طراحی هورن
(Horn Design)

ارائه دهنده:

پیمان مصدق

دانشگاه صنعتی اصفهان

پاییز 1399

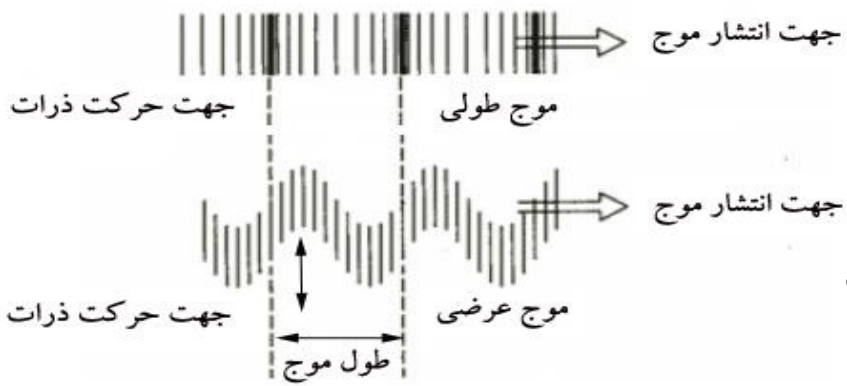
امواج صوتی

انواع موج‌های صوتی

- ✓ موج طولی

موج عرضی

موج ریلی (سطحی): ترکیب موج طولی و عرضی

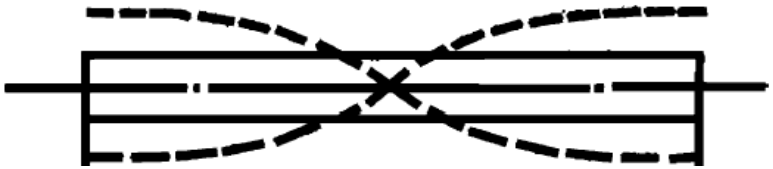


موج‌های صوتی از لحاظ تحریک

- ✓ ایستا

متحرک

منابع متداول تولید صوت



کروی

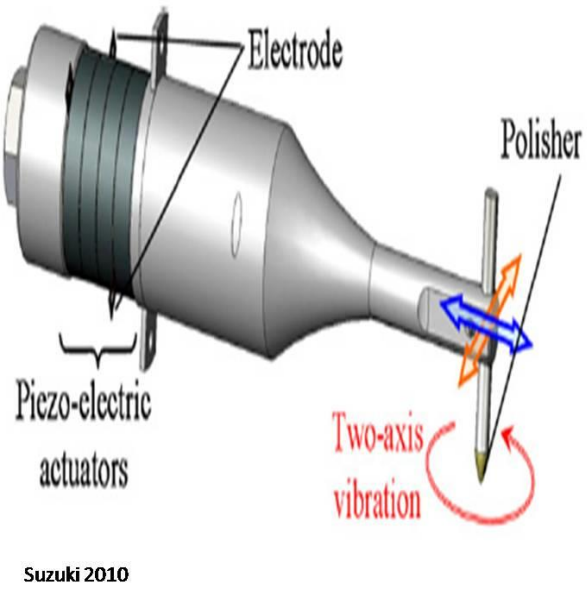
- ✓ مسطح

امواج آلتراسونیک

100 kHz -20 kHz

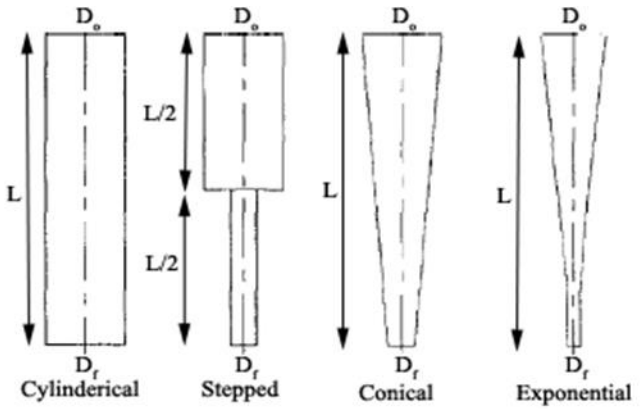
هورن

هورن یکی از اجزای مورد استفاده در فرایندهای آلتراسونیکی می‌باشد که وظایف مهمی از جمله انتقال ارتعاشات و تقویت دامنه ارتعاشات را بر عهده دارد.



Suzuki 2010

هورن‌ها عموما در چهار دسته کلی دسته‌بندی می‌شوند



هندسه هورن

هورن استوانه‌ای

به لحاظ ساخت نسبت به دیگر طرح‌ها ساده‌تر می‌باشد

در جاییکه نیاز به تقویت دامنه ارتعاش نباشد بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد

به دلیل عدم تغییرات سطح مقطع از استحکام کافی برخوردار بوده و ارتعاشات را خوب منتقل می‌کند.

دامنه موج تولیدی در انتهای هورن با دامنه موج تولید شده توسط ترنسدیوسر مساوی می‌باشد

هورن پله‌ای

مزیت آن نسبت به هورن استوانه‌ای تقویت دامنه ارتعاش می‌باشد.

پله ایجاد شده باعث تغییر ناگهانی سطح مقطع شده و تمرکز تنش شدیدی ایجاد خواهد کرد.

تغییر سطح مقطع ناگهانی باعث برگشت درصدی از موج تولید شده توسط ترنسدیوسر به خود ترنسدیوسر شده که باعث افزایش دمای مجموعه می‌شود.

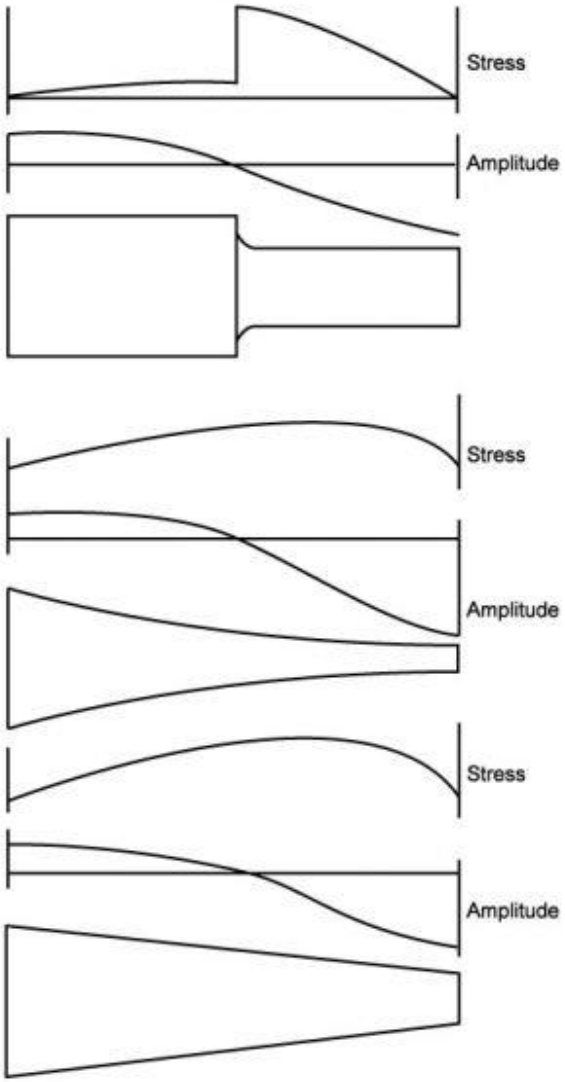
هورن‌های مخروطی و نمایی

نسبت به دو هورن قبلی عملکرد بهتری دارند و به صورت گسترده در صنعت استفاده می‌شوند.

ارتعاشات را به خوبی منتقل کرده و به دلیل عدم بازگشت امواج ،در حالت ایده‌آل شرایط دمایی می‌باشد.

مزیت‌های هر یک از دو هورن قبلی را یعنی تقویت دامنه ارتعاش و انتقال خوب ارتعاشات را با هم دارند.

تنش‌های اعمالی



تنش‌های اعمالی به هورن نباید از استحکام تسلیم جنس مورد استفاده تجاوز نماید.

جنس هورن

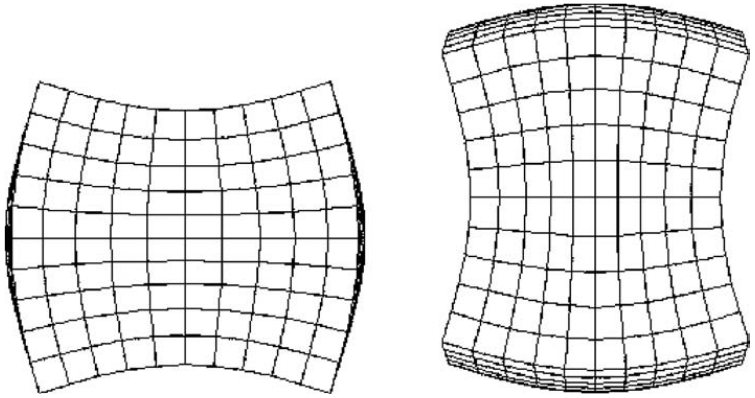
- ✓ خواص مکانیکی (تحمل تنش تسلیم)
- ✓ خواص آکوستیکی (انتقال خوب موج)

معمولا آلومنیم گرید ۷۰۰۰ و تیتانیوم مناسب برای ساخت هورن میباشند

قطر هورن

محاسبه قطر هورن

لازم است بزرگ‌ترین قطر هورن از یک چهارم طول موج کوچک‌تر یا مساوی آن باشد.
در صورت بزرگ‌تر بودن از این مقدار ارتعاشات عرضی در هورن قابل توجه بوده که در نهایت باعث کاهش انرژی در نوک هورن می‌شود.



تغییر ناهمگن هورن در
حالت کشش و فشار کامل

برای بدست آوردن قطر ماکزیمم هورن ابتدا سرعت صوت محاسبه می گردد.

$$c=\sqrt{(E/\rho)}$$

سپس طول موج با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\lambda=c/f$$

سرانجام حداکثر قطر هورن به طریق زیر مشخص می گردد.

$$D_max=\lambda/4$$

نحوه طراحی

روش‌های طراحی هورن

- ✓ روش تحلیلی
- ✓ روش تجربی
- ✓ روش عددی

روش تحلیلی

روشی است که بر اساس معادله موج پایه‌گذاری شده است.

در این روش ساده‌سازی‌هایی اعمال می شود از جمله اینکه

- ارتعاشات از نوع سینوسی هستند
- طول هورن ضریب صحیحی از نصف طول موج می‌باشد
- ارتعاش ایجاد شده در هورن از نوع طولی می‌باشد

معایب روش

حل معادلات بسیار پیچیده و وقت‌گیر می‌باشد

حل معادلات برای شکل پروفیل‌های ساده امکان‌پذیر بوده و برای شکل پروفیل‌های پیچیده و گوناگون نیاز به برنامه‌نویسی کامپیوتری و حل به کمک کامپیوتر می‌باشد

ساده‌سازی‌ها در نهایت منجر به جواب‌های نه چندان دقیق می‌شود

نحوه طراحی

روش تجربی و آزمایشگاهی

این روش بر اساس ساخت و تست هورن توسط ژنراتور می‌باشد

- ✓ سرعت انتشار موج در جنس مورد نظر با استفاده از روابط موجود محاسبه گردیده
- ✓ با در نظر گرفتن بسامد طراحی مورد نظر، طول موج محاسبه شود
- ✓ طول تقریبی هورن را با استفاده از طول موج انتشار یافته در آن محاسبه می شود
- ✓ هورن با استفاده از ماشینکاری مجدد تصحیح شده تا بسامد مورد نظر حاصل گردد

معایب

زمان بر بودن و دقت نامناسب

رسیدن به بسامد طراحی مورد نظر برای کل مجموعه ارتعاشی بسیار مشکل می‌باشد

روش عددی

یکی از موثرترین و کارآمدترین روش‌ها برای طراحی هورن.

با این روش می‌توان هورن‌ها با ابعاد و شکل پروفیل‌های متفاوت و ترکیبی از آنها را تحلیل مودال کرد

این روش از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده

نسبت به سایر روش‌ها راحت‌تر بوده و وقت کمتری را می‌گیرد

روش تحلیلی

معادلات ارتعاشی حاکم بر هورن:

حل‌های خاص برای معادله هورن به روش تحلیلی معادله هورن بر حسب جابجایی ذره، ، عبارت است از و برحسب سرعت:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}-\frac{1}{S}\frac{\partial S}{\partial X}\frac{\partial \zeta}{\partial X}-\frac{\partial^2\zeta}{\partial X^2}=0$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\frac{1}{S}\frac{\partial S}{\partial X}\frac{\partial V}{\partial X}+\frac{\omega^2}{c^2}V=0$$

X فاصله از یک طرف هورن نسبت به موقعیت مرجع بر حسب متر،
S سطح مقطع هورن در فاصله X بر حسب متر مربع، ω بسامد زاویه ای $(2\pi f)$،
f بسامد بر حسب هرتز وc سرعت صوت در هورن بر حسب متر بر ثانیه

می‌توان از ضریب پوآسون در مواقعی که قطر هورن کوچک‌تر از ۲۰% طول موج باشد صرف نظر کرد. نادیده گرفتن ضریب پوآسون منجر به محاسبه طولی بزرگ‌تر نسبت به طول تشدید واقعی هورن می‌شود.
تغییرات نیرو و دما نیز باعث تغییر در بسامد می‌شوند. به همین دلیل بیشتر سیستم‌های آلتراسونیک برای کاربردهای توان بالا می‌توانند در یک رنج گسترده‌ای از بسامدها کار کنند تا بتوانند تغییرات ناشی از نیرو و هورن را جبران کنند

هورن استوانه‌ای

برای هورن استوانه‌ای: تغییرات سطح مقطع صفر است.

$$\frac{\partial S}{\partial X} = 0$$

حل معادله بر حسب جابجایی ذره،

$$\zeta = \left[A\cos\frac{\omega X}{C} + B\sin\frac{\omega X}{C}\right]\cos(\omega t)$$

و بر حسب سرعت ذره،

$$V = -\omega\left[A\cos\frac{\omega X}{C} + B\sin\frac{\omega X}{C}\right]\sin(\omega t)$$

برای یک مود تشدید طولی نصف طول موج،

$$\zeta = \zeta_m \cos\left(\frac{\omega X}{C}\right)\cos(\omega t)$$

هورن استوانه‌ای

$$\zeta = \zeta_m \cos\left(\frac{\omega X}{C}\right)\cos(\omega t)$$

و سرعت:

$$V = -\omega\zeta_m \cos\left(\frac{\omega X}{C}\right)\sin(\omega t)$$

که ζ_m ماکزیمم جابجایی و $X = 0$ر می باشد.

شتاب در هر نقطه در امتداد هورن،

$$a = -\omega^2\zeta_m \cos\left(\frac{\omega X}{C}\right)\cos(\omega t) = -\omega^2\zeta$$

تنش در امتداد محور برای هورن استوانه‌ای در حالت تشدید:

$$\sigma = \frac{jE}{\omega}\frac{dV}{dX}$$

و یا

$$\sigma = jE\frac{\omega\zeta_m}{C}\sin\left(\frac{\omega X}{C}\right)\sin(\omega t)$$

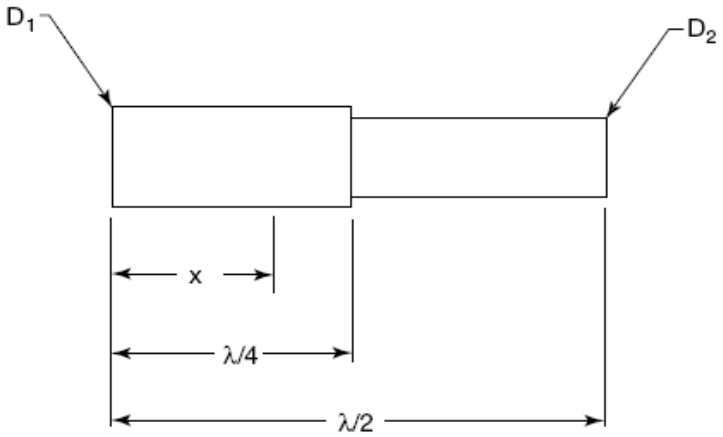
که $\omega\zeta_m$ ماکزیمم سرعت و $X = 0$ر اتفاق می افتد، Eمدول یانگ.

در یک هورن استوانه‌ای ماکزیمم تنش در وسط هورن اتفاق می‌افتد.

هورن پله ای

هورن پله‌ای

برای هورن پله‌ای که پله در وسط هورن اتفاق می‌افتد، رابطه زیر برقرار است



$$\frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

که ζ_1 جابجایی ذره در $X = 0$ ، ζ_2جابجایی ذره در $X = l$ ، V_1سرعت ذره در $X = 0$، V_2سرعت ذره در $X = l$، S_1مساحت سطح مقطع در$X = 0$ و S_2 مساحت سطح مقطع در $X = l$ می باشد.

هورن پله ای

برای مقادیر $X \leq \lambda/4$ جابجایی ζ_x عبارت است از:

$$\zeta_x = \zeta_1 \cos\left(\frac{\omega X}{C}\right)\cos(\omega t)$$

و V_x،

$$V_x = -\omega\, \zeta_1 \cos\left(\frac{\omega X}{C}\right)\sin(\omega t)$$

،a_x

$$a_x = -\omega^2 \zeta_1 \cos\left(\frac{\omega X}{C}\right)\cos(\omega t)$$

هورن پله ای

و برای مقادیر $\lambda/4 < X \leq \lambda/2$، جابجایی، ζ_x،

$$\zeta_x = \zeta_2 \cos\left[\frac{\omega}{c}(l - X)\right]\cos(\omega t)$$

و سرعت V_x،

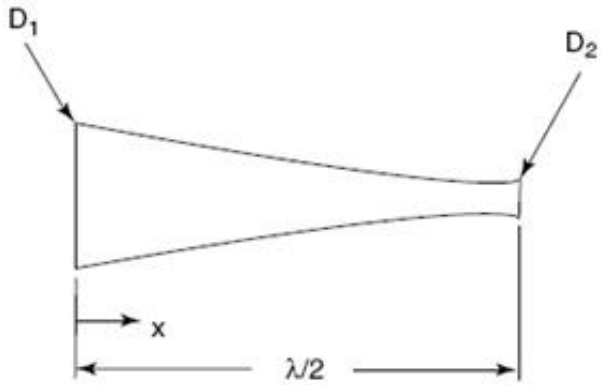
$$V_x = -\omega\zeta_2 \cos\left[\frac{\omega}{c}(l - X)\right]\sin(\omega t)$$

ماکزیمم تنش در وسط هورن یا همان پله $(X = \lambda/4)$ اتفاق می‌افتد:

$$\sigma = E\frac{\omega\zeta_2}{c} = E\frac{\omega}{c}\frac{S_1}{S_2}\zeta_1$$

هورن نمایی

هورن نمايي



تابعي كه هندسه يک هورن نمايي را نشان مي‌دهد عبارت است از:

$$S = S_0 e^{-\propto x}$$

که $\propto$، ضریب مخروط $[(1/l)\ln(S_0/S_l)]$ و S_0 مساحت سطح مقطع در انتهای بزرگ‌تر هورن می‌باشد. معادله هورن به معادله،

$$\frac{d^2V}{dX^2} - \propto \frac{dV}{dX} + \frac{\omega^2}{c^2}V = 0$$

تبدیل می‌شود.

هورن نمایی

با حل معادله:

$$V = V_0 \left[\cos\frac{\omega X}{c'} - \frac{\propto c'}{2\omega}\sin\frac{\omega X}{c'}\right] e^{\propto x/2}$$

که

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\propto^2 c^2}{4\omega^2}}}$$

جابجایی ذره ζ،

$$\zeta = \zeta_0 \left[\cos\frac{\omega X}{c'} - \frac{\propto c'}{2\omega}\sin\frac{\omega X}{c'}\right] e^{\propto x/2}$$

شتاب ذره a،

$$a = \frac{dV}{dt} = -\omega^2$$

و یا،

$$a = -\omega^2\zeta_0 \left[\cos\frac{\omega X}{c'} - \frac{\propto c'}{2\omega}\sin\frac{\omega X}{c'}\right] e^{\propto x/2}$$

و تنش σ،

$$\sigma = \frac{jE}{\omega}\frac{dV}{dX} = -j\frac{E}{\omega}V_0\left(\frac{\omega}{c'} + \frac{\propto^2 c'}{4\omega}\right)e^{\propto x/2}\sin\frac{\omega X}{c'}$$

ماکزیمم تنش در جایی اتفاق می‌افتد که $ds/dX = 0$ و موقعی است که،

$$\tan\frac{\omega X}{c'} = -\frac{2\omega}{\propto c'}$$

و طول هورن برای نصف موج، l،

$$l = \frac{\pi c'}{\omega} = \frac{c'}{2f}$$

Principle Of USM

Design of horn:

Uniform Bar Horn:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right) = C^2\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right) \qquad \frac{E}{\rho} = C^2 \qquad (1)$$

$$\omega = \frac{n.\pi.C}{l} = \frac{n.\pi.\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{l} \qquad n = 1,2,3,.... \qquad (2)$$

$$\lambda = C.T = \frac{C}{f} \qquad \lambda = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{f} \qquad (3)$$

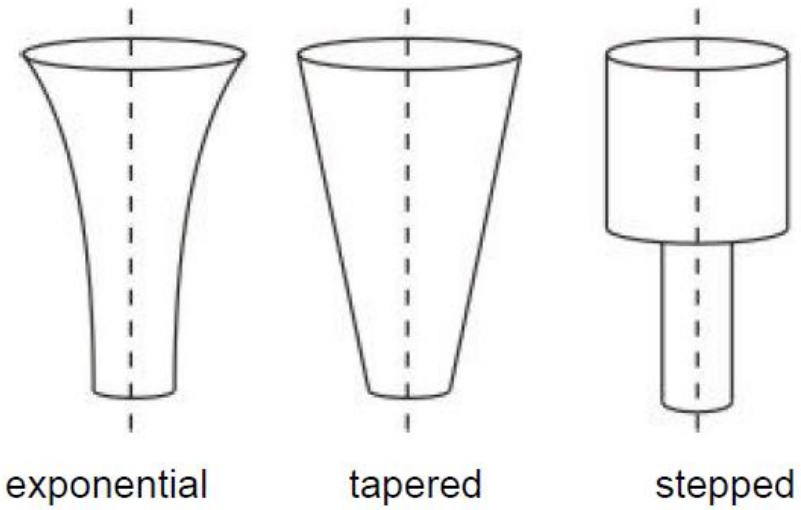


Fig4. Different Horns used in USM

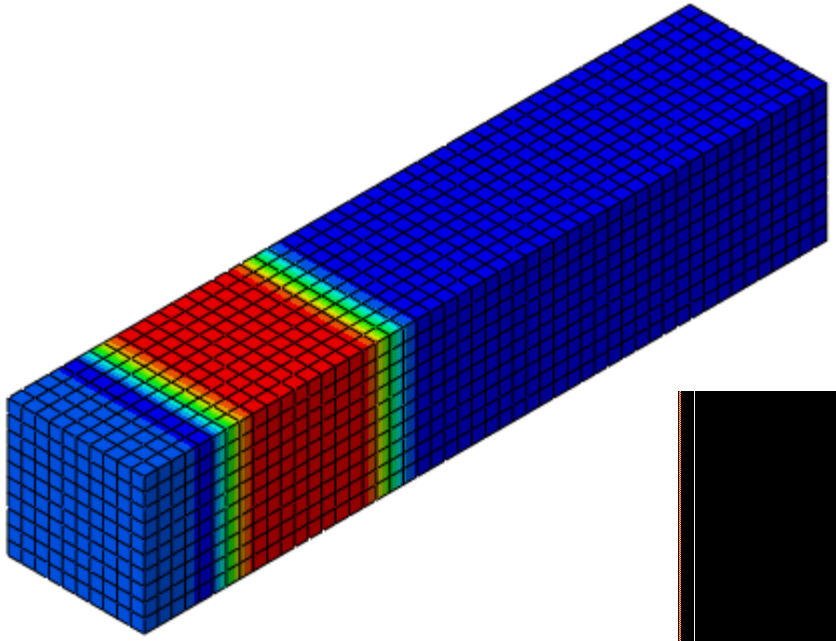
Exponentially Tapered Horn:

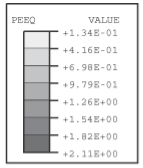
$$\left(\frac{d^2 u}{dt^2}\right) - 2\beta\left(.\frac{du}{dx}\right) + K^2 u = 0 \qquad (4)$$

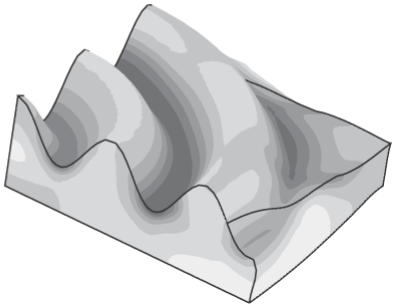
$$k = \frac{\omega}{c} \qquad A = A_0 e^{-2\beta x}$$

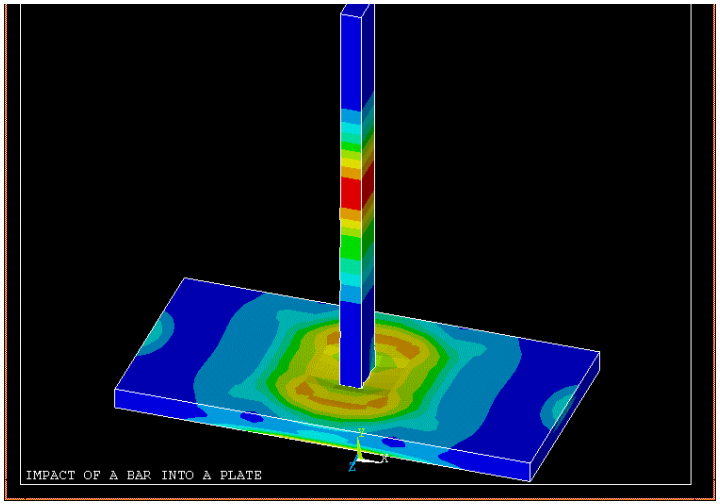
$$\lambda = \frac{\frac{C}{\sqrt{(1-\frac{\beta^2}{K^2})}}}{f} = \frac{\frac{C}{\sqrt{(1-\frac{\beta^2 C^2}{\omega^2})}}}{f} \qquad (5)$$

روش حل عددی









STEP: Linear perturbation

روش حل عددی

معادله تعادل یک المان در مدل اجزا محدود:

$$P^N - I^N = M^{NM}\ddot{u}^M$$

P^N بردار نیروهای خارجی

I^N بردار نیروهای داخلی

$M^{NM}\ddot{u}^M$ بردار نیروی حاصل از اینرسی ماده

به طوریکه

$$I^N = \int \beta^N : \sigma \, dV$$

$$\dot{\varepsilon} = \beta^N \dot{u}^N$$

V حجم مدل

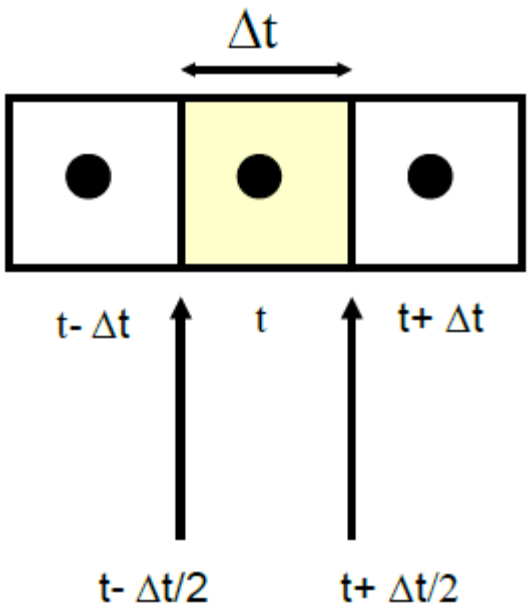
$\beta^N(x)$ ماتریس تغییر کرنش بر حسب جابجایی

از طرفی سرعت و فرکانس عبارت است از:

$$\omega_{\max} = 2\frac{c}{l} \qquad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

روش حل عددی

$$\ddot{u}^N\big|_t = [M^{NM}]^{-1} \cdot (P^M - I^M)\big|_t .$$



$$\dot{u}^N\Big|_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \dot{u}^N\Big|_{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left(\frac{\Delta t\big|_{t+\Delta t} + \Delta t\big|_t}{2}\right)\ddot{u}^N\big|_t ,$$

$$u^N\big|_{t+\Delta t} = u^N\big|_t + \Delta t\big|_{t+\Delta t}\dot{u}^N\Big|_{t+\frac{\Delta t}{2}} .$$

روش حل عددی

خلاصه ای از روند حل عددی

۱) محاسبات نقطه ای

الف) معادله دینامیکی

$$\ddot{u}^N\big|_t = [M^{NM}]^{-1} \cdot (P^M - I^M)\big|_t,$$

ب)انتگرال گیری صریح در بازه زمانی مشخص

$$\dot{u}^N\Big|_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \dot{u}^N\Big|_{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left(\frac{\Delta t|_{t+\Delta t} + \Delta t|_t}{2}\right)\ddot{u}^N\big|_t,$$

$$u^N\big|_{t+\Delta t} = u^N\big|_t + \Delta t|_{t+\Delta t}\dot{u}^N\Big|_{t+\frac{\Delta t}{2}}.$$

۲) محاسبه المانی

الف) محاسبه تغییرات کرنش به کمک نرخ کرنش

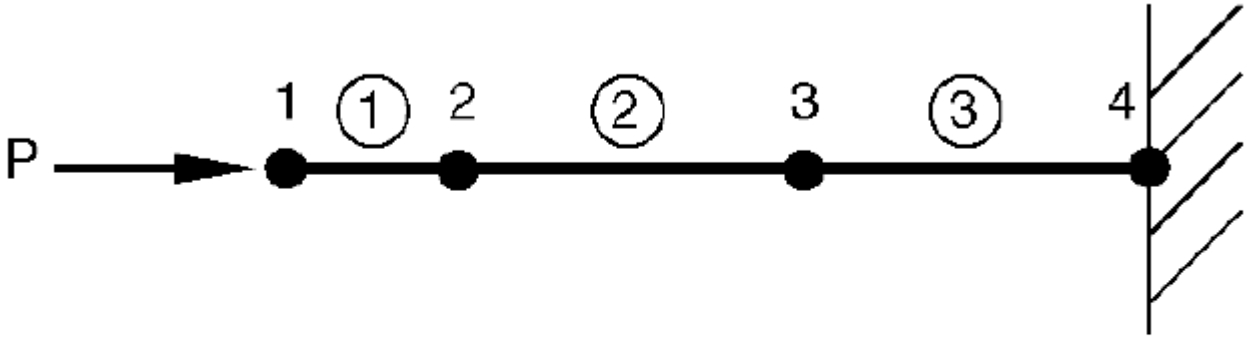
ب) محاسبه تنش توسط معادله ساختاری

۳) بازگشت به مرحله اول و تکرای روند حل برای بازه بعدی

نظر

روش حل عددی

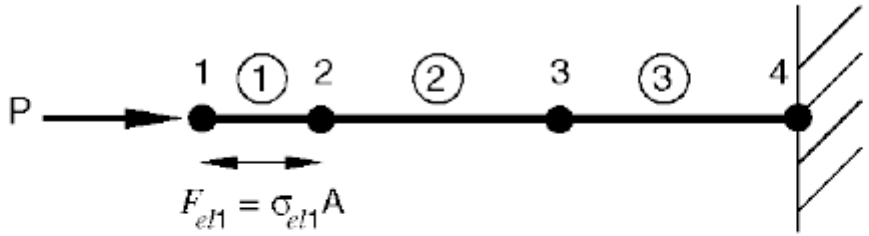
مثال یک بعدی از انتقال موج در ماده



$$\ddot{u}_1 = \frac{P}{M_1} \Rightarrow \dot{u}_1 = \int \ddot{u}_1 dt \Rightarrow \dot{\varepsilon}_{el1} = \frac{-\dot{u}_1}{l} \Rightarrow d\varepsilon_{el1} = \int \dot{\varepsilon}_{el1} dt$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{el1} = \varepsilon_0 + d\varepsilon_{el1} \Rightarrow \sigma_{el1} = E\varepsilon_{el1}$$

روش حل عددی



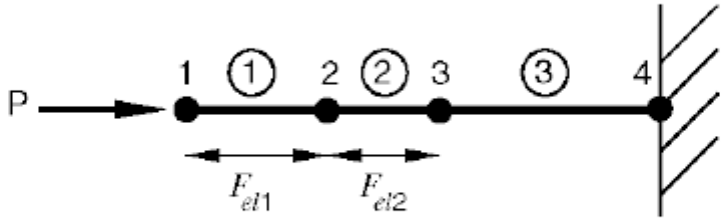
$$\ddot{u}_1 = \frac{P - F_{el1}}{M_1} \Rightarrow \dot{u}_1 = \dot{u}_1^{old} + \int \ddot{u}_1 dt \qquad \dot{\varepsilon}_{el1} = \frac{\dot{u}_2 - \dot{u}_1}{l} \Rightarrow d\varepsilon_{el1} = \int \dot{\varepsilon}_{el1} dt$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{el1} = \varepsilon_1 + d\varepsilon_{el1}$$

$$\ddot{u}_2 = \frac{F_{el1}}{M_2} \Rightarrow \dot{u}_2 = \int \ddot{u}_2 dt$$

$$\Rightarrow \sigma_{el1} = E\varepsilon_{el1}$$

Configuration of the rod at the beginning of Increment 2



Configuration of the rod at the beginning of Increment 3

Simulation of a horn in ABAQUS