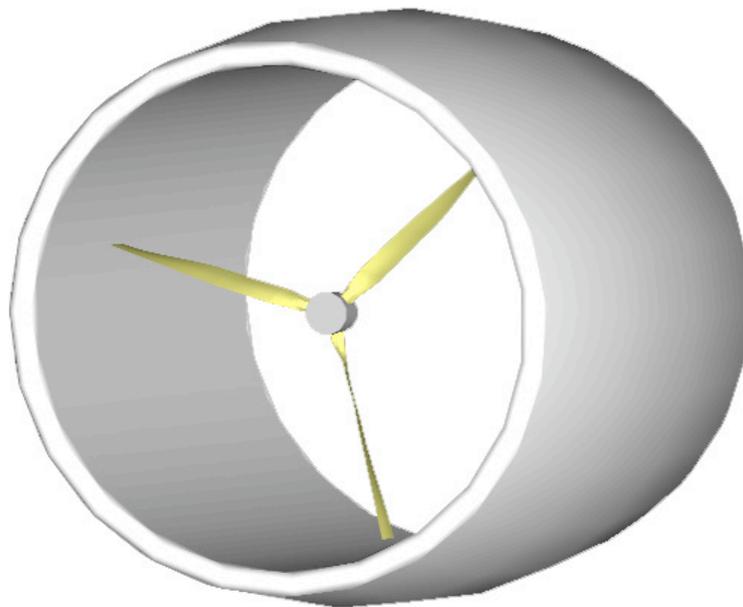


AIRACRETT
TOP 51

TEORIA

DELLA VENTOLA INTUBATA



di *Giacomo Sacchi*

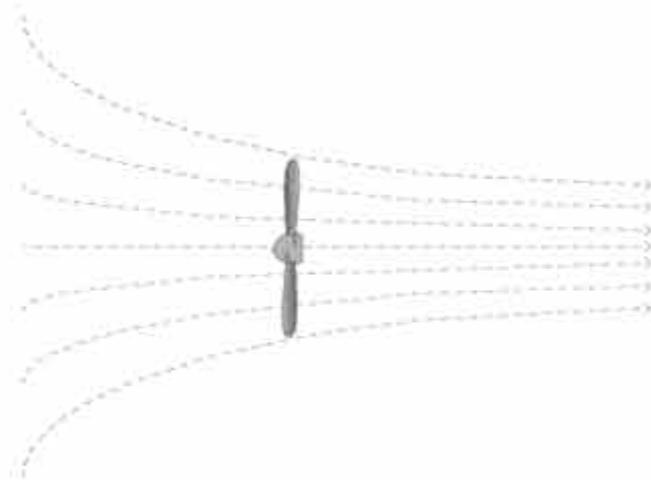
giacomo@autogiro.it

agosto, 2009

DIFFERENZE TRA ELICA LIBERA ED ELICA INTUBATA

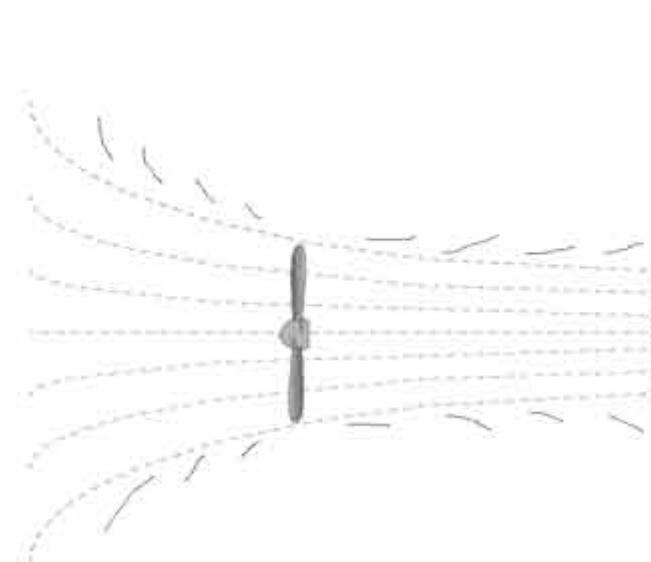
Il **flusso d'aria** che transita in un'elica nella sua forma "idealizzata" se:

- è delimitato da un confine netto con l'aria circostante a forma di "quadratica";
- l'aria accelera in modo costante lungo il percorso;
- l'aria ha pari velocità in ogni sezione di flusso;
- la densità dell'aria è costante e uguale a quella circostante;



Per il principio della conservazione della massa (con ipotesi di densità costante) se la sezione dimezza la velocità raddoppia, dato che l'area è funzione del quadrato del raggio ne consegue che la forma del confine deve essere una quadratica.

Il flusso reale è meno regolare, in quanto la depressione che inghiotte l'aria nell'elica la attira da ogni direzione e questo non permette un confine netto tra



flusso e aria circostante, quindi le accelerazioni e le velocità del flusso sono disomogenee tra centro e zona periferica.

L'aria del flusso in uscita dall'elica è spinta in ogni direzione dalla pressione.

In condizioni particolarmente degenerate la stessa aria soffiata viene nuovamente aspirata dall'elica generando anelli vorticosi che riducono drasticamente la spinta.

Il perchè di questo è nelle proprietà dell'aria come: viscosità, attriti, legami molecolari, ecc.

Il peggioramento del flusso si ha soprattutto per basse velocità e per eliche piccole in proporzione alla potenza applicata.

In questi casi, usare una tubazione per indirizzare il flusso nell'elica, permette di ridurre queste inefficienze.

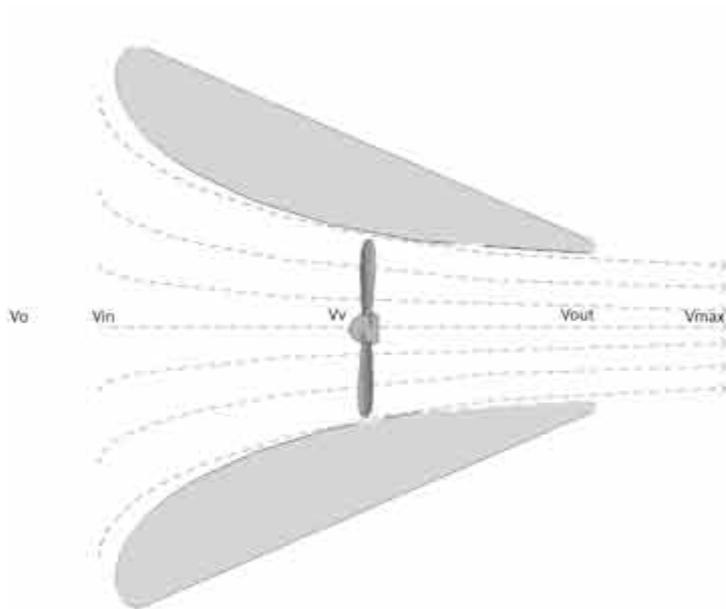
Però ciò comporta un maggiore peso e una maggiore complessità costruttiva, inoltre il dimensionamento del tubo è ottimizzato per una specifica condizione e allontanandosi da questa le perdite aumentano notevolmente.

Generalmente l'impiego di eliche intubate è reso necessario dalla mancanza di spazio per eliche più grandi o dalla volontà di massimizzare la spinta statica o per motivi di sicurezza in quanto si proteggono le persone dal contatto con l'elica.

ANALISI DEL FLUSSO DELLA VENTOLA INTUBATA

I parametri più importanti sono:

- ρ_0 = densità dell'aria
- V_0 = velocità dell'aria circostante
- A_{in} = area ingresso
- A_v = area ventola
- A_{out} = area uscita
- V_{in} = velocità media dell'aria che entra
- V_v = velocità all'elica
- V_{out} = velocità media dell'aria che esce
- V_{max} = velocità massima del flusso
- Δp = variazione di pressione tra prima e dopo l'elica



IPOTESI DENSITA' DELL'ARIA (ρ) COSTANTE

La prima ipotesi da fissare è che la densità resti costante ed uguale a quella dell'aria circostante. Questa è una approssimazione tanto più legittima quanto più il flusso ha una velocità molto minore di quella del suono (circa 1200 km/h). Inoltre la pressione generata dall'elica non deve raggiungere valori elevatissimi, perchè causerebbe accelerazioni dell'aria tali da indurla a comprimersi per vincere la sua stessa inerzia.

FLUSSO DI MASSA (m')

Quantità d'aria che transita nell'elica (A_v) nell'unità di tempo (Kg/sec)

SPINTA (T)

La spinta è data esclusivamente dalla quantità d'aria che viene accelerata

$$T = \text{massa} \times \text{accelerazione} = m' (V_{max} - V_0) = m' \Delta V$$

Questa formula si riferisce alla spinta dell'intero sistema elica-tubo, mentre l'elica genera una spinta leggermente superiore che però viene persa in attriti tra aria e tubo.

POTENZA DELLA SPINTA (Pt)

$$P_t = \frac{1}{2} m' (V_{\max}^2 - V_0^2) = T V_0 + \frac{1}{2} T (V_{\max} - V_0)$$

Ovviamente la potenza aumenta con la spinta che si vuole generare, ma aumenta 'inutilmente' anche con ΔV e V_0 . Si traggono le seguenti considerazioni:

1. con ΔV costante ed aumentando m' ottengo stessa spinta con meno potenza, questo lo si ottiene con A_v grande, da massimizzare sempre nei limiti progettuali;
2. con l'aumento di V_0 ci serve più potenza; L'aria che entra nel tubo deve essere lenta ma se siamo noi a rallentarla si spreca energia che non viene più completamente recuperata, invece se l'aria è comunque rallentata (es. strato limite sulle ali) si ha un maggiore rendimento.

VELOCITA' NELLA CONDOTTA

La velocità dell'aria nella condotta è data solamente dal principio di conservazione della massa:

$$\rho_{in} A_{in} V_{in} = \rho_v A_v V_v = \rho_{out} A_{out} V_{out}$$

ma con ρ costante:

$$A_{in} V_{in} = A_v V_v = A_{out} V_{out}$$

$$V_{in} = (m'/\rho)/A_{in}; \quad V_v = (m'/\rho)/A_v; \quad V_{out} = (m'/\rho)/A_{out};$$

Si noti che V_{in} è generalmente diverso da V_0 e V_{out} non ha legami con V_{\max} ;

Le velocità V_{in} , V_v , V_{out} dipendono dalle sezioni del tubo e non direttamente da V_0 e V_{\max} ; Inoltre si ricorda che sono velocità medie, per esempio il flusso 'ideale' potrebbe passare solo nella parte centrale della sezione e la restante aria essere quasi ferma. Nel caso di flusso reale interverrebbero inoltre le resistenze di scorrimento a dare una distribuzione a campana della velocità nella sezione.

Si ipotizza che la velocità nella sezione dell'elica (V_v) sia esattamente la stessa appena prima e appena dopo e questa è una approssimazione accettabile.

Per una buona efficienza le velocità del flusso (in particolare V_{\max}) siano sempre molto minori della velocità del suono (circa 1200 km/h).

PRESSIONI NELLA CONDOTTA

L'azione dell'elica è di generare una depressione appena prima ($p.v1$) che attira l'aria nella condotta e una pressione appena dopo ($p.v2$) tale da accelerare l'aria in uscita.

$\Delta p = p.v2 - p.v1$, questa differenza di pressione genera la spinta dell'elica F ($>T$ per sopperire alle perdite per attrito nel tubo)

$$F = \Delta p Av$$

Con Δp elevate si generano più inefficienze e si può arrivare a comprimere l'aria, ma ricordiamoci che vogliamo realizzare un'elica intubata non un compressore.

La pressione in ingresso al tubo ($p.in$) e quella in uscita ($p.out$) variano con le sezioni e le velocità dell'aria in base all'equazione di Bernulli, che nelle ipotesi ρ costante e la condotta sia orizzontale (quindi senza variazioni di energia potenziale) si ha:

$$\frac{1}{2} \rho V_{in}^2 + p.in = \frac{1}{2} \rho Vv^2 + p.v1$$

$$\frac{1}{2} \rho Vv^2 + p.v2 = \frac{1}{2} \rho V_{out}^2 + p.out$$

I valori di pressione in ingresso ed uscita tendono alla pressione esterna (p_o) ma solo se le sezioni della condotta sono correttamente dimensionate a seguire il flusso e non ad ostacolarlo.

VORTICI (SWIRL)

La rotazione dell'elica genera spinta assiale (F) con una potenza (P_f), ma anche dei vortici che sono un effetto indesiderato in quanto sprecano potenza (P_s).

Potenza totale applicata all'elica: $P_t = P_f + P_s$

Per la progettazione si ipotizza una "distribuzione dei vortici liberi", cioè la velocità dei vortici aumenta linearmente allontanandosi dal centro dell'elica:

$$V_s = K / r \quad \omega_s = K / r^2 \quad \tau_s = m' K$$

K = costante di swirl; ricavabile sperimentalmente misurando la potenza applicata all'elica e l'effettiva spinta ottenuta; i valori vanno da 1 a 6;

La potenza dei vortici si ricava facendo l'integrale su A_v di $(\tau_s \times \omega_s)$ e si ottiene:

$$P_s = 2 \pi (m' K^2 / A_v) \ln (R_v / R_{hub})$$

R_v = raggio elica;

R_{hub} = raggio ogiva elica;

CARATTERISTICHE DEL CONDOTTO

Il **condotto d'ingresso** ha il solo scopo di convogliare l'aria all'elica in modo regolare introducendo meno attriti possibili e mantenendo il flusso laminare.

L'ingresso deve essere aerodinamicamente pulito, affusolato.

Le superfici devono essere lisce, regolare e con andamento del raggio delle sezioni a ridursi in modo quadratico.

La lunghezza del condotto d'ingresso è determinata dal grado di ottimizzazione si voglia raggiungere ad una determinata velocità.

Cioè, se si allunga il condotto fino ad avere velocità d'ingresso uguale alla velocità di avanzamento a cui vogliamo ottimizzare la spinta, si ottiene il massimo della resa in quella condizione, ma il rapido peggioramento dell'efficienza nelle altre velocità.

Il **condotto d'uscita** ha il compito invece di trasformare la pressione in velocità, come avviene nelle armi dove la pressione dell'esplosione viene trasformata grazie alla canna in velocità dell'ogiva.

Il condotto d'uscita deve essere sufficientemente lungo (bastano pochi decimetri) ma non troppo per non introdurre resistenze, inoltre la sezione non deve allargarsi.

Per avere dei vantaggi nel caso estremo di eliche intubate con condotte cortissime è necessario ostacolare il ritorno dell'aria dall'uscita all'ingresso (es. rotori di coda di alcuni elicotteri).

LA PROGETTAZIONE DELLA CONDOTTA

Si possono intraprendere diversi approcci, partendo da diversi vincoli, ma in ogni caso sarà probabilmente necessario partire con valori stimati e procedere a tentativi nella direzione degli aspetti da ottimizzare.

Il procedimento da me scelto prevede di decidere:

- il diametro dell'elica: il più grande possibile;
- la velocità V_0 dell'aria esterna a cui ottimizzare la spinta, potrebbe essere la velocità di crociera ma penalizzerebbe molto il decollo; Questa è una scelta da fare valutando il velivolo e la potenza installata;
- stimare la spinta voluta a V_0 ;

Ora si deve stimare il flusso di massa (m') ottimale, cioè quello che minimizza la potenza totale necessaria.

Primo metodo produce risultati migliori con V_0 basso o con A_e piccole:

P_{tot} = potenza per la spinta + potenza di swirl (non si possono ancora valutare le altre perdite come la resistenza del condotto in quanto non si conoscono ancora le velocità del flusso d'aria);

β = variabile di comodo;

$$P_s = 2 \pi (m' K^2 / A_v) \ln (R_v / R_{hub}) = \beta m'$$

$$T = m' \Delta V$$

$$P_{tot} = TV_0 + \frac{1}{2} T \Delta V + P_s$$

sostituendo:

$$P_{tot} = TV_0 + \frac{1}{2} T^2/m' + \beta m'$$

questa formula lega la potenza necessaria al flusso di massa, ma bisogna ancora minimizzare la potenza, quindi deriviamo in m' e poniamo uguale a zero.

$$m' = T / \sqrt{2 \beta}$$

Secondo metodo produce risultati migliori con V_0 alto o con A_e grandi

$$\mathbf{m' = \rho A_e V_0}$$

Dei due metodi si deve utilizzare il flusso di massa che richiede meno potenza.

Trovato m' ora si possono ricavare le varie velocità:

$$\mathbf{V_{in} = (m'/\rho)/A_{in}; \quad V_v = (m'/\rho)/A_v; \quad V_{out} = (m'/\rho)/A_{out}; \quad V_{max} = T/m' + V_0}$$

Queste velocità devono essere tutte molto minori della velocità del suono (circa 1200 km/h).

Inoltre si possono valutare le perdite di potenza per resistenza (P_r) dovute all'attrito dell'aria in presenza della condotta, che sono in funzione delle velocità.

Potenza da applicare all'elica:

$$\mathbf{P_f = T V_0 + \frac{1}{2} T^2/m' + P_s + P_r}$$

Se è eccessiva si può intervenire aumentando l'area della ventola e/o diminuendo la velocità di crociera (V_0).

La spinta fissata (T) è quella desiderata, ma l'elica deve produrre una spinta (F) maggiore per sopperire alle perdite per attrito (se considerate).

$$\mathbf{F = T ((P_f - P_s)/(P_f - P_s - P_r)) ((V_{max} + V_0)/2)/V_v}$$

La potenza di swirl va detratta in quanto non contribuisce alla spinta.

Un parametro che ci servirà per la progettazione dell'elica è:

$$\mathbf{\Delta p = F / A_v}$$

LA PROGETTAZIONE DELLA VENTOLA

Stabilita la condotta si ottiene la velocità dell'aria alla ventola (V_v) per la prefissata velocità (V_o) e la spinta (R) che si vuole ottenere.

Si fissa la velocità di rotazione della ventola (ω) in funzione del grafico di potenza/RPM del motore alla potenza necessaria (P_f), si ricorda che la velocità terminale ($V_t = \omega R$) deve essere minore della velocità del suono (circa 1200 km/h).

La pala deve essere divisa in sezioni in modo da ricavare per ognuna i valori di angolo di svergolamento e di corda.

Si ottengono le velocità relative (V_i) e gli angoli di incidenza (α_i) del flusso d'aria nelle varie sezioni della pala.

Ora si può decidere di applicare diverse scelte, come per esempio mantenere una corda fissa semplificando la pala ma non ottimizzando il risultato, oppure aumentare il numero delle pale per non avere corde troppo grandi, ecc.

Angoli di svergolamento e corde ottimali

Dal diagramma del profilo scelto per le pale si trova l'angolo di incidenza (α') tale per cui si ha il 75% del (C_p/C_r) massimo, in modo che il profilo lavori il più possibile in buona efficienza, ma riducendo il rischio di stalli.

Ricaviamo immediatamente l'angolo di svergolamento nelle varie sezioni = $\alpha_i + \alpha'$

La larghezza della corda (c_i) la si ricava da Δp , da C_p ad α' e dalla formula della portanza $P = \frac{1}{2} \rho S_i C_p V_i^2$.

S_i = superficie della sezione di pala

Buon lavoro.

Giacomo Sacchi

www.autogiro.it