



## 技术信息

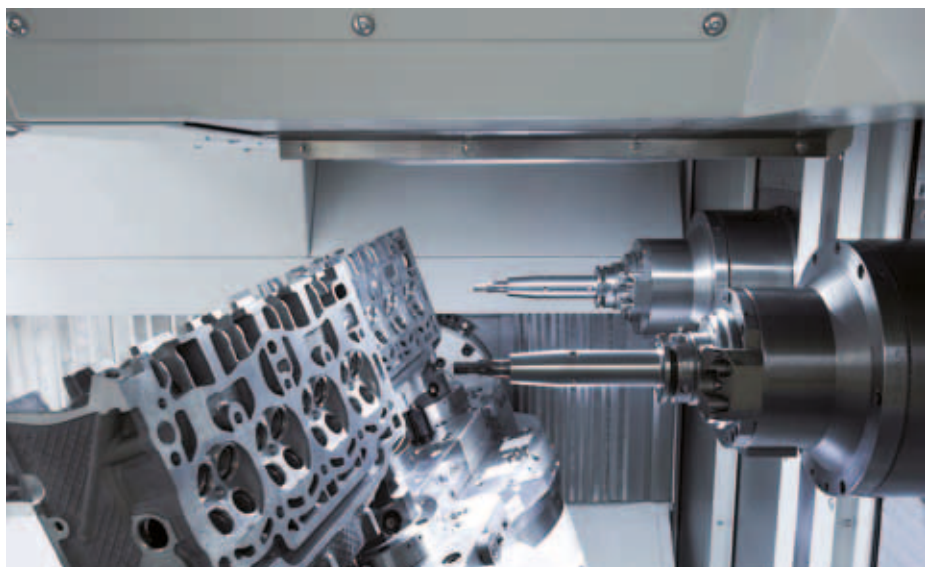
# 更高精度的加工中心在自动化大批量生产中的应用

汽车客户有许多不同的应用条件，因此需要不同类型的汽车和发动机，燃油成本、排放标准和税务等不同市场条件对汽车尺寸、发动机类型或功率都构成不同的要求。对于汽车制造商，他们难以预测产量变化或制定产能计划以及设计生产线。

为满足客户需求，汽车制造商需要生产缸数相同而性能等级不同的发动机，也就是说需要生产更多品种的产品。日益缩短的汽车生命周期以及日益激烈的市场竞争，使汽车制造商不得不面对与以往不同的生产挑战[1]。为应对这种挑战，需要增加传统生产如质量、时间和成本的灵活性。

不同于固定节拍和生产力较高的传统连续生产线，汽车动力总成部件（发动机、变速箱和车桥部件）的加工生产线需要调整为由多台互连的加工中心组成，以提高灵活性。除应对汽车销售市场波动的挑战外，未来的法律及最终用户对汽车污染物排放及燃油消耗有更加严格的要求。应对方式之一是减小动力总成的摩擦，这就是说必须提高被加工件的质量。

生产线中多台互连加工中心还需要满足汽车制造商对大批量汽车生产过程安全的要求（参见图1）。在加工中心进给轴闭环控制中应用直线光栅尺能满足这些多方面的要求。



# 从连续生产线到多台互连加工中心 提高品种、机型和产能灵活性

## 连续生产线的可调整性不足

由于连续生产线上的每个工位被设计为执行特定工件的特定加工任务，这些固定不变的工艺链生产线难以通过简单地增加工位方式进行扩展。为满足最高计划产能的要求，开始生产（SOP）时需要投资建设生产线的绝大部分设备。由于生产初期时的产量增长缓慢（增产）或产品生命周期结束时产品逐渐退市产量缓慢降低（减产），必然导致产能富余（图2），其结果是不能充分利用已有设备产能。

还有其它方面的挑战，例如，如果正常生产期间的所需产能大于连续生产线的原计划能力，市场所需的工件将无法用已有生产线的产能满足。然而，为应对最高产量要求而新建一条连续生产线可能导致产能严重过剩。

## 多台互连加工中心的灵活性

产能较小的生产线可用多台互连加工中心组成，它能执行更广泛的生产任务，因此拥有更高的生产灵活性。在增产阶段，实际所需产量可通过在现有生产线的空工位处增加加工中心数量或增加一条完整生产线方式满足。

这种接近产能需求的可用产能生产方式能尽可能经济地扩展生产系统[2]。因为，现在的大批量汽车动力总成部件的生产方式与连续生产线方式十分不同，越来越多地采用加工中心或中转中心方式[3]。

多台互连加工中心更高的灵活性直接使汽车制造商能更快和更经济地应对需求波动的要求。例如，当需要不同品种的工件在同一个生产线上加工时，无需调整设置（品种灵活性）。

另一个方法是增加机床数量轻松扩展生产线。这可被称之为**重用灵活性**，它用标准机床以及标准化的机床互连，简化其它生产线的系统集成并重用这类机床。

如果考虑生产线产能与被加工件全生命周期期间的关系，上述需求波动导致生产线的产能需求与可用产能间的不匹配。而对于连续生产线，只能较大地提高产能，而多台互连加工中心生产线能在增产阶段小幅度逐渐提高产能。减产时，由于这种生产线高度灵活，生产线也能再次退出生产[4]。图2为加工件增产阶段的分步投资方式，以及减产阶段的缩减产量（数量灵活性）。

图3为动力总成部件机械加工生产线的布局举例。图示中的加工中心通过桁架式装件机连接在一起，并分为多个加工作业组。因此，一组加工作业包括同时工作的多台加工中心，其加工任务相同。

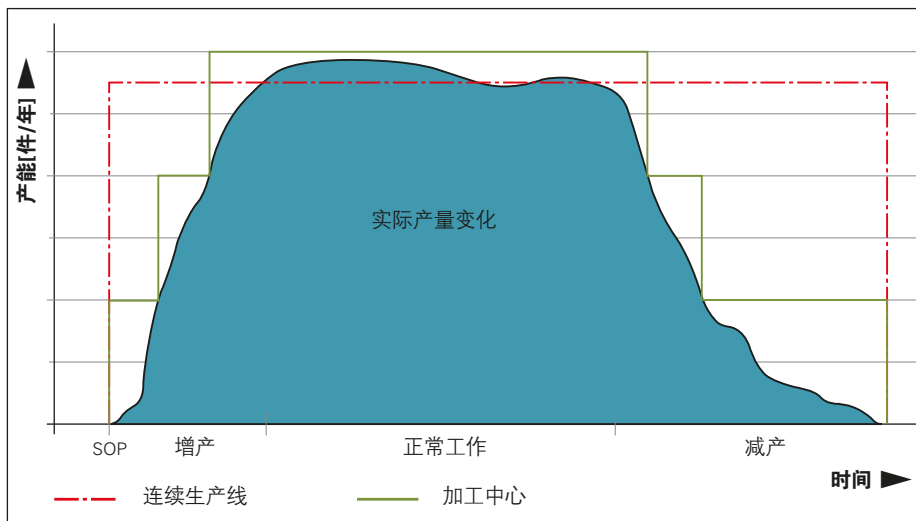


图2：产量灵活性——可用产能与产能需求[4]

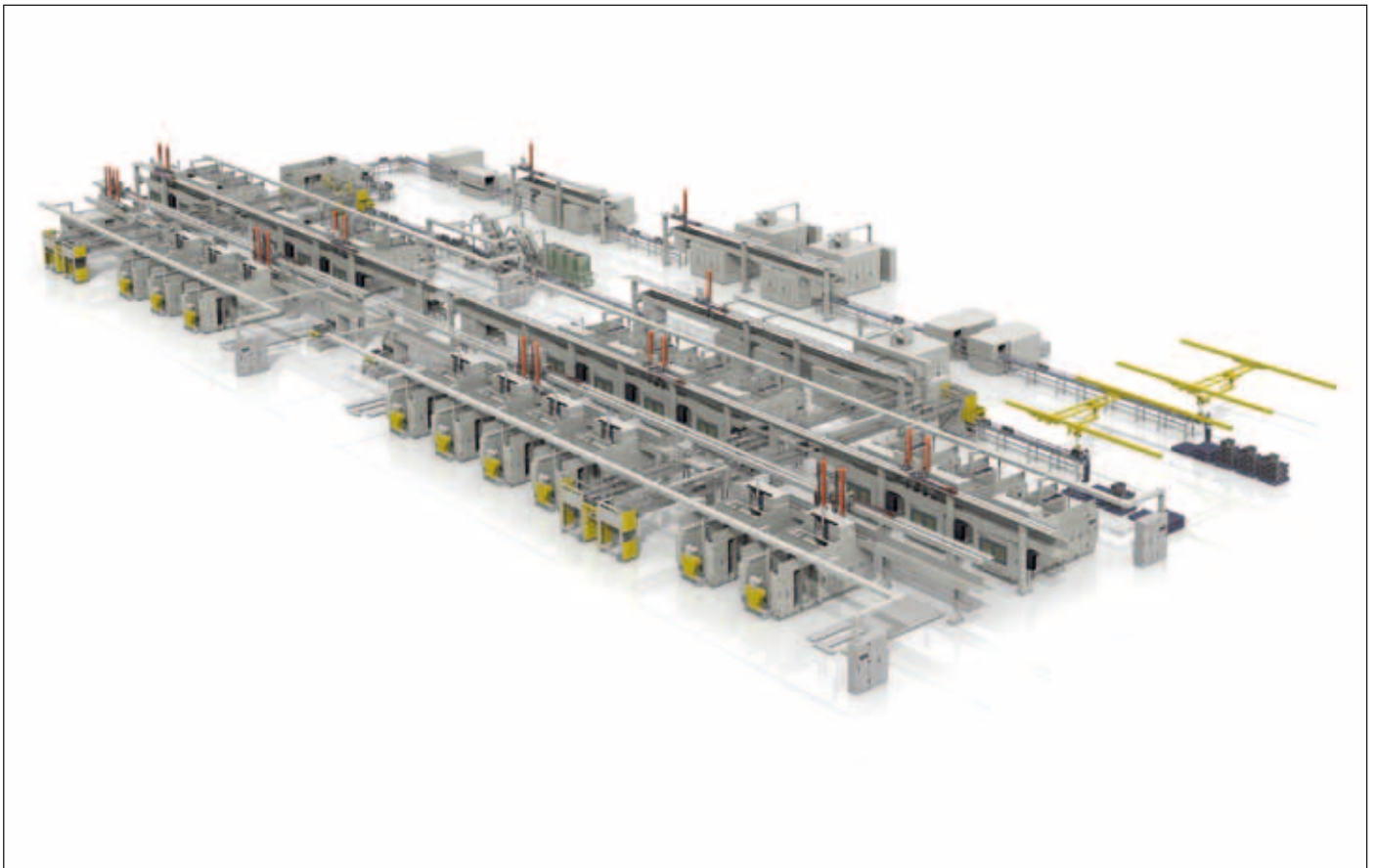


图3: 大批量生产的生产线举例 (照片: MAG IAS GmbH)

#### 卧式加工中心的优点

卧式加工中心常用于生产应用, 它的优点是落屑性能好, 因此冲洗切屑时可用较少冷却润滑液甚至微量润滑液 (MQL)。这些机床易于实现自动化, 可轻松从正面或机顶装件, 同一机型能用于不同生产线, 甚至不同的装件系统。有时使用底座略大的双主轴机床, 它的生产力更高 (参见第1页图1)。

#### 大批量汽车生产的特点

总之, 大批量汽车生产中, 立方体工件的加工有以下特点:

- 多台互连卧式加工中心组成的自动化生产
- 一名机床操作员控制8台至15台机床
- 加工作业通常由同时工作的多台相同加工中心组成, 其加工任务相同
- 工件通过多个加工步骤顺序完成加工
- 一个工件用多台加工中心生产, 这就是说多台加工中心共同负责满足工件的公差要求

特别是最后一点十分清楚地告诉我们, 工件的最终生产公差取决于每台机床或整个生产系统的每步加工。这不同于模具生产, 模具生产中, 工件用一台机床加工并由一名机床操作人员控制, 而大批量生产, 工艺链上的不同加工步骤之间相互依存。设计工艺及生产线时, 必须考虑这个因素。

# 立方形动力总成部件 加工工艺和公差

汽车的动力总成分为发动机、变速箱和车桥模块[1]，这些模块又由一系列部件组成，例如气门机构及其部件。缸盖、曲轴箱和变速箱箱体都是动力总成生产中传统的立方形工件。

由于其产量大及相应的经济性要求，通常在机械加工前，已将工件生产为接近最终形状。这就是说工件的主要几何要素已由铸造或锻造加工确定，例如锻造的连杆或曲轴，这影响到立方形工件的加工作业[5, 6]。

## 钻孔重点

图4为缸盖加工作业。铣削加工相对钻孔或类似加工较少，这不难理解，因为除少数部位外，这类工件的主要几何要素采用铸造成形。

而铸件中的特定孔只能用较高成本方法制造，否则无法制造这样复杂的几何形状。它们只能在机械生产线上用钻孔加工方式制造，因此钻孔加工占加工的比例很高。

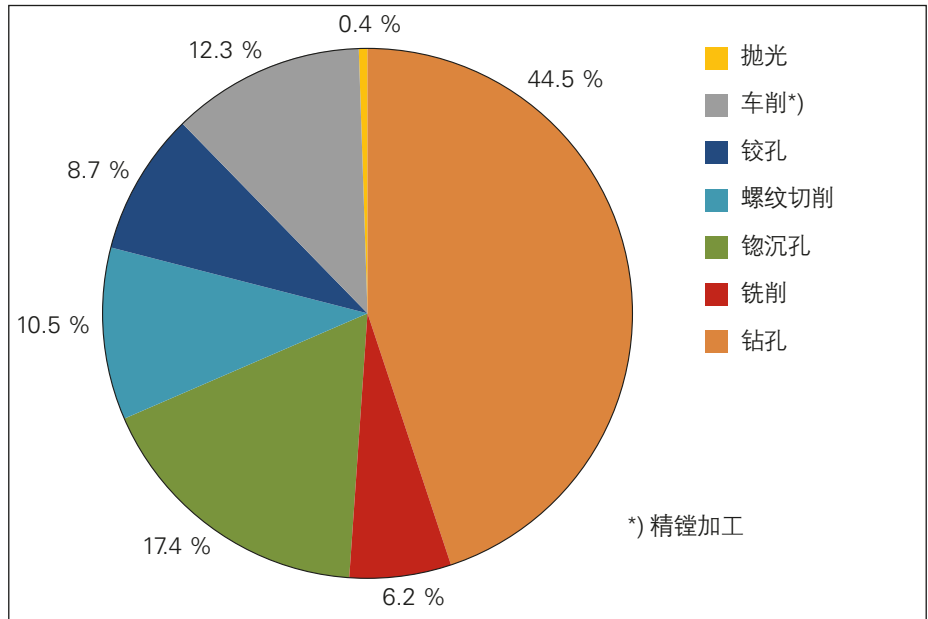


图4：缸盖生产中的加工方式及其比例 [5]

多种加工作业也能让我们得出加工所需轴运动的结论。由于钻孔加工，大部分运动为刀具相对工件的定位运动以及单轴进给和退刀运动。而且由于工件通常没有自由曲面，铣削加工中，除定位运动外，在加工面中运动（沿两个直线轴运动）足以完成加工。

因此，工件加工的主要几何公差大部分由钻削加工决定。除主要由刀具尺寸，例如铰刀，决定直径公差外，工件图纸还有孔位、孔距和孔深的公差技术要求。



图5：海德汉直线光栅尺在卧式加工中心的应用  
(照片：GROB-WERKE GmbH & Co. KG)

### 直线轴决定尺寸精度

满足指定公差要求的能力由机床的直线轴等因素决定，直线轴确保高精度的定位（图5）。根据工件或图纸要求，不同的被加工几何要素的公差或公差带可能不同。

图6为曲轴箱的公差分布（孔位、孔距和孔深公差）。从该例可见，大约30%以上的所分析公差 $\leq \pm 0.1$  mm，设计人员要求的缸盖和变速箱箱体的被加工几何要素公差 $\leq \pm 0.1$  mm。这些是缸盖气门机构钻孔加工的孔位和孔深公差以及差速器箱体上主轴承与轴颈轴承孔的孔心距公差举例。

### 可靠地满足严格公差要求

要满足更高灵活性所需的以上要求，生产商的目标之一是用标准机床进行生产，而无需为不同尺寸的加工而部署专用机床。这就是说，即使公差值 $\leq \pm 0.1$  mm，他们生产线上的加工中心仍必须安全且可靠地满足要求。

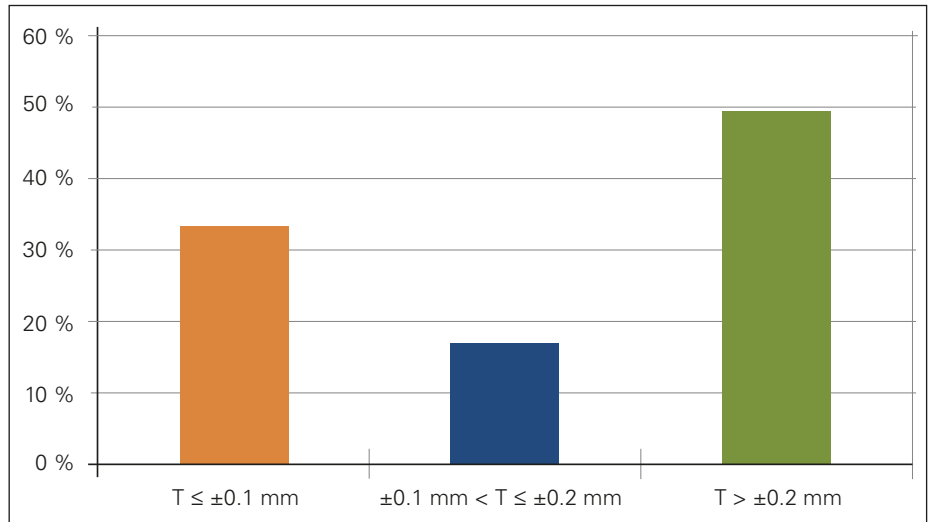


图6：曲轴箱的孔位、孔距和孔深公差分布

# 立方形动力总成部件

## 用能力分析确定机床能力与过程能力的技术条件

前面所定的公差值相对模具制造业看似比较大。但我们必须考虑到汽车工件的公差值是设计人员设计图的初始技术要求。汽车制造商对加工中心进行了统计能力分析，以确保机床和采用的生产工艺能够在一段比较长的时间内满足设计图公差要求，不超出公差范围的安全线[7]。

### 机床和工艺的能力测试

对于机床验收测试，例如用系统或单机生产50件，所生产公差分布用统计方法进行处理。用能力测试确定能力技术条件或能力指数。

要确定**机床能力**，定义 $C_m$ 或 $C_{mk}$ 指数，为记录**过程能力**，定义 $C_p$ 或 $C_{pk}$ 指数。 $C_{mk}$ 和 $C_{pk}$ 指数代表多个工件所测得公差值的分散性。

机床能力的确定让我们能知道在基本不变的约束条件下机床生产公差的临时分散性（=短期测试）。过程能力用于确定工艺约束条件下，机床的长期分散性（=长期测试）。图[7]为基于机床所生产工件的公差测量值计算这些指数的公式以及其它信息。

等式1定义变量 $C_m$ 和 $C_p$ ：

$$C_m, C_p = T / (6 \cdot s) \quad (\text{等式1})$$

$T$  = 图纸尺寸的公差范围  
 $s$  = 标准方差

制造商定义质量方面公差的能力指数，机床制造商的生产机床在验收测试中必须至少满足这些指数要求。有关验收测试，确定这些指数将进一步限制工件图纸定义的公差。图7为考虑机床能力技术条件 $C_m$ 情况下， $T = \pm 0.1 \text{ mm}$ 公差值的举例。汽车制造商还根据部件的功能定义不同类型的几何要素公差，关键尺寸（ $C_m = 2.00$ ），重要尺寸（ $C_m = 1.67$ ），一般尺寸（ $C_m = 1.33$ ）。

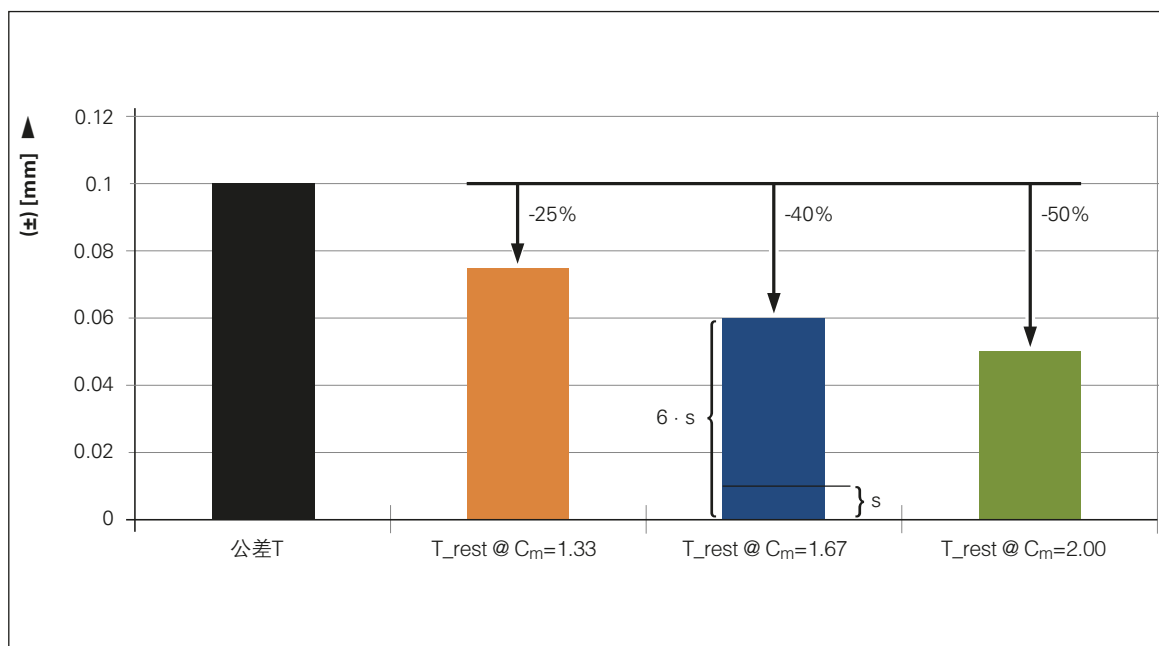


图7：图纸公差要求与能力指数 $C_m$ 间关系

### 目标：最小分散性

为保证高质量工件的一致性和最低废品率，目标是生产公差的分散性最小，也即偏离标准值的偏差要小。因此，等式1被表示为：

$$C_{m,measured} = T / (6 \cdot s) \geq C_m \quad (\text{等式2})$$

或者

$$6 \cdot s \leq T / C_m \quad (\text{等式3})$$

$C_{m,measured}$ 是机床验收期间由一定数量所生产工件，例如50件，带公差尺寸测量值所得的指数以及由测量值所计算的标准方差。

### 能力测试用于检查是否满足最大可接受的分散性要求

等式2表示能力指数，它来自测量值大于标准方差的下限。工件测量值

( $C_{m,measured}$ ) 大于或等于制造商要求的  $C_m$  值。如果考虑这个因素，按照制造商要求的带公差尺寸的最大可接受标准方差确定能力指数 (等式3和图7)。

以图7为例， $C_m = 1.67$ ，它表示最初公差为  $\pm 0.1$  mm，不同工件全部公差尺寸测量值的99.73 %在  $\pm 0.06$  mm范围内。因此可接受的标准方差最大值只有  $\pm 10$   $\mu\text{m}$ 。要达到这样的公差值要求，对大批量生产应用的多台互连加工中心来说极有挑战性。



# 加工的误差极限

## 加工中的缺陷尺寸及其影响

上页简要介绍了汽车动力总成工件公差地放大情况。问题是地加工几何要素在加工中生产的公差占可用公差的比例。

如果总误差大于可用公差，机床或工艺将不能满足指定的加工任务要求。下面我们分析机床的误差极限，例如由于工件夹持或进给轴的热位移导致的误差，目的是通过比较可用公差与现有误差极限以确定剩余的公差裕度。这个裕度是为机床或工艺对无法预测或难以控制的生产影响所留出的部分。

### 工件夹持的定位公差

机床装件通常自动进行，用特殊装件装置，例如桁架式装件机。加工工件前，需要将工件固定在地位并夹持在机床的夹具中，而且由于无人操作，通常用夹具的定位销定位工件。这就是说必修考虑工件定

位孔与生产线上夹具的定位销之间的机械配合公差。

根据图纸的技术要求，在生产线生产的每一个工件的定位孔公差要求全部相同，但每个工件的实际生产尺寸都不同。夹具的每一个定位销同样如此。因此，不可能实现完全相同的定位偏差。然而定位孔和定位销所要求的最大公差范围必须在各种情况下都可满足，否则将为废品。这样就能评估误差极限。

对于以上的立方形汽车动力总成部件（缸盖，曲轴箱，变速箱箱体），定位孔的钻孔直径通常为12 mm。不希望在地定位销内夹持工件，因为这可导致装件系统的巨大负载或导致工件夹持误差，因此可能造成生产线停产。

为避免出现该情况，下面假定用 $\varnothing 12\text{ H7/js6}$ 的过渡配合。这些技术要求能使夹具的工件定位达到以下最大误差极限：

$$\text{定位孔 } \varnothing 12\text{ H7} = \varnothing 12^{+0.018}_0 \text{ mm} \quad (\text{等式4})$$

$$\text{定位销 } \varnothing 12\text{ js6} = \varnothing 12^{-0.0055}_{+0.0055} \text{ mm} \quad (\text{等式5})$$

$$\varnothing (12.018 - 11.9945) \text{ mm} \\ = \pm 11.75 \mu\text{m} (\text{径向}) \quad (\text{等式6})$$

要加工公差严格要求的几何要素，有时需要在夹持工件前用液压油缸沿确定方向将工件推入夹具内。这就是说工件沿径向方向压入定位销，因此距中心钻孔轴，最大仅误差极限的一半（ $\pm 5.88 \mu\text{m}$ ）。由于运动机构通常使夹具更加复杂，因此也更加昂贵，无法安装在任何一个加工工位处。

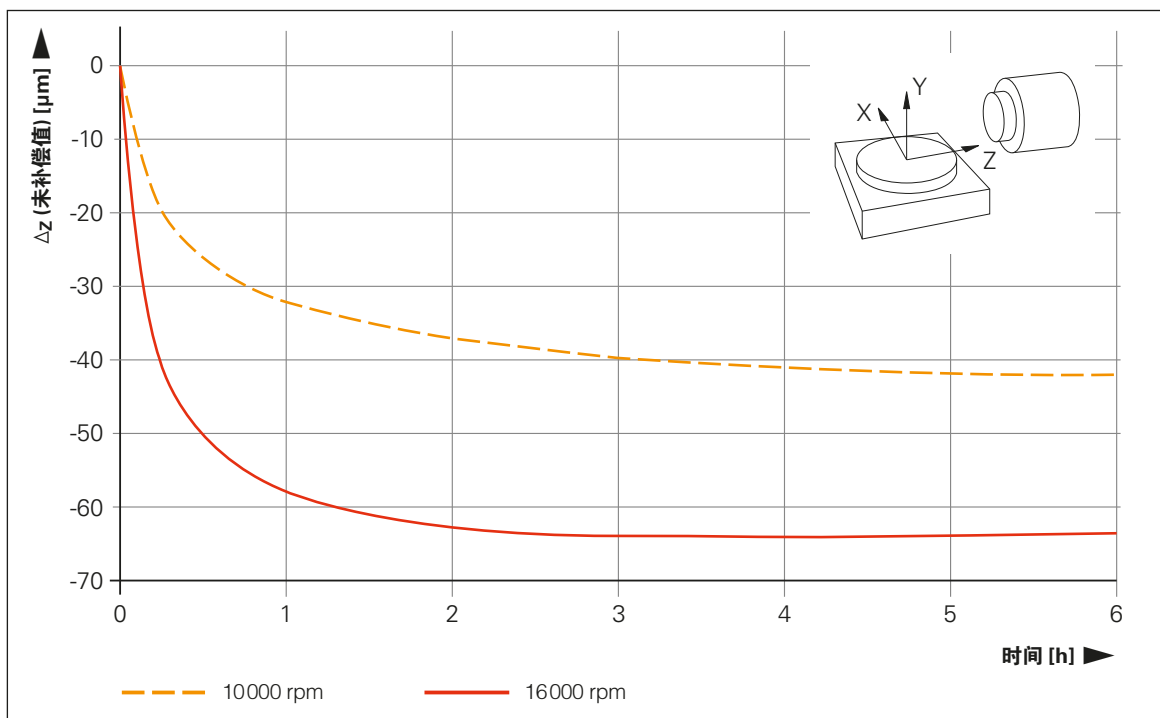


图8：主轴发热导致的Z轴未补偿的热位移测量值



### 换刀公差

刀具方面，换刀也存在误差，也与所用刀柄有关。上述特定生产线的加工中心中，通常使用主轴及空心刀柄的刀具。据文献[8]，空心刀柄的典型重复精度为 $< 1 \mu\text{m}$ （轴向）和 $< 3 \mu\text{m}$ （径向）（ $\equiv \pm 0.5 \mu\text{m}$ 轴向； $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 径向）。

### 主轴鼻端热位移

加工期间主轴鼻端的轴向位移影响已定义深度的孔，如果需要加工已定义间距的两个平行面，例如燃烧室和缸盖端面，将影响端面铣削。加工期间，主轴发热对主轴热膨胀有严重影响，因此影响Z轴结构。上述生产机床通常采用电主轴。变化的加工条件导致工作性能的不稳定，因此内置的主轴驱动和主轴轴承导致热负荷的变化。由于电主轴紧密集成在机床进给轴结构内，热量通过电主轴壳体和安装面传导到机床进给轴结构中。因此，电主轴通常连接冷却系统。

图8为配电主轴的加工中心在预热阶段沿Z轴方向的热位移测量值。图中所示的热位移是刀具中心点相对机床工作台，空载转速分别为10,000 rpm或 16,000 rpm时的测量值。这些测量值不包括加工期间主轴负载导致的附加热负荷和热位移。可以预计主轴负载与转速时的热位移要明显高于空载时的热位移值。

根据图8的测量曲线，空载转速16,000 rpm时，主轴鼻端相对机床工作台沿Z轴方向上的热位移约 $64 \mu\text{m}$ 。数控系统的补偿模型通常能减小热位移，大约可减小热位移约80%。对于图示的测量曲线，这意味着剩余值为 $12 \mu\text{m}$ （ $\equiv \pm 6 \mu\text{m}$ ）。

# 加工的误差极限

## 位置检测方式导致的误差尺寸

另一个因素是滚珠丝杠驱动的进给轴有关实际位置值确定方式间的不同。主要区别是轴编码器的安装位置以及进入进给轴控制环的方式。图9为半闭环与全闭环控制的进给轴结构。

### 半闭环和全闭环

半闭环是指进给轴的位置控制环通过进给电机的编码器形成的控制环。这里，编码器测量进给电机轴的角度位置，而不是测量轴滑座需运动的位置。用角度测量值与滚珠丝杠螺距计算滑座位置并假定进给轴或机床工作期间，角度位置与丝杠螺距及滑座位置关系保持不变。如果该关系改变，例如滚珠丝杠热膨胀或磨损，那么计算的位置值则不正确。数控系统和编码器“无法感知”进给轴传动系统的变化。

对于进给轴的全闭环工作方式，进给轴滑座位置用直线光栅尺测量，并将实际位置测量值反馈给轴的位置控制环。工作期间，滑座的任何位置变化，例如滚珠丝杠驱动的热位移，都被检测到并用轴的控制系统进行调整。

### 系统性位置偏差和随机位置偏差

进给轴定位运动期间的定位误差（[9]，[10]）。系统性偏差是指在相同边界条件下可重现的偏差，因此它可以被补偿。随机偏差不可重现，服从一定统计规律。机床轴定位的随机偏差的影响效果用位置变化范围表示。

如果一台有位置公差的机床对工件进行钻孔加工，那么必须将位置变化范围视为不可重现的误差因素。实际测量结果显示，半闭环方式的进给轴，500 mm至800 mm长的进给轴的位置变化范围典型值大约为 $2\ \mu\text{m}$ （ $\approx \pm 1\ \mu\text{m}$ ）。

如果进给轴滑座采用直线光栅尺并将实际位置值反馈给位置控制环，将降低进给轴摩擦的影响和直线导轨对定位精度的影响。测量结果显示，全闭环控制的位置变化范围比半闭环方式通常小40%至50%（ $\approx \pm 0.5\ \mu\text{m}$ ）。

### 热位移的减小

“进给轴精度”和“机床加工精度”技术信息文档中的测量结果显示，半闭环控制的滚珠丝杠进给轴，行程运动800 mm的热位移可达 $40\ \mu\text{m}$ （ $\approx \pm 20\ \mu\text{m}$ ）以上（[11]，[12]）。如果冷却滚珠丝杠，且冷却系统质量高（温度稳定性 $\leq 1\ \text{K}$ ），热位移能减小50%。

由于增加冷却系统，每个进给轴需要加装冷却液管及旋转接头使冷却液进入滚珠丝杠中。

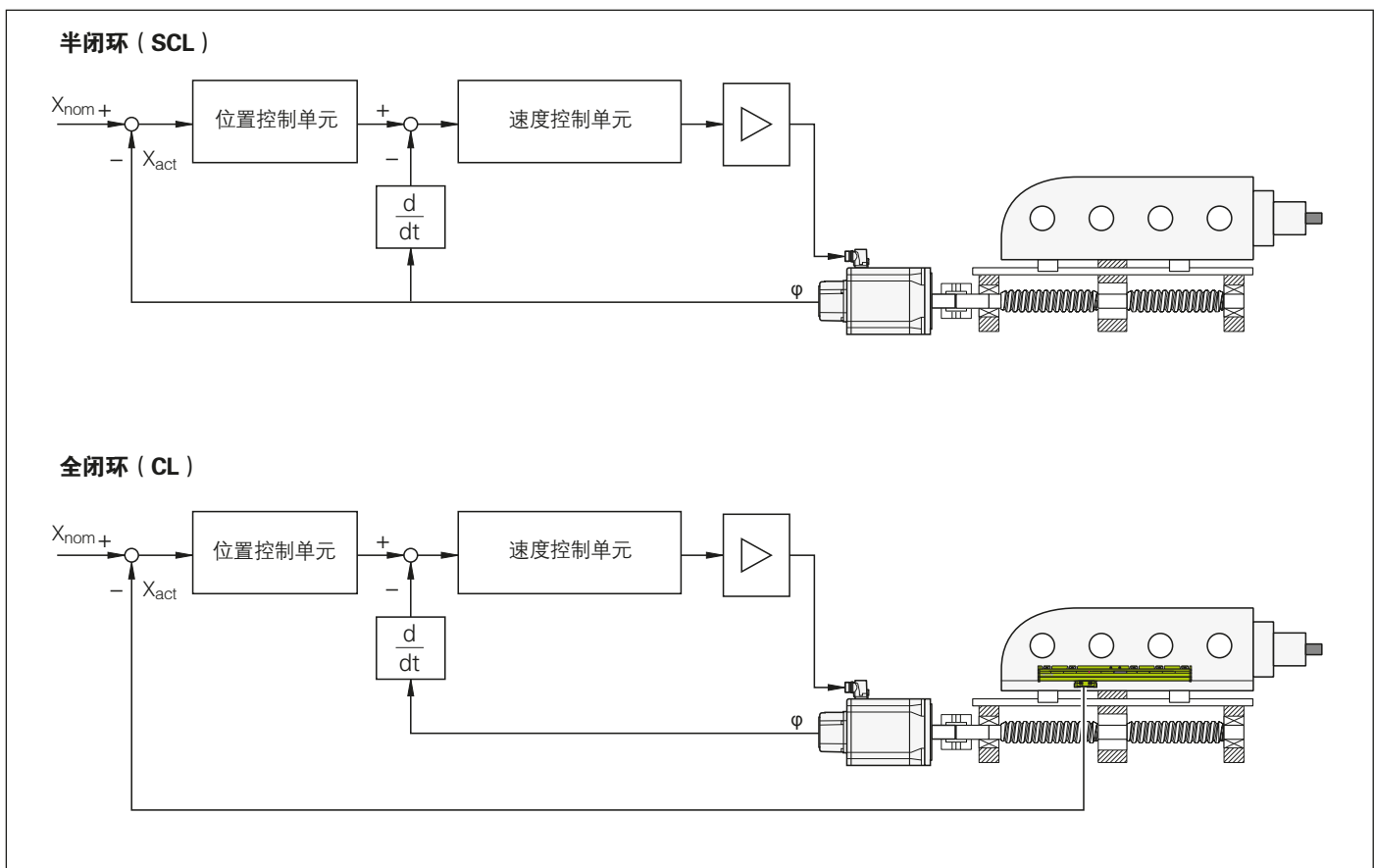


图9：半闭环与全闭环控制原理

	评估的误差极限[μm]	
	半闭环	全闭环
工件夹持定位	± 11.75 ± 5.88 (带滑座)	
换刀误差 (空心刀柄)	± 0.5 (轴向) ± 1.5 (径向)	
主轴热位移 (补偿后)	± 6	
位置变化范围 (500 mm < X ≤ 800 mm)	± 1	± 0.5
滚珠丝杠发热导致的热位移	± 20 ± 10 (冷却的滚珠丝杠)	± 1
三坐标测量机的直线测量偏差 (CMM)	± 1.5	

表1: 评估半闭环与全闭环的误差极限

而全闭环控制能更显著地减小滚珠丝杠的热位移。直线光栅尺检测滚珠丝杠热位移并在轴控制系统中调整位置值—将剩余的热位移减小到 $\leq 2 \mu\text{m}$  ( $= \pm 1 \mu\text{m}$ ) [11]。

表1为上面估计的误差极限, 以及比较半闭环与全闭环控制方式进给轴的误差极限。评估加工公差占技术要求的误差极限的比例时, 必须考虑工件位置和工件中的带公差被加工几何要素。因此, 只有沿指定公差方向上的误差才占用可用公差极限的份额。

#### 工件测量的影响

工件的尺寸精度通常在适当计量室中用三坐标测量机测量确定。三坐标测量机的几何结构与机床类似, 也存在误差影响, 评估工件尺寸时也存在测量偏差。测量偏差的影响程度:

- 计量室的温度波动
- 三坐标测量机的几何误差
- 探测误差
- 所选测量方式
- 工件夹持误差及操作人员误差
- ...

由于剩余的测量偏差必须明显小于被评估的尺寸公差, 三坐标测量机通常工作在温度控制的计量室中。生产和组装三坐标测量机需要更高的精度, 并用直线光栅尺组成全闭环控制。

通过计算补偿值进一步减小剩余偏差 (例如探测期间探头弯曲导致的误差)。为确保可靠地测量带公差的长度尺寸, 三坐标测量机的直线测量值偏差大约不能超过被评估公差的十分之一。对于工件图纸要求 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 的公差, 这就是说测量误差必须小于 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。然而, 要可靠地测量更小公差并使用常规三坐标测量机, 例如中央计量室中的三坐标测量机, 实际应用的三坐标测量机的直线测量偏差范围为 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 。

# 刀具公差与误差极限 全闭环增加公差裕度

下面用举例的几何要素为例，比较上页中的工件公差与估计的误差极限。图10为变速箱箱体中轴的轴承组件孔。

为缩短辅助时间，也即缩短周期时间，用组合刀具加工这两个孔直径。为此，加工直径和Z尺寸的刀刃都在一把刀上。还显示了对正工件所需的其中一个定位孔。定位孔的公差方向与带公差加工尺寸 $Z_1$ 和 $Z_2$ 的方向一致。不适用于尺寸Y。

## 需考虑的误差

因此，加工 $Z_1$ 和 $Z_2$ 时，必须考虑夹具中工件定位导致的误差。加工操作中，由于机床上工件的其它位置需要使用其它刀具，误差裕度中还必须考虑换刀误差。而且，还必须考虑主轴轴向热位移导致的 $Z_1$ 和 $Z_2$ 尺寸方向的误差，沿加工方向Z轴定位期间的位置变化范围，以及滚珠丝杠驱动发热导致Z轴方向热位移。误差裕度分析中计算的三坐标测量机的直线测量偏差与机床中工件的夹持方向无关。

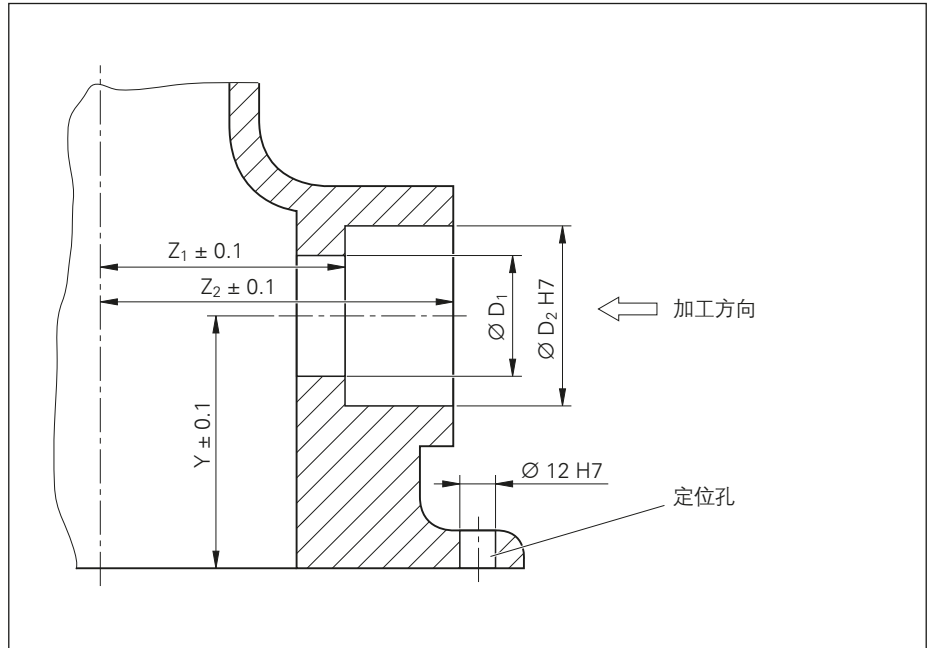


图10: 变速箱箱体上的轴承孔（几何要素举例）

假定带公差加工尺寸的平均机床能力指数  $C_m = 1.67$ ，现在可确定最恶劣情况下预计的误差占可用公差的比例。图11为半闭环控制的 $Z_1$ 和 $Z_2$ 尺寸的公差。

我们可看到可用公差中的最大部分是未被控制的滚珠丝杠的热位移。最终分析结果显示可用公差的裕度只有  $\pm 19 \mu\text{m}$ 。

## 减小误差和加大公差裕度

我们能清楚地看到，减小误差变化将直接增加公差裕度。直线轴采用直线光栅尺，也即全闭环控制，能特别有效地减小滚珠丝杠的热位移（图12），因而能显著增加公差裕度  $\pm 39 \mu\text{m}$ 。

如前面介绍，大批量生产的工艺链中的每一个生产步骤之间存在相关性。表1中的误差极限只表示整个工件生产过程中的部分潜在误差变化。为此，我们的目标是确保每台机床最小的误差尺寸，以此为加工中心难控制误差留出最大的公差裕度。

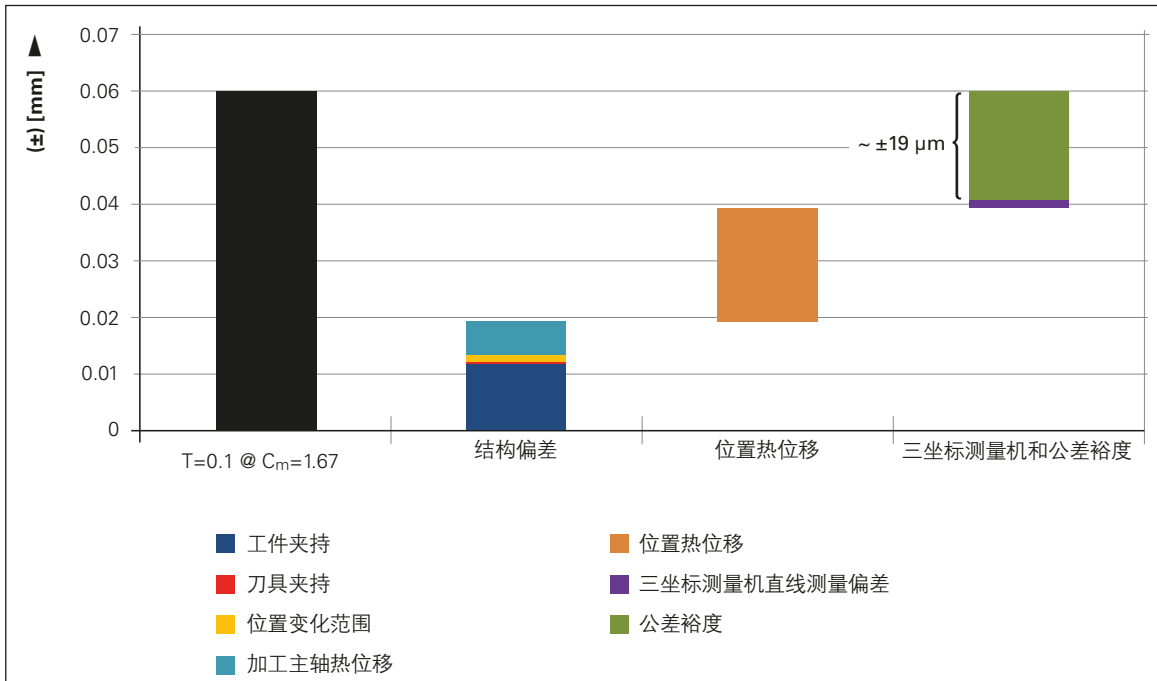


图11：  
可用公差  
( ±0.1 mm )，  
 $C_m = 1.67$ 与半闭环  
误差极限的比较

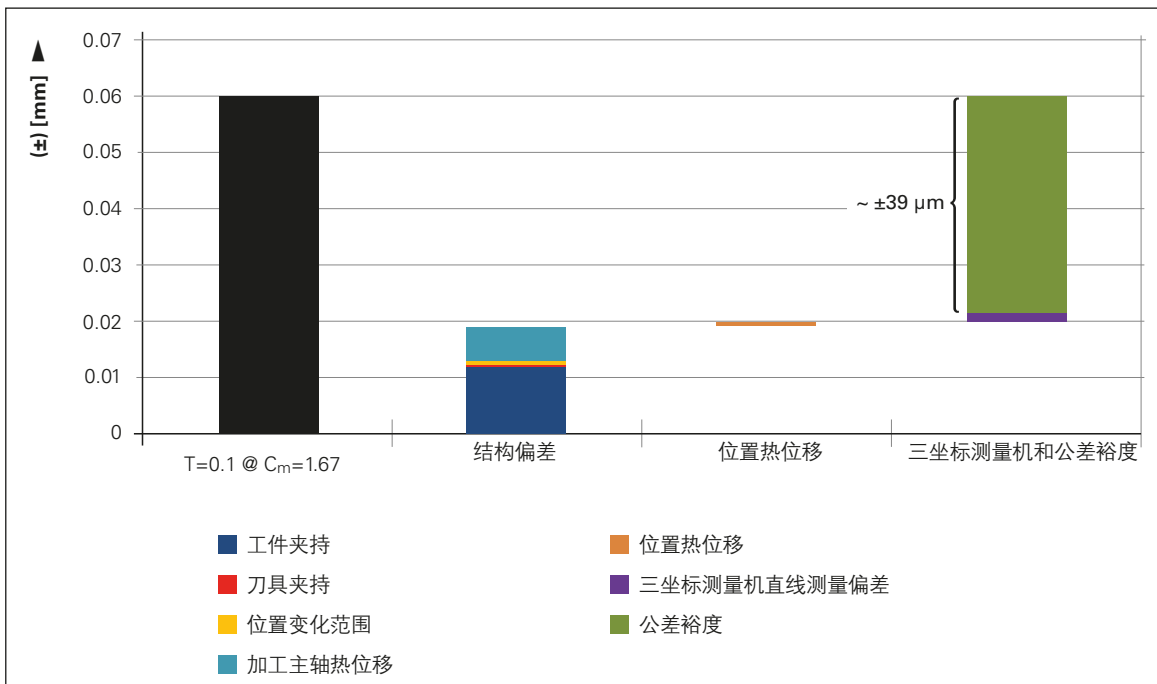


图12：  
可用公差  
( ±0.1 mm )，  
 $C_m = 1.67$ 与全闭环  
误差极限的比较

生产过程中难控制误差的影响因素有：

- 车间温度波动
- 冷却液温度波动
- 工件温度波动，因此工件在不同机床之间转换时将有热膨胀
- 不同夹持力导致的工件静态变形和生产线中每一个夹具的夹持公差
- 由于各机床上的工件温度（公差尺寸的生产）与计量室中工件温度（公差尺寸的确定）的不同导致的带公差尺寸的热变形

- 由于前道工序误差导致的刀具偏移（例如定心钻孔的公差偏差导致铰刀偏移）
- 切屑（例如附着切屑，定心钻的切屑等）
- 刀具磨损（例如不同的切削力，刀具偏移等）
- ...

以上列表绝非完整，仅仅用于显示汽车动力总成零件的自动化机械加工生产，生产工艺的设计绝非小事。许多误差源可能影响到生产质量、生产时间和生产成本。

# 刀具公差与误差范围比较

## 公差裕度提高生产力

为感受半闭环  $\pm 19 \mu\text{m}$  和全闭环  $\pm 39 \mu\text{m}$  的公差裕度，下面我们仔细分析刀具磨损情况。铝件加工中，刀具切削刃可能很锋利，但工件上的毛刺常常导致换刀，而铸铁件（例如曲轴箱）或耐热钢（例如废气涡轮增压器）的加工导致刀具严重磨损。一段时间后，刀具磨损通常导致后刀面（VB）磨损（图13）。

### 刀具磨损正常

由于刀刃几何尺寸（后角  $\alpha$ ，前角  $\gamma$ ），随着后刀面磨损的增加相应导致切削刃偏移（SV），结果是公差裕度减小。切削刃偏移用公式[13]计算，它取决于后刀面VB及  $\alpha$  和  $\gamma$ ：

$$SV = \frac{VB \cdot \tan \alpha}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \gamma} \quad (\text{等式7})$$

对于最新的直线形布局的多台互连加工中心，缸盖、曲轴箱和变速箱箱体机械加工的刀具成本占8%至12%，显然占整个系统投资的相当大部分。这包括非磨损的刀具部件（例如刀柄和镗杆）以及磨损的零

件（刀片，钻头）。影响该比例大小的因素很多，其中之一是所用备用刀的数量（有时需多达3套）及切削材料（例如加工铝材的PCD刀片）。

要降低刀具使用成本，需要尽可能地延长刀具寿命，以使刀具在换刀前或重磨前其磨损量保持在一定可接受的范围内。据[14]，硬质合金刀具和满足公差要求的精加工循环，后刀面VB磨损的基准值为  $200 \mu\text{m}$  至  $400 \mu\text{m}$ 。

要获得刀刃偏移值，应用典型切削刃角  $\alpha = 5^\circ$  和  $\gamma = 4^\circ$ 。从等式7得到切削刃偏移范围为  $18 \mu\text{m}$  至  $35 \mu\text{m}$ 。

假定公差范围中心位置的刀刃极其锋利，半闭环中，目标的最小刀具磨损值已占剩余公差裕度的最大部分。考虑到应用直线光栅尺的公差裕度较大，在刀具磨损到需进行补偿前可加工的工件较多，这就是说确定刀具补偿或换刀恰当时间所需的刀具测量工作量较小。

### 换刀操作中中断生产

为加工严格公差要求的工件，更换使用的刀具，通常需要直接检测工件是否正常（合格工件）。为避免废品，测量用新刀加工的首件工件时，机床停止加工，而且仅当加工和测量的工件达到合格时才能确认机床。机床等待确认的时间等于零件件数损失，因为机床损失了加工时间。

由于检测和补偿复杂性的降低，提高了机床工作时间，大批量生产中较大的公差裕度有助于提高生产力。这类似于汽车驾驶，相当于在宽车道上驾驶，驾驶员不太需要修正方向就能使汽车保持在车道内—而窄车道需要较多的修正。

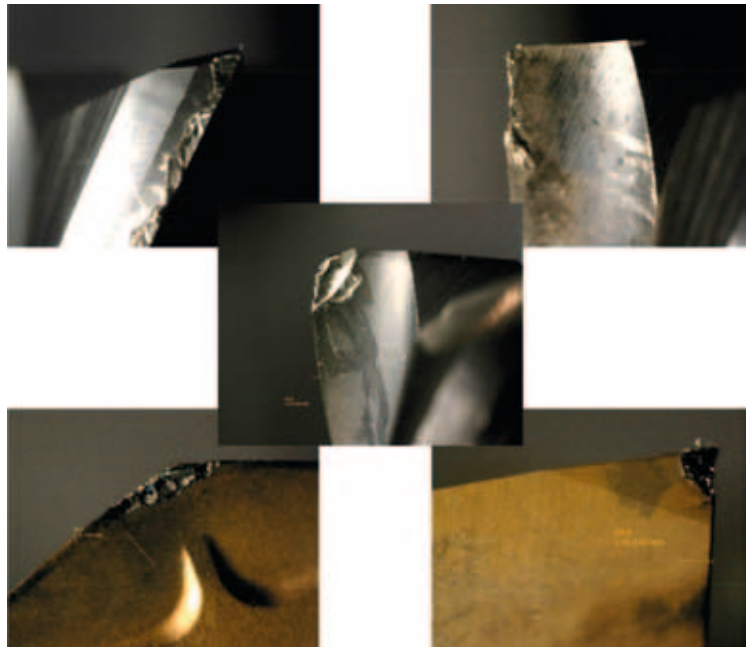
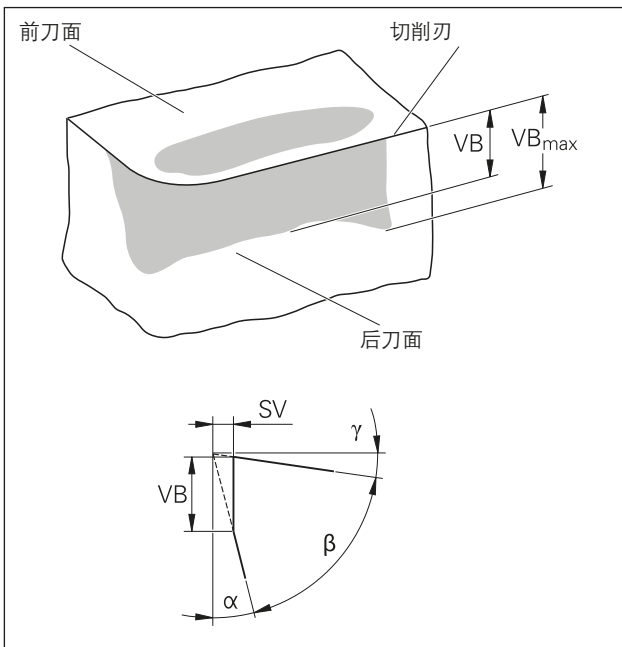


图13：后刀面磨损（VB）和切削刃偏移（SV）— 基于[13]和[14]绘图

# 结论

除应对汽车销售市场需求波动的挑战外，未来法律和最终用户对汽车污染物排放及燃油消耗将有更高的要求。满足这些挑战的方法之一是减小动力总成的摩擦，也就是减小工件公差及提高表面质量。

由于在自动化大批量生产中，工件依序加工，整个工艺链的各个加工步骤之间存在相关性。为保证整个工艺链满足工件公差要求，人们希望加大每台机床的最小可用公差，将剩余的公差裕度用于难以控制的因素，也就是说公差裕度越大越好。

加工中心进给轴采用直线光栅尺可提高机床精度，因此能增加公差裕度。降低检测的复杂性及工件件数损失能提高加工的生产力。

## 参考文献

- [1] Kasper, G.: 未来动力总成生产的挑战 – 放眼全球化生产。第12界动力总成生产大会，达姆施塔特，2013年9月26日 – 27日。
- [2] Abele, E.; Hueske, B.和Kuhn, S.: 总体设备灵活性 – 衡量总体切削加工生产灵活性方法的最新发展。ZWF 103第5期，2008年。
- [3] Dörr, J.: 动力总成机床结构：经济性比较。第10界动力总成生产大会，费尔巴赫，2009年11月11日 – 12日。
- [4] Abele, E.; Wiegel, F.; Kuske, P.和Hueske, B.: 更高灵活性的阶段性改进 – 柔性生产系统增加资金灵活性的评估方法，wt Werkstattstechnik网站，第100期，2010年。
- [5] Stürenburg, B.: 优化钻孔加工切屑的形成与最大限度减少切屑进入铝合金工件FBK生产报告，2009年第02卷。
- [6] Abele, E.; Ellermeier, A.; Hohenstein, J.和Tschannerl, M.: 大长度整体硬质合金麻花钻研究 – 刀具长度对整体硬质合金麻花钻动态性能的影响，wt Werkstattstechnik网站，第97期，2007年。
- [7] VDMA 8669: 1999-01: 切削机床验收的机床能力研究。德国机械设备制造业联合会 (VDMA)，1999年。
- [8] MAPAL: MAPAL竞争力 – 夹持技术。公司出版物MAPAL高精度刀具，Dr. Kress KG，订购号10138532 | V2.1.0，2015。
- [9] DIN ISO 230-2: 2000-05: 机床检测规则 – 第2部分：数控轴定位误差和定位重复精度的确定。德国标准化学会 DIN，2000年。
- [10] VDI/DGQ 3441: 机床加工与定位精度的统计考核 – 基础。德国工程师协会 / 德国质量协会，1977年3月。
- [11] 海德汉: 技术信息 – 进给轴精度。2006年3月。
- [12] 海德汉: 技术信息 – 机床加工精度。2011年9月。
- [13] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.和Tikal, F.: 切削技术 – 工艺，刀具，技术。Vieweg + Teubner Verlag，第12期，2008年。
- [14] GARANT: GARANT ToolScout – 切削手册。ISBN 3-00-016882-6，2013年04新版。

# 机床的直线光栅尺

位置测量的直线光栅尺是机床高精度定位不可或缺的测量手段。直线光栅尺直接并立即测量进给轴的实际位置。因此，机械传动零件对位置测量结果没有任何影响，运动特性误差和热误差或作用力的影响全部被直线光栅尺测量并进入到位置控制环中。因此，它能消除潜在的多项误差源：

- 滚珠丝杠温度特性导致的定位误差
- 反向误差
- 切削力作用导致的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

因此，直线光栅尺是**高精度定位**和**高速加工**机床不可或缺的基础技术手段。

用于数控机床的海德汉直线光栅尺几乎适用于任何应用。它是所有进给轴为伺服控制环模式的机器和设备的最佳选择，例如铣床、加工中心、镗床、车床和磨床。直线光栅尺的动态性能优点，允许的运动速度高，沿测量方向的加速性能使其不仅能满足常规轴高动态性能要求，也能满足直接驱动电机的高动态性能要求。



LC 485 至2040 mm



LC 185 至4240 mm



LB 201 至28040 mm

## 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](http://www.heidenhain.com.cn)

### 更多信息：

- 样本：直线光栅尺用于NC数控机床
- 技术信息：进给轴精度
- 样本：机床检测和验收测试的测量装置

