

# 將循圓測試儀與「圓形-菱形-方形」加工測試相結合

## 簡介

本白皮書介紹了 Renishaw 循圓測試儀如何結合（或在某些情況下代替）「圓形-菱形-方形」切削測試對機台性能進行評估。文中首先概述了「圓形-菱形-方形」輪廓加工測試以及用來評估機台性能的量測值，隨後介紹了 Renishaw 循圓測試儀系統以及自動圖形診斷軟體提供的結果。最後，詳細說明如何在執行實際切削測試之前，利用循圓測試儀診斷結果對機台性能進行深入的分析了解，進而節省時間和成本。

## 「圓形-菱形-方形」機台加工測試

切削測試一直是評估機台性能的常用方法。機台在受控條件下進行加工測試件，然後在三次元量床 (CMM) 上檢查測試件的尺寸精度，進而評估機台的性能。

1966 年，美國航空航太工業協會 (Aerospace Industries Association of America) 在美國國家航太標準 NAS979<sup>1</sup>（均勻切削測試 — NAS 系列 — 金屬切削設備規格）中界定了一系列 CNC 銑床的標準化切削測試。

該標準第 4.3.3.5.1 節定義了在 CNC 條件下加工圓形、菱形和方形輪廓的複合切削測試。該測試後來被稱為「圓形-菱形-方形」測試。

目前普遍認為 NAS979 標準已於 2013 年 5 月 31 日後不再設計新的測試，且沒有直接的替代標準。然而，如今的國際標準 ISO 10791-7 2014<sup>2</sup> 和美國標準 ASME B5.54 2005<sup>3</sup> 中均定義了類似的「圓形-菱形-方形」測試。

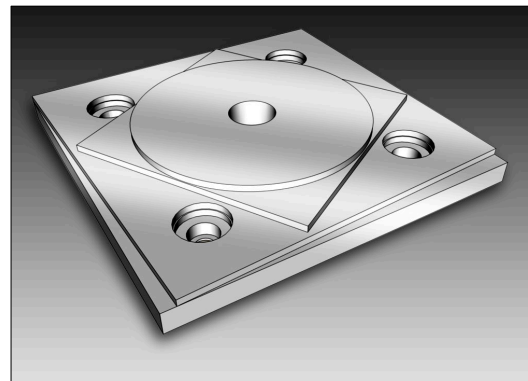


圖 1 — ISO 10791-7 320 mm 測試件

ISO 10791-7 定義了「定位與輪廓加工測試」，該測試所用測試件的圓形、菱形和方形特徵與 NAS979 中規定的特徵相似（但並非完全相同）。該測試定義了三種測試件尺寸以滿足各種機台尺寸的需要，指定了 M1\_80 (80 x 80 mm)、M1\_160 (160 x 160 mm) 和 M1\_320 (320 x 320 mm) 三種規格，以及各自的目標公差。圖 1 所示為 320 x 320 mm 測試件的示意圖。

ASME B5.54 標準第 8.2 節定義了「精密輪廓加工測試」，該測試採用的 160 mm 和 320 mm 測試件相較 ISO 10791-7 標準中規定的測試件略有修改，且檢測程式有所不同，沒有規定任何特定的公差範圍（公差由供應商和客戶商定）。

本白皮書重點介紹 ISO 10791-7 標準中定義的 320 mm 測試件，但基本原理普遍適用。

圖 2 所示為 320 mm ISO 10791-7 測試件的關鍵尺寸。

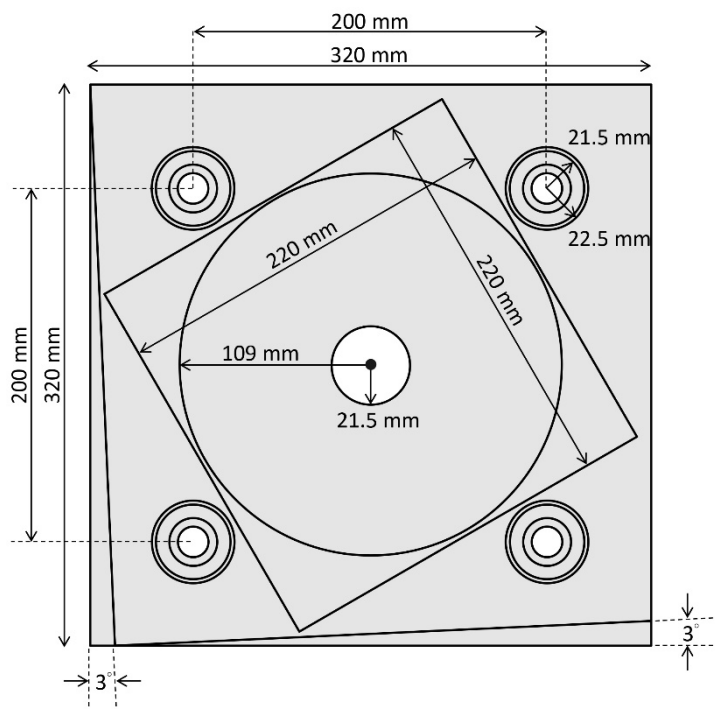


圖 2 — M1\_320 測試件關鍵尺寸

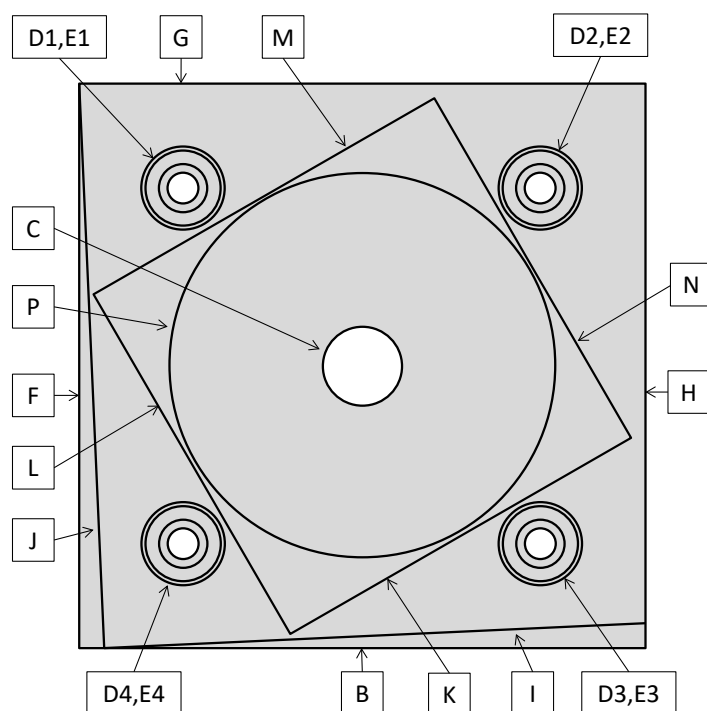


圖 3 — M1\_320 測試件 — 特徵命名規則

圖 3 標出了各個關鍵特徵的名稱。菱形特徵的頂部平面是基準面 A。面 B 和孔 C 也是基準特徵。位於四角的最深的沉孔則用於固定。

測試時，沿 X 軸和 Y 軸的正方向接近鏜孔 (E)，沿反方向接近沉孔 (D)。基準面 B 與機台的一條線性軸 (X 軸或 Y 軸) 平行。

ISO 10791-7 標準定義了加工特徵 A 至 P 的 31 個目標公差。下表列出了這些於 320 mm 測試件的公差。

編號	特徵	公差	限值 (mm)
1	中心孔	孔 C 的圓柱度	0.015
2		孔 C 軸與基準平面 A 之間的垂直度	0.015
3	方形	B 側的真直度	0.015
4		F 側的真直度	
5		G 側的真直度	
6		H 側的真直度	
7		H 側與基準平面 B 之間的垂直度	0.020
8		F 側與基準平面 B 之間的垂直度	
9	G 側與基準平面 B 之間的平行度		
10	菱形	K 側的真直度	0.015
11		L 側的真直度	
12		M 側的真直度	
13		K 側的真直度	
14		K 側與基準平面 B 的夾角為 30°	0.020
15		L 側與基準平面 B 的夾角為 60°	
16		M 側與基準平面 B 的夾角為 30°	
17		N 側與基準平面 B 的夾角為 60°	
18	圓形	圓 P 的圓度	0.020
19		外圓 P 與基準孔 C 的同軸度	0.025
20	斜面	面 I 的真直度	0.015
21		面 J 的真直度	
22		I 側與基準平面 B 的夾角為 3°	0.020
23		J 側與基準平面 B 的夾角為 93°	
24	鏜孔	D1 相對於基準孔 C 的位置	0.050
25		D2 相對於基準孔 C 的位置	
26		D3 相對於基準孔 C 的位置	
27		D4 相對於基準孔 C 的位置	
28		孔 E1 與 D1 的同軸度	0.020
29		孔 E2 與 D2 的同軸度	
30		孔 E3 與 D3 的同軸度	
31		孔 E4 與 D4 的同軸度	

表 1 — 320 mm 測試件加工特徵的公差

測試件經過加工後，在 CMM 上進行量測。如果沒有達到目標公差，可能需要調整機台，並重複測試。因此，整個過程成本高昂且耗時，不僅需要付出坯料成本，還耗費加工和量測時間。如果附近沒有 CMM，還會增加額外的運輸成本及延期風險，從而使情況變得更加複雜。

儘管存在上述缺點，物理加工測試仍是可展示機台的工件加工精度的一種實用方法。因此，現行國際標準 ISO 10791-7 和美國標準 ASME B5.54 中仍納入了升級版本的「圓形-菱形-方形」測試。

## 循圓測試

使用伸縮式循圓測試儀進行機台測試，該方法源於美國勞倫斯利弗莫爾國家實驗室 (Lawrence Livermore National Laboratory) 備受尊敬的計量學家 James Bryan 的研究成果。該項成果於 1984 年獲得了美國專利<sup>4</sup>，名稱為「伸縮式磁性循圓測試儀」。

伸縮式循圓測試儀由一根伸縮杆組成，兩端分別各帶有一個球體，內部有一個位移感測器。一個球體通過 Z 軸杯型槽安裝在機台工作台上，另一個安裝在機台主軸上，中間是伸縮杆。隨後，對機台進行編程，使位於工作台的球形接頭繞主軸插補出一段圓弧，由感測器記錄機台主軸沿此圓弧運動的實際軌跡與設定軌跡的偏差（見圖 4）。由此產生的誤差軌跡的「圓度」將給出一個簡明易懂的數值結果，指出機台的輪廓加工性能。如果同時用順時針和逆時針圓弧對機台進行測試，則通過分析所記錄的資料，便可深入了解機台性能以及任何誤差源。

這就是循圓測試儀測試的價值所在，許多國家和國際標準均將該項測試納入其中，包括 ISO 230-4<sup>5</sup>、ASME B5.54<sup>6,7</sup>、ASME B5.57<sup>8</sup>、JIS B-6190<sup>9</sup>、GB/T17421.4<sup>10</sup> 等，時間可以追溯到 1992 年。

Renishaw 也於 1992 年推出了首款「快速檢測」循圓測試儀測試系統，很快又於 1994 年推出了 QC10 循圓測試儀系統。從那時起，Renishaw 便定期對該產品進行更新。目前市場上的 QC20 循圓測試儀系統具備無線操作功能，提供各種附件、軟體以及廣泛的多語種支援。

Renishaw 循圓測試儀之所以深受用戶青睞，關鍵在於其擁有極高的測試速度，並可提供詳盡的機台性能診斷報告。

## 循圓測試儀圖形分析和誤差診斷

循圓測試儀測試的主要結果是提供軌跡圖形的圓度\*。計算所測試資料的偏心值，並計算最大半徑和最小半徑之間的差值。在 ISO 230-4 和 B5.54 標準中，該結果稱為「圓度偏差」。見圖 5。

\*注意：循圓測試儀圖形圓度的計算方法與「圓形-菱形-方形」測試中的加工圓的圓度計算方法相同。



圖 4 — Renishaw QC20 循圓測試儀

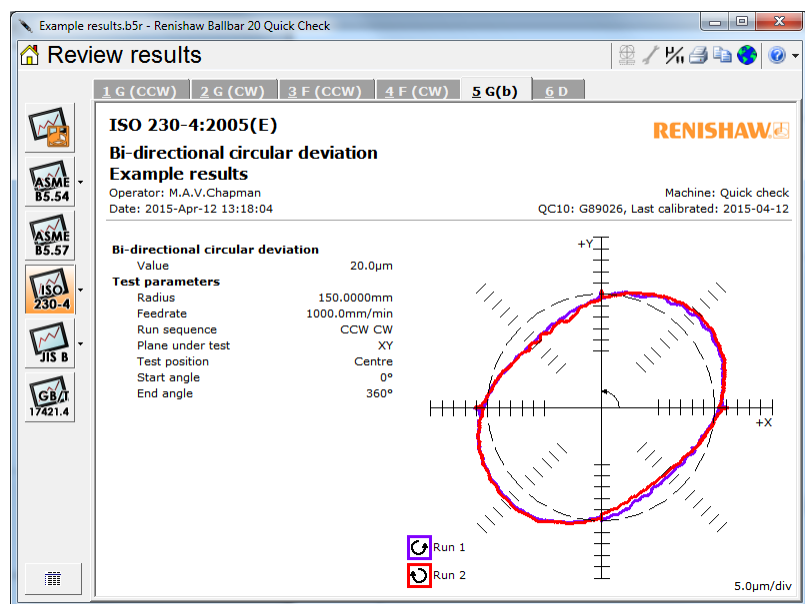


圖 5 — 符合 ISO230-4 標準的 Renishaw 循圓測試儀分析結果

然而，如果只是簡單地計算圖形圓度，則僅僅利用了循圓測試儀資料中所含的一小部分資訊。通過對圖形形狀進行詳細的檢查，可以找出被測機台存在的誤差類型。圖 6 中的軌跡顯示了在 XY 平面上以 3000 mm/min 的進給率執行半徑為 150 mm 的雙向循圓測試儀測試時，機台中不同類型的誤差如何使循圓測試儀圖形發生不同形式的變形。測試過程中，若順時針軌跡與逆時針軌跡不相同，則順時針資料用藍色表示，逆時針資料用紅色表示。每個圖形的比例均為 5  $\mu\text{m}$ /格。

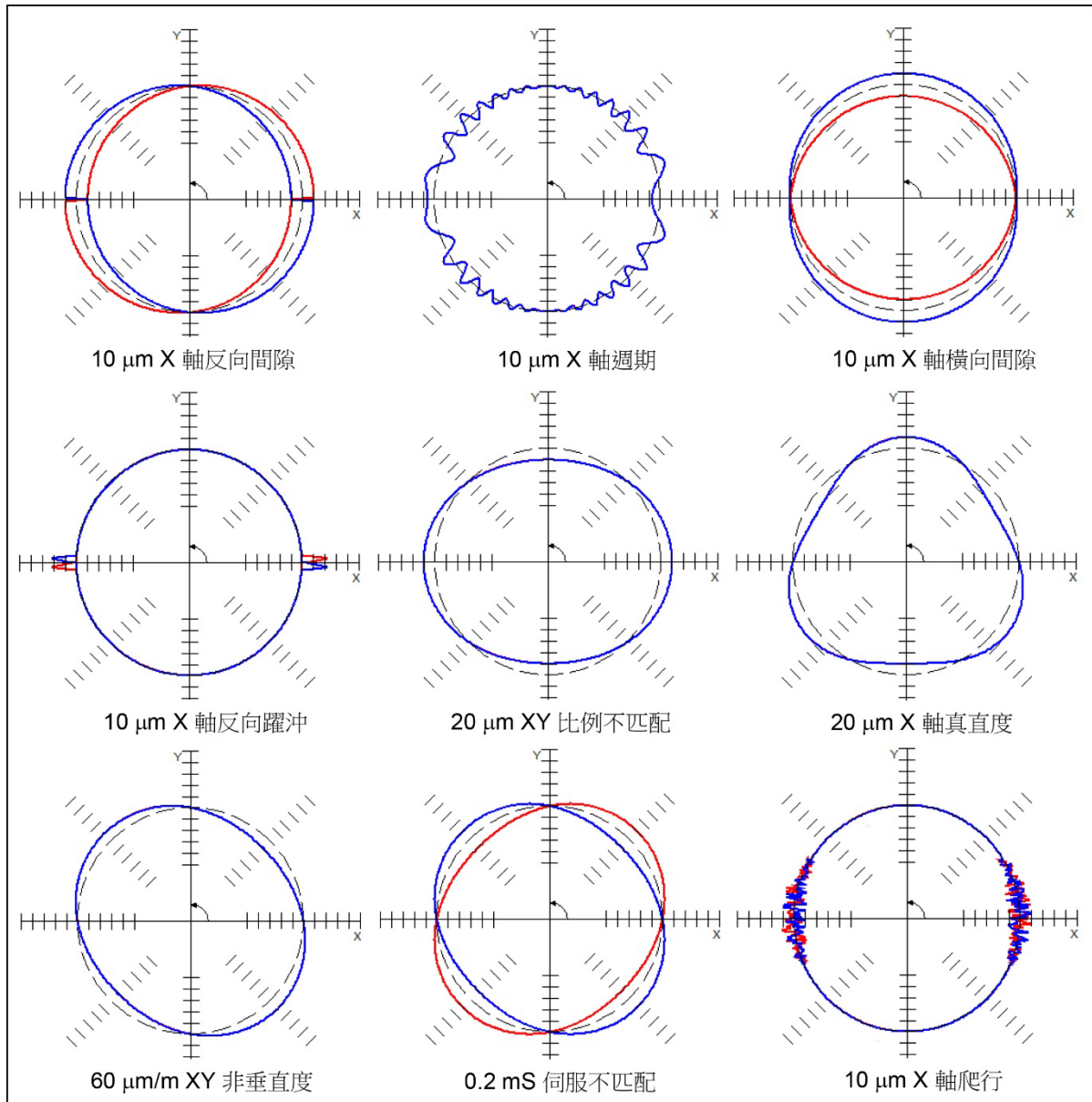


圖 6 — 各種機台誤差引起的循圓測試儀變形圖

如果機台僅含有一兩種誤差，那麼尚有可能通過對圖形進行目測檢查來確定誤差源。然而，在許多情況下，機台包含諸多相互疊加的誤差，這使得透過目測發現誤差源變得非常困難，甚至根本無法實現。

圖 7 所示為 X 軸和 Y 軸均存在多種誤差的情況下的機台模擬測試圖形。僅對該圖形進行目測檢查很難完全識別出機台的各種誤差。為解決這一問題，Renishaw 的循圓測試儀套裝軟體包含了先進的數學演算法，能夠診斷出機台存在哪些誤差，並將誤差程度進行量化。

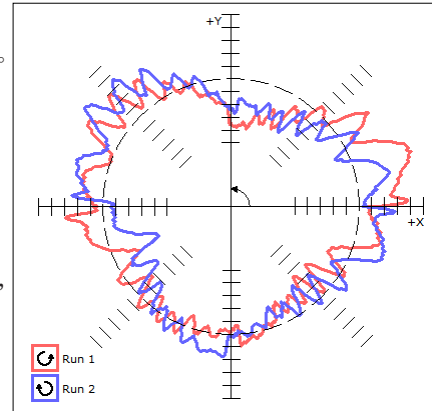


圖 7 — 包含複雜誤差的測試圖形

圖 8 所示為使用 Renishaw 循圓測試儀誤差診斷軟體，對圖 7 中的資料集進行分析後得到的結果。紅色和藍色軌跡表示原始資料，上方疊加的細黑色軌跡表示擬合診斷結果。左側的數值表示已診斷出的各種機台誤差的具體大小。

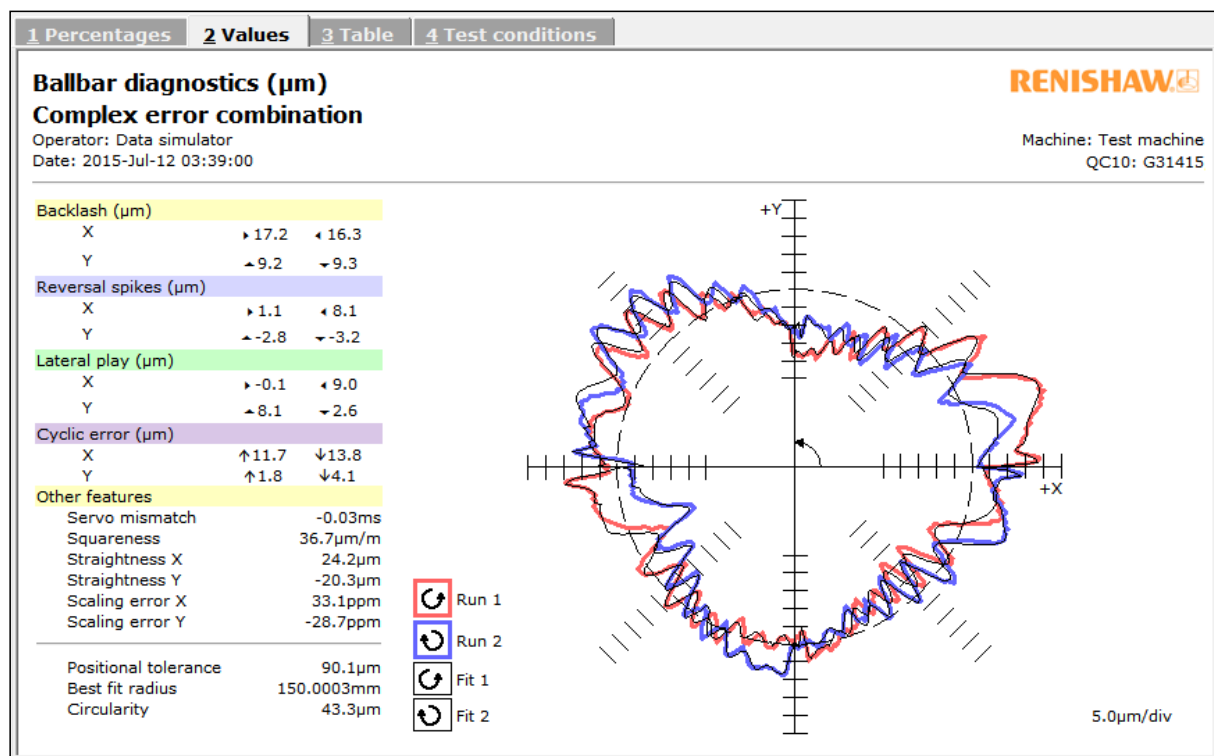


圖 8 — 循圓測試儀誤差診斷結果（「數值」頁）

如果已使用循圓測試儀校正塊（見圖 9）校正了其長度，則利用診斷結果能夠識別出 X 軸和 Y 軸各自的比例誤差（而不僅僅是確定兩個軸之間的不匹配），還可以估算出機台在測試區域內可實現的位置公差。



圖 9 — 循圓測試儀校正塊

如圖 10 所示，Renishaw 的循圓測試儀軟體還能夠以不同的格式呈現診斷結果，即按照各個誤差源占圓度偏差結果的百分比，將其進行排序優先列出誤差占比最大者。

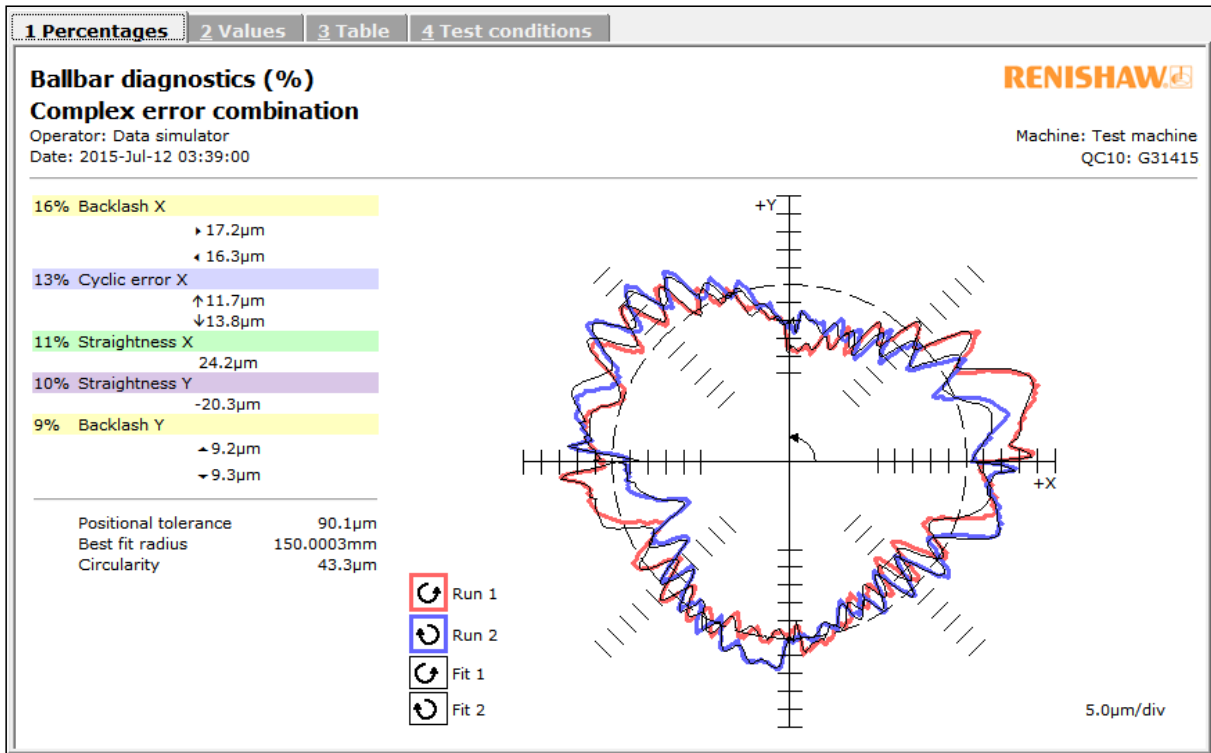


圖 10 — 循圓測試儀診斷結果（「百分比」頁）

在本例中，診斷結果表明，導致軌跡圖形圓度較差（圓度偏差）的最主要原因是 X 軸上的反向間隙誤差。

循圓測試儀測試僅需數分鐘便可完成，並且可立即得到診斷結果。

它還可以獲得與「圓形-菱形-方形」測試相同的詳盡結果，但這發生在切削金屬之前，因此可節省寶貴的時間和金錢。

## 進階循圓測試儀的測試設定

在「圓形-菱形-方形」加工測試前執行循圓測試儀做測試時，應按以下方式設定：

- 循圓測試儀測試半徑。**所選測試半徑最好應使測試圓的大小與「圓形-菱形-方形」測試件相似。Renishaw 的標準循圓測試儀元件支援 100、150、250、300、400、450、550 和 600 mm 的測試半徑。循圓測試儀校正塊支援 100/100、150 和 300 mm 的測試半徑。可選的小圓適配器元件支援 50 mm 的半徑，並包括一個 50 mm 循圓測試儀校正塊。受上述約束條件以及 ISO 10791-7 測試件尺寸的限制，建議採用圖 11 所示的循圓測試儀測試半徑。

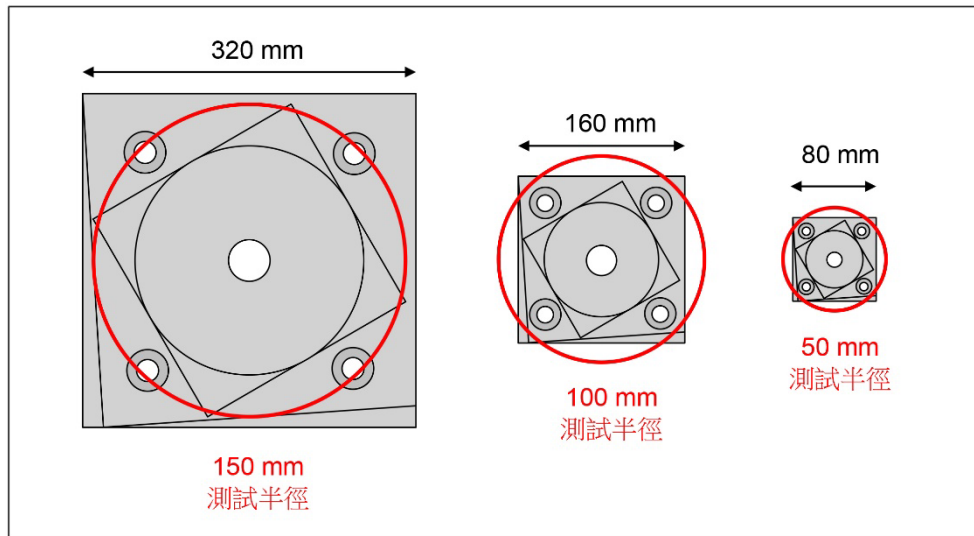


圖 11 — ISO 10791-7 標準中的 80、160 和 320 mm 測試件所對應的推薦循圓測試儀測試半徑

- **循圓測試儀長度校正。** 測試開始前，最好使用循圓測試儀校正塊對循圓測試儀長度進行校正，這樣可確保分析結果包括位置公差結果。此外，最好在循圓測試儀軟體中輸入測試件材料的膨脹係數及測試時可能所處的溫度，以便進行材料膨脹補償。

註：如果加工一個 ISO 10791-7 測試件，且孔 D1、2、3 和 4 的目標位置公差為 0.050 mm，則材料膨脹補償並不重要。因此，如果您不確定膨脹係數和溫度，可以將膨脹係數輸入為 0.0 ppm/°C，將材料溫度輸入為 20 °C。

- **測試位置** — 循圓測試儀測試的中心位置應與測試件所處位置相同。
- **測試進給率** — 循圓測試儀測試的進給率應與加工測試中的精切削進給率相同。
- **測試圓弧** — 選擇 360° 的測試圓弧，並帶有一些越程量（建議 45° 或 180°，以簡化編程）。這將確保可靠採集各軸的反向特徵。
- **測試執行次數** — 執行 2 次測試，一次順時針，一次逆時針。這將確保獲得完整的循圓測試儀診斷結果。

## 循圓測試儀資料分析

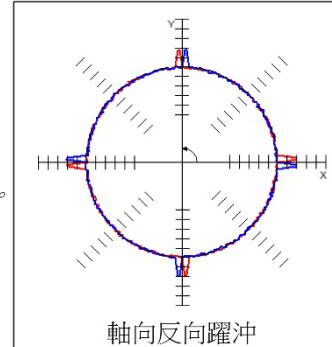
採集循圓測試儀資料後，應使用循圓測試儀機台誤差診斷軟體對其進行分析。通過將圖形圓度、診斷出的機台誤差和位置公差結果（見圖 8）與「圓形-菱形-方形」測試件的目標公差（見表 1）進行比較，可以預測\*切削測試中的潛在問題。

\*這裡需要注意一點。切削測試還包含額外的誤差來源，如主軸軸向、徑向跳動、機器振動、換刀重複誤差等，這些都不會包括在循圓測試儀測試中。兩種測試中的幾何誤差及其誤差大小也有所不同，因此，結果之間不存在直接的關聯性。然而，如果機台的循圓測試儀測試結果已表明加工的測試件將達不到所需的目標公差，則建議採取補救措施。



可以將循圓測試儀測試結果與目標切削測試公差作如下比較：

- **加工圓的圓度**。如果循圓測試儀測試結果顯示圓度誤差大於 ISO 10791-7 中圓 P 的目標圓度公差（或者 ASME B5.54 中輪廓加工圓 L 的目標圓度公差），則加工的圓可能將超差。
  - 使用「百分比」診斷頁（見圖 10）確定循圓測試儀測試圓度誤差的主要原因，並採取相應的補救措施。
  - 注意，如果循圓測試儀圓度誤差的主要原因是向外的軸向反向尖角較大，則加工圓的精度可能不會受到嚴重影響，這是因為刀具半徑的組合效應可能會消除這些尖角。（儘管表面粗糙度可能會出現明顯的瑕疵）。



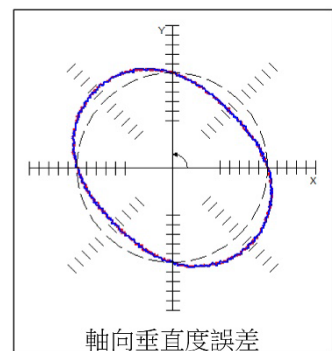
- **位於四角的各孔的位置公差**。將循圓測試儀位置公差結果（見圖 8 — 「數值」診斷頁）與位於四角的各孔所需的目標位置公差進行比較。如果循圓測試儀測試結果是目標位置公差值的兩倍以上\*，則可能四個鏜孔中的一個或多個孔的位置將超差。
  - 使用「百分比」診斷頁（見圖 10）確定主要誤差源，並採取相應的補救措施。

\*註：循圓測試儀測試的位置公差提供的是測試圓內任意位置的 2 個特徵之間可以達到的位置度估算值，而 ISO 10791-7 和 ASME B5.54 的目標公差是相對於中心孔定義的，因此特徵間誤差值及許多其他機台誤差值將減半。

- **加工面的角度精度**。將循圓測試儀測試的垂直度診斷結果（見圖 8 — 「數值」診斷頁）與加工菱形、方形和 93° 面的目標角度公差進行比較。這需要將 ISO 10791-7 中的「指示器讀數」公差轉換為以  $\mu\text{m/m}$  或弧秒為單位的角度，以便與循圓測試儀診斷結果匹配。

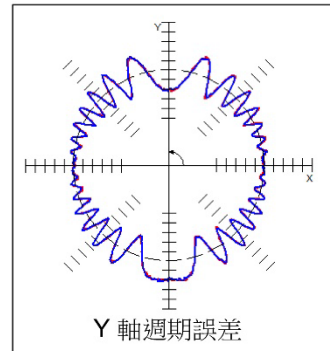
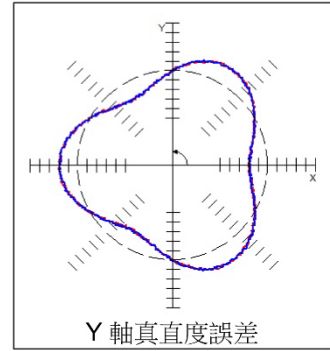
例如，320 mm ISO 測試件的 H 側與基準平面 B 之間的垂直度公差為 0.02 mm，H 側長 320 mm。因此，320 mm 長度上的 0.02 mm 公差相當於角度偏差為  $0.02/320 = 62.5$  微弧度  $\mu 13$  弧秒。

- 如果循圓測試儀測試診斷出的垂直度誤差超過目標角度公差，則加工面的角度可能會超差。可能需要調整或補償機台的垂直度。



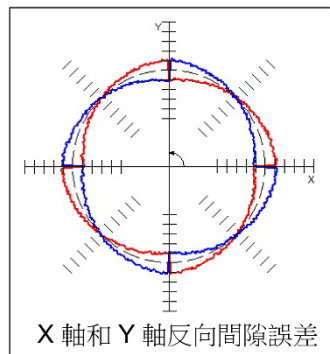
- **加工面的真直度**。將循圓測試儀測試的真直度診斷結果（「數值」診斷頁）與加工菱形、方形以及  $3^\circ$  面和  $93^\circ$  面的目標真直度公差進行比較。

- 如果循圓測試儀測試診斷出的真直度誤差超過目標真直度公差，則加工面可能會超差。可能需要調整或補償軸導軌真直度。
- 如果循圓測試儀測試診斷出的軸週期誤差超過各菱形面的目標真直度公差，則可能會導致這些加工面的真直度出現問題。注意 — 週期誤差不會影響各方形面的真直度，也不太可能影響  $3^\circ$  面和  $93^\circ$  面。



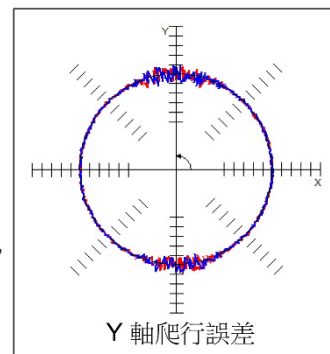
- **四角各孔中的沉孔的同軸度**。ISO 10791-7 和 B5.54 均規定，鏜孔位置的接近方向必須與沉孔位置的接近方向相反。因此，將 X 軸和 Y 軸的橫向間隙和反向間隙診斷值（見圖 8 — 「數值」診斷頁）與四個角上的鏜孔和沉孔所需的同軸度公差進行比較，會非常有用。

- 如果循圓測試儀診斷出的反向間隙或間隙誤差超過目標同軸度公差，則這些孔的同軸度可能不符合規格。可能需要調整或補償軸反向間隙並/或調整導軌間隙。



- **圓以及  $3^\circ$  面和  $93^\circ$  面的表面粗糙度**。加工  $3^\circ$  面和  $93^\circ$  面時，一個軸以近乎編程設定的進給率運動，而另一個軸大約以該進給率  $1/20$  的速度運動。如果軸潤滑或間隙有問題，則移動較慢的軸可能會出現爬行運動，導致  $3^\circ$  或  $93^\circ$  加工面的表面粗糙度出現問題（極端情況下甚至會影響真直度）。加工圓的軸換向區域附近也可能會出現表面粗糙度問題。

- 如果循圓測試儀軌跡顯示任何軸換向點附近的雜訊過大，則表明其中一個軸出現爬行運動，可能需要調整該軸導軌的潤滑或間隙。



上述部分說明了如何在進行任何切削測試之前，使用循圓測試儀來檢查機台的潛在問題。一旦問題解決，則可以根據需要進行切削測試，此時測試將具有更高的可信度。

## 使用循圓測試儀測試的優點

- 可以在切削金屬之前發現潛在的問題，進而節省時間和成本。
- 如果發現問題，循圓測試儀診斷軟體可以突出顯示需要注意的機台區域。
- 循圓測試儀還可用來測試大型機台，這類機台可能沒有尺寸合適的測試件。（連接延長桿後，QC20 循圓測試儀的測試半徑可達到 1350 mm）。
- 循圓測試儀的測試速度非常快，因此可定期重複測試，以建立機台性能歷史記錄，這樣便可在問題真正變得嚴重之前，確定趨勢並安排維護工作。圖 12 所示為 Renishaw 循圓測試儀軟體提供的一份機台性能歷史記錄圖。該軟體可繪製圓度、垂直度、反向間隙等任何診斷特徵隨時間變化的圖表。

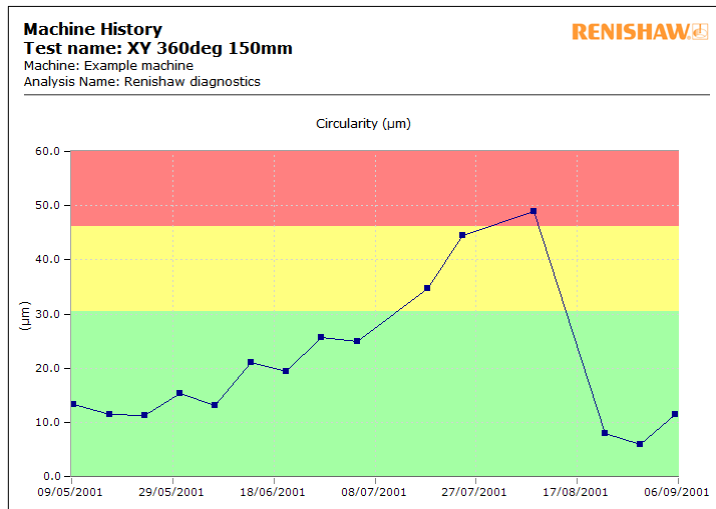


圖 12 — 機台性能歷史記錄圖

## 切削測試的優點

切削測試對循圓測試儀無法檢測的其他誤差源非常敏感，例如：

- 主軸問題（校準、振動、軸承磨損等）
- 切削負載引起的機台變形
- 刀具震顫和冷卻液問題等引起的其他表面粗糙度問題
- 換刀重複性問題（B5.54 要求在加工四角各孔中的每個鏜孔和沉孔之前換刀）

## 結論

本白皮書概述了「圓形-菱形-方形」加工測試及其用來評估機台性能的量測值。文中介紹了如何在執行實際金屬切削測試之前，利用 Renishaw 循圓測試儀系統和診斷軟體對機台性能進行深入的分析了解，進而節省時間和成本。

在對初始機台性能進行基準測試後，還可持續利用循圓測試儀來監控機台性能的變化趨勢，以在實際問題出現之前便可妥善安排維護工作。

## 註腳 1 — ASME B5.54 建議

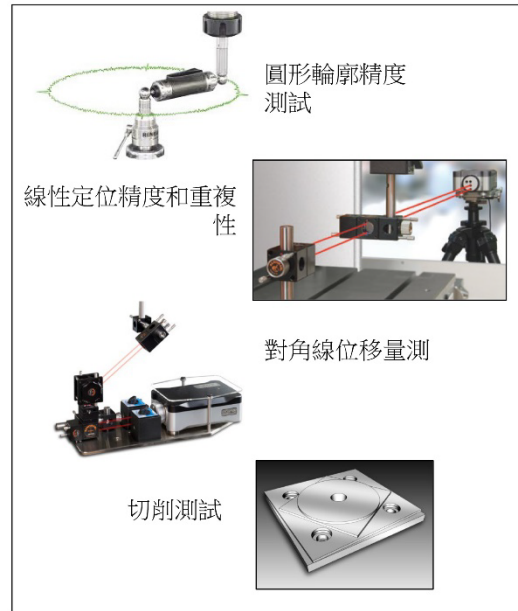
值得注意的是，ASME B5.54 附錄 A3<sup>11</sup> 提出了合理建議，推薦了以下快速評估 3 軸機台性能的最小測試集：

**A3.1 輪廓加工性能測試**，使用伸縮式循圓測試儀等，在 3 個平面中進行圓測試。

**A3.2 各軸線性定位精度和重複性測試**，使用雷射干涉儀等。

**A3.3 沿 4 條體對角線進行對角線位移測試**，使用雷射干涉儀。

**A3.4 精密輪廓加工測試**，包括經典的「圓形-菱形-方形」測試等。



## 註腳 2 — 錐體切削測試

圖 13 — B5.54 推薦的測試集

NAS979、B5.54 和 ISO 10791-7 標準還介紹了 5 軸機台的錐體切削測試。該測試包括同時移動 5 個軸來加工一個傾斜的平頭錐體測試件（如圖 14 左側示意圖所示）。

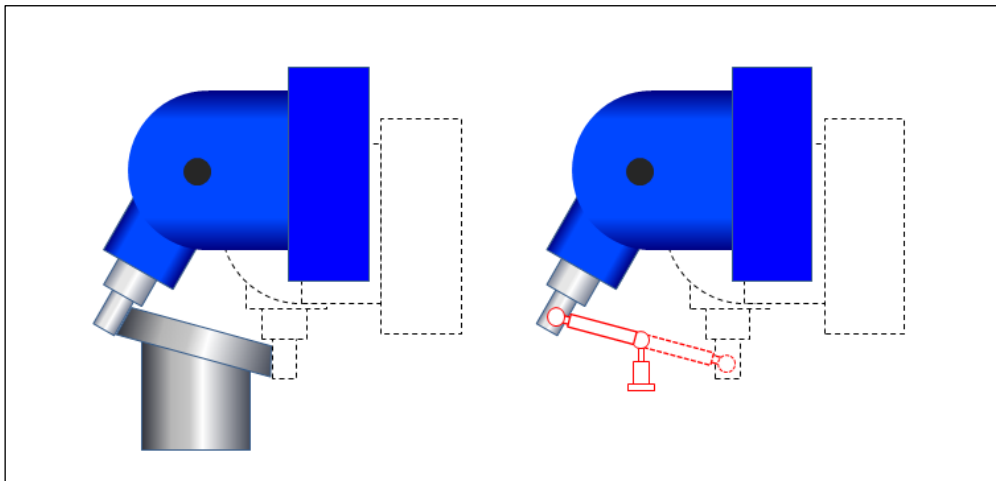


圖 14 — 5 軸機台平頭錐體切削測試

透過使用圖 14 右側所示的循圓測試儀設定，可以用循圓測試儀來評估機台能夠實現的平頭錐體的加工圓度。循圓測試儀分析軟體將正確計算該圓度，但由於該軟體僅設計用於診斷 3 軸機台測試中的問題，因此需要仔細解讀機台誤差診斷結果。


## 參考文獻

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.tw/contact](http://www.renishaw.com.tw/contact)



#renishaw

 +886 4 2460 3799

 [taiwan@renishaw.com](mailto:taiwan@renishaw.com)

© 2013-2023 Renishaw plc 保留所有權利。未經 Renishaw 事先書面同意，不得複製或再製本文件之一部分或全部，或以任何方式轉移至任何其他媒體或語言。

RENISHAW® 及測頭標誌為 Renishaw plc 註冊商標。Renishaw 產品名稱、命名及「apply innovation」標記為 Renishaw plc 或其子公司商標。其他品牌、產品或公司名稱為各自所有者的商標。

儘管本公司於發布本文件時已盡相當之努力驗證其正確性，於法律允許範圍內，本公司概不接納以任何方式產生之擔保、條件、聲明及賠償責任。RENISHAW 保留對本文件及設備、和/或本文所述軟體及規格進行變更之權利，恕不另行通知。

Renishaw plc 於英格蘭及威爾斯註冊登記。公司編號：1106260。註冊辦公室：New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK。

文件編號：H-5650-2062-01-A

發布日期：01.2023