

# 变速切削过程中电机电流瞬时变化特性

洪 莉

(长春大学, 长春 130022)

杨辅伦 于骏一

(吉林工业大学, 长春 130025)

**摘要** 本文对变速车削过程电机电流瞬时变化特征进行了较系统的研究。理论分析和试验结果证明,采用变速车削加工,电机瞬时电流确有一定程度的波动和增长,如果变速参数取得合适,电机瞬时电流的增长幅度在20%左右,不影响电机的正常使用,电机瞬时电流的波动问题不是推广应用变速车削方法的限制性因素。

**关键词:** 变速车削; 电机瞬时电流

## 1 引 言

切削加工中的振动是影响机械加工过程的主要技术问题之一,一旦加工过程出现了振动,就会影响工件加工质量,使刀具磨损急剧增加,同时还会破坏机床的联结刚度,降低机床的寿命,严重时加工根本无法进行,因此,寻求一种有效地抑制振动的方法,是生产中急待解决的问题。国内外专家学者,经过几十年的研究探索,寻找出了一些抑制颤振的方法。其中变速切削抑振法抑振效果最为显著。但是在变速切削过程中,随着速度的变化,电机电流会出现波动,如果电机电流的瞬时波动值过大就会造成电机的损坏甚至烧毁,因此,这个问题是直接涉及到变速切削抑振法是否具有生产应用前景的关键问题。

## 2 理论分析

### 2.1 电力拖动系统基本运动方程式

电力拖动系统的运动规律取决于电机的电磁转矩  $M$  和负载转矩  $M_L$  之间的关系并符合刚体旋转的运动定律。电力拖动系统在工程上常用的运动方程为:

$$M - M_L = (GD^2/375)dn/dt \quad (1)$$

其中  $G$  为重量,  $D$  为惯性直径,  $n$  为转速。

收稿日期: 1994年9月16日

\* 国家教委博士点基金资助项目

实际中, 电机与控制对象间往往要经过多轴传动, 在使用 (1) 式时, 先要将角载转矩及转动惯量折算到电机轴上才能使用。

## 2.2 电机电枢电流变化规律 (数学模型)

根据电工学知识, 有:

$$E = C_E \Phi n \quad (2)$$

$$M = C_M \Phi I_a \quad (3)$$

式中  $C_M$  为转矩系数,  $C_E$  为电势系数;

$$V = I_a R_a + E \quad (4)$$

设恒速切削时,  $n = n_0, I_a = I_0$ , 而负载转矩  $M_Z$  与电磁转矩平衡, 所以有:

$$M_Z = C_M \Phi I_0 \quad (5)$$

由式 (2) ~ (4) 可得到:

$$n = \frac{V}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_M \Phi^2} M \quad (6)$$

将 (1)、(5) 代入 (6) 式, 整理可得:

$$\frac{dn}{dt} + \frac{1}{C_2 C_3} n = \frac{1}{C_2 C_3} V = \frac{C_1}{C_2 C_3} C - \frac{C_4}{C_5} I_0 \quad (7)$$

其中  $C_1 = \frac{1}{C_E \Phi}$ ;  $C_2 = \frac{R_a}{C_E C_M \Phi}$ ;  $C_3 = GD^2/375$ ;  $C_4 = C_M \Phi$

根据微分方程理论, 可解出微分方程 (7) 的解为:

$$n = e^{-\frac{t}{C_2 C_3}} \left[ \frac{C_1}{C_2 C_3} \int V e^{\frac{t}{C_2 C_3}} dt - C_2 C_4 I_0 e^{\frac{t}{C_2 C_3}} + C \right] \quad (8)$$

由 (1)、(3)、(5) 可得:

$$I_a = I_0 + \frac{C_3}{C_4} \frac{dn}{dt} \quad (9)$$

由 (8) 式得:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{C_1}{C_2 C_3} \left[ -\frac{1}{C_2 C_3} e^{-\frac{t}{C_2 C_3}} \int V e^{\frac{t}{C_2 C_3}} dt + V \right] - \frac{C}{C_2 C_3} e^{-\frac{t}{C_2 C_3}} \quad (10)$$

代入 (9) 式, 并整理得:

$$I_a = I_0 + \frac{C_1}{C_2 C_4} \left[ e^{-\frac{t}{C_2 C_3}} \int e^{\frac{t}{C_2 C_3}} dV \right] - \frac{C}{C_2 C_4} e^{-\frac{t}{C_2 C_3}} \quad (11)$$

式中  $C$  为根据初始条件待定的常数,  $V$  是加在电机电枢两端的电压, 是时间的函数。对于各种不同的变速波形,  $V$  具有不同的形式, 现分述如下:

变速波形采用正弦波:

$$V = \frac{V_h + V_l}{2} + \frac{V_h - V_l}{2} \sin(2\pi f t) \quad (12)$$

变速波形采用矩形波:

$$V = \begin{cases} V_h & ST \leq t \leq (S+1) \frac{T}{2} \\ V_l & (S+1) \frac{T}{2} \leq t \leq (S+1)T \end{cases} \quad S = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

变速波形采用三角波:

$$V = \begin{cases} V_l + 2f(V_h - V_l)(t - ST) & ST \leq t \leq (S+1)\frac{T}{2} \\ V_h - 2f(V_h - V_l)(t - ST - \frac{T}{2}) & (S+1)\frac{T}{2} \leq t \leq (S+1)T \end{cases} \quad (14)$$

变速波形采用前沿锯齿波:

$$V = V_l + (V_h - V_l)f(t - ST) \quad ST \leq t \leq (S+1)T \\ S = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

式中  $f$  为变换频率,  $T$  为变速周期,  $V_h$  是对应  $n_h$  的电压,  $V_l$  是对应  $n_l$  的电压。

(1) 变速波形采用正弦沿时, 电机电枢电流变化规律

当变速波形采用正弦波时, 电机电枢电压变化规律由式 (12) 决定, 此时

$$dV = (V_h - V_l)\pi f \cos 2\pi f t dt \quad (16)$$

将式 (16) 代入 (11) 式可得:

$$I_a = I_0 + \frac{C_1 C_2 C_3 \pi f [\cos 2\pi f t + C_2 C_3 2\pi f \sin 2\pi f t] (V_h - V_l)}{C_2 C_4 [1 + (C_2 C_3 2\pi f)^2]} - \frac{C}{C_2 C_4} e^{-\frac{t}{C_2 C_3}} \quad (17)$$

当  $t=0$  时,  $I_a = I_0$  代入上式, 解得:

$$C = \frac{C_1 C_2 C_3 \pi f (V_h - V_l)}{[1 + (C_2 C_3 \cdot 2\pi f)^2]}$$

将  $C$  代入式 (17) 可得:

$$I_a = I_0 + \frac{C_1 C_2 C_3 \pi f (V_h - V_l)}{C_2 C_4 [1 + (C_2 C_3 2\pi f)^2]} (\cos 2\pi f t \sin 2\pi f t + C_2 C_3 2\pi f \sin 2\pi f t - e^{-\frac{t}{C_2 C_3}}) \quad (18)$$

令  $\sin \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + (C_2 C_3 2\pi f)^2}}$ ,  $\cos \beta = \frac{C_2 C_3 2\pi f}{\sqrt{1 + (C_2 C_3 2\pi f)^2}}$ , 代入 (18) 式得:

$$I_a = I_0 + \frac{C_1 C_2 C_3 \pi f (V_h - V_l)}{C_2 C_4 \sqrt{1 + (C_2 C_3 2\pi f)^2}} [\sin(2\pi f t + \beta) - e^{-\frac{t}{C_2 C_3}}] \quad (19)$$

我们最关心的是电机电枢电流冲击的最大值。所以从式 (19) 可知, 当变速波形采用正弦波时的最大电机电枢电流冲击为:

$$\Delta I_{amax} = \frac{C_1 C_2 C_3 \pi f (V_h - V_l)}{C_2 C_4 \sqrt{1 + (C_2 C_3 2\pi f)^2}} \quad (20)$$

$$\frac{d\Delta I_{amax}}{df} = \frac{C_1 C_2 C_3 (V_h - V_l) [1 - (C_2 C_3 2\pi f)^2]}{C_2 C_4 [1 + (C_2 C_3 2\pi f)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (21)$$

当

$$f < \frac{1}{2\pi C_2 C_3} \text{ 时, } \frac{d\Delta I_{amax}}{df} > 0 \\ f > \frac{1}{2\pi C_2 C_3} \text{ 时, } \frac{d\Delta I_{amax}}{df} < 0 \quad (22)$$

分析式 (20)、(21)、(22), 可得出结论, 变速波形采用正弦时: ①电机电枢电流冲击的最大值与变速幅度  $(V_h - V_l)$  成正比; ②当  $f < \frac{1}{2\pi C_2 C_3}$  时, 电机电枢电流冲击的最大值随变速频率  $f$  增大而增大; 当  $f > \frac{1}{2\pi C_2 C_3}$  时, 电机电枢电流冲击的最大值随变速频率  $f$  的增大而

减小。

### (2) 变速波形采用矩形波时电机电枢电流变化规律

当变速波形采用矩形波时, 电机电枢电压变化规律由式 (13) 决定, 此时, 取  $V = V_h$  讨论

$$dV = 0 \quad (23)$$

将式 (23) 代入 (11) 式得:

$$I_a = I_0 - \frac{C}{C_2 C_4} e^{-\frac{t}{\tau_2 \tau_3}} \quad (24)$$

当  $t = 0^+$  时

$$I_a = I_0 + \frac{V_h - V_l}{2R_a} \quad (25)$$

将式 (25) 代入 (24) 可求出

$$C = -\frac{V_h - V_l}{2R_a} C_2 C_4 \quad (26)$$

将  $C_2, C_4$  代入 (26) 有:

$$C = -\frac{V_h - V_l}{2} 2C_1 \quad (27)$$

将式 (27) 代入 (24) 得到:

$$I_a = I_0 + \frac{V_h - V_l}{2} \frac{C_1}{C_2 C_4} e^{-\frac{t}{\tau_2 \tau_3}} \quad (28)$$

从式 (28) 可得到变速波形为矩形波时, 最大电机电枢电流冲击为:

$$\Delta I_{amax} = \frac{V_h - V_l}{2} \frac{C_1}{C_2 C_4} \quad (29)$$

可见, 当变速波形为矩形波时, 最大电机电枢电流冲击与变速幅度  $(V_h - V_l)$  成正比。

### (3) 变速波形采用三角波时电机电枢电流变化规律

当变速波形采用三角波时, 电机电枢电压变化规律, 由式 (14) 决定。

我们最关心的是电机电枢电流冲击的最大值, 所以, 我们只考虑  $ST \leq t \leq (S+1)\frac{T}{2}$  时的情况此时,

$$dV = 2(V_h - V_l) f dt \quad (30)$$

将式 (30) 代入 (11) 式, 得:

$$I_a = I_0 + \frac{2(C_1 C_2 C_3)(V_h - V_l) f}{C_2 C_4} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2 \tau_3}}) \quad (31)$$

当变速波形采用三角波时, 电机电枢电流冲击的最大值为:

$$\Delta I_{amax} = \frac{2(C_1 C_2 C_3)(V_h - V_l) f}{C_2 C_4} \quad (32)$$

从式 (32) 可知, 当变速波形采用三角波时, 电机电枢电流冲击最大值随时着变速幅度  $(V_h - V_l)$  变速频率  $f$  的增大而增大。

当采用前沿锯齿波变速波形时, 可以用上述三角波的分析方法, 得出类似的结论, 所不同的只是二者的电枢电压变化的斜率不同。

### 3 试验装置及试验方法

车削试验是在 CA6140 型普通车床上进行的。选取刀杆、刀具系统为振动系统。将车刀安装在细长型刀杆上，同时设法提高其它有关部件的刚度。

工件的无级变速通过可控硅直流调速装置控制直流电机实现。直流电机电枢中的电流，采用交流互感器进行测量。图 1 为电流测量电路。

在车削试验过程中，电机电流信号与振动信号同时由磁带机记录。试验数据的处理是在 CF-920FFT 分析仪上进行的。双直流信号，进行直流耦合，在作幅值概率密度平均处理，可以得到电流的平均值。对电流时域信号，利用搜索功能就可以求出任一点的电流值，如电流冲击时的峰值点值，这样把多个峰值点的平均值作为电流冲击时的峰值，更能全面地反映电流冲击的实际情况。

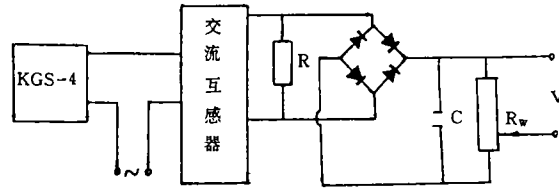


图 1 电流测量电路图

### 4 试验结果分析

为便于讨论，我们首先规定，用指标  $\gamma$  评定电机电枢电流增长程度。 $\gamma$  定义为变速切削中电机电流的瞬时波动最大与恒速切削时电机电流平均值之差同恒速切削时电机电流平值的比值。试验中，电流信号的录制和振动信号同时进行，这样就把两者结合起，应用中就可以选择既有较好的抑振效果而冲击电流  $\gamma$  又比较的小变速参数。

#### 4.1 变速幅度对电机瞬时电流变化的影响

在其它条件不变，只致变变速幅度的情况下进行试验。试验条件如下：机床主轴基本转

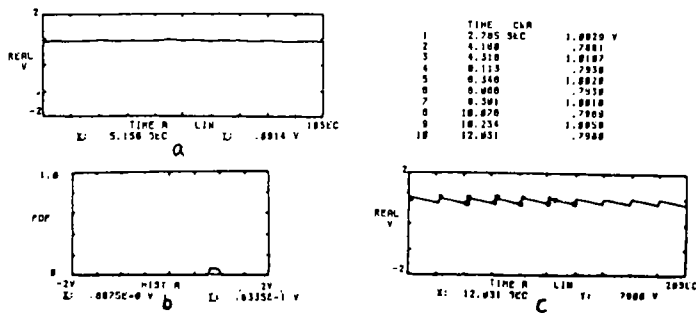


图 2 试验结果

速  $N_0 = 400\text{r/min}$ ；进给量  $f = 0.1\text{mm/r}$ ；切削深度  $a_p = 0.5\text{mm}$ ；变速波形为正弦波；变速频率为  $0.4\text{Hz}$ ；变速幅度分别取为  $20\%$ 、 $15\%$ 、 $10\%$ 、 $5\%$ 。

图 2a、b 分别是第一组第 1 号试验在恒速切削阶段电流信号的时域图和电流幅值概率密度平均图。图 2c 是变速切削阶段电流信号的时域图及电流变化峰谷点值图。其它试验的原始试验数据与图 2 相似。因篇幅限制，在此不一一列出。图 3 是根据试验数据绘制的试验结果曲线，由图 3 可知，随着变速幅度的增大， $\gamma$  值增大，这和前面的理论分析相符。这是由于机电系统有惯性，转速变化必定落后于电压的变化，即感应电势  $E$  的变化落后于电压的变化且变速幅度越大，此种滞后现象越明显，电枢电流的瞬时冲击就越大。

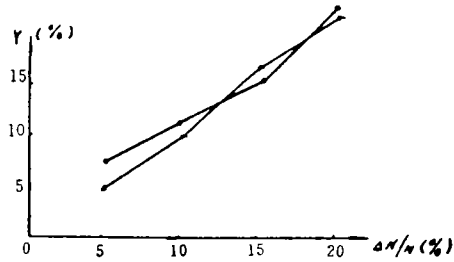


图 3 试验结果曲线

#### 4.2 变速频率对电机瞬时电流变化的影响

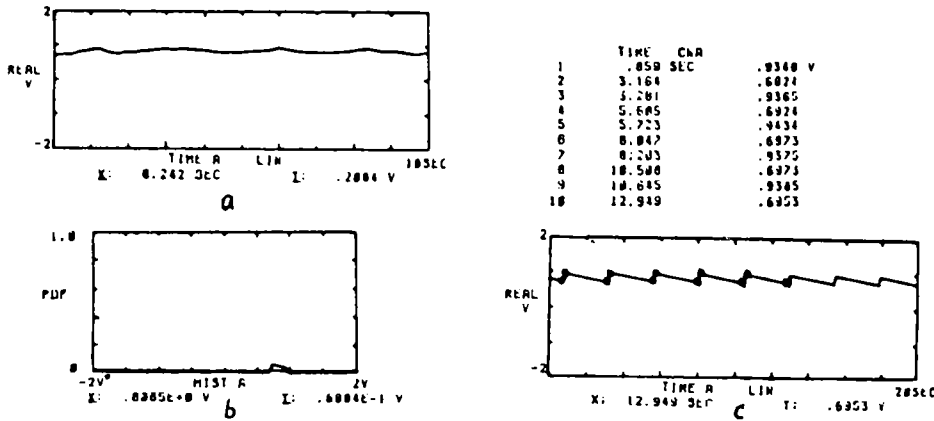


图 4 试验结果

为了研究变速频率对电机瞬时电流变化的影响，在其它条件不变，只改变变速频率的情况下进行试验。试验条件如下：机床主轴基本转速  $N_0 = 400\text{r/min}$ ；切削深度  $a_p = 0.5\text{mm}$ ；进给量  $f = 0.1\text{mm/r}$ ；变速幅度  $\Delta N/N_0 = 20\%$ ；变速波形为正弦波；变速频率分别取为  $0.5\text{Hz}$ 、 $0.4\text{Hz}$ 、 $0.3\text{Hz}$ 、 $0.2\text{Hz}$ 。图 4a、b 分别为第一组第 1 号试验恒速切削阶段电流信号的时域图和电流幅值概率密度平均图；图 4c 为变速切削阶段电机电流信号时域图及电流变化峰谷点值图，其它试验数据从略。

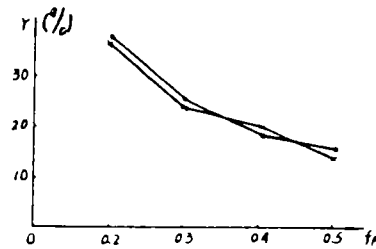


图 5 试验结果曲线

图 5 是试验结果曲线。由图 5 可知：随着变速频率的增加， $\gamma$  值呈下降趋势。

#### 4.3 变速波形对电机瞬时电流变化的影响

为了研究变速波形对电机瞬时电流变化的影响，在其它条件下不变，只改变变速波形的情况下进行试验，试验条件如下：机床主轴基本转速  $N_0 = 400\text{r/min}$ ；切削深度  $a_p = 0.5\text{mm}$ ；进给量  $f = 0.1\text{mm/r}$ ；变速幅度  $\Delta N/N_0 = 20\%$ ；变速频率  $f_p = 0.4\text{Hz}$ ；变速波形分别取为正弦波、矩形波、三角波和前沿锯齿波。图 6a、b 分别是第 1 组第 1 号试验恒速切削阶段的电

流信号时域图及电流幅值概率密度平均图；图 6c 是变速切削阶段电流信号时域图及电流变化峰谷点值图。其它试验数据从略。

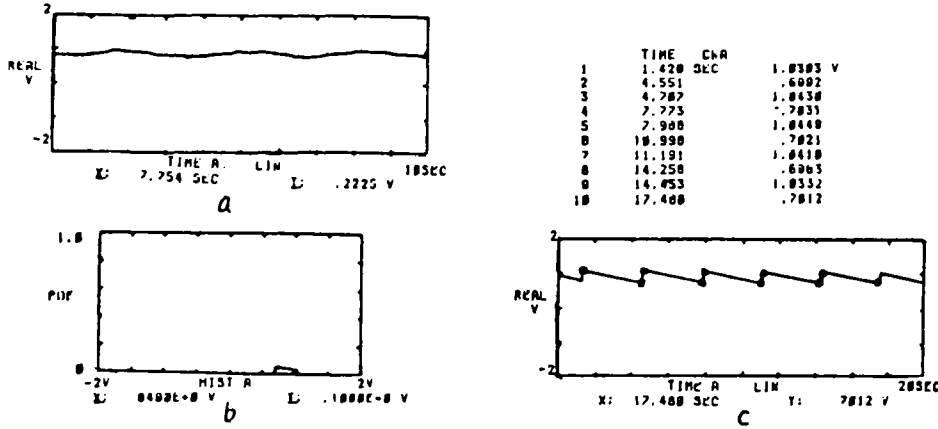


图 6 试验结果

图 7 试验结果曲线，分析图 7 可知矩形波对  $\gamma$  的影响最为显著，锯齿波对  $r$  的影响最小，这是因为，对前沿较陡的波形来说，变速电压在瞬间达到峰值，而在这极短的时间内由于机电系统的惯性存在，电机感应电势不能跟着同步升高，所以， $r$  很高；对前沿不陡的波形来说，它们对  $r$  的影响不大。前沿锯齿波对  $r$  影响最低的原因是：变速电压达到峰值所用的时间为正弦波及三角波的两倍，感应电势易于建立，转速跟踪电压变化的性能较好。因此采用锯齿波形变速对  $r$  的影响较小。

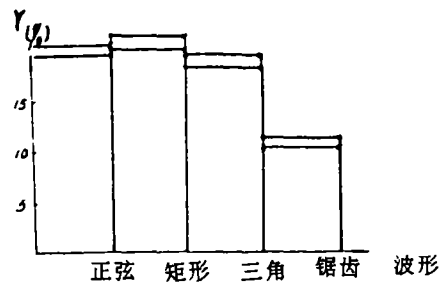


图 7 试验结果曲线

### 5 结 论

(1) 理论分析和试验表明，采用变速车削加工，电机瞬时电流确有一定程度的波动和增长。在本文给定的试验条件下，电机瞬时电流的最大增长幅度不超过 40%，如果变速参数取得合适，电机瞬时电流的增长幅度可控制在 20% 左右，在电机瞬时过载电流不得超过额定电流的 1.5~2 倍的规定范围内，不影响电机的正常使用，试验结果表明，电机瞬时电流的波动问题不是推广应用变速切削方法的限制性因素。

(2) 变速波形、变速幅度、变速频率对电机瞬时电流的波动有很大影响。就变速波形而言，机床主轴转速如按前沿较陡的波形（例如矩形波）变速，机床电机瞬时电流的波动较大，而按前沿较缓的波形（例如前沿锯齿波）变速，则机床电机瞬时电流的波动较小，电机瞬时电流随变速幅度的增大而增大。

## 参 考 文 献

- [1] 于骏一等, 变速切削的研究. 机械工程学报, 1988, 24 (4): 59—63
- [2] 星铁太郎, 机械加工颤振的分析与对策. 上海科学技术出版社, 1981
- [3] T. Hoshi, et al., Study for Practical Application of Fluctuating Speed Cutting for Regenerative Chatter Control. Annals of the CIRP. 1977, 25 (1): 175—180
- [4] J. S. Srxton, B. J. Stone. An Investigation of the Transient Effects During Variable Speed Cutting. Journal Mechanical Engineering Science, 1980, 22 (3): 321—326
- [5] 李礼贤, 电力拖动与控制, 北京: 机械工业出版社, 1986

### Varying Characteristics of Motor Instantaneous Current in Vari-speed Cutting Process

Hong Li

(Changchun University, Changchun 130022)

Yang Fulun, Yu Junyi

(Jilin University of Technology, Changchun 130025)

#### Abstract

The varying characteristics of motor instantaneous current in vari-speed cutting are discussed in this paper. The theoretical analysis and experimental results demonstrate that the motor current has some fluctuation in vari-speed cutting process, but it is almost no effect on normal operation of motor because the increase amplitude of motor instantaneous current is about 20 percent if the vari-speed parameters is appropriate. It is not restrictive factor to popularize vari-speed cutting.

**Key Words:** Vari-speed cutting, Motor instantaneous current