Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 4, Primavera · 🧱 Calcolatore integrato

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 suo ambito segue un progetto finale aerospaziale semestrale dell'ultimo anno. È modellato sull'approccio concepire-progettare-realizzare-operare di MIT 16.83X Space Systems Engineering (gratuito su MIT OpenCourseWare) e sul NASA Systems Engineering Handbook, che citiamo dove utili. Né il MIT né la NASA approvano questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: due percorsi paralleli (un piccolo drone elettrico o un CubeSat 3U), ogni unità collegata a un lavoro reale con una fonte pubblica citata, ogni numero della pagina ricalcolato da uno script di controllo prima della pubblicazione e ogni laboratorio in un foglio di calcolo gratuito.
>
> Seguilo in ordine, da solo o in squadra. Ogni unità ha obiettivi, idee chiave, equazioni, esempi passo passo, esercizi con risposte complete, errori comuni, flashcard e un quiz. I tuoi progressi sono salvati solo in questo browser.

Come questo corso aiuta a salvare il pianeta

I team dei progetti finali costruiscono i satelliti e i velivoli che misurano e proteggono il pianeta: i CubeSat studenteschi volano grazie al CubeSat Launch Initiative della NASA, e piccoli satelliti come PREFIRE studiano come l'Artico disperde calore.

Sul fronte velivoli, il Sustainable Flight National Partnership della NASA punta a guadagni di efficienza energetica del 25–30%. 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 490).
- 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

- Avionica e ingegneria dei sistemi: requisiti, affidabilità e verifica.
- Progettazione di veicoli spaziali: budget di potenza, termico e di collegamento.
- Prestazioni dei velivoli: portanza, resistenza, autonomia e salita.
- Strutture aerospaziali: sollecitazioni, coefficienti di sicurezza e margini.

Come studiare

- Tieni un unico quaderno di progetto o foglio di calcolo da cui derivano tutti i numeri.
- Collega ogni scelta di progetto a un requisito.
- Chiudi i budget con margine prima di aggiungere dettagli.
- Fai brevi revisioni settimanali, anche lavorando da solo.
- Scrivi man mano: ogni unità aggiunge una sezione alla tua relazione finale.
- Fai ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta e ripeti i quiz qualche giorno dopo.

Che cosa ti serve

- Un foglio di calcolo (va bene qualsiasi gratuito), oppure Python.
- Il NASA Systems Engineering Handbook gratuito in un browser web.
- Software di presentazione gratuito per le tue revisioni di progetto.
- 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	Missione, stakeholder e requisiti	Missione e requisiti; Laboratorio A	NASA SE Handbook
2	Generazione e selezione dei concetti	Selezione del concetto; Laboratorio B	MIT 16.83X
3	Percorso velivolo: dimensionamento dei pesi e autonomia	Dimensionamento dei pesi del velivolo	NASA SFNP
4	Percorso velivolo: dimensionamento dei pesi e autonomia	Autonomia e ciclo di dimensionamento; Laboratorio C	MIT 16.83X
5	Percorso velivolo: carico alare e potenza	Carico alare e potenza	NASA SFNP
6	Percorso CubeSat: dimensionamento e orbita	Dimensionamento e orbita del CubeSat; Laboratorio D	NASA PREFIRE
7	Percorso CubeSat: budget di potenza e di collegamento	Budget di potenza e di collegamento; Laboratorio E; esercitazione per il parziale	NASA SST SOA
8	Verifiche strutturali e termiche	Verifiche strutturali e termiche	MIT 16.83X
9	Costi, tempi e rischi	WBS e cronoprogramma	NASA SE Handbook
10	Costi, tempi e rischi	Valore acquisito e rischi; Laboratorio F	NASA SE Handbook
11	Prototipo, prove e verifica	Pianificazione del prototipo	MIT 16.83X
12	Prototipo, prove e verifica	Prove	NASA CSLI
13	Prototipo, prove e verifica	Chiusura della verifica	NASA SE Handbook
14	Revisioni di progetto e relazione finale	Revisione critica di progetto	MIT 16.83X
15	Revisioni di progetto e relazione finale	Relazione finale; esercitazione finale	NASA SE Handbook

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

Missione, stakeholder e requisiti

Scegliere un percorso, definire la missione, identificare gli stakeholder, scrivere requisiti verificabili e fissare allocazioni con margine.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Scrivere una dichiarazione di missione in una frase.
- Elencare gli stakeholder e le loro esigenze.
- Scrivere requisiti verificabili.
- Calcolare il margine rispetto a un'allocazione.

Concetti chiave

- Scegli un percorso: un piccolo drone elettrico che trasporta un sensore, o un CubeSat 3U che osserva la Terra.
- Una dichiarazione di missione dice chi ha bisogno di cosa e perché; i requisiti la rendono misurabile.
- Gli stakeholder includono utenti, finanziatori, autorità di lancio o dello spazio aereo e il team stesso.
- Ogni requisito ha un numero, un'unità e un metodo di verifica (prova, analisi, ispezione o dimostrazione).
- Le allocazioni includono margine fin dall'inizio, perché le stime crescono man mano che il progetto matura.

Equazioni chiave

$$\text{Margin} = \frac{A - E}{E}$$

```
Margin=(A-E)/(E)
```

Margine dell'allocazione sulla stima

$$m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

```
m_alloc=m_est(1+M)
```

Allocazione con margine

$$m_{3U} \approx 3 \times 1.33\ \text{kg}$$

Massa ammessa per un 3U (valore da manuale)

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

I pesi sommano a uno

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 Un CubeSat 3U ha un'allocazione di 4.0 kg (valore da manuale) e una stima di 3.4 kg. Margine?

1. (4.0 − 3.4)/3.4.

Risposta: 17.6%.

Esempio 1.2 Il sensore di un drone è stimato in 0.8 kg. Alloca con un margine del 25% (valori di esempio).

1. 0.8 × 1.25.

Risposta: 1.0 kg.

Esempio 1.3 Scrivi un requisito verificabile di autonomia per il drone.

1. Numero, unità, metodo.

Risposta: «Il drone deve volare almeno 30 minuti a 15 m/s, verificato mediante prova in volo.»

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Margine se la stima sale a 3.8 kg?

   5.26%.

2. Tre unità da 1.33 kg (valore da manuale)?

   3.99 kg, circa 4 kg.

3. Indica quattro stakeholder di un CubeSat studentesco.

Per esempio: gli utenti scientifici, l'università, il fornitore del lancio e l'ente regolatore radio.

4. «Il CubeSat deve essere affidabile» è verificabile?

   No; aggiungi un numero e un metodo.

Errori concettuali comuni

Mito: I requisiti descrivono il progetto.
In realtà: Esprimono esigenze, non soluzioni.

Mito: Il margine si può aggiungere dopo.
In realtà: Conviene mantenerlo fin dall'inizio.

Mito: Basta un solo stakeholder.
In realtà: Stakeholder dimenticati causano sorprese tardive.

Flashcard

Dichiarazione di missione

Chi ha bisogno di cosa e perché.

Stakeholder

Chiunque abbia un'esigenza o voce in capitolo.

Requisito

Esigenza verificabile.

Allocazione

Quota a budget.

Margine

Riserva oltre la stima.

Percorso

Percorso di progetto drone o CubeSat.

Quiz di autoverifica

1. Margine di massa...

17.6%

15%

0.6%

85%

17.6%. (4.0 − 3.4)/3.4.

2. 0.8 kg + 25%...

1.0 kg

0.85 kg

1.25 kg

0.6 kg

1.0 kg. Moltiplica.

3. Metodi di verifica...

prova, analisi, ispezione, dimostrazione

indovinare, sperare, aspettare, spedire

costi, tempi, rischi, ambito

PDR, CDR, TRR, FRR

prova, analisi, ispezione, dimostrazione. Quattro metodi.

4. La dichiarazione di missione dice...

chi ha bisogno di cosa e perché

la misura dei bulloni

solo il budget

solo la data di lancio

chi ha bisogno di cosa e perché. Scopo.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il CubeSat Launch Initiative della NASA offre ai CubeSat costruiti da istituzioni educative e organizzazioni senza scopo di lucro statunitensi, inclusi musei e centri scientifici, l'opportunità di volare su lanci futuri; la NASA afferma di aver lanciato oltre 150 CubeSat.

La NASA afferma che il suo bando di opportunità di partenariato viene di solito pubblicato ogni agosto con proposte da presentare a novembre, quindi un progetto finale può essere strutturato come una vera proposta.

Su Saving Planets: Progettazione di veicoli spaziali · Avionica e ingegneria dei sistemi

Fonti: NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.
- NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/): NASA CSLI.

☐ **Ho finito questa unità**

Generazione e selezione dei concetti

Brainstorming, tavole morfologiche, matrici di Pugh, matrici decisionali pesate e sensibilità ai pesi.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Generare diversi concetti.
- Costruire una tavola morfologica.
- Valutare i concetti in una matrice pesata.
- Verificare la sensibilità ai pesi.

Concetti chiave

- Genera molti concetti prima di giudicarne qualcuno; prima la quantità, poi la qualità.
- Una tavola morfologica elenca le opzioni per ogni funzione e le combina in concetti.
- Una matrice di Pugh confronta i concetti con un riferimento usando +, 0 e −.
- Una matrice decisionale pesata moltiplica i punteggi per i pesi e li somma.
- Se piccole variazioni dei pesi cambiano il vincitore, la decisione richiede più dati.

Equazioni chiave

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Punteggio pesato

$$N = \prod n_i$$

`N= n_i`

Combinazioni morfologiche

$$P = n_+ - n_-$$

`P=n_+-n_-`

Punteggio netto di Pugh

$$\sum w_i = 1$$

$w_i=1$

Pesi normalizzati

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 Il concetto A ottiene 6 (costo), 9 (prestazioni), 5 (rischio); B ottiene 8, 6, 8. Pesi 0.3, 0.5, 0.2. Vincitore?

1. A = 1.8 + 4.5 + 1.0 = 7.3.
2. B = 2.4 + 3.0 + 1.6 = 7.0.

Risposta: A, 7.3 contro 7.0.

Esempio 2.2 Cambia i pesi in 0.4, 0.3, 0.3.

1. A = 2.4 + 2.7 + 1.5 = 6.6.
2. B = 3.2 + 1.8 + 2.4 = 7.4.

Risposta: Vince B: la scelta è sensibile ai pesi.

Esempio 2.3 Una tavola ha 3 opzioni di alimentazione, 2 strutture e 4 sensori. Combinazioni?

1. 3 × 2 × 4.

Risposta: 24.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Pugh: 4 più, 1 meno. Netto?

   +3.

2. Combinazioni per 2 × 3 × 3 × 2?

   36.

3. Perché verificare la sensibilità ai pesi?

   Per vedere se il vincitore è robusto.

4. Perché fare brainstorming prima di assegnare punteggi?

   Giudicare presto uccide le buone idee.

Errori concettuali comuni

Mito: Il punteggio più alto ha sempre ragione.
In realtà: Verifica sensibilità e ipotesi.

Mito: I pesi sono oggettivi.
In realtà: Codificano un giudizio.

Mito: Un solo concetto basta.
In realtà: Confrontane diversi.

Flashcard

Tavola morfologica

Opzioni per funzione.

Matrice di Pugh

Confronto con un riferimento.

Riferimento

Concetto di riferimento.

Matrice pesata

Punteggi per pesi.

Sensibilità

Come cambiano i risultati con gli ingressi.

Selezione

Scelta di un concetto.

Quiz di autoverifica

1. Punteggio di A...

7.3

7.0

6.6

20

7.3. Somma pesata.

2. Punteggio di B...

7.0

7.3

7.4

22

7.0. Somma pesata.

3. Dopo la nuova pesatura...

vince B

vince A

parità

nessuno dei due

vince B. 7.4 > 6.6.

4. Combinazioni...

24

9

12

48

24. 3 × 2 × 4.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il Sustainable Flight National Partnership della NASA lavora in tre aree: tecnologie avanzate dei velivoli, operazioni efficienti delle compagnie aeree e carburanti sostenibili per l'aviazione.

Soppesare opzioni tra aree come queste è un problema di selezione del concetto: i pesi giusti dipendono da ciò che gli stakeholder considerano importante, emissioni comprese.

Su Saving Planets: Soluzioni · Prestazioni dei velivoli

Fonti: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.

Guarda la lezione

Session 4: System Architecture and Concept Generation (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/resources/session-4-system-architecture-and-concept-generation/) (in inglese)

MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015), 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**

Percorso velivolo: dimensionamento dei pesi e autonomia

Stima del peso al decollo dalle frazioni di peso, equazione dell'autonomia di Breguet e come i guadagni di efficienza cambiano autonomia e carburante.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Stimare il peso al decollo dalle frazioni.
- Applicare l'equazione di Breguet.
- Mostrare come L/D cambia l'autonomia.
- Iterare un ciclo di dimensionamento.

Concetti chiave

- Il peso al decollo è il carico utile diviso per uno meno le frazioni a vuoto e di energia.
- Se le frazioni a vuoto e di energia si avvicinano a 1, il progetto non chiude.
- Per gli aerei a getto, l'autonomia di Breguet è (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f).
- L'autonomia è proporzionale a L/D, quindi un guadagno del 30% su L/D dà il 30% di autonomia in più a parità di frazione di carburante.
- Il dimensionamento è iterativo: stimare, calcolare, aggiornare le frazioni, ripetere finché il peso converge.

Equazioni chiave

$$W_0 = \frac{W_{pay}}{1 - W_e/W_0 - W_f/W_0}$$

`W_0=_pay1-W_e/W_0-W_f/W_0`

Peso al decollo

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

`R=V/cL/D(W_i)/(W_f)`

Autonomia di Breguet (jet)

$$R \propto L/D$$

L'autonomia scala con L/D

$$W = mg$$

`W=mg`

Peso

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 Un drone trasporta 1 kg di carico utile con frazione a vuoto 0.5 e frazione batteria 0.3 (valori di esempio). Massa al decollo?

1. $1/(1 - 0.5 - 0.3)$.

Risposta: 5 kg.

Esempio 3.2 Un aereo da trasporto vola a 230 m/s con c = 0.6 all'ora, L/D = 17 e $W_i/W_f = 1.25$ (valori da manuale). Autonomia?

1. $c = 1.667 \times 10^{-4}\ s^{-1}$.
2. $R = (230/1.667 \times 10^{-4}) \times 17 \times \ln 1.25 = 1.38 \times 10^{6} \times 17 \times 0.2231$.

Risposta: Circa 5235 km.

Esempio 3.3 Aumenta L/D del 30%.

1. L'autonomia scala con L/D.

Risposta: Circa 6805 km.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Massa al decollo se la frazione batteria sale a 0.35?

   6.67 kg.

2. Peso del drone da 5 kg?

   49.0 N.

3. Perché le frazioni non possono sommare a 1?

   Non resterebbe nulla per il carico utile.

4. ln 1.25?

   0.223.

Errori concettuali comuni

Mito: Più batteria significa sempre più autonomia.

In realtà: Aumenta anche il peso; conta la frazione.

Mito: Breguet vale per gli aerei elettrici.

In realtà: Le batterie non si alleggeriscono; usa una forma energetica.

Mito: Un solo passaggio basta.

In realtà: Iterare finché il peso converge.

Flashcard

Frazione a vuoto

Peso a vuoto su peso al decollo.

Frazione di carburante

Carburante sul peso al decollo.

Breguet

Equazione dell'autonomia.

L/D

Rapporto portanza/resistenza.

TSFC

Consumo specifico di carburante per unità di spinta.

Ciclo di dimensionamento

Iterare fino a convergenza.

Quiz di autoverifica

1. Massa al decollo del drone...

5 kg

2 kg

1.25 kg

10 kg

5 kg. 1/0.2.

2. Autonomia dell’aereo da trasporto...

≈ 5235 km

≈ 523 km

≈ 52,000 km

≈ 1380 km

≈ 5235 km. Breguet.

3. Con +30% di L/D...

≈ 6805 km

≈ 5235 km

≈ 4027 km

≈ 10,470 km

≈ 6805 km. × 1.3.

4. L’autonomia scala con...

L/D

c

W_f

alla resistenza

L/D. Breguet.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il Sustainable Flight National Partnership mira a consentire miglioramenti di efficienza energetica del 25–30% negli aerei da trasporto di nuova generazione in grado di usare il 100% di carburante sostenibile per l'aviazione e volare su traiettorie ottimali.

Il suo fulcro è un dimostratore X-plane in scala reale che prova un progetto aerodinamico ultra-efficiente, con primo volo non prima della fine del 2026; un L/D più alto è proprio la leva che l'equazione di Breguet di questa unità premia.

Su Saving Planets: Prestazioni dei velivoli · Soluzioni

Fonti: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Percorso velivolo: carico alare e potenza

Dimensionamento per vincoli: carico alare dalla velocità di stallo, superficie alare e potenza di salita per un piccolo velivolo elettrico.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Trovare il carico alare dalla velocità di stallo.
- Dimensionare la superficie alare.
- Calcolare la potenza di salita.
- Disegnare un semplice diagramma dei vincoli.

Concetti chiave

- La velocità di stallo fissa il carico alare massimo: W/S = ½ρV_s²C_Lmax.
- La superficie alare deriva dal peso diviso il carico alare.
- La potenza all'albero in salita copre la resistenza (W V/(L/D)) più il termine di salita (W × rateo di salita), divisi per il rendimento propulsivo.
- Ogni requisito traccia una linea su un grafico W/S in funzione del rapporto potenza/peso; il punto di progetto sta nella regione che li soddisfa tutti.
- I piccoli droni volano a bassi numeri di Reynolds, quindi controlla i dati dei profili a piccola scala.

Equazioni chiave

$$\frac{W}{S} = \frac{1}{2}\rho V_s^2 C_{L,max}$$

`W/S=12ρ V_s^2C_L,max`

Carico alare di stallo

$$S = \frac{W}{W/S}$$

`S=(W)/(W/S)`

Superficie alare

$$P = \frac{W}{\eta}\left(\frac{V}{L/D} + RC\right)$$

`P=(W)/()((V)/(L/D)+RC)`

Potenza di salita

$$q = \tfrac{1}{2}\rho V^2$$

`q=12ρ V^2`

Pressione dinamica

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 Stallo a 12 m/s, C_Lmax = 1.2, livello del mare. Carico alare?

1. ½ × 1.225 × 144 × 1.2.

Risposta: 105.8 N/m².

Esempio 4.2 Superficie alare per il drone da 5 kg?

1. 49.03/105.84.

Risposta: 0.463 m².

Esempio 4.3 Potenza di salita a 15 m/s, L/D = 10, salita a 2 m/s, η = 0.7?

1. 49.03 × (1.5 + 2) = 171.6 W.
2. 171.6/0.7.

Risposta: 245 W.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Carico alare per uno stallo a 10 m/s?

   73.5 N/m².

2. Potenza senza il termine di salita?

   105.1 W.

3. Pressione dinamica a 15 m/s?

   137.8 Pa.

4. Perché lo stallo fissa un W/S massimo?

   Un W/S più alto richiede una velocità di stallo più alta.

Errori concettuali comuni

Mito: Ali più grandi sono sempre migliori.
In realtà: Aggiungono peso e resistenza.

Mito: La potenza di salita è piccola.
In realtà: Può dominare nei piccoli droni.

Mito: $\eta = 1$.
In realtà: Eliche e motori perdono energia.

Flashcard

Carico alare

Peso per superficie alare.

C_Lmax

Coefficiente di portanza massimo.

Diagramma dei vincoli

Requisiti su un unico grafico.

Rateo di salita

Velocità verticale.

Rendimento propulsivo

Frazione di potenza utile.

Velocità di stallo

Velocità stazionaria minima.

Quiz di autoverifica

1. W/S...

105.8 N/m²

88.2

1058

10.6

105.8 N/m². ½ρV²C_L.

2. Superficie alare...

0.463 m²

4.63 m²

0.0463 m²

1 m²

0.463 m². W/(W/S).

3. Potenza di salita...

245 W

171.6 W

49 W

490 W

245 W. Dividi per η.

4. Il punto di progetto sta...

dove tutti i vincoli sono soddisfatti

su una linea qualsiasi

nell'origine

all'esterno

dove tutti i vincoli sono soddisfatti. Regione ammissibile.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il Sustainable Flight National Partnership della NASA punta anche a operazioni efficienti delle compagnie e traiettorie ottimali, dove le scelte di potenza e salita incontrano il consumo di carburante.

Piccoli droni elettrici ben dimensionati come in questa unità sono già usati per rilievi di colture, foreste e coste. I valori in questa unità sono valori di esempio.

Su Saving Planets: Prestazioni dei velivoli · Aerodinamica I

Fonti: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Percorso CubeSat: dimensionamento e orbita

Formati CubeSat, massa ammessa, periodo orbitale, passaggi al giorno e frazione di eclisse in orbita terrestre bassa.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Dimensionare il budget di massa di un CubeSat 3U.
- Calcolare il periodo orbitale.
- Calcolare le orbite al giorno.
- Calcolare l'eclisse nel caso peggiore.

Concetti chiave

- I CubeSat sono fatti di unità (U) da 10 cm; un 3U misura circa 10 × 10 × 34 cm (valore da manuale).
- La massa ammessa è di circa 1.33 kg per U (valore da manuale); verificala con il fornitore del lancio.
- Il periodo orbitale dipende solo dal semiasse maggiore: T = 2π√(a³/μ).
- Nel caso peggiore (Sole nel piano orbitale), la frazione di eclisse è asin(R_E/a)/π.
- Le orbite basse decadono più in fretta per la resistenza; la maggior parte dei CubeSat studenteschi rientra in pochi anni.

Equazioni chiave

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

T=2π^3/μ

Periodo orbitale

$$f_e = \frac{1}{\pi}\sin^{-1}\frac{R_E}{a}$$

f_e=(1)/(π)^-1(R_E)/(a)

Frazione di eclisse nel caso peggiore

$$n = 1440/T$$

n=1440/T

Orbite al giorno (T in min)

$$a = R_E + h$$

$a = R_E + h$

Semiasse maggiore

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Periodo a 500 km di quota?

1. $a = 6878.1$ km.
2. $T = 2\pi\sqrt{(6878.1^3/398{,}600.4)}$.

Risposta: 94.6 min.

Esempio 5.2 Orbite al giorno?

1. 1440/94.6.

Risposta: 15.2.

Esempio 5.3 Eclisse nel caso peggiore?

1. $\text{asin}(6378.1/6878.1)/\pi = 0.378$.
2. 0.378×94.6.

Risposta: 35.8 min.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Massa ammessa di un 3U a 1.33 kg/U?

   3.99 kg.

2. Tempo al sole per orbita?

   58.9 min.

3. Il periodo dipende dalla massa del CubeSat?

   No.

4. Perché le orbite basse decadono?

Resistenza atmosferica.

Errori concettuali comuni

Mito: I satelliti più pesanti orbitano più lentamente.

In realtà: Il periodo dipende solo da a.

Mito: L’eclisse è sempre del 50%.

In realtà: Dipende dalla quota e dall’angolo del Sole.

Mito: Usare la quota nella legge di Keplero.

In realtà: Usa a = R_E + h.

Flashcard

CubeSat

Piccolo satellite standard in unità da 10 cm.

3U

CubeSat a tre unità.

Periodo

Durata di un’orbita.

Frazione di eclisse

Quota dell’orbita in ombra.

Semiasse maggiore

R_E + h per le orbite circolari.

Decadimento

Perdita di orbita per resistenza.

Quiz di autoverifica

1. Periodo...

94.6 min

90 min

100 min

84.4 min

94.6 min. $2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

2. Orbite al giorno...

15.2

14.5

16

24

15.2. 1440/T.

3. Eclisse...

35.8 min

47 min

20 min

0 min

35.8 min. 0.378 × 94.6.

4. Massa di un 3U...

≈ 4 kg

≈ 1.33 kg

≈ 12 kg

≈ 40 kg

≈ 4 kg. 3 × 1.33.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che PREFIRE usa una coppia di minuscoli satelliti, CubeSat lanciati nel maggio 2024, per misurare una parte poco studiata dell'energia radiante emessa dalla Terra, alla ricerca di

indizi su perdita di ghiaccio marino, fusione delle calotte e riscaldamento dell'Artico.

La NASA definisce l'Artico la regione che si comporta come il termostato del pianeta, smaltendo l'energia in eccesso ricevuta ai tropici; per questo lì conta una coppia di piccoli satelliti.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra · Meccanica orbitale

Fonti: NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/): NASA PREFIRE.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rapporto gratuito della NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Percorso CubeSat: budget di potenza e di collegamento

Produzione dei pannelli solari, potenza media orbitale, dimensionamento della batteria per l'eclisse, attenuazione di un collegamento UHF e volume di dati giornaliero.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la produzione dei pannelli al sole.
- Calcolare la potenza media orbitale.
- Dimensionare una batteria per l'eclissi.
- Stimare attenuazione di percorso e dati al giorno.

Concetti chiave

- La potenza dei pannelli è flusso solare × efficienza delle celle × area × cos(angolo).
- La generazione media orbitale è ridotta dalla frazione di eclisse (e in pratica dal puntamento).
- La batteria copre il carico durante l'eclisse; limitare la profondità di scarica ne allunga la vita in cicli.
- L'attenuazione nello spazio libero cresce come $20 \log_{10}(4\pi d/\lambda)$; le bande UHF radioamatoriali sono comuni per i CubeSat studenteschi.
- Il volume di dati al giorno è velocità in bit × durata del passaggio × numero di passaggi.

Equazioni chiave

$$P = S \eta A \cos\theta$$

`P=S ηA cosθ`

Produzione dei pannelli

$$\bar{P} = P(1 - f_e)$$

`P=P(1-f_e)`

Generazione media orbitale

$$E = \frac{P_e t_e}{DoD}$$

`E=(P_et_e)/(DoD)`

Capacità della batteria

$$L = 20 \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda}$$

`L=20_10(4π d)/()`

Attenuazione di tratta

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 Pannelli da 0.06 m² con celle al 28% rivolti al Sole (valori di esempio). Produzione?

1. 1361 × 0.28 × 0.06.

Risposta: 22.9 W.

Esempio 6.2 Media orbitale con la frazione di eclisse di 0.378 dell'unità 5?

1. 22.86 × 0.622.

Risposta: 14.2 W.

Esempio 6.3 Batteria per 8 W durante un'eclisse di 35.8 min al 30% di profondità di scarica?

1. 8 × 35.75/60 = 4.77 Wh.
2. 4.77/0.3.

Risposta: 15.9 Wh.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Attenuazione di percorso a 437 MHz su 1000 km?

   λ = 0.686 m; L = 145.3 dB.

2. Dati al giorno a 9600 bit/s, quattro passaggi da 10 minuti?

   23.04 Mbit = 2.88 MB.

3. Produzione con un angolo solare di 60°?

   11.4 W.

4. Perché limitare la profondità di scarica?

   Più cicli prima che la batteria si usuri.

Errori concettuali comuni

Mito: La potenza solare è costante lungo l’orbita.

In realtà: Eclisse e puntamento la riducono.

Mito: Batteria = energia dell’eclisse.

In realtà: Dividi per la DoD.

Mito: Più bit al secondo sono gratis.

In realtà: Servono più margini di collegamento.

Flashcard

Potenza media sull’orbita

Generazione su un’orbita completa.

DoD

Profondità di scarica.

Attenuazione di tratta

Perdita per dispersione.

UHF

Banda ad altissima frequenza.

Passaggio

Tempo in cui una stazione di terra vede il satellite.

Volume di dati

Bit scaricati al giorno.

Quiz di autoverifica

1. Produzione dei pannelli...

22.9 W

2.29 W

229 W

38 W

22.9 W. SηA.

2. Media orbitale...

14.2 W

22.9 W

8.6 W

11.4 W

14.2 W. × 0.622.

3. Batteria...

15.9 Wh

4.77 Wh

47.7 Wh

8 Wh

15.9 Wh. ÷ 0.3.

4. Attenuazione di percorso...

145.3 dB

125 dB

165 dB

14.5 dB

145.3 dB. 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il rapporto della NASA sui piccoli veicoli spaziali afferma che, quando la sua prima edizione fu pubblicata nel 2013, erano stati lanciati nel mondo 247 CubeSat e altri 105 piccoli veicoli sotto i 50

kg, meno del 2% della massa lanciata in orbita.

La NASA afferma che da allora i piccoli veicoli spaziali sono diventati il mezzo principale di accesso allo spazio per istituzioni commerciali, governative, private e accademiche, quindi budget di potenza e collegamento accurati sostengono oggi gran parte dell'osservazione della Terra.

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

Fonti: NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rapporto gratuito della NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Verifiche strutturali e termiche

Fattori di carico, margini di sicurezza, carichi di lancio e di volo e una prima stima di equilibrio termico per entrambi i percorsi.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare un carico di progetto da un fattore di carico.
- Calcolare un margine di sicurezza.
- Stimare la temperatura di equilibrio.
- Decidere cosa richiede un'analisi dettagliata.

Concetti chiave

- I carichi di progetto sono il peso per un fattore di carico (lancio o manovra), per un coefficiente di sicurezza.
- Il margine di sicurezza MS = ammissibile/(FS × applicato) − 1 deve essere positivo.
- L'alluminio 6061-T6 snerva vicino a 276 MPa (valore da manuale), una scelta comune sia per i droni sia per le strutture dei CubeSat.
- Una prima stima termica bilancia la luce solare assorbita con l'infrarosso emesso; per α = ε un corpo al sole vicino alla Terra si trova in media vicino a 278 K.
- Le verifiche a mano trovano i casi critici; i modelli a elementi finiti e termici poi li affinano.

Equazioni chiave

$$F = nmg$$

`F=nmg`

Carico dal fattore di carico

$$MS = \frac{\sigma_{allow}}{FS \cdot \sigma} - 1$$

`MS=σ_allowFS·σ-1`

Margine di sicurezza

$$T = \left(\frac{\alpha S}{4\varepsilon\sigma}\right)^{1/4}$$

`T=((α S)/(4σ))^1/4`

Temperatura media di equilibrio

$$\sigma = F/A$$

Tensione normale

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Un CubeSat da 4 kg subisce 10 g (fattore di carico di esempio). Carico?

1. 10 × 4 × 9.80665.

Risposta: 392 N.

Esempio 7.2 Una guida subisce 80 MPa; lo snervamento è 276 MPa; FS = 1.25. MS?

1. 276/(1.25 × 80) − 1.

Risposta: 1.76, positivo.

Esempio 7.3 Temperatura media di equilibrio con α = ε?

1. (1361/(4 × 5.670374419 × 10⁻⁸))^¼.

Risposta: 278 K.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. MS se la sollecitazione sale a 200 MPa?

   0.10.

2. Carico a 6 g su 5 kg?

   294 N.

3. In °C, quanto vale 278.3 K?

   5.2 °C.

4. Perché un coefficiente di sicurezza?

   Incertezze su carichi, materiali e analisi.

Errori concettuali comuni

Mito: MS = 0 va bene.

In realtà: Mantienilo positivo.

Mito: Lo spazio è freddo, quindi niente problemi termici.

In realtà: Le parti al sole possono surriscaldarsi.

Mito: Le verifiche a mano sostituiscono l’analisi.

In realtà: La guidano.

Flashcard

Fattore di carico

Multiplo del peso.

Coefficiente di sicurezza

Moltiplicatore dei carichi.

Margine di sicurezza

Ammissibile su richiesto meno uno.

Tensione di snervamento

Sollecitazione che produce deformazione permanente.

Temperatura di equilibrio

Assorbito = emesso.

FEA

Analisi agli elementi finiti.

Quiz di autoverifica

1. Carico...

392 N

39 N

3920 N

40 N

392 N. nmg.

2. MS…

1.76

2.76

0.76

−0.24

1.76. 276/100 − 1.

3. T di equilibrio…

278 K

255 K

300 K

373 K

278 K. (S/4σ)^¼.

4. L’MS deve essere…

positivo

negativo

zero

sopra 10

positivo. Definizione.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che i due CubeSat di PREFIRE misurano l’emissione nel lontano infrarosso della Terra, la stessa radiazione che questa unità bilancia nella sua stima termica.

La NASA riferisce che la missione PREFIRE è stata estesa perché i due satelliti operino almeno fino a settembre 2026, ampliando l'attenzione dai poli all'intero pianeta, frutto di un progetto che è sopravvissuto al lancio e all'orbita.

Su Saving Planets: Strutture aerospaziali · Trasmissione del calore

Fonti: NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.

Guarda la lezione

Lecture 5: Orbiter Structure + Thermal Protection System (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-5/) (in inglese)

MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2005), 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**

Costi, tempi e rischi

Strutture di scomposizione del lavoro, cronoprogrammi a percorso critico, valore acquisito, matrici dei rischi e piani di mitigazione.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Costruire una WBS.
- Trovare il percorso critico.
- Calcolare CPI, SPI e stima a finire.
- Valutare e mitigare i rischi.

Concetti chiave

- Una WBS suddivide il progetto in parti consegnabili che si possono stimare e assegnare.
- Il percorso critico è la catena più lunga di attività dipendenti; qualsiasi ritardo su di esso ritarda il progetto.
- Il valore acquisito confronta valore pianificato, valore acquisito e costo effettivo.
- CPI = EV/AC e SPI = EV/PV; valori sotto 1 significano fuori budget o in ritardo.
- I rischi sono valutati come probabilità × conseguenza e seguiti con responsabili e mitigazioni.

Equazioni chiave

$$CPI = EV / AC$$

`CPI=EV/AC`

Indice di performance dei costi

$$SPI = EV / PV$$

`SPI=EV/PV`

Indice di performance dei tempi

$$EAC = BAC / CPI$$

`EAC=BAC/CPI`

Stima a finire

$$R = L \times C$$

$$R = L \times C$$

Punteggio di rischio

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 PV = $50k, EV = $45k, AC = $48k (valori di esempio). CPI e SPI?

1. CPI = 45/48.
2. SPI = 45/50.

Risposta: CPI = 0.9375, SPI = 0.90.

Esempio 8.2 Il budget a finire è $100k. EAC?

1. 100/0.9375.

Risposta: $106.7k.

Esempio 8.3 Attività in sequenza durano 3, 4, 5 e 2 settimane in un semestre di 15 settimane. Margine?

1. Percorso = 14 settimane.
2. 15 − 14.

Risposta: 1 settimana.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Punteggio di rischio per probabilità 4 e conseguenza 5?

   20 su 25.

2. Che cosa significa CPI = 1.1?

   Sotto budget.

3. Scostamento a finire per un EAC di $106.7k?

   −$6.7k.

4. Che cos’è una WBS?

   Struttura di scomposizione del lavoro.

Errori concettuali comuni

Mito: Spendere secondo il piano significa essere nei tempi.

In realtà: Confronta il valore acquisito, non la spesa.

Mito: Ogni attività è critica.

In realtà: Solo il percorso più lungo lo è.

Mito: I rischi spariscono una volta elencati.

In realtà: Hanno bisogno di responsabili e azioni.

Flashcard

WBS

Struttura di scomposizione del lavoro.

Percorso critico

Catena dipendente più lunga.

Valore acquisito

Valore del lavoro svolto.

CPI

EV/AC.

SPI

EV/PV.

Matrice dei rischi

Probabilità × conseguenza.

Quiz di autoverifica

1. CPI...

0.9375

0.90

1.067

0.96

0.9375. EV/AC.

2. SPI...

0.90

0.9375

1.11

0.96

0.90. EV/PV.

3. EAC...

$106.7k

$100k

$93.8k

$111k

$106.7k. BAC/CPI.

4. Margine...

1 settimana

0 settimane

14 settimane

3 settimane

1 settimana. 15 − 14.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il Systems Engineering Handbook della NASA include un'intera sezione sulla gestione tecnica trasversale, accanto alla progettazione di sistema e alla realizzazione del prodotto.

I progetti che rispettano budget e tempi vengono lanciati prima, e i dati di osservazione della Terra iniziano ad arrivare prima. I costi in questa unità sono valori di esempio.

Su Saving Planets: Soluzioni · Avionica e ingegneria dei sistemi

Fonti: NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA, sezione 6.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Prototipo, prove e verifica

Matrici di verifica, pianificazione delle prove, statistica delle misure, confronto dei risultati con le previsioni e chiusura dei requisiti.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Costruire una matrice di verifica.
- Calcolare media e deviazione standard.
- Confrontare una misura con un'allocazione.
- Chiudere un requisito o concedere una deroga.

Concetti chiave

- Una matrice di verifica elenca ogni requisito, il suo metodo, la prova o l'analisi e il risultato.
- Ripeti le misure per stimare media e dispersione; riportale entrambe.
- Confronta i risultati con le previsioni; grandi differenze rivelano presto errori del modello.
- Prova come voli: usa configurazioni e procedure rappresentative del volo.
- Il 16.83X del MIT segue le fasi concepire, progettare, realizzare e operare, terminando con prove nell'ambiente previsto.

Equazioni chiave

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i$$

`x=1n x_i`

Media

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

`s=((x_i- x)^2)/(n-1)`

Deviazione standard campionaria

$$\text{Margin} = \frac{A - \bar{x}}{\bar{x}}$$

`Margin=(A- x)/( x)`

Margine misurato

$$e = \frac{x_m - x_p}{x_p}$$

`e=(x_m-x_p)/(x_p)`

Errore di previsione

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Cinque misure di massa: 3.38, 3.42, 3.40, 3.45, 3.35 kg. Media?

1. Sum 17.00/5.

Risposta: 3.40 kg.

Esempio 9.2 Deviazione standard campionaria?

1. Scarti −0.02, 0.02, 0, 0.05, −0.05.
2. √(0.0058/4).

Risposta: 0.038 kg.

Esempio 9.3 Margine rispetto all’allocazione di 4.0 kg?

1. (4.0 − 3.40)/3.40.

Risposta: 17.6%: il requisito si chiude.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Previsto 3.30 kg, misurato 3.40 kg. Errore?

   +3.03%.

2. Perché ripetere le misure?

   Per stimare la dispersione e individuare errori.

3. Che cosa significa «prova come voli»?

   Usare hardware e procedure rappresentativi del volo.

4. Chi approva una deroga?

   Il comitato di revisione del progetto o il cliente.

Errori concettuali comuni

Mito: Una sola misura basta.

In realtà: Riporta media e dispersione.

Mito: Le prove dimostrano che un progetto è perfetto.

In realtà: Mostrano che soddisfa i requisiti nelle condizioni di prova.

Mito: I dati discordanti sono negativi.

In realtà: Ti insegnano qualcosa sul modello.

Flashcard

Matrice di verifica

Tabella requisito-evidenza.

Media

Media.

Deviazione standard

Dispersione.

Prova come voli

Prove rappresentative del volo.

Deroga

Eccezione approvata.

CDIO

Concepire, progettare, realizzare, operare.

Quiz di autoverifica

1. Media...

3.40 kg

3.38 kg

3.45 kg

17 kg

3.40 kg. Sum/n.

2. Deviazione standard...

0.038 kg

0.38 kg

0.0058 kg

0.1 kg

0.038 kg. Formula campionaria.

3. Margine...

17.6%

15%

0.6%

−15%

17.6%. (4 − 3.4)/3.4.

4. Errore di previsione...

+3.03%

−3.03%

+0.1%

+30%

+3.03%. 0.1/3.3.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

MIT OpenCourseWare descrive il 16.83X come basato su un modello concepire-progettare-realizzare-operare, con una fase finale in cui il sistema viene collaudato e preparato per l'ambiente previsto.

Il CubeSat Launch Initiative della NASA porta in volo satelliti studenteschi che superano questo tipo di prove, trasformando progetti finali in strumenti operativi in orbita.

Su Saving Planets: Avionica e ingegneria dei sistemi · Probabilità e statistica

Fonti: MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/) · NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA, sezione 5.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Revisioni di progetto e relazione finale

Revisioni di progetto preliminare e critica, presentazione di trade-off e budget, risposta alle domande e stesura della relazione finale.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Pianificare una revisione di progetto.
- Presentare i budget con i margini.
- Seguire le azioni emerse dalla revisione.
- Scrivere una relazione finale chiara.

Concetti chiave

- Una revisione di progetto preliminare mostra che il concetto soddisfa i requisiti con margine; una revisione critica mostra che il progetto di dettaglio è pronto per la costruzione.
- Inizia dai requisiti, poi il progetto, poi budget, rischi, piani di prova e questioni aperte.
- Ogni revisione produce azioni con responsabili e scadenze.
- La relazione finale racconta la storia dall'esigenza al progetto verificato, con numeri riconducibili al foglio di calcolo.
- Discutere onestamente ciò che non ha funzionato fa parte della buona ingegneria.

Equazioni chiave

$$t_{talk} = n_{slides} \times t_{slide}$$

```
t_talk=n_slides× t_slide
```

Durata della presentazione

$$\text{Closure} = \frac{n_{closed}}{n_{total}}$$

```
Closure=_closedn_total
```

Chiusura delle azioni

$$\text{Margin} = \frac{A - E}{E}$$

```
Margin=(A-E)/(E)
```

Margine di budget

$$\text{Coverage} = \frac{n_{verified}}{n_{req}}$$

`Coverage=_verifiedn_req`

Copertura della verifica

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 Una revisione di 20 minuti a 1.5 minuti per slide. Quante slide?

1. 20/1.5.

Risposta: Circa 13.

Esempio 10.2 Una revisione lascia 12 azioni; 9 sono chiuse. Chiusura?

1. 9/12.

Risposta: 75%.

Esempio 10.3 30 requisiti su 32 sono verificati. Copertura?

1. 30/32.

Risposta: 93.75%.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Slide per una revisione di 30 minuti a 2 min ciascuna?

   15.

2. Che cosa segue la PDR?

   CDR.

3. Chiusura con 11 su 12 chiuse?

   91.7%.

4. Perché mostrare le questioni aperte?

   I revisori possono aiutare, e crea fiducia.

Errori concettuali comuni

Mito: Le revisioni sono esami.

In realtà: Aiutano il progetto.

Mito: Più slide è meglio.

In realtà: La chiarezza batte il volume.

Mito: Nascondere i problemi.

In realtà: Mostrali con dei piani.

Flashcard

PDR

Revisione di progetto preliminare.

CDR

Revisione critica di progetto.

Azione

Attività emersa da una revisione.

Relazione finale

Racconto dall'esigenza alla verifica.

Copertura

Quota di requisiti verificati.

Lezioni apprese

Cosa fare diversamente.

Quiz di autoverifica

1. Slide...

≈ 13

20

30

5

≈ 13. 20/1.5.

2. Chiusura...

75%

9%

25%

133%

75%. 9/12.

3. Copertura...

93.75%

30%

96%

6.25%

93.75%. 30/32.

4. La CDR mostra...

un progetto pronto da costruire

la prima idea

il lancio avvenuto

solo il budget

un progetto pronto da costruire. Progetto critico.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NASA afferma che il suo Sustainable Flight National Partnership sostiene l'obiettivo della comunità aeronautica di zero emissioni nette di carbonio entro il 2050.

La NASA afferma che la missione estesa di PREFIRE osserva ora l'intero pianeta; revisioni e relazioni solide sono il modo in cui i progetti di studenti e professionisti raggiungono questo tipo di impatto.

Su Saving Planets: Soluzioni · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/) · NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

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

1. Missione, stakeholder e requisiti
   4 esercizi
2. Generazione e selezione dei concetti
   4 esercizi
3. Percorso velivolo: dimensionamento dei pesi e autonomia
   4 esercizi
4. Percorso velivolo: carico alare e potenza
   4 esercizi
5. Percorso CubeSat: dimensionamento e orbita
   4 esercizi
6. Percorso CubeSat: budget di potenza e di collegamento
   4 esercizi
7. Verifiche strutturali e termiche
   4 esercizi
8. Costi, tempi e rischi
   4 esercizi
9. Prototipo, prove e verifica
   4 esercizi
10. Revisioni di progetto e relazione finale
    4 esercizi

Il laboratorio (Design studio)

Lo studio di progettazione è la parte pratica del corso. Qui è gratuito e solo per esercitarsi, senza crediti.

Ogni laboratorio è uno strumento di progettazione su foglio di calcolo, quindi non ci sono pericoli. Per questo corso non costruire né far volare un vero drone, non caricare batterie al litio e non maneggiare hardware di lancio senza supervisione qualificata e nel rispetto delle norme locali. 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: Tracciamento di requisiti e margini

SETTIMANA 1

Obiettivo: Costruisci il foglio dei requisiti che userà tutto il tuo progetto, con margini aggiornati in tempo reale.

$$\text{Margin} = (A - E)/E$$

```
Margin=(A-E)/E
```

Margine

Procedimento

1. Elenca 10–20 requisiti con numero, unità e metodo di verifica.
2. Inserisci un'allocazione di massa di 4.0 kg (valore da manuale per un 3U) o un'allocazione di 5 kg per il drone.
3. Inserisci stime di 3.4, 3.6 e 3.8 kg e calcola il margine.
4. Colora di rosso i margini sotto il 10%.

Tabella dei dati

Stima (kg)	Margine
3.4	17.6%
3.6	11.1%
3.8	5.26%

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. (4.0 − 3.6)/3.6 = 11.1%.
2. (4.0 − 3.8)/3.8 = 5.26%.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Legame con il pianeta: Il CubeSat Launch Initiative della NASA ha lanciato oltre 150 CubeSat. NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

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

Laboratorio B: Matrice di selezione del concetto con sensibilità

SETTIMANA 2

Obiettivo: Valuta due concetti e verifica come i pesi cambiano il vincitore.

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Punteggio pesato

Procedimento

1. Inserisci i punteggi dell'unità 2: A (6, 9, 5), B (8, 6, 8).
2. Valuta con tre insiemi di pesi.
3. Traccia il vincitore in funzione del peso delle prestazioni.
4. Scrivi un paragrafo per difendere la tua scelta.

Tabella dei dati

Pesi (costo, prest., rischio)	**A**	**B**
0.3, 0.5, 0.2	7.3	7.0
0.4, 0.3, 0.3	6.6	7.4
0.2, 0.6, 0.2	7.6	6.8

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. A = 0.2 × 6 + 0.6 × 9 + 0.2 × 5 = 7.6.
2. B = 0.2 × 8 + 0.6 × 6 + 0.2 × 8 = 6.8.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/)

Legame con il pianeta: L'SFNP della NASA copre velivoli, operazioni e carburanti sostenibili. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

Laboratorio C: Ciclo di dimensionamento del drone

SETTIMANA 4

Obiettivo: Dimensiona la massa al decollo del percorso drone per diverse frazioni di batteria.

$$W_0 = W_{pay}/(1 - f_e - f_b)$$

```
W_0=W_pay/(1-f_e-f_b)
```

Massa al decollo

Procedimento

1. Inserisci 1 kg di carico utile e una frazione a vuoto di 0.5.
2. Calcola la massa al decollo per frazioni di batteria di 0.25, 0.30 e 0.35.
3. Aggiungi la superficie alare da W/S = 105.84 N/m².
4. Scegli un punto di progetto e giustificalo.

Tabella dei dati

Frazione di batteria	Massa al decollo (kg)
0.25	4.0
0.30	5.0
0.35	6.67

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. 1/(1 − 0.5 − 0.25) = 4.0 kg.
2. 1/(1 − 0.5 − 0.35) = 6.67 kg.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/)

Legame con il pianeta: L'SFNP della NASA punta a guadagni di efficienza energetica del 25–30%. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

Laboratorio D: Orbita ed eclisse del CubeSat

SETTIMANA 6

Obiettivo: Calcola periodo ed eclisse nel caso peggiore per le quote candidate.

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

T=2π^3/μ

Periodo

Procedimento

1. Inserisci le quote 400, 500 e 600 km.
2. Calcola T e le orbite al giorno.
3. Calcola i minuti di eclisse nel caso peggiore.
4. Scegli una quota e annota il compromesso con la durata dovuta alla resistenza.

Tabella dei dati

Quota (km)	T (min)	Eclissi (min)
400	92.6	36.1
500	94.6	35.8
600	96.7	35.5

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. T(600) = 2π√(6978.1³/398600.4) = 96.7 min.
2. Eclisse(400) = 0.390 × 92.6 = 36.1 min.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Legame con il pianeta: NASA: i CubeSat di PREFIRE sono stati lanciati nel maggio 2024. NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/

prefire/)

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

Laboratorio E: Budget di potenza e dati

SETTIMANA 7

Obiettivo: Chiudi i budget di potenza e dati del CubeSat con margine.

$$V = R_b t_p n_p$$

`V=R_bt_pn_p`

Volume di dati giornaliero

Procedimento

1. Inserisci una produzione dei pannelli di 22.9 W e una media orbitale di 14.2 W.
2. Elenca i carichi e confrontali con la media orbitale.
3. Calcola i dati al giorno a 9600 bit/s per 2, 4 e 6 passaggi da dieci minuti.
4. Confrontali con i dati giornalieri del tuo carico utile.

Tabella dei dati

Passaggi al giorno	Dati (Mbit)
2	11.52
4	23.04
6	34.56

Valori d’esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. 9600 × 600 × 2 = 11.52 Mbit.
2. 9600 × 600 × 6 = 34.56 Mbit.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Legame con il pianeta: NASA: i piccoli veicoli spaziali sono ora il mezzo principale di accesso allo spazio per molti gruppi. NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsa

t-institute/sst-soa/)

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

Laboratorio F: Tracciamento del valore acquisito

SETTIMANA 10

Obiettivo: Segui le prestazioni di costi e tempi su tre date di avanzamento.

$$CPI = EV/AC,\ SPI = EV/PV$$

`CPI=EV/AC,\ SPI=EV/PV`

Indici di prestazione

Procedimento

1. Inserisci PV, EV e AC per tre date.
2. Calcola CPI e SPI.
3. Calcola l'EAC con BAC = $100k.
4. Scrivi uno stato di una riga per ogni data.

Tabella dei dati

PV, EV, AC ($k)	CPI	SPI
20, 20, 22	0.909	1.00
50, 45, 48	0.9375	0.90
80, 76, 80	0.95	0.95

Valori d'esempio calcolati.

Calcolo di esempio

1. 20/22 = 0.909.
2. 76/80 = 0.95.

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

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Legame con il pianeta: Il manuale della NASA tratta la gestione tecnica trasversale. NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

- [ ] **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. Margine di un'allocazione di 4.0 kg su una stima di 3.6 kg?

    1. 0.4/3.6.

    Risposta: 11.1%.

2. Massa al decollo per 2 kg di carico utile, frazione a vuoto 0.45, batteria 0.3?

    1. 2/0.25.

    Risposta: 8 kg.

3. Carico alare per uno stallo a 14 m/s, C_Lmax 1.3?

    1. ½ × 1.225 × 196 × 1.3.

    Risposta: 156.1 N/m².

4. Periodo a 400 km?

    1. a = 6778.1 km.

    Risposta: 92.6 min.

5. Autonomia di Breguet con L/D = 20 invece di 17 (valori dell'unità 3)?

    1. 5235 × 20/17.

    Risposta: 6159 km.

Serie finale di esercizi (unità 1–10)

1. Pannello da 0.09 m² con efficienza del 30%?

    1. 1361 × 0.3 × 0.09.

    Risposta: 36.7 W.

2. Batteria per 10 W per 36 min al 25% di DoD?

1. 10 × 0.6/0.25.

Risposta: 24 Wh.

3. MS per 100 MPa, snervamento 276 MPa, FS 1.4?

    1. 276/140 − 1.

    Risposta: 0.971.

4. EAC con BAC $200k, EV 60, AC 64?

    1. CPI = 0.9375.
    2. 200/0.9375.

    Risposta: $213.3k.

5. Media e deviazione standard campionaria di 2, 4, 6?

    1. Media 4.
    2. √(8/2).

    Risposta: 4 e 2.

6. Copertura della verifica, 45 su 50?

    1. 45/50.

    Risposta: 90%.

Formulario

$$\text{Margin} = (A - E)/E,\ m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

$$S = \sum w_i s_i,\ N = \prod n_i$$

$$W_0 = W_{pay}/(1 - f_e - f_b),\ R = (V/c)(L/D)\ln(W_i$$

$$W/S = \tfrac{1}{2}\rho V_s^2 C_{L,max},\ P = W(V/(L/D) + RC)/\eta$$

$$T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu},\ f_e = \sin^{-1}(R_E/a)/\pi$$

$$P = S\eta A\cos\theta,\ E = P_e t_e/DoD,\ L = 20\log_{10}(4\pi d$$

$$F = nmg,\ MS = \sigma_{allow}/(FS\,\sigma) - 1$$

$$CPI = EV/AC,\ SPI = EV/PV,\ EAC = BAC$$

$$\bar{x} = \sum x_i/n,\ s = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2/(n-1)}$$

$$\text{Coverage} = n_{verified}/n_{req}$$

Costanti

Costante	Valore
Parametro gravitazionale terrestre (valore da manuale)	$\mu = 398{,}600.4418\ km^3/s^2$
Raggio equatoriale terrestre (valore da manuale)	6378.137 km
Gravità standard	$g = 9.80665\ m/s^2$
Costante solare (valore da manuale)	$1361\ W/m^2$
Densità dell'aria al livello del mare (valore da manuale)	$1.225\ kg/m^3$
Velocità della luce	c = 299792458 m/s (esatto)

Fonte: NIST: CODATA value, speed of light in vacuum (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c)

Testi e risorse gratuiti

Usa questi manuali, lezioni e pagine di missione gratuiti insieme al corso.

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuale gratuito della NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Materiali gratuiti del progetto finale del MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rapporto gratuito della NASA sui piccoli veicoli spaziali.
- NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/): Opportunità di lancio della NASA.
- NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/): Missione CubeSat della NASA.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): Aviazione sostenibile alla NASA.

Glossario

Azione
Attività assegnata in una revisione.

Allocazione
Quota a budget di una risorsa.

Equazione di Breguet
Equazione dell'autonomia di un velivolo.

CDR

Revisione critica di progetto.

CPI
Indice di prestazione dei costi.

Diagramma dei vincoli
Requisiti tracciati in funzione del carico alare.

Percorso critico
Catena più lunga di attività dipendenti.

CubeSat
Piccolo satellite costruito in unità da 10 cm.

Profondità di scarica
Quota della capacità della batteria utilizzata.

Valore acquisito
Valore a budget del lavoro svolto.

Frazione di eclisse
Quota di un'orbita in ombra.

Margine di sicurezza
Ammissibile su richiesto meno uno.

Tavola morfologica
Opzioni per ogni funzione.

PDR
Revisione di progetto preliminare.

Matrice di Pugh
Confronto con un concetto di riferimento.

Requisito
Enunciato verificabile di un bisogno.

SPI
Indice di prestazione dei tempi.

Matrice di verifica
Tabella requisito-evidenza.

Carico alare
Peso per superficie alare.

Work breakdown structure (WBS)
Progetto suddiviso in deliverable.

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	Consegna un progetto che collega ogni numero a un requisito, chiude tutti i budget con margine, verifica i requisiti con evidenze e presenta chiaramente compromessi, rischi e lezioni.
3 · Competente	Chiude la maggior parte dei budget con margine e presenta un progetto chiaro con lacune minori.
2 · In sviluppo	Ha un concetto e alcuni budget, ma una tracciabilità dei requisiti debole o margini mancanti.
1 · Principiante	Presenta un progetto senza requisiti, budget né verifica; deve rivedere le 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

- Avionica e ingegneria dei sistemi AERO 450
- Aviazione sostenibile AERO 470
- Propulsione AERO 410
- Tutti i corsi