

Programozható irányítóberendezések és szenzorrendszerek - Közegáram mérésének elvei és műszerei

Kiss Bálint

Irányítástechnika és Informatika Tanszék,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2016. március 5.



Két előadás a témában

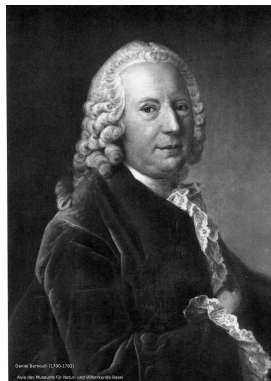
Az előadások célja

- 1 Bemutatni az áramlásmérés szerepét az ipari gyakorlatban.
- 2 Megadni az áramláshoz köthető mérendő mennyiségeket.
- 3 Megismertetni az áramló közegek viselkedésének leírásához használható jellemzőket és alapvető összefüggéseket (viszkozitás, Reynolds-szám, Newton viszkozitási törvénye, kontinuitási egyenlet, Bernoulli-egyenlet)
- 4 Megmagyarázni az alkalmazható mérési elveket, előnyeiket, hátrányaikat, a kapcsolódó alkalmazástechnikai megfontolásokat.



Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogatkihasználásos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Daniel Bernoulli
(1700-1782)



Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogatkihasználásos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Bevezetés

Folyamatokhoz anyagtovábbítás

- 1 nagynyomású gőzt turbinákhoz
- 2 folyékony földgázt/oxigént tartályba
- 3 vért, oldatot terápiához
- 4 nyers olajat finomítóba
- 5 üzemanyagot motorba
- 6 olvadékot öntvénykészítéshez
- 7 sört/bort/pálinkát (palackozáshoz)

Áramló közegek mérése szükséges

- 1 elszámoláshoz
- 2 vezérléshez, szabályozáshoz
- 3 üzemvitelhez



Bevezetés

Mi kell az áramlás meghatározásához?

Áramlási viszonyok + Érzékelési elv + Számítások

Áramlási viszonyok

- áramló közeg (víz, olaj, földgáz, vízgőz, sör, stb.) tulajdonságai (viszkozitás, sűrűség)
- környezeti tulajdonságok (nyomás, hőmérséklet)
- áramlást befolyásoló mechanikai konfiguráció (csőátmérő, csőfelület érdessége, csőalak, torlóelemek)
- ezek kölcsönhatásai (hőmérsékletfüggő viszkozitás, felületi érdességtől függő áramlási profil, stb.)



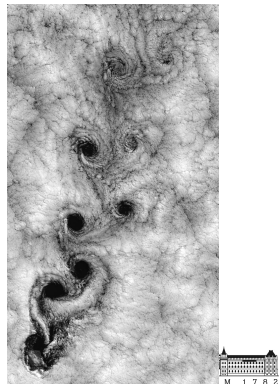
Bevezetés

Mi kell az áramlás meghatározásához?

Áramlási viszonyok + Érzékelési elv + Számítások

Érzékelési elv

- Időegység alatt mechanikailag kiszorított térfogat
- Nyomáskülönbség (DP)
- Hőmérsékletkülönbség (DT)
- Rezgési fáziskülönbség
- Frekvencia különbség (DF)
- Örvényleválások számlálása
- stb.



Bevezetés

Mi kell az áramlás meghatározásához?

Áramlási viszonyok + Érzékelési elv + Számítások

Számítások eredménye

- pillanatnyi térfogatáram a keresztmetszeten [m^3/h]
- pillanatnyi tömegáram a keresztmetszeten [kg/s]
- pillanatnyi sűrűség a csőszakaszban [kg/m^3]
- pillanatnyi közegsebesség [m/s]
- összegzett átáramlott térfogat [m^3]
- összegzett átáramlott tömeg [kg]

A számítások a mérési elvből következnek és csak adott áramlási viszonyok mellett pontosak.

Bevezetés

- ➊ Összenyomható közegek esetében a térfogatot (vagy térfogatáramot) **szabványos nyomáson és hőmérsékleten** adjuk meg (STP - standard temperature and pressure) ún. normálköbméterben (Nm^3).
- ➋ Az STP értékeket szabványok rögzítik, amelyek (szervezetként, országonként, régióként) eltérhetnek. Adott Nm^3 értéknek nincs jelentése, ha nincs megadva a hozzá tartozó STP.
- ➌ Adott műszer esetében a számított normálköbméterhez tartozó STP érték helyességéről meg kell győződni. Ha szükséges, akkor az elszámolási szerződésben adott értékhez kell igazítani. Egyes műszerekben az STP választható, illetve a számítás piacfüggő lehet!
- ➍ Gáztechnikai normál állapot Magyarországon (MSZ2373 és egyben ISO13443): 101325 Pa (1 atm) és 288,15 K (15°C - világ-középhőmérséklet) - ezen adják meg a földgáz köbméterének fűtési értékét is (v.ö. gázszolgáltatási szerződések).
- ➎ STP az IUPAC szerint: 100000 Pa és 0°C
- ➏ STP a NIST (USA) szerint: 101325 Pa és 20°C



Bevezetés

Intelligens áramlásmérők piaca

- 2014-es jelentés.
- Intelligens mérő: érzékelők + beágyazott feldolgozó elektronika
- Globális piac 2020-ban: 7098,79 M USD (becsült)
- Átlagosan 5,7%-os évi növekedési ráta az 2014-2020 időszakban
- Legnagyobb várható növekedési régió: **APAC**
- Legnagyobb várható növekedést mutató mérési elv: ultrahang, vertex, Coriolis



Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai**
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogatkiszorításos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Áramlás leírása

Fizikai mennyiségek 1

- v - áramlási sebesség [m/s]
- ρ - sűrűség [kg/m^3]

Fizikai mennyiségek 2

- p - nyomás [$Pa = \frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$]
- T - hőmérséklet [$^{\circ}C$]

Megjegyzések

- Az áramlási jelenségek, avagy mozgásban lévő kontinuum anyag (csepfolyós vagy légnemű közegek) viszonyainak leírása az áramlástanhoz (fluid dynamics) tartozik.
- Az áramlástanhoz tartozik még az áramló közeg és a határoló elemek (csőfal), szűkítő elemek, torlóelemek (szárny, perem, stb.) közötti kölcsönhatások leírása is.
- Adott áramlási konfigurációban és általános esetben v , ρ , p , T egyszerre idő- és helyfüggő.



Áramlás leírása

Stacionárius áramlás

v , ρ , p , T időben állandó (a térben még változhat)

Összenyomhatatlan közeg áramlása

Az áramló közeg összenyomhatatlan, ha sűrűsége a vizsgált térrészben jó közelítéssel állandó, azaz $\frac{D\rho}{Dt} = 0$ (teljes derivált, mivel ρ függhet T -től, p -től).

Folytonosság (kontinuitás, tömegmegmaradás) tétele

Szövegesen

Tömeg nem keletkezik és nem tűnik el. Tekintve egy A felülettel határolt V térrészt a sűrűség a beáramló és a kiáramló tömegek különbsége miatt változik. (Összenyomhatatlan közeg esetében a be és kiáramló tömegmennyiség megegyezik.)

Egyenlettel

Vegyük észre, hogy egy infinitezimális dA felületen átáramló tömeg a $\rho \cdot v \cdot dA$ szorzattal adható meg. Ekkor

$$-\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \int_A \rho \cdot v \cdot dA$$

Ennek differenciális alakja:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla v = 0$$

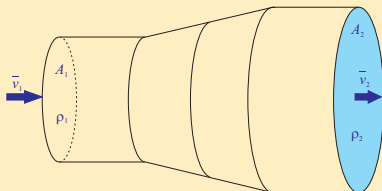
Folytonosság (kontinuitás) tétele

Folytonossági egyenlet

Előző fóliáról:

$$-\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \int_A \rho \cdot \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}$$

Változó átmérőjű csővezetékben



(diffúzor elem)

Feltételezés

A be- és kilépő felületeken az átlagsebesség rendre \bar{v}_1 és \bar{v}_2 . Az áramlás stacionárius.

Kontinuitási egyenlet csővezetékben

Vizsgáljuk az A_1 és A_2 felületek által határolt csőszakasz térfogatát. Ekkor $\rho_1 \bar{v}_1 A_1 = \rho_2 \bar{v}_2 A_2$

Következmény ($A_i = r_i^2 \pi$)

Összenyomhatatlan közegnél a sebesség a csőátmérők négyzetének arányában változik: $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 \frac{D_1^2}{D_2^2}$

Szilárd testek és folyadékok: egy lényeges különbség

Súrlódás és viszkozitás

- Nyírófeszültség (terhelés) hatására a szilárd testek rugalmassági tartományukban deformálódnak. A deformáció és a terhelés viszonyainak lineáris közelítésű leírása a **Hooke-törvény**, (benne a Young-modulus). A jelenséget felhasználtuk erőméréshez, nyomásméréshez. A Young-modulus az anyag merevségre jellemző mennyiség (általános esetben tenzor).
- A folyadékok is deformálódnak, de nem nyerik vissza eredeti alakjukat, "merevségük" általában nulla.
- Folyadékok esetében a terhelés és a deformáció **sebessége** között írható fel összefüggés.

Határfelületen: tapadási törvény

Szilárd test és folyadék érintkezésénél a relatív sebesség nulla.

Newton viszkozitási törvénye

Tapasztalat

- A víz "könnyebben" folyik, mint a fogkrém és a méz. A víz kevésbé viszkózus anyag.
- A viszkozitás és a sűrűség különböző fogalmak. (A sűrűség áramlás nélkül is értelmezett.)

Szöveggel

A viszkozitás az áramló közeg belső súrlódási tényezője. A közeg "ellenáll" annak, hogy benne egyes rétegek között relatív sebesség alakuljon ki, azaz a relatív sebesség fenntartásához külső erőhatás szükséges.



Newton viszkozitási törvénye

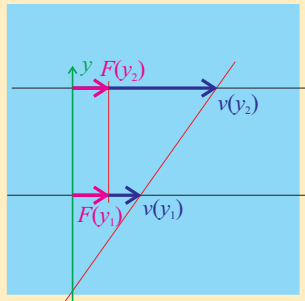
Egyenlettel

Tegyük fel, hogy egy áramló közeg áramlási sebessége egy A felületen v és a sebesség a felület környezetében, egy arra merőleges y irányban változik. Akkor az áramlási sebességgradiens fenntartásához szükséges erőt megadó kifejezés

$$F = \mu A \frac{\partial v}{\partial y}$$

A μ együttható értéke az anyagra jellemző dinamikus viszkozitás. Izotropikus közeg esetében μ minden irányban azonos.

Illusztráció (1DOF)



Mértékegység

A μ dinamikus viszkozitás mértékegysége: $[kg/ms]$

Newton viszkozitási törvénye

Megjegyzések

Ez lineáris közelítés. Newtoniaknak nevezzük azokat a közegeket, ahol ez a viszkozitási törvény jó közelítéssel érvényes.

Kinematikai viszkozitás

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Egysége m^2/s vagy St (Stokes).

$1 \text{ cSt} = 1 \text{ cm}^2/s$.

Folyékonyság

A folyékonyság a viszkozitás reciproka.



Euler, Navier, Stokes és Bernoulli

Euler-egyenlet (súrlódásmentes eset)

A **súrlódást elhanyagoljuk**, a közeg **összenyomhatatlan**. Adott pontban a közeg gyorsulása a nyomásgradienstől és valamely külső erőter irányától (pl. gravitáció) függ.

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{1}{\rho} \nabla p$$

Áramvonal

Adott ponton áthaladó áramvonal a v sebességmező egy integrálgörbéje, azaz egy olyan vonal, amelynek minden pontjában az érintője egybe esik a közeg adott pontban vett sebességének irányával.

Áramvonalak és idővonalak

Euler, Navier, Stokes és Bernoulli

Navier-Stokes egyenlet (súrlódásos eset)

A közeg **összenyomhatatlan**. Adott pontban a közeg gyorsulása a nyomásgradienstől, valamely külső erőter irányától (pl. gravitáció) és a sebességgradienstől függ.

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v$$

Megjegyzések

- 1 A sebesség növekedésével az áramlás rendezetlenné (gomolygóvá), turbulenssé válik.
- 2 Rendezett áramlásnál a súrlódási erők dominálnak, gátolják örvények kialakulását.
- 3 Az ipari gyakorlatban közegek szállításakor alacsony sebességet szoktak alkalmazni, mert kisebb teljesítményű szivattyúkra van szükség és kisebb a súrlódási veszteség is.



Lamináris és turbulens (gomolygó) áramlások

lamináris (rendezett) áramlás

turbulens (gomolygó) áramlás

- A gomolygó áramlásban a súrlódási veszteség nagyobb, ezért az ipari gyakorlatban kerülendő.
- Egyes (gyorsan terjedő) mérők torlóttesttel keltenek örvényeket (eddy) egy rövid szakaszon és azokat számolják (arányos sebességgel). Ezeket később vizsgáljuk.
- A turbulencia környezetében nincsen stacionárius áramlás.
- A turbulens áramlás kialakulása nem csak a közeg sebességének köszönhető.



Reynolds-szám

Szöveggel

A Reynolds-szám egy áramlási konfigurációra jellemző, dimenziómentes mennyiség, melynek értékéből az áramlás viselkedésére lehet következtetni. Például: lamináris vagy turbulens áramlás alakul-e ki.

Egyenlettel

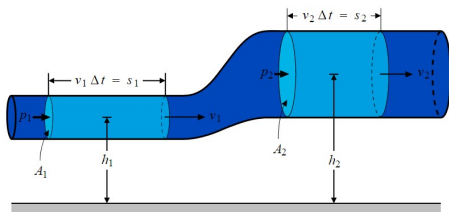
A Reynolds-szám a tehetetlenségi és a viszkozus erők nagyságának hányadosa (v.ö. Navier-Stokes egyenlet). Csőáramlás (d - csőátmérő) esetében

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{\rho v d}{\rho \nu} = \frac{v d}{\nu}$$

Tapasztalat

Csőáramláskor turbulencia akkor alakul ki, ha $Re > 2300$.

Euler, Navier, Stokes és Bernoulli (folytatás)



Bernoulli-egyenlet

A korábbi feltételezések esetén egy áramvonal minden pontjában

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = C \qquad \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gh_2$$

Bernoulli-egyenlet csővezetékben

Bernoulli-egyenlet

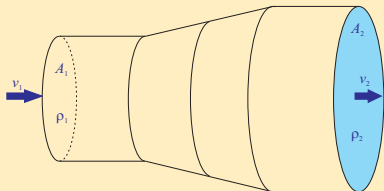
Előző fóliáról:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gh_2$$

Feltételezés

Az áramlás stacionárius, a közeg összenyomhatatlan (ρ állandó), belső súrlódásokat elhanyagoltuk.

Változó átmérőjű csővezetékben



(vízszintes diffúzor elem)

Bernoulli-egyenlet

Mivel $h_1 = h_2$ és $\rho_1 = \rho_2 = \rho$

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

$$\sqrt{v_1^2 - v_2^2} = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}$$



Bernoulli-egyenlet csővezetékben

Bernoulli-egyenlet

Mivel $h_1 = h_2$ és $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, így a korábbiak szerint $\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$ és

$$\sqrt{v_1^2 - v_2^2} = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}$$

Megjegyzések

- 1 A fenti egyenlet mutatja a **nyomásváltozás** és az áramlási sebesség-változás közötti összefüggést vízszintes csőben (+ feltételezések).
- 2 A nyomás mérésére ismerünk eljárásokat. Ha a nyomást folyadékoszlop magasságból számoljuk ($p_i = \rho g h_{p,i}$), akkor a fenti egyenlet

$$\sqrt{v_1^2 - v_2^2} = \sqrt{2g(h_{p,2} - h_{p,1})}$$

alakú (ρ nélkül). A gyakorlatban a nyomást deformáció alapján mérjük, így ρ is szükséges.



Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés**
- 4 Térfogat kiszorításos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Venturi-cső



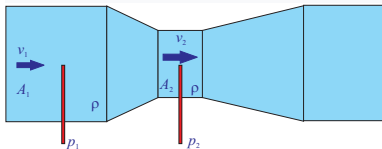
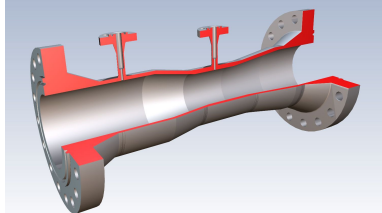
Giovanni Battista Venturi
(1746-1822)

Megállapítás

Mindent értünk, hogy megvizsgáljuk az áramlásmérés egyik módszerének alapeszközét, a Venturi-csövet.



Venturi-cső



Feltételezések

- ❶ Stacionárius áramlás
- ❷ Összenyomhatatlan közeg
- ❸ Elhanyagolható belső súrlódás (kis viszkozitás)
- ❹ Áramlási sebesség a keresztmetszeten jól közelíthető egy átlag értékkel

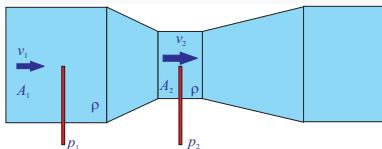
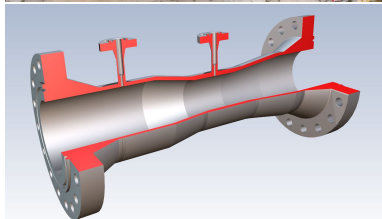
Egyenletek

Bernoulli és kontinuitás:

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Venturi-cső



Egyenletek (folytatás)

Átrendezve v_2 -re vagy v_1 -re:

$$v_2 = \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

$$v_1 = \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

A térfogatáram - q_v

Ismert, hogy $q_v = A_1 v_1 = A_2 v_2$

$$q_v = \frac{A_1 A_2 \sqrt{2}}{\sqrt{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \sqrt{p_1 - p_2}$$

Venturi-cső - megjegyzések

Kihasznált tulajdonság - DP

Az áramlási sebesség arányos a nyomáskülönbség gyökével, illetve fordítottan arányos a sűrűség gyökével.

$$q_v \propto \sqrt{\Delta p}$$

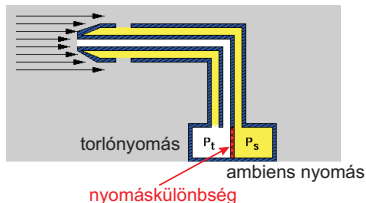
Fontos **korlátozások**

- 1 A Venturi csőnél (és egyéb nyomáskülönbségen alapuló térfogatáram mérésénél) az áramlási sebességet valójában csak egy ponton (kis felületen) mérjük.
- 2 Ebből a teljes keresztmetszeten időegység alatt átáramló térfogat csak megfelelő áramlási körülmények között kalibráció nyomán számolható.
- 3 A módszerrel tömegáramot csak akkor lehet meghatározni, ha a sűrűség ismert.

Pitot-cső (tórloácső)

Az eszköz

A Pitot-cső szintén nyomáskülönbségen alapuló eszköz, áramlás sebességének mérésére. Elterjedt a repülőgépiparban.



Megjegyzések

Egy pontban, egy irányban méri a közeg sebességét. A konstrukció ezen javíthat (több nyílás). Viharban befagyhat, többszörözés. Az [AF447 lezuhanását](#) jegesedésnek tulajdonítják.

Mérőperemes áramlásmérők

Az eszköz

A Venturi-cső bonyolult konstrukciója helyett egy peremmel szűkítjük a cső keresztmetszetét. Az átmérők aránya: $\beta = \frac{d}{D}$.



Mérőperemes áramlásmérők

Megjegyzések

- A nyomást nem a középvezetékben mérjük, hanem a csőfal közelében.
- A hatásos áramlási felület kisebb, mint a csőátmérő.
- Nagyobb sebességeknél a turbulencia csökkentésére módosítani kell a geometriát (közelíteni a Venturi-csövet).
- Kis áramlási sebességeknél (ekkor olcsó a szállítás), a nyomáskülönbség kicsi, ez növeli a pontatlanságot.
- A peremnél lerakódások keletkezhetnek, módosítják a geometriát.

Összenyomható közegek

Az elv összenyomható közegekre is alkalmazható. Ekkor $\rho = f(p)$ (nem állandó), és a Bernoulli-egyenlet (vízszintes csőben):

$$\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} + \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} = 0$$

Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogat kiszorításos mérők**
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Térfogat kiszorításos mérők - köbözők és húsdarálók

Mérési elv

- A közeg ismert térfogatú térrészekbe sorolódik be a belépő oldalon és továbbítódik a kilépő oldal felé. A mérő az átvitt térrészeket számolja.
- A számolás általában egy forgó tengelyen zajlik, inkrementális jeladóval.
- A mechanikai mozgáshoz szükséges munkát a "közeg" végzi.
- Összenyomhatatlan közegekhez.
- Nagy pontosság, mivel a térrészek nagy precizitással kialakíthatóak.
- Működhet pumpaként is (precíziós adagoló)
- Érzékeny a szennyeződésekre.



Térfogatkihasználásos mérők - köbözők és húsdarálók



Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogat kiszorításos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők**
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



A Coriolis-erő

Jól ismert jelenség

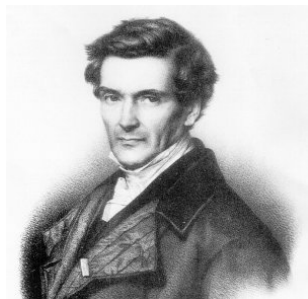
Egy inerciarendszerhez képest forgó koordináta-rendszerben egyenletes sebességgel haladó testre a tömegével arányos erő hat.

Egyenlettel

$$F_C = 2m(\omega \times v),$$

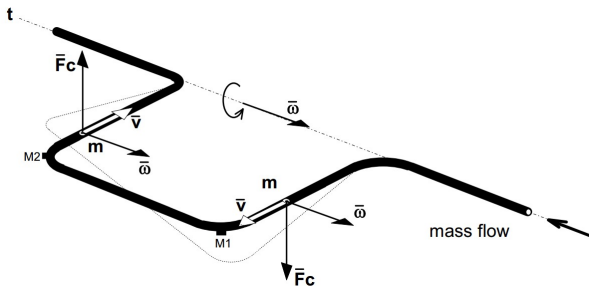
ahol

- ω - a pillanatnyi szögsebesség vektora
- v - a test pillanatnyi sebességvektora
- m - a test tömege



Gaspard-Gustave de Coriolis
(1792-1843)

Coriolis-erők rezgő/lengő csőben



Erőhatások elemzése $v \neq 0$

- A lengés tengelyével párhuzamosan haladó közegre nem hat Coriolis-erő.
- A legnagyobb erő a lengésre merőleges szakaszokban keletkezik.
- A lengések deformálják a csövet.

Coriolis-erők rezgő/lengő csőben

Erőhatások elemzése $v \neq 0$

- Két csőszakaszt rezgetünk ellenfázisban.
- A mérőpontokban érzékeljük (elkapjuk - pick-up) az elmozdulásokat.



Csőalak és rezgetése - $F_C = 2m(\omega \times v)$

Megfontolások

- ❶ A Coriolis-erő nagyobb, ha növeljük a közeg sebességét (csökken a keresztmetszet, ez áramlási veszteség)
- ❷ Két azonos formájú csőszakaszt ellenfázisban rezgetnek, hogy a mérőből kifelé ne terjedjen rezgés.
- ❸ A mérőt megfelelően be kell fogni, hogy kívülről befelé ne terjedjen rezgés (külső hatás).
- ❹ Többfázisú közegben (pl. buborékos folyadék vagy kicsapódó ködös gázok) a belső súrlódás csökkenti a rezgési energiát, egyébként az egynemű közeg viszkozitásától a mérés pontossága nem függ.



Ismeretlen gázolaj tolvaj
(i.e. 2000-)



Csőalak és rezgetése

A lengőrendszer

- 1 Rezgetés és pick-up mágneses elven. Az elmozdulások mm -nél kisebbek.
- 2 Kis amplitúdójú rezgésnél a struktúra lineáris rugóként viselkedik.
- 3 A csőalak egy mechanikai lengő-rendszer (egy kéttárolós lengőtag):

$$W(s) = \frac{1}{ms^2 + bs + k} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}}$$

ahol k (nagyrészt) a cső merevsége, b (nagyrészt) a közeg viszkozitása és m a rezgő tömeg (cső és közeg).

- 4 A lengőrendszer csillapítatlan sajátfrekvenciája: $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.
- 5 A ω_0 -n történő rezgetéshez kell a legkevesebb energia.

Mit mérhetünk a rezgés alapján?

Mérhető mennyiségek

- Sűrűség - (csillapítatlan saját)frekvenciából
- Tömegáram - fáziskülönbségből



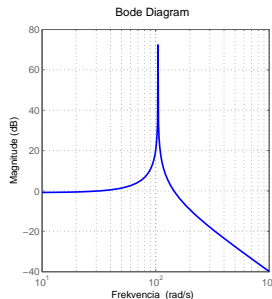
Sűrűség mérése

$$W(s) = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Elgondolás

- ❶ A rezgő csőszakasz k merevsége ismert (mi gyártottuk).
- ❷ A cső V térfogata és m_{pipe} tömege a két befogási pont között ismert.
- ❸ Ha a cső éppen ω_0 körfervekvencián rezeg, a benne található közeg (átlagos) sűrűsége

$$\rho = \frac{1}{V} \left(\frac{k}{\omega_0^2} - m_{pipe} \right)$$



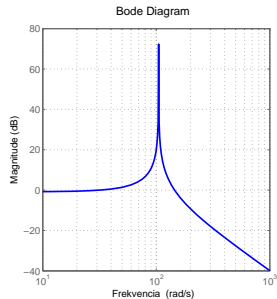
Sűrűség mérése

Rezgetés ω_0 -n

Ez egy szabályozási feladat. Megoldása ismert: PLL (benne VCO).

ω_0 meghatározása

- 1 A pick-up-ok jeleiből (vagy a különbségi jelből).
- 2 Például FFT-vel.



Hol tanultuk a hozzávalókat?

Jelek és rendszerek, Fizika, Elektronika, Elektromágneses terek, Méréstechnika, Szabályozástechnika.



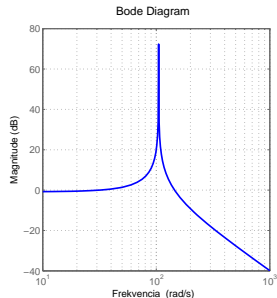
Sűrűség mérése

Rezgetés ω_0 -n

Ez egy szabályozási feladat. Megoldása ismert: PLL (benne VCO).

ω_0 meghatározása

- 1 A pick-up-ok jeleiből (vagy a különbségi jelből).
- 2 Például FFT-vel.



Hol tanultuk a hozzávalókat?

Jelek és rendszerek, Fizika, Elektronika, Elektromágneses terek, Méréstechnika, Szabályozástechnika.



Tömegáram mérése

Elgondolás

A Δt fáziseltolódás az érzékelőknél arányos a **tömegárammal** $q_m \propto \Delta t$.
Az összefüggés

$$q_m = \frac{k(T) - \Theta \omega_0^2}{2Kd^2} \Delta t,$$

ahol

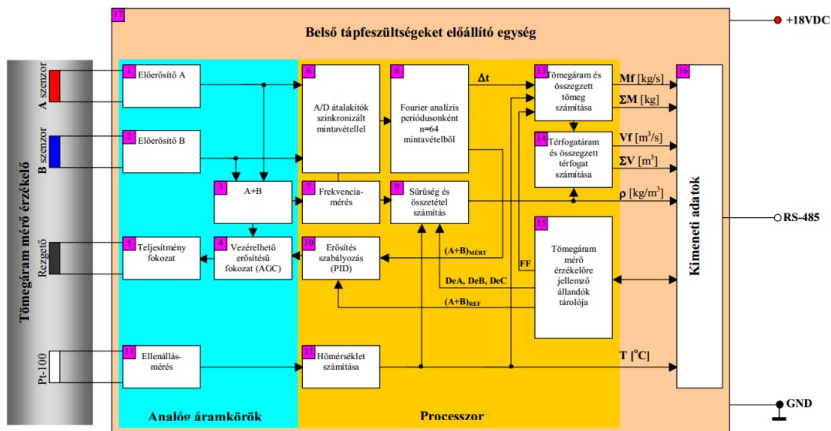
- k - cső merevsége
- T - hőmérséklet
- Θ - cső inerciája
- K - csőalak konstans
- d - átmérő

Hőtagulás

A cső merevsége a hőmérséklettel változik, kompenzálásához T -t mérik.



Coriolis-mérő - blokkvázlat



A jelfeldolgozás menete



Coriolis-féle tömegárammérés - összegzés

Előnyök

- "Közvetlen" tömegáram mérés (független a közeg konzisztenciájától az elvből adódóan).
- Az elérhető pontosság akár 0,1% **alatt** a mért értékhez képest (nem a mérési tartományhoz képest).

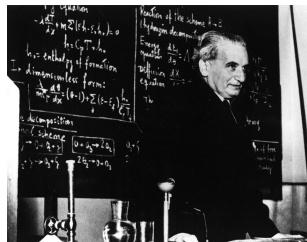


Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogatkiszorításos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők**
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Kármán-féle örvénysor



Örvénysor kialakulása

- Torlóttest mögötti nyomáskülönbség miatt örvények alakulnak ki.
- A közeg mozgásának megfelelő energiaszintűnek kell lennie, különben a viszkozitás miatt az örvény nem jön létre.
- Az örvénysor adott elrendezésben bizonyos Re tartományban alakul ki.



Kármán-féle örvénysor - éneklő vezetékek

Megjegyzések

- 1 A viszkozitás miatt az áramlás a csőben később rendeződik.
- 2 Kis sebességű (alacsony energiájú) áramlás esetén nem alakul ki, szűkítő kellhet közeg gyorsításához.
- 3 Tipikus Re tartomány az örvénysor kialakulásához: $[47, 10^5]$.
- 4 A leváló örvények a torlótestet rezgetik. Ha a struktúra rezonancia frekvenciája hallgató tartományba esik, akkor a szél zenél.

(Bűvös) képletek

Az átlagos v áramlási sebesség hengeres torlótestnél

$$v = \frac{fd}{0,198} \left(1 - \frac{19,7}{Re} \right)^{-1},$$

ahol

- f - örvénysor frekvencia
- d - torlótest átmérője
- Re - Reynolds-szám

Azaz $v \propto f$ és $q_v = Av$. Nem mér q_m -et.

Örvénymérők és torlótestek

Örvények számlálása

Cső hossztengelyére merőleges elmozdulás, illetve deformáció érzékelésével (pl. piezo, optikai).



FISCHER & PORTER



EASTECH (MMG)



KENT



YOKOGAWA



J - TEC

Gyakori torlótest formák

Strouhal-szám

Adott elrendezésben a $\frac{fd}{v}$ hányadosra Strouhal-számként hivatkozunk.

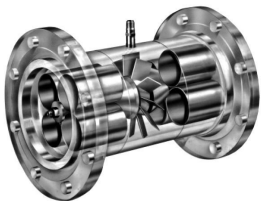


Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogat kiszorításos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők**
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Turbinás áramlásmérés - működési elv



Megfontolások

- Az áramlás a turbina lapátok között továbbhaladva azokat megforgatja.
- A tubinalapátok kiképzése gátolja az örvényleválást, és minimalizálja az áramlási veszteséget, ugyanakkor a tubinalapátok közvetlen közelében a közeg áll.
- Ideális viselkedést akkor kapunk, ha eltekintünk a turbina tengelyének súrlódásától és a turbina lapátjainak közegellenállásától.

Turbinás áramlásmérés - működési elv

Ideális viselkedés

Elhanyagolt sűrűlódás és elhanyagolt közegellenállás mellett

$$q_v = Kf,$$

ahol

- K - a mérő kalibrációs állandója
- f - forgási sebességgel arányos lapátfrekvencia

Szivárgási áramlás

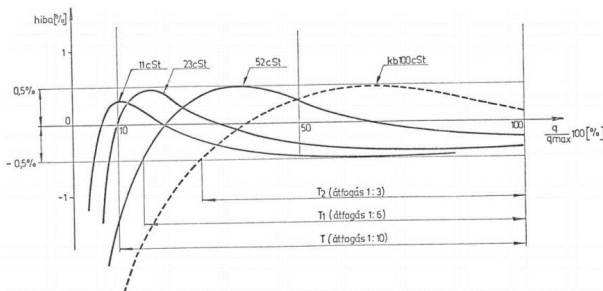
Egy küszöb q_v áramlás alatt a lapátok nem mozdulnak. Ez a mérő szivárgása.

Sűrűlódás és közegellenállás

A mérés pontatlanságát befolyásoló hatások éppen a mért mennyiség (áramlás) függvényei, amit a kalibrációs állandóban is figyelembe kell(ene) venni.



Turbinás áramlásmérés - K hibája



Megjegyzések

- Az ábra K függését mutatja q_v -től különböző kinematikai viszkozitás értékek mellett.
- A mérési tartomány felső részét kell használni.
- Adott viszkozitás mellett $K(q_v)$ -t interpolálni szokták.

Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogat kiszorításos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők**
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Mérési elv

Faraday-törvény

Egy B indukciójú mágneses térben v sebességgel mozgó vezető közegben feszültség indukálódik. Amennyiben v merőleges B -re:

$$U = v \cdot B \cdot D,$$

ahol D a csőátmérő, U az indukált feszültség, és v a közeg átlagsebessége.

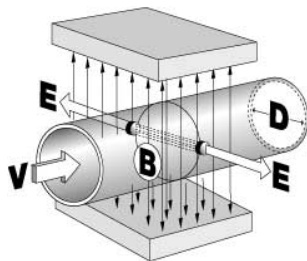
Korlátozott alkalmazhatóság

Csak vezető közegre (víz, vér, különböző oldatok, cseppfolyós fémek).

Nehézség

B létrehozása

- Váltakozó árammal átjárt tekercsel.
- Egyenáramú gerjesztés (nagy teljesítmény kell).



Indukciós áramlásmérők

Megjegyzések

- Az elektródák rendszeres tisztítása szükséges.
- A mágneses tér változtatásával a szisztematikus hibák kiküszöbölhetők.



Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogat kiszorításos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők**
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló



Ultrahangos mérők

Mérési elv

Az áramló közegbe ultrahang csomagokat küldünk. Két mérési módszer is rendelkezésre áll

- 1 áthaladási időn alapuló (Time of Flight - ToF)
- 2 Doppler-hatáson alapuló.

Áthaladási idő (ToF)

Az ultrahang impulzusok terjedési sebessége a közegben az áramlással azonos és ellentétes irányban különbözik.

Doppler-hatás

Áramló (mozgó) részecskékről visszaverődő csomagok frekvenciája sebességükkel arányosan változik ($v \propto \Delta\omega$).

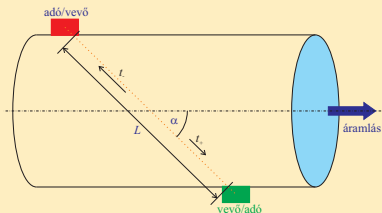
Előny - a módszer népszerűségének magyarázata

Nincs szükség torlótestre, az áramlási veszteség kicsi (szűkítésből adódhat).



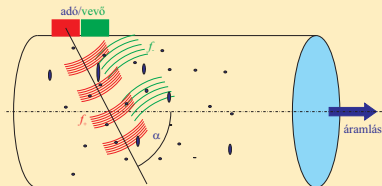
Ultrahangos mérők - mérési elrendezések

Terjedési idő (ToF)



- A nyaláb a cső falánál valójában megtörik: elhelyezéskor figyelembe venni.
- Léteznek a cső faláról visszaverődő csomagok idejét mérő megoldások is.

Doppler-hatás



A visszaverődés a csőben az áramlással együtt mozgó reflexív részecskékről, felületekről érkezik.

Terjedési idő alapú mérés

Megjegyzés

Több adó-vevő pár alakítható ki a keresztmetszeten. Adó és vevő a piezoelektromos hatást használja ki.

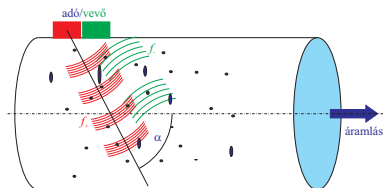
Egyenlet

Az átlagos közegsebesség

$$v = \frac{L}{2 \sin \alpha} \frac{t_- - t_+}{t_- t_+} \quad q_v = A \cdot v,$$

- t_- - terjedési idő az áramlással szemben
- t_+ - terjedési idő az áramlás irányában
- α - terjedési út és az áramlás irányának szöge
- L - távolság az adó és a vevő között

Doppler-hatáson alapú mérés



Megjegyzés

Fémből készült csövek elvezethetik a kívülről átküldeni kívánt ultrahang nagy részét.

Egyenlet

Az átlagos közegsebesség

$$v = \frac{c}{2f_+ \cos \alpha} (f_+ - f_-) \quad q_v = A \cdot v,$$

- f_- - visszaverődő frekvencia
- f_+ - adó frekvencia
- α - terjedési út és az áramlás irányának szöge
- c - a hang sebessége az áramló közegben

Tartalom

- 1 Bevezetés
- 2 Áramló közeg és az áramlás tulajdonságai
- 3 Nyomáskülönbségen alapuló áramlásmérés
- 4 Térfogat kiszorításos mérők
- 5 Coriolis elvű mérők
- 6 Örvénymérők
- 7 Turbinás mérők
- 8 Indukciós mérők
- 9 Ultrahangos mérők
- 10 Áramlásmérési módszerek - összefoglaló**



Áramlásmérési módszerek - összehasonlítás

Mért érték és tipikus pontosság (leolvasott értékhez viszonyítva)

- Turbinás mérő - q_v - $\pm 0,3\%$, gyenge kis q_v -nél és nagy ν -nél.
- Mérőperem - q_v - $\pm 0,2\%$, bonyolult kompenzációs számítások.
- Indukciós mérő - q_v - $\pm 0,1\%$, csak vezető közegekre.
- Örvénymérő - q_v - $\pm 0,1\%$, rendezetlenné teszi az áramlást.
- Coriolis - q_m $\pm 0,1\%$

Egyéb szempontok lehetnek

Átfogás (legnagyobb és legkisebb pontosan mérhető áramlási érték hányadosa), szükséges előtét csőszakasz (straight run), null-stabilitás, kalibrálhatóság, áramlási veszteség, karbantartási költség, TCO (total cost of ownership).



Áramlásmérési módszerek - összefoglaló

