



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
Ingegneria
e Architettura



Corso di MACCHINE [065IN] Corso di MACCHINE MARINE [100IN]

Prof. Rodolfo Taccani

Prof. Lucia Parussini

Prof. Marco Bogar

A.A. 2023-2024

Teoria monodimensionale delle turbomacchine

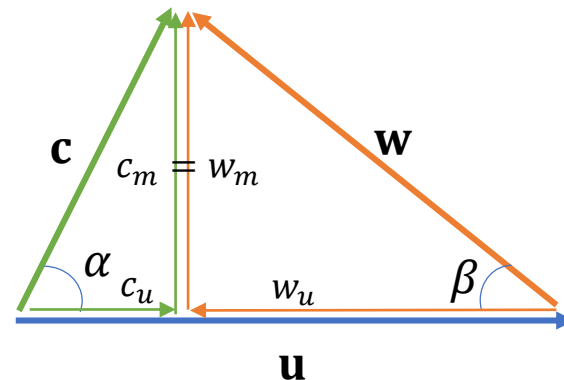
TURBOMACCHINE

Triangolo di velocità $\mathbf{c} = \mathbf{w} + \mathbf{u}$

$$|\mathbf{c}|^2 = c^2 = c_u^2 + c_m^2$$
$$|\mathbf{w}|^2 = w^2 = w_u^2 + w_m^2$$

$$c_u = c \cos \alpha \quad w_u = w \cos \beta$$
$$c_m = c \sin \alpha \quad w_m = w \sin \beta$$
$$c_m = c_u \tan \alpha \quad w_m = w_u \tan \alpha$$
$$c_u = u - w_u = u - c_m \cot \beta$$

Teorema di Carnot $w^2 = c^2 + u^2 - 2uc \cos \alpha$



Teoria monodimensionale delle turbomacchine

LAVORO EULERIANO trasmesso dalle pale della girante della macchina operatrice al fluido (positivo se entra nel volume di controllo)

$$l_i = u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

LAVORO EULERIANO trasmesso dal fluido alle pale della girante della macchina motrice (positivo se esce dal volume di controllo)

$$l_i = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

l_i = variazione di en. cinetica nel moto assoluto +
variazione di potenziale centrifugo -
variazione di en. cinetica nel moto relativo

Teoria monodimensionale delle turbomacchine

variazione di en. cinetica nel moto assoluto ($\neq 0$)

macchina operatrice

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} > 0 \quad c_2 > c_1$$

macchina motrice

$$\frac{c_1^2 - c_2^2}{2} > 0 \quad c_1 > c_2$$

variazione di potenziale centrifugo ($= 0$ nelle macchine assiali)

Nelle macchine radiali $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} > 0$ se $r_1 < r_2 \rightarrow u_1 < u_2$ girante centrifuga, macchina operatrice

Nelle macchine radiali $\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} > 0$ se $r_2 < r_1 \rightarrow u_2 < u_1$ girante centripeta, macchina motrice

variazione di en. cinetica nel moto relativo

In una macchina ad azione assiale $w_1 = w_2$ ($\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = 0$)

In una macchina a reazione operatrice $\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} < 0 \rightarrow w_2 < w_1$ il flusso relativo decelera

In una macchina a reazione motrice $\frac{w_1^2 - w_2^2}{2} < 0 \rightarrow w_2 > w_1$ il flusso relativo accelera

Grado di reazione delle turbomacchine

Grado di reazione

rapporto tra l'energia statica elaborata dalla girante e il lavoro totale da essa svolto $\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta h_t}$

Nello studio delle turbomacchine, il grado di reazione è un parametro adimensionale definito come il rapporto fra il salto di entalpia (e quindi, in ipotesi di isoentropicità, di pressione) nella sola parte rotorica e quello totale di un intero stadio della turbomacchina. Indica quindi la ripartizione di tale salto tra la parte fissa e quella mobile.

Grado di reazione delle turbomacchine

Grado di reazione

Macchina termica operatrice

Trascurando le variazioni di quota ($\Delta h_t = \Delta h_0$) e indicando con

1 sezione di ingresso del rotore, 2 sezione di uscita del rotore

2 sezione di ingresso dello statore, 3 sezione di uscita dello statore:

In un organo rotorico adiabatico: $\Delta h_0 = l_i$

$$h_2 + \frac{1}{2}c_2^2 - h_1 - \frac{1}{2}c_1^2 = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$
$$\rightarrow \Delta h_R = h_2 - h_1 = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

In un organo statorico adiabatico $l_i = 0$: $\Delta h_0 = 0$

$$h_3 + \frac{1}{2}c_3^2 - h_2 - \frac{1}{2}c_2^2 = 0 \quad \Delta h_S = \frac{c_2^2 - c_3^2}{2} > 0$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_R}{\Delta h_t} = \frac{\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}}{l_i} = 1 - \frac{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}}{l_i}$$

$\varepsilon = 0 \rightarrow \Delta h_R = 0$ nel rotore e

$$\frac{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}}{l_i} = 1 \rightarrow l_i = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} > 0$$

$\varepsilon > 0 \rightarrow \Delta h_R = h_2 - h_1 > 0$ nel rotore e

$$\frac{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}}{l_i} < 1 \rightarrow l_i > \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} > 0$$

Grado di reazione delle turbomacchine

Grado di reazione

Macchina idraulica operatrice

Trascurando le variazioni di quota ($\Delta p_t = \Delta p_0$) e indicando con

1 sezione di ingresso del rotore, 2 sezione di uscita del rotore

2 sezione di ingresso dello statore, 3 sezione di uscita dello statore:

In un organo rotorico adiabatico (in assenza di irreversibilità): $\Delta p_0 = l_i$

$$\frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}c_2^2 - \frac{p_1}{\rho} - \frac{1}{2}c_1^2 = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$
$$\rightarrow \frac{\Delta p_R}{\rho} = \frac{p_2 - p_1}{\rho} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

In un organo statorico adiabatico $l_i = 0$: $\Delta p_0 = 0$

$$\frac{p_3}{\rho} + \frac{1}{2}c_3^2 - \frac{p_2}{\rho} - \frac{1}{2}c_2^2 = 0 \quad \frac{\Delta p_S}{\rho} = \frac{c_2^2 - c_3^2}{2} > 0$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta p_R}{\Delta p_t} = \frac{\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}}{l_i} = 1 - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2l_i}$$

$\varepsilon = 0 \rightarrow \Delta p_R = 0$ nel rotore e

$$\frac{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}}{l_i} = 1 \rightarrow l_i = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} > 0$$

$\varepsilon > 0 \rightarrow \Delta p_R = p_2 - p_1 > 0$ nel rotore e

$$\frac{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}}{l_i} < 1 \rightarrow l_i > \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} > 0$$

Grado di reazione delle turbomacchine

Grado di reazione

Macchina termica motrice

Trascurando le variazioni di quota ($\Delta h_t = \Delta h_0$) e indicando con

0 sezione di ingresso dello statore, 1 sezione di uscita dello statore

1 sezione di ingresso del rotore, 2 sezione di uscita del rotore:

In un organo statorico adiabatico $l_i = 0$: $\Delta h_0 = 0$

$$h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 - h_0 - \frac{1}{2}c_0^2 = 0 \quad \Delta h_s = \frac{c_1^2 - c_0^2}{2} > 0$$

In un organo rotorico adiabatico: $\Delta h_0 = l_i$

$$h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 - h_2 - \frac{1}{2}c_2^2 = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$
$$\rightarrow \Delta h_R = h_1 - h_2 = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_R}{\Delta h_t} = \frac{\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}}{l_i} = 1 - \frac{c_1^2 - c_2^2}{2l_i}$$

$\varepsilon = 0 \rightarrow \Delta h_R = 0$ nel rotore e

$$\frac{\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}}{l_i} = 1 \rightarrow l_i = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} > 0$$

$\varepsilon > 0 \rightarrow \Delta h_R = h_1 - h_2 > 0$ nel rotore e

$$\frac{\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}}{l_i} < 1 \rightarrow l_i > \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} > 0$$

Grado di reazione delle turbomacchine

Grado di reazione

Macchina idraulica motrice

Trascurando le variazioni di quota ($\Delta p_t = \Delta p_0$) e indicando con

0 sezione di ingresso dello statore, 1 sezione di uscita dello statore

1 sezione di ingresso del rotore, 2 sezione di uscita del rotore :

In un organo statorico adiabatico $l_i = 0$: $\Delta p_0 = 0$

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 - \frac{p_0}{\rho} - \frac{1}{2}c_0^2 = 0 \quad \frac{\Delta p_s}{\rho} = \frac{c_1^2 - c_0^2}{2} > 0$$

In un organo rotorico adiabatico (in assenza di irreversibilità): $\Delta p_0 = l_i$

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 - \frac{p_2}{\rho} - \frac{1}{2}c_2^2 = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

$$\rightarrow \frac{\Delta p_R}{\rho} = \frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta p_R}{\Delta p_t} = \frac{\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}}{l_i} = 1 - \frac{c_1^2 - c_2^2}{l_i}$$

$\varepsilon = 0 \rightarrow \Delta p_R = 0$ nel rotore e

$$\frac{\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}}{l_i} = 1 \rightarrow l_i = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} > 0$$

$\varepsilon > 0 \rightarrow \Delta p_R = p_1 - p_2 > 0$ nel rotore e

$$\frac{\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}}{l_i} < 1 \rightarrow l_i > \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} > 0$$

Grado di reazione delle turbomacchine

Macchina operatrice

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} > 0 \rightarrow c_2 > c_1 = c_{m1}$$

radiale $u_2 > u_1$

assiale $u_2 = u_1 = u$

ad azione

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = 0$$

radiale $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} > 0 \rightarrow w_2 > w_1$

assiale $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = 0 \rightarrow w_2 = w_1$

a reazione

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} > 0$$

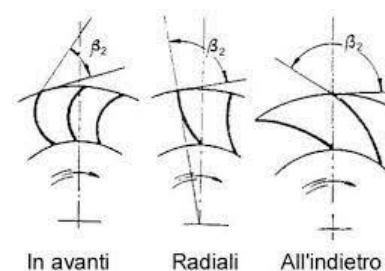
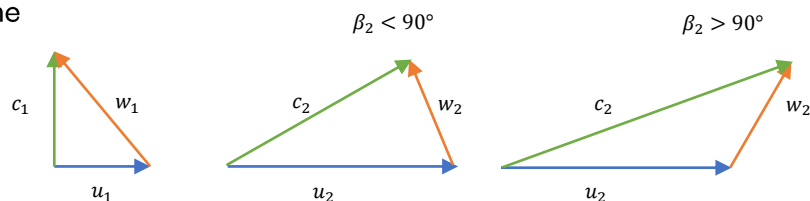
radiale $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} > 0 > \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \quad w_2 < w_1$

assiale $\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} < 0 \rightarrow w_2 < w_1$

Grado di reazione delle turbomacchine

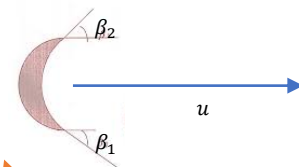
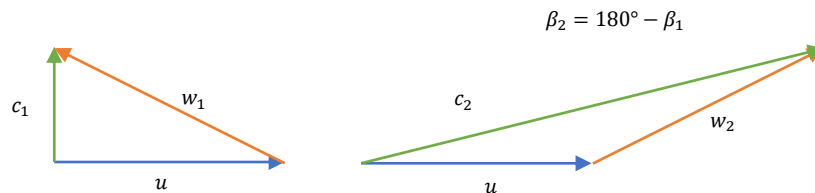
Macchina operatrice radiale a reazione

$$\begin{aligned} u_2 &> u_1 \\ c_2 &> c_1 = c_{m1} \\ w_2 &< w_1 \end{aligned}$$



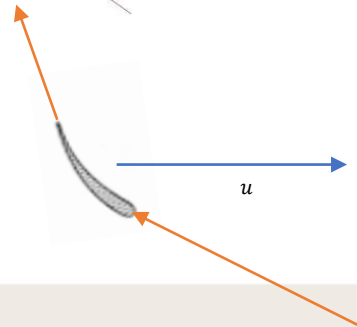
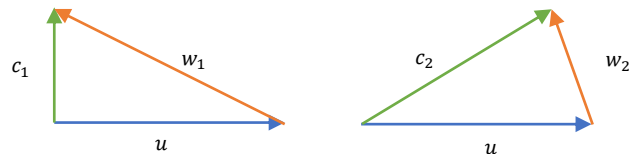
Macchina operatrice assiale
ad azione

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1 = u \\ c_2 &> c_1 = c_{m1} \\ w_2 &= w_1 \end{aligned}$$



a reazione

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1 = u \\ c_2 &> c_1 = c_{m1} \\ w_2 &< w_1 \end{aligned}$$



Grado di reazione delle turbomacchine

Macchina motrice

$$\frac{c_1^2 - c_2^2}{2} > 0 \rightarrow c_1 > c_2 = c_{m2}$$

radiale $u_1 > u_2$

assiale $u_1 = u_2 = u$

ad azione

$$\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} = 0$$

radiale $\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} > 0 \rightarrow w_1 > w_2$

assiale $\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} = 0 \rightarrow w_1 = w_2$

a reazione

$$\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} > 0$$

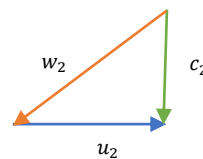
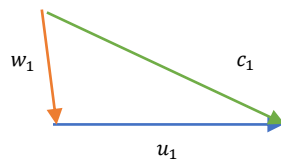
radiale $\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} > 0 > \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \rightarrow w_2 > w_1$

assiale $\frac{w_1^2 - w_2^2}{2} < 0 \rightarrow w_2 > w_1$

Grado di reazione delle turbomacchine

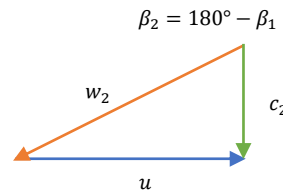
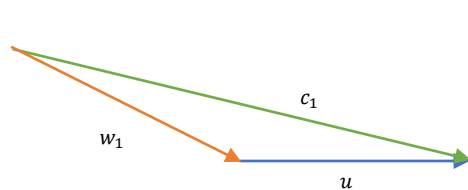
Macchina motrice radiale a reazione

$$\begin{aligned} u_1 &> u_2 \\ c_1 &> c_2 = c_{m2} \\ w_2 &> w_1 \end{aligned}$$



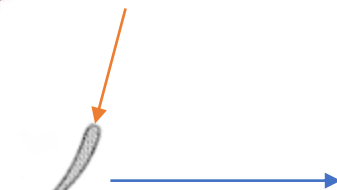
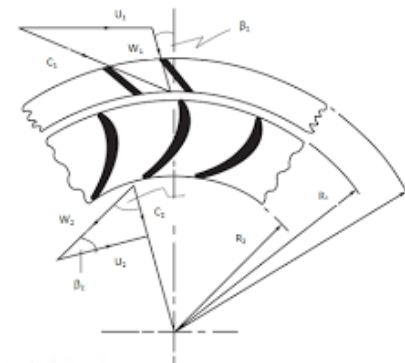
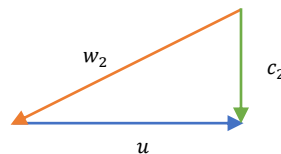
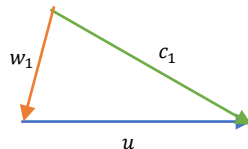
Macchina motrice assiale
ad azione

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1 = u \\ c_1 &> c_2 = c_{m2} \\ w_2 &= w_1 \end{aligned}$$



a reazione

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1 = u \\ c_1 &> c_2 = c_{m2} \\ w_2 &> w_1 \end{aligned}$$





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**