

文章编号: 1005-0523(2020)03-0001-09

# 超声波清洗技术及设备研究进展

黄志超<sup>1</sup>, 涂林鹏<sup>1</sup>, 刘举平<sup>1</sup>, 黄薇<sup>1</sup>, 韩志利<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 中车洛阳机车有限公司, 河南 洛阳 471002)

**摘要:** 文章论述了超声波清洗技术在理论研究以及设备研制应用方面的进展。首先讨论了超声波清洗中空化效应的观测、空化气泡的运动特性以及空化强度的测量等方面的研究, 并重点从数值模拟以及实验分析两方面介绍了频率、功率、温度等因素对超声波清洗效果的影响规律。然后是清洗设备中对于换能器指向性和匹配网络问题研究的论述以及近年来对频率自动跟踪技术的研究现状, 并介绍了在各领域中采用不同超声波清洗技术的应用。最后, 针对超声波清洗技术研究现状中存在的问题, 提出超声波清洗技术今后的研究建议以及设备研制的方向。

**关键词:** 超声波; 清洗技术; 空化效应; 频率自动跟踪

**中图分类号:** TB559      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.03.001

现如今, 超声波清洗技术已成为诸多工业生产以及科学与医学研究领域中的常规技术<sup>[1]</sup>。超声波具有波长短、能量集中、穿透力强等特性, 在液体中产生空化效应发挥作用, 因此可以利用超声波清洗那些构造精密, 传统清洗方式不能达到的地方, 如存在盲孔、缝隙等复杂结构的工件, 同时其所具备的能量可以高效去除附着力强、难溶解性的污渍, 大大缩减清洗工时, 从而减少对工件清洗过程中的损伤, 保证工件的使用寿命<sup>[2]</sup>。超声波清洗设备首次应用于 20 世纪 50 年代, 主要应用于机械零部件以及医学材料的表面清洗, 随着超声波电源及换能器技术的发展, 超声波清洗机体积更小, 效率更高, 例如在汽车减震器复杂的金属零件<sup>[3]</sup>、轴承<sup>[4]</sup>这类拆卸困难并且结构精密复杂的部件, 超声波清洗技术便大大提高清洗效率。直到近几年, 随着计算机控制技术发展与运用, 超声波清洗机从半自动化向全自动化, 多功能一体式发展。

随着生产技术的提高, 产品精度越来越高, 结构越来越复杂, 超声波清洗工艺也要求更高的清洗质量, 不少研究人员对超声波清洗技术中的各个方面进行了大量的研究, 研究超声空化效应的形成、空化强度测量以及超声波清洗效果的影响因素等问题对于改进优化超声波清洗工艺, 能够为超声波清洗设备提供设计准则。研究者从建立动力学模型, 利用数值模拟以及实验验证等方法, 到控制系统中的算法研究等来实现清洗设备各系统间的完美匹配, 进而提高超声波的清洗质量。

## 1 超声清洗技术理论研究

### 1.1 空化效应的观测

超声波在液体中会产生空化、乳化、化学反应以及热效应等多种效应, 早期 Rozenberg L<sup>[5]</sup>利用高速摄影机观察超声波在液体中产生了大量的“气泡”, 在这些“气泡”的作用下去除了污染物, 认为超声波在液体中主要是靠空化效应发挥了清洗作用, 然而由于技术水平的局限性, 很难观测出空化气泡从形成到溃灭过程的机理。随着影像科技水平的提高, 李彬<sup>[6]</sup>等利用影像设备观测到空化气泡在超声波声场中的运动行为, 探

收稿日期: 2019-10-22

基金项目: 江西省重点研发计划(20192BBEL50013, 20181BBE50011)

作者简介: 黄志超(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为载运工具的强度及可靠性。

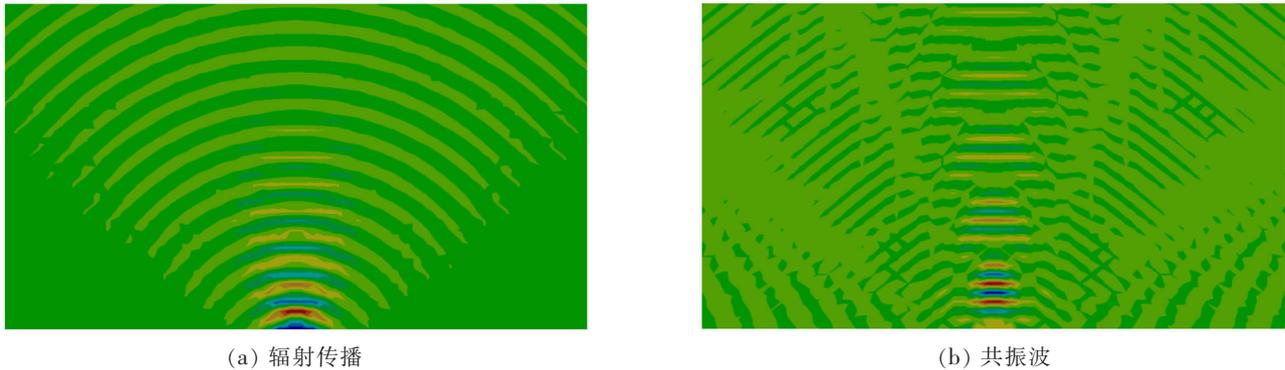


图1 超声波在液体中的传播  
Fig.1 Propagation of ultrasonic waves in liquids

测医学用途中微泡在超声波频率激励下振动的半径变化,但对于气泡起振的初始状态无法确定。白立新<sup>[7]</sup>等则采用超高速显微成像装置、水听器、示波器以及空化实验装置等对空化气泡的形成及分布进行观测,并且通过控制空化的产生以及压力分布探讨了几种典型:锥形、柱形、树枝状、拖尾状以及射流型结构的相互关系。此外,Tiong T J<sup>[8]</sup>等利用声致发光图像技术来观测液体超声场中的空化分布情况,同时利用 Comsol 进行数值模拟与观测图像进行比较。如图 1(a)所示,超声波在液体中呈辐射传播,清洗槽中多个超声波源与超声波的反射波叠加形成共振波如图 1(b)所示,图 2 所示的空化区域就主要发生在共振波集中的区域。

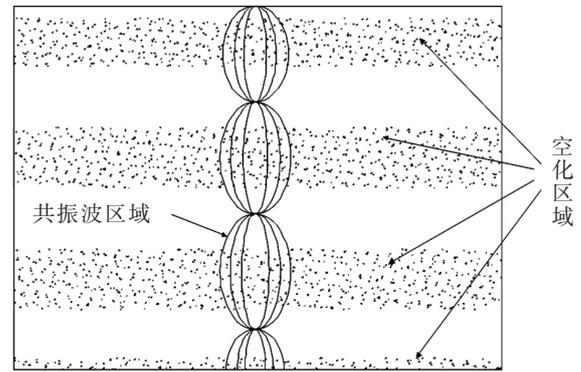


图2 空化效应的产生  
Fig.2 The generation of cavitation effect

## 1.2 空化气泡的运动特性

通过许多研究者对于空化效应的观测,发现空化泡在声场中一直处于运动或振荡状态,并且随外界条件的不同,如声压、频率等声学参数,液体物理属性以及气泡初始半径等,呈现不同的运动状态,同时空化强度不尽相同,这类现象将大大影响超声波清洗的效果。最早由 Rayleigh<sup>[9]</sup>在未考虑液体可压缩性、表面张力以及液体粘性的情况下,建立了以半径为动力学参数的球形气泡动力学方程,之后 Plesset<sup>[10]</sup>等对 Rayleigh 方程进行修正得出符合实际场景的 Rayleigh-Plesset(R-P)动力学方程,计算更为准确。但 R-P 方程是建立在气泡小振幅运动状态下,同时要考虑空化气泡在超声场中的非球形状态,Leighton<sup>[11]</sup>推导出以体积为动力学参数的 R-P 方程,具有更大的计算精度。罗贤能<sup>[12]</sup>等忽略液体压缩,气泡内蒸汽压等情况,用 Matlab 对单一空化气泡的理想模型进行 R-P 方程计算,计算空化的谐振频率和气泡共振半径,模拟不同频率参数以及对比三角波、方波和正弦波信号对气泡产生到溃灭时运动特性的影响,得知单一的增加频率,不一定能增强空化效果,方波信号比其它信号激励下的空化效果要好。沈壮志<sup>[13]</sup>等则根据实际条件,同时考虑了气泡运动时向液体辐射声波而存在的辐射阻尼,讨论了频率以及初始半径对气泡运动的影响,结果表明,超声频率小于共振频率时,空化气泡的数量逐渐增多,频率增大时,空化泡难以被压溃,只能往复振荡运动,空化效果减弱,同样对于初始半径大于共振半径的空化气泡,在声场中也做振荡运动不会被压溃,小于初始半径则会在负压作用下增大到共振半径压溃。庞昊斐<sup>[14]</sup>等通过数值模拟的方法,建立以水为清洗液体环境中的空化气泡动力学模型,模拟清洗温度从 0~80 °C 空化效果的影响。发现随着温度升高,液体的表面张力和粘性下降,气泡具有更快的膨胀的速度,且从生成到湮灭的时间缩短为原来的三分之一,在 50 °C 左右的温度下空化气

泡膨胀半径最大,空化强度达到最大,而温度的变化几乎不影响空化气泡的运动特性。

许多学者对空化气泡的运动特性做了数值分析与实验验证,但在实际超声波清洗中超声波声场同时存在清洗对象的固态界面,这类情况下的空化气泡运动特征直到近几年,一些学者才开始涉足研究。实际上,早在1966年,Benjamin<sup>[15]</sup>首次试验发现,空化气泡在固态界面上下受力不均匀时,可能产生一束高速微射流穿过气泡冲击在固体面上。Brujan<sup>[16]</sup>和 Ikeda T<sup>[17]</sup>则测量了微射流的速度及冲击强度,计算出在特定频率激励下的空化气泡能产生80~130 m/s的微射流,冲击强度达到1.3 GPa。Vignoli<sup>[18]</sup>则研究微射流的产生条件,发现气泡只有在溃灭速度远大于声波传播速度的情况下产生微射流,图3所示为超声空化气泡溃灭产生的微射流效应作用在固体污染物上,实现清洗效果。郭策<sup>[19]</sup>等建立刚性界面附件的空化气泡动力学模型,计算对比自由界面下的空化气泡运动特征,发现刚性界面的存在对气泡的振荡起抑制的作用,影响气泡的溃灭速度,通过研究气泡溃灭速度与微射流的关系发现控制溃灭速度可以达到控制微射流的目的。叶林征<sup>[20]</sup>等基于耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法建立了超声空化微射流冲击壁面模型,探讨微射流冲击固态界面的角度对冲击强度的影响,在一定角度范围内,微射流冲击强度会随角度增大而加强,随着角度的增大,对刚性界面的冲击强度减弱。叶林征<sup>[21]</sup>等还通过建立微射流-固态界面的固流耦合模型,通过固态模型反向推演微射流的最佳速度和空化强度,为微射流的控制提供理论参考。

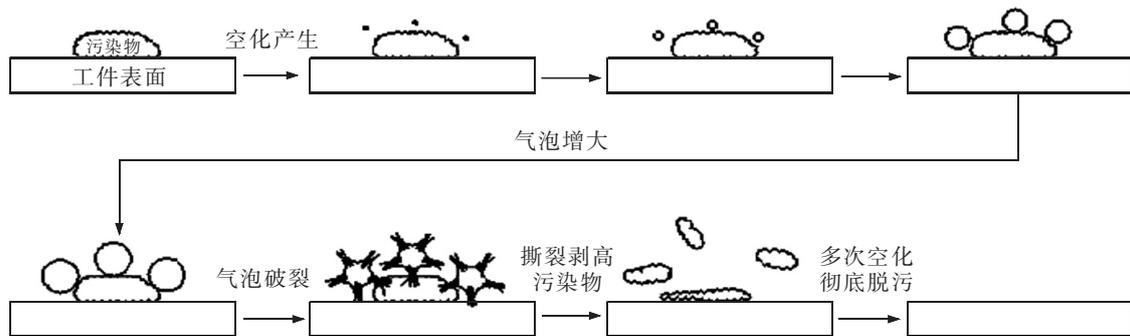


图3 超声空化除污过程

Fig.3 Ultrasonic cavitation decontamination process

### 1.3 空化强度的测量

国内外学者对于空化强度的测量方法做了许多研究。王向红<sup>[22]</sup>等通过铝箔腐蚀实验的方式较直观测量超声空化强度,发现铝箔腐蚀的区域主要分布于清洗槽的中间部位。李超<sup>[23]</sup>等通过气泡破裂时产生的噪声脉冲信号强度来体现空化的强弱,Verhaagen B<sup>[24]</sup>等则提出一种具有高空间分辨率和时间分辨率的“理想传感器”来测量空化情况。然而,由于传感器在超声波声场中会受到干扰,以及铝箔腐蚀等方法灵敏度不高,不能完全反映液体中的空化情况,Saallbach K A<sup>[25]</sup>等通过利用自感知技术检测超声波在液体中的空化效应,则利用超声波换能器中频率分量的电信号去自感知检测液体中的空化情况,检测出空化的产生(空化阈值的大小),超谐波(空化强度最大)的产生、大小、分布区域与换能器频率的大小,换能器面积以及距离的相关性。近年来,众多研究人员关于空化强度概念表述问题提出了质疑,沈建中<sup>[26]</sup>认为空化气泡产生的大小、数量只能反应某种单一条件(频率、功率等)下空化的状态,铝箔腐蚀、声致发光和噪声测量的方法也只是反映空化完成之后的清洗效果,不能表示空化过程中的强烈程度。吴鹏飞<sup>[27]</sup>等引入了空化状态变量的新概念,通过空化状态变量的起伏变化来表述空化强烈程度。

### 1.4 影响超声波清洗的其他因素

超声波清洗效果的影响因素主要来自三个方面(如图4所示)。其中,清洗设备参数中的功率,频率、清洗时间以及清洗液的温度和流动速度等会影响超声波在液体中的空化效应,清洗剂的溶解力和酸碱性则会影响除污效果,工件的结构和摆放位置则与超声波的传播衰减有关。

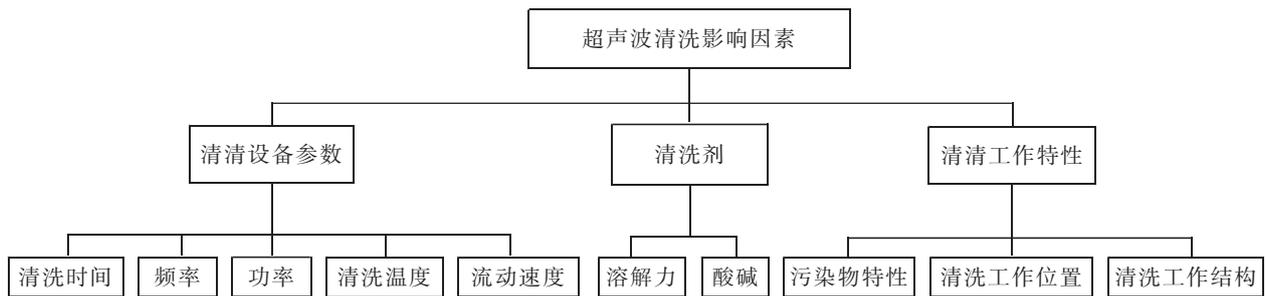


图4 超声波清洗的主要影响因素

Fig.4 Main influencing factors of ultrasonic cleaning

国内外许多学者从空化气泡动力学的角度对空化效应的影响因素做了大量的研究,不少人也从清洗设备的声学参数对清洗效果进行探究。Worapol T<sup>[28]</sup>等通过 Ansys Workbench 对清洗槽进行谐响应分析,模拟在方形槽内,在换能器数目相同的情况下,换能器不同放置位置频率在 28 kHz 和 40 kHz 时槽内声压场情况,发现换能器同时底面放置和侧面放置时 28 kHz 和 40 kHz 都能得到比全部底面放置时更高的声压强度,且 40 kHz 时声场分布比 28 kHz 更均匀。曾照彬<sup>[29]</sup>利用 Matlab 仿真槽内的声场情况,对比研究功率,换能器半径、频率、发射角度的影响规律。发现声场强度与传播距离的平方成反比,与功率的平方根成正比,并在一定程度时达到饱和。同时声场强度也随换能器半径和频率的增大而增大,半径持续增大声场强度会增大但使得横向声场范围缩小,频率则是纵向声场范围增大但强度减弱。杨景<sup>[30]</sup>等研究强超声作用下空化的反常衰减问题,功率会影响单位时间或空间内的空化气泡数量,增大功率,清洗槽内空化气泡的密度增加,但是持续增大,产生大量气泡增加了超声波在清洗槽内的非线性衰减,超声波能降低,清洗效果下降。陈伟中<sup>[31]</sup>则发现空化衰减的原因在于大功率下的空化气泡数量多,加剧空化气泡的非线性振荡,吸收更多的谐波能量,这称为“空化屏蔽”现象,并提出一种改善空化均匀性的方法。朱秀丽<sup>[32]</sup>等利用声致发光原理通过微光测量系统测量温度从 6~85 °C 时的声致发光强度,空化强度大,对应的声致发光强度也越大。发现温度逐渐升高到 55 °C 时光强度达到最大值,随后温度升高,强度减小。

Niemczewski B<sup>[33]</sup>等研究了清洗液的酸碱性对清洗效果的影响,通过实验对比同等浓度的碱性清洗液的情况下得出加入亚硫酸氢钠使得清洗液碱性降低具有更好的空化效果,然后为进一步探究,Niemczewski B<sup>[34]</sup>又对比了清洗液浓度酸性 1%~7% (w/w) 情况下对空化效果的影响,发现随着酸浓度的逐渐升高,空化效应强度无明显变化,甚至频率在 36 kHz 时强度稍有增大。

此外周围的环境也会影响超声波清洗效果。2015 年,吴强<sup>[35]</sup>等利用数值模拟计算环境压力对清洗槽内空化效应的影响规律,得出环境压力在小于清洗槽内的声压场强时,空化情况受声压场的影响更大,而随着环境压力的升高,空化强度将大大降低。

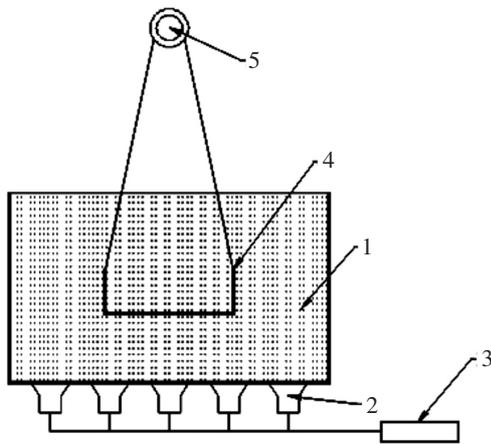
数值模拟和空化实验均能够得出各个清洗条件参数对超声波清洗的影响规律,而最后的清洗效果,以及对于最佳的清洗参数要取决于超声波清洗对象。Svetsky S<sup>[36]</sup>等对超声波清洗后的实验电路板进行检测,主要检测:污渍残余、清洗剂残余以及导电情况。Leite F P<sup>[37]</sup>等比较研究了不同腐蚀时间,氢氟酸腐蚀清洗以及超声波清洗对树脂与长石陶瓷微拉伸结合强度稳定性的影响,最后发现清洗时间对结合强度无显著影响,而超声波清洗提高了结合强度的稳定性。Kim T H<sup>[38]</sup>等则直接从微观上探究空化气泡破裂时的溃灭机制,发现空化气泡的破裂时的振荡行为有:体积振荡、形状振荡、分裂和混沌振荡 4 种类型,而其中气泡的分裂和混沌振荡会造成半导体等电子材料表面损坏。孔祥祯<sup>[39]</sup>等则是在不同的清洗功率,清洗温度以及清洗剂的浓度下对电路板进行超声波清洗,先通过 Matlab 计算得出超声功率在 900 W,清洗温度 60 °C 以及 1:100 (w/w) 的清洗液浓度时清洗效果最佳,实验清洗同样也发现提升温度对清洗效果有显著提高,而随着温度的继续升高影响了清洗液的溶解力使得同等浓度下的清洗效果下降,而且会烧蚀电路板。加大功率清洗则会对电路板造成腐蚀损坏。

## 2 超声系统的研究

清洗槽、换能器以及超声波发生器是组成超声波清洗机必不可少的一部分(如图5所示)。设备研制的重点在于清洗机的超声换能系统,即由超声波电源与超声波换能器组成的系统,二者之间的相互匹配问题是超声系统研发的主要问题。

### 2.1 超声波换能器

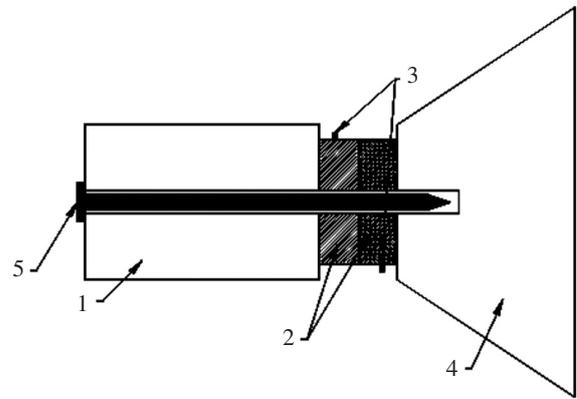
1917年,Langevin P发明了夹心式压电换能器(如图6所示),1933年磁致伸缩式换能器以高强度、高稳定性代替了压电换能器,直到1950年代,Jaffe等采用锆钛酸铅(PZT)作为压电材料,发现其具有更高的机械强度以及机电转换率。1956年,Mason M P<sup>[42]</sup>发明了超声变幅杆与压电换能器连接获得更大的振动位移和幅值,起到聚能高效传递能量的作用。



1. 清洗槽 2. 换能器 3. 超声波发生器  
4. 清洗工件吊篮 5. 吊装传动机构

图5 超声波清洗机主要结构

Fig.5 Main structure of ultrasonic cleaning machine



1. 后盖板 2. 压电陶瓷 3. 铜极电片  
4. 铝辐射锥体 5. 预紧螺钉

图6 夹心式压电陶瓷换能器

Fig.6 Sandwich piezoelectric ceramic transducer

换能器所产生的声场分布情况将直接影响超声波的空化效应,另外,换能器的指向性和阻抗匹配问题也是换能器技术的关键,换能器的指向性指的是换能器的发射响应与接受响应随幅值的方位角变化而变化的一种特性,它反映了超声波的声场分布以及在换能器主轴方向的集中程度。Elko<sup>[43]</sup>等提出通过计算机计算测量源与接收器之间传递函数的谱密度方差的新方法来测量换能器的指向性,此种方法具有一定的局限性,容易受到外界因素的影响产生误差。郭世旭<sup>[44]</sup>等采用基于四元十字阵的测量方法测量并验证换能器的指向性,利用四元十字阵的延时误差对换能器进行定位,确定十字阵阵元与换能器的相对方位关系,进而确定换能器的指向性。Moulin E<sup>[45]</sup>等分析了换能器的相互作用对指向性的影响,为实际使用中超声换能器的阵列方式提供参考。王丹<sup>[46]</sup>等研究了柱状线阵列换能器的指向性,探讨换能器阵列方式、间距、数目对指向性的影响,得出换能器过多,阵元间距小会影响换能器阵列的整体聚焦性,换能器的集中程度下降的影响。关于换能器的阻抗匹配则关系到换能器的电声转换效率,Silva F G S<sup>[47]</sup>提出一种基于多谐振电路的无开关多频带阻抗匹配网络技术,该方法能够在指定频率下提供短路和开路条件,从而使电容器和电感能够或不能形成多频带阻抗匹配网络。韩丽轩<sup>[48]</sup>等对传统LC型匹配电路进行改进,增加可调元件对换能器进行匹配失调补偿,并开发了参数化设计软件。

### 2.2 频率自动跟踪技术

设备运行时,清洗槽底部的换能器能良好的传递并转换超声波电源发出的激励信号,系统处于最佳工作状态,称为谐振工作状态,此时换能器输出的工作频率为谐振频率。然而由于负载的变化以及设备老化等

问题,陶瓷元件的介电损耗增加使得谐振频率发生偏移,造成超声波电源与换能器不匹配而大大降低清洗效率,甚至缩减系统使用寿命。

为了换能器的吸收,功率能够随负载的变化而变化,使换能器一直处于谐振工作状态,因此借助算法实现超声波发生器对频率的快速跟踪<sup>[49]</sup>。频率跟踪(如图7所示)就是将换能器谐振频率的偏移反馈给控制单元,重新匹配激励信号给换能器,使换能器工作状态始终接近谐振频率。目前已经有多种实现频率自动跟踪的控制电路:锁相环集成电路、电流动态反馈电路、最大功率检测电路以及差动变量器桥式电路<sup>[50]</sup>等。

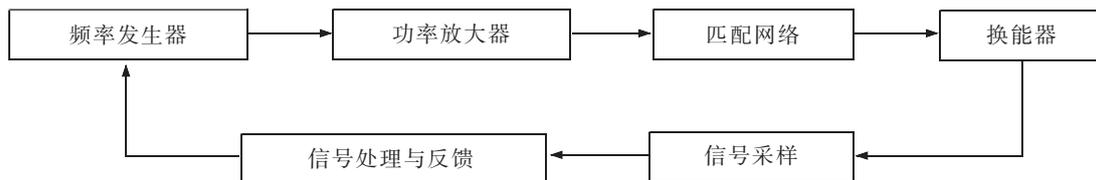


图7 频率跟踪策略  
Fig.7 Frequency tracking

超声换能系统是非线性的系统,很难得到精确的数学算法模型,传统的算法冗长复杂,满足不了控制精度,这也是频率跟踪技术一直面临的问题,廖晓辉<sup>[51]</sup>等将比例-积分控制(proportional integral controller)与模糊动态模型(fuzzy dynamic model)控制相结合的模糊PI控制算法来提高频率跟踪系统参数自整定能力。Jittakort J<sup>[52]</sup>等结合锁相环电路控制采用非对称电压抵消的方法来控制输出功率使得清洗过程中逆变器的开关频率自动调整,以保持负载参数变化时的滞后相位。张青<sup>[53]</sup>则在此基础上分别试验对比分析模糊PI控制、比例-积分-微分控制(proportional integral differential controller)以及基于鲁棒控制理论的前馈控制算法的控制效果,结果表明模糊PI控制算法的控制效果非常稳定,具有很高的自适应性能。鲁棒控制虽然具备更高的控制精度和稳定性,但算法过程很复杂,对超声波电源有较高的硬件要求。

### 3 超声波清洗机的应用

由于清洗对象的不同,清洗设备的种类也多种多样,例如有的体积小设备结构简单,有的则大到需要依靠龙门吊吊装辅助。超声波清洗不再仅局限于工业生产中,近年来,在工业维护领域以及再制造行业中应用越发广泛。汽车废旧发动机在制造行业,采用超声波清洗清理积炭机油等污渍<sup>[54]</sup>,利用聚能式超声波清洗技术清理航空飞机的空滤、油滤等纳污能力强的物件<sup>[55]</sup>,采用超声波气相清洗技术清洗高压电网<sup>[56]</sup>。株洲机车在动车检修过程中也运用超声波清洗,解决滤网、牵引变流器等一些复杂部件人工清洗效率低的缺陷<sup>[57]</sup>,一些轴承如航空发动机轴承这种高精密零件的清洗,传统一般采用以汽油为清洗介质人工清洗,清洁度不高,而且汽油挥发对清洁人员的身体有危害,超声波清洗的应用就能使得轴承在不损坏的情况下实现高效清洗<sup>[58]</sup>,刘春<sup>[59]</sup>等将超声波技术结合流体运动设计的清洗设备用于解决飞机异性管道内污垢清理难的问题。

### 4 结论与展望

1) 超声波清洗技术的研究与应用近年来得到了很大的发展,研究者在空化效应研究方面取得了众多成果,然而,超声波在液体中除了会产生空化效应外,还会产生乳化、热效应以及化学效应,这些效应的产生机理,以及对空化效应是否有影响也需要进一步深入研究。

2) 关于空化效应中微射流效应,近几年才开始探究,由于微射流效应的过程复杂而短暂,目前的研究处于影响观测以及数值模拟的阶段,缺乏一定的实验探究,需要对其原理以及影响因素进行研究,进而提出相应的有益于提高超声波清洗效果的方案。

3) 不少学者对空化强度的概念表述提出了质疑,认为当前空化强弱的术语以及强度的测量方法有待商榷,因此应该对于空化强弱概念的探讨,建立一套标准的概念以及合适的测量手段。

4) 超声波清洗设备广泛应用于众多生产领域,但在工业维护领域中,针对一些清洗对象,不同的部件结构和功能不同,应用超声波清洗的技术参数也不同,在清理场地须配备多台清洗设备,成本太高,还有一些清洗对象,体积大、结构系统复杂,在清理时需要一件一件拆卸下来,耗费大量的人力物力。因此,以后的超声波清洗机应朝着更加智能化的方向发展,在清洗前对部件的结构、污染物、功能等进行检测并自动匹配清洗策略。

5) 在完成清洗后,超声波可能对部件造成损伤,而这些损伤并不容易察觉。在清洗完成后可以借助超声波探伤技术,对清洗部件进行探伤检测。

6) 设计研发在线超声波清洗设备,即针对汽车、列车、飞机等大型清洗对象,无需拆卸即可对部件进行超声波清洗;同时,为节约水资源,实现环保清洁,设计无水基超声波除垢装置也具备良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] MASON T J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2016;519–523.
- [2] 程欣. 超声波清洗技术发展研究[J]. *中国市场*, 2016(49):79–80.
- [3] 喻永康,奚敏贤. 汽车减震器金属零件的自动超声波清洗机研制[J]. *机械与电子*, 2016,34(9):38–40.
- [4] KOROLEV A V, KOROLEV A A, BOLKUNOV V V, et al. Ultrasonic cleaning of bearing components[J]. *Russian Engineering Research*, 2011,31(1):85–87.
- [5] ROZENBERG L. On the physics of ultrasonic cleaning[J]. *Ultrasonic News*, 1960:16–20.
- [6] 李彬,万明习. 基于超高速摄影显微成像和超声散射的纳米包膜造影微泡包膜厚度估计[J]. *生物物理学报*, 2005,21(1):71–77.
- [7] BAI L, XU W, DENG J, et al. Generation and control of acoustic cavitation structure [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014,21(5):1696–1706.
- [8] TIONG T J, CHANDESA T, YAP Y H. Comparison of sonochemiluminescence images using image analysis techniques and identification of acoustic pressure fields via simulation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017,36:78–87.
- [9] RAYLEIGH J W. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. *Philos Mag*, 1917,6:94–98.
- [10] PLESSET M S, CHAPMAN R B. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary[J]. *Fluid Mech*, 1971(2):283–290.
- [11] LEIGHTON T G. The Rayleigh–Plesset equation in terms of volume with explicit shear losses[J]. *Ultrasonics*, 2008,48(2):85–90.
- [12] 罗贤能,赵良举,奉策强,等. 声空化气泡成长及破裂研究[J]. *工程热物理学报*, 2011,32(1):17–20.
- [13] 沈壮志,林书玉. 声场中气泡运动的混沌特性[J]. *物理学报*, 2011,60(10):418–425.
- [14] 庞昊斐,祝锡晶,王璟,等. 温度对超声清洗中空化泡动力学特性的影响[J]. *表面技术*, 2016,45(8):150–155.
- [15] BENJAMIN T B, WATT N F. Psychopathology and semantic interpretation of ambiguous words[J]. *Journal of Abnormal Psychology*, 1969,74(6):706.
- [16] BRUJAN E A, IKEDA T, YOSHINAKA. The final stage of the collapse of a cloud of bubbles close to a rigid boundary[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011,18(1):59–64.
- [17] IKEDA T, BRUJAN E A, YOSHINAKA. Shock wave emission from a cloud of bubbles[J]. *Soft Matter* 2012,8(21):5777–5783.
- [18] LUCAS L VIGNOLI, ANAL F DEBARROS, ROBERTO C ATHOMÉ, et al. Modeling the dynamics of single-bubble sonoluminescence[J]. *European Journal of Physics*, 2013,34(3):679.
- [19] 郭策,祝锡晶,王建青,等. 超声场下刚性界面附近溃灭空化气泡的速度分析[J]. *物理学报*, 2016,65(4):184–191.
- [20] 叶林征,祝锡晶,王建青,等. 基于 CEL 不同角度超声空化微射流冲击的仿真分析[J]. *振动与冲击*, 2016,35(16):130–134.
- [21] 叶林征,祝锡晶,王建青. 近壁声空泡溃灭微射流冲击流固耦合模型及蚀坑反演分析[J]. *爆炸与冲击*, 2019,39(6):23–34.
- [22] 王向红,毛汉领,黄振峰. 超声清洗槽内空化强度的测量[J]. *应用声学*, 2005,29(3):188–191.

- [23] 李超,应崇福,白立新,邓京军. 流体动力空化的噪声特性及空化强度的测量[J]. 中国科学:物理学力学天文学,2012,42(10):987-995.
- [24] VERHAAGEN B,RIVAS D F. Measuring cavitation and its cleaning effect[J]. Ultrasonics Sonochemistry. 2016,29:619-628.
- [25] SAALBACH K A,TWIEFEL J,WALLASCHEK J. Self-Sensing cavitation detection in ultrasound-induced acoustic cavitation[J]. Ultrasonics,2019,94:401-410.
- [26] 沈建中. 关于表述空化场强弱术语的讨论[J]. 应用声学,2018,37(5):831-833.
- [27] 吴鹏飞,白立新,林伟军,等. 声流耦合空化场观测与量化表征探索[J]. 应用声学,2018,37(5):801-810.
- [28] WORAPOL T,JATUPORN T. Development of an industrial ultrasonic cleaning tank based on harmonic response analysis[J]. Ultrasonics,2019,91:68-76.
- [29] 曾照彬. 超声波声场模拟及除垢实验研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2014.
- [30] 杨景,王寻,陈伟中. 强超声在空化液体中的反常衰减[J]. 声学学报,2016,41(5):713-717.
- [31] 陈伟中. 声空化泡对声传播的屏蔽特性[J]. 应用声学,2018,37(5):675-679.
- [32] 朱秀丽,牛勇,皇磊落. 温度对超声空化声场的影响[J]. 陕西师范大学学报,2008,36(5):35-37.
- [33] NIEMCZEWSKI B. Influence of acid concentration on cavitation intensity in ultrasonic cleaning in aqueous solutions of acids[J]. Transactions of the IMF,2012,90(1):52-56.
- [34] NIEMCZEWSKI B,KOLODZIEJCZYK Z. Chemical support of cavitation intensity in ultrasonic cleaning[J]. Transactions of the IMF,2015,93(4):205-208.
- [35] 吴强,姚澄,朱昌平,等. 超声清洗过程环境压力对声空化效应的影响[J]. 应用声学,2015,34(5):391-397.
- [36] SVETSKY S. Testing and long-term monitoring within printed circuit board cleaning technology [J]. Circuit World,2016:27-32.
- [37] LEITE F P, ÖZCAN M,VALANDRO L F. Effect of the etching duration and ultrasonic cleaning on microtensile bond strength between feldspathic ceramic and resin cement[J]. The Journal of Adhesion,2013,89(3):159-173.
- [38] KIM T H,KIM H Y. Disruptive bubble behaviour leading to microstructure damage in an ultrasonic field [J]. Journal of Fluid Mechanics,2014,750:355-371.
- [39] 孔祥祯,杨江平,刘东青,等. 装备中的电路板超声波清洗实验分析[J]. 空军预警学院学报,2017,31(4):297-300.
- [40] 田华. 新型超声换能器与辐射器的研究[D]. 西安:陕西师范大学,2013.
- [41] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京:科学出版社,
- [42] MASON M P. Physical acoustics and the properties of solids[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1956,28(6):1197-1206.
- [43] ELKO G W. A new technique to measure electroacoustic transducer directivity indices in reverberant fields[C]//Proceedings of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. IEEE,1993:64-67.
- [44] 郭世旭,朱锃琪,王萧博,等. 基于四元十字阵的低频换能器指向性检测方法[J]. 声学技术,2019,38(4):464-469.
- [45] MOULIN E,ASSAAD J,DELEBARRE C,et al. Piezoelectric transducer embedded in a composite plate: application to Lamb wave generation[J]. Journal of Applied Physics,1997,82(5):2049-2055.
- [46] 王丹,郭建中. 柱状线阵列超声换能器指向性研究[J]. 声学技术,2013,32(S1):295-296.
- [47] SILVA F G S,DELIMA R N,CARLOS R. A switchless multiband impedance matching technique based on multiresonant circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,2013,60(7):417-421.
- [48] 韩丽轩,于保华,胡小平. 功率超声压电换能器阻抗匹配电路参数化设计[J]. 压电与声光,2015,37(4):713-716.
- [49] 刘丽晨,杨明,李世阳,等. 超声换能器并联谐振频率复合式跟踪方法研究[J]. 应用声学,2015,34(1):45-50.
- [50] 张镜澄. 差动变量器桥式自动频率跟踪电路[J]. 应用声学,1988(4):17-19.
- [51] 廖晓辉,王晓伟. 基于模糊 PI 控制的超声波换能器谐振频率跟踪系统仿真[J]. 河南科学,2015,33(3):411-414.
- [52] JITTAKORT J,SANGSWANG A,NAETILADDANON S. Full bridge resonant inverter using asymmetrical control with resonant-frequency tracking for ultrasonic cleaning applications[J]. Journal of Power Electronics. 2017,17(5):1150-1159.
- [53] 张青. 功率超声波换能器恒电压控制策略研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2017.
- [54] 王延智. 发动机再造中活塞表面积碳的清洗工艺研究[D]. 陕西:长安大学,2018.
- [55] 郭利军. 聚能式超声波清洗技术在飞机液压过滤器中的应用[J]. 航空维修与工程,2018(10):73-75.

- [56] 袁翠萍,叶媛媛,张振明,等. 气相清洗技术在航天器电缆网清洗中的应用研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2018(1):28-32.
- [57] 彭伟,李琳,梁雷. 民用航空发动机轴承清洗技术研究[J]. 工业技术,2017,25(6):95-97.
- [59] 李燕德. 自动化超声波清洗机设备在动车检修工程中的应用研究[J]. 科技与创新,2017,5:157-160
- [59] 刘春,张洪瑞,王巍,等. 基于 ANSYS CFX 航空管件清洗设备管流数值模拟与分析[J]. 机械设计与制造工程,2016,1:16-20.

## Review of Ultrasonic Cleaning Technology and Equipment

Huang Zhichao<sup>1</sup>, Tu Linpeng<sup>1</sup>, Liu Juping<sup>1</sup>, Huang Wei<sup>1</sup>, Han Zhili<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. CSR Luoyang Locomotive Co., Ltd., Luoyang 471002, China)

**Abstract:** This paper discusses the progress of ultrasonic cleaning technologies in theoretical research and equipment application. Firstly, the observation of cavitation effect, the motion characteristics of cavitation bubble and the measurement of cavitation intensity in ultrasonic cleaning are discussed, and the effects of frequency, power, temperature and other factors on the effect of ultrasonic cleaning are mainly introduced from numerical simulation and experimental analysis. Then, the research on the directivity and impedance matching of transducer in cleaning equipment and the research status of frequency automatic tracking technology in recent years are discussed, and the application of different ultrasonic cleaning technology in various fields is introduced. Finally, in view of the existing problems in the research of ultrasonic cleaning technology, the paper puts forward the future research suggestions of ultrasonic cleaning technology and the direction of equipment development.

**Key words:** ultrasonic; cleaning technology; cavitation effect; frequency automatic tracking