TMA680 TILLÄMPAD MATEMATIK K, 1996
KOMPLETTERANDE FÖRELÄSNINGS-ANTECKNINGAR OCH ÖVNINGAR

Stig Larsson

K1. Numerisk optimering—en orientering

Optimeringsproblem går ut på att minimera en funktion $f(x)$ då x tillhör en delmängd $X \subset \mathbf{R}^n$, dvs man söker

$$\min_{x \in X} f(x)$$

Funktionen f kallas *objektfunktion* eller *målfunktion* och den beskriver ofta en kostnad eller en energi som ska minimeras. Mängden X (som kan vara hela $\mathbf{R}^n$) kallas *tillåten mängd* eller *tillåtet område*. Problemet att maximera f kan givetvis formuleras som att minimera $-f$.

Den tillåtna mängden X beskrivs ofta med hjälp av så kallade *bivillkor*, som kan vara olikheter

$$g_i(x) \le 0, \ i = 1, \dots, m$$

eller likheter

$$g_i(x) = 0, \ i = m+1, \dots, p$$

Exempel 1. En handelsträdgård säljer två slags handelsgödsel, A och B. Dessa innehåller olika mycket av näringsämnena N, P och K, se tabellen. Tabellen visar också priset i kr/kg samt hur mycket av N, P och K du behöver till din golfbana.

	N	P	K	pris
A	19%	7%	15%	43
B	21%	5%	14%	38
behov	30	10	24	

Problemet är att bestämma hur mycket du ska köpa av A och B för att tillfredställa behovet och samtidigt minimera kostnaden.

Antag att du köper x_1 respektive x_2 kg av A och B. Kostnaden blir $f(x_1, x_2) = 43x_1 + 38x_2$. Denna funktion skall minimeras samtidigt som bivillkoren att du får tillräckligt mycket av N, P, K uppfylls:

$$\begin{aligned} 19x_1 + 21x_2 &\ge 3000 \\ 7x_1 + 5x_2 &\ge 1000 \\ 15x_1 + 14x_2 &\ge 2400 \end{aligned}$$

Dessutom måste ju $x_1 \ge 0$, $x_2 \ge 0$. Observera att både objektfunktionen och bivillkoren kan skrivas på matrisform: $f(x) = h^t x$, $Ax \ge b$ och $x \ge 0$, där olikheterna gäller komponentvis. Ett problem av denna typ kallas *linjärprogrammeringsproblem* eftersom både objektfunktion och bivillkor är linjära. Den vanligaste numeriska metoden

för att lösa sådana problem är den så kallade simplexmetoden. Den finns implementerad i MATLAB-programmet `lp`.

Det aktuella problemet är så enkelt att man kan lösa det grafiskt. Varje bivillkor säger att x ska ligga på ena sidan om en rät linje i x_1, x_2-planet. Det tillåtna området blir det område som ligger till höger om och över x_1 och x_2 axlarna och de tre räta linjerna enligt figuren. Nivåkurvorna till objektfunktionen är också räta linjer med normalvektorn $(43, 38)$. Man inser att minimum inträffar i något hörn av det tillåtna området. (Gör övning 2.)

□

Exempel 2. Minimera energin

$$f(x) = \frac{1}{2}x^t Ax - b^t x \text{ då } x \in \mathbf{R}^n$$

och A är en symmetrisk positivt definit matris av typ $n \times n$. Denna typ av minimeringsproblem uppträder t ex i mekaniken. Observera att detta problem saknar bivillkor: det tillåtna området är hela $\mathbf{R}^n$. Notera också att gradienten av f är $f'(x) = Ax - b$ och Hessematrisen $f''(x) = A$. Eftersom den senare är positivt definit har vi en unik mimimipunkt $x = A^{-1}b$. I MATLAB finns programmen `fmins` och `fminu` för denna typ av problem. (Gör övning 3.) □

Exempel 3. Van der Waals tillståndsekvation för en gas är

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \tag{1}$$

Här är $p,\ V,\ T$ tryck, volym och temperatur. Parametrarna a och b är karakteristiska för gasen (kom ihåg att $a = b = 0$ för en ideal gas). För att bestämma a och b gör vi ett antal mätningar. Detta resulterar i en serie mätvärden $p_k,\ V_k,\ T_k,\ k = 1, \ldots, n$.

Vi anpassar sedan mätserien till teorin (1) genom att minimera funktionen

$$f(a,b) = \sum_{k=1}^{n} \left(\left(p_k + \frac{a}{V_k^2} \right) (V_k - b) - RT_k \right)^2$$

Detta är en ickelinjär variant av minsta kvadratmetoden. I MATLAB kan man lösa detta problem med t ex programmen `leastsq`, `fminu` eller `fmins`. □

De flesta numeriska metoder för minimering är iterativa, dvs algoritmen söker efter ett lokalt minimum genom att utgå från en startapproximation x_0 och sedan bestämma en bättre approximation x_1, etc. Gemensamt för de flesta metoder är också att de behöver tillgång till gradienten av funktionen f. Om användaren inte kan eller vill programmera f's derivator, så beräknar programmet dessa approximativt genom att ersätta partiella derivator med differenskvoter. Beräkningen blir dock ofta snabbare och noggrannare om programmet förses med exakta formler för derivatorna. Detta låter sig dock inte alltid göras; man har kanske inte tillgång till en explicit formel för $f'(x)$, eller denna är alltför komplicerad. Tidsåtgången för en numerisk optimering bestäms bl a av antalet funktionsevalueringar (av f och f') som måste utföras och hur tidskrävande dessa är.

For minimeringsproblem utan bivillkor är den grundläggande metoden att man givet en approximativ minimipunkt x_k söker en bättre approximation x_{k+1} genom att söka i gradientens riktning, dvs man minimerar funktionen

$$g(s) = f(x_k + sf'(x_k)), \quad s \in \mathbf{R}.$$

Exempel 4. Betrakta minimeringsproblemet i Exempel 2 ovan med $b = 0$ och

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nivåkurvorna till f är cirklar med minimum i origo och gradientsökningsalgoritmen hittar lösningen i ett steg. Med

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$$

blir nivåkurvorna extremt avlånga ellipser och gradientsökningsalgoritmen behöver många steg för att hitta minimipunkten. Man säger att detta minimeringsproblem är illa konditionerat. □

K2. Dynamiskt system. Linjärisering. Stabilitet

Vi börjar med ett enkelt exempel.

Exempel. Rörelseekvationerna för en dämpad, driven pendel är

$$ml\theta''(t) = -mg \sin\theta(t) - bl\theta'(t) + M(t)/l, \tag{2}$$

med beteckningar enlig figuren, och där b [Ns/m] är en dämpningskoefficient ("luft-

motståndet") och $M(t)$ [Nm] är ett vridmoment ("en elmotor på axeln").

Med beteckningarna $X_1 = \theta$, $X_2 = \theta'$, $U = M$, $\omega = \sqrt{g/l}$, $\alpha = b/m$, $\beta = 1/(ml^2)$ får vi

$$
\begin{aligned}
X_1'(t) &= X_2(t), \\
X_2'(t) &= -\omega^2 \sin X_1(t) - \alpha X_2(t) + \beta U(t).
\end{aligned} \tag{3}
$$

Detta kan skrivas på matrisform,

$$
X'(t) = F(X(t), U(t)), \quad \text{där } X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}, \; F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix},
$$

och $F_1(X, U) = X_2$, $F_2(X, U) = -\omega^2 \sin X_1(t) - \alpha X_2(t) + \beta U(t)$. Till dessa ekvationer kommer ett begynnelsevillkor

$$
X(0) = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \nu_0 \end{bmatrix},
$$

där θ_0 och ν_0 är pendelns utslagsvinkel respektive vinkelhastighet vid tiden $t = 0$. □

Mer allmänt betraktar vi ett begynnelsevärdesproblem för ett system av icke-linjära ordinära differentialekvationer av typen

$$
\begin{aligned}
X'(t) &= F(X(t), U(t)), \quad t > 0, \\
X(0) &= X_0,
\end{aligned} \tag{4}
$$

där $X(t) \in \mathbf{R}^n$ är den obekanta lösningen, $F \in \mathbf{R}^n$ är en given vektorvärd funktion av $X \in \mathbf{R}^n$ och $U \in \mathbf{R}^m$, $U(t) \in \mathbf{R}^m$ är en given funktion och $X_0 \in \mathbf{R}^n$ är ett givet begynnelsevärde. I exemplet är $n = 2$ och $m = 1$. Vi betraktar detta som ett *dynamiskt system*, där vi ger *indata* X_0 och $U(t)$ och beräknar *utdata* $X(t)$. Vi är alltså inte intresserade av en enskild lösning $X(t)$ utan av systemets beteende då vi varierar indata. Differentialekvationen är icke-linjär och kan i allmänhet endast lösas numeriskt. Viss information om systemets beteende kan man dock få genom att linjärisera.

Stationär lösning. Antag att systemet (4) har ett stationärt (tidsoberoende) tillstånd $\bar{X}$, $\bar{U}$. Detta betyder att

$$F(\bar{X}, \bar{U}) = 0. \tag{5}$$

I tillämpningar kan $\bar{X}$ representera en arbetspunkt, som man vill uppnå genom att välja styrvariabeln $\bar{U}$ på lämpligt sätt.

Exempel. För pendeln ges de stationära punkterna av ekvationssystemet

$$\begin{aligned} \bar{X}_2 &= 0, \\ -\omega^2 \sin \bar{X}_1 - \alpha \bar{X}_2 + \beta \bar{U} &= 0. \end{aligned} \tag{6}$$

Om vi väljer t ex $\bar{U} = 0$ (dvs inget yttre vridmoment) får vi lösningarna $\bar{X}_2 = 0$, $\bar{X}_1 = k\pi$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$. På grund av periodicitet räcker det att betrakta de två fallen $\bar{X}_1 = 0$ (nedre jämviktsläget) och $\bar{X}_1 = \pi$ (övre jämviktsläget). Med $\bar{U} = 0$ har vi alltså två stationära punkter $\bar{X} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ och $\bar{X} = \begin{bmatrix} \pi \\ 0 \end{bmatrix}$.

Å andra sidan, om vi vill att pendeln ska ställa in sig på vinkeln $\bar{X}_1 = \phi$ ($0 \le \phi < \pi/2$), väljer vi $\bar{U}$ så att

$$-\omega^2 \sin \phi + \beta \bar{U} = 0,$$

dvs $\bar{U} = \frac{\omega^2}{\beta} \sin \phi$. Med detta värde på $\bar{U}$ ges de stationära lösningarna av $\bar{X}_2 = 0$ och ekvationen

$$-\omega^2 \sin \bar{X}_1 + \omega^2 \sin \phi = 0,$$

med lösningarna

$$\bar{X}_1 = \begin{cases} \phi + k2\pi \\ \pi - \phi + k2\pi \end{cases}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots.$$

Med $\bar{U} = \frac{\omega^2}{\beta} \sin \phi$ får vi alltså (bortsett från periodiska upprepningar) två stationära punkter $\bar{X} = \begin{bmatrix} \phi \\ 0 \end{bmatrix}$ och $\bar{X} = \begin{bmatrix} \pi - \phi \\ 0 \end{bmatrix}$. $\square$

Linjärisering. Låt nu $X(t)$ med data X_0, $U(t)$ vara en lösning till (4) som är nära $\bar{X}$. Med

$$X(t) = \bar{X} + \Delta X(t), \quad U(t) = \bar{U} + \Delta U(t), \quad X_0 = \bar{X} + \Delta X_0, \tag{7}$$

kan vi betrakta $\Delta X(t)$ som en störning i $X(t)$ orsakad av störningarna ΔX_0 och $\Delta U(t)$ i data. Vi söker en ekvation för $\Delta X(t)$. Vi har

$$\Delta X'(t) = X'(t) = F(X(t), U(t)) = F(\bar{X} + \Delta X(t), \bar{U} + \Delta U(t)).$$

Taylorutveckling av F_i kring $\bar{X}$, $\bar{U}$ ger

$$\begin{aligned} F_i(\bar{X} + \Delta X(t), \bar{U} + \Delta U(t)) = F_i(\bar{X}, \bar{U}) &+ \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial F_i}{\partial X_j}(\bar{X}, \bar{U}) \Delta X_j(t) \\ &+ \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial F_i}{\partial U_j}(\bar{X}, \bar{U}) \Delta U_j(t) + R_i(t), \end{aligned} \tag{8}$$

där $R_i(t)$ är resttermen. Eftersom $F(\bar{X}, \bar{U}) = 0$, får vi (på matrisform)

$$F(\bar{X} + \Delta X(t), \bar{U} + \Delta U(t)) = A \Delta X(t) + B \Delta U(t) + R(t), \tag{9}$$

där matriserna

$$A = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial X_j}(\bar{X}, \bar{U}) \right\}_{i=1,\ j=1}^{n,\ n}, \quad B = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial U_j}(\bar{X}, \bar{U}) \right\}_{i=1,\ j=1}^{n,\ m}, \tag{10}$$

kallas Jacobimatriser till F i punkten $\bar{X}, \bar{U}$. Den sökta ekvationen för $\Delta X(t)$ är alltså

$$\begin{aligned} &\Delta X'(t) = A\Delta X(t) + B\Delta U(t) + R(t), \quad t > 0, \\ &\Delta X(0) = \Delta X_0. \end{aligned} \tag{9}$$

Observera att denna endast är en omskrivning av (4). Om $\Delta X(t)$ och $\Delta U(t)$ är små, så kan vi förenkla (9) genom att försumma resttermen, och vi får det *linjäriserade systemet*

$$\begin{aligned} &x'(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad t > 0, \\ &x(0) = x_0, \end{aligned} \tag{11}$$

för den approximativa störningen $x(t) \approx \Delta X(t)$ orsakad av datastörningarna $x_0 = \Delta X_0$ och $u(t) = \Delta U(t)$.

Det linjära systemet (11) sägs vara *stabilt* om lösningen $x(t)$ förblir liten för alla $t \geq 0$, om man tar tillräckligt små indata x_0, $u(t)$. Man kan visa att i så fall förblir $X(t)$ nära $\bar{X}$, om man väljer X_0 tillräckligt nära $\bar{X}$ och $U(t)$ tillräckligt nära $\bar{U}$. Vi säger då att $\bar{X}$, $\bar{U}$ är en *stabil stationär punkt* till det icke-linjära systemet (4). Observera att triviala lösningen $x(t) = 0$, $u(t) = 0$ till (11) motsvarar stationära lösningen $X(t) = \bar{X}$, $U(t) = \bar{U}$ till (4).

Exempel. För pendeln blir Jacobimatriserna

$$A = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial X_j}(\bar{X}, \bar{U}) \right\} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 \cos \bar{X}_1 & -\alpha \end{bmatrix}, \quad B = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial U_j}(\bar{X}, \bar{U}) \right\} = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix}. \tag{12}$$

I punkten $\bar{X} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\bar{U} = 0$ får vi det linjäriserade systemet

$$x'(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -\alpha \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix} u(t), \tag{13}$$

vilket motsvarar den linjära, dämpade, drivna svängningsekvationen

$$\theta''(t) + \omega^2 \theta(t) + \alpha\theta'(t) = \beta u(t).$$

I punkten $\bar{X} = \begin{bmatrix} \pi \\ 0 \end{bmatrix}$, $\bar{U} = 0$ får vi det linjäriserade systemet

$$x'(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega^2 & -\alpha \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix} u(t), \tag{14}$$

vilket motsvarar

$$\theta''(t) - \omega^2 \theta(t) + \alpha\theta'(t) = \beta u(t),$$

vars lösningar inte är svängningar. □

Vi ska nu undersöka stabiliteten hos systemet (11). Vi börjar med den homogena ekvationen, dvs fallet då $Bu(t) \equiv 0$.

Homogent system. Vi betraktar ett system av linjära differentialekvationer med konstanta koefficienter

$$x'(t) = Ax(t),\ t > 0;\ x(0) = b. \tag{15}$$

Antag att koefficientmatrisen A är diagonaliserbar, dvs att egenvektormatrisen $P = [g_1, \ldots, g_n]$ är inverterbar, så att $P^{-1}AP = D$, $D = \mathrm{diag}\{\lambda_1, \ldots, \lambda_n\}$. Då utgör egenvektorerna $\{g_k\}_{k=1}^n$ en bas för $\mathbf{R}^n$ (eller $\mathbf{C}^n$ om g_k är komplexa). Varje vektor kan då skrivas på ett entydigt sätt som en linjärkombination av $\{g_k\}_{k=1}^n$. Speciellt gör vi ansatsen $x(t) = \sum_{k=1}^n y_k(t) g_k$. Koefficienterna $y_k(t)$ bestäms genom insättning i differentialekvationen. Om vi använder relationerna $Ag_k = \lambda_k g_k$ får vi

$$0 = x'(t) - Ax(t) = \sum_{k=1}^n y_k'(t) g_k - \sum_{k=1}^n y_k(t) A g_k = \sum_{k=1}^n \Big(y_k'(t) - \lambda_k y_k(t) \Big) g_k.$$

Identifikation av koefficienterna för g_k ger ett okopplat system

$$y_k'(t) = \lambda_k y_k(t),\ k = 1, \ldots, n, \tag{16}$$

med lösningen $y_k(t) = c_k e^{\lambda_k t}$, vilket ger

$$x(t) = \sum_{k=1}^n c_k e^{\lambda_k t} g_k = c_1 e^{\lambda_1 t} g_1 + \cdots + c_n e^{\lambda_n t} g_n. \tag{17}$$

Koefficienterna c_k ges av begynnelsevillkoret $x(0) = b$,

$$b = \sum_{k=1}^n c_k g_k,$$

dvs c_k är komponenterna för vektorn b med avseende på basen $\{g_k\}_{k=1}^n$.

Likheten (17) ger lösningen $x(t)$ som en linjärkombination av egenmoder $c_k e^{\lambda_k t} g_k$. Karaktären hos dessa bestäms av egenvärdena λ_k. Om vi skriver $\lambda_k = \alpha_k + j\omega_k$ där α_k och ω_k ar real- respektive imaginärdelarna av λ_k kan vi urskilja två fall:

(1) $\lambda_k = \alpha_k$ är reellt. Då är $e^{\lambda_k t} = e^{\alpha_k t}$ exponentiellt växande, exponentiellt avtagande eller konstant beroende på om $\alpha_k > 0$, $\alpha_k < 0$ eller $\alpha_k = 0$.

(2) $\lambda_k = \alpha_k + j\omega_k$ är inte reellt ($\omega_k \neq 0$). Då är $e^{\lambda_k t} = e^{\alpha_k t + j\omega_k t} = e^{\alpha_k t} e^{j\omega_k t} = e^{\alpha_k t}(\cos\omega_k t + j \sin\omega_k t)$ en harmonisk svängning med exponentiellt växande, exponentiellt avtagande eller konstant amplitud beroende på om $\alpha_k > 0$, $\alpha_k < 0$ eller $\alpha_k = 0$.

Bland annat kan vi nu dra slutsatser om lösningens beteende då $t \to \infty$. Vi säger att systemet (15) är *stabilt* om $x(t)$ är begränsad då $t \to \infty$ för alla begynnelsevärden b, dvs om för varje begynnelsevärde b finns en konstant C sådan att $\|x(t)\| \leq C$ för $0 \leq t < \infty$, *asymptotiskt stabilt* om $x(t) \to 0$ då $t \to \infty$ för alla begynnelsevärden b, och *instabilt* annars.

Sats 1. *Om A är diagonaliserbar så är systemet $x' = Ax$ stabilt om och endast om $Re\,\lambda_k \leq 0$ för alla egenvärden λ_k, asymptotiskt stabilt om och endast om $Re\,\lambda_k < 0$ för alla egenvärden λ_k, och instabilt om och endast om $Re\,\lambda_k > 0$ för något egenvärde λ_k.*

Bevis. Tillämpa triangelolikheten på (17) så fås

$$\|x(t)\| \leq \sum_{k=1}^n \|c_k e^{\lambda_k t} g_k\| = \sum_{k=1}^n |c_k| e^{\alpha_k t} \|g_k\|, \quad \alpha_k = \mathrm{Re}\,\lambda_k.$$

Om $\alpha_k \le 0$ för alla k så är $e^{\alpha_k t} \le 1$ och $\|x(t)\| \le \sum_{k=1}^n |c_k| \|g_k\| = C$ och systemet är stabilt. Om $\alpha_k < 0$ för alla k så $e^{\alpha_k t} \to 0$ då $t \to \infty$ och $\|x(t)\| \to 0$ och systemet är asymptotiskt stabilt.

Omvänt om $\alpha_k \ge 0$ för något k så tar vi $b = g_k$ och vi får

$$\|x(t)\| = \|e^{\lambda_k t} g_k\| = e^{\alpha_k t} \|g_k\|.$$

Speciellt om $\alpha_k > 0$ så $\|x(t)\| \to \infty$ då $t \to \infty$ och systemet är inte stabilt, och om $\alpha_k = 0$ så $\|x(t)\| = \|g_k\|$ dvs systemet är inte asymptotiskt stabilt. □

Matrisexponentialfunktionen. Om matrisen A är diagonaliserbar, $A = PDP^{-1}$, definierar vi matrisen

$$e^{tA} = Pe^{tD}P^{-1}, \text{ där } e^{tD} = \text{diag}\{e^{t\lambda_1}, \dots, e^{t\lambda_n}\}.$$

Genom transformationen $x = Py$, $b = Pc$, övergår ekvation (15) i

$$y'(t) = Dy(t), \ t > 0; \quad y(0) = c,$$

vilken är identisk med (16), med lösningen $y(t) = e^{tD}c$. Genom att transformera tillbaka får vi

$$x(t) = Py(t) = Pe^{tD}c = Pe^{tD}P^{-1}b = e^{tA}b,$$

dvs

$$x(t) = e^{tA}b,$$

vilket är ett annat sätt att skriva (17). Matrisen e^{tA} kan ses som en lösningsoperator till det homogena systemet (15). Observera att

$$\frac{d}{dt}e^{tA} = Ae^{tA} = e^{tA}A. \tag{18}$$

Om A inte är diagonaliserbar, så gäller inte lösningsformeln (17), men man kan ändå visa att villkoret att alla $\text{Re}\,\lambda_k < 0$ är tillräckligt för stabilitet och att villkoret att ett $\text{Re}\,\lambda_k > 0$ är tillräckligt för instabilitet. En egenmod med $\text{Re}\,\lambda_k = 0$ kan dock vara stabil eller (svagt) instabil beroende på omständigheterna.

Sammanfattning. *Det linjära systemet $x' = Ax$ stabilt om $Re\,\lambda_k < 0$ för alla egenvärden λ_k, och instabilt om $Re\,\lambda_k > 0$ för något egenvärde λ_k.*

Sats 1 är ett *kvalitativt* resultat: vi får t ex veta att störningar inte växer obegränsat men inte hur stora de kan bli. Om A är symmetrisk så kan vi även få *kvantitativ* information.

Symmetriskt system. Antag att A är symmetrisk. Enligt spektralsatsen är λ_k reella och vi kan välja g_k ortonormerade. Vi har då

$$b = \sum_{k=1}^n c_k g_k, \quad c_k = (b, g_k) = b^t g_k, \quad \|b\|^2 = \sum_{k=1}^n c_k^2,$$

$$x(t) = \sum_{k=1}^n c_k e^{\lambda_k t} g_k, \quad \|x(t)\|^2 = \sum_{k=1}^n (c_k e^{\lambda_k t})^2 = \sum_{k=1}^n c_k^2 e^{2\lambda_k t}.$$

Sats 1 ger att systemet (15) är stabilt om och endast om alla $\lambda_k \le 0$, dvs om och endast om A är negativt semidefinit. I så fall ordnar vi egenvärdena $\lambda_n \le \dots \le \lambda_k \le \dots \le \lambda_1 \le 0$ så att $e^{\lambda_k t} \le e^{\lambda_1 t} \le 1$ och

$$\|x(t)\|^2 = \sum_{k=1}^n c_k^2 e^{2\lambda_k t} \le e^{2\lambda_1 t} \sum_{k=1}^n c_k^2 = e^{2\lambda_1 t}\|b\|^2 \le \|b\|^2,$$

dvs

$$\|x(t)\| \le \|b\|, \quad t \ge 0. \tag{19}$$

Vi drar slutsatsen att en störning inte kan bli större än begynnelsestörningen. Om A är negativt definit så har vi $\lambda_k \le \lambda_1 < 0$ och

$$\|x(t)\| \le e^{\lambda_1 t}\|b\|, \quad t \ge 0,$$

dvs störningen avtar exponentiellt då $t \to \infty$.

Inhomogent system. Om $Bu(t) \not\equiv 0$, så ges lösningen till (11) av

$$x(t) = e^{tA}x_0 + \int_0^t e^{(t-s)A}Bu(s)\,ds, \tag{20}$$

där matrisen e^{tA} är lösningsoperatorn till det homogena systemet (15), se Problem 6. Om nu $\operatorname{Re}\lambda_k < 0$ för alla egenvärden λ_k till A, så att e^{tA} är stabil, så kan man visa att termen $\int_0^t e^{(t-s)A}Bu(s)\,ds$ också är stabil, dvs den blir liten om $u(t)$ är tillräckligt liten.

Exempel. Vi återvänder nu till pendeln. Jacobimatrisen för det övre jämviktsläget är, se (14),

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega^2 & -\alpha \end{bmatrix},$$

med egenvärdena

$$\lambda_\pm = -\frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} + \omega^2}.$$

Eftersom $\lambda_+ > 0$ och $\lambda_- < 0$ drar vi slutsatsen att det övre jämviktsläget är instabilt.

I det undre jämviktsläget, se (13), blir Jacobimatrisen

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -\alpha \end{bmatrix},$$

med egenvärdena

$$\lambda_\pm = -\frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} - \omega^2}.$$

Om $\alpha > 2\omega$ (stark dämpning) får vi två reella egenvärden $\lambda_\pm < 0$. Om $\alpha = 2\omega$ (kritisk dämpning) får vi ett dubbelt reellt egenvärde $\lambda_\pm = -\alpha/2 < 0$ (Jacobimatrisen är ej diagonaliserbar i detta fall). Om $0 < \alpha < 2\omega$ (svag dämpning) får vi två komplexa egenvärden med $\operatorname{Re}\lambda_\pm = -\alpha/2 < 0$. Om $\alpha = 0$ (ingen dämpning) får vi två imaginära egenvärden $\lambda_\pm = \pm i\omega$ med $\operatorname{Re}\lambda_\pm = 0$. Vi drar slutsatsen att det nedre jämviktsläget är stabilt om $\alpha = 0$ och asymptotiskt stabilt om $\alpha > 0$. □

K3. Värmeledning, diffusion, reaktion

Härledning av värmeledningsekvationen. Vi studerar värmeledning i en kropp $V \subset \mathbf{R}^3$ med begränsningsytan S. Vi inför följande beteckningar:

$u = u(x,y,z,t)$ temperaturen i punkten (x,y,z) vid tiden t [K],
$j = j(x,y,z,t)$ värmeflödesvektorn [J/(m^{2}s)],
$c_p = c_p(x,y,z)$ värmekapaciteten [J/(kg K)],
$\rho = \rho(x,y,z)$ masstätheten [kg/m^3],
$\lambda = \lambda(x,y,z)$ värmeledningsförmågan [J/(m K s)],
$q = q(x,y,z,t)$ värmekällor/sänkor [J/(m^{3}s)].

Vi betraktar värmebalansen i en godtycklig delvolym V_0 med begränsningsytan S_0. Totala värmeenergin är $\int_{V_0} \rho c_p\, u\, dV$ [J] och nettoflödet ut genom S_0 blir $\int_{S_0} j \cdot n\, dS$. Här är n den utåtriktade enhetsnormalen till ytan S_0.

Energiprincipen säger att ändringen per tidsenhet av den totala värmeenergin i V_0 är lika med värmeflödet in genom S_0 plus värmeproduktionen per tidsenhet i V_0. Eftersom den totala värmeenergin är $\int_{V_0} \rho c_p\, u\, dV$ och värmeproduktionen per tidsenhet är $\int_{V_0} q\, dV$, får vi

$$\frac{d}{dt}\int_{V_0} \rho c_p\, u\, dV = -\int_{S_0} j \cdot n\, dS + \int_{V_0} q\, dV.$$

Vi tillämpar nu divergenssatsen för vektorfältet j och derivering under integraltecknet:

$$\int_{S_0} j \cdot n\, dS = \int_{V_0} \nabla \cdot j\, dV \quad \text{och} \quad \frac{d}{dt}\int_{V_0} \rho c_p\, u\, dV = \int_{V_0} \rho c_p \frac{\partial u}{\partial t}\, dV,$$

vilket leder till

$$\int_{V_0} \left(\rho c_p \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot j - q \right) dV = 0.$$

Eftersom $V_0 \subset V$ är godtycklig, så måste integranden vara identiskt lika med 0, dvs

$$\rho c_p \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot j = q.$$

Fouriers lag säger att värmeflödet är proportionellt mot temperaturgradienten och att värme strömmar från varmt till kallt. Därför blir flödesvektorn

$$j = -\lambda \nabla u = -\lambda \text{grad } u$$

och vi får

$$\rho c_p \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla u) = q.$$

Detta är värmeledningsekvationen med variabla koefficienter. Om vi för enkelhets skull antar att koefficienterna ρ, c_p, λ är konstanta får vi istället

$$\frac{1}{\kappa}\frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot \nabla u = \frac{q}{\lambda},$$

där $\kappa = \lambda/\rho c_p$. Med Laplaceoperatorn

$$\Delta u = \nabla \cdot \nabla u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

och $u_t = \partial u/\partial t$ samt $f(x,y,z,t) = q(x,y,z,t)/\lambda$ har vi värmeledningsekvationen med konstanta koefficienter:

$$\frac{1}{\kappa} u_t - \Delta u = f. \tag{21}$$

Ekvation (21) måste kombineras med ett begynnelsevillkor

$$u(x,y,z,0) = v(x,y,z) \tag{22}$$

samt ett randvillkor, som uttrycker att värmeflödet ut genom randen är proportionellt mot temperaturdifferensen, $j \cdot n = k(u - g)$, där g är omgivningens temperatur och k [J/(m^2 s K)] en värmeöverföringskoefficient. Eftersom

$$j \cdot n = -\lambda \nabla u \cdot n = -\lambda \frac{\partial u}{\partial n} \quad \text{på } S,$$

där $\partial u/\partial n$ betecknar normalderivatan av u, dvs riktningsderivatan i normalriktningen n, blir randvillkoret

$$\frac{\partial u}{\partial n} + h(u - g) = 0 \quad \text{på } S, \tag{23}$$

där $h = k/\lambda$. Gränsfallet $h = 0$ svarar mot att begränsningsytan är isolerad:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad \text{på } S.$$

Om vi å andra sidan dividerar med h i (23) och sedan låter $h \to \infty$, får vi att temperaturen är föreskriven:

$$u = g \quad \text{på } S.$$

Gränsfallet $h = \infty$ betyder alltså att begränsningsytan är oisolerad, dvs värme kan obehindrat strömma genom ytan och kroppens yttemperatur blir då lika med omgivningens temperatur.

Den partiella differentialekvationen (21) tillsammans med begynnelsevillkoret (22) och randvillkoret (23) säges utgöra ett begynnelse-randvärdesproblem.

Om f inte beror på t uppnås då $t \to \infty$ ett stationärt tillstånd $u = u(x, y, z)$. Eftersom nu $u_t = 0$ får vi Poissons ekvation

$$-\Delta u = f.$$

Om dessutom $f = 0$ har vi Laplaces ekvation

$$-\Delta u = 0.$$

Dessa måste kombineras med lämpliga randvillkor enligt ovan. Vi har då ett så kallat randvärdesproblem.

Om vi betraktar värmeledning i en lång cylinder orienterad parallellt med x-axeln och vars mantelyta är isolerad, och där begynnelsetemperaturen v och källtermen f är oberoende av y och z, är det rimligt att anta att temperaturen också är oberoende av y och z, dvs $u = u(x, t)$. Värmeledningsekvationen (21) blir då

$$\frac{1}{\kappa} u_t - u_{xx} = f.$$

Denna studeras i ett intervall t ex $0 < x < L$. Eftersom $\partial u/\partial n = -\partial u/\partial x$ vid $x = 0$ och $\partial u/\partial n = \partial u/\partial x$ vid $x = L$ blir randvillkoret (23) nu

$$-u_x + h_0(u - g_0) = 0, \ x = 0; \quad u_x + h_L(u - g_L) = 0, \ x = L,$$

där h_0, g_0 respektive h_L, g_L är värmeöverföringskoefficienten och omgivningens temperatur vid ytan $x = 0$ respektive $x = L$. Gränsfallen $h_0 = 0$, $h_0 = \infty$ etc tolkas analogt med ovan.

Diffusionsekvationen. Vid en diffusionsprocess är massflödet proportionellt mot gradienten av koncentrationen $c = c(x, y, z, t)$ [mol/m^3] av det diffunderande ämnet:

$$j = -D\nabla c = -D\text{grad } c. \quad [\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})]$$

Här är D [m^2/s] diffusionskonstanten. Samma härledning som ovan leder till diffusionsekvationen:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \nabla \cdot (D\nabla c) = f, \quad [\text{mol}/(\text{m}^3\text{s})]$$

eller, om D är konstant,

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D\Delta c = f.$$

Matematiskt sett är detta samma ekvation som värmeledningsekvationen. Randvillkoret blir

$$\frac{\partial c}{\partial n} + d(c - c_0) = 0 \quad \text{på } S,$$

där koefficienten d beror på ytans permeabilitet och c_0 är concentrationen utanför S.

Reaktions-diffusionsekvationer. Betrakta en enkel exoterm kemisk reaktion där reaktionshastigheten ges av Arrhenius lag $k_0 c \exp(-E/RT)$ [mol/(m^{3}s)]. Här är E aktiveringsenergin, R allmänna gaskonstanten, T temperaturen och c [mol/m^3] koncentrationen av det reagerande ämnet. Reaktionsentalpin är $-\Delta H$ [J/mol]. Vi får två kopplade partiella differentialekvationer

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} - \kappa\Delta T &= \beta k_0 c e^{-E/RT}, \quad \beta = \frac{-\Delta H}{\rho c_p}, \\ \frac{\partial c}{\partial t} - D\Delta c &= -k_0 c e^{-E/RT}, \end{aligned} \tag{24}$$

med randvillkoren

$$\frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0, \ \frac{\partial c}{\partial n} + d(c - c_0) = 0 \quad \text{på } S.$$

Observera att differentialekvationerna är ickelinjära och kopplade till varandra.

Övningar

1. Bestäm lokala maxima och minima till funktionen $f(x, y) = x^3 + y^2 - xy$.

2. Lös handelsgödselproblemet i K1 Exempel 1 ovan både grafiskt och med hjälp av Matlab-programmet `lp` eller `constr`. Hur mycket måste priset på B sänkas för att det ska bli fördelaktigt att köpa enbart av denna sort?

3. Bevisa påståendena i K1 Exempel 2.

4. Kvadratisk form. (Matlab, TLA kap. 8) Bestäm största och minsta värdet av den kvadratiska formen

$$f(x, y, z) = 9x^2 + 5y^2 + 6z^2 + 8xy + xz + 3yz$$

på sfären $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ och ange i vilka punkter maximum och minimum inträffar.

5. Minimering. (Matlab) Sök minimum av funktionen

$$f(x) = x_1^4 + x_2^4 - 4x_1x_2 + x_1 + 8, \quad x = [x_1, x_2]^t$$

(Tips: använd kommandot `fmins`; skriv `>> help fmins` för dokumentation. Detta kommando fordrar att man skriver en funktionsfil (kallad t ex `funk.m`) som definierar funktionen f, se TLA sid App:27.)

6. Bevisa (20) genom att multiplicera ekvation (11) med den integrerande faktorn e^{-tA} (se (18)) och integrera.

7. Avgör om systemet $x' = Ax$ är stabilt när A är

$$\text{(a)} \begin{bmatrix} -1001 & 999 \\ 999 & -1001 \end{bmatrix} \quad \text{(b)} \begin{bmatrix} -1 & 3 & 5 \\ 0 & -4 & 6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(c)} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -4 \end{bmatrix}$$

8. Bestäm de stationära lösningarna till systemet

$$\begin{aligned} x_1'(t) &= x_2(t)\big(1 - x_1(t)^2\big), \\ x_2'(t) &= 2 - x_1(t)x_2(t). \end{aligned}$$

Linjärisera kring de stationära lösningarna och undersök de linjäriserade systemens stabilitet.

9. Mineas ekvation. Bestäm vilka stationära lösningar man kan få för olika värden på $\bar{U}$ och $\delta > 0$. Skriv för varje stationär lösning ned den linjäriserade ekvationen och undersök dess stabilitet.

$$\begin{aligned} X_1'(t) &= -X_1(t) - \delta(X_2(t)^2 + X_3(t)^2) + U(t), \\ X_2'(t) &= -X_2(t) - \delta X_1(t) X_2(t), \\ X_3'(t) &= -X_3(t) - \delta X_1(t) X_3(t). \end{aligned}$$

10. Bestäm de stationära punkterna och avgör deras stabilitet för följande system:

$$\text{(a)} \begin{aligned} x' &= x(1-y) \\ y' &= y(1-x) \end{aligned} \qquad \text{(b)} \begin{aligned} x' &= -2(x-10) + ye^x \\ y' &= -2y - ye^x \end{aligned} \qquad \text{(c)} \begin{aligned} x_1' &= x_1 + x_1x_2^2 + x_1x_3^2 \\ x_2' &= -x_1 + x_2 - x_2x_3 + x_1x_2x_3 \\ x_3' &= x_2 + x_3 - x_1^2 \end{aligned}$$

11. Reaktorstabilitet. I en tankreaktor på 1.2 m^3 skall ett ämne ($c_f = 5$ $\mathrm{kmol/m}^3$) omsättas till 50% enligt en första ordningens reaktion med $k = 2.8 \cdot 10^{-5}$ s^{-1} vid 70 °C. Mätningar visar att värdet på k fördubblas för var tionde °C. Reaktionsvärmet är $\Delta H = -83.7$ kJ/mol. Värmekapaciteten och densiteten hos materialströmmen varierar ej med temperaturen och sammansättningen, och är $c_p = 4.19$ kJ/(kg K) respektive $\rho = 1000$ kg/m^3. Flödeshastigheten är $q = 2.79 \cdot 10^{-4}$ m^3/s. Inflödets temperatur är $T_f = 70$°C. För värmeväxlaren i tanken kan man räkna med värmegenomgångskoefficienten $\kappa = 0.58$ kJ/(m^2 s K).

Beräkna gränsvärdet på erforderlig värmeväxlararea A för stabil drift. Välj därefter lämplig area och beräkna temperaturen i kylvattnet vid jämvikt vid 50% omsättningsgrad. (Omsättningsgraden= $(c_f - c)/c_f$.) (Från "Kemisk reaktionsteknik. Övningsuppgifter", Kemisk reaktionsteknik, CTH 1993, uppgift 7.1.) Ledning:

På MD-sun: Importera filerna `~stig/tmk/data.m` och `~stig/tmk/fel.m` med kommandot "`cp ~stig/tmk/*.m .`".

På kemi-pc: Filerna `data.m` och `fel.m` finns tillgängliga efter att man exekverat kommandot "`tillmat`" i Matlab.

(a) Ställ upp balansekvationer för massa och energi. Omsättningshastigheten av massa är Vck [mol/s], där reaktionshastigheten ges av $k = k_0 \exp(-E/(RT))$ [s^{-1}] enligt Arrhenius. Värmeproduktionshastigheten blir då $Q = (-\Delta H)Vck$ [J/s].

(b) För att kunna räkna (numeriskt) måste man skala variablerna så att de får rimliga storleksordningar (det visar sig t ex att $\exp(-E/(RT)) \approx e^{-30}$). Vi inför därför dimensionslösa variabler enligt

$$\begin{aligned} s = t/\tau, \quad \tau = V/q \text{ [s]}, \\ X_1(s) = c(s\tau)/c_f, \quad X_2(s) = T(s\tau)/T_f, \quad U(s) = T_K(s\tau)/T_f, \end{aligned}$$

där $\tau = V/q$ [s] kallas uppehållstiden. Visa att ekvationerna kan skrivas

$$\begin{aligned} \frac{dX_1}{ds} &= 1 - X_1 - X_1 f(X_2), \\ \frac{dX_2}{ds} &= 1 - X_2 + \alpha X_1 f(X_2) - \beta(X_2 - U), \end{aligned}$$

med $f(x) = \delta e^{\gamma - \gamma/x}$, där $\gamma = E/(RT_f)$ är Arrhenius tal och där α, β, δ är positiva tal. Observera att $e^{\gamma - \gamma/X_2} \approx 1$ då $X_2 \approx 1$, vilket är en hanterlig storleksordning. (Alternativt kan man använda variablerna $Y_1 = 1 - X_1 = (c_f - c)/c_f$ (omsättningsgraden) och $Y_2 = \gamma(X_2 - 1) = \gamma(T - T_f)/T_f$. Då blir $e^{\gamma - \gamma/X_2} = e^{Y_2/(1+Y_2/\gamma)} \approx e^{Y_2} \approx 1$ då $Y_2 \approx 0$.)

(c) Bestäm parametrarna δ, γ genom att anpassa funktionen $\tau k = \delta e^{\gamma - \gamma/X_2}$ till givna mätdata för k och T. Dessa finns i filen `data.m`. Exekvera denna så läses alla data in. Se Exempel 3 i avsnitt K1 och exemplet "fitting" i Matlabs demo. Använd Matlab-programmet `fmins` och filen `fel.m`. Plotta mätdata tillsammans med den anpassade funktionen för att se hur bra det stämmer.

(d) Kravet att omsättningen ska vara 50% innebär att arbetspunkten ska vara $\bar{c} = 0.5 c_f$, dvs $\bar{X}_1 = 0.5$. Bestäm $\bar{X}_2$ och $\bar{U}$ så att $\bar{X}_1 = 0.5$. Uttryck dessa i $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, dvs sätt inte in numeriska värden ännu.

(e) Linjärisera kring $\bar{X}, \bar{U}$. Skriv ned det linjäriserade systemet.

(f) Bestäm en undre gräns β_0 för β sådan att det linjäriserade systemet blir stabilt för $\beta > \beta_0$. Gör detta t ex genom att systematiskt beräkna egenvärdena till Jacobimatrisen numeriskt för olika värden på β (Tips: `[P,D]=eig(A)`.) (Man kan nog också beräkna β_0 analytiskt.)

(g) Lös numeriskt både det linjäriserade och det icke-linjära systemet med små störningsdata x_0 och t ex $u(s) = u_0 \cos(s)$ kring $\bar{X}, \bar{U}$. Välj β både under och över stabilitetsgränsen. Plotta lösningarna. (Tips: `ode23`, `ode45`, `plot(s,x)` och `plot(x(:,1),x(:,2))`.) Experimentera! Finns det fler (icke önskvärda) stationära punkter?

(h) Ge slutligen en rekommendation om hur reaktorn ska köras uttryckt i de ursprungliga variablerna c, T, T_K, A. Hur mycket värme måste kylas bort?

12. Skriv följande differentialekvationsproblem som system $x' = Ax$, $x(0) = b$ genom att införa nya variabler $x_1 = u$, $x_2 = u'$, $x_3 = u''$. Lös systemen med diagonaliser-

ingsmetoden.

(a) $u'' + 4u' + 13u = 0$, (dämpad harmonisk svängning)
$u(0) = 0,\ u'(0) = -1$

(b) $u'' + 2\alpha\omega u' + \omega^2 u = 0$, (dämpad harmonisk svängning $\alpha \geq 0, \omega > 0$)
$u(0) = u_0,\ u'(0) = u_1$

(c) $u''' + 3u'' + 2u' = 0,\ u(0) = 1,\ u'(0) = 2,\ u''(0) = 3.$

13. (Repetition av Laplacetransformen, MA2 kap 15.) Lös differentialekvationerna i övning 12 med Laplacetransformen.

14. Konvektions/diffusionsekvationen. Genomför ovanstående härledning i det fallet då värme (eller massa) transporteras även genom konvektion, dvs med hjälp av en "vind" som blåser med hastighetsvektorn $\beta = \beta(x, y, z, t)$ [m/s]. Detta leder till ekvationen

$$\rho c_p \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla u) + \nabla \cdot (\rho c_p u \beta) = q.$$

15. Laplaceoperatorn i sfärisk symmetri. Inför sfäriska koordinater (r, θ, ϕ):

$$\begin{aligned} x &= r \sin\theta \cos\phi \\ y &= r \sin\theta \sin\phi \\ z &= r \cos\theta \end{aligned}$$

Antag att funktionen u ej beror på θ och ϕ, dvs $u = u(r)$. Visa att

$$\Delta u = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \Big(r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \Big)$$

16. Laplaceoperatorn i cylindersymmetri. Inför cylinderkoordinater (ρ, φ, z):

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos\varphi \\ y &= \rho \sin\varphi \\ z &= z \end{aligned}$$

Antag att funktionen u ej beror på φ, dvs $u = u(\rho, z)$. Visa att

$$\Delta u = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \Big(\rho \frac{\partial u}{\partial \rho} \Big) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

17. Visa att följande funktioner satisfierar Laplaces ekvation $\Delta u = 0$.

(a) $u(r, \theta, \phi) = \dfrac{1}{r}$ (sfäriska koordinater)

(b) $u(\rho, \varphi, z) = \ln \rho + z$ (cylindriska koordinater)

(c) $u(x, y, z) = 2x^2 - y^2 - z^2$

18. Lös följande randvärdesproblem. Tolka lösningen fysikaliskt i termer av värmeledning eller diffusion samt rita dess graf.

(a) $-u''_{xx} = 1,\ 0 < x < L,\ u(0) = u(L) = 0$

(b) $-u''_{xx} = 1,\ 0 < x < L,\ u(0) = 0,\ u'(L) = 0$

(c) $-u''_{xx} = 0,\ 0 < x < L,\ -u'(0) + \dfrac{2}{L}(u(0) - 1) = 0,\ u'(L) + \dfrac{3}{L}(u(L) - 2) = 0$

(d) $-u''_{xx} = 1,\ 0 < x < L,\ u'(0) = u'(L) = 0$

19. Visa att funktionen $u(x,y,z) = \sin x \sin y \sin z$ safisfierar randvärdesproblemet

$$-\Delta u = 3u \text{ i } K,\ u = 0 \text{ på } S$$

där K är kuben $\{0 < x < \pi,\ 0 < y < \pi,\ 0 < z < \pi\}$ med randen S. Alltså är u en egenfunktion till Laplaceoperatorn i K med egenvärde 3.

20. Betrakta stationär värmeledning genom en vägg:

$$-(d(x)u'(x))' = 0, \quad -L < x < L; \quad u(-L) = g_0,\ u(L) = g_1.$$

Yttertemperaturerna g_0, g_1 samt värmeledningsförmågan $d(x)$ i isoleringsmaterialet är givna. Uppgiften är att bestämma en effektiv värmeöverföringskoefficient k sådan att värmeflödet genom väggen kan skrivas $q = k(g_0 - g_1)$.

(a) Antag att $d(x) = \epsilon(1 + (\beta x)^2)$ och lös problemet för hand.

(b) Lös randvärdesproblemet med ADFEM. För att bestämma värmeflödet $q(x) = -d(x)u'(x)$ gör vi så här: Nodvärdena av den beräknade temperaturen finns i vektorn `u`, nätstorleken finns i vektorn `h`. Om vi bildar differensen mellan konsekutiva u-värden med programmet `diff` (`>> help diff`) och dividerar med h-värdena, så får vi temperatur-derivatan u'. Den är en styckvis konstant funktion och fås alltså i vektorn `diff(u)./h`. Värdena av värmeledningskoefficienten i mittpunkterna på elementen finns i vektorn `d`. Värmeflödet ges alltså av `q=-d.*diff(u)./h`. Testa först med ett specialfall där exakta lösningen är känd, dvs välj $d(x)$ så att $u(x)$ kan beräknas symboliskt som t ex i (a). Prova sedan med en annan värmeledningskoefficient, t ex $d(x) = 1.01 + \cos 7x$. (Försök inte bestämma den exakta lösningen i detta fall.) Detta problem är svårare att lösa även för ADFEM. Varför?

21. Reaktion-diffusion i porös katalysator-pellet. Ett ämne i gasform diffunderar in i en porös katalysator-pellet och omsätts vid isoterma och stationära betingelser. Vi får reaktions-diffusions ekvationen, se (24),

$$\begin{aligned} -D\Delta c &= -kc \quad \text{i } V, \\ c &= c_f \quad \text{på } S, \end{aligned} \tag{25}$$

med koncentrationen c [mol/m^3] i katalysatorn, den konstanta koncentrationen c_f i omgivningen, diffusionskonstanten D [m^2/s], reaktionshastigheten k [s^{-1}], storleken L [m], och där $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

(a) Inför dimensionslösa variabler $(x^*, y^*, z^*) = (x/L, y/L, z/L)$, $c^* = c/c_f$ så att (25) övergår i

$$\begin{aligned} -\Delta^* c^* &= -\phi^2 c^* \quad \text{i } V^*, \\ c^* &= 1 \quad \text{på } S^*, \end{aligned} \tag{26}$$

där $\Delta^* = \frac{\partial^2}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial z^{*2}}$ och ϕ kallas Thiele-modulen. Uttryck ϕ i de givna storheterna.

(b) För olika värden på ϕ vill vi undersöka dels hur långt in i katalysatorn reaktionen når, dels beräkna kvoten mellan den uppnådda reaktionshastigheten och den ideala reaktionshastighet man skulle få utan hindrande diffusion, dvs om $c = c_f$. Denna kvot kallas effektivitetsfaktorn och ges alltså av

$$\eta = \frac{\int_V kc\, dV}{kc_f V} = \frac{\int_V c\, dV}{c_f V} = \frac{1}{V^*}\int_{V^*} c^*\, dV^*. \tag{27}$$

Visa detta! Visa också att

$$\eta = \frac{1}{\phi^2}\frac{1}{V^*}\int_{S^*} \frac{\partial c^*}{\partial n^*}\, dS^*. \tag{28}$$

Tips: (26) och Gauss sats.

(c) Speciell geometri: (i) platta

$$\begin{aligned} -\frac{d^2c^*}{dr^2} &= -\phi^2 c^*, \quad -1 < r < 1, \\ c^*(-1) &= c^*(1) = 1, \end{aligned} \tag{29}$$

eller på grund av symmetri (c^* är en jämn funktion, dvs $c^*(-r) = c^*(r)$, och för varje jämn funktion gäller att derivatan är udda och därför är derivatan $= 0$ i origo)

$$\begin{aligned} -\frac{d^2c^*}{dr^2} &= -\phi^2 c^*, \quad 0 < r < 1, \\ \frac{dc^*}{dr}(0) &= 0,\ c^*(1) = 1. \end{aligned} \tag{30}$$

(ii) cirkulär cylinder

$$\begin{aligned} -\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\Big(r\frac{dc^*}{dr}\Big) &= -\phi^2 c^*, \quad 0 < r < 1, \\ \frac{dc^*}{dr}(0) &= 0,\ c^*(1) = 1. \end{aligned} \tag{31}$$

(iii) sfär

$$\begin{aligned} -\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\Big(r^2\frac{dc^*}{dr}\Big) &= -\phi^2 c^*, \quad 0 < r < 1, \\ \frac{dc^*}{dr}(0) &= 0,\ c^*(1) = 1. \end{aligned} \tag{32}$$

(Den dimensionlösa variabeln r borde egentligen tecknas r^*, men det blir alltför svårläst.)

(d) Lös (30) exakt och bestäm och plotta η som funktion av ϕ.

(e) Lös (32) exakt och bestäm och plotta η som funktion av ϕ. (Se lösning i facit.)

(f) (Adfem, Matlab) Lös (30), (31), (32) numeriskt med programmet Adfem i Matlab och bestäm η för några olika värden på ϕ (små och stora). Jämför med exakta lösningar i (d) och (e). Vilken geometri är fördelaktigast? Tips: Funktionsvärdena $c^*(r_i)$ till lösningen finns i vektorn `u`, beräkningsnoderna r_i i vektorn `x` och nätstorleken h_i i vektorn `h`. Kommandot `integrate(u.*x,h)` beräknar integralen $\int_0^1 c^*(r) r\,dr$.

(g) (Femlab, endast på MD-sun) Lös (26) numeriskt med programmet Femlab för några olika geometrier (cirkel, rektangel, ...) och några olika värden på ϕ. En rättvis jämförelse mellan olika geometrier kräver att man beräknar η. I princip kan man lätt beräkna η med Femlab också, men verktyget för detta är inte implementerat ännu och vi nöjer oss med att titta på lösningen och se hur långt in reaktionen når.

(h) Varianter för den ambitiöse teknologen (frivilligt). Gör sammalunda för någon av följande modifikationer. (i) Robins randvillkor:

$$\frac{dc^*}{dr}(0) = 0,\ \frac{dc^*}{dr}(1) + \nu(c^*(1) - 1) = 0.$$

(ii) Tät kärna:

$$\begin{aligned} &-\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\Big(r^2\frac{dc^*}{dr}\Big) = -\phi^2 c^*, \quad \omega < r < 1, \\ &\frac{dc^*}{dr}(\omega) = 0,\ c^*(1) = 1. \end{aligned} \tag{33}$$

(iii) Förgiftning:

$$\begin{aligned} &-\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\Big(r^2\frac{dc^*}{dr}\Big) = -\phi^2 c^*, \quad 0 < r < \omega, \\ &-\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\Big(r^2\frac{dc^*}{dr}\Big) = 0, \quad \omega < r < 1, \\ &\frac{dc^*}{dr}(0) = 0,\ c^*(1) = 1. \end{aligned} \tag{34}$$

22. (TLA kap 6) Låt $I = [a, b]$ vara ett begränsat intervall. Visa att följande är normer på vektorrummet $C(I)$:

(a) $\|f\|_{L_1} = \int_I |f(x)|\,dx$ (L_1-normen)

(b) $\|f\|_{L_2} = \left(\int_I |f(x)|^2\,dx\right)^{1/2}$ (L_2-normen)

(c) $\|f\|_{L_\infty} = \max_{x\in I} |f(x)|$ (L_∞-normen eller maximumnormen)

23. Beräkna $\|f\|_{L_1}$, $\|f\|_{L_2}$, $\|f\|_{L_\infty}$ i följande fall:

(a) $f(x) = \cos nx, \quad n = 0, 1, 2, \ldots, \quad I = [0, \pi]$

(b) $f(x) = \sqrt{x}, \quad I = [-1, 1]$

(c) $f(x) = x^{-1/3}, \quad I = (0, 1)$

(d) $f(x) = x^{-1/2}, \quad I = (0, 1)$

24. Lös begynnelse-randvärdesproblemet

$$\begin{aligned} &u_{tt}'' = u_{xx}'', && 0 < x < 1,\ t > 0, \\ &u(0,t) = 0,\ u(1,t) = 0, && t > 0, \\ &u(x,0) = 1,\ u_t'(x,0) = 0, && 0 < x < 1. \end{aligned}$$

25. Formulera den tidsberoende varianten av (29) och lös med Fouriers metod. Vad händer då $t \to \infty$?

Svar och lösningar till vissa övningar

1. De stationära punkterna till funktionen $f(x,y) = x^3 + y^2 - xy$ ges av ekvationssystemet

$$f'_x(x,y) = 3x^2 - y = 0$$
$$f'_y(x,y) = 2y - x = 0$$

Den andra ekvationen ger $x = 2y$ vilket insättes i den första ekvationen: $12y^2 - y = 0$, vilken har två lösningar $y = 0$ och $y = 1/12$. Vi har alltså två stationära punkter nämligen $(0,0)$ och $(1/6, 1/12)$. Hessematrisen är $f''(x,y) = \begin{bmatrix} f''_{xx} & f''_{xy} \\ f''_{xy} & f''_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6x & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$. I de två punkterna får vi $f''(0,0) = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$ med egenvärdena $1 \pm \sqrt{2}$, så att matrisen är indefinit, och $f''(1/6, 1/12) = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$ med egenvärdena $(3 \pm \sqrt{5})/2$, så att matrisen är positivt definit. Vi drar slutsatsen att $(0,0)$ är en sadelpunkt och att $(1/6, 1/12)$ är en minimipunkt.

7. (a) asymptotiskt stabilt, (b) instabilt, (c) asymptotiskt stabilt

8. De stationära lösningarna ges av ekvationssystemet

$$x_2(1 - x_1^2) = 0$$
$$2 - x_1 x_2 = 0$$

med två lösningar $(x_1, x_2) = (1, 2)$ och $(x_1, x_2) = (-1, -2)$. Jacobimatrisen är

$$\begin{bmatrix} -2x_1x_2 & 1 - x_1^2 \\ -x_2 & -x_1 \end{bmatrix}.$$

Linjärisering kring $(x_1, x_2) = (1, 2)$ leder till det linjära systemet

$$\begin{bmatrix} y'_1(t) \\ y'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 & 0 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix},$$

vars matris har negativa egenvärden -4 och -1, och alltså är stabilt. Linjärisering kring $(x_1, x_2) = (-1, -2)$ leder till systemet

$$\begin{bmatrix} y'_1(t) \\ y'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 & 0 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix}.$$

Egenvärdena är -4 och 1 och systemet är instabilt.

10. (a) $(0,0)$ instabil, $(1,1)$ instabil, (b) $(10,0)$ asymptotiskt stabil

13. (a) $-\frac{1}{3}e^{-2t}\sin 3t$

18. (a) $\frac{1}{2}L^2(x/L)(1 - (x/L))$. (b) $L^2(x/L)(1 - \frac{1}{2}(x/L))$. (c) $\frac{6}{11}(x/L) + \frac{14}{11}$. (d) Det finns ingen lösning. Problemet är inte "rätt ställt" (not "well posed"). Detta värmeledningsproblem är ofysikaliskt och saknar stationär lösning. Man pumpar in värme men släpper inte ut någon.

20. (a) Genom att integrera differentialekvationen får vi

$$d(x)u'(x) = A, \quad u'(x) = \frac{A}{d(x)} = \frac{A}{\epsilon}\frac{1}{1+(\beta x)^2}, \quad u(x) = \frac{A}{\epsilon\beta}\arctan(\beta x) + B,$$
$$g_0 = u(-L) = \frac{A}{\epsilon\beta}\arctan(-\beta L) + B = -\frac{A}{\epsilon\beta}\arctan(\beta L) + B,$$
$$g_1 = u(L) = \frac{A}{\epsilon\beta}\arctan(\beta L) + B,$$
$$A = \epsilon\beta\frac{g_1 - g_0}{2\arctan(\beta L)}, \quad B = \frac{g_1+g_0}{2},$$
$$u(x) = \frac{g_1-g_0}{2}\frac{\arctan(\beta x)}{\arctan(\beta L)} + \frac{g_1+g_0}{2},$$
$$q(x) = -d(x)u'(x) = -A = -\epsilon\beta\frac{g_1-g_0}{2\arctan(\beta L)}, \quad k = \frac{\epsilon\beta}{2\arctan(\beta L)}.$$

21. (a) $\phi = L\sqrt{k/D}$. (d) $c^*(r) = \cosh(\phi r)/\cosh(\phi)$, $\eta = \tanh(\phi)/\phi$, $c^*(0) = 1/\cosh(\phi)$. Obs att $c^*(r) \equiv 1$ om $\phi = 0$.

(e) Med $u = rc^*(r)$ övergår (32) i

$$u''(r) = \phi^2 u(r),$$

med allmänna lösningen

$$u(r) = A\cosh(\phi r) + B\sinh(\phi r),$$

så att

$$c^*(r) = \frac{1}{r}(A\cosh(\phi r) + B\sinh(\phi r)),$$
$$\frac{dc^*(r)}{dr} = -\frac{1}{r^2}(A\cosh(\phi r) + B\sinh(\phi r)) + \frac{\phi}{r}(A\sinh(\phi r) + B\cosh(\phi r))$$
$$= A\phi^2\frac{\phi r\sinh(\phi r) - \cosh(\phi r)}{(\phi r)^2} + B\phi^2\frac{\phi r\cosh(\phi r) - \sinh(\phi r)}{(\phi r)^2}.$$

Taylorutvecklingarna $\cosh x = 1 + \frac{1}{2}x^2 + O(x^4)$, $\sinh x = x + \frac{1}{6}x^3 + O(x^5)$ visar att uttrycket efter A går mot ∞, och uttrycket efter B går mot 0, då r går mot 0. Därför måste $A = 0$ och randvillkoret $c^*(1) = 1$ ger sedan $B = 1/\sinh\phi$. Lösningen blir

$$c^*(r) = \frac{\sinh(\phi r)}{r\sinh(\phi)}.$$

Effektivitetsfaktorn blir enligt (27)

$$\eta = \frac{1}{V^*}\int_{V^*} c^*\,dV^* = \frac{1}{4\pi/3}\int_0^1 c^*(r)4\pi r^2\,dr = 3\int_0^1 c^*(r)r^2\,dr$$
$$= \frac{3}{\sinh(\phi)}\int_0^1 r\sinh(\phi r)\,dr = \frac{3}{\phi^2\sinh(\phi)}\int_0^\phi s\sinh(s)\,ds$$
$$= \{\text{ partiell integration }\} = \frac{3}{\phi^2}\Big(\frac{\phi}{\tanh(\phi)} - 1\Big).$$

Eller enligt (28)

$$\eta = \frac{1}{\phi^2}\frac{1}{V^*}\int_{S^*}\frac{\partial c^*}{\partial n^*}\,dS^* = \frac{1}{\phi^2}\frac{1}{4\pi/3}c^{*\prime}(1)4\pi$$
$$= \frac{3}{\phi^2}\frac{\phi\cosh(\phi)-\sinh(\phi)}{\sinh(\phi)} = \frac{3}{\phi^2}\Big(\frac{\phi}{\tanh(\phi)}-1\Big).$$

En intressant observation: Eftersom $\sinh(x)/x \to 1$ då $x \to 0$, och

$$c^*(r) = \frac{\phi}{\sinh(\phi)}\frac{\sinh(\phi r)}{\phi r},$$

ser vi att $c^*(0) = \phi/\sinh(\phi)$, och att $c^*(r) \to 1$ då $\phi \to 0$ med r fixt, vilket stämmer överens med att $c^*(r) \equiv 1$ om $\phi = 0$.

24. Ansatsen $u(x,t) = X(x)T(t)$ i (DE) och (RV) leder till

(1) $$X''(x) = \lambda X(x),\ 0 < x < 1;\ X(0) = X(1) = 0;$$

(2) $$T''(t) = \lambda T(t), \quad t > 0.$$

Egenvärdesproblemet (1) har lösningen

$$\lambda_n = -(n\pi)^2,\ X_n(x) = \sin n\pi x,\ n = 1, 2, \ldots,$$

och ekvation (2) blir då $T_n''(t) = -(n\pi)^2 T_n(t)$ med allmänna lösningen $T_n(t) = A_n \sin n\pi t + B_n \cos n\pi t$. Serien

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty}\Big(A_n \sin n\pi t + B_n \cos n\pi t\Big)\sin n\pi x$$

löser alltså (DE) och (RV). Det andra (BV) ger $A_n = 0$ och det första ger sedan

$$1 = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\pi x.$$

Multiplikation med $\sin k\pi x$ och integration ger

$$\int_0^1 \sin k\pi x\,dx = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \int_0^1 \sin n\pi x \sin k\pi x\,dx = \frac{1}{2}B_k,$$

där vi använt ortogonalitetsrelationerna $\int_0^1 \sin n\pi x \sin k\pi x\,dx = \frac{1}{2}\delta_{nk}$. Vi har alltså

$$B_n = 2\int_0^1 \sin n\pi x\,dx = \Big[-2\frac{\cos n\pi x}{n\pi}\Big]_0^1 = 2\frac{1-\cos n\pi}{n\pi} = 2\frac{1-(-1)^n}{n\pi},$$

så att lösningen blir

$$u(x,t) = \frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-(-1)^n}{n}\cos n\pi t \sin n\pi x.$$

11. (a) Balansekvationerna för massa Vc [mol] och värmeenergi $\rho c_p VT$ [J] blir

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(Vc) &= q(c_f - c) - Vck_0 \exp(-E/(RT)),\\ \frac{d}{dt}(\rho c_p VT) &= \rho c_p q(T_f - T) + (-\Delta H)Vck_0 \exp(-E/(RT)) - \kappa A(T - T_K).\end{aligned}$$

(b) Den första ekvationen divideras med qc_f, den andra med $\rho c_p q T_f$. Med $\tau = V/q$ får vi

$$\begin{aligned}\tau\frac{d}{dt}\Big(\frac{c}{c_f}\Big) &= 1 - \frac{c}{c_f} - \frac{c}{c_f}\tau k_0 \exp\Big(-\frac{E}{RT_f}\frac{T_f}{T}\Big),\\ \tau\frac{d}{dt}\Big(\frac{T}{T_f}\Big) &= 1 - \frac{T}{T_f} + \frac{(-\Delta H)c_f}{\rho c_p T_f}\frac{c}{c_f}\tau k_0 \exp\Big(-\frac{E}{RT_f}\frac{T_f}{T}\Big) - \frac{\kappa A\tau}{\rho c_p V}\Big(\frac{T}{T_f} - \frac{T_K}{T_f}\Big).\end{aligned}$$

Med de dimensionslösa variablerna

$$\begin{aligned}&s = t/\tau, \quad X_1(s) = \frac{c(s\tau)}{c_f}, \quad X_2(s) = \frac{T(s\tau)}{T_f}, \quad U(s) = \frac{T_K(s\tau)}{T_f},\\ &\alpha = \frac{(-\Delta H)c_f}{\rho c_p T_f}, \quad \beta = \frac{\kappa A\tau}{\rho c_p V}, \quad \gamma = \frac{E}{RT_f}, \quad \delta = \tau k_0 e^{-\gamma}, \quad f(x) = \delta e^{\gamma - \gamma/x},\end{aligned}$$

får vi det ickelinjära differentialekvationssystemet

$$\begin{aligned}\frac{dX_1}{ds} &= 1 - X_1 - X_1 f(X_2) && (= F_1(X,U)\ ),\\ \frac{dX_2}{ds} &= 1 - X_2 + \alpha X_1 f(X_2) - \beta(X_2 - U) && (= F_2(X,U)\ ).\end{aligned}$$

(c) Med givna data får man $\delta = 0.0761$, $\gamma = 30.9896$. Beräkningarna görs av programmet `step1.m`.

(d) Stationära lösningar ges av

$$\begin{aligned}1 - \bar X_1 - \bar X_1 f(\bar X_2) &= 0,\\ 1 - \bar X_2 + \alpha \bar X_1 f(\bar X_2) - \beta(\bar X_2 - \bar U) &= 0.\end{aligned}$$

Om $\bar X_1$ är fixerad ger den första ekvationen

$$f(\bar X_2) = (1 - \bar X_1)/\bar X_1,$$

dvs

$$\bar X_2 = \frac{\gamma}{\gamma + \ln(\delta \bar X_1/(1 - \bar X_1))}.$$

Den andra ekvationen ger sedan

$$\bar U = \bar X_2 - \frac{1 - \bar X_2 + \alpha \bar X_1 f(\bar X_2)}{\beta} = \bar X_2 - \frac{1 - \bar X_2 + \alpha(1 - \bar X_1)}{\beta}.$$

(e) Linjärisering kring $\bar X, \bar U$ ger det linjäriserade systemet

$$x'(s) = Ax(s) + Bu(s), \quad s > 0; \quad x(0) = x_0,$$

med Jacobimatriserna

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1}(\bar{X},\bar{U}) & \frac{\partial F_1}{\partial X_2}(\bar{X},\bar{U}) \\ \frac{\partial F_2}{\partial X_1}(\bar{X},\bar{U}) & \frac{\partial F_2}{\partial X_2}(\bar{X},\bar{U}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 - f(\bar{X}_2) & -\bar{X}_1 f'(\bar{X}_2) \\ \alpha f(\bar{X}_2) & -1 + \alpha \bar{X}_1 f'(\bar{X}_2) - \beta \end{bmatrix},$$

där $f'(x) = \dfrac{\gamma}{x^2} f(x)$, och

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial U}(\bar{X},\bar{U}) \\ \frac{\partial F_2}{\partial U}(\bar{X},\bar{U}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix}.$$

(f) Vi sätter $\bar{X}_1 = 0.5$ och beräknar att $f(\bar{X}_2) = 1$, $\bar{X}_2 = 1.0906$, $\alpha = 0.2912$. Vi beräknar sedan A och $\bar{U}$ för olika värden på β. Numeriska experiment visar att A har två egenvärden $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 > 0$ om $0 < \beta < \beta_0 \approx 0.898$; ett konjugerat par av komplexa egenvärden med $\operatorname{Re}\lambda_{1,2} < 0$ om $\beta_0 < \beta < \beta_1 \approx 8.688$; och två negativa egenvärden om $\beta > \beta_1$. Arbetspunkten $\bar{X} = (0.5, 1.0906)$ är alltså stabil om $\beta > \beta_0 \approx 0.898$ och instabil annars. Beräkningarna görs av programmet `step2.m`.

(g) Beräkningarna görs av programmen `step3.m` och `step4.m`. Vi använder data $x(0) = x_0$, $u(s) = u_0 \cos(s)$ för det linjäriserade systemet och $X(0) = \bar{X} + x_0$, $U(s) = \bar{U} + u(s)$ för det ickelinjära. Vi tar först $u_0 = 0$ och t ex $x_0 = (0,0)$, $x_0 = 0.001\,(1, \pm 1)$, och sedan t ex $u_0 = 0.001$. Man ser tydligt att arbetspunkten $\bar{X}_1 = 0.5$, $\bar{X}_2 = 1.0906$ är stabil om $\beta > \beta_0 \approx 0.898$ och instabil annars. I det senare fallet tippar systemet över till en annan (icke önskvärd) stabil stationär punkt. Det verkar finnas två sådana.

(h) Den kritiska arean blir

$$A_0 = \frac{\beta_0 \rho c_p V}{\kappa \tau} = 1.8099 \text{ m}^2.$$

För stabil drift väljer vi t ex $\beta = 3$, vilket ger arbetspunkten

$$\begin{aligned}
&c = \bar{X}_1 c_f = 0.5 c_f = 2500 \text{ mol/m}^3, \\
&T_f = 343.15 \text{ K} = 70.00\ ^\circ\text{C}, \\
&T = \bar{X}_2 T_f = 374.24 \text{ K} = 101.09\ ^\circ\text{C}, \\
&T_K = \bar{U} T_f = 367.95 \text{ K} = 94.80\ ^\circ\text{C}, \\
&T - T_K = 6.28 \text{ K} = 6.28\ ^\circ\text{C}, \\
&A = \frac{\beta \rho c_p V}{\kappa \tau} = 6.047 \text{ m}^2, \\
&\text{kyleffekten} = \kappa A (T - T_K) = 22.04 \text{ kJ/s}.
\end{aligned}$$

Beräkningarna görs av programmet `step5.m`.

Anmärkning: I "Kemisk reaktionsteknik. Övningsuppgifter", CTH 1993, uppgift 7.1, uppskattas kritiska arean till 1.5 m^2, vilket svarar mot $\beta = 0.7442$. För att göra en jämförelse beräknar vi $Q = (-\Delta H) k c V = \rho c_p q T_f \alpha X_1 f(X_2)$ [J/s] och i arbetspunkten

$$\frac{\partial Q}{\partial T} = \frac{\partial Q}{\partial X_2}\frac{\partial X_2}{\partial T} = \rho c_p q \alpha \bar{X}_1 f'(\bar{X}_2) = \rho c_p q \alpha \bar{X}_1 \frac{\gamma}{\bar{X}_2^2} f(\bar{X}_2) = 4.43 \cdot 10^3 \text{ J/(s K)}.$$

I kompendiet uppskattas $\partial Q/\partial T$ till $2.03 \cdot 10^3$ J/(s K). Detta leder till en underskattning av kritiska arean. Felet verkar vara att man beräknar

$$\left.\frac{\partial Q}{\partial T}\right|_{c_f - c - ck\tau = \text{konst}} \quad \text{i stället för} \quad \left.\frac{\partial Q}{\partial T}\right|_{c = \text{konst}}.$$

De använda m-filerna finns under `http://www.math.chalmers.se/~stig`