UNIVERSITÀ DI PISA

TRASMISSIONE DEL CALORE E TERMOFLUIDODINAMICA

ALESSANDRO FRANCO

Academic year	2022/23
Course	INGEGNERIA ENERGETICA
Code	748II
Credits	12

Modules	Area	Type	Hours	Teacher(s)
TERMOFLUIDODINAMICA	ING-IND/10	LEZIONI	60	DANIELE TESTI
TRASMISSIONE DEL CALORE	ING-IND/10	LEZIONI	60	ALESSANDRO FRANCO

Obiettivi di apprendimento

Conoscenze
Lo studente avrà acquisito conoscenze sui meccanismi di fluidodinamica e trasmissione del calore e sui relativi metodi analitici e applicativi.

Modalità di verifica delle conoscenze
La verifica delle conoscenze sarà oggetto di valutazione durante l'esame orale.

Capacità
Lo studente sarà in grado di:

- per il modulo di Trasmissione del Calore, interpretare i fenomeni di scambio termico conduttivo e radiativo e applicarli a problemi ingegneristici;
- per il modulo di Termofluidodinamica, interpretare i fenomeni di fluidodinamica e scambio termico convettivo e applicarli a problemi ingegneristici.

Modalità di verifica delle capacità
Durante l'esame orale, lo studente dovrà individuare i metodi più corretti da utilizzare per risolvere i problemi di fluidodinamica e scambio termico proposti.

Comportamenti
Lo studente acquisirà maggiore consapevolezza sulle problematiche di fluidodinamica e scambio termico e sulle relative applicazioni ingegneristiche.

Modalità di verifica dei comportamenti
Durante l'esame orale, si verificherà l'autonomia dello studente nella modellazione e nella risoluzione dei problemi proposti.

Prerequisiti (conoscenze iniziali)
Conoscenze di analisi, fisica generale e fisica tecnica.

Programma (contenuti dell'insegnamento)
TRASMISSIONE DEL CALORE
Richiami generali ai meccanismi di trasmissione del calore. Scambio termico per conduzione: il postulato di Fourier ed il gradiente termico. La conducibilità termica, la diffusività termica. l'equazione della diffusione del calore. Esempi applicativi e valutazioni numeriche su problemi di conduzione del calore.
La convezione ed il coefficiente di scambio termico convettivo. Valori caratteristici. Il modello a parametri concentrati per la soluzione di semplici problemi di scambio termico in condizione stazionaria. Applicazioni del modello a parametri concentrati. Limiti all'applicabilità del modello a parametri concentrati. Il numero di Biot. Esempi applicativi e valutazioni numeriche.
Lo scambio termico radiante. Gli esperimenti e la derivazione delle principali leggi fisiche. Il corpo nero. Le esperienze di Stefan e la legge di Stefan Boltzmann. Le esperienze di Lummer e Pringsheim e la derivazione della equazione di Planck. Effetti dello scambio termico radiante sulla misura della temperatura. la schermatura della radiazione termica. Assimilazione tra meccanismo di scambio convettivo e radiante. La

definizione del coefficiente di scambio termico radiante equivalente. Limiti di validità dell'approssimazione nel caso di scambi a bassa temperatura.
Meccanismi combinati di scambio termico: convezione e radiazione termica. Estensione del modella a parametri concentrati al caso di meccanismi combinanti. Il raffreddamento della sfera in presenza di meccanismi combinati di scambio: analisi degli effetti della variazione del coefficiente di scambio convettivo. Il corpo con generazione termica interna e con condizione di scambio termico convettivo e radiante. Applicazione del modello a parametri concentrati. Valutazioni numeriche.
L'equazione della diffusione del calore in forma generale. Scrittura dell'equazione in funzione di diversi sistemi di coordinate: coordinate cartesiane, coordinate cilindriche e coordinate sferiche. Scrittura dell'equazione risolvente di un problema termico a partire dall'equazione della diffusione del calore: metodologia generale. Analogia elettrica. Applicazione della metodologia generale a problemi di conduzione in coordinate cartesiane con diverse condizioni a contorno: il problema con temperature imposte e con condizione a contorno convettiva. Introduzione dell'analisi adimensionale. Il problema delle resistenze di contatto.
Utilizzazione dell'equazione della diffusione del calore per problemi in coordinate cilindriche con diverse condizioni a contorno. Il caso del tubo con temperature imposte ed il caso del tubo con condizione a contorno convettiva. Le resistenze termiche e l'analogia elettrica nel caso delle coordinate cilindriche. Problema applicativo: il caso del raggio critico dell'isolante. Il caso del sistema con condizione a contorno convettiva e radiante.
Equazione della diffusione del calore e problemi in sistemi con coordinate sferiche. Esempi applicativi. Valutazione della conducibilità termica di materiali isolanti utilizzando basato sulla conduzione in cavità sferiche. Confinamento del reattore nucleare. Il problema ben posto: la scrittura della condizione iniziale e delle condizioni a contorno. Metodi per la soluzione di un problema ben posto. Il metodo della separazione delle variabili. Problemi in due dimensioni. Analisi di un caso applicativo: l'attenuazione dell'onda di temperatura in una piastra.
Analisi dimensionale e soluzione di problemi di trasmissione del calore mediante l'analisi adimensionale. Il Teorema di Buckingham ed i gruppi adimensionali. Esempi di soluzione di alcuni problemi della fisica mediante l'analisi adimensionale. Il problema della lastra con condizioni a contorno di tipo convettivo e con la generazione interna di calore mediante l'analisi adimensionale. Analisi della soluzione in alcuni casi particolari.
Conduzione termica stazionaria e monodimensionale. Il problema dell'aletta. Definizioni e tipologie principali di alette. Applicazioni tecniche delle alette per l'intensificazione dello scambio termico convettivo. Condizioni necessarie per la monodimensionalità. Aletta con sezione ad area costante. Derivazione dell'equazione risolvente nel caso di aletta con estremità isolata. Analisi della soluzione in funzione dei parametri adimensionali e delle funzioni iperboliche. Calcolo del flusso dissipabile con una aletta a sezione costante. Alcuni casi dimensionali. Aletta di lunghezza infinita.
Aletta con condizione di scambio convettiva all'estremità. Efficienza ed efficacia delle alette. Confronto tra soluzione con modello di aletta con estremità isolata ed aletta che scambia sull'estremità in un caso particolare. Generalizzazione del metodo per l'analisi dell'aletta a casi di sezioni variabili. L'aletta a profilo triangolare. Derivazione della soluzione con le funzioni di Bessel. Estensione della soluzione del problema dell'aletta al caso dello scambio termico nel "corpo umano". La "bioheat equation".
La "bioheat equation" e l'utilizzazione della stessa per la termoregolazione. Alette longitudinali a spessore costante. La trattazione monodimensionale e l'utilizzazione di nuovi parametri adimensionali: il fattore di forma ed il flusso adimensionale. La schiara di alette (fin array): schiera "aperta" e schiera "chiusa". Esempi di dimensionamento di una schiera alettata per dissipazione di potenza termica. Analisi di problemi non stazionari e dipendenti dalla posizione. Analisi dimensionale. Il numero di Fourier.
Estensione del modello a parametri concentrati a casi in cui la temperatura ambiente vari. Analisi combinata di due sistemi accoppiati per i quali possa essere utilizzato il modello a parametri concentrati. Il raffreddamento della doppia parete sottoposta a condizioni a contorno di primo tipo (temperatura imposta) e di terzo tipo (coefficiente di scambio convettivo imposto).
Problemi di scambio termico con dipendenza dal tempo e dalla posizione. Introduzione del numero di Fourier. La piastra con temperatura di parete imposta. Metodo analitico per la soluzione. Soluzione come sviluppo in serie. La piastra con condizione di scambio convettiva. Analisi grafica del problema e "Temperature charts". Soluzioni di un solo termine (one-term soluzions). Generalizzazione del metodo al caso del cilindro e della sfera. Il parametro di rimozione del calore. Sviluppo di un esempio con il supporto delle "Temperature charts".
Conduzione del calore stazionaria in solido semi-infinito. Derivazione analitica della legge generale ed applicazione nel caso di differenti condizioni a contorno. La funzione degli errori. Esempi applicativi. Rimozione del calore da un solido semi-infinito. Diffusione del calore in un mezzo semi-infinito con flusso imposto sulla superficie. Il caso della temperatura oscillante armonicamente sulle pareti.
Conduzione multidimensionale e stazionaria. Metodologia grafica per la soluzione. Il fattore di forma. Derivazione analitica di fattori di forma. Esempi di alcuni fattori di forma per casi più complessi. Esempi applicativi: il problema del forno. Perdite termiche in una linea interrata.
Conduzione multi-dimensionale e non stazionaria: il metodo della sovrapposizione degli effetti. Esempio applicativo: il cilindro di lunghezza finita.
Scambio termico per irraggiamento. Richiami di alcuni elementi di base. Emissività: potere emissivo monocromatico. Emissività di alcuni materiali in specifico campo di temperatura. Il corpo grigio. Caratteristiche di emissività di corpi: emissione speculare, semi-diffusa e diffusa. Intensità della radiazione. Potere emissivo angolare e legge di Lambert. Potere assorbente (assorbività dei materiali). La legge di Kirchhoff. Assorbimento e scambio termico radiante: l'approssimazione del corpo grigio. Scambio termico radiante tra corpi neri di dimensione finita. Il fattore di vista. Il teorema di reciprocità. Esempi di valutazioni dei fattori di vista a partire dal teorema di reciprocità. Calcolo del fattore di vista di corpi neri. Fattori di vista per superfici bi-dimensionali e tri-dimensionali. Esempi applicativi.
Calcolo di fattori di vista tra superfici nere utilizzando combinazione di casi semplici. Esempi applicativi. Estensione della trattazione al caso delle superfici grigie e opache. I concetti di irradianza e di radiosità. Le superfici grigie e l'analogia elettrica. Casi particolari. Il corpo grigio contenuto interamente in altro corpo grigio. Il corpo grigio di piccole dimensioni in un ambiente molto grande. Il fattore di trasferimento. Fattore di reciprocità per il trasferimento. Schermatura della radiazione e superfici speculari. L'uso dell'analogia elettrica per la soluzione di problemi di scambio termico radiante tra più di due superfici.
Analisi di situazioni di scambio tra 3 superfici con il metodo dell'analogia elettrica. Caso generale e situazione particolare con una superficie adiabatica. Caso in cui si ha il flusso imposto su una delle pareti. Analisi dello scambio tra n-superfici: il metodo matriciale. Trattazione generale ed applicazioni. Il caso del condotto triangolare. Estensione del metodo al caso di superfici non isoterme, superfici non grigie e superfici non diffuse. Cenni ai possibili metodo di soluzione dei problemi.
Scambio termico radiante e gas. Interazione tra gas e fotoni: cenni al meccanismo fisico: il fenomeno dello scattering. Assorbimento, trasmittanza ed emissività dei gas. Legge di Beer. Assorbività monocromatica di gas: dipendenza dalla lunghezza d'onda: esempi. Scambio termico tra gas e pareti nel caso di superfici nere: risultati grafici e leggi analitiche. Valori caratteristici delle emissività dei gas: il caso del biossido di carbonio e del vapore di acqua. Esempio applicativo: scambio termico radiante tra gas e pareti in una camera di combustione.

Scambio termico radiante in presenza di fiamme.
Scambio termico radiante in presenza di fiamme: legge generale e coefficienti correttivi in funzione delle caratteristiche della fiamma e delle superfici della camera di combustione. Approfondimenti ulteriori sui problemi di conduzione del calore: oscillazioni termiche e postulato di Maxwell-Cattaneo. Trasformazione della equazione della diffusione del calore da parabolica ad iperbolica.
Metodi per la soluzione numerica di problemi di conduzione del calore: il metodo alla differenze finite. Utilizzazione del metodo delle differenze finite per la soluzione di un problema semplice. Estensione del metodo nel caso di condizioni a contorno di tipo convettivo. Equazioni nodali per diverse tipologie di bordo: nodi laterali e nodi di spigolo. Risoluzione numerica di un problema a 9 nodi. Estensione del metodo nel caso di problemi con geometria multi-dimensionale e non stazionaria. Scelta del tempo caratteristico. Equazioni nodali nel caso di condizioni a contorno di tipo convettivo in casi non stazionari.

TERMOFLUIDODINAMICA
Generalità sui fluidi. Ipotesi del continuo e definizione locale di densità. Numero di Knudsen. Equilibrio termodinamico locale. Condizioni al contorno su parete solida. Teorema del trasporto. Formulazione euleriana e formulazione lagrangiana. Derivata materiale e termine convettivo. Origine fisica della viscosità e della conducibilità termica nei gas e nei liquidi. Numero di Prandtl e sua dipendenza con la temperatura. Velocità del suono. Numero di Mach. Limiti di validità dell'ipotesi di flusso incomprimibile. Effetto Doppler. Coefficienti di comprimibilità. Tensore gradiente di velocità. Modi di deformazione di una particella fluida. Significato fisico della divergenza del vettore velocità. Significato fisico del rotore del vettore velocità.
Bilancio integrale e differenziale della massa. Bilancio integrale e differenziale della quantità di moto. Teorema di Cauchy e tensore degli sforzi. Bilancio integrale del momento angolare e simmetria del tensore degli sforzi. Equazione costitutiva per un fluido newtoniano (relazione tra il tensore degli sforzi viscosi e il tensore velocità di deformazione). Coefficiente di viscosità volumetrica. Bilancio integrale e differenziale dell'energia totale. Bilanci dell'energia cinetica e dell'energia interna. Bilancio dell'entropia. Calcolo della funzione di dissipazione viscosa. Semplificazione delle equazioni di Navier-Stokes nel caso di flussi incomprimibili. Bilancio differenziale dell'entalpia e dell'entalpia totale. Bilancio integrale e differenziale di un generico campo scalare per unità di massa. Espressione del bilancio di quantità di moto, mettendo in evidenza il trinomio di Bernoulli. Traiettorie, linee di corrente e linee di fumo. Semplificazioni del bilancio della quantità di moto per flusso inviscido lungo una linea di corrente. Discussione sul significato fisico del numero di Reynolds in flussi esterni. Valutazione dello spessore dello strato limite.
Flussi irrotazionali, definizione del campo potenziale e Teorema di Bernoulli generalizzato. Teorema di Thomson sulla conservazione della vorticità globale. Generazione di vorticità in corrispondenza di un corpo solido. Paradosso di d'Alembert. Equazioni dello strato limite bidimensionale. Spessore di spostamento. Pseudocorpo e procedura iterativa di Prandtl per il calcolo del flusso in presenza di strati sottili rotazionali. Dinamica di una scia sottile e relative equazioni e condizioni al contorno. Metodo delle singolarità per la risoluzione del flusso potenziale. Vortice ideale. Condizione di Kutta al bordo d'uscita. Teorema di Wu e vorticità associata ai corpi solidi. Vortice di avviamento. Portanza e legge di Kutta-Joukowski. Coefficiente di pressione: definizione e andamento su un corpo aerodinamico. Coefficiente di portanza e coefficiente di resistenza. Soluzione analitica autosimile per lo strato limite laminare su lastra piana a incidenza nulla e risoluzione numerica dell'equazione di Blasius. Effetto dell'angolo d'incidenza sui coefficienti di portanza e di resistenza. Condizione di stallo. Principali risultati della teoria di Glauert per i profili sottili. Polare di un profilo aerodinamico. Efficienza aerodinamica. Fenomeno del downwash per un corpo aerodinamico di apertura finita. Resistenza indotta secondo la teoria di Prandtl e riduzione della portanza in funzione dell'aspect ratio del corpo. Distacco naturale dello strato limite. Gradienti di pressione favorevole e avverso e condizione necessaria per il distacco. Interpretazioni fisiche tramite l'evoluzione dei profili di velocità e di vorticità e relative condizioni di distacco. Tecniche per il ritardo del distacco naturale dello strato limite.
Corpi tozzi. Resistenza di pressione e resistenza d'attrito. Flusso e distacco dello strato limite su un cilindro investito trasversalmente da una corrente fluida. Vortex shedding di von Kármán. Numero di Strouhal. Interpretazione energetica della resistenza fluidodinamica agente su un corpo in moto rettilineo uniforme. Bilancio della vorticità in un flusso incomprimibile. Vortice di Rankine. Effetti della concentrazione della vorticità. Riduzione della resistenza di forma di corpi tozzi. Portata di vorticità immessa in scia. Manipolazione della struttura della vorticità immessa in scia. Esempi di tecniche passive e attive di controllo del flusso. Interpretazione fisica del numero di Reynolds attraverso la dinamica della vorticità. Significato fisico del prodotto interno tra vorticità e tensore gradiente di velocità. Forza di massa aggiunta. Calcolo per flusso non viscoso o moto incipiente. Adimensionalizzazione dell'equazione di bilancio della quantità di moto. Flusso di Stokes. Soluzione per una sfera. Dipendenza della densità dalla temperatura e approssimazione di Boussinesq. Aggiunta del termine termogravitazionale nel bilancio della vorticità. Esperienza di Rayleigh e instabilità della soluzione di temperatura stratificata. Numero di Rayleigh e valore critico per l'attivazione della convezione naturale. Transizione alla turbolenza in convezione naturale. Celle di Bénard. Altre configurazioni di flussi in convezione naturale (due lastre orizzontali in controgravità, due lastre verticali, cilindro con asse orizzontale, lastra piana orizzontale di dimensioni finite). Strato limite della velocità e strato limite termico ed evoluzione su lastra verticale. Determinazione del numero di Grashof per flussi dominati dalla convezione e per flussi viscosi. Numero di Richardson e convezione mista. Definizione del coefficiente di scambio termico convettivo e limiti del concetto. Definizione del numero di Nusselt. Correlazioni di scambio termico in convezione naturale. Convenzione mista in flussi interni orizzontali e verticali (ascendenti e discendenti). Fenomeno della laminarizzazione del flusso interno turbolento in convezione mista. Vantaggi dell'utilizzo in termofluidodinamica di parametri adimensionali in accordo col Teorema pi greco di Buckingham.
Scambio termico in convezione forzata interna laminare. Correlazioni per flussi interni turbolenti. Adimensionalizzazione dell'equazione dell'energia. Numero di Péclet. Numero di Eckert. Condizioni in cui è trascurabile la funzione di dissipazione nel bilancio di energia. Evoluzione dei profili di velocità e temperatura per flussi interni in condizioni di sviluppo. Lunghezze di sviluppo idrodinamico e termico in regime laminare e turbolento. Numero di Graetz. Numero di Prandtl turbolento. Definizione della temperatura di miscelamento adiabatico. Evoluzione dello strato limite termico su lastra piana a incidenza nulla. Descrizione statistica della turbolenza. Termofluidodinamica dei getti sommersi impattanti.

Bibliografia e materiale didattico

TRASMISSIONE DEL CALORE
Mills, A. F., *Heat and Mass Transfer*, Irwin, Chicago, Ill., 1995.
Holman, J. P., Heat transfer, McGraw?Hill, New York, 1972.
Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass transfer*, Wiley, New York, 1996.
Lienhard, J. H., *A Heat Transfer Textbook*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1981.
Arpaci, V. S., *Conduction heat transfer*, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass., 1966.

Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C., *Conduction of heat in solids*, Clarendon Press; Oxford University Press, Oxford New York, 1986.
Bejan, A., *Heat transfer*, J. Wiley, New York, 1993.
Eckert E. R. G. and Drake, R. M. Jr., Analysis of heat and mass transfer, McGraw?Hill, New York, 1972.
Siegel, R., and Howell, J. R., *Thermal radiation heat transfer*, Hemisphere Pub. Corp., Washington, D.C., 1992.

TERMOFLUIDODINAMICA

Buresti, *Elements of Fluid Dynamics*.
Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*.
Çengel, *Meccanica dei fluidi*.
Lamb, *Hydrodynamics*.
Munson, *Fundamentals of Fluid Mechanics*.
Panton, *Incompressible Flow*.
Schlichting, *Boundary Layer Theory*.
Shapiro, *Compressibility Fluid Flow Vol-I & Vol-II*.
Tritton, *Physical Fluid Dynamics*.
White, *Fluid Mechanics*.
Bejan, *Heat Transfer Handbook*.
Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.
Kakaç, *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*.
Lienhard, *A Heat Transfer Textbook*.

Modalità d'esame

L'esame finale si svolge in modalità orale. La durata è di circa un'ora per candidato. La commissione d'esame tipicamente rivolge da due a quattro domande nel complesso, che possono riguardare sia l'esposizione di nozioni teoriche, sia la risoluzione di esercizi applicativi.

Altri riferimenti web

Registro delle lezioni, modulo di Trasmissione del Calore: https://unimap.unipi.it/registri/dettregistriNEW.php?re=7084329::::&ri=9000
Registro delle lezioni, modulo di Termofluidodinamica: https://unimap.unipi.it/registri/dettregistriNEW.php?re=7085589::::&ri=011203

Ultimo aggiornamento 22/10/2022 12:47