

Atterraggio dello Space Shuttle

Andreas Ulovec (traduzione in italiano Jmmy Mauro)

1 Introduzione

Il lancio di uno Space Shuttle è sempre un'avventura emozionante! Il conto alla rovescia, l'accensione dei motori, un decollo spettacolare e lo Shuttle è via per la sua nuova missione alla ISS o per qualche altra missione vicino all'orbita della Terra – tutte coperte in diretta dalle stazioni TV di tutto il mondo.



Fig.1 Lo Space Shuttle *Endeavour* pronto a decollare per la missione STS-130

Tuttavia, quando lo Shuttle (in realtà la parte a forma di aeroplano che atterra è detta *Orbiter*, mentre per *Space Shuttle* si intende l'intero veicolo al momento del decollo, includendo i due razzi a propellente solido (SRB) ed il serbatoio esterno di colore arancione, tutti i quali vengono abbandonati parecchi minuti dopo il decollo) ritorna, alcuni giorni o qualche settimana dopo, suscita molto meno interesse. Eppure, è l'atterraggio che risulta per l'equipaggio la parte più eccitante del volo – ed anche la più pericolosa. *Lo Space Shuttle si riscalda moltissimo durante il rientro a Terra*, si potrebbe leggere su internet o sui giornali, ma quanto è “moltissimo”? Quanto tempo dura effettivamente il “rientro a Terra”? Qualcuno ha sentito parlare di attrito dell'aria, resistenza aerodinamica, piastrelle di isolamento, ma come il tutto si unisce? Seguici per scoprirne di più!

2 Contenuto del programma svolto in questa unità

2.1 Programma di Matematica

- Manipolazione di termini contenenti frazioni e potenze
- Percentuale
- Area di figure piane
- Funzioni trigonometriche
- Facoltativo: Derivate
- Facoltativo: risoluzione di semplici equazioni differenziali

2.2 Programma di Scienze

- Densità dell'aria
- Resistenza aerodinamica (attrito dell'aria)
- Conversione dell'energia
- Moto accelerato

3 Compiti e problemi

3.1 Quanto si riscalda uno Space Shuttle?

Prima di poter rispondere a questa domanda, dobbiamo vedere in primo luogo *perché* uno Space Shuttle (o un qualsiasi altro oggetto che si muove velocemente nell'atmosfera) si riscalda. La risposta è *l'attrito dell'aria*. In un qualsiasi tipo di attrito, l'energia cinetica è convertita in energia interna. Se prendiamo in considerazione l'attrito fra solidi, questo è un fenomeno ben noto – strofina insieme le mani e diventeranno più calde, strofinalo più rapidamente e diventeranno ancora più calde. L'attrito di un solido che si muove in un gas è un po' diverso, ma il principio di conversione di energia cinetica in energia interna è lo stesso (si potrebbe affermare che, in realtà, non c'è conversione in energia interna, in quanto l'aumento di temperatura significa appunto che le molecole si muovono più velocemente, cioè di nuova energia cinetica). Le molecole dell'aria (principalmente molecole di azoto e di ossigeno) urtano la superficie del solido ed una minuscola frazione dell'energia cinetica del solido è convertita in energia interna (o energia cinetica delle molecole dell'aria). Anche a velocità relativamente basse, questo effetto è presente, ma non in maniera significativa – se muovi le mani nell'aria, non avverti affatto che esse (o l'aria) si riscaldino (in realtà, le mani diventano un po' più fredde a causa dell'evaporazione del sudore). Alla velocità di un aeroplano, l'effetto è già apprezzabile. Alla velocità di uno Space Shuttle (circa venti volte quella di un aereo da trasporto) l'effetto diventa un notevole problema ingegneristico – ma vi ritorneremo più tardi.

Compito: la parte più pericolosa dell'atterraggio è dopo il *de-orbit burn*¹ di uno Space Shuttle (cioè il momento in cui il processo di atterraggio incomincia) ad una quota di 122 km e ad una velocità di $v_1 = 25,900$ km/h, fino al momento in cui lo Shuttle esce dall'oscuramento radio (che segna la fine della fase più calda del volo) ad una quota di 55 km e ad una velocità di $v_2 = 13,300$ km/h. Quanto aumenta la temperatura della superficie dello Shuttle in questo periodo (la capacità termica dello Shuttle è $c \approx 500 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$)? (N.B. A causa di un effetto detto onda di shock, soltanto il 4% dell'energia convertita riscalda lo Shuttle, il resto riscalda l'aria e in questo contesto non ci riguarda).

Soluzione:

$$\text{Energia cinetica } E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}, \text{ Energia interna } E_{th} = m \cdot c \cdot T$$

Conversione dell'energia: variazione dell'energia cinetica + variazione dell'energia interna

Teniamo conto ora del fatto che soltanto il 4% dell'energia convertita riscalda lo Shuttle:

Variazione dell'energia interna = 4% della variazione di energia cinetica

$$\Delta E_{th} = 0.04 \cdot \Delta E_{kin}$$

$$m \cdot c \cdot \Delta T = 0.04 \cdot \left(\frac{m \cdot v_1^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2} \right) = 0.04 \cdot \frac{m}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$\Delta T = \frac{0.04 \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}}{c}$$

Poiché facciamo i conti nel sistema metrico, tutte le unità (qui in particolare la velocità) vanno convertite nelle unità standard. Per la velocità, è m/s. Il fattore di conversione da km/h in m/s è 3.6, cioè 1 m/s = 3.6 km/h. Ne segue che $v_1 = 7,194$ m/s e $v_2 = 3,700$ m/s. Ora possiamo calcolare la differenza di temperatura:

¹ Accensione dei motori per la fuoriuscita dall'orbita.

$$\Delta T = \frac{0,04 \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}}{c} = \frac{0,04 \cdot \frac{7,194^2 - 3,700^2}{2}}{500} = 1,522$$

La temperatura aumenta di 1522 °C (in realtà l'unità standard per la temperatura sarebbe il Kelvin, ma poiché in questo contesto stiamo parlando di *differenza* di temperature, possiamo usare °C: infatti le scale Celsius e Kelvin hanno la stessa unità di scala relativa). Questo significa che l'utilizzo per la superficie dello Shuttle dei consueti materiali impiegati per gli aeroplani non sarebbe in grado di proteggerla dal calore di rientro (l'acciaio fonde a 1530 °C, l'alluminio già a 660 °C). Ecco perché la superficie dello Shuttle (in particolare le parti che si riscaldano di più, cioè il muso del veicolo e il bordo d'attacco delle ali, e per un'estensione minore la parte inferiore del corpo centrale e delle ali) è ricoperto nei punti critici con Sistema di Protezione Termica carbonio – carbonio rinforzato e piastrelle di isolamento realizzate in materiale ceramico, costituito principalmente da un composto di silicio, che ha un alto punto di fusione e disperde il calore molto rapidamente.



Fig.2 Piastrelle di isolamento sul lato inferiore delle ali del modello *Explorer* di Shuttle



Fig.3 Verifica della dispersione del calore mediante le piastrelle di isolamento al *Kennedy Space Center*

3.2 Quanto dura la “fase rovente”?

Sappiamo già che l'attrito dell'aria è il motivo principale per cui lo Space Shuttle si riscalda durante l'atterraggio (altri fattori, ma minori, sono il calore proveniente dal sole e dall'irraggiamento). E' anche il motivo principale per cui lo Shuttle rallenta (senza l'atmosfera, in effetti, lo Shuttle accelererebbe per la forza di gravità, ma l'effetto dell'accelerazione verticale dovuto alla gravità è quasi del tutto bilanciato dalla forza centripeta a tale alta velocità). L'attrito dell'aria dipende da parecchi fattori: la velocità v (il fattore principale), la densità dell'aria ρ , l'area della superficie (effettiva) dell'oggetto A_{eff} , la forma geometrica dell'oggetto (descritta da un fattore di forma o coefficiente di resistenza aerodinamica, c_d). La decelerazione è data da

$$a = -\frac{1}{2m} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{eff} \cdot c_d$$

La massa, l'area effettiva e il fattore di forma dello Shuttle si possono determinare facilmente e rimangono pressoché costanti (ciò sarebbe corretto soltanto se lo Shuttle volasse in linea retta; in realtà, lo Shuttle fa un paio di giri a forma di S, ma questo complicherebbe troppo i conti); la densità dell'aria, invece, dipende dalla quota, dalle condizioni atmosferiche, etc. La densità dell'aria nell'atmosfera terrestre ad una certa quota h (in metri) è data da

$$\rho_h = \rho_0 \cdot e^{-h \cdot 0.00011856}$$

dove ρ_0 è la densità dell'aria a livello del mare (il valore standard è $\rho_0 = 1.2250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).

Compito: Come descritto sopra, la “fase rovente” dell’atterraggio di uno Space Shuttle comincia alla fine del *de-orbit burn* ad una quota di 122 km e ad una velocità di $v_1 = 25,900$ km/h e finisce nel momento in cui lo Shuttle esce dall’oscuramento radio ad una quota di 55 km e ad una velocità di $v_2 = 13,300$ km/h. Quanto dura la “fase rovente”? La superficie alare di uno Space Shuttle è di 250 m^2 , esso entra con il muso inclinato verso l’alto di circa 40° , la sua massa all’atterraggio è approssimativamente 100 t, e il coefficiente di resistenza aerodinamica è circa 0.078. (N.B. per semplificare i conti, assumiamo che la densità dell’aria sia costante $\rho_{55\text{km}}$). Suggerimento: trova la funzione $v(t)$ che esprime la relazione fra velocità e tempo.

Soluzione: (N.B. l’equazione della velocità può essere determinata dagli studenti, utilizzando le derivate e risolvendo una semplice equazione differenziale, o fornita dall’insegnante). Per trovare la relazione tra la velocità v ed il tempo t , ricordiamo che la decelerazione è la variazione di velocità nel tempo. In virtù dell’equazione sopra per la decelerazione dovuta all’attrito dell’aria, otteniamo

$$a = \frac{dv}{dt}$$

With the above equation for deceleration by air friction we get

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2m} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{\text{eff}} \cdot c_d$$

Questa è un’equazione differenziale della forma

$$\dot{v} + k \cdot v^2 = 0, \text{ con } k = \frac{1}{2m} \cdot \rho \cdot A_{\text{eff}} \cdot c_d$$

La soluzione può essere facilmente determinata, ad esempio, utilizzando il metodo di separazione delle variabili

$$\frac{dv}{dt} = -k \cdot v^2 \Rightarrow \frac{1}{v^2} \cdot dv = -k \cdot dt \Rightarrow \int \frac{1}{v} = -k \cdot t + c$$

$$v(t) = \frac{1}{k \cdot t - c}$$

Poichè abbiamo la condizione al limite $v(0) = v_1 = 25,900 \text{ km} = 7,194 \text{ m/s}$ otteniamo $c = -0.00014$, e l’equazione per la velocità è

$$v(t) = \frac{1}{\frac{1}{2m} \cdot \rho \cdot A_{\text{eff}} \cdot c_d \cdot t - 0.00014}$$

Ora dobbiamo soltanto calcolare le rimanenti variabili: la densità dell’aria ρ , e l’area della superficie effettiva dell’oggetto A_{eff} (massa e coefficiente di resistenza aerodinamica, come anche la velocità nel momento in cui lo shuttle lascia la “fase rovente”, sono noti). Come per la densità dell’aria, faremo l’assunzione che questo è un valore costante $\rho_{55\text{km}}$:

$$\rho_{55\text{km}} = \rho_{55,000\text{m}} = \rho_0 \cdot e^{-55,000 \cdot 0.00011856} = 0.0018 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Si potrebbe pensare che l’area effettiva coincida con la superficie alare (250 m^2), ma lo Shuttle entra ad un angolo di 40° (l’angolo effettivo varia per le parecchie manovre di volo compiute dal computer di bordo, ma per la maggior parte del rientro è davvero 40°), cioè l’area effettiva deve essere ridotta

del fattore $\sin 40^\circ$ (se si guarda un foglio di carta da un angolo di 90° si vede l'intera area, se lo si guarda da un altro angolo l'area sembra essere più piccola):

$$A_{eff} = 250 \text{ m}^2 \cdot \sin 40^\circ = 160 \text{ m}^2$$

Infine inseriamo tutti i valori nell'equazione per la velocità e calcoliamo il tempo t :

$$t = \frac{1 + v(t) \cdot 0.00014}{v(t) \cdot \frac{1}{2m} \cdot \rho \cdot A_{eff} \cdot c_d} = 3,653 \text{ s} \approx 60 \text{ min}$$

Lo shuttle impiega circa 60 minuti dal de-orbit burn alla fine dell'oscuramento radio.

3.3 Qualcos'altro riguardo lo Space Shuttle

La maggior parte delle missioni degli Shuttle sono alla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), consegnare parti, effettuare riparazioni e – in maniera abbastanza significativa - trasportare i membri dell'equipaggio alla e dalla stazione. Queste missioni durano da pochi giorni ad alcune settimane. Sebbene lo Shuttle sia agganciato alla ISS, entrambi non sono fissati a un determinato punto dello spazio, ma si muovono lungo una orbita assegnata – e abbastanza velocemente, per giunta! Ma quanto velocemente? E quante miglia percorre uno Shuttle in una missione?

Compiti:

- [1] Trova l'orbita e la velocità (relativa alla Terra) dell' ISS, sul sito web della NASA.
- [2] Scegli una missione conclusa dello Shuttle sull'ISS e scopri quanto tempo è durata.
- [3] Utilizza questi dati per stimare quante miglia ha percorso lo Shuttle durante la missione che hai scelto. Confronta il risultato con i dati forniti su Wikipedia.



Fig.4 Modello *Explorer* di Space Shuttle

Consigli per ulteriori letture

- <http://www.WhenWillUseMath.com> (Dec. 16, 2009)
- <http://www.nasa.gov/audience/forstudents/index.html> (Dec. 16, 2009)