

文章编号 :1671 - 6833(2002)03 - 0067 - 03

机械加工振型耦合颤振研究

黄仁贵¹, 郑艳萍¹, 孙 炎², 董红霞²

(1. 郑州大学机械工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省计算机公司, 河南 郑州 450002)

摘 要: 论述了机械加工过程中, 刀具与工件之间的平面振动——椭圆运动, 可以分解为任意两个互相垂直方向上的谐振动, 推导出这两个谐振动之间的相位差即是振型耦合切削颤振的诊断参数; 同时以车削、镗削为例建立了机械加工工艺系统发生振型耦合颤振时的加工曲线方程, 并分析了颤振对机械加工表面几何形状的影响。

关键词: 振型耦合颤振; 相位差; 机械加工

中图分类号: TG 172.5 文献标识码: A

机械加工过程中, 若工艺系统具有两个机理个自由度, 则刀具与工件之间可能发生平面振动。以车削为例, 如图 1 所示。设主振系统为刀架系统, 其等效质量为 m , 在两个刚度主轴方向上的等效刚度分别为 K_1, K_2 。车削过程中由于偶然因素的扰动, m 便产生平面振动, 刀尖的运动轨迹一般为椭圆。根据振型耦合颤振机理^[1, 2], 工艺系统的稳定性将取决于刀尖的运动轨迹——椭圆长轴的方向和椭圆运动的转向。取静坐标系 YOZ , Y, Z 分别为加工表面的法向和切向。当刀尖运动轨迹——椭圆长轴位于 I, III 象限时, 椭圆运动的转向为逆时针, 则系统是稳定的; 顺时针则系统将发生颤振。当椭圆长轴位于 II, IV 象限时, 椭圆运动的转向为逆时针, 则系统将发生颤振, 为顺时针则系统是稳定的。可见问题的关键是如何判断刀尖运动轨迹——椭圆长轴的方位和椭圆运动的转向, 即如何确定诊断参数, 该参数必须能够充分且仅仅反映振型耦合颤振的机理。

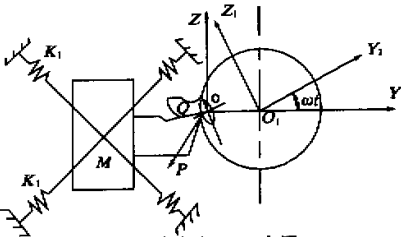


图 1 车削加工示意图

Fig.1 Turning abridged general view

1 振型耦合颤振的诊断参数研究

在图 1 所示的车削加工中, 测取刀尖平面振动的信号为

$$\begin{cases} Y = A_1 \cos k\omega t; \\ Z = A_2 \cos(k\omega t + \varphi), \end{cases} \tag{1}$$

式中 ω 为车床主轴的转动角速度。

以 Y 向为 Re 轴, Z 向为 Im 轴, 在复平面上刀尖的运动轨迹为

$$\begin{aligned} E = Y + jZ &= \frac{1}{2}(A_1 + j A_2 e^{j\varphi})e^{jk\omega t} \\ &+ \frac{1}{2}(A_1 + j A_2 e^{-j\varphi})e^{-jk\omega t}, \end{aligned} \tag{2}$$

令 $(A_1 + j A_2 e^{j\varphi})/2 = B_1 e^{j\beta_1};$ (3)

$$(A_1 + j A_2 e^{-j\varphi})/2 = B_2 e^{j\beta_2}, \tag{4}$$

将式(3)(4)代入式(2), 得

$$\begin{aligned} E &= B_1 e^{j(k\omega t + \beta_1)} + B_2 e^{-j(k\omega t - \beta_2)}, \tag{5} \\ E &= E e^{j\theta} e^{-j\theta} = e^{j\theta} [B_1 e^{j(k\omega t + \beta_1 - \theta)} + B_2 e^{-j(k\omega t - \beta_2 + \theta)}]. \end{aligned} \tag{6}$$

令 $\beta_1 - \theta = \theta - \beta_2,$

得 $\theta = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2).$ (7)

将式(7)代入式(6), 得

$$E = e^{j\frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2)} [B_1 e^{j(k\omega t + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2})} + B_2 e^{-j(k\omega t + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2})}]; \tag{8}$$

$$E = e^{j\frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2)} [(B_1 + B_2) \cos(k\omega t + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2})]$$

收稿日期 2002 - 04 - 01; 修订日期 2002 - 06 - 24

基金项目 河南省科技攻关项目(991110111)

作者简介: 黄仁贵(1942 -)男, 辽宁省庄河县人, 郑州大学副教授, 主要从事机械加工精度理论方面的研究。

+ [B_1 - B_2] \sin(k\omega t + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2})] \tag{9}

式(8)(9)皆为椭圆的标准方程,其长半轴为 B_1 + B_2,短半轴为|B_1 - B_2|,长轴与 Re 轴(Y 向)的夹角——椭圆的方位角为(\beta_1 + \beta_2)/2.

由式(3)(4)可得

B_2^2 - B_1^2 = A_1 A_2 \sin \varphi; \tag{10}

\sin(\beta_1 + \beta_2) = \frac{A_1 A_2}{2B_1 + B_2} \cos \varphi; \tag{11}

\cos(\beta_1 + \beta_2) = \frac{A_1^2 - A_2^2}{4B_1 B_2}, \tag{12}

根据式(9),刀尖的椭圆运动又可写为

E = M e^{j(\Psi + \frac{\beta_1 + \beta_2}{2})}, \tag{13}

式中,

M = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos(2k\omega t + \beta_1 - \beta_2)}; \tag{14}

表 1 相位差与系统稳定性关系

Tab.1 The relationship between phase difference and the stability of machining system

相位差 φ	振幅关系	方位角 $\frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2)$	椭圆长轴 所在象限	B_1, B_2 关系	椭圆运动转向	系统稳定性
$(0, \frac{\pi}{2})$	$A_1 > A_2$	$(0, \pi/4)$	I, III 象限	$B_1 < B_2$	顺时针	振型耦合颤振
	$A_1 < A_2$	$(\pi/4, \pi/2)$				
	$A_1 = A_2$	$\pi/4$				
$(\frac{3\pi}{2}, 2\pi)$	$A_1 > A_2$	$(0, \pi/4)$	II, IV 象限	$B_1 > B_2$	逆时针	不会发生振型耦合颤振
	$A_1 < A_2$	$(\pi/4, \pi/2)$				
	$A_1 = A_2$	$\pi/4$				
$(\frac{\pi}{2}, \pi)$	$A_1 > A_2$	$(3\pi/2, \pi)$	I, III 象限	$B_1 < B_2$	顺时针	不会发生振型耦合颤振
	$A_1 < A_2$	$(\pi/2, 3\pi/4)$				
	$A_1 = A_2$	$3\pi/4$				
$(\pi, \frac{3\pi}{2})$	$A_1 > A_2$	$(3\pi/4, \pi)$	II, IV 象限	$B_1 > B_2$	逆时针	振型耦合颤振
	$A_1 < A_2$	$(\pi/2, 3\pi/4)$				
	$A_1 = A_2$	$3\pi/4$				

根据式(10)~(12)和(16),得出结果如下:当 $\varphi = 0$ 或 $\varphi = \pi$ 时,则 $B_1 = B_2, \beta_1 = \beta_2$,刀尖运动为 β_1 方向上的谐振动,因此系统不会发生振型耦合颤振;同理可推出,当 $\varphi = \pi/2$ 或 $\varphi = 3\pi/2$ 时,系统也不会发生振型耦合颤振.

2 颤振对机械加工表面几何形状的影响

机械加工工艺系统一旦发生振型耦合颤振,必然产生机械加工误差.现以车削、镗削加工为例,讨论颤振对机械加工表面几何形状的影响[3,4]. 万方数据

\text{tg} \Psi = \frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2} \text{tg} (k\omega t + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2}), \tag{15}

将式(15)两边对时间 t 求导数,得

\frac{d\Psi}{dt} = \frac{(B_1 - B_2) \cos \Psi}{(B_1 + B_2) \cos^2(k\omega t + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2})} \cdot \omega. \tag{16}

其中 $\frac{d\Psi}{dt}$ 表示刀尖椭圆运动的转动角速度.

由式(11)可知,刀尖运动轨迹方位角 $(\beta_1 + \beta_2)/2$ 所在的象限取决于 φ ;由式(10)(16)知,刀尖椭圆运动的转向也取决于 φ .可见通过一个测试参数 φ 就能够确定刀尖运动轨迹的方位角和刀尖椭圆运动的转向,从而可以判断刀架系统的振动是否属于振型耦合颤振,或刀架系统能否发生振型耦合颤振.分析的结果如表 1 所示.

2.1 车削中颤振的影响

切削外圆如图 1 所示.振动系统为刀架,取静参考系 YOZ , Y, Z 分别为加工表面的法向和切向,为 O 刀尖 Q 的平面运动中心,刀尖 Q 在 YOZ 上的运动为 $Y_Q = A_1 \cos k\omega t, Z_Q = A_2 \cos(k\omega t + \varphi)$.取动参考系 $Y_1 Q_1 Z_1$ 为车床主轴的径向回转平面,主轴回转中心为 O_1 ,转动角速度为 ω, O_1 在 YOZ 上的位置为 $YO_1 = R, ZO_1 = 0$.则刀尖在 $Y_1 O_1 Z_1$ (工件)上的运动轨迹可作如下分析:
由于 $\overline{O_1 Q} = \overline{OQ} - \overline{OO_1}$,
即 $j_1 Y_{1Q} + k_1 Z_{1Q} = j Y_Q + k Z_Q - (j Y_{O_1} + k Z_{O_1}) =$

$$j(Y_Q - YO_1) + k(Z_Q - ZO_1),$$

得

$$\begin{cases} Y_{1Q} = A_1 \cos k\omega t \cos \omega t + A_2 \cos(k\omega t + \varphi) \sin \omega t - R \cos \omega t; \\ Z_{1Q} = -A_1 \cos k\omega t \sin \omega t + A_2 \cos(k\omega t + \varphi) \cos \omega t + R \sin \omega t. \end{cases} \quad (17)$$

式(17)即为车削加工曲线方程。

2.2 镗削中颤振的影响

在镗床上镗孔,如图 2 所示,振动系统为镗杆。镗杆回转中心为 O_2 。取静参考系 YOZ , O 为 O_2 的平面运动中心。动参考系 $Y_2O_2Z_2$ 为镗杆径向回转平面,其转动角速度为 ω 。刀尖 P 在 $Y_2O_2Z_2$ 上的位置为 $Y_{2P} = R \cos \alpha$, $Z_{2P} = R \sin \alpha$ 。

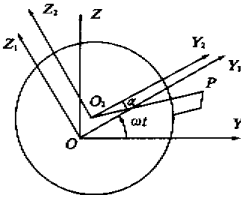


图 2 镗削加工位置示意图

Fig.2 Boring position indication

又取动参考系 Y_1OZ_1 , 其以角速度 ω 绕定点 O 转动。镗杆中心 O_2 在 Y_1OZ_1 上的运动为 $Y_1O_2 = A_1 \cos k\omega t$, $Z_1O_2 = A_2 \cos(k\omega t + \varphi)$ 。则刀尖 P 在 YOZ (工件)上的运动轨迹可作分析如下:

由于 $\overline{OP} = \overline{OO_2} - \overline{O_2P}$,

即 $jY_P + kZ_P = jY_1O_2 + k_1Z_1O_2 + j_1Y_{2P} + k_1Z_{2P}$

$$= j(Y_1O_2 + Y_{2P}) + k_1(Z_1O_2 + Z_{2P}),$$

得

$$\begin{cases} Y_P = R \cos(\omega t + \varphi) + A_1 \cos k\omega t \cos \omega t - A_2 \cos(k\omega t + \varphi) \sin \omega t; \\ Z_{1Q} = R \sin(\omega t + \varphi) + A_1 \cos k\omega t \sin \omega t + A_2 \cos(k\omega t + \varphi) \cos \omega t. \end{cases} \quad (18)$$

式(18)即为镗孔加工曲线方程。

显然,式(17)(18)表明加工曲线不是圆,即产生误差。加工表面的几何形状不仅与 A_1 , A_2 和 k 有关,而且与 φ 也有关系。当工艺系统发生振型耦合颤振时,利用式(17)(18)可以对加工表面的圆度误差(或波度)进行评定,同时对振型耦合颤振的机理可以作进一步的探讨。

3 结束语

在机械加工过程中,对于二自由度的工艺系统,刀具与工件之间的平面振动——椭圆运动,可以分解为任意两个互相垂直方向上的谐振动。经过论证可知,这两个谐振动之间的相位差 φ 为机械加工振型耦合颤振的诊断参数,即当 φ 在 $[0, \pi/2]$ 或 $[\pi, 3\pi/2]$ 区间时,系统会发生振型耦合颤振;当 φ 在 $(\pi/2, \pi)$ 或 $(3\pi/2, 2\pi)$ 区间时,系统不会发生振型耦合颤振。以车削、镗削为例建立了刀具与工件之间发生平面振动时机械加工表面的数学模型,并分析了颤振对机械加工表面几何形状的影响,这对研究切削颤振的机理、控制和预防切削颤振、分析和评定加工表面的误差和波度、提高机械加工质量都是有意义的。

参考文献:

[1] 王先逵.机械制造工艺学[M].北京:机械工业出版社,1995.

[2] 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.

[3] 黄仁贵.主轴径向平面运动的几何分析[J].机械工程学报,1994,30(2):26-31.

[4] 黄仁贵.回转径向误差运动的数学描述及仿真[J].计量学报,1991,13(3):186-192.

Self-excited Vibration Research of Oscillation Mode Coupling in Machining

HUANG Ren-gui¹, ZHENG Yan-ping¹, SUN Yan², DONG Hong-xia²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Computer Company, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper indicates that during the machining, the plane vibration-ellipse movement between cutter and workpiece can be resolving along two arbitrarily direction perpendicular to each other, and deduces that the phase difference is diagnostic parameter on the self-excited vibration of oscillation mode coupling in machining. What's more, by quoting turning and boring as examples, the equations of machining curve are established as the self-excited vibration occurring in the machining system and the effects on machining surface of self-excited vibration shape are analyzed in this paper.

Key words: self-excited vibration of oscillation mode coupling; phase difference; machining