



# UNIVERSITÀ DI PISA

## ROCKET PROPULSION

LUCA D'AGOSTINO

Academic year	2018/19
Course	INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Code	665II
Credits	12

Modules	Area	Type	Hours	Teacher(s)
ROCKET PROPULSION	ING-IND/07	LEZIONI	120	LUCA D'AGOSTINO

### Obiettivi di apprendimento

#### Conoscenze

Coprire i principali aspetti del funzionamento dei sistemi di propulsione chimici a razzo e affrontare i problemi principali della loro concezione, analisi, progettazione, integrazione e uso.

#### Modalità di verifica delle conoscenze

Esame dello studente consistente nella illustrazione, discussione ed applicazione degli argomenti trattati nelle lezioni. L'esame ha lo scopo di verificare il grado di comprensione degli argomenti del corso e la capacità di utilizzarlo per sviluppare soluzioni originali.

#### Capacità

Alla fine del corso lo studente dovrà essere in grado di:

- Formulare, discutere e risolvere problemi tecnici ed ingegneristici inerenti la concezione, il funzionamento, l'architettura, la valutazione delle prestazioni, il dimensionamento e la progettazione dei propulsori spaziali a razzo a propellenti chimici applicando le conoscenze ed i metodi illustrati nel corso.
- Ideare e risolvere modelli originali per l'analisi e lo studio di problemi ingegneristici inerenti il programma del corso utilizzando in modo originale e creativo gli approcci illustrati nelle lezioni.

#### Modalità di verifica delle capacità

Esame dello studente, consistente nella soluzione (scritta o sulla lavagna) di uno o più problemi relativi al programma del corso. L'uso del materiale distribuito dal docente durante il corso è consentito, salvo diversa indicazione al momento dell'assegnazione del problema.

#### Comportamenti

Lo studente deve dimostrare di saper lavorare in collaborazione e di comportarsi lealmente e rispettosamente nei confronti del docente, del personale universitario, dei suoi colleghi ed in generale dell'Università nel suo complesso.

#### Modalità di verifica dei comportamenti

Interazione diretta con lo studente durante le lezioni, le esercitazioni e gli esami.

#### Prerequisiti (conoscenze iniziali)

Tutti i contenuti di:

- i corsi della laurea triennale in ingegneria aerospaziale ed in particolare quelli dei corsi di Termodinamica Applicata, Fisica II, Elettronica, Fluidodinamica e Motori per Aeromobili;
- dei corsi di Fluids Dynamics of Propulsion Systems I e II del primo e secondo anno della laurea magistrale in ingegneria aerospaziale.

Più in generale i fondamenti di:

*Scienze Termofluidodinamiche:*

- termodinamica applicata, trasferimento di calore (conduzione, convezione, radiazione)
- meccanica dei fluidi, aerodinamica, dinamica dei gas

*Fisica e Meccanica:*



## UNIVERSITÀ DI PISA

- meccanica, acustica, termodinamica, elettromagnetismo, ottica
- meccanica analitica (cinematica, statica, dinamica)
- meccanica della struttura e dinamica

### Matematica applicata:

- analisi di calcolo, serie, ODE, PDE, geometria, vettoriale e tensoriale
- calcolo complesso, ODE, funzioni speciali, EVP e BVP
- analisi numerica, equazioni multiple non lineari, integrazione, ODE, PDE
- programmazione per computer, BASIC, FORTRAN, C, MathLab, MathCad, ecc.

### Tecnologie di produzione

### Propulsione aeronautica:

- cicli, motori, turbomacchine, parametri di funzionamento, requisiti, applicazioni

### Corequisiti

Conoscenza della lingua inglese parlata e scritta.

Capacità di lavorare in gruppo.

### Prerequisiti per studi successivi

Analisi complessa, equazioni e sistemi di equazioni differenziali ordinarie quasi-lineari, equazioni differenziali ordinarie non lineari, equazioni differenziali alle derivate parziali, trasformate integrali, analisi di Fourier e di Laplace, teoria delle probabilità e variabili casuali, processi stocastici.

Meccanica e dinamica delle strutture, dinamica e vibrazioni, onde, meccanica statistica, ottica.

Metodi e sensori di misura di temperatura, pressione, velocità, flusso, deformazione e forza.

### Indicazioni metodologiche

- Le lezioni frontali vengono svolte con l'ausilio di trasparenze.
- Il materiale didattico utilizzato a lezione è messo a disposizione degli studenti tramite il sito elearning.
- Il sito elearning è utilizzato per le comunicazioni agli studenti e la gestione degli esami.
- Il ricevimento settimanale è accessibile agli studenti senza prenotazione.
- Gli esercizi del corso sono analoghi a quelli proposti all'esame, sono corredati dalla soluzione per consentirne la verifica, e consistono dello svolgimento indipendente di problemi applicativi degli argomenti trattati.

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

**Introduzione.** Docente, dispense, compiti a casa e le loro soluzioni, ricevimento degli studenti, esami. Approcci alla professione e alla formazione, obiettivi educativi, consigli di studio, insegnanti e studenti, sul tuo lavoro. Il contesto internazionale di ricerca e sviluppo. Materiale di base utile, testi di riferimento. Come documentare e presentare il tuo lavoro. Alcune utili informazioni sui programmi aerospaziali (dalla "Augustine Law").

**Fondamenti di propulsione di razzo.** Sistemi e tecnologie di propulsione a razzo; bilancio di massa, quantità di moto ed energia; prestazioni del razzo libero; parametri di prestazione; razzi singoli e multistadio; ottimizzazione dei razzi multistadio; ottimizzazione del razzo elettrico.

**Missione dello Space Shuttle.** Space Shuttle System; navigazione e volo; guida, navigazione e controllo; ascesa in orbita, operazioni e manovre orbitali; rientro; atterraggio; funzioni e requisiti in orbita.

**Propulsione dello Space Shuttle.** Sistema di propulsione SSME: Space Shuttle Main Engine (SSME), serbatoio esterno, booster a razzo solido, sottosistema di propulsione principale, sottosistema di manovra orbitale, sistema di controllo della reazione; dispositivi di combustione dello SSME, testa di potenza, accenditori, pre-bruciatori, iniettori, camera di combustione e ugello; trasferimento di calore nel SSME.

**Turbomacchine spaziali.** Turbopompe dello SSME, funzionamento, parametri e progetto, prestazioni di cavitazione e aspirazione; turbine, funzionamento, parametri e progetto dello SSME; requisiti del veicolo/motore; turbopompe di bassa/alta pressione dell'ossidante/combustibile; selezione, progetto, architettura, sviluppo; bilanciamento assiale; cuscinetti e guarnizioni, velocità critiche, rotodinamica; problemi di sviluppo e soluzioni.

**Analisi della missione.** Atmosfera, meccanica orbitale, orbite ellittiche, disturbi, manovre, trasferimenti impulsivi e a bassa spinta, lancio, ascesa in orbita, rientro in atmosfera.

**Prestazioni dei razzi a propellenti chimici.** Parametri caratteristici delle prestazioni; ugelli: espansione ottimale, configurazione del flusso, ugelli a campana, limiti operativi, ottimizzazione, ugelli non convenzionali; razzi a gas freddo.

**Razzi a propellente solido.** Architettura, generalità e classificazioni; propellenti solidi, combustione, instabilità, transitori di accensione, effetti di flusso a due fasi, trasferimento di calore, protezioni termiche.

**Razzi propellenti liquidi.** Architettura, generale e classificazioni; propellenti liquidi, mono-, bi- e tri-propellente, combustione, prestazioni, effetti di non equilibrio, iniezione, dimensionamento della camera di combustione, instabilità (meccanismi di iniezione e spinta), gestione e cicli del propellente, serbatoi e "sloshing" del propellente, raffreddamento rigenerativo.

**Turbomacchine.** Informazioni generali, tipi e architetture, equazione di Eulero, efficienze, tensioni e materiali, triangoli di velocità, parametri caratteristici, similitudine; turbopompe, induttori, compressori, turbine e turbine idrauliche. Macchine assiali: velocità del flusso, lame, forze del fluido sulle cascate del profilo, perdite; compressori: instabilità del flusso; turbine: grado di reazione, distributori bloccati, temperature di ristagno. Macchine radiali: schiere radiali, velocità di scorrimento.

**Flussi 1D non stazionari in condotti instabili.** Flussi comprimibili: equazioni generali, proprietà totali o di stagnazione. Flussi non stazionari in

## UNIVERSITÀ DI PISA

condotti: velocità sonica in condotti conformi, equazioni di continuità e di momento, flussi incomprimibili in condotti rigidi. Perdite in flussi stazionari in tubi, espansioni improvvise, diffusori conici, ingressi e contrazioni, componenti delle tubazioni. Oscillazioni di flusso di piccola ampiezza: formulazione della matrice di trasferimento dinamico per fluidi incomprimibili/comprimibili in condotti rigidi, accumulatori di pressione, valvole a farfalla, condotti dritti con/senza flusso medio e perdite.

**Razzi ibridi.** Generalità, velocità di regressione e sua distribuzione assiale, rapporto ossidante/combustibile, lunghezza del grano, storia della combustione, pressione della camera, spinta, effetti della temperatura del grano, radiazione termica e velocità di reazione.

**Flussi bifase e cavitazione.** Equazioni generali, di conservazione e costitutive, cambiamenti di fase, bollitura e cavitazione, nucleazione, dinamica delle bolle, forme di cavitazione e parametri di somiglianza, modelli di liquido/gas, liquido/gas/vapore e liquido/vapore, effetti termici, simulazione di flussi cavitanti.

**Turbopompe a cavitazione.** Parametri caratteristici e di similitudine, prestazioni di pompaggio e aspirazione, cavitazione termica. Instabilità indotte dalla cavitazione: classificazione e caratteristiche, cavitazione rotante, oscillazioni autoindotte, forze rotodinamiche, fluttuazioni del flusso del sistema di alimentazione, oscillazioni propulsivamente accoppiate (POGO).

**Radiazione termica.** Radiazioni elettromagnetiche; trasferimento di energia radiante, radiazione termica, 1a e 2a legge della radiazione di Kirchhoff, radiazione di corpo nero. Proprietà radiative dei materiali: emittenze, assorbimenti, riflettenze, trasmissioni. Reti di radiazione: radiosità e fattori di vista; cavità con superfici grigie, nere e non grigie. Radiazioni in mezzi debolmente assorbenti, assorbimento monocromatico, emissioni e trasmissioni di gas; assorbività totale, emittenza e trasmissione di gas multicomponenti. Lunghezze equivalenti e geometriche di radiazione tra due superfici radianti, emissione omnidirezionale di un gas su una o più superfici; cavità con mezzo partecipante e superfici grigie, camera chiusa con mezzo otticamente sottile; radiazione di fiamme.

### Bibliografia e materiale didattico

#### Riferimenti

Dispense del docente.

I riferimenti bibliografici consigliati per l'approfondimento dei principali argomenti trattati nel corso sono:

Hill P., Peterson C., 1992, "Mechanics and Thermodynamics of Propulsion", Addison Wesley, 2nd ed., ISBN 0-201-14659-2.

Sutton G. P., 1992, "Rocket Propulsion Elements", John Wiley & Sons, ISBN 0-471-52938-9.

Huzel D. K. and Huang D. H., 1992, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA, ISBN 1563470136.

Oates G. C., 1988, "Aerothermodynamics of Gas Turbine and Rocket Propulsion", AIAA Education Series, ISBN 0930403347.

Humble R.W., Henry G.N. and Larson W.J., 1995, "Space Propulsion Analysis and Design", McGraw Hill College Custom Series, ISBN 0-07-031320-2.

Chiaverini M.J. and Kuo K. editors, 2007, "Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion", AIAA, Progress in Aeronautics and Astronautics, Vol. 218.

Kerrebrock, 1992, "Aircraft Engines and Gas Turbines", Cambridge University Press, 2nd edition, ISBN 0262111624

Kuo K. K. and Summerfield M., editors, 1984, "Fundamentals of Solid-Propellant Combustion", AIAA, Vol. 90.

Yang V. Brill T.B., Wu-Zhen Ren editors, 2000, "Solid Propellant Chemistry, Combustion and Motor Interior Ballistics", AIAA, Progress in Aeronautics and Astronautics, Vol. 185.

Yang V. & Anderson W., editors, 1995, "Liquid Rocket Engine Combustion Instability", AIAA, Vol. 169, ISBN 1-56347-183-3.

Oates G.C., 1984, "Aerothermodynamics of Aircraft Engine Components", AIAA Education Series, ISBN 0-91592-887-6.

Lakshminarayana B., 1996, "Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachines", John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-47185-546-4.

Brennen C. E., 1995, "Cavitation and Bubble Dynamics", Oxford University Press, ISBN 0-19509-409-3.

Brennen C. E., 1995, "Hydrodynamics of Pumps", Concepts ETI, Inc., P.O. Box 643, Norwich, Vt, USA 05055, ISBN 0-19856-442-2.

Childs, D., 1993, "Turbomachinery Rotordynamics", John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-47153-840-X.

Murthy S.N.B. and Murray E.T., ed., 1996, "Developments in High-Speed Vehicle Propulsion Systems", Progress in Aeronautics and Astronautics, Vol. 165, AIAA, ISBN 1-56347-176-0.

Callen H.B., 1985, "Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics", John Wiley & Sons, ISBN 0-47186-256-8.

Saberski R.H., Acosta A.J., Hauptmann E.G., 1989, "Fluid Flow", Macmillan Publishing Co.

Currie I. G., 1993, "Fundamental Mechanics of Fluids", McGraw-Hill.

White F.E., 1974, "Viscous Fluid Flow", McGraw Hill, ISBN 0-07069-710-8.

Eckert & Drake, 1972, "Analysis of Heat and Mass Transfer", MacGraw Hill Inc. - ISBN 0-89116-553-3.

Kuo K. K., 1986, "Principles of Combustion", John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-47109-852-3.

Morse P.M. & Ingard K.U., 1968, "Theoretical Acoustics", Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, USA.

Turns, S.R., 1996, "An Introduction to Combustion", McGraw Hill, ISBN 0-07-911812-7.

Vincenti W.G. & Kruger C.H., 1986, "Physical Gas Dynamics", Krieger Publ. Co., Malabar, FL, USA.

Anderson J. D. Jr., 1990, "Modern Compressible Flow with Historical Perspective", McGraw-Hill, ISBN 0-07100-665-6.

Anderson J. D. Jr., 1989, "Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics", McGraw Hill, ISBN 0-07100-668-0.

Churchill, Brown & Verhey, 1974, "Complex Variables and Applications", McGraw Hill.

Hildebrand F.B., 1976, Advanced Calculus for Applications Prentice-Hall

De Luca L. Price E.W., Summerfield M., editors, 1992, "Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 143, AIAA, ISSN 0079-6050.

Jensen G.E., Netzer D.W., editors, 1991, "Numerical Approaches to Combustion Modeling", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 135, AIAA, ISBN 1-56347-004-7/91.

Yang V., Habibaqillah M., Hulka J., Popp M., editors, 2004, "Liquid Rocket Thrust Chambers: Aspects of Modeling, Analysis and Design", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 200, AIAA, ISBN 1-56347-223-6.

Lefebvre A.H., 1989, "Atomization and Sprays", Taylor & Francis, ISBN 0-89116-603-3.

Koster J.N., Sani R.L., editors, 1990, "Low-Gravity Fluid Dynamics and Transport Phenomena", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 130, AIAA, ISBN 1-56347-223-6.

Bayvel L., Orzechowski, 1993, "Liquid Atomization", Taylor & Francis, ISBN 0-89116-959-8.

Ehrich F., 1999, "Handbook of Rotordynamics", Krieger Publishing Co., Malabar, Florida, USA.

Oran E.S., Boris J.P., editors, 1996, "Tactical Missile Propulsion", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 170, AIAA, ISBN



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

1-56347-118-3.

### Indicazioni per non frequentanti

Si consiglia di integrare lo studio con lo svolgimento degli esercizi proposti, reperibili su e-learn.

I contenuti del corso sono ogni anno in parte rielaborati. Si consiglia di tenersi aggiornati sulle ultime versioni dei documenti a supporto delle lezioni tramite e-learn e consultando il docente.

### Modalità d'esame

Esame dello studente consistente in:

- Illustrazione e discussione degli argomenti trattati nel corso.
- La soluzione (scritta o sulla lavagna) di uno o più problemi relativi al programma del corso.

L'uso del materiale distribuito dal docente durante il corso è consentito, salvo diversa indicazione al momento dell'assegnazione del problema.

L'esame ha lo scopo di verificare il grado di comprensione degli argomenti del corso e la capacità di utilizzarlo per sviluppare soluzioni originali.

### Pagina web del corso

<https://elearn.ing.unipi.it>

*Ultimo aggiornamento 14/09/2018 17:18*