一种新型的超声加工深小孔的工具系统

应崇福

范国良

林仲茂 彭

(华北光电枝术研究所)

翔

(华北光电技术研究所)

(中国科学院声学研究所) (华北光 1981 年 8 月 19 日收到

传统超声加工用工具或者很短,或者按半波长整数倍叠加. 加工中工具长度的大量磨损会明显降低加工效率,因而必须经常更换工具.本文提出一种新型的超声加工深小孔的工具系统,能以特殊的方式工作.工具长度任意,加工中工具长度变化允许达 80%;仅仅需要适当调节电发生器频率就能良好工作.本工具系统已成功地用在超声加工玻璃深小孔(圆形和异形孔),在玻璃上加工出直径6mm、深达280mm 的孔.加工效率至少可以与常规方法相比.

观测了具有等截面细长杆的复合振动系统的频率特性和工具系统的振动模式,得出了工具杆"局 部共振"的结论。初步探讨了产生这种共振的条件及其形成机理。

局部共振现象,应当还可用在高功率超声的其它场合。

一、引言

在超声加工中,超声振动系统一般由换能器、变幅杆和与之相接的加工工具组成.加工工具大多是一根等截面杆.通常,换能器和变幅杆系统的长度为半波长的整数倍。当加接加工工具时,如果工具较短,大多把它作为变幅杆的组成部分考虑。如果工具较长,就按半波长整数倍叠加.这时,工具长度应满足指定的要求,不能变化太大,否则会导致工具端部振幅明显减小,因此,遇到加工中工具磨损较大时,就需要经常更换工具。当加工很深的小孔(例如直径5mm、深200mm)时,工具如果按半波长叠加,长度可能远大于要求的孔深,因而会给工具的制造增加困难.

在我们的研究工作中发现,采用不按半波 长整数倍设计的细长工具,在工具的长度因磨 损等原因发生较大变化时,仅需改变电发生器 的频率,就可以始终保持良好的加工效果。研究 和应用表明,本工具在超声加工中具有明显优 点:不需要改变驱动系统(换能器和变幅杆系统) 的几何尺寸,在输入换能器电功率一定的条件

• 2 •

下,即使加工工具的长度逐渐改变达 200mm 以 上,总可以在它的输出端,在空载时得到比与 之相接的变幅杆输出端大数倍以上的位移振 幅,甚至可以比半波长型工具输出端的位移振 幅大.在实际加工时,则可以保持较高的加工 效率.

上述发现,使得细长工具的设计摆脱了按 半波长整数倍叠加的概念,使得振动系统的调 谐工作方式不限于常用的"全谐振"方式.为了 解释这种现象,通过实验研究,我们认为工具作 为一个系统可以实现"单独共振",或叫"局部共 振". 本文着重介绍一些有关的实验研究和应 用结果.

二、空载下复合振动系统频率 特性的测量及工具杆振动 模式的直接观测

1. 复合振动系统频率特性的测量

复合振动系统是指工具杆与换能器和变幅 杆组成的整个振动系统。为了弄清等截面细长 工具杆的振动模式,首先测量了复合振动系统 的频率特性。 图1是复合振动系统的一个 例

1卷1期

E 11 子. 图中工具杆为不锈钢管,外径 6mm,壁厚 1mm,长 320mm. 为了方便起见,把磁致伸缩 换能器和变幅杆组成的系统称"D"系统. 用电 发生器的高频电流来激励磁致伸缩换能器,并 在紧靠工具杆的自由端安装电容拾振器以测量 这个端面的位移振幅变化(图 2).



ž

从变幅杆输出端测得的位移振幅频率特性.

由图 3 可以看出,在工具端面存在多个振动极大值.分析某些振动极大的频率,可以找出这样一个规律,即这些频率恰好符合工具杆本身固有的一些谐振频率.假设工具杆是独立的,并且一端固定,一端自由.由于杆长 320mm,纵波声速为 5 × 10⁶ mm/sec,则工具杆的纵向振动固有频率为

$$f_{TN} = (2N + 1)c/4L = 3.90(N = 0),$$

11.70(N = 1), 19.50(N = 2),
27.30(N = 3)kHz

查看图 3,较大的振动极大的频率有 3.80, 11.39,19.65,26.91 kHz。显然两组频率是很 接近的. 从此例以及其他不少实例可以推论, 等截面细长工具杆虽然连接在"D"系统上,但 它能作为一个独立的系统而振动,此时,它和变 幅杆的连接处振动极小.

2. 工具杆振动模式的直接观测

前面提到,从复合振动系统的频率特性测量中发现,在适当频率的激振下,工具杆可能作独立的纵向振动.为了进一步验证,我们采用两种方法来直接观测工具杆的振动模式、一种是借助于热成象,以观察振动时工具杆沿长度的应力分布.振动时应力大处形变大,因而局部温度升高多,而应力低处温度低.利用热像仪拍摄工具杆振动时的"热像图",就可以确定工具杆沿长度上的应力分布.另一方面,若激振前沿工具长度上均匀撒上一层微粉,激振时微粉会移动,观察工具杆沿长度上微粉的分布,就可以确定其位移分布.

1

图 5 是图 1 所示复合振动系统中工具杆在 激振前与用不同频率激发共振时热像图的一个



(c) (d) 医5 工具杆受激前和受激共振时的热像图 (a) 受激前; (b) *t* = 11.39 kHz (*N* = 1); (c) *t* = 19.65 kHz (*N* = 2); (d) *t* = 26.91 kHz (*N* = 3) (4.1) 例子.图 5(a)反映激振前,图 5 中(b)、(c)和(d) 反映激振频率分别为 11.39、19.65、26.91 kHz (参看图 4)时,工具杆沿长度上的温度分布.杆 上亮处温度较高,因而是应力较大区域。 图 6 是用微粉分布法测得的同一工具杆沿 长度的位移分布图样。图 6(a),激振前微粉已 均匀撒在杆上;图 6(b)、(c)、(d),激振时波节 处微粉堆积(图中箭头所指)。



图 6 工具杆受激前和受激共振时的微粉分布图样 (a) 受激前; (b) f = 11.93 kHz (N = 1); (c) f = 19.65 kHz (N = 2); (d) f = 26.91 kHz (N = 3)

由图 5 和图 6 可以看出,工具杆在适当频 率激发共振时,它和"D"系统的变幅杆连接处 总是处于位移节点(应力腹点),而它的自由端 是位移腹点。在这两点之间,对应不同的振动 模式 N = 1、N = 2 和 N = 3,分别有 1、2 和 3 个位移节点(应力腹点)。工具杆的振动模 式正是一端固定、一端自由的振动模式。考虑 到工具是在复合振动系统内,却能独立谐振,我 们称这种现象为"局部共振"。

对实心的等截面工具杆,曾同样观察到"局 部共振"的图像。

三、局部共振的条件问题

如上述,细长的工具杆在适当频率激振下 可以作局部共振。下一个问题是,工具杆要满 ^{应用声学} 足什么条件才会产生这种现象。也就是说,工 具杆要细到什么程度才会发生"局部共振"?杆 的长度对"局部共振有没影响,杆长如果改变较 大,局部共振是否继续存在? 为了回答这些问 题,我们进行了下面的一些实验。

首先采用了图 7 所示的复合振动系统。等 截面实心杆为普遍钢材、与变幅杆材料相同。 长度为 195mm。 开始时直径为 20mm,与变幅 杆细端直径 D_T 相同。 设钢杆材料中纵波声速 为 $C = 5.10 \times 10^6$ mm/sec,当工具杆长 195mm 时,可以计算出 N = 0, N = 1 和 N = 2 时的 共振频率为

 $f_{70} = 6.54$, $f_{71} = 19.62$, $f_{72} = 32.70$ kHz 调节电发生器的频率,借助电容拾振器测量工 具杆自由端出现位移极大值时的频率,发现测 得的频率并不符合计算的频率,工具杆与变幅

• 5 •

9

杆的连接处也不是位移波节,而与波节有相当 偏离。我们随后逐步车小工具杆的直径 Dr,每 次车小 2mm,逐次测量,结果是随着工具杆直 径 Dr的减小,测得的位移极大的三个频率 f_n , f_n 和 f_n ,逐步分别接近于上面计算的 f_{ro} , f_n 和 f_n ,即 f_n/f_n , f_n/f_n 之比分别接近于 1.工具杆与变幅杆连接处附近的位移波节,也 逐步移至连接处,直到 D_r/D_r 约为 0.30 (面积 比约为 10%)时就相当一致。图 8 画出了图 7 所示工具杆自由端面位移极大频率的测量值 f_n 与工具杆局部共振的(N = 0)频率 f_{ro} 之比,与 工具杆直径对变幅杆输出端直径之比 D_r/D_r 的关系。

由这个有限的实验及前述的一些实验可 见,工具杆局部共振的条件是它的直径(或面 积)要相当小于与之相接的变幅杆输出端的直



径(或面积),但这个结论还是相当初步的,有 些问题,如工具的质量有无影响等尚待进一步 研究.

其次进一步研究了工具杆长度对局部共振 的影响。图9给出了一个实例,显示工具杆自 由端面振动极大频率测量值 fi 与局部共振的 (N = 0)计算频率 fn 之比,随工具杆长度的变 化.实验时采用的工具杆为长管,外径13mm, 壁厚 0.5mm,长度由 130mm 变化到 60mm.

由图 9 可以看出,随着工具杆长度的改变, 局部共振特性依然存在。但值得提到的是,我 们曾经初步测量了局部共振时工具杆自由端面 位移幅随杆长的变化,发现最大振幅与杆长仍 有一定关系,尚值得进一步研究。



现在初步探讨一下局部共振的机理问题。 一般把换能器、变幅杆和工具组合的系统看作 是一个整体.根据本文实验的结果,则可以把 这个复合振动系统看作是两个独立系统的耦 合,一个是D系统(驱动系统),一个是工具系 统.两者之间的耦合程度,在工具杆细长时是 很弱的。局部共振的条件就是耦合系数小到两 个系统几乎不相互影响,从而工具系统能以独 立的模式作振动的条件. 从本文实验结果来 看,在工具杆直径与变幅杆输出端直径的比值 小于 0.3 时,耦合系数就足够小.值得指出,在 两个不同截面杆的连接处,通常假定波的传播 是连续的. 显然不尽如此,特别是两个截面相

1卷1期

差很远时,那时波的传播可以看作是波导内的 行进波遇到前面壁上一个小孔。这种情况可能 导致两系统的耦合大量减弱。为此,有待对这 个问题进行定量分析。

还可以指出两个有关的情况。一是本文实 验证明,工具杆与变幅杆的连接处在局部共振 时总是个波节。关于这个问题可以引用一下一 般的理论结果:一个两端自由的等截面细长 杆,假定在一端受到速度驱动,它的振动模式就 相当于一端固定、一端自由¹³³.二是本文实验曾 表明,D系统的频率响应是多峰的(参看图 5), 而不是一般认为那样只是在 19kHz 附近有一 个峰.因此,D系统是包括几个峰的宽频带机 械驱动源。

四、在负载下的加工效果

上面已经证明,在一定条件下,工具杆是可 以单独共振的,因而工具杆基本上可以任意长. 同时,我们的一些测量表明,空载时工具杆端面 位移振幅也比较大,上述特点如果能适用于有 载情况,那么对实际应用是很有利的. 这将使 工具设计容易;不必担心在加工过程中工具杆 的大量磨损;而且可以获得较高的加工速度. 为此,我们选用了与图1相同的复合振动系统 进行钻孔实验. 在保持换能器和变幅杆组成的 D系统及其它工艺参数 (如输入换能器的电功 率、加工压力和所用磨料等)不变的条件下,逐 步切短工具杆的长度 L,并借助调节电发生器

表 1 工具杆在不同的振动模式下,局部 共振时,在玻璃上钻孔

长度 L(mm)	振动模式	频率 f(kHz)	时间
320	N = 2	19.57	2min.6s
260	N = 1	14.22	2min.11s
200	N = 1	19.07	2min.45s
170	N = 1	21.97	1min.40s
140	N = 0	8.93	1min.56s
110	N = 0	10.94	2min.18s
80	N = 0	14.93	2min.55s
70	N = 0	16.78	1min.5s
60	N = 0	20.88	2min.13s

应用声学

的频率使工具杆按不同的振动模式工作。部分 实验结果见表 1。实验用工具为细长管,外径 6mm,壁厚 1mm,材料为不锈钢。输入换能器 电功率 150 瓦,加工材料 玻璃,加工深度是 20mm。

此外,我们采用图 1 所示复合振动系统实际用于加工玻璃小孔,完成了直径为 6mm 的各种不同深度的几十个孔的加工,最深达 280mm。 表 2 是在玻璃上钻深小孔的实例.

表 2 在玻璃上钻深小孔

工具长度 L(mm)	振动模式	钻 孔深度 (mm)	钻孔时间
329	N=2	225	33min.
316	N == 2	225	39min.
306	N = 2	225	33min_36s
276	N=2	225	37min_12s

为了进一步比较本加工方法的效果,我们 还进行了复合振动系统在局部共振和"全谐振 下"加工玻璃深小孔的实验。实验表明,采用前 者的加工速度有时比后者约快 1/2。

显然,工具杆的截面不一定是圆的.我们 采用此方法已钻出长方形深小孔,孔径为 4 × 6mm、深度 240mm.

五、结 论

1. 细长的等截面 (圆形或非圆形)工具杆 可以独立于它所依附的换能器和变幅杆组成的 D系统(驱动系统),在满足一定的条件下,只要 激振电源的频率符合工具杆本身的共振频率, 就可以激发单独共振。无负载时,它的共振模 式相当于一端固定、一端自由。 共振时杆端的 位移振幅可以大于单独的D系统中变幅杆输出 端的位移振幅

2. 细长的等截面工具杆局部共振,出现在 工具杆的直径(或面积)甚小于与之相接的变幅 杆输出端直径(或面积),即在直径比约小于 0.30(或面积比约小于10%).在我们已实验过 的杆长从 60mm 到 350mm 范围内,细长杆激发

(下转 32 页)

• 7 •

角度 θ 的误差主要与声楔加工精度,两换 能器的一致性及安装平行度有关. 如果加工 精度 ± 0.1%, θ 将有 ± 0.05 度变化. 引起 ± 0.17% 的误差.

上面讨论的都是根据几何声学原理,把超 审被作为一束射线考虑的.并且按换能器压电 晶片的中心射线进行计算.一般要求压电晶片 直径与管径之比小于十分之一.此外,由于声 束漂移,声线弯曲和声速的变化等,均对测量精 度有影响,但较小.这里就不分析了.

综上所述,在管径 0.3m,流速 0.5m-2.5m/ŧ 范围内,测量精度 < ± 1.5%.

四、结束语

目前,除频差流超声流量计外,多卜勒超声 流量计及利用呜环技术制成的时差法超声流量 计⁽¹⁾,也开始广泛地使用了. 由于超声流量计可以在管外测量管内流 量,无压力损失等独特优点.对大中型管道,自 流管及河渠的测量,在技术上和经济上占有重 要地位. 它有着广泛地应用前景.

对超声流量计的研究,我国才刚刚迈出第 一步.随着电子技术的发展,新技术的不断应 用,作为工业自动化中必不可少的超声流量计 必然会迅速发展,满足四个现代化的需要.

由于水平有限,一定会有许多缺点,错误。 恳请读者批评指止.

٤

参考文献

- [1] 北京大学无线电系超声测流组,无线电电子学资料,
 5 (1978).
- [2] 山本美明,日本音响学会誌, 36 No. 1 (1980).
- [3] Proceedings of IMEKO Symposium on Flow Measurement and Control in Industry, Tokyo, Japan, November (1979), 239-244.
- [4] Proceedings of IMEKO Symposium on Flow Measurement and Control in Industry, Tokyo, Japan, November (1979), 171-175.

(上接第7页)

单独共振时,在其自由端都能得到较大的位移 振幅,甚至还能比半波长型工具大,并且可以选 择适当的振动模式工作,以获得良好的工作效 果.

3. 利用细长杆单独共振的工具系统,已在 玻璃板上加工出直径为 6mm、深达 280mm 的 孔.采用一根工具杆就可以完成多个深孔的加 工,累计加工总深度达 2000-3000mm 以上,不 需要更换工具.在玻璃上的钻孔速度,一般约为 6mm/min 以上,需要的电功率比复合振动系统 按"全谐振"工作时少.

4. 可以认为,工具杆细长时,它和D系统 (驱动系统)的耦合很弱,因此,它几乎可以完全 独立地振动. 局部共振这个新原理,除了用于 超声加工深小孔外,可以有更广泛的用途.

本文的"熱像图"是由华北光电技术研究所刘岳林同志帮助拍摄的,其余照片由金月星和司晓黎两同志帮助拍摄。在 实验过程中,还得到其他一些同志的帮助,一并致谢。

参考文献

 K. F. Graff, Wave motion in elastic solids, Clarendon press, Oxford, 1975, 91.

• 32 •