

螺旋桨测风仪风洞测试及不确定度分析

李松奎 贺晓雷 边泽强 刘昕

(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要 本文借鉴国标 GB/T-24559 海洋螺旋桨式风向风速计中的测试方法及测试点, 在低速直路风洞中, 对螺旋桨测风仪进行测试, 并依据 JJF1059. 1-2012 测量不确定度的评定与表示要求, 对风速 7 个校准点分别进行重复试验, 采用极差法进行 A 类不确定度评定, 并分析测试过程中的 B 类不确定来源, 进行 B 类不确定度评定。结果表明: 在 WZ860070-E 型直路风洞中对螺旋桨测风仪进行风速校准测试的方法是可行的。同时, 2 m/s 以上各测试点均能满足 3 倍量传关系。

关键词 螺旋桨测风仪; 校准; 风洞; 不确定度

中图分类号: P412. 1; TN91 **DOI:** 10. 19517/j. 1671-6345. 20200397 **文献标识码:** A

引言

螺旋桨测风仪是增强型的测风传感器, 能够适应高湿度、高盐度的环境。广泛地使用于气象、海洋领域。与传统机械式测风传感器相比, 螺旋桨测风仪的回转力矩大, 惯性力小, 对风速的追迹性能极好, 抗风能力强。能够应对恶劣的海洋环境, 在中国气象局海洋一期工程海滨自动站中被广泛使用。为保证其测量数据的准确可靠, 需要定期对其进行校准工作。

气象部门业务使用的风速类仪器, 多数已进行了不确定度分析, 如曾涛等^[1]对自动气象站风速传感器测量结果进行了评定分析; 李松奎等^[2]对超声波风速仪测量结果进行了评定分析; 韩玉婷等^[3]对数字风速仪测量结果进行了评定分析, 但均未涉及到 30 m/s 以上风速点测量结果的不确定度分析。本文依据国标 GB/T 24559-2009 海洋螺旋桨式风向风速计中的测试方法以及测量不确定度的评定与表示的要求, 使用风速校准装置, 以美国 Young 公司 05106 型螺旋桨测风仪作为研究对象, 在 WZ860070-E 型低速直路风洞中进行校准测试, 并对测量结果进行不确定度分析。

1 螺旋桨测风仪工作原理

螺旋桨测风仪一般由螺旋桨、风速转轴、风速发

电线圈等组成。在风力作用下, 螺旋桨转动, 带动轴上的磁极旋转, 在线圈中感应出正弦信号, 其频率随风速的增大而线性增加。螺旋桨测风仪外观示意及结构如图 1、图 2 所示。

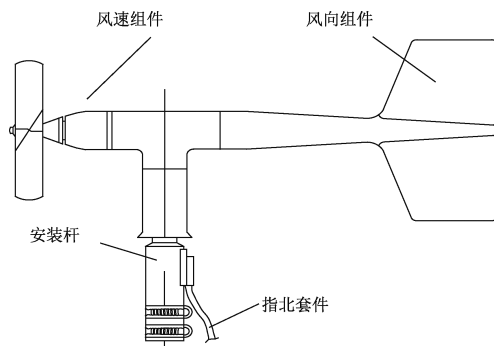


图 1 螺旋桨测风仪外观示意

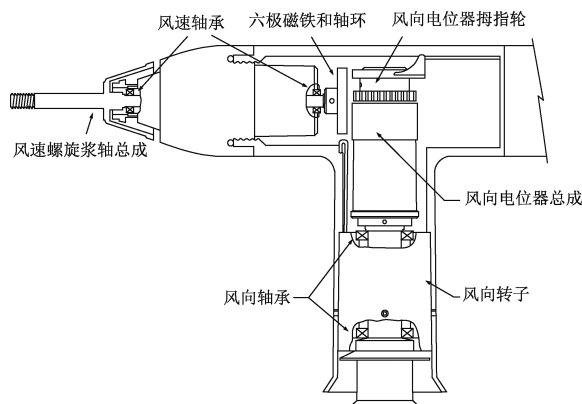


图 2 螺旋桨测风仪结构

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

作者简介: 李松奎, 男, 1989, 硕士, 工程师, 大气探测与计量检定研究, Email: 410854960@qq.com

收稿日期: 2020 年 9 月 22 日; 定稿日期: 2021 年 5 月 18 日

2 基于 WZ860070-E 型直路风洞的风速校准测试

2.1 风速测试装置

(1)WZ860070-E 型直路风洞。该型号风洞为中国气象局业务使用的低速直路风洞,其流场均匀性小于 1%,稳定性小于 0.5%,流速范围 0.5~70 m/s,主要试验段的直径为 600 mm,工作段长度 1000 mm,为本试验的开展提供可行性。风洞的示意如图 3 所示。

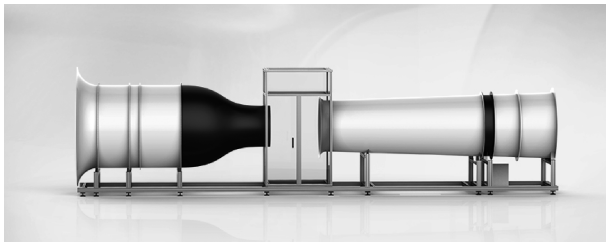


图 3 风洞示意

(2)皮托静压管。本次试验使用的是国家气象计量站的一等标准皮托静压管,该皮托静压管为 L 型,主要由探头和支杆组成。通过探头上的总压孔、静压孔得到风洞试验段中的微差压,然后连接到微压差计得到微差压值,通过计算得到标准风速值^[4-5]。

2.2 标准风速计算方法

通过温度、湿度、气压传感器测得风洞试验段内的空气温度、相对湿度及气压值,然后用风洞试验段内的空气温度、相对湿度和气压值按式(1)计算出空气密度。

$$\rho = 3.48353 \times 10^{-3} \frac{1}{T} (P_0 - 0.378He_w) \quad (1)$$

式中: T 为试验段内空气温度, K; P_0 为试验段内气压, Pa; H 为试验段内空气相对湿度, 用小数表示; e_w 为 T 温度下的饱和水汽压, Pa。

再将空气密度、微差压计示值代入式(2)计算出标准风速值。

$$v = k \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (2)$$

式中: v 为标准风速, m/s; ρ 为空气密度, kg/m³; p 为微差压计示值, Pa; k 为皮托静压管系数。

3 测试过程及数据获取

测试试验中,选用 05106 型螺旋桨测风仪作为

试验用仪器,其测量值可数字化输出,分辨力为 0.01 m/s。所用风洞为 WZ860070-E 型风洞,此风洞由国家气象计量站检测合格,整个洞体流场均匀稳定,满足试验要求。

在测试过程中,参考国标海洋螺旋桨式风向风速计中的测试点,选择 2 m/s、5 m/s、10 m/s、20 m/s、30 m/s、50 m/s、70 m/s,共 7 个风速测试点。测试数据见表 1。测试环境:温度为 19.4 °C,气压为 1005.5 hPa,相对湿度为 20.6%。

表 1 测试数据 m/s

测试点 风速	标准风速			被测仪器输出风速		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
2	2.06	2.07	2.07	1.80	1.80	1.70
5	5.06	5.06	5.08	4.90	4.90	4.80
10	10.04	10.03	10.03	10.00	10.10	10.00
20	20.05	20.04	20.04	20.30	20.20	20.30
30	30.07	30.07	30.05	30.60	30.50	30.60
50	50.08	50.09	50.10	50.80	50.80	50.90
70	70.23	70.23	70.23	71.00	70.90	70.80

4 不确定度评定分析

4.1 不确定度评定测量模型

在校准过程中,测量结果为示值误差

$$\Delta v = v' - v \quad (3)$$

式中: Δv 为被校表在某一点的示值误差, m/s; v' 为被校表在该点的示值, m/s; v 为对应校准点的标准风速值, m/s。

将标准风速 v 的计算公式带入式(3),同时考虑到风洞均匀性对测量结果的影响,求得被校表风速测量结果不确定度评定的测量模型:

$$\Delta v = v' - \sqrt{\frac{2}{3.48353 \times 10^{-3} \frac{1}{T} (P_0 - 0.378He_w)} \rho \xi + \Delta f} \quad (4)$$

式中: Δv 为被校表在某一点的示值误差, m/s; v' 为被校表在该点的示值, m/s; ξ 为皮托静压管校准系数; Δf 为风洞均匀性对测量结果的影响, m/s。

4.2 不确定度分量评定

4.2.1 螺旋桨测风仪测量重复性引入的不确定度

根据不同的风速点进行的 3 次重复风速测量值,用极差法^[6-9]求出试验标准差,螺旋桨测风仪测

量值为 3 次测量结果的平均值^[10-11],螺旋桨测风仪测量重复性引入的不确定度见表 2。

表 2 螺旋桨测风仪测量重复性引入的不确定度 $u(v')$

	标准点风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)						
	2	5	10	20	30	50	70
极差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
$u(v')$ /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.068

4.2.2 微差压计引入的标准不确定度

微差压计的最大允许误差为 ± 0.5 Pa,取均匀分布,则微差压计示值误差引入的标准不确定度 $u(p)$ 为:

$$u(p) = 0.5/\sqrt{3} = 0.289 \text{ Pa}$$

4.2.3 皮托静压管校准系数引入的标准不确定度

试验使用的标准皮托静压管的校准系数 $\xi = 1.003$,相对不确定度 u_{rel} 为 0.1%(包含因子 $k=2$)。故由标准皮托静压管校准系数引入的绝对不确定度 $u(\xi)$ 为

$$u(\xi) = \frac{u_{\text{rel}}(\xi)}{2} \xi = \frac{0.001}{2} \times 1.003 = 0.0005$$

4.2.4 温度仪引入的标准不确定度

温度仪的最大允许误差为 ± 0.5 °C,按均匀分布,则温度仪测量引入的标准不确定度 $u(T)$ 为

$$u(T) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ °C}$$

4.2.5 气压计引入的标准不确定度

气压计的最大允许误差为 ± 2 hPa,按均匀分布,则气压计测量引入的标准不确定度 $u(P_0)$:

$$u(P_0) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 115 \text{ Pa}$$

4.2.6 湿度仪引入的标准不确定度

湿度仪的最大允许误差为 $\pm 8\%$,按均匀分布,则湿度仪测量引入的标准不确定度 $u(H)$

$$u(H) = \frac{8\%}{\sqrt{3}} = 4.61\%$$

4.2.7 风洞均匀性引入的不确定度

风洞的不均匀性最大为 1.0%,因螺旋桨测风仪安装在风洞中,会对风场的均匀性产生影响。但由于皮托静压管和风速仪感应部分基本相近均匀区,按均匀分布^[12-18],则由风洞均匀性在各风速点引入的标准不确定度 $u(\Delta f)$ 为

$$u(\Delta f) = \frac{1\%v}{\sqrt{3}} = 0.58\%v$$

各标准点不确定度 $u(\Delta f)$ 计算结果见表 3。

表 3 风洞均匀性引入的标准不确定度 $u(\Delta f)$ m/s

	标准点风速						
	2	5	10	20	30	50	70
$u(\Delta f)$	0.012	0.029	0.058	0.116	0.174	0.290	0.406

4.3 合成标准不确定度

各标准不确定度的灵敏系数变量见表 4。灵敏度系数可由式(4)求偏导^[19-20]得出。

表 4 标准不确定度及灵敏度系数变量

标准不确定度来源	灵敏度系数
螺旋桨测风仪测量重复性引入的标准不确定度 $u(v')$	$c_{v'}$
微差压计引入的标准不确定度 $u(p)$	c_p
皮托静压管校准系数引入的标准不确定度 $u(\xi)$	c_{ξ}
温度仪引入的标准不确定度 $u(T)$	c_T
气压计引入的标准不确定度 $u(P_0)$	c_{P_0}
湿度仪引入的标准不确定度 $u(H)$	c_H
风洞均匀性引入的标准不确定度 $u(\Delta f)$	$c_{\Delta f}$

$$c_{v'} = \frac{\partial \Delta v}{\partial v'} = 1$$

$$c_p = \frac{\partial \Delta v}{\partial p} = -\frac{\sqrt{2}}{2} T^{\frac{1}{2}} p^{-\frac{1}{2}} \xi^{\frac{1}{2}} (3.48353 \times 10^{-3} P_0 - 3.48353 \times 10^{-3} \times 0.378 He_w)^{-\frac{1}{2}}$$

$$c_{\xi} = \frac{\partial \Delta v}{\partial \xi} = -\frac{\sqrt{2}}{2} T^{\frac{1}{2}} p^{\frac{1}{2}} \xi^{-\frac{1}{2}} (3.48353 \times 10^{-3} P_0 - 3.48353 \times 10^{-3} \times 0.378 He_w)^{-\frac{1}{2}}$$

$$c_T = \frac{\partial \Delta v}{\partial T} = -\frac{\sqrt{2}}{2} T^{-\frac{1}{2}} p^{\frac{1}{2}} \xi^{\frac{1}{2}} (3.48353 \times 10^{-3} P_0 - 3.48353 \times 10^{-3} \times 0.378 He_w)^{-\frac{1}{2}}$$

$$c_{P_0} = \frac{\partial \Delta v}{\partial P_0} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 3.48353 \times 10^{-3} T^{\frac{1}{2}} p^{\frac{1}{2}} \xi^{\frac{1}{2}} \cdot (3.48353 \times 10^{-3} \times P_0 - 3.48353 \times 10^{-3} \times 0.378 He_w)^{-\frac{3}{2}}$$

$$c_H = \frac{\partial \Delta v}{\partial H} = -\frac{\sqrt{2}}{2} \times 3.48353 \times 10^{-3} \times 0.378 e_w T^{\frac{1}{2}} p^{\frac{1}{2}} \xi^{\frac{1}{2}} (3.48353 \times 10^{-3} P_0 - 3.48353 \times 10^{-3} \times 0.378 H e_w)^{-\frac{3}{2}}$$

$$c_{\Delta f} = \frac{\partial \Delta v}{\partial \Delta f} = 1$$

本次试验环境:温度为 19.4 °C,气压为 1005.5 hPa,相对湿度为 20.6%,则各灵敏度系数计算结果见表 5。

表 5 本次试验各灵敏度系数值

	标准点风速						
	2	5	10	20	30	50	70
c_v'	1	1	1	1	1	1	1
c_p	-0.415	-0.166	-0.084	-0.042	-0.028	-0.017	-0.012
c_ξ	-1.025	-2.515	-4.983	-9.953	-14.928	-24.879	-34.867
c_T	-0.004	-0.009	-0.017	-0.034	-0.051	-0.085	-0.120
c_{P_0}	0.00001	0.00003	0.00005	0.00010	0.00015	0.00025	0.00035
c_H	0.0001	0.0002	0.0004	0.0008	0.0013	0.0021	0.0030
$c_{\Delta f}$	1	1	1	1	1	1	1

合成标准不确定度的计算公式如下:其计算结果见表 6。

$$u_c = \sqrt{[c_v' u(v')]^2 + [c_p u(p)]^2 + [c_\xi u(\xi)]^2 + [c_T u(T)]^2 + [c_{P_0} u(P_0)]^2 + [c_H u(H)]^2 + [c_{\Delta f} u(\Delta f)]^2}$$

表 6 合成标准不确定度 u_c m/s

	标准点风速						
	2	5	10	20	30	50	70
u_c	0.123	0.066	0.072	0.123	0.179	0.295	0.415

4.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$,则扩展不确定度 $U=2u_c$,合成标准不确定度 u_c 见表 6,扩展不确定度计算结果见表 7。

表 7 扩展不确定度 $U(k=2)$ m/s

	标准点风速						
	2	5	10	20	30	50	70
$U(k=2)$	0.25	0.13	0.14	0.25	0.36	0.59	0.83

4.5 合理性分析

螺旋桨测风仪测试过程中的标准设备采用了国际通用的皮托静压管、微差压计和风洞,技术指标科学合理,测量结果准确可靠。评定的测量结果扩展不确定度符合我国开展计量校准要求。其扩展不确定

度 U 与被检测风仪允许误差 MPEV 的比值 $\frac{U}{MPEV}$ 见表 8。

表 8 扩展不确定度 U 与被检测风仪允许误差 MPEV 及其比值

	标准点风速						
	2	5	10	20	30	50	70
MPEV	0.60	0.75	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00
$U(k=2)$	0.25	0.13	0.14	0.25	0.36	0.59	0.83
$\frac{U}{MPEV}$	0.42	0.17	0.14	0.17	0.18	0.20	0.21

从表 8 中可看出,除 2 m/s 外,各点 $\frac{U}{MPEV}$ 均小于 $\frac{1}{3}$,达到了量传 3 倍的关系。2 m/s 点的 $\frac{U}{MPEV}$ 大于 $\frac{1}{3}$ 但小于 $\frac{1}{2}$,其原因是由于微差压计的误差引入的(微差压计示值在低压段的相对误差过大)。若需达到 2 m/s 量传 3 倍关系,则需减小微差压计误差,从经济性和合理性角度考虑可行性较差。

5 结论

通过上述试验以及测量结果的不确定度分析,得出以下结论:

- (1)利用 WZ860070-E 型直路风洞对螺旋桨测风仪进行风速校准测试的方法是可行的。
- (2)通过对螺旋桨测风仪测量结果的不确定度

分析,可以得出风速校准标准装置以及螺旋桨测风仪自身存在不确定度分量外,校准装置工作段的温度、湿度、气压都对测量结果的不确定度有直接影响。

(3)本次测量结果不确定度评定分析充分考虑了各种可能的影响因子并尽可能取较大值计算,实际测量结果的扩展不确定度可能略小于本文给出扩展不确定度值。

测量结果的不确定度评定是计量工作不可缺少的部分,体现了测量工作的可信程度。本文给出的评定方法,可为风速类仪器测量结果的不确定度评定提供参考,具有一定参考价值。

参考文献

- [1] 曾涛,龚熙,边泽强.自动气象站风速传感器测量不确定度评定[J].电子测量技术,2018,41(15):96-99.
- [2] 李松奎,边泽强,刘昕.超声波风速仪测量结果不确定度评定[J].电子测量技术,2019,42(15):112-116.
- [3] 韩玉婷,吴丽娜,汪鑫.数字风速仪测量结果的不确定度评定[J].气象水文海洋仪器,2017,34(2):26-29.
- [4] 黄敏,卢会国,王保强,等.超声测风传感器在回路风洞中的测试[J].气象科技,2016,44(1):14-18.
- [5] 崔骊水,李鹏,邱丽荣,等.微风速标准装置的建立和热线风速仪校准方法的实验研究[J].计量学报,2018,39(3):289-293.
- [6] 郑亮,张天华,黄小静,等.风向现场校准三点测量不确定度分析[J].气象科技,2018,46(2):229-232.
- [7] 叶德培,赵峰,施昌彦,等.测量不确定度评定与表示[M].北京:中国标准出版社,2012.
- [8] 宋明顺,方兴华,黄佳,等.校准和检测中微小样本测量不确定度评定方法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(2):419-426.
- [9] 李常春.热球式风速仪测量不确定度的分析与评定[J].国外电子测量技术,2019,38(8):33-38.
- [10] 党选发,刘永强,张红英,等.风速检定中对标准风速测量值的影响量分析[J].气象,2013,39(2):249-252.
- [11] 陈涛,李晓红,张虎,等.风速现场校准值的不确定度评定[J].计量与测试技术,2017,44(4):87-88.
- [12] 刘昕,边泽强,李松奎.自动气象站风向风速仪现场校准方法研究[J].计量与测试技术,2015,42(8):7-8.
- [13] 刘宇,张佳佳,刘文忠,等.铂电阻地温传感器检定不确定度评定[J].气象科技,2016,44(5):728-732.
- [14] 王明明,王建森,黄鹏良,等.超声波风速仪示值的测量不确定度评定[J].气象水文海洋仪器,2019,36(1):1-3.
- [15] 李建宇.杯式风速传感器现场校准方法[J].气象科技,2019,47(5):752-756.
- [16] 杨波,颜平江,李文博.风速传感器测量值的不确定度评定[J].计量与测试技术,2015,41(1):46-49.
- [17] 吴宇,吴丹.风速变送器校准及示值误差测量不确定度评定[J].国外电子测量技术,2020,39(7):11-16.
- [18] 李常春.热球式风速仪测量不确定度的分析与评定[J].国外电子测量技术,2019,38(8):33-38.
- [19] 魏明明.皮托管测量风速时 GUM 评定不确定度的偏差修正[J].仪器仪表学报,2019,40(6):146-154.
- [20] 刘园园,杨健,赵希勇,等.GUM法和MCM法评定测量不确定度对比分析[J].计量学报,2018,39(1):135-139.
- [21] 雷晓妹,吴丽娜,韩玉婷,等.基于GUM的叶轮数字风速仪不确定度分析与评定[J].国外电子测量技术,2020,39(3):30-34.

Measurement and Uncertainty Analysis of Propeller Anemometer in Wind Tunnel

LI Songkui HE Xiaolei BIAN Zeqiang LIU Xin

(Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081)

Abstract: Based on the GB/T-24559 marine propeller anemometer test methods and test points, the propeller anemometer was tested in the low-speed wind tunnel. According to the JJF1059.1-2012 measurement uncertainty evaluation and expression requirements, seven calibration points of wind speed were tested repeatedly, and the range method was used to evaluate the type A uncertainty. The sources of type B uncertainty in the testing process are analyzed and the type B uncertainty is evaluated. The results show that it is feasible to calibrate the propeller anemometer in the WZ860070-E wind tunnel. At the same time, each test point above 2 m/s can meet the three times of the quantitative transmission relationship.

Keywords: propeller anemometer; calibration; wind tunnel