

Corso di Studi in Ingegneria Meccanica

DISPENSE DI
FLUIDODINAMICA

Prof. Giulio Guj

Esercitazioni a cura del Prof. Roberto Camussi

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale
Università degli Studi Roma Tre

Roma, Ottobre 2004

PREFAZIONE ALLA EDIZIONE 2005

Le dispense contengono non solo gli argomenti trattati nel programma di Fluidodinamica Nuovo Ordinamento, ma anche quelli già affrontati nel corso di Idrodinamica ed in altri corsi precedenti. Sono anche riportate dimostrazioni e informazioni non facenti parte del programma d'esame, ma tuttavia utili per la comprensione dei risultati matematici e delle interpretazioni fisiche dei fenomeni fluidodinamici e termici. In questa edizione sono anche contenute le soluzioni di parte degli esercizi sviluppati in aula durante le esercitazioni. In questo senso queste dispense devono essere considerate dagli studenti alla stregua di un libro di testo che contiene più informazioni di quante richieste semplicemente dal corso (e spiegate durante le lezioni e le esercitazioni), dal quale gli studenti devono estrarre le informazioni che ritengono essenziali ai fini della loro preparazione.

Per semplificare il lavoro l'indice è organizzato in modo che le varie informazioni siano classificate come segue:

- in “**grassetto**” sono segnati gli argomenti trattati nel programma di Fluidodinamica Nuovo Ordinamento;
- in “normale” sono segnati gli argomenti già trattati in Idrodinamica (N.O.);
- in “*corsivetto*” sono segnati gli argomenti non trattati nel programma (N.O.).

Elenco dei testi suggeriti

- 1) E. Mattioli: “*Aerodinamica*”, Levrotto & Bella Ed., 1994.
- 2) J. Anderson: “*Fundamentals Aerodynamics*”, McGraw-Hill, 1988.
- 3) Kundu P.: “*Fluid Mechanics*”, Academic Press, 1990.
- 4) G.K. Batchelor: “*An Introduction to Fluid Dynamics*”, Cambridge Univ. Press, 1973.
- 5) N.P. Cheremisinoff: “*Enciclopedia of Fluid Mechanics. 1. Flow phenomena and measurements*”, Gulf Publ. Comp., 1986.
- 6) M. Van Dyke: “*An Album of Fluid Motion*”, The Parabolic Press, 1982.
- 7) A.H. Shapiro: “*The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*”, The Ronald Press, 1954, Vol. I e II.
- 8) J.O. Hinze: “*Turbulence*”, 2nd ed., McGraw-Hill, 1975.
- 9) H. Schlichting: “*Boundary-Layer Theory*”, McGraw-Hill, 1979.

INDICE

1	INTRODUZIONE	6
1.1	Informazioni storiche	
1.2	Concetto di mezzo continuo (solidi, liquidi e gas)	
1.3	Grandezze e parametri che caratterizzano un fluido (Richiami di termodinamica)	
1.3.1	Unità di misura	
1.3.2	Parametri e grandezze di riferimento.	
1.3.3	Richiami di termodinamica e processi isentropici di gas perfetti	
1.3.4	Velocità del suono	
1.3.5	Variabili e parametri della fluidodinamica	
1.4	Fluidostatica	
1.4.1	La pressione idrostatica	
1.4.2	<i>Atmosfera standard</i>	
1.5	Forze e momenti su corpi e profili aerodinamici	
1.6	Teorema di Buckingham e classificazione	
1.7	Principali tipi di moto e visualizzazioni	
1.8	Esercizi relativi al Cap. 1	
1.9	Soluzione degli esercizi relativi al Cap.1	
2	CINEMATICA ED ALTRE NOZIONI INTRODUTTIVE	38
2.1	Richiami e relazioni di calcolo vettoriale	
2.2	Campi scalari e vettoriali	
2.2.1	Proprietà	
2.2.2	Gli integrali ed alcuni teoremi notevoli	
2.2.3	Solenoidalità e irrotazionalità	
2.3	Descrizione Euliana e Lagrangiana del moto	
2.4	Derivata sostanziale	
2.5	Linee di corrente, di fumo, traiettorie	
2.5.1	Definizioni	
2.5.2	<i>Relazioni tra linee di corrente e linee equipotenziali</i>	
2.5.3	<i>Significato fisico della funzione di corrente.</i>	
2.6	Volume di controllo e sistema	
2.7	Teorema del trasporto di Reynolds.	
2.8	Analisi del moto di una particella.	
2.8.1	Traslazione	
2.8.2	Rotazione	
2.8.3	Deformazione	
2.9	Tensore delle tensioni	
2.9.1	Tetraedo di Cauchy	
2.9.2	Simmetria del tensore delle tensioni.	
2.10	Relazione costitutiva per fluidi Newtoniani	

2.10.1 Relazioni costitutive tensioni – velocità di deformazione (esclusa dimostrazione).

2.10.2 Relazioni costitutive per il flusso di calore

2.11 Esercizi relativi al Cap. 2

2.12 Soluzione degli esercizi relativi al Cap.2

3 EQUAZIONI DELLA FLUIDODINAMICA

82

3.1 Equazione di conservazione della massa

3.1.1 Forma integrale

3.1.2 Forma differenziale

3.2 Equazione di bilancio della quantità di moto

3.2.1 Forma integrale

3.2.3 Forma differenziale

3.3 Equazione di bilancio dell'energia

3.3.1 Forma integrale.

3.3.2 Forma differenziale.

3.3.3 Equazione di Bernoulli per flussi stazionari compressibili.

3.3.4 Conservazione dell'energia totale (esclusa dimostrazione, solo concetto)

3.3.5 Bilancio di energia meccanica

3.3.6 Bilancio di energia termica

3.3.6.1 Bilancio di energia termica in termini di energia interna

3.3.6.2 Bilancio di energia termica in termini di temperatura

3.3.6.3 Bilancio di energia termica in termini di entalpia

3.3.6.4 Bilancio di energia termica in termini di entropia

3.3.6.5 Disequazione di Clausius-Duhén e produzione di entropia (esclusa dimostrazione, solo concetto)

3.4 Altre forme dell'equazione di Navier-Stokes

3.4.1 *Accelerazione di Lagrange*

3.4.2 Equazione di trasporto della vorticità per flussi incompressibili

3.4.2.1 Partendo dalle equazioni di Navier-Stokes

3.4.2.2 Partendo dall' accelerazione di Lagrange

3.4.2.3 Trasporto della vorticità 2D

3.4.3 *Cenni alla soluzione numerica dell'equazione di Navier-Stokes in formulazione ψ, ω (2D)*

3.5 Varie forme dell'equazione di Bernoulli

3.5.1 *Equazione di Bernoulli per flussi incompressibili e rotazionali*

3.5.2 *Bernoulli per flussi barotropici-stazionari*

3.5.3 *Bernoulli per flussi potenziali-non stazionari*

3.6 Teorema di Crocco

3.7 Teoremi sui vortici

3.7.1 Teorema di Kelvin-Thompson

3.7.2	Primo teorema di Helmholtz sui vortici	
3.7.3	Secondo teorema di Helmholtz sui vortici	
3.7.4	Terzo teorema di Helmholtz sui vortici	
3.8	Equazione di governo della termofluidodinamica	
3.8.1	Conservazione della massa	
3.8.2	Conservazione della quantità di moto	
3.8.3	Bilancio dell'energia termica	
3.8.4	Equazione di stato per gas perfetti	
3.8.5	Riassunto numeri caratteristici per un gas perfetto	
3.8.6	Soluzioni asintotiche	
3.8.7	Importanza dei numeri caratteristici nelle leggi di similitudine	
3.9	Esercizi relativi al Cap. 3	
3.10	Soluzione degli esercizi relativi al Cap.3	
4	FLUSSI POTENZIALI, MOTI IRROTAZIONALI	188
4.1	Flussi potenziali incompressibili non viscosi	
4.1.1	Condizioni al contorno	
4.1.2	Potenziale di corrente uniforme	
4.1.3	<i>Secondo teorema di Green</i>	
4.2	<i>Potenziale di sorgente</i>	
4.3	<i>Potenziale di doppietta</i>	
4.4	<i>Vorticità indotta in un campo irrotazionale da vorticità concentrata o distribuita in una regione limitata</i>	
	Tabelle riassuntive 4.1 e 4.2	
4.5	Sovrapposizione di soluzioni singolari in 2D	
4.5.1	Semicorpo	
4.5.2	<i>Corpo chiuso (ovale di Rankine)</i>	
4.5.3	Cilindro circolare in una corrente uniforme	
4.5.4	Cilindro rotante	
4.6	<i>Espressione del potenziale in termini di integrali di superficie</i>	
4.7	<i>Distribuzioni superficiali di sorgenti e doppiette</i>	
4.8	<i>Metodo dei pannelli</i>	
4.9	Esercizi relativi al Cap. 4	
4.10	Soluzione degli esercizi relativi al Cap.4	
5	STRATO LIMITE	226
5.1	<i>Strato limite termico in situazione di flusso incompressibile, stazionario monodimensionale.</i>	
5.2	Strato limite cinematico (o dinamico) bidimensionale di un flusso incompressibile, stazionario	
5.3	Separazione dello strato limite	
5.4	<i>Equazioni dello strato limite in termini di ψ (funzione di corrente)</i>	
5.5	<i>Soluzioni simili per lo strato limite</i>	

- 5.5.1 *Equazione di Falkner-Skan.*
- 5.5.2 *Condizioni nel flusso potenziale esterno che determinano soluzioni simili per SL- Equazione di Blasius*
 - 5.5.2.1 *Equazione di Blasius-Lastra piana.*
 - 5.5.2.2 *Flusso contro una parete (ristagno)*
 - 5.5.2.3 *Divergente 2D*
- 5.6 *Spessore dello strato limite*
- 5.7 *Metodi integrali per lo strato limite (equazione di Von Karmann - Polausen)*
- 5.8 Esercizi relativi al Cap. 5**
- 5.9 Soluzione degli esercizi relativi al Cap.5**

6 FLUSSI COMPRESSIBILI NON VISCOSI

265

- 6.1 Generalità**
- 6.2 Cono di Mach**
 - 6.2.1 *Espansioni delle onde*
 - 6.2.2 *Cono di Mach*
- 6.3 Modelli unidimensionali e quasi-unidimensionali stazionari**
 - 6.3.1 Modello quasi-unidimensionale (QU)**
 - 6.3.2 Modello unidimensionale (U)**
 - 6.3.3 Effetto di Mach sul flusso compressibile nei condotti**
 - 6.3.4 Variazione di temperatura tra due sezioni per flussi quasi-unidimensionali anche non isentropici**
 - 6.3.5 Flussi isentropici con modello quasi-unidimensionale.**
 - 6.3.6 *Le velocità di riferimento in un flusso compressibile*
 - 6.3.7 *Velocità del suono*
- 6.4 Urto normale**
 - 6.4.1 Descrizione fisica della formazione di onde d'urto e di espansione**
 - 6.4.2 Equazione dell'urto normale con modello unidimensionale**
 - 6.4.3 Relazioni di Rankine-Hugoniot.**
 - 6.4.4 *Cenni sullo spessore dell'urto*
 - 6.4.5 Variazione dell'entropia nell'urto**
 - 6.4.6 *Effetto della temperatura sul rapporto γ*
- 6.5 *Circuiti gasdinamici con diverse gole*
- 6.6 *Onda d'urto obliqua ed onde di espansione*
 - 6.6.1 *Onda d'urto obliqua*
 - 6.6.2 *Onde di espansione di Prandtl-Meyer*
 - 6.6.3 *Il metodo urto espansione: applicazione ad un profilo supersonico*
- 6.7 *Flussi non isentropici di un gas ideale*
 - 6.7.1 *Flussi di Fanno*
 - 6.7.1.1 *Approccio globale*
 - 6.7.1.2 *Approccio locale.*
 - 6.7.2 *Flussi di Rayleigh*

6.7.2.1 *Approccio globale*

6.7.2.2 *Approccio locale*

6.8 Esercizi relativi al Cap. 6

6.9 Soluzione degli esercizi relativi al Cap.6

7 SOLUZIONI SEMPLICI DELLE EQUAZIONI DI NAVIER-STOKES

PER FLUSSI VISCOSI INCOMPRESSIBILI

350

7.1 *Flusso laminare tra lastre piane parallele*

7.2 *Flusso di Couette.*

7.3 *Flusso di Poiseuille.*

7.4 *Teoria della lubrificazione.*

8 ALCUNI STRUMENTI PER MISURE DI PORTATA E VELOCITÀ

372

8.1 *Metodi sperimentali per misure di velocità*

8.2 *Tubo di Venturi*

8.3 *Tubo di Pitot*

8.4 *Misuratore di portata*

Bibliografia