

# 球杆仪测试与“圆形-菱形-方形”加工测试相结合

## 简介

本白皮书介绍了雷尼绍球杆仪测试如何结合（或在某些情况下代替）“圆形-菱形-方形”切削测试，对机床性能进行评估。文中首先概述了“圆形-菱形-方形”轮廓加工测试，以及用来评估机床性能的测量值；随后介绍了雷尼绍球杆仪系统，以及自动图形诊断软件提供的结果；最后详细介绍了如何在执行实际切削测试之前，利用球杆仪诊断结果对机床性能进行深入的分析了解，从而节省时间和成本。

## “圆形-菱形-方形”机床加工测试

切削测试一直是评估机床性能的常用方法。使用机床在受控条件下加工测试件，然后，通过在坐标测量机上检查测试件的尺寸精度，从而评估机床的性能。

1966年，美国航空航天工业协会 (Aerospace Industries Association of America) 在美国国家航天标准NAS979<sup>1</sup>（*均匀切削测试 — NAS系列 — 金属切削设备规格*）中界定了一系列数控铣床的标准化切削测试。

该标准第4.3.3.5.1节定义了数控条件下加工圆形、菱形和方形轮廓的复合切削测试。该测试后来被称为“圆形-菱形-方形”测试。

目前普遍认为NAS979标准已于“2013年5月31日后不再设计新的测试”，且没有直接的替代标准。然而，如今的国际标准ISO 10791-7 2014<sup>2</sup>和美国标准ASME B5.54 2005<sup>3</sup>中均定义了类似的“圆形-菱形-方形”测试。

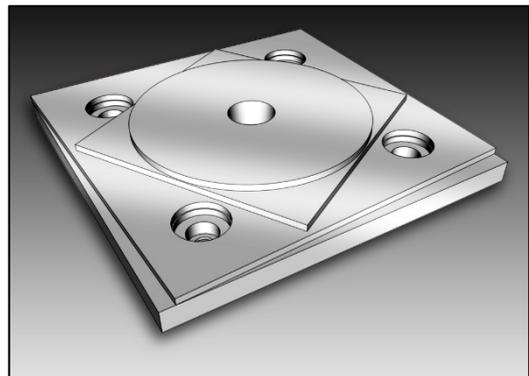


图1 — ISO 10791-7 320 mm测试件

ISO 10791-7定义了“定位与轮廓加工测试”，该测试所用测试件的圆形、菱形和方形特征与NAS979中规定的特征相似（但并非完全相同）。该测试定义了三种测试件尺寸以满足各种机床尺寸的需要，指定了M1\_80 (80 x 80 mm)、M1\_160 (160 x 160 mm) 和M1\_320 (320 x 320 mm) 三种规格，以及各自的目标公差。图1所示为320 x 320 mm测试件的示意图。

ASME B5.54标准第8.2节定义了“精密轮廓加工测试”，该测试采用的160 mm和320 mm测试件相比ISO 10791-7标准中规定的测试件略有修改，且检测程序有所不同，没有规定任何特定的公差范围（公差由供应商和客户商定）。

本白皮书重点介绍ISO 10791-7标准中定义的320 mm测试件，但基本原理普遍适用。

图2所示为320 mm ISO 10791-7测试件的关键尺寸。

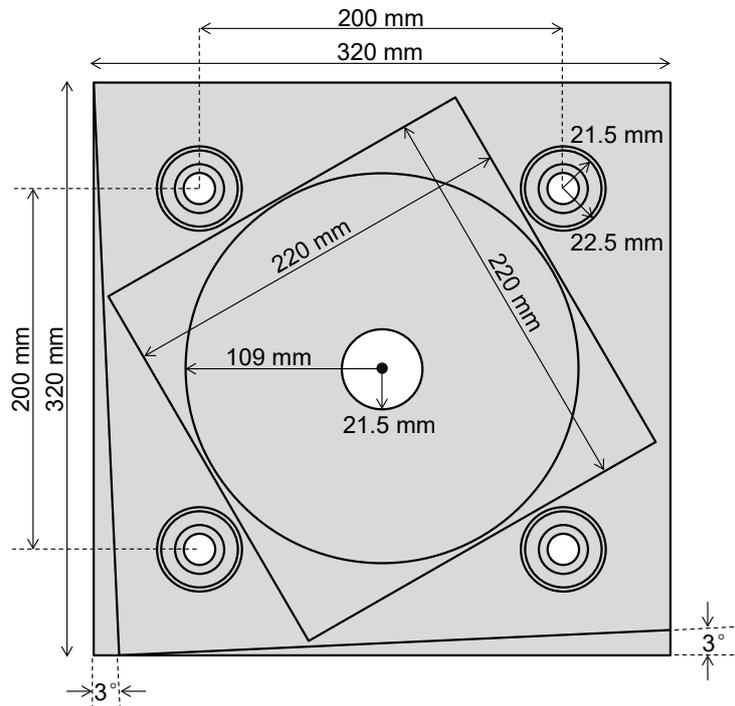


图2 — M1\_320测试件关键尺寸

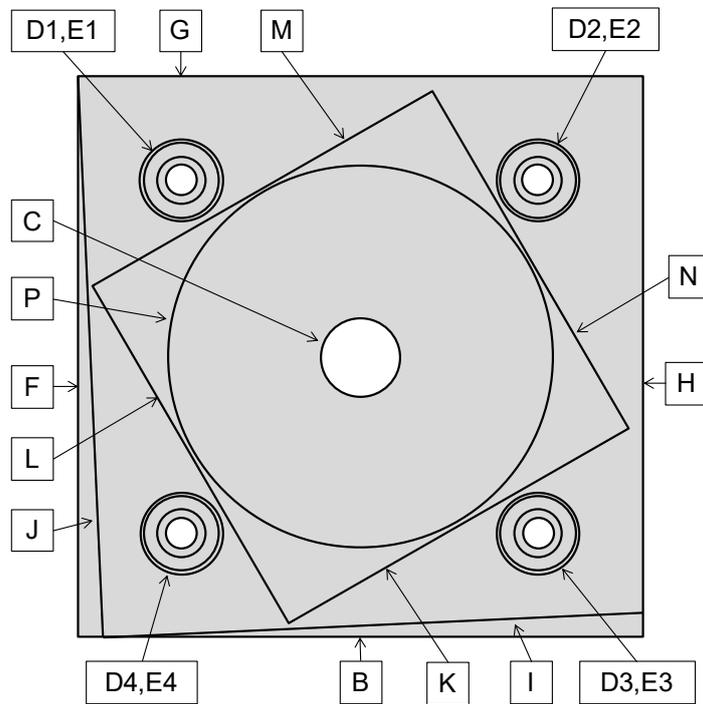


图3 — M1\_320测试件 — 特征命名规则

图3标出了各个关键特征的名称。菱形特征的顶面平面是基准面A。面B和孔C也是基准特征。位于四角的最深的沉孔用于固定。

测试时，沿X轴和Y轴的正方向接近镗孔 (E)，沿负方向接近沉孔 (D)。基准面B与机床的一条线性轴 (X轴或Y轴) 平行。

ISO 10791-7标准定义了加工特征A至P的31个目标公差。下表列出了320 mm测试件的这些公差。

编号	特征	公差	限值 (mm)	
1	中心孔	孔C的圆柱度	0.015	
2		孔C轴与基准平面A之间的垂直度	0.015	
3	方形	B侧的直线度	0.015	
4		F侧的直线度		
5		G侧的直线度		
6		H侧的直线度		
7		H侧与基准平面B之间的垂直度	0.020	
8		F侧与基准平面B之间的垂直度		
9		G侧与基准平面B之间的平行度		
10		菱形	K侧的直线度	0.015
11			L侧的直线度	
12	M侧的直线度			
13	N侧的直线度			
14	K侧与基准平面B的夹角为30°		0.020	
15	L侧与基准平面B的夹角为60°			
16	M侧与基准平面B的夹角为30°			
17	N侧与基准平面B的夹角为60°			
18	圆形	圆P的圆度	0.020	
19		外圆P与基准孔C的同轴度	0.025	
20	斜面	面I的直线度	0.015	
21		面J的直线度		
22		I侧与基准平面B的夹角为3°	0.020	
23		J侧与基准平面B的夹角为93°		
24	镗孔	D1相对于基准孔C的位置	0.050	
25		D2相对于基准孔C的位置		
26		D3相对于基准孔C的位置		
27		D4相对于基准孔C的位置		
28		孔E1与D1的同轴度	0.020	
29		孔E2与D2的同轴度		
30		孔E3与D3的同轴度		
31		孔E4与D4的同轴度		

表1 — 320 mm测试件加工特征的公差

测试件经过加工后，在坐标测量机上进行测量。如果没有达到目标公差，可能需要调整机床，并重复测试。因此，整个过程成本高昂且耗时，不仅需要付出坯料成本，还耗费加工和测量时间。如果附近没有坐标测量机设施，还会增加额外的运输成本及延期风险，从而使情况变得更加复杂。

尽管存在上述缺点，物理加工测试仍是可展示机床的工件加工精度的一种实用方法。因此，现行国际标准ISO 10791-7和美国标准ASME B5.54中仍纳入了升级版本的“圆形-菱形-方形”测试。

## 球杆仪测试

使用伸缩式球杆仪进行机床测试，该方法源于美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory) 备受尊敬的计量学家James Bryan的研究成果。该项成果于1984年获得了美国专利<sup>4</sup>，名称为“伸缩式磁性球杆测试仪”。

伸缩式球杆仪由一根伸缩杆组成，两端分别各带有一个球体，内部有一个位移传感器。一个球体通过磁性球碗安装在机床工作台上，另一个安装在机床主轴上，中间是伸缩杆。随后，对机床进行编程，使位于工作台的球形接头绕主轴插补出一段圆弧，由传感器记录机床主轴沿此圆弧运动的实际轨迹与设定轨迹的偏差（见图4）。由此产生的误差轨迹的“圆度”将给出一个通俗易懂的数值结果，指明机床的轮廓加工性能。如果同时用顺时针和逆时针圆弧对机床进行测试，则通过分析所记录的数据，便可深入了解机床性能以及任何误差源。

这就是球杆仪测试的价值所在，许多国家和国际标准均将该项测试纳入其中，包括ISO 230-4<sup>5</sup>、ASME B5.54<sup>6</sup>、7、ASME B5.57<sup>8</sup>、JIS B-6190<sup>9</sup>、GB/T17421.4<sup>10</sup>等，时间可以追溯到1992年。



图4 — 雷尼绍QC20球杆仪

雷尼绍也于1992年推出了首款“快速检测”球杆仪测试系统，很快又于1994年推出了QC10球杆仪系统。从那时起，雷尼绍便定期对该产品进行更新。目前市场上的QC20球杆仪系统具备无线操作功能，提供各种附件、软件以及广泛的多语种支持。

雷尼绍球杆仪之所以深受用户青睐，关键在于其拥有极高的测试速度，并可提供详尽的机床性能诊断报告。

## 球杆仪图形分析和误差诊断

球杆仪测试的主要结果是提供轨迹图形的圆度\*。计算所测试数据的偏心值，并计算最大半径和最小半径之间的差值。在ISO 230-4和B5.54标准中，该结果称为“圆度偏差”。见图5。

\*注：球杆仪图形圆度的计算方法与“圆形-菱形-方形”测试中的加工圆的圆度计算方法相同。

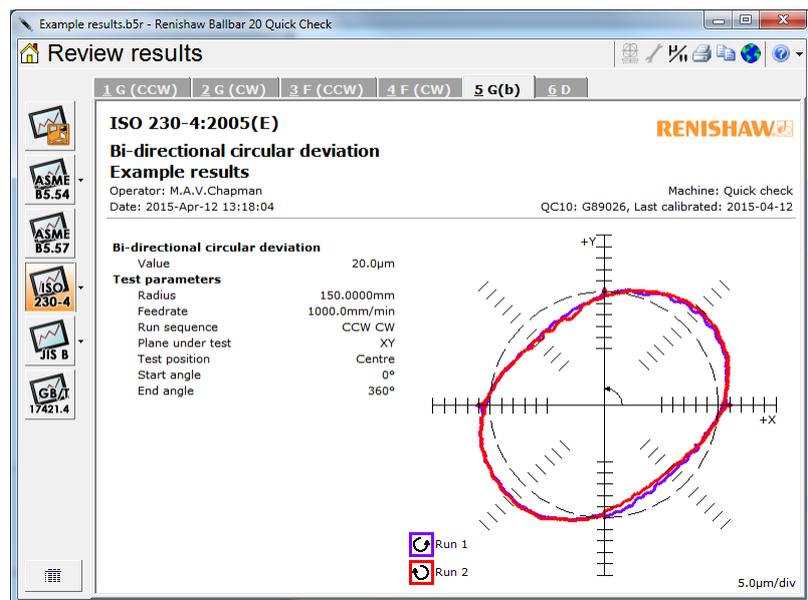


图5 — 符合ISO230-4标准的雷尼绍球杆仪分析结果

然而，如果只是简单地计算图形圆度，则仅仅利用了球杆仪数据中所含的一小部分信息。通过对图形形状进行详细的检查，可以找出被测机床存在的误差类型。图6中的轨迹显示了在XY平面上以3000 mm/min的进给率执行半径为150 mm的双向球杆仪测试时，机床中不同类型的误差如何使球杆仪图形发生不同形式的变形。测试过程中，若顺时针轨迹与逆时针轨迹不相同，则顺时针数据用蓝色表示，逆时针数据用红色表示。每个图形的比例均为5 μm/格。

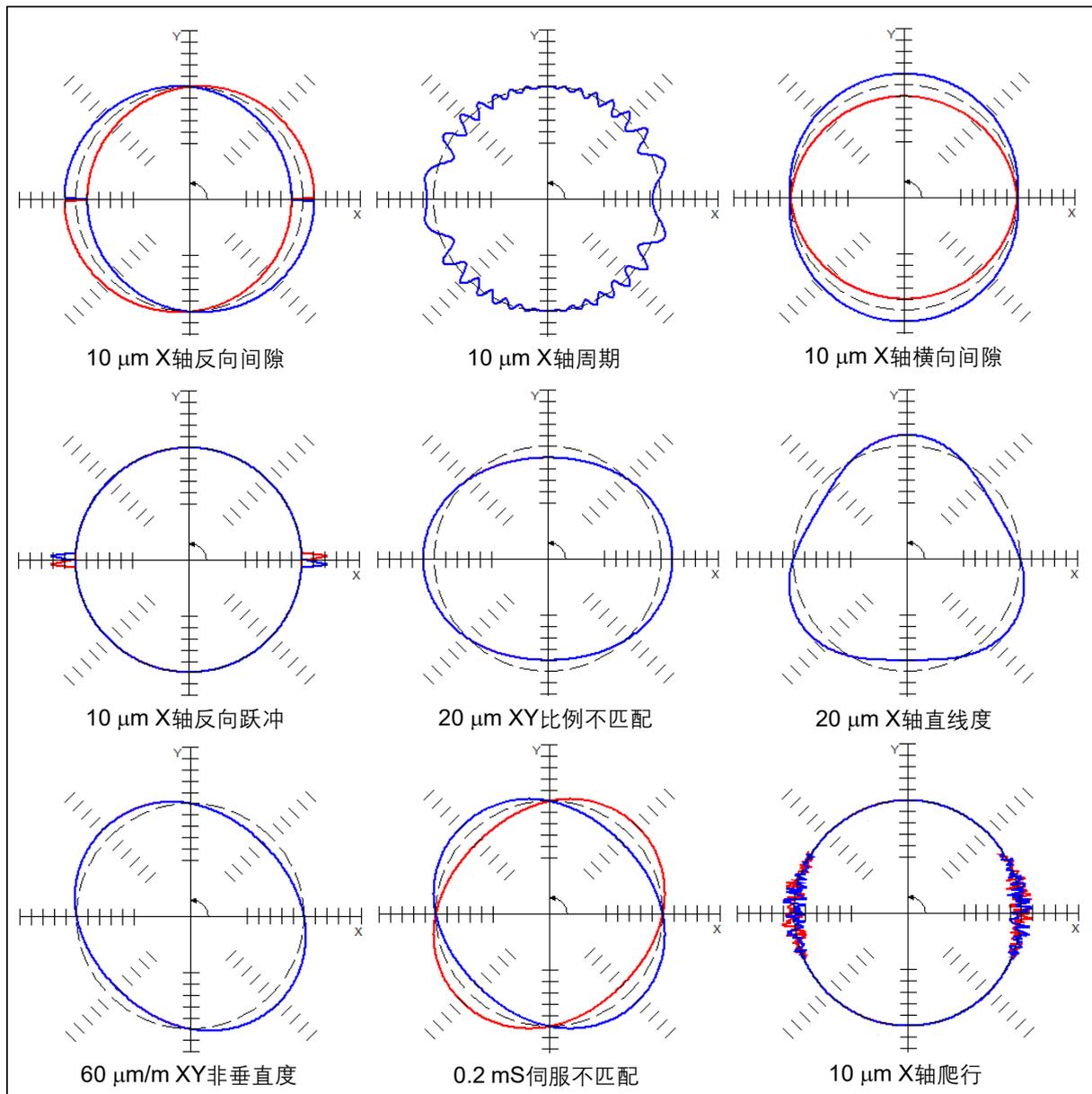


图6 — 各种机床误差引起的球杆仪图形变形

如果机床仅含有一两种误差，那么尚有可能通过对图形进行目测检查来确定误差源。然而，在许多情况下，机床包含诸多相互叠加的误差，这使得通过目测发现误差源变得非常困难，甚至根本无法实现。

图7所示为X轴和Y轴均存在多种误差的情况下，一台机床的模拟测试图形。仅对该图形进行目测检查很难完全识别出机床的各种误差。为解决这一问题，雷尼绍的球杆仪软件包含了先进的数学算法，能够诊断出机床存在哪些误差，并将误差程度进行量化。

图8所示为使用雷尼绍球杆仪误差诊断软件，对图7中的数据集进行分析后得到的结果。红色和蓝色轨迹表示原始数据，上方叠加的细黑色轨迹表示拟合诊断结果。左侧的数值表示已诊断出的各种机床误差的具体大小。

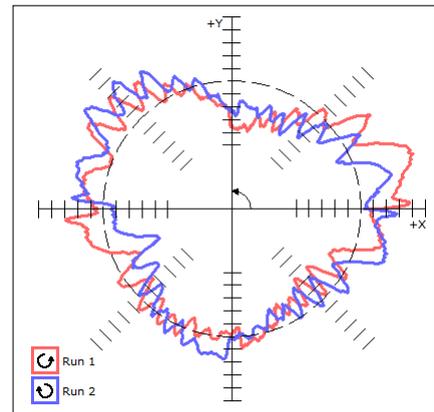


图7 — 包含复杂误差的测试图形

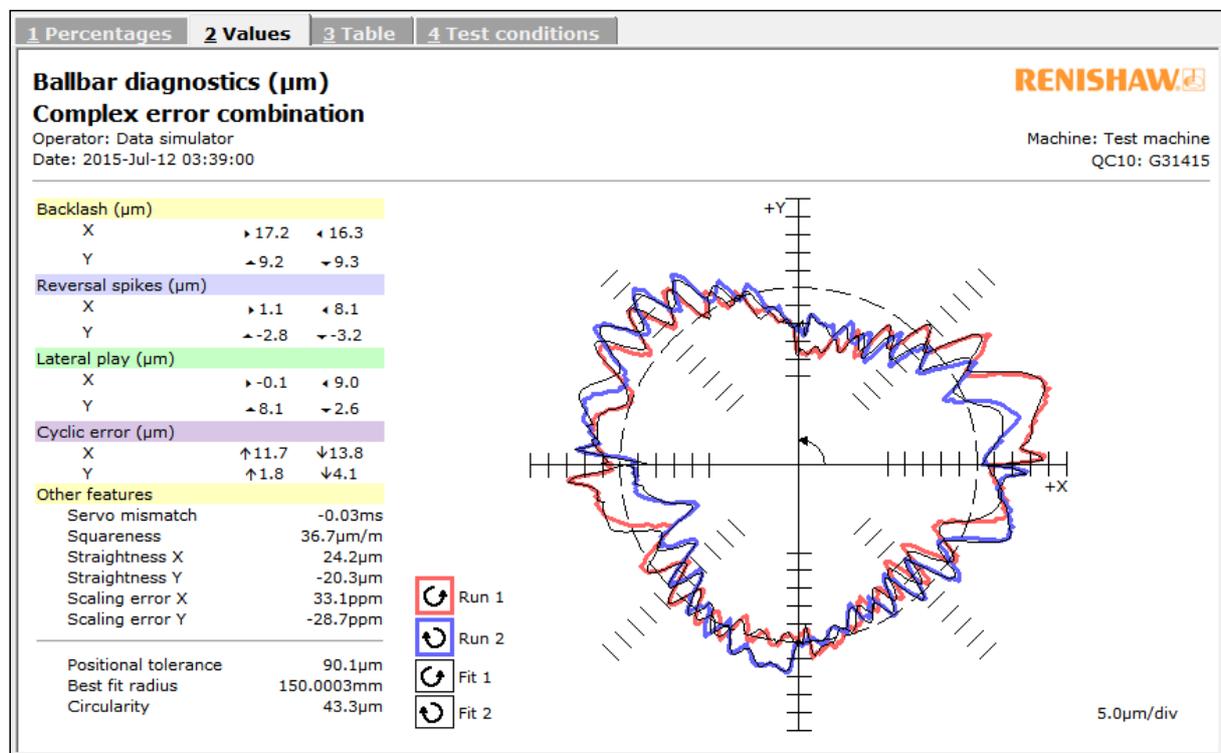


图8 — 球杆仪误差诊断结果 (“数值”选项卡)

如果已使用球杆仪校准规 (见图9) 校准了球杆仪长度，则利用诊断结果能够识别出X轴和Y轴的各自比例误差 (而不仅仅是确定两个轴之间的不匹配)，还可以估算出机床在测试区域内可实现的位置公差。



图9 — 球杆仪校准规

如图10所示，雷尼绍的球杆仪软件还能够以不同的格式呈现诊断结果，即按照各个误差源占圆度偏差结果的百分比，将其进行排序并首先列出误差占比最大者。

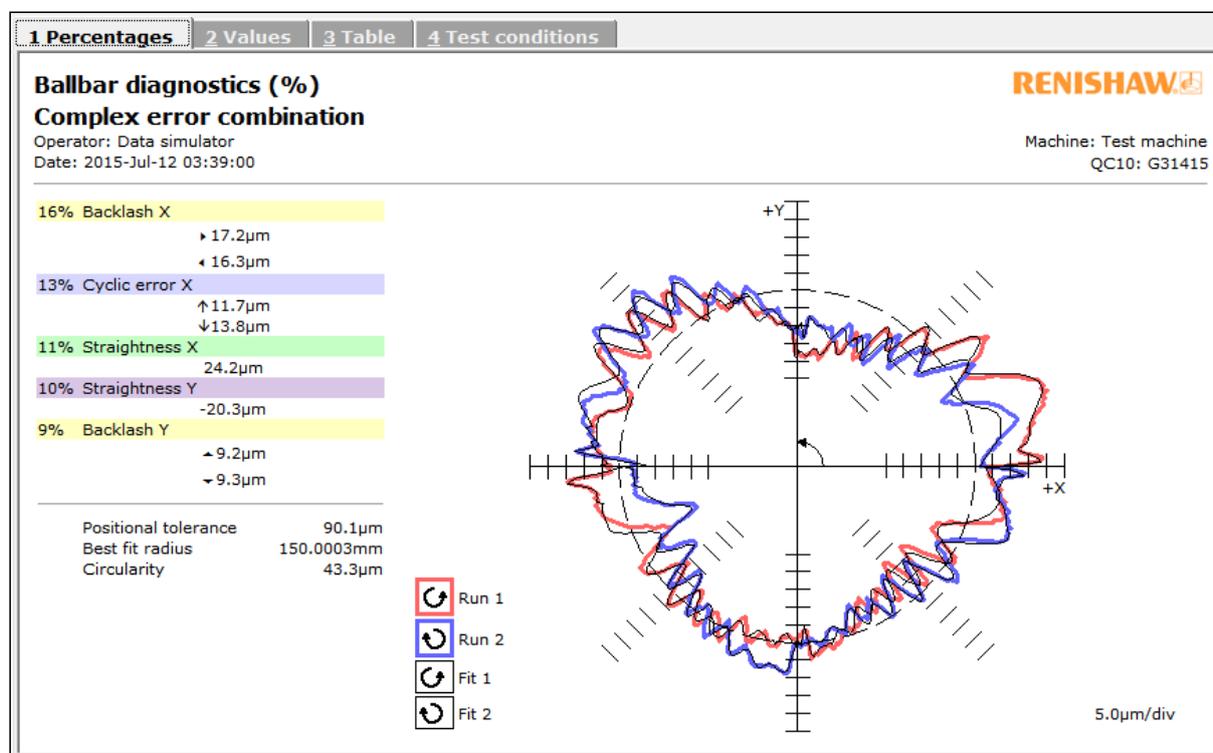


图10 — 球杆仪诊断结果 (“百分比”选项卡)

在本例中，诊断结果表明，导致轨迹图形圆度较差（圆度偏差）的最主要原因是X轴上的反向间隙误差。

球杆仪测试仅需数分钟便可完成，并且可立即得到诊断结果。因此，球杆仪测试可对机床性能进行快速而功能强大的评估，并且可确定可能需要采取补救措施的区域。

它还可以获得与“圆形-菱形-方形”测试相同的详尽结果，但这发生在切削金属之前，因此可节省宝贵的时间和金钱。

## 高级球杆仪测试设定

在“圆形-菱形-方形”加工测试前执行球杆仪测试时，应按以下方式设定球杆仪：

- 球杆仪测试半径。** 所选测试半径最好应使测试圆的大小与“圆形-菱形-方形”测试件相似。雷尼绍的标准球杆仪组件支持100、150、250、300、400、450、550和600 mm的测试半径。球杆仪校准规支持100、150和300 mm的测试半径。可选的小圆适配器组件支持50 mm的半径，并包括一个50 mm球杆仪校准规。受上述约束条件以及ISO 10791-7测试件尺寸的限制，建议采用图11所示的球杆仪测试半径。

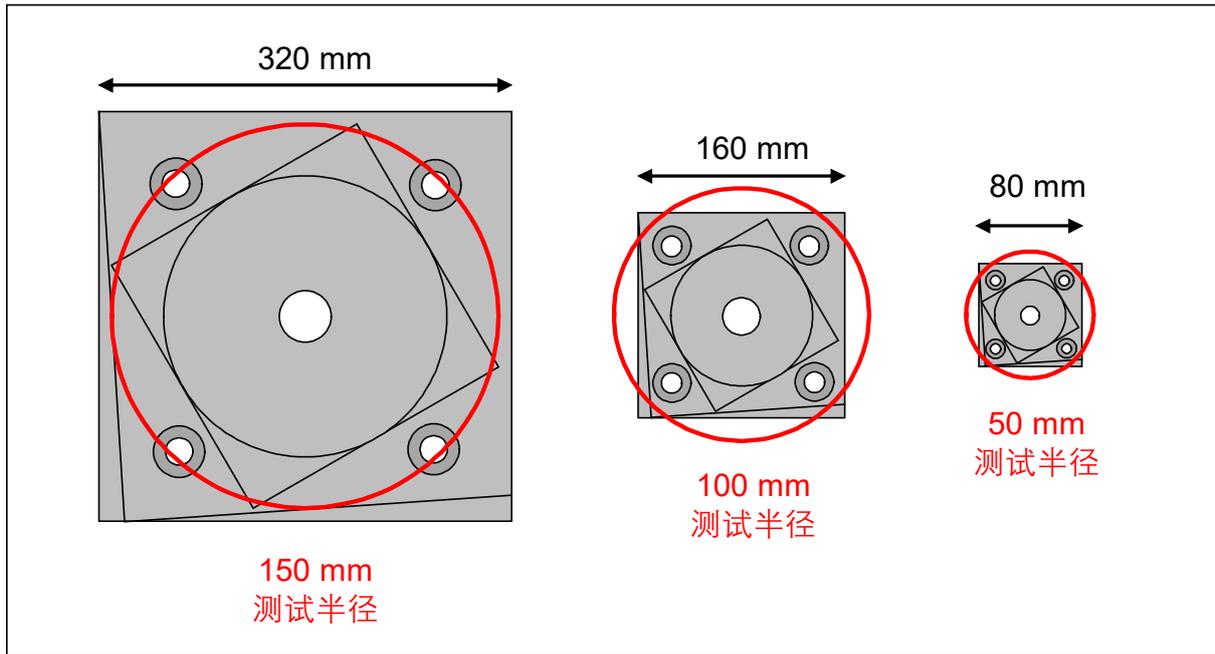


图11 — ISO 10791-7标准中的80、160和320 mm测试件所对应的推荐球杆仪测试半径

- **球杆仪长度校准。**测试开始前，最好使用球杆仪校准规对球杆仪长度进行校准，这样可确保分析结果包括位置公差结果。此外，最好在球杆仪软件中输入测试件材料的膨胀系数及测试时可能所处的温度，以便进行材料膨胀补偿。

*注：如果加工一个ISO 10791-7测试件，且孔D1、2、3和4的目标位置公差为0.050 mm，则材料膨胀补偿并不重要。因而，如果您不确定膨胀系数和温度，可以将膨胀系数输入为0.0 ppm/°C，将材料温度输入为20 °C。*

- **测试位置** — 球杆仪测试的中心位置应与测试件所处位置相同。
- **测试进给率** — 球杆仪测试的进给率应与加工测试中的精切削进给率相同。
- **测试圆弧** — 选择360°的测试圆弧，并带有一些越程量（建议45°或180°，以简化编程）。这将确保可靠采集各轴的反向特征。
- **测试运行次数** — 运行2次测试，一次顺时针，一次逆时针。这将确保获得完整的球杆仪诊断结果。

## 球杆仪数据分析

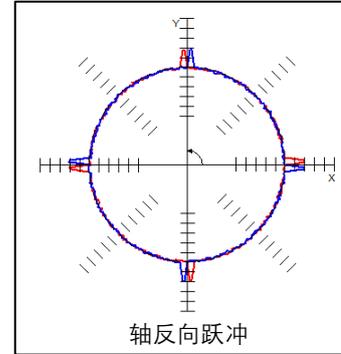
采集球杆仪数据后，应使用球杆仪机床误差诊断软件对其进行分析。通过将图形圆度、诊断出的机床误差和位置公差结果（见图8）与“圆形-菱形-方形”测试件的目标公差（见表1）进行比较，可以预测\*切削测试中的潜在问题。

*\*这里需要注意一点。切削测试还包含额外的误差来源，如主轴轴向、径向跳动、机器振动、换刀重复误差等，这些都不会包括在球杆仪测试中。两种测试中的几何误差及其误差大小也有所不同，因而，结果之间不存在直接的关联性。然而，如果机床的球杆仪测试结果已表明加工的测试件将达不到所需的目标公差，则建议采取补救措施。*

可以将球杆仪测试结果与目标切削测试公差作如下比较：

- **加工圆的圆度。**如果球杆仪测试结果表明圆度误差大于ISO 10791-7中圆P的目标圆度公差（或者ASME B5.54中轮廓加工圆L的目标圆度公差），则加工的圆可能将超差。

- 使用“百分比”诊断选项卡（见图10）确定球杆仪测试圆度误差的主要原因，并采取相应的补救措施。
- 注意，如果球杆仪圆度误差的主要原因是向外的轴向反向跃冲较大，则加工圆的精度可能不会受到严重影响，这是因为刀具半径的组合效应可能会消除这些跃冲。（尽管表面粗糙度可能会出现明显的瑕疵）。



- **位于四角的各孔的位置公差。**将球杆仪位置公差结果（见图8 — “数值”诊断选项卡）与位于四角的各孔所需的目标位置公差进行比较。如果球杆仪测试结果是目标位置公差值的两倍以上\*，则可能四个镗孔中的一个或多个孔的位置将超差。

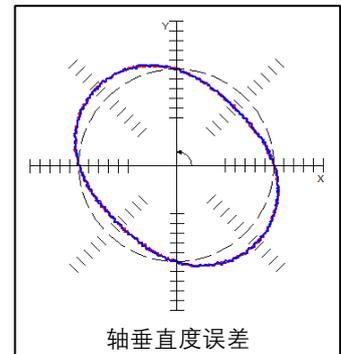
- 使用“百分比”诊断选项卡（见图10）确定主要误差源，并采取相应的补救措施。

*\*注：球杆仪测试的位置公差提供的是测试圆内任意位置的2个特征之间可以达到的位置度估算值，而ISO 10791-7和ASME B5.54的目标公差是相对于中心孔定义的，因此特征间误差值及许多其他机床误差值将减半。*

- **加工面的角度精度。**将球杆仪测试的垂直度诊断结果（见图8 — “数值”诊断选项卡）与加工菱形、方形和93°面的目标角度公差进行比较。这需要将ISO 10791-7中的“指示器读数”公差转换为以 $\mu\text{m}/\text{m}$ 或角秒为单位的角度，以便与球杆仪诊断结果匹配。

例如，320 mm ISO测试件的H侧与基准平面B之间的垂直度公差为0.02 mm，H侧长320 mm。因此，320 mm长度上的0.02 mm公差相当于角度偏差为 $0.02/320 = 62.5$ 微弧度  $\approx 13$ 角秒。

- 如果球杆仪测试诊断出的垂直度误差超过目标角度公差，则加工面的角度可能会超差。可能需要调整或补偿机床的垂直度。



- **加工面的直线度。**将球杆仪测试的直线度诊断结果（“数值”诊断选项卡）与加工菱形、方形以及 $3^\circ$ 面和 $93^\circ$ 面的目标直线度公差进行比较。

- 如果球杆仪测试诊断出的直线度误差超过目标直线度公差，则加工面可能会超差。可能需要调整或补偿导轨直线度。
- 如果球杆仪测试诊断出的轴周期误差超过各菱形面的目标直线度公差，则可能会导致这些加工面的直线度出现问题。注意 — 周期误差不会影响各方形面的直线度，也不太可能影响 $3^\circ$ 面和 $93^\circ$ 面。

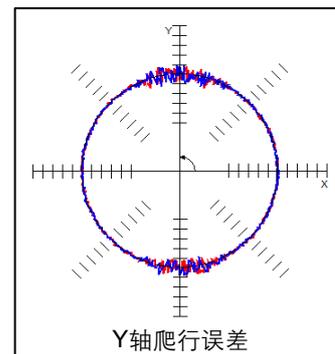
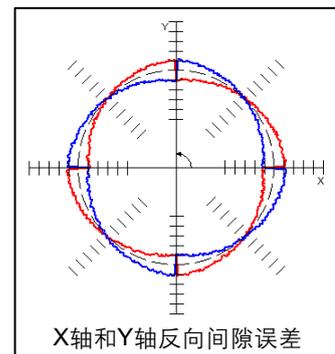
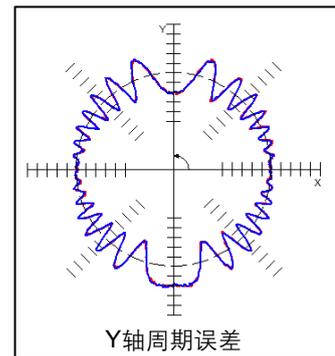
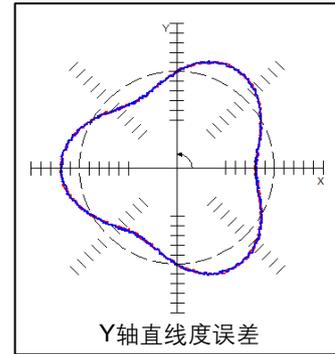
- **四角各孔中的沉孔的同轴度。**ISO 10791-7和B5.54均规定，镗孔位置的接近方向必须与沉孔位置的接近方向相反。因此，将X轴和Y轴的横向间隙和反向间隙诊断值（见图8 — “数值”诊断选项卡）与四个角上的镗孔和沉孔所需的同轴度公差进行比较，会非常有用。

- 如果球杆仪测试诊断出的反向间隙或间隙误差超过目标同轴度公差，则这些孔的同轴度可能不符合规格。可能需要调整或补偿轴反向间隙并/或调整导轨间隙。

- **圆以及 $3^\circ$ 面和 $93^\circ$ 面的表面粗糙度。**加工 $3^\circ$ 面和 $93^\circ$ 面时，一个轴以近乎编程设定的进给率运动，而另一个轴大约以该进给率 $1/20$ 的速度运动。如果轴润滑或间隙有问题，则移动较慢的轴可能会出现爬行运动，导致 $3^\circ$ 或 $93^\circ$ 加工面的表面粗糙度出现问题（极端情况下甚至会影响直线度）。加工圆的轴换向区域附近也可能出现表面粗糙度问题。

- 如果球杆仪轨迹显示任何轴换向点附近的噪声过大，则表明其中一个轴出现爬行运动，可能需要调整该轴导轨的润滑或间隙。

上述部分说明了如何在进行任何切削测试之前，使用球杆仪测试来检查机床的潜在问题。一旦问题解决，则可以根据需要进行切削测试，此时测试将具有更高的置信度。



## 使用球杆仪测试的优点

- 可以在切削金属之前发现潜在的问题，从而节省时间和成本。
- 如果发现问题，球杆仪诊断软件可以突出显示需要注意的机床区域。
- 球杆仪测试还可用来测试大型机床，这类机床可能没有尺寸合适的测试件。（连接加长杆后，QC20球杆仪的测试半径可达到1350 mm）。
- 球杆仪测试速度非常快，因此可定期重复测试，以建立机床性能历史记录，这样便可在问题真正变得严重之前，确定趋势并安排维护工作。图12所示为雷尼绍球杆仪软件提供的一份机床性能历史记录图。该软件可绘制圆度、垂直度、反向间隙等任何诊断特征随时间变化的图表。

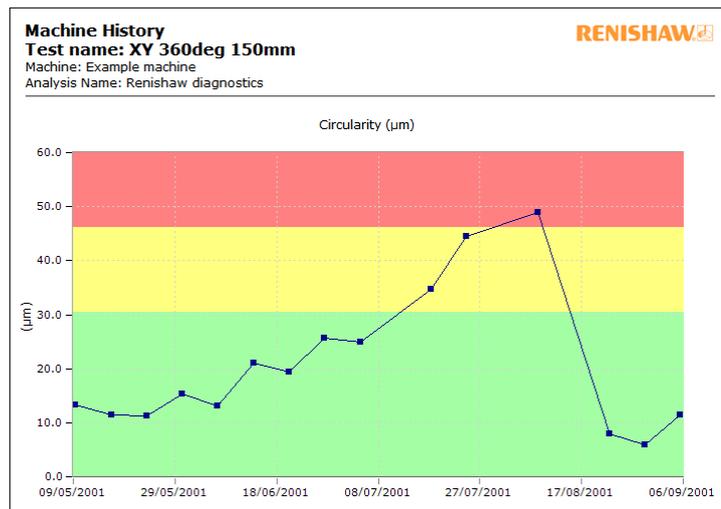


图12 — 机床性能历史记录图

## 切削测试的优点

切削测试对球杆仪测试无法检测的其他误差源非常敏感，例如：

- 主轴问题（准直、振动、轴承磨损等）
- 切削负载引起的机床变形
- 刀具震颤和冷却液问题等引起的其他表面粗糙度问题
- 换刀重复性问题（B5.54要求在加工四角各孔中的每个镗孔和沉孔之前换刀）

## 结论

本白皮书概述了“圆形-菱形-方形”加工测试及其用来评估机床性能的测量值。文中介绍了如何在执行实际金属切削测试之前，利用雷尼绍球杆仪系统和诊断软件对机床性能进行深入的分析了解，从而节省时间和成本。

在对初始机床性能进行基准测试后，还可持续利用球杆仪测试来监测机床性能的变化趋势，以在实际问题出现之前便可妥善安排维护工作。

## 脚注1 — ASME B5.54建议

值得注意的是，ASME B5.54附录A3<sup>11</sup>提出了合理建议，推荐了以下快速评估三轴机床性能的最小测试集合：

**A3.1 轮廓加工性能测试**，使用伸缩式球杆仪等，在3个平面中进行圆测试。

**A3.2 各轴线性定位精度和重复性测试**，使用激光干涉仪等。

**A3.3 沿4条体对角线进行对角线位移测试**，使用激光干涉仪。

**A3.4 精密轮廓加工测试**，包括经典的“圆形-菱形-方形”测试等。

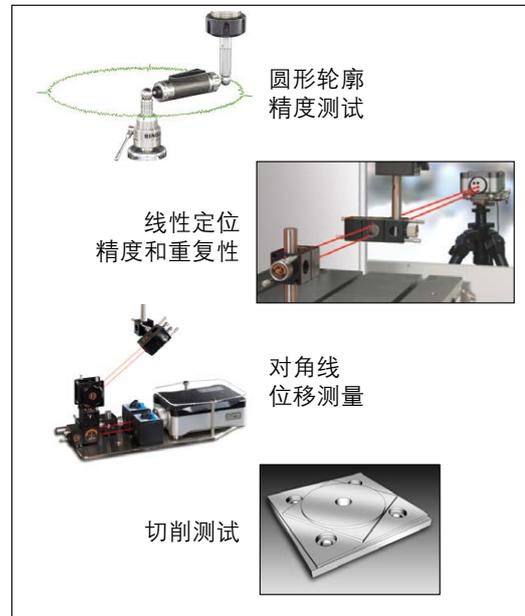


图13 — B5.54推荐的测试集合

## 脚注2 — 锥体切削测试

NAS979、B5.54和ISO 10791-7标准还介绍了五轴机床的锥体切削测试。该测试包括同时移动5个轴来加工一个倾斜的平头锥体测试件（如图14左侧示意图所示）。

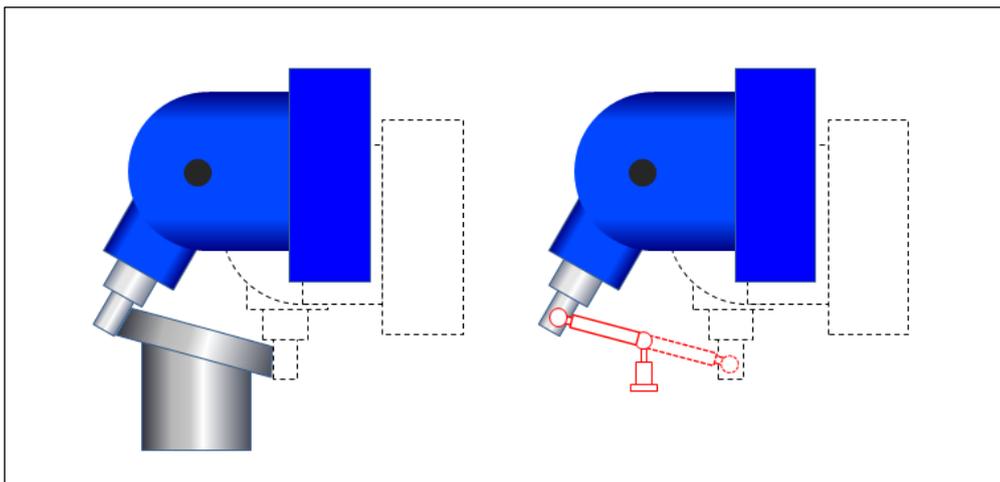


图14 — 五轴机床平头锥体切削测试

通过使用图14右侧所示的球杆仪设定，可以用球杆仪来评估机床能够实现的平头锥体的加工圆度。球杆仪分析软件将正确计算该圆度，但由于该软件仅设计用于诊断三轴机床测试中的问题，因此需要仔细解读机床误差诊断结果。

## 参考文献

1. National Aerospace Standard NAS979 (*Uniform Cutting Tests - NAS series - Metal cutting equipment specifications*). Section 4.3.3.5.1 - Composite cutting test.
2. International Standard ISO 10791-7 2014: Test conditions for machining centres - Part 7: Accuracy of finished test pieces.
3. American Standard B5.54-2005 Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centres. Section 8.2 Precision contouring test.
4. US Patent No US4435905 A - Telescoping magnetic ball bar test gage - James B. Bryan
5. International Standard ISO230-4:2005 - Test code for machine tools - Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools.
6. American Standard B5.54-1992 Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centres. Section 5.9.3 Contouring Performance Using Telescoping Ball Bars.
7. American Standard B5.54-2005 Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centres. Section 7.11 Contouring Performance Using Telescoping Circular Tests.
8. American Standard B5.57-2012 Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Lathes and Turning Centers.
9. Japanese standard JIS B-6190 (Japanese equivalent to ISO 230-4, see ref 5 above)
10. Chinese standard GB/T17421.4 (Chinese equivalent to ISO 230-4, see ref 5 above)
11. American Standard B5.54-2005 Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centres. Appendix A3 Recommended minimum test set.

[www.renishaw.com.cn/ballbar](http://www.renishaw.com.cn/ballbar)



#雷尼绍

© 2016-2023 Renishaw plc. 版权所有。RENISHAW®和测头图案是Renishaw plc的注册商标。  
Renishaw产品名、型号和“apply innovation”标识为Renishaw plc或其子公司的商标。  
其他品牌名、产品名或公司名为其各自所有者的商标。  
Renishaw plc. 在英格兰和威尔士注册。公司编号：1106260。注册办公地：New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK。  
在出版本文时，我们为核实本文的准确性作出了巨大努力，但在法律允许的范围内，无论因何产生的所有担保、条件、声明和责任均被排除在外。



扫描关注雷尼绍官方微信

文档编号：H-5650-2061-01-A  
发布：2023.01

上海 T +86 21 6180 6416 E <a href="mailto:shanghai@renishaw.com">shanghai@renishaw.com</a>	天津 T +86 22 8485 7632 E <a href="mailto:tianjin@renishaw.com">tianjin@renishaw.com</a>	青岛 T +86 532 8503 0208 E <a href="mailto:qingdao@renishaw.com">qingdao@renishaw.com</a>
北京 T +86 10 8420 0202 E <a href="mailto:beijing@renishaw.com">beijing@renishaw.com</a>	成都 T +86 28 8652 8671 E <a href="mailto:chengdu@renishaw.com">chengdu@renishaw.com</a>	西安 T +86 29 8833 7292 E <a href="mailto:xian@renishaw.com">xian@renishaw.com</a>
广州 T +86 20 8550 9485 E <a href="mailto:guangzhou@renishaw.com">guangzhou@renishaw.com</a>	重庆 T +86 23 6865 6997 E <a href="mailto:chongqing@renishaw.com">chongqing@renishaw.com</a>	宁波 T +86 574 8791 3785 E <a href="mailto:ningbo@renishaw.com">ningbo@renishaw.com</a>
深圳 T +86 755 3369 2648 E <a href="mailto:shenzhen@renishaw.com">shenzhen@renishaw.com</a>	苏州 T +86 512 8686 5539 E <a href="mailto:suzhou@renishaw.com">suzhou@renishaw.com</a>	郑州 T +86 371 6658 2150 E <a href="mailto:zhengzhou@renishaw.com">zhengzhou@renishaw.com</a>
武汉 T +86 27 6552 7075 E <a href="mailto:wuhan@renishaw.com">wuhan@renishaw.com</a>	沈阳 T +86 24 2334 1900 E <a href="mailto:shenyang@renishaw.com">shenyang@renishaw.com</a>	