

# 超声波技术在个人卫生护理机器人中的应用\*

韩征峰, 尚振东\*, 胡志刚, 周志立

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**为解决行动不便者独立或有限人工辅助下的洗浴问题,将超声波清洗技术应用到个人卫生服务机器人中。通过分析超声波声学特性和清洁机理,研究了超声波对生命体组织的影响,建立了人体超声波洗浴的有效性和安全性之间的关系,提出了人体超声波洗浴方法:洗浴用超声波宜采用频率为 40 kHz 左右的脉冲波,并保证浴缸中的功率分布不大于  $1.5 \text{ W/cm}^2$ ,洗浴中人体最大超声波辐照时间为 5 min。在个人卫生服务机器人上对超声波人体洗浴的安全性和有效性进行了评价,并进行了超声波洗浴试验,试验结果表明该方法是可行的。

**关键词:**超声波技术;个人卫生;护理;机器人

中图分类号:TB43;TP24

文献标志码:B

文章编号:1001-4551(2011)09-1098-04

## Application of ultrasound technology in the personal hygiene nursing robot

HAN Zheng-feng, SHANG Zhen-dong, HU Zhi-gang, ZHOU Zhi-li

(School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of bathing of the person who can not take care of themselves, the technology of ultrasonic applied to the personal hygiene nursing robot was investigated. After the analysis of the ultrasonic acoustic characteristics, the cleaning mechanism and the irradiation injury, the relationship between safety and effectiveness of ultrasonic bathing was established. A method was presented that the frequency, power distribution, wave type and irradiation time of the ultrasonic for person bathing should choose 40 kHz around, less-than  $1.5 \text{ W/cm}^2$ , and the pulse wave less than 5 min. The relationship between safety and effectiveness of ultrasonic bathing were evaluated on the personal hygiene nursing robot. The experiments of ultrasonic cleaning were tested. The experimental results show that the method is feasible.

**Key words:** ultrasound technology; personal hygiene; nursing; robot

## 0 引 言

随着社会老龄化的发展,社会对个人卫生护理机器人的需求极为迫切。对于老人或残疾人,个人卫生护理洗浴都是难题。尤其是存在卧床不起情况后,洗澡是重要和令人头痛的日常护理之一。目前市场上各类洗浴器械种类繁多、功能各异,但适合老年人或残疾人使用的很少。因此,从满足老年人等特殊群体的洗浴护理需求出发,面向家用与医用环境,开发和研制个人卫生护理机器人,为老年人或残疾人提供洗头、洗

澡、干身、按摩和康复等服务,对于提高老年人及重残人的生活质量、解决人口老龄化等带来的重大社会服务问题具有重要意义。

个人卫生护理机器人的研制工作是一项复杂的系统工程。20 世纪 70 年代,一些发达国家研制出个人卫生护理设备,这些设备多为机械或半机械式。国内也有一些关于洗澡机、洗发机的单项专利,但功能综合、智能控制的个人卫生护理机器人尚未见报道。个人卫生服务机器人开发的难点是如何实验洗澡者独立或在有限人工辅助下完成洗澡。

收稿日期:2011-04-22

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2008AA040208);国家国际科技合作资助项目(2011DFA10440)

作者简介:韩征峰(1985-),男,河南平顶山人,主要从事智能测控理论及其应用方面的研究. E-mail:han851229@126.com

通信联系人:尚振东,男,副教授. E-mail:cnlyszd@163.com

对行动不便的老年人或重残人来说,若要既实现独立或有限人工辅助洗澡,又能避免交叉病菌感染,必然要采用非接触式人体洗澡方式,超声波清洗技术无疑优势明显。早在20世纪50年代就出现了超声波清洗技术<sup>[1]</sup>。超声波清洗的重要特点是速度快、效果好、成本低、有利于环保、容易实现工业控制等<sup>[2]</sup>。超声波清洗被国际公认为是当前效率最高、效果最好的清洗方式,尤其对形状结构复杂、人工及其他清洗方式不能有效进行清洗的工作,具有显著的清洗效果。

虽然超声波清洗技术已经广泛应用于工业品的清洗工作,但对于人体洗澡的应用还鲜见报道。应用超声波技术的个人卫生服务机器人研究的重点是如何确定超声波的相关参数,使其既满足有效性又满足安全性。基于此,本研究主要探讨了超声波技术在个人卫生护理机器人中的作用。

## 1 超声波及其与介质的相互作用

超声波是一种频率超出人类听觉范围20 kHz以上的声波。超声波的施加主要由超声波电源和换能器实现。超声波电源可进行负载匹配、频率跟踪等技术提高输出效率。超声波电源还需要进行开路、短路、过流、过压保护和失调调节功能设计。超声波换能器一般采用压电换能器。

超声波与介质的相互作用可分为以下3种形式:

(1) 热机制。超声波在介质中传播时,其振动能量不断被介质吸收转变为热量,从而使介质温度升高。这种使介质温度升高的效应称之为超声的热机制。

(2) 机械(力学)机制。超声波也是一种机械能量的传播形式。在力学效应中,主要有搅拌、分散、成雾、凝聚、冲击破碎和疲劳损坏等作用。

(3) 空化机制。超声波在液体传播过程中,超声波的功率密度达到一定值(空化阈值)时,在液体中传播的超声波的声波压强峰值在液体中会产生一个很大的力,介质分子间的平均距离就会增大,并超过极限距离,从而将液体拉断形成空穴,将液体拉裂成空洞(空化核),此空洞为真空或非常接近真空。空洞在超声波压强下一个半周达到最大时,由于周围压力的增大而被压碎,产生无数细小而密集的气泡,在极短的时间和极小的空间内,形成局部热点,可产生高达5 000 K的高温 and  $1.0 \times 10^8$  Pa的高压,温度变化率高达 $1.0 \times 10^9$  K/s,并伴随有强烈的冲击波和时速达400 km/h的射流。这种现象被称之为空化效应。空化现象包括空化核的产生、增大和破裂过程,如图1所示(纵轴为气泡半径)。

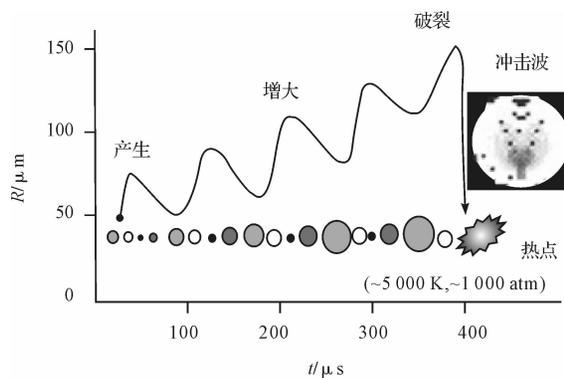


图1 空化效应示意图

## 2 超声波清洗技术

超声波清洗技术主要利用超声波在液体中的空化效应。在此作用下,液体分子激烈碰撞而产生非常强大的冲击力,将被清洗物体表面的污物撞击下来。空化效应也在固体与液体交界处产生一种剪切力,使污垢脱落,对于侵入超声波作用下液体中的物体外表面具有超乎寻常的清洗作用。空化效应在液体中产生的振动也加剧了溶液的脉动和搅拌,更加强化了清洗的作用。

低频超声清洗适用于大表面,但空化噪音大。中频超声波宜清洗表面形状复杂或有盲孔的工件,适合清洗污物与被清洗件表面结合力较弱的场合。高频超声清洗适用于计算机,微电子元件的精细清洗;兆赫超声清洗适用于集成电路芯片、硅片及波薄膜的清洗,能去除微米、亚微米级的污物而对清洗件没有任何损伤。因此从清洗效果及经济性考虑,频率一般选择在20 kHz~130 kHz范围,当然正确选择频率至关重要,而具体合适的工作频率的选取需要做一定的实验取得。另外,本研究采用具有多个工作频率的夹心式换能器,结合超声波电源的变频输出,能实现在两个频率上交替工作,即复频工作,从而有效地消除因驻波产生的清洗盲区,满足不同污物的有效清洗。

超声波清洗已广泛应用于各行各业,如利用其空化作用对机械零部件、半导体器件、茶青、丝织、鲜切蔬菜等的清洗<sup>[3-4]</sup>。超声波用于人体清洗的研究在国外研究较早,尤其是日本,已有几款应用超声波的人体清洗设备面世,国内未见相关报道。

## 3 超声波频率选择

超声空化阈值和超声波的频率有密切关系,频率越高,空化阈值越高。换句话说,频率越低,空化越容易产生,而且在低频情况下液体受到的压缩和稀疏作

用有更长的时间间隔,使气泡在崩溃前能生长到较大的尺寸,增高空化强度,有利于清洗效果的提高。然而,根据经验,当人处于空化液体中时,人体会产生针刺样不适感觉,空化强度越大,人体针刺感越强烈。因此,应恰当选择超声波频率,兼顾洗涤效果和洗澡舒适性。

为选择超声波最佳工作频率,本研究设计并实施了如下实验:用程控超声波电源(威海国创产)驱动换能器(喇叭形压电换能器),换能器作用于水盆的水中,将附着了泥土、油污、牙膏的硅胶块放置在换能器下方的盆底,用水听器(中科院声学所提供的球形水听器)结合示波器(DS1020)检测液体中超声波频率和功率分布。设置程控超声波电源输出不同频率的超声波,配合相应频率的换能器,观察硅胶上污渍的清洗效果。在清洗过程中,将人手放入水中,记录感受。实验示意图如图 2 所示。

超声频率越高,其分频谐波就能少一些进入人耳,噪声也会相应减少。但是当频率处于几兆赫兹时,人体内微小的气泡很容易与之发生共振。大一些(大于共振体积)的气泡在超声波的高频干扰下,会越来越大,直到排除体外,对人体细胞不会产生不良影响。而小一些的气泡会有一个突然变大的瞬间类似于爆炸,瞬间的温度和压力都非常大,足以伤害人体细胞。另外,超声频率高,不易产生空化效应<sup>[5]</sup>。因此,实验频率主要选择 28 kHz ~ 58 kHz 之间。

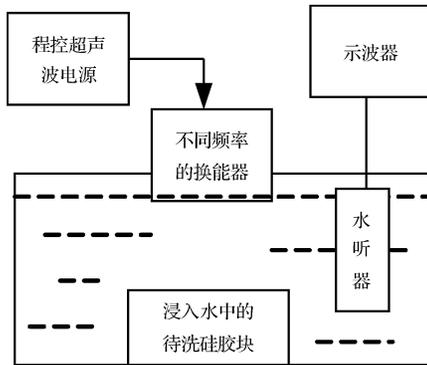


图 2 频率选择实验系统示意图

实验结果如表 1 所示。根据实验结果发现,在 28 kHz ~ 58 kHz 间,频率越低洗涤效果越好,但针刺感也越强烈。38 kHz 的频率,在相同功率分布下,产生的空化泡数量比频率为 28 kHz 时多,穿透力较强,空化噪音较小,但空化强度较低。38 kHz 的频率,在相同功率分布下,产生的空化泡数量比频率为 58 kHz 时少,空化噪音稍大,空化强度较高。因此,综合考虑洗浴效果和舒适的洗浴感受,确定洗涤超声波频率为 40 kHz。

表 1 频率选择实验结果

频率 / kHz	泥土	牙膏	油污	人手感受
28	干净	干净	没有明显变化	针刺感强烈
32	干净	较干净	没有明显变化	针刺感强烈
38	较干净	稍有去除	没有明显变化	有一定针刺感
48	稍有去除	没有明显变化	没有明显变化	稍有针刺感
58	没有明显变化	没有明显变化	没有明显变化	稍有针刺感

由于采用单一频率的超声波,在清洗液中极易形成驻波,导致空化效应不均匀,影响洗涤效果。为了得到均匀的声场分布,可采用调频、弯曲振动矩形薄板振动器、设计斜底式清洗槽及复合频率超声波清洗等方法(其中复合频率超声波清洗方法是发展趋势)。

#### 4 超声波的波型、功率分布和辐照时间

在超声波频率一定情况下,功率分布越大,空化泡的最大半径与起始半径的比值越大,空化效应越强烈。从清洗效果角度考虑,产生空化效应越强烈,清洗时间越长,洗浴效果越好。然而,通过对超声设备输出功率分布的大量实验和重复确认,过剂量的输出功率分布会给人体健康带来不良影响。在一定频率及强度范围内,超声波照射时间长,总的能量大,对细胞超微结构有轻微影响,一般作用于细胞内的线粒体,从电镜下有线粒体结构改变<sup>[6]</sup>。因此国际标准 IEC29/WG10 和我国标准 GB6385-86 对各类超声诊断设备的超声输出强度都做出明确规定:必须小于 10 mW/cm<sup>2</sup>。因此,应慎重选择个人卫生护理机器人超声波的波型、功率分布和作用时间等关键参数。

如上所述,超声波具有热机制。俞世勋等<sup>[7]</sup>进行过超声波作用于兔头部皮肤后损伤效应和温度变化的实验研究。该研究采用 2.0 W/cm<sup>2</sup>、1.5 W/cm<sup>2</sup>、1.25 W/cm<sup>2</sup> 的脉冲型和连续型超声波作用一定时间,对比辐照前后,2.0 W/cm<sup>2</sup>、1.5 W/cm<sup>2</sup> 组动物出现不同程度头皮烫伤和脑组织损伤,如使脑膜血管扩张、充血、脑组织出血坏死等。经长时间辐照,动物出现烦躁不安,呼吸加快现象。2.0 W/cm<sup>2</sup> 组部分动物甚至出现二便失禁,而 1.25 W/cm<sup>2</sup> 脉冲超声波产热较少,辐照 5 min 后对头皮及脑组织损伤不明显,动物无不良反应,相对较安全。显然:超声波作用于组织表面产生热能,其大小与超声波的功率密度、辐照时间及波型有关,超声波剂量越大,产热量越多,组织吸收的亦越多;

连续波产生的热能大于脉冲波。

很多学者还研究了超声波对动物和人体神经的影响<sup>[8-11]</sup>,普遍认为:较高强度的低频超声可能导致神经传导功能障碍甚至神经组织破坏。Moore J H等<sup>[12-13]</sup>曾对15例健康成人的正中神经采用1 MHz~3 MHz、1 W/cm<sup>2</sup>的脉冲和连续超声波辐照8 min,结果显示感觉潜伏期缩短;Kramer J F等<sup>[14]</sup>采用0.5 W/cm<sup>2</sup>~2.5 W/cm<sup>2</sup>辐照20例成人前臂尺神经,结果显示,一定强度的超声波使尺神经运动纤维传导速度增大,超声波强度越大,影响也越大。Carrier D P等<sup>[15]</sup>用超声(1 MHz,1.5 W/cm<sup>2</sup>,连续波)照射5例健康男性桡神经5 min,说明超声波加快了桡神经的传导速度。

通过分析上述研究结果可得:脉冲型超声波较连续型超声波对人体影响小。人体辐照功率分布不大于1.5 W/cm<sup>2</sup>,辐照时间不超过5 min对人体影响较小。另外,由于功率分布过高,会产生大量无用的气泡,增加散射衰减,形成声屏障,同时功率分布增大也会增加非线性衰减,这样都会削弱远离声源地方的清洗效果,同时浴缸振动板金属空化严重,水的腐蚀也增强,造成设备寿命降低;但超声波清洗功率选择小了,花费很长时间也没有清除污垢,也是不可取的。因此应在优先保证安全性的前提下,综合考虑洗澡舒适和高效,按实际使用情况选择超声功率。

参照《医用电气设备 第2-5部分:超声理疗设备安全专用要求(GB9706.7-2008)》的有关安全规定和其他有关产品参数,在保证洗浴者安全的前提下,以提供良好的洗浴效果、舒适的洗浴感受和合理的经济指标为准则,对超声波洗浴功率分布的选择要求不大于1.5 W/cm<sup>2</sup>,超声波型选择脉冲波<sup>[16]</sup>。最大超声波洗浴时间控制在5 min内。超声波洗浴主要参数如表2所示。

表2 超声波洗浴主要参数

序号	项目	参数	备注
1	波型	脉冲波	
2	频率	40 kHz左右	
3	功率分布	≤1.5 W/cm <sup>2</sup>	人体表面处
4	清洗时间	≤5 min	

## 5 换能器安装位置

超声波在人体组织内传播时,其强度将随传播距离的增加而逐渐衰减。因此换能器应不能接触人体皮肤,最好远离内脏器官。为此,个人卫生护理机器人采用两个超声波换能器,并排安装浴舱后部,角度与人体

在洗浴中姿态的中轴线平行。个人卫生护理机器人换能器安装位置如图3所示<sup>[17-18]</sup>。

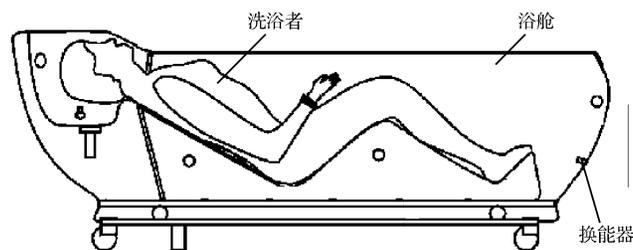


图3 换能器在浴舱中安装位置

个人卫生护理机器人样机如图4所示。



图4 个人卫生护理机器人样机

换能器采用压电式喇叭型换能器,谐振频率为40 kHz,最大输出功率为50 W。超声波电源固定在洗浴仓中间夹层的中下部,紧固在洗浴仓侧壁上,超声头直接作用于洗浴液。

## 6 结束语

本研究通过对超声波声学特性、清洁机理、安全剂量和清洗实验的研究,发现低频、高功率分布、连续波、长时间清洗有利于去除人体污垢,但是高功率分布、连续波、长时间清洗不但使洗浴者不适感增强,而且对人体组织损伤较大,综合考虑,确定个人卫生护理机器人采用超声波频率为40 kHz左右,功率分布选择不大于1.5 W/cm<sup>2</sup>,超声波型选择脉冲波,最大超声波洗浴时间控制在5 min内。本研究采用两个超声波换能器,并排安装在浴舱后部,角度与人体在洗浴中姿态的中轴线平行,不能接触人体皮肤,最好远离内脏器官。

(下转第1105页)

## 5 结束语

本研究基于TCP/IP协议,采用典型的客户服务器模式,应用文件流和数据流技术,完成了PC机上图片到单片机的传输工作,并且通过对传输速率与数据块大小之间关系的研究,得到了相对最优的传输方案,提高了图片文件的传送速率;另外,该系统还实时采集客户端发送的数据,并将数据和时间记录到Access数据库中,解决了数据接收和存储的问题,在实际应用上具有较高的科学意义。

### 参考文献(References):

- [1] JIBANYUD A, TOADITHEP N. The system of powerful computer laboratory class via socket programming[J]. **Computer Science and Information Technology**, 2010(4):638-641.
- [2] LI Yu-xiang, CHANG Chao, CHANG Shuang, et al. Study of computer room management system based on C/S Structure [J]. **Software Technology and Engineering**, 2010

(2):380-383.

- [3] YEE J C, NICHOLS K. Server and buffer allocation in a client-server multimedia system [J]. **Networks**, 1993(1):133-136.
- [4] TSYBAKOV B S. File transmission over wireless fast fading downlink [J]. **Information Theory**, 2002, 48(8):2323-2337.
- [5] 萨师焯,王珊. 数据库系统概论[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2000.
- [6] 史斌星,史佳. 新编Java实用教程[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2009.
- [7] 石荣,李在铭. 信道自适应主动块丢弃数字图像传输技术[J]. 信息与电子工程,2003,1(1):6-7.
- [8] KEHAGIAS A, PETRIDIS V. Predictive modular neural networks for unsupervised segmentation of switching time series: the data allocation problem [J]. **Neural Networks**, 2002, 13(6):1432-1449.
- [9] 谢希仁. 计算机网络[M]. 5版. 北京:电子工业出版社,2008. [编辑:李辉]

(上接第1101页)

### 参考文献(References):

- [1] 林仲茂. 超声清洗及液体处理设备的进展[J]. 清洗世界, 2007, 23(9):27-31.
- [2] 李峰,颜钢锋. 基于FPGA的智能超声波功率源的设计[J]. 机电工程,2005,22(7):30-33.
- [3] 袁海,王志新. 机电一体化茶青超声波清洗机的设计开发[J]. 自动化仪表,2006,27(3):22-24.
- [4] 燕平梅,苏丽荣,赵惠玲,等. 超声波气泡清洗对鲜切豇豆菜品品质的影响[J]. 现代食品科技,2010,26(2):140-144.
- [5] 王奇芳,张云电. 高能聚焦超声波清洗声学系统的有限元分析[J]. 机电工程,2007,24(1):15-18.
- [6] 冯泽平,陈辉,吴连连,等. 诊断超声对中孕宫内胎儿心脏超微结构影响的研究[J]. 中国超声医学杂志,1999,15(10):761-763.
- [7] 俞世勋,郭民霞,高敬龙,等. 超声波作用于兔头部皮肤后损伤效应和温度变化的实验研究[J]. 中华物理医学杂志,1998,20(1):58-60.
- [8] ROSENSCHEIN U, ROZENSZAJN L A, LANIADOS S, et al. Study of mechanism of ultrasound angioplasty from human thrombi and bovine aorta [J]. **Am J Cardiol**, 1994, 74(2):1263-1266.
- [9] ZAKHAROV S L, LAUDONE K Y, ROSENSHTRAUKH L V, et al. The effect of acoustic cavitations of the confection force and membrane potential of rat papillary muscle [J]. **Ul-**

**trasound Med Biol**, 1989(15):561.

- [10] NELSON E. Pathological effects of ultrasound on the human brain [J]. **J Neuropath and Exp Neurol**, 1959, 18(4):489.
- [11] 黄晶,王志刚,李增高,等. 导管超声对兔肝组织细胞的生物学效应[J]. 中华肝脏病杂志,1997,5(1):55.
- [12] MOORE J H, GIECK J H, SALIBA E N, et al. The biophysical effects of ultrasound on median nerve distal latencies [J]. **Electromyogr-clin-Neurophysiol**, 2000, 40(3):169-180.
- [13] 许纲,徐明香,王丽雯. 小剂量高频超声波对正中神经显微传导速度的影响[J]. 中华物理医学杂志,1998,20(3):155-157.
- [14] KRAMER J F. Effect of therapeutic ultrasound intensity on subcutaneous tissue temperature and ulnar nerve conduction velocity [J]. **Am-J-Phys-Med**, 1985, 64(1):1-9.
- [15] CURRIER D P, GRENTHOUSE D, SWIFT T. Sensory nerve conduction: effect of ultrasound [J]. **Arch-phys-Med-Rehabil**, 1978, 59(4):181-185.
- [16] 张洪民,胡夏夏,高爱兵. 超声波电机摩擦把幼模型及其有限元仿真[J]. 轻工机械,2010,28(6):82-85.
- [17] 黄金梭,陈开强. 基于VB的工业机器人PLC控制系统[J]. 轻工机械,2010,28(3):65-68.
- [18] 邵金华. 竞赛机器人驱动控制系统分析[J]. 现代制造技术与装备,2010(6):20-21. [编辑:张翔]