Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 4, Autunno

Informazioni sul corso

Questo corso gratuito ha 10 unità e 6 laboratori. Sono i totali reali, non un programma più lungo accorciato.

Un controllo è un numero o un risultato di codice in una pagina del corso che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero stampato e quello ricalcolato devono coincidere.

> Questo è lo schema di un corso gratuito di autoapprendimento scritto da Saving Planets. Non è un corso universitario, non dà crediti accademici e nessuna scuola è coinvolta.
>
> Il programma segue un corso semestrale dell'ultimo anno di trasmissione del calore per ingegneri. Riprende argomenti e livello del manuale online gratuito A Heat Transfer Textbook di Lienhard e Lienhard e di MIT 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (gratuito su MIT OpenCourseWare), che colleghiamo dove sono utili. Nessuno di questi autori, atenei o enti approva questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è legata a un lavoro reale con una fonte pubblica citata (il bilancio energetico della Terra della NASA, Parker Solar Probe e le pompe di calore ENERGY STAR), ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di verifica prima della pubblicazione, e ogni laboratorio ha una simulazione gratuita o un foglio di calcolo.
>
> Seguilo in ordine. Ogni unità ha obiettivi, idee chiave, equazioni, esempi passo per passo, esercizi con soluzioni complete, errori comuni, flashcard e un quiz. I tuoi progressi sono salvati solo in questo browser.

Come questo corso aiuta a salvare il pianeta

Il clima della Terra è un problema di trasmissione del calore: entra luce solare, esce infrarosso termico, e convezione ed evaporazione spostano il calore nel mezzo. La stessa fisica decide quanta energia sprecano i nostri edifici, motori ed elettronica.

Isolamento, pompe di calore e scambiatori efficienti sono tra le soluzioni climatiche più economiche. Ogni unità termina con una breve sezione con fonti. I valori che non provengono da una fonte sono indicati come valori di esempio o da manuale.

Per gli insegnanti

Puoi insegnare questo corso, oppure lasciare che uno studente lo faccia da solo. È gratis. Saving Planets non dà un voto né crediti scolastici.

- Questa pagina è l'intero corso: 10 unità e 6 laboratori (AERO 440).
- Prevedi 15 settimane, circa 6–9 ore a settimana, comprese le settimane di laboratorio.
- Segui il calendario di 15 settimane. Leggi l'unità, fai la pratica su carta, poi apri la risposta. Nella settimana di laboratorio, fai il laboratorio o la versione a casa.
- Un controllo è un numero o un risultato di codice nella pagina che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero che vedi e quello ricalcolato devono coincidere.
- Usa Stampa questa pagina, oppure scarica la guida di studio PDF. Il formulario è verso la fine.
- Chiedi: in che modo questa unità aiuta le persone e il pianeta? Ogni unità ha un riquadro verde con un fatto e la sua fonte.
- Copia il modello di guida per insegnanti e scrivi il nome della classe, il tempo che hai e le domande che farai. Apri il modello di guida per insegnanti

Prima di iniziare

Prerequisiti

- Termodinamica: bilanci energetici e primo e secondo principio.
- Meccanica dei fluidi: strati limite, numero di Reynolds e flusso nei condotti.
- Equazioni differenziali: EDO del primo ordine e separazione delle variabili.
- Analisi III: gradienti e integrali su superfici e volumi.

Come studiare

- Disegna il sistema e ogni freccia di flusso termico prima di scrivere un'equazione.
- Usa i kelvin per l'irraggiamento e le differenze di temperatura per conduzione e convezione.
- Trasforma ogni problema in una rete di resistenze termiche quando puoi.
- Controlla i numeri adimensionali (Bi, Re, Pr, Nu, Ra) per scegliere la correlazione giusta.
- Confronta le risposte con l'esperienza quotidiana: una casa calda, una tazza che si raffredda, una padella rovente.
- Fai ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta e ripeti i quiz qualche giorno dopo.

Che cosa ti serve

- Un computer o un tablet per le simulazioni PhET gratuite Energy Forms and Changes, Blackbody Spectrum e Greenhouse Effect.
- Un foglio di calcolo (va bene qualsiasi gratuito), oppure Python.
- Il manuale online gratuito A Heat Transfer Textbook in un browser web.
- Una calcolatrice.

Programma suggerito di 15 settimane

Circa 6-9 ore a settimana: lettura, esercizi e, nelle settimane di laboratorio, il laboratorio.

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
1	Modi di trasmissione del calore e bilanci energetici	Modi e bilanci energetici	Lienhard AHTT
2	Conduzione stazionaria e resistenza termica	Resistenza termica; Laboratorio A	Lienhard AHTT
3	Cilindri, sfere e alette	Cilindri e raggio critico	Lienhard AHTT
4	Cilindri, sfere e alette	Alette; Laboratorio B	MIT 2.51
5	Conduzione transitoria	Conduzione transitoria; Laboratorio C	Lienhard AHTT
6	Convezione forzata esterna	Strati limite	MIT 2.51
7	Convezione forzata esterna	Correlazioni per lastra piana; Laboratorio D; esercitazione per il parziale	Lienhard AHTT
8	Flusso interno e scambiatori di calore	Flusso interno	MIT 2.51
9	Flusso interno e scambiatori di calore	Scambiatori di calore	Lienhard AHTT
10	Convezione naturale ed ebollizione	Convezione naturale ed ebollizione	Lienhard AHTT
11	Fondamenti dell’irraggiamento	Fondamenti dell’irraggiamento; Laboratorio E	NASA Earth Observatory
12	Scambio radiativo e schermi	Fattori di vista	Lienhard AHTT
13	Scambio radiativo e schermi	Schermi e Parker Solar Probe	NASA Parker Solar Probe
14	Pompe di calore, edifici e bilancio energetico della Terra	Pompe di calore e bilancio della Terra; Laboratorio F	ENERGY STAR
15	Pompe di calore, edifici e bilancio energetico della Terra	Ripasso; esercitazione per l’esame finale	MIT 2.51

I tuoi progressi

Spunta unità e laboratori man mano che li finisci, e fai i quiz. Progressi e punteggi sono salvati solo in questo browser e non ci vengono mai inviati.

Unità

Modi di trasmissione del calore e bilanci energetici

Conduzione, convezione e irraggiamento, le loro equazioni di flusso, e i bilanci energetici di superficie e di volume di controllo.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Nominare i tre modi e le loro leggi di flusso.
- Calcolare i flussi di conduzione, convezione e irraggiamento.
- Scrivere un bilancio energetico di superficie.
- Leggere il bilancio energetico della Terra come un bilancio termico.

Concetti chiave

- La trasmissione del calore è energia in transito dovuta a una differenza di temperatura; la termodinamica dice quanta, la trasmissione del calore dice con quale rapidità.
- La conduzione trasporta energia attraverso un solido o un fluido fermo per contatto molecolare (legge di Fourier).
- La convezione trasporta energia tra una superficie e un fluido in moto (legge di raffreddamento di Newton, con un coefficiente di scambio h).
- L'irraggiamento trasporta energia tramite onde elettromagnetiche, non richiede un mezzo e cresce con T⁴ in kelvin (legge di Stefan–Boltzmann).
- Una superficie non accumula energia, quindi ciò che arriva per un modo deve uscire per gli altri.

Equazioni chiave

$$q = kA\frac{\Delta T}{L}$$

`q=kA(Δ T)/(L)`

Legge di Fourier, parete piana

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

`q=hA(T_s-T_∞)`

Legge di raffreddamento di Newton

$$q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

`q=σ A(T_s^4-T_sur^4)`

Irraggiamento netto verso un ambiente ampio

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g = \dot{E}_{st}$$

```
E_in- E_out+ E_g= E_st
```

Bilancio energetico

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 Un muro di calcestruzzo di 0.2 m (k = 1.4 W/(m·K), esempio) di area 10 m² ha una differenza di 15 K. Trova q.

1. q = 1.4 × 10 × 15/0.2.

Risposta: 1050 W.

Esempio 1.2 Una piastra con ε = 0.9 a 400 K si trova in un ambiente a 300 K. Irraggiamento netto per m²?

1. $0.9\sigma(400^4 - 300^4) = 0.9 \times 5.670374419 \times 10^{-8} \times 1.75 \times 10^{10}$.

Risposta: 893 W/m².

Esempio 1.3 La NASA afferma che circa il 29% della luce solare in arrivo viene riflesso e che la media globale è circa 340 W/m². Quanto viene assorbito?

1. Riflesso: 0.29 × 340 = 98.6 W/m².
2. Assorbito: 340 − 98.6.

Risposta: 241.4 W/m², in linea con i circa 240 W/m² della NASA.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Ripeti l'esempio del muro con k = 0.04 W/(m·K).

   30 W.

2. Convezione con h = 25 W/(m²·K), A = 2 m², ΔT = 40 K?

   2000 W.

3. Perché l’irraggiamento deve usare i kelvin?

   T^4 dipende dalla temperatura assoluta.

4. Perché 1360/4 è l’insolazione media globale?

   L’area di una sfera è 4 volte quella del suo disco d’ombra: 1360/4 = 340 W/m².

Errori concettuali comuni

Mito: Calore e temperatura sono la stessa cosa.
In realtà: La temperatura è uno stato; il calore è energia in transito.

Mito: L’irraggiamento ha bisogno d’aria.
In realtà: Viaggia nel vuoto.

Mito: h è una proprietà del materiale.
In realtà: Dipende dal flusso e dalla geometria.

Flashcard

Conduzione

Trasferimento di energia molecolare attraverso la materia.

Convezione

Trasferimento da una superficie a un fluido in moto.

Irraggiamento

Scambio di energia elettromagnetica.

h

Coefficiente di convezione, W/(m²·K).

k

Conduttività termica, W/(m·K).

Bilancio di superficie

Entrata = uscita su una superficie.

Quiz di autoverifica

1. q del muro di calcestruzzo...

1050 W

105 W

4200 W

210 W

1050 W. 1.4 × 10 × 15/0.2.

2. L’irraggiamento scala con…

T^4 (K)

T (°C)

T^2

√T

T^4 (K). Stefan–Boltzmann.

3. La Terra assorbe circa…

240 W/m²

1360 W/m²

29 W/m²

0.8 W/m²

240 W/m². NASA.

4. Modo che non richiede un mezzo…

irraggiamento

conduzione

convezione

ebollizione

irraggiamento. Onde.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il NASA Earth Observatory afferma che l'irradianza solare totale è circa 1360 W/m², in media circa 340 W/m² sul globo; circa il 29% è riflesso, il 23% assorbito dall'atmosfera e il 48% dalla superficie, quindi la Terra assorbe circa 240 W/m².

Per una temperatura stabile, la Terra deve irraggiare verso lo spazio gli stessi 240 W/m² come infrarosso termico, il bilancio termico su cui il corso torna nell'unità 10.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Termodinamica

Fonti: NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitolo 1.
- NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance): Scheda esplicativa della NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Conduzione stazionaria e resistenza termica

L’equazione del calore, la conduzione stazionaria monodimensionale, le reti di resistenze termiche, le pareti composite e l’isolamento.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Enunciare l’equazione del calore e la sua forma 1D stazionaria.
- Costruire reti di resistenze in serie e in parallelo.
- Calcolare la perdita di calore attraverso una parete composita.
- Quantificare il risparmio dovuto all’isolamento.

Concetti chiave

- L’equazione del calore bilancia conduzione, generazione e accumulo; a regime senza generazione una parete piana ha un profilo di temperatura lineare.
- Ogni strato si comporta come un resistore elettrico: R = L/(kA) per la conduzione, 1/(hA) per la convezione.
- Le resistenze in serie si sommano; il flusso termico è il ΔT complessivo diviso per la resistenza totale, come una corrente.
- La resistenza maggiore controlla il flusso, ed è per questo che l’isolamento (k basso) conta di più.
- La resistenza di contatto tra strati può aggiungere una resistenza sorprendente in elettronica e giunzioni.

Equazioni chiave

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

```
·(k T)+ q=ρ c( T)/( t)
```

Equazione del calore

$$R_{cond} = \frac{L}{kA}$$

```
R_cond=L/kA
```

Resistenza di conduzione

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

```
R_conv=1/hA
```

Resistenza di convezione

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\sum R}$$

q=_∞,1-T_∞,2 R

Rete in serie

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 Una parete ha aria interna (h = 8), 0.1 m di isolante (k = 0.04), 0.1 m di mattoni (k = 0.7) e aria esterna (h = 25), tutti valori di esempio. Trova la resistenza per m².

1. 1/8 + 0.1/0.04 + 0.1/0.7 + 1/25 = 0.125 + 2.5 + 0.1429 + 0.04.

Risposta: 2.808 m²·K/W.

Esempio 2.2 Con 20 K tra interno ed esterno, trova il flusso termico e la perdita attraverso 100 m².

1. q" = 20/2.808 = 7.12 W/m².
2. q = 100 × 7.12.

Risposta: 712 W.

Esempio 2.3 Togli l’isolante. Di quanto cresce la perdita?

1. R" = 0.3079 m²·K/W.
2. q" = 20/0.3079 = 64.97 W/m².

Risposta: Circa 9.1 volte; l’isolante riduce la perdita dell’89.0%.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Raddoppia l’isolante a 0.2 m. Nuovo q"?

   R" = 5.308, q" = 3.77 W/m².

2. Quale strato domina nella parete originale?

L’isolante, 2.5 su 2.808 $m^2 \cdot K/W$.

3. Scrivi R per due strati in parallelo.

   $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$.

4. Forma di T(x) in una parete piana a regime?

   Lineare.

Errori concettuali comuni

Mito: Gli strati sottili non contano mai.
In realtà: Uno strato sottile a basso k può dominare.

Mito: Le resistenze in serie si moltiplicano.
In realtà: Si sommano.

Mito: I film d’aria non aggiungono nulla.
In realtà: La resistenza convettiva è reale.

Flashcard

Resistenza termica

ΔT per unità di flusso termico.

Equazione del calore

Bilancio energetico in un solido.

Parete composita

Strati in serie.

Isolamento

Materiale a basso k.

Resistenza di contatto

Resistenza a un’interfaccia.

Trasmittanza U

Coefficiente globale, 1/R".

Quiz di autoverifica

1. R" totale...

2.808 $m^2 \cdot K/W$

2.5

0.308

28.08

2.808 m²·K/W. Somma gli strati.

2. Perdita attraverso 100 m²...

712 W

71 W

6497 W

2000 W

712 W. 100 × 7.12.

3. Risparmio dovuto all'isolamento...

89.0%

50%

9.1%

25%

89.0%. 1 − 0.3079/2.808.

4. Le resistenze in serie...

si sommano

si moltiplicano

si mediano

si annullano

si sommano. Analogia elettrica.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

ENERGY STAR afferma che una tipica bolletta energetica di una famiglia statunitense è di circa $1900 l'anno e quasi la metà va a riscaldamento e raffrescamento.

La parete di esempio di questa unità mostra perché sigillare e isolare viene prima: aggiungere isolante ha ridotto la perdita per conduzione di circa l'89%, quindi qualunque impianto di riscaldamento ha molto meno calore da reintegrare.

Su Saving Planets: Soluzioni · Termodinamica

Fonti: ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitolo 2.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Cilindri, sfere e alette

Conduzione radiale, isolamento delle tubazioni e raggio critico, superfici estese, efficienza delle alette e raffreddamento dell'elettronica.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la resistenza di conduzione radiale.
- Trovare il raggio critico di isolamento.
- Calcolare il parametro d'aletta m e l'efficienza dell'aletta.
- Stimare il calore di un'aletta.

Concetti chiave

- In un cilindro l'area cresce con il raggio, quindi il profilo di temperatura è logaritmico e R = ln(r_2/r_1)/(2πkL).
- Aggiungere isolante a un filo sottile può aumentare la perdita di calore finché il raggio esterno non supera il raggio critico k/h.
- Le alette aggiungono area dove h è basso (di solito nei gas), come su cilindri dei motori, dissipatori e radiatori.
- Il parametro d'aletta m = √(hP/(kA_c)) fissa quanto rapidamente la temperatura dell'aletta decade dalla base.
- L'efficienza dell'aletta confronta il calore reale con quello che si avrebbe se tutta l'aletta fosse alla temperatura della base.

Equazioni chiave

$$R_{cyl} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L}$$

```
R_cyl=((r_2/r_1))/(2π kL)
```

Resistenza radiale

$$r_{cr} = \frac{k}{h}$$

```
r_cr=k/h
```

Raggio critico (cilindro)

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}}$$

`m=(hP)/(kA_c)`

Parametro d’aletta

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c}$$

`_f=((mL_c))/(mL_c)`

Efficienza dell’aletta

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 Isolamento di un tubo da r = 0.05 a 0.1 m, k = 0.04 W/(m·K), lungo 1 m, 100 K di differenza (valori di esempio). Trova R e q.

1. R = ln 2/(2π × 0.04) = 2.758 K/W.
2. q = 100/2.758.

Risposta: 36.3 W per metro.

Esempio 3.2 Un’aletta a spina in alluminio (k = 200) ha 5 mm di diametro con h = 50 W/(m²·K) e una lunghezza efficace di 20 mm. Trova η.

1. m = √(4h/(kD)) = √(200/1) = 14.14 m⁻¹.
2. mL = 0.2828.
3. η = tanh(0.2828)/0.2828.

Risposta: 0.974.

Esempio 3.3 Calore di quell’aletta con un eccesso di 50 K alla base?

1. A_f = πDL = 3.142 × 10⁻⁴ m².
2. q = ηhA_fθ = 0.974 × 50 × 3.142 × 10⁻⁴ × 50.

Risposta: 0.765 W.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Raggio critico per k = 0.04 e h = 8?

5 mm.

2. Efficienza dell’aletta con L = 40 mm?

   mL = 0.566, η = 0.905.

3. Perché le alette sono più adatte all’aria che all’acqua?

   Il basso h dell’aria rende l’area il collo di bottiglia.

4. Forma del profilo in una parete cilindrica?

   Logaritmica.

Errori concettuali comuni

Mito: Più isolante aiuta sempre.
In realtà: Non sotto il raggio critico.

Mito: Alette più lunghe aiutano sempre molto.
In realtà: L’efficienza cala con la lunghezza.

Mito: Le alette funzionano in qualsiasi mezzo.
In realtà: Convengono dove h è basso.

Flashcard

Raggio critico

k/h per i cilindri.

Fin

Superficie estesa.

Efficienza dell’aletta

Calore reale su calore ideale dell’aletta.

m

Parametro di decadimento dell’aletta.

Dissipatore

Insieme di alette.

Profilo logaritmico

Temperatura stazionaria di un cilindro.

Quiz di autoverifica

1. R del tubo...

2.758 K/W

0.276

27.6

1.0

2.758 K/W. ln 2/(2π × 0.04).

2. Raggio critico...

5 mm

50 mm

0.5 mm

200 mm

5 mm. k/h.

3. Efficienza dell’aletta...

0.974

0.5

0.283

1.2

0.974. tanh(mL)/mL.

4. Calore dell’aletta...

0.765 W

7.65 W

76.5 W

0.0765 W

0.765 W. ηhAθ.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il calore si muove in una parete di tubo come nella crosta di un pianeta: dal caldo al freddo, attraverso resistenze in serie.

Isolare i tubi dell'acqua calda e del vapore è uno dei passi di efficienza più semplici in edifici e industria. Tutti i valori di questa unità sono valori da manuale di esempio.

Su Saving Planets: Soluzioni · Circuiti

Fonti: J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitolo 4.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Conduzione transitoria

Il numero di Biot, il modello a capacità concentrata, le costanti di tempo, e quando contano i gradienti spaziali di temperatura.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il numero di Biot.
- Usare il modello concentrato quando Bi < 0.1.
- Calcolare una costante di tempo termica.
- Trovare il tempo per raggiungere una temperatura obiettivo.

Concetti chiave

- Il numero di Biot confronta la resistenza conduttiva interna con la resistenza convettiva esterna.
- Quando Bi < 0.1 il corpo è quasi uniforme in temperatura e il modello concentrato funziona.
- Nel modello concentrato l'eccesso di temperatura decade esponenzialmente con costante di tempo τ = ρcV/(hA).
- Per Bi maggiori, usa soluzioni in serie a un termine o diagrammi (Heisler) o un metodo numerico.
- Un'elevata capacità termica rallenta la risposta: oceani e muri spessi sono volani termici.

Equazioni chiave

$$Bi = \frac{hL_c}{k},\ L_c = V/A$$

`Bi=(hL_c)/(k),\ L_c=V/A`

Numero di Biot

$$\tau = \frac{\rho c V}{hA}$$

`τ=(ρ cV)/(hA)`

Costante di tempo

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-t/\tau}$$

`(T-T_∞)/(T_i-T_∞)=e^-t/τ`

Risposta concentrata

$$t = \tau \ln \frac{\theta_i}{\theta}$$

`t=τ(θ_i)/(θ)`

Tempo fino a un obiettivo

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 Una sfera di alluminio da 10 mm (k = 237, ρ = 2700, c = 900) si raffredda in aria con h = 50. Trova Bi.

1. L_c = D/6 = 1.667 × 10^{-3} m.
2. Bi = 50 × 1.667 × 10^{-3}/237.

Risposta: 3.52 × 10^{-4}, quindi il modello concentrato funziona.

Esempio 4.2 Trova τ per quella sfera.

1. τ = 2700 × 900 × 1.667 × 10^{-3}/50.

Risposta: 81 s.

Esempio 4.3 Quanto tempo per raffreddarsi da 300 °C a 50 °C in aria a 20 °C?

1. θ_i = 280 K, θ = 30 K.
2. t = 81 ln(280/30) = 81 × 2.234.

Risposta: 181 s.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Frazione dell’eccesso rimasta dopo un τ?

   e^{-1} = 0.368.

2. Tempo per dimezzare l’eccesso?

   τ ln 2 = 56.1 s.

3. Bi = 0.5. Il modello concentrato è valido?

No; usa soluzioni in serie o numeriche.

4. Raddoppia h. Che cosa succede a τ?

   Si dimezza a 40.5 s.

Errori concettuali comuni

Mito: Bi è il numero di Nusselt.
In realtà: Bi usa la k del solido; Nu quella del fluido.

Mito: Il modello concentrato vale per qualsiasi dimensione.
In realtà: Solo quando Bi < 0.1.

Mito: Il raffreddamento è lineare nel tempo.
In realtà: È esponenziale.

Flashcard

Numero di Biot

Resistenza interna su esterna.

Capacità concentrata

Modello a temperatura uniforme.

Costante di tempo

ρcV/(hA).

Diagramma di Heisler

Diagramma della soluzione transitoria a un termine.

Massa termica

Capacità termica che rallenta i cambiamenti.

L_c

Lunghezza caratteristica V/A.

Quiz di autoverifica

1. Costante di tempo...

81 s

8.1 s

810 s

181 s

81 s. ρcV/(hA).

2. Tempo di raffreddamento fino a 50 °C...

181 s

81 s

56 s

300 s

181 s. $\tau \ln(280/30)$.

3. Il modello concentrato vale quando...

Bi < 0.1

Bi > 1

Re > 5×10^5

Nu < 1

Bi < 0.1. Corpo uniforme.

4. Dopo un τ...

resta il 36.8%

resta il 50%

resta lo 0%

resta il 63.2%

resta il 36.8%. e^{-1}.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L’Earth Observatory della NASA osserva che la superficie terrestre ha una media di circa 15 °C, oltre 30 °C in più di quanto avrebbe senza atmosfera.

Nel linguaggio di questa unità, una grande capacità termica significa una lunga costante di tempo; la capacità termica degli oceani dà al clima terrestre una risposta lenta (un’idea da manuale, non un dato NASA).

Su Saving Planets: Oceani · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitolo 5.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Convezione forzata esterna

Strati limite, numeri di Reynolds, Prandtl e Nusselt, correlazioni per lastra piana e flusso attorno a cilindri.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare Re, Pr e Nu.
- Usare la correlazione laminare per lastra piana.
- Trovare h e la potenza termica.
- Verificare la transizione a Re ≈ 5 × 10⁵.

Concetti chiave

- Su una superficie si formano strati limite di velocità e termico; il calore attraversa per conduzione il sottile strato di fluido lento.
- Il numero di Nusselt Nu = hL/k è il coefficiente di scambio termico adimensionale.
- Il numero di Prandtl confronta la diffusività della quantità di moto e quella termica (circa 0.7 per l'aria, circa 7 per l'acqua vicino alla temperatura ambiente, valori da manuale).
- Su una lastra piana il flusso è di solito laminare sotto Re ≈ 5 × 10⁵; la turbolenza aumenta h.
- Le correlazioni sono adattamenti a esperimenti; usale entro gli intervalli indicati.

Equazioni chiave

$$Re_L = \frac{VL}{\nu}$$

`Re_L=(VL)/(ν)`

Numero di Reynolds

$$Nu_L = \frac{\bar{h}L}{k}$$

`Nu_L=( hL)/(k)`

Numero di Nusselt

$$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$$

`_L=0.664Re_L^1/2Pr^1/3`

Lastra piana laminare (media)

$$\overline{Nu}_L = 0.037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}$$

_L=0.037Re_L^4/5Pr^1/3

Lastra piana turbolenta (media)

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Aria (ν = 1.5 × 10⁻⁵, k = 0.026, Pr = 0.71) scorre a 5 m/s su una lastra di 0.5 m. Trova Re.

1. Re = 5 × 0.5/1.5 × 10⁻⁵.

Risposta: 166667, laminare.

Esempio 5.2 Trova Nu medio e h.

1. Nu = 0.664 × 166,667^½ × 0.71^⅓ = 0.664 × 408.2 × 0.892 = 241.8.
2. h = 241.8 × 0.026/0.5.

Risposta: 12.6 W/(m²·K).

Esempio 5.3 Calore da una lastra di 0.5 × 1 m a 30 K sopra l’aria?

1. q = 12.58 × 0.5 × 30.

Risposta: 189 W.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Ripeti h a 10 m/s.

   Re = 333333, h = 17.8 W/(m²·K) (√2 volte maggiore).

2. Re a 1 m/s?

   33,333.

3. Dai un nome all’h adimensionale.

   Numero di Nusselt.

4. Perché la turbolenza aumenta h?

   Il mescolamento assottiglia lo strato lento vicino alla parete.

Errori concettuali comuni

Mito: Nu usa la k del solido.

In realtà: Usa la k del fluido.

Mito: Una correlazione vale per tutti i flussi.

In realtà: Verifica intervallo e geometria.

Mito: h è costante lungo una lastra.

In realtà: L'h locale cala man mano che lo strato cresce.

Flashcard

Numero di Reynolds

Inerzia su viscosità.

Numero di Prandtl

ν/α.

Numero di Nusselt

hL/k.

Strato limite

Sottile regione vicino alla parete.

Correlazione

Adattamento a esperimenti.

Transizione

Da laminare a turbolento.

Quiz di autoverifica

1. Re a 5 m/s...

166,667

16,667

1.67×10^6

6000

166,667. VL/ν.

2. h medio...

12.6 W/(m²·K)

126

1.26

242

12.6 W/(m²·K). Nu k/L.

3. Potenza termica...

189 W

18.9 W

377 W

63 W

189 W. hAΔT.

4. Transizione vicino a...

5×10^5

2300

10^3

10^9

5×10^5. Lastra piana.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L’Earth Observatory della NASA afferma che la convezione trasporta circa il 5% dell’energia solare in arrivo dalla superficie all’atmosfera, mentre l’evaporazione ne trasporta circa il 25%.

La velocità del vento fissa h su oceani e terre come la velocità fissa h sulla lastra di questa unità; per questo i venti determinano quanto rapidamente la superficie cede calore.

Su Saving Planets: Meccanica dei fluidi · Oceani

Fonti: NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitoli 6–7.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Lezioni gratuite del MIT.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Flusso interno e scambiatori di calore

Convezione nei condotti, temperatura media, la correlazione di Dittus–Boelter, tipi di scambiatori di calore, LMTD ed efficacia–NTU.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare le correlazioni laminari e turbolente nei condotti.
- Calcolare una differenza di temperatura media logaritmica.
- Dimensionare uno scambiatore con UA e LMTD.
- Usare il metodo efficacia–NTU.

Concetti chiave

- In un condotto la temperatura media di miscela varia lungo la lunghezza quando il calore entra o esce.
- Il flusso laminare completamente sviluppato con temperatura di parete costante ha Nu = 3.66; il flusso turbolento usa Dittus–Boelter (correlazioni da manuale).
- Gli scambiatori in controcorrente battono quelli in equicorrente perché la differenza di temperatura resta più uniforme.
- Il metodo LMTD è adatto al dimensionamento quando tutte e quattro le temperature sono note.
- Il metodo ε-NTU è adatto alla verifica quando le temperature di uscita sono ignote.

Equazioni chiave

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{0.4}$$

```
Nu_D=0.023Re_D^4/5Pr^0.4
```

Dittus–Boelter (riscaldamento)

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

```
Δ T_lm=(Δ T_1-Δ T_2)/((Δ T_1/Δ T_2))
```

Differenza di temperatura media logaritmica

$$q = U A \Delta T_{lm}$$

```
q=UAΔ T_lm
```

Potenza termica dello scambiatore

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \ (C_r = 0)$$

=1-e^-NTU\ (C_r=0)

Efficacia, condensatore o evaporatore

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 Acqua (k = 0.6, Pr = 7, valori da manuale) scorre con Re = 20000 in un tubo da 20 mm. Trova h.

1. Nu = 0.023 × 20,000^0.8 × 7^0.4 = 138.2.
2. h = 138.2 × 0.6/0.02.

Risposta: Circa 4150 W/(m²·K).

Esempio 6.2 Controcorrente: caldo 90 → 50 °C, freddo 20 → 40 °C. Trova la LMTD.

1. $\Delta T_1 = 90 - 40 = 50$ K; $\Delta T_2 = 50 - 20 = 30$ K.
2. LMTD = 20/ln(50/30).

Risposta: 39.15 K.

Esempio 6.3 Con U = 500 W/(m²·K) e A = 2 m², trova q.

1. q = 500 × 2 × 39.15.

Risposta: 39.2 kW.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. ε per NTU = 2 quando un flusso condensa (C_r = 0)?

   $1 - e^{-2} = 0.865$.

2. Nu laminare a temperatura di parete costante?

   3.66.

3. Perché preferire la controcorrente?

ΔT più uniforme, più calore per area.

4. Nu di Dittus–Boelter per Pr = 0.7, Re = 20000?

   55.0.

Errori concettuali comuni

Mito: Usare il ΔT medio aritmetico.
In realtà: Usa la media logaritmica.

Mito: ε può superare 1.
In realtà: Non può.

Mito: Le correlazioni laminari valgono per il flusso turbolento.
In realtà: Controlla prima Re.

Flashcard

LMTD

ΔT medio logaritmico.

NTU

UA/C_min.

Efficacia

Calore reale su calore massimo.

Controcorrente

Flussi in direzioni opposte.

Sporcamento

Depositi che aggiungono resistenza.

Dittus–Boelter

Correlazione turbolenta nei condotti.

Quiz di autoverifica

1. LMTD...

39.15 K

40 K

30 K

50 K

39.15 K. 20/ln(5/3).

2. q dello scambiatore...

39.2 kW

3.92 kW

20 kW

78 kW

39.2 kW. UA LMTD.

3. ε a NTU 2...

0.865

0.5

0.98

2

0.865. 1 − e^{-2}.

4. h dell’acqua...

≈ 4150 W/(m²·K)

≈ 41

≈ 415,000

≈ 1.4

≈ 4150 W/(m²·K). Nu k/D.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

ENERGY STAR spiega che una pompa di calore aria-aria sposta calore tra aria interna ed esterna invece di produrlo da combustibile, usando scambiatori di calore (batterie) su entrambi i lati.

Scambiatori migliori richiedono una differenza di temperatura minore per spostare lo stesso calore, uno dei motivi per cui le pompe di calore moderne forniscono più calore per unità di elettricità.

Su Saving Planets: Soluzioni · Termodinamica

Fonti: ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitoli 3 e 7.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Convezione naturale ed ebollizione

Flusso dovuto al galleggiamento, numeri di Grashof e Rayleigh, correlazioni per lastra verticale e un’introduzione a ebollizione e condensazione.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il numero di Rayleigh.
- Usare una correlazione per lastra verticale.
- Confrontare h naturale e forzato.
- Descrivere la curva di ebollizione.

Concetti chiave

- Il fluido caldo è più leggero e sale; è il galleggiamento, non un ventilatore, a muovere il flusso.
- Il numero di Rayleigh Ra = gβΔTL³/(να) svolge il ruolo che Re svolge nel flusso forzato.
- Su una lastra verticale il flusso è laminare sotto circa Ra = 10⁹ (valore da manuale).
- L’h di convezione naturale in aria è di pochi W/(m²·K), quindi l’irraggiamento è spesso comparabile.
- Ebollizione e condensazione trasferiscono molto calore con piccoli ΔT grazie al calore latente.

Equazioni chiave

$$Ra_L = \frac{g\beta\Delta T L^3}{\nu\alpha}$$

`Ra_L=(gβΔ TL^3)/(να)`

Numero di Rayleigh

$$\overline{Nu}_L = 0.59 Ra_L^{1/4}$$

`_L=0.59Ra_L^1/4`

Lastra verticale laminare

$$\beta = 1/T$$

Coefficiente di dilatazione del gas ideale

$$Gr = Ra/Pr$$

`Gr=Ra/Pr`

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Una lastra verticale di 0.3 m è 30 K sopra l'aria ($\beta = 1/300$ K^{-1}, $\nu = 1.6 \times 10^{-5}$, $\alpha = 2.2 \times 10^{-5}$, valori di esempio). Trova Ra.

1. $Ra = 9.80665 \times (1/300) \times 30 \times 0.3^3/(1.6 \times 10^{-5} \times 2.2 \times 10^{-5})$.

Risposta: 7.52×10^7, laminare.

Esempio 7.2 Trova Nu e h con k = 0.026.

1. $Nu = 0.59 \times (7.52 \times 10^7)\text{^}¼ = 54.9$.
2. $h = 54.9 \times 0.026/0.3$.

Risposta: 4.76 W/(m²·K).

Esempio 7.3 Calore da una lastra di 0.3 × 1 m?

1. $q = 4.76 \times 0.3 \times 30$.

Risposta: 42.9 W.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Confronta con l'h forzato di 12.6 dell'unità 5.

   Il forzato è circa 2.64 volte maggiore.

2. Limite laminare su Ra?

   Circa 10^9.

3. Perché l'ebollizione è così efficace?

   Il calore latente trasferisce energia con piccoli ΔT.

4. β per un gas ideale a 300 K?

   $1/300$ K$^{-1} = 3.33 \times 10^{-3}$.

Errori concettuali comuni

Mito: La convezione naturale è trascurabile.

In realtà: Spesso eguaglia l’irraggiamento.

Mito: Ra usa la velocità.

In realtà: Usa il galleggiamento.

Mito: L’h di ebollizione è basso.

In realtà: È tra i più alti.

Flashcard

Numero di Rayleigh

Intensità del galleggiamento.

Numero di Grashof

Galleggiamento su viscosità.

β

Coefficiente di dilatazione.

Curva di ebollizione

Flusso termico in funzione del surriscaldamento di parete.

Flusso termico critico

Flusso massimo di ebollizione nucleata.

Condensazione

Da vapore a liquido su una parete fredda.

Quiz di autoverifica

1. Ra...

7.52×10^{7}

7.52×10^{9}

752

5×10^{5}

7.52×10^{7}. $g\beta\Delta TL^{3}/(\nu\alpha)$.

2. h...

4.76 W/(m²·K)

47.6

0.476

12.6

4.76 W/(m²·K). Nu k/L.

3. Calore...

42.9 W

429 W

4.29 W

189 W

42.9 W. hAΔT.

4. Motore della convezione naturale...

il galleggiamento

una pompa

irraggiamento

perdita di carico

il galleggiamento. Differenza di densità.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L'Earth Observatory della NASA afferma che l'evaporazione rimuove circa il 25% dell'energia solare in arrivo dalla superficie e la convezione circa il 5%; il calore latente viene rilasciato quando il vapore

acqueo condensa in nubi.

Con un'insolazione media di 340 W/m², queste quote valgono circa 85 e 17 W/m², gli stessi processi di cambiamento di fase e galleggiamento trattati in questa unità.

Su Saving Planets: Oceani · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitoli 8–9.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Lezioni gratuite del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Fondamenti dell’irraggiamento

Corpi neri, legge di Planck, legge di Wien, legge di Stefan–Boltzmann, emissività, assorbività e legge di Kirchhoff.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Trovare la lunghezza d’onda di picco di un corpo nero.
- Calcolare il potere emissivo.
- Usare emissività e assorbività.
- Trovare la temperatura effettiva di un pianeta.

Concetti chiave

- Un corpo nero assorbe tutta la radiazione ed emette il massimo possibile a ogni temperatura e lunghezza d’onda.
- Legge di Wien: la lunghezza d’onda di picco è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta.
- Il potere emissivo totale cresce come σT^4, quindi raddoppiare la temperatura moltiplica l’emissione per 16.
- Le superfici reali emettono una frazione ε della potenza del corpo nero; per una superficie grigia $\alpha = \varepsilon$ (Kirchhoff).
- La radiazione solare è a onda corta; l’emissione della Terra è infrarossa a onda lunga, ed è per questo che contano gas come CO_2 e vapore acqueo.

Equazioni chiave

$$\lambda_{max} T = 2898\ \mu m \cdot K$$

_maxT=2898\ μ m· K

Legge dello spostamento di Wien

$$E_b = \sigma T^4$$

E_b=σ T^4

Stefan–Boltzmann

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

E=σ T^4

Superficie reale

$$T_e = \left(\frac{\bar{S}(1-a)}{\sigma} \right)^{1/4}$$

`T_e=(( S(1-a))/(σ))^1/4`

Temperatura effettiva

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 La NASA attribuisce al Sole circa 5800 K. Trova la sua lunghezza d'onda di picco.

1. 2898/5800.

Risposta: 0.500 µm, luce visibile.

Esempio 8.2 La Terra assorbe circa 240 W/m² (NASA). Trova la sua temperatura effettiva.

1. T = (240/5.670374419 × 10⁻⁸)^¼.

Risposta: 255.1 K, circa −18 °C (la NASA arrotonda a circa −20 °C).

Esempio 8.3 Emissione di corpo nero di una superficie a 288 K?

1. σ × 288⁴.

Risposta: 390 W/m².

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Lunghezza d'onda di picco a 288 K?

   10.06 µm, infrarosso termico.

2. Rapporto di emissione quando T raddoppia?

   2⁴ = 16.

3. Picco per un filamento di lampada a 3000 K?

0.966 μm, vicino infrarosso.

4. Superficie grigia con ε = 0.8: α?

   0.8.

Errori concettuali comuni

Mito: Caldo significa visibile.

In realtà: Gli oggetti a temperatura ambiente brillano nell'infrarosso.

Mito: Usare °C in σT^4.

In realtà: Usa i kelvin.

Mito: Lucido significa freddo.

In realtà: Un ε basso significa che emette e assorbe poco.

Flashcard

Corpo nero

Assorbitore ed emettitore perfetto.

Legge di Wien

$\lambda_{max} T = 2898$ μm·K.

Emissività

Emissione relativa al corpo nero.

Legge di Kirchhoff

$\alpha = \varepsilon$ per le superfici grigie.

Legge di Planck

Emissione spettrale del corpo nero.

Temperatura effettiva

T equivalente di corpo nero.

Quiz di autoverifica

1. Picco del Sole...

0.500 μm

10 μm

5 μm

0.05 µm

0.500 µm. 2898/5800.

2. Temperatura effettiva della Terra...

255 K

288 K

300 K

5800 K

255 K. (240/σ)^¼.

3. Raddoppia T, l'emissione...

×16

×2

×4

×8

×16. T^4.

4. Corpo nero a 288 K...

390 W/m²

240 W/m²

1360 W/m²

39 W/m²

390 W/m². σT^4.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L’Earth Observatory della NASA afferma che la superficie del Sole è a circa 5800 K, che la temperatura radiativa effettiva della Terra è di circa −20 °C e che raddoppiare la temperatura di un oggetto moltiplica la sua energia irradiata per 16.

La NASA osserva anche che il vapore acqueo lascia sfuggire la maggior parte dell’infrarosso tra 8 e 14 μm, mentre l’anidride carbonica assorbe oltre circa 12–13 μm, vicino al bordo di quella finestra.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Soluzioni

Fonti: NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitolo 10.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): Simulazione gratuita.

☐ **Ho finito questa unità**

Scambio radiativo e schermi

Fattori di vista, reciprocità, reti di superfici grigie, lastre parallele, schermi di radiazione e protezione termica nello spazio.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare la reciprocità dei fattori di vista.
- Calcolare lo scambio netto tra lastre parallele.
- Mostrare come uno schermo riduce il flusso di calore.
- Stimare la radiazione da uno schermo caldo.

Concetti chiave

- Il fattore di vista F_{12} è la frazione della radiazione che lascia la superficie 1 e raggiunge la superficie 2.
- Reciprocità: $A_1F_{12} = A_2F_{21}$; somma: i fattori di vista da una superficie sommano a 1.
- Le superfici grigie scambiano calore attraverso resistenze superficiali $(1 - \varepsilon)/(\varepsilon A)$ e resistenze spaziali $1/(A_1F_{12})$.
- Uno schermo sottile a basso ε tra due lastre aggiunge resistenze e riduce nettamente lo scambio; l'isolamento multistrato ne impila molti.
- Uno scudo termico rivolto al Sole si scalda, irradia di nuovo e protegge ciò che sta nella sua ombra.

Equazioni chiave

$$A_1F_{12} = A_2F_{21}$$

```
A_1F_12=A_2F_21
```

Reciprocità

$$q'' = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

```
q^=(σ(T_1^4-T_2^4))/(1/_1+1/_2-1)
```

Armature parallele

$$R_{surf} = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon A}$$

```
R_surf=(1-)/( A)
```

Resistenza superficiale

$$R_{space} = \frac{1}{A_1 F_{12}}$$

R_space=1A_1F_12

Resistenza spaziale

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Grandi lastre parallele a 400 K e 300 K, entrambe ε = 0.8. Flusso netto?

1. Denominatore: 1.25 + 1.25 − 1 = 1.5.
2. q'' = σ(400⁴ − 300⁴)/1.5.

Risposta: 662 W/m².

Esempio 9.2 Inserisci uno schermo con ε = 0.05 su entrambi i lati.

1. Resistenza: 2 × (1.25 + 20 − 1) = 40.5.
2. q'' = σ × 1.75 × 10¹⁰/40.5.

Risposta: 24.5 W/m², 27 volte meno.

Esempio 9.3 Una piccola sfera (A_1 = 1 m²) si trova dentro un guscio di area 4 m². Trova F_{21}.

1. F_{12} = 1.
2. $F_{21} = A_1F_{12}/A_2$.

Risposta: 0.25.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Flusso di corpo nero al limite di 1377 °C dello scudo della Parker?

   σ × 1650.15⁴ = 4.20 × 10⁵ W/m².

2. Perché un solo schermo con ε = 0.05 funziona così bene?

   Le sue due resistenze superficiali aggiungono circa 39.

3. Somma dei fattori di vista da una superficie di una cavità?

    1.

4. Che cos'è l'MLI?

    Molti schermi sottili a basso ε impilati.

Errori concettuali comuni

Mito: I fattori di vista sono simmetrici.
In realtà: Solo $A_1F_{12} = A_2F_{21}$.

Mito: Gli schermi devono essere spessi.
In realtà: Conta il basso ε, non lo spessore.

Mito: Le superfici nere sono buoni schermi.
In realtà: Gli schermi richiedono basso ε.

Flashcard

Fattore di vista

Frazione di radiazione intercettata.

Reciprocità

$A_1F_{12} = A_2F_{21}$.

Radiosità

Tutta la radiazione che lascia una superficie.

Schermo di radiazione

Barriera a basso ε.

MLI

Isolamento multistrato.

Superficie grigia

ε indipendente dalla lunghezza d'onda.

Quiz di autoverifica

1. Flusso tra lastre...

662 W/m²

993 W/m²

24.5 W/m²

1000 W/m²

662 W/m². σΔT⁴/1.5.

2. Con schermo...

24.5 W/m²

331 W/m²

66 W/m²

2.45 W/m²

24.5 W/m². ÷ 40.5.

3. F_{21}...

0.25

1

4

0.5

0.25. Reciprocità.

4. I buoni schermi hanno...

ε basso

ε alto

k alto

h alto

ε basso. Emettitori deboli.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che la Parker Solar Probe, lanciata il 12 agosto 2018, è protetta da uno scudo in composito di carbonio da 4.5 pollici (11.43 cm) che resiste a quasi 2500 °F (1377 °C) mentre la sonda passa a circa 3.9 milioni di miglia (6.2 milioni di km) dal Sole.

Nel 2021 la Parker è diventata il primo veicolo spaziale ad attraversare la corona solare; il suo scudo tiene in ombra gli strumenti retrostanti, la stessa idea dello schermo di radiazione di questa unità.

Su Saving Planets: Progettazione di veicoli spaziali · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Science: Parker Solar Probe (https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/)

Risorse di apprendimento gratuite

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale gratuito, capitolo 10.
- NASA Science: Parker Solar Probe (https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/): Pagina della missione NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Pompe di calore, edifici e bilancio energetico della Terra

COP delle pompe di calore, limiti di Carnot, dispersioni di un intero edificio e squilibrio energetico planetario misurato dallo spazio.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il COP di una pompa di calore e il suo limite di Carnot.
- Dimensionare l'elettricità per un carico di riscaldamento.
- Convertire uno squilibrio di flusso in potenza totale.
- Collegare i tre modi in un unico sistema.

Concetti chiave

- Una pompa di calore sposta calore dal freddo al caldo usando lavoro; il suo COP di riscaldamento è il calore fornito diviso il lavoro.
- Il COP di Carnot, T_h/(T_h − T_c), è un limite superiore che cala al diminuire della temperatura esterna.
- La dispersione di un edificio è il suo UA per la differenza interno–esterno; l'isolamento riduce UA prima di acquistare impianti.
- Lo squilibrio energetico della Terra è una piccola differenza tra due grandi flussi, misurata da satelliti come gli strumenti CERES della NASA.
- Ogni sistema di questo corso combina conduzione, convezione e irraggiamento in una rete di resistenze.

Equazioni chiave

$$COP_h = \frac{Q_h}{W}$$

```
COP_h=(Q_h)/(W)
```

COP di riscaldamento

$$COP_{Carnot} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

```
COP_Carnot=(T_h)/(T_h-T_c)
```

Limite di Carnot

$$Q = UA\Delta T$$

Q=UAΔ T

Dispersione dell’edificio

$$P = \Delta F \cdot A_E$$

P=Δ F· A_E

Potenza dello squilibrio planetario

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 ENERGY STAR afferma che una pompa di calore può fornire fino a tre volte più calore dell’elettricità che consuma. Elettricità per 9 kW di calore?

1. W = 9/3.

Risposta: 3 kW.

Esempio 10.2 COP di riscaldamento di Carnot con mandata a 35 °C (308 K) e 0 °C (273 K) all’esterno?

1. 308/(308 − 273).

Risposta: 8.8; le unità reali raggiungono circa un terzo di quel valore.

Esempio 10.3 La NASA indica uno squilibrio di poco più di 0.8 W/m². Con un’area terrestre di 5.1 × 10^{14} m² (valore da manuale), potenza totale?

1. 0.8 × 5.1 × 10^{14}.

Risposta: Circa 4.1 × 10^{14} W.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Metà di una bolletta energetica annua di $1900?

   Circa $950 per riscaldamento e raffrescamento.

2. COP di Carnot con −10 °C (263 K) all’esterno, mandata a 308 K?

   6.84.

3. Perché isolare prima di comprare una pompa di calore?

   Un UA minore significa un'unità più piccola ed economica.

4. Che cosa misura CERES?

   L'energia radiante della Terra dallo spazio.

Errori concettuali comuni

Mito: Un COP superiore a 1 viola la conservazione dell'energia.
In realtà: Il calore viene spostato, non creato.

Mito: Abbassare molto le pompe di calore di notte.
In realtà: ENERGY STAR consiglia un'impostazione costante.

Mito: 0.8 W/m² è trascurabile.
In realtà: Su tutta la Terra sono circa 4×10^{14} W.

Flashcard

COP

Calore fornito per unità di lavoro.

COP di Carnot

Limite ideale.

UA

Conduttanza complessiva.

Squilibrio energetico

Assorbito meno emesso.

CERES

Strumenti NASA per il bilancio radiativo.

Pompa di calore

Sposta calore con lavoro.

Quiz di autoverifica

1. Elettricità per 9 kW con COP 3...

3 kW

27 kW

9 kW

1 kW

3 kW. 9/3.

2. COP di Carnot...

8.8

3

1.13

35

8.8. 308/35.

3. Potenza dello squilibrio...

≈ 4.1×10^{14} W

≈ 4×10^{9} W

≈ 0.8 W

≈ 10^{20} W

≈ 4.1×10^{14} W. $0.8 \times 5.1 \times 10^{14}$.

4. Ridurre UA...

isolando

aumentando il COP

aggiungendo alette

verniciando di nero

isolando. Resistenza.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

ENERGY STAR afferma che una pompa di calore aria-aria può fornire fino a tre volte più energia termica dell'energia elettrica che consuma, perché sposta il calore invece di produrlo.

L'Earth Observatory della NASA afferma che la Terra assorbe poco più di 0.8 W/m² in più di quanto emette; gli strumenti CERES della NASA misurano il bilancio radiativo dall'orbita.

Su Saving Planets: Soluzioni · Osservazione della Terra

Fonti: ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps) · NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance) · NASA Langley: CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) (https://ceres.larc.nasa.gov/)

Risorse di apprendimento gratuite

- ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps): Guida ENERGY STAR.
- NASA Langley: CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) (https://ceres.larc.nasa.gov/): NASA CERES.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

Questi esercizi stanno dentro ogni unità. Falli su carta, poi apri la risposta.

1. Modi di trasmissione del calore e bilanci energetici
   4 esercizi
2. Conduzione stazionaria e resistenza termica
   4 esercizi
3. Cilindri, sfere e alette
   4 esercizi
4. Conduzione transitoria
   4 esercizi
5. Convezione forzata esterna
   4 esercizi
6. Flusso interno e scambiatori di calore
   4 esercizi
7. Convezione naturale ed ebollizione
   4 esercizi
8. Fondamenti dell'irraggiamento
   4 esercizi
9. Scambio radiativo e schermi
   4 esercizi
10. Pompe di calore, edifici e bilancio energetico della Terra

4 esercizi

Il laboratorio (Heat transfer lab)

Il laboratorio è la parte pratica del corso. Qui è gratuito e solo per esercitarsi, senza crediti.

Ogni laboratorio si svolge in una simulazione gratuita o in un foglio di calcolo, quindi non ci sono rischi di ustioni o elettrici. Non scaldare, far bollire o accendere nulla per questo corso. Fai pause dallo schermo, mantieni una buona postura e tieni i cavi fuori dai passaggi.

Riferimento per la sicurezza: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

Laboratorio A: Flusso di calore e un calcolatore di isolamento delle pareti

SETTIMANA 2

Obiettivo: Osserva il flusso di calore tra oggetti in PhET Energy Forms and Changes, poi calcola il flusso termico di una parete per diversi spessori di isolante.

$$q'' = \Delta T / R''$$

q^=Δ T/R^

Parete in serie

Procedimento

1. In PhET Energy Forms and Changes, scalda un blocco e osserva l’energia fluire verso il vicino e verso l’aria.
2. In un foglio di calcolo, inserisci la parete dell’unità 2 senza isolante: R" = 0.3079 m²·K/W.
3. Aggiungi strati di isolante da 0.05, 0.1 e 0.2 m (k = 0.04) e calcola q" per ΔT = 20 K.
4. Traccia q" in funzione dello spessore e nota i rendimenti decrescenti.

Tabella dei dati

Isolante (m)	R" (m²·K/W)	q" (W/m²)
0	0.3079	64.96
0.05	1.558	12.84
0.1	2.808	7.12
0.2	5.308	3.77

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. R"(0.05) = 0.3079 + 0.05/0.04 = 1.558.
2. q" = 20/1.558 = 12.84 W/m².

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Legame con il pianeta: ENERGY STAR: quasi metà di una tipica bolletta energetica domestica di $1900 va a riscaldamento e raffrescamento. ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio B: Esploratore dell’efficienza delle alette

SETTIMANA 4

Obiettivo: Calcola l’efficienza di un’aletta a spillo per diverse lunghezze e vedi dove allungarla smette di convenire.

$$\eta_f = \tanh(mL)/(mL)$$

`_f=mL/mL`

Efficienza dell’aletta

Procedimento

1. Inserisci l’aletta dell’unità 3: k = 200, D = 5 mm, h = 50, quindi m = 14.14 m^{-1}.
2. Calcola η per L = 10, 20 e 40 mm.
3. Calcola il calore dell’aletta per un eccesso di 50 K alla base.
4. Porta h a 200 e ripeti.

Tabella dei dati

L (mm)	mL	η
10	0.1414	0.993
20	0.2828	0.974
40	0.5657	0.905

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. m = √(4 × 50/(200 × 0.005)) = 14.14 m^{-1}.
2. η(40 mm) = tanh(0.5657)/0.5657 = 0.905.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/)

Legame con il pianeta: Alette e scambiatori efficienti permettono alle pompe di calore di spostare più calore per unità di elettricità (ENERGY STAR). ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio C: Curva di raffreddamento concentrato

SETTIMANA 5

Obiettivo: Modella in un foglio di calcolo il raffreddamento della sfera di alluminio dell'unità 4 e confronta una curva esatta con una soluzione passo passo (Euler).

$$T = T_\infty + (T_i - T_\infty)e^{-t/\tau}$$

`T=T_∞+(T_i-T_∞)e^-t/τ`

Risposta concentrata

Procedimento

1. Inserisci T_i = 300 °C, T∞ = 20 °C, τ = 81 s.
2. Calcola T a ogni τ fino a 3τ.
3. Aggiungi una colonna Euler con passo di 5 s e confronta.
4. Raddoppia h e ripeti.

Tabella dei dati

t (s)	T (°C)
0	300
81	123.0
162	57.9
243	33.9

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. $T(81) = 20 + 280e^{-1} = 123.0$ °C.
2. $T(243) = 20 + 280e^{-3} = 33.9$ °C.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Legame con il pianeta: NASA: la superficie terrestre ha una media di circa 15 °C, oltre 30 °C in più che senza atmosfera. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio D: Calcolatore di convezione su lastra piana

SETTIMANA 7

Obiettivo: Calcola Re e l’h medio per aria su una lastra di 0.5 m a diverse velocità.

$$\bar{h} = 0.664 \frac{k}{L} Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$$

`h=0.664k/LRe_L^1/2Pr^1/3`

Lastra laminare

Procedimento

1. Inserisci le proprietà dell’aria: ν = 1.5 × 10⁻⁵, k = 0.026, Pr = 0.71.
2. Calcola Re e h a 1, 5 e 10 m/s.
3. Verifica che ogni Re sia sotto 5 × 10⁵.
4. Traccia h in funzione di √V.

Tabella dei dati

V (m/s)	Re	h (W/(m²·K))
1	33,333	5.62
5	166,667	12.58
10	333,333	17.78

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. Re(1) = 1 × 0.5/1.5 × 10⁻⁵ = 33,333.
2. h(10) = 0.664 × 577.4 × 0.892 × 0.052 = 17.78.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/)

Legame con il pianeta: NASA: la convezione trasporta circa il 5% dell'energia solare in arrivo dalla superficie. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio E: Spettri di corpo nero

SETTIMANA 11

Obiettivo: Usa PhET Blackbody Spectrum per vedere la legge di Wien, poi verifica i picchi in un foglio di calcolo.

$$\lambda_{max} = 2898/T$$

`_max=2898/T`

Legge di Wien

Procedimento

1. In PhET Blackbody Spectrum, imposta il Sole, una lampada e la Terra.
2. Leggi la lunghezza d'onda di picco dal grafico.
3. Calcola 2898/T per 288, 3000 e 5800 K.
4. Calcola σT⁴ per ciascuno.

Tabella dei dati

T (K)	λ_max (μm)	σT⁴ (W/m²)
288	10.06	390
3000	0.966	4.59×10^{6}
5800	0.500	6.42×10^{7}

Valori calcolati.

Calcolo di esempio

1. 2898/288 = 10.06 μm.
2. $\sigma \times 5800^{4} = 6.42 \times 10^{7}$ W/m².

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Funziona in un browser web.

PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum)

Legame con il pianeta: NASA: il Sole è a circa 5800 K. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio F: Effetto serra e bilancio energetico

SETTIMANA 14

Obiettivo: Esplora PhET Greenhouse Effect, poi calcola la temperatura effettiva della Terra per diversi albedo.

$$T_e = \left(\frac{S(1-a)}{4\sigma}\right)^{1/4}$$

`T_e=((S(1-a))/(4σ))^1/4`

Temperatura effettiva

Procedimento

1. In PhET Greenhouse Effect, aggiungi e togli nubi e gas serra e osserva la temperatura.
2. In un foglio di calcolo, usa S = 1360 W/m² (NASA).
3. Calcola T_e per albedo 0.25, 0.29 e 0.35.
4. Spiega perché T_e è inferiore alla media superficiale di 15 °C della NASA.

Tabella dei dati

Albedo	T_e (K)
0.25	259.0
0.29	255.4
0.35	249.9

Valori calcolati.

Calcolo di esempio

1. (1360 × 0.71/(4σ))^¼ = 255.4 K.
2. 255.4 − 273.15 = −17.7 °C.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Funziona in un browser web.

PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect)

Legame con il pianeta: NASA: circa il 29% della luce solare viene riflesso e la Terra assorbe circa 240 W/m². NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Serie di esercizi per gli esami

Cronometrati: circa 10 minuti per problema. Poi confronta con le soluzioni complete.

Esercizi di preparazione all'esame intermedio (unità 1–5)

1. Convezione da 3 m² con h = 15 W/(m²·K), ΔT = 20 K?
    1. 15 × 3 × 20.

    Risposta: 900 W.

2. Flusso termico attraverso 0.15 m di isolante (k = 0.04) più 0.3079 m²·K/W di altri strati con ΔT = 20 K?
    1. R'' = 0.3079 + 3.75 = 4.058.
    2. 20/4.058.

    Risposta: 4.93 W/m².

3. Raggio critico per k = 0.1 e h = 10?
    1. k/h.

    Risposta: 10 mm.

4. τ per una sfera di alluminio da 20 mm, h = 50?
    1. 2700 × 900 × (0.02/6)/50.

    Risposta: 162 s.

5. Re per aria a 2 m/s su 0.5 m?
    1. 2 × 0.5/1.5 × 10^{-5}.

    Risposta: 66,667.

Serie finale di esercizi (unità 1–10)

1. LMTD per ΔT_1 = 60 K e ΔT_2 = 20 K?

1. 40/ln 3.

Risposta: 36.4 K.

2. ε per NTU = 1, C_r = 0?

1. 1 − e⁻¹.

Risposta: 0.632.

3. Ra per la lastra dell'unità 7 con L = 0.6 m?

1. 7.52 × 10⁷ × 8.

Risposta: 6.02 × 10⁸.

4. Lunghezza d'onda di picco a 1000 K?

1. 2898/1000.

Risposta: 2.90 µm.

5. Lastre parallele a 500 K e 300 K, entrambe ε = 0.9?

1. σ(500⁴ − 300⁴)/(2/0.9 − 1).

Risposta: 2524 W/m².

6. COP di riscaldamento di Carnot, mandata a 318 K, 268 K all'esterno?

1. 318/50.

Risposta: 6.36.

Formulario

$$q = kA\Delta T/L,\ q = hA\Delta T,\ q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4) \qquad R = L/(kA),\ R = 1/(hA),\ q = \Delta T/\sum R$$

$$R_{cyl} = \ln(r_2/r_1)/(2\pi kL),\ r_{cr} = k/h \qquad m = \sqrt{hP/(kA_c)},\ \eta_f = \tanh(mL)/(mL)$$

$$Bi = hL_c/k,\ \tau = \rho cV/(hA),\ \theta/\theta_i = e^{-t/\tau} \qquad Re = VL/\nu,\ Nu = hL/k,\ Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4},\ \Delta T_{lm} = (\Delta T_1 - \Delta T_2)/\ln(\qquad Ra = g\beta\Delta TL^3/(\nu\alpha),\ Nu = 0.59Ra^{1/4}$$

$$\lambda_{max}T = 2898,\ E_b = \sigma T^4,\ A_1F_{12} = A_2F_{21} \qquad COP = Q_h/W,\ COP_C = T_h/(T_h - T_c),\ P = \Delta F$$

Costanti

Costante	Valore
Costante di Stefan–Boltzmann	$\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)
Costante di Wien (valore da manuale)	2898 µm·K
Gravità standard	g = 9.80665 m/s²
Aria vicino a 300 K (valori da manuale)	k = 0.026 W/(m·K), $\nu = 1.5 \times 10^{-5}$ m²/s, Pr = 0.71
Alluminio (valori da manuale)	k = 237 W/(m·K), ρ = 2700 kg/m³, c = 900 J/(kg·K)
Superficie della Terra (valore da manuale)	5.1×10^{14} m²

Fonte: NIST: CODATA value, Stefan–Boltzmann constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma)

Testi e simulazioni gratuiti

Usa questi testi, lezioni e simulazioni gratuiti insieme al corso.

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuale completo e gratuito di trasmissione del calore.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Lezioni ed esercizi gratuiti del MIT.
- NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance): Spiegazione gratuita della NASA.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): Il flusso di calore in modo interattivo.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): Irraggiamento termico.
- PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect): Bilancio radiativo.

Glossario

Albedo
Frazione della luce solare riflessa.

Numero di Biot
Resistenza termica interna su esterna.

Corpo nero
Assorbitore ed emettitore perfetto.

Strato limite
Sottile regione di flusso vicino alla parete.

COP
Calore spostato per unità di lavoro.

Raggio critico
Raggio di massima dispersione di un cilindro isolato.

Efficacia
Calore reale su calore massimo dello scambiatore.

Emissività
Emissione relativa a un corpo nero.

Squilibrio energetico
Energia planetaria assorbita meno emessa.

Efficienza dell'aletta
Calore reale su calore ideale dell'aletta.

Legge di Fourier
Legge della potenza conduttiva.

Scambiatore di calore
Dispositivo che sposta calore tra fluidi.

LMTD
Differenza di temperatura media logaritmica.

Capacità concentrata
Modello transitorio a temperatura uniforme.

Numero di Nusselt
Coefficiente di convezione adimensionale.

Numero di Prandtl
Diffusività della quantità di moto su diffusività termica.

Schermo di radiazione
Barriera a bassa emissività.

Numero di Rayleigh
Intensità del flusso di galleggiamento.

Resistenza termica
Differenza di temperatura per flusso di calore.

Fattore di vista
Frazione di radiazione intercettata da una superficie.

Griglia di autovalutazione

Non si assegnano voti né crediti. Usala per valutare onestamente a che punto sei in ogni unità.

Livello	Come si presenta
4 · Padronanza	Disegna il sistema e la rete di resistenze, controlla i numeri adimensionali prima di scegliere una correlazione, usa i kelvin per l'irraggiamento e spiega i risultati in parole semplici.
3 · Competente	Risolve le serie di esercizi e d'esame con piccoli errori e controlla le unità.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma confonde la k del solido e del fluido, o usa °C in σT^4.
1 · Principiante	Inserisce numeri nelle formule senza schizzo né bilancio energetico; deve rivedere l'unità.

Pesi suggeriti se vuoi un punteggio

Parte	Peso
Esercizi	20%
Laboratori	25%
Serie di esercizi di metà corso	25%
Serie di esercizi finale	30%

Punta al livello 3 o superiore in ogni unità prima di passare al corso successivo.

Corsi correlati

- Progettazione di veicoli spaziali AERO 430
- Avionica e ingegneria dei sistemi AERO 450
- Propulsione AERO 410
- Tutti i corsi