

# Nok-volgersystemen - Ontwerp en Dynamica

Wilm Decré, Kevin Tanghe, Maxim Vochten en Joris De Schutter

In dit werkje wordt een nok ontworpen die een bepaalde heffing moet realiseren en tegen bepaalde functionele krachten in moet werken. Bovendien wordt het dynamisch gedrag geverifieerd op basis van een invers dynamische (kinetostatische) analyse. Dit wil zeggen dat de aandrijfsnelheid van de nok constant verondersteld wordt. Deze opdracht valt uiteen in de deelopdrachten 1, 2, 3 en 4.

De data waarvan vertrokken wordt, is bijvoorbeeld de volgende. De te ontwerpen nok moet volgende heffing realiseren:

- van 0 tot 120 graden: +25 mm
- van 120 tot 200 graden: -10 mm
- van 200 tot 270 graden: -15 mm

De opgegeven heffing is steeds relatief:  $-10mm$  betekent een daling van  $10mm$ . Op de plaats waar geen heffing is opgegeven, moet een constante heffing (dwell) gerealiseerd worden. De heffing wordt hier enkel gespecificeerd op de begin- en eindpunten van de verschillende segmenten. Het is vrij te kiezen hoe de heffing van begin- naar eindpunt verloopt.

De equivalente massa en dempingsverhouding van de volger (en bijhorende onderdelen) worden respectievelijk geschat op  $m = 5$  kg en  $\zeta = 0.075$ , terwijl het mechanisme volgende functionele krachten moet uitoefenen:

- van 0 tot 120 graden: een lineair toenemende drukkracht van 0 N tot 60 N
- van 120 tot 200 graden: een constante trekkracht van 25 N
- van 200 tot 360 graden: geen functionele krachten werkzaam

Druk en trek betekenen hetvolgende: duwen is duwen vanuit nokstandpunt, dwz. in een richting weg van het centrum van de nok.

**Opgelet: de numerieke data die jullie moeten gebruiken is niet hetzelfde als wat hierboven staat.** Iedere groep krijgt tijdens de oefenzitting een nummer. De numerieke data voor jullie werkje vind je in het bestand *num\_data.html* bij het nummer dat je tijdens de oefenzitting gekregen hebt.

## 1 Definiëren van de hefwet

Hier worden de opgelegde heffingen omgezet in een hefwet (motion law) die voor elke waarde van de nokhoek  $\theta$  een overeenkomstige verplaatsing  $S(\theta)$  realiseert. Houd hier rekening met de fundamentele wet van nokkenontwerp. De hefwet kan worden ontworpen met behulp van het programma matcam. Voeg een figuur van de bekomen hefwet toe aan het verslag.

De volgende trajecten zijn in matcam gedefinieerd: (1) constante dwell, (2) minimum rms versnelling, (3) harmonisch traject, (4) cycloidaal traject, (5) vijfde graads polynoom, en (6) zevende graads polynoom.

Het bepalen van de hefwet is vaak een erg moeilijke opgave, waarbij heel wat tegenstrijdige objectieven (trade-offs) een rol spelen. Maak de redenering achter jullie keuze voor het ontwerp van de hefwet duidelijk in het verslag.

Het resultaat van deze deelopgave is de hefwet.

## 2 Bepalen van de geometrie van de volger

De gekozen nokvolger configuratie is een roterende nok met een translerende volger, uitgerust met een looprol. Twee belangrijke parameters die de geometrie van deze nok bepalen zijn de straal van de basiscirkel en van de looprol. Bepaal deze waarden zodat geen ondersnijding optreedt en de drukhoek kleiner is dan 30 graden, en doe dit met de nomogrammen van Kloomok en Muffley. Denk goed na over de volgorde waarin je deze nomogrammen gebruikt en geef in het verslag goed aan welke numerieke waarden je gebruikt (bijvoorbeeld, de gekozen ratio  $L/R_0$ ).

Verifieer via matcam of er effectief geen ondersnijding optreedt (dat gebeurt via de kromtestraal, maar hoe precies?) en of de drukhoek aan de gestelde voorwaarden voldoet. Voeg hiertoe figuren van de kromtestraal en drukhoek toe aan het verslag (voor excentriciteit nul).

Een parameter die toelaat het verloop van de drukhoek te beïnvloeden is de gekozen excentriciteit. De nomogrammen van Kloomok en Muffley gelden voor excentriciteit gelijk aan nul. Geef in het verslag aan wat de invloed van de excentriciteit is op de drukhoek, welke waarde in jouw geval optimaal is en waarom. Voeg opnieuw figuren toe van de kromtestraal en drukhoek (voor de gekozen excentriciteit) en bespreek (treedt er ondersnijding op voor de gekozen waarde van de excentriciteit?).

Het resultaat van deze deelopgave is een set waarden voor de basiscirkelstraal, de looprolstraal en de excentriciteit, m.a.w. de nokgeometrie.

## 3 Verifiëren van de rigid-body krachten

Uitgaande van de hefwet, de gekozen geometrie en de veronderstelling van een constante aandrijfsnelheid worden nu de rigid-body krachten berekend. In dit deel van de opgave wordt de volger oneindig stijf verondersteld (rigid-body), en moet je dus nog geen rekening houden met de opgegeven dempingsverhouding  $\zeta$ . Het uitwendige krachtensysteem dat inwerkt op het mechanisme valt te herleiden tot twee elementen: de inertiekrachten van de volger en de functionele belastingen die inwerken op het volgermechanisme. Noch met de wrijving van de volger in haar geleiding, noch met de zwaartekracht wordt rekening

gehouden.

Een eerste doel van deze analyse is het dimensioneren van een veer die het contact tussen de nok en de volger ten allen tijde moet verzekeren. Voer daartoe de eerder besproken belastingen in en verifieer het resulterend krachtenverloop op de nok. Indien de krachten ervoor zorgen dat de volger contact verliest met de nok, dan vergt het systeem een bijkomende veer. Bepaal, zo nodig, de (proportionele) veer zodat het contact tussen volger en nok verzekerd wordt. Definieer de veer evenwel zodanig dat de krachten minimaal blijven (stijfheid / voorspanning). Voeg in uw verslag figuren toe van de contactkracht tussen de nok en de volger en toon aan dat er geen contactverlies optreedt. Wat gebeurt er met de contactkracht tussen de nok en de volger als de rotatiesnelheid verdubbelt? Verklaar!

Een ander aspect van de dynamische analyse is het vermogen nodig om in regime het systeem aan te drijven. Het ogenblikkelijk vermogen wordt in de cursus gegeven voor excentriciteit nul. Leid een variant voor deze formule af die ook geldig is voor excentriciteit verschillend van nul (doe dit op basis van een duidelijke tekening!). Bereken op basis van de matcam output het ogenblikkelijk vermogen voor de eerder gekozen optimale excentriciteit en voor excentriciteit nul. Deze ogenblikkelijke vermogens dienen gelijk te zijn. Kun je dit intuïtief verklaren?

Bij de motorkeuze is niet alleen het ogenblikkelijk vermogen van belang, maar ook het gemiddeld vermogen (dit bepaalt de thermische belasting van de motor). Wat is het gemiddeld vermogen in jouw geval. Is het positief of negatief, en hoe moet dit geïnterpreteerd worden?

De resultaten van de rigid-body analyse zijn ook belangrijk voor het dimensioneren van een vliegwiel. Ontwerp voor de door u geselecteerde heffingswet een vliegwiel dat de snelheidsvariëaties van de nokkenas beneden de vijf procent houdt. Deze berekening voer je uit in matlab en is gebaseerd op de koppelvraag van het mechanisme. Voeg een tekening van de koppelvraag toe aan het verslag, en duid er het gemiddeld vermogen op aan. Op basis van deze laatste tekening kun je, ter verificatie van de exacte matlabberekening, een afchatting maken van de grootte van het vliegwiel. Deze benaderende berekening is gebaseerd op het afschatten van de oppervlaktes onder de koppelvraagcurve (bijvoorbeeld door ze te benaderen door driehoeken of andere eenvoudige geometrische vormen). Voeg deze ruwe afchatting van de vliegwielgrootte toe aan je verslag. Het is een goede ingenieurshouding om via dit soort korte, benaderende controleberekeningen numerieke resultaten geleverd door computerprogramma's te checken.

Het ogenblikkelijk vermogen en het gemiddeld vermogen tot hiertoe beschouwd zijn geldig voor het regimegedrag van de nokaandrijving. Bespreek in ten hoogste 200 woorden hoe je de motor zou dimensioneren voor het opstartgedrag.

De resultaten van de kinetostatische analyse worden ook gebruikt voor de volgende aspecten van het nokontwerp die niet aan bod komen in deze oefening: het bepalen van de Hertziaanse spanningen in het nokprofiel, het dimensioneren van het noklager, het dimensioneren van de looprol, etc.

## 4 Dynamica van een vervormbare volger

Dit deel van de opgave gaat het effect van de volgerflexibiliteit op het volggedrag en de contactkracht na. Hiertoe zijn de equivalente massa  $m$  van de volger en een dempingsverhouding  $\zeta$  gegeven (zie nok-volgermodel van slide 9.5).

### 4.1 Voorwaarden nauwkeurigheid single rise analyse

- Onder welke voorwaarde mag een single rise analyse uitgevoerd worden?
  - Onder welke voorwaarde mag de **benaderende** single rise analyse van slide 9.25 uitgevoerd worden? Hoe kan je deze voorwaarde met een formule kwantificeren?
- Zoek de meest kritische heffing/daling om de volgerstijfheid te bepalen zodat de benaderende oplossing geldig is voor elke heffing/daling. Geef duidelijk aan waarom deze heffing/daling de meest kritische is.
  - Bereken nu de equivalente volgerstijfheid  $k_f$  zodat aan de voorwaarde van vraag 1 (b) voldaan is.  
*Hoewel de equivalente stijfheid van de volger in de meeste praktische toepassingen vastligt, wordt de equivalente stijfheid  $k_f$  hier 'gekozen'.*

### 4.2 Numerieke resultaten

- Kies een heffing/daling die direct gevolgd wordt door een 'dwell'. Voer een numerieke **single rise** simulatie uit van het nok-volgersysteem voor deze gekozen heffing/daling. Deze simulatie maakt gebruik van de exacte input. In de volgende vraag zullen we het resultaat van deze simulatie vergelijken met de benaderende oplossing.

De simulatie is vergelijkbaar met de oefeningen van het deel trillingen. De functionele krachten mogen hier buiten beschouwing gelaten worden, we kijken enkel naar de beweging.

Voor de numerieke simulatie schrijven we de dynamische vergelijking, (2) uit les 9, eerst onder de vorm van een overdrachtsfunctie (zie cursustekst deel trillingen):

$$\frac{\Gamma(s)}{\Theta(s)} = \frac{(2\pi\lambda)^2}{s^2 + 2\zeta(2\pi\lambda)s + (2\pi\lambda)^2}, \quad (1)$$

met  $\Gamma(s) = \mathcal{L}\{\gamma(\tau)\}$ ,  $\Theta(s) = \mathcal{L}\{\theta(\tau)\}$  de Laplace-getransformeerde signalen van respectievelijk  $\gamma(\tau)$  en  $\theta(\tau)$  en waarbij het systeem start vanuit rust.

In Matlab maak je deze overdrachtsfunctie aan als:

```
>> teller = (2*pi*lambda)^2;  
>> noemer = [1, 2*zeta*(2*pi*lambda), (2*pi*lambda)^2];  
>> sys = tf(teller, noemer);
```

Je kan de responsie  $\gamma(\tau)$  voor gegeven excitatie  $\theta(\tau)$  berekenen als:

```
>> Ts = 0.001 % dimensieloze bemonsteringsperiode
>> tau = 0:Ts:10; % dimensieloze tijd, pas eindwaarde aan zoals nodig
>> theta = ... % vul zelf in, dimensieloze heffing theta als functie van tau
>> lsim(sys,theta,tau)
```

Matlab toont een figuur van  $\theta(\tau)$  en  $\gamma(\tau)$ . Kies  $\theta$  eerst voor een single rise analyse van het gekozen deel van de hefvet. Onder sectie opmerkingen vind je terug hoe je vectoren uit matcam kan opvragen, bijvoorbeeld voor het bepalen van  $\theta$ . Indien je  $\gamma$  wil opslaan voor verdere analyse, typ je:

```
>> gamma = lsim(sys,theta,tau);
```

Zoals hier gebruikt, berekent `lsim` de totale responsie startend vanuit **rust**, d.w.z. zowel de heffing als de snelheid zijn gelijk aan nul op  $\tau = 0$ .

Indien het systeem niet start vanuit rust, moet Matlab rekening houden met de beginvoorwaarden. Dit kan op de volgende manier:

```
>> theta0 = ... % vul hier zelf de initiele dimensieloze heffing in
>> theta_dot0 = ... % vul hier zelf de initiele dimensieloze snelheid in
>> [A,B,C,D] = tf2ss(teller,noemer);
>> X0 = [1/C(2)*theta_dot0; 1/C(2)*theta0];
>> gamma = lsim(A,B,C,D, theta, tau, X0);
```

2. Pas nu de benaderende analyse toe om de amplitude van de trilling bij  $\tau = 1$  te schatten. Hoe kan je de benaderende oplossing snel vergelijken met de numerieke simulatie? Bespreek het resultaat van de vergelijking.
3. Vertaal de amplitude van het overgangsverschijnsel van de volgerverplaatsing op  $\tau = 1$  naar een amplitude van het overgangsverschijnsel van de contactkracht tussen nok en volger. Moet de stijfheid van de terugstelveer die je berekend hebt in deel 3 aangepast worden als je op deze plaats (d.w.z. voor deze nokhoek) contactverlies wil vermijden?
4. Analyseer nu de amplitude van het overgangsverschijnsel van de volgerverplaatsing voor het deel van de hefvet dat je gekozen hebt aan de hand van een **multi-rise** analyse van het regimegedrag van de volger. Vergelijk de resultaten van single- en multi-rise en bespreek het resultaat.