



技术信息

位置测量技术对5轴加工精度的影响

生产效率和精度是机床竞争能力的主要体现。五轴加工技术在提高生产效率方面有巨大潜力。在许多应用中，五轴加工的金属切除率高于三轴加工。生产时间的缩短主要得益于二次装夹所需时间的节省和一台机床进行多任务加工等功能。在零件几何形状非常复杂的许多应用中，5轴加工正在成为不可或缺的加工技术。

由于5轴加工通常需要的直线轴运动行程较大，机床必须在整个加工区内保持高精度。然而，5轴机床的两个旋转轴对加工精度有巨大影响。除旋转轴外，常常也需要直线轴进行运动使刀具相对工件表面达到所需方向。五轴的行程运动在工件局部可能留下明显可见的加工缺陷。5轴加工中，驱动系统中的误差，例如螺距和运动传递误差，反向误差和热膨胀导致的位移都可能迅速产生废品。直线轴和旋转轴的定位精度对5轴机床性能发挥着至关重要影响。

现在，5轴加工已成为许多金属切削领域不可或缺技术。它的经济优势来自它一次装夹的完整加工能力：因此能显著缩短零件的整个生产时间。同时显著提高零件精度。

此外，增加的旋转轴使刀具可以更好接近复杂工件轮廓，例如模具中的型腔。通常，允许用短刀小角度颤动加工，因此金属切除率大。

5轴联动加工中，即使是加工极为复杂的轮廓，刀刃处的切削速度也能保持在很小波动范围内。这对工件最终表面质量极为有利。如果需要使用高效刀具（例如盘铣刀），铣削自由曲面时唯有使用5轴联动加工机床才可行。



5轴加工应用领域

航空航天零件

零件的重量轻和强度高是航空航天业的基本要求。整体构件已被证明是减少飞行零件重量的最有效方法：复杂的工件结构全部用一个单件毛坯加工。金属切除率可能高达95 %。如此高的净毛比意味着毛坯采购的高成本。

整体构件应用中，5轴加工技术是降低工件重量的同时不牺牲工件强度方面的创新技术。首先进行计算机辅助结构优化，使零件几何特性适应受力要求。结果：机械受力最大的部位使用的材料多。而其他部位，大大减少所用材料。例如壁板厚度根据刚性要求使零件中的受力分布进行调整。例如，通过增加高度减小壁板厚度。这样使工件的几何形状可以方便地用5轴型腔铣削方式加工。



五轴加工早已成为飞机制造业的标准技术。高效率的要求需不断改进喷气发动机全部零件的空气动力学特性。这使得零件几何形状非常复杂，因此只能用5轴联动铣削技术加工。

5轴加工在汽车制造业中的应用

汽车的钣金和塑料件生产需要使用大量模具。钣金成形模具的最大长度可能达6 m，铣削加工的精度需要高达 $\pm 0.02\text{ mm}$ ，这样才能保证上下模间的间隙符合技术要求。而且，所有工作面的表面质量必须非常高，才能确保成形模具的长时间使用寿命。

加工模具曲面时，切削路径的运动距离必须保持很小才能确保达到所需的表面质量要求。这自然导致NC数控程



序运行时间加长。因此成形模具所需的精度是加工机床必须面对的挑战：大型零件长时间加工保持高精度要求机床结构和进给驱动系统的热稳定性好。

五轴加工技术在缩短加工时间方面开创了新的可能，因为它能方便地加工模具中大深度轮廓。此外，特殊模具，例如半径铣刀的使用能显著增加路径间距，因此能缩短程序运行时间。

五轴加工在医疗器械业中的应用

医疗器械行业的特点是医疗器械适应特殊检查或治疗方式的能力必须很好。这样使治疗更精确和带给病人的副作用更小。医疗器械产品形状通常都很复杂，因此适合使用5轴铣床的单件加工。

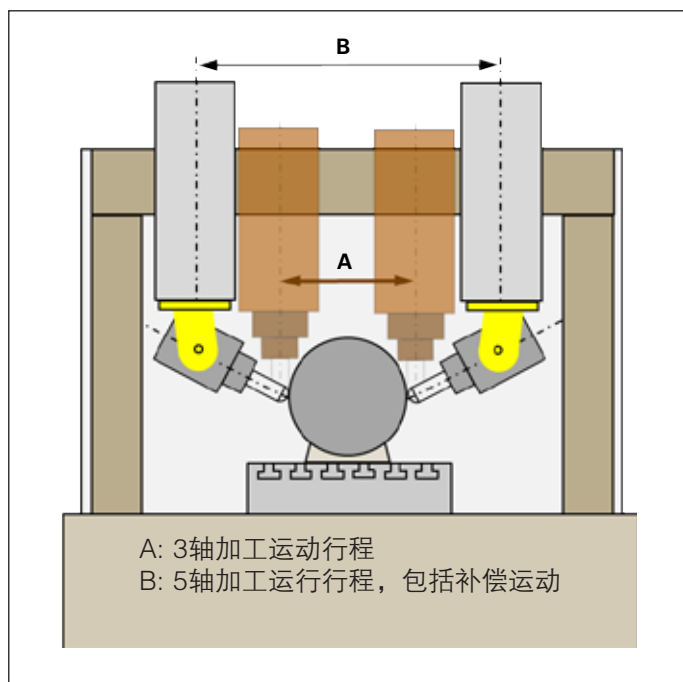
伴随着人类预期寿命的增加，对人造牙齿和关节需求也在提高。现在，人造髋关节和膝关节使很多人有机会提高生活质量。牙齿和关节的外形必须与人体的相应配合面完美配合。植入体基本都用铣床加工，因为铣削技术可以小批量生产。由于植入体的形状复杂，医疗器械业是5轴加工的最大应用市场之一。经济地加工高度复杂零件需要机床位置测量精度高和进给运动精度高。



位置测量要求

3轴铣削中，进给轴用不超过工件尺寸和刀具直径之和的尺寸运动。不同于3轴加工，5轴加工中，刀具的倾斜角必须相对工件表面进行调整。如果刀具中心点（TCP）位置保持不变，刀具方向变化通常需要直线轴有一定附加运动。这些补偿运动必然增加直线轴所需的运动范围。由于运动范围的增加意味着位置误差的增加，因此需要5轴机床的进给轴精度和重复精度必须非常高。

直线轴的补偿运动与NC数控程序要求的刀具中心点在X轴，Y轴和Z轴方向的运动叠加。由于叠加作用，刀具中心处的机床轴进给速度可能大大超过程序要求的进给速度。进给速度的增加导致电机，传动系统和循环滚珠丝杠发热。根据位置测量原理，发热使位置误差加大。为避免工件致废，高精度位置测量系统必须直接安装在机床运动件的进给轴处。



直线轴的位置测量

进给轴位置测量方法可以通过循环滚珠丝杠和旋转编码器测量，也可以用直线光栅尺测量。如果机床轴位置用进给丝杠螺距和旋转编码器（见图）测量，那么滚珠丝杠承担两项任务：作为驱动系统，它必须传递大驱动力，但作为测量设备，希望它的螺距精度高。但是，位置控制环中只有旋转编码器。由于驱动系统机械部件的磨损变化或温度无法补偿，这种控制方式被称为**半闭环控制**。驱动系统存在无法避免的定位误差，并严重影响工件质量。

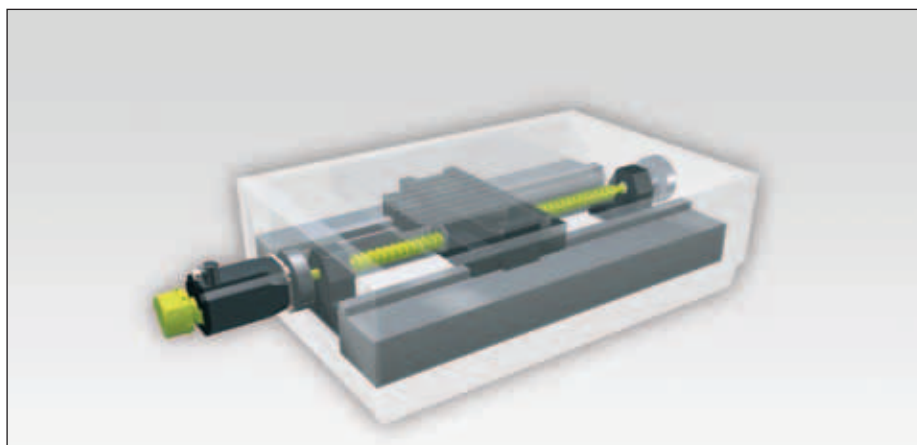
如果用直线光栅尺测量滑座位置（见图），位置控制环中包括全部进给机构。因此，这种控制方式被称为**闭环控制**。机床运动传递件的轴向间隙和误差不影响位置测量。也就是说测量精度几乎只取决于直线光栅尺精度和安装位置。

不同的应用条件以及高速进给和大进给力使滚珠丝杠温度条件不断变化。滚珠丝杠的局部发热，这个局部位置可以是滚珠丝杠的任何位置，对半闭环控制的精度有决定性影响。

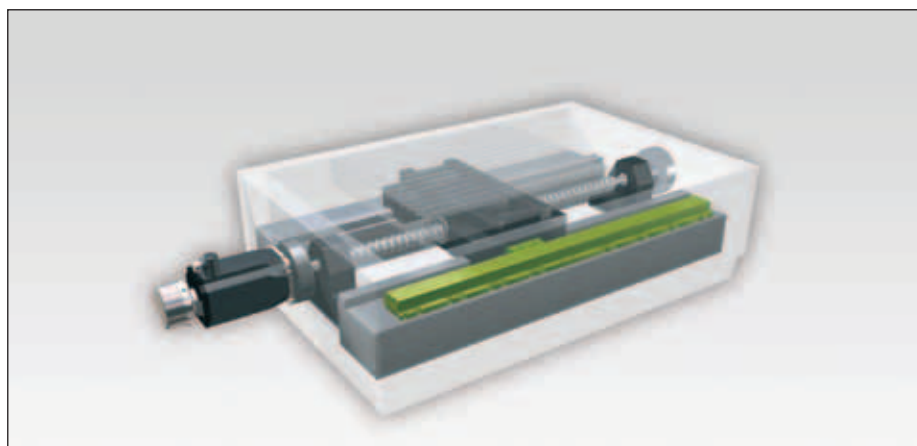
直线轴的全行程重复精度高和位置精度高要求只能用闭环控制的直线光栅尺满足。这样加工的工件精度高和废品率低。

直线进给轴不仅可以用循环滚珠丝杠驱动，也可以用直线电机驱动。如果

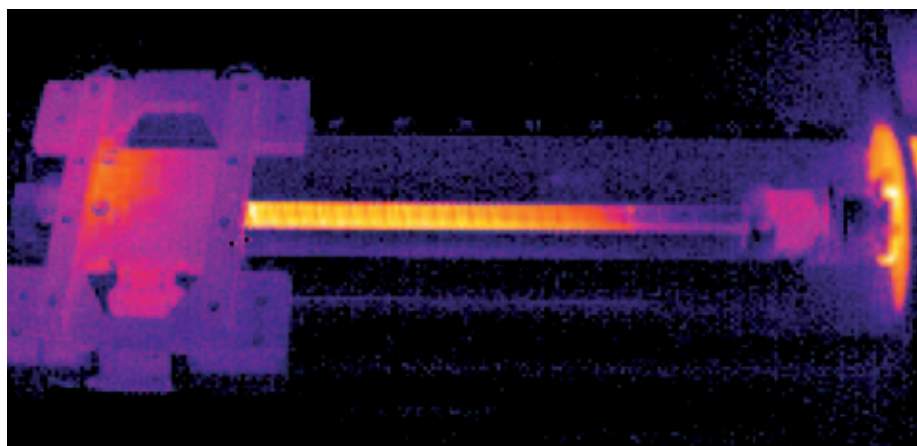
用直线电机驱动，机床轴位置也是用直接安装在机床轴滑座处的直线光栅尺测量。为保证直线电机的动态性能好同时工作噪音小，直线电机需要分辨率高和精度高的直线光栅尺。这种驱动方式将闭环控制的优点发挥地更为充分。



半闭环： 直线轴位置用进给电机内的旋转编码器测量



闭环： 用直线光栅尺测量直线轴位置



循环滚珠丝杠发热的热成像图

旋转轴的位置测量

直线轴的基本道理同样适用于旋转轴。这里的位置用电机内的旋转编码器测量或用机床轴中高精度的角度编码器测量。

如果用进给电机中的**旋转编码器**测量轴位置，这是**半闭环控制**方式，因为齿轮系统的运动传递误差无法在闭环的位置环中补偿。

旋转轴机械运动传递误差来源有

- 齿轮偏心，
- 间隙，或者
- 摩擦和齿轮轮齿接触区的弹性变形和传动轴轴承。

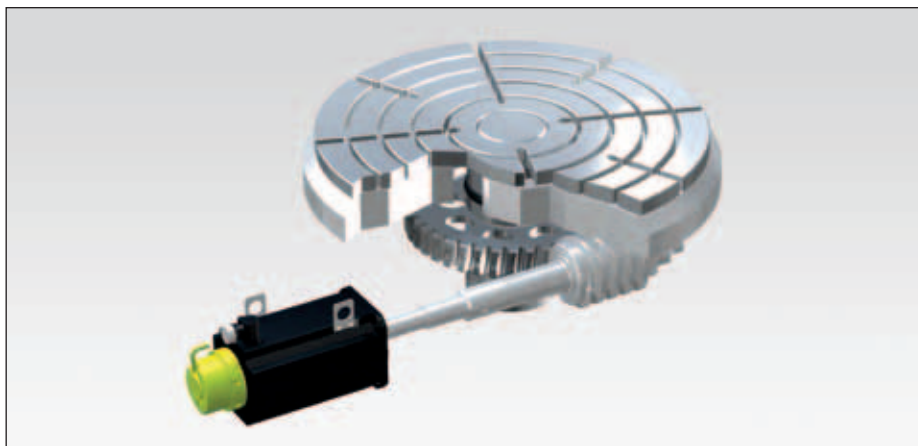
此外，大多数预紧的传动机构都使摩擦加剧，旋转轴发热加大，因此根据机械系统设计情况，这些因素导致位置误差。

半闭环控制中，旋转轴运动传递误差导致定位误差并显著降低重复精度。旋转轴误差导致工件几何误差，使加工件废品率增加。

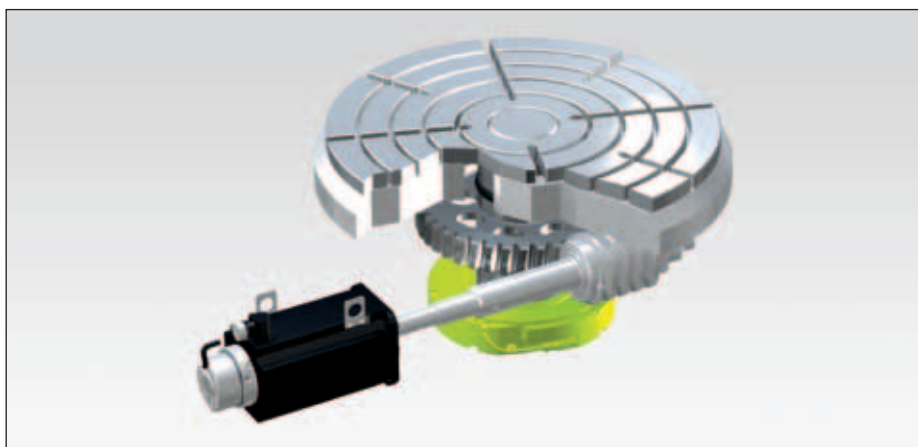
如果用高精度**角度编码器**测量将能大幅改善旋转轴定位精度和重复精度。这是因为轴位置测量不通过电机，而是直接测量机床旋转轴，因此这是**闭环控制**方式。旋转轴运动传递误差对定位精度没有影响。长时间工作时旋转轴运动到特定轴位置的精度也明显提高。因此，能最大限度降低废品率。

如果旋转轴直接用**力矩电机**驱动，效果更明显。力矩电机的特殊结构决定了它允许的扭矩更大，而且机械运动传递环节更少。力矩电机驱动的旋转

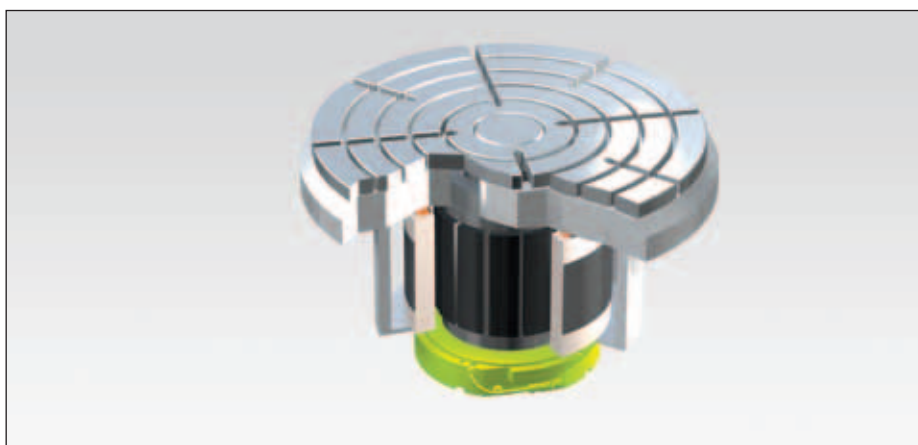
轴需要在机床轴中直接使用高分辨率角度编码器。也是**闭环控制**方式。



半闭环：进给电机用旋转编码器测量位置。驱动系统的误差不可检测。



闭环：机床轴位置用角度编码器测量。驱动系统的误差可检测。



力矩电机：力矩电机的旋转轴为闭环控制方式。

加工举例

高精度五轴联动加工

Telstar足球

1970和1974世界杯足球锦标赛的比赛足球被称为Telstar足球，Telstar是人类第一颗非军用通信卫星的名字，1963年由美国宇航局和美国电话电报公司送入太空。Telstar足球有20个白色六边形和12个黑色五边形缝在一起做成。

用该足球作为5轴铣床的工件样例。加工的工件用作检测件，检测5轴铣削的加工精度。

Telstar足球以一个车削的工件为毛坯用三个加工步骤完成加工：

- 沿垂直路径和用倾斜刀进行五边形三轴铣削
- 沿水平路径和用倾斜刀进行六边形三轴铣削
- 五轴铣削接缝

Telstar足球光滑如镜的表面只有高精度地铣削五边形与六边形间的接缝才能实现，尽管加工时间长达2个小时。



五轴加工1970和1974年Telstar世界杯锦标赛足球

Telstar足球的5轴加工顺序



铣削五边形：
3轴，倾斜铣刀
顺铣
加工时间：22分钟
进给速率：6 m/min
铣刀： $\varnothing = 16\text{ mm}$
行距：1.5 mm
倾斜角：40°



铣削六边形：
3轴，倾斜铣刀
顺铣
加工时间：2小时17分钟
进给速率：6 m/min
铣刀： $\varnothing = 16\text{ mm}$
行距：0.2 mm
倾斜角：40°



铣削接缝：
五轴联动加工
加工时间：11分钟
进给速率：0.4 m/min
铣刀： $\varnothing = 25\text{ mm}$
倾斜角：55°

刀具用不同倾斜角加工三条接缝交点位置。因此只有铣刀中心点（TCP）在三个不同倾斜角定位于同一点时才能高精度地加工出来。

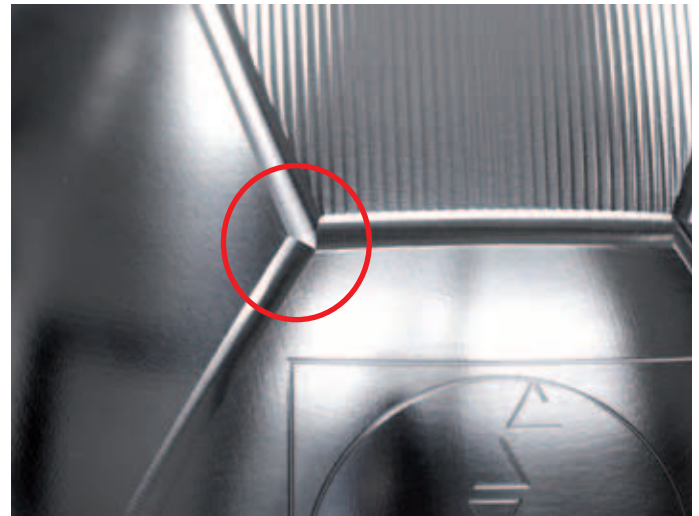
但是铣刀的三个倾斜角需要直线轴进行插补运动。无论是哪一条接缝，交点的TCP位置需要的直线轴和旋转轴位置非常不同。

铣削三条接缝过程中，一个或多个进给轴的定位误差都不可避免地导致TCP位置不在同一交点位置。高精度地加工接缝，包括其交点要求全部进给轴都具有很高的定位精度。

为了方便直观检查Telstar足球加工精度，全部用25 mm直径的铣刀加工0.15 mm深的接缝。这样加工的接缝截面深度很小，如果接缝深度有轻微误差（ $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ 或更小）也将导致接缝宽度变化。

如果Telstar足球用**半闭环**机床加工，定位精度和重复精度受到直线轴循环滚珠丝杠和旋转轴运动传动结构误差的限制。结果: Telstar足球接缝宽度变化。每条接缝的交点未准确相交在同一点位置现象表示接缝中心有位移。

闭环控制中，整个运动行程的进给轴定位精度高和重复精度高。这使工件相邻部位加工的精度也很高，包括需要经常改变刀具角度和加工步骤间的持续时间长的情况。接缝路径的交点可明显体现最终加工精度。每个交点沿全部三条接缝接近。此外，接缝宽度在整个Telstar足球的球面上保持不变。



半闭环：驱动系统对加工精度的影响。接缝宽度不同。接缝交点明显不准确。



闭环：由于海德汉高精度直线光栅尺和角度编码器，驱动系统的误差对加工结果没有影响。接缝宽度铣削准确，交点相交在正确位置。

五轴联动铣削平面

多面体铣削

五轴加工在缩短加工时间方面有巨大潜力。多面体的横向表面用平面铣刀和五轴联动方式围绕工件精加工一圈。与用球头铣刀加工横向表面的3轴加工方式相比，5轴加工方式缩短加工时间30 %。

进给轴的五轴联动高精度加工对进给驱动系统精度要求很高。根据位置测量类型，旋转和摆动轴的附加误差严重影响工件质量。因此，必须注意正确选用编码器并使其进入到控制环中。

多面体外表面用C轴转一圈同时插补B轴运动加工。加工横向表面期间，B

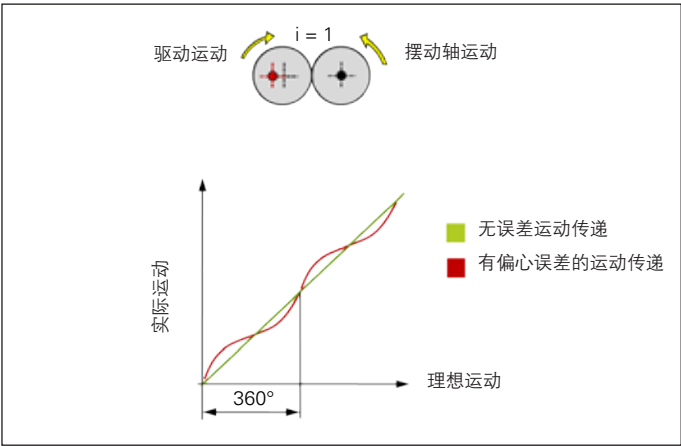
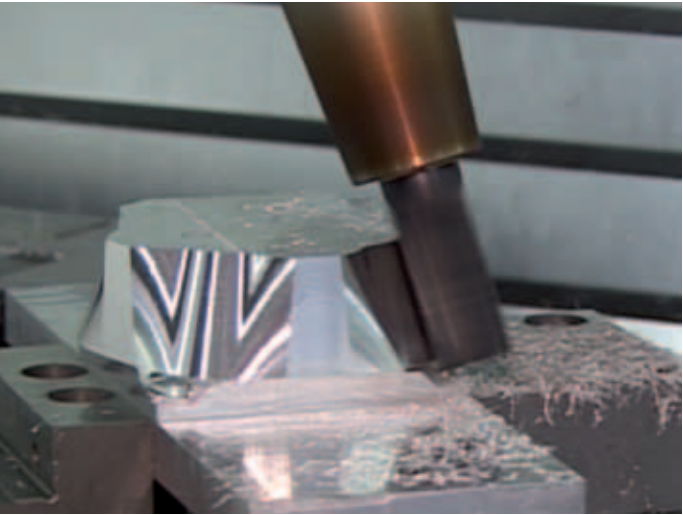
轴向内和向外摆动5次，角度在1° 至19° 之间。

为了用加工结果检查位置测量效果，一次用闭环控制的B轴加工，一次用半闭环控制的B轴加工。所有其他轴全部为闭环控制。

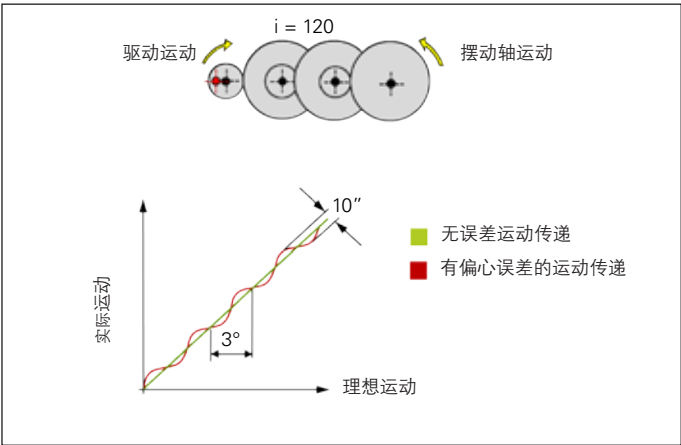
半闭环控制中，旋转轴机械传递误差导致位置误差，因此加工精度低。摆动轴通常用多级齿轮驱动。摆动轴不一致的运动，全部齿轮必须高精度地加工和精确组装。即使齿轮轻微的偏心也将造成摆动轴速度明显变化。

下图显示齿轮偏心的影响。精确组装的齿轮使驱动电机的运动传给摆动轴中没有误差。如果运动传递齿轮有偏心，摆动轴运动有正弦误差。

图示的多面体工件用有摆动轴的机床加工，齿轮速比为 $i = 120$ 。电机的小齿轮直径为40 mm。小齿轮径向跳动为 ± 0.058 mm。



传动系统偏心导致的旋转轴位置误差，齿轮速比 $i = 1$



传动系统偏心导致的旋转轴位置误差，齿轮速比 $i = 120$

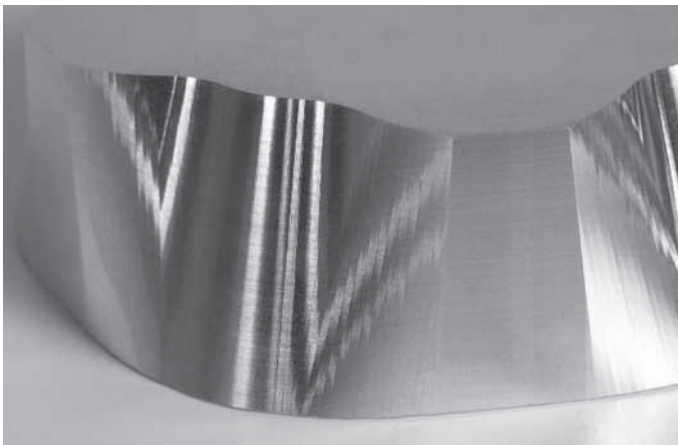
如果摆动轴用**半闭环控制**，运动传递系统的正弦位置误差无法被驱动控制单元检测到。驱动电机的偏心小齿轮转一圈导致的摆动轴运动误差大约为 ± 10 角秒。相对摆动角每 3° ，该误差重复一次。

第一个实验中，多面体工件用半闭环控制方式加工。运动传递误差导致的位置误差十分明显，这就是多面体工件横向表面的振纹。加工的形状误差为 $\pm 0.015\text{ mm}$ 。运动传递误差只出现在摆动轴运动的工件部位处。

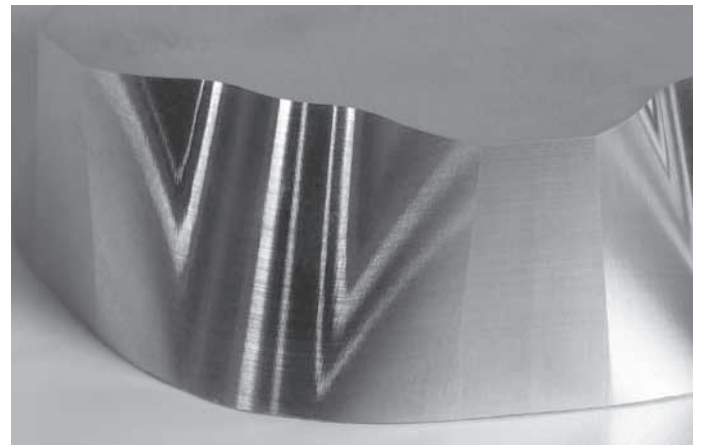
第二个实验中，摆动轴用**闭环控制**方式。这里使用海德汉光学扫描的角度编码器。角度编码器直接测量摆动轴的轴位置。这样运动传递误差的影响

被立即测量到。驱动控制单元立即响应这个误差并要求进给电机进行补偿运动。因此运动传递误差对加工没有影响。

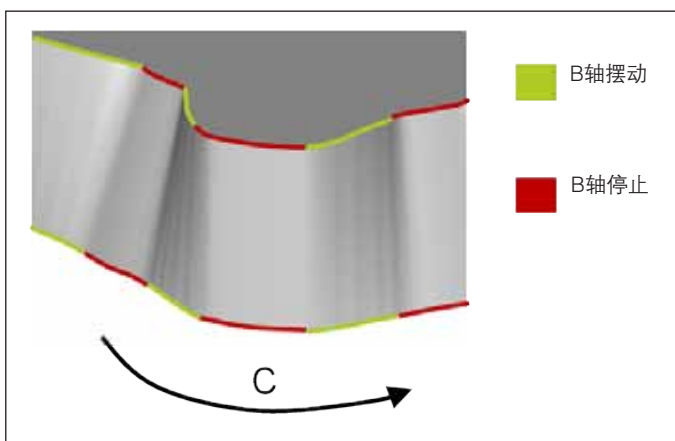
由于旋转轴使用海德汉角度编码器，用五轴联动加工的横向表面加工时间短，表面质量好和尺寸精度高。



半闭环：表面质量不好的多面体工件。



闭环：高质量表面的多面体工件



用平面铣削和旋转和摆动轴加工多面体

反向加工

旋转轴精度要求

棱体侧面通常用反向加工方式加工。先加工一个侧面，可能用摆动轴使工件相对刀具倾斜一定角度。工件再被回转工作台转动180° 加工对边。

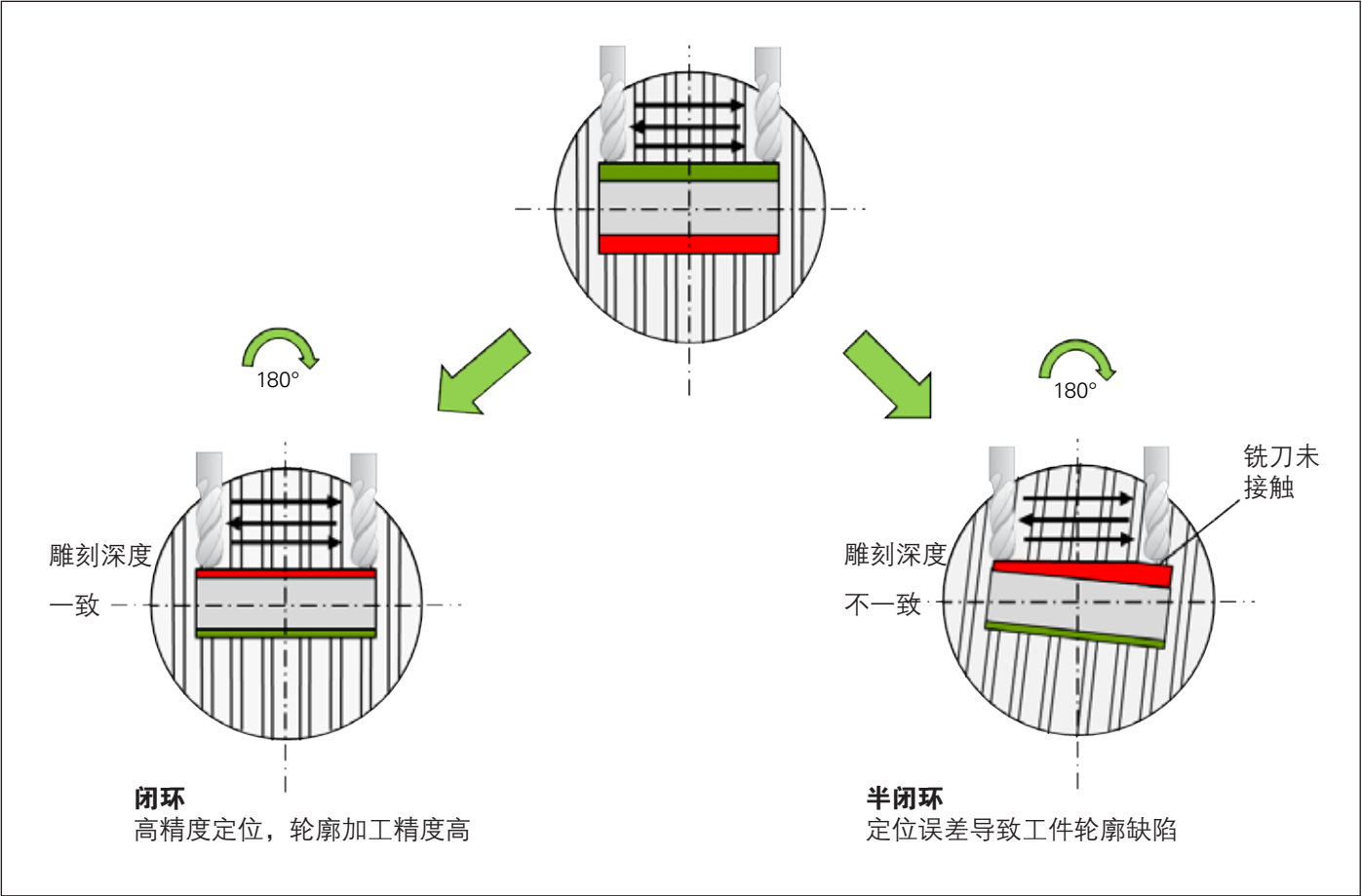
反方向加工对回转工作台定位精度要求严格。即使旋转运动的极小角度误差也将导致工件对边的平行度误差。一个边长500 mm的工件装夹在回转工作台上，只有毫度角度的定位误差也将导致垂直于表面0.01 mm的误差。

如果加工位置在驱动电机轴端测量（半闭环控制），旋转轴有定位误差，这是因为旋转轴运动传递机构（间

隙，弹性，齿轮轴的径向跳动）不在位置控制环中和无法补偿。根据驱动系统的结构特点，半闭环控制可能使回转运动的定位误差为 ± 10 毫度角度或更大。

如果用高精度角度编码器直接测量回转工作台运动，可以极大地改善回转工作台精度。回转工作台齿轮的运动传递误差用角度编码器测量，因此可以在位置控制环（闭环）中补偿。闭环控制方式中角度编码器的精度主要取决于回转工作台运动精度。光学扫描的角度编码器精度优于0.3毫度角度。

为直观显示反向加工中回转工作台的定位误差影响，在一个立方工件的侧面雕刻加工几个字符。首先用5轴铣床在倾斜面中探测工件的一个侧面。然后用球头铣刀并用3轴插补方式顺铣和逆铣加工字符。字符高度为0.025 mm。然后用回转工作台将工件转动180° 在工件对面加工相同高度的字符。



首先，用**闭环控制**方式铣削（见工件的☐）。然后，用同一台机床并用**半闭环控制**方式加工另一个工件（见工件的☑）。区别非常明显。用高精度直线光栅尺和角度编码器 and 闭环控制方式加工的字符没有缺陷，而用半闭环控制方式加工的字符有明显缺陷：半闭环控制铣削的工件背面，左侧雕刻深度深，而右侧基本没有加工到。

半闭环控制方式中与位置与方向有关的误差导致机床工作台和工件倾斜。这使得雕刻加工缺陷明显和使工件报废。



半闭环：驱动系统误差（例如运动传递误差）影响机床精度，因此影响加工精度和表面质量。



闭环：驱动系统误差对加工结果没有影响。由于使用了海德汉高精度角度编码器，加工后的工件轮廓精度高和表面质量好。

编码器

五轴加工对进给驱动精度提出更高要求，这是因为相对3轴加工，它的运动行程更大和轴进给速度也更快。进给驱动系统的发热和机械传动误差使进给驱动的位置测量精度对加工精度有决定性影响。正确测量位置将能最大限度降低废品和成本。

因此直线轴的直线光栅尺和旋转和摆动轴的角度编码器成为定位精度要求高和加工速度快机床的不可或缺技术。

这是由于海德汉直线光栅尺和角度编码器能直接和立即确定轴的运动位置。由于运动特性误差，受热误差和作用力的影响全部被直线光栅尺和角度编码器测量并进入位置控制环中，因此机械传递系统对位置测量结果没有影响。因此它能消除潜在多项误差源。

直线轴：

- 滚珠丝杠温度特性导致的定位误差
- 反向误差
- 机械力作用导致驱动机构变形形成的误差
- 滚珠丝杠螺距误差导致的运动特性误差

倾斜，摆动和回转轴：

- 机械运动传递误差
- 反向误差
- 机械力作用导致驱动机构变形形成的误差



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：直线光栅尺用于NC数控机床
- 样本：角度编码器
- 样本：无内置轴承角度编码器