Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 1, Autunno · 🧱 Calcolatore integrato

Informazioni sul corso

Questo corso gratuito ha 10 unità e 4 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 le introduzioni del primo anno di ingegneria aerospaziale come MIT 16.00 e la parte iniziale della Unified Engineering del MIT, i corsi introduttivi di aeronautica e astronautica di Purdue, Georgia Tech ed Embry-Riddle, e il testo classico Introduction to Flight di John D. Anderson Jr. Rimandiamo ovunque a materiali gratuiti, in particolare alla Beginner's Guide to Aeronautics di NASA Glenn. Nessuna di queste organizzazioni approva questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è collegata a un volo più pulito e ai veicoli spaziali che osservano il nostro pianeta, ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di verifica prima della pubblicazione, e quattro laboratori, tra cui una galleria del vento virtuale e un aliante che costruisci tu, rendono concrete le equazioni.
>
> 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

L'ingegneria aerospaziale costruisce i satelliti che misurano clima, foreste, ghiacci e oceani della Terra, e deve anche ridurre la propria impronta: ogni chilogrammo di carburante per jet bruciato produce circa 3.16 kg di CO_2.

Ogni unità termina con una breve sezione con fonti che mostra come le sue idee aiutano le persone e il pianeta.

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 4 laboratori (AERO 101).
- 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

- Algebra e trigonometria delle superiori; logaritmi ed esponenziali.
- La meccanica di Fisica I (forze, energia, quantità di moto, moto circolare) aiuta; seguila in parallelo se puoi.
- Analisi I è utile per alcune derivazioni ma non è necessaria per i calcoli numerici.

Come studiare

- Usa sempre unità SI e scrivile su ogni riga.
- Disegna le forze (portanza, peso, spinta, resistenza) prima di scrivere qualsiasi equazione.
- Stima prima; i numeri aerospaziali hanno ordini di grandezza familiari (aria al livello del mare ≈ 1.2 kg/m³, orbita bassa ≈ 7.7 km/s).
- Svolgi ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta.
- Usa i simulatori di NASA Glenn per verificare la tua intuizione.
- Rifai i quiz qualche giorno dopo. La pratica distribuita batte una lunga sessione unica.

Che cosa ti serve

- Un computer con browser web e foglio di calcolo (FoilSim funziona nel browser).
- Per il laboratorio dell'aliante: cartoncino o cartone vegetale, un righello, forbici, plastilina o monete come zavorra per il muso e un metro a nastro.
- Facoltativo: il cronometro di uno smartphone.

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	Storia del volo e processo di progettazione	Storia del volo; processo di progettazione; le quattro forze	MIT 16.00; Smithsonian
2	L’atmosfera	Atmosfera standard; velocità del suono	NASA Glenn: atmosfera
3	Aerodinamica di base: portanza e resistenza	Equazioni di portanza e resistenza; Bernoulli	NASA Glenn: portanza e resistenza
4	Aerodinamica di base: portanza e resistenza	Numero di Reynolds e velocità di stallo; Laboratorio D	FAA PHAK
5	Profili alari e ali	Profili alari, curva di portanza, ali finite; Laboratorio A	NASA FoilSim
6	Prestazioni dei velivoli	Volo planato, potenza necessaria, salita	NASA Glenn: angolo di planata
7	Prestazioni dei velivoli	Autonomia di distanza e di tempo; esercitazione per il compito intermedio	FAA PHAK
8	Stabilità e controllo	Stabilità e controllo; Laboratorio C	NASA Glenn: rotazioni
9	Fondamenti di propulsione	Propulsione: getti, fan ed eliche	NASA Glenn: propulsione
10	Razzi e l’equazione del razzo	Spinta dei razzi ed equazione del razzo	NASA Glenn: razzi
11	Razzi e l’equazione del razzo	Stadi e lanciatori; Laboratorio B	NASA Glenn: razzi
12	Orbite e missioni spaziali	Orbite, leggi di Keplero, orbita geostazionaria	JPL Basics of Space Flight
13	Orbite e missioni spaziali	Trasferimenti di Hohmann e progettazione di missioni	JPL Basics of Space Flight
14	Aviazione e spazio sostenibili	Aviazione e spazio sostenibili	NASA; EPA; DOE
15	Ripasso	Ripasso ed esercitazione finale	Tutte le unità

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

Storia del volo e processo di progettazione

Dai fratelli Wright ad Artemis: come gli ingegneri aerospaziali trasformano una missione in requisiti, compromessi e un progetto che vola.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Delineare le tappe fondamentali dell'aviazione e del volo spaziale.
- Descrivere il ciclo di progettazione: requisiti, concetto, progetto preliminare e di dettaglio, prove.
- Spiegare gli studi di compromesso e perché il peso condiziona tutto.
- Nominare le quattro forze del volo.

Concetti chiave

- Il 17 dicembre 1903 il Wright Flyer compì un volo di 12 secondi percorrendo 36 m (120 ft); il volo migliore di quel giorno coprì 260 m (852 ft) in 59 secondi. I Wright ebbero successo grazie alle prove: costruirono alianti e una propria galleria del vento prima di aggiungere un motore.
- Ogni progetto inizia da una missione: carico utile, autonomia od orbita, costo, sicurezza. I requisiti traducono la missione in numeri che il progetto deve rispettare.
- La progettazione è iterativa: schizzo del concetto, dimensionamento, analisi, prova, riprogettazione. Uno studio di compromesso confronta le opzioni secondo criteri pesati.
- Su un aereo agiscono quattro forze: portanza, peso, spinta e resistenza. In volo livellato stazionario, portanza = peso e spinta = resistenza.
- Il peso si accumula: più struttura richiede più portanza, un'ala più grande, più resistenza, più carburante e di nuovo più peso.

Equazioni chiave

$$L = W, \quad T = D$$

`L=W, T=D`

Volo stazionario, livellato, non accelerato

$$W = mg$$

`W=mg`

Peso

$$\text{Score} = \sum_i w_i \, s_i$$

`Score=_i w_i s_i`

Punteggio pesato di uno studio di compromesso

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 Un aereo leggero da 1100 kg vola in crociera livellata. Quanta portanza deve produrre la sua ala?

1. Volo livellato: L = W = mg.
2. L = 1,100 × 9.81.

Risposta: 10,791 N ≈ 10.8 kN.

Esempio 1.2 Due concetti di ala ricevono un voto su 10 per costo (peso 0.3), efficienza (0.5) e facilità di costruzione (0.2). Il concetto A ottiene 8, 6, 9; B ottiene 5, 9, 6. Quale vince?

1. A: 0.3(8) + 0.5(6) + 0.2(9) = 7.2.
2. B: 0.3(5) + 0.5(9) + 0.2(6) = 7.2.

Risposta: Pareggio a 7.2: il team dovrebbe provarli entrambi o rivedere i pesi di cui si fida meno.

Esempio 1.3 Il primo volo del Wright Flyer coprì 36 m in 12 s. Qual era la sua velocità media rispetto al suolo?

1. v = 36/12.

Risposta: 3 m/s rispetto al suolo. Volava contro un forte vento frontale, quindi la sua velocità all'aria era molto più alta.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un aereo di linea di massa 70000 kg vola in crociera livellata. Trova la sua portanza.

   L = 70,000 × 9.81 = 686,700 N ≈ 687 kN.

2. In crociera livellata i motori di un aereo forniscono 30 kN di spinta. Qual è la sua resistenza?

   30 kN, perché in volo stazionario la spinta bilancia la resistenza.

3. Perché i fratelli Wright costruirono una galleria del vento?

I dati di portanza pubblicati erano inaffidabili, così misurarono da soli molte forme d'ala: provare prima di costruire è il cuore del processo di progettazione.

Errori concettuali comuni

Mito: Gli ingegneri progettano prima l'aereo e poi gli trovano una missione.

In realtà: La missione e i suoi requisiti vengono prima.

Mito: In volo livellato la spinta deve bilanciare il peso.

In realtà: La spinta bilancia la resistenza; la portanza bilancia il peso.

Mito: Risparmiare un po' di peso fa risparmiare solo quel peso.

In realtà: I risparmi di peso si moltiplicano attraverso dimensioni dell'ala, resistenza e carburante.

Flashcard

Quattro forze

Portanza, peso, spinta, resistenza.

Requisiti

Obiettivi misurabili che un progetto deve soddisfare.

Studio di compromesso

Confronto pesato tra opzioni di progetto.

Ciclo di progettazione

Concetto → preliminare → progetto di dettaglio → prova → iterazione.

Wright Flyer

Primi voli a motore e controllati di un aereo, 17 dic. 1903.

Spirale del peso

Il peso in più fa crescere l'intero progetto.

Quiz di autoverifica

1. In volo livellato stazionario, la portanza è uguale...

alla spinta

alla resistenza

al peso

zero

al peso. Le forze verticali si bilanciano.

2. Il Wright Flyer volò per la prima volta il...

1899

1903

1911

1927

1903. 17 dicembre 1903, a Kitty Hawk.

3. Uno studio di compromesso...

sceglie il componente più economico

confronta le opzioni secondo criteri pesati

prova un prototipo fino alla rottura

si fa dopo le prove di volo

confronta le opzioni secondo criteri pesati. Classifica le opzioni in modo sistematico.

4. Il primo passo del processo di progettazione è...

i disegni di dettaglio

la missione e i requisiti

la prova di volo

la scelta di un motore

la missione e i requisiti. I requisiti guidano tutto ciò che segue.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Le priorità di progettazione cambiano con i tempi. I requisiti dei nuovi aerei ora includono consumo di carburante ed emissioni, quindi gli stessi strumenti di studio di compromesso pesano il clima insieme a costo e prestazioni.

La NASA indica tre vie principali per rendere sostenibile l'aviazione: tecnologia aeronautica efficiente, carburante sostenibile per l'aviazione, e operazioni e infrastrutture migliori.

Su Saving Planets: Artemis II

Fonti: Smithsonian: il Wright Flyer del 1903 (https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000) · NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Risorse di apprendimento gratuite

- Smithsonian: il Wright Flyer del 1903 (https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000): La storia e le caratteristiche del Wright Flyer.
- MIT OpenCourseWare 16.00: Introduction to Aerospace Engineering and Design (https://ocw.mit.edu/courses/16-00-introduction-to-aerospace-engineering-and-design-spring-2003/): Il corso introduttivo del MIT incentrato sulla progettazione.
- NASA Glenn: Beginner's Guide to Aeronautics (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/): Inizia da qui per ogni argomento.

☐ **Ho finito questa unità**

L’atmosfera

L’aria in cui vola un aereo: come temperatura, pressione, densità e velocità del suono cambiano con la quota.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare un modello di atmosfera standard per trovare T, p e ρ in quota.
- Applicare all’aria la legge dei gas perfetti.
- Calcolare la velocità del suono e il numero di Mach.
- Spiegare perché gli aerei di linea volano in crociera intorno a 11 km.

Concetti chiave

- Un’atmosfera standard è un modello medio adattato alle misure. Nel modello della NASA la troposfera va dal suolo a 11000 m, e la temperatura scende di circa 6.5 °C per chilometro.
- Da 11 a 25 km (bassa stratosfera) la temperatura del modello è costante a −56.46 °C, mentre la pressione continua a scendere esponenzialmente.
- La densità deriva dalla legge dei gas perfetti, ρ = p/(RT). A 11 km l’aria ha circa il 30% della densità al livello del mare.
- La velocità del suono è a = √(γRT), quindi dipende solo dalla temperatura. Numero di Mach M = V/a.
- Aria rarefatta significa meno resistenza a una data velocità, ed è per questo che i jet volano in alto, ma ali e motori hanno comunque bisogno di aria sufficiente per funzionare.

Equazioni chiave

$$T = 15.04 - 0.00649\,h \;\; (^\circ\mathrm{C},\; h \text{ in m})$$

`T=15.04-0.00649 h\ \ (^,\ h in m)`

Approssimazione NASA della temperatura nella troposfera

$$p = 101.29 \left(\frac{T + 273.1}{288.08} \right)^{5.256} \;\; \mathrm{kPa}$$

`p=101.29((T+273.1)/(288.08))^5.256 kPa`

Approssimazione NASA della pressione nella troposfera

$$\rho = \frac{p}{0.2869\,(T + 273.1)}$$

`ρ=(p)/(0.2869 (T+273.1))`

Densità (p in kPa, ρ in kg/m³)

$$a = \sqrt{\gamma RT}, \quad M = \frac{V}{a}$$

a=γ RT, M= Va

Velocità del suono e numero di Mach

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 Trova T, p e ρ a 5000 m con il modello della NASA.

1. T = 15.04 − 0.00649 × 5,000 = −17.41 °C.
2. p = 101.29 × (255.69/288.08)^5.256 = 54.11 kPa.
3. ρ = 54.11/(0.2869 × 255.69).

Risposta: T ≈ −17.4 °C, p ≈ 54.1 kPa, ρ ≈ 0.738 kg/m³ (60% del livello del mare).

Esempio 2.2 Trova la velocità del suono al livello del mare (15 °C) e a 11 km (−56.5 °C).

1. a = √(1.4 × 287 × 288.15) = 340.3 m/s.
2. a = √(1.4 × 287 × 216.65) = 295.0 m/s.

Risposta: 340 m/s e 295 m/s.

Esempio 2.3 Un aereo di linea vola a 230 m/s di velocità vera a 11 km. Qual è il suo numero di Mach?

1. M = 230/295.0.

Risposta: M ≈ 0.78.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova la densità dell'aria a 11000 m con il modello della NASA (T = −56.46 °C, p = 22.72 kPa).

   ρ = 22.72/(0.2869 × 216.64) ≈ 0.366 kg/m³, circa il 30% del livello del mare.

2. Trova la temperatura a 1500 m nel modello della NASA.

$T = 15.04 - 9.74 = 5.3\ °C$.

3. Quanto vale Mach 2 al livello del mare in m/s?

   $2 \times 340 = 680$ m/s.

4. Trova la densità al livello del mare da $p = 101.40$ kPa e $T = 15.04$ °C.

   $\rho = 101.40/(0.2869 \times 288.14) \approx 1.227$ kg/m³.

Errori concettuali comuni

Mito: La velocità del suono dipende dalla pressione.

In realtà: Per un gas perfetto dipende solo dalla temperatura.

Mito: Fa sempre più freddo salendo.

In realtà: La temperatura si stabilizza sopra gli 11 km e risale più in alto nella stratosfera.

Mito: L'aria più rarefatta aiuta sempre.

In realtà: Riduce la resistenza ma anche la portanza e la spinta dei motori, quindi le ali devono volare più veloci o con coefficienti di portanza più alti.

Flashcard

Atmosfera standard

Modello medio di T, p, ρ in funzione della quota.

Troposfera

Dal suolo a ~11 km; la temperatura scende con la quota.

Gradiente termico verticale

≈ 6.5 °C per km nella troposfera.

Legge dei gas ideali

$p = \rho RT$.

Velocità del suono

$a = \sqrt{(\gamma RT)}$.

Numero di Mach

$M = V/a$.

Quiz di autoverifica

1. Nella troposfera la temperatura scende di circa...

1 °C/km

6.5 °C/km

15 °C/km

0 °C/km

6.5 °C/km. Il gradiente della NASA è 0.00649 °C/m.

2. La velocità del suono al livello del mare è circa...

100 m/s

340 m/s

1,000 m/s

3,000 m/s

340 m/s. √(1.4 × 287 × 288).

3. A 11 km la densità è circa quale frazione di quella al livello del mare?

90%

60%

30%

5%

30%. 0.366/1.227.

4. Il numero di Mach è...

V × a

V/a

a/V

V^2/a

V/a. La velocità divisa per la velocità locale del suono.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Gli aerei volano dove si formano tempo e clima. La NASA studia le emissioni degli aerei con modelli al computer, prove di combustione in laboratorio e prove di volo, perché ciò che i motori rilasciano in quota conta per l'atmosfera.

La stessa fisica dell'atmosfera permette ai satelliti di trasformare la radiazione che misurano in profili di temperatura dell'aria.

Su Saving Planets: Resistenza atmosferica

Fonti: NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/) · NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/): Il modello e le equazioni usati in questa unità.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Capitoli gratuiti del manuale FAA su atmosfera e aerodinamica.

☐ **Ho finito questa unità**

Aerodinamica di base: portanza e resistenza

Da dove vengono portanza e resistenza, e le due equazioni che dimensionano ogni ala: L = ½ρV²SC_L e D = ½ρV²SC_D.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Spiegare la portanza come risultato della deviazione di un flusso, con differenze di pressione descritte dall'equazione di Bernoulli.
- Usare le equazioni di portanza e resistenza.
- Calcolare la pressione dinamica, la velocità di stallo e il numero di Reynolds.
- Distinguere resistenza d'attrito, di pressione e indotta.

Concetti chiave

- Un'ala devia il flusso d'aria verso il basso; per la terza legge di Newton l'aria spinge l'ala verso l'alto. In modo equivalente, un flusso più veloce sul dorso significa pressione più bassa lì (Bernoulli). Entrambe descrivono un unico flusso.
- La pressione dinamica q = ½ρV² fissa la scala di ogni forza aerodinamica. I coefficienti di portanza e resistenza C_L e C_D tengono conto di forma e angolo d'attacco.
- La portanza cresce con V², quindi dimezzare la velocità richiede un coefficiente di portanza o una superficie alare quattro volte maggiore.
- La resistenza deriva dall'attrito superficiale, dalla resistenza di pressione (di forma) e dalla resistenza indotta, il prezzo per generare portanza con un'ala finita.
- Il numero di Reynolds Re = ρVc/μ confronta effetti inerziali e viscosi; i modelli in galleria del vento devono tenerne conto per prevedere il comportamento in scala reale.

Equazioni chiave

$$L = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_L$$

`L=12ρ V^2SC_L`

Equazione della portanza

$$D = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

`D=12ρ V^2SC_D`

Equazione della resistenza

$$p + \tfrac{1}{2}\rho V^2 = \text{const}$$

p+12ρ V^2=const

Equazione di Bernoulli (lungo una linea di corrente)

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu}$$

Re=(ρ Vc)/(μ)

Numero di Reynolds

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 Un aereo da 1100 kg con un'ala di 16.2 m² vola livellato a 55 m/s al livello del mare (ρ = 1.227 kg/m³). Trova C_L.

1. L = W = 10,791 N.
2. q = ½ × 1.227 × 55² = 1,855 Pa.
3. C_L = 10,791/(1,855 × 16.2).

Risposta: C_L ≈ 0.36.

Esempio 3.2 Con C_L,max = 1.6, trova la velocità di stallo di questo aereo al livello del mare.

1. V_s = √(2W/(ρSC_L,max)).
2. = √(2 × 10,791/(1.227 × 16.2 × 1.6)).

Risposta: V_s ≈ 26.1 m/s (circa 51 nodi).

Esempio 3.3 Trova il numero di Reynolds di una corda di 1.5 m a 55 m/s al livello del mare (μ = 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s)).

1. Re = 1.227 × 55 × 1.5/(1.789 × 10⁻⁵).

Risposta: Re ≈ 5.7 milioni.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Se la velocità raddoppia con lo stesso C_L, come cambia la portanza?

Portanza $\propto V^2$, quindi quadruplica.

2. Trova la pressione dinamica a 230 m/s a 11 km ($\rho = 0.366$ kg/m³).

   $q = \frac{1}{2} \times 0.366 \times 230^2 \approx 9{,}680$ Pa.

3. Trova la resistenza dell'aereo dell'esempio 3.1 se $C_D = 0.032$.

   $D = 1{,}855 \times 16.2 \times 0.032 \approx 962$ N.

4. Di quanto è maggiore la velocità di stallo a 1500 m ($\rho = 1.060$ kg/m³) rispetto al livello del mare?

   $V_s \propto 1/\sqrt{\rho}$: $\sqrt{(1.227/1.060)} = 1.076$, quindi circa il 7.6% in più (≈ 28.0 m/s di velocità vera).

Errori concettuali comuni

Mito: L'aria che passa sopra deve ricongiungersi con quella che passa sotto al bordo d'uscita (tempo di transito uguale).

In realtà: Non è così; il flusso superiore in realtà arriva prima. NASA Glenn elenca il transito uguale tra le teorie errate della portanza.

Mito: La portanza è solo Bernoulli, o solo Newton.

In realtà: Entrambe descrivono lo stesso flusso; differenze di pressione e deviazione del flusso vanno insieme.

Mito: La resistenza è solo attrito con l'aria.

In realtà: La resistenza di pressione e quella indotta sono spesso maggiori.

Flashcard

Pressione dinamica

$q = \frac{1}{2}\rho V^2$.

Equazione della portanza

$L = qSC_L$.

Equazione della resistenza

$D = qSC_D$.

Velocità di stallo

$V_s = \sqrt{(2W/(\rho SC_{L,max}))}$.

Numero di Reynolds

$\rho Vc/\mu$.

Resistenza indotta

Resistenza dovuta alla portanza su un'ala finita.

Quiz di autoverifica

1. La portanza è proporzionale a…

- V
- V^2
- $\sqrt{V}$
- $1/V$

V^2. Attraverso la pressione dinamica $\frac{1}{2}\rho V^2$.

2. Raddoppiare la superficie alare a parità di velocità e C_L…

- dimezza la portanza
- raddoppia la portanza
- quadruplica la portanza
- non ha effetto

raddoppia la portanza. $L \propto S$.

3. Il numero di Reynolds confronta…

- portanza e resistenza
- effetti inerziali e viscosi
- velocità e velocità del suono
- spinta e peso

effetti inerziali e viscosi. $\rho V c/\mu$.

4. La resistenza indotta è causata da…

- la rugosità della vernice
- la generazione di portanza con un’ala finita

lo scarico dei motori

solo le onde d'urto

la generazione di portanza con un'ala finita. I vortici d'estremità inclinano la portanza all'indietro.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La resistenza è carburante. In crociera la spinta dei motori è pari alla resistenza, quindi ogni newton di resistenza eliminato è carburante non bruciato e CO_2 non emessa. Aver bisogno di meno energia per volare è la prima delle tre vie della NASA verso un'aviazione sostenibile.

La stessa fisica della portanza muove le pale delle turbine eoliche, che trasformano la forza aerodinamica del vento in elettricità pulita.

Su Saving Planets: Fisica I

Fonti: NASA Glenn: l'equazione della resistenza (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/) · NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: l'equazione della portanza (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/lift-equation/): Equazione e coefficienti di portanza.
- NASA Glenn: l'equazione della resistenza (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/): Equazione della resistenza.
- NASA Glenn: l'equazione di Bernoulli (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoullis-equation/): Pressione e velocità.
- NASA Glenn: Bernoulli e Newton (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoulli-and-newton/): Perché la spiegazione del transito uguale è sbagliata.

☐ **Ho finito questa unità**

Profili alari e ali

Geometria dei profili alari, curva di portanza, stallo e perché ali lunghe e sottili producono meno resistenza.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Nominare la geometria di un profilo: corda, curvatura, spessore, angolo d'attacco.
- Usare la teoria dei profili sottili: c_l ≈ 2πα.
- Correggere la pendenza della retta di portanza per un'ala finita di allungamento AR.
- Usare la polare di resistenza C_D = C_D0 + C_L²/(πeAR) per trovare la massima efficienza aerodinamica.

Concetti chiave

- Un profilo alare è la sezione di un'ala. La curvatura le permette di generare portanza con angolo d'attacco nullo; lo spessore dà robustezza e spazio per il carburante.
- La teoria dei profili sottili prevede una pendenza di portanza di 2π per radiante (circa 0.11 per grado) finché il flusso non si separa e l'ala va in stallo.
- Un'ala finita perde pendenza di portanza a causa dei vortici d'estremità: a = a_0/(1 + a_0/(πeAR)), con allungamento AR = b²/S.
- Resistenza totale C_D = C_D0 + KC_L² con K = 1/(πeAR). Il massimo L/D si ha quando la resistenza indotta è uguale a quella parassita.
- Un grande allungamento (alianti, albatri, ali dei moderni aerei di linea) significa meno resistenza indotta e un L/D più alto.

Equazioni chiave

$$c_l = 2\pi\alpha \ (\alpha \text{ in rad})$$

`c_l=2πα\ (α in rad)`

Pendenza di portanza del profilo sottile

$$a = \frac{a_0}{1 + a_0/(\pi e AR)}, \quad AR = \frac{b^2}{S}$$

`a=(a_0)/(1+a_0/(π eAR)), AR=^2S`

Pendenza di portanza dell'ala finita

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi e AR}$$

C_D=C_D0+(C_L^2)/(π eAR)

Polare di resistenza

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{\max} = \frac{1}{2\sqrt{C_{D0}K}}, \;\; C_L^* = \sqrt{\frac{C_{D0}}{K}}$$

(LD)_=12_D0K,\ \ C_L^*=_D0K

Massima efficienza aerodinamica

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 Teoria dei profili sottili: trova c_l con α = 5°.

1. α = 5π/180 = 0.0873 rad.
2. c_l = 2π × 0.0873.

Risposta: c_l ≈ 0.548.

Esempio 4.2 Trova la pendenza di portanza di un'ala con AR = 8 ed e = 0.9.

1. a = 2π/(1 + 2π/(π × 0.9 × 8)) = 6.283/1.278.

Risposta: 4.92 per rad ≈ 0.086 per grado, il 22% sotto il valore 2D.

Esempio 4.3 Con C_D0 = 0.025, e = 0.8 e AR = 7.5, trova (L/D)max e il C_L a cui si verifica.

1. K = 1/(π × 0.8 × 7.5) = 0.0531.
2. (L/D)max = 1/(2√(0.025 × 0.0531)).
3. C_L* = √(0.025/0.0531).

Risposta: (L/D)max ≈ 13.7 con C_L ≈ 0.69.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova l'allungamento di un'ala con apertura 11 m e superficie 16.2 m².

   AR = 121/16.2 ≈ 7.5.

2. Con $c_l = 2\pi\alpha$, quale angolo dà $c_l = 0.5$?

   $\alpha = 0.5/(2\pi) = 0.0796$ rad $\approx 4.6°$.

3. Per l'aereo dell'esempio 4.3, trova C_D con $C_L = 0.36$.

   $C_D = 0.025 + 0.0531 \times 0.1296 \approx 0.0319$.

4. Se AR passa da 7.5 a 15 (stessi e e C_{D0}), come cambia $(L/D)_{max}$?

   K si dimezza, quindi $(L/D)_{max}$ cresce di $\sqrt{2}$ fino a ≈ 19.4.

Errori concettuali comuni

Mito: Più angolo d'attacco significa sempre più portanza.
In realtà: Oltre l'angolo di stallo il flusso si separa e la portanza cala.

Mito: I profili simmetrici non possono generare portanza.
In realtà: La generano con un angolo d'attacco positivo.

Mito: I dispositivi d'estremità alare annullano la resistenza indotta.
In realtà: La riducono; solo un'ala infinitamente lunga non ne avrebbe.

Flashcard

Corda

Dal bordo d'attacco al bordo d'uscita.

Curvatura

Curvatura della linea media.

Angolo d'attacco

Angolo tra la corda e il flusso incidente.

Stallo

Separazione del flusso; la portanza cala.

Allungamento

b^2/S.

Polare di resistenza

$C_D = C_{D0} + KC_L^2$.

Quiz di autoverifica

1. La pendenza di portanza del profilo sottile è...

π per rad

2π per rad

2π per grado

1 per rad

2π per rad. $c_l = 2\pi\alpha$.

2. L’allungamento è...

b/S

b^2/S

S/b

c/b

b^2/S. L’apertura al quadrato divisa per la superficie.

3. Al massimo L/D...

resistenza indotta = resistenza parassita

la resistenza è nulla

$C_L = 0$

l’ala è in stallo

resistenza indotta = resistenza parassita. Minimizzare C_D/C_L dà $KC_L^2 = C_{D0}$.

4. Un allungamento maggiore riduce soprattutto...

l’attrito superficiale

la resistenza indotta

al peso

la resistenza d’onda

la resistenza indotta. K = 1/(πeAR).

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Le ali lunghe e sottili sono uno dei modi più diretti per ridurre il consumo di carburante, perché la resistenza indotta cala all'aumentare dell'allungamento. È proprio la via della «tecnologia aeronautica efficiente» nel lavoro della NASA sull'aviazione sostenibile.

L'albatro, che plana per ore sull'oceano, usa la stessa fisica: un'ala lunga e sottile con alta efficienza aerodinamica.

Su Saving Planets: Analisi II

Fonti: NASA Glenn: coefficiente di resistenza indotta (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/induced-drag-coefficient/) · NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/): Esplora curvatura, spessore e angolo d'attacco.
- NASA Glenn: coefficiente di resistenza indotta (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/induced-drag-coefficient/): Allungamento e fattore di efficienza.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04: Unified Engineering (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Le lezioni di fluidodinamica del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Prestazioni dei velivoli

Quanto lontano, quanto a lungo, quanto veloce e quanto ripido: planata, salita, autonomia di distanza e di tempo.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Collegare il rapporto di planata a L/D.
- Trovare spinta e potenza necessarie in volo livellato.
- Calcolare il rateo di salita dalla potenza in eccesso.
- Usare l'equazione di Breguet per l'autonomia di distanza.

Concetti chiave

- Un aliante con efficienza L/D percorre L/D metri in avanti per ogni metro di quota perso: tan γ = D/L.
- In volo livellato la spinta necessaria è pari alla resistenza; la potenza necessaria è resistenza × velocità. La potenza in eccesso diventa salita: rateo di salita = (P_avail − P_req)/W.
- Per un jet l'autonomia segue l'equazione di Breguet: R = (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f). Tre leve: efficienza del motore (V/c), aerodinamica (L/D) e strutture (frazione di peso).
- L'autonomia oraria (tempo in volo) è massima a una velocità diversa da quella per l'autonomia di distanza.

Equazioni chiave

$$\tan\gamma = \frac{D}{L} = \frac{1}{L/D}$$

γ=D/L=1L/D

Angolo di planata

$$P_R = DV$$

P_R=DV

Potenza necessaria

$$RC = \frac{P_A - P_R}{W}$$

RC=(P_A-P_R)/(W)

Rateo di salita

$$R = \frac{V}{c}\,\frac{L}{D}\,\ln\frac{W_i}{W_f}$$

`R= Vc LD (W_i)/(W_f)`

Equazione di Breguet per l'autonomia (jet)

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Un aliante con L/D = 20 si trova a 1000 m di quota. Quanto lontano può planare in aria calma, e con quale angolo?

1. Distanza = 1000 × 20.
2. γ = arctan(1/20).

Risposta: 20 km, con un angolo di planata di circa 2.9°.

Esempio 5.2 Un jet vola in crociera a 230 m/s con L/D = 17 e consumo specifico c = 0.6 all'ora. Bruciando carburante il suo peso scende da W_i a W_i/1.25. Trova la sua autonomia.

1. c = 0.6/3,600 = 1.667 × 10^{-4} s^{-1}.
2. R = (230/1.667 × 10^{-4}) × 17 × ln 1.25.

Risposta: ≈ 5,235 km.

Esempio 5.3 L'aereo dell'esempio 3.1, con la polare dell'esempio 4.3, ha circa 957 N di resistenza a 55 m/s. Quale potenza richiede il volo livellato?

1. P = DV = 957 × 55.

Risposta: ≈ 52.6 kW (circa 71 CV).

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un aliante di carta ha L/D = 5. Lanciato in orizzontale da 2 m, quanto lontano plana all'incirca?

   10 m.

2. Un aereo che pesa 10800 N ha 30 kW di potenza in eccesso. Trova il suo rateo di salita.

30,000/10,800 ≈ 2.8 m/s.

3. Nell’esempio 5.2, come cambia l’autonomia se L/D sale da 17 a 20?

   Autonomia ∝ L/D: 5235 × 20/17 ≈ 6159 km.

4. Quanto lontano può planare l’aereo dell’esempio 4.3 da 1500 m con la sua efficienza massima di 13.7?

   1,500 × 13.7 ≈ 20.6 km.

Errori concettuali comuni

Mito: Un aliante più pesante plana più lontano.
In realtà: Il rapporto di planata dipende da L/D, non dal peso; il peso cambia la velocità ottimale.

Mito: L’autonomia dipende solo dal carico di carburante.
In realtà: Dipende da efficienza del motore, L/D e frazione di peso (Breguet).

Mito: Volare più veloci dà sempre più autonomia.
In realtà: La migliore autonomia si ha a una velocità moderata legata al miglior L/D.

Flashcard

Rapporto di planata

Distanza orizzontale per unità di quota = L/D.

Potenza necessaria

$P_R = DV$.

Rateo di salita

$(P_A - P_R)/W$.

Autonomia di Breguet

$R = (V/c)(L/D)\ \ln(W_i/W_f)$.

TSFC

Flusso di carburante per unità di spinta.

Autonomia oraria

Tempo in volo.

Quiz di autoverifica

1. Il rapporto di planata è uguale a...

W/D

L/D

T/W

V/a

L/D. Distanza su quota = L/D.

2. La potenza necessaria in volo livellato è...

L × V

D × V

W/V

T/V

D × V. La resistenza per la velocità.

3. L'autonomia di Breguet cresce con...

c

L/D

il peso della struttura

alla resistenza

L/D. R ∝ L/D.

4. La salita deriva da...

la potenza in eccesso

solo più portanza

solo meno peso

una velocità più bassa

la potenza in eccesso. RC = potenza in eccesso/W.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L'equazione di Breguet è l'equazione climatica dell'aviazione: per un dato viaggio il carburante bruciato diminuisce quando i motori diventano più efficienti, le ali hanno un L/D più alto o le strutture si alleggeriscono. A parità degli altri termini, l'autonomia è proporzionale a L/D.

La NASA stima che, con la flotta e le operazioni attuali, il traffico aereo mondiale nel 2050 richiederebbe oltre 620 milioni di tonnellate di carburante ed emetterebbe quasi 2000 milioni di tonnellate di CO_2: per questo ogni termine dell'equazione conta.

Su Saving Planets: CO2M: misurare la CO_2 dallo spazio

Fonti: NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: angolo di planata (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/glide-angle/): Volo planato.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Capitolo sulle prestazioni degli aerei.
- NASA Glenn: rapporto spinta/peso (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-to-weight-ratio/): Spinta, peso e salita.

Guarda la lezione

Lecture 12: Aircraft Performance (https://ocw.mit.edu/courses/16-687-private-pilot-ground-school-january-iap-2019/resources/lecture-12-aircraft-performance/) (in inglese)

MIT 16.687 Private Pilot Ground School (IAP 2019), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Stabilità e controllo

Perché un aereo ben progettato torna da solo al volo stazionario, e come piloti e computer lo controllano.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Nominare i tre assi, beccheggio, rollio e imbardata, e le relative superfici di comando.
- Spiegare la stabilità statica e dinamica.
- Individuare il baricentro e il punto neutro; calcolare il margine statico.
- Spiegare perché la coda stabilizza un aereo.

Concetti chiave

- Un aereo ruota attorno al proprio baricentro: beccheggio (equilibratore), rollio (alettoni), imbardata (timone).
- Stabilità statica: dopo una perturbazione l'aereo tende inizialmente a tornare indietro. Stabilità dinamica: il moto si smorza davvero nel tempo.
- La stabilità in beccheggio richiede che il baricentro sia davanti al punto neutro. Il margine statico = (x_np − x_cg)/c̄ deve essere positivo.
- Una coda molto dietro il CG funziona come le penne di una freccia: una perturbazione a cabrare aumenta la portanza della coda e riporta giù il muso.
- Troppa stabilità rende l'aereo poco reattivo e costa resistenza di trim; alcuni caccia moderni sono progettati instabili e pilotati dal computer.

Equazioni chiave

$$\mathrm{SM} = \frac{x_{np} - x_{cg}}{\bar{c}}$$

```
SM=_np-x_cg c
```

Margine statico

$$x_{cg} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$$

```
x_cg=( m_ix_i)/( m_i)
```

Baricentro

$$\frac{dC_m}{d\alpha} < 0$$

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 Il punto neutro è al 40% della corda media e il CG al 25%. Trova il margine statico.

1. SM = 0.40 − 0.25.

Risposta: 0.15, cioè 15%: stabile.

Esempio 6.2 Un aliante ha un'ala da 50 g a x = 10 cm, una coda da 10 g a x = 40 cm e 20 g di zavorra nel muso a x = 0. Trova il CG.

1. Σmx = 50(10) + 10(40) + 20(0) = 900 g·cm.
2. Σm = 80 g.

Risposta: x_cg = 11.25 cm dal muso.

Esempio 6.3 Per l'aliante dell'esempio 6.2 (corda media 8 cm) il punto neutro è a 13 cm. È stabile?

1. SM = (13 − 11.25)/8.

Risposta: SM ≈ 0.22: stabile. Togli la zavorra dal muso e il CG arretra verso l'instabilità.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Quale superficie controlla il beccheggio?

   L'equilibratore, sul piano di coda orizzontale.

2. CG al 30% della corda, punto neutro al 28%. È stabile?

   SM = −0.02 < 0: staticamente instabile.

3. Nell'esempio 6.2, quale zavorra m nel muso porta il CG a 12 cm?

   900/(60 + m) = 12 dà m = 15 g.

4. Perché un aeroplanino di carta senza zavorra nel muso cabra e va in stallo?

   Il suo CG è troppo arretrato, vicino o dietro al punto neutro.

Errori concettuali comuni

Mito: Staticamente stabile significa che l'oscillazione si smorza.

In realtà: Quella è stabilità dinamica; la stabilità statica è la tendenza iniziale.

Mito: Più stabilità è sempre meglio.

In realtà: Troppa rende pesanti i comandi e spreca resistenza di trim.

Mito: Il CG può stare ovunque purché l'ala sostenga.

In realtà: Un CG arretrato rende l'aereo instabile.

Flashcard

Beccheggio / rollio / imbardata

Equilibratore / alettoni / timone.

Stabilità statica

Tendenza iniziale a tornare.

Stabilità dinamica

La perturbazione si smorza nel tempo.

Punto neutro

Posizione del CG per una stabilità neutra in beccheggio.

Margine statico

$(x_{np} - x_{cg})/\bar{c}$.

Trim

Equilibrato, momento risultante nullo.

Quiz di autoverifica

1. Gli alettoni controllano...

il beccheggio

il rollio

l'imbardata

alla spinta

il rollio. Si deflettono in direzioni opposte su ciascuna ala.

2. Per la stabilità in beccheggio il CG deve essere...

dietro il punto neutro

davanti al punto neutro

in coda

all'estremità alare

davanti al punto neutro. Margine statico positivo.

3. Un margine statico di 0.15 significa...

instabile

stabile

neutro

in stallo

stabile. Margine positivo.

4. La stabilità dinamica riguarda...

la tendenza iniziale

il moto nel tempo

la spinta del motore

solo il peso

il moto nel tempo. Se le oscillazioni si smorzano.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

I margini di stabilità costano carburante: una coda convenzionale di solito spinge verso il basso per equilibrare l'aereo, e l'ala deve generare portanza in più, con resistenza in più, per sostenerla.

Ridurre questa penalità fa parte della via dell’aereo efficiente descritta dalla NASA.

Le stesse idee di equilibrio e controllo mantengono puntati in modo stabile i satelliti di osservazione della Terra, così che i loro strumenti possano mappare il pianeta.

Su Saving Planets: Guida alle orbite

Fonti: NASA Glenn: rotazioni dell’aereo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/) · NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: rotazioni dell’aereo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/): Beccheggio, rollio e imbardata.
- FAA Pilot’s Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Capitoli su stabilità e comandi di volo.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Fondamenti di propulsione

Come eliche, jet e razzi producono spinta lanciando massa all'indietro, e perché jet più grandi e lenti sono più efficienti.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare l'equazione della spinta dalla quantità di moto.
- Calcolare il rendimento propulsivo.
- Confrontare turbogetti, turbofan ed eliche.
- Definire l'impulso specifico e il consumo specifico di carburante.

Concetti chiave

- Ogni motore produce spinta accelerando una portata di massa: F = ṁ(v_e − v_0) per un motore aerobico (trascurando la massa del carburante e i termini di pressione).
- Rendimento propulsivo η_p = 2/(1 + v_e/v_0): spostare tanta aria di poco è più efficiente che spostare poca aria di molto. Per questo i turbofan hanno fan enormi.
- Turbogetto: tutta l'aria passa nel nucleo. Turbofan: gran parte dell'aria aggira il nucleo passando per il fan. Turboelica: un'elica mossa da una turbina a gas.
- L'impulso specifico I_sp = F/(ṁ_fuel g_0) misura la spinta per portata in peso di carburante, in secondi.

Equazioni chiave

$$F = \dot{m}(v_e - v_0)$$

F= m(v_e-v_0)

Spinta di un motore aerobico

$$\eta_p = \frac{2}{1 + v_e/v_0}$$

_p=(2)/(1+v_e/v_0)

Rendimento propulsivo

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}_f g_0}$$

I_sp=(F)/(m_fg_0)

Impulso specifico

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Un turbofan accelera 500 kg/s d'aria da 250 m/s a 320 m/s. Trova spinta e rendimento propulsivo.

1. F = 500 × 70 = 35,000 N.
2. $\eta_p = 2/(1 + 320/250) = 2/2.28$.

Risposta: F = 35 kN, $\eta_p \approx 0.88$.

Esempio 7.2 Un turbogetto produce gli stessi 35 kN con 100 kg/s d'aria a v_0 = 250 m/s. Quale velocità di scarico gli serve, e quanto vale η_p?

1. $v_e = 250 + 35{,}000/100 = 600$ m/s.
2. $\eta_p = 2/(1 + 2.4)$.

Risposta: v_e = 600 m/s, $\eta_p \approx 0.59$: molto meno efficiente.

Esempio 7.3 Un motore produce 100 kN bruciando 2.5 kg/s di carburante. Trova il suo I_{sp}.

1. $I_{sp} = 100{,}000/(2.5 \times 9.80665)$.

Risposta: ≈ 4079 s. I motori aerobici battono i razzi su questa misura perché non trasportano il proprio ossidante.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova la spinta per $\dot{m}$ = 200 kg/s, v_0 = 200 m/s, v_e = 300 m/s.

   20 kN.

2. Trova η_p quando $v_e = v_0$.

   1.0, ma la spinta è nulla: rendimento e spinta sono in compromesso.

3. Perché gli aerei di linea usano turbofan ad alto rapporto di by-pass?

   Spostano lentamente una grande massa d'aria, il che aumenta il rendimento propulsivo e riduce consumo e rumore.

Errori concettuali comuni

Mito: I jet spingono contro l'aria dietro di loro.

In realtà: Accelerano l'aria attraverso il motore; la reazione a questo è la spinta.

Mito: Uno scarico più veloce significa sempre un motore migliore.

In realtà: Per l'efficienza, la velocità di scarico dovrebbe essere vicina alla velocità di volo.

Mito: L'impulso specifico è una velocità.

In realtà: Si misura in secondi; $I_{sp} \times g_0$ è una velocità di scarico efficace.

Flashcard

Spinta dalla quantità di moto

$F = \dot{m}(v_e - v_0)$.

Rendimento propulsivo

$2/(1 + v_e/v_0)$.

Turbofan

Fan più nucleo; gran parte dell'aria lo aggira.

Rapporto di by-pass

Aria di by-pass ÷ aria del nucleo.

Impulso specifico

$F/(\dot{m}\, g_0)$, in secondi.

TSFC

Flusso di carburante per unità di spinta.

Quiz di autoverifica

1. Spinta di un motore aerobico ≈

$\dot{m}v_0$

$\dot{m}(v_e - v_0)$

$\dot{m}v_e^2$

ρV^2

$\dot{m}(v_e - v_0)$. Variazione della quantità di moto al secondo.

2. Il rendimento propulsivo è massimo quando v_e/v_0 è…

grande

vicino a 1

zero

negativo

vicino a 1. $\eta_p = 2/(1 + v_e/v_0)$.

3. In un turbofan ad alto by-pass, gran parte dell'aria…

passa nella camera di combustione

aggira il nucleo

viene immagazzinata

viene scaldata a 2000 K

aggira il nucleo. Il flusso del fan.

4. L'I_{sp} si misura in…

m/s

secondi

newton

kg

secondi. Spinta per portata in peso di propellente.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Un rendimento propulsivo più alto è un risparmio diretto di carburante e di CO_2. Ogni chilogrammo di carburante per jet bruciato produce circa 3.16 kg di CO_2 (il carbonio del carburante combinato

con l'ossigeno dell'aria; vedi l'unità 10), quindi i guadagni di efficienza si sommano nei decenni di servizio di un motore.

Il carburante sostenibile per l'aviazione, prodotto da rifiuti e biomasse, viene miscelato per eguagliare le proprietà del carburante per jet convenzionale e garantire un esercizio sicuro. La NASA osserva che il SAF non rilascia nuova CO_2 nell'ambiente.

Su Saving Planets: Chimica Generale I

Fonti: NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · U.S. DOE: carburanti sostenibili per l'aviazione (https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuels)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: rapporto spinta/peso (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-to-weight-ratio/): Motori e spinta.
- NASA Glenn: impulso specifico (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/specific-impulse/): Efficienza di razzi e jet.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04: Unified Engineering (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Lezioni di propulsione del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Razzi e l’equazione del razzo

Perché raggiungere l’orbita è così difficile: l’equazione del razzo di Ciolkovskij, i rapporti di massa e gli stadi.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usa Δv = I_sp g_0 ln(m_0/m_f).
- Calcolare i rapporti di massa necessari.
- Spiegare perché la suddivisione in stadi funziona.
- Calcolare il rapporto spinta/peso di un razzo.

Concetti chiave

- Un razzo trasporta tutto il suo propellente, combustibile e ossidante. La sua spinta è F = ṁv_e + (p_e − p_a)A_e.
- L’equazione ideale del razzo: Δv = v_e ln(m_0/m_f), con v_e = I_sp g_0. La velocità cresce solo con il logaritmo del rapporto di massa.
- Raggiungere l’orbita terrestre bassa richiede circa 9.4 km/s di Δv includendo le perdite per gravità e resistenza, quindi la maggior parte della massa di un lanciatore è propellente.
- Gli stadi sganciano serbatoi e motori vuoti, così gli stadi successivi non trasportano peso morto.
- Il rapporto spinta/peso deve superare 1 per decollare.

Equazioni chiave

$$\Delta v = I_{sp}\, g_0 \ln \frac{m_0}{m_f}$$

`Δ v=I_sp g_0(m_0)/(m_f)`

Equazione ideale del razzo (Ciolkovskij)

$$F = \dot{m} v_e + (p_e - p_a) A_e$$

`F= m v_e+(p_e-p_a)A_e`

Spinta del razzo

$$\frac{m_0}{m_f} = e^{\Delta v/(I_{sp} g_0)}$$

`(m_0)/(m_f)=e^Δ v/(I_spg_0)`

Rapporto di massa necessario

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 Un motore con I_sp = 450 s funziona finché $m_0/m_f = 5$. Trova Δv.

1. v_e = 450 × 9.80665 = 4,413 m/s.
2. Δv = 4,413 × ln 5.

Risposta: ≈ 7,102 m/s.

Esempio 8.2 Quale rapporto di massa serve a un singolo stadio per 9.4 km/s con I_sp = 300 s? E con 450 s?

1. 300 s: e^(9,400/2,942) = e^3.195.
2. 450 s: e^(9,400/4,413) = e^2.130.

Risposta: ≈ 24.4 contro ≈ 8.4: circa il 96% contro l'88% del razzo dev'essere propellente.

Esempio 8.3 Un razzo a due stadi: ogni stadio ha I_sp = 300 s e rapporto di massa 4. Trova il Δv totale.

1. Ogni stadio: 2942 × ln 4 = 4078 m/s.
2. Somma gli stadi.

Risposta: ≈ 8157 m/s, il doppio di quanto dà un solo stadio con rapporto di massa 4.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova Δv per I_sp = 311 s e $m_0/m_f = 3$.

   311 × 9.80665 × ln 3 ≈ 3,351 m/s.

2. Un razzo da 500000 kg ha 7.5 MN di spinta. Trova T/W al decollo.

   $7.5 \times 10^6/(500{,}000 \times 9.81) \approx 1.53$.

3. Quale I_sp dà Δv = 3000 m/s con rapporto di massa 2?

   3,000/(9.80665 × ln 2) ≈ 441 s.

Errori concettuali comuni

Mito: I razzi spingono contro l'aria.

In realtà: Funzionano meglio nel vuoto; spingono sui propri gas di scarico.

Mito: Doppio propellente, doppio Δv.

In realtà: Δv cresce con il logaritmo del rapporto di massa.

Mito: L'orbita richiede solo 7.7 km/s di Δv.

In realtà: Le perdite per gravità e resistenza portano il totale a circa 9.4 km/s.

Flashcard

Equazione del razzo

$\Delta v = I_sp\ g_0\ \ln(m_0/m_f)$.

Rapporto di massa

m_0/m_f.

Stadi

Sganciare gli stadi esauriti.

Spinta/peso

Deve superare 1 al decollo.

Δv verso LEO

≈ 9.4 km/s comprese le perdite.

I_sp

Secondi di spinta per peso di propellente.

Quiz di autoverifica

1. Δv dipende dal rapporto di massa tramite...

un quadrato

un logaritmo

una radice quadrata

una retta

un logaritmo. $\ln(m_0/m_f)$.

2. Gli stadi aiutano perché...

aumentano l'I_sp

sganciano massa morta

aggiungono aria

riducono la gravità

sganciano massa morta. I serbatoi vuoti non devono più essere accelerati.

3. Per decollare, il rapporto spinta/peso deve essere…

< 1

> 1

= 0

esattamente 1

> 1. La spinta deve superare il peso.

4. La velocità di scarico efficace per I_sp = 300 s è circa…

300 m/s

2,940 m/s

30 km/s

9.8 m/s

2,940 m/s. I_sp × g_0.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Ogni satellite di osservazione della Terra, da Landsat alle missioni che seguono il livello del mare e i gas serra, viaggia su un razzo dimensionato con questa equazione. Per questo ogni chilogrammo di strumento è prezioso e i satelliti sono costruiti per essere leggeri.

Il nostro calcolatore di Delta-v ti permette di fare gli stessi calcoli per missioni reali.

Su Saving Planets: Calcolatore di delta-v · Landsat 9

Fonti: NASA Glenn: equazione ideale del razzo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/) · NASA Glenn: equazione della spinta del razzo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: equazione ideale del razzo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/): Derivazione e uso.
- NASA Glenn: equazione della spinta del razzo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/): Spinta di pressione e di quantità di moto.
- NASA Glenn: impulso specifico (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/specific-impulse/): Confronto tra propellenti.

☐ **Ho finito questa unità**

Orbite e missioni spaziali

Orbite circolari ed ellittiche, periodi, orbita geostazionaria e trasferimento di Hohmann, oltre a come le missioni di osservazione della Terra scelgono le orbite.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare velocità e periodo di un'orbita circolare.
- Trovare il raggio geostazionario.
- Calcolare il Δv e la durata di un trasferimento di Hohmann.
- Descrivere le orbite terrestri più comuni e i loro usi.

Concetti chiave

- In un'orbita circolare la gravità fornisce la forza centripeta: v = √(μ/r), con μ = GM.
- Terza legge di Keplero: T = 2π√(a³/μ). Le orbite più alte sono più lente e durano di più.
- Un'orbita geostazionaria ha un periodo di un giorno siderale (86164 s) e si trova sopra l'equatore a un raggio di circa 42164 km.
- Un trasferimento di Hohmann usa due accensioni lungo un'ellisse tangente a entrambe le orbite circolari; è il trasferimento a due accensioni più efficiente tra orbite circolari complanari.
- L'orbita terrestre bassa (circa 400 km per la ISS), le orbite polari eliosincrone per le immagini e l'orbita geostazionaria per la meteorologia servono missioni diverse.

Equazioni chiave

$$v = \sqrt{\mu / r}$$

v=μ/r

Velocità in orbita circolare

$$T = 2\pi \sqrt{a^3 / \mu}$$

T=2π^3/μ

Periodo orbitale

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

v=μ(2r-1a)

Equazione vis-viva

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}}\left(\sqrt{\frac{2r_2}{r_1+r_2}} - 1\right)$$

`Δ v_1=μr_1(2r_2r_1+r_2-1)`

Prima accensione di Hohmann

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Trova velocità e periodo di un'orbita circolare a 400 km di quota.

1. r = 6,771 km.
2. v = √(3.986 × 10^{14}/6.771 × 10^{6}) = 7,673 m/s.
3. T = 2π√(r^3/μ) = 5,545 s.

Risposta: 7.67 km/s e ≈ 92.4 minuti.

Esempio 9.2 Trovare il raggio geostazionario.

1. r = (μT^2/4π^2)^(1/3) con T = 86164 s.

Risposta: ≈ 42164 km dal centro della Terra (circa 35786 km sopra l'equatore).

Esempio 9.3 Trova il Δv di Hohmann da un'orbita circolare a 300 km al raggio geostazionario.

1. r_1 = 6,671 km, r_2 = 42,164 km.
2. Δv_1 = 2,428 m/s; Δv_2 = 1,468 m/s.
3. Tempo di trasferimento = metà del periodo dell'ellisse di trasferimento.

Risposta: Totale ≈ 3.90 km/s; trasferimento ≈ 5.27 ore (senza cambio di piano).

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova v per un'orbita circolare con r = 7000 km.

   √(3.986 × 10^{14}/7 × 10^{6}) ≈ 7,546 m/s.

2. Se il raggio dell'orbita quadruplica, come cambia il periodo?

   T ∝ r^(3/2): 8 volte più lungo.

3. Perché molti satelliti meteorologici sono geostazionari?

   Restano sopra lo stesso punto e possono riprendere lo stesso emisfero in modo continuo.

Errori concettuali comuni

Mito: Gli astronauti fluttuano perché in orbita non c'è gravità.

In realtà: A 400 km la gravità è circa l'89% del valore in superficie; sono in caduta libera.

Mito: Per raggiungere un veicolo spaziale davanti a te, basta accelerare.

In realtà: Accelerare alza la tua orbita e riduce la tua velocità angolare.

Mito: Le orbite più alte richiedono più velocità.

In realtà: La velocità circolare diminuisce con la quota, anche se raggiungere orbite più alte richiede più Δv totale.

Flashcard

Velocità circolare

$\sqrt{(\mu/r)}$.

Terza legge di Keplero

$T = 2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

Vis-viva

$v^2 = \mu(2/r - 1/a)$.

Trasferimento di Hohmann

Trasferimento ellittico a due accensioni.

GEO

Periodo = 1 giorno siderale; $r \approx 42164$ km.

Orbita eliosincrona

Orbita quasi polare che passa sopra ogni luogo all'incirca alla stessa ora locale.

Quiz di autoverifica

1. La velocità in orbita circolare è...

$\sqrt{(\mu r)}$

$\sqrt{(\mu/r)}$

μ/r^2

2πr

√(μ/r). La gravità fornisce la forza centripeta.

2. A 400 km un veicolo spaziale compie un giro della Terra circa ogni…

24 h

92 min

10 min

1 settimana

92 min. ≈ 92.4 minuti.

3. Un trasferimento di Hohmann usa…

un’accensione

due accensioni

solo spinta continua

solo aerofrenata

due accensioni. Una a ciascuna estremità dell’ellisse di trasferimento.

4. Raggio geostazionario ≈

6,771 km

42,164 km

384,400 km

20,000 km

42,164 km. Terza legge di Keplero con un giorno siderale.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il monitoraggio del clima dipende dalla scelta dell'orbita. Le orbite eliosincrone permettono a Landsat di riprendere lo stesso luogo con un'illuminazione simile, così i cambiamenti di foreste, colture e ghiacci risaltano, mentre i satelliti meteorologici geostazionari osservano in continuo lo sviluppo delle tempeste.

Anche le orbite richiedono attenzione: i detriti minacciano queste missioni, quindi i veicoli spaziali sono sempre più progettati per essere smaltiti a fine vita.

Su Saving Planets: Guida alle orbite · Calcolatore di velocità orbitale · Calcolatore del periodo orbitale

Fonti: NASA JPL: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/) · Scheda NASA sulla Terra (in inglese) (https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA JPL: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): L'introduzione gratuita del NASA JPL a orbite e missioni.
- Fisica I, Unità 7: gravitazione e orbite: La nostra unità sulle orbite.

☐ **Ho finito questa unità**

Aviazione e spazio sostenibili

Mettere tutto insieme: la fisica per ridurre l'impatto climatico dell'aviazione, dagli aerei efficienti ai carburanti sostenibili e alle nuove fonti di energia, e per mantenere lo spazio utilizzabile.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la CO_2 prodotta dal carburante bruciato.
- Usare l'equazione di Breguet per confrontare miglioramenti di efficienza.
- Spiegare ruolo e limiti del carburante sostenibile per l'aviazione, delle batterie e dell'idrogeno.
- Descrivere la sostenibilità spaziale: detriti e smaltimento.

Concetti chiave

- Bruciare un chilogrammo di carburante per jet di tipo cherosene produce circa 3.16 kg di CO_2, un valore fissato dalla chimica. Gli unici modi per ridurla sono bruciare meno carburante o usare carburante il cui carbonio provenga di recente dall'aria.
- L'EPA riferisce che gli aerei coperti dalla sua norma sui gas serra rappresentano il 10% delle emissioni di gas serra dei trasporti negli Stati Uniti e il 3% del totale statunitense.
- Le tre vie della NASA: tecnologia aeronautica efficiente, carburante sostenibile per l'aviazione, e operazioni e infrastrutture migliori.
- Le batterie odierne immagazzinano molta meno energia per chilogrammo del carburante per jet, quindi gli aerei elettrici sono adatti a voli brevi e piccoli; l'idrogeno immagazzina molta energia per chilogrammo ma richiede grandi serbatoi.
- Sostenibilità spaziale significa pianificare lo smaltimento affinché le orbite utili restino disponibili per i satelliti che monitorano la Terra.

Equazioni chiave

$$m_{\mathrm{CO_2}} \approx 3.16\, m_{\mathrm{fuel}}$$

CO_2 dalla combustione del carburante per jet

$$\frac{\mathrm{fuel}_2}{\mathrm{fuel}_1} \approx \frac{(L/D)_1}{(L/D)_2}$$

Il carburante varia in modo inversamente proporzionale a L/D (stesso viaggio, variazioni modeste)

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 Da dove viene 3.16? Modella il carburante per jet come $C_{12}H_{23}$ e trova i kg di CO_2 per kg di carburante.

1. Massa molare: 12(12.011) + 23(1.008) = 167.3 g/mol.
2. 12 CO_2 per molecola: 12 × 44.01 = 528.1 g.
3. 528.1/167.3.

Risposta: ≈ 3.16 kg di CO_2 per kg di carburante.

Esempio 10.2 La NASA stima 620 milioni di tonnellate di carburante nel 2050 con l'efficienza attuale. Quanta CO_2 è?

1. 620 × 3.16.

Risposta: ≈ 1959 milioni di tonnellate, in linea con le «quasi 2000 megatonnellate» della NASA.

Esempio 10.3 Un volo brucia 20 t di carburante. Una nuova ala porta L/D da 17 a 19. Stima il carburante e la CO_2 risparmiati.

1. Carburante ≈ 20 × 17/19 = 17.9 t.
2. Carburante risparmiato ≈ 2.1 t; × 3.16.

Risposta: ≈ 2.1 t di carburante e ≈ 6.7 t di CO_2 per volo (stima semplificata).

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un volo brucia 5000 kg di carburante. Quanta CO_2 produce?

   ≈ 15,800 kg.

2. Se i motori diventano più efficienti del 15% nei consumi, di quanto calano all'incirca le emissioni di CO_2 per viaggio?

   Di circa il 15%, perché la CO_2 è proporzionale al carburante bruciato.

3. Perché le batterie odierne non possono alimentare aerei di linea a lungo raggio?

   La loro energia per chilogrammo è molto inferiore a quella del carburante per jet, e il compromesso di Breguet rende il peso extra molto costoso.

Errori concettuali comuni

Mito: Il carburante sostenibile per l'aviazione non emette CO_2 quando brucia.

In realtà: Emette CO_2 come il carburante per jet; il vantaggio è che il suo carbonio proviene di recente dall'aria, quindi le emissioni sul ciclo di vita sono minori.

Mito: Gli aerei elettrici sostituiranno presto tutti i jet.

In realtà: La densità energetica delle batterie li limita per ora a voli brevi e piccoli.

Mito: Lo spazio è troppo grande per essere inquinato.

In realtà: I detriti nelle orbite più usate sono un pericolo reale.

Flashcard

CO_2 per kg di carburante

≈ 3.16 kg.

SAF

Carburante sostenibile per l'aviazione da rifiuti e biomasse.

Tre vie

Aerei efficienti, SAF, operazioni.

Densità energetica

Energia per kg; batterie ≪ carburante per jet.

Detriti spaziali

Oggetti dismessi che minacciano le orbite utili.

Emissioni sul ciclo di vita

Tutte le emissioni, dalla produzione del carburante al suo uso.

Quiz di autoverifica

1. Bruciare 1 kg di carburante per jet produce circa...

1 kg CO_2

3.16 kg CO_2

0.3 kg CO_2

10 kg CO_2

3.16 kg CO_2. Il carbonio del carburante si combina con l'ossigeno dell'aria.

2. Le tre vie della NASA verso un'aviazione sostenibile sono...

serbatoi più grandi

aerei efficienti, SAF, operazioni e infrastrutture

solo volare più bassi

solo salite più lente

aerei efficienti, SAF, operazioni e infrastrutture. Secondo l'elenco della NASA.

3. Se L/D aumenta del 10%, il carburante per lo stesso viaggio cala all'incirca...

1%

9–10%

50%

0%

9–10%. Carburante ∝ 1/(L/D).

4. Quale quota del totale dei gas serra statunitensi emettono gli aerei coperti dalla norma EPA?

0.3%

3%

30%

50%

3%. EPA: il 3% del totale nazionale.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Questa unità è il legame completo del corso con il pianeta: ogni equazione delle unità 3–7 è una leva sul consumo di carburante, e il consumo di carburante è CO_2. Gli ingegneri capaci di fare questi calcoli progettano gli aerei più puliti verso cui lavorano la NASA e l'industria.

L'EPA riferisce che gli aerei coperti dalla sua norma producono il 10% delle emissioni di gas serra dei trasporti negli Stati Uniti, e la NASA osserva che nel 2021 gli Stati Uniti si sono impegnati a raggiungere emissioni nette zero di gas serra nell'aviazione entro il 2050.

Su Saving Planets: CO2M: misurare la CO_2 dallo spazio · Calcolatore di delta-v

Fonti: NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · EPA: emissioni di gas serra degli aerei (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/): Panoramica e obiettivi della NASA.
- EPA: emissioni di gas serra degli aerei (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft): Standard di emissione e dati degli Stati Uniti.
- U.S. DOE: carburanti sostenibili per l'aviazione (https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuels): Come si produce il SAF.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

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

1. Storia del volo e processo di progettazione
   3 esercizi
2. L'atmosfera
   4 esercizi
3. Aerodinamica di base: portanza e resistenza
   4 esercizi
4. Profili alari e ali
   4 esercizi
5. Prestazioni dei velivoli
   4 esercizi
6. Stabilità e controllo
   4 esercizi
7. Fondamenti di propulsione
   3 esercizi
8. Razzi e l'equazione del razzo
   3 esercizi
9. Orbite e missioni spaziali
   3 esercizi

10. Aviazione e spazio sostenibili
    3 esercizi

Laboratori

Quattro laboratori mettono in pratica il corso: una galleria del vento virtuale con FoilSim della NASA, un calcolatore dell'equazione del razzo, un aliante che progetti e fai volare, e un foglio di calcolo su atmosfera e velocità di stallo.

I dati di esempio sono indicati come tali. Le tue misure saranno diverse, e spiegare perché fa parte del laboratorio.

Riferimento per la sicurezza: FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak)

Laboratorio A: galleria del vento virtuale con NASA FoilSim

SETTIMANA 5

Obiettivo: Misurare la curva di portanza di un profilo in FoilSim e confrontarla con la teoria dei profili sottili.

$$c_l \approx 2\pi\alpha$$

Teoria dei profili sottili (α in radianti)

Procedimento

1. Apri FoilSim e scegli un profilo simmetrico (curvatura nulla) spesso circa il 12%.
2. Registra il coefficiente di portanza ad α = 0°, 2°, 4°, 6° e 8°.
3. Aggiungi una colonna con 2πα e confronta. Poi aggiungi curvatura e ripeti.
4. Aumenta α finché FoilSim non segnala lo stallo; annota l'angolo.

Tabella dei dati

α (gradi)	Teoria c_l = 2πα
0	0.000
2	0.219
4	0.439
6	0.658
8	0.877

Valori teorici calcolati. Le tue letture in FoilSim saranno un po' diverse; spiega perché (spessore, ipotesi del modello).

Calcolo di esempio

1. 2π × (4π/180) = 0.439.
2. Pendenza teorica: 0.110 per grado. Un'ala finita con AR = 8 ed e = 0.9 mostrerebbe solo circa 0.086 per grado (unità 4).

> **Sicurezza**
>
> - Nessuna, oltre al normale uso del computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Funziona in un browser web.

NASA Glenn: FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/)

Legame con il pianeta: Le prove in galleria del vento, reali e virtuali, sono il modo in cui i progettisti trovano ali a bassa resistenza che bruciano meno carburante. NASA: aviazione sostenibile (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

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

Laboratorio B: calcolatore dell’equazione del razzo

SETTIMANA 11

Obiettivo: Costruire un foglio di calcolo che dia Δv da I_sp e rapporto di massa, e usarlo per dimensionare un razzo a due stadi.

$$\Delta v = I_{sp}\, g_0 \ln(m_0/m_f)$$

```
Δ v=I_sp g_0(m_0/m_f)
```

Equazione ideale del razzo

Procedimento

1. Colonne: I_sp, m_0, m_f, rapporto di massa, Δv.
2. Compila righe per I_sp = 300 s e 450 s con rapporti di massa 2, 4 e 8.
3. Aggiungi un foglio a due stadi: Δv totale = somma degli stadi. Trova rapporti di massa per stadio che arrivino a 9.4 km/s.
4. Verifica un risultato con il nostro calcolatore di Delta-v.

Tabella dei dati

I_sp (s)	Rapporto di massa	Δv (m/s)
300	2	2,039
300	4	4,078
300	8	6,118
450	4	6,118
450	8	9,177

Valori calcolati (caso ideale: senza perdite per gravità né resistenza).

Calcolo di esempio

1. 300 × 9.80665 × ln 2 = 2,039 m/s.
2. Ogni raddoppio del rapporto di massa aggiunge gli stessi 2039 m/s a 300 s: il logaritmo all’opera.
3. Due stadi a 300 s, ciascuno con rapporto di massa 5, danno 2 × 4735 = 9470 m/s, appena sopra 9.4 km/s.

> **Sicurezza**

- Nessuna oltre al normale uso del computer. Non costruire né far volare motori a razzo senza supervisione qualificata e permesso locale.

Alternativa a casa o virtuale

- Basta un foglio di calcolo.

Calcolatore di Delta-v di Saving Planets · NASA Glenn: equazione ideale del razzo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/)

Legame con il pianeta: Ogni chilogrammo risparmiato su un satellite climatico riduce il razzo necessario per lanciarlo. NASA Glenn: equazione ideale del razzo (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/)

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

Laboratorio C: progetta, costruisci e fai volare un aliante

SETTIMANA 8

Obiettivo: Progettare un aliante in cartoncino o schiuma, posizionarne il CG per un margine statico positivo, poi misurarne il rapporto di planata.

$$L/D \approx \frac{\text{glide distance}}{\text{launch height}}$$

Rapporto di planata da una planata stabile

Procedimento

1. Abbozza un progetto: scegli apertura e corda per un allungamento tra 5 e 8, una coda pari a circa il 20% della superficie alare e un bastoncino come fusoliera.
2. Costruiscilo. Trova il CG bilanciandolo su un dito; aggiungi zavorra nel muso finché il CG si trova a circa il 25% della corda dietro il bordo d'attacco dell'ala.
3. Lancialo dolcemente e in orizzontale da un'altezza misurata, in aria calma, almeno cinque volte; registra ogni distanza.
4. Calcola L/D. Poi sposta il CG indietro a piccoli passi e annota cosa succede.

Tabella dei dati

Prova	Altezza (m)	Distanza (m)
1	2.0	9.6
2	2.0	10.4
3	2.0	10.0
Media	2.0	10.0

Dati di esempio per esercitarsi, non un risultato misurato.

Calcolo di esempio

1. L/D medio ≈ 10.0/2.0 = 5.0.
2. Angolo di planata = arctan(1/5) ≈ 11.3°.
3. Risultato tipico: con il CG troppo arretrato l'aliante cabra e va in stallo (margine statico negativo); troppo avanzato, picchia.

> **Sicurezza**
>
> - Taglia allontanando la lama dal corpo; un adulto deve maneggiare qualsiasi taglierino.
> - Fallo volare lontano dal viso delle persone, in uno spazio aperto.

Alternativa a casa o virtuale

- Cartoncino, nastro adesivo e una moneta come zavorra nel muso funzionano bene.

NASA Glenn: angolo di planata (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/glide-angle/)

Legame con il pianeta: Gli alianti mostrano fin dove può portarti da sola una buona aerodinamica, senza alcun carburante.

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

Laboratorio D: foglio di calcolo su atmosfera e velocità di stallo

SETTIMANA 4

Obiettivo: Implementare il modello atmosferico della NASA e vedere come la quota cambia densità, velocità del suono e velocità di stallo.

$$V_s = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L,\max}}}$$

V_s=2Wρ SC_L,

Velocità di stallo (velocità vera)

Procedimento

1. Implementa le approssimazioni NASA per troposfera e bassa stratosfera da 0 a 12 km con passo di 1 km.
2. Calcola ρ, a e V_s per W = 10791 N, S = 16.2 m², C_L,max = 1.6.
3. Traccia ρ/ρ₀ e V_s in funzione della quota.

Tabella dei dati

Quota (m)	ρ (kg/m³)	V_s (m/s)
0	1.227	26.1
5,000	0.738	33.6
10,000	0.414	44.8

Calcolato dal modello della NASA.

Calcolo di esempio

1. At 5,000 m: √(2 × 10,791/(0.738 × 16.2 × 1.6)) = 33.6 m/s.
2. V_s cresce come 1/√ρ: a 10 km è 1.72 volte il valore al livello del mare.

> **Sicurezza**
>
> - Nessuna, oltre al normale uso del computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Basta un foglio di calcolo.

NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/)

Legame con il pianeta: La fisica dell'atmosfera standard è anche alla base del modo in cui i satelliti misurano l'aria.

- [ ] **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. Trova ρ a 5000 m con il modello della NASA.
    1. $T = -17.41\ °C$; $p = 54.11\ kPa$.
    2. $\rho = 54.11/(0.2869 \times 255.69)$.

    Risposta: $\approx 0.738\ kg/m^3$.

2. Un aereo da 1100 kg ($S = 16.2\ m^2$, $C_{L,max} = 1.6$): trova la sua velocità di stallo a 5000 m.
    1. $V_s = \sqrt{(2 \times 10{,}791/(0.738 \times 16.2 \times 1.6))}$.

    Risposta: $\approx 33.6\ m/s$.

3. Trova $(L/D)_{max}$ per $C_{D0} = 0.025$, $e = 0.8$, $AR = 7.5$.
    1. $K = 0.0531$; $(L/D)_{max} = 1/(2\sqrt{(C_{D0}\ K)})$.

    Risposta: ≈ 13.7.

4. Un aliante con $L/D = 13.7$ parte da 1500 m di quota. Quanto lontano può planare?
    1. $1{,}500 \times 13.7$.

    Risposta: $\approx 20.6\ km$.

Serie di esercizi finale (tutte le unità)

1. Trova il margine statico per $x_{np} = 0.40\bar{c}$ e $x_{cg} = 0.25\bar{c}$.
    1. $0.40 - 0.25$.

    Risposta: 0.15 (stabile).

2. Un motore accelera 500 kg/s di aria da 250 a 320 m/s. Trova la spinta e η_p.
    1. $F = 500 \times 70$; $\eta_p = 2/(1 + 1.28)$.

Risposta: 35 kN; ≈ 0.88.

3. Trova Δv per I_sp = 450 s e rapporto di massa 5.

    1. 4,413 × ln 5.

    Risposta: ≈ 7,102 m/s.

4. Trova il periodo di un’orbita circolare a 400 km di quota.

    1. T = 2π√(r³/μ) con r = 6.771 × 10⁶ m.

    Risposta: ≈ 92.4 min.

5. Trova il Δv di Hohmann da un’orbita a 300 km al raggio geostazionario.

    1. Δv_1 = 2,428 m/s; Δv_2 = 1,468 m/s.

    Risposta: ≈ 3.90 km/s.

6. Un volo brucia 20 t di carburante. Quanta CO_2?

    1. 20 × 3.16.

    Risposta: ≈ 63 t.

Formulario

$$L = W,\ T = D$$

$$T = 15.04 - 0.00649h,\ p = 101.29\left(\tfrac{T+273.1}{288.08}\right)^{5.256}$$

$$\rho = p/(RT),\ a = \sqrt{\gamma RT},\ M = V/a$$

$$L = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_L,\ D = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

$$V_s = \sqrt{2W/(\rho S C_{L,\max})}$$

$$Re = \rho V c/\mu$$

$$c_l = 2\pi\alpha$$

$$a = a_0/(1 + a_0/(\pi e AR))$$

$$C_D = C_{D0} + C_L^2/(\pi e AR)$$

$$(L/D)_{\max} = 1/(2\sqrt{C_{D0}K})$$

$$\tan\gamma = 1/(L/D)$$

$$R = (V/c)(L/D)\ln(W_i/W_f)$$

$$\mathrm{SM} = (x_{np} - x_{cg})/\bar{c}$$

$$F = \dot{m}(v_e - v_0),\ \eta_p = 2/(1 + v_e/v_0)$$

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln(m_0/m_f)$$

$$v = \sqrt{\mu/r},\ T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu}$$

$$v^2 = \mu(2/r - 1/a)$$

$$m_{CO_2} \approx 3.16\, m_{fuel}$$

Costanti

Costante	Valore
Gravità standard g_0	9.80665 m/s²
Densità dell’aria al livello del mare (modello NASA)	1.23 kg/m³
Pressione al livello del mare (modello NASA)	101.3 kPa
Velocità del suono, livello del mare (15 °C)	340 m/s
Costante dei gas dell’aria R	287 J/(kg·K)
Rapporto dei calori specifici γ (aria)	1.4
GM della Terra	3.986 × 10¹⁴ m³/s²
Raggio medio della Terra	6,371 km

Fonte: NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/)

Simulatori e riferimenti

Strumenti e riferimenti gratuiti da usare insieme al corso.

- NASA Glenn: Beginner’s Guide to Aeronautics (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/): Il riferimento gratuito della NASA per ogni equazione di questo corso, con simulatori.
- NASA Glenn: FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/): Galleria del vento virtuale per profili alari (laboratorio A).
- MIT OpenCourseWare 16.00: Introduction to Aerospace Engineering and Design (https://ocw.mit.edu/courses/16-00-introduction-to-aerospace-engineering-and-design-spring-2003/): Il corso di progettazione del primo anno del MIT.
- FAA Pilot’s Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Manuale gratuito della FAA su aerodinamica, prestazioni e stabilità.
- NASA JPL: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): Introduzione gratuita a orbite e missioni.

Glossario

Angolo d’attacco

Angolo tra la linea di corda e l'aria incidente.

Allungamento
Apertura al quadrato divisa per la superficie alare.

Equazione dell'autonomia di Breguet
Autonomia di un jet in base a velocità, consumo, L/D e frazione di peso.

Curvatura
Curvatura della linea media di un profilo.

Baricentro
Punto in cui agisce il peso.

Polare di resistenza
C_D in funzione di C_L.

Pressione dinamica
$\frac{1}{2}\rho V^2$.

Orbita geostazionaria
Orbita equatoriale con periodo di un giorno sidereo.

Trasferimento di Hohmann
Trasferimento ellittico a due accensioni tra orbite circolari.

Resistenza indotta
Resistenza causata dalla produzione di portanza con un'ala finita.

Numero di Mach
La velocità divisa per la velocità locale del suono.

Punto neutro
Posizione del CG che dà stabilità neutra in beccheggio.

Rendimento propulsivo
Frazione della potenza del getto che diventa potenza di spinta utile.

Numero di Reynolds
Rapporto tra effetti inerziali e viscosi, $\rho Vc/\mu$.

Equazione del razzo
$\Delta v = I_sp\ g_0 \ln(m_0/m_f)$.

Impulso specifico
Spinta per portata in peso di propellente, in secondi.

Stallo
Perdita di portanza quando il flusso si separa dall'ala.

Atmosfera standard
Modello medio delle proprietà dell'aria in funzione della quota.

Margine statico
Distanza dal CG al punto neutro in corde medie.

Carburante sostenibile per l’aviazione
Carburante per jet prodotto da rifiuti o biomassa.

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	Imposta i problemi a partire da forze e requisiti, controlla unità e ordini di grandezza e spiega i compromessi.
3 · Competente	Risolve gli esercizi con qualche errore occasionale.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma fatica a scegliere l’equazione giusta.
1 · Principiante	Inserisce numeri senza controllare unità o ipotesi; rivedi l’unità.

Pesi suggeriti se vuoi un punteggio

Parte	Peso
Esercizi	25%
Laboratori	20%
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

- Analisi II MATH 111
- Disegno tecnico / CAD ENGR 120
- Chimica generale I + Laboratorio CHEM 110 + CHEM 110L
- Tutti i corsi