

## 白皮书

# 核心要素 — 坐标测量机专用测针选型指南

当需要确定在坐标测量机 (CMM) 上测量工件的最佳方法时，许多选择是默认的，因为它们之前已经经过多次深思熟虑。坐标测量机的精度指标、使用的最佳传感器类型（触发或扫描）以及最优测量方法经常被想当然地认为是正确的，不再受到质疑。然而，精确测量的这一基础可能因为选择了不合适的测针而受到破坏，结果影响了测量精度。



在评估坐标测量机的测量结果需要如何精确时，通常的做法是采用至少 1:5（1:10 是理想的比率，但过于昂贵，在许多场合不可行）的坐标测量机不确定度和特征公差比。此比率提供了一个安全系数，确保测量结果不确定度与预期工件误差范围的比率相对较小。只要在极严格的公差水平上能够保持 1:5 的比率，有关精度的争论就会止息。

遗憾的是，诸如更换测头上的测针这种不起眼的操作都会对可能实现的实际精度造成巨大影响，导致测量结果发生显著的变化。依赖坐标测量机的年度校准检查此精度是不够的，因为这只能确认测试（通常时间极短）所用测针的测量结果。这可能只是最好的一次精度。为了更全面地了解各种测量的可能精度，我们需要评估测针是如何影响测量不确定度的。



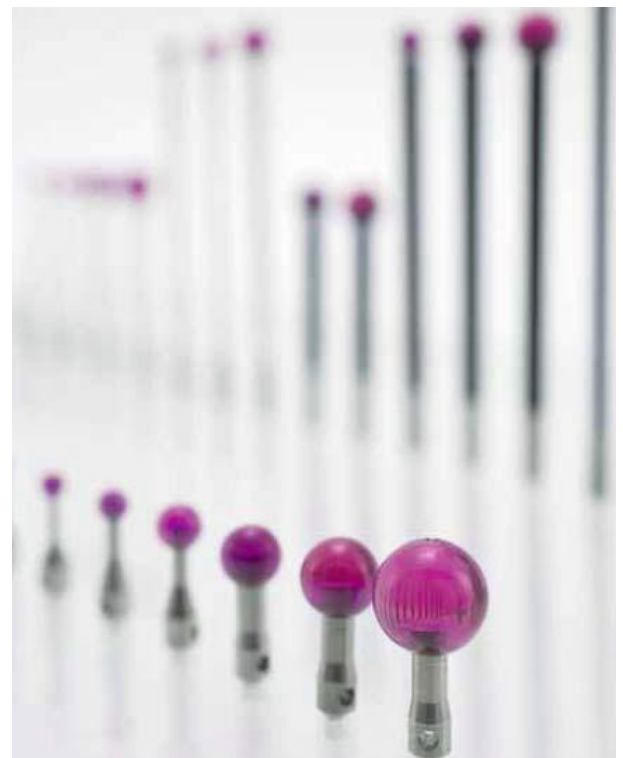
测针规格和配置可能影响测量结果的精度。

本白皮书将阐述影响坐标测量机总体精度的测针选型的四个主要方面：

1. 测球球度（圆度）
2. 测针变形
3. 热稳定性
4. 测尖材料选择（扫描应用）

### 1. 测球球度（圆度）

大多数测针的测尖是一个球头，最常见的材料是人造红宝石。此类测尖球度（圆度）的任何误差都可能成为坐标测量机测量不确定度的一个影响因素，这很可能造成坐标测量机精度降低 10% 之多。



球形红宝石测尖

红宝石测球有各种定义为“等级”的精度级别，指的是测球与理想球面的最大偏移量。两种最常用的测球指标是 5 级和 10 级（等级数字越低测球越好）。测球等级由 5 级“降到”10 级，测针可能会节约些许成本，但极有可能影响到所谓 1:5 比率的理论。问题

是，测球等级无法用肉眼识别，在测量结果中所起的作用并不明显，因此难以估计它是否重要。一种办法是，将 5 级测球指定为标准配置：这种测球成本也许略高了一点，但相比由于测球原因导致合格零件变成废品，或者将不合格零件误测为合格零件的高风险，这点成本是微不足道的。不合常理的是，坐标测量机精度越高，测球等级的影响越大。在最高规格的坐标测量机上，这种影响会使精度削弱达 10%。请看以下示例……

符合 ISO 10360-2 ( $MPE_P$ ) 的典型测量误差，用配 5 级测球的测针测得：

- $MPE_P = 1.70 \mu m$

此数字通过测量 25 个离散点得出，每个离散点都被估计为 25 个单独的半径。半径的变化范围是  $MPE_P$  值。测球圆度对此产生直接影响，而在本示例中把 5 级测球换成 10 级使该值增加了  $0.12 \mu m$ ，并使测量误差增加了 7%：

- $MPE_P = 1.82 \mu m$

请注意：测球圆度也会对  $MPE_{THP}$  产生影响， $MPE_{THP}$  使用球面上的 4 个扫描路径评估扫描测头的性能。

注：

- 5 级测球球度 =  $0.13 \mu m$
- 10 级测球球度 =  $0.25 \mu m$

对于要求极为严格的应用，雷尼绍提供一系列配用球度只有  $0.08 \mu m$  的 3 级测球的测针。

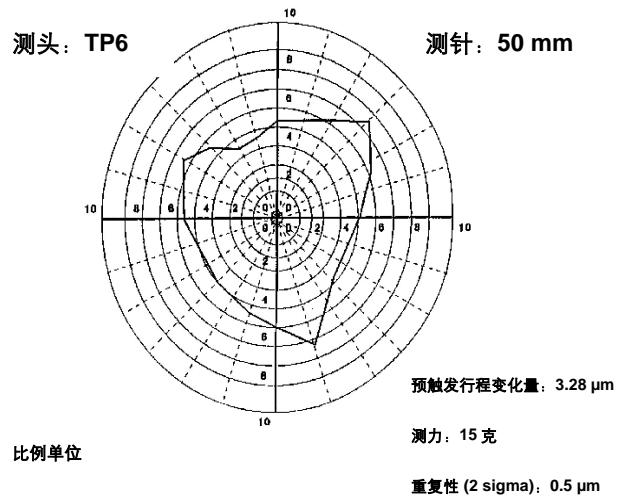


## 2. 测针变形

使用触发式测头时（例如行业标准的 TP20），常见的做法是交换测针模块，利用经过优化的不同测针执行不同测量任务。之所以不在所有特征测量中都使用长测针，是因为测针越长，精度损失就越大。一个好方法是尽可能选择短而且刚性强的测针——但为什么呢？

尽管测针不是此特定误差的直接原因，但误差确实随着测针长度的增大而增大。误差源自于需要在各个方向触发测头的不同测力。大多数测头不是在测针和工件发生接触的瞬间触发的；它们需要测力不断加大，以超过传感器机构内的弹簧负荷。此弹力迫使测针变形。此变形允许测头在发生物理接触后、触发生前相对于工件短距离移动。此移动即所谓的预触发行程。

大多数测头的三点机械定位机构可以根据要求提供不同的测力来产生触发。在刚性较硬的方向测头会阻挠触发，直到出现更大的测针变形量。这也意味着坐标测量机会移动更远，因此预触发行程因挺进角而异（见下图）。在使用复合挺进角（X、Y 和 Z 轴）时，此预触发行程变化更为复杂。



挺进角与 TP6 触发式测头的触发预行程比较。

为降低这种影响，所有测针使用前均在已知尺寸的标准球上标定过。在理想情况下此过程将对测针和挺进角合并造成的误差进行修正。在实践当中，为节省时间通常只抽查一些角，取平均数，故少量误差仍可能存在。

若不进行经验性测试，很难估计这些误差对测量不确定度的影响。需要注意的关键因素是，任何存留的预触发行程变化误差都会随不同的测针选择而受到影响。此处强调的是材料选择在测针设计中的重要性，诸如测杆抗挠刚性和重量及成本等其他特性。钢适合于许多较短的测针，其 Young 的模数  $E = 210 \text{ kN/mm}^2$ ，常用的刚性最强的材料是碳化钨 ( $E = 620 \text{ kN/mm}^2$ )，但这种材料密度很大，因此极少用于长测针。在这些实例中，碳纤维集刚性强 ( $E \geq 450 \text{ kN/mm}^2$ ) 和重量轻的特点于一体。与此同时，陶瓷测杆 ( $E = 300 - 400 \text{ kN/mm}^2$ ) 通常用于机床测量应用中，这种材料具有重量轻和热稳定性高的优点。



如果保持精度，复杂测针配置要求精心挑选材料。

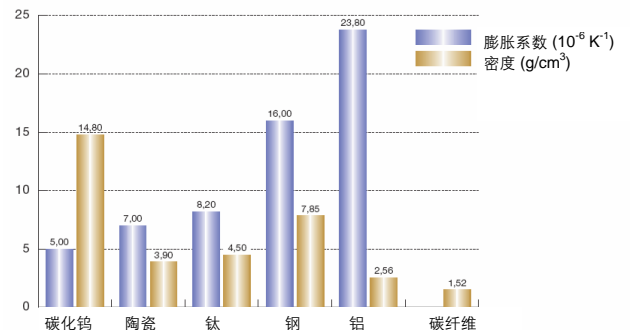


长测针和加长杆通常由具有最佳刚性和重量的碳纤维制成

测针刚性也受到测针组件转接头的影响。作为指导原则，最好尽量避免使用转接头，因为它会引起迟滞，不过在使用固定传感器测量复杂工件时转接头可能无法避免。在这些情况下，可能需要由一系列测针、加长杆、接头和关节所组成的配置。再次强调，选择测针材料时进行周全的考虑是非常重要的，因为这会对测针配置的刚性、重量及坚固性产生影响。

### 3. 热稳定性

温度变化可能导致严重的测量误差。选择正确的测针加长杆材料，保证在温度变化的条件下也能提供更好的稳定性，实现更可靠的测量结果。具有低热膨胀系数的材料更可取，特别是在使用长测针的场合，因为热膨胀量与测针长度相关。



测杆材料的相关热膨胀系数和密度

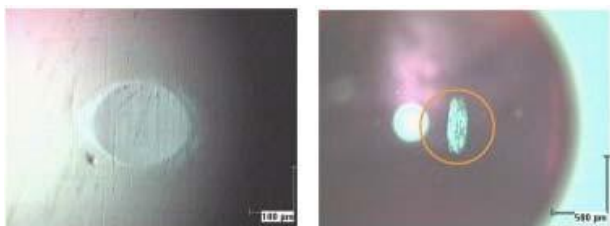
如上文所述，碳纤维是长测针和加长杆的最常用材料，因为此材料刚性强、重量轻，并且长度不随温度的变化而变化。在需要金属材料的场合 — 如接头、关节等 — 钛在强度、稳定性和密度方面提供了完美的组合。雷尼绍提供采用这两种材料制成的测头和测针加长杆。

#### 4. 测尖材料选择

对于大多数应用，红宝石测球是测尖的默认选项。但在某些情况下其他的材料可提供更好的选择。

在触发测量中，测尖只与工件表面短间接触，而没有相对移动。扫描则与之不同，因为测球沿着工件表面滑动，并引起摩擦磨损。在恶劣状况下，这种持续接触可能造成工件材料脱落或附着在测球上，进而影响测球球度。如果测球的某个部分与工件持续接触，这些影响会增大。雷尼绍对这些影响进行广泛的研究，重点确定了两种磨损类型：

- 在扫描表面时（例如铸铁表面），极小的残留微粒可能造成球形测针和工件表面出现细小划痕，导致测尖上出现小“浅坑”，这种磨损称为**摩擦磨损**。坚硬的氧化锆测尖是这些应用场合的最佳选择。



摩擦磨损（左）导致材料脱离测尖，而粘附磨损（右）导致表面材料附着在测球表面。

- 当测球和工件彼此之间有化学亲和力和力时会出现**粘附磨损**。当用红宝石（氧化铝）测球扫描铝质工件时可能出现这种现象。

#### 结论

测针在任何测量中都是关键因素，它在传感器和组件之间提供了关键的连接点。它们能够测量工件周围的特征，而且必须把表面位置正确地传递给测头。要执行精确的测量，测针必须由精密部件组装而成，每种部件的材料都应符合测量任务的要求。如果精心选择，合适的测针不会显著增加不确定度，反而会提供一致可靠的结果。在工件公差严格并且需要较长测针的场合，必须认真考虑这些选择对精度的影响。

材料从较软的工件传递到测针上，导致测尖上形成一个铝涂层，进而影响了其圆度。在这种情况下，最佳选择是氮化硅，因为它具有良好的耐磨性能，而且不与铝发生吸附。

#### 5. 其他因素

选择测针的其他考虑因素包括：

- 测针螺纹尺寸，与所选传感器相适应
- 测针类型 — 直测针、星形测针、可旋转测针或自定义配置
- 测尖类型 — 球形、柱形、盘形、半球形
- 测尖尺寸，使表面粗糙度对测量精度的影响降至最低

这些问题在雷尼绍的《精密测针》样本中均有详细阐述（文档编号 H-1000-3309），如需下载，请点击 [www.renishaw.com.cn/styli](http://www.renishaw.com.cn/styli)

