

工具杆几何尺寸对超声扭转振动特性的影响^{*}

刘世清 林书玉

(陕西师范大学应用声学研究所 西安 710062)

2003 年 6 月 10 日收到

摘要 依据四端网络理论, 利用机电类比方法, 研究了具有类圆锥过度段的复合阶梯型变幅杆的扭转共振频率和与之相连接的工具杆的几何尺寸之间的变化关系, 理论和实验符合的较好, 为超声扭转加工振动系统的设计提供了参考依据。

关键词 超声加工, 变幅杆, 扭转振动, 四端网络

Effects of geometry dimensions of the tool on the ultrasonic torsional vibration system

LIU Shi-Qing LIN Shu-Yu

(Applied acoustics institute of ShannXi Normal University, Xi'an 710062)

Abstract Based on the theory of four-end network, the resonant frequency of a complex stepped torsional-mode concentrator with a quasi-cone transited part, which showed depend on the geometrical dimensions of the tool rod, is studied by using the electromechanical analogy method. Experimentation shows that the theoretical values basically agree with the experimental results. The study may provide reference for the structure designing of an ultrasonic torsional mode processing system.

Key words Ultrasonic processing, Concentrator, Torsional vibration, Four-end network

1 引言

随着功率超声技术的不断发展, 超声加工技术应用范围越来越广, 如超声钻孔、超声振动切削、超声焊接、超声研磨和抛光以及超声金属塑性材料加工等^[1~8], 日益受到人们的重视。在这些超声加工应用技术中, 除了利用纵向超声振动系统外, 超声扭转振动以及纵-扭复合振动系统 also 具有很大的发展潜力。超声加工

过程中通常是通过在换能器的变幅杆端加载工具杆来对材料进行处理的。随着加工工具的不断磨损, 如长度变短、截面积变小, 这些变化势必会影响系统的谐振频率, 因此, 必须考虑工具杆几何尺寸的变化对系统振动特性的影响。如文献 [1] 主要以实验方法研究了超声纵向加工系统中工具杆长度和截面直径的变化对系统共振频率的影响; 文献 [2] 研究了具有过渡段的阶梯形超声纵振变幅杆的振动特性随变幅杆

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (10274046)

细端长度和直径的变化规律;文献 [3] 讨论了纵向振动超声变幅杆的四端网络法设计并研究了具有圆锥过渡阶梯形复合超声变幅杆的谐振频率随细端长度的变化关系等。这些研究都仅仅讨论了纵振系统问题,而对于扭转超声加工振动系统中工具杆对系统振动特性影响的研究目前几乎没有涉及。本文将工具杆当作变幅杆负载来处理,利用四端网络理论和机电类比方法对扭转超声加工振动系统的共振频率随工具杆的直径与长度变化的规律进行了有益探讨,结果表明,理论和实验比较一致,为超声扭转加工振动系统的设计及频率调节提供了参考依据。

2 变幅杆-工具杆复合系统

考察常用的具有过渡段的阶梯形变幅杆与工具杆所组成的复合振动系统,如图 1 所示。共分为 4 部分:第 I、III 段为等截面圆柱杆,长度分别为 L_1 , L_3 , 直径分别为 D_1 , D_3 ;第 II 段为类圆锥过渡段,左、右端直径分别为 D_1 , D_3 , 长度为 L_2 ;第 IV 段为工具杆,一般是等截面圆形杆,其直径为 D_4 长度为 L_4 ;第 II 段截面

变化规律为 $D = D_1(1 - \alpha x_2)^{1/2}$, α 为常数,由第 II 段两端面直径 D_1 , D_3 及长度 L_2 决定,即 $\alpha = (N^2 - 1)/N^2 L_2$, $N = D_1/D_3$ 。假定系统只作纯扭转振动,且两端为自由状态。为了便于实验,工具杆与换能器变幅杆之间用螺栓连接,可随意装卸。从强度上考虑,在连接处加工了一小过渡弧,其对系统影响可以忽略不计。

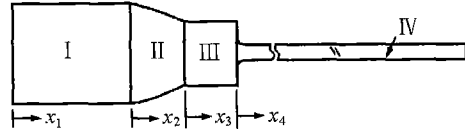


图 1 变幅杆工具杆复合超声扭振系统

3 系统等效电路

工具杆通常是等截面圆柱杆,这样复合系统由三段等截面圆柱杆和类圆锥杆级联组成。类比于杆的纵振动,由机电类比及四端网络理论^[9,10],可得复合系统级联等效 T 型网络如图 2 所示。其中力矩类比电压,扭转振速类比电流。 Z_l 为工具杆的机电类比等效阻抗。

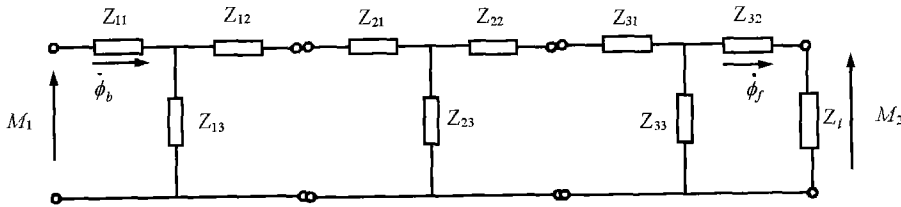


图 2 系统等效电路

相应的级联 T 型网络的各臂阻抗分别为

$$Z_{11} = Z_{12} = \frac{Z_{01}}{j \tan(kl_1)} - \frac{Z_{01}}{j \sin(kl_1)}$$

$$Z_{13} = \frac{Z_{01}}{j \sin(kl_1)}$$

$$Z_{21} = Z_{01} \left(\frac{1}{j \tan(kl_2)} - \frac{\alpha}{jk} \right) - \frac{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}{j \sin(kl_2)}$$

$$Z_{22} = Z_{02} \left(\frac{1}{j \tan(kl_2)} + \frac{\alpha N^2}{jk} \right) - \frac{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}{j \sin(kl_2)},$$

$$Z_{23} = \frac{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}{j \sin(kl_2)}$$

$$Z_{31} = Z_{32} = \frac{Z_{02}}{j \tan(kl_3)} - \frac{Z_{02}}{j \sin(kl_3)},$$

$$Z_{33} = \frac{Z_{02}}{j \sin(kl_3)}$$

工具杆终端自由时的输入阻抗

$$Z_l = j Z_{03} \tan(kl_4).$$

其中

$$Z_{01} = \rho_1 c_1 I_{p1}, \quad Z_{02} = \rho_3 c_3 I_{p3}, \quad Z_{03} = \rho_4 c_4 I_{p4}$$

而 $I_{pi}(x_i) = \iint_s r_i^2 ds, i = 1, 2, 3, 4$, 为各段截面极惯性矩。对实心圆形截面 $I_{pi} = \frac{\pi}{32} D_i^4, D_i$ 为圆形截面直径。

4 系统频率方程

假定各交界面上扭转振速连续, 则有相应的边界条件

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1(0) = \dot{\phi}_b & (1a) \\ \dot{\phi}_2(0) = \dot{\phi}_1(l_1) & (1b) \\ \dot{\phi}_3(0) = \dot{\phi}_2(l_2) & (1c) \end{cases}$$

其中 $\dot{\phi}_b$ 为换能器输出端面扭转振速, 亦即变

幅杆输入端的扭转振速。

由图 2 的等效电路, 系统两端自由相当于电路两端短路, 即 $M_1 = M_2 = 0$, 将工具杆看作变幅杆输出端的负载阻抗 Z_l , 由基尔霍夫定律, 结合边界条件 (1) 可得下列回路方程组

$$\begin{cases} \dot{\phi}_b(Z_{11} + Z_{13}) - \dot{\phi}_2(0)Z_{13} = 0 & (2a) \\ -\dot{\phi}_b Z_{13} + \dot{\phi}_2(0)(Z_{12} + Z_{13} + Z_{21} + Z_{23}) - \dot{\phi}_3(0)Z_{23} = 0 & (2b) \\ -\dot{\phi}_2(0)Z_{23} + \dot{\phi}_3(0)(Z_{23} + Z_{22} + Z_{31} + Z_{33}) - \dot{\phi}_f Z_{33} = 0 & (2c) \\ -\dot{\phi}_3(0)Z_{33} + \dot{\phi}_f(Z_{33} + Z_{32} + Z_l) = 0 & (2d) \end{cases}$$

式中 $\dot{\phi}_f$ 为变幅杆输出端的扭转振速。

将各阻抗表达式代入回路方程组 (2), 并解方程得到复合系统的频率方程如下

$$\tan kl_4 = \frac{Z_{02} \left\{ [\cos kl_3 \sin(kl_2 + kl_3) + \frac{\alpha N^2}{k} \cos kl_3 - \sin kl_2] \psi - \sin kl_1 \cos kl_1 \sin kl_3 \cos kl_3 \right\}}{Z_{03} \left\{ [\sin kl_3 \sin(kl_2 + kl_3) + \frac{\alpha N^2}{k}] \psi - \sin kl_1 \cos kl_1 \sin^2 kl_3 \right\}} \quad (3)$$

其中: $\psi = \cos kl_1 \sin(kl_1 + kl_2) - \sin kl_2 \left(\frac{\alpha}{k} \sin kl_1 \cos kl_1 + 1 \right)$ 。

5 实验

实验测定了组合系统谐频随工具杆长度和直径变化的关系, 实验装置如图 3 所示。振子材料均为 45# 钢, 其相关常数 $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 8.29 \times 10^{10} \text{N/m}^2, c_t = 3251 \text{m/s}, N = 1.925$ 。

(1) 实验中加工了工具杆长度每次相差约 5mm 的 5 个样品进行了测试, 测得相应的谐振频率如表 1 所示, 其中 $L_1 = 26.2 \text{mm}, L_2 = 10.3 \text{mm}, L_3 = 10.4 \text{mm}, D_1 = 35.8 \text{mm}, D_3 = 18.6 \text{mm}$ 均为定值。

(2) 实验中加工了工具杆直径每次相差约 1mm 的 7 个样品进行了实验, 测得相应的谐振频率如表 2 所示。其中 $L_1 = 26.2 \text{mm}, L_2 =$

10.3mm, $L_3 = 10.4 \text{mm}, D_1 = 35.8 \text{mm}, D_3 = 18.6 \text{mm}$ 均为定值。实验结果与理论曲线的比较如图 4、图 5 所示。

表 1 谐频随长度的变化关系

样品编号	1	2	3	4	5
工具杆直径 (mm)	6.10	6.50	5.92	6.08	6.03
工具杆长度 (mm)	25.3	29.9	35.2	39.1	44.8
f 测 (kHz)	32.2	27.2	22.9	20.1	18.2
f 理 (kHz)	31.90	26.9	23.0	20.3	18.3
$\Delta f/f$ 理 (%)	-0.94	-1.11	0.43	0.98	0.55

表 2 谐频随截面直径的变化关系

样品编号	1	2	3	4	5	6	7
工具杆长度 (mm)	29.8	30.2	30.5	30.3	30.3	30.4	30.1
工具杆直径 (mm)	5.96	6.98	8.11	9.05	10.3	11.2	12.1
f 测 (kHz)	26.81	26.68	26.15	26.13	25.32	24.62	23.70
f 理 (kHz)	26.52	26.47	26.38	25.82	25.67	25.12	24.38
$\Delta f/f$ 理 (%)	-1.1	-0.8	0.9	-1.2	1.4	2	2.8

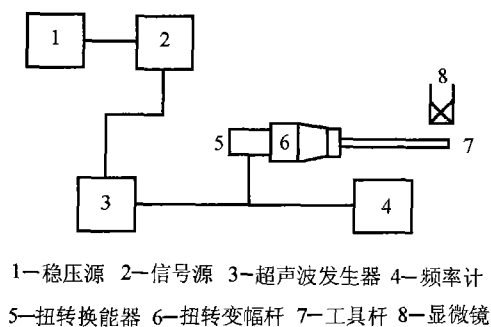


图3 实验装置图

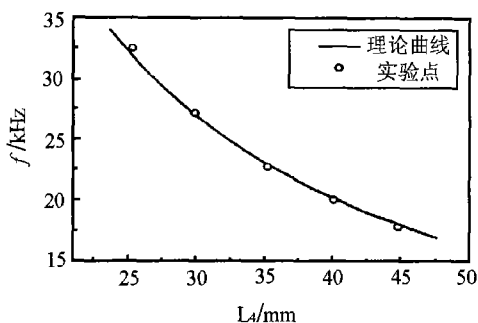


图4 谐频与工具杆长度关系

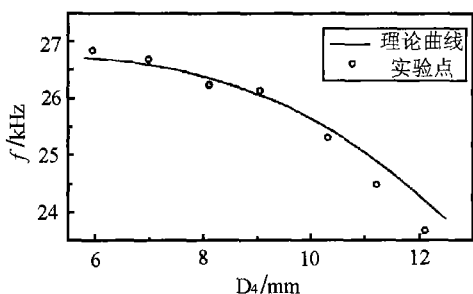


图5 谐频与工具杆直径关系

6 实验分析和结论

(1) 图4的理论曲线和实验符合的很好,

误差基本在百分之一以内。从图4曲线和表1数据分析可知组合系统的扭转谐振频率随工具杆长度的变短而升高,工具杆长度 L_4 每减小1mm,频率约增加700Hz。可见工具杆长度的变化对复合系统的频率影响显著。

(2) 从图5可知,理论和实验基本一致。变幅杆-工具杆复合系统的频率随工具杆横截面积的减小而增加,符合一般振动规律。工具杆直径每减小1mm,系统频率约升高500Hz。可见截面直径的变化对共振频率的影响也是比较显著的。

(3) 由以上分析可知,在其他尺寸不变的情况下,在超声加工过程中随着工具头的不断磨损,其对系统频率影响是明显的,可以此作为超声扭转加工振动系统频率调节的依据。必须指出,本文推导出的公式是在假定复合系统两端为自由时得出的,实用于轻负载加工时的实用状态,对重负载的实用状态亦有一定参考价值。

参 考 文 献

- 1 范国良,应崇福,林仲茂等.应用声学,1982,1(1):2~7.
- 2 马玉英,丁大成.物理学报,1987,36(2):208~215.
- 3 赵福令,冯冬菊,郭东明等.声学学报,2002,27(6):554~558.
- 4 赵波,何定东.机械工艺师,1998,(6):4~6.
- 5 赵继,王立江,孟继安.声学学报,1992,17(1):22~29.
- 6 丁大成,马玉英.陕西师大学报,1985,2(2):22~25.
- 7 应崇福,范国良.应用声学,2002,21(1):19~25.
- 8 林书玉.声学学报,1999,24(1):59~65.
- 9 吉三成编.电路分析原理.高等教育出版社,1985.
- 10 林仲茂著.超声变幅杆的原理和设计.北京:科学出版社,1987.