

# Linjära system av differentialekvationer

## 1 Inledning

Vi har i studioövning 3 sett på allmänna system av differentialekvationer med begynnelsevillkor

$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{u}(t)), & a \leq t \leq b \\ \mathbf{u}(a) = \mathbf{u}_a \end{cases}$$

Vi har också lärt oss att lösa dem i MATLAB med Euler framåtmetoden eller t.ex. `ode45`. I den här studioövningen kommer vi se på allmänna *linjära system* av differentialekvationer

$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t), & a \leq t \leq b \\ \mathbf{u}(a) = \mathbf{u}_a \end{cases} \quad (1)$$

där  $\mathbf{A}$  är en konstant  $n \times n$ -matris. Sambandet mellan  $\mathbf{f}$  och matrisen  $\mathbf{A}$  ges av

$$\mathbf{f}(t, \mathbf{u}) = \mathbf{A}\mathbf{u}$$

Det är enkelt att lösa system (??) i MATLAB enligt

```
>> f=@(t,u)A*u  
>> [t,U]=ode45(f,[a,b],ua)
```

Till skillnad från de flesta icke-linjära system så kan vi lösa de linjära analytiskt (dvs. exakt) med *egenvärdesmetoden*, se Lay kapitel 5.7.

## 2 Riktningsfält och fasporträtt

Precis som för allmänna system får vi en bättre uppfattning av vilka egenskaper systemet (??) har genom att se närmare på högerledet  $\mathbf{f}(\mathbf{u}) = \mathbf{A}\mathbf{u}$ .

För varje begynnelsevärde till (??) så har vi en lösning  $\mathbf{u}(t)$ . Från differentialekvationen har vi  $\mathbf{u}' = \mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{u})$ . Vektorfältet  $\mathbf{f}$  ger oss i varje punkt  $\mathbf{u}$  den riktning i vilken lösningen förändras och dess längd ger förändringstakten. Genom att i ett lämpligt antal punkter  $\mathbf{u}$  markera styrka och riktning för vektorn  $\mathbf{f}(\mathbf{u})$  med en pil så får vi, som i studioövning 3, ett *riktningsfält*.

Genom att rita upp detta riktningsfält får vi ungefärlig information om hur lösningen  $\mathbf{u}(t)$  till ekvationen beter sig för samtliga möjliga startvärden.

Tidigare har vi ju främst ritat ut graferna för koordinatfunktionerna  $u_1(t)$  och  $u_2(t)$ , men det är också naturligt att visualisera lösningen i ett *fasporträtt* där vi ritar  $u_1(t)$  mot  $u_2(t)$ . Det blir extra intressant att rita in en sådan kurva (bana) i ett riktningsfält.

Som exempel på ett linjärt system tar vi (Lay, Exempel 2, kapitel 5.7)

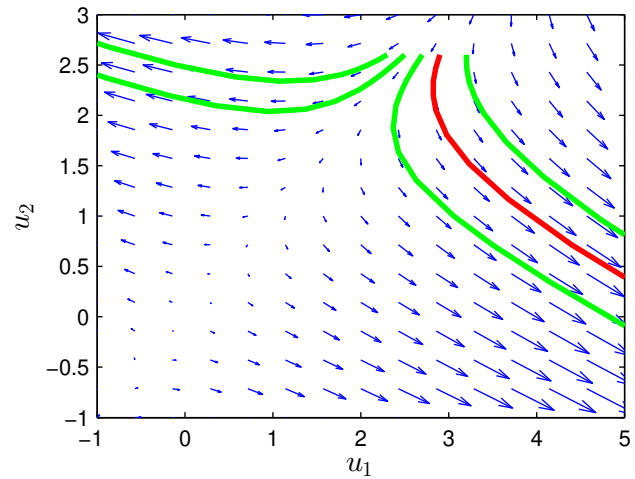
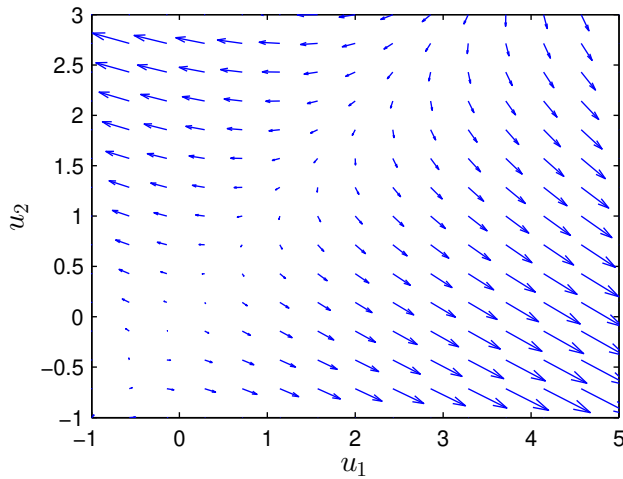
$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t), & 0 \leq t \leq T \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}$$

där

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 4 & -5 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} 2.9 \\ 2.6 \end{bmatrix}$$

Vi ritat riktningsfältet

```
>> A=[4 -5;-2 1];  
>> u1=linspace(-1,5,20);u2=linspace(-1,3,20);  
>> [U1,U2]=meshgrid(u1,u2);  
>> F1=A(1,1)*U1+A(1,2)*U2;  
>> F2=A(2,1)*U1+A(2,2)*U2;  
>> quiver(U1,U2,F1,F2,1.5)  
>> axis([-1 5 -1 3]), hold on
```



En (numerisk) lösning får vi enligt följande:

```
>> f=@(t,u)A*u;  
>> u0=[2.9;2.6];  
>> [t,U]=ode45(f,[0 5],u0);  
>> plot(U(:,1),U(:,2),'r','LineWidth',2)
```

Vi ser hur lösningen  $\mathbf{u}(t)$  följer fältets riktning i figuren ovan till höger. Där har vi även ritat ut lösningar för några andra begynnelsevillkor.

**Uppgift 1.** Betrakta begynnelsevärdesproblemet:

$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t), & 0 \leq t \leq T \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}$$

Rita riktningsfält och fasporträtt då

(a).  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ 3 & -4 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} -3 \\ 5 \end{bmatrix}$  och  $\mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} 3 \\ -5 \end{bmatrix}$ ,  $T = 5$ .

(b).  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ -3 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix}$ ,  $T = 7$ .

### 3 Egenvärdesmetoden

Antag att  $\mathbf{A}$  är en diagonaliserbar  $2 \times 2$ -matris med en bas av egenvektorer  $\mathbf{v}_1$  och  $\mathbf{v}_2$  och med tillhörande egenvärden  $\lambda_1$  respektive  $\lambda_2$ . Då ges lösningen till

$$\begin{cases} \mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t), & 0 \leq t \leq T \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}$$

av formeln

$$\mathbf{u}(t) = c_1 \mathbf{v}_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 \mathbf{v}_2 e^{\lambda_2 t},$$

där koefficienterna  $c_1$  och  $c_2$  bestäms av startvärdena  $\mathbf{u}_0$ .

Vi sätter  $t = 0$  och får

$$\mathbf{u}(0) = c_1 \mathbf{v}_1 + c_2 \mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 & \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}.$$

Detta visar att

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{u}_0, \quad (\mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0),$$

där matrisen  $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 & \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}$  (kolonnerna är egenvektorerna till matrisen  $\mathbf{A}$ ).

Som exempel ser vi åter på

$$\begin{cases} \mathbf{u}' = \mathbf{A}\mathbf{u}, & 0 \leq t \leq T \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \end{cases}$$

där

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 4 & -5 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} 2.9 \\ 2.6 \end{bmatrix}$$

Med MATLAB löser vi egenvärdesproblemet och ritar lösning enligt

```
>> A=[4 -5;-2 1]; u0=[2.9;2.6]; T=10;
>> [V,D]=eig(A)
>> t=linspace(0,T);
>> c=V\u0;
>> U=c(1)*V(:,1)*exp(D(1,1)*t)+c(2)*V(:,2)*exp(D(2,2)*t);
>> plot(U(1,:),U(2,:), 'r')
```

Vi beräknar alla egenvärden och egenvektorer med `eig` enligt `[V,D]=eig(A)`. Egenvärdena för matrisen  $\mathbf{A}$  hamnar längs diagonalen i  $\mathbf{D}$  och egenvektorerna blir kolonner i  $\mathbf{V}$ .

Lägg märke till hur vi bygger upp  $\mathbf{U}$ , vektorn  $\mathbf{t}$  är en radvektor och t.ex.  $\mathbf{V}(:,1)$  är en kolonn så att  $\mathbf{V}(:,1)*\exp(\mathbf{D}(1,1)*\mathbf{t})$  blir en matris. Längs första raden i  $\mathbf{U}$ , dvs.  $\mathbf{U}(1,:)$ , kommer  $u_1(t)$ -värden finnas för de olika  $t$ -värden i vektorn  $\mathbf{t}$  och på andra raden, dvs.  $\mathbf{U}(2,:)$ , finner vi motsvarande  $u_2(t)$ -värden.

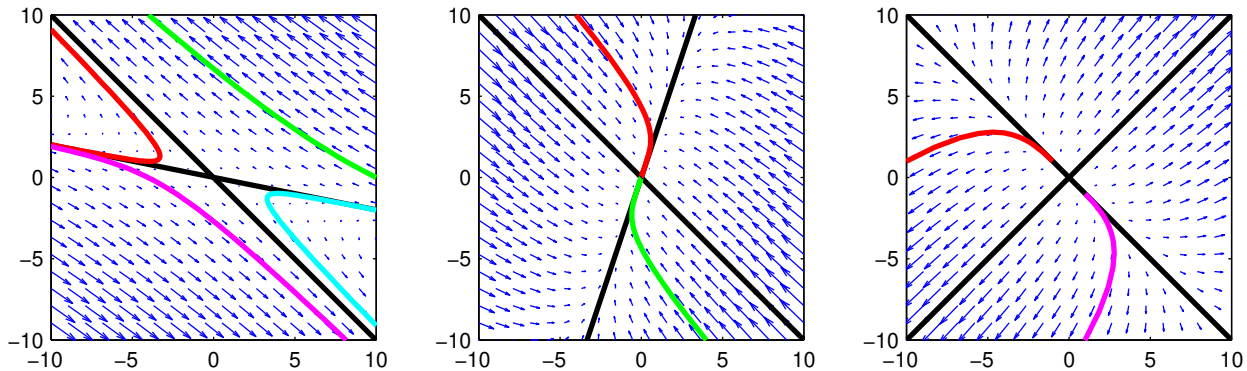
**Uppgift 2.** Undersök systemet  $\mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t)$  för matriserna  $\mathbf{A}$  nedan. Rita i samma graf egenvektorerna till  $\mathbf{A}$  och jämför riktningfältets egenskaper med egenvektorerna och motsvarande egenvärden. Förklara sambandet mellan riktningfältet och matrisens egenvärden och egenvektorer.

Matriserna nedan har reella egenvärden. När utgör origo en *källa* (alla lösningar strömmar från origo), en *sänka* (alla lösningar strömmar till origo) eller en *sadelpunkt* (lösningarna går mot origo men avviker sedan)?

Rita också lösningen till differentialekvationen för några startvärden som ni hittar på själva. Använd ett lagom långt  $t$ -intervall.

$$(a). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2 & -5 \\ 1 & 4 \end{bmatrix} \quad (b). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -4 & 1 \\ 3 & -2 \end{bmatrix} \quad (c). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 5 & 3 \\ 3 & 5 \end{bmatrix}$$

När egenvärdena är reella har egenvektorerna en speciell betydelse (förutom att de bygger upp lösningarna). Om vi ritat linjer genom origo i egenvektorernas riktning får vi en uppdelning av fasplanet i sektorer ut från origo. En lösningskurva kan aldrig korsa en uppdelningslinje, den blir alltid kvar i samma sektor.



Här ovan har vi ritat dessa egenvektorslinjer, som delar upp i sektorer, för matriserna från uppgiften ovan.

**Uppgift 3.** Undersök systemet  $\mathbf{u}'(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t)$  för matriserna  $\mathbf{A}$  nedan. Nu har vi komplexa egenvärden så origo kommer vara en *spiralpunkt* (lösningarna går i spiral kring origo).

Rita riktningsfältet tillsammans med lösningen till differentialekvationen för några startvärden som ni hittar på själva.

$$(a). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 4 \\ -9 & 1 \end{bmatrix} \quad (b). \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ -8 & 2 \end{bmatrix}$$