

## Esercitazione 7

### Metodi Numerici per la Soluzione di Equazioni Differenziali Ordinarie del Primo Ordine

#### Metodi numerici per la soluzione del problema di Cauchy

Dato un generico problema di Cauchy:

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y) & t_0 < t \leq t_{max}, \\ y(t_0) = y_0, \end{cases} \quad (1)$$

i metodi numerici utilizzati per risolvere il problema (1) si basano sulla seguente strategia:

1. stabilire un passo di avanzamento temporale  $h$ ;
2. suddividere l'intervallo temporale  $[t_0, t_{max}]$  in un numero  $N_h$  di sottointervalli  $N_h = (t_{max} - t_0)/h$  di egual ampiezza  $h$ ;
3. per ogni istante temporale discreto  $t_n = t_0 + nh$ , per  $n = 0, \dots, N_h$ , si calcola il valore incognito  $u_n$  che *approssima* la soluzione di (1)  $y_n = y(t_n)$ .

L'insieme dei valori  $\{u_0 = y_0, u_1, \dots, u_{N_h}\}$  rappresenta la soluzione numerica di (1).

#### Metodi di Eulero in avanti, Eulero all'indietro, Crank-Nicolson e Heun

- Il metodo di *Eulero in avanti* calcola la soluzione numerica  $\{u_n\}$  di (1) con il seguente algoritmo:

$$\begin{cases} u_{n+1} = u_n + hf(t_n, u_n) & n = 0, \dots, N_h - 1, \\ u_0 = y_0, \end{cases}$$

Osserviamo che tale metodo è esplicito e ad un passo in quanto, ad ogni passo temporale, la soluzione numerica  $u_{n+1}$  dipende soltanto dalla soluzione al passo temporale precedente  $u_n$ .

- Il metodo di *Eulero all'indietro* calcola invece la soluzione numerica  $\{u_n\}$  di (1) con il seguente algoritmo:

$$\begin{cases} u_{n+1} = u_n + hf(t_{n+1}, u_{n+1}) & n = 0, \dots, N_h - 1, \\ u_0 = y_0, \end{cases}$$

Tale metodo è implicito e ad un passo, in quanto, ad ogni passo temporale, la soluzione numerica  $u_{n+1}$  dipende dalla stessa soluzione incognita  $u_{n+1}$ , oltre che da  $u_n$ . Quindi se  $f(t, y)$  è una funzione non lineare nel secondo argomento, ad ogni istante temporale, si deve risolvere un'equazione non lineare nell'incognita  $u_{n+1}$ . Infatti,  $u_{n+1}$  è lo zero della funzione

$$F_{EI,n}(w) = w - u_n - hf(t_{n+1}, w) \quad \text{per } n = 0, \dots, N_h - 1. \quad (2)$$

Utilizzando il *metodo di Newton* per risolvere questa equazione non lineare per ogni  $n = 0, \dots, N_h - 1$ , scriviamo allora:

$$\begin{cases} w^{(0)} = u_n, \\ w^{(k+1)} = w^{(k)} - \frac{F_{EI,n}(w^{(k)})}{F'_{EI,n}(w^{(k)})} & \text{per } k = 0, 1, \dots \text{ fino a criterio d'arresto soddisfatto,} \\ u_{n+1} = w^{(k+1)}, \end{cases} \quad (3)$$

dove  $F'_{EI,n}(w) = 1 - h \frac{\partial f}{\partial y}(t_{n+1}, w)$ . Notiamo quindi che per costruire le iterate del metodo di Newton, sarà necessario fornire in input alla funzione l'espressione di  $\frac{\partial f}{\partial y}(t, y)$ .

Alternativamente è possibile utilizzare il metodo delle *iterazioni di punto fisso* per risolvere l'equazione non lineare (2), introducendo la funzione di iterazione seguente

$$\phi_{EI,n}(w) = u_n + h f(t_{n+1}, w) \quad \text{per } n = 0, \dots, N_h - 1.$$

Considerando il metodo delle iterazioni di punto fisso, applichiamo dunque, per ogni  $n = 0, \dots, N_h - 1$ :

$$\begin{cases} w^{(0)} = u_n, \\ w^{(k+1)} = \phi_{EI,n}(w^{(k)}) & \text{per } k = 0, 1, \dots \text{ fino a criterio d'arresto soddisfatto,} \\ u_{n+1} = w^{(k+1)}. \end{cases} \quad (4)$$

Le proprietà di convergenza locali del metodo delle iterazioni di punto fisso dipenderanno dunque da  $\phi'_{EI,n}(w) = h \frac{\partial f}{\partial y}(t_{n+1}, w)$ .

- Il metodo di *Crank-Nicolson* calcola la soluzione numerica  $\{u_n\}$  di (1) con il seguente algoritmo:

$$\begin{cases} u_{n+1} = u_n + \frac{h}{2} [f(t_n, u_n) + f(t_{n+1}, u_{n+1})] & n = 0, \dots, N_h - 1, \\ u_0 = y_0. \end{cases}$$

Osserviamo che anche tale metodo è implicito in quanto, ad ogni passo temporale la soluzione numerica  $u_{n+1}$  dipende dalla stessa soluzione incognita  $u_{n+1}$ . Analogamente a quanto visto per il metodo di Eulero all'indietro, ad ogni istante temporale si deve risolvere un'equazione non lineare:

$$F_{CN,n}(w) = w - u_n - \frac{h}{2} [f(t_n, u_n) + f(t_{n+1}, w)] \quad \text{per } n = 0, \dots, N_h - 1.$$

È possibile utilizzare il *metodo di Newton* analogamente a (3), utilizzando  $F_{CN,n}(w)$  e  $F'_{CN,n}(w) = 1 - \frac{h}{2} \frac{\partial f}{\partial y}(t_{n+1}, w)$ , oppure il metodo delle *iterazioni di punto fisso* (4) con la funzione di iterazione:

$$\phi_{CN,n}(w) = u_n + \frac{h}{2} [f(t_n, u_n) + f(t_{n+1}, w)] \quad \text{per } n = 0, \dots, N_h - 1.$$

- Il metodo di *Heun* calcola la soluzione numerica  $\{u_n\}$  di (1) con il seguente algoritmo:

$$\begin{cases} u_{n+1}^* = u_n + h f(t_n, u_n), \\ u_{n+1} = u_n + \frac{h}{2} [f(t_n, u_n) + f(t_{n+1}, u_{n+1}^*)] & n = 0, \dots, N_h - 1, \\ u_0 = y_0. \end{cases}$$

Osserviamo che anche tale metodo è esplicito in quanto, ad ogni passo temporale, la soluzione numerica  $u_{n+1}$  soltanto dalla soluzione al passo temporale precedente  $u_n$ .

## Esercizio 1

Si consideri il problema di Cauchy:

$$\begin{cases} y'(t) = \cos(2y(t)) & 0 < t \leq 6 \\ y(0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Qui la funzione  $f(t, y) = \cos(2y)$ . La soluzione esatta nell'intervallo limitato  $t \in [0, 6]$  è

$$y(t) = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{e^{4t} - 1}{e^{4t} + 1} \right) \quad \text{per } t \geq 0.$$

1. Rappresentare graficamente la soluzione esatta nell'intervallo considerato.
2. Implementare i metodi di Eulero in avanti, Eulero all'indietro, Crank-Nicolson e Heun nelle funzioni Matlab® di cui si riporta l'intestazione:

```
function [t_h,u_h] = eulero_avanti(f,t_max,y_0,h)
function [t_h,u_h,iter_nwt] = eulero_indietro(f,df,t_max,y_0,h)
function [t_h,u_h,iter_nwt] = crank_nicolson(f,df,t_max,y_0,h)
function [t_h,u_h] = heun(f,t_max,y_0,h)
```

Si consideri in particolare il *metodo di Newton* per i metodi impliciti di Eulero all'indietro e Crank-Nicolson con un criterio d'arresto basato sulla differenza tra iterate successive.

Tutti i metodi richiedono in input la funzione  $f$  che descrive il problema di Cauchy definita come anonymous function ( $f = @(t,y) \dots$ ), l'istante finale  $t_{\max}$  dell'intervallo temporale di soluzione (l'istante iniziale è sempre  $t_0 = 0$ ), il dato iniziale del problema di Cauchy  $y_0$  e il passo di discretizzazione temporale  $h$ . Tutti i metodi restituiscono in output il vettore  $t_h$  degli istanti temporali e il vettore  $u_h$  contenente la soluzione numerica del problema di Cauchy.

Per i soli metodi impliciti è necessario fornire in input l'espressione della funzione  $df$  (definita come anonymous function  $df = @(t,y) \dots$ ) che contiene l'espressione di  $\frac{\partial}{\partial y}f(t,y)$ , necessaria per utilizzare il metodo di Newton. I metodi impliciti restituiscono in output anche il vettore  $iter\_nwt$  che contiene il numero di iterazioni che il metodo di Newton compie per risolvere l'equazione non lineare ad ogni istante temporale.

3. Risolvere numericamente il problema (5) utilizzando le funzioni `eulero_avanti`, `eulero_indietro`, `crank_nicolson` e `heun` con un passo di discretizzazione temporale  $h = 0.5$ .
4. Rappresentare sullo stesso grafico le soluzioni numeriche ottenute e confrontarle con la soluzione esatta.
4. Risolvere numericamente il problema con i quattro metodi precedenti utilizzando i passi di discretizzazione temporale:  $h = [0.4, 0.2, 0.1, 0.05, 0.025, 0.0125]$ . Al variare di  $h$ , si valuti per ogni metodo il massimo modulo dell'errore compiuto approssimando la soluzione esatta  $y_n = y(t_n)$  con la soluzione numerica  $u_n$ :

$$e_h = \max_{t_n \in [t_0, t_{\max}]} |y_n - u_n|.$$

5. Riportare, su un grafico in scala logaritmica su entrambi gli assi, l'andamento di  $e_h$  al variare di  $h$  per i quattro metodi considerati. Verificare che ci sia accordo con gli ordini di convergenza teorici dei metodi; ricordiamo che se  $y \in C^2([t_0, t_f])$  i metodi di Eulero sono accurati di ordine  $p = 1$ , mentre se  $y \in C^3([t_0, t_f])$  i metodi di Crank-Nicolson e Heun sono accurati di ordine  $p = 2$ .
6. Si ripeta il punto 2 implementando gli algoritmi dei metodi di Eulero all'indietro e Crank-Nicolson usando ora il metodo delle *iterazioni di punto fisso* per risolvere le equazioni non lineari a ogni passo temporale. Si considerino le seguenti intestazioni:

```
function [t_h,u_h,iter_ptofis] = eulero_indietro_ptofis(f,t_max,y_0,h)
function [t_h,u_h,iter_ptofis] = crank_nicolson_ptofis(f,t_max,y_0,h)
```

La funzione di iterazione corrispondente ai due metodi ( $\phi_{EI,n}(w)$  e  $\phi_{CN,n}(w)$ ) andrà definita all'interno delle funzioni come anonymous function  $\phi = @(w) \dots$ ). Le funzioni restituiscono in output anche il vettore  $iter\_ptofis$  che contiene il numero di iterazioni che il metodo delle iterazioni di punto fisso compie per risolvere l'equazione non lineare ad ogni istante temporale.

7. Si ripeta il punto 3 utilizzando le funzioni `eulero_indietro_ptofis` e `crank_nicolson_ptofis` implementate al punto 6.
8. Si utilizzi opportunamente la funzione Matlab® `ode23` per risolvere il problema (5). Si rappresenti su un grafico la soluzione numerica ottenuta.

## Esercizio 2

Si consideri il problema di Cauchy lineare (problema modello):

$$\begin{cases} y'(t) = \lambda y & t > 0 \\ y(0) = y_0. \end{cases} \quad (6)$$

1. Risolvere il problema (6) nel caso  $\lambda = -2$  con i metodi di Eulero in avanti e di Eulero all'indietro. Scegliere come istante finale  $t_{max} = 10$ , dato iniziale  $y_0 = 1$  e utilizzare il passo di discretizzazione temporale  $h = 0.1$ . Rappresentare sullo stesso grafico le soluzioni numeriche ottenute e confrontarle con la soluzione esatta:

$$y(t) = y_0 e^{\lambda t} \quad \text{per } t \geq 0.$$

2. Si ripeta il punto precedente ora con  $h = 0.9$  e  $h = 1.1$ . Cosa si osserva? Si motivi il risultato ottenuto.

## Esercizio 3

Si consideri il problema di Cauchy lineare:

$$\begin{cases} y'(t) = \cos(t) e^{-t/2} - \frac{1}{2}y(t) & 0 < t \leq 10, \\ y(0) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

dove  $f(t, y) = \cos(t) e^{-t/2} - \frac{1}{2}y$  è lineare nel secondo argomento  $y$ . La soluzione esatta di tale problema è :

$$y(t) = \sin(t) \exp(-t/2) \quad \text{per } t \geq 0.$$

Si desidera risolvere tale problema tramite i metodi di Eulero隐式和 Crank-Nicolson. Essendo la funzione  $f(t, y)$  lineare rispetto ad  $y$ , si può scrivere nella forma  $f(t, y) = a(t)y(t) + b(t)$ . In tal caso, anche per i metodi impliciti, è possibile ottenere una formulazione esplicita manipolando le equazioni; infatti, scrivendo il passo di aggiornamento, mediante alcuni calcoli, si può ricavare un'espressione esplicita rispetto a  $u_{n+1}$ . Nel caso di Eulero隐式, per  $f(t, y) = a(t)y(t) + b(t)$ , abbiamo:

$$u_{n+1} = u_n + h [a(t_{n+1})u_{n+1} + b(t_{n+1})],$$

da cui:

$$u_{n+1} = \frac{1}{1 - h a(t_{n+1})} [u_n + h b(t_{n+1})].$$

Invece, nel caso di Crank-Nicolson, abbiamo:

$$u_{n+1} = u_n + \frac{h}{2} [a(t_n)u_n + b(t_n) + a(t_{n+1})u_{n+1} + b(t_{n+1})],$$

da cui:

$$u_{n+1} = \frac{1}{1 - \frac{h}{2} a(t_{n+1})} \left[ \left(1 + \frac{h}{2} a(t_n)\right) u_n + \frac{h}{2} (b(t_n) + b(t_{n+1})) \right].$$

1. Si scriva la formulazione dei due metodi applicati al problema in esame. Sfruttando la linearità della funzione  $f(t, y)$  rispetto al secondo argomento, riportare la forma esplicita di entrambi gli schemi.

2. Si rappresenti con Matlab<sup>®</sup> la soluzione esatta  $y(t)$  nell'intervallo  $[0, 10]$ .
3. Si implementino i metodi di Eulero implicito e di Crank-Nicolson per il problema in esame, sfruttando la formulazione ottenuta per la funzione  $f(t, y)$  lineare nel secondo argomento. Si risolva numericamente il problema con un passo  $h = 0.2$  e si confrontino graficamente le soluzioni approssimate con la soluzione esatta.