

TSFS09 – Modellering och Reglering av Motorer och Drivlinor (MoDr)

Fö 3 – Arbetsprinciper, termodynamik och modeller för motormoment

Lars Eriksson - Kursansvarig

Fordonssystem, Institutionen för Systemteknik
Linköpings universitet
larser@isy.liu.se

September 3, 2020

1 / 35

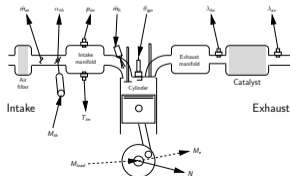
Innehållsförteckning

- 1 Repetition
 - Luft och bränsle
- 2 Arbetsprinciper och Momentgenerering
- 3 Sammanfattning av termodynamiken
- 4 Motor cykelräkning
- 5 Motor, mer om arbetsprinciperna

2 / 35

Medelvärdesmodellering - Luftens och bränslets väg

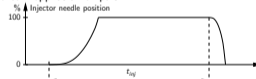
- Återanvändning – Snabbar upp produktutvecklingen.
- Cylindermodellen: 3 komponenter
 - Luft- och avgasmassflöde –Avgastemperatur –Moment



3 / 35

Bränsleinjektor

- Injektorn öppnas av en puls

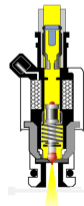


- Sammanslagen öppnings- och stängningstid t_0 .
- Injicerad massa

$$m_{fi} = c \sqrt{\Delta p} (t_{inj} - t_0(u_{batt}))$$

- Bränsleflöde

$$\dot{m}_{fi} = \frac{N n_{cyl}}{n_r} m_{fi} = N c_1 (t_{inj} - t_0(u_{batt}))$$



4 / 35

Modellsammanfattning 1(3)

Gaspedalstolkning och trottelposition

$$\alpha_{ref} = u_{pedal} \quad \text{där } u_{pedal} \in [0, 1]$$

$$\alpha = H_\alpha(s) \alpha_{ref}$$

Luftflöde in i insugsröret

$$\dot{m}_{at}(\alpha, p_{amb}, T_{amb}, \Pi) = \frac{p_{amb}}{\sqrt{R T_{amb}}} \cdot A_{th}(\alpha) \cdot C_{th}(\alpha) \cdot \Psi(\Pi)$$

Luftflöde in i cylindern

$$\dot{m}_{ac}(N, p_{im}, T_{im}) = \eta_{vol}(N, p_{im}) \frac{p_{im} V_d n_{cyl} N}{R T_{im} n_i}$$

Tryckuppbyggnad i insugsröret

$$\frac{dp_{im}}{dt} = \frac{R T_{im}}{V_{im}} \frac{dm_{im}}{dt} = \frac{R T_{im}}{V_{im}} (\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac})$$

5 / 35

Modellsammanfattning 2(3)

Flöde genom katalysator och avgassystemet (inkompressibel turbulent)

$$\dot{m}_{cat} = C_3 \sqrt{\frac{p_{em} \Delta p}{R T_{em}}}$$

Gasflöde från motorn

$$\dot{m}_{cyl} = \dot{m}_{ac} + \dot{m}_{fc}$$

Tryckuppbyggnad i avgasröret

$$\frac{dp_{em}}{dt} = \frac{R T_{em}}{V_{em}} \frac{dm_{em}}{dt} = \frac{R T_{em}}{V_{em}} (\dot{m}_{cyl} - \dot{m}_{cat})$$

Avgastemperatur T_{em} = kommer senare...

6 / 35

Modellsammanfattning 3(3)

Bränsleinjektor - Port inspr.

$$\dot{m}_{fi} = C_1 N (t_{inj} - t_0(u_{batt}))$$

Bränslefilm

$$\frac{dm_{fi}}{dt} = X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fo}} m_{fi}$$

$$\dot{m}_{fc} = (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fo}} m_{fi}$$

λ till motor

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{ac}}{\dot{m}_{fc}} / (A/F)_s$$

Bränsleinjektor - Direkt inspr.

$$\dot{m}_{fc} = C_1 N (t_{inj} - t_0(u_{batt}))$$

Gasblandning & Transportfördörjning

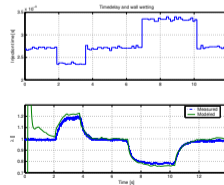
$$\frac{d}{dt} \lambda_{veh}(t) = \frac{1}{\tau_{mix}} (\lambda(t - \tau_d(N)) - \lambda_{veh}(t))$$

Sensordynamik

$$\frac{d}{dt} \lambda_s(t) = \frac{1}{\tau_\lambda} (\lambda_{veh}(t) - \lambda_s(t))$$

7 / 35

(A/F) Bränsletsväg – Modellvalidering (en annan motor)



Modellen fångar:
-Tidsfördröjningen.
-Dynamik i systemet.

-Glöm inte bort att sätta initialvärden!

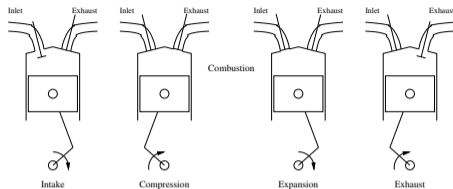
8 / 35

Innehållsförteckning

- 1 Repetition
- 2 Arbetsprinciper och Momentgenerering
 - Arbetscykeln
 - Grundläggande begrepp
- 3 Sammanfattning av termodynamiken
- 4 Motor cykelräkning
- 5 Motor, mer om arbetsprinciperna

9 / 35

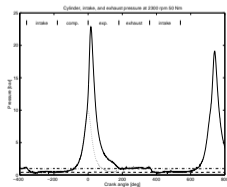
Fyrtaktsprincipen - (En cykel = 2 varv = 4π)



10 / 35

Indikatordiagram

Indikatordiagram – Cylindertryck som funktion av vevaxelvinkel θ



11 / 35

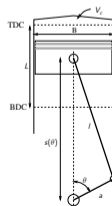
Motorgeometri \Rightarrow Volym

Cylinder bore	B
Connecting rod length	l
Crank radius	a
Piston stroke	$L = 2a$
Crank angle	θ
Clearance volume	V_c
Displaced volume	$V_d = \frac{\pi B^2 L}{4}$

$$r_c = \frac{\text{maximum cylinder volume}}{\text{minimum cylinder volume}} = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s(\theta))$$

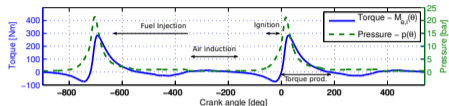
$$s(\theta) = a \cos \theta + \sqrt{l^2 - a^2 \sin^2 \theta}$$



12 / 35

Cylindertryck och momentant moment

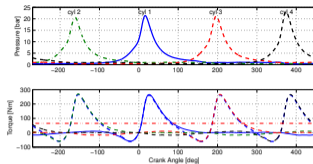
Tryck och moment från en cylinder, pulsationer ger varvtalsvariationer
(Mätning i labbet och koppling till diagnos).



Fler cylindrar och svänghjulet smetar ut variationerna

13 / 35

Cylindertryck och momentant moment



Flera cylindrar (4st)
Cylinderordning 1-3-4-2

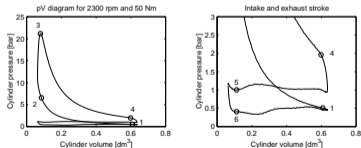
Medelvärdesmodellens och motorns moment

$$M_e = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} M_{cyl}(\theta) d\theta - M_f = \frac{1}{4\pi} \oint p(V) dV - M_f$$

14 / 35

Indikatordiagram

Indikatordiagrammet från tidigare omräknat till pV-diagram



Varför pV-diagram?

–Arbetet kan räknas fram genom $W = \int p dV!$

15 / 35

Cyklar

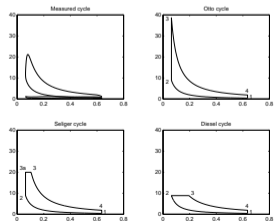
Termodynamiska cykler som modell
av uppmätt indikatordiagram

⇒ Handräkning och analytiska
resultat

Viktigt att göra skillnad på:

Ottomotor ≠ Ottocykel
Dieselmotor ≠ Dieselrykel

Seiliger ger bäst överensstämmelse



16 / 35

Innehållsförteckning

- 1 Repetition
- 2 Arbetsprinciper och Momentgenerering
- 3 Sammanfattning av termodynamiken
 - Termodynamiska storheter
 - Termodynamiska system, processer, och cykler
- 4 Motor cykelräkning
- 5 Motor, mer om arbetsprinciperna

17 / 35

En kort sammanfattning av termodynamiken

- Alla gaser vi räknar på i kursen är ideala.
- Ideala gaslagen $pV = mRT$ och $pV = n\tilde{R}T$
- $\tilde{R} = 8.3143$ [J/mol K] universella gaskonstanten,
 $R = \tilde{R}/M$ [J/kg K] gaskonstanten.
- För en ideal gas gäller
(utgå från $h = u + pv$ och $pv = RT$)
- Kan med $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ få följande uttryck
- Alla gaser vi räknar på har c_p och c_v konstanta.

$$R = \frac{\tilde{R}}{M}$$

$$c_p - c_v = R$$

$$c_v = \frac{R}{\gamma-1}, c_p = \frac{R}{1-1/\gamma}$$

18 / 35

En kort sammanfattning av termodynamiken

Mass specifika storheter – små bokstäver

$$v = \frac{V}{m}, q = \frac{Q}{m}, u = \frac{U}{m}, h = \frac{H}{m}, w = \frac{W}{m}$$

Ideal gas	$pV = mRT$	$pv = RT$
1:a Huvudsatsen	$dQ = dU + dW$	$dq = du + dw$
Rev. arbete	$dW = p dV$	$dw = p dv$
Entalpi	$H = U + pV$	$h = u + pv$
1:a H. (igen)	$dH = dU + dpV + p dV$	$dh = du + dpv + p dv$
Värmekapacitet	$C_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_v$	$c_v = \left(\frac{dq}{dT}\right)_v$
	$C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p$	$c_p = \left(\frac{dq}{dT}\right)_p$

Samband:
Ratio of specific heats

$$du = c_v dT \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$dh = c_p dT \quad \gamma \in [1.2, 1.4]$$

19 / 35

Termodynamiska system och processer

System

- Isolerat
- Slutet
- Öppet

Processer

- *Isobar*: samma tryck $dp = 0$
- *Isokor*: samma volym $dV = 0$
- *Isoterm*: samma temp. $dT = 0$
- *Adiabatisk*: inget värmeutbyte $dQ = 0$
- *Reversibel*: $dW = p dV$
- *Isentropisk*: adiabatisk + reversibel (den bästa processen)

20 / 35

Isentropisk kompression och expansion – Ideal gas

Isentropisk betyder

- Ingen värmeöverföring $dq = 0$
- Reversibel process $dw = p dv$

–Söker samband som beskriver hur tillståndet förändras under processen
Utgå från 1:a Huvudsatsen

$$dq = du + dw \Rightarrow 0 = c_v dT + p dv$$

Ideal gas $p = \frac{RT}{v}$:

$$c_v dT = -\frac{RT}{v} dv \Leftrightarrow \frac{1}{T} dT = -\frac{R}{c_v} \frac{1}{v} dv \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{T} dT = -\frac{c_p - c_v}{c_v} \frac{1}{v} dv \Rightarrow \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T} dT = -(\gamma - 1) \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{v} dv$$

21 / 35

Isentropisk kompression och expansion – Ideal gas

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T} dT = -(\gamma - 1) \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{v} dv \Rightarrow \ln T_2 - \ln T_1 = -(\gamma - 1)(\ln v_2 - \ln v_1)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1}$$

$$\left[T = \frac{pV}{R}\right] \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma} \Leftrightarrow p_2 v_2^{\gamma} = p_1 v_1^{\gamma}$$

$$\left[v = \frac{RT}{p}\right] \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Viktigaste ekvationen

$$p v^{\gamma} = \text{konstant}$$

22 / 35

Isokor process (konstant volym) – t.ex. förbränning

- Frigjord energi från bränslet

$$Q_{in} = \min(\lambda, 1) \cdot m_f \cdot q_{LHV}$$

- Konstant volym
- 1:a huvudsatsen (energiekvationen)

$$dV = 0$$

$$dQ = dU + p dV \Rightarrow dQ = dU$$

- Inre energi
- Integrera 1:a huvudsatsen

$$U = m u \Rightarrow dU = m_{tot} du = m_{tot} c_v dT$$

$$\int_0^{Q_{in}} dQ = \int_{T_2}^{T_3} m_{tot} c_v dT \Rightarrow Q_{in} = m_{tot} c_v (T_3 - T_2)$$

23 / 35

Isobar process (konstant tryck) – t.ex. förbränning

- Frigjord energi från bränslet

$$Q_{in} = \min(\lambda, 1) \cdot m_f \cdot q_{LHV}$$

- Konstant tryck
- Entalpidefinitionen + 1:a huvudsatsen

$$dp = 0$$

$$H = U + pV \Rightarrow dU = dH - p dV - V dp$$

$$dQ = dU + p dV = dH - V dp \Rightarrow dQ = dH$$

- Entalpi
- Integrera 1:a huvudsatsen

$$H = m h \Rightarrow dH = m_{tot} dh = m_{tot} c_p dT$$

$$\int_0^{Q_{in}} dQ = \int_{T_2}^{T_3} m_{tot} c_p dT \Rightarrow Q_{in} = m_{tot} c_p (T_3 - T_2)$$

24 / 35

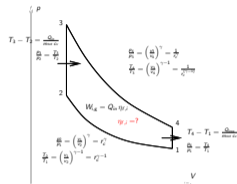
Innehållsförteckning

- 1 Repetition
- 2 Arbetsprinciper och Momentgenerering
- 3 Sammanfattning av termodynamiken
- 4 Motor cykelräkning
 - Jämförelse mellan modell och mätning
 - De ideala cyklernas effektivitet
- 5 Motor, mer om arbetsprinciperna

25 / 35

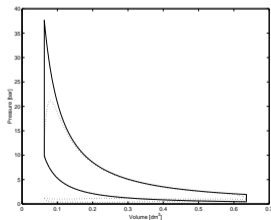
Cykelräkning – p_1 och T_1 givna

Termodynamiken ger en systematisk metod för att räkna cykeln runt.



26 / 35

Jämförelse mellan mätning och modell



27 / 35

Ideala Ottocykelns effektivitet

- Verkningsgrad
- Känner "tillförd energi" Q_{in}
- Två sätt att beräkna "arbete ut" W_{out}
 - Integrera arean $W_{out} = \int p dV$
 - Lösa två integraler $\int c \cdot V^{-\gamma} dV$
 - Första lagen: efter en cykel har U inte ändrats

$$\eta_{otto} = \frac{\text{Arbete ut}}{\text{Tillförd energi}}$$

$$dQ = dU + dW \Rightarrow \Delta Q = \Delta W$$

$$\Delta W = W_{out} \quad \Delta Q = Q_{in} - Q_{loss}$$

$$\bullet \eta_{otto} = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{loss}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{loss}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$$

28 / 35

Ottocykelns effektivitet

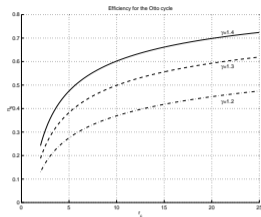
$$\eta_{f,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$$

Normalfall $\gamma = 1.3$

Övningsuppgift:

Jämför $r_c = 10$ med $r_c = 5$ i ett pV-diagram.

Var förlorar man?



29 / 35

Innehållsförteckning

- 1 Repetition
- 2 Arbetsprinciper och Momentgenerering
- 3 Sammanfattning av termodynamiken
- 4 Motor cykelräkning
- 5 Motor, mer om arbetsprinciperna
 - pV diagrammet och andra cykler
 - Knack – En begränsning

30 / 35

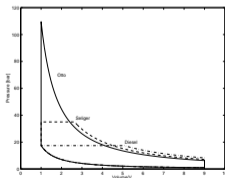
Cykeleffektiviteten och pV-diagramet

Alla tre ideala cyklerna

$$\eta_{f,i} = \frac{W_i}{Q_{in}}$$

Förutsättning:
Samma Q_{in} .

Vad syns i diagrammet?



$$\eta_{Otto} > \eta_{Seiliger} > \eta_{Diesel}$$

31 / 35

Cykeleffektivitet forts.

Dieselsykel eller cykel med konstant-tryck

$$\eta_{f,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \frac{\beta^{\gamma} - 1}{(\beta - 1)\gamma}$$

Seiligercykel eller cykel med begränsat-tryck

$$\eta_{f,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \frac{\alpha\beta^{\gamma} - 1}{\alpha(\beta - 1)\gamma + \alpha - 1}$$

Notera att Dieselsykeln ($\alpha = 1$)
och Ottocykeln ($\alpha = 1$ och $\beta = 1$)
är specialfall av Seiligercykeln.

–Alla cykler säger att vi skall ha högt kompressionstal!

–Vad är haken?

32 / 35

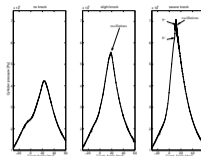
Några kolvar som utsatts för knock



- Knock (spikning) och oktantal hänger samman
- Oktantalet är bränslets motstånd mot självantändning.
- Krav på styrsystemet
 - Hantera olika bränslen.

33 / 35

Knack – En begränsning för bensinmotorer



–Knack kan förstöra motorn!

–Mer om denna begränsning för bensinmotorn nästa läsperiod...

34 / 35

Innehållsförteckning

- 1 Repetition
 - Luft och bränsle
- 2 Arbetsprinciper och Momentgenerering
 - Arbetscykeln
 - Grundläggande begrepp
- 3 Sammanfattning av termodynamiken
 - Termodynamiska storheter
 - Termodynamiska system, processer, och cykler
- 4 Motor cykelräkning
 - Jämförelse mellan modell och mätning
 - De ideala cyklernas effektivitet
- 5 Motor, mer om arbetsprinciperna
 - pV diagrammet och andra cykler
 - Knack – En begränsning

35 / 35