

滑动噪声的机理探索

张 奕 鑫

(精密机械工程系)

摘 要

本文论述滑动噪声的机理和影响滑动噪声的主要因素, 并提出减少滑动噪声的途径。

一、前 言

噪声在国际上已列为公害之一, 它也是评价机器技术水平的综合指标之一。因此, 对机械噪声的研究正日益引起人们的重视, 很多学者专家对齿轮、轴承、液压系统等方面的噪声进行了深入的研究, 取得很大的成效^[1]。然而目前有关滑动付产生噪声的资料却很少。实际上, 各种运转的机器中, 均存在有滑动摩擦而引起的噪声。例如在齿轮传递中, 齿轮是旋转运动件, 但在啮合过程中, 从啮合开始至脱开, 在啮合线上齿面产生摩擦, 引起摩擦噪声; 另外, 在轴与滑动轴承上, 以及其它诸如凸轮机构中的凸轮与挺杆、机床的工作台与导轨等, 同样也存在滑动摩擦噪声。至于某些机床(或机器), 如刨床、插床、拉床等, 其主运动是直线运动, 滑动摩擦噪声就更突出了。如果将机械运动分为两大类: 一是直线运动(包括往复运动); 二是旋转运动。那末滑动摩擦既存在于直线运动之中, 又存在于旋转运动之中。可见, 研究滑动摩擦引起的噪声, 显然是十分重要的课题。本文拟就机械滑动噪声的机理和影响滑动噪声的主要因素作一初步探索。

二、滑动噪声的机理

噪声来自物体的振动, 而振动来自物体的作用力。两个金属物体相对滑动时, 产生表面接触, 在切向力的作用下, 克服摩擦阻力后, 才能产生相对滑动。实际上, 物体表面即使磨得非常光滑, 其微观表面仍存在有很多的粗糙峰和凹坑。所以当两个物体表面接触时, 只能是有限个粗糙峰点承受作用在物体上的载荷。这些分散的接触面积的总和构成了实际接触面积, 它只占名义面积的很小比例, 如图1所示。设实际接触面积为 A , 物体上的载荷为 W , 则金属粗糙峰上的应力 σ 为

本文1987年4月17日收到。

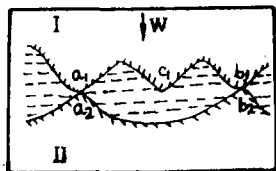


图1 金属微观表面放大图

$$\sigma = \frac{W}{A} \quad (1)$$

式(1)适用于金属表面间没有润滑剂的干摩擦。

一般机械的接触表面都用润滑剂润滑。一种是液体润滑,金属表面间被一层润滑剂隔开,完全不产生金属之间的直接接触。例如,动、静压轴承,静压丝杆等就属于这种润滑状态,称为理想状态。这时的噪声属于流体噪声,即润滑剂的流动、物体与润滑剂之间的摩擦引起的噪声。这种状态只能是在载荷 W 较小,润滑液体压力较大时才能产生。这种状态从机械行业来说为数甚少;而绝大多数的润滑是一种边界润滑或混合润滑,它是介于干摩擦和流体润滑之间的,即在金属表面既有金属粗糙峰的直接接触,又有被润滑液体隔开的区域。随着载荷 W 的增大,润滑油膜强度承受不了载荷的增加而被破坏,造成部分粗糙峰的直接接触,如图1中的 a 点、 b 点。这时载荷 W 将由三部分所支承,用下式表示

$$W = A\sigma + B\sigma_B + W_c$$

式中, A 、 σ 为粗糙峰实际接触面积及其应力;

B 、 σ_B 为油膜实际接触面积及其强度;

W_c 为两个表面互相接近时,由于流体动压效应所产生的挤压油膜所能支持的载荷。

为分析方便,仅研究边界润滑或混合润滑状态,用 W' 表示粗糙峰上所承担的载荷,则它们的关系为

$$W' = W - B\sigma_B - W_c = A\sigma$$

$$\sigma = \frac{W'}{A} \quad (2)$$

式(2)适用于边界润滑或混合润滑状态。

这样就可以简便地分析滑动噪声的机理,它包括以下几个方面。

1. 弹性变形噪声 当粗糙峰上的应力 σ 小于金属的屈服应力 σ_s 时,粗糙峰接触后就产生弹性变形,见图1中的 a 、 b 点,如果物体 I (滑块) 相对于物体 II (导轨) 滑动时,接触点 a_1 、 a_2 及 b_1 、 b_2 脱开,由于弹性力的作用,恢复原状,弹性力将使物体产生自由振动,引起噪声,其振动频率为物体的固有频率。在滑动过程中,粗糙峰将不断地接触和脱开,这种弹性力的作用始终存在,物体也将不断地产生振动和噪声。如果金属表面加上润滑剂润滑,润滑剂将产生阻尼作用,就会使振动噪声很快衰减下来。

2. 塑性变形噪声 随着滑块的载荷 W 增大或金属表面的粗糙度增大,实际接触面积减小,当粗糙峰的应力 σ 大于金属的屈服应力 σ_s 时,粗糙峰点(见图1中之 a 、 b 点)将产生塑性变形,并不断地扩大实际接触面积,直至粗糙峰上的应力 σ 等于金属的屈服应力 σ_s 为止。由于金属表面分子的作用,塑性变形的粗糙峰将发生粘结,即两个金属表面的粗糙峰点“焊接”在一起。根据 Bowden 和 Tabor 的粘结理论^[2]指出,金属接触区若处于塑性流动状态,由于变形热和摩擦热集中在很小区域,因而接触点产生瞬时高温,接触点将形成牢固的粘结点。所以为使滑块滑动,必须有足够大的切向力将粘结点剪切、撕裂后,随即产生滑动。这种现象对于物体相对滑动速度较慢或相对速度为零的时刻(例如往复运动在前后死点速度为

零)更为突出。在剪切结点时,切断的瞬间,物体将发生瞬态的受迫振动,引起噪声。在滑动过程中,粗糙峰将是接触-塑性变形-粘结-撕裂-接触的过程。简单地说就是粘结和滑动交替产生的过程,因此物体将受到撕裂激振力的作用,产生受迫振动和随机性噪声。

3. 撞击噪声 当滑块滑动时,滑块上的粗糙峰首先撞击导轨上的粗糙峰,而后才产生弹性变形和塑性变形,这样就产生了撞击噪声。在滑块上某一粗糙峰点每一秒钟撞击导轨上粗糙峰的数量,就产生这个数量的频率噪声。每个粗糙峰点在滑动过程中在一秒钟内撞击的数量是不相等的,故产生噪声的频率也是变化的,整个滑块上的所有粗糙峰撞击的数量也各不相同。这样,撞击噪声的频带就较宽,且是随机性变化的。

4. 刨削噪声 如果两个物体的表面硬度不同,当物体表面接触时,硬物体的粗糙峰在法向载荷作用下嵌入软物体表面内,形成粘结点。当滑块滑动时,首先硬物体的粗糙峰剪切粘结点,随即刨削软物体的表面,在软物体表面刨出一条沟槽,由于软物体表面也是粗糙不平,因而产生自激振动,从而引起刨削噪声。

5. 磨屑噪声 在相对滑动时,粘结点被剪切,塑性材料就会转移到另一表面上,此后出现粘结-剪断-再粘结的循环过程,这就形成粘结磨损。如果粘结点的强度低,剪切将发生在界面上,这时表面几乎没有磨损,噪声也就较小。如果粘结点强度高,剪切面将发生在软金属表面之内,这就会形成危害性的粘结磨损。这时被剪断的部分软金属逐渐转移到硬表面上,一部分被转移的金属从母体分离而形成磨屑,磨屑在两个物体表面被滚压,一方面破坏金属表面的光洁度,一方面产生不规则的振动和噪声。

总之,两个物体表面接触后产生相对滑动,上述几种噪声将叠加在一起,加上润滑剂流动噪声,物体与润滑剂的摩擦噪声,以及挤压润滑剂的动压效应的噪声,决定了滑动噪声是随机宽带、兼有固有频率的噪声,这都说明滑动摩擦噪声的复杂性。到目前为止,还不能用数学模型来表达,也难以进行定量的分析。

三、影响滑动噪声的主要因素

从滑动噪声的机理分析,可以清楚地看到影响滑动噪声的因素很多,但主要有:金属物体的表面质量、作用在物体上的载荷、相对速度、物体材料的物理化学性能和润滑条件等。下面逐一加以探讨。

1. 表面粗糙度的影响

采用HT20-40铸铁做为滑块的材料,用A₃普通碳钢作为导轨,两者接触的粗糙度取为一致,表面间加入HJ-20 润滑油润滑,均从粗加工向精加工方向逐级加工、逐级试验、逐级测量噪声。滑块上负载为5kg,平均滑动速度为25.4m/min,传声器距导轨面在同一水平位置上为0.5m,采用B& K 2203型精密声级计测量,开始表面粗糙度为12.5 μ m,然后按国标第一系列级数进行加工,最后至粗糙度为0.2 μ m。每一级粗糙度测量5次噪声声压级,测得粗糙度与噪声平均声压级的关系如图2所示。

从图可见,声压级随着粗糙度的增大而增大,但不呈线性关系。在粗糙度较大的区域,声压级变化较大,其声压级差值为3—6dB;在粗糙度较小的区域,声压级变化较小,其差值为1—2dB。在粗糙度为0.8 μ m以下时,声压级变化不大,这样可以预计粗糙度在0.2 μ m以

下的声压级差值倾向小于1dB。但从 $0.2\mu\text{m}$ 至 $12.5\mu\text{m}$ 声压级增大17.2dB。由此可以得出:

(1) 表面粗糙度对噪声的影响很大, 表面越粗糙, 噪声越大, 但不呈线性关系; (2) 表面粗糙度降低到一定值后 (例 $0.8\mu\text{m}$), 对粗糙度就不必要求过小, 因它对降低噪声的作用已不很明显, 而每降低一级粗糙度, 对加工就显得困难得多。

从机理上分析, 物体接触表面越粗糙, 则粗糙峰越大, 实际接触面积越小, 在载荷相同的情况下, 粗糙峰上的应力 σ 就越大, 粗糙峰上的油膜被破坏, 造成金属直接接触, 并产生塑性变形。塑性变形越严重, 粘结点就越牢固, 剪切应力就越大, 这样就造成物体受迫振动的增加, 并产生以塑性变形噪声为主的噪声, 因此噪声显著增大。

如果物体接触表面粗糙度小, 则粗糙峰小, 实际接触面积较大, 根据式(2), 在载荷相同的情况下, 粗糙峰上的应力 σ 越小, 在小于物体屈服应力 σ_s 时, 粗糙峰产生弹性变形, 物体将产生以自由振动和弹性变形噪声为主的噪声。由于弹性变形较小, 加上润滑剂的阻尼作用, 自由振动很快降低下来, 所以噪声明显变小。

由此, 说明了粗糙度大噪声也随之增大的原因, 同时也说明了粗糙度小到某一值 (例如 $0.8\mu\text{m}$) 以下, 由于实际接触面积增大, 使得粗糙峰上的应力 σ 小于屈服应力 σ_s , 物体产生自由振动和弹性变形噪声为主, 如果再继续降低粗糙度, 实际接触面积再继续扩大, 只不过在粗糙峰上的应力 σ 再度减小, 弹性变形再度减小, 而弹性变形本来就较小, 所以噪声声压级变化就不大。

2. 滑块载荷的影响

滑块载荷的影响与粗糙度大小的影响是相近的, 它是决定表面粗糙度产生弹性变形为主或是产生塑性变形、粘结点的粘结程度的关键之一。载荷较小时, 根据式(2), 粗糙峰上的应力 σ 小于物体的屈服应力 σ_s , 产生以弹性变形噪声为主的噪声, 噪声幅值小; 如果载荷大, 则产生塑性变形和剪切噪声为主的噪声, 噪声幅值就显著增大。本试验采用滑块(HT20-40)表面粗糙度为 $3.2\mu\text{m}$, 导轨(碳钢)表面粗糙度为 $6.3\mu\text{m}$, 两个表面间加HJ-20润滑油润滑, 滑块的平均速度为 25.4m/min , 滑块上加5kg载荷时的试验, 测得噪声的1/3倍频程的频谱曲线如图3中的曲线1; 当滑块上加10kg载荷时, 测得噪声的1/3倍频程的频谱曲线如图3中的曲线2, 声压级增加6.5dB。由此说明载荷增大, 塑性变形噪声和剪切噪声也随之很快地增大。所以, 在设计机器中应尽可能减少大载荷的传递, 这也是减小噪声的一个有效途径。

3. 相对滑动速度的影响

相对滑动速度试验时, 采用滑块(HT20-40)与导轨(A₃碳钢)的表面粗糙度均为 $3.2\mu\text{m}$, 表面间仍用HJ-20润滑油润滑, 滑块上加10kg载荷, 逐级改变平均滑动速度、逐级测量声压级。滑块的平均速度为6.3、9.3、12.7、18.6、25.4、37.2m/min, 测得噪声平均声压级与

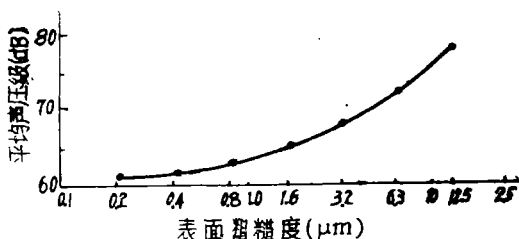


图2 表面粗糙度与平均声压级的关系曲线

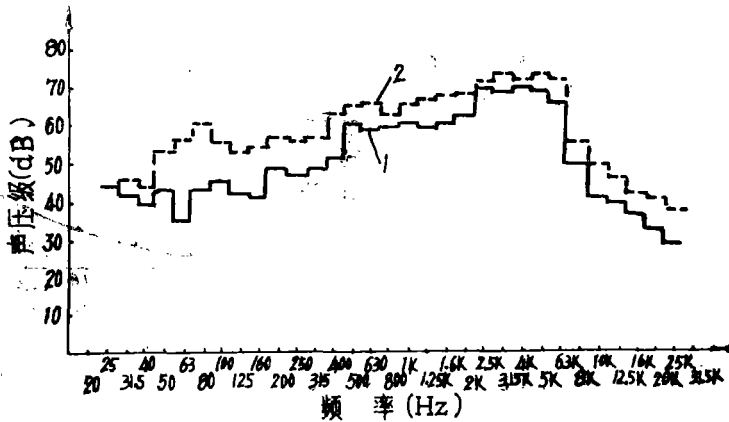


图 3 载荷变化的1/3倍频程频谱曲线

平均滑动速度的关系曲线如图 4 所示。

由图可见,当相对速度较小(在 $6.3\sim 25.4\text{m/min}$)时,声压级变化较小,其差值在 $1\sim 2\text{dB}$ 。当速度增大(在 25.4m/min 以上)时,声压级变化较大,其差值在 $3\sim 4\text{dB}$ 以上。

从Bowden的粘结理论^[2]指出,滑动速度增大,粘结点的形成程度较差,摩擦系数较低,滑动过程比较平稳。据此说明剪切噪声应小,总噪声也应低。但是,动能与速度的平方是成正比的,所以当滑块的速度增加时,动能增加很多,粗糙峰的撞击能量也增加很快,这就造成撞击噪声增大很多。同时由于速度的增大,热能也必然增高,使润滑剂稀释,油膜承载能力降低,粗糙峰直接接触的数量增多,撞击噪声就增大了。

4. 材料的物理化学性能的影响

在机械中,滑块通常采用较软的材料制

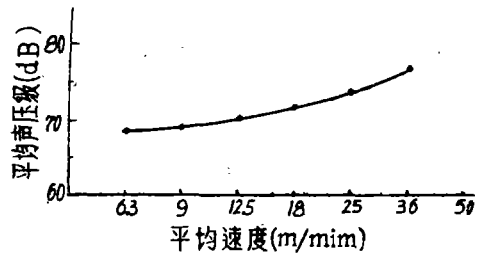


图 4 平均声压级与平均滑动速度的关系曲线

成,作为易损件可以更换。而导轨采用较硬的材料。为此,本试验采用HT20-40 铸铁做为滑块,而分别采用HT20-40铸铁和A₃碳钢做出结构尺寸相同的导轨。导轨和滑块的接触表面粗糙度均为 $3.2\mu\text{m}$,滑块上加 10kg 载荷进行试验,分别测得铸铁导轨和碳钢导轨的噪声,测得结果,铸铁导轨比碳钢导轨噪声降低 4.5dB 。其1/3倍频程的频谱曲线如图 5 所示,曲线 1 为铸铁导轨,曲线 2 为碳钢导轨。由图可见碳钢导轨的高频成分的幅值增大很多,而铸铁导轨的高频成分的幅值很小,显然碳钢导轨的噪声较大。其原因是由于材料的物理化学性能所决定的,铸铁的衰减性能好,能很快地使物体的振动衰减下来,而碳钢的衰减性能较差。其次,由于滑块材料较软,而碳钢导轨材料较硬,这就造成机理分析中的“刨削”噪声的产生。因此,在保证强度要求的前提下,应尽量采用铸铁材料做导轨,可以降低噪声。

5. 润滑条件的影响

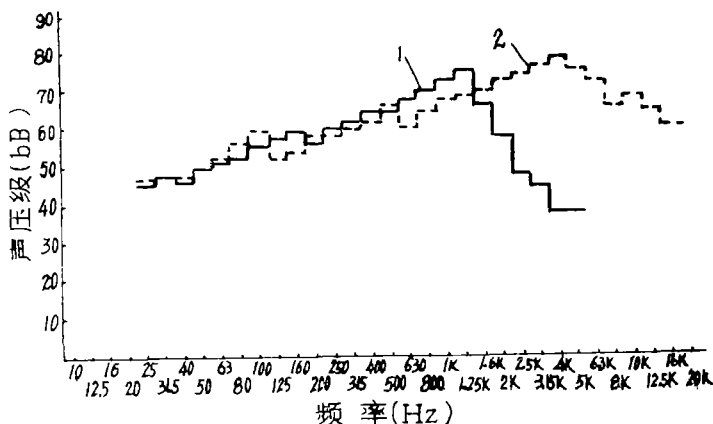


图5 铸铁与碳钢导轨的频谱曲线

采用的滑块 (HT20-40) 和导轨 (A₃碳钢) 两个接触表面粗糙度均为 $3.2\mu\text{m}$, 在滑块上施加10kg载荷, 滑块的平均速度为25.4m/min, 分别对两表面“保持洁净”和添加HJ-20润滑油润滑两种状态进行试验, 测得“洁净”表面的噪声比有润滑油表面的噪声大9.6dB, 试验表明润滑油对降低噪声具有很好的作用。

润滑油有两方面的作用: 第一, 润滑油具有阻尼作用, 它可使物体的振动很快衰减下来, 噪声随油量、油的粘度的增加而变小; 第二, 润滑油能在金属表面维持一定油膜厚度, 防止大部分的粗糙峰直接接触, 即使已经直接接触的粗糙峰, 当滑动接触脱开后, 也能重新在粗糙峰上形成油膜。如果采用动压润滑剂, 还会产生动压效应, 油压承担部分载荷, 以减轻粗糙峰上的应力, 从而降低塑性变形噪声和剪切噪声。

四、结 论

1. 滑动摩擦噪声包括有粗糙峰和底材表面的弹性变形噪声、塑性变形噪声、剪切瞬态噪声、粗糙峰的撞击噪声、刨削噪声和磨屑噪声的叠加。因此决定滑动噪声既包括固有频率成分, 又具有宽频带成分, 其幅值在滑动过程中变化较大, 所以滑动噪声是随机性噪声, 寻找滑动噪声源不能采用频谱特性对比法来寻找, 必须采用模拟试验等其它方法。

2. 影响滑动噪声的主要因素有接触表面的质量、载荷的大小、润滑条件、相对滑动速度、材料的物理化学性能、机械结构形式和辐射面积等。

3. 表面粗糙度越大, 塑性变形噪声和剪切瞬态噪声越大。但表面粗糙度降低到一定值 (例 $0.8\mu\text{m}$) 后, 就再也不要求过小, 因它对降低噪声的作用已不很明显, 反而会对加工提出太高的要求。

5. 降低滑动付的相对滑动速度, 能很好地降低撞击噪声。

6. 铸铁比碳钢对噪声的衰减性能好, 同时铸铁的高频成分的噪声小, 因此在保证强度要求的前提下, 尽可能采用铸铁材料。

7. 润滑剂对降低噪声有综合性的作用, 而且作用较大, 特别是动压润滑剂, 可减轻粗糙峰上的应力, 从而降低滑动噪声。

参 考 文 献

- [1] 国外机床噪声专集资料, 科学技术文献出版社重庆分社, (1980)。
- [2] Bowden, F.P and Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, (1954)。

Mechanism of the Noise results from Sliding Friction

Zhang Yixin

Abstract

This paper deals with the mechanism of the noise results from friction of motion.

It also investigates primary influential factors and suggests a way to eliminate them.