

汪承灏院士论文选集

中国科学院声学研究所 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

近 60 年来,汪承灏院士一直从事超声学和物理声学领域的研究。研究内容主要包括晶体声学,声表面波和高频体声波换能器、器件和系统,固体中的弹性波,声栅,声学时间反转方法,功率超声,声空化,压电换能器,声学微机电系统等。

本论文集收录了汪承灏院士代表性论文 80 余篇,反映了他在超声学和物理声学领域取得的主要成绩。

本书可供从事超声学和物理声学科技人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

汪承灏院士论文选集/中国科学院声学研究所编. —北京:科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-056134-3

I. ①汪… II. ①中… III. ①声学-文集 IV. ①O42-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 316140 号

责任编辑:刘凤娟 / 责任校对:杨 然

责任印制:肖 兴 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 1 月第一次印刷 印张:43 1/2 插页:1

字数:1 025 000

定价:299.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)





汪承灏院士

博观约取 厚积薄发

(代 序)

长绳难系日，岁月不居，时节如流，繁忙中不觉汪承灏院士八十华诞悄然到来。几位过了知天命之年的同事和学生与声学所商议，出版一本汪先生的论文选集，以表达对先生的生日祝贺和敬仰之情。

有缘初识汪承灏先生是在1998年春天，先生审阅我的博士学位论文，他的渊博知识和严谨学风令我至今难以忘怀，受益匪浅。有缘较深地了解汪承灏先生的治学思想和精神品格是在1999年秋天，我和学弟陪着先生一起去武汉参加声学会议。记得那是个中秋节的夜晚，我们一起乘车至宜昌，坐船溯长江去往三峡。江面月光溶溶，两岸山影绰绰，汪先生坐在甲板上与我和学弟谈历史、谈学习、谈科研、谈声学……谈许许多多有趣的事情，深深吸引着我们两位学子，也深深影响了我们后来的做人做事风格。一路行程，每当遇到有花销时，汪先生总是抢先付账，从不让我和学弟掏腰包，他既是一位博学严谨的学者，又是一位慈祥的长者。实至名归，2001年汪承灏先生以他高深的学术造诣和崇高的精神品格当选为中科院院士，后来因为工作原因我也有幸对汪先生有了更深入的认识。

1938年1月10日，日军侵占南京不足一个月，汪承灏先生的家人逃难到金陵远郊，途中先生降生。汪先生生于苦难，长于忧患，4岁丧父，少时家衰，身体瘦弱，经常生病。但是，汪先生天性聪颖好学，自小学到中学主课成绩几乎都是全班第一。先生高中阶段就读于南京市第一中学，该校历史悠久，名师荟萃，授知识，传道德，教做人。有位教授平面几何课的钱介石老先生，每次上课前，都要先站在教室门口整整衣服，立正一下，然后才走上讲台，老师的敬业精神让汪承灏院士至今不能忘怀。1954年，汪承灏先生考入北京大学物理系，受到了翔实系统的物理学基础教育，为他以后从事科学研究工作打下了良好基础。

1958年11月，经中央批准，从全国各大学抽调100名优秀大学生提前毕业，到中国科学院电子所工作，以加强我国水声学研究，这个举措后来常被称为“拔青苗”。作为百名“青苗”之一，汪承灏先生被分配到第八研究室，师从应崇福院士，开始了他长达60年的超声学和物理声学研究生涯。

在超声学和物理声学研究工作期间，汪承灏院士淡泊名利，不怕困难，刻苦钻研，博观约取，厚积薄发，在超声学和物理声学等诸多领域，取得了骄人成绩，为我国声学事业发展做出了杰出贡献。汪先生先后获得国家自然科学奖、国家发明奖以及国家科技进步奖三等奖4项，获得全国科技大会中国科学院重大成果奖，中国科学院科技成果一、二等奖4项，以及饶毓泰物理学奖。

汪承灏院士在空化发光机理方面开展了先驱性研究,建立了压电晶体表面激发的理论体系,提出并成功研制出多种声表面波和高频声体波器件和系统,率先提出了压电可调频换能器和压电阻尼原理,发展了声学时间反转方法,研制的硅微传声器、水听器和矢量水听器,达到了国际水平。在超声学和物理声学研究领域发表了约 260 篇论文,获得 20 余项发明专利。

汪承灏院士当年取得的空化发光机理先驱性研究成果,在约 30 年后引起国际物理学界轰动的声致发光研究热潮出现时,再次受到高度关注,著名超声物理学家埃森蒙哥(Eisenmenger)指出,汪承灏的论文是在这次热潮前,“几十年来见到的唯一的一篇文章”。

从 20 世纪 60 年代中期起,声表面波技术获得迅速发展,许多器件纷纷提出,并应用于电子各领域,但是精确严格的压电晶体表面激发分析理论尚未建立,人们初期只能用 δ 函数、脉冲响应或者等效电路等模型解决器件设计上的问题,不能满足声表面波技术快速发展的迫切需求。1977 年,迈尔森(Milsom)等首先用格林函数方法给出在压电晶体表面上表面电荷激发产生的声表面波和体波场,汪承灏院士敏锐地发现了其理论很不完备,也没有给出产生弹性波场的清晰表述,他决心深入探讨压电晶体表面激发问题,建立它的完备理论体系。汪先生与他的同事及研究生们首先证明了压电晶体声表面激发产生的弹性波场是表面上广义力与广义格林函数的点乘卷积,广义力不仅包括电源激发,而且包括力源激发,电源也不仅包括表面上法向电位移不连续(存在表面电荷),也可以是表面切向电场不连续,从而给出了仅与晶体材料参数和切向有关的激发产生广义弹性波场(包括表面波和体波场)的解析表达式。他们后来又推广到表面激发产生膺表面波以及头波的情况,并在理论和实验上证明了压电晶体表面的高速模式是他们理论给出的表面纵波头波模式,而不是国外所认为的高速膺表面波模式。汪先生与他的同事的工作被国际同行学者评价为“分析表面波激发和传播最严格的方法”,以此为基础,他们将激发理论由一维推广到二维情况,在国际上首次给出了压电晶体表面有限孔径源产生声表面波和体波衍射场的严格矢量场理论,该理论对于设计研制叉指换能器和声表面波器件具有重要的实用价值。经过长期不懈的努力,汪承灏院士与学生们利用积分变换和 Cagniard-de Hoop 方法,给出了压电晶体瞬态激发产生的相互耦合的电磁波和弹性声波两类波动,表面波、体波和头波三种波型的波场普遍理论,实现了从稳态分析到瞬态分析的飞跃,并惊人地发现并实验验证了表征弹性波与电磁波耦合的电磁声头波,完成了建立压电晶体表面激发、传播、衍射和散射的完整的理论体系的使命。

他一手抓建立压电晶体表面激发理论体系以加强声表面波基础研究,一手抓声表面波器件产品研制以满足国家战略需求。汪先生组织研究队伍,添置仪器设备,提高工艺技术,提出并成功研制出多种声表面波和高频声体波器件和系统,几乎国外有的我们都有,尤其是新颖和尖端器件和系统,达到或超过了国际水平,在我国国防和经济建设中发挥了重要作用。

汪承灏院士与合作者还首创性地提出了压电振动系统可调频原理,用改变负载电抗的方法实现压电可调频换能器,打破了人们通常认为换能器只能在固定频率下工作的传统观念,在实验上证明了一种纵振动压电换能器能够在一个半倍频程内有效地工作,可以简便有效地连续瞬时调节换能器工作频率,已经引起国外同行的关注,应用推广到声

呐换能器中。汪先生早于国外同行率先提出了压电阻尼原理表明压电材料可以成为一种新型阻尼材料,压电振动系统可作为一种阻尼结构。它可代替超声、水声换能器的背衬阻尼结构,在不妨碍向介质有效辐射条件下,保持辐射较窄的声脉冲;在抗振方面,可以构成新型阻尼结构,这种压电阻尼结构具有简便、连续、瞬时可调的特点。

1997年,汪承灏院士敏锐地意识到法国 Fink 教授提出的时间反转方法对于声学探测发展的重要性,他立即亲自查阅文献,自制仪器设备,组织团队开展相关研究工作,取得不少成果。他们将时间反转方法扩展应用到各向异性介质,实现了自适应聚焦, Fink 教授认为此项工作是声学时间反转技术的重要发展,予以高度评价;他们将改进的时间反转方法应用于超声无损检测,解决了在界面或底面附近或其上的缺陷难以检测到的难题;他们采用简明的射线法进行水中波导声通信信号的时间反转处理分析,对一个 16 阵元发出的 7 位巴克码,相关峰主副瓣比提高了 5dB,处理增益提高了 6dB,意味着水下通信距离可增加一倍,并可调低门限电平,降低误码率,引起我国水声界的重视。

1999年,汪承灏院士审时度势,毅然决定创建声学微机电系统 (AMEMS) 实验室,组织队伍,筹措经费,历经两年,初步建成了 MEMS 工艺线,开展研究工作,取得了一些成果。他们提出了一种新型硅微电容传声器结构,采用独特工艺研制出具有国际水平的硅微电容传声器;他们将硅微压电传声器改制成硅微压电水听器,在保证灵敏度的条件下,比现有水听器体积大大减小,达到国际水平。

汪承灏院士从一棵大学生“青苗”成长为一名超声学家和物理声学家,在一个甲子的科研生涯中,刻苦勤奋,学风严谨,勇于创新。汪先生做任何一项研究工作,都要从理论和实验多方面进行思考钻研和实际验证,不断总结提升,对发现的新现象和规律,除了要作多次的反覆检验,还要进行理论分析。如他得到了压电晶体表面激发产生的体波解后,发现相位上存在一个 $\pi/2$ 的相差,一时还得不到解释,虽然这并不影响研究的主要结论,但他还经过一年的慎重思考后,确认结果完全正确无误,才将论文送出发表。汪先生从不迷信书本,不迷信权威,思想极其活跃敏捷,充满了科研的好奇心,享受科研的乐趣。汪先生的科研经历和取得的成果,教科书般地诠释了学习—创造—再学习—再创造的循环提高的螺旋式上升过程。

老骥伏枥,志在千里。虽然年龄已经八旬,汪承灏院士仍然十分关注超声学和物理声学事业的发展,在研究方向的把握,青年人才的培养,新研究领域的开辟等方面发挥着不可替代的作用。汪先生目前还在开展硅微超声换能器、高频体声波谐振器以及超声检测和成像新方法等方面的研究工作,决心与年轻的同事们一道争取多出成果,为国家多做贡献。

值此论文集出版之际,仅以拙笔表达对汪承灏院士的祝愿:祝汪先生生日快乐,愿汪先生身体健康,永远有一颗童心。是为序。

中国科学院声学研究所所长

王小民

2017年10月21日

目 录

博观约取 厚积薄发(代序)

第一部分 空化及其作用机理

单一空化气泡的电磁辐射和光辐射	汪承灏, 张德俊	3
超声空化压力效应的测量	谢瑞琚, 汪承灏	13
单一空化气泡运动的高速摄影的实验研究	张德俊, 汪承灏	18
空化乳化机制的高速摄影实验研究	汪承灏, 张德俊, 宗健	25

第二部分 功率超声

盘形聚能器设计理论	汪承灏	35
广义变幅器理论——有负载情况下变幅器特性研究	汪承灏	44
Development of an acoustic levitation reactor		
Cao Zhuyou, Liu Shuqin, Li Zhimin, Gong Mingli, Ma Yulong, Wang Chenghao		60
相控的 HIFU 系统研究	张迪, 汪承灏, 马军, 吴先梅	67

第三部分 压电换能器

在电负载下压电板的厚度振动	汪承灏, 赵哲英	73
The effect of electric load on the characteristics for piezoelectric vibrational system		
Wang Chenhao, Zhao Zheyang, Ma Yulong		78
Principle of piezoelectric-tunable transducer	Wang Chenhao, Zhao Zheyang	89
Principle of piezoelectric damping of vibration: an experimental investigation		
Wang Chenghao		98
ZnO planar focusing transducer on using Fresnel Array		
Donghai Qiao, Shunzhou Li, Chenghao Wang, Zheyang Zhao		105
Theoretical and experimental investigation of ultrasonic focusing with annular phased array		
Zhang Bixing, Wang Chenghao, Lai Puxiang		110

第四部分 固体中的弹性波

The radiation impedance and the energy partition among wave fields generated by a normal force strip radiator on isotropic solid surface	Qiao Donghai, Wang Chenghao	117
An analytical method for calculating P-SV acoustical field excited by a piezoelectric strip with finite width and thickness	Zhang Bixing, Wang Chenghao, Anders Boström	127
Focusing and scanning of bulk acoustic wave in solid		
Wu Jinyuan, Wang Chenghao, He Qiguang		131

菲涅耳阵在固体中所产生的声束聚焦和扫描特性	吴进远, 汪承灏, 何启光	135
Study on focusing properties of acoustic beams in solid	Donghai Qiao, Chenghao Wang	145
Experimental analysis of multimode guided waves in stratified media	Laiyu Lu, Chenghao Wang, Bixing Zhang	149
Time-frequency analysis of the dispersive Rayleigh wave in stratified media	Lu Laiyu, Wang Chenghao, Zhang Bixing	152
Inversion of multimode Rayleigh waves in the presence of a low-velocity layer: numerical and laboratory study	Laiyu Lu, Chenghao Wang, Bixing Zhang	165
第五部分 晶体声学		
Analysis of surface excitation of elastic wave field in a half space of piezoelectric crystal-general formulae of surface excitation of elastic wave field	Wang Chenghao, Chen Dongpei	179
Generalized Green's functions of surface excitation of elastic wave fields in a piezoelectric half-space	Wang Chenghao, Chen Dongpei	191
压电晶体表面激发的赝表面声波 Green 函数	汪承灏, 黄歆	208
压电晶体表面任意源分布所产生的弹性波场	汪承灏, 范思齐	213
压电晶体表面激发的二维声表面波 Green 函数	范思齐, 汪承灏	223
Transient waves in a piezoelectric half-space generated by line-loaded surface sources	Yuan Liu, Chenghao Wang, Chongfu Ying	229
Head waves in a piezoelectric half-space	Yuan Liu, Chenghao Wang, C. F. Ying	234
High velocity acoustical head wave on surface of ST quartz	Wang Chenghao, Liu Yuan, He Shitang, Huang Xin	241
压电晶体表面高速声学模式	汪承灏, 黄歆, 许钊庚, 应崇福	243
Electromagnetic acoustic head waves in piezoelectric media	Yuan Liu, Chenghao Wang, C. F. Ying	249
Scattering of BG wave by a groove on the surface of a 6mm crystal	Wang Chenghao	252
Scattering of Rayleigh wave through a groove on surface of piezoelectric crystal	Wang Chenghao, Chen Dongpei	265
Scattering of normally incident Rayleigh wave from short-circuited metallic grating	Sun Baoshen, Wang Chenghao, Ying Chongfu	280
SAW diffraction field generated by source with finite aperture piezoelectric crystal surfaces	Wang Chenghao, Fan Siqi, Fan Huaiyu, Liu Yuan	289
Elastic wave diffraction fields generated by surface excitation of a crystal	Huang Xin, Wang Chenghao	300
Focusing of surface acoustic wave on a piezoelectric crystal	Qiao Donghai, Wang Chenghao, Wang Zuoqing	307

第六部分 SAW 在声栅上衍射

声表面波在声栅上的 Bragg 衍射	王佐卿, 周素华, 汪承灏	313
The angular spread of the deflected SAW beam diffracted by Bragg grating	Wang Zuoqing, Wang Chenghao	325
The diffraction of normally incident SAW by acoustic grating	Wang Zuoqing, Zhou Suhua, Wang Chenghao	334
SAW 声栅频谱分析器探讨	汪承灏, 王佐卿, 周素华	346
Purely acoustical RF spectrum analyzer based on 2-dimensional acoustic Bragg lens	Wang Chenghao, Wang Zuoqing and Zhou Suhua	352

第七部分 SAW 叉指换能器、器件和系统

The IDT with high internal reflection suppression	He Shitang, Chen Dongpei, Wang Chenghao	359
General two-dimensional planar transducers and blazed array-like interdigital transducer	Liu Yuan, Wang Chenghao, Ying Chongfu	369
声表面波低插入损耗滤波器的研制(I)——控制电极宽度单相单向换能器	何世堂, 汪承灏, 解述, 金国华	373
声表面波低插入损耗滤波器的研制(II)——横向耦合谐振滤波器	郭艳明, 何世堂, 汪承灏, 解述	378
高稳定性的 500MHz 声表面波沟槽谐振器型振荡器	周先明, 汪承灏, 周连亨	383
Uniform groove-depth RAC by using transducer weighting	Wang Chenghao, Zhou Xianwen, Xie Shu, Chen Dongpei	390
高性能 SAW MSC 弹性卷积器的研制	金国华, 冯所椿, 李丽岩, 汪承灏	397
基于声表面波滤波器组的快速跳频频率综合器	汪承灏, 何世堂, 薛丹炜, 孙宝申, 周正芳	401
用声表面波技术实现合成孔径雷达成像	许聿峰, 汪承灏	405
声表面波可编程匹配滤波器及应用于构成码分多址扩频通讯系统的实验研究	张宇行, 乔东海, 汪承灏	410

第八部分 高频体声波器件和系统

Resonance spectrum characteristics of effective electromechanical coupling coefficient of high-overtone bulk acoustic resonator	Jian Li, Mengwei Liu, Chenghao Wang	417
Influence of electrodes on the effective electromechanical coupling coefficient distributions of high-overtone bulk acoustic resonator	Mengwei Liu, Jian Li, Chenghao Wang, Junhong Li, Jun Ma	428
Mechanical quality factor of high-overtone bulk acoustic resonator	Li Jian, Liu Mengwei, Li Junhong, Ma Jun, Wang Chenghao	437

一种基于高次谐波体声波谐振器的新型微波稳频源

..... 徐帆, 汪承灏, 周育英, 乔东海	456
纯声学体声波宽带谱分析器的研制	乔东海, 汪承灏, 徐帆, 周育英 461

High frequency acoustic microscopy with Fresnel zoom lens

..... Qiao Donghai, Li Shunzhou, Wang Chenghao	465
--	-----

第九部分 声学时间反转方法

Self-adaptive focusing by time reversal through interface between different media

..... Wei Wei, Wang Chenghao	479
------------------------------	-----

Self-focusing of acoustical beam in solid by time-reversal processing

..... Wei Wei, Liu Chen, Wang Chenghao	485
--	-----

Time reversal self-focusing in a solid-plate waveguide

..... Zhang Bixing, Wu Hao, Wang Chenghao	492
---	-----

Time reversal self-adaptive focusing in anisotropic elastic solid medium

..... Bixing Zhang, Chenghao Wang, Minghui Lu	496
---	-----

Theoretical and experimental study of time reversal in cubic crystals

..... Lu Minghui, Zhang Bixing, Wang Chenghao	503
---	-----

Study of self-focusing in underwater waveguide by time reversal method

..... Zhang Bixing, Wang Chenghao, Lu Minghui	507
---	-----

Application of time reversal in underwater communication

..... Lu Minghui, Zhang Bixing, Wang Chenghao	518
---	-----

改进的时间反转法用于有界面时超声目标探测的鉴别	汪承灏, 魏炜 528
-------------------------------	-------------

时间反转和逆时偏移混合法用于层状介质中目标的声学检测和定位

..... 师芳芳, 汪承灏, 张碧星, 李俊红	533
--------------------------	-----

Acoustic field analysis of detection and location of targets in layered media by time reversal-reverse time migration mixed method

..... Gao Xiang, Li Jian, Shi Fangfang, Ma Jun, Wang Wen, Wang Chenghao	542
---	-----

第十部分 声学微电子机械系统

硅微传声器研究进展	田静, 汪承灏, 徐联, 乔东海, 马军, 魏建辉 559
-----------------	-------------------------------

外围减薄振动膜的硅微电容传声器

..... 张晓辉, 汪承灏, 徐联, 魏建辉, 马军, 李俊红	563
----------------------------------	-----

Numerical analysis of capacitive pressure micro-sensors

..... Wang Xiaomin, Li Mingxuan, Wang Chenghao	567
--	-----

Research progress in piezoelectric MEMS microphones

..... Tian Jing, Wang Chenghao, Xu Lian, Yang Chuwei, Li Junhong	579
--	-----

ZnO thin film piezoelectric micromachined microphone with symmetric composite vibrating diaphragm	Junhong Li, Chenghao Wang, Wei Ren, Jun Ma 584
---	--

MEMS 压电水听器的研究	马军, 郝震宏, 徐联, 李伯权, 汪承灏 594
---------------------	---------------------------

ZnO 薄膜硅微压电矢量水听器..... 李俊红, 魏建辉, 马军, 任伟, 刘梦伟, 汪承灏	598
基于 ZnO 压电薄膜的弯曲振动硅微压电超声换能器的研究 郝震宏, 汪承灏, 乔东海	606
Design and fabrication of piezoelectric micromachined ultrasound transducer (pMUT) with partially-etched ZnO film Junhong Li, Wei Ren, Guoxiang Fan, Chenghao Wang	614
Pt/Ti electrodes of PZT thin films patterning by novel lift-off using ZnO as a sacrificial layer Li Junhong, Wang Chenghao, Xu Lian, Xie Shu	627
Micro-patterning of PZT thick film by lift-off using ZnO as a sacrificial layer Junhong Li, Wei Ren, Chenghao Wang, Mengwei Liu, Guoxiang Fan	631
Effect of annealing process on properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ thin films prepared by sol-gel method..... Junhong Li, Chenghao Wang, Mengwei Liu, Jun Ma	635
Micromachined ultrasonic transducers based on lead zirconate titanate (PZT) films Junhong Li, Chenghao Wang, Jun Ma, Mengwei Liu	642
Design and Analysis of MEMS Linear Phased Array Guoxiang Fan, Junhong Li, Chenghao Wang	650
汪承灏专利目录.....	664
汪承灏全部论著目录.....	666
后记.....	679

第一部分 空化及其作用机理

单一空化气泡的电磁辐射和光辐射*

汪承灏 张德俊

(中国科学院声学研究所)

本文报导关于单一气泡空化所产生电磁辐射和光辐射的实验研究。在观察和简略理论分析单一空化气泡的生长和闭合运动后,用实验方法研究了这两种辐射。首先肯定了电磁辐射的存在;并与其他一些有关光辐射的工作所作统计性的结论有別,明确肯定电磁辐射和光辐射同时发生在气泡闭合时刻。接着研究了儿种液体、儿种气体以及气泡闭合速度对两种辐射的影响。实验结果表明,虽然存在有 Frenkel 所预言的电磁辐射和光辐射,但其机制不是他提出的假说。初步看来,两种辐射的产生可能与闭合时气泡中所产生的微駁波有关。

引 言

自从 1934 年 Frenzel 和 Schultes^[1]发现超声空化伴随有很微弱的发光(所谓“声发光”)现象以来,许多人对于空化发光进行了大量研究,但至今发光的机理还没有完全搞清楚。声发光作为超声空化的基本物理效应之一,它密切与超声应用,特别是在化学化工方面应用有关系。

1940 年 Frenkel 提出这样的假说^[2]:当超声引起所谓“真正空化”(即拉断液体中的薄弱处)、形成透镜状空腔时,空腔两侧离子分布的热涨落造成不均匀荷电,使空腔中稀薄气体发生电击穿,因此产生微弱的发光。但这假说却受到愈来愈多的怀疑。首先是现在都认为声空化必需有空化核存在,而不可能由于声“拉断”液体,因此 Frenkel 所假设的前提就有问题。其次是,近来对超声发光与气泡生长闭合的相角关系作了观察,观察的结果和 Frenkel 的假说相抵触。虽然早期工作的结论存在分歧,即有的认为发光是发生在生长相,有的认为是发生在闭合相;但新近的较细致实验工作^[3,4]证明,发光在一个周期内相当大的部分时间内都可能发生,然而在压缩相中的一个较短的时间间隔内发光较强。值得注意的是,液体中存在有大小不同的气泡核;而半径不同的气泡,它们生长闭合周期并不相同^[3]。可以认为,发光较强的时刻相应于闭合较剧烈的气泡的闭合时刻;因此,上述实验的结果,用气泡闭合时产生光辐射来

说明是比较合理的。根据 Frenkel 假说,发光却应当发生在气泡生长时刻。

另一方面,有人认为,由于声的交替连续作用,气泡闭合至最小与气泡拉开生长,在时间上是紧密相连的,因而至今所用的方法并不能严格地确定相角,因此从相角关系上还不能完全否定 Frenkel 的假说^[5]。

此外,根据 Frenkel 假说,空化除了会发光以外,还应当有电磁辐射存在。Jarman 曾经作了电磁辐射检测的尝试,没有成功^[6]。1960 年 Skorobogatov 报导了^[7]在变压器油中,用探针观察到空化引起的电脉冲。在 21.3 千赫(周期为 47 微秒)的超声场中,观察到的电脉冲宽度达 6—29 微秒,即占了声周期的一半以上,因而他的实验也没有能从相角关系上完全否定或肯定 Frenkel 的假说。

由上可见,有必要进一步研究空化的电磁辐射和光辐射,特别是两种辐射和气泡生长闭合的相角关系。为了避免超声空化所遇到的相角不单一困难,我们采用了 Chasterman-Schmid^[8,9]方法,来产生单一的、较大的空化气泡。气泡比较大(最大有 2 厘米直径),于是比较容易观测;气泡又是单一的,再加上生长闭合周期比较长,因而相角关系可以准确地确定。我们首先对单一气泡的生长闭合运动(以下简称运动)进行观测,并作了理论分析;然后对电磁

* 1964 年 5 月 6 日收到。

辐射和光辐射进行观测。对两种辐射观测的内容包括: 1) 进一步确定电磁辐射的存在*; 2) 比较电磁辐射、光辐射和气泡运动三者之间相角时间关系; 3) 研究了气泡闭合速度对两种辐射的影响; 4) 研究了几种液体(水, 变压器油, 二克分子浓度的食盐水溶液, 乙二醇, 乙醇)对两种辐射的影响; 5) 最后研究了几种气体(氢, 氧, 空气, 二氧化碳)对两种辐射的影响。

一、单一空化气泡生长闭合运动的观测和理论分析

1. 产生空化气泡及观测气泡运动的设备

Chesterman-Schmid 方法产生单一空化气泡的原理^[8,9]很简单。用一个上方有管的容器, 在容器内充装液体, 并使上方管内也有一定高度的液柱。在(弹簧)拉力作用下, 容器带着液体一起向上运动, 达到一定速度后, 迅速制动容

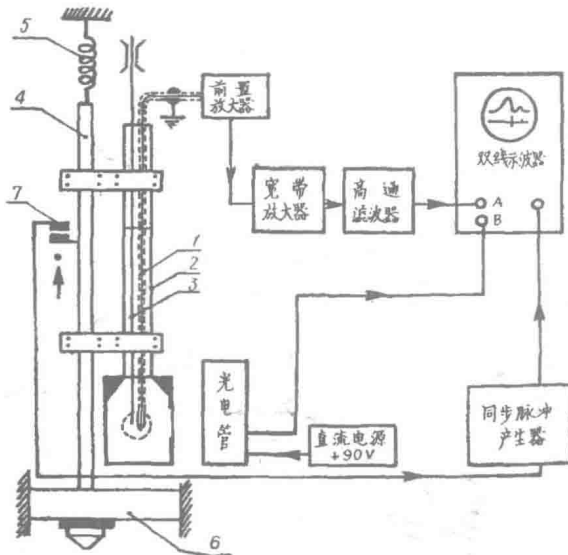


图1 观测气泡运动、电磁辐射以及两者之间相角关系的设备方块图

器, 这时预先注入容器中的气泡核(小气泡)在液柱向上的惯性力拉动下开始长大, 拉至最大半径后又闭合。

产生设备如图1左方所示。容器2是由透明的有机玻璃制成(容积为 $6 \times 6 \times 6$ 或 $5 \times 5 \times 5$ 立方厘米两种), 其上接的是内径为2.8厘米有

机玻璃管, 管中液柱高约45厘米。容器通过连杆与滑杆4相连, 滑杆上端被一弹簧5吊住。挡板6用以制动容器。7是机械同步接触开关。气泡核是通过注气管3注入的。注气用两种方法: 氢或氧用电解法在注气管下端产生; 空气或 CO_2 气体是把注气管上端开一小孔穴, 用压入法排开孔穴中液体而注入的。注入的气泡直径可在0.1到0.8毫米内变化。图中1是用于检测电磁辐射的探针。

为了提高容器中液体的“强度”, 避免在注入气泡核以外其他地方也被拉出气泡来, 水是蒸馏过的, 其他液体都经过滤, 以尽量除去液体中混杂的固体质点; 除乙醇外, 所有液体并都预先除气, 以尽量消除其他的气泡核。

为观测气泡运动, 我们用两种方法。第一种方法是用闪光灯对气泡在不同时间进行取样照相。闪光照明用普通照相用闪光灯, 闪光灯的闪光时间间隔(光强峰值降至峰值的 $1/3$ 时的时间间隔)约为0.03毫秒。拍照时取样时间选择用延时电路(延时时间从0.1毫秒到30毫秒, 连续可调)调节。照相用透射光及侧面散射光都可以。

第二种观测方法是用恒定光照射在容器上, 而在侧面用光电管(918)或光电倍增管(M12FS35)接收被气泡所散射的光。气泡大, 散射光也就强, 接收光电管的光电流也就愈大; 虽然其大小和气泡大小并不成比例, 但这样用示波器可以把气泡运动情况显示出来。

2. 观测的结果

(1) 闪光取样照相的结果 图2是典型的在侧面摄得的气泡照片(在气泡半径最大时附近)。由大量实验结果表明, 虽然一组照片的结果是许多次相同条件下气泡运动的不同瞬间取样结果, 但重复性还是比较满意的。我们曾在相同延时时间下照相, 多次重复的结果, 所得气泡的形状、大小颇为雷同。图3就是一组取样照相的结果, 容器制动时为时间起点,

* 我们观察电辐射的尝试, 是根据应崇福教授的建议在1960年开始的; 并根据他的建议采用电探针法, 当时我们还未见论文^[7]。

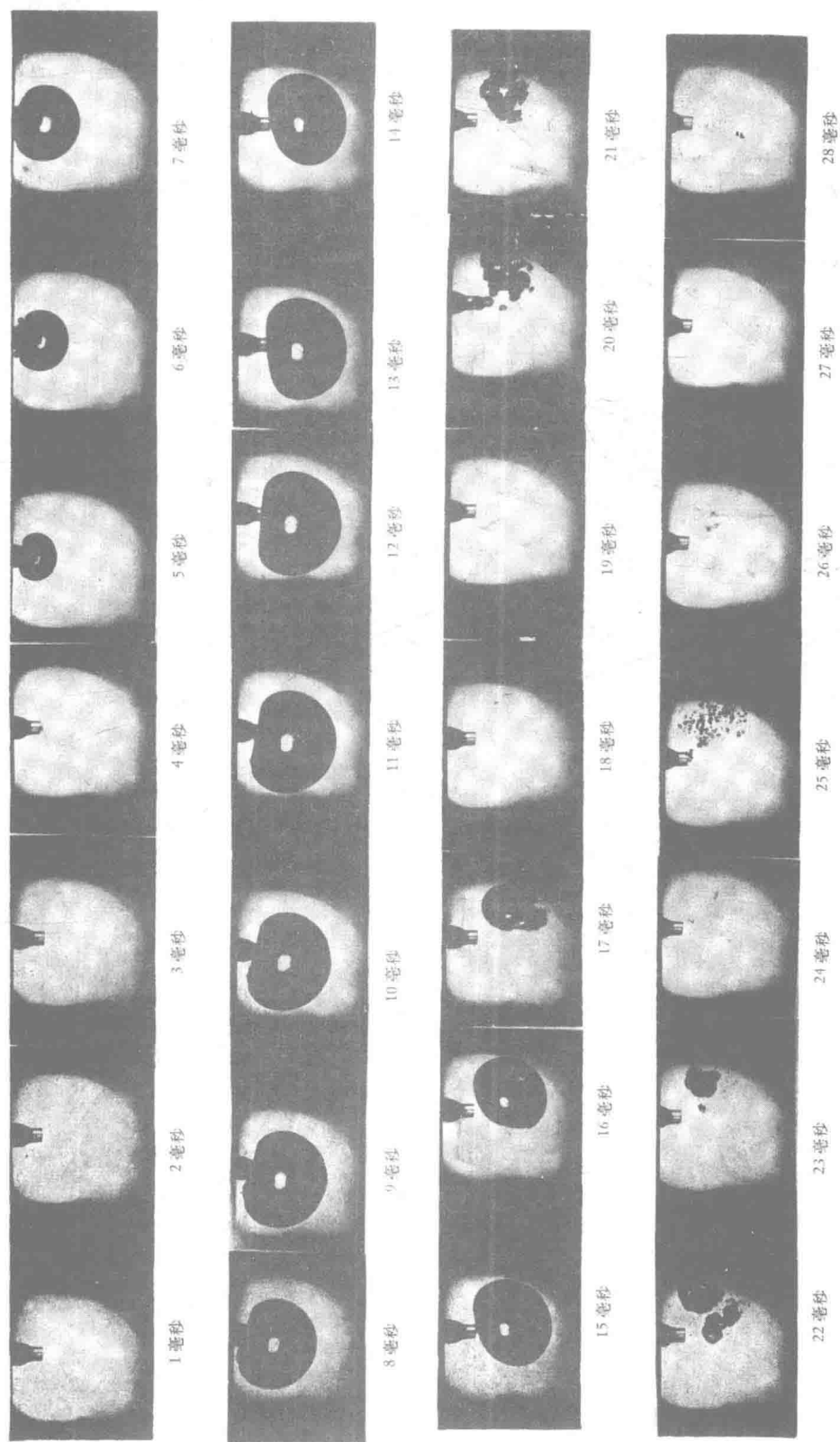


图 3 单一空化气泡生长闭合运动照片 (比例 1:1.2)