

地面风场风速测量标准装置需求与设计

陈凤贵¹, 姜明波¹, 杜智涛¹, 徐燕¹, 张旭¹, 马俊平²

(1. 北京应用气象研究所, 北京 100029; 2. 中国航空工业空气动力研究院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对地面风场中风速测量仪器计量测试的需求, 提出了风速测量标准装置的组成及性能指标设计要求, 详细分析了风速测量标准装置各个重要部件的设计关键技术, 结果表明该设计科学合理。

关键词: 风速; 测量标准; 气象检定; 设计

中图分类号: E915 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)01-0079-04

Requirement and Design of Standard Wind Speed Measuring Equipment in Surface Wind Fields

CHEN Feng-gui¹, JIANG Ming-bo¹, DU Zhi-tao¹, XU Yan¹, ZHANG Xu¹, MA Jun-ping²

(1. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China;

2. Academy of Industrial Air Dynamics, Chinese Aeronautics, Harbin 150001, China)

Abstract: The structure and performance requirements of standard wind speed measuring equipment were put forward according to metering and testing requirement for surface wind fields. The key design techniques of important parts of standard wind speed measuring equipment were analyzed. The results showed that the design is scientific and reasonable.

Key words: wind speed; measurement standard; meteorological verification; design

气象测量仪器是大气环境探测的重要设备, 它获得的测量数据是开展气象研究和气象保障服务的基础。风速是描述地面大气流动的气象要素之一。目前测量地面风速的仪器主要有电传风向风速仪、热电式微风仪、机械式风向风速仪和便携式风向风速仪等。由于这些仪器设备大多存在基线漂移现象, 直接影响气象测量数据的准确性、可比性和代表性, 需要定期进行检定测试, 用于评价风向风速仪的测量性能, 判断准确性、稳定性和灵敏性是否合格, 决定能否继续使用或者调整后使用。因此, 需要研

发高标准、高精度的地面风速测量标准装置, 用于地面风向风速仪的检定测试。同时, 其风场环境也可用于开展被试设备的环境试验^[1]。文中重点分析了风速测量标准装置的需求和设计。

1 主要设计要求

1.1 地面风场风速测量标准装置整体结构组成

地面风场风速测量标准装置的组成如图1所示。

收稿日期: 2012-08-06

作者简介: 陈凤贵(1967—), 男, 河南卫辉人, 硕士, 工程师, 主要从事气象水文装备论证研究。

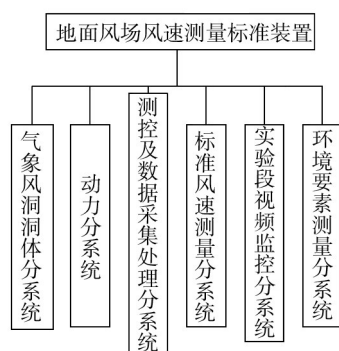


图1 地面风场风速测量标准装置组成

Fig. 1 The composing chart of standard wind speed measuring equipment for surface wind fields

气象风洞洞体分系统主要由动力段、大角扩散段(含一层防分离网)、稳定段(包括蜂窝器和两层阻尼网)、收缩段、实验段、第一扩散段、第一拐角、第一过渡段、第二拐角、第二扩散段、动力段、第三扩散段、第四扩散段、第三拐角、第二过渡段、第四拐角和实验段等组成;风洞动力分系统主要由变频电机及其带动的风扇、轴流散热风机等组成,为风洞产生连续、可调节气流提供动力;测控及数据采集处理分系统主要由光电编码器、变频调速器、PLC(可编程逻辑控制器)、触摸屏、通信转换模块、数据采集卡、数据处理计算机、打印机和相关配套软件等组成,用于风洞运行状态的测控、数据自动采集、处理测量数据、打印输出证书和报告;标准风速测量分系统由皮托静压管、数字式微差压仪和超声波测风仪等组成,主要用于实验段风速的测量;视频监控分系统主要由高清晰度高分辨率可变焦摄像头、画面分割器、工业监视器视频采集卡等组成,用于机械式风测量仪器动态性能测试和实验工作情况实时观察;环境要素测量分系统主要由气温、湿度和气压测量仪器等组成。由环境要素测量分系统的测量结果,可对实验室环境进行监测,并可计算出风洞实验段空气密度。结合标准风速测量分系统的测量数据,可计算出标准风速值^[2]。

1.2 性能指标要求^[3]

1) 皮托静压管,测量范围为2~40 m/s;系数 K 取值范围为0.997~1.003;系数的允许误差应小于 $\pm 0.03\%$ 。

2) 微差压计,测量范围为0~1500 Pa;允许误差限应小于 $\pm 0.03\%$ 。

3) 超声波测风仪,风速测量范围为0~40 m/s;风向测量范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$;风速测量最大允许误差为 $\pm (0.01 \pm 2\% \times \text{读数})$ m/s;风向测量最大允许误差为 $\pm 0.1^\circ$ 。

4) 风洞,试验段直径 ≥ 630 mm,最大风速 ≥ 40 m/s;风速范围为0.1~40 m/s,连续可调;气流稳定性(1 min)优于 $\pm 0.4\%$ (相对误差);试验段流场不均匀性小于0.4%(相对误差);试验段气流紊流度小于0.4%(相对误差);气流偏角小于 0.8° ;噪声小于85 dB。

5) 环境测量仪器。气温测量仪器,测量范围为 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$,最大允许误差小于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$;大气压力测量仪器,测量范围为800~1060 hPa,最大允许误差小于 ± 0.10 hPa;相对湿度测量仪器,测量范围为5%~90%,最大允许误差为 $\pm 3\%$;视频监视系统,摄像机监控在0.05 lx低光照下能够观察仪器工作状态,摄像机具有3倍以上光学变焦功能,摄像机拍摄频率大于90帧/s。

2 关键设计技术

2.1 风洞气动布局与总体设计

根据地面风速环境试验装置设计要求,风洞设计主要涉及以下难题。一是风速跨度大。二是微风速状态下的实现与测量。采用优化风扇系统实现大跨度的风速范围,利用超声测风仪测量微风速,利用皮托管测量较大风速。三是流场指标之一的风场紊流度要求高,设计要求为实验段流场紊流度指标小于0.4%,在稳定段采用蜂窝器和两层阻尼网进行整流并采用较大收缩比设计。四是控制和降低噪声难度大,需要对风扇系统进行高效率低噪声设计。采用风扇-止旋片构型的动力系统,由12片风扇桨叶、11片止旋片、头整流罩、尾整流罩和电机组成,对动力段进行降噪处理,并采用低噪声机械传动机构^[4]。

地面风速环境试验装置洞体收缩段收缩比设计为7.76。除动力段附近外各部件截面均为正方形切角。

2.2 风洞洞体收缩段设计

收缩段对气流起加速作用,同时能够降低气流

的纵向和横向湍流度,是提高实验段气流品质的主要部件之一。收缩段出口的流场对实验段流场影响较大,一般要求收缩段出口气流均匀性、稳定性要好,附面层尽可能薄且不发生分离。

收缩段性能主要由收缩比、收缩曲线等参数决定。收缩段过短会导致气流出现不均匀乃至发生分离,但从成本和空间占用来看,收缩段长度也不宜过长。据统计,国内外风洞收缩段长度通常多为 $(0.5 \sim 1.0)R$, R 为收缩段入口直径。

为了避免在收缩段发生气流分离现象,满足低风速要求,收缩曲线选用五次方曲线,见式(1)。

$$\frac{D - D_2}{D_1 - D_2} = 1 - 10\left(\frac{x}{L}\right)^3 + 15\left(\frac{x}{L}\right)^4 - 6\left(\frac{x}{L}\right)^5 \quad (1)$$

式中: D 为收缩段内 x 处的高或宽; D_1 为入口的高或宽; D_2 为出口的高或宽; x 为长度方向的坐标值; L 为收缩段长度。

风洞收缩段入口边长为1700 mm,切角为280 mm,当量直径为1865 mm,截面积为2.733 m²;出口边长为610 mm,切角为100 mm,当量直径为669 mm,截面积为0.352 m²;长度为1200 mm,收缩比为7.76。

2.3 风洞洞体能量比计算

按技术要求,选择风洞实验段最大风速40 m/s进行风洞能量比的估算,实现风扇系统的最佳设计。

取标准大气状态并按光滑管流进行计算,温度为15 ℃,黏性系数 ν 为 1.4607×10^{-5} 。风洞各部件的当量损失系数及风洞的洞身能量比见表1,当量损失系数 $\sum K_0$ 为0.34,能量比 ER_i 为2.94。

考虑到大部份(如第二扩散段、大角扩散段等)入流条件得不到充分保证,与常规设计有些差异,将当量损失系数 $\sum K_0$ 放大20%,即为0.408,对应洞身能量比 ER_i 为2.45。

当量损失系数 $\sum K_0$ 为0.408,洞身能量比为2.45,风扇效率 η_i 取75%,按实验段风速40 m/s进行功率估算,电机轴头功率计算见式(2)。

$$P=0.5 \rho A v^3 / ER_i / \eta_i \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; A 为洞体截面积; v 为风速。风速为40 m/s时,需要的电机轴头功率 P 为7509 W。

表1 风洞各部件的当量损失系数

Table 1 The equivalent loss coefficient of all parts of wind tunnel

序号	部件	K_0	序号	部件	K_0
1	稳定段	0.049 07	8	第三扩散段	0.002 05
2	收缩段	0.002 50	9	第四扩散段	0.005 35
3	实验段	0.023 83	10	第三和第四拐角	0.019 36
4	第一扩散段	0.046 57	11	第二过渡段	0.000 35
5	第一和第二拐角	0.082 97	12	大角扩散段	0.030 00
6	第二扩散段	0.004 26	13	防护网	0.051 65
7	动力段	0.022 01			
计算结果: $\sum K_0=0.34, ER_i=2.94$					
放大20%时: $\sum K_0=0.408, ER_i=2.45$					

考虑到洞体实际加工具有一定的粗糙度,会造成能量损失,在电机轴头功率上增加近20%的冗余量,电机轴头功率为9011 W,设计值应为10 kW。

2.4 风扇及扇叶设计

采用风扇-止旋片构型动力系统的设计方法,主要包括风扇、止旋片、整流罩和支撑片的设计,风扇和止旋片的设计内容主要为剖面选择、弦长和安装角分布,整流罩的设计内容主要为整流罩外形轮廓和尾罩扩散角的选择。采用改进的Collar方法^[5],按等环量速度分布进行风扇设计。

设计转速为1200 r/min,轮毂比为0.60,叶片数为12,洞身能量比为2.34,实验段横截面积为0.3521 m²,实验段风速为40 m/s,叶片翼型为RAF-D翼型。

翼型数据,弦线为下表面(直线),前缘半径 $R_f=0.0135C$,后缘半径 $R_b=0.01C$ 。风扇桨叶各站位上剖面的弦长和安装角见表2,其中 r 为站位处半径, C 为弦长, $\bar{C}$ 为相对厚度, β 为安装角(剖面弦线与旋转剖面的夹角)。结构设计主要依据 C 、 β 和剖面坐标等参数。

2.5 止旋片设计

设计叶片数为11,叶片厚度为20 mm,叶片翼型从尖部到根部为NACA0010—NACA0017翼型变化,间距弦长比为1.0。

翼型数据,NACA翼型上、下表面坐标对称,坐标见式(3),前缘半径 $R_f=0.011\ 019C$ 。

表2 风扇桨叶设计值
Table 2 The design values of fan blade

风扇桨叶			止旋片叶片				
r/m	C/m	$\beta/(\circ)$	圆弧角/ $(\circ)$	安装角/ $(\circ)$	C/m	$\bar{C}/\text{m}$	弧高/ m
0.3120	0.1068	40.275	32.04	7.69	0.1782	0.1683	0.0125
0.3417	0.0988	37.048	29.60	7.11	0.1952	0.1537	0.0127
0.3714	0.0919	34.322	27.51	6.60	0.2122	0.1414	0.0128
0.4011	0.0858	31.991	25.69	6.17	0.2291	0.1309	0.0129
0.4309	0.0804	29.976	24.10	5.78	0.2461	0.1219	0.0130
0.4606	0.0756	28.217	22.69	5.45	0.2631	0.1140	0.0131
0.4903	0.0713	26.669	21.44	5.15	0.2800	0.1071	0.0131
0.5200	0.0675	25.297	20.33	4.88	0.2970	0.1010	0.0132

$$y/C = 5\bar{C}(0.2969\sqrt{\bar{x}} - 0.126\bar{x} - 0.3516\bar{x}^2 + 0.2843\bar{x}^3 - 0.1015\bar{x}^4) \quad (3)$$

式中: $\bar{x} = x/C$ 。

2.6 整流罩设计

整流罩的长细比取3.0,长度 L (不含等直段和桨叶段)为1872 mm,头罩和尾罩长度(不含等直段)分别为748.8 mm和1123.2 mm,轮毂半径 R 为312 mm。

对于整流罩外形,当 $0 \leq \frac{x}{L} \leq 0.4$ 时,

$$\left(\frac{x}{L} - 0.4\right)^2 + 0.16\left(\frac{r}{R}\right)^2 = 0.16, \text{ 为头罩坐标;}$$

当 $0 \leq \frac{x}{L} \leq 1.0$ 时, $\left(\frac{x}{L} - 0.4\right)^2 + 0.0679\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 0.2921\frac{r}{R} = 0.36$, 为尾罩坐标。其中 r 为各轴网站位的半径。

2.7 标准风速测量

标准风速测量是指对实验段内的风速进行测量,需借助皮托静压管、数字式微差压仪和超声波测风仪等^[3]。

在对风场中的风速进行测量时,皮托静压管总压孔对准风向,所感应的是风的总压力;静压孔与风向垂直,感应的是风的静压力。根据流体力学的伯努利方程,空气流动所造成的动压力等于总压力减去静压力所得的差值。微差压测量仪器对皮托静压管输出的总压力和静压力进行测量,可直接得到风

的动压力^[4]。风速计算见式(4)。

$$P = \frac{1}{2}\rho v^2 = \xi(P_1 - P_2) \quad (4)$$

式中: P 为风洞动压; ρ 为空气密度; v 为气流速度; ξ 为皮托静压管系数; P_1 为皮托静压管感受的总压; P_2 为皮托静压管感受的静压。

3 结语

地面风场风速测量标准装置是检定和测试气象风速测量仪器准确性、稳定性和灵敏性的重要技术设备,检测需要根据场地环境条件、检定对象要求、当前技术工艺发展水平等要素综合考虑,合理设计风速测量标准装置,实现其气象风速测量仪器检定、计量测试和环境试验等使用功能。

参考文献:

- [1] 总装备部军事训练教材编委会. 高低速风洞气动与结构设计[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [2] 伍荣林. 风洞设计原理[M]. 北京:北京航空学院出版社,1985.
- [3] 华绍曾,杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [4] 张平. 高级风速标准装置技术报告[R]. 北京:北京应用气象研究所,2009.
- [5] 胥泽奇. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程,2012,9(1):57—58.