



精度

微米公差加工意味着更高要求

不同工具和加工策略促使机床厂寻求超越最苛刻工作和最具有能力加工中心的新效率。

文 | Matt Danford



Integral 公司长期以来致力于高精度的专业加工技术，但这一技术在过去几年中有了新的含义。为微流体和光子学等行业客户提供服务，则推动 Toronto 地区这家面积达 6000 in²(1 in=25.4 mm) 的机床厂实现了以 μm 为单位来进行测量公差加工工艺。

Integral 公司总裁兼创始人 Peter Reypa 表示 Integral 进入这些市场是经济衰退后立即进行分区的结果。Kern Microtechnic 的五轴 Evo 加工中心是 2010 年安装的，位置精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。这足以在工件上实现 $\pm 2 \mu\text{m}$ 的精度。所以该机床必须被充分发挥作用，以满足新客户工作特征的要求。为此做出的努力包括通过对环境的控制、认真校准程序、先进数控机床功能以及新型切削工具、软件和加工策略来消除最显而易见的错误。

此外，获得 μm 级加工能力的好处在于拥有了在市场中竞争的机会。Reypa 表示推动 Evo 需要工作人员提出自己的想法，并且吸取大型机床厂的经验教训。Reypa 说：“结果是 Integral 公司已经变得更加高效，因此无论要求怎样，所有客户都变成我们很好的合作伙伴。”

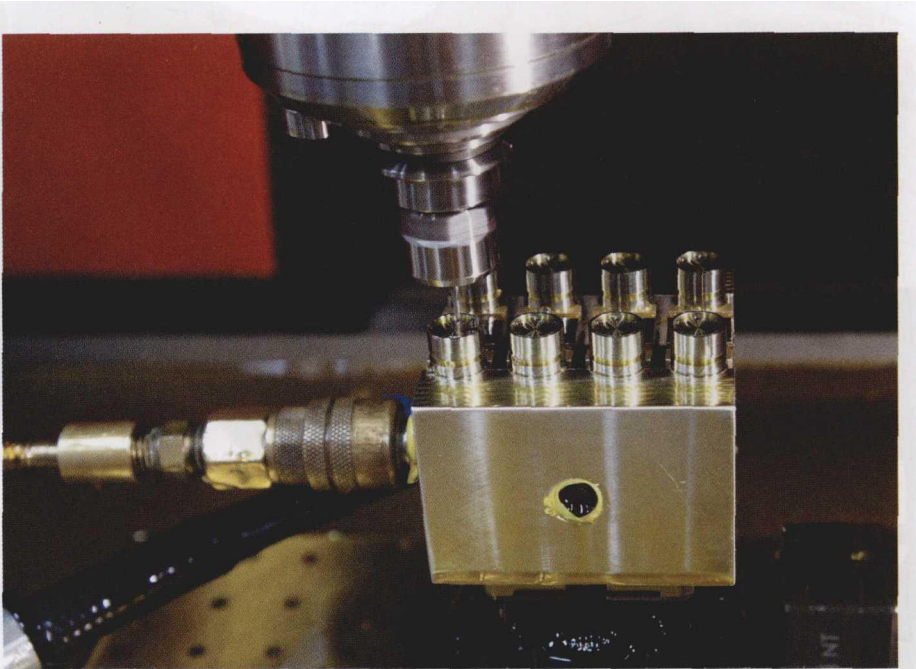


图 1 这些部件为用于扩展光束光纤电缆连接器的插入键，其使用透镜将光线进行聚焦，并从一条光纤传输到另一条光纤上。虽然大多数零件(以及用于相同工作的其他部件)是在瑞士型车床上加工的，但是要求保持精度水平的操作则是在该机床厂 Kern Evo 加工中心进行的

准备精度

Reypa 表示 Integral 公司特别受 μm 级公差吸引，因为在安装 Evo 之前，很多前期准备工作已经就位。该公司机床厂位于 Ontario，成立于 1989 年，长期以来一直在小型高精度零件加工中占有

一席之地，特别是在航空航天和医疗行业更是如此。加工资源方面则包括四个三轴立式加工中心 (VMC) 以及三台瑞士型车床。虽然这些机床都没有提供 Evo 的精度，但是对每个零件的每个特征而言都不需要该精度级别。实际上，

只有约 30% 的工作需要进行 μm 级公差操作，而这些操作通常仅限于几个关键特性。因此，11 名员工的机床厂已经能够进入新的工作领域。

Reypa 表示该加工中心自 2010 年安装以来就已经证明了其具有的能力。Evo 的精度始于 C 型框架结构，其将主轴固定在 Z 轴上，并且依赖于工作台的运动，用于所有其他轴行程。他还具有聚合物混凝土基座，根据 Kern 的说法，他比许多典型机床设计的铸铁或焊接框架更坚硬、更耐振动。玻璃秤、滚动轴承、预应力、棱柱形线形导轨则有助于 $0.1\mu\text{m}$ 的机床分辨率。同时，循环水将所有部件包括机轴、主轴、电气柜和冷却液箱都保持为 20°C 的恒定温度。电气柜与机床的其余部分分离，冷却水的冷却器也是如此，以防止这些部件所产生的热量影响精度。

该机床的主要运营商生产经理 Andrew Sweeting 说：“安装该机床在很多方面更像是安装一台计量设备，而非一台加工设备。”虽然机床厂长期将其坐标测量机 (CMM) 与其他的操作进行了隔离，但是容纳新的加工中心需要质量控制区周围更大的空间。 $1100\text{ft}^2 (1\text{ft}^2 = 0.093\text{m}^2)$ 的机床厂环境是需要严格控制的。温度恒定在 20°C ，并且用五个湿

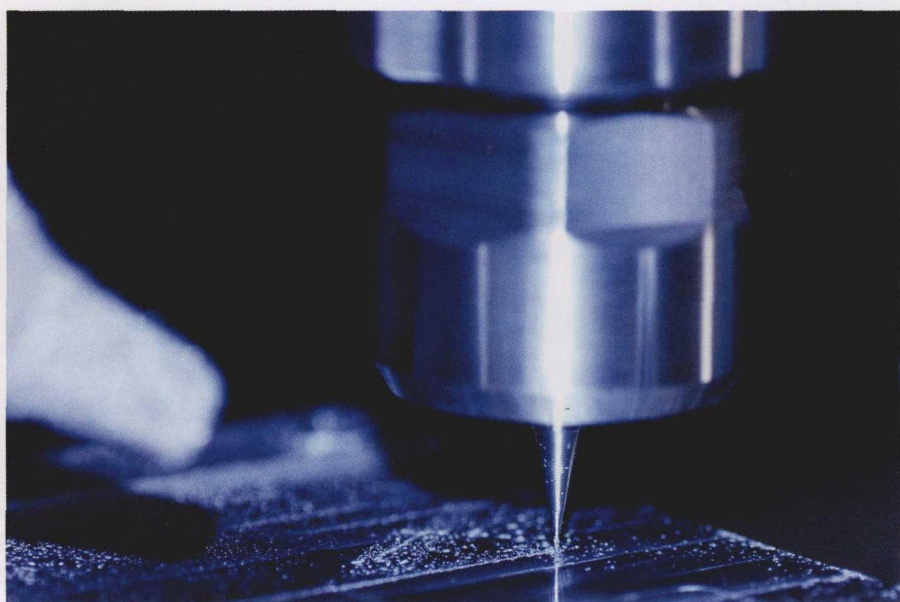


图 2 微流体工业研发应用已经要求铣削通道，使其具有非常光滑的表面，将其处理成如图所示的塑料型钛板。摆线刀具路径有助于精确控制径向切削深度，从而确保一致的切削力，并且能够完成 0.006in 直径通道的两侧加工，在单程中实现 $0.2\mu\text{m}$ 的表面粗糙度

度计来检测湿度。为防止继续使用而蔓延到该结构中产生偏航、俯仰和其他误差，Sweeting 每月进行一次机床校准。Integral 公司的代表还大约每 18 个月访问一次，以便使用 Heidenhain KGM 栅格编码器进行更彻底的校准。

然而，Sweeting 强调：“即使是最精心设计，良好的维护机床和高度可控的环境仍然不够。”在没有学习优化特定工

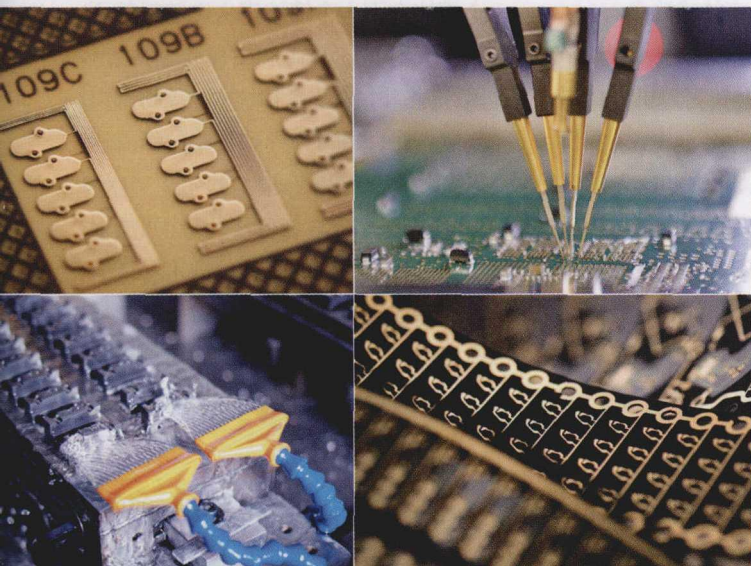
作过程的情况下，Integral 公司从来不会满足匹配甚至超过该零件精度的 $\pm 2\mu\text{m}$ 。

没有错误余地

机床和环境固有的误差控制，则开始于相对简单的步骤。然而，这不会使其变得多余。一个例子就是允许机床在切割开始之前进行预热。Sweeting 说：“预热的时间长短取决于实际操作，通常为

cicor

您的电子科技合作伙伴



Cicor 是一家为全球电子行业提供创新技术解决方案的工程与制造企业。Cicor 一共拥有约一千九百名员工在十个生产基地，负责研制高度复杂的印刷电路板，混合电路和 3D-MID (模塑互连器件技术或三维注塑电路板)，并提供完整的电子组装和注塑成型。

不仅如此，Cicor 也为国际客户从设计到成品提供定制化的解决方案。

www.cicor.com

info@cicor.com

广告



图 3 Integral Machining 公司生产经理和 Kern Evo 公司首席运营官 Sweeting 演示了 Heidenhain 数控机床示波器。该功能通过实时显示每根轴偏离其编程位置的距离帮助诊断错误源

1 h 左右，对于高温材料响应良好的工件则需要进行整夜处理。”他补充说，“我通常让他们运行到碳化物膨胀，能使最小的工具加热 10 min 左右。”为管理振动情况，他有时候在门的另一侧张贴一个标志，来警告 VMC 操作员，以避免运行时出现重型粗加工。Sweeting 说：“我们无法容忍其出现任何变化。”

一种用于对不一致性进行归零的策略，包括不从机床本身开始，而是利用 Heidenhain iTNC530 数控机床的示波器来测量轴偏差。在通常由机床制造商和分销商用于轴调整的情况下，示波器测量电信号，以确定轴编程位置与实际位置之间的差异。结果显示为每根轴的 2D 波形。

此功能的一个好处就是缩短故障排除的时间，例如，如果 Y 轴运动在目标上但是 X 轴不是，那么 Sweeting 可能得出结论，编程错误导致零件一侧留下的材料太多。Sweeting 指出：“在 1 in 立铣刀的情况下，留下超过 0.001 in 可能没有什么区别，但是这是 0.004 in 立铣刀直径的 25%。”

示波器也被证明对于确定“最佳点”来说，切削参数是非常有价值的，这些参数为各种切削刀具提供了最平滑的加工。基本思想是确保切削刃随着固有频

率而碰到工件，其中加工中心很容易与该特定工具一起振动。在最近一个实例中，制造商建议规定为 48 000 r/min，用直径为 0.006 in 的四刃立铣刀来有效切割 5 级钛微流体通道，其转速非常接近于 Evo 的 50 000 r/min 这一极限值。然而，使用示波器测试不同参数，显示该工具在转速为 39 000 r/min 时性能更佳，也就是说，Z 轴线的主轴速度在整个切割过程中保持的最为平直。

挑战极限

除了高级数控机床功能和最佳点以外，在非常高的主轴速度下运行极小的刀具，使得一些人习以为常。Sweeting 说：“我永远不会在我的生活中转动一个 0.006 in 的立铣刀，每把这样的刀具会花费 50 美元，转速非常接近于 50 000 r/min，并且在开始的时候会有点心疼的感觉。”

然而，无论客户是否要求，在 Evo 上尝试的新事物越多，在更大机床厂中的加工程度也就越大。Reypa 说：“我们正在挑战更多的极限。”例如，先前在不使用硬质合金立铣刀的情况下，机床厂更有可能使用特种刀具。最近的一个案例涉及到使用 0.75 in 立铣刀，转速为 10 000 r/min，速度为 200 in/min，对铝进行粗加工，这是为该材料进行专门设

计的加工方式。Reypa 说：“五六年前，我们可能已经使用了高速钢进行再研磨，并且慢慢稳定下来了。”

这种实验已经导致机床厂考虑如果没有购买 Evo，可选择一些特殊性能的特性。以下概述了一些例子，以及由更开放、具有前瞻性的态度和员工更大意愿，使得自己及其设备挑战新的极限。

工具颈部更细

在微加工中使用的每个立铣刀几乎都具有缩小的颈部，也就是说，工具的颈部为实心圆柱体，而刀锋和柄部的直径更小。由于沟槽的横截面相对更细更薄，因此这种结构要比在颈部整个长度延伸的沟槽具有更大的刚性和强度。

Sweeting 说：“强度和刚度对于 Kern 采用的小型立铣刀是至关重要的，但是更大的机床厂也会有大量的工作，即要求长度与直径比的工具会增加破裂和振动的风险。”缩小的颈部还改善了对零件特征的检修，因为他们不太可能干扰切割动作，不管零件尺寸或公差如何。

刀具可变几何尺寸

微加工的成功也使得机床厂考虑具有可变的螺旋角、前角以及槽间距的切削刀具。Sweeting 说：“在 Evo 上的应用并没有留下空间，对称立铣刀会特别脆弱。”相同的切削刃在相同频率下产生振动，每个连续的边缘彼此产生的振动会撞击工件。可变几何形状的工具不会受到这种影响。刀具上的槽纹数量也很重要。Sweeting 解释说：“槽纹数量越多，一个槽纹在下一个槽纹进入之前就越来越不可能离开材料，从而产生一个‘捶击’作用。”此外，在更多槽纹中扩展切割力和切屑产生，通常会导致更小的切屑以及更光滑的表面粗糙度。

Sweeting 表示，缺乏具有多个可变间隔以及有角度槽纹的工具，机床厂可能不会那样加工零件。用于扩展光束光纤电缆连接器的这些插件，使用绿色透镜将光线进行聚焦，并从一条光纤传输到

另一条光纤上。将保持透镜和光纤的孔进行精加工成 N4 级 ($0.2\mu\text{m}$) 的表面粗糙度, 涉及到使用直径 2 mm、长 10 mm 的三凹面立铣刀, 以螺旋运动形式切削成仅为 $100\mu\text{m}$ 的材料。在更大机床厂中的工作并非那么苛刻, 但是机床厂经常利用这些刀具来提高适当操作的性能。

相同工具多个功能

与光纤连接器插件有关的挑战, 最困难的一个就是确保埋头孔中的透镜能够很好地排列。更具体地说, 问题是确保直径为 2.5 mm 的钻孔和直径为 3 mm 的沉孔之间的同心度。在螺旋形刀具路径的情况下, 可以用同一立铣刀来加工沉头孔和钻孔。这种方法使得镜头保持足够直, 以保持光损失在规范范围以内 (不超过 1.5 dB)。

径向跳动、温度、磨损以及影响切割的其他因素可能随着不同工具而变化, 尽管精心安装在刀架上, 但是对于刀具更换机构的要求而言, Sweeting 解释了该方法的成功情况。虽然对 Evo 上的操作具有特别影响, 但同样的原则适用于任何规模。

新工具路径

使用多个功能的同一工具将不会很好地发挥作用, 没有最大限度地延长工具名, 并且 Sweeting 表示使用 3D 系统 Cimatron CAM 软件受益匪浅。最初购买时是用来替换系统, 其不能在 Evo 上进行操作而提供足够的分辨率或 3D 能力, 该 CAM 软件便于使用更平滑的道具路径, 从而更好地控制切削力。一个实例就是摆线铣削, 用于诸如微流体测试板零件所用的槽铣削方法。以环形、花纹图案来进给工具, 能够准确地控制径向切割深度, 当目标是采用同一切割器来铣削整个槽时, 则需要特别关注。在表面粗糙度达到 $0.2\mu\text{m}$ 时, 更换工具在那项工作上就会有风险。Sweeting 补充说: “这也可能会降低效率。”

虽然更大机床厂内使用摆线铣削



图 4 仔细观察光纤连接器插头, 光纤包含在直径为 2.5 mm 孔中紧密配合的陶瓷套管或套圈中, 其在连接端具有 3 mm 的沉孔, 以容纳该透镜

的情况非常罕见, 但是已经应用同样的原理来提高刀具寿命和生产率。例如, Sweeting 坚信软件中刀具路径引擎的 Volumill, 用于生成刀具路径, 通过避免方向或刀具接合的急剧变化, 将刀具和主轴上的负载保持在程序限制范围内。

一致的机床运动

确保特定图案的适当定位, 对于要求 Evo 的工作而言可能特别困难。例如, 光纤连接器插头上的孔位置必须保持在 $\pm 1.5\mu\text{m}$ 范围内。在这种情况下, Kern 所用的程序总是指示机床在钻出每个孔之后返回到中心位置上, 而非依次从一个孔移动到另一个孔上。该方法确保了 X 轴和 Y 轴向每个孔的来回移动, 并且通过扩展、加速、减速、断开距离、间隙等, 尽可能地保持一致。Sweeting 说: “虽然对于不需要 Evo 精度的工件通常并不需要这种方法, 但是当特征位置很关键时, 这种方法总是令人放心, 特别是当多个工具发生变化或者其他因素增加变化的可能性时更是如此。”

更广泛进化

通过机床厂加工操作的组合添加超精密零件, 促进技术和工艺变化。Reypa 表示, 例如先前 CMM 并不足以进行 μm

级耐受性工作。如今机床厂使用了卡尔蔡司工业计量公司的 O-Inspect 多传感器系统 (光学触摸探头)。与 Evo 的情况一样, 在该台机床进行测量所遇到的艰难工作则促使了在质量控制方面的全面改进。

例如, 加工直径为 2.5 mm 的立方氧化锆的环形量规, 需要购买可加工小孔上 μm 级公差的机床。用较大伪影校准机床, 不足以确保测量的一致性。该应用程序用于校准伪像, 则因尽可能与被测量特征的几何形状和尺寸相匹配, 已经应用于更大机床厂的多个工作中。“如果我们需要使用卡规来检查钻孔到十分之一的精度, 则可能会得到一个精确到小数点后五位的特殊环规, 然后我们知道我们是无法精确到的。” Reypa 说。

由于在极端精确操作中吸取的经验教训继续在机床厂中渗透, Reypa 和 Sweeting 以及工作人员正在关注他们的下一步情况。事实上, Reypa 说: “如果不是因为欧元和加拿大之间的汇率问题, 他们可能已经够买一台 Kern Micro, 这是 Evo 的继任者。” 无论未来如何, Integral 公司渴望扩大在 μm 级测量公差中的工作容量和能力。如果参照过去的经验, 那么更多的工作将不仅付清直接收入, 而且将促使一个整体且更具有能力的机床厂。[MM]