

涵道螺旋桨桨叶涡强度分布计算

屠秋野¹, 唐狄毅²

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082;

2. 西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文依据开式螺旋桨理论, 涵道后缘的库塔条件以及微元涡丝的诱导方程, 建立了涵道螺旋桨叶片涡强度分布的计算模型并进行了数值计算。结果显示, 涵道螺旋桨桨叶涡强度在桨尖处达到最大。

关键词: 涵道螺旋桨; 涡强度

中图分类号: V235.12

文献标识码: A

A Numerical Model for Duct Fan Vortex Intensity

TU Qiu-ye¹, TANG Di-yi²

(1. China Ship Science Research Center, Wuxi 214082, China;

2. Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Duct fans play an important role in WIG propulsion system. The vortex system of duct fan can be divided into two parts, inner sheet and boundary sheet, which are induced by each other. It is assumed that the boundary sheet should eliminate the radial velocity disturbance of inner sheet, match the discontinuity between the intersections of boundary sheet, not induce the inner sheet, and ensure the constraint that the sum of vortices equals zero. Based on the classical theory of propeller, Kutta conditions, vortices induced equations, and assumptions of duct fan, a numerical model for calculating duct vortex intensity of fan blades is set up in this paper. Results show that the vortex intensity reaches its maximum value at the blade tip for the duct fan. This intensity profile is much different from that of the general propeller.

Key words: duct fan; vortex intensity

1 前言

涵道螺旋桨是介于开式螺旋桨和风扇之间的推进装置, 它在民用航空中的垂直起落飞行器和气垫船上得到广泛的应用。随着地效翼船的出现, 涵道桨又重新受到人们的关注。美国在 70 年代曾对涵道桨进行过细致的研究^[1~3], 而国内在这方面还很欠缺, 涵道螺旋桨的理论尚未与实际的设计有效的结合起来, 因此开展涵道螺旋桨设计理论与方法的研究十分必要。

2 涵道螺旋桨工作原理分析

定义所有从径向脱落的涡为内涡页。从叶尖脱落的涡由于涵道的作用, 呈轴向分布, 这一涡系定义为边界涡页。边界涡页应服从几个基本条件:

- (1) 必须抵消与内涡页相关的边界径向速度场;
- (2) 必须满足跨越边界涡页交线内外的流动速度不连续性;
- (3) 不诱导内涡页表面的径向速度, 不引起

收稿日期: 2001-04-28; 修订日期: 2001-08-15

作者简介: 屠秋野(1971-), 男, 中国船舶科学研究中心在站博士后。

内涡页的径向扭曲变形;

(4) 与内涡页流场一起保证内涡页的表现轴向运动; 以及保证尾涡系统总涡量之和为零的约束。

为满足上面的基本要求, 可将边界涡页划分为两部分。第一部分是均匀边界涡页, 具有恒定的强度和恒定的螺距角, 这部分用以满足条件 2。第二部分是均匀边界涡页, 具有未知的变强度和恒定的螺距角, 该部分用以满足条件 1, 在涡丝与边界交线处其强度为零, 以保持流动相容性条件, 且满足围绕交线对称的强度分布。条件 4 由总涡量之和为零保证。这样条件 3 会自动得到保证。

3 控制方程的建立及求解

涡对内涡页控制点的法向诱导方程如下:

$$\sum_1 \left(\frac{\Delta u_t}{w} \right) + \sum_2 \left[\left(\frac{\Delta u_t}{w} \right) A_1 - \left(\frac{\Delta u_t}{w} \right) A_2 \right] + \sum_3 \left(\frac{\Delta u_t}{w} \right) = \cos \varphi \quad (1)$$

式中: u_t 为涡对任意点的扰动速度的法向分量, u_t 为涡对任意点的扰动速度的切向分量, w 为轴向诱导速度, φ 为内页的轴向螺距角。

涡对边界涡页控制点的径向诱导方程如下:

$$\sum_1 \left(\frac{\Delta u_r}{w} \right) + \sum_3 \left(\frac{\Delta u_r}{w} \right) = 0 \quad (2)$$

式中: u_r 为涡对任意点的扰动速度的径向分量。

总的涡强度和:

$$\sum_1 \left(\frac{\gamma}{4\pi R w} \right) + \sum_2 \left(\frac{\gamma}{4\pi R w} \right) + \sum_3 \left(\frac{\gamma}{4\pi R w} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: γ 为涡强度, R 为螺旋桨半径, $\tan \varphi = \lambda$, 下标“1”表示内涡页, 下标“2”表示均匀边界涡页, 下标“3”表示非均匀边界涡页。

由于均匀边界涡页的简单性, 它对内涡页控制点的诱导经推导后可写成:

$$1 - \sum_2 \frac{\left[\left(\frac{\Delta u_t}{w} \right) A_1 - \left(\frac{\Delta u_t}{w} \right) A_2 \right]}{\cos \varphi} = G \frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2} \quad (4)$$

式中: λ 为内页螺距, $\lambda = (V_\infty + w) / \Omega R$ 。

均匀边界涡页的涡强度之和经推导后可写成:

$$-\sum_2 \left(\frac{\gamma}{4\pi R w} \right) = -\frac{G}{2b} \left(\frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2} \right) \quad (5)$$

其中: b 为桨叶数目。载荷因子 $G = 1 - u_{t0}/w$, 下标“0”表示尾涡中心轴上的扰动速度。根据载荷因子

G 的定义, 当 $G \approx 1$ 时, 可以认定为轻载状态。

再对 γ 做无量纲处理, 令:

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{G} \left(\frac{\gamma}{4\pi R w} \right)$$

代入得到轻载条件下的控制方程组:

$$\begin{aligned} \sum_1 I_t \bar{\gamma} + \sum_3 I_t \bar{\gamma} &= \frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2} \\ \sum_1 I_r \bar{\gamma} + \sum_3 I_r \bar{\gamma} &= 0 \\ \sum_1 \bar{\gamma} + \sum_3 \bar{\gamma} &= -\frac{1}{2b} \frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad I_r &= \left(\frac{\Delta u_r}{w} \right) \left/ \left(\frac{\gamma}{4\pi R w} \right) \right. \\ I_t &= \left(\frac{\Delta u_t}{w} \right) \left/ \left(\frac{\gamma}{4\pi R w} \cos \varphi \right) \right. \end{aligned}$$

将涡对任意点的扰动速度的各个分量写成柱坐标形式, 用 R 做无量纲处理, 并应用 Betz 条件: $r \tan \varphi = r' \tan \varphi' = R \tan \varphi_R$, 得:

径向速度方程系数

$$I_r = \int_{-\infty}^{\infty} \{ \bar{r}' \tan \varphi_R \sin(\psi' - \psi) +$$

$$\bar{r}' \cos(\psi' - \psi) [\bar{z} - \bar{z}_0 - \psi' \tan \varphi_R] \} \frac{d\psi'}{\bar{P}^3}$$

法向速度方程系数:

$$I_t = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &\bar{r}'^2 \bar{r}' \cos(\psi' - \psi) - \\ &\tan \varphi_R^2 \left[1 - \frac{\bar{r}'}{\bar{r}} \cos(\psi' - \psi) \right] \\ &- \frac{\bar{r}'}{\bar{r}} \sin(\psi' - \psi) \tan \varphi_R \\ &[\bar{z} - \bar{z}_0 - \psi' \tan \varphi_R] \end{aligned} \right\} \frac{d\psi'}{\bar{P}^3}$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{P}^2 &= \bar{r}^2 + \bar{r}'^2 - 2 \bar{r} \bar{r}' \cos(\psi' - \psi) + \\ &[\bar{z} - \bar{z}_0 - \psi' \tan \varphi_R]^2 \end{aligned}$$

式中: r, z, ψ 为控制点柱坐标, r', z', ψ' 为涡的柱坐标, \bar{P} 为涡元到控制点的无量纲距离。

求解控制方程时, 径向取螺旋桨半径 R , 轴向取螺旋桨的单位运动周期长度 $2\pi R \lambda$, 作为计算域。对于不同的桨叶数目 b , 则划分成与之相应的单位特征区域, 每个单位特征区域的轴向长度为 $2\pi R \lambda / b$ 。在单位特征区域内, 内涡页上等距离选择 10 个控制点和 10 个涡元; 边界涡页上等距离选择 7 个控制点和 7 个涡元, 涡元均匀分布于控制点中央(图 1)。涡强度分布的对称线落在边界涡页第 4 个控制点上, 因此边界涡页上选用 4 个涡元和 3 个控制点。对控制方程组式(6)进行离散, 写出内涡页 10 个控制点和边界涡页 3 个控制点的速度诱导方程, 加上总涡强度为零的约束封

闭方程组。写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} I_{\zeta,1,1} & I_{\zeta,1,2} & \cdots & I_{\zeta,1,10} & I_{\zeta,1,11} & I_{\zeta,1,12} & I_{\zeta,1,13} & I_{\zeta,1,14} \\ I_{\zeta,2,1} & I_{\zeta,2,2} & \cdots & I_{\zeta,2,10} & I_{\zeta,2,11} & I_{\zeta,2,12} & I_{\zeta,2,13} & I_{\zeta,2,14} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{\zeta,10,1} & I_{\zeta,10,2} & \cdots & I_{\zeta,10,10} & I_{\zeta,10,11} & I_{\zeta,10,12} & I_{\zeta,10,13} & I_{\zeta,10,14} \\ I_{r,11,1} & I_{r,11,2} & \cdots & I_{r,11,10} & I_{r,11,11} & I_{r,11,12} & I_{r,11,13} & I_{r,11,14} \\ I_{r,12,1} & I_{r,12,2} & \cdots & I_{r,12,10} & I_{r,12,11} & I_{r,12,12} & I_{r,12,13} & I_{r,12,14} \\ I_{r,13,1} & I_{r,13,2} & \cdots & I_{r,13,10} & I_{r,13,11} & I_{r,13,12} & I_{r,13,13} & I_{r,13,14} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\gamma}_1 \\ \bar{\gamma}_2 \\ \vdots \\ \bar{\gamma}_{10} \\ \bar{\gamma}_{11} \\ \bar{\gamma}_{12} \\ \bar{\gamma}_{13} \\ \bar{\gamma}_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda^2/1 + \lambda^2 \\ \lambda^2/1 + \lambda^2 \\ \vdots \\ \lambda^2/1 + \lambda^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\lambda/2b(1 + \lambda^2) \end{bmatrix}$$

式中: $\bar{\gamma}$ 为单位长度的涡元强度。

求解上述方程组得到轻载条件下的各涡元强度 $\bar{\gamma}_1 \cdots \bar{\gamma}_{14}$ 。

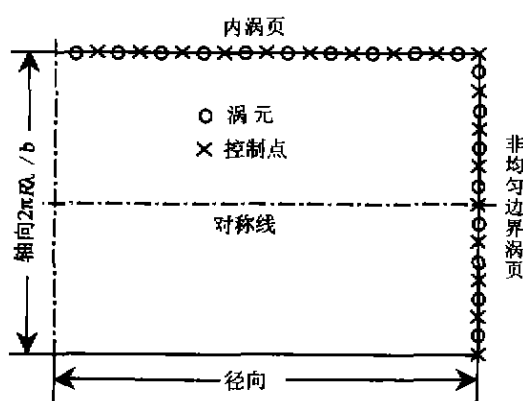


图1 单位特征区域内涡元和控制点的划分

对涡强度分布函数做傅立叶展开:

$$\bar{\Gamma}(x) = \frac{\Gamma(x)}{2\pi R w \lambda} = \sum_{n=1}^{N-1} B_n \sin\left[\frac{2n-1}{2}\pi x\right] \quad (7)$$

式中: x 为相对半径, $x=r/R$ 。

利用下面公式求叶片涡强度分布:

$$\bar{\gamma} = - \int_{x-\omega}^{x+\omega} \bar{\Gamma}(x) dx = - \sum_{n=1}^{N-1} 2B_n \cdot \sin\left[\frac{2n-1}{2}\pi\omega\right] \cos\left[\frac{2n-1}{2}\pi x\right] \quad (8)$$

对 B_n 列出线性方程组并解出 B_n , 带回(7)式得到叶片的涡强度分布函数。计算得到轻载条件下无量纲涡强度:

$$K_0(x) = \frac{b\Gamma(x)}{2\pi R w \lambda}$$

重载条件下: $K(x) = GK_0(x)$

4 计算结果

在不同 λ 的情况下, 取不同的桨叶数目对涵道螺旋桨桨叶上的涡强度分布进行计算, 结果如图2~图4所示, 图中实线表示计算结果, 虚线表示为文献[1]给出的数据。结果显示, 涵道螺旋桨

桨叶的涡强度分布在桨尖处达到最大, 而普通开

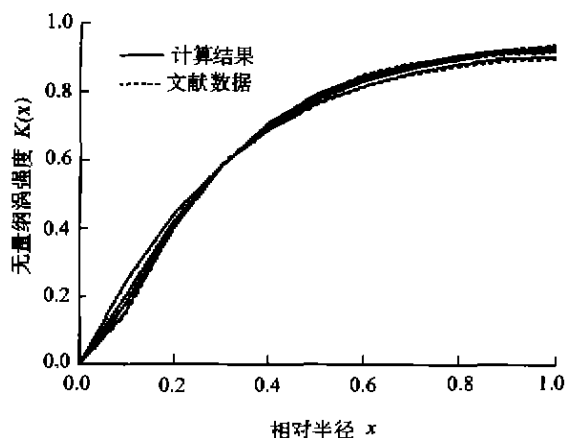


图2 桨叶上的无量纲涡强度分布
($\lambda=0.25$)

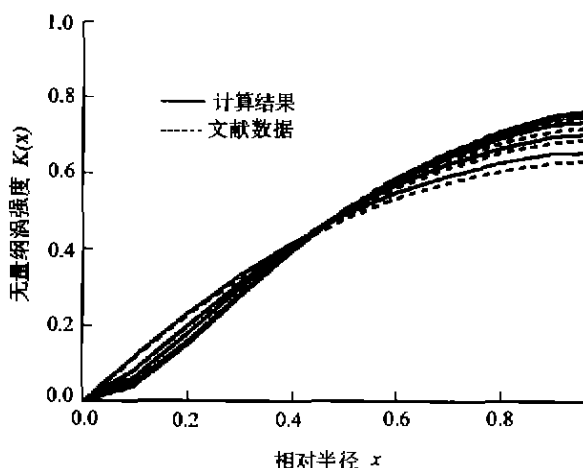


图3 桨叶上的无量纲涡强度分布
($\lambda=0.5$)

式螺旋桨桨叶的涡强度分布则在0.7的相对桨径处为最大, 这是涵道螺旋桨与开式螺旋桨最主要的差异所在, 也是在涵道螺旋桨设计上最值得注

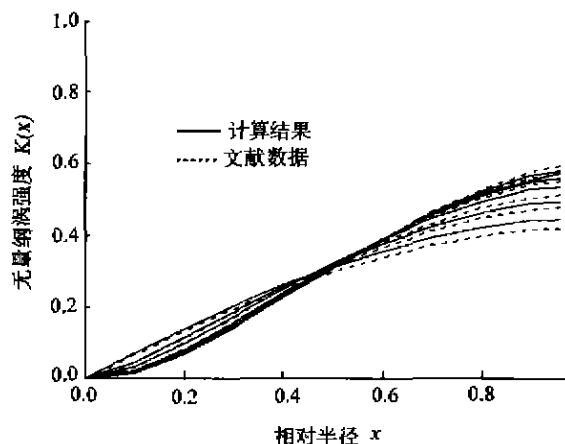


图 4 桨叶上的无量纲涡强度分布
($\lambda=0.75$)

意的问题。

5 结 论

(1) 本文结合分析国外文献资料[1~3]建立

了涵道螺旋桨的涡强度数值计算模型,并在计算方法和计算精度上进行了改进。

(2) 模型的计算结果同国外文献数据[1]的较证明了模型的可靠性。

(3) 涵道螺旋桨桨叶的涡强度分布在桨尖处达到最大,这是与开式螺旋桨的最大差异,也是涵道螺旋桨设计中值得注意的问题。

参考文献:

- [1] Terry W. Determination of the Design Parameters for Optimum Heavily Loaded Ducted Fans[D]. Ph. D. Dissertation, School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 30332, Nov., 1969.
- [2] Robin B G, Terry W. A Vortex Wake Model for Optimum Heavily Loaded Ducted Fans[J]. Journal of Aircraft, Nov. - Dec., 1970, 7: 152-158.
- [3] Terry W. Evaluation of the Design Parameters for Optimum Heavily Loaded Ducted Fans[J]. Journal of Aircraft, Nov. - Dec., 1970, 7: 512-517.

(责任编辑 杨再荣)