

超声复合振动系统中的“局部共振” 现象实验研究

季 远 张德远

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

2002 年 8 月 16 日收到

摘要 本文从实验的角度出发,对超声复合振动系统中细长杆的“局部共振”现象进行了较为精确的测量,主要研究了细杆长度与谐振频率之间的关系,超声振子对“局部共振”的影响,以及“局部共振”中细杆长度对振幅的影响,从而为深入研究“局部共振”现象产生的机理提供了更多的依据。

关键词 超声振动系统, 局部共振, 实验研究

Experimental study on the phenomenon of “local resonance” in compound ultrasonic vibration systems

Ji Yuan ZHANG Deyuan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics,

School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing 100083)

Abstract Based on a series of experiments, the phenomenon of “local resonance” in compound ultrasonic vibration systems is studied. Experiments include relations of the length of thin threading beam to frequency of resonance, and the effect of the ultrasonic vibration systems on the phenomena of “local resonance”, and the relation of the length of the beam to amplitude. The experiments may help in the understanding of the mechanism of “local resonance”.

Key words Ultrasonic compound vibration systems, Local resonance, Experiments

1 引言

“局部共振”概念自 1982 年由范国良、应崇福等人首次提出后,很多学者都对这种“局部共振”现象进行了机理研究,并且在实际工作中得到应用。在这些研究和应用中可以发现“局部共振”的基本特点是:在超声复合纵向振动系统中,当工具杆比较细长,细长杆直径与变

幅杆端部直径比很小时^[1](小于 0.3),工具杆可以独立于换能器和变幅杆组成的系统产生“局部共振”现象。

至今,已经有很多关于“局部共振”机理方面的报道^[2,3],大部分机理研究是基于文献[1]中所阐述的现象规律。当前,大功率压电陶瓷换能器已经大量取代了磁致伸缩换能器在生产实践得到广泛应用,而以大功率压电换能器驱动

细长工具杆产生“局部共振”现象的规律研究并不深入, 本文借助较为精确测量手段对用压电陶瓷驱动的超声复合振动中弹性细长杆产生“局部共振”的规律, 以及多项参数对“局部共振”现象的影响进行了具体详细的实验研究, 并且对其产生的机理进行了初步理论分析, 为“局部共振”理论的完善提供了更多的依据。

2 弹性细长杆局部共振规律测试系统

如图 1 所示, 弹性细长杆局部共振测试系统是由以下几部分组成: (1) 压电换能器、阶梯变幅杆和弹性细长杆组成的超声振子, 换能器前盖、后盖以及变幅杆材料都为 45 号钢, 变幅杆变幅比为 4, 端部直径为 23 mm, 超声复合振子设计工作频率 19 kHz; (2) 美国 PHILTEC 公司的光纤激光测振仪, 用于测量细长杆端部的纵向振幅, 其测量精度可以达到 $1\mu\text{m}$, 频带范围最高到 120 kHz; (3) 超声波信号发生器, 压电换能器谐振频率较磁致伸缩换能器窄很多 (通常仅为几十赫兹), 为了精确测量系统谐振频率, 我们选用高精度高分辨率的超声信号源, 其最高分辨率可以达到 1 Hz, 可以手动连续调节和自动产生扫频信号; (4) 超声换能器导纳特性在线测量系统, 采用我们自己研制的超声换能器在线自动扫频测量系统, 可以准确的测量记录工作状态下超声换能器的导纳特性, 判断在扫频范围内的谐振点。

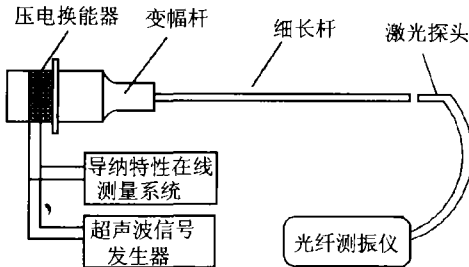


图 1 弹性细长杆局部共振测试系统

实验采用的弹性细长杆初始长度为 535 mm, 直径为 6 mm, 符合文献 [1] 提出的

产生局部振动的条件, 细长杆材料为不锈钢, 为了方便测量, 同时保证测试条件的一致, 我们对超声复合振动系统的测试全部在空载状态进行, 超声波发生器的输出功率保持恒定。实验过程是以 10–15mm 为单位逐步缩短细长杆的长度, 每缩短一次便对超声复合系统进行一次扫频测量, 测出系统的谐振频率 f_i 以及对应的细长杆端部的振幅 A , 本实验扫频范围主要集中在 15kHz–30kHz。

3 测试结果及机理分析

3.1 细杆长度与复合振动系统谐振频率之间的关系

通过实验发现当细长杆长度较长时 ($L > 300\text{mm}$), 复合振动系统在扫频范围内 (15kHz–30 kHz) 存在多阶纵向共振模式, 如图 2 所示, 在扫频范围内细长杆存在 3 阶纵向共振模式, 并且随着细长杆长度的缩短, 共振模式谐振频率逐渐提高。

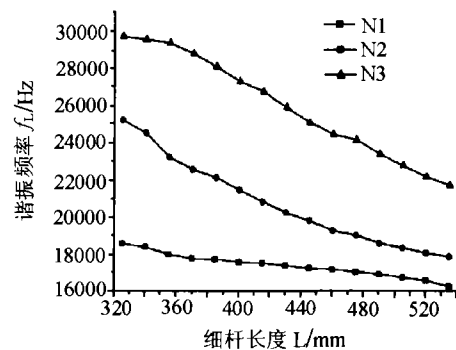


图 2 细杆长度与谐振频率的关系

理论上弹性细长杆一端固定、一端自由的纵振频率 f_{LN} 可以表示为:

$$f_{LN} = (2N + 1) \frac{c}{4L} \quad (1)$$

其中, c 表示不锈钢细长杆的纵波声速 $c \approx 5 \times 10^6 \text{mm/s}$, 取细长杆 $L = 400\text{mm}$ 时, 理论纵振频率 f_N (在扫频范围内 15kHz–30kHz, 单

位 kHz) 为

$$f_{N1} = 15.63 \quad f_{N2} = 21.88 \quad f_{N3} = 28.13$$

测试得到的数据为,

$$f'_{N1} = 17.6 \quad f'_{N2} = 21.58 \quad f'_{N3} = 27.6$$

最大振幅出现在 17.6kHz, 振幅 A 为 $19\mu\text{m}$ 。

当细长杆 $L = 200\text{mm}$ 时, 理论纵振频率 f_N 为

$$f_N = 18.75$$

实际测试结果为 18.58kHz, 在这个频率出现最大振幅 $21\mu\text{m}$, 理论值同测试结果十分接近。将全部测试数据与理论计算值对比, 我们发现理论计算值同测试数据并不是全部吻合, 有一个明显的特点: 每一个细杆长度计算出的理论谐振频率一定有一个测试频率与其非常接近, 但这个频率下的振幅并不一定是细杆端部最大振幅。如第一例所示, 理论计算得到的第二个频率同测试得到的第二个频率很接近, 但这个频率对应的振幅不是最大振幅, 最大振幅出现在 17.6kHz。由此可以得出, “局部共振”现象时确实存在的, 同时, “局部共振”现象的产生又是受多方面因素的影响和制约, 如细杆长度、超声换能器的谐振频率以及负载的变化, “局部共振”现象不仅是细长杆的局部共振, 而且是超声换能器和细长杆组成的系统在“局部条件”下的共振。为此, 我们要对多种因素对“局部共振”的影响进行讨论。

3.2 复合振动系统谐振频率与局部共振的关系

“局部共振”条件下, 超声振子与细长杆之间是弱耦合, 细长杆可以视为超声复合振动系统的低阻抗负载, 根据机电等效模型^[4], 可以将带细长杆的超声复合振动系统等效为如图 3 所示的等效电路, 电容 C_2 大小代表细长杆同变幅杆的耦合程度。超声振子的能量通过电容 C_2 将能量耦合到细长杆, 只有当超声振子处于串联谐振状态时, 超声振子内部阻抗比较小, 能量才可以通过耦合电容 C_2 有效的传递到低

阻抗负载的细长杆, 使细长杆获得较多的能量产生大振幅谐振。超声振动系统在这样条件下才可以有效的输出功率, 使系统效率提高。

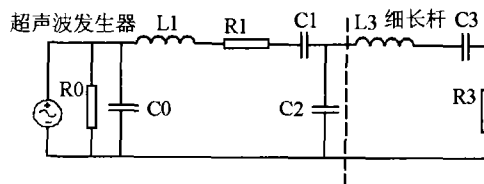


图 3 超声复合振动系统等效电路

我们实验用的超声振子设计的谐振频率为 19kHz, 实际工作的谐振频率为 18.04kHz, 当联接细长杆作为负载后, 由于耦合系数比较小, 细长杆作为低阻抗负载对振子谐振频率的影响并不明显。

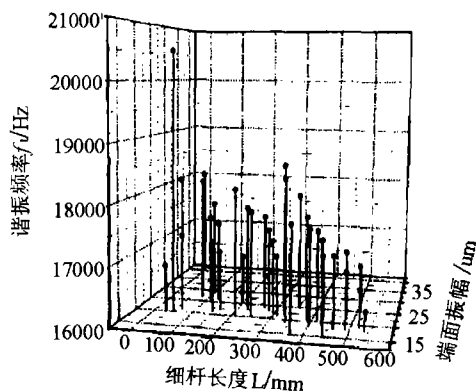


图 4 细长杆端部最大振幅与谐振频率的关系

如图 4 所示, 细长杆长度发生变化时, 细长杆端部最大振幅存在的谐振频率始终集中在 16.5kHz-18kHz 之间, 虽然细长杆在其他频率段也存在纵振模态, 但是振幅都比较小。说明细长杆只有在超声振子工作在其谐振频带内的条件下才可以产生大振幅“局部共振”。细长杆的“局部共振”是受整个超声复合振动系统制约的局部共振。

3.3 细杆长度与局部共振的关系

超声振动系统不装夹细长杆时, 谐振频率为 18.04kHz, 变幅杆端部最大振幅为 $40\mu\text{m}$ 。由

测试数据可以看到 (如图 5 所示), 细长杆端部最大振幅都低于变幅杆空载状态下端部振幅, 随着细长杆长度的增加, 细长杆端部最大振幅有减小的趋势, 但下降趋势比较缓慢。

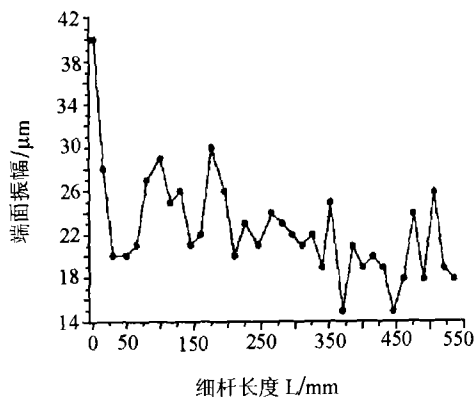


图 5 细杆长度与端面最大振幅关系曲线

针对这种现象, 我们认为还应该从能量的角度加以解释。对于超声换能器、变幅杆和细长杆组成的复合振动系统, 压电换能器转换产生的机械振动能量由变幅杆传播到细长杆的过程中, 在变幅杆与细长杆的连接处由于截面面积产生突变, 使能量不可避免的产生反射, 截面面积变化越大, 能量反射越大, 细长杆得到的能量也就越少, 虽然细长杆有振速放大的作用, 但相对于能量的损失来说仍不足以使细长杆端部振幅大于变幅杆端部振幅。

“局部共振”产生的前提就是超声振子同细长杆的弱耦合效应, 由于耦合系数很小, 细

长杆在一定能量的激励下可以保持相对独立的谐振状态, 同时, 细长杆本身作为负载来说就是低阻抗负载, 长度的变化对整个超声振动系统来说影响并不明显, 这也就是当细长杆逐渐增长而端部振幅衰减并不明显的原因。利用这个特点, 做为工具杆的细长杆在加工过程中由于磨损产生的长度变化不会对其端部的最大振幅产生明显影响, 也就不会因此影响系统的加工效率。

4 结论

通过实验和初步的理论分析, 可以看到细长杆在超声复合振动系统中存在“局部共振”现象, 同时, “局部共振”是受超声振子谐振频率制约的局部条件下的局部共振, 只有当细长杆自身的共振频率与超声振子的谐振频率接近时, 细长杆才能出现明显的可以利用的“局部共振”现象; 另外, 细长杆的长度对于其端面的振幅影响程度很小, 当细长杆长度发生较大范围变化时, 其端面可以达到的最大振幅变化不大, 从而保证了在一定范围内的“局部共振”。

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 应崇福, 范国良. 应用声学, 2002, 21(1): 19—25.
- 3 鲍善慧. 应用声学, 1998, 17(4): 6—10.
- 4 Arthur Ballato. IEEE Transactions on UFFC, 2001, 48(5): 1189—1240.