

Indice

Prefazione alla quarta edizione italiana	XVII
Ringraziamenti dell'Editore	XIX
Guida alla lettura	XXI
Capitolo 1 Introduzione e uno sguardo d'insieme	1
1.1 Introduzione alle scienze termiche	2
1.1.1 I campi di applicazione delle scienze termiche	2
1.2 La termodinamica e l'energia	3
1.3 La trasmissione del calore	4
1.4 Le grandezze fisiche e le unità di misura	5
1.4.1 Alcune unità di misura SI	6
1.4.2 L'omogeneità dimensionale	8
1.4.3 I rapporti di conversione delle unità	9
1.5 La tecnica del problem solving	11
1.5.1 I pacchetti di software per l'ingegneria	12
1.5.2 L'Engineering Equation Solver (EES)	13
1.5.3 Una nota sulle cifre significative	14
Capitolo 2 Introduzione e concetti fondamentali	17
2.1 I sistemi e i volumi di controllo	18
2.2 Le proprietà di un sistema	19
2.2.1 Continuum	20
2.3 La densità e la densità relativa	20
2.4 Lo stato e l'equilibrio	21
2.4.1 Il postulato di stato	22
2.5 Le trasformazioni e i cicli termodinamici	22
2.5.1 Le trasformazioni termodinamiche in condizioni di flusso stazionario	23
2.6 La temperatura e il principio zero della termodinamica	24
2.6.1 Le scale termometriche	25
2.6.2 La Scala Internazionale di Temperatura del 1990 (STI-90) [International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)]	26
2.7 La pressione	28
2.7.1 La pressione in un punto	30
2.7.2 La variazione della pressione con la profondità	30

2.8	Gli strumenti di misurazione della pressione	33
2.8.1	Il barometro	33
2.8.2	Il manometro	34
2.8.3	Altri strumenti di misurazione della pressione	37
Capitolo 3 Energia, trasferimento di energia e analisi energetica generale		43
3.1	Introduzione	44
3.2	Le forme di energia	45
3.2.1	Alcuni approfondimenti sull'energia interna	47
3.2.2	Un approfondimento sull'energia nucleare	48
3.2.3	L'energia meccanica	50
3.3	Il trasferimento di energia sotto forma di calore	52
3.3.1	Cenni storici	53
3.4	Il trasferimento di energia sotto forma di lavoro	54
3.4.1	Il lavoro elettrico	58
3.5	Le forme meccaniche del lavoro	58
3.5.2	Il lavoro elastico (lavoro di una molla)	59
3.5.1	Il lavoro meccanico (lavoro all'albero)	59
3.5.3	Il lavoro compiuto su barre piene elastiche	60
3.5.4	Il lavoro associato allo stiramento di una lamina liquida	60
3.5.5	Il lavoro compiuto per sollevare o accelerare un corpo	61
3.5.6	Le forme non meccaniche di lavoro	62
3.6	Il primo principio della termodinamica	63
3.6.1	Il bilancio energetico	64
3.6.2	La variazione di energia di un sistema, $\Delta E_{\text{sistema}}$	65
3.6.3	I meccanismi di trasferimento di energia, E_{entrante} e E_{uscente}	65
3.7	I rendimenti di conversione dell'energia	72
3.7.1	I rendimenti dei dispositivi meccanici ed elettrici	77
3.8	Energia e ambiente	81
3.8.1	Ozono e smog	83
3.8.2	La pioggia acida	84
3.8.3	L'effetto serra: riscaldamento globale (planetario) e cambiamento climatico	84
Capitolo 4 Proprietà delle sostanze pure		89
4.1	Le sostanze pure	90
4.2	Le fasi di una sostanza pura	90
4.3	Le trasformazioni con cambiamento di fase delle sostanze pure	91
4.3.1	Il liquido sottoraffreddato e il liquido saturo	91
4.3.2	Il vapore saturo e il vapore surriscaldato	92
4.3.3	La temperatura di saturazione e la pressione di saturazione	93
4.3.4	Alcune conseguenze della dipendenza di T_{sat} da p_{sat}	95
4.4	I diagrammi di stato per trasformazioni con cambiamento di fase	96
4.4.1	Il diagramma T - v	96
4.4.2	Il diagramma p - v	98
4.4.3	L'estensione dei diagrammi alla fase solida	99
4.4.4	Il diagramma p - T	101
4.4.5	La superficie p - v - T	102

4.5	Le tabelle delle proprietà	103
4.5.1	L'entalpia: una combinazione di proprietà termodinamiche	103
4.5.2	Il liquido saturo e il vapore saturo	104
4.5.3	La miscela saturo liquido-vapore	106
4.5.4	Il vapore surriscaldato	110
4.5.5	Il liquido sottoraffreddato	111
4.5.6	Gli stati termodinamici di riferimento e i valori di riferimento	112
4.6	L'equazione di stato dei gas perfetti	115
4.6.1	Il vapor d'acqua è un gas perfetto?	117
4.7	Il fattore di compressibilità: una misura dello scostamento dal comportamento di gas perfetto	117
4.8	Altre equazioni di stato	122
4.8.1	L'equazione di stato di van der Waals	122
4.8.2	L'equazione di stato di Beattie-Bridgeman	123
4.8.3	L'equazione di stato di Benedict-Webb-Rubin	123
4.8.4	L'equazione di stato del viriale	124
Capitolo 5 Analisi energetica dei sistemi chiusi		129
5.1	Il lavoro di variazione di volume	130
5.1.1	La trasformazione politropica	135
5.2	Il bilancio energetico per sistemi chiusi	137
5.3	I calori specifici	143
5.4	L'energia interna, l'entalpia e i calori specifici dei gas perfetti	145
5.4.1	Le relazioni tra i calori specifici dei gas perfetti	147
5.5	L'energia interna, l'entalpia e i calori specifici di solidi e liquidi	154
5.5.1	Le variazioni di energia interna	154
5.5.2	Le variazioni di entalpia	154
Capitolo 6 Analisi dei volumi di controllo in base alla conservazione della massa e alla conservazione dell'energia		159
6.1	Il principio di conservazione della massa	160
6.1.1	La portata massica e la portata volumetrica	160
6.1.2	Il principio di conservazione della massa	162
6.1.3	Il bilancio di massa per i processi a flusso stazionario	164
6.1.4	Un caso particolare: il flusso incomprimibile	165
6.2	Il lavoro di pulsione e l'energia di un fluido che scorre	168
6.2.1	L'energia totale di un fluido che scorre	169
6.2.2	Il trasporto di energia mediante flusso di massa	169
6.3	L'analisi energetica dei sistemi a flusso stazionario	172
6.4	Alcuni dispositivi a flusso stazionario	175
6.4.1	Gli ugelli e i diffusori	175
6.4.2	Le turbine e i turbocompressori	179
6.4.3	Le valvole di laminazione	182
6.4.4	Il flusso in tubi e condotti	188
6.5	L'analisi energetica dei processi a flusso non stazionario	190

Capitolo 7	Il secondo principio della termodinamica	199
7.1	Introduzione al secondo principio della termodinamica	200
7.2	I serbatoi di energia termica	201
7.3	I motori termici	201
7.3.1	Il rendimento termico	203
7.3.2	È possibile ridurre il calore scaricato nell'ambiente?	204
7.3.3	Il secondo principio della termodinamica: l'enunciato di Kelvin-Planck	206
7.4	Le macchine frigorifere e le pompe di calore	207
7.4.1	Il secondo principio della termodinamica: l'enunciato di Clausius	211
7.4.2	L'equivalenza dei due enunciati	212
7.5	Le macchine a moto perpetuo	213
7.6	Le trasformazioni reversibili e irreversibili	214
7.6.1	Le irreversibilità	215
7.6.2	Le trasformazioni internamente ed esternamente reversibili	217
7.7	Il ciclo di Carnot	218
7.7.1	Il ciclo di Carnot inverso	219
7.8	I teoremi di Carnot	220
7.9	La scala termodinamica di temperatura	221
7.10	Il motore termico di Carnot	223
7.10.1	La qualità dell'energia	225
7.10.2	La quantità e la qualità dell'energia nella vita quotidiana	225
7.11	La macchina frigorifera e la pompa di calore di Carnot	226
Capitolo 8	L'entropia	229
8.1	L'entropia	230
8.1.1	Un caso particolare: i processi di scambio termico isotermi e internamente reversibili	232
8.2	Il principio dell'aumento dell'entropia	233
8.2.1	Alcune note sull'entropia	235
8.3	La variazione di entropia per le sostanze pure	237
8.4	Le trasformazioni isoentropiche	240
8.5	I diagrammi che coinvolgono l'entropia	242
8.6	Che cos'è l'entropia?	243
8.6.1	L'entropia nella vita quotidiana	245
8.7	Le relazioni $T ds$	245
8.8	La variazione di entropia di solidi e liquidi	247
8.9	La variazione di entropia dei gas perfetti	250
8.9.1	Calore specifico costante (analisi approssimata)	251
8.9.2	Calore specifico variabile (analisi esatta)	251
8.9.3	Le trasformazioni isoentropiche dei gas ideali	253
8.9.4	Calore specifico costante (analisi approssimata)	253
8.9.5	Calore specifico variabile (analisi esatta)	254
8.9.6	Pressione relativa e volume specifico relativo	255
8.10	Il lavoro per trasformazioni reversibili in condizioni di flusso stazionario	257

8.10.1 Dimostrazione che i dispositivi a flusso stazionario producono il massimo e richiedono il minimo lavoro quando il processo è reversibile	260
8.11 Il minimo lavoro di compressione	261
8.11.1 La compressione multistadio con raffreddamento	262
8.12 Il rendimento isoentropico per dispositivi a flusso stazionario	265
8.12.1 Il rendimento isoentropico delle turbine	266
8.12.2 Il rendimento isoentropico di compressori e pompe	268
8.12.3 Il rendimento isoentropico degli ugelli	270
8.13 Il bilancio di entropia	273
8.13.1 La variazione di entropia di un sistema, $\Delta S_{\text{sistema}}$	273
8.13.2 L'entropia scambiata, S_e e S_u	273
8.13.3 L'entropia generata, S_{gen}	275
8.13.4 I sistemi chiusi	276
8.13.4 I volumi di controllo	276
Capitolo 9 I cicli termodinamici diretti e inversi	285
9.1 Considerazioni fondamentali nell'analisi dei cicli diretti	286
9.2 Il ciclo di Carnot come ciclo di confronto	288
9.3 I cicli ad aria standard	289
9.4 Descrizione dei motori alternativi	290
9.5 Il ciclo Otto: ciclo ideale dei motori ad accensione comandata	291
9.6 Il ciclo Diesel: ciclo ideale dei motori ad accensione spontanea	297
9.7 Il ciclo Brayton: ciclo ideale degli impianti a turbina a gas	301
9.8 Il ciclo Brayton con rigenerazione	306
9.9 Il ciclo ideale della propulsione a getto	310
9.9.1 Sviluppi del motore turbogetto	313
9.10 Il ciclo di Carnot a vapore	316
9.11 Il ciclo Rankine: ciclo ideale degli impianti a vapore	317
9.11.1 Analisi energetica del ciclo Rankine ideale	317
9.11.2 Metodi per aumentare il rendimento termico del ciclo Rankine	322
9.12 Il ciclo Rankine ideale con surriscaldamento	324
9.13 Il ciclo Rankine ideale con rigenerazione	327
9.13.1 Rigeneratori aperti	328
9.13.2 Rigeneratori chiusi	329
9.14 Cogenerazione	335
9.15 I cicli diretti combinati gas-vapore	340
9.16 Macchine frigorifere e pompe di calore	343
9.17 Il ciclo inverso di Carnot	344
9.18 Il ciclo inverso a compressione di vapore ideale	345
9.19 Proprietà dei refrigeranti	348
9.20 Le pompe di calore	350
9.21 La refrigerazione termoelettrica	351
Capitolo 10 Le miscele di gas	355
10.1 La composizione delle miscele di gas	356

10.2	Comportamento p-v-T delle miscele di gas ideali e gas reali	358
10.2.1	Miscele di gas ideali	359
10.2.2	Miscele di gas reali	360
10.3	Le proprietà delle miscele di gas: gas ideali e gas reali	363
10.3.1	Miscele di gas ideali	365
10.3.2	Miscele di gas reali	368
Capitolo 11 Le miscele di gas e vapore: l'aria atmosferica		373
11.1	Aria secca e aria atmosferica	374
11.2	Umidità assoluta e umidità relativa	375
11.3	La temperatura di rugiada	377
11.4	La temperatura di saturazione adiabatica e la temperatura di bulbo umido	379
11.5	Il diagramma psicrometrico	382
11.6	Il benessere termoigrometrico e il condizionamento dell'aria	384
11.6.1	Gli indicatori del comfort termo igrometrico	386
11.7	Trasformazioni per il condizionamento dell'aria	388
11.7.1	Semplice riscaldamento e raffreddamento ($x = \text{costante}$)	389
11.7.2	Riscaldamento con umidificazione	390
11.7.3	Raffreddamento con deumidificazione	392
11.7.4	Raffreddamento per evaporazione	393
11.7.5	Miscelazione adiabatica di flussi d'aria	395
11.7.6	Torri evaporative	398
11.8	Verifica termoigrometrica delle strutture	401
11.8.1	La condensazione superficiale	402
11.8.2	Trasporti di vapore	403
11.8.3	Metodo grafico di Glaser	406
Capitolo 12 Le modalità di trasmissione del calore		409
12.1	Introduzione	410
12.2	La conduzione	410
12.2.1	La conduttività termica	412
12.2.2	La diffusività termica	415
12.3	La convezione	417
12.4	Irraggiamento	419
12.5	Modalità simultanee di trasmissione del calore	421
Capitolo 13 La conduzione termica in regime stazionario		427
13.1	La conduzione termica stazionaria nelle pareti piane	428
13.1.1	Il concetto di resistenza termica	429
13.1.2	La rete di resistenze termiche	431
13.1.3	Le pareti piane multistrato	433
13.2	La resistenza termica di contatto	438
13.3	Le reti di resistenze termiche	443
13.4	La conduzione termica in cilindri e sfere	446
13.4.1	I cilindri e le sfere multistrato	447
13.5	Il raggio critico di isolamento	452

13.6 La trasmissione di calore da superfici alettate	455
13.6.1 Equazione dell'aletta	456
13.6.2 L'efficienza dell'aletta	459
13.6.3 L'efficacia dell'alettatura	463
13.6.4 La giusta lunghezza dell'aletta	465
13.7 La trasmissione di calore nelle configurazioni comuni	471
Capitolo 14 La conduzione termica in regime variabile	477
Capitolo scaricabile dal sito www.ateneonline.it/cengel4e	
Capitolo 15 La convezione forzata esterna	479
15.1 Il fenomeno fisico della convezione forzata	480
15.1.1 Il numero di Nusselt	482
15.2 La classificazione del moto dei fluidi	483
15.2.1 Regioni di moto viscoso e regioni di moto non viscoso	483
15.2.2 Flusso interno e flusso esterno	483
15.2.3 Flusso comprimibile e flusso incomprimibile	484
15.2.4 Flusso laminare e flusso turbolento	484
15.2.5 Flusso naturale (o non forzato) e flusso forzato	484
15.2.6 Moto stazionario e moto non stazionario	485
15.2.7 Moti mono-, bi- e tri-dimensionali	485
15.3 Lo strato limite di velocità	486
15.3.1 Sforzo di taglio	487
15.4 Lo strato limite di temperatura	488
15.4.1 Numero di Prandtl	489
15.5 I flussi turbolenti e laminari	489
15.5.1 Il numero di Reynolds	490
15.6 Resistenza e trasmissione del calore nel flusso esterno	491
15.6.1 La resistenza di pressione e la resistenza d'attrito	492
15.6.2 La trasmissione del calore	494
15.7 Il flusso parallelo su piastre piane	495
15.7.1 Il coefficiente d'attrito	496
15.7.2 Il coefficiente di scambio termico	497
15.7.3 La piastra piana con regione iniziale non riscaldata	498
15.7.4 Il flusso termico uniforme	499
15.8 Il flusso su cilindri e sfere	503
15.8.1 Gli effetti della rugosità superficiale	505
15.8.2 Il coefficiente di trasmissione del calore	507
Capitolo 16 La convezione forzata interna	513
16.1 Introduzione	514
16.2 La velocità media e la temperatura media	515
16.2.1 Il flusso laminare e turbolento nei tubi	516
16.3 La regione d'ingresso	516
16.3.1 Le lunghezze d'ingresso	519
16.4 L'analisi termica generale	520
16.4.1 Il flusso termico superficiale costante ($\dot{q}_{spf} = \text{costante}$)	521
16.4.2 La temperatura superficiale costante ($T_{spf} = \text{costante}$)	522
16.5 Il flusso laminare all'interno di tubi	525

16.5.1	La caduta di pressione	526
16.5.2	Il profilo di temperatura e il numero di Nusselt	528
16.5.3	Il flusso superficiale costante	529
16.5.4	La temperatura superficiale costante	530
16.5.5	Il flusso laminare in tubi non circolari	530
16.5.6	Il flusso laminare in sviluppo nella regione d'ingresso	531
16.6	Il flusso turbolento all'interno di tubi	534
16.6.1	Le superfici rugose	536
16.6.2	Il flusso turbolento in sviluppo nella regione d'ingresso	537
16.6.3	Il flusso turbolento in tubi non circolari	538
16.6.4	Il flusso in due tubi concentrici	538
16.6.5	Il miglioramento dello scambio termico	539
Capitolo 17 La convezione naturale		543
17.1	Il fenomeno fisico della convezione naturale	544
17.2	L'equazione del moto e il numero di Grashof	547
17.2.1	Il numero di Grashof	549
17.3	La convezione naturale su superfici	550
17.3.1	Le piastre verticali ($T_s = \text{costante}$)	550
17.3.2	Le piastre verticali ($\dot{q}_s = \text{costante}$)	552
17.3.3	I cilindri verticali	552
17.3.4	Le piastre inclinate	552
17.3.5	Le piastre orizzontali	553
17.3.6	I cilindri orizzontali e le sfere	553
17.4	La convezione naturale su superfici alettate e circuiti stampati	557
17.4.1	Il raffreddamento per convezione naturale di superfici alettate ($T_s = \text{costante}$)	558
17.4.2	Il raffreddamento per convezione naturale di una piastra per circuito stampato verticale ($\dot{q}_s = \text{costante}$)	559
17.4.3	Il flusso di massa attraverso lo spazio tra le piastre	559
17.5	La convezione naturale all'interno di cavità	562
17.5.1	La conduttività termica effettiva	563
17.5.2	Le cavità rettangolari orizzontali	563
17.5.3	Le cavità rettangolari inclinate	564
17.5.4	Le cavità verticali rettangolari	565
17.5.5	I cilindri concentrici	565
17.5.6	Le sfere concentriche	566
17.5.7	Gli effetti combinati di convezione naturale e irraggiamento	566
Capitolo 18 La trasmissione di calore per irraggiamento		573
18.1	Introduzione	574
18.2	La radiazione termica	575
18.3	La radiazione di un corpo nero	576
18.4	Le proprietà radiative	583
18.4.1	L'emissività	583
18.4.2	I coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione	587
18.4.3	La legge di Kirchhoff	589
18.4.4	L'effetto serra	590
18.5	Il fattore di vista	591

18.5.1 Le relazioni tra fattori di vista	593
18.5.2 I fattori di vista tra superfici infinitamente lunghe: il metodo delle corde incrociate	601
18.6 La trasmissione di calore per irraggiamento: superfici nere	603
18.7 La trasmissione di calore per irraggiamento: superfici grigie e diffondenti	605
18.7.1 La radiosità	606
18.7.2 La potenza termica netta trasmessa per irraggiamento a (o da) una superficie	606
18.7.3 La potenza termica netta trasmessa tra due superfici generiche	607
18.7.4 Risoluzione dei problemi sull'irraggiamento	609
18.7.5 La trasmissione di calore per irraggiamento in cavità con due superfici	609
18.7.6 La trasmissione di calore per irraggiamento in cavità con tre superfici	611
Capitolo 19 Gli scambiatori di calore	619
Capitolo scaricabile dal sito www.ateneonline.it/cengel4e	
Capitolo 20 Il raffreddamento delle apparecchiature elettroniche	621
Capitolo scaricabile dal sito www.ateneonline.it/cengel4e	
Appendice A	A1
Eserciziario	E1
Indice analitico	I1