



海上测风仪风洞实验数据分析

李维森

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

本文介绍测风仪风洞实验数据分析的方法, 以及如何对测量精度作出评价。

1. 1~70m/s 风速的数据分析

在风速为 1~70m/s 的范围内, 通过对风洞实验数据分析发现, 测量值离散性较大。对整个测量范围所求得的回归直线方程为:

$$\theta = 0.999\ 999\ 19v + 0.000\ 03 \quad (1)$$

风速的方差无偏估计量 $s' = 0.623\ 3\text{m/s}$

当被测风速的置信概率为 95% 时, 其偏差为 $\pm 2s' = \pm 1.24\text{m/s}$, 这个偏差对于低风速段

表 1 风洞实验数据

v (m/s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	68
n (r/min)	93	187.5	285	382.5	481.5	571.5	675	783	877.5	991.5	1099.5	1209	1311	1389

旋桨轴承摩擦阻力和旋桨叶片与风的摩擦阻力量值很小, 可以忽略^[1]。因此, 旋桨转速 n 与风速 v 呈正比, 即: $n = kv$ 。这是为简化旋桨设计、计算而假设的理想条件, 实际上转速与风速并不呈线性关系, 仅是风速越大, 转速越高。这是因为在实际测量中存在着上述两项摩擦阻力和仪器的安装误差。为近似描述风速与转速的相关关系, 我们采用一元线性回归方程进行分析

$$\theta_1 = bn + a \quad (2)$$

式中, θ_1 值不同于风洞风速值 v , θ_1 较好地描述了 v 的理想值, 且与转速 n 呈线性关系。

a, b 是由实测值所确定的回归系数, 其计算公式为:

$$a = \bar{v} - b \cdot \bar{n}$$

$$b = \frac{\sum n \cdot v - k \bar{n} \cdot \bar{v}}{\sum n^2 - k \bar{n}^2}$$

$$\bar{v} = \frac{1}{k} \sum v$$

(1~14.8m/s) 达不到仪器精度指标 (仪器的精度为 $0.5 \pm 0.05v$)。因此, 在 1~70m/s 的风速范围内, 用一个回归直线方程来描述风速的真实情况是不合适的。

根据风速变化的离散情况以及精度指标, 在不提高仪器本身加工精度的前提下, 可以将测量范围分成几段进行分析, 使测量精度达到指标要求。由于采用了微机系统, 上述处理是非常方便的。

1. 1~45m/s 风速的测量精度分析

风洞实验数据见表 1。

$$\bar{n} = \frac{1}{k} \sum n$$

其中, k 为样本容量。由实测数据计算得:

$$\sum n \cdot v = 137\ 800;$$

$$\sum n^2 = 266\ 852\ 0.25; \bar{v} = 25; \bar{n} = 481.833$$

$$k = 9$$

计算得出: $a = 0.48; b = 0.0509$

一元线性回归方程为:

$$\theta_1 = 0.050\ 9n + 0.48 \quad (3)$$

用最小二乘法确定的直线能较好地反映原始数据 n, v 的分布状态。

由表 1 可知, 转速 n 与风洞风速 v 是一一对应的, θ_1 值在回归直线上与 n 值也是一一对应的。在相同的转速下, θ_1 与 v 也是一一对应的, 且 θ_1 值随 v 值的增大而增大。为了表达 θ_1 与 v 的关系, 用最小二乘法求出回归方程:

$$\theta = bv + a \quad (4)$$

其中, θ 是测风仪输出的风速。

由(3)式可计算出 $\hat{\sigma}_1$ 与 v 相对应的一系列值(表2)。

表2 1~45m/s 风速值计算

序号	v (m/s)	$\hat{\sigma}_1$ (m/s)	v^2	$\hat{\sigma}_1^2$	$v\hat{\sigma}_1$
1	5	5.21	25	27.144 1	26.05
2	10	10.02	100	100.400 4	100.2
3	15	14.98	225	224.400 4	224.7
4	20	19.95	400	398.002 5	399
5	25	24.99	625	624.500 1	624.75
6	30	29.57	900	874.384 9	887.1
7	35	34.84	1 225	1 213.825 6	1 219.4
8	40	40.33	1 600	1 626.508 9	1 613.2
9	45	45.14	2 025	2 037.619 6	2 031.3
Σ	225	225.03	7 125	7 126.786 5	7 125.7

计算得:

$$b = \frac{\Sigma \hat{\sigma}_1 \cdot v - k \hat{\sigma}_1 \bar{v}}{\Sigma v^2 - k \bar{v}^2} = 1.0005$$

$$a = \hat{\sigma}_1 - b \cdot \bar{v} = -0.0092$$

$$k = 9$$

一元线性回归方程为:

$$\hat{\sigma} = 1.0005v - 0.0092 \quad (5)$$

样本相关系数:

$$r = \frac{\Sigma \hat{\sigma}_1 v - k \hat{\sigma}_1 \bar{v}}{\sqrt{(\Sigma v^2 - k \bar{v}^2)(\Sigma \hat{\sigma}_1^2 - k \hat{\sigma}_1^2)}} = 0.999 871 2$$

$\hat{\sigma}_1$ 的方差无偏估计量:

$$s' = \left[\frac{(1 - r^2)(\Sigma \hat{\sigma}_1^2 - k \hat{\sigma}_1^2)}{k - 2} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.23(\text{m/s})$$

在 1~45m/s 的风速范围内,任意风速 v_0 是以回归直线方程对应值 $\hat{\sigma}_0 = 1.0005v_0 - 0.0092$ 为中心且服从正态分布的随机变量。

在 $(\hat{\sigma}_0 - 1.96s', \hat{\sigma}_0 + 1.96s')$ 区间,风速真值的置信概率为 95%,其风速误差为 $\pm 1.96s'$,为计算方便,可以用 $\pm 2s'$ 代替 $\pm 1.96s'$ 。

$$\pm 2s' = \pm 0.46(\text{m/s})$$

测风仪的精度为 $0.5 \pm 0.05v$,在 1~45m/s 风速测量范围内, ± 0.46 m/s 的风速误差达到指标要求。

I. 2. 45 ~ 70m/s 风速的测量精度分析

用同样方法,可求得在 45~70m/s 风速范围内风速 v_1 与转速 n 的回归方程:

$$\hat{\sigma}_1 = 0.045 5n + 4.97 \quad (6)$$

求出 $\hat{\sigma}_1$ 后,可得 $\hat{\sigma}_1$ 与 v 的一一对应关系及回归方程:

$$\hat{\sigma} = 0.998 4v + 0.135 \quad (7)$$

样本相关系数 $r = 0.998 6$

$\hat{\sigma}$ 值的方差无偏估计量 $s' = 0.5(\text{m/s})$

因此,在 45~70m/s 风速测量范围内,测量精度为 $\pm 2s' = \pm 1(\text{m/s})$,优于测量精度指标。两条回归直线见下图。

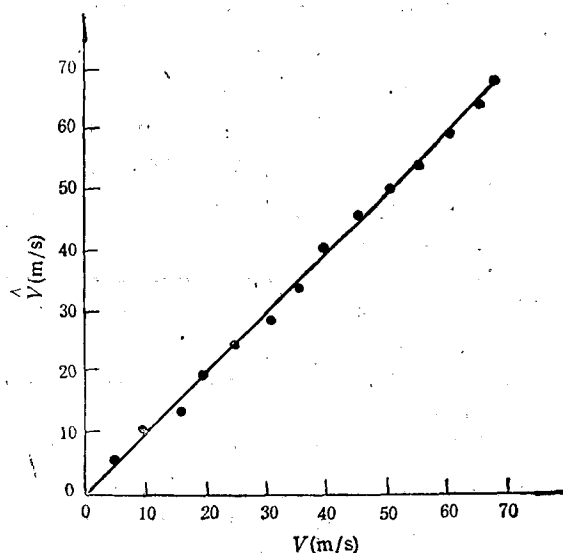


图 1~45m/s 和 45~70m/s 风速实验数据的回归直线

注: ● 为风洞实测值。

II. 结论

通过对 1~70m/s 风速测量范围的精度分析可知,在整个测量范围内,用一个回归方程描述风速的真实状况,其精度不能满足要求,在低风速段,风速误差过大。若将测量范围分为二段,用两个回归方程来表达风速的变化规律,求出其风速置信概率为 95% 的两个误差带 ± 0.46 和 ± 1 ,满足了风速精度指标要求。对测风仪进行分段精度分析,可以降低测风仪的加工精度要求,降低加工成本,提高生产率。