

触发式测头的创新传感技术

摘要

自二十世纪七十年代触发式测头发明以来，测头已经成为坐标测量机 (CMM) 和机床尺寸测量的主要传感手段。如今，越来越多坐标测量机使用扫描式测头来测量复杂形状和表征棱边工件的形状；然而，在使用坐标测量机进行工件尺寸和位置检测、或使用机床进行工件找正和序中测量时，触发式测头依然发挥着重要作用。

本文将介绍两项关键的触发式测头技术 (机械式电阻测头和应变片式测头) 的性能特点，重点说明这些测头的发展如何让制造商不断获益。

机械式电阻测头

触发式测头的基本要求有：

- **柔性缓冲性**，使测针在接触工件表面时弹性偏转，对工件施加较小的力，并为机床减速提供时间，然后再使测针从工件表面回退
- **机械重复性**，当测针不与工件接触时返回到相对于机床轴套/主轴的初始位置
- **电气重复性**，无论在哪个方向，测头始终以相同的测针偏折度触发

触发式测头采用杆和小球珠的弹簧承载机械安装方式，如图1所示。这种安装方式形成了六个接触点，可确保测针架固定在一个独特的位置上，并具有优异的重复性。当测头的测针接触工件时，该机械结构可使测针发生弹性偏转，而测针离开工件表面时，结构内的弹簧则可使测针复位。

测头的接触元件由非常坚硬的碳化钨制成，可确保接触面非常小（接触面处的材料在弹簧作用下发生弹性变形）。电流流过接触点形成电路，而测头的电子元件则测量该电路的电阻。

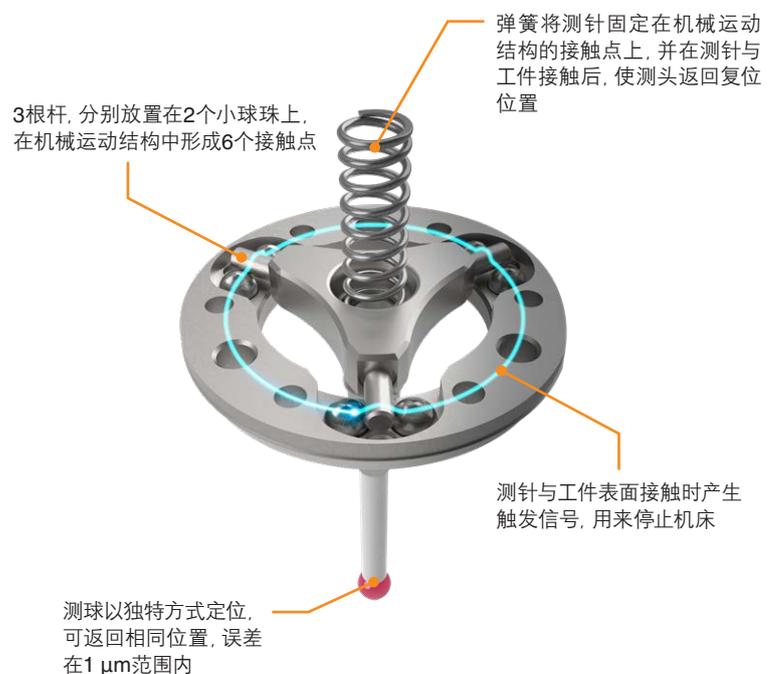


图1：机械式电阻测头示意图

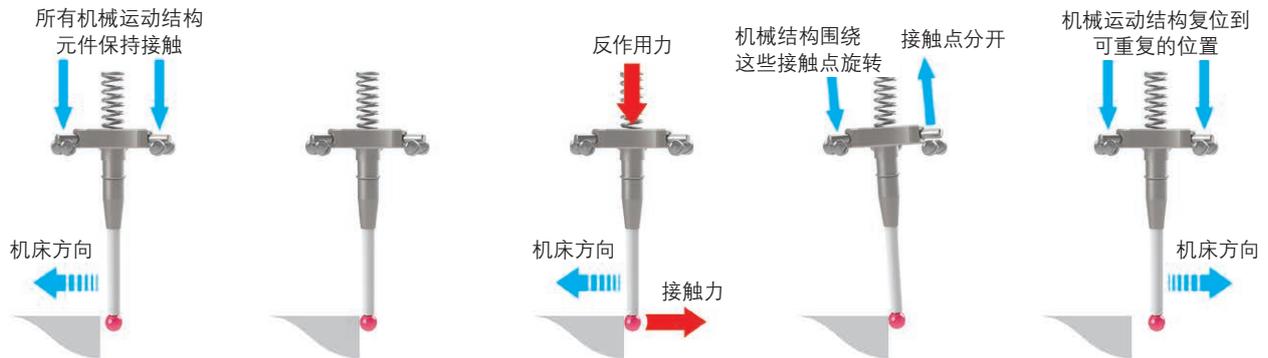


图2: 机械式电阻测头生成触发信号的方式

图2展示了信号的触发机制:

1. 当测头的测针移向工件时, 弹簧使所有机械运动结构元件保持接触, 测针处于相对于轴套/主轴的初始位置。
2. 测针接触工件表面。
3. 机床结构元件继续移动驱动测针与工件接触, 测头机械结构中的力随之开始增加。测针测尖处的接触力在测头机械结构中产生一个围绕结构左侧的一组接触点旋转的力矩; 弹簧围绕同一组接触点旋转所产生的反作用力矩, 会平衡该力矩。随着这些力的增加, 测针会发生弯曲 (图中显著夸大了弯曲幅度作说明用)。
4. 接触力力矩不断增大, 超过了反作用力矩, 测头机械结构开始围绕左侧的接触点旋转; 而令右侧的接触点组分开, 从而断开测头中的电路。在此之前, 测头便已会生成触发信号 (参见下文的电气开关部分), 用来锁存机床实时的位置, 并命令机床减速并从工件表面回退。
5. 当机床回退并离开工件表面, 测头便复位到其可重复的静止位置。

电气开关

电流流经机械运动结构元件的接触点形成电路。小球珠底板与碳化钨小球珠彼此绝缘, 杆与测针架也彼此绝缘 (见图3a)。小球珠底板中的导线在各组接触点之间传递电流。

在弹簧的作用下, 接触元件发生弹性变形 (见图3b), 形成小的椭圆形接触面, 电流可以流过这些接触面。每个接触面上的接触电阻与接触面的面积成反比。测针接触工件时, 接触力会增加, 测头机械结构中产生的反作用力矩会导致一些接触元件之间的受力增加, 而其他接触元件之间的受力会减小。随着两个接触元件之间的受力减小, 接触面的面积也会减小, 这些元件之间的电阻因此增大。由于全部六个接触面用导线串联在一起, 它们中受力最小的接触面对测头电路的总电阻有很大的影响。

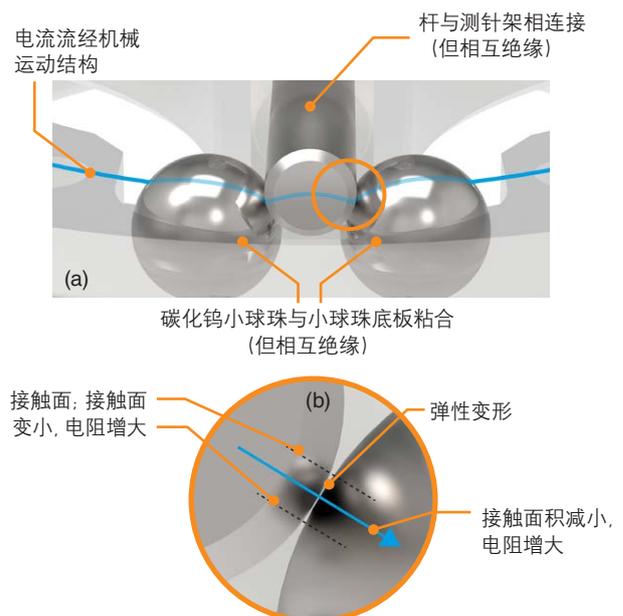


图3a和3b: (a) 电流流经机械运动机构, 和 (b) 元件间接触面的特写

当电阻达到某个阈值时，测头的输出设为“已触发”（见图4）。至关重要的一点是，触发时小球珠和杆仍保持接触，因此测针能够位于确定的位置，从而获得具有重复性的测量结果。

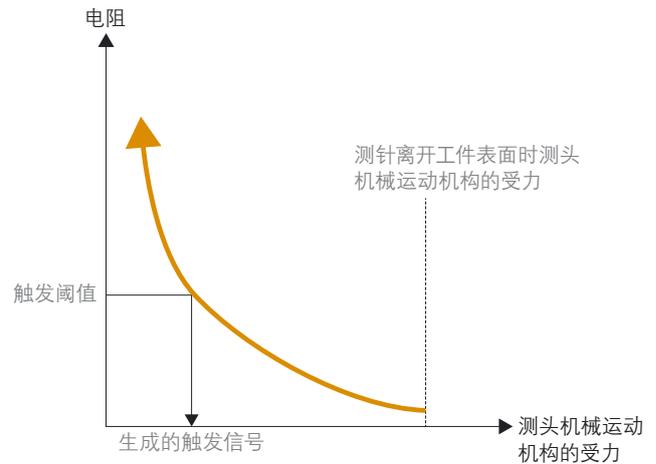


图4：当测头电路电阻超过阈值时，生成触发信号

影响机械式电阻测头性能的因素

预行程

测针接触工件表面时，会建立起力的平衡。在达到触发阈值之前，这些力不断增大，导致测针弯曲。由于机床仍在运动，测针在测头触发前的弯曲量会影响测头触发时刻记录的机床锁存位置。

触发之前的测针弯曲称为预行程。如图5所示，预行程取决于 F_c 、 L 以及测针的刚性，公式如下：

预行程 = $F_c \cdot L^3 / 3EI$ （其中 E 是测针测杆材料的杨氏模量， I 是转动惯量）。

在接触元件分开之前，力的平衡如下：

$$F_c \cdot L = F_s \cdot R$$

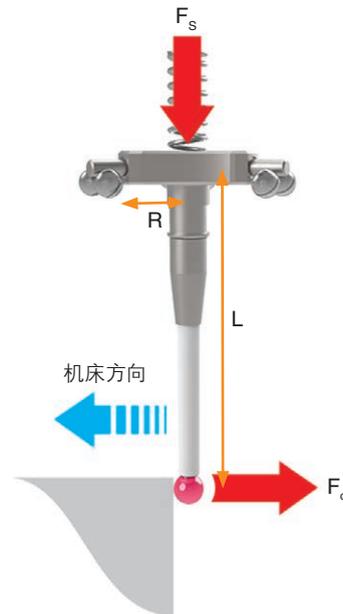


图5：触发式测头中力的平衡

预行程变化（各向异性）

机械式电阻测头的各组接触点形成三角形布置，这意味着枢轴距离 R 会因应根据接触力相对于测头结构的方向而变化。对于某根特定的测针（即 L 为常数），接触力 F_c 与 R 成正比。

图6显示了特定测针的接触力随接触方向的变化。在低触发力方向 (F_L)，接触支点距离 R 约为高触发力方向 (F_H) 距离的一半。图7a和7b详细说明了这一点。因为 $R_1 > R_2$ ，所以 $F_{c1} > F_{c2}$ 。在高触发力方向，需要更大的接触力才能达到触发阈值，因此这个方向上的预行程更大。触发力变化导致了一个现象，即**预行程变化 (PTV)** 或各向异性。

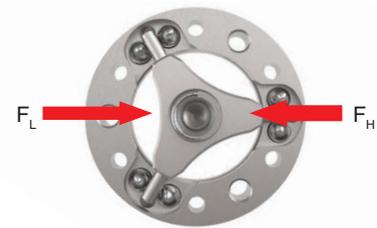


图6: 高触发力和低触发力方向

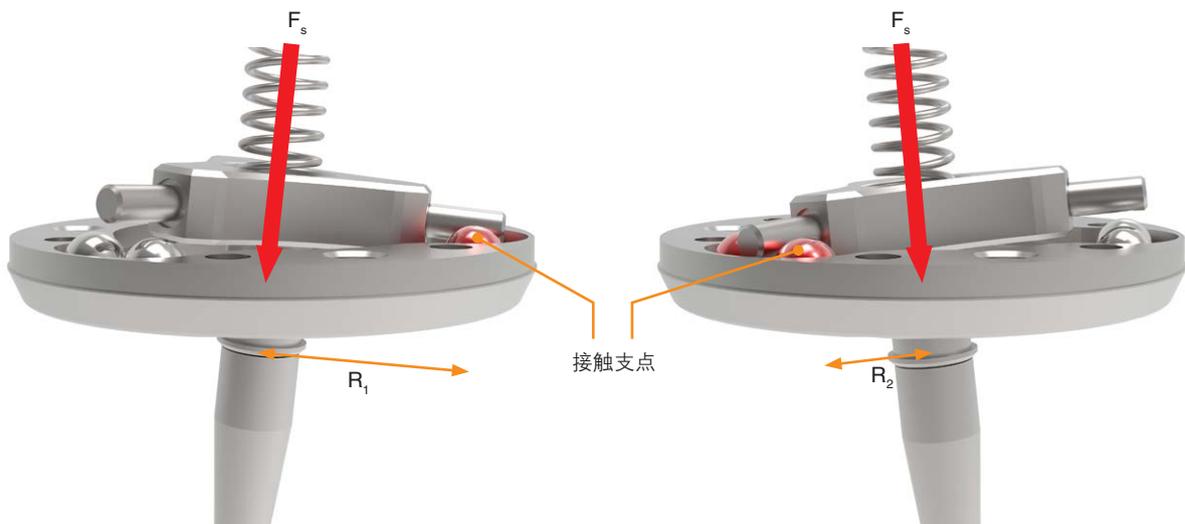


图7a: 在高触发力方向，接触支点离测针中心线较远

图7b: 在低触发力方向，接触支点离测针中心线较近

图8所示为TP6机械式电阻坐标测量机触发式测头的典型XY预行程图。可以看到，这三个高触发力方向是图中的三个峰值点。在本例中，预行程的最大变化约为 $3.3 \mu\text{m}$ 。

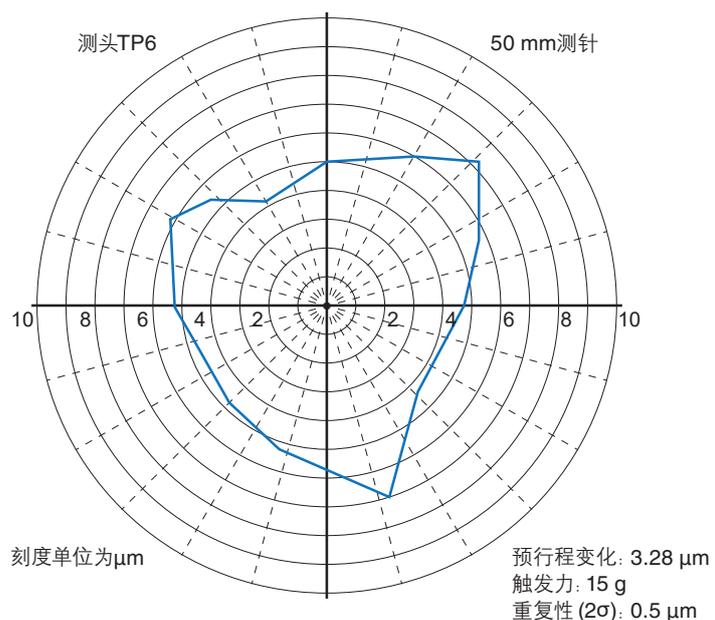


图8: TP6坐标测量机测头的预行程变化图

XYZ预行程变化

预行程不仅存在于XY平面，也存在于Z方向。由于测头弹簧在Z方向上没有杠杆作用的机械优势，所以接触力与弹簧力相同（见图9）；因此，Z方向的触发力比XY平面的触发力要大很多。由于在Z方向上触发时，测针处于压缩状态，因此它的有效刚度很高，这意味着此方向的预行程通常比XY平面小很多。

机械式电阻测头将表现出三维（XYZ）的预行程变化（PTV），即XY平面和Z轴预行程影响的组合。测量复杂表面时，这是一个很重要的特性。



图9: Z方向上力的平衡

测头标定

由于很容易通过测头标定来补偿，预行程本身并不是一种误差。要确定相关测针的平均预行程，便需测量已知尺寸和位置的基准特征。标定完成后，影响测量精度的关键因素便是测头的重复性（见下一节）。

然而，这种方法存在一些限制：复杂工件可能需要多个测头测量方向。如果测头/测针组合的PTV值足够低，其对测量精度的影响或许可以接受，然而，如果可能的测量误差较大导致结果难以接受，便需要在使用测头的各个方向上进行标定。

重复性

测头每次在相同的点触发的能力称为重复性。这是一项随机误差，用于机床的机械式电阻测头在测针测尖处的重复性通常在 $1.0\ \mu\text{m}$ (2σ) 以内。许多坐标测量机机械式电阻测头的重复性可达 $0.35\ \mu\text{m}$ (2σ)。需要注意的是，这些是在测试装置上测得的数值，并不一定代表系统的测量重复性。从测头发触发信号到锁存机床位置，这段时间内的任何变化都会导致重复性的下降。坐标测量机的控制器设计已优化了测头输入的信号，但对于数控机床来说，情况并非总是如此。

其他一些因素也会影响机床测头的测量重复性，包括：

- **采样频率** — 在坐标测量机上，当测头发出发信号时，控制器通常会实时中断当前操作进行处理，而有些数控机床配备了高速跳步输入，能够尽量降低触发点位置的不确定性。然而，有些数控机床仅每隔几毫秒对测头的输入信号进行一次采样。
- **传输重复性** — 向控制器传输测头发信号所需时间的变化。雷尼绍光学和无线电传输技术的设计具有较短且高度可重复的延迟。

滞后

前一次测头触发的方向会对当前的测头触发位置产生微小影响，这与滚珠丝杠结构中的反向间隙类似。当测头测量移动方向在XY平面上与前一次测量方向相反时，滞后达到最大。这种影响随着测针长度和接触力的增加而增强。然而，测头的机械运动结构会将滞后效应降到最低，因此它对测头单向重复性的影响通常很小。

性能因素（按重要性排序）

1. 重复性

这是所有触发式测头的关键性能要求，代表了系统性能的基本极限。滞后现象对重复性也有一定影响。

2. 预行程变化

如果所有测头测量方向都是已知的，这个因素则可通过标定来消除。如果在未经验证的方向使用PTV值较高的测头，那么测量精度会降低。在机械式电阻测头中，PTV随着测针长度的增加而迅速增大。

3. 滞后

这个因素对带有机运动机构的测头影响较小。

应变片式测头技术

应变片式测头技术是一种相对新型感应技术，突破了机械式电阻触发测头机制的性能局限。应变片式测头技术将现代微电子技术与固态感应技术相融合，搭载应变片技术的雷尼绍测头，其直径可小至13 mm。

尽管应变片式测头仍然使用机械运动结构来固定测针，但它并不通过接触元件的电阻变化来感应测针是否已触发。取而代之的是，一组应变片被放置在测头机构内精心设计的砷型台上，并且位于机械运动机构上方（见图10）。这些应变片测量施加在测针上的接触力，当应力超过阈值时，即产生触发信号。此类测头具有低触发力，而且由于其感应并不依赖机械运动机构，因此所有方向的触发特性都是一致的。

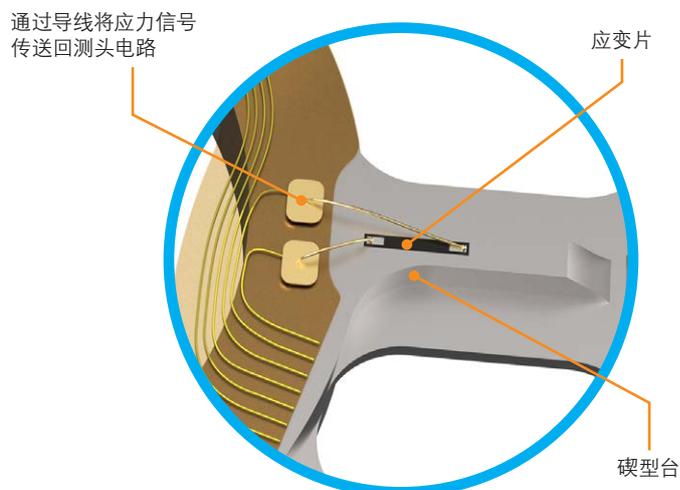


图10: 安装在测头内部砷型台上的应变片

测量接触力

图11所示为应变片式测头的示意图。在低接触力条件下，机械运动结构保持就位状态，接触力通过它们传递到测头的机械传感结构平台上。纤薄的碟型台上装有应变片，三个测量应变片的位置已对准，可对X、Y和Z轴方向的接触力进行感应。它们会检测机械传感结构平台中的应力，并将其输出值相加，一旦在任何方向超过阈值，就会产生触发信号。此阈值通常只有几克，远低于同等电阻式传感器上的触发力。

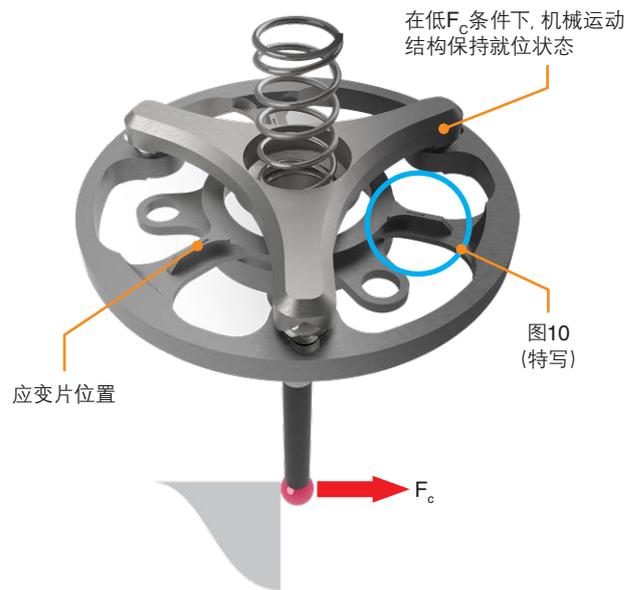


图11: 应变片式测头的接触力测量示意图

应变片对机械传感结构上的应力非常敏感，即使在测针未接触工件表面时，它们也能检测到机床上的振动。测头内部的滤波电路可以确定在应变片上检测到的应力，是否是由于测针真正持久偏折所导致。为此，从第一次超过触发力阈值的那一刻起，在检测电路中便会插入一个较短且高度可重复的延迟，在此延迟周期结束前，测头必须检测到持续且不断增加的应力，才会发出触发信号。

排除错误触发、提供具有重复性的测量结果

图12a展示了一种情况：由于机床振动，导致应变片输出值存在显著噪声。在这种情况下，某个特定的振动超过了阈值，固定延迟计时器开始计时。然而，应力又降至阈值以下，并保持较低水平，因此到延迟周期结束时，测头的电子元件能够识别出没有发生真正的触发，所以不会发出触发信号。

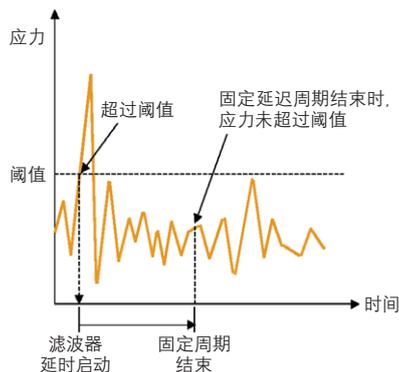


图12a: 随机振动超过应变片应力阈值——不会发出触发信号

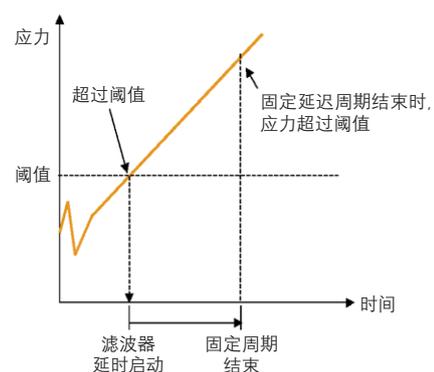


图12b: 测头触发产生的持续接触力超过了应变片的应力阈值——延迟周期结束时发出触发信号

图12b则显示了测针接触工件表面的情况。一旦测针接触工件表面，随着应变片对接触力进行测量，随机振动会被迅速抑制。在应变片上检测到的应力持续上升，而且自计时器启动后，应力不会再降到阈值以下。当此可重复的延迟周期结束时，测头便会发出触发信号。

通过测头标定, 很容易便可消除这种可重复延迟带来的影响; 标定带来的最终效果是测球的半径明显减小, 减小幅度相当于固定延迟周期期间机床移动的距离。只要在这个周期中机床匀速移动, 测量重复性便不受影响。这意味着, 标定测头时必须以与测量相同的编程进给率, 令应变片式测头只适用于自动化坐标测量机和数控机床。另一个需考虑的因素是编程的目标位置, 即在测头测量循环期间, 机床依据编程设定移动到预期工件位置之外的点。工程师必须确保机床向目标点移动时, 不会在测针接触到工件表面之前开始减速。因此, 过行程距离必须同时考虑到工件表面位置可能的变化以及机床的减速性能。

性能优势

图13所示为OMP400触发式测头以30°为增量围绕一个圆采集12个点的典型预行程变化图。图中显示OMP400触发式测头的典型PTV图, 所有方向的预行程都很低, 而且几乎一致。使用50 mm测针时, XY平面中的PTV值仅为0.34 μm, 比类似尺寸的机械式触发测头的PTV值低大约90%。OMP400触发式测头的XYZ PTV值通常小于1 μm。

在要求更高精度的测量中, 尤其是在使用多个感应方向测量复杂工件时, 这些性能优势更为明显。低PTV值意味着可以使用简单的测头标定程序。

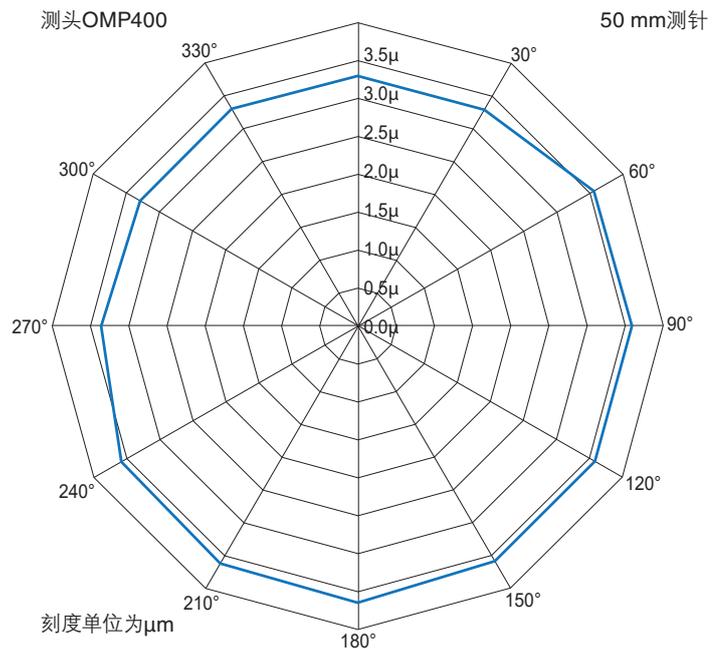


图13: OMP400触发式测头的预行程变化图

使用寿命和可靠性优势

应变片技术的另一个优点是使用寿命长 — 通常可达电阻测头的十倍以上。使用固态应变片技术的机械复位特点, 并不会降低测头机械运动机构的性能。反观电阻测头却会随着增加使用的时间, 而出现越来越多的复位故障的情况。电阻测头表面材料的微降解, 机械式结构接触元件中的电阻最终将无法降至阈值以下。此外, 与电阻测头不同, 应变片式测头不会出现因振动引起的误触发。由于具备这些特点, 应变片式测头非常适合高强度的触发式测头测量应用。

灵活性

机械式电阻测头的预行程变化会随着测针长度的增加而迅速增大（PTV与测针长度的立方成正比），这意味着使用的测针长度会被测量性能要求所限制。虽然在很多情况下，可以使用加长杆、可重复定位测座和/或较小的测头来克服这些局限，但某些检测应用仍必须要用到非常长的测针。使用应变片传感器的测头具有更低、更一致的触发力，支持更长的测针应用，提供更出色的测量性能。用于机床的RMP600测头（见图14），可以使用长达300 mm的测针，而测量性能仅有略微下降。

	测针长度	
	50 mm	100 mm
重复性		
12个方向中任意方向的最大 2σ	0.25 μm	0.25 μm
2D (XY) 各向异性		
环规的最大偏差	$\pm 0.25 \mu\text{m}$	$\pm 0.25 \mu\text{m}$
3D (XYZ) 各向异性		
已知标准球的最大偏差	$\pm 0.25 \mu\text{m}$	$\pm 0.25 \mu\text{m}$



图14: OMP600应变片式工件测头

有些测量应用需要非常小的测针，才能接触待测量的特征。应变片式测头的触发力较低，可以使用刚性略低的测针。

结语

触发式测头（机械式电阻测头和应变片式测头）是坐标测量机和数控机床应用最广泛的接触式测量设备。尽管近年来扫描测头在坐标测量机上的使用有所增加，但在许多制造领域的质量保证和制程控制方面，触发式测头仍发挥着重要作用。它们的设计也一直在不断改进和完善，以满足各种测量任务的需求。随着感应技术的创新，触发式测头的性能、使用寿命和灵活性都大大提高。

www.renishaw.com.cn/machinetool

 #雷尼绍

© 2024-2025 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。



扫码关注雷尼绍官方微信
 文档编号：H-5650-2063-02-A
 发布：2025.08

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