

声学研究的进展

Progress in Acoustics Research

马大猷

(中国科学院声学研究所, 中国科学院院士

北京 100080)

—

在近代科学中,声学是最早发展的学科。早在16世纪,伽里略(Galileo,以研究单摆振动著名的科学家)就曾对弦的振动、弦长与所发声音的音调的关系,音调与频率的关系和共振做了详尽的观察和推论。他还观察了用手摩擦酒盅边缘使之发声时,音调和水纹的关系和铲除铜板上的铜锈时所发出的尖叫音调与铲掉的铜锈所形成条纹距离的关系。根据他的讨论,可知他完全了解弦的振动频率依赖弦长、张力和密度的关系。他还曾企图用单摆的振动解释相差五度(频率2:3)的声音听起来和谐的原因。所有这些都是没有任何实验仪器的条件下进行的。这种使用简单仪器设备,甚至毫无仪器设备,取得重要研究结果,一直是声学研究工作特点。伽里略的研究结果于1638年在他的《关于两门新科学的对话》一书中发表,从此声学引起学术界的广泛注意。牛顿(Newton)于1687年在他的《数学原理》中发表了他以极巧妙的方法求得的恒温声速(当时还没有必需的数学工具)。1713年,泰勒(Taylor,以泰勒级数闻名的科学家)给出振动单弦的严格解。1759年欧勒(Euler)建立了声波传播的

定无机性的晶体。

事实上,强于范德华力的分子间二级相互作用并不限于氢键。 $S \cdots S$ 的范德华半径和为3.7埃,近十年来所发展起来的富含硫的有机导体和超导体中分子间 $S \cdots S$ 距离可短至3.3埃,其键的强度可以达到较弱的配位键的程度,且密布在二维甚至三维分子晶格中,并导致前线分子轨道充分重叠而形成导电能带,氢键的本质是静电相互作用,而 $S \cdots S$ 键的本质是 π 电子在分子间离域而能量降低的量子力学效应。富含硫的有机导体是非常典型的具有多方面无机品格(例如导电性、高熔点、有机溶剂难溶性)的有机晶体。近20年来在高科技光电

基础,从此经典声学走上了严谨的科学道路。声音的感知(听觉理论)则是19世纪最伟大的物理学家亥姆霍兹(Helmholtz)建立的。他在1865年《音的感知》一书中发表的用以他命名的共振腔做的听觉实验和由此推论的听觉物理过程和生理过程,完全被100年后的解剖、测试实验所证实。在从16世纪末起长达300年中,几乎所有伟大的哲学家、数学家和物理学家都曾在声学研究中做出重要贡献,也进行过热烈的争辩,形成百家争鸣的局面。19世纪末,瑞利(Rayleigh)以他的著作《声学理论》做了总结。时至今日,这部书仍是声学研究工作的重要参考书。从20世纪开始,虽然振动和声波基本理论(称为物理声学)的研究继续发展,但声学的主要发展则是不断和有关学科或技术结合,形成大量的边缘学科。按“物理、天文分类法”,声学有15个分支学科,涉及人类活动的各个方面。图1是1972年著名声学家林赛(Lindsay)绘制的,不甚完全,但揭示了一个现代声学的概念。这些分支继续发展,并且不断增加新的内容或新的分支。在本世纪下半叶中,有的分支或其一部分已成为工程技术,直接为生产服务。大部分分支则向纵深发展,进行基础性研究,并提出不少共同性的振动理论和线性、非线性声波理论问题,丰富了基础物理声学(包括固体

功能材料领域大放异彩的分子晶体大都具有分子间较强二级相互作用的结构特征。

现代化学和材料科学早已形成了各种有机—无机矿物盐、金属—有机配合物、元素有机化合物、电荷转移型有机自由基盐、电荷转移复合物等无机与有机相互渗透的研究分支。今后也必将有更多的本征性的有机与无机相结合的产物(例如有机性无机分子和无机性有机晶体)问世。这使我们有可能通过增加无机分子的有机性(即可塑性)和有机晶体的无机性(即分子间的强相互作用性)架起有机与无机彼此沟通的桥梁。(责任编辑 孙立明)

和液体中的传播问题),使声学 and 物理学其它方面(特别是凝聚态物理)更加接近。

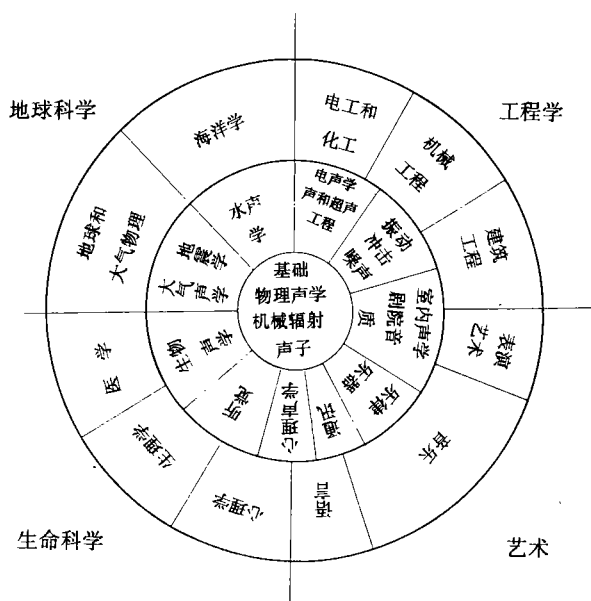


图1 声学科的边缘和外延

二

1. 物理声学

振动和声波的基本特性和效应是现代声学的共同基础。线性声学虽然已经过几百年的发展,但具体问题尚多,特别是涉及振动体的辐射和障碍物的散射和衍射等。过去只有对简单形状的确切解,可应用于流体、固体中的辐射和散射,但即使简单形状,理论也不完善。在我国非线性声学虽已有相当发展,但非线性驻波理论的研究才刚开始起步。非线性声波的效应,如辐射压力、声流、空化、凝聚等的机理和在特殊环境(高温、高压)下的规律仍有待于研究。振动涉及安全和噪声辐射,在大型、高速设备的发展中尤为重要,但有关的理论有待完善。这些问题对各分支的发展都是极端重要的。

2. 声学信号处理

信号处理在电子学中是成熟的技术,在声学中主要是如何应用。几乎声学各个分支都涉及信号处理,特别是时空信号的处理方法,如水声信号、超声信号、语音信号、有源控制信号、环境声学信号、地声信号、大气声信号等等,都需要处理,以了解和应用其有关物理过程和后果。此外,图样识别、自学习、自适应处理、声学反演、声学层析术、声全息处理等等都非常重要。

3. 海洋声学(声学海洋学)

海洋资源要比陆地资源丰富得多,但开发得不够。此外,海洋变化很大,海流、涡流等尺度很大,并

不断变化,影响气候变化。不但海洋中食物链、矿产等受其影响,远离海洋的人类也要受到影响。因此海洋研究对人类生活非常重要。可见光、电磁波等在海水所能传播的距离都极其有限。用船或卫星可以取得大量信息,但船只限于一时一地,而卫星只能观察海面。只有声波可以在海水中远距离传播。用声学方法可以大大推动海洋研究。例如,用声学方法可以研究海底,根据反射推出海底物质成分,可以探测鱼群的密度,直接用于渔业,也可以探测浮游生物的密度,估计海洋生物的繁殖趋向和海洋中整个食物链的变化。用声学层析术,以单频声源和简正波测量为基础,可求得声速分布的截面图。低频率声波在海洋中可传到极远的距离。SOFAR 系统用于海难呼救,对行驶安全起重要作用。在南印度洋设的赫德发射站,用 57 赫低频可在 18000 公里外收到(传播时间三个多小时),因而可算出深海声道内的平均声速。用这个系统可测得每年水温变化,准确到 0.01°C 。这种监测水温变化的办法,还要广泛应用,包括用于经过北极在内的声道,因为水温变化影响气温变化,影响海洋中浮游生物密度和海洋生物的繁殖,以及整个食物链。

4. 光声学和声致发光学

用脉冲激光照射固体或液体表面,可以在后者中产生声波,而用强声波在液体中可产生空化而发光。这是声光互相转换的两种方式,可用于物质研究,也用于物质的无损检测和光纤通信。激光照射可利用热效应,产生频率为脉冲调制频率的声波,频率几乎没有限制,不过一般转换效率较低,所得声波较弱。有人试验,使照射到水面的激光束在所需声波传播方向移动,光点的移动速度稍高于水中声波速度,这时所得到的关系就和电子学中行波管内电磁波与电子束的关系相似。激光的能量不断加强声波,估计可使 30 千赫高频声波传到 5~10 公里的距离。此项试验结果有广阔的应用前景。激光照射产生声波的另一个机理是直接利用激光的频率产生振动。一般用两束频率不同的激光的差频,这样可以在固体中产生频率为 $10^{10}\sim 10^{13}$ 赫的特超声,用以研究声子的运动。用极强激光照射,可产生达 1000 大气压的短脉冲。声致发光所需声场能量很小,由于空化气泡破碎而发射光量子,可能经过了 11 个数量级的放大,其机理、光谱等都尚待研究。光声学和声致发光学有实际应用价值,也是物质构造的重要研究手段。

5. 扫描声学显微镜

1949 年,发明家索柯罗夫(Sokolof)在“超声显微镜”一文中说:“超声显微镜可以在不透明的媒质中取得小物体的像和这种媒质中不纯的质点或杂质的像。”但是他从 1936 年提出超声显微镜的概念

起,几十年中并未能实现他提出的两项重要的应用,因为他无法将频率提高到所需要的值。一直到本世纪 60 年代中叶,薄膜换能器的出现,这才有了可能性。从 1974 年制出第一台扫描声学显微镜起,现在已有了很大发展。它的分辨率在室温下可达到 0.2 微米,在低温下达到 0.02 微米,理论上还可能高得多,完全可能超过光学显微镜。它的使用频率在微波范围,而技术基础在压电换能器和检测器。所用频率从在水中 3 兆赫(波长 500 微米)到氦中 8 吉赫(波长 0.03 微米),波长范围超过 10000:1。这相当于光学显微镜用微波,经过红外、可见光一直超过真空紫外光。扫描声学显微镜可用于各种物质结构和器件(如集成电路)的研究和检查。

6. 医疗和生物声学

超声诊断现在已是成熟的技术。B 超在与 X 射线层析术和核磁共振的竞争中处于有利地位,这是由于电子计算机的应用使声波传输、接收和显示过程都达到最佳状态,改进了超声成像的质量。超声三维显示正在发展,用换能器件在一面上扫描,以此取得二维图后,再建立三维图像。利用计算机建立三维图像,需要一组距离已知的截面图和不同组织可区别的特征。但后者是不存在的,因为各种软组织的特征无法分辨,因此 CT 与 MRI 技术不能直接移相于超声,但不同组织和液体间的界面还是明显的,以此为基础组建三维图像是成功的。此外微动部分(如心跳)还可以用多普勒方法分辨,更增加了三维显示的能力和可能性。体外激波碎石术(ESWL)治疗肾结石的效果很好,已用于临床,其确切机理和安全极限尚须研究。ESWL 用于胆结石还不成功,因为碎块太大,排泄不出。此外,生物和生物体的声学特性及其受声波的影响还有大量研究工作要做。

7. 噪声和噪声控制

噪声和噪声控制的研究目的是建立保证人们工作和生活的声学环境,是环境保护的重要方面。声源控制是从根本上控制噪声,同时也是发展工业的重要措施。例如,40 年代发展的涡轮喷气飞机载客不过 20 多人,噪声和振动却几乎令人不堪忍受,不可能成为大规模运输工具。经过不断改进设计,几乎每十年噪声降低十分贝(噪声强度减少到 1/10)。1988 年鉴定的空中客车 B320,载客 300~400 人,机舱中的噪声只和热闹的大街上差不多(84 分贝)。根据大量研究证明,一般铁路稍加改造,可把车速提高到每小时 200 公里,噪声和振动都在安全、舒适范围之内。现在欧洲 14 个国家的铁路局已共同协商,在 20 年内完成全部高速化改造,并联网(运货列车不在内,仍是每小时 90 公里)。磁悬浮列车试验已可达到 400~500 公里。所以噪声研究不但是环境保护问题,还关系到社会的巨大进步。

汽车研究也很受注意。从重工业设备、巨型机器直到家用电器,噪声和噪声控制的研究都很重要。

8. 室内音质

如果说噪声控制研究的目的是使人不受噪声伤害,音质研究则是使人的声环境舒适、安逸,有利于思考、学习、交谈、各种社会活动和文艺欣赏。一般体积小的房间内,基本要求是安静,控制外面噪声传入(用隔声措施)。学校教室和会议厅还要求把有益声音向听众反射,混响时间短。音乐的音域宽,动态范围大,所以音乐厅的音质要求更高,也是主要研究方向。根据白瑞奈克(Beranek)的广泛调查和实际比较,他认为有四种音乐厅设计可能达到良好音质。一种是传统的矩形设计;第二种是扇形设计、舞台上罩有罩顶和围墙;第三种是舞台在中央偏后,听众分区用板壁隔开,坐位按阶梯升高;第四种是杂技蓬形,顶棚用多块斜板合成。这四种设计都可能满足良好音质的因素要求。

9. 有源振动和噪声控制

产生一个相位相反的振动或噪声以消除或降低原有的振动或噪声的方法已发明了半个世纪多。只是近 20 年由于换能器、控制理论和计算机软件等方面的发展才使这项技术日臻完善。有源控制理论也有重大成就。现在对户外声源、通风管道和小尺寸的空腔等的噪声有源控制技术已比较成熟。室内或有限空间内有源噪声控制用简正波抵消方法已初步获得成功。这个原理用于振动控制也颇有前途。有人用圆筒模拟飞机,在其上适当加力以激发在某一频率范围内的简正振动,以抵消原有振动,效果很好,圆筒辐射的噪声也降低了。有源振动控制前景颇好,联合振动与噪声控制也颇有前途。飞机内部的有源噪声控制已取得相当成功,有些部位的噪声降低了 30 分贝。这些虽做了飞行试验,但离实用阶段尚远,设备重量是关键,换能器、放大器、控制器还需要有重大改进。

10. 听觉理论

听觉研究的一大特点是心理—物理实验的成功。改变物理量听取受试者的反映,以估计出他的心理量变化。根据这种实验的结果,19 世纪中叶亥姆霍兹提出耳蜗基底膜共振的理论,100 年后得到贝凯西(Bekesy)的解剖学证实。本世纪 20 年代富来彻(Fletcher)求得响度、音调等的主观标度也是用同样方法。近 20 年已证明基底膜共振后,随之引起机电正反馈(能量来源是新陈代谢)大大增加听觉的灵敏度和分辨力,以后发出神经脉冲,送入大脑。神经系统 and 大脑如何处理这些信息还在研究之中,最终目的是建立完整的听觉理论。听觉研究也可能是研究大脑功能的唯一道路,人们对此期望很大。

11. 自动语言识别

用机器自动识别和理解语言,这是人们长久的梦想。从20年代,人们研究电话的语言通信起,对语言的本质已有比较深刻的了解。从本质讲,人讲话不过是肺部、声带、舌、齿、唇和鼻腔的运动,每一部分动作都很慢,每秒钟不上十次,所以语言的信息量似乎不大。根据这种考虑,在本世纪30年代就制成了语音合成器和声码器。它经过不断改进和新技术的应用,已逐渐达到较高质量,在实际中使用。语言识别或理解最初觉得很简单,但一直不能实现。50年代有一些突破,但到60年并没有进展。到70年代,计算技术的发展和大规模集成电路出现后,美国国防部ARPA计划以数百万美元资助四个单位“攻关”,要求研制认人、有限词汇的识别系统,三个单位都失败了,只有Harpy成功,用的是简单分析方法。以后有大量用不同分析方法的报道,水平基本相同。80年代末又有了新突破:美国卡内基—梅伦大学的李凯夫开发的可识别以1000个词汇组成的连续语言的系统,正确率达94%。他所用的是隐藏马尔柯夫模型(HMM),三个词一次识别。这以后又出现大量HMM系统,但直到现在,水平并未提高。从过去发展情况看,语言识别不单纯是信号分析,还必须根据语言本身特性(语言学、语义学、语音分布规律等等)决定信号处理方法。若不依从语言规律;只当做一般信号处理,是不能取得进展的,过去两次突破完全说明这一点。现在一些国家决定以发展“口语系统”(SLS)为目标。要求该系统能够根据数据库内容提出的问题,正确理解,并做出反应。一旦不认人、无限词汇的语言识别和理解系统实现后,人们的社会生活将会发生根本的改变。

12. 热声学

1982年,惠梯雷(J. C. Wheatley)发现在驻波管内接近管端的 $1/4$ 波长的长度内放一摞薄片,在声波作用下,薄片两端产生温度差,接近管端处温度升高,远处温度降低,这就是热声效应。这给停止使用氟利昂后的致冷系统提供了应用前景。十年来,不但对热声现象本身增加了不少知识,对它的应用也做了大量工作。直接用上述发生热声效应的装置,在迭片的热端以冷却水导出热量,冷端接到水室就得到稍低于 0°C 的制冷系统。如果用级联的方法把几组迭片连起来可以得到较大温差。热声制冷器可能向低温发展,有些实验已达到液氮温度附近。利用逆作用,可以用温差产生声压。有一个实验,在四个大气压的氦气中产生了160分贝的声压(强度是1瓦/平方厘米)。另有一个实验,以液钠作媒质,在磁场中运动成为磁流体发电机。这些实验都是近几年进行的,目前功率尚小,只能在卫星上应用(在卫星上的磁流体电源还没有其它方法可以替代),但证明热电声效应的应用极其广阔,大有发

展前途。

13. 空间声学

在空间研究空气中的液滴和液体中的气泡,以及固体的特性和运动有很大意义。液滴的研究结果可以用在从水滴直到原子核的各种对象。液滴和气泡是传统的简单非线性系统,对它们的运动做理论和实验研究可了解混沌现象的演变过程。此外,大气中的水滴和海洋中的气泡也是影响世界气候变化的重要因素。在空间研究液滴、气泡和固体可避免容器的影响,特别是在纯金属、特殊合金和玻璃的冶炼中避免污染,在理论和应用上都很有意义。声学可提供在空间固定或运动的手段。声悬浮和旋转声场可使水滴悬浮并定在一点,也可以使之转动和移动振动(有人称之为声学镊子),以研究它的运动特性、形状变化、光学性质、凝聚时的详细过程等等。1992年7月王赣骏和陈翔曾做过这种实验。声悬浮在地面上也有重要应用,曾用声波使直径1厘米的钢球在空中悬浮。

三

以上只是简单回顾了声学的一些突出发展的方向,当然不是全部声学工作。但即使如此,也可以看出在这些方向上做出的独创性成果都具有重要的学术意义和实际应用意义。我们讲科学技术是第一生产力,声学研究工作完全当之无愧。声学是一门应用物理学,事实上其它应用物理学,以及应用化学、应用数学等等也都具有同样性质。重视和发展基础研究,主要力量应放在应用基础研究上,要求系统地、科学地进行工作,并取得独创性的重要实际成果。重复性的工作和重复性的成果在基础研究(纯粹的或应用的)中,一般是无意义的。因为基础研究的成果主要是新的科学知识,科学知识一经发表就成为公共财产,人人可以利用。所以,应用基础研究需要支持,也应严格要求。纯粹基础研究没有眼前的实际应用背景或目的,但要求可能更高。探索物质世界的规律可能十年甚至百年后才起实际作用,最初的放射性、电磁场、19世纪的声学等都是这种性质。基础研究的工作方法与应用基础研究相似,但对成果要求更高。这方面由于要求不同,一般仪器设备可能不够,因而要求重大投资,所以组织这方面的工作要非常谨慎,全面考虑。虽然美国经济发达,但在考虑超导超对撞机的建设时以其经费要求过高而决定停建,已投资20亿美元的设备要作废。此事对我国可为借鉴。对应用研究或技术开发工作的要求则不同,重复性的工作或重复性的结果完全允许,因为国外掌握的生产知识不能直接为我国所用。对这些工作的要求只是达到其目前所应的水平。

(责任编辑 肖庆山)