

从孤立波到非传播孤立子

王本仁

(南京大学声学研究所)

本文概述孤立波和孤立子的发现和发展过程。非传播孤立子的特征,以及它们在非线性和学科中的重要作用。

孤立波现象虽则出现得很早,但是到今天似乎应该这样说,它们是伴随着非线性性质的发展而日显重要。特别是近年来,越来越多的事实表明,孤立子和确定性混沌是两个在非线性问题上极其迅速发展的方向。且几乎涉及物理学的每一分支,诸如流体力学,光学,声学和等离子体物理等。也扩及化学,生物学及生态学。于是一门新的课程——“非线性物理”,正在逐渐从物理课程中

分离出来。到今天,一个物理学家可能说“世界是非线性的”。

一、孤立波地发现

由苏格兰科学家和工程师Scott Russell在1834年所偶然观察到在狭河道中前进的小船的船首,因被船推动而出现的大水堆。在船停下来后,它依然集聚成一平滑而轮廓分明的孤立波峰,急速离开船首,滚动着进行,并

表的应用显示了光明的前景。

5. 还有一种可能的应用就是用表面波抽头延迟线来做无线电编志器,为汽车或集装箱等商品编号,识别仪器向后发出一个脉冲信号,表面声波器件就能应答出一个码,以表示该汽车或该商品的编号。

四、结语

以上所述,表面声波器件大约有以下几个趋向:

1. 频率向高频移。以民用而论,近期内提高到400-600兆赫以至1000兆赫左右已是日益明朗化的需求。至于军用,最好提高到几千兆赫甚至几十千兆赫。

2. 降低滤波器的损耗。表面声波器件虽有优良的滤波功能,但其高损耗大大限制了它的应用。设法降低损耗同时保持其优良的滤波功能这个课题现在正是许多科学家在钻研的问题。

3. 提高表面声波振荡器的频率稳定度。寻找新材料、新切向以获得更高的温度稳定

性能一直是人们在研究的问题。

4. 由于对表面声波器件性能的要求愈来愈高,对二级效应的补偿,设计、制作提出了更严格的要求。

5. 封装的改进。

9. 研究性能可程序控制的表面声波器件。

7. 开发新的波型的表面声波器件。例如漏表面波、斯乐莱波等等。

8. 特别值得一提的是用表面声波驱动半导体中载流子的研究正在引起很大的注意。

总之,在近期内,表面声波器件还将继续发展,开拓新应用,并要求研究工作相应地解决问题,保证它们前进。

参 考 文 献

- [1] Hartmann C.S. Proc. of IEEE ultrasonics symposium, 1985
- [2] Bray, R.C Proc. of IEEE Ultrasonics Symposium, 1986 p'299

维持着一定的速度和不变的形状。Russell认为这种孤立的波动是流体运动中的一个稳定状态。并称它为“孤立波”。但是Russell的论断并未能使当时许多物理学家信服。从而在物理学界中引起了广泛的争论。如有名的流体力学家Stokes就对此存在怀疑。再如物理权威Airy的看法也是如此。而Russell则抱怨当时的数学家未能从已知的流体运动方程中预言出这一特殊现象。Russell自己则用他的孤立波理论于大气和太空，以预测地球大气层的厚度和宇宙的范围。这个争论一直延续了近60年之久，到1895年荷兰数学家 Korteweg 和他的学生 de Vries 对水波的运动进行较完整的分析，得到流体力学中著名的非线性方程——KdV方程，和相应的孤立波解。这样，争论才告结束。

至此，流体中的孤立波现象得到了承认。但是，在流体之外的物理领域中是否存在这样稳定、无奇异性和不扩散的解呢？这个问题一直到廿世纪初仍然是一个未解决的问题。

二、一个重要的实验和孤立子的诞生

在距Russell观察到孤立波近一个多世纪以后，1950年由Fermi—Pastu—Ulam

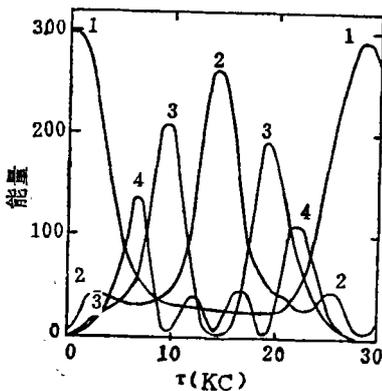


图1

在第一台大型电子计算机(Maniac1)上研究由64个质量和弹簧所构成的非线性谐振子链的振动。这样链也是今天描述声波在固体中传播的基本模型。如果初始有一个长波扰动(低频激励)加到某振子上，则由于系统的“弱非线性”，各模式间相互作用，按经典统计力学理论系统最终将被“热化”到能量均分，各态历经的状态。即任何微弱的非线性相互作用，可导致系统由非平衡状态向平衡状态过渡。这被称为热力学“第零条定律”。也是设想一个激发声波在固体中如何衰弱的过程。

但是实际数值实验的结果表明能量并不均分到所有的模式。而只留在初始激励振动和几个邻近的模式、在这些模式上的能量密度随时间变化有近乎周期的行为。即经过几万次振荡以后，又回复到初态。这种结果引起了人们对孤立波研究的极大兴趣！即孤立波不但在流体中存在，在固体中也同样可能存在。而这种非均分的结果是非线性方程在特定条件下得到孤立波解的前提，就是即使非线性耦合极弱，但它们必然存在。因为弱耦合并不等同于弱振幅。后来美国数学家Kruskal特别感兴趣于FPU问题中能量回归的问题。他和Zabusky与二个和多个KdV孤立波作相互碰撞的数值计算，发现孤波并不破碎和弥散，他们称这样孤立波为“Soliton”，是希腊文中的粒子。

严格意义下的孤立子是指“它是稳定的，似脉冲状区域化的孤立波，并且有特殊的相互作用性质使给出粒子特征”。所谓粒子特征就是在弹性碰撞后仍保持原有形状。但是各个不同的领域应用孤立子名称时，着重点似乎并不统一。因此各人所用的孤立子可能并非上述意义下的孤立子。

三、孤立子的特性^[3]

此处所说的奇异性质是指由于非线性引起的，而并非在数学意义上的奇异。

性质之一：在KaV孤立子中孤立子的传

播速度，波的宽度和振幅是相互联系的。如以

$$u(x,t) = \frac{3v}{2} \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{v}}{2} (x - vt) + \delta \right]$$

代表 x, t 平面上的一维孤立子。则可看出当 v 大时相应的振幅大，波宽狭和速度快。

性质之二：同向运动的KdV孤立子，在合成-相互作用碰撞的瞬间。它的合成振幅小于原来较大孤立子的振幅(见图2)但是在作

用后，二个孤立子除有相移外，仍保持和前相同情形。

所以，二个相同的孤立子，必然永远分离。因此，孤立子的这种行为很象费米子(Fermions)。

反向运动的二个Toda晶格孤立子，在合成相互作用的瞬间，它的振幅比二个孤立子振幅的和还要大(见图3)。

性质之三：一个初始激励波形，在传播过程中可衰变成多个孤立子以及辐射(它是

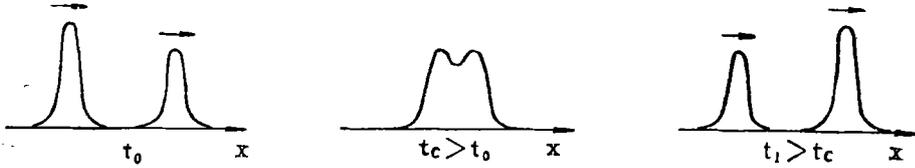


图2

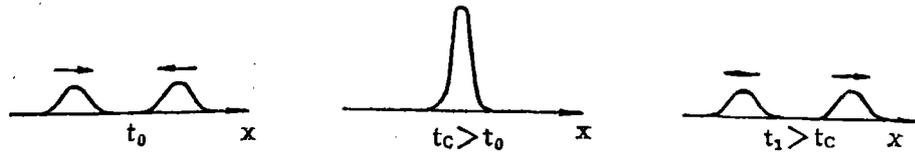


图3

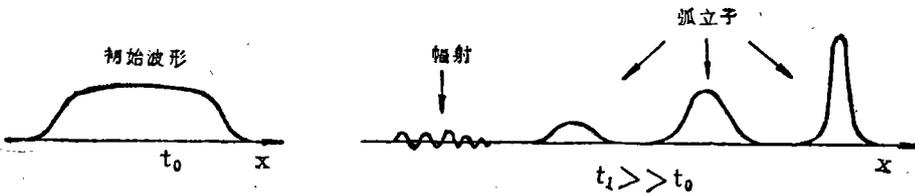


图4

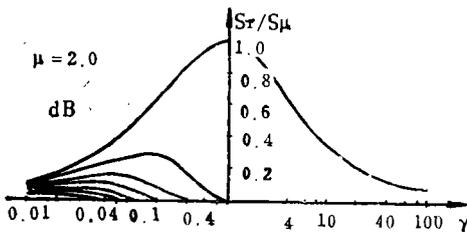


图5a

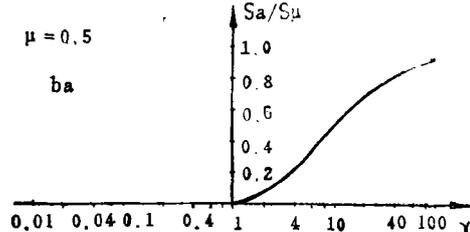


图5b

图5 $S_a = \sinh^2 \mu$ 是入射孤立子振幅, S_R 和 S_T 各为反射及透射孤立子振幅, r 是介面前后端的质量

比(= 后端/前端)。(每线相当于一孤子)

不含孤子的振荡尾部)(见图4)。这一特性的意义表明孤立子并非相应非线性方程的一种特解,而是任何波形都可以分解成孤立子和少量非孤子的剩余(它可能为零)来组成。

性质之四: Toda晶格孤立子在不同质量的界面处,出现的反射和透射的孤立子数,将随质量比和入射孤立子的振幅不同而变化。反射孤子数在0和1之间,透射孤子数至少为1,可能多于1(见图5)即相应于非线性性的界面产生非弹性碰撞的结果)。

四、典型的应用

1. KdV方程(描述单向传播的波)

浅水中的表面波,气泡和水混合体中的声波,非谐晶体中的长波,等离子体中的离子——声波,

2. Sine—Klein—Gordon方程(简记为SKG或SG方程)晶体中位错,一维Josephson线上的磁通,粒子物理和量子场论,超短光脉冲传播中的自透明问题。

3. 非线性Schrodinger方程)简记为NLS方程)

定深水中的重力波,光纤中超短光脉冲的传播,光波导的自陷,超导中的Ginzburg—Landau方程,固体中热脉冲传播和等离子体中的Langmuir波。

4. Toda晶格方程

会出现孤立子的非线性方程可以很多,自己可按照一定的规则来构造,但上述所遇到的方程,正是在实际场合所产生的重要方程。

孤立子在较长时间内是数学物理上的一个概念,但是它同样是一个物理实体。近见报道是发现“孤立子激光器”,他的发明者Mollenauer和提出及应用孤立子名称的Kruskal及Zabusky等一起获得1986年美国物理学会Franklin研究所的最高荣誉勋章。

五、为什么要研究非传播孤立子^[6]?

非传播孤立子是孤立子研究中的一种新形态。它有什么特征呢?

1. 它是非传播的,按照定深定边界的重力水表面波理论分析表明^[7-9]它遵从的是NLS类型的方程。这种方程的解一般应是传播的,可有包络型孤子等。只有在特殊条件下,才会得稳定解。然而,实验中参量激励下水槽中的孤子又常是稳定的。可使之运动,这需附加相应的激励(如用浆板来拨动,或使槽侧斜等)。

2. 随着水槽的激励频率和振幅的设定,椭圆余弦驻波消失,而孤立子出现。它可以看作是槽中不同模式水波竞争的结果。导致孤立子的状态。但是它在槽中出现的位置又是极为随机的。一经出现,就十分稳定。那末,促使它在何处出现的随机因素是什么?有无规律?(这一情形十分相似于Rayleigh—Benard实验中对流状态的形成)。

3. KdV方程的水波孤子只能单向运动,而Boussinesq方程孤子可作双向运动。现在的孤立子若它们二个是同极性的可作振荡运动,异极性的则保持平衡。这种振荡十分相似于磁力场中的粒子运动。

4. 在物理问题中,现在所谓的各种孤立子方程常是系统中既有色散和非线性,又有耗散和激励,甚至随机扰动等多因素综合问题的前级近似。在这样条件下,才能得出孤立子解。众所周知,孤子的出现是非线性和色散作用相互平衡的结果。但是色散就伴随着有耗散,实际系统也总有耗散,同样需要激励和耗散相平衡。各种因素的消长将破坏稳定而推入新的形态。如从孤立子到混沌态的过渡^[10],或者混沌到孤子态的再过渡。

非传播孤子的这些特征也促使它在不同

近代声学中的两个重要课题

钱祖文

(中国科学院声学研究所)

本文扼要地叙述了颗粒介质(包括雾、悬浮液体、孔多材料及气泡介质等)中的声传播的现状、要解决的问题及其应用。此外,还讨论了KdV孤波形成条件与定义,进一步述及小水槽中观察到的孤波。

一、颗粒介质中的声传播

所谓颗粒介质是指一种物质的颗粒弥散于另一种以连续状态出现的介质中,从而形成的一种复合介质。例如液体颗粒(如水滴、油滴等)悬浮于空气中所形成的雾状介质,固体颗粒悬浮于流体中所形成的悬浮液体或气溶胶,液体中出现空腔形成气泡液体,固体中出现液体或气体空腔成为多孔弹性介质等均属于这一范畴。

研究颗粒介质中声传播这个问题是极其重要的,不仅因为它在声学学科领域占有重要位置,而且由于它与国民经济关系极为密切。通过声场对物质的作用,可以作为超

声消雾和超声除尘,这对环境污染的治理有直接指导意义。另一方面,由于物质与声场的相互作用,通过对声场的测量可以反演出颗粒介质的性质和颗粒尺度及浓度。利用这个原理,人们制成了超声粒度浓度仪,用它来测量颗粒介质(如煤粉浆、矿砂以及海底表层沉积物等)的粒径分布及浓度,这些充分表明研究颗粒介质中的声传播对于能源利用、矿冶、海洋工程及环境科学等都有直接意义。

水雾是常见的一种颗粒介质,在其中传播的声波要遭到衰减,到目前为止,已被研究过的衰减机理有如下几个:粘滞热传导机理(高频)、液滴的蒸发与凝结引起的声衰减

门类的学科中找到重要的应用。如在大气科学中峰面是形成可以用孤立子来解释,但是这种孤立子是运动的。然而大气层中局部气流或云雨层往往又能维持在一定地域保持不动,而造成局部灾害性天气。这时运动孤立子将被非传播孤立子所替代。同样在天体物理中,木星上的红班的运动似也可以用非传播孤立子来描述,更为合适。

综上所述,可看到孤立子的研究是伴随着非线性物理学的发展。而对非线性物理研究的开展,将逐步揭示出孤立子和混沌,有序和无序,以及可积性和内在随机性之间关系。最后仅以本文向我的老师魏荣爵教授从教五十周年表衷心的祝贺。

参考文献

- [1] 魏荣爵, 物理学进展, 2(1982)390
- [2] Scott, A.C et al, Proceedings of IEEE, 61(1973)1443
- [3] Lauterborn, W Eortschritte der Akustik—FASE/DAGA 1982
- [4] 李振道, "场论和粒子物理学", 科学出版社, 1980年
- [5] Dodd, R.K et al Solitons and Nonlinear Wave Eguations Academic Press 1982
- [6] J. Wu et al Phys Rev. Lett 52(1984)1421
- [7] Miles W Fluid Mech 148(1984)451
- [8] 王本仁, 魏荣爵, 物理学报, 35(1986)1547
- [9] Wang BR Wei R.J. et al Chinese Phys.lett 3(1986)213
- [10] Wei R.J Proceedings of China—Japan Joint Coference on Ultrasonics, 1987 P.13—18