

第 22 章

机床振动和颤振

22 机床振动和颤振

22.1 序言

机床与工件产生振动而引起的问题是金属切削中提高生产率的主要障碍。工件和切削刀具间的振动被记录在工件的表面上，而且根据振动的严重程度和所需要的表面粗糙度，有可能使工件的表面质量不能满足要求。过分的振动和颤振还可能严重地降低刀具寿命。此外，颤振还影响轴承和机床中其他零件的寿命。

在现代车间中所遇到的高效率和恶劣的切削条件还暴露出振动的另一个问题，即过大的噪声。这个问题通常是由高频振动的条件，即所谓颤振所产生，尽管它可能对表面粗糙度的影响很小，但是现在政府的法规已经非常注意机床操作者的环境噪声。

如果对刀具寿命，表面粗糙度和噪声的情况不能满足，就需要解决振动问题。许多有车间经验的人都注意到了振动和颤振，但却很少会识别振动问题的类型及其适当的解决方法。下面将介绍机床和工件振动的起因及消除方法的选择。

22.2 振动的起因

(1) 机床元件的变形

为了分析振动问题，首先要了解材料的变形特性，决定变形的最重要的材料性能是弹性模量。对大多数结构来说，在给定载荷下的非永久性的弹性变形量与弹性模量成反比例关系。模量愈高则变形愈小。表 22-1 给出了机床、刀具和夹具常用材料的弹性模量：

表 22-1 一些普通材料的弹性模量

材 料	弹性模量 MPa
铝	63000
铸铁	98000(变化较大)
钢	203000
碳化钨(硬质合金)	595000

应当指出，所有的钢，不论其合金成份、热处理或硬度如何，都具有大致相同的弹性模量。弹性模量取决于材料的基本原子结构，而强度和硬度则主要取决于材料中不影响模量的含量很少的元素。

表 22-1 所列的材料中，对减少机床结构变形来说，铝是最差的材料。铸铁比铝的抗变形能力要强，钢又更好些，最好的是碳化钨（硬质合金）。由于铸铁材料比较容易获得，而且加工费用比钢低，所以，尽管它的弹性模量较低，还是经常在机床结构中使用。碳化钨非常贵而且加工费用很高，因此，只用在性能比成本更重要的地方。

对于给定的材料来说，结构的变形是作用力和几何形状的函数，方程（1）可以用来预计如图 22-1 所示截面的悬臂梁的变形：

$$d = \frac{64PL^3}{3\pi ED^4} \quad (1)$$

- 式中 d ——梁的变形 cm；
 P ——作用在梁端上的力 kgf；
 L ——梁的长度 cm；
 D ——梁的直径 cm；
 E ——弹性模量 MPa。

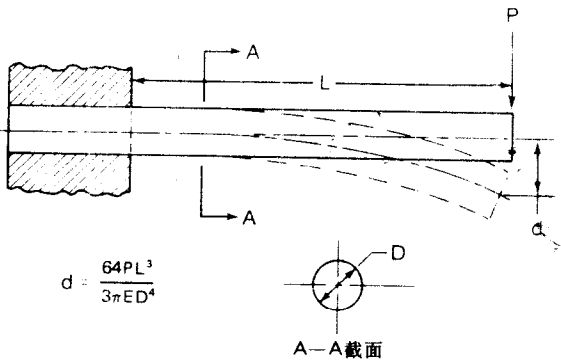


图 22-1 悬臂梁的变形

方程（1）只能“严格地”用于一端紧固在沉重基础上的圆柱体梁。也可以近似地用于从刀架或刀架伸出的镗杆；一端在虎钳上夹紧的圆柱形长零件；从前轴承伸出的主轴头部；或者任何悬伸很长的“细长”梁或薄板的变形。在这里，“细长”和“薄”只是相对的名词，甚至可适用于一些非常粗壮的截面，只要它的无支撑长度数倍于它的厚度。在方程（1）中，梁的直径是以四次方、梁的长度是以三次方增加的，这意味着两者都是影响梁变形的重要量。

对于一根给定的梁, 增加一个给定百分比的悬伸长度就会使变形增加很大百分比。例如, 梁的长度增加两倍将使变形增加八倍。因此, 在设计刀具和夹具时, 必须使用最小的悬伸长度。以镗杆的设计为例, 如果长度-直径比大于 4: 1 或 5: 1 就被认为是不现实的。直径加大一个百分比, 对减少变形的影响比长度的加大对增加变形的影响还要大。因此, 悬伸件的直径要尽可能大, 这是很重要的。

(2) 结构刚度

结构的刚度可以用产生 2.5cm 的变形量所需要的力来表示。方程 (2) 可以用来计算结构刚度。

$$K = \frac{P}{d} \quad (2)$$

式中 K ——刚度, N/cm;

P ——力, N;

d ——变形, cm。

例如, 一台机床在 3630N 载荷的作用下变形为 0.0025cm, 则其刚度为:

$$K = \frac{3630}{0.0025} = 1450000 \text{ N/cm}$$

如果结构刚度为已知, 那么它在载荷下的变形可以从方程 (2) 的派生式来计算:

$$d = \frac{P}{K}$$

“方向刚度”是用来描述受不同方向载荷的结构刚度的。这是一个重要的概念, 因为很多机床, 刀具和工件都有刚强和薄弱的方向。如果一个加工装置正好使切削力向着薄弱的方向, 就会产生过大的变形和可能的颤振。如果改变一下装置, 使力作用在刚强的方向上, 这个问题就可减小或消除。作为例子可看图 22-2。如果是在 Z 和 X 方向受力, 它将是非常刚强的; 在 Y 方向上受力时, 梁将产生最大的变形, 因此, 也是最低的方向刚度。

(3) 结构的激励

振动分析中的重要名词术语示于图 22-3, 它们包括:

振幅: A , 是从平衡位置算的最大位移。它是从波峰到波谷的一半, 而不是从波峰最高点到波谷最低点的全部位移。

周期: T , 是完成一整周振动所需的时间。

频率: f , 是一定时间 (通常为 1s) 内所完成的振动周数。

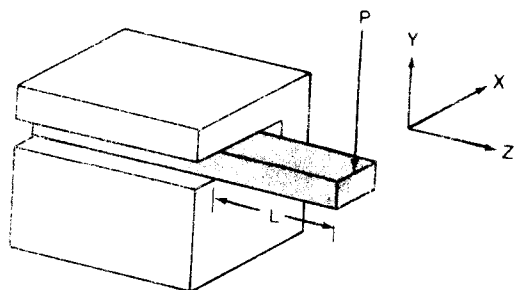


图22-2 方向刚度的概念示例, 这根悬梁的刚强方向为 X 和 Z 薄弱方向为 Y。

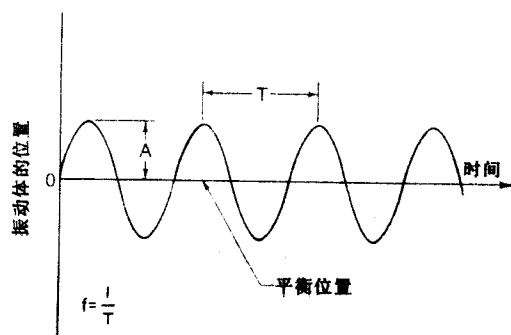


图22-3 一个振动结构的周期运动

方程 (3) 是周期与频率之间一个很重要的关系:

$$f = \frac{1}{T} \text{ Hz} \quad (3)$$

大多数人都知道, 当一个物体被推一下并很快松开, 它就开始振动。如果“结构”在振动, 它就按结构本身所固有的频率在进行, 而不是按给它的力或位移所确定的频率。在机床上引起的振动, 通常是由于周期变化的力, 即随时间变化的力的作用所引起的。这种结构称为受变化力“激励”的结构, 电机不平衡是机械制造中遇到的最普通的周期力, 加工中另一个周期力的例子是切削带键槽的轴时引起的切削力的变化。每当刀尖进入键槽时, 切削力降到零, 当它再切入工件时, 切削力又恢复到正常值。

铣削加工中遇到的强迫振动可以预料有三个主要的原因。第一, 与工件接触的刀齿数经常在变化。第二, 随着刀齿的旋转, 切削力的方向角在变化。第三, 刀齿移经接触弧时切屑厚度在变化。图

22 机床振动和颤振

22-4 是实际铣削力的记录示例^[14]。在所有三个切削分力、 F_x 、 F_y 和 F_z 中明显地出现强迫振动。

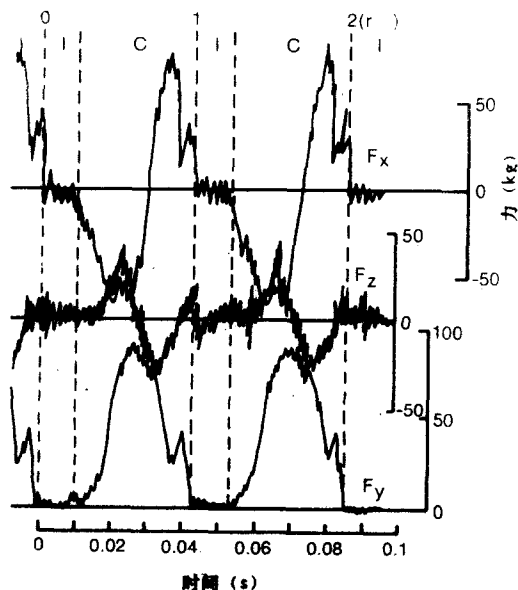


图22-4 铣削加工中切削力分量的波动
(取自 Hosoi^[14])

22.3 阻尼

阻尼是系统抵抗快速运动的特性。如果一根梁用榔头一敲后振动很长时间，它就是低阻尼的。如果梁的振动几乎是马上停止，则它是高阻尼的。从理论上说，一个无阻尼的系统将永远振动，且振幅与初时一样。这实际上是不存在的，因为所有的材料都有一定量的内阻尼。由于材料变形的基本方式，所有使弹性元件变形所做的功，在元件被松释时，都不可能重新恢复，大部份的能量可以恢复，但有少量将留在元件中并转化为热，这些少量的能量损失就使每周振动的振幅有微小的减少。

不同的材料具有不同的内阻尼量。图 22-5 所示是钢和铸铁的不同阻尼特性，并清楚地表明铸铁具有高得多的内阻尼。从这个图可以得出结论：铸铁的机床结构比钢结构具有好得多的抗振性。

但是，材料的阻尼并非机床阻尼的全部，因为接合处的阻尼，或“挤压油膜”的阻尼在机械制造中同样是很重要的。油成了振动时隔开两个表面的介质。当两平面相互分开时，油被吸入并填充间隙，当他们靠紧时，油即被迫挤出。油的这些运动，在吸收能量的同时使它发热。这是接合面中最有力的阻尼源，在干接触表面中，阻尼产生于摩擦和空气的吸入和排出。但是，这种阻尼通常意义较小。

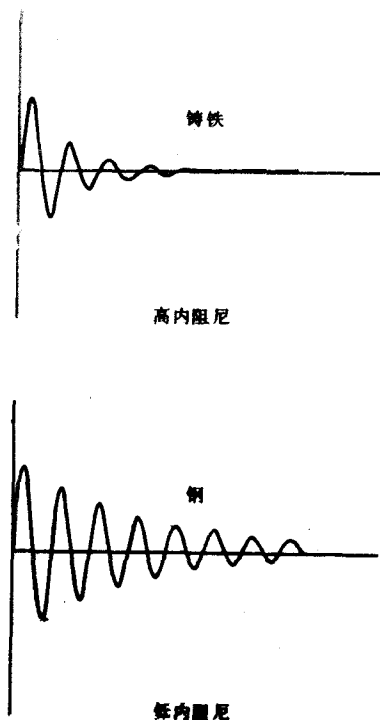
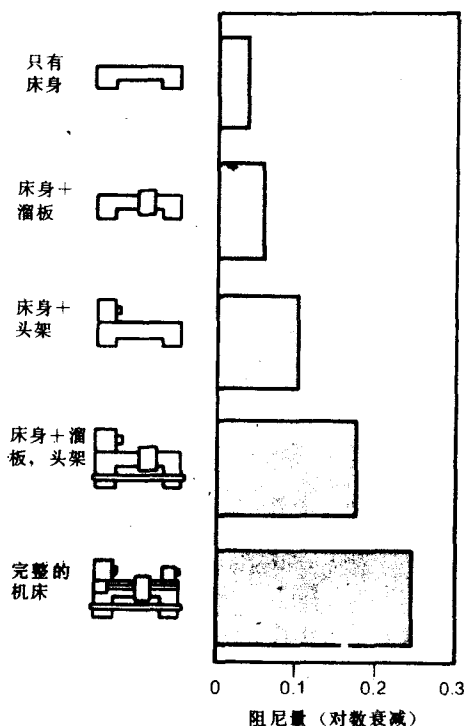


图 22-5 表明铸铁和钢内阻尼差异的图形

图 22-6 表示一台机床的阻尼随着它的部件装而上而增加。在一台完整机床中，各种部件接合面间构成的阻尼要比部件结构的内阻尼大得多。

阻尼的第三个主要范畴是为了改善机床的抗振性而有意加上去的阻尼。一个普通例子是汽车的冲击消振器。同样，调谐振动消振器为改善许多机床的抗振性提供了一个方便的方法。


 图 22-6 材料及连接对阻尼影响 (取自 Peters⁽⁵⁾)

22.4 结构对周期力的响应

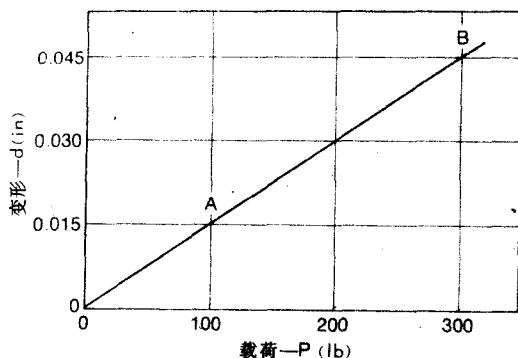
(1) 静刚度和动刚度

对结构在动态力作用下的特性分析远比它在静载荷作用下的特性分析复杂得多。基本的原理是：在频率很低时，结构对动载荷的响应和对静载荷的响应是一样的。为了强调这一点，可看图 22-7，图中表示悬臂梁的变形和静载荷的关系。

这个图形可以由特定梁的变形方程在不同载荷下计算出来。在 450N 载荷时，变形为 0.038cm；在 900N 时为 0.076cm 等等。静刚度 K 就是作用在结构上的静态力除以它所产生的变形所得的值。产生图 22-7 中数据的梁的静刚度为 11840N/cm，正如下式计算所表明的一样：

$$K = \frac{1350}{0.114} = 11840 \text{ N/cm}$$

注意：在图 22-7 中沿直线的任意载荷除以相应的变形都给出同样的静刚度值。



注：1in = 25.4mm 11b = 4.5N

图 22-7 悬臂梁的变形和静载荷特性与变形的关系

假定作用在梁上的载荷从 450N 变到 1350N (载荷的峰谷变化为 $1350 - 450 = 900\text{N}$)。力的幅值为谷到峰值之半，即 450N)。假定载荷作用的频率为 1 周 / 2h 或为 0.00014 周 / s。这样慢的频率就没有必要进行振动分析来预计它的后果。力和变形都将很慢地沿图 22-7 中 A-B 两点之间的静态变形曲线微量上下波动。在任何一点上瞬时作用的变化力所引起的变形都将与它在静态力时所引起的变形一样。

如果力的变化增大至 1 周 / min 这个速度仍然很低。还不能感到振动。如果力的变化增加到 1 周 / s 或者更快。其结果是否一样，仍不明显。为了弄清楚力在高频变化时所发生的情况，就必须采用动刚度的概念。动刚度 K_d 是力的幅值 F 对振动幅值 A 之比。在一定振动频率时， $K_d = K$ ，即动刚度和静刚度相同。动刚度的概念 K_d ，可以从图 22-7 表示载荷和变形关系的曲线得知。例如，在图 22-7 中，力的峰—谷值为 900N ($F = 450\text{N}$) 给出从峰到谷的位移值为 $0.114 - 0.038 = 0.076\text{cm}$ ($A = 0.038\text{cm}$)，动刚度为：

$$K_d = \frac{450}{0.038} = 11840 \text{ N/cm}$$

式中 F ——力的幅值 (波动力从其平均值算起的最大增量，即它的峰—谷值之半)；

A ——振动的幅值。

22 机床振动和颤振

注意, 这与前面所表示的 K 值是完全一样的, 说明只要力和位移值落在同一曲线上时, 它们之比仍然相同, 动刚度和静刚度也一样。

图 22-8 所示是在低频时作用在一个结构上的力的波形和由此而产生的结构移动的波形图。这表明了寻找振动的一个基本规律, 即结构振动的频率几乎总是与引起它振动的力的频率一样的。图 22-8 中在两个波形之间存在着“相位差”, 即位移轨迹的峰稍落后于力的轨迹的峰。尽管如此, 两个波形的周期是一样的, 因此频率也必然一样。

有时也偶尔有一些不寻常的结构和不寻常的力的波形。这时力和位移的上述关系就不能适用。这种情况需要专家进行分析。为了研究一般的振动问题, 通常把这个规律作为正确的来使用, 因为它是研究这个问题的最好方法, 即测量振动的频率并寻找与该频率相同的力的来源。

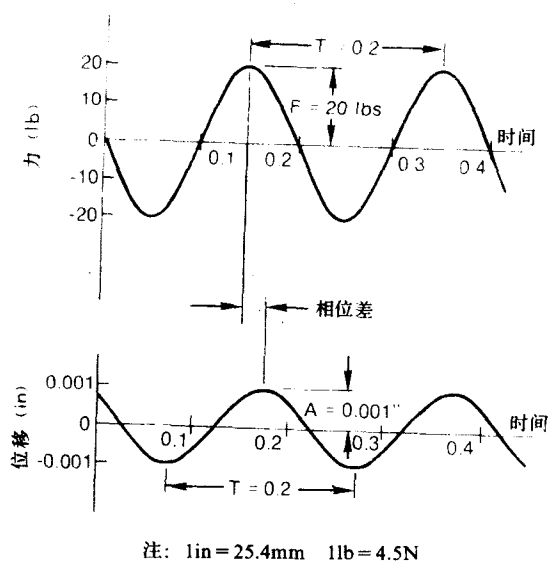


图22-8 表示一个结构在低频振动时的力和位移的波形图

(2) 简单结构的特性

假定一个很重的物体由一个很软的弹簧吊挂着, 且弹簧的上端在一个人的手里。然后假定手上下移动, 最初很慢, 而后频率逐渐增高。现在来分析一下, 重物将会发生什么情况。首先可以看到, 重物将总是和手以同样的频率移动, 这是基本的,

也是很重要的。它意味着, 当有一个可疑的强迫振动问题时, 其原因可以用其已知频率来追寻。

在低频时, 重物移动的距离和手移动的距离完全相同。因而, 手与重物的振幅是一样的, 这时在弹簧中没有附加伸长。这一特性是所有结构的典型。随着频率的增加, 弹簧开始伸长, 重物的振幅变得大于手的振幅。最终达到这样一个频率, 即一个运动就可以使重物的振幅很大。这一情况称为共振。发生共振时的频率称为固有频率 f_n , 这也是动刚度最低时的频率。当频率增加到超过了固有频率时, 物体的振幅将继续减少, 直到最后, 手可以抖得很快, 但物体却呈现出静止不动。

从这些观察中可以得出这样的结论: 如果用接近于其固有频率的频率去激励机床结构, 它将很容易振动。如果以高出固有频率很多的频率去激励, 它就很难振动, 当低于固有频率时, 机床结构将在某一个中间的振幅上振动, 简单结构 (例如重物吊挂在弹簧上) 的固有频率可以按方程 (4) 计算:

$$f_n = \frac{49.5}{\pi} \sqrt{\frac{K}{W}} \quad (4)$$

式中 f_n ——固有频率, Hz;

K ——弹簧刚度, N/cm;

W ——物体的重量, kgf。

在查寻振动问题时, 方程 (4) 很少被用来计算固有频率, 但是, 对于估价改变刚度和重量的效果, 它是有用的。

(3) 复杂结构的特性

图 22-9 和图 22-10 分别为装在底板上的电机及其频率响应。这个系统的静刚度为 14740N/cm, 固有频率为 20Hz。在频率分析中, 它通常化为柔度, 即静刚度的倒数。图 22-11 表示一个具有刚度为 89250N/cm, 固有频率为 50Hz 的机床立柱的频率响应曲线。如果图 22-9 中的底板装到这个立柱上, 那么, 这块底板的频率响应将包含底板和立柱两者的固有频率。复合的频率响应可以用很简单的逻辑来建立。在低频时, 单薄底板的运动要比坚固立柱的运动大得多。因此, 在最低的固有频率之前, 只出现底板的变形, 而且复合的响应曲线将等同于底板的响应曲线。在底板共振时, 电机和底板将一起振动并激励立柱。但是, 由于立柱的运动在这个频率上仍很小, 所以复合的频率响

应仍同由于共振的底板的频率响应一样。底板与立柱的频率响应等于单一底板时的频率响应的情况将继续下去，直到激励频率接近于立柱的共振为止。在这个频率和在更高的频率时，立柱的响应远远大于底板的运动，因此，复合响应等于立柱的响应。

这个系统的复合频率响应示于图 22-12。如果电机和底板装在立柱上进行试验，将可看到这样的响应曲线。在这种情况下有两个固有频率。即在 20 和 50 Hz 处。

绝大多数的机床结构实际上要比上面的例子复杂得多；例如，图 22-13（取自文献〔15〕）所示的

钻床的频率响应。为了把图形压缩到适当尺寸，图 22-13 中采用了对数坐标轴。图中出现结构共振的峰是 23、33、38、70、100、110、170、230、300、380 和 500 周/s。每一个峰都与构成钻床的各个零件的不同振型相联系。虽然大多数机床的频率响应更象图 22-13，而不象图 22-12 所描述的系统，但是，振动问题通常不是这样复杂的，因为它们往往只涉及一个频率。所以，其他的共振频率可以忽略，而且把实际的机床看成是只具有一个固有频率的复杂系统。

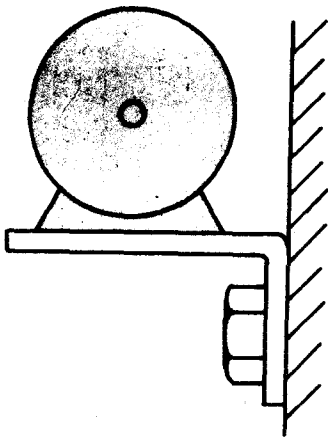
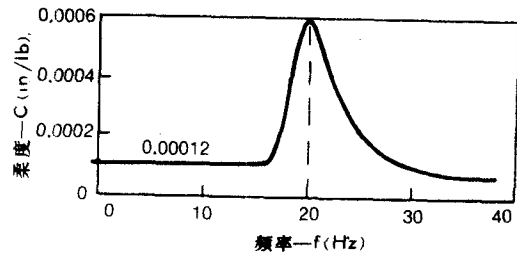
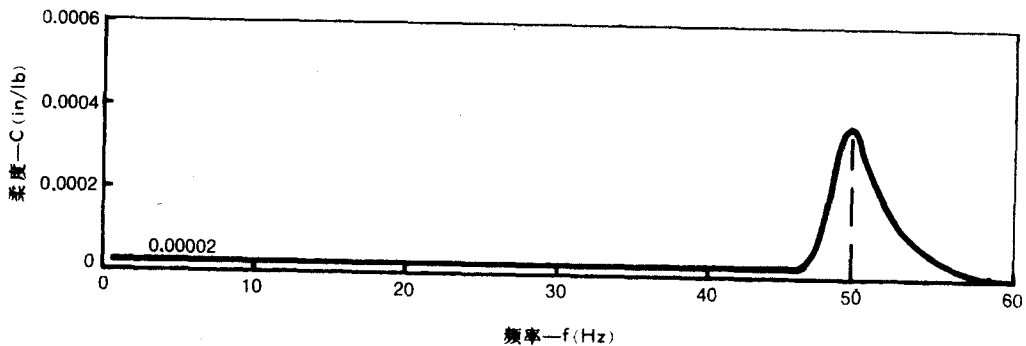


图 22-9 装在底板上的电机



注: $1 \text{ in} / 1 \text{ lb} = 0.57 \text{ cm} / \text{N}$

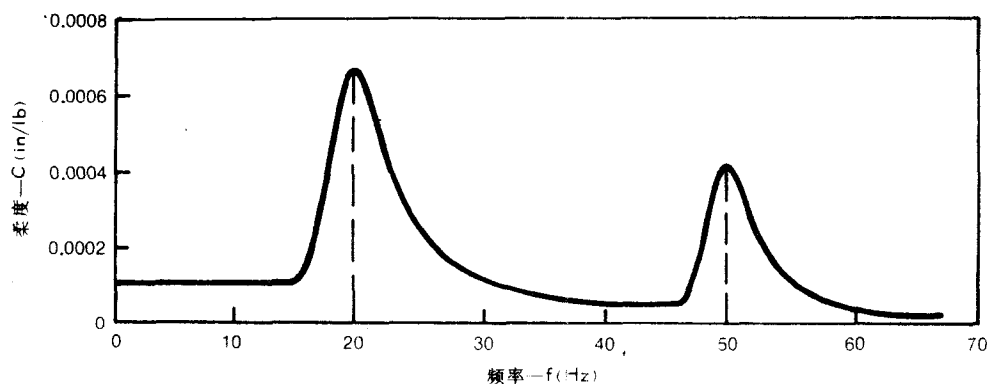
图 22-10 图 22-9 所示的系统的频率响应



注: $1 \text{ in} / 1 \text{ lb} = 0.57 \text{ cm} / \text{N}$

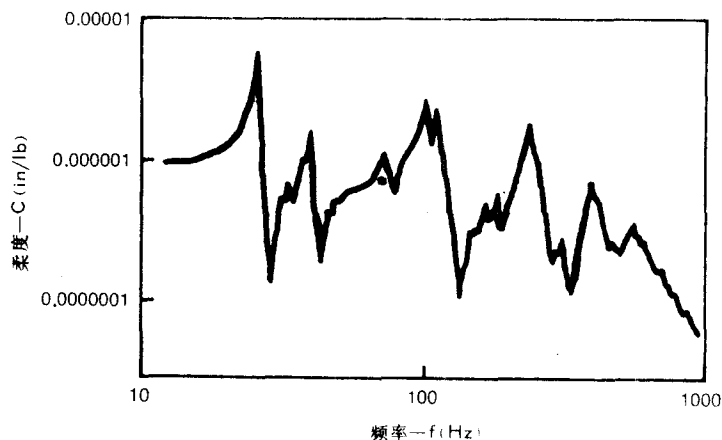
图 22-11 机床立柱的频率响应

22 机床振动和颤振



注: $1 \text{ in/lb} = 0.57 \text{ cm/N}$

图 22-12 安装的电机和立柱的复合频率响应曲线



注: $1 \text{ in/lb} = 0.57 \text{ cm/N}$

图 22-13 钻床的频率响应曲线

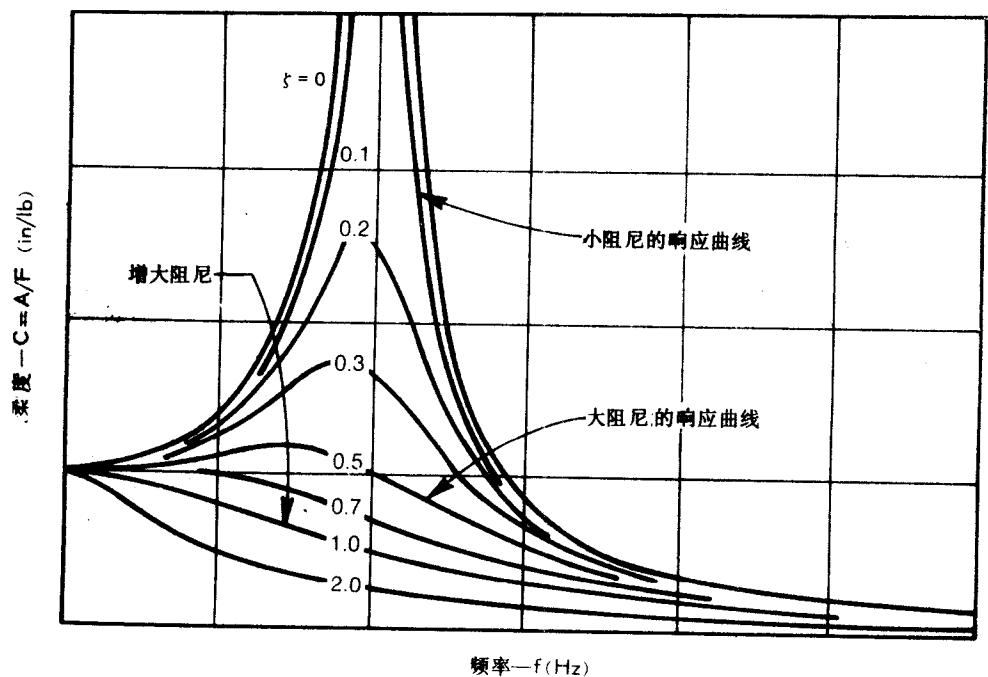
(4) 阻尼的影响

前面曾经指出, 当一个系统开始振动和停息时, 阻尼对自由振动的振幅有着很大影响。阻尼对于强迫振动的振幅也有强烈的影响, 特别是在共振的时候, 图 22-14 中的一组曲线表明具有不同阻尼量的简单振动系统的频率响应。图中力的幅值为 F , 振动的幅值为 A , 频率为 f 。

振动系统被阻尼的程度, 可用它的“共振放大因素”来衡量, 该放大因素是在相同力幅下, 共振时的振幅除以低频时的振幅。共振放大因素也是静刚度 K 对动刚度 K_d 在共振时的比值。在图 22-15 中静态柔度为 0.0000056 cm/N , 与此同时, 共振时的

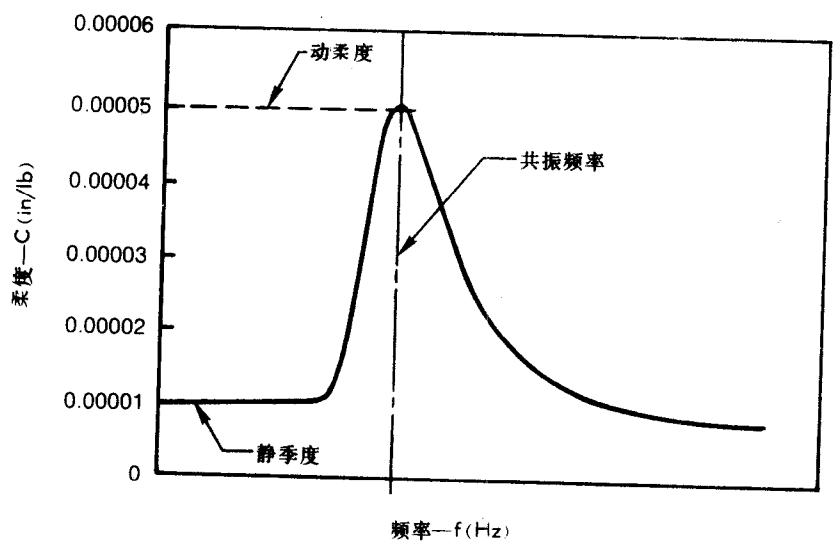
最大柔度为 0.000028 cm/N , 故共振放大因素为 $(0.000028 \div 0.0000056) 5$ 。

对低阻尼系统, 共振放大因素可以是 $10 \sim 30$, 而对一个大阻尼系统, 它是 $1.5 \sim 4$, 这些范围指明了阻尼在机械制造中的重要性。有时对一个低阻尼的结构用附加阻尼的方法就很容易减少其在靠近共振时的振幅。任何附加到低阻尼结构上的阻尼, 几乎都可改善其动刚度 2 或 3 倍, 从而可使其振幅减到它们原始值的 $1/2$ 到 $1/3$ 。增加静刚度 K (即减少静态柔度) 同样也可减少振幅, 但这可能很困难而且很费钱。



注: $1\text{ in} / \text{lb} = 0.57\text{ cm} / \text{N}$

图 22-14 阻尼对振动系统频率响应的影响



注: $1\text{ in} / \text{lb} = 0.57\text{ cm} / \text{N}$

图 22-15 共振放大因素的确定

22 机床振动和颤振

(5) 来自机床结构的数据

图 22-16 是 13 台不同机床⁽⁶⁻¹⁰⁾的主要固有频率的典型值, 把从这些机床得到的 40 个固有频率分成若干组, 在 0~25Hz 间有 3 个固有频率, 25~50Hz 有 7 个, 50~75Hz 有 8 个, 等等。图 22-16 中的数据表明, 固有频率常出现在 0~100Hz 之间; 很多频率分布在 100~300Hz 范围内, 对于这一组具体机床来说, 300Hz 以后没有重要的固有频率。

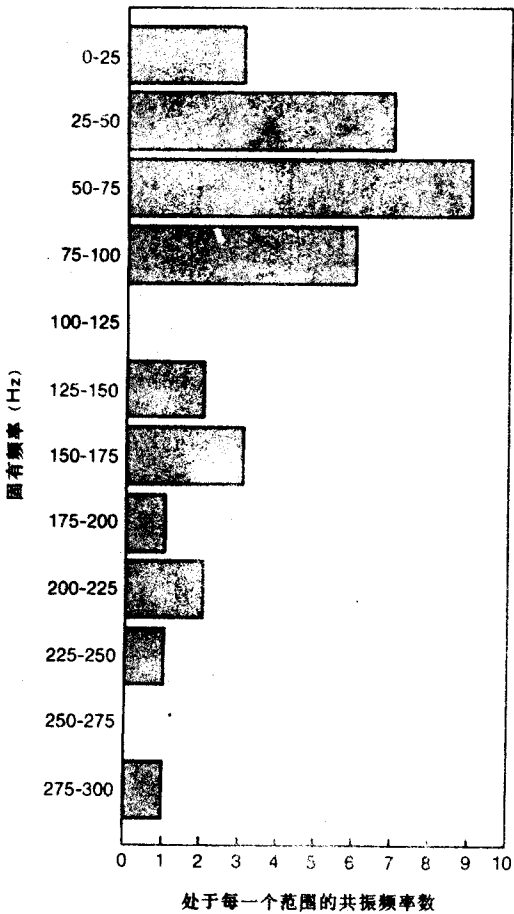


图22-16 13台机床上的固有频率的典型值 (从 Long⁽⁶⁾, Koenigsberger⁽⁷⁾, Gandissart⁽⁸⁾, Tobias⁽⁹⁾ 和 Tlusty⁽¹⁰⁾ 的资料汇编)

低频率是重部件振动 (如整机摇晃) 的典型固有频率。100~300Hz 是对应于好的、坚固的, 较

轻的部件, 如车床床身的振动。在实际工作中, 振动问题偶尔也出现在高于 300Hz 的固有频率, 但是, 在大多数情况下, 这种振动是同刀具振动有关, 而不是与机床有关。方程 (4) 表明了获得高的固有频率值所必须的特性。如果一个部件的刚度为 892500N/cm, 为了给出高达 500Hz 的固有频率, 其有效重力只能为 88.5Nkg, 由于

$$f_n = \frac{15.7}{\pi} \sqrt{\frac{892500}{88.5}} = 500\text{Hz}$$

任何重量大于 88.5kg 时都将会使频率低于 500Hz, 镗杆和圆柱立铣刀是具有固有频率为 500Hz 范围或更高的典型零件。

另一个有用的数是共振放大因素, 即静刚度和动刚度的比值。图 22-17 所示是 7 台不同机床⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾的共振放大因素的量值。这些值一般处于 5~30Hz 的范围内。当振动涉及滑动接合, 如车床的溜板在其导轨上摇晃时, 便得到较低的值, 较高的值则对应于坚实零件, 如铣床立柱的扭曲振动。

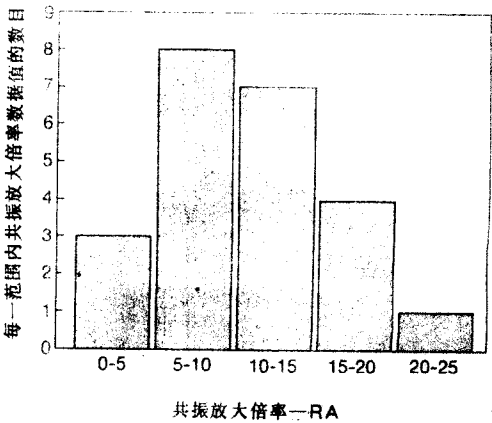


图22-17 从7台机床得到的共振放大因素的数据 (从 long⁽⁶⁾, Koenigsberger⁽⁷⁾ 和 Tobias⁽⁹⁾ 的资料汇编)

需要从实际机床试验中获得的最后的值是共振时的动刚度。表 22-2 中列出的值是从 9 台不同尺寸和型式的机床获得的。

动刚度为 27260N/cm 的机床 A 代表轻负载的机床, 不宜作大余量切削之用。动刚度等于或高于 70800 以上代表具有大余量重切削能力的机床。较重负载的机床, 其生产率通常受到装在它们上面的刀具、工件或夹具的刚度所限制。

表 22-2 共振时的动刚度

机 床	动刚度 N/cm
A	27260
B	48680
C	58940
D	59300
E	104250
F	126660
G	215940
H	725700
I	846000

资料来源: 根据 Long⁽⁶⁾, Koenigsberger⁽⁷⁾, Gandissart⁽⁸⁾, Tobias⁽⁹⁾, Tlustý⁽¹⁰⁾ 的资料汇编。

22.5 自激颤振

至此所讨论的振动都是由不平衡、偏心和不对中等因素所产生的力所引起的。但是, 另有一种不同类型的振动, 即自激颤振。在没有外部激励时, 结构本身就能根据它的刚度和切削条件而决定是否自激颤振。有两种类型的自激颤振, 即高频颤振和再生颤振。

(1) 高频颤振

高频颤振是高频振动的结果, 有时产生在刀具很钝的时候。刀具在切削速度方向上振动并产生高音调的噪声和不很深的鱼鳞纹工件表面, 这种类型的颤振是在切削速度增加时, 由于刀具侧面的摩擦力下降所引起的。当切削时, 工件中的小硬点, 或者由于很小的不平衡力所引起的小振动, 其结果都会使切削力略有增大。这首先要引起刀具在切削力方向上的变形微小增加。而当刀具在这个方向上发生变形时, 切削速度就略为降低而使切削力略有增加, 结果又引起更大的变形。这一循环一直继续到切削力变得很大, 以致刀具突然弹回其原始位置, 甚至超过这个位置, 从而又重复循环。这不是自激颤振的重要类型, 而且常可以用重新刃磨刀具来解决。这里叙述它只是为了避免同其他类型的机床振

动相混淆。

(2) 再生颤振

自激颤振的重要形式是再生颤振。再生颤振很难消除, 因为几乎不可能预测机床为何颤动。有时差不多每一个加工的变量对它都有影响, 但只有少数经常对它起作用。这是来自车间的关于颤振的许多认识。有些往往是正确的, 有些则很少正确。

在再生颤振中, 由于切削力的波动和小的强迫振动等很小的扰动, 将引起刀具相对于工件振动, 小的冲击在被加工的表面上留下痕迹。由于大多数车削中, 后面的切削通常都与前面的切削有一定程度的叠合, 当这些冲击在下一转中暴露时, 就使切削稍有加深, 并产生一个与振动力一样的作用。这时即使原始的扰动已经消失, 也要引起刀具的振动。对于一个特性好的切削, 强迫振动留下的冲击在第二转时就已经比原始的冲击略小, 而且在若干转之后, 就会完全消失。

在导致颤振的情况下, 冲击一圈比一圈大, 最后大到产生可见和可闻的颤振。对这种冲击的增加或消失的规律进行的数学研究就称为稳定性理论。在某些优秀的技术刊物⁽⁹⁻¹²⁾中, 对这种研究有好几种不同方式的介绍。稳定性理论最重要的发现如下:

1) 在某些切削速度范围内, 速度的轻微改变就有使颤振增加或减少的倾向, 这是因为严重的颤振只有当前一转反馈出来的波形与刀具的现行运动处在一定的关系时才能发生。例如, 如果在工件表面上的冲击正在使切削力增大, 与此同时, 刀具正在从工件中移出而使切削力减少, 其综合结果可能是使力的变化为零, 因而不倾向于颤振, 这种现象与切削速度及机床的固有频率有关。随着速度的变化, 机床可能由强颤振走向无颤振并重新恢复强颤振。

2) 颤振的频率非常接近于具有最高共振峰值(最低的动刚度)的机床固有频率。

3) 根据机床结构在共振时的最小动刚度、切削的条件不达到一定的恶劣程度是不会发生颤振的, 切削条件的恶劣程度超过一定水平时, 往往要发生颤振。这个水平的界限与许多切削的及结构的参数有关, 而且很难精确地预测。

4) 无颤振时所能采用的切削条件的恶劣程度

22 机床振动和颤振

严格地与最高共振峰时的最小动刚度值有关。最重要的频率响应不是机床的响应，而是刀具和工件之间对激励的响应，它包含刀具、刀架、机床、夹具和工件。最小动刚度增加两倍，则采用的切削也可加重约两倍。

5) 对颤振倾向性的增加与参与切削的切削刃的总长度成正比。总切削力和功率对它并不重要。产生多大的切屑也不重要。

6) 不同的工件材料对颤振的倾向性正比于由它们所产生的切削力。产生高切削力的材料只能进行无颤振的轻切削。产生低切削力的材料则可以进行重切削而无颤振。

当切削条件的恶劣程度等于或大于结构的抗振水平时颤振就会发生。数学表达为：如果

$$QL_c > CK_{dm} \quad (5)$$

则发生颤振。

式中 Q ——工件材料对颤振的倾向性；

L_c ——参与切削的切削刃总长；

C ——决定于切削速度和共振频率的因素；

K_{dm} ——机床—工件系统最高共振峰时的最小动刚度。

表 22-3 包括了对一般工件材料和硬度的 Q 值比较。

表 22-3 一般工件材料对颤振的倾向性 Q

材料类别	硬度 HB	对颤振的倾向性
易切削碳钢, 冷轧	100~150	0.9
	150~200	1.0
	200~275	1.2
	275~325	1.4
	325~375	1.6
	375~425	1.8
碳钢, 冷轧和铸造	85~125	0.8
	125~175	1.0
	175~225	1.2
	225~275	1.4
	275~325	1.6
	325~375	1.8
易切削合金钢, 冷轧	150~200	1.1
	200~275	1.4
	275~325	1.6
	325~375	1.8
	375~425	2.0
	HRC45~48	2.2
	HRC48~52	2.5

(续)

材料类别	硬度 HB	对颤振的倾向性
合金钢, 冷轧和铸造; 高强度钢, 冷轧; 马氏体时效钢, 冷轧	125~175	1.1
	175~225	1.3
	225~275	1.5
	275~325	1.7
	325~375	1.9
	375~425	2.1
	HRC45~48	2.4
	HRC48~52	2.9
工具钢, 冷轧和铸造	150~200	1.3
	200~275	1.6
	275~325	1.8
	325~375	2.0
	375~425	2.2
	HRC45~48	2.7
	HRC48~52	3.2
氮化钢, 冷轧	200~250	1.4
	300~350	1.8
装甲用钢板	200~250	1.6
	250~300	1.8
	300~350	2.0
	350~400	2.3
	400~450	2.6
结构钢, 冷轧	100~150	1.0
	150~200	1.2
	200~250	1.4
	300~350	1.6
	350~400	1.8
	400~450	2.0
易切削不锈钢, 冷轧 奥氏体	135~185	1.5
	185~225	1.7
	225~275	1.9
	275~325	2.1
	325~375	2.3
铁素体和马氏体	135~185	1.5
	185~225	1.7
	225~275	1.9
	275~325	2.3
	375~425	2.7
不锈钢, 冷轧和铸造 奥氏体	135~185	1.8
	185~225	1.9
	225~275	2.1
	275~325	2.3
	325~375	2.6
铁素体和马氏体	135~185	1.8
	185~225	1.9
	225~275	2.1
	275~325	2.3
	325~375	2.6
	375~425	2.9
	HRC42~45	3.2
	HRC45~48	3.4
	HRC48~52	4.0
弥散硬化不锈钢, 冷轧和铸造	150~200	2.4
	275~325	2.7
	325~375	3.0
	375~440	3.4

(续)

材料类别	硬度 HB	对颤振的倾向性
灰铸铁	120~150	0.6
	150~200	0.8
	200~220	1.0
	220~260	1.2
球墨铸铁	140~190	0.9
	190~225	1.1
	225~260	1.3
	260~300	1.5
可锻铸铁	110~160	0.9
	160~200	1.1
	200~240	1.3
	240~280	1.5
铝合金, 锻轧和铸造	280~320	1.7
	30~80	0.5
	80~125	0.6
	(500kg 载荷)	
锰合金, 锻轧和铸造	50~90	0.4
	(500kg 载荷)	
钛合金, 锻轧和铸造	150~200	1.2
	200~250	1.4
	250~300	1.6
	300~350	1.8
	350~400	2.0
	400~450	2.2
铜合金, 锻轧	HRB10~60	0.6~0.9
	HRB60~100	1.0~1.2
铜合金, 铸造	40~100	0.6~0.8
	100~200	0.8~1.6
	(500kg 载荷)	
镍合金, 锻轧和铸造	80~150	1.5
	150~200	2.2
	200~250	2.8
	300~320	2.2
高温合金	200~300	2.0~3.0
	300~375	2.0~5.0
	375~425	3.0~6.0
耐热合金, 锻轧, 铸造和粉末冶金	175~250	2.0~6.0
	250~300	3.0~7.0
	300~350	4.0~7.0
钛合金, 铸造	80~100	0.5
铝合金	5~30	0.3
锡合金	(500kg 载荷)	

(3) 切削试验

为了研究自激颤振, 许多研究者作了切削试验。图 22-18 表明当车削一根长轴时, 如果切深逐渐增加将会发生的情况。测量了振幅并把它作为切深的函数作图。轻切削时的低振动水平表示由于传动链中的不平衡和不规则所造成的机床的背景振动水平。在一定的“临界切宽”时振动急剧的增大乃是再生颤振的特征。颤振时实际振幅大多变化很大。关于如何确定振幅的问题了解得还不多, 但是一旦发生了颤振, 振幅几乎都太大。解决这个问题的办法是消除颤振, 而不是测定机床为什么在一定水平

上振动。

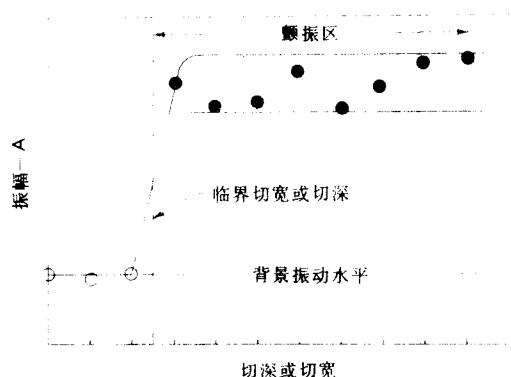
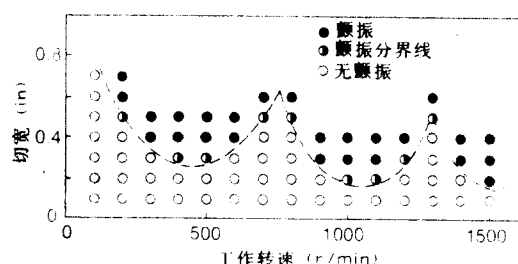


图 22-18 确定再生颤振时临界切宽或切深的实验方法

在不同的切削速度下重复这个试验以表明这个“临界宽度”是如何受到影响的。试验是采用图 22-19 中用圆圈表示的切宽和速度进行的。黑心圆表示颤振, 空心圆表示无颤振, 半黑半白的圆表示颤振的边界线 (大于背景振动, 但小于激烈的颤振)。虚线是粗略画出的颤振边界线。从这个图形中学到的有用概念有以下几点:

- 1) 低于一定的切宽时, 在任何速度上都没有颤振;
- 2) 在稍大一点切宽时, 用改变工件的转速就有可能进入或脱离颤振;



注: 1in = 25.4mm

图 22-19 再生颤振研究的实验结果, 虚线表示颤振的边界线

- 3) 除了在非常低的速度时外, 总是在大的切宽上发生颤振;
- 4) 只有当切削速度足够低时, 才能采用很大的无颤振切宽。

22 机床振动和颤振

图中出现在一定速度下可以增加无颤振切宽的尖瓣形曲线的原因是切削速度和再生颤振间的内在关系。在很低的切削速度下没有颤振称为“低速稳定性”。这一现象没有完全弄清楚,但它似乎是工件和刀具接触的小区域正好落后于切削刃的结果。为了表明钝刀具和小的侧面后角能增加低速稳定性,已经作过许多试验。

把颤振理论用于解释试验结果(不同于在低切削速度时增强稳定性)是很好的,但很难用它来解决颤振问题。颤振理论不能正确预测机床何时将开始颤振,在做到这一点之前,理论还需大大地发展。

(4) 影响颤振的因素

在切削中功率消耗愈多,切削力就愈大,颤振的可能性也就越大,这似乎是一个规律。其实这是不对的。颤振理论表明:切削的恶劣程度是材料对颤振的倾向性乘以切削时的刀刃长度。这个关系由方程(5)所给定。功率大可能意味也可能不意味着颤振的倾向性大。工件材料的颤振倾向性与切削力及功率密切相关。不同工件材料的理论颤振倾向性列于表 22-3。对颤振的倾向性通常正比于预期的切削功率。颤振倾向性的低值属于铝,中间值属于普通铸铁和钢,高值则为航天中常用的难加工合金。表中的颤振倾向数表明:在所有其他条件相同的情况下,切削硬度为 HB175 的易切削碳钢比切削硬度为 HB350 的弥散硬化不锈钢可重切三倍。

影响切削恶劣程度的另一重要因素是切削刃的长度。在粗车中,切削刃在工件中的长度约等于径向切深。因此,如果从轴的直径上切去 12mm,就要比切去 6mm 时恶劣两倍。注意:进给速度是不重要的,根据颤振理论和实验数据,小进给似乎反而比大进给容易引起颤振。这意味着:径向切深为 7.6mm,进给量为 0.0025mm/r 的情况要比径向切深为 6.4mm,进给量为 0.76mm/r 的情况更容易颤振。与此同时,较重的切削要求较高的功率,但颤振却似乎更少发生。

用切断刀或成形刀具进行切入或切削时,影响颤振的重要尺寸是刀具的宽度。当用 3.2mm 宽的切断刀去切断脆弱的工件时,似乎要比用 1.6mm 宽的切断刀去切断时容易发生颤振两倍。此外,从颤振的观点来看,进给速度是个不重要的变量。在钻削中,参与切削的刃长约等于钻头的直径,钻头中心

的横刃具有强烈的稳定性影响,这是理论所没有预计的。在扩孔时,横刃不切削,故颤振的倾向性正比于直径之差。

了解铣削中的颤振是个更为复杂的过程,因为它的特性是三维的。但是,它可用下面的方法来简化。首先确定一个刀齿的切削长度,如图 22-20 所示。然后对参与切削的齿数用图 22-21 所示的方法去确定。最好是铣刀在旋转时处于接触中的刀齿数目最多时,即当一个刀齿(例如,齿 1)将要离开切削时的情况。处在接触中的切削刃总长就是每齿的长度乘以处在接触的齿数。这个数就确定了切削的恶劣程度。如在车削中一样,不考虑进给速度,因为在平面铣削中颤振的倾向性与工作台的进给速度无关。因此,对于相同的金属切除率来说,吃刀浅一点走刀快一点要比吃刀深和走刀慢为好。

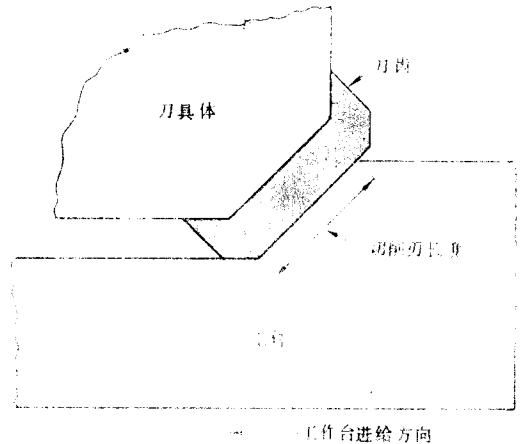
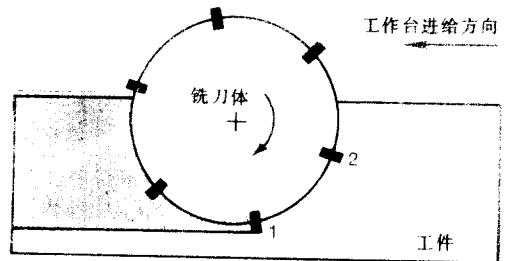


图 22-20 表示铣削中切削刃长度的示意图



在接触中的齿数, $N=2$

图 22-21 可以用来确定铣削中接触的刀齿数的方法示意图

22.6 颤振的查寻和对策

(1) 问题的识别

机床上有两种类型的振动：强迫振动和自激振动。多齿刀具的冲击，齿轮转动的不规则和不平衡，机床基础的运动等构成强迫振动，这种振动造成被加工表面的不规则。在切削加工中除了这些因素之外，振动还包含有自激颤振，这是切削机理本身的基本不稳定性。图 22-22 中的流程图可以用来识别振动问题的类型。下面的讨论将详述这些过程中的步骤并提供一个有关分析两类振动的指导原则。

绝大多数的颤振问题是由自激振动所引起的。只有少数是由于断续切削力在共振频率下激励结构所造成。为了解决这些问题，第一步是要区别这两种类型的振动，然后才能进行其他诊断措施。

寻查颤振问题的关键是确定颤振的频率。此时可以用专门的传感器和电子仪器，但往往也可以不用仪器，而用测量工件表面上振痕之间的间距来确定频率。图 22-23 所示为典型的车削表面上的振痕。为了易于参照，在放大图上把振痕编上号。颤振“波长”的正确测量是相应于振痕 1 和 2、或振痕 3 和 4、或振痕 5 和 6 点之间。注意：螺旋状分布的振痕 1-3-5-7 等点没有意义，因为振痕的测量必须顺着刀具的轨迹。当它沿进给线移动时，刀具作出振痕 1，振痕 2，等等。工件完成一转之后，它通过振痕 1 的附近作出振痕 3，随后作振痕 4，在较后的另一转上则作振痕 5 和 6 等等。

图 22-24 表示平面铣削中的类似情况。同样，螺旋形分布的振痕 1-2-3 或 4-5-6 是没有意义的。沿着进给线可以发现振痕是按下列顺序作出的：

- 齿 1：振痕 4；离开工件。
- 齿 2：振痕 5；振痕 1；离开工件。
- 齿 3：振痕 6；振痕 2；离开工件。

颤振的波长同样是沿进给线，而不是横跨进给线测量的。

在实际工作时，颤振波长最好多测几次，不相等的测量结果通常是由于刀具脱离工件时产生的连

续振动所引起的。这些附加的振动痕迹覆盖了真正的振痕图形并使振痕间距失去意义。这个问题可以用尽快脱开进给或者在垂直于振痕表面方向上快速移开来得到减少或避免。

颤振的波长或间距测得后，振动的频率就可以计算如下：

$$f = \frac{16.7V}{WL} \quad (6)$$

式中 f ——振动频率 Hz；

V ——切削速度 m/min；

WL ——长度（或颤振痕迹间距）mm；

16.7——因采用的单位关系而引入的常数。

例如，上述铣削的例子中，颤振波长为 2.5mm，而切削速度为 61m/min，那末颤振的频率便为：

$$f = \frac{16.7 \times 61}{2.5} = 400\text{Hz}$$

是否由于断续切削而产生颤振问题，可用降低或提高切削速度 50% 来进行计算很快就能确定。在每次以不同的速度切削完后，测量振痕并计算频率。如果频率的改变正比于切削速度，则颤振是由于断续切削所造成的。这里有一条基本原则是：自激颤振发生在与主轴速度无关的固有频率附近，而强迫振动则经常发生在激励的频率之上。改变切削速度 50% 使颤振频率改变很小，但同样改变这个速度时，却使强迫振动的频率也改变 50%。

另一个识别自激颤振的正确方法是减少切削的恶劣程度。随着参与切削的切削刃长度的减少，就能达到这样一点，即只要切削刃长度略有减少就使振动显著降低。这种降低可能与“切宽”有关，也可能与“切深”有关，这要看具体的切削工序而定，但永远不会与进给速度有关。

(2) 强迫振动的消除

如果问题被查明是强迫振动，就可尝试采用减少强迫振动量或增加机床系统的刚度来解决。减少强迫振动量的方法之一是改变刀具的角度。以逐渐减少切削负荷。图 22-25 所示就是如何把一个不利的状况改变为有利的例子。减少强迫振动的另一个可能途径是减少进给速度。振幅应正比于进给速度的改变；因此，如果只需要轻微减少的话，减少进给速度是一个恰当的解决办法。

22 机床振动和颤振

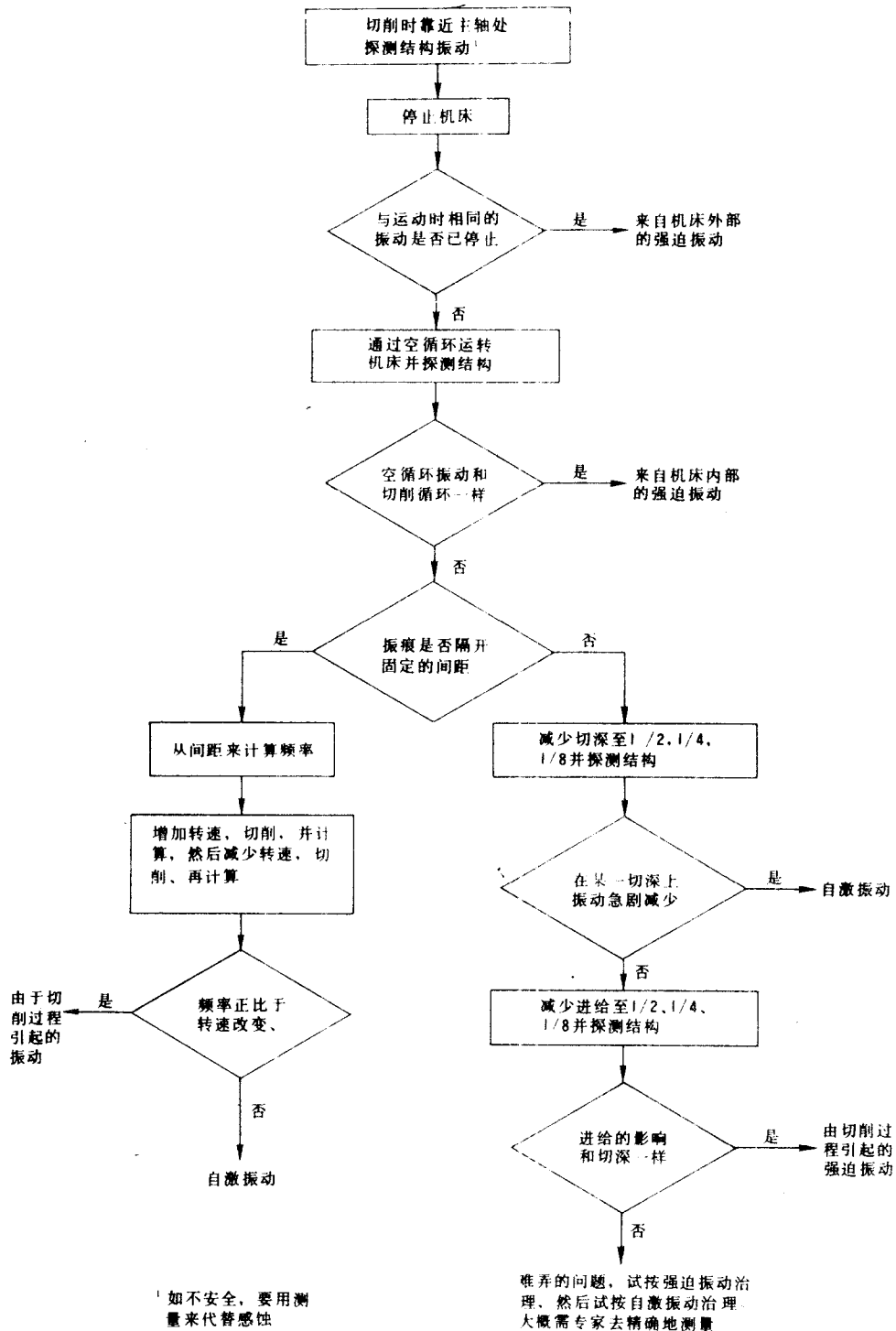


图 22-22 识别振动问题的流程图

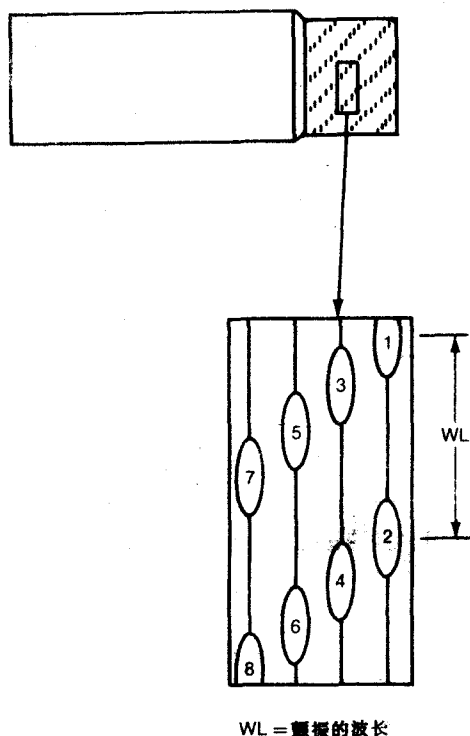


图 22-23 车削表面上的振痕

改变切削速度对减少强迫振动通常有着明显的效果。根据机床是在共振峰的那一边工作，减少或增加切削速度，可以使振动减少到足以解决问题。如果机床是在略低于固有频率的频率上被激励，稍为增加速度就会使振幅增加，再进一步增加速度就会使振幅减小。另一方面，减少速度立即会使振幅减小。如果强迫振动是在高于固有频率之上开始，则响应恰好相反。由于没有方法可以事先告诉你哪一种状态更为适用，可以试用增加或减少切削速度最少 20% 的办法，无论增或减选其最容易的。如果结果不是肯定的，则朝另一方向改变速度进行试验。

有时用于铣削中的一种方法是改变切削力的方

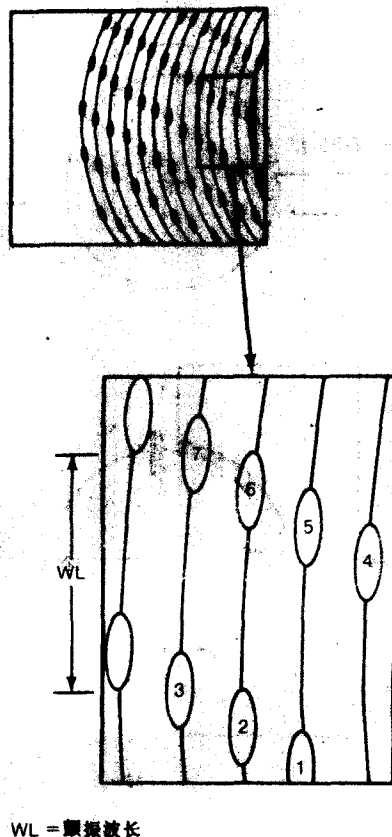


图 22-24 铣削表面上的振痕

向，使其从结构的薄弱方向上离开并转向结构的刚强方向上。这并不是都能科学地做到。因为力的方向或机床的方向刚度可能是不知道的。但面铣刀盘采用 Y 向进给而不用 X 向进给，或者在滚铣中改变工作台的进给方向等类的改变在工作中是早已知道的。

(3) 自激颤振的消除

减少切削刃在切削中的长度可以显著地消除自激颤振。在车削中这意味着减少径向切深。在平面铣削中，可以减少轴向深度或从铣刀盘上每隔一齿卸去一个刀齿（相当于进给速度的减少）。采用立铣刀铣削时，可以减少径向深度或轴向深度，或者采用较少刀齿的铣刀。