



技术信息

动态高精 – 动态的高精度加工

更高生产力和更低成本是现代生产企业的首要目标。降低废品率、加快加工速度和避免多余加工步骤或二次加工是实现这些目标的要求。加工时间、表面质量和工件精度间存在相互冲突，因此机床数控系统必须能为铣削机床和生产过程提供最优化方法。

海德汉公司的**动态高精**是一系列TNC功能用于显著提高机床轮廓加工精度，甚至对复杂轮廓进行高速加工。机床的动态精度取决于工件与刀具间高精度运动所需的进给轴加速度决定。

进给轴加速运动时，机床部件在惯性力作用下发生变形甚至振动。**动态高精**能显著降低加工期间刀具中心点（TCP）的动态误差，使NC程序加工的工件精度高，表面质量高且加工速度明显加快。



通过显著降低高速执行NC程序期间刀具中心点的误差，**动态高精**能为机床性能的提升发挥重大作用。

用户不仅节省时间还能避免不必要的废品进而降低成本，这是因为**动态高精**提高了机床动态精度，缩短了加工时间，提高了工件精度和表面质量。

dynamic + precision

动态高精

缩短加工时间，提高加工精度和表面质量

工件表面上可见缺陷和主要几何误差源于三类误差。

在数控系统中实际机床运动特性误差的影响用**运动特性**或**静态误差**的运动特性模型描述。实际应用中，以下因素影响机床运动特性精度。

- 机床部件生产和组装精度
 - 重量导致的床身下垂或相应变形
- 对于高价值机床，运动特性误差变化通常很小且可用TNC的KinematicsComp和KinematicsOpt软件选装项测量和补偿。

受热导致的误差描述床身或工件温度变化的对刀具中心点（TCP）精度的影响。床身温度变化的原因是：

- 机床车间的冷空气气流或热空气气流
- 阳光直射
- 机床部件和驱动体的发热
- 低温或高温冷却润滑油在机床加工区内的流动

机床从几分钟到几个小时的热误差在工件上就变得明显可见。KinematicsOpt软件选装项让5轴机床用户能快速和有效补偿回转工作台位置的受热误差的影响。

机床**动态误差**包括刀具中心点的轻微偏差或振动。动态误差的原因有：

- 进给力 and 进给扭矩以及加工力导致刀具中心点位置误差和角度误差。
- 进给轴名义位置与实际位置间的跟随误差无法被驱动控制系统完全补偿。

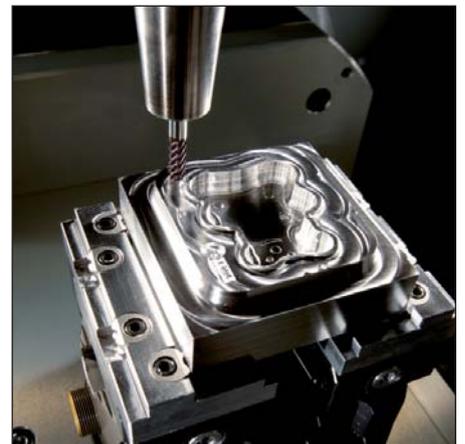
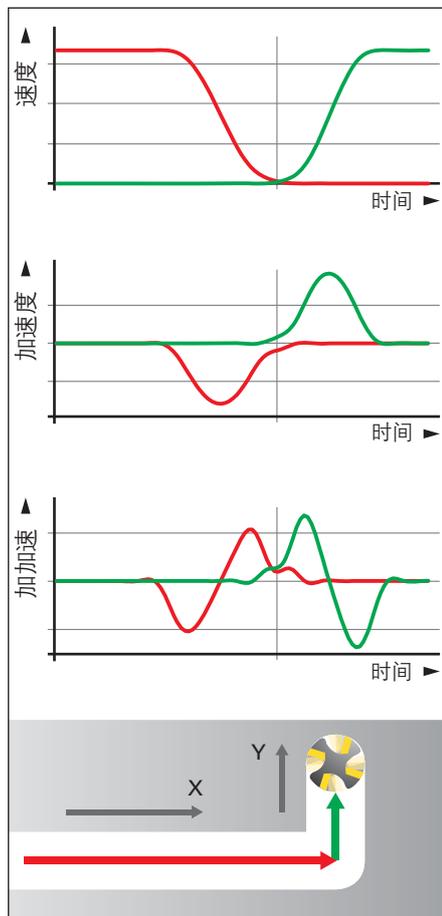
通常NC程序执行速度越快，动态误差越大。因此，缩短加工时间对精度和表面质量有负面影响。或者说，要提高轮廓精度，就需要更长的加工时间。

特别是用最高表面质量且高精度加工**自由曲面**时。许多自由曲面加工都存在一定曲面的角点。这导致铣削加工方向频繁变化。进给轴必须在每次方向改变时进行加速或减速。表示变化的加速过程的概念是加加速。大加加速意味着加速度变化快，因此能节省时间。然而，大加加速也导致机床振动，使工件表面精度不足和有误差。为尽可能限制动态误差导致的偏差，需要慢速运动。

一定曲面或轻微倾斜的表面通常引发暗点的表面质量问题。这是机床振动的结果，但也是外部干扰的原因。

对于**5轴加工**，由于补偿运动，直线轴需要进行高速运动（快速进给，大加速度）。由于振动或其它动态误差，也导致偏差加大。

由于机床动态精度随机床的**机龄和负载增大**而变化，偏差可能更大。这些影响主要表现在加速阶段。



加工角点：X轴和Y轴两轴的速度，加速度和加加速

动态高精系统由一系列有效减小机床动态误差的海德汉数控系统选装功能组成。它们能提高机床动态性能，提高刀具中心点处的刚性，使用户可以根据机床机龄、负载和加工位置所允许的最大理论值进行铣削加工。

动态高精对最终用户的优点

不需要为了保证工件高精度和高表面质量而降低加工速度。用**动态高精**的机床可以**同时实现高速加工和高精加工**。

高精和高速加工也意味着高生产力。降低单件成本而不牺牲任何精度和表面质量。

动态高精还能保证实现的精度与加工时间和工件重量无关。不需要因为机龄或负载而降低进给速率。

动态高精是什么？

动态高精功能是海德汉数控系统的选装功能。可以单独实施也可以多个组合实施。

- CTC – 补偿由加速度产生的刀具中心点位置误差，因此提高了加速阶段的精度
- AVD – 动态抑制振动，提高表面质量
- PAC – 控制参数的位置自适应控制
- LAC – 控制参数的负载自适应控制，提高精度，使其与受力和机龄无关
- MAC – 控制参数的运动自适应控制

以下是这些功能的详细说明。

动态高精如何发挥作用？

动态高精功能在海德汉数控系统内的控制单元中用高时钟频率根据机床运动和负载情况进行控制。

由于**动态高精**由多个软件功能组成，无需对机床结构或传动系进行任何改造。但，机床制造商必须激活各项功能，并根据机床的情况输入合适的参数。



补偿刀具中心点与加速度相关的位置误差

高速加速期间的作用力造成机床零件短时间变形。这导致刀具中心点 (TCP) 偏差。除了轴向的变形, 机械方式连接的轴的加速度快速变化也导致进给轴在垂直于加速方向的变形。特别是进给力不在进给轴的中心线上时。因此, 重量和转动惯量在制动和加速阶段导致俯仰运动 (见图1)。

这导致加速轴和垂直轴方向的位置误差与运动的进给轴的加速度成正比 (图2)。位置误差也取决于导轨刚性, 进给受力点与重心之间的距离和重心与刀具中心点间的距离。

这些偏差都无法被位置编码器测量到。进给伺服轴无法对此作出响应。

对工件的影响

最能体现这个影响的情况是首先用大加速度接近工件的同一点, 然后用小加速度接近。

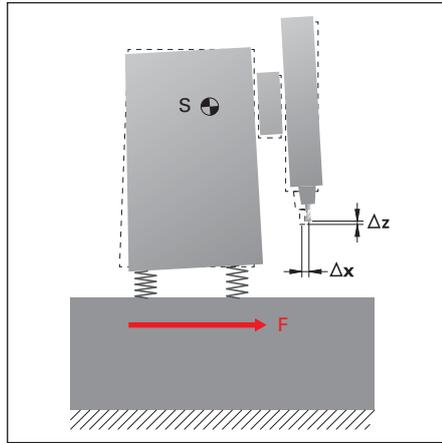


图1: 轴的俯仰误差

例1: 铣削圆

由于X轴和Y轴的动态弹性变形造成加工的凸台 (R32 F10000) 过大。该图显示凸台下方矩形加工时的情况。由于凸台直径与两边的侧面长度完全相同, 理想情况下矩形与圆形凸台应相切 (图3)。然而, 由于弹性变形使凸台过大, 加工凸台下方的矩形时铣掉了部分凸台。圆面上的小平面 (图4)。

弹性变形的影响如图5。通过测量得到的加速度导致的偏差加入到实际运动中。由于

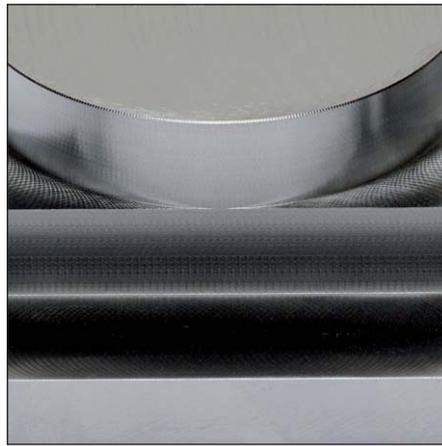


图3: 矩形上的凸台, 用CTC功能铣削。无可见小平面。

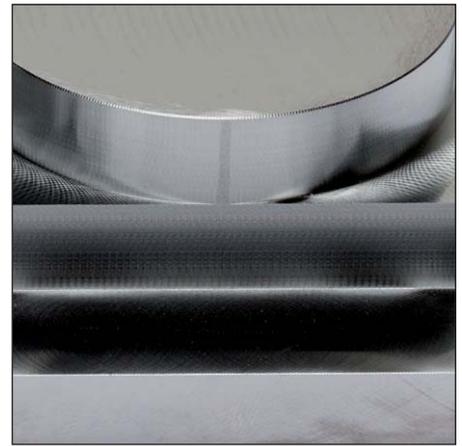


图4: 弹性变形的影响 (铣削矩形时偏大的凸台被铣出小平面)

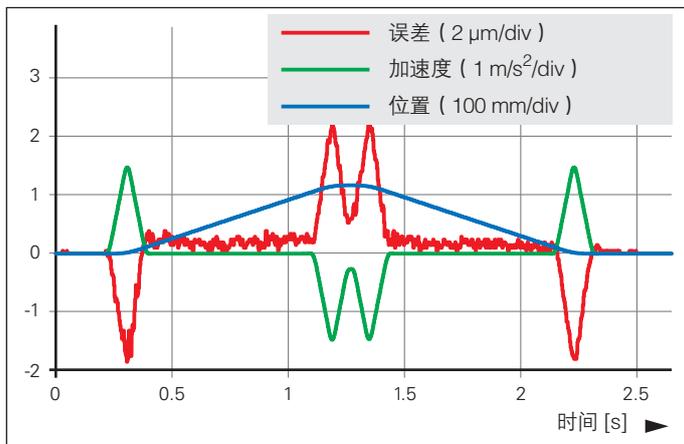


图2: 位置变化时加速导致的误差

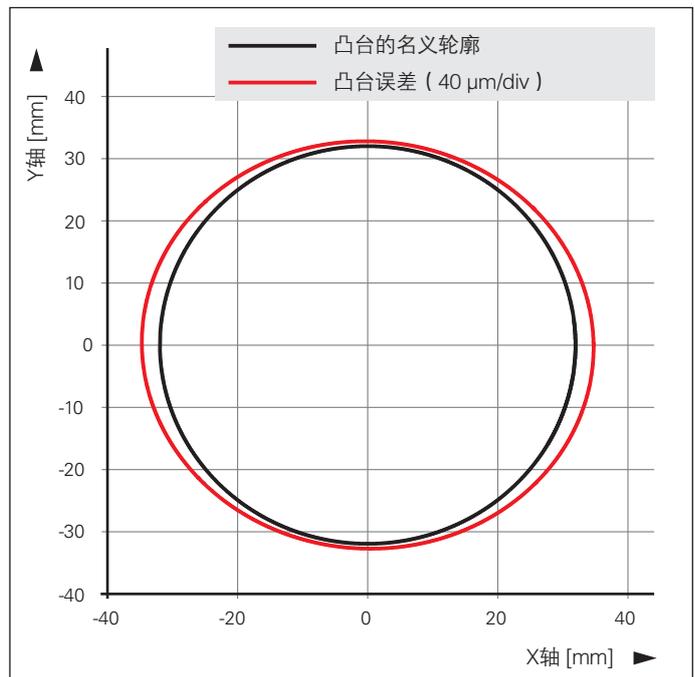


图5: 圆弧运动精度。放大500倍后相对名义轮廓的偏差

X轴和Y轴的条件不同（质量，机床几何特性等）形成一定椭圆形路径。

图6显示无放大的误差。它清楚地显示弹性变形导致X轴方向半径加大了约5 μm，结果在被铣削表面下方的圆面上形成一个12.5 mm宽的小平面。也等于实际工件的测量误差。

例2：型腔铣削，弹性变形垂直于加速度方向

铣削型腔时，进给轴在垂直于运动方向由加速度导致的变形造成表面留下斑点（图7）。加速运动导致俯仰运动。铣刀轻微切入被加工材料。CTC消除这类错误运动（图8）。

通过CTC补偿

海德汉公司的CTC（关联轴补偿）功能是一个数控选装项，它补偿加速度导致的刀具中心点处的位置误差。相应数据和参数可被数控系统知道（加速度）或通过测量确定（机床刚性）。

因此可以生产更高精度的零件且不需要改动机床机械系统或不需要延长加工时间。此外，CTC可实现的精度不取决于横向加速度运动。

实际影响

使用CTC后，用二维编码器测量显示平均误差减小达80%。因此可提高加加速（表示变化的加速过程的概念）且显著缩短加工时间。

如果加加速提高2倍，轮廓加工时间可缩短达15%。由于CTC的作用，平均误差只有不用CTC时的50%。

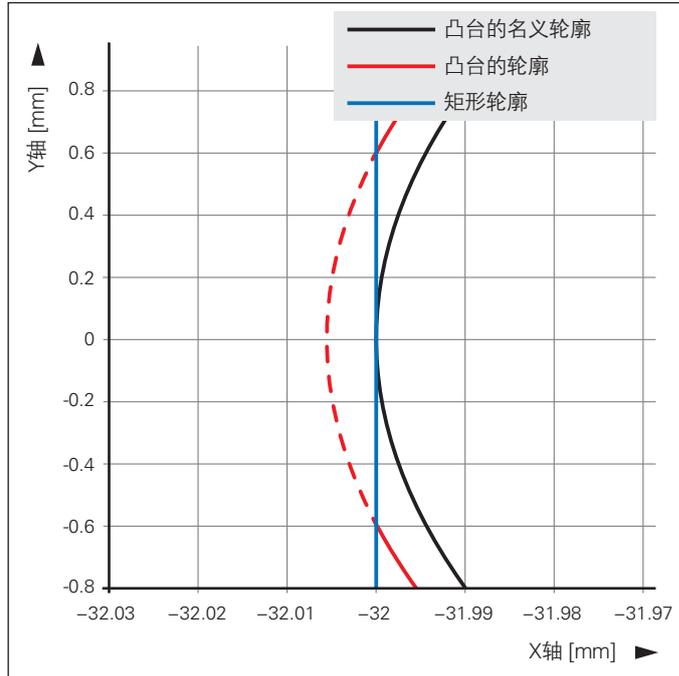


图6：这个局部图清楚地显示铣削矩形时对凸台的损害

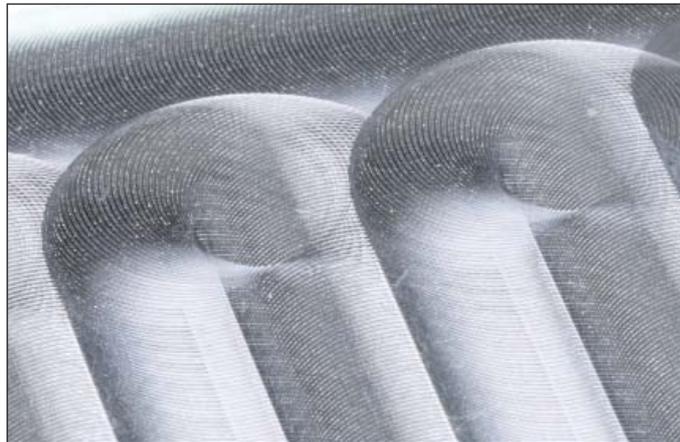


图7：不用CTC加工



图8：用CTC加工

AVD

动态减振

倾斜面或曲面常有表面质量问题，表现为明显可见的凹点或凸凹波纹。这是非常麻烦的问题，因为通常在相距30或60 cm的距离查看工件，人眼对0.5 mm至5 mm位置周期的对比度变化十分敏感。产生暗点的不同原因：

- 动力传动系统或机床系统的弹性变形造成的机械振动
- 编码器单信号周期内的位置误差（细分误差）。
（参见用海德汉编码器实现最高表面质量的技术信息）

这份“技术信息”介绍机械振动导致的表面误差。

周期性暗点通常是由不高于100 Hz的低频振动导致的。通常精加工进给速率在3000至6000 mm/min之间，这类振动在这些位置周期的位置处十分明显。根据光线情况，可看到不足1 μm 的轮廓偏差。

通常有两种导致表面质量问题的原因：

- **传动系统中的弹性变形**
例如，滚珠丝杠的弹性变形或传动带的弹性变形可导致驱动端（电机）与摩擦端（滑座）间的传动系统振动。
- **机床系统的振动**
机床系统的振动无法避免。机床系统振动的频率范围通常在10 Hz至30 Hz之间。

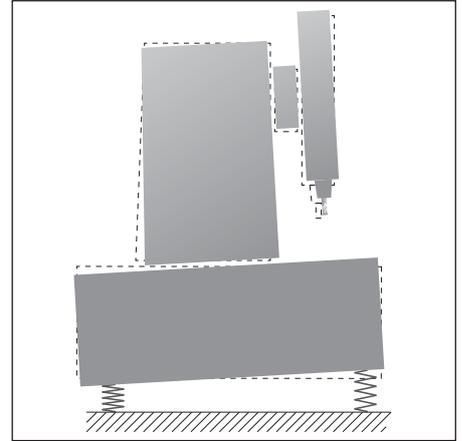


图1：机床系统振动

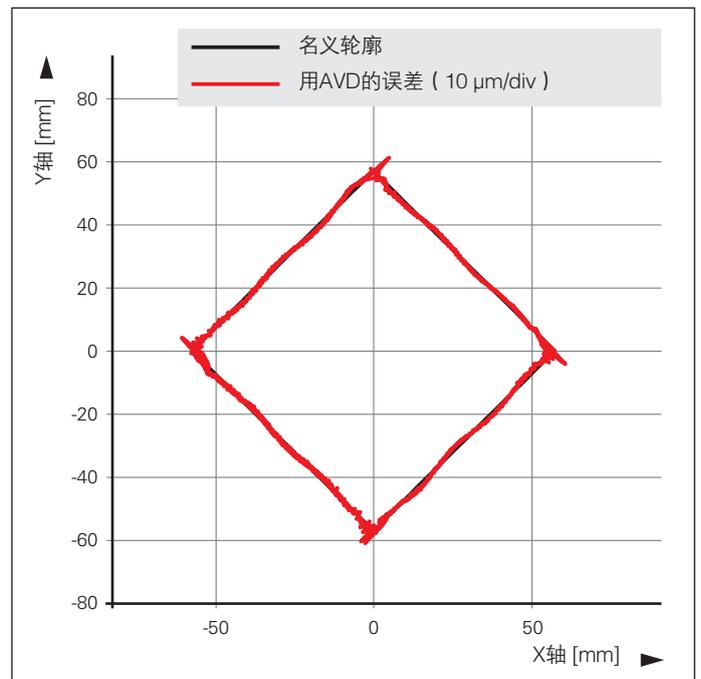
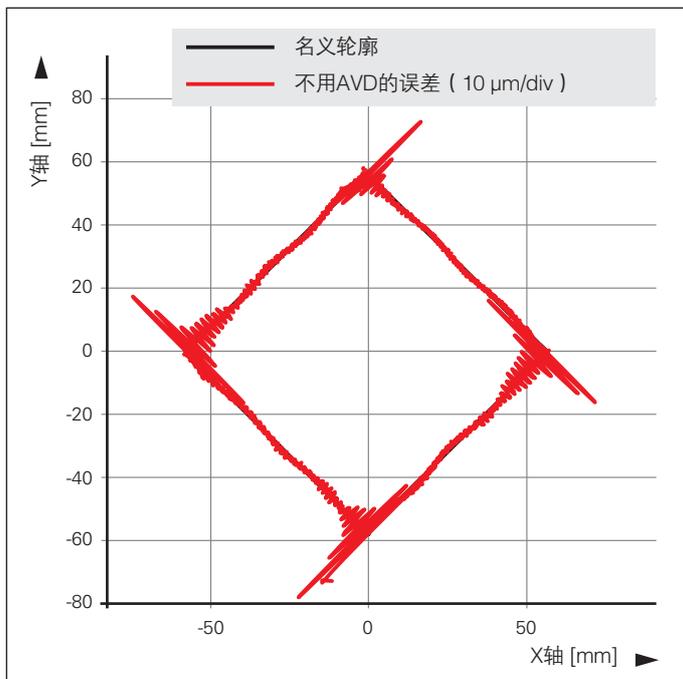


图2和图3：振动导致的误差

传统措施

加速运动导致机床或与地面连接部位振动，铣刀切入时以及电机扭矩波动时都可发生振动。加速过程导致的振动可通过减小加加速减轻，但导致加工时间加长。

通过AVD补偿

AVD功能（动态减振）抑制大量低频振动（机床系统振动或传动系统的弹性变形）。

AVD使铣削加工速度更快且无振动。通过抑制加速过程的干扰，因此允许用大加加速和大加速度。缩短加工时间且不影响工件表面质量。

实际影响

本例中，两个矩形之间相距一定角度。在角点位置加速期间，X轴和Y轴发生振动（图2和图3）。垂直于工件表面的振动部件有明显暗点（图4）。16.5 Hz的被测系统振动频率导致2000 mm/min进给速率时的周期长度为2 mm。如果用AVD功能，可以基本消除该振动幅值（图5）。

不用AVD功能要达到相应的表面质量，必须将加加速减小3倍。

结论

AVD既能提高机床生产力又能提高工件表面质量。

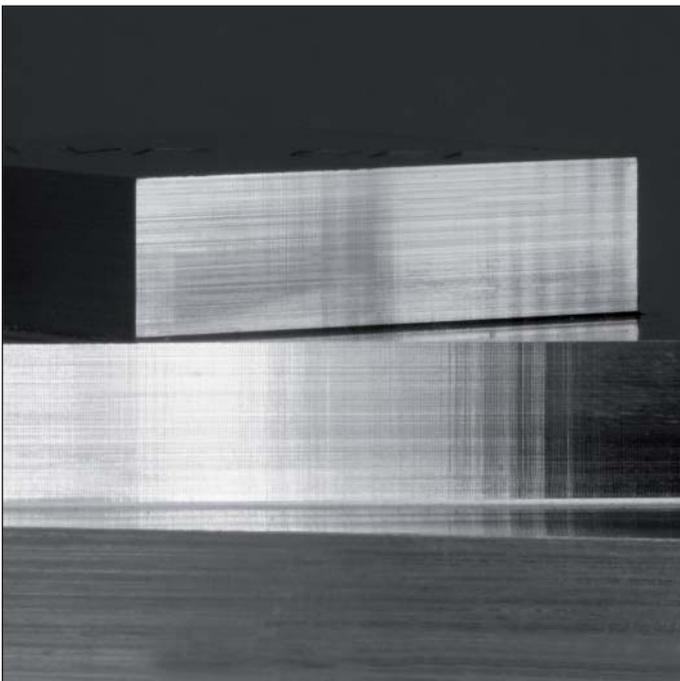


图4：振动显著降低表面质量。

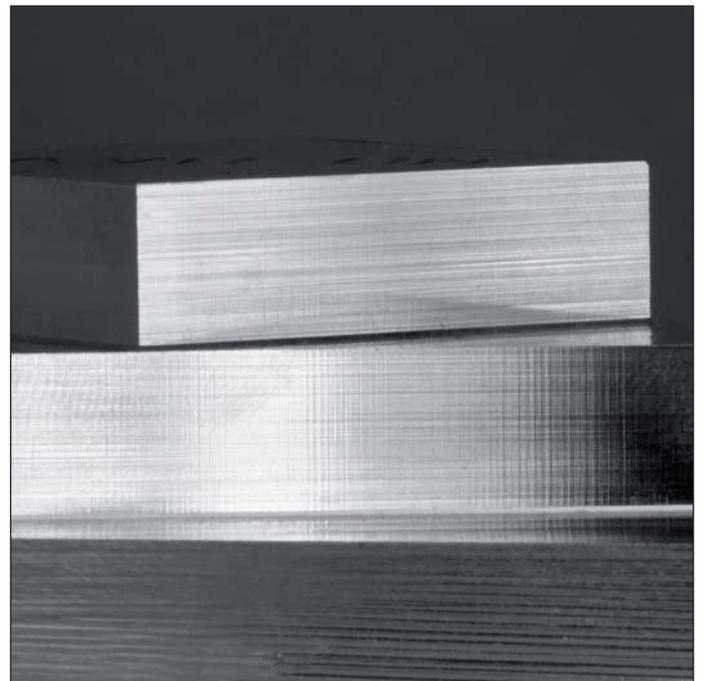


图5：AVD实现更高表面质量

PAC

控制参数的位置自适应控制

根据进给轴在加工区内的位置，机床运动特性的动态表现不同，它可能影响伺服控制的稳定性或质量。

进给轴位置的改变也影响机床的质量比（见图1）。刚性值也受位置影响，例如滚珠丝杠上设备的位置。变化的质量比和刚性值造成驱动传动系统的自然频率变化。这导致控制行为随位置不同而不同。

跟随误差可作为一项控制质量的指标。它代表控制系统符合名义轮廓要求的程度。

传统方法

进给轴控制环的调整必须保证在任何位置都能稳定工作和可靠。因此，必须根据最弱的位置调整。这些位置通常位于运动行程的端头（加工区极限位置，换刀位置，工作台受力位置等）。在加工区中心位置，这里需要达到最高加工精度，所得到的控制系统动态性能和动态精度显著提高。

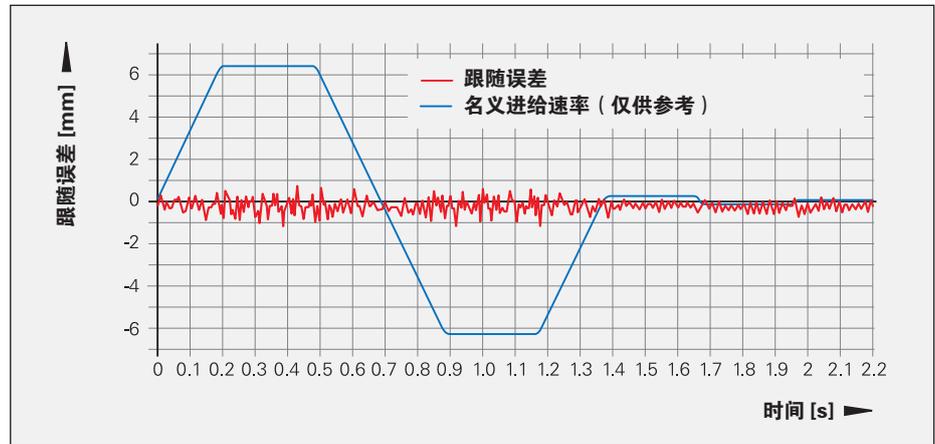
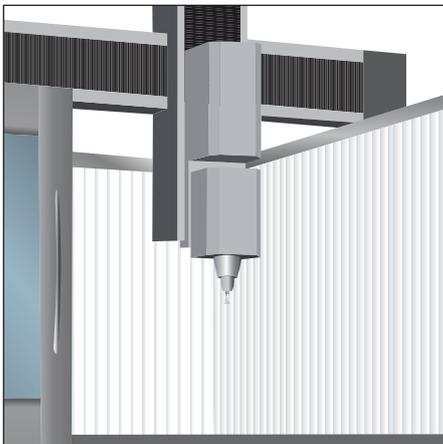
按照最弱位置调整意味着动态精度潜力未被完全利用。

PAC优点

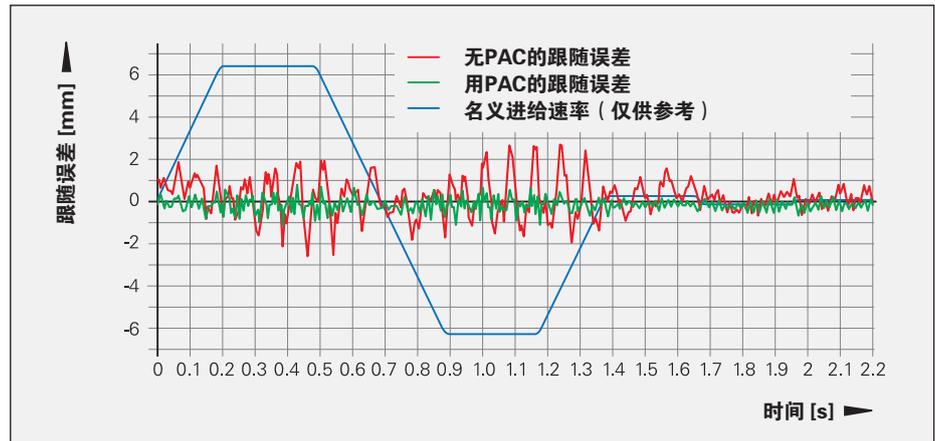
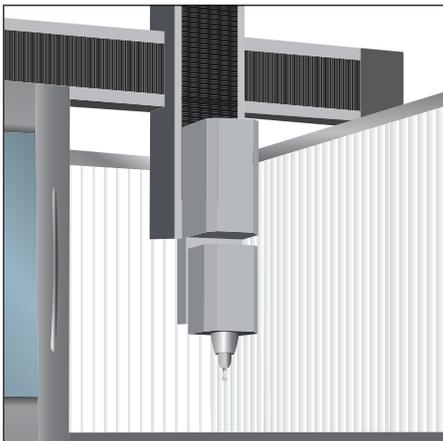
海德汉公司的PAC选装项（位置自适应控制）根据进给轴位置调整机床参数，更充分地利用机床动态性能。

数控系统通过与位置有关的过滤器设置和控制系数最佳地调整机床使机床在加工区内的任何位置都达到最佳效果。此外，它提高加工任务最重位置处的动态精度。

设置的控制系数越高，抑制干扰的效果越好（即齿轮传动误差，电机的扭矩波动）和跟随误差越小。也就是能实现更高轮廓精度。



Z = 0处优化的伺服控制，跟随误差在公差带 ($\pm 1 \mu\text{m}$) 内



伺服控制，Z轴 = -500

- 无PAC：震动明显且跟随误差超出公差带 ($\pm 3 \mu\text{m}$)
- PAC工作时：跟随误差在公差带 ($\pm 1 \mu\text{m}$) 内

活动工作台机床的动态响应与夹持的工件质量（直线轴）或转动惯量（旋转轴）有关。在调整过程中，进给轴前馈控制的摩擦力和加速度只作用于现有的质量或转动惯量。在其他受力条件下，前馈值并不适用于实际情况。这本身说明加速阶段的跟随误差加大，而跟随误差导致轮廓偏差。

传统方法

机床制造商可针对不同负载情况制定可通过循环调用的参数集。这样减少跟随误差，但根据负载情况仍必然存在残余误差。

一个典型例子是0 kg至150 kg（根据75 kg调整）和150 kg至500 kg（根据325 kg调整）负载条件的两个参数集。最差情况

时，实际质量与调整用的负载相差达175 kg。

对于回转工作台这个情况更为严重。这里是转动惯量而不是质量，它与前馈参数值有关。如果工件装夹不佳，相同质量可容易造成转动惯量成倍增加。

用LAC补偿

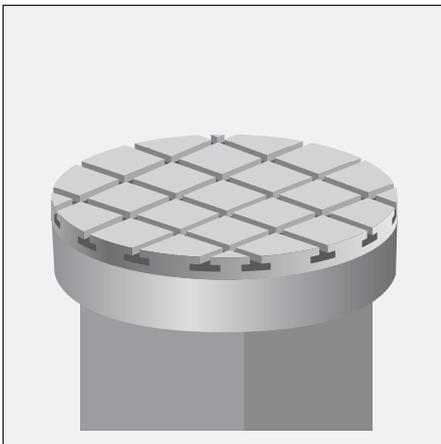
海德汉公司的LAC选装项（负载自适应控制）用于使数控系统自动确定直线轴的当前质量和旋转轴的转动惯量以及摩擦系数。为了优化不同受力情况下的不同控制特性，自适应前馈控制功能可检测加速度，保持扭矩，静摩擦和高轴速时的摩擦力数据。工件加工期间，数控系统还连续调整自适应前馈控制参数使其适应工件的

当前质量或转动惯量要求。调整速度由参数预定义。由于机床操作人员不能自己输入受力情况，因此能避免操作人员的人为错误。

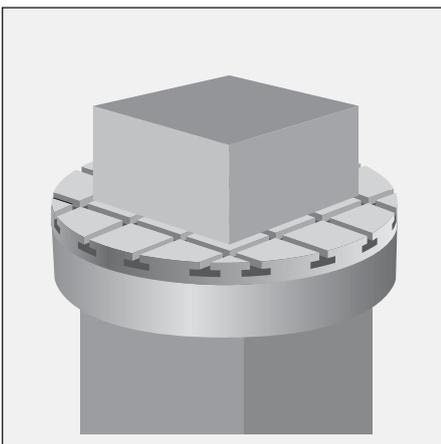
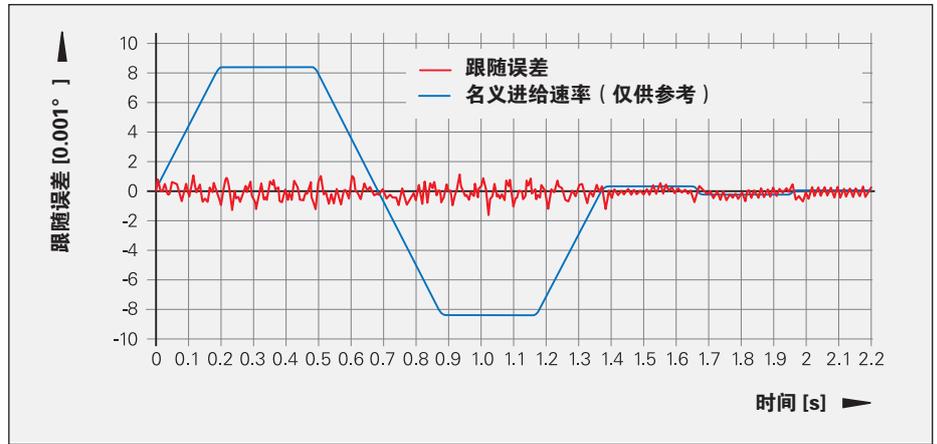
LAC的其它优点

机床部件的老化，例如导轨或滚珠丝杠，使摩擦力在机床整个使用寿命期中的变化可能很大。机床在新机时的最佳前馈调节在机床使用几年后就不适用了。LAC选装项确保进给轴始终得到最佳地调整。

然而，快速变化的摩擦条件，例如滑动导轨润滑脉动导致的，也能用LAC最佳地补偿。

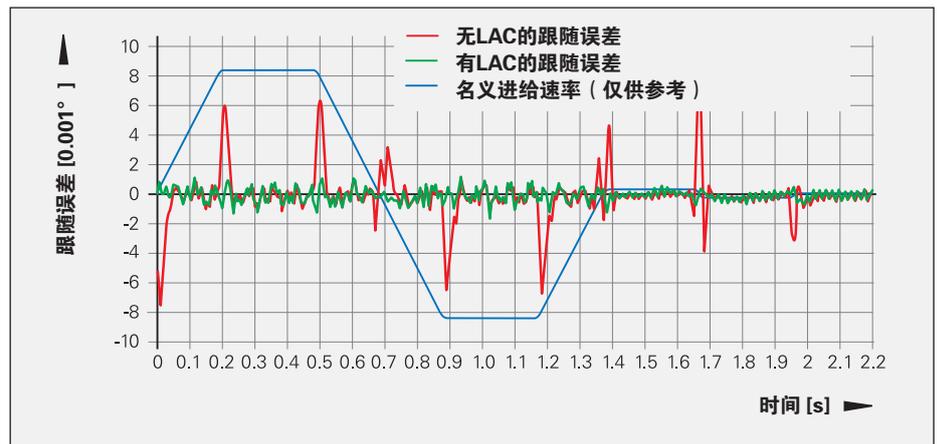


回转工作台的优化前馈控制，无附加力和跟随误差在公差带（ $\pm 0.001^\circ$ ）内



外部负载改变

- 无LAC：前馈控制无变化，跟随误差超出公差带（ $\pm 0.008^\circ$ ）
- 用LAC：前馈控制中LAC工作，跟随误差在公差带（ $\pm 0.001^\circ$ ）内



MAC

控制参数的运动自适应控制

机床工作特性的变化不仅取决于进给轴在加工区内的位置，还取决于其速度。除其他因素外，这也是速度对导轨摩擦力影响的原因。变化的摩擦条件影响机床振动行为。最佳的控制系统设置通常是针对静止状态的，这可导致快速运动时发生强烈振动。

此外，MAC能方便地通过两个独立的进给电机根据速度调整齿条-小齿轮驱动的轴承预紧力。

MAC的优点

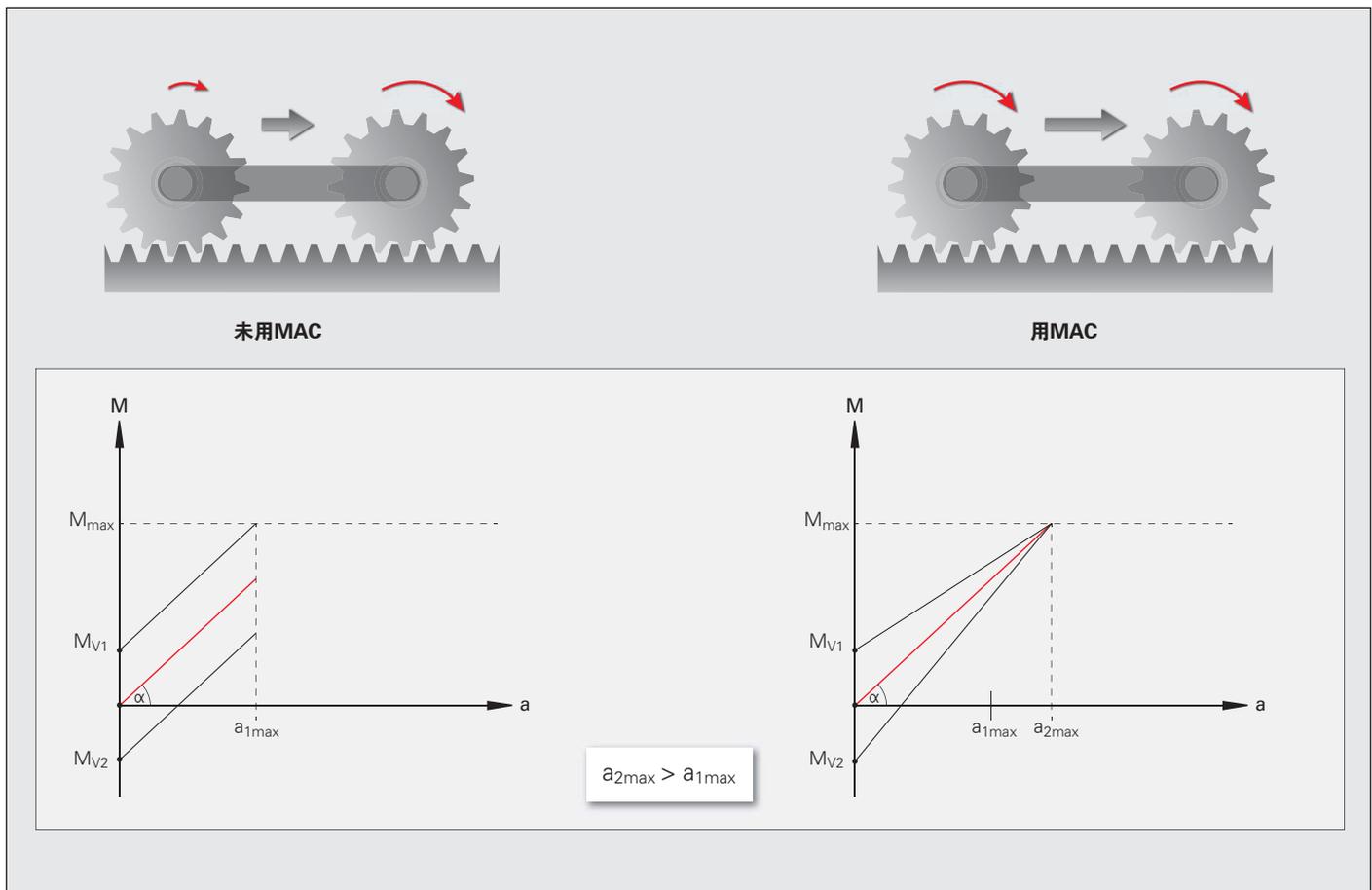
例1

MAC选装项（运动自适应控制）可根据其它输入值调整机床参数，例如速度，跟随误差或驱动加速度的输入值。通过这个控制参数的运动自适应控制，能实现的功能之一是对不同运动速度导致的电机稳定性变化的控制环增益进行自适应控制。这样，可对任何加工条件应用最佳的控制系统设置。它提供最佳的干扰抑制和提高机床动态性能。

例2

其他应用还有根据加速度变化调整主从扭矩控制系统中的主动端与从动端间的张紧扭矩大小。用MAC选装项调整后，可明显提高快移运动时的最大加速度，例如用参数减小张紧扭矩，提高加速度。

此外，由于静止时的张紧扭矩减小使机床发热明显减少，进而减少热变形或热飘移。



动态高精 完美配合的功能

动态高精中的各项功能间完美地相互补充。以一个简单轮廓为例—图中黑色部分—说明CTC和AVD的作用。TCP的误差用10 000 m/s进给速率运动的二维编码器测量。图示的轮廓偏差放大500倍。

图1中与名义轮廓的偏差为红色线。特别是在角点部位加速阶段，由于速度快，误差值相当大。

如果使用**动态高精**功能，这里启用了CTC和AVD选装项，这些误差被补偿（图1中的绿色线）。加工零件时能用更大进给速率且能实现更高轮廓精度。由于误差减小，可提高加加速以充分利用机床动态性能。

大加加速让机床更快地工作。结果造成明显可见的振动，工件出现暗点。这些强烈振动再用AVD选装项降低。

图2比较初始条件（红色线：加加速100 %时未用**动态高精**功能）与加加速200 %时用**动态高精**加工（图2，绿色线）。该图清楚地表明**动态高精**，甚至与**动态高效**一起，将误差改善2倍。在该轮廓位置将加加速加倍，缩短运动时间12 %。

| | 平均误差 | 时间 |
|-------------------------|--------|--------|
| CTC关闭 AVD关闭 R100% | 2.6 μm | 1.04 s |
| CTC启用 AVD启用 R100% | 0.4 μm | 1.04 s |
| CTC启用 AVD启用 R200% | 0.6 μm | 0.91 s |

结论

动态高精功能不仅能显著提高加工精度或一如加大加加速—还能在提高速度的同时提高精度。

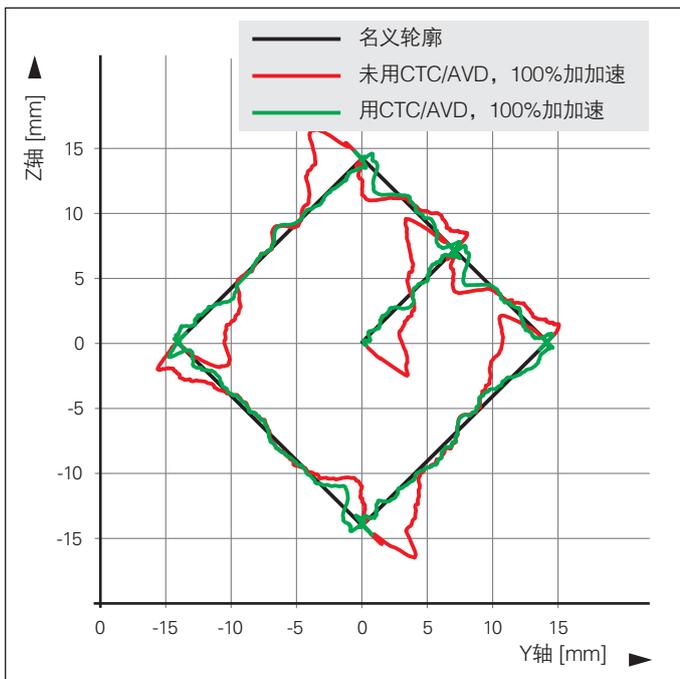


图1：用和未用**动态高精**功能在100 %加加速时的误差

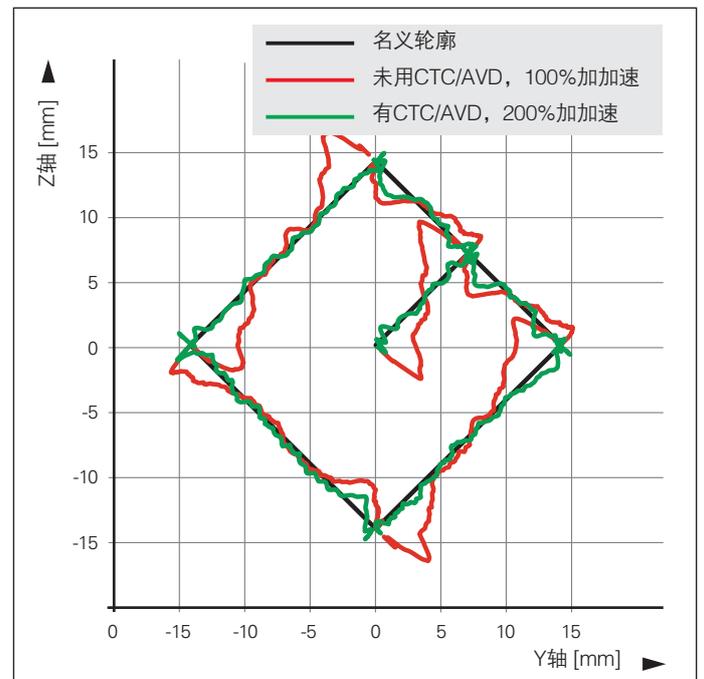


图1：100 %加加速时用和不用**动态高精**功能和200 %加加速时用**动态高精**功能的误差

海德汉数控系统

铣床，铣车复合加工机床，钻床，镗床和加工中心的数控系统

海德汉公司的TNC系列数控系统适应于所有应用领域：从简单的紧凑型TNC 128的3轴简易数控系统到TNC 530（支持多达18轴加主轴）—总有一款TNC数控系统能满足用户的应用要求。TNC 640数控系统支持铣床进行车削加工。

海德汉公司的TNC数控系统非常灵活通用：

它们支持面向车间编程，也支持脱机编程，因此它是自动化生产的理想选择。例如，无论是高速切削—特别是平滑路径控制—还是用回转工作台和摆动铣头进行5轴加工，它不仅能轻松完成铣削任务，而且与TNC 640和iTNC 530一样可靠。

海德汉用**动态高效**和**动态高精**合成词代表集合在一起的多项高效和高精加工的创新数控功能。

动态高效，帮助用户更高效地重型加工并提高加工过程可靠性。**动态高效**功能适用于TNC 640和iTNC 530数控系统。

动态高精功能可使工件更准确，表面质量更高和加工速度更快，因此它提供更高精度和更高生产力。**动态高精**软件选装项适用于TNC 640，iTNC 530和TNC 620数控系统。



TNC 640



iTNC 530



TNC 620

| | TNC 640 | iTNC 530 | TNC 620 |
|---------------------------|---------|----------|---------|
| 动态高精 | X | X | X |
| CTC – 通过关联轴补偿位置误差 | 选装项 | 选装项 | 选装项 |
| AVD – 动态减振 | 选装项 | 选装项 | 选装项 |
| PAC – 控制参数的位置自适应控制 | 选装项 | 选装项 | 选装项 |
| LAC – 控制参数的负载自适应控制 | 选装项 | 选装项 | 选装项 |
| MAC – 控制参数的运动自适应控制 | 选装项 | 选装项 | 选装项 |
| 动态高效 | X | X | – |
| ACC – 有效振颤控制 | 选装项 | 选装项 | 选装项 |
| AFC – 自适应进给控制 | 选装项 | 选装项 | – |
| 摆线铣削 | • | • | • |

x 允许的功能
• 标配功能

HEIDENHAIN

约翰内斯·海德汉博士（中国）有限公司

北京市顺义区天竺空港工业区A区

天纬三街6号（101312）

☎ 010-80420000

☎ 010-80420010

Email: sales@heidenhain.com.cn

www.heidenhain.com.cn

更多信息：

- 样本：TNC 640
- 样本：iTNC 530
- 样本：TNC 620
- 技术信息：动态高效

