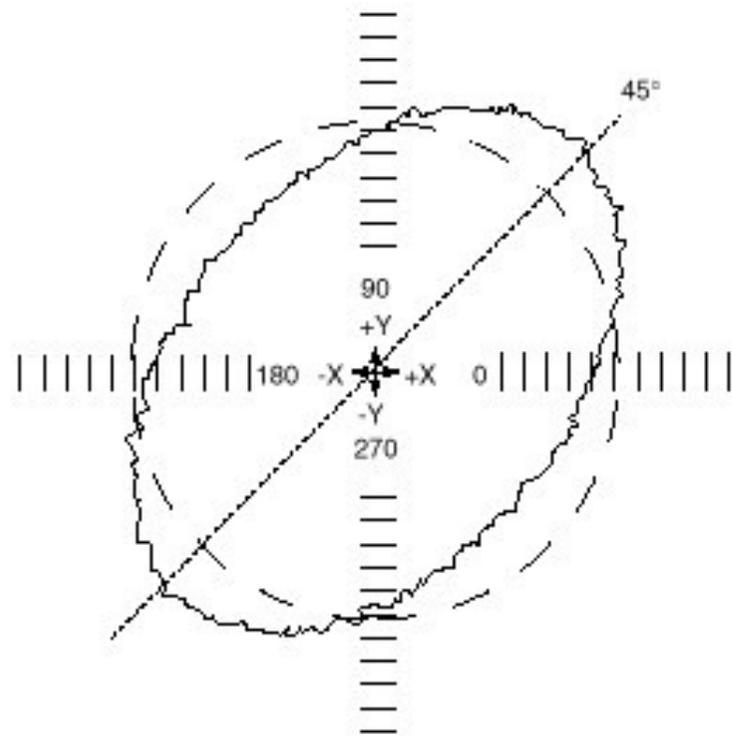
垂直度误差及影响 | 垂直度误差及原因

高速立式加工中心和龙门铣床在实际应用中，两轴的联动较多，尤其是X轴和Y轴的联动加工（如走斜线、圆弧和圆周等），受垂直度误差影响较大，严重时直接影响到机床的正常使用。

球杆仪测试：图形呈椭圆或花生形，沿 45° 或 135° 对角方向拉伸变形。在顺时针和逆时针方向测试时轴的拉伸方向相同。

垂直度误差原因：

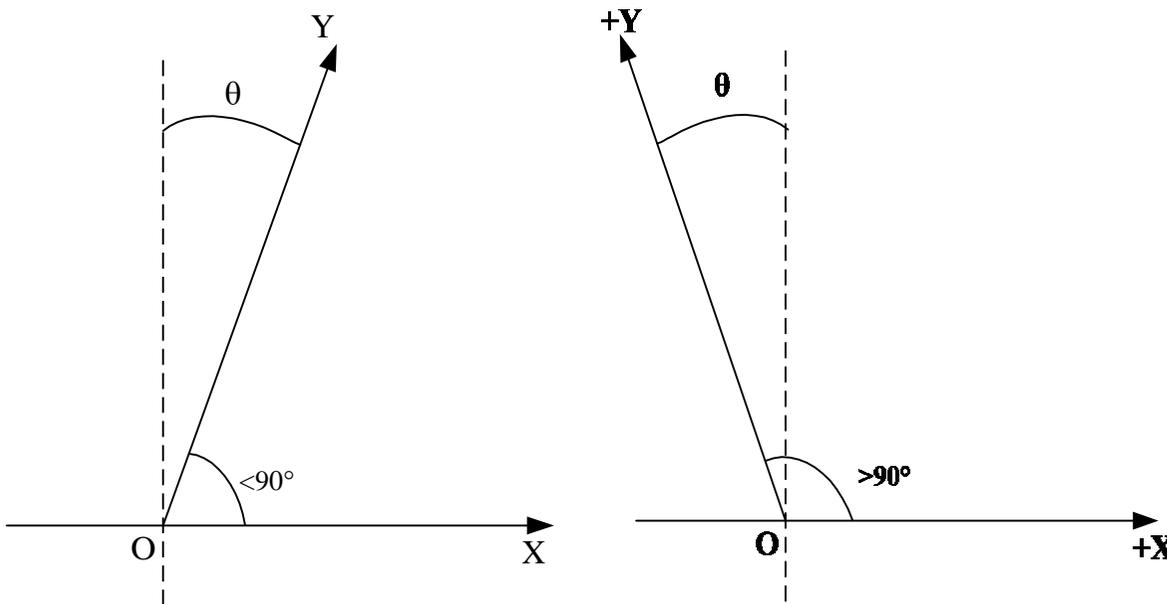
- （1）装配不良，轴弯曲或者整体未调直
- （2）轴刚性不够，导致某些部位不直
- （3）导轨过分磨损，导致机床运动时在轴中有一定间隙
- （4）在使用过程中由于长时间的震动与受力，机床部件发生偏移



垂直度误差及影响 | 垂直度误差的影响

垂直度误差的影响包括 (1) 对孔位精度的影响 ; (2) 直线轮廓误差的影响 ; (3) 圆弧轮廓误差的影响。

球杆仪测量两轴联动的圆度误差时, 其中:
垂直度误差为正值表示两轴正向夹角超过 90° 垂直度误差为负值表示两轴正向夹角小于 90°

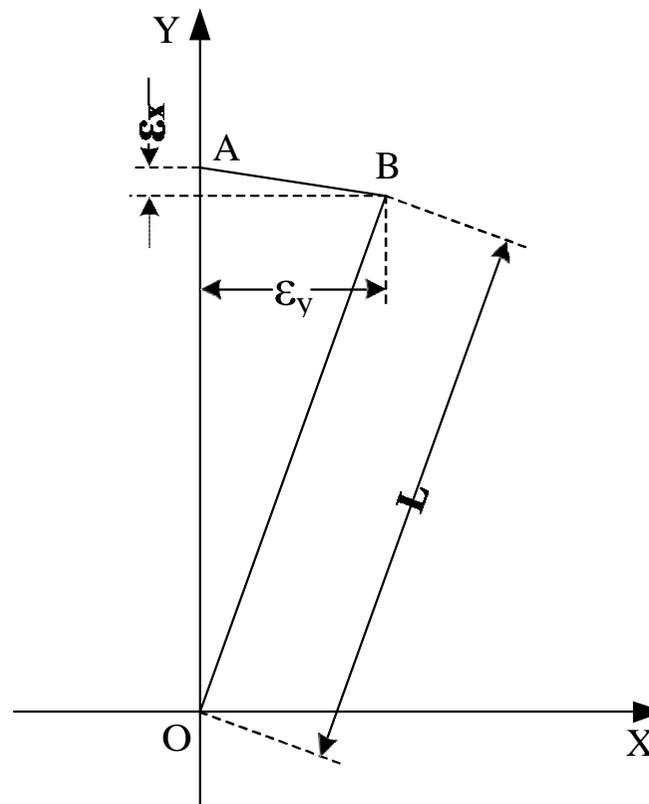


垂直度误差及影响 | 垂直度误差的影响

垂直度误差的影响包括 (1) 对孔位精度的影响 ; (2) 直线轮廓误差的影响 ; (3) 圆弧轮廓误差的影响。

(1) 对孔位精度的影响:

设定从O点的孔沿Y方向走L行程去加工A孔, 由于机床X轴和Y轴存在 θ 的垂直度误差, 实际刀具走位到了B点。从而造成孔位在X方向和Y方向有 ϵ_x 和 ϵ_y 的偏差。

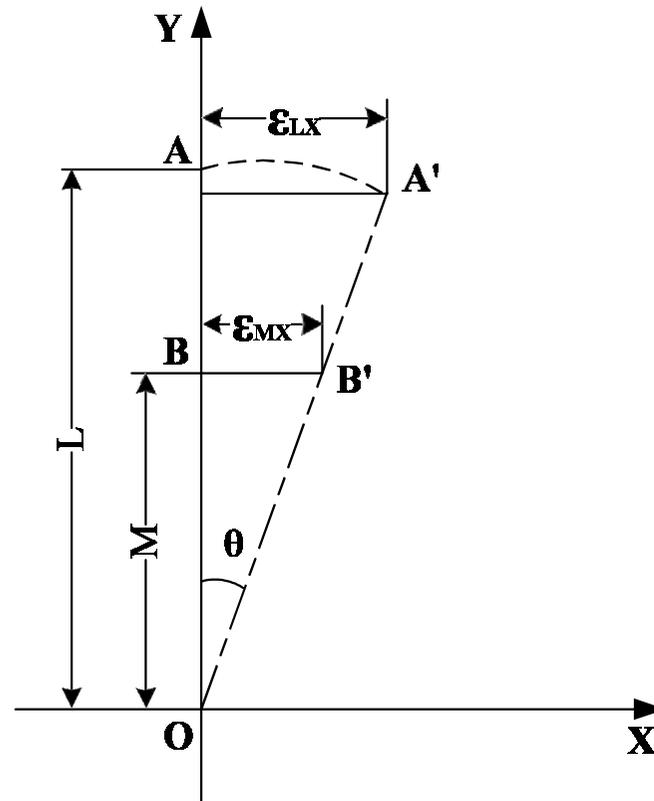


垂直度误差及影响 | 垂直度误差的影响

垂直度误差的影响包括 (1) 对孔位精度的影响 ; (2) 对直线轮廓误差的影响 ; (3) 对圆弧轮廓误差的影响。

(2) 对直线轮廓的影响:

加工与X轴垂直的直线OA, 由于X轴和Y轴的垂直度误差 θ , 使实际加工的直线为OA'。造成 A'点在X方向的误差 ϵ_{LX} ; 而直线上B点由于垂直度误差实际走到了B', 在X方向的误差 ϵ_{MX} ; 直线OA的轮廓在各个位置的偏差度不同。

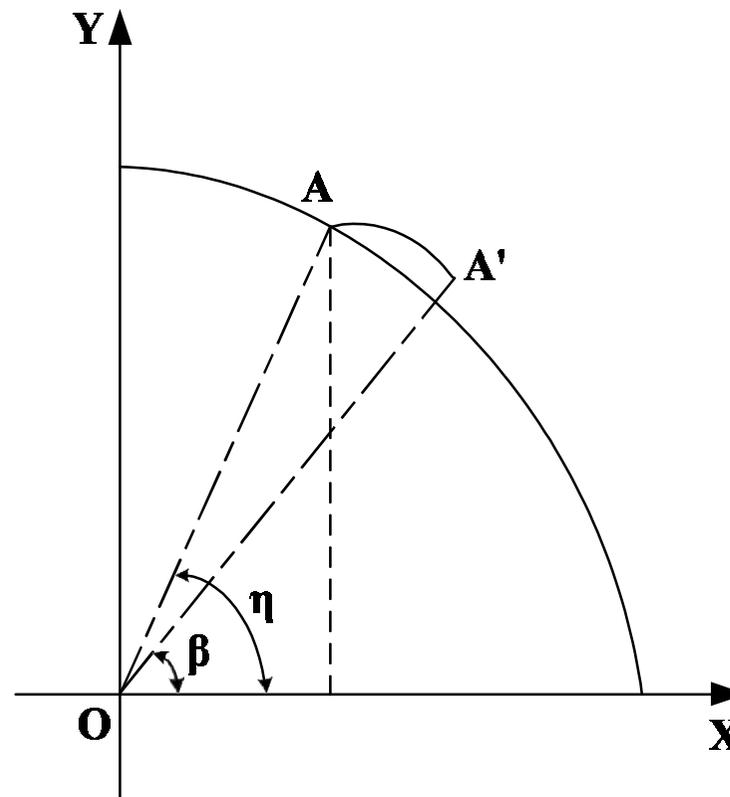


垂直度误差及影响 | 垂直度误差的影响

垂直度误差的影响包括 (1) 对孔位精度的影响 ; (2) 对直线轮廓误差的影响 ; (3) 对圆弧轮廓误差的影响。

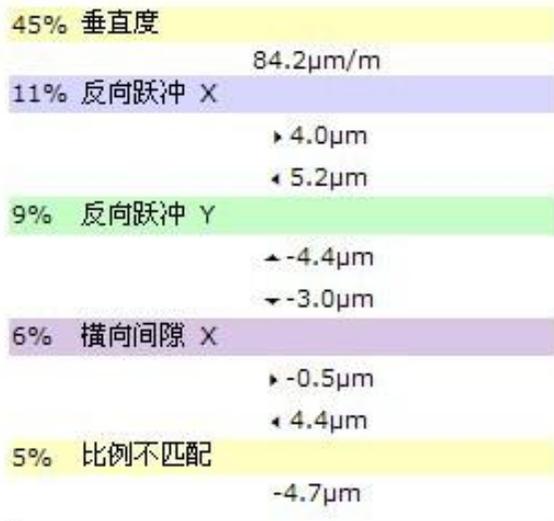
(3) 对圆弧轮廓的影响:

加工一段圆弧段如右图所示, 由于X轴和Y轴的垂直度误差 θ , 使基准圆弧上的A点偏移到了A'点。A点对应的圆弧角度为 η ; 而A'点的圆弧角度为 β ; 由于垂直度误差会造成了实际圆弧在各个位置相比基准圆弧的轮廓偏差。



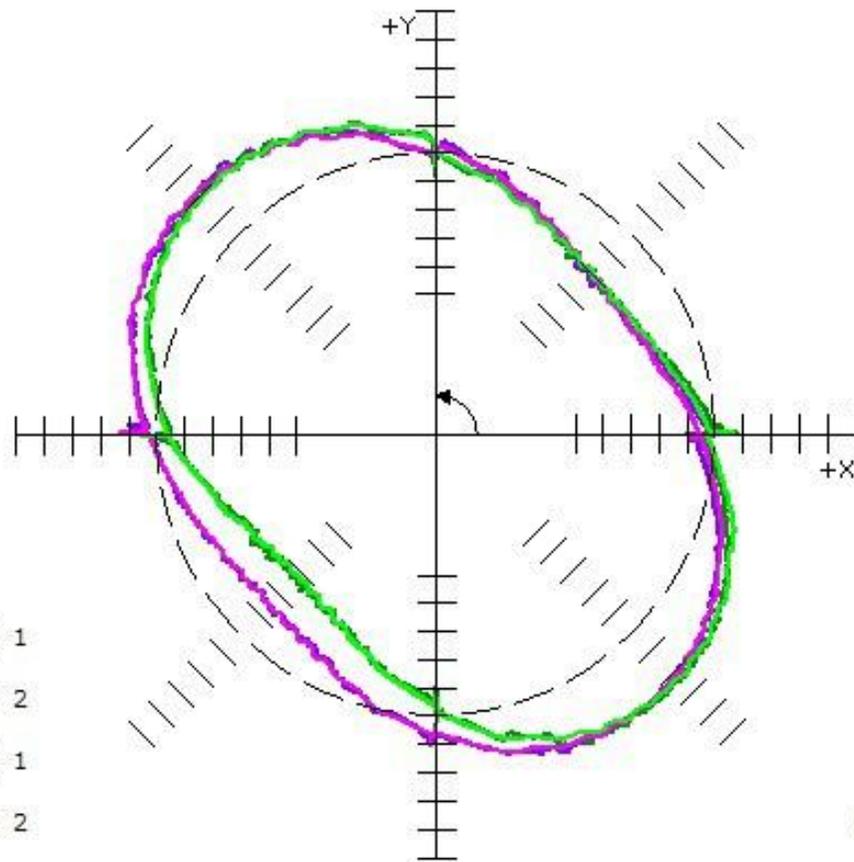
垂直度误差及影响 | 垂直度误差的影响

垂直度误差的影响包括 (1) 对孔位精度的影响 ; (2) 对直线轮廓误差的影响 ; (3) 对圆弧轮廓误差的影响。



圆度 26.9 μm
垂直度误差的影响占据圆度误差的45%，是影响圆度误差的主要因素

- 运行 1
- 运行 2
- 拟合 1
- 拟合 2



垂直度误差及影响 | 垂直度误差修正

雷尼绍关于垂直度误差所建议的**常规应对措施**（机械调整的方式）：

- （1）在机器的各部位重复测试，判断垂直度误差是否仅在局部发生还是影响整台机器。如果误差仅为局部，则在加工零件表面时试着使用那些不受垂直度误差影响的部位来加工。
- （2）如整台机器均受垂直度误差的影响，那么可能的话应重新调整机器轴。
- （3）如果导轨出现严重磨损，可能需要更换磨损部件。

但机械调整方法操作复杂，效率低下。

实际加工中关于垂直度误差的调整方法：

通过三坐标测量仪检测孔位误差、直线轮廓误差以及圆弧轮廓误差，通过调整加工程序的轨迹，来修正偏差。但这种方法需要等待测量结果，效率低下，并且操作复杂。

垂直度误差补偿技术 | 垂直度误差测量

1. 测量方法

采用雷尼绍球杆仪按照标准方法进行垂直度误差的测量。

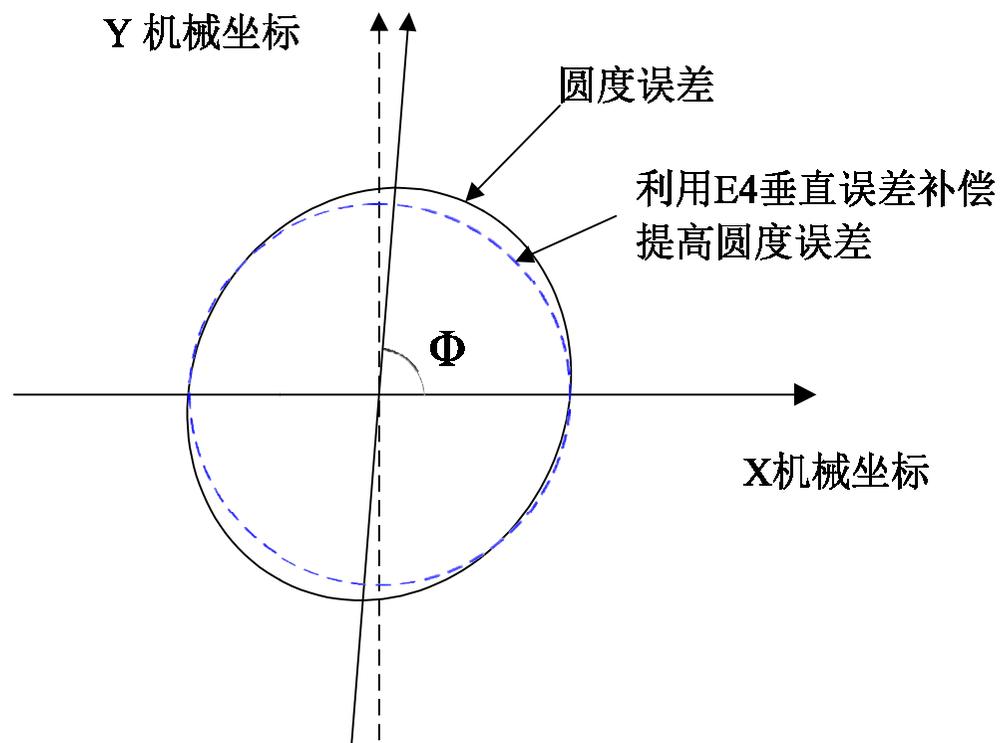
- 1 运行球杆仪测试
- 2 查看测试结果



垂直度误差补偿技术 | 垂直度误差补偿软件

1. 睿涛垂直度误差补偿软件工作原理

利用E4垂直度误差补偿修正两轴联动时由于垂直度引起的轨迹误差，如直线、圆弧或者圆，从而提高雷尼绍球杆仪测量的圆度误差。



垂直度误差补偿技术 | 垂直度误差补偿硬件

2. 睿涛垂直度误差补偿硬件

调试时连接显示器，生产使用中可不连接这根线

网线，连接到FANUC系统的以太网接口



温度采集模块

误差补偿模块

调试时连接键盘和鼠标，生产使用中不连接这根线

采用模块化的垂直度误差实时补偿系统，具有智能化、安装简便、易操作和高可靠性的特点。

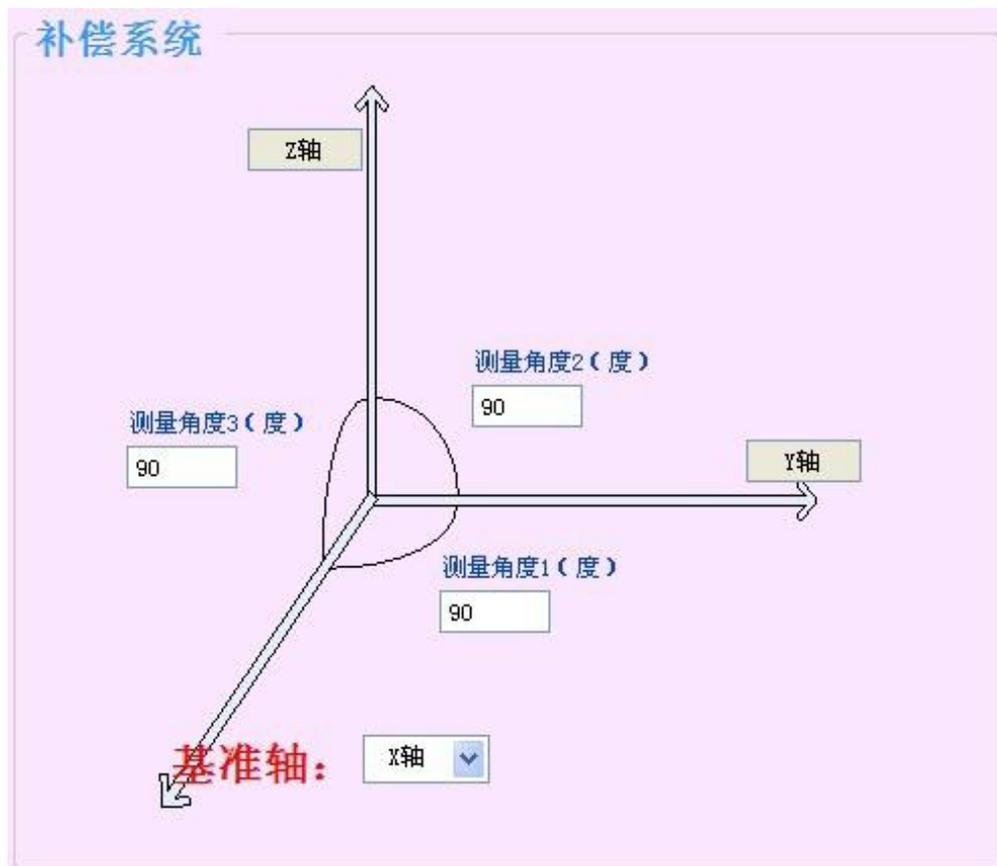
□ 在一个插补周期内实现实时补偿

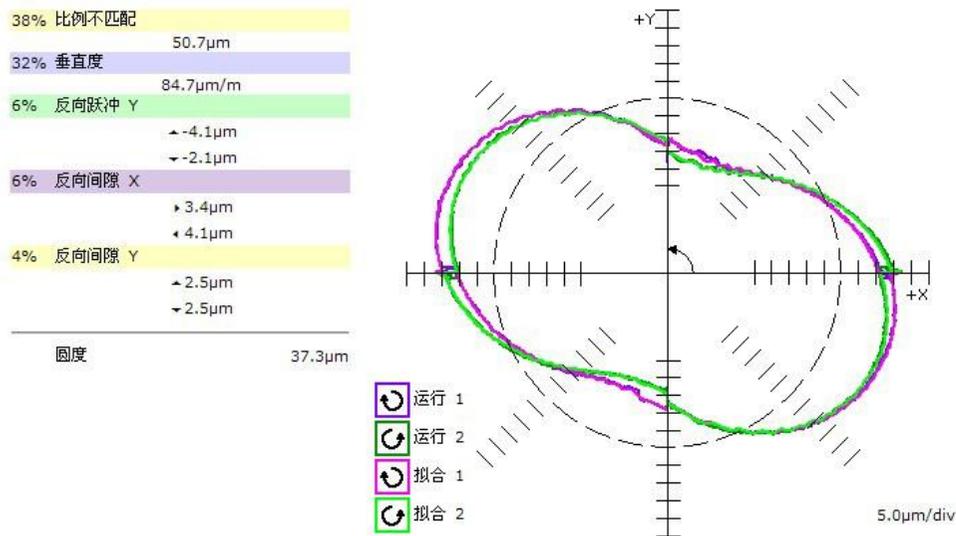
□ 最小分辨率 $1\mu\text{m}$

垂直度误差补偿技术 | 垂直度误差补偿软件

3. 睿涛垂直度误差补偿软件人机界面

将雷尼绍球杆仪测量的垂直度误差结果转换成实际夹角值，输入补偿软件界面（如XY的垂直度误差输入图中绿圈位置），补偿软件即驱动运运在实际运行时自动完成在线运行时的位置修正。

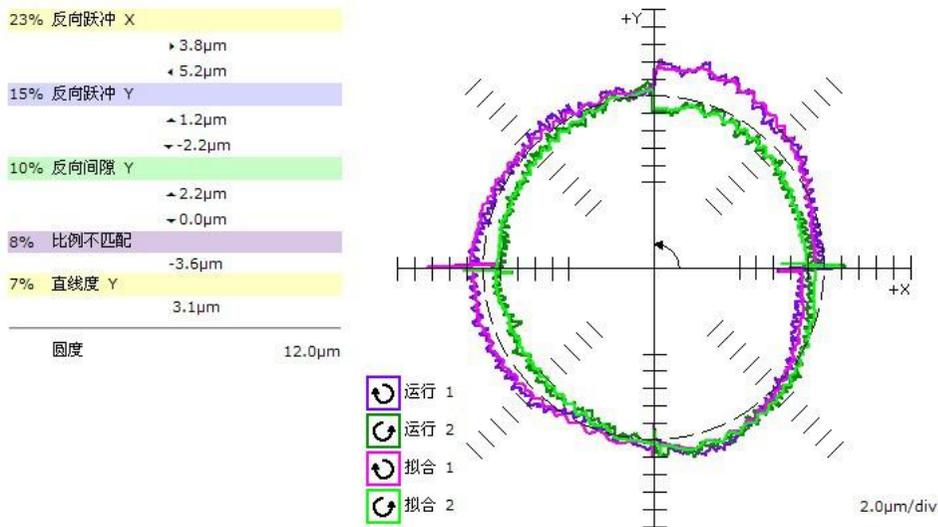




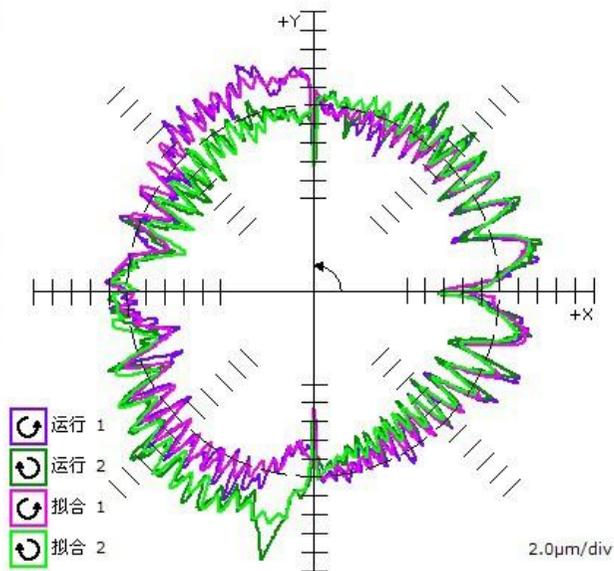
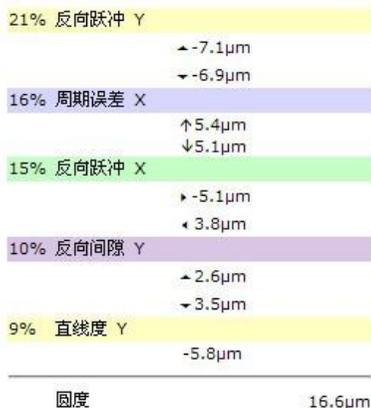
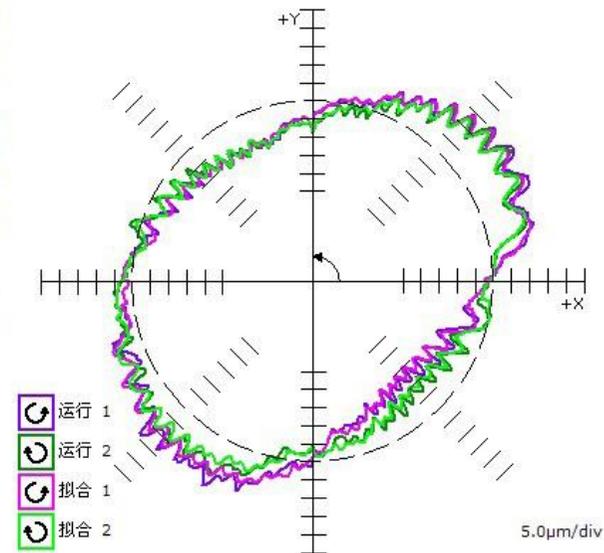
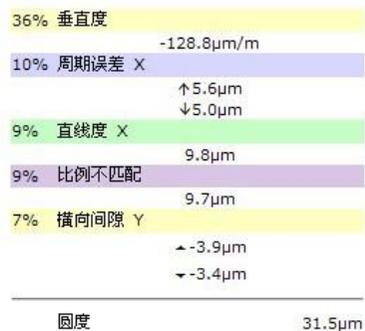
案例1：肇庆市高讯数控设备有限公司
机床型号：立式加工中心
数控系统：三菱 M70系统
应用效果：机床垂直度误差**降低了98.9%**；
 圆度误差**降低了67.8%**。

(1) 补偿后，机床的垂直度误差从84.7 μm 减小到0.9 μm ，垂直度误差对圆度的影响从32%减低至1%；结合E4的定位误差补偿功能，可解决机床的比例不匹配问题，最终使得圆度从37.3 μm 下降到12 μm

(2) 补偿后有效改善机床联动走斜线时的孔位精度问题，采用软件补偿方案对比原方案中需要调整机床的丝杠和导轨，性价比很高



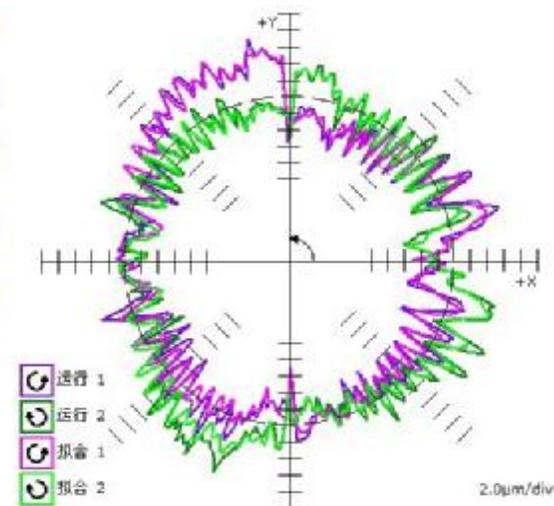
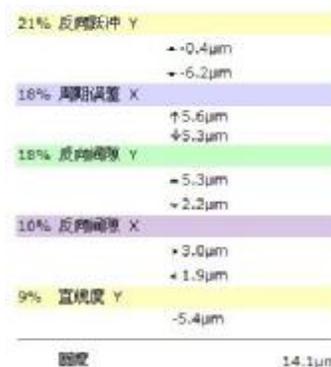
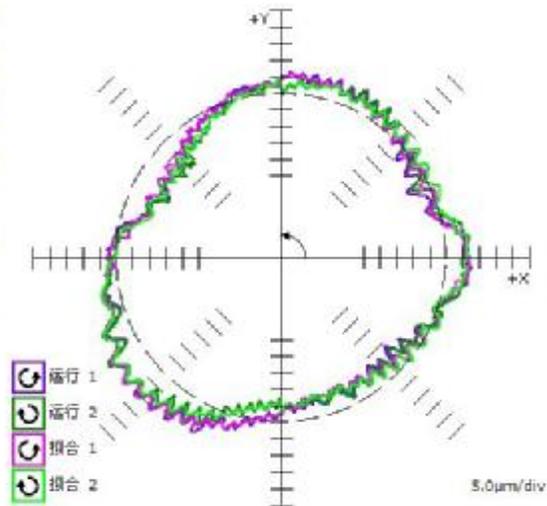
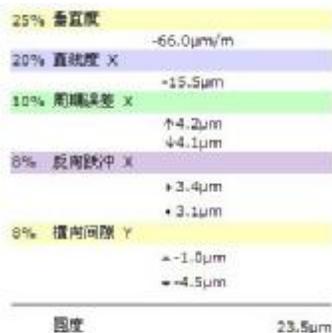
应用案例2：沈阳中捷立加
 机床型号：VMC850P立式加工中心
 数控系统：FANUC 0i MD系统
 应用效果：补偿后，机床垂直度误差降低了**87.1%**；圆度误差降低了**47.3%**。



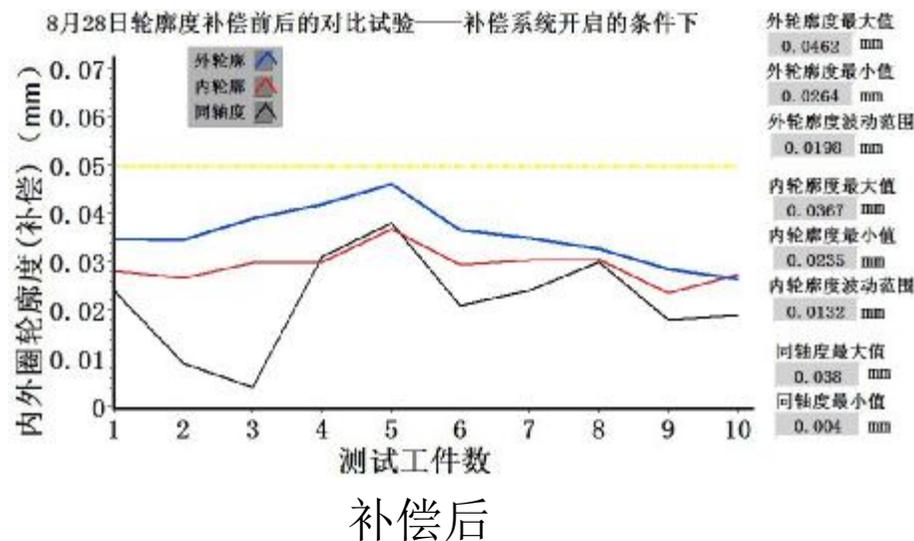
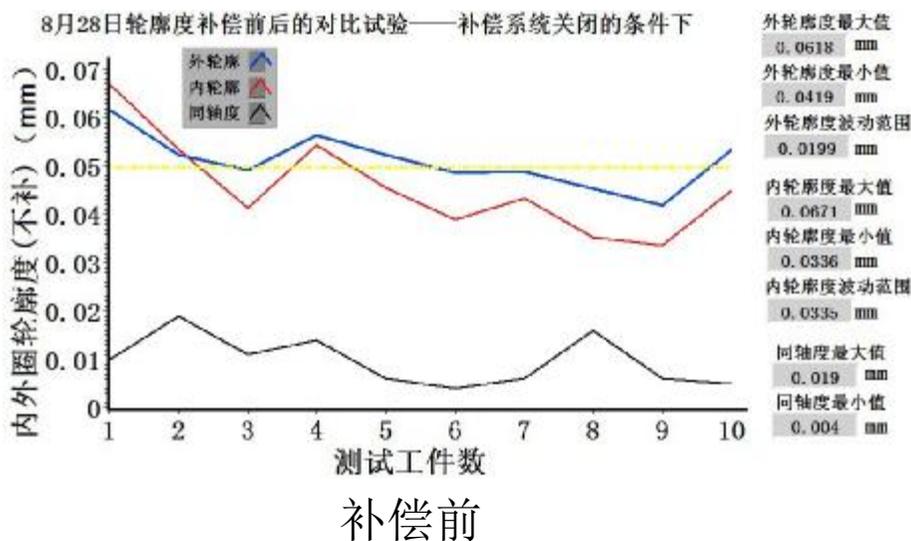
(1) 补偿后，机床的垂直度误差从-128.8 μm 减小到-16.6 μm ，垂直度误差对圆度的影响从36%减低到7%；并使得圆度从31.5 μm 下降到16.6 μm

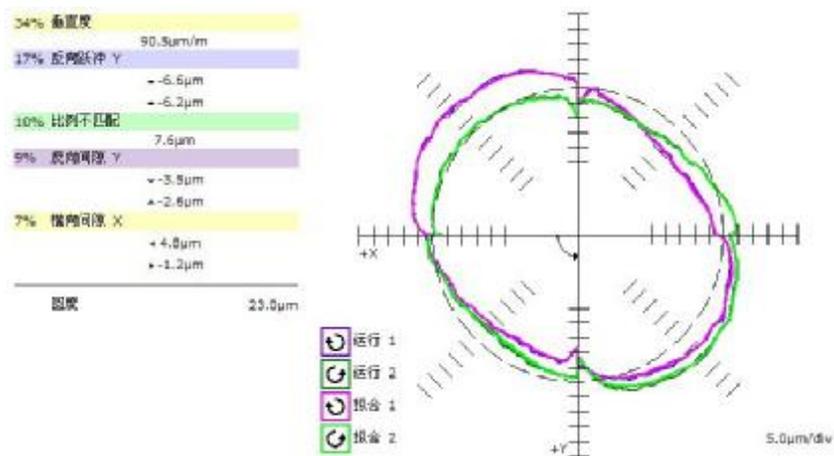
(2) 补偿后有效改善机床联动走圆弧或者圆时的轮廓精度，对于缩短机床厂家调机时间或者现场调试周期有实用意义

应用案例1：南京奥特佳新能源科技有限公司
应用对象：涡旋压缩机生产线
机床型号：哈挺立式加工中心
应用效果：补偿后，机床垂直度误差降低了**95.2%**；圆度误差降低了**40%**。



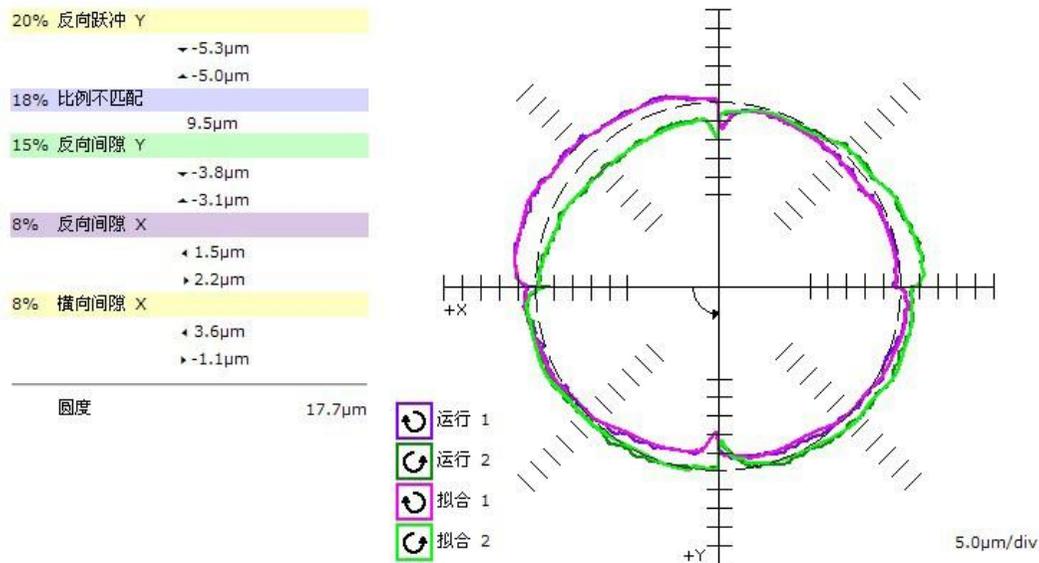
应用案例1：南京奥特佳新能源科技有限公司
应用对象：涡旋压缩机生产线
机床型号：哈挺立式加工中心
应用效果：垂直度误差补偿后，产品合格率提升到100%



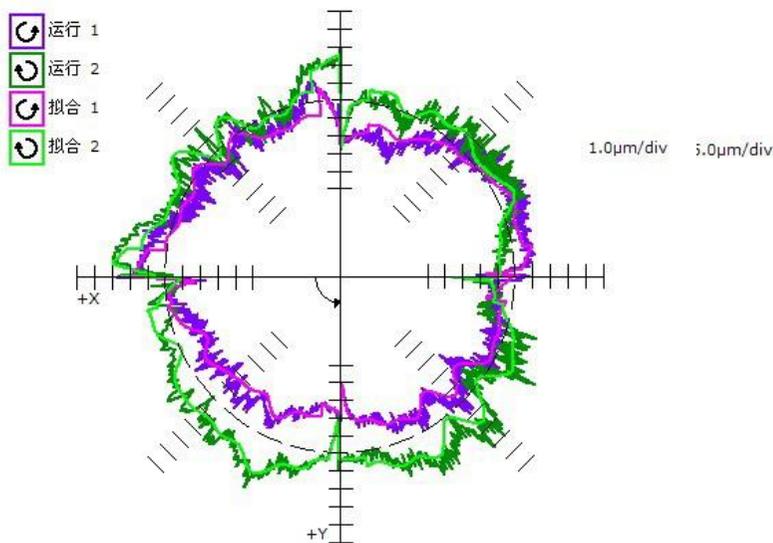


应用案例2：比亚迪十七事业部齿轮工厂
 应用对象：齿轮盘加工
 机床型号：台湾建荣立式加工中心
 应用效果：补偿后，机床垂直度误差降低了**96.6%**；圆度误差降低了**23%**。

- (1) 补偿后，机床的垂直度误差从90.5μm减小到3.1μm，垂直度误差对圆度的影响从34%减低到2%
- (2) 补偿后有效改善机床在加工齿轮座时的孔位精度问题，精度提升达到了83%，有效解决了工厂的加工问题。



应用案例1：深圳富士康科技
 应用对象：金属手机外壳加工
 机床型号：ROBODRILL钻铣中心
 应用效果：机床的圆度误差从补偿前的 $20.5\mu\text{m}$ 提高到补偿后的 $7.1\mu\text{m}$

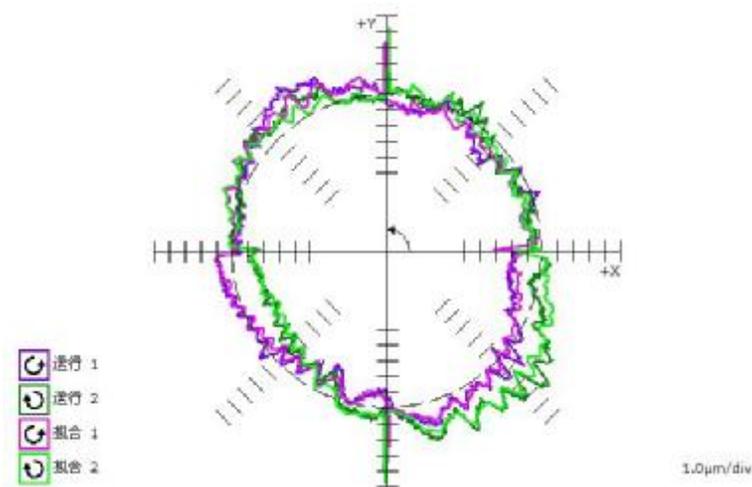
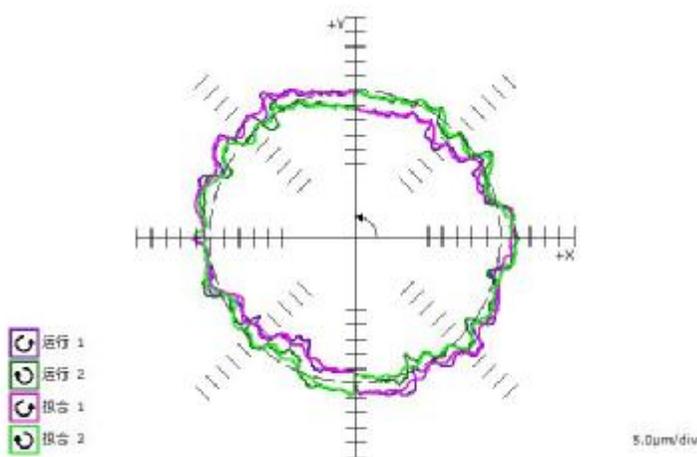


机床误差因素	补偿前	补偿后	提高百分比
比例不匹配	$-12.5\mu\text{m}$	0	100%
周期误差Y	$5\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	80%
伺服不匹配	-0.14ms	-0.04ms	71.4%
垂直度误差	$-18.2\mu\text{m/m}$	$-0.8\mu\text{m/m}$	95.6%
圆度误差	$20.5\mu\text{m}$	$7.1\mu\text{m}$	65.4%

应用案例2：深圳富士康科技
应用对象：金属键盘加工
机床型号：ROBODRILL钻铣中心
应用效果：通过垂直度误差补偿，降低X轴和Y轴联动时的轨迹误差和圆度误差；并配合机械和电气匹配性调整，消除键盘的转接线刀纹



减小圆度误差



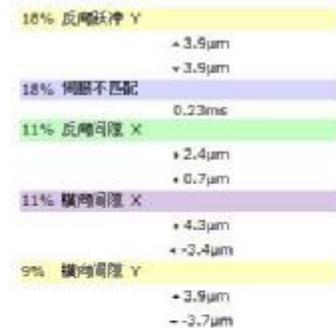
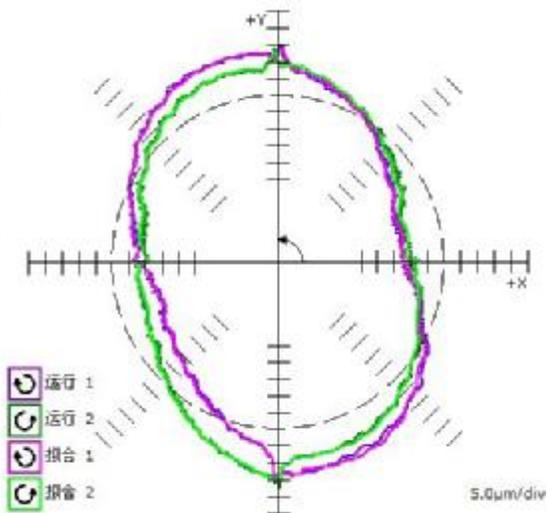
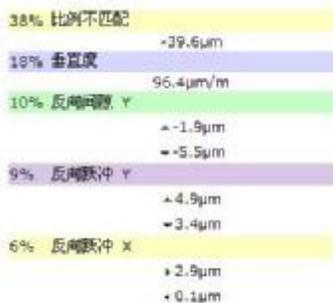


应用案例3：比亚迪第一事业部金属工厂

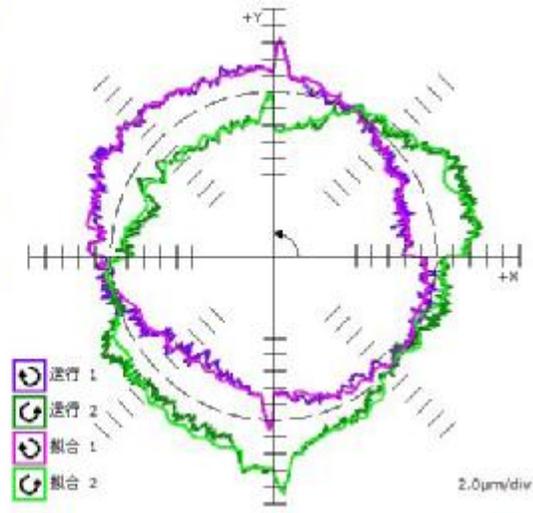
应用对象：金属手机外壳生产线

机床型号：台群T500钻铣中心

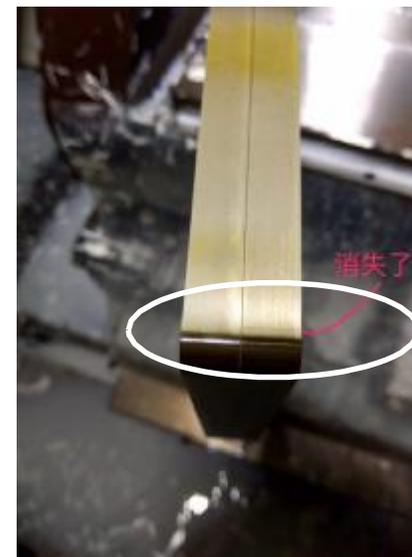
应用效果：补偿后，机床垂直度误差降低了**95.5%**；圆度误差从 $31.8\mu\text{m}$ 减小到 $14.5\mu\text{m}$ ，降低了**54.4%**。由于苹果公司要求生产其产品的机床必须达到圆度 $20\mu\text{m}$ 的指标，因而调整前的机床实际未达到生产苹果产品的要求；而经垂直度补偿后，机床满足了性能指标。



圆度 14.5 μm



应用案例2：深圳富士康科技
 应用对象：金属键盘加工
 机床型号：ROBODRILL钻铣中心
 应用效果：通过垂直度误差补偿，降低X轴和Y轴联动时的轨迹误差和圆度误差；并配合机械和电气匹配性调整，消除键盘的转接线刀纹

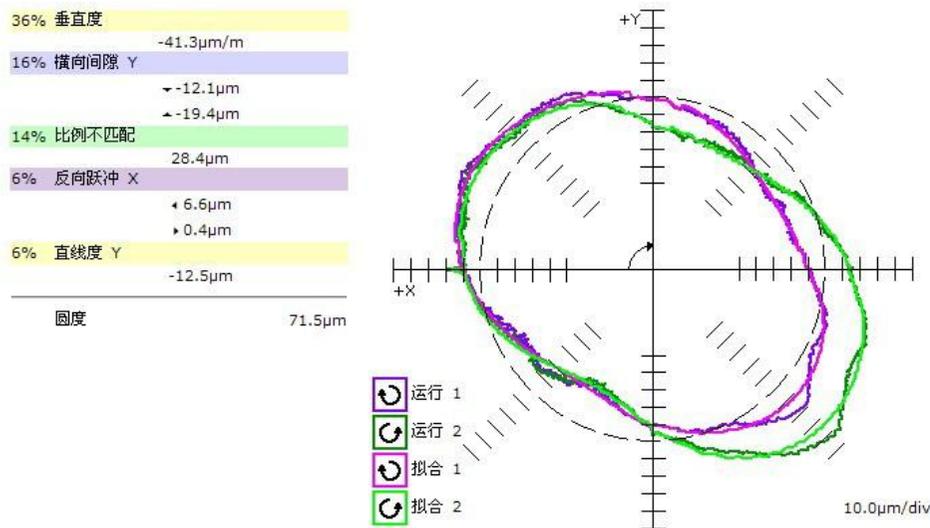


减小圆度误差

项目	误差				补偿后精度提高百分比(%)			
	伺服不匹配	比例不匹配	垂直度	圆度	伺服不匹配	比例不匹配	垂直度	圆度
补偿前	-0.07ms	7.9μm	37.7μm/m	20.2μm	71.4%	86.1%	66.6%	65.3%
补偿后	0.02ms	-1.1μm	12.6μm/m	7.0μm				

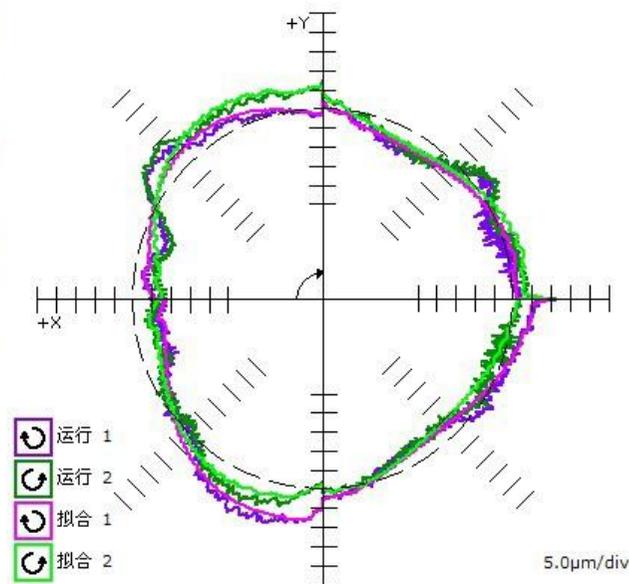
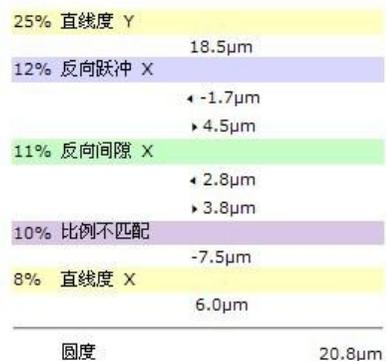
市场推广应用典型案例 | 风电制造行业

30

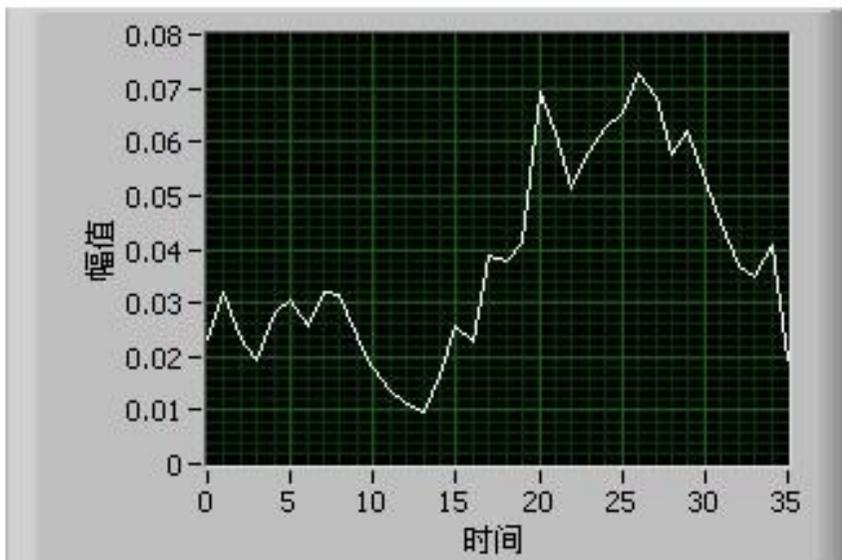


案例：南京高速齿轮制造有限公司
机床型号：威亚龙门加工中心
数控系统：FANUC 18i系统
应用效果：机床垂直度误差**降低了98.5%**；圆度误差**降低了70.9%**。

误差补偿后，机床的垂直度误差从-41.3 μm 减小到-0.6 μm ，垂直度误差对圆度的影响从32%减低到2%；结合E4的两轴联动定位误差和热误差补偿功能，可解决机床的比例不匹配问题，最终使得圆度从71.5 μm 下降到20.8 μm



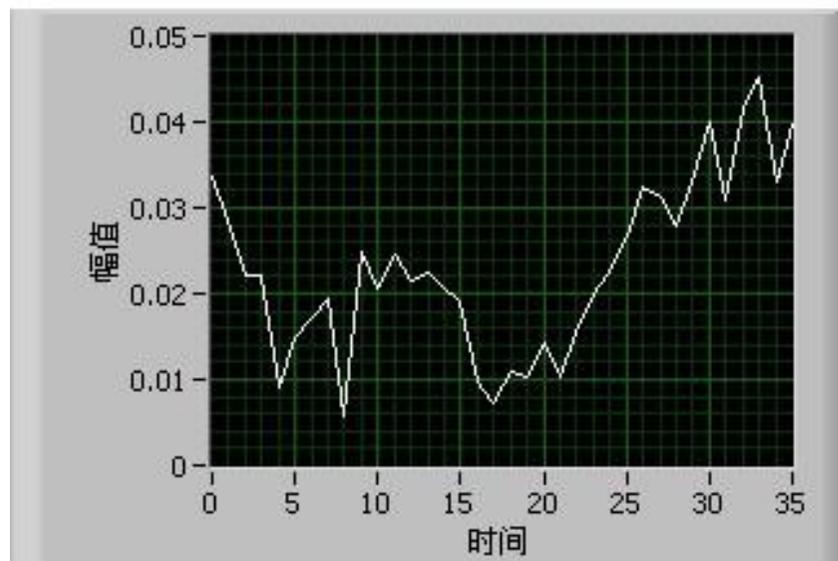
工件半径_0.925m_未补偿



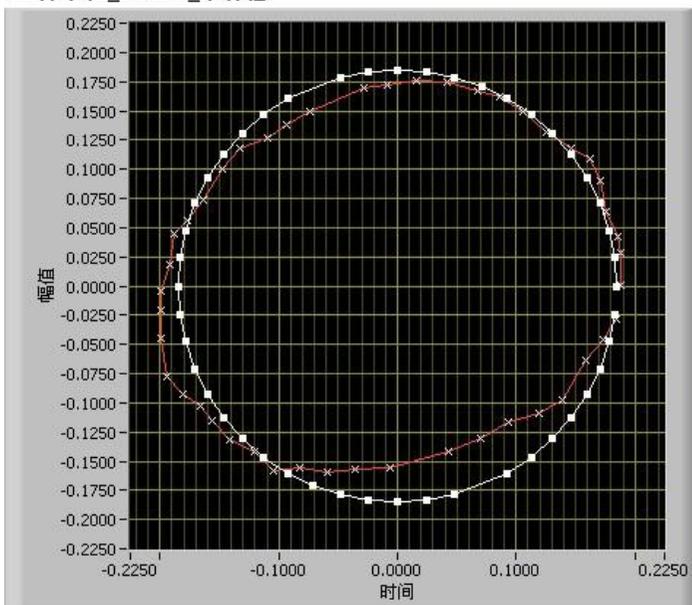
用户加工件为风力发电机的大型轴承座，在圆周上加工等分的36-46个安装孔，孔位最大距离1.8m以上，孔位误差要求小于 $50\mu\text{m}$ 。未补偿时，工件的孔位误差分布图如左上图所示，孔位偏差波动大；而采用垂直度误差补偿后，工件的孔位误差分布图如右下图所示，孔位偏差波动明显改善，达到了用户的使用要求。

案例：南京高速齿轮制造有限公司
机床型号：威亚龙门加工中心
数控系统：FANUC 18i系统
应用效果：加工件孔位偏差从最大 $61\mu\text{m}$ 下降到最大 $34\mu\text{m}$ ，**降低了44.3%**

工件半径_0.925m_补偿



工件半径_0.925m_未补偿



案例：南京高速齿轮制造有限公司
机床型号：威亚龙门加工中心
数控系统：FANUC 18i系统
应用效果：加工件孔位偏差从最大
61 μ m 下降到最大34 μ m，**降低了
44.3%**

从三坐标测量结果来看。没有进行垂直度误差补偿前，实际加工孔位的拟合圆存在明显的一、三象限的倾斜，拟合圆相比理论圆轮廓误差较大；而经过垂直度误差补偿后，孔位拟合圆的倾斜问题得到明显改善，圆轮廓误差减小。

工件半径_0.925m_补偿

