

احساس صوت

- < موج‌های صوتی از جمله‌ی انواع گوناگون موج‌ها به شما می‌رود که در اثر آشفتگی فشار در هر شارهی تراکم‌پذیر ایجاد می‌شود.
- < گوش انسان معمولاً فرکانس‌های بین 20 تا 20000 هرتز را می‌شنود.
- هر چیزی بالا یا زیر این محدوده، «فراصوت» یا «فروصوت» نام دارد.
- < امواج صوتی: امواجی هستند که گوش انسان می‌تواند به طور طبیعی آنها را بشنود. محدوده‌ی فرکانسی بین 20 تا 20000 هرتز است.
- * صدای صحبت کردن انسان (حدود 100 تا 300 هرتز برای صداهای مردانه و بالاتر برای زنانه)
- * صدای آلات موسیقی
- * صدای زنگ ساعت
- * صدای تلویزیون
- * آواز پرندگان
- * صدای باران و باد.
- < امواج فراصوتی: امواجی بسیار ظریف با انرژی نسبتاً بالا هستند که گوش انسان قادر به شنیدن آنها نیست. محدوده‌ی فرکانسی بالای 20000 هرتز است. بعضی از حیوانات مثل سگ، دلفین و خفاش این صداها را می‌شنوند.
- * پزشکی و تصویربرداری (سونوگرافی): برای دیدن جنین در شکم مادر یا بررسی اندام‌های داخلی از امواج فراصوتی استفاده می‌شود.
- * تشخیص عیوب صنعتی: می‌توانند ترک‌های ریز داخل قطعات فلزی را پیدا کنند. می‌توانند در جامدات نفوذ کنند.
- * دستگاه دفع حشرات: سوسک‌ها و موش‌ها با امواج فراصوتی فراری داده می‌شوند.
- < امواج فروصوتی: این امواج بسیار بم و سنگین هستند. گوش انسان آنها را نمی‌شنود، اما گاهی احساس فیزیکی آنها را (مثل لرزش بدن، فشار به قفسه سینه، حالت تهوع یا ترس) درک می‌کند. این امواج می‌توانند مسافت‌های بسیار طولانی را بدون تضعیف زیاد طی کنند.

موج‌های آکوستیکی تخت-گروه فیزیک دانشگاه قم-محمدرضا مظفری

* پدیده‌های طبیعی عظیم: زلزله، فوران آتشفشان، سونامی، رعد و برق شدید و ریزش بهمن قبل از وقوع خود امواج فروصوتی تولید می‌کنند. به همین دلیل از این امواج برای پیش‌بینی سونامی استفاده می‌شود.

* برخی از حیوانات بزرگ: فیل‌ها و زرافه‌ها از امواج فروصوتی برای ارتباط با هم در فواصل چند کیلومتری استفاده می‌کنند. نهنگ‌های عظیم‌الجثه نیز با فروصوت در اقیانوس با هم حرف می‌زنند.

* ماشین‌آلات سنگین: توربین‌های بادی غول‌پیکر، موتورهای جت و برخی کمپرسورها فروصوت تولید می‌کنند. گاهی ساکنان مناطق مسکونی نزدیک به توربین‌های بادی به دلیل این امواج دچار سردرد یا بی‌خوابی می‌شوند.

< برخلاف موج‌های یک بعدی (تارهای مرتعش، میله‌ها) و موج‌های دوبعدی (پوسته‌ها و ورق‌ها)، موج‌های آکوستیکی یک موج سه‌بعدی اند.

< موج‌های آکوستیکی طولی هستند (یعنی نوسان مولکول‌ها و امتداد رفت و برگشت آنها بر امتداد انتشار منطبق است).

< در شاره نیروی بازگرداننده‌ای از مقاومت در برابر تراکم آن ایجاد می‌گردد.

< موج در شاره‌ها بسیار پیچیده است. در اینجا قصد داریم از موج تخت که ساده‌ترین آنها است آغاز کنیم.

< خاصیت مشخص این موج آن است که فشارهای آکوستیکی، تغییر مکان ذرات، تغییر چگالی و غیره، در همه نقاط واقع در هر سطح عمود بر امتداد ارتعاش به یک فاز و به یک دامنه هستند.

< موج تخت را می‌توان بوسیله پیستونی که شاره درون لوله‌ای را به ارتعاش در می‌آورد ایجاد کرد.

موج‌های آکوستیکی تخت-گروه فیزیک دانشگاه قم-محمدرضا مظفری

رفتار الاستیکی شاره

< قصد داریم،

معادله انتشار موج تخت حاصل از شاره درون لوله به مقطع ثابت

به همان روش که

در مورد انتشار موج در میله

بکار بردیم، بدست آوریم

< رابطه بین تغییر فشار شاره و تغییر شکل شاره را با ترکیبی از معادلات خواص ترمودینامیک

شاره با در نظر گرفتن اصل بقای جرم بدست آورد.

< برای یافتن و حل معادلات مربوط به انتشار امواج تخت در امتداد محور x ، نشانه‌های زیر

را بکار می‌بریم:

$\mathcal{X}$: مختصات ذره مرتعش در وضع تعادل خود

ξ : تغییر مکان ذره نسبت به وضع تعادل در امتداد محور x

u : سرعت لحظه‌ای ذره مرتعش که برابر است با $u = \partial \xi / \partial t$

ρ : جرم ویژه لحظه‌ای شاره در هر نقطه

ρ_0 : جرم ویژه ثابت شاره در حال تعادل

s : تراکم در هر نقطه از شاره

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad \text{or} \quad \rho = \rho_0(1 + s)$$

P : فشار لحظه‌ای شاره در هر نقطه

P_0 : فشار ثابت شاره در حال تعادل

p : تغییر فشار شاره نسبت به فشار تعادل (فشار آکوستیکی)

$$p = P - P_0$$

c : سرعت انتشار

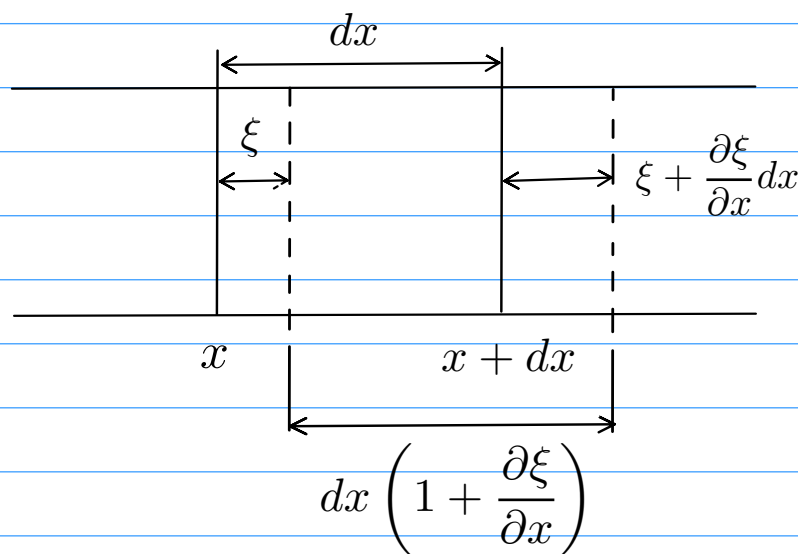
موج‌های آکوستیکی تخت-گروه فیزیک دانشگاه قم-محمدرضا مظفری

< مقصود از ذره حجم کوچکی از شاره است که می‌توان تغییرات آکوستیکی مانند فشار، چگالی و سرعت را برای تمام مولکول‌های آن در هر لحظه برابر گرفت.

< از اثر گرانش صرفه‌نظر می‌شود

< شاره را همگن، آیزوتروپ و کاملاً الاستیک (بدون آثار تلف‌کننده انرژی) فرض می‌کنیم.

< دامنه موج‌ها را کوچک فرض می‌کنیم. بدین ترتیب تغییرات چگالی نسبت به مقدار تعادلی اش جزئی در نظر گرفته می‌شود.



< هنگامی که سطح موج در امتداد محور x حرکت می‌کند، سطوحی از مولکول‌های شاره مجاور و موازی سطح موج از حالت تعادل خود تغییر مکان می‌دهند که می‌توان آنرا با

$$\xi(x, t)$$

نمایش داد.

< رابطه بین تغییر مکان و تغییر چگالی شاره

جرم لایه بین x و $x+dx$ در حالت تعادل: $\rho_0 S dx$

جرم لایه در اثر تغییر حجم که باعث تغییر چگالی نیز می‌شود: $\rho S dx \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}\right)$

< جرم لایه در اثر این تغییر ثابت باقی می‌ماند

$$\rho S dx \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}\right) = \rho_0 S dx \Rightarrow \rho_0 (1 + s) S dx \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}\right) = \rho_0 S dx$$

موج‌های آکوستیکی تخت-گروه فیزیک دانشگاه قم-محمدرضا مظفری

$$(1 + s) \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) = 1 \Rightarrow 1 + s + \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + s \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) = 1$$

< مقدار $\partial \xi / \partial x$ بسیار کوچک‌اند

$$s = - \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)$$

< خاصیتی دیگر شاره‌ها که در معادله موج دخالت می‌کند، خاصیت ترمودینامیک آن است که رابطه بین تغییرات فشار و چگالی را مشخص می‌کند.

$$\text{همدما : } \frac{P}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$$

$$\text{بی‌دررو : } \frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma$$

< انقباض و انبساط لایه Sdx ، با توجه به این که گرمای ناچیزی به لایه‌ی مجاور منتقل می‌شود، می‌توان یک فرایند بی‌دررو دانست.

< بطور کلی می‌توان فشار را قطع نظر از نوع فرایند بصورت تابعی از چگالی در نظر گرفت

$$P = P(\rho)$$

< با دیفرانسیل از تابع حالت شاره در نقطه‌ی تعادل (ρ_0, P_0) و استفاده از

فشار آکوستیکی $p = P - P_0$ و رابطه تراکم $\rho = \rho_0(1 + s)$ داریم

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 d\rho \Rightarrow p = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \rho_0 s$$

< $(\partial P / \partial \rho)_0$ ابعاد مربع سرعت دارد و آنرا با c^2 نمایش می‌دهیم

$$p = \rho_0 c^2 s$$

< اگر به جای s مقدار آن را $-(\partial \xi / \partial x)$ قرار دهیم

$$p = -\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

معادله موج تخت

< برآیند نیروی وارد بر دو سطح لایه Sdx

$$dF_x = \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] S = -\frac{\partial p}{\partial x} S dx$$

< قانون دوم نیوتن بر لایه Sdx به جرم $dm = \rho_0 S dx$

$$dF_x = dm \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \rho_0 S dx \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

بنابراین

$$-\frac{\partial p}{\partial x} S dx = \rho_0 S dx \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

برای $p = -\rho_0 c^2 (\partial \xi / \partial x)$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \Rightarrow -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \Rightarrow \boxed{c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}}$$

برای $\partial \xi / \partial x = -p / \rho_0 c^2$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) = \rho_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) \Rightarrow -\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)$$

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \Rightarrow -\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{p}{\rho_0 c^2} \right) \Rightarrow \boxed{c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}}$$

حل هارمونیک

$$c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$$\xi(x, t) = f_1(ct - x) + f_2(ct + x)$$

$$\omega = ck$$

پیشرونده پیشرونده

$$\xi(x, t) = Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)}$$

ضرایب A و B مختلط هستند

$$\text{پیشرونده} \quad \xi_+(x, t) = Ae^{i(\omega t - kx)}$$

$$\text{پسرونده} \quad \xi_-(x, t) = Be^{i(\omega t + kx)}$$

$$\xi(x, t) = \xi_+(x, t) + \xi_-(x, t)$$

$$\text{فشار آکوستیکی} : p = -\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$p = -\rho_0 c^2 [-ik\xi_+(x, t) + ik\xi_-(x, t)]$$

$$= i\rho_0 k c^2 [\xi_+(x, t) - \xi_-(x, t)]$$

$$= i\rho_0 c \omega [\xi_+(x, t) - \xi_-(x, t)]$$

$$= \rho_0 c \omega \left[\xi_+(x, t) e^{i\pi/2} + \xi_-(x, t) e^{-i\pi/2} \right]$$

$$p_{\pm}(x, t) = \rho_0 c \omega \xi_{\pm}(x, t) e^{\pm i\pi/2}$$

p_+ به اندازه $\pi/2$ جلوتر از ξ_+ p_- به اندازه $\pi/2$ عقب‌تر از ξ_-

$$\text{تراکم} : s = -\frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$s = -[-ik\xi_+(x, t) + ik\xi_-(x, t)]$$

$$= ik [\xi_+(x, t) - \xi_-(x, t)]$$

$$= k \left[\xi_+(x, t) e^{i\pi/2} + \xi_-(x, t) e^{-i\pi/2} \right]$$

$$s_{\pm}(x, t) = k\xi_{\pm}(x, t)e^{\pm i\pi/2}$$

s_+ به اندازه $\pi/2$ جلوتر از ξ_+ s_- به اندازه $\pi/2$ عقب‌تر از ξ_-

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} : \text{سرعت}$$

$$\begin{aligned} u &= [i\omega\xi_+(x, t) + i\omega\xi_-(x, t)] \\ &= i\omega [\xi_+(x, t) + \xi_-(x, t)] \end{aligned}$$

$$u_{\pm}(x, t) = \omega\xi_{\pm}(x, t)e^{i\pi/2}$$

u_+ به اندازه $\pi/2$ جلوتر از ξ_+ u_- به اندازه $\pi/2$ جلوتر از ξ_-

جواب حقیقی

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx) + B \cos(\omega t + kx)$$

$$p(x, t) = -\rho_0 c \omega A \sin(\omega t - kx) + \rho_0 c \omega B \sin(\omega t + kx)$$

$$s(x, t) = -kA \sin(\omega t - kx) + kB \sin(\omega t + kx)$$

$$p(x, t) = -\omega A \sin(\omega t - kx) - \omega B \sin(\omega t + kx)$$

سرعت انتشار صوت در شاره

$$c = \sqrt{\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_0}$$

گاز ایده‌آل و فرایند بی‌دررو

$$\text{فرایند بی‌دررو: } \frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma$$

موج‌های آکوستیکی تخت-گروه فیزیک دانشگاه قم-محمدرضا مظفری

$$P(\rho) = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma$$

$$\frac{dP}{d\rho} = \gamma \frac{P_0}{\rho_0} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma-1}$$

$$(\rho, P) = (\rho_0, P_0) : \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 = \gamma \frac{P_0}{\rho_0}$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0} = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}}$$

$$\text{گاز ایده‌آل} : \frac{P}{\rho} = \mathcal{R}T$$

$$(\rho, P) = (\rho_0, P_0) : \frac{P_0}{\rho_0} = \mathcal{R}T$$

$$c = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}} = \sqrt{\gamma \mathcal{R}T} = \sqrt{\gamma \mathcal{R}273} \sqrt{\frac{T}{273}}$$

$$T = 273 + t$$

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad , \quad c_0 = \sqrt{\gamma \mathcal{R}273}$$

$$t \ll 273 : c = c_0 + \frac{c_0}{546} t$$