Programa para diseñar máquinas axiales

Pedro Curto
Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República Oriental del Uruguay

18 de febrero de 2008

1. Contenido

L1661: Librería para instalar en la HP.
AXIAL: Directorio con el código del programa.

2. AxialHP

El siguiente programa calcula el largo de la cuerda del perfil seleccionado y el ángulo de pala. Según un método iterativo.

2.1. ConfigAxHP

Cuadro 1: Descripción de la configuración del programa.

Paso a paso:	para la iteración hasta que se oprima una tecla.
Marca:	pone una marca alrededor de la variable calculada, más recientemente.
Rend. Hidráulico:	fija el rendimiento hidráulico.
Rend. Volumétrico:	fija el rendimiento volumétrico.

2.2. Axiales

Se deben ingresar los siguientes datos:

1. N: Velocidad de giro (rpm).
2. H: Carga (m de columna del fluido).
3. Q: Caudal (m$^3/s$).
4. L: Largo de la cuerda de inicio para empezar la iteración (m).
5. D_i: Diámetro del cubo (diámetro interior del rotor en m).
6. D_e: Diámetro exterior del rotor (m).
7. Z: Cantidad de palas.
8. η_V: Rendimiento volumétrico inicial (o el rendimiento si esta seteado como constante).

9. η_H: Rendimiento hidráulico inicial (o el rendimiento si esta seteado como constante).

10. Criterio para el diámetro representativo o el diámetro representativo (D).

11. El perfil del alabe seleccionado o los siguientes datos:
    - p: Razón de la cuerda en la que se encuentra el espesor máximo del álabe.
    - α: Ángulo de ataque (en grados).
    - tg_λ: Tangente de λ (C_D/C_L).
    - C_L: Coeficiente de sustentación.

12. δ: Luz entre la carcasa y el rotor (si no esta seteado el rend. Volumétrico como conocido).

3. Ejemplo

A continuación se diseñará un ventilador de flujo axial con los siguientes datos:

Cuadro 2: Datos iniciales del programa.

Q	40 m$^3/s$	D_e	1.77m
H	22m	Z	5
N	750rpm	δ	0.013m
D_i	0.8m		

Con el perfil NACA4412 y tomando como criterio que $tg(\lambda)$ sea mínima se obtienen los siguientes resultados:

$$\alpha = 5.51°,\ tg(\lambda) = 0.0138,\ p = 0.12 \text{ y } C_L = 0.95$$

3.1. Calculo del rotor

Supongo $\eta_v = 0.97$
Supongo $l = 0.15m$

$$e_{max} = pl = 0.12 \cdot 0.15m = 0.018m$$

$$C = 1 - \frac{Ze_{max}}{\pi D} = 1 - \frac{50.018m}{\pi 1.373m} = 0.979$$

$$V_a = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}\left(D_e^2 - D_i^2\right)\eta_v C} = \frac{40\mathrm{m}^3/s}{\frac{\pi}{4}\left((1.77m)^2 - (0.8m)^2\right)0.97 \cdot 0.979} = 21.513\frac{m}{s}$$

supongo $\eta_H = 0.92$

$$H_t = \frac{H}{\eta_H} = \frac{22m}{0.92} = 23.913m$$

$$u = \frac{\pi DN}{60} = \frac{\pi}{60}\frac{1}{rpm \cdot s}1.373m \cdot 750rpm = 53.918\frac{m}{s}$$

$$\Delta V_u = \frac{gH_t}{u} = g \cdot \frac{23.913m}{53.918\frac{m}{s}} = 4.349\frac{m}{s}$$

$$\mathrm{tg}\left(\beta_\infty\right) = \frac{V_a}{u - \frac{\Delta V_u}{2}} = \frac{21.513\frac{m}{s}}{53.918\frac{m}{s} - \frac{4.349\frac{m}{s}}{2}} = 0.416 \qquad \Longrightarrow \qquad \beta_\infty = 22.59°$$

$$V_\infty = \sqrt{\left(u - \frac{\Delta V_u}{2}\right)^2 + V_a^2} = \sqrt{\left(53.918\frac{m}{s} - \frac{4.349\frac{m}{s}}{2}\right)^2 + \left(21.513\frac{m}{s}\right)^2} = 56.037\frac{m}{s}$$

$$\eta_H = 1 - \frac{V_\infty}{u\,\mathrm{sen}\left(\beta_\infty\right)}\frac{1}{\frac{1}{\mathrm{tg}(\beta_\infty)} + \frac{1}{\mathrm{tg}(\lambda)}} = 1 - \frac{56.037\frac{m}{s}}{53.918\frac{m}{s}\,\mathrm{sen}\left(22.59°\right)}\frac{1}{\frac{1}{0.416)} + \frac{1}{0.0138}} = 0.964$$

Segunda iteración para el cálculo del rendimiento hidráulico.

$$H_t = \frac{H}{\eta_H} = \frac{22m}{0.964} = 22.822m$$

$$\Delta V_u = \frac{gH_t}{u} = \frac{g \cdot 22.822m}{53.918\frac{m}{s}} = 4.151\frac{m}{s}$$

$$\mathrm{tg}\left(\beta_\infty\right) = \frac{V_a}{u - \frac{\Delta V_u}{2}} = \frac{21.513\frac{m}{s}}{53.918\frac{m}{s} - \frac{4.151\frac{m}{s}}{2}} = 0.415 \qquad \Longrightarrow \qquad \beta_\infty = 22.54°$$

$$V_\infty = \sqrt{\left(u - \frac{\Delta V_u}{2}\right)^2 + V_a^2} = \sqrt{\left(53.918\frac{m}{s} - \frac{4.151\frac{m}{s}}{2}\right)^2 + \left(21.513\frac{m}{s}\right)^2} = 56.129\frac{m}{s}$$

$$\eta_H = 1 - \frac{V_\infty}{u\,\mathrm{sen}\left(\beta_\infty\right)}\frac{1}{\frac{1}{\mathrm{tg}(\beta_\infty)} + \frac{1}{\mathrm{tg}(\lambda)}} = 1 - \frac{56.129\frac{m}{s}}{53.918\frac{m}{s}\,\mathrm{sen}\left(22.54°\right)}\frac{1}{\frac{1}{0.415)} + \frac{1}{0.0138}} = 0.964$$

Con $\eta_H = 0.964$ obtengo $H_t = 22.822m$

$$\beta_p = \beta_\infty + \alpha = 22.54° + 5.51° = 28.05°$$

$$t = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi \cdot 1.373m}{5} = 0.863m$$

$$H_t = \frac{l}{t}\frac{u}{V_a}\frac{V_\infty^2}{2g}kC_L\,\mathrm{sen}\left(\beta_\infty\right)\left(1 + \frac{\mathrm{tg}\left(\lambda\right)}{\mathrm{tg}\left(\beta_p\right)}\right)$$

conociendo $C_L\left(\alpha\right) = C_L\left(5.51°\right) = 0.95$ se tiene que

$$22.822m = \frac{l}{t}\frac{53.918\frac{m}{s}}{21.513\frac{m}{s}}\frac{\left(56.129\frac{m}{s}\right)^2}{2g}k \cdot 0.95 \cdot \mathrm{sen}\left(22.54°\right)\left(1 + \frac{0.0138}{0.533}\right)$$

o bien

$$22.822 = \frac{lk}{t}151.482 \qquad \Longrightarrow \qquad k = 0.151\frac{t}{l}$$

intersectando esta recta en el ábaco de Weining se obtiene $k = 1$ por lo tanto $l = 0.130m$

Recalculo l

$$l = 0.13m \quad \Rightarrow e_{max} = 0.016m \quad \Rightarrow C = 0.981 \quad \Rightarrow V_a = 21.470\frac{m}{s}$$

Supongo $\eta_H = 0.964$

$$H_t = 22.822m \quad \Rightarrow \Delta V_u = 4.151\frac{m}{s} \quad \Rightarrow \text{tg}\left(\beta_\infty\right) = 0.414 \quad \Rightarrow \beta_\infty = 22.45°$$

$$\Rightarrow V_\infty = 56.112\frac{m}{s} \quad \Rightarrow \eta_H = 0.964$$

$$\beta_p = \beta_\infty + \alpha = 22.45° + 5.51° = 27.96°$$

Luego se tiene que

$$k = 0.151\frac{t}{l}$$

intersectando esta recta en el ábaco de Weining se obtiene $k = 1$ por lo tanto $l = 0.130m$.

Conociendo $l = 0.130m$ recalculo η_v mediante la siguiente ecuación, considerando $\mu = 0.6$ [1]

$$Q' = \mu V_\infty \sqrt{kC_L}\delta l Z = 0.6 \cdot 56.112\frac{m}{s}\sqrt{0.95} \cdot 0.013m \cdot 0.13m \cdot 5 = 0.277\frac{m^3}{s}$$

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + Q'} = \frac{40\frac{m^3}{s}}{40\frac{m^3}{s} + 0.277\frac{m^3}{s}} = 0.993$$

Segundo paso de la iteración del rendimiento volumétrico. Con $\eta_v = 0.993$ tenemos

$$l = 0.13m \quad \Rightarrow e_{max} = 0.016m \quad \Rightarrow C = 0.981 \quad \Rightarrow V_a = 20.972\frac{m}{s}$$

Supongo $\eta_H = 0.964$

$$H_t = 22.822m \quad \Rightarrow \Delta V_u = 4.151\frac{m}{s} \quad \Rightarrow \text{tg}\left(\beta_\infty\right) = 0.405 \quad \Rightarrow \beta_\infty = 22.05°$$

$$\Rightarrow V_\infty = 55.924\frac{m}{s} \quad \Rightarrow \eta_H = 0.963$$

segundo paso de la iteración del rendimiento hidráulico

$$H_t = 22.845m \quad \Rightarrow \Delta V_u = 4.155\frac{m}{s} \quad \Rightarrow \text{tg}\left(\beta_\infty\right) = 0.404 \quad \Rightarrow \beta_\infty = 22.00°$$

$$\Rightarrow V_\infty = 55.922\frac{m}{s} \quad \Rightarrow \eta_H = 0.963$$

$$\beta_p = \beta_\infty + \alpha = 22.00° + 5.51° = 27.51°$$

Luego se tiene que

$$k = 0.151\frac{t}{l}$$

[1] Los valores de la ecuación deben ser estimados en la punta del álabe, pero se aproximan a los de la sección significativa.

intersectando esta recta en el ábaco de Weining se obtiene $k = 1$ por lo tanto $l = 0.130m$.

$$Q' = \mu V_\infty \sqrt{kC_L}\delta l Z = 0.6 \cdot 55.922\frac{m}{s}\sqrt{0.95} \cdot 0.013m \cdot 0.13m \cdot 5 = 0.276\frac{m^3}{s}$$

$$\eta_v = \frac{Q}{Q+Q'} = \frac{40\frac{m^3}{s}}{40\frac{m^3}{s} + 0.276\frac{m^3}{s}} = 0.993$$

El resultado es el siguiente:

$$l = 0.130m \qquad \beta_p = 27.51^\circ \qquad \eta_v = 0.993 \qquad \eta_H = 0.963$$