

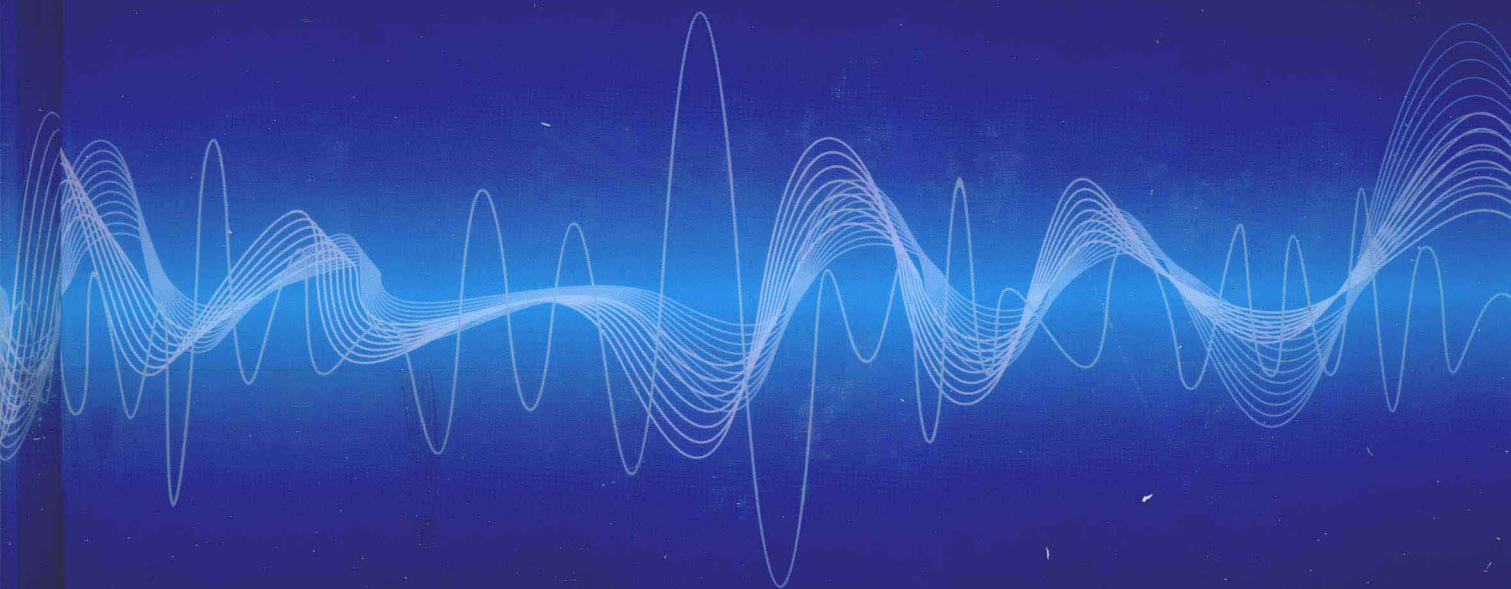
YIXUE CHAOSHENG SHEBEI
YUANLI SHEJI YINGYONG



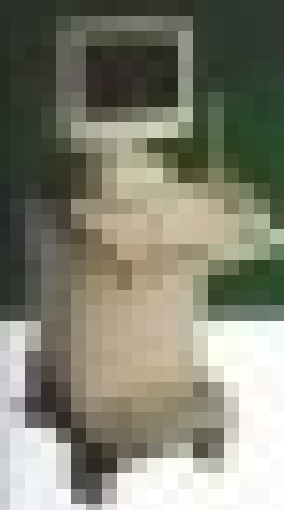
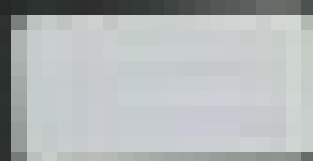
医学超声设备

原理 · 设计 · 应用

伍于添 主编



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS



医学超声设备

原理 · 设计 · 应用

第2版

人民卫生出版社

医学超声设备

原理·设计·应用

伍于添 主编



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

医学超声设备 原理·设计·应用/伍于添主编. —北京:科学技术文献出版社,2012.4
ISBN 978-7-5023-6761-9

I. ①医… II. ①伍… III. ①超声波诊断—医疗器械 IV. ①R445.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 187164 号

医学超声设备 原理·设计·应用

策划编辑:张金水 责任编辑:张金水 责任校对:赵文珍 张叫噪 责任出版:王杰馨

出 版 者	科学技术文献出版社
地 址	北京市复兴路 15 号 邮编 100038
编 务 部	(010)58882938,58882087(传真)
发 行 部	(010)58882868,58882866(传真)
邮 购 部	(010)58882873
官 方 网 址	http://www.stdp.com.cn
淘宝旗舰店	http://stbook.taobao.com
发 行 者	科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 刷 者	北京博泰印务有限责任公司
版 次	2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷
开 本	889×1194 1/16 开
字 数	1192 千
印 张	40
书 号	ISBN 978-7-5023-6761-9
定 价	118.00 元



© 版权所有 违法必究

购买本社图书,凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

编著者名单

主 编 伍于添

副 主 编 高上凯 张德俊 李德来 陈思平

编 著 者 (按章节次序排)

伍于添 中山大学医学院生物医学工程系

张德俊 中国科学院武汉物理所

寿文德 上海交通大学生物医学工程系

毓 星 国家人口计生委药具发展中心

舒贞权 汕头市超声仪器研究所有限公司

卜书中 美迪森(上海)医疗器械有限公司

高上凯 清华大学医学院生物医学工程系

林春漪 华南理工大学

他得安 复旦大学电子工程系

彭 珏 深圳大学生物医学工程系

陈思平 深圳大学

鄢英杰 昆山日盛电子有限公司

段世梅 美迪森(上海)医疗器械有限公司

杨 军 天津迈达医学科技有限公司

宋学东 天津迈达医学科技有限公司

计建军 天津迈达医学科技有限公司

王延群 中国医学科学院生物医学工程研究所

李跃杰 中国医学科学院生物医学工程研究所

王晓春 中国医学科学院生物医学工程研究所

陈 昕 深圳大学生物医学工程系

咎学全 深圳市恩普电子技术有限公司

何 平 深圳市恩普电子技术有限公司
郑音飞 浙江大学
李德来 汕头市超声仪器研究所有限公司
杨金耀 汕头市超声仪器研究所有限公司
毛志林 深圳市威尔德医疗电子股份有限公司
孙福成 上海交通大学
钱盛友 湖南师范大学
萧翔麟 上海交通大学
牛金海 上海交通大学
张学勇 中国人民解放军军械工程学院
江剑晖 上海交通大学
王 耀 宁波大学
牛凤岐 中国科学院声学所

图文整理 杨晓施 谭飞宇

前言

医学超声设备主要包括超声治疗仪和超声诊断仪。它们涉及到声学、电子学、生物医学、材料科学、传感技术、计算机及数字技术、图像处理等科学技术领域,是理、工、医等学科相互渗透的产物。随着上述学科的发展和推动,20年来超声治疗仪或超声诊断仪的研发和生产,无论在品种、数量、水平或在质量和临床应用上都取得令人瞩目的进步。

随着医学超声事业的发展,出版了众多医学超声的临床应用论著。但是迄今尚没有一部全面论述医学超声设备和新技术的原理、设计与应用的论著。本专著包括声学原理、超声生物物理、生物效应与超声测量、超声换能器、有关的模拟与数字电路、图像处理、显示技术以及超声诊断仪和超声治疗仪的原理、设计与应用,医用超声诊断设备的安全性、标准化与质量保证检测等十分丰富的专业知识内容。它是当前为培养生物医学工程、医疗设备或医学影像等专业人才,为从事医学超声研制、生产与应用的广大科技、生产和医务人员学习、开发、应用以及提高业务水平所需要的。

为了使读者在有限篇幅中获得尽可能多的有关医学超声设备的知识,本书取材、编排新颖,力求概念清晰、严谨,内容博采众长,注意深度与广度的合理性以及科学性、实用性。

本书的33名撰稿人中,有清华大学、中山大学、深圳大学、浙江大学、上海交通大学、复旦大学等著名高校的生物医学工程学教授,中国科学院声学所、中国科学院武汉物理所、中国医科院生物医学工程研究所的研究员,以及从事医用超声设备研发、生产第一线富有实践经验的高级工程师。他们大都是我国长期从事医学超声领域教学、科研、开发和生产,以及检测等方面的著名专家学者;也有少数是杰出的中青年科学工作者和工程技术人员。在撰稿过程中,查阅了大量国内外近期有关的文献,力求本书能体现国内外有关医学超声的学术及技术水平。

本书共计12章,约120万字。每章内容相对独立,并兼顾前后章的相互衔接与联系。前5章以相关的基础知识、原理和应用为主;后6章以具体技术和系统设计为主;最后一章专述医用超声设备的标准化与质量保证检测。

本书的出版得到了国内同行的关心和支持,并承有关医学超声设备厂家的大力支持。这些单位是汕头市超声仪器研究所有限公司、天津迈达医学科技有限公司、深圳市恩普电子科技有限公司、深圳市威尔德医疗电子股份有限公司、深圳开立科技有限公司、昆山日盛电子有限公司、广州一杰医药科技有限公司、深圳普罗超声生物医学研究所等,在此深表感谢。

医学超声涉及学科面广、发展迅速。因作者水平所限,难免有错漏之处,诚请专家、读者不吝指教!

伍于添

目 录

绪 论	伍于添	(1)
第一章 声学基础	张德俊	(4)
第一节 医学超声中常用声学量的基本定义与物理关系		(4)
第二节 描述声场的波动方程及其解		(7)
第三节 声波的辐射特性		(10)
第四节 声波的传播特性		(18)
第五节 声波的散射特性		(26)
第六节 声成像的声学特性		(28)
第七节 声波的非线性特性		(34)
第八节 声空化		(40)
第二章 超声波在生物组织中的传播特性	张德俊	(50)
第一节 生物组织中声速的传播特性		(50)
第二节 生物组织中声衰减的传播特性		(51)
第三章 超声波的生物效应和安全性	寿文德	(54)
第一节 超声波的生物效应		(54)
第二节 超声波应用的安全性		(69)
第四章 医学超声技术的原理及应用		(79)
第一节 医学超声技术的基本原理	伍于添	(79)
第二节 利用回波幅度的超声诊断技术	伍于添	(80)

第三节	利用多普勒效应的超声诊断技术	伍于添 (92)
第四节	其他超声诊断技术	伍于添 (101)
第五节	超声仪器在计划生育 / 生殖健康服务中的应用及展望	毓 星 (102)
第六节	超声诊断设备的正确使用与维护 舒贞权 卜书中 伍于添	(109)

第五章 医用超声新参量成像..... (113)

第一节	谐波成像	高上凯 (113)
第二节	超声弹性成像技术	林春漪 (116)
第三节	速度矢量成像	张德俊 (126)
第四节	超声诊断骨质疏松技术	他得安 (128)
第五节	光声成像技术	彭 珏 陈思平 (136)
第六节	非线性声参量成像	张德俊 (139)

第六章 超声换能器、探头与声头..... (146)

第一节	医用压电材料	鄢英杰 (146)
第二节	压电方程	卜书中 (162)
第三节	压电陶瓷材料参数的测量	鄢英杰 (170)
第四节	超声换能器的设计	卜书中 (181)
第五节	超声换能器的声场特性	段世梅 (195)
第六节	常用超声探头	卜书中 (209)
第七节	机械扫描探头	杨 军 王延群 (220)
第八节	专用超声探头	卜书中 (226)
第九节	超声治疗用换能器 (声头)	寿文德 (236)
第十节	超声探头制作中的工艺问题	卜书中 (243)
第十一节	探头技术发展现状与展望	卜书中 (251)

第七章 超声诊断设备主要的电子电路..... (263)

第一节	系统概述	陈 昕 陈思平 (263)
第二节	超声外围接口电路	何 平 管学全 (267)
第三节	超声模拟电路	郑音飞 陈 昕 陈思平 (285)
第四节	超声数字电路	郑音飞 陈 昕 陈思平 (396)
第五节	超声血流多普勒测量电路	陈 昕 陈思平 (312)
第六节	超声电路关键器件介绍	陈 昕 陈思平 (318)

第八章 结构成像中的信号与图像处理

..... 高上凯 彭旗宇 刘 凯 赵 珩 项 雷 苏立楠 (331)

第一节 数字式波束形成 (332)

第二节 数字解调方法 (339)

第三节 斑点噪声的抑制 (346)

第四节 编码激励成像 (349)

第五节 扩展视野成像 (362)

第六节 三维成像 (370)

第九章 医学超声多普勒技术..... (377)

第一节 概述 金树武 (377)

第二节 超声多普勒效应的基本原理 金树武 (378)

第三节 超声多普勒系统的一般特性 金树武 (380)

第四节 连续波超声多普勒系统 金树武 (383)

第五节 脉冲超声多普勒系统 金树武 (385)

第六节 多普勒成像技术 金树武 (388)

第七节 彩色多普勒信号处理技术及实现 郑音飞 (391)

第八节 彩色多普勒信号处理的其他技术 郑音飞 (404)

第十章 超声诊断设备..... (411)

第一节 临床常用超声诊断设备的组成、原理和主要技术指标

..... 李德来 舒贞权 杨金耀 (411)

第二节 超声诊断设备的系统设计 李德来 舒贞权 杨金耀 (420)

第三节 全数字B型超声诊断设备 李德来 舒贞权 杨金耀 (429)

第四节 Apogee 3500 全数字彩色多普勒超声诊断系统

..... 李德来 舒贞权 杨金耀 (459)

第五节 专用超声诊断仪..... 杨 军 毛志林 何 平

..... 王延群 宋学东 李跃杰 计建军 (466)

第十一章 超声治疗设备原理、设计与应用..... (482)

第一节 概论 孙福成 钱盛友 (482)

第二节 传统(常规)超声治疗技术及其在医疗领域中的应用

..... 孙福成 杨 军 李跃杰 (485)

第三节 超声肿瘤热疗 孙福成 钱盛友 萧翔麟 (492)

第四节 高强度聚焦超声 (HIFU) 肿瘤治疗

... 孙福成 钱盛友 萧翔麟 王 耀 牛金海 张学勇 江剑晖 (499)

第十二章 医用超声设备的标准化与质量保证检测..... (558)

第一节 标准、标准化的概念及标准化组织机构 牛凤岐 (558)

第二节 医用超声的标准化 牛凤岐 (559)

第三节 医用超声设备的专用检测手段 牛凤岐 寿文德 (561)

第四节 医用超声设备声场和输出参数测量 寿文德 (589)

第五节 超声诊断和监护设备换能器表面温度的测量 牛凤岐 (604)

第六节 超声诊断与监护设备的性能检测 牛凤岐 (608)

第七节 超声治疗设备的性能检测 寿文德 (616)

第八节 医用超声设备及其质量检测涉及的计量学问题

..... 牛凤岐 (627)

绪 论

一、医学超声发展概况

1880年法国物理学家居里兄弟(P & J Curie)发现的压电效应是超声学发展史上的重大发现,为超声换能器的发展建立了基础。1915年法国物理学家郎之万(Langevin)开展超声水下探测。1921年,声纳(Sound Navigation and Ranging, SONAR),即声探测与定位技术被成功地用于探测水潜艇。1928年开始使用MHz频段的超声波进行金属探伤。MHz频段超声波的应用,导致了检测声学、分子声学和生物医学超声学的相继出现。

1942年,奥地利KT Dussik用超声穿透法来探测颅脑疾病。虽然超声医学诊断始于穿透法,但此法一直未达到实用程度。后来工业探伤技术被用于探查人体,从而研制了A型超声诊断仪。1952年,美国Wild等首先报道应用A型超声检查人体组织结构。1954年,Edler等人开始用M型超声诊断多种心血管疾病。以上采用超声回波幅度的一维检测方法,在20世纪70年代前取得了长足的发展,这是医学超声发展史上的第一阶段。这一阶段仅能获得人体组织的一维结构信息。

20世纪60年代开始B型超声诊断仪的研究。1967年实时B型超声诊断仪问世。特别是在1973年,Bom提出的多阵元探头电控扫描更促进了实时B型超声显像仪的发展。此后,相继出现了DSC、DSP和计算机图像与信号处理技术,特别是80年代末期的全数字化技术(数字波束形成技术)使B型超声发展到一个新高度。由于B型超声能提供组织的二维结构信息,并具有安全、无创、便携、易用、价廉和实时成像等优势。使得超声诊断在20世纪80年代成为临床诊断重要的方法之一。利用

超声回波幅度实时成像,提供人体组织二维结构信息是超声发展史第二阶段的主要特点。

早在1957年,日本里村茂夫开始应用连续波多普勒超声于诊断。其后,Fram kein研制出脉冲波多普勒超声。到80年代初,日本Aloka公司首先推出彩色血流成像。此后,超声诊断技术不仅进入利用超声回波多普勒技术检测人体组织运动学信息的发展阶段;而且,将彩色血流图和B型超声结合为一个系统,这个系统称为彩超。它是超声诊断发展的第三个阶段。这个阶段是以双功系统为特点,既利用回波幅度信号又利用回波多普勒频移信号;既能提供组织结构学信息又能提供组织运动学信息。21世纪开始彩超逐步代替B超成为超声诊断的主要设备。

20世纪90年代开始发展新参量成像,如利用超声非线性技术发展的谐波成像;利用多波(纵波和横波)的弹性成像等。超声诊断开始进入一个综合多参量多功能的超声诊断系统阶段。也就是这一阶段的超声诊断系统不仅利用回波的幅度和多普勒信号,还利用非线性的谐波信号;不仅利用纵波,还利用横波获取剪切模量来检测组织的弹性。超声诊断给临床带来愈来愈丰富、愈来愈有效的诊断信息。

在我国,1958年11月上海市第六人民医院首先用江南I型超声波探伤仪,对人体进行探索。成为我国超声诊断技术应用发源地。1974年复旦大学研制采用显像管代替示波管的多参数M型超声诊断仪,推动了M超在国内医院的应用。20世纪70年代末由医科院基础所在四川研制的机械扇扫B超和西安研制的20阵元的电子线阵超声诊断仪,开创了我国实时B超的产业。80年代,汕头超声

研究所引进日本日立公司的探头生产线,开始大批量生产可以选配多种电子探头的实时B超。深圳安科公司于1989年生产出我国第一台彩超,接着汕头超声研究所引进美国ATL公司的彩超技术,开始批量生产Apogee系列彩超。我国目前已有近百家生产医用超声设备的厂家,生产的B超不仅可以满足国内需要,并已有大量出口,已成为全球B超的最大生产国和出口国。此外,迄今已有汕头超声研究所、深圳开立科技有限公司等近10个厂家已能生产中档和普及型彩超,其中一些厂的产品有一半以上出口到世界各地。

然而,我国在高档彩超以及超声新参量成像方面与国外先进厂家仍有不小的差距。需要国内医学超声工作者和厂家共同努力,跟上国际发展的步伐。

超声在医学中的应用,治疗早于诊断。早在1922年,德国出现了首例超声治疗仪的发明专利。1928年Mulwert试用超声治疗慢性耳聋,1933年又用以治疗耳硬化症。但直到1949年召开的第一次国际医学超声学术会议上,才有了超声治疗方面的论文交流,为超声治疗学的发展奠定了基础。

国内在超声治疗领域起步稍晚,公开的文献报道始见于1957年。与超声诊断相比,超声治疗的发展比较滞后。直到近20年方步入新的发展时期。目前除了一般超声治疗法之外,还在超声外科、超声碎石和超声热疗,特别在高强聚焦超声治疗仪(HIFU)方面取得了令人瞩目的发展。这些技术将在第十一章详细介绍。

二、国内外主要超声医学学会简介

(一) 中国超声医学工程学会(CMUI)

1976年首次召开的“全国超声检测技术交流会”,促进了全国恢复超声诊断技术的发展,会后成立的“全国超声诊断技术通讯中心”,于1984年6月23日在衡山成立了我国第一个全国群众性的超声医学专业学术团体——中国超声医学研究会,后来在1986年更名为中国超声医学工程学会。促进理、工、医人员团结合作,共同推动医学超声事业的发展,现有会员超过1.5万人,下设仪器工程开发、超声心动图、腹部等11个专业委员会。

《中国超声医学杂志》创刊也有20多年,已成为具有高新、严谨特色和风格的著名核心期刊。

(二) 中华医学会超声医学分会

它是中华医学会下设的二级学术组织,是我国很有影响力的超声医学学术团体。

(三) 世界超声医学与生物学联合会(World Federation for Ultrasound in Medicine and Biology, WFUMB)

它源于1969年眼科诊断超声国际协会(SIDDO)在维也纳召开的第三次国际会议(其中也包括了一个诊断超声的国际会议)后于1973年正式成立WFUMB。WFUMB下设亚洲医学与生物学联合会(AFSUMB)、欧洲超声医学与生物学联合会(EFSUMB)、美国超声医学学会(AIUM)、拉丁美洲超声医学与生物学联合会(FLAUS)、澳洲超声医学协会(ASUM)、地中海和非洲超声协会(MASU),每3年举办一次世界大会。

《超声医学和生物学》(UMB)是WFUMB的官方杂志(月刊)。该杂志的读者对象面向生物超声医学领域的医生、科学家、工程师等。目前影响因子为2.395,在26种声学期刊中排第三位。

(四) 电子电气工程师协会超声学、铁电体和频率控制协会(IEEE UFFC)

早在1953年在无线电工程协会(IRE)成立了一个超声工程专业组(PGUE)。直到1985年,正式改名为IEEE UFFC。每年举行一次年会,是国际超声界最重要的学术大会之一。

《IEEE超声学、铁电体技术与频率控制汇刊》(IEEE TUFFC)是IEEE UFFC的官方杂志,是此领域的重要期刊。

三、医学超声现状及展望

(一) 医学超声现况

从医学超声发展史可见,目前B超和彩超已成为超声诊断的重要设备。已从模拟技术发展到了数字技术,图像质量已达到一个相当高的水平。目前的彩超系统在从回波幅度信号获取结构学信息,以及从超声多普勒频移信号获取运动学信息方面都十分成熟。此外,应用谐波的非线性特性而发展的组织谐波成像和造影谐波成像都已进入临床应用阶

段；应用多波技术，利用剪切模量 μ 的弹性成像也引起了临床的关注。

超声治疗在临床多个领域展开应用，开始受到重视。目前，不仅使用小功率和中功率的超声，而且高强超声也开始在应用。

（二）展望

1. 继续提高传统 B 超和彩超的图像质量和性能，但这方面已难有突破性发展。

2. 加强超声新参量成像的研究，值得关注的有下述几方面：

（1）造影谐波成像，特别是新型造影剂和造影谐波成像新技术方面。

（2）非线性参数 B/A 成像。

（3）多波成像，除了传统的利用纵波成像外，还引入横波成像，如利用剪切模量 μ 的弹性成像。

（4）组织定征的技术研究。

（5）超声诊断、引导和治疗的结合。

（6）高强聚焦超声治疗技术（HIFU）的深入研究和临床应用的进一步探讨。

（7）研发探头的新材料、新技术。

医学超声涉及的学科领域广泛，必须借助多学科特别是数字通讯、计算机和图像处理、机械、材料学和微电子学、生物医学等领域的最新进展，经各方研究人员的共同努力和深入细致地研究，医学超声将会进入一个新的发展阶段。

（伍于添）

声学基础

第一节 医学超声中常用声学量的基本定义与物理关系

声波,就其波动性来说,它与电磁波、光波具有相似的传播规律;但就其物质性来说,它与电磁波、光波又有区别。声波本质上是机械波,是机械振动在弹性媒质中的传播。这意味着形成声波需要两个基本条件:一是要有产生机械振动的声源;二是要有弹性媒质作为传播物质。因此,声波除不能在真空和理想刚体中传播外,几乎可在一切物质,包括气体、液体、固体和凝聚体中传播。生物组织是由气体、水分、血液、脂肪、肌肉、筋腱、骨骼组成的特殊复杂结构。但宏观上,从其声学特性来看,大致可分为软组织和骨骼两种形态。它们都是良好的传声媒质。为叙述方便,下面主要讨论与软组织较为近似的流体中的声学问题;在涉及骨骼等固体声学问题时,再做相关讨论。

描述声源和声场的空间、时间特性,需借助许多声学量。本章就从医学超声中最常用的,也是声学中最基本的物理量及其相互关系先行介绍。

一、声压与质点速度

(一) 声压 (sound pressure)

声压是声源对媒质产生扰动的主要因素,也是声场中最容易测量的声学量。它定义为:有声波时,媒质中的压力与静压的差值。

设媒质在没有受到声扰动时,处于相对平衡状态。此时,媒质中的静压强(即流体或软组织中的环境压力)为 P_0 ,当扰动到来时,媒质中的总压强 P' 与静压强 P_0 的差(即声压)为

$$p = P' - P_0 \quad (1-1-1)$$

此量也称为逾量压强。

在声波传播过程中,声场中不同位置处的声压是不相同的,且同一位置处的声压还随时间而变化。故声压应是空间和时间的函数,在直角坐标系中,可表示为

$$p = p(x, y, z, t)$$

声压的具体表达式取决于声源振动的形式。显然,当声源作简谐振动,且声波沿 x 方向做一维传播情况下,媒质中某点 x 处的瞬时声压具有稳态简谐振荡特性,可表示为

$$p = p_a \cos(\omega t - kx + \varphi_0) \quad (1-1-2)$$

或用复数形式表示为

$$p = \operatorname{Re} \left[p_a e^{j(\omega t - kx + \varphi_0)} \right] \quad (1-1-3)$$

在声学中,表示取实部的符号 $\operatorname{Re} [\]$ 通常可

省略。式中: p_a 是声压的幅度; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为圆波数, λ 为声波的波长; $\omega = ck = 2\pi f$ 是圆频率, f 是声波的频率,其倒数是声波的周期 $T = \frac{1}{f}$, c 为声的传播速度; t 是时间; φ_0 是声压的初始位相,一般情况下可设为零。

声压的均方根值称为有效声压,即

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int p^2 dt} \quad (1-1-4)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [p_a \cos(\omega t - kx + \varphi_0)]^2 dt}$$

声压的单位是帕[斯卡](Pascal): 1 帕 = 1 牛顿/米², 用符号表示即 1 Pa = 1 N/m²。以前声压曾用巴(bar)或大气压(atm)作单位: 1 巴 = 1 大气压 = 1.013 × 10⁵ N/m²。

故有下面的换算关系: 1 Pa = 10 μbar = 10⁻⁵ atm, 1 bar = 1 atm = 10⁵ Pa = 0.1 MPa。

(二) 质点速度 (particle velocity)

其定义为: 媒质中的质点, 因声波通过而引起的相对于其平衡位置的振动速度, 单位为米每秒, 符号为 m/s。

设媒质中的质点在声压作用下, 在其平衡位置附近产生的振动位移为 $\xi(x, y, z, t)$, 则质点速度可表示为 ξ 随时间的变化率, 即微商, 故有

$$v = \frac{d\xi}{dt} \quad (1-1-5)$$

由于质点位移是矢量, 故质点速度也是矢量。

根据牛顿第二定律(运动方程), 质点速度与声压之间的关系为

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\text{grad } p \quad (1-1-6)$$

式中: ρ ——媒质的密度, 可表示为 $\rho = \rho_0 + \rho'$, ρ_0 为媒质的静态密度, ρ' 为声波作用下的密度变化量; 它也是空间和时间的函数, 即 $\rho' = \rho'(x, y, z, t)$;

grad ——梯度算符, 也可用 ∇ 符号表示, 在直角坐标系中, 它表示 $\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$ 。

对沿 X 方向传播的一维波, 在线性近似下, 将(1-1-6)式两边对 t 积分, 则有

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt \quad (1-1-7)$$

将上面声压表达式(1-1-3)代入, 便得到质

点速度为

$$v = \frac{p_a}{\rho_0 c_0} e^{j(\omega t - kx)} \quad (1-1-8)$$

二、声阻抗与声阻抗率

(一) 声阻抗 (acoustic impedance)

定义为: 在波阵面的一定面积 S 上的声压 p 与通过这个面积的体积速度 U 的复数比值。单位为帕[斯卡]秒每立方米, 符号为 Pa · s/m³, 称为声欧姆。

声阻抗的表示式为

$$Z_a = \frac{p}{U} = \frac{p}{vS} \quad (1-1-9)$$

式中: $U = vS$, 称为体积速度, 其中 S 为声波通过的面积。

按照声-电类比原理, 若将声压类比于电路中的电压, 体积速度类比于电流, 则声阻抗类比于电阻抗。由此可知, 当声场可化为像电路那样的集总参数系统时, 将声阻抗作为一个声学元件是十分方便的。此时, 可将某一部分媒质的声阻抗, 看作驱动这部分的声压差与体积速度的复数比值。这在分析具有一定面积的声源辐射、声在管道中传播以及换能器的等效电路分析中非常有用。

(二) 声阻抗率 (specific acoustic impedance)

定义为: 媒质中某一点的声压 p 与质点速度 v 的复数比值。单位为帕[斯卡]秒每米, 符号为 Pa · s/m。

声阻抗率的表示式为:

$$Z_s = \frac{p}{v} \quad (1-1-10)$$

声阻抗率类比于电路中的电阻抗率, 普遍用于将声场作为分布参数系统的情况, 且按上式得出的 Z_s 通常也为复数。但对于一维向前传播的平面简谐波, 可将上述关于声压 p 和质点速度 v 的表达式(1-1-3)和(1-1-8)代入上式, 则得此特殊情况下的声阻抗率为

$$Z_s = \rho_0 c_0 \quad (1-1-11)$$

由此可见,平面声波的声阻抗率是实数,且只取决于媒质本身的静态密度和声速特性,而与声波无关。故称其为媒质的声特性阻抗,简称特性阻抗。

经类似推导可证明,对反向传播的平面波则有 $Z_s = -\rho_0 c_0$ 。

据此,可将这两种情况合并表示为 $p = \pm \rho_0 c_0 v$ 。式中:正号代表前进波;负号代表后退波或反射波。

平面声波的这一特性在声学中具有重要意义:首先,它可以作为识别平面声波的特征之一;其次,在不同媒质界面的阻抗匹配中, $\rho_0 c_0$ 乘积作为整体的作用比它们单独作用更大。因为我们可以分别调整 ρ_0 或 c_0 , 达到阻抗匹配的目的。这在多层媒质透声,特别是声换能器结构设计等方面非常有用。

三、声强与声功率

(一) 声强 (sound intensity)

定义:声场中某点处,与质点速度方向垂直的单位面积上在单位时间内通过的声能称为瞬时声强,它是一个矢量。单位是瓦每平方米,符号为 W/m^2 。在医学超声中,常用的单位是 W/cm^2 。

声强的表达式为

$$I(t) = p(t) \cdot v(t) \quad (1-1-12)$$

式中: $I(t)$ ——瞬时声强; $p(t)$ ——瞬时声压; $v(t)$ ——瞬时质点速度。

在稳态声场中,声强 I 是瞬时声强 $I(t)$ 的时间平均值,即

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot v(t) dt \quad (1-1-13)$$

式中: T ——周期的整倍数,或长到不影响计算结果的时间段。

若将上述声压和质点速度公式代入,则可得到平面声波(球面波也适用)的声强为

$$I = \frac{p_e^2}{\rho_0 c_0} \quad (1-1-14)$$

(二) 声功率 (sound power)

定义为:单位时间内通过与声传播方向垂直的面积 S 的声能。单位为瓦,符号为 W , $1 W = 1 J/s$, J 是焦耳的符号。

声功率的表达式为

$$W = \int_S I dS \quad (1-1-15)$$

若声强取空间平均值,则有下列简单关系

$$\bar{I} = \frac{W}{S} \quad (1-1-16)$$

四、速度势

速度势 (velocity potential) 是由流体力学引入的一个有用概念。虽然它不直接对应于哪个声学量,或只能把它当做一个中间量,但知道了它就可方便地导出某些重要的声学量,特别是声压和质点速度。而由此就能进一步导出其他几乎所有的声场基本量。

流体力学表明,连续、可压缩流体的无旋运动,必然存在一个势函数,称为速度势:

$$\Phi = \int \frac{p}{\rho_0} dt \quad (1-1-17)$$

它是一个标量函数,其物理意义是单位质量具有的冲量。而声学中就有这样的关系式。由三维线性声波的运动方程

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\text{grad } p = -\nabla p \quad (1-1-18)$$

将此式两边对 t 积分可得

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int \nabla p dt \quad (1-1-19)$$

与速度势的公式 (1-1-16) 相对比可知

$$v = -\nabla \Phi \quad (1-1-20)$$

由此得到速度势 Φ 与声压 p 和质点速度 v 的关系式如下: