

海上强风速风向仪旋桨的设计

李维森

(中国科学院海洋研究所, 青岛266071)

为了测量海上强风, 我们研制了海洋数据浮标测风仪器用平板扇形旋桨。旋桨采用聚丙烯材料, 可以用模具注射而成, 具有重量轻、防腐蚀、抗高速风及冰雹破坏等优点。结构见图1。

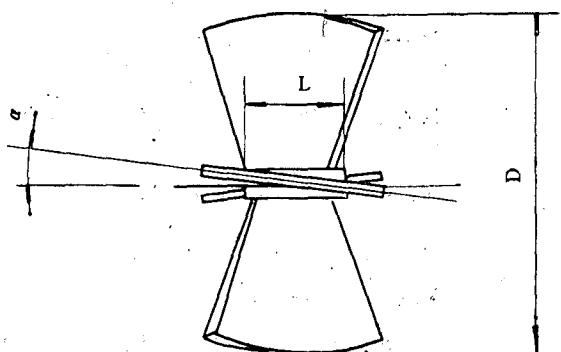


图1 旋桨结构

I. 平板扇形旋桨的测风原理

将旋桨轴正对风向, 旋桨叶片与风向呈一定夹角。空气质点打在叶片上, 产生了转动力矩, 使旋桨绕轴转动。转速与风速成正比, 即 $n = kv$, 旋桨转动产生频率正比于风速的正弦交流电压信号, 交流电压信号是由安装在旋桨轴上的六磁极与安装在主体非转动部分上的线圈感应产生的, 不需要电刷和滑环。

II. 旋桨特征数 k 值的推导

假设: 旋桨叶片数为 N ; 风速风向仪旋桨轴系统转动惯量为 J_x ; 叶片平面与旋桨轴夹角为 α ; 叶片扇形半径为 R_2 ; 扇形圆心至叶片安装根部长度为 R_1 ; 叶片扇形角为 2θ ; 扇形圆心至旋桨轴中心距离为 a ; 风速为 v ; 旋桨轴转速为 n (图2)。

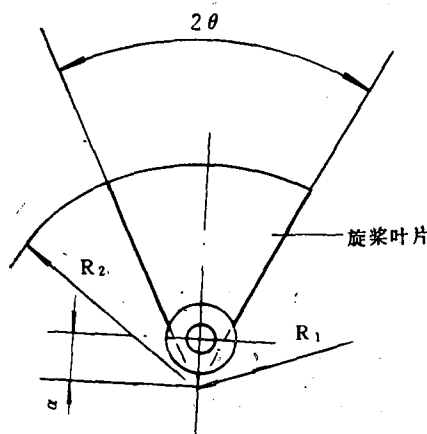


图2 叶片示意

根据刚体绕轴转动的微分方程可得:

$$J_x \frac{d\omega}{dt} = \Sigma m_x(F)$$

当风速风向仪旋桨匀速转动时, 作用于转轴上的外力矩之和为零。

$$\text{即, } M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 0$$

式中, M_1 为风驱动叶片的力矩; M_2 为旋桨转动时, 空气产生的阻力矩; M_3 为轴承部分产生的摩擦阻力矩; M_4 为叶片与风摩擦产生的阻力矩。(M_3 和 M_4 可以忽略)

II.1. 力矩 M_1 的计算

当风吹向叶片时, 空气质点打在叶片上, 叶片给于空气质点作用力, 使空气质点动量发生变化, 叶片所受作用力 F 与质点受叶片的作用力大小相等, 方向相反 (图3)。

$$mv \cdot \sin \alpha - mv \cdot \cos 90^\circ = F$$

$$F = mv \sin \alpha$$

在单位时间里, 垂流过叶片的空气质量为:

$$m = \iint r \cdot \Delta S \cdot \sin \alpha \cdot v$$

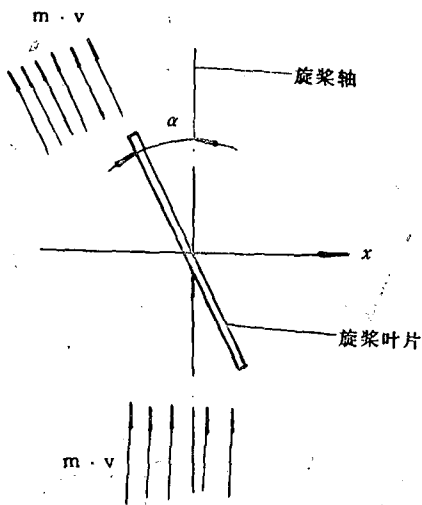


图3 叶片受力分析

作用于叶片上的力:

$$F = \iint r \cdot \Delta S \cdot \sin^2 \alpha \cdot v^2$$

式中, r 为空气密度; S 为扇形叶片面积。

力 F 对于螺旋轴的力矩为:

$$\begin{aligned} M_1 &= N \iint r \cdot \Delta S \cdot \sin^2 \alpha \cdot v^2 (\rho \cos \theta - a) \\ &= 2 \cdot N \cdot r \cdot \sin^2 \alpha \cdot v^2 \left(\frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \sin \theta \right. \\ &\quad \left. - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \cdot a \theta \right) \end{aligned}$$

II.2. 阻力矩 M_2 的计算

当螺旋转动时, 角速度为 ω , 在叶片的背风面产生相对风, 其速度为: $v = R_i \cdot \omega$, 产生阻力矩 M_2 。

相对风对叶片单位时间的作用力为:

$$F = m \cdot R_i \omega$$

R_i 为叶片不同部位与转轴的距离。

$$m = \iint r \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha \cdot R_i \omega$$

$$\text{所以, } F = \iint r \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha R_i^2 \cdot \omega^2$$

力 F 对螺旋转轴的阻力矩为:

$$\begin{aligned} M_2 &= N \iint r \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha \cdot \omega^2 \cdot R_i^3 \\ &= N \cdot r \cdot \cos \alpha \cdot \omega^2 \left[\frac{2}{5} (R_2^5 - R_1^5) \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \sin \theta - \frac{2}{15} (R_2^3 - R_1^3) \sin^3 \theta \\ &- \frac{3}{8} (R_2^4 - R_1^4) \cdot a \cdot \sin 2\theta - \frac{3}{4} \cdot a \\ &\cdot \theta \cdot (R_2^4 - R_1^4) + 2a^2 (R_2^3 - R_1^3) \sin \theta \\ &\left. - a^3 \cdot \theta (R_2^2 - R_1^2) \right] \end{aligned}$$

由于 $M_1 = M_2$

化简后得:

$$\begin{aligned} n &= \frac{30\sqrt{2}}{\pi} \left\{ \sin^2 \alpha \left(\frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \sin \theta \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \cdot a \cdot \theta \right) / \cos \alpha \right. \\ &\quad \times \left[\frac{2}{5} (R_2^3 - R_1^3) \sin \theta - \frac{2}{15} \right. \\ &\quad \times (R_2^5 - R_1^5) \sin^3 \theta - \frac{3}{8} (R_2^4 - R_1^4) \\ &\quad \cdot a \cdot \sin 2\theta - \frac{3}{4} a \cdot \theta (R_2^4 - R_1^4) \\ &\quad \left. + 2a^2 (R_2^3 - R_1^3) \sin \theta - a^3 \right. \\ &\quad \left. \cdot \theta (R_2^2 - R_1^2) \right] \left. \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot v \\ \text{令 } k &= \frac{30\sqrt{2}}{\pi} \left\{ \sin^2 \alpha \left(\frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \sin \theta - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \cdot a \cdot \theta \right) / \cos \alpha \right. \\ &\quad \times \left[\frac{2}{5} (R_2^3 - R_1^3) \sin \theta - \frac{2}{15} \right. \\ &\quad \times (R_2^5 - R_1^5) \sin^3 \theta - \frac{3}{8} (R_2^4 - R_1^4) \\ &\quad \cdot a \cdot \sin 2\theta - \frac{3}{4} a \cdot \theta (R_2^4 - R_1^4) \\ &\quad \left. + 2a^2 (R_2^3 - R_1^3) \cdot \sin \theta - a^3 \right. \\ &\quad \left. \cdot \theta (R_2^2 - R_1^2) \right] \left. \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

即 $n = k \cdot v$ 。

k 值是螺旋的特征数, 反映了螺旋的结构和性能。

III. 螺旋 k 值的确定

k 值是由螺旋的结构参数确定的一个常数。它可以确定螺旋的大小、性能、测量分辨率、螺旋的受力情况以及螺旋的转速范围等。对于平板扇形螺旋, 应当在满足起动风速和分辨率的前提下, 控制螺旋的转速范围, 免于损坏,

k 值应取小值。

k 值越大,分辨率越高,旋桨转速也越高,旋桨轴的轴承选用高精密级轴承,旋桨轴转速可达 $2\,000\text{r}/\text{min}$,如果经过很好的动平衡校正,旋桨是不易损坏的。

如果在某些场合,只需要测高速风, k 值可取更小值,较低的风速,旋桨不转动,当风速达到一定值时,旋桨才开始转动,并有电压脉冲信号输出。

在某些情况下,要求测量较低的风速或某种气流的流动情况, k 值可取大些。

k 值为设计不同用途的平板扇形旋桨提供了理论根据。 k 值只与旋桨的结构参数有关,而与被测量的流体无关,所以平板扇形旋桨可以用来测量海流和其他流体的流动情况。向量海流计的旋桨就是平板扇形旋桨,只是 k 值根据海流测量范围而确定的。

IV. 平板扇形旋桨设计计算举例

k 值确定后, $R_1, R_2, a, \alpha, \theta$ 的取值也是一

个十分复杂的设计计算过程。

根据测风仪器,或测量某种流体的专用仪器的整体设计,从工艺、结构方面首先确定 R_1, R_2, a, θ 值,然后根据 k 值,求出叶片安装角 α 值。

例如,我们进行风洞试验的旋桨参数为:
 $R_2 = 0.15\text{m}; R_1 = 0.072\text{m}; \theta = \frac{\pi}{9}; \alpha = 7.5;$
 $a = 0.06\text{m}。$

求得 $k = 19.24。$

风洞试验后,对数据进行处理,其风速与转速的回归方程为 $n = 20.69v - 27.4。$

多次实验结果表明,旋桨的 k 值与其回归方程的斜率十分相近。因此, k 值对旋桨的设计具有指导意义。

参考文献(略)