

切削加工振动的分析和防治*

祝小军

(盐城工学院 机械工程系, 江苏 盐城 224003)

摘要: 切削加工振动主要有自激振动和受迫振动, 它们分别与机床系统本身的特性、内部干扰力和外部干扰力有关。为了减振防振, 必须准确判断振动的类型和产生的原因, 综合分析引起振动的主要因素, 找出它们的作用和相互关系, 采取切实可行的有效措施隔断和减轻引起机床振动的各种干扰力, 调整机床系统的固有频率、阻尼、刚度以提高其动态特性。

关键词: 机械振动; 干扰力; 固有频率

中图分类号: TG51

文献标识码: A

文章编号: 1008-5092(2001)04-0022-03

目前, 机械切削加工朝着高效率、高质量、环保型方向发展。制约机械加工水平提高的一个重要因素是切削加工过程中产生的振动问题。特别是高速切削时, 振动的影响非常明显, 这也是制约切削速度提高的主要原因之一。目前我国大多数机械制造厂家只能以降低生产效率和质量来回避它, 这是无奈之举。在机床上进行切削加工过程中产生的振动主要分为两大类: 自激振动和受迫振动。前者是由机床-刀具-工件系统产生的, 其频率接近机床加工系统薄弱环节的固有频率; 而后者产生的主要原因是机床加工系统受到各种各样干扰力的影响, 其频率为干扰力频率若干倍(也有可能相等)。干扰力分为机床内部和外部干扰力。判定切削加工过程中振动类型及干扰力来源的一般步骤见图1。

1 机外干扰力的防治

一般而言, 机外振源引起的受迫振动频率较低, 由于振源较远, 导致传播过程中能量衰减, 对机床影响不是很大; 但对于高精度的机床, 其抗振要求较高, 对机外振源的影响是敏感的。机外振源干扰力可通过隔振地基加以防治。

例如: 某金工车间有一台刨床和一台高精度车床, 刨床工作时作为机外振源对车床产生很大的干扰力, 需对刨床进行主动隔振。图2为刨床

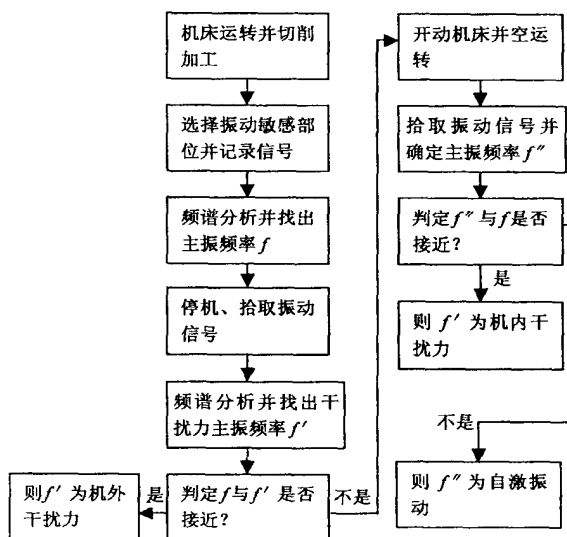


图1 振动判断流程图

Fig.1 flow chart of judging vibration

振动模型, 设刨床质量为 M , 位移为 X , 在时刻 t , 床身受到的切削力为 $P(t) = P \sin(\omega t)$, ω 为频率。没有隔振时, 设备与支承之间为刚性接触, 振动几乎百分之百传给地基。若用弹性基础来隔振, 则刨床可看成一个刚体, 弹性地基可用一个刚度为 K 的弹簧和一个阻尼系数为 C 的阻尼器来代替。

弹簧和阻尼器传给地基的最大动载荷分别为 P_k 和 P_c 。

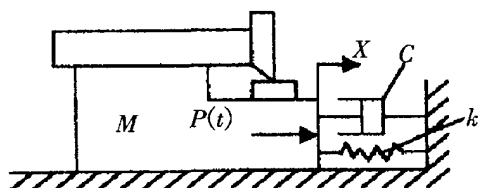


图2 刨床振动模型

Fig.2 Vibrating model of planer

于是有： $P_k = KX$, $P_c = C\dot{X}$

并且有： $X = A \sin(\omega t + \phi)$, $\dot{X} = A\omega \cos(\omega t + \phi)$, $\dot{X}$ 为 X 对时间 t 的导数, A 为振幅, ϕ 为初相位, 显然, P_c 与 P_k 相位差为 $\pi/2$, 它们频率相同, 均为 ω , 它们合力的最大值为 P_m , 于是有:

$P_m = \sqrt{(P_c)^2 + (P_k)^2} = \sqrt{(cA\omega)^2 + (KA)^2} = KA \sqrt{1 + (2\zeta)^2}$, 系统固有频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$, 衰减系数 $\alpha = \frac{C}{2M}$, 阻尼比 $\zeta = \frac{\alpha}{\omega_n} = \frac{C}{2M\omega_n}$, 频率比 $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$, 单自由度受迫振动的振幅:

$$A = \frac{P}{K \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad [2]$$

主动隔振系数:

$$n = \frac{P_m}{P} = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad [2]$$

图3为车床振动模型, M' 为车床质量, K' 为弹簧刚度, C' 为阻尼系数, 需进行被动隔振, 刨床传来的干扰力, 引起支承的垂直振动(a 为振幅, ω 为频率), 其位移为:

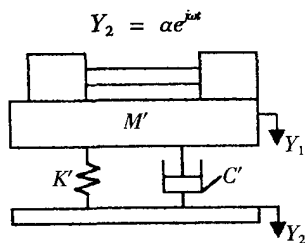


图3 车床振动模型

Fig.3 Vibrating model of lathe

车床产生受迫振动, 振动位移为 Y_1 :

$$Y_1 = Y e^{j(\omega t - \varphi)}$$

φ 为两者相位差, 则车床与支承之间的相对位移为 $Y_1 - Y_2$, 相对速度为 $\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2$, 作用于车床的弹力和阻尼力分别为 $K'(Y_1 - Y_2)$ 和 $C'(\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2)$, 于是有:

$$M\ddot{Y}_1 + C'(\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2) + K'(Y_1 - Y_2) = 0 \quad [1]$$

$$M\ddot{Y}_1 + C'\dot{Y}_1 + K'Y_1 = K'Y_2 + C'\dot{Y}_2 \quad [1]$$

系统固有频率 $\omega'_n = \sqrt{\frac{K'}{M}}$, 衰减系数 $\alpha' = \frac{C'}{2M}$, 阻

尼比 $\zeta' = \frac{\alpha'}{\omega'_n}$, 频率比 $\lambda' = \frac{\omega}{\omega'_n}$, 于是有:

$$\ddot{Y}_1 = 2\alpha'\dot{Y}_1 + (\omega'_n)^2 Y_1 = (\omega'_n)^2 Y_2 + 2\alpha'\dot{Y}_2 \quad [1]$$

$$\text{振幅: } A' = \frac{\alpha \sqrt{1 + (2\zeta'\lambda')^2}}{\sqrt{[1 - (\lambda')^2]^2 + (2\zeta'\lambda')^2}} \quad [2]$$

被动隔振系数:

$$n' = \frac{A'}{\alpha} = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta'\lambda')^2}}{\sqrt{[1 - (\lambda')^2]^2 + (2\zeta'\lambda')^2}} \quad [2]$$

以 λ 或 λ' 为横坐标, n 或 n' 为纵坐标, 作出不同阻尼系数 ζ 或 ζ' 下的幅频响应曲线如图4。

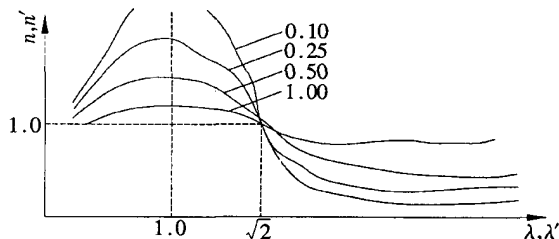


图4 幅频响应曲线

Fig.4 responding curve of extent and frequency of vibration

(1) 当 λ 或 $\lambda' < \sqrt{2}$ 时, n 或 $n' > 1$, 不但没有隔振效果, 反而把振动放大, λ 或 $\lambda' \approx 1$ 时, 发生共振, 可增大阻尼, 以减少设备在启动和停止过程中共振区的最大值。

(2) 当 λ 或 $\lambda' \geq \sqrt{2}$ 时, n 或 $n' < 1$, 有隔振作用, 一般取 λ 或 $\lambda' \approx 2.5 \sim 5$, n 或 n' 随着 ζ 或 ζ' 增大而提高, 即在此区域增大 ζ 或 ζ' 是不利于隔振的。隔振设计时, 首先要确定设备的质量、重心、转动惯量以及振动的大小、方向、频率等, 其次按频率比为 $2.5 \sim 5$ 计算隔振系统的固有频率。若设备上作用几个振源, 在计算频率比时应取激振频率的最小值, 对于多自由度系统, 应取系统的最高固有频率, 才能保证隔振效果。然后计算隔振器的刚度和阻尼系数。

2 机内干扰力的防治

对车床而言, 高速转动零件的不平衡, 能导致机内干扰力的产生, 一般通过平衡方法加以解决。在切削过程中, 可从刀具、切削用量、防止变形等方面着手, 减少切削力的变化, 以防止机内干扰力的产生。

大多机床都有齿轮传动,这也是机内干扰力的主要来源。减少齿轮振动的主要方法有:

(1)提高齿轮精度,齿顶和齿根修圆,传动比尽量为非整数,重叠系数尽量大且为非整数,适当增加齿侧间隙。

(2)提高齿轮刚度:如选用变位齿轮、减少齿高、增加齿厚等。

(3)增大齿轮阻尼:选用阻尼较大材料,如铸铁、高分子、粉末冶金等,以及在齿轮上加阻尼材料。

3 提高机床的动态特性——防止自激振动的产生

3.1 提高系统固有频率

对一个振动系统而言,在一定条件下,其振幅 A 与固有频率 ω_n 成反比,它们的关系如图 5 所示,机床系统固有频率取决于其弹性系统薄弱环节的固有频率,故提高弹性系统薄弱环节的固有频率可有效降低振动。由图 4 可知,振动频率 ω 接近系统固有频率 ω_n 时,会发生共振现象,因此实际应用时,应使干扰力频率远离机床加工系统薄弱环节的固有频率,由经验可知,一般应满足

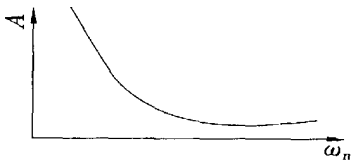
$$\left| \frac{\omega_n - \omega}{\omega} \right| \geq 0.25。$$


图 5 幅频关系曲线

Fig.5 Curve of relation of extent and frequency of vibration

3.2 增大机床系统的阻尼

单自由度振动系统在频率为 ω , 干扰力 $F^{(t)} = Fe^{j\omega t}$ 作用下的振动响应为:

$$Y^{(t)} = \frac{Fe^{j(\omega t - \varphi)}}{K \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

λ 和 ζ 分别是频率比、阻尼比。增大 ζ 可降低振动响应,机床中的阻尼主要来自材料阻尼和摩擦阻尼以及附加阻尼。

机床的阻尼主要来自零部件结合面间的摩擦阻尼,可通过调节结合面间隙和预紧力、表面粗糙度来调整阻尼比。图 6 为在车床主轴上附加阻尼以增加阻尼比,具有一定阻尼力的油液从阻尼器与主轴间隙通过,对主轴产生阻尼作用,油液的粘

度越大,阻尼效果越好。

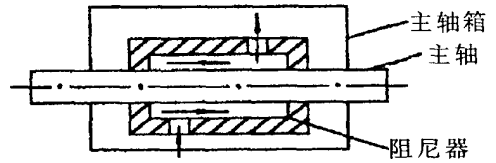


图 6 附加阻尼器

Fig.6 Additional impedance instrument

3.3 增大加工系统刚度

3.3.1 增大机床系统刚度

要设法提高机床系统主振部件的主振方向刚度才能更好地减振,并且尽量减轻其质量。

3.3.2 增大工件系统刚度

提高工件系统刚度,也是减振的一个有效方法。如在车床上加工细长轴类零件时,为提高刚度,用顶针顶住工件一端或把切削加工部位尽量靠近支承部位,采用中心架和跟刀架等措施可很好地提高工件系统刚度。

3.3.3 提高刀具系统刚度

刀具直接与工件系统接触,承受工件传来的切削力,其刚度的高低对振动的传递影响非常大。为提高其刚度,刀杆截面应尽量大且悬伸量应尽量短。

4 选择合适的切削用量和刀具几何角度

确定切削用量时,应使切削速度 v 尽量避免共振区;切削深度 a_p 不宜取大;应增大进给量 f ;前后两次切削应不在同一轨迹上,可有效减少振动。增大刀具前角 γ_0 和主偏角 k_r 对减少振动是有利的,图 7 是 V, f, γ_0, k_r 与振幅 A 的关系:

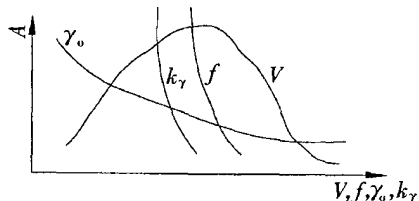


图 7 切削参数与振幅的关系

Fig.7 Relation of cutting parameter and extent of vibration

后角减小时,后刀面与加工表面摩擦增大,起到增加阻尼的作用,但后角不宜过小,否则会由于摩擦作用而产生自激振动。

总之,引起振动的因素很多,只有准确地诊断、采取有效措施加以防治,才能把切削振动的影响降低到最低程度。(下转第 32 页)

有限目标的攻关与提高企业的竞争力相结合,形成制造业的优势领域;六是根据企业的资金、组织结构和人员素质的承受能力,继续深入开展并行工程、虚拟制造、敏捷制造和绿色制造的研究与应

用,引入具体的新产品、新技术和新工艺。通过工程化、产业化的研究,提高先进制造技术成果的成熟度和成套性,形成科技成果通向产业的便捷通道。

参考文献:

- [1] 李敏贤.面向 21 世纪的先进制造技术[J].机械工业自动化,1998,20(4):1~3.
- [2] 陈晓川,刘晓冰.现代集成制造系统的技术构成及发展策略研究[J].组合机床与自动化加工技术,1999,(3):10.
- [3] 潘再其,唐任仲.对先进制造系统理论的探讨[J].中国机械工程,1998,(4):4.
- [4] Merchant M E. Manufacturing in the 21 Century[J]. J Mater. Process. Technol. 1994,44:145~155.

Studies on Advanced Manufacturing Technology and Its Developing Strategy

HUI Xue-qin

(Department of Mechanical Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224002, PRC)

Abstract: This paper illustrates advanced manufacturing technology and its patterns which will adopt to the 21th century, and discusses the developing strategy of advanced manufacturing technology in China by combining with the present situations in the Chinese manufacturing field.

Keywords: manufacturing technology; manufacturing pattern; Developing strategy

(上接第 24 页)

参考文献:

- [1] 闻邦椿,刘凤翥.振动机械的理论及应用[M].北京:机械工业出版社,1982.
- [2] 徐耀信.机床振动学[M].南昌:江西高校出版社,1990.
- [3] 吴博达,于骏一.机械加工振动的诊断识别与控制[M].北京:清华大学出版社,1994.

Analysis and Prevention of Vibration in Cutting

ZHU Xiao-jun

(Department of Mechanical Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, PRC)

Abstract: Vibration in cutting of machinery is chiefly classified as spontaneous vibration and compelling vibration. They are related to the characters and inside interference force and outside interference force in system of machine tool. In order to relief and prevention of vibration, it is necessary to judge correctly the type and producing reason of vibration and analyze the main factors of initiating vibration, and find out their functions and each other relations. Then we should take practical and feasible and effective measures to cut off and relieve all kinds of interference force that lead to vibration of machine tool, and adjust the inherent frequency, impedance and rigidity of machine tool system so as to raise its moving character.

Keywords: vibration of machinery; force of interference; inherent frequency