

气象用 90m/s 回流开闭两用强风风洞设计

孔诗媛¹ 刘昕² 边泽强² 孙文博¹ 王旭¹ 陆华³

(1 吉林省气象探测保障中心, 长春 130062; 2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081;

3 江苏省昆山三维换热器有限公司, 昆山 215300)

摘要 为解决国内 70 m/s 以上风速传感器没有检定和校准能力的问题, 本文设计一种风速上限为 90 m/s 的回流强风气象风洞, 并利用移动导轨使试验段具备开闭两用功能。风洞整体尺寸为 26 m×10 m×4.2 m(长×宽×高); 流速范围闭口时达到 0.49~90.74 m/s; 控制系统采用物理量全数字化设计, 满足计量实验的自动化需求。性能指标通过验收均满足气象低速风洞性能测试规范要求。

关键词 强风风洞; 开闭两用风洞; 气象; 低速风洞

中图分类号: P412 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200043 **文献标识码:** A

引言

我国是海陆兼备的国家, 海洋是我国国土空间的重要组成部分, 是经济社会可持续发展的重要战略空间^[1]。中国气象局在海洋沿岸和海岛建设的强风观测站均采用测量范围为 0~90 m/s 的螺旋桨式强风计作为观测设备进行海洋观测, 但目前气象部门测量范围最大的风洞为 0~70 m/s, 为保证螺旋桨式强风计全量程范围的数值准确度, 研发一套风速上限为 90 m/s 的气象低速风洞, 保证海洋观测资料的准确性和完整性, 为海洋气象综合观测体系提供有力支撑。

风洞设计包括结构设计、动力系统设计和控制系统设计 3 个部分。风速上限的扩大涉及整体风洞气动结构的重构, 动力部分的提升为设计的重点。对于风速仪器静态测试研究、动态特性研究以及阻塞系数修正研究都具有深远意义。

1 总体结构设计

风洞总体尺寸为 26 m×10 m×4.2 m(长×宽×高)。回路风洞的气流均匀性和稳定性优于直路风洞, 空间占用情况相对较小。考虑到超声波测风仪、螺旋桨式强风计等新型测风传感器的计量检定

问题, 该风洞采用移动导轨加电控开关的方式实现试验段的开(闭)功能。风洞的总体结构如图 1 所示, 主要包括试验段、动力段、扩散段、拐角段、稳定段、收缩段、收缩段等。

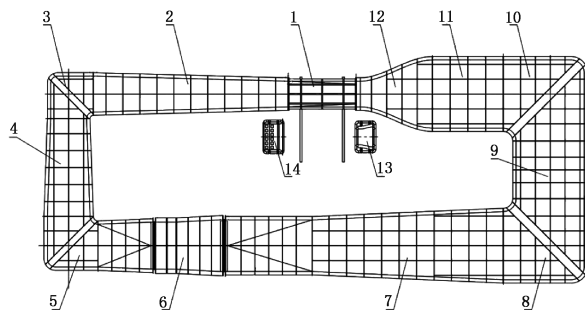


图 1 90 m/s 风洞总体结构

(1 试验段, 2 第 1 扩散段, 3 第 1 拐角段, 4 第 2 扩散段, 5 第 2 拐角段, 6 动力段, 7 第 3 扩散段, 8 第 3 拐角段, 9 等直段, 10 第 4 拐角段, 11 稳定段, 12 第 1 收缩段, 13 第 2 收缩段, 14 收集器)

1.1 试验段设计

1.1.1 闭口试验段设计

风洞试验段尺寸设计时, 应考虑满足螺旋桨式强风计的相关计量工作。螺旋桨式强风计相对传统的风速传感器尺寸要大, 根据测试要求: 被测仪器截面积与试验段截面积的占比要小于 5%, 结合试验中

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

山洪地质灾害防治气象保障工程——装备保障系统 2017 年建设项目资助

作者简介: 孔诗媛, 女, 1988 年生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事气象观测传感器技术研究, Email: ksy184217177@163.com

收稿日期: 2020 年 2 月 18 日; 定稿日期: 2020 年 11 月 28 日

可能遇到的综合情况,取试验段截面尺寸为 1.2 m×1.2 m(高×宽)。

根据非圆管的特征长度(即“水力直径”)确定风洞试验段长度,水力直径的计算公式如式(1)所示:

$$D_0 = 2[D_1 D_2 / (D_1 + D_2)] \quad (1)$$

式中: D_0 为水力直径,单位:m; D_1 为试验段高度,单位:m; D_2 为试验段宽度,单位:m。取 $D_1=1.2$ m, $D_2=1.2$ m 得 $D_0=1.2$ m。

标准闭口常规低速风洞试验段长度取 $L=2.5 D_0^{[2]}$,结合上式可得 $L=3.0$ m。本风洞试验段为开闭两用试验段,在试验段开口状态下,试验段长度过短会导致阻力系数影响较明显,从而影响流场品质。综合各方面因素考虑,本风洞试验段长度取 $L=4.0 D_0$,可得 $L=4.8$ m,取整为 5 m。因此闭口试验段实际尺寸设计为 5.0 m×1.2 m×1.2 m(长×高×宽)

1.1.2 开口试验段设计

为避免闭口试验段洞壁对被检设备的干扰,超声风测风仪等传感器的计量工作在开口环境下进行。由于开口回路风洞的扩散段处在不稳定扰动试验段气流的直接作用区中,洞体结构受到强烈的激振力作用,不可避免的产生强烈振动或共振。本风洞采取在扩散段前加装收集器(如图 1 中 14 所示)的方式来减弱震动的影响。根据自由射流角度设计相应的角度接应来流,并在收集器装置上开减振平衡孔,通过减振孔可对作用在扩散段内、外壁的脉动压差起到缓冲平衡作用,从而削弱自由射流旋涡撞击洞体封闭部分所引起的结构振动。

喷口收缩段的设计根据 CARD C(中国空气动力研究与发展中心)φ3.2 m 开口试验段低速风洞的运行经验,开口风洞试验时在喷口前段增加一个收缩段(如图 1 中 13 所示),二次收缩后开口试验段截面取整为 1 m×1 m,单面扩散角定为 3.22°。

1.2 扩散段设计

扩散段的设计任务是保证气流在通过扩散段时不产生分离,否则对扩散段性能本身以及位于扩散段下游的各段性能均会造成不良的影响。影响气流扩散最主要的因素是扩散角,风洞最佳扩散角由扩散段阻力系数来决定。本风洞第 1 扩散段的扩散角设计为 3°,长度为 9200 mm;第 2 扩散段的扩散角为 4°,长度为 4000 mm;第 3 扩散段的扩散角为 5°,长度为 9017 mm。采用该设计时气流的总压损失因数最小,可以更好地将气流动能转化为压力能。

1.3 拐角段设计

气流经过拐角时在拐角处的外壁和拐角后的内壁容易产生分离和出现对流现象,从而造成流动不均匀或产生脉动^[3-4],因此需要在拐角处设置弧形导流片。本风洞的弧形导流片系数为 0.138,该导流片对来流的适应性较强,能较好地处理气流弯折,对调整试验段中上偏气流和横向气流分布方面有着显著的效果。本风洞各拐角段导流片具体设计数据为:第 1 拐角段:15 片,间距为 145.98 mm;第 2 拐角段:15 片,间距为 173.79 mm;第 3 拐角段:15 片,间距为 278.65 mm;第 4 拐角段:15 片,间距为 278.65 mm。

1.4 稳定段设计

1.4.1 稳定段直径

稳定段位于收缩段前端,根据国内外常规回路风洞设计经验,收缩比通常设定在 $C=7\sim 10$ 。稳定段内还需设置蜂窝器、阻尼网等必要的整流装置^[5-6]来实现风速均匀性和稳定性的最优化。风洞闭口试验段的截面尺寸为 1200 mm×1200 mm,取定值收缩比 7.1,可得该风洞的稳定段直径为 3200 mm×3200 mm。

1.4.2 蜂窝器

风洞稳定段内的蜂窝器,其主要作用是导向和分割气流大漩涡,有利于加快旋涡的衰减,并在一定程度上降低气流的湍流度^[7]。研究表明,气流在通过六角形蜂窝器后,气流湍流度特别是横向分量的湍流度随下游距离的增加衰减十分明显。因此本设计选用的对边距为 20 mm、长细比为 12 的正六角形截面的蜂窝器,实现气流湍流度的充分衰减。

1.4.3 阻尼网

为进一步减小稳定段气流的湍流强度,以及均衡气流中不同风速的偏差,于蜂窝器的下游设计安装了双层阻尼网,阻尼网间距为 500 mm,粗细为 18 目/英寸(1 英寸=2.54 cm)。

1.4.4 静流段设计

为保证风洞内的气流充分均匀和稳定,并使气流的湍流度进一步充分的衰减,在阻尼网后设计一段静流段是必要的。通常静流段长度约为稳定段直径的 0.3~0.5 倍,本风洞稳定段直径 3200 mm,取 0.3 倍稳定段直径计算静流段长度取整为 1000 mm。

1.5 收缩段设计

1.5.1 收缩段长度

收缩段的主要作用是均匀加速气流,使其达到

试验段需要的流速。在设计收缩段时,通常考虑以下 3 个方面:①气流在沿收缩段加速时,洞壁上不出现分离。②收缩段出口截面的气流均匀、平行和稳定。③收缩段不宜过长^[8-9]。

在保证收缩段性能的前提下,通常规定 $L = (0.5 \sim 1.5)D$, D 为收缩段入口直径。本风洞收缩段长度取 $L = 1.125D$, 入口直径为 3200 mm, 收缩段长度为 3600 mm。

1.5.2 收缩段曲线

收缩段曲线采用维斯辛基收缩曲线公式^[10-12]计算各位置处的半高(H)及半宽(B),由此求得各截面的高度($2H$)与宽度($2B$), H 的计算可由式(2)表示:

$$H = \frac{H_2}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{H_2}{D/2} \right)^2 \right] \frac{\left(1 - \frac{3X^2}{A^2} \right)^2}{\left(1 + \frac{X^2}{A^2} \right)^3}}} \quad (2)$$

式中: X 为从收缩段入口到某截面的轴向距离, mm; H 为 X 截面处半高度, mm; D 为收缩段入口截面高, $D = 3200$ mm; H_2 为收缩段出口截面半高, $H_2 = 600$ mm; $A = \sqrt{3}$ 。

计算 B 时只需要将公式中的 H_i 换成对应的 B_i , 代入各数据后计算可得收缩段曲线坐标系数。收缩段的收缩曲线如图 2 所示。

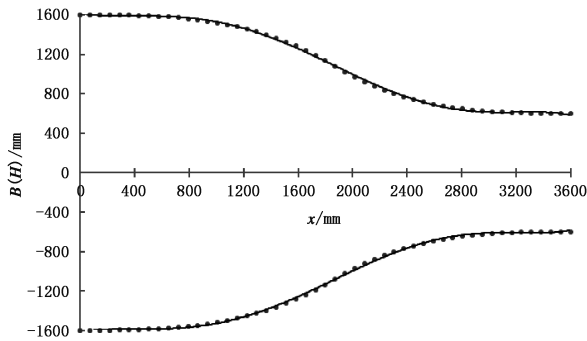


图 2 风洞收缩曲线

(X 为到收缩段入口处的轴向距离; $B(H)$ 为 X 处截面的半宽度或半高度)

2 动力段设计

2.1 动力段结构

动力段是整个系统影响风洞性能最重要的部分,由交流变频电机、交流变频调速系统、整流罩及固定在电机轴上的风扇组成。通过交流变频调速系统调节电机转速,为风洞提供稳定的动压,整流罩为电机及桨毂

等进行整流,使风扇前后保持流线型,改善气流的性能,防止气流分离^[13]。动力段结构如图 3 所示:

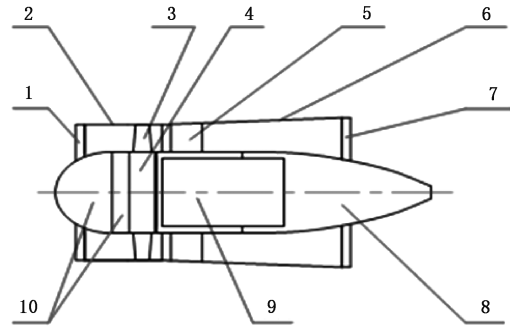


图 3 动力段结构

(1 前连接段, 2 平直段壳体, 3 叶片, 4 轮毂, 5 止旋片, 6 扩散段壳体, 7 后连接段, 8 尾罩, 9 内置电机, 10 头罩)

2.2 电机功率

风洞的试验段截面尺寸和风速上限值确定后,计算求取电机功率。风洞总当量损失系数为 0.32258,其倒数为风洞的能量损失^[14],通常用能量比来表示。能量比定义为风洞试验段气流的动能流速与通过风扇输入风洞的功率之比,根据当量损失系数可得,该风洞的能量比为 3.1。已知低速风洞电机功率计算公式为:

$$P_N = \frac{\frac{1}{2} \rho v^3 A}{\eta_{\text{风扇}} \eta_{\text{电机}} \chi_{\text{风洞}}} \quad (3)$$

式中: $\chi_{\text{风洞}}$ 为风洞能量比; P_N 为电机功率,单位: kW; ρ 为空气密度,单位: kg/m^3 ; v 为试验段最大设计风速,单位: m/s ; A 为风洞试验段截面积,单位: m^2 ; $\eta_{\text{风扇}}$ 为风扇效率; $\eta_{\text{电机}}$ 为电机效率。计算可得所需电机功率为 278 kW。

根据风洞的实际运行结果,考虑多种因素的影响,把计算所得的风洞的总损失系数提高约 10%~15%左右,最终 N 值确定为 310 kW。结合实际情况,本风洞选配 $N = 350$ kW 左右的交流变频电机,转速为 1200 r/min,电机内置于风洞,并选用强冷风机外循环。

2.3 动力段整流装置

整流罩采用流线型旋转体,长细比为 4,动力段内的风扇整流罩的直径为 1316 mm,为动力段直径的 0.59 倍。为避免整个整流罩后段产生过渡的逆压梯度,导致气流分离,整流罩下游的当量圆锥形扩散角设计为 7° 。

整流罩气动外形尺寸按式(4)和式(5)计算:

$$\text{前段: } \left(\frac{x}{L} - 0.4\right)^2 + 0.16\left(\frac{r}{R}\right)^2 = 0.16, \quad \left(0 \leq \frac{x}{L} \leq 0.4\right) \quad (4)$$

$$\text{后段: } \left(\frac{x}{L} - 0.4\right)^2 + 0.0679\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 0.2921\left(\frac{r}{R}\right) = 0.36, \quad \left(0.4 \leq \frac{x}{L} \leq 1.0\right) \quad (5)$$

式中: L 为整流罩全长(m), R 为整流罩最大半径(m), r 为轴向距离 x 对应的截面半径(m)。

3 控制系统设计

控制系统由风洞洞体、西门子 G150 变频器、西门子 PLC、皮托静压管、数字万用表、气压传感器、温湿度传感器、串口服务器和工业计算机等组成,系统框图见图 4。

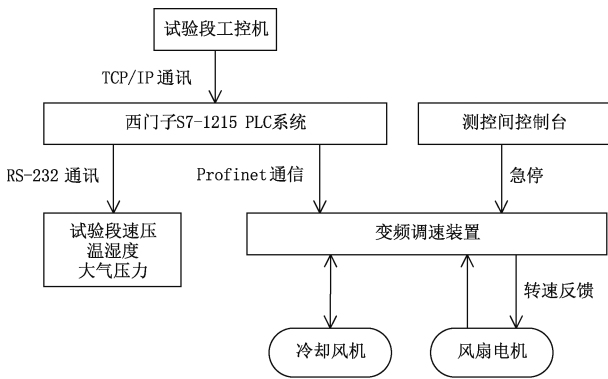


图 4 风速控制系统

系统将检定过程中的物理量全部数字化,以工业计算机为核心,通过串口服务器接口进行通信,从气压传感器、温湿度传感器和数字微压计中同步读出气压、温度、湿度和差压数据^[15],根据公式计算当前标准风速值,通过当前数值与检定设定点风速值比较,通过 PID 调节对变频器输出频率信号,从而对电机转速进行控制。当标准风速值达到检定点风速值并稳定一分钟后,系统开始采集环境参数和标准风速值、被检仪器示值、示值误差等数据,计算求取 30 组数据平均值后自动跳转至下一检定点,直至整个检定过程结束。

4 流场测试校验结果验证

为验证风洞设计的合理性,由国家气象计量站依据中国气象局发布的行业标准 QX/T 84—2007 气象低速风洞性能测试规范进行测试。选用 NPL 型标准皮托静压管作为标准器,给出流速范围、气流偏角、温升、最大噪声、流场均匀性、稳定性主要指标的测试结果。流速范围测试分开口和闭口两种状态;气流偏角分水平和垂直两方向的偏离程度;温升为最大风速下稳定运行 30 min 后洞体测试段的温度上升情况;最大噪声为流速上限时的噪音量;流场的稳定性和均匀性试验选取同一截面不用风速(2 m/s、40 m/s、80 m/s)进行测试,结果如表 1 所示。其中均匀性不大于 1%,稳定性不大于 0.5%,其余各项指标同样均能满足测试规范技术要求。

表 1 90 m/s 强风气象风洞测试结果

	试验段闭口状态	试验段开口状态
流速上限/(m·s ⁻¹)	90.74	70.03
流速下限/(m·s ⁻¹)	0.49	0.45
气流偏角	水平方向 0.53°偏右,垂直方向 0.22°偏下	水平方向 0.45°偏右,垂直方向 0.56°偏下
最大噪声/dB	74.8	80.0
温升/℃	0.8	0.1
流场均匀性	2 m/s:0.15%, 40 m/s:0.08%, 80 m/s:0.20%	2 m/s:0.04 m/s, 40 m/s:0.37%, 70 m/s:0.95%
流场稳定性	2 m/s:0.17%, 40 m/s:0.02%, 80 m/s:0.02%	2 m/s:0.28%, 40m/s:0.06%, 70m/s:0.06%

5 结论

(1)根据海洋气象发展规划建设目标要求,设计了气象用 90 m/s 回流开(闭)两用强风风洞,整体尺寸为 26 m×10 m×4.2 m(长×宽×高);闭口试验段

为截面尺寸 1.2 m×1.2 m 的矩形,长度 $L=5$ m,试验段收缩比为 1:7.1,风机功率 350 kW。

(2)风洞相关性能通过国家气象计量站测试:流速范围闭口时达(0.49~90.74) m/s,开口时达(0.45~70.03) m/s;最大气流流速下温升达

0.8 °C/30 min,最大噪音 80.0 dB;闭口状态流场均匀性 0.2%,稳定性 0.17%,开口状态下流场均匀性 0.95%,稳定性 0.28%。

(3)性能测试数据表明,该风洞结构设计合理,具备试验段可调节、流场性能优异、能量损耗较小等优点,足以填补国内 70 m/s 以上强风检定或校准领域的空白。

参考文献

- [1] 王芳. 对海陆统筹发展的认识和思考[J]. 国土资源, 2009(3):33-35.
- [2] 曹岚,曾攀,雷丽萍. 大口径低速直流式风力测试平台的设计与制造[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(3):86-89.
- [3] 李岩,马宇,王延奎. 风洞实验中的脉动压力测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(增刊 1):171-174.
- [4] 张莽,代京,陈农. 激波风洞瞬时动导数试验方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12):1812-1817.
- [5] 徐挺,陈勇,彭志伟,等. 雷暴冲击风风洞设计及流场测试[J]. 实验力学, 2009, 24(6):505-512.
- [6] 吕骋予,赵志军,张笑雷. 低速高温风洞设计及性能测试[J]. 能源研究与信息, 2018, 34(1):51-55+61.
- [7] 张洪军,韩伟栋,付军. 风冷散热器热阻流阻测试系统风洞和试验段设计[J]. 测试技术学报, 2015(1):7-13.
- [8] 刘卫红,黄为民. 低速风洞收缩段的边界层修正[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(1):51-56.
- [9] 郭金良,白景双,冯杰. 煤矿用涡街原理风速传感器校准方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012(增刊 1):125-127.
- [10] 张金玉,季鑫源,何贵先,等. 风电机组多重雷击暂态过电压分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(3):153-160.
- [11] 于会群,高扬,张浩,等. 并网双馈异步风电机组模糊自适应控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5):676-683.
- [12] 刘秀丽,徐小力. 风电场机组远程监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5):794-801.
- [13] 吴丽萍,姬亚芹,徐让书,等. NK-1 型可移动式风蚀风洞洞体设计[J]. 农业工程学报, 2012(2):62-67.
- [14] 贾青,杨志刚,李启良. 汽车风洞试验段流场的试验研究[J]. 实验流体力学, 2011(6):35-39.
- [15] 魏明明. 风速测量结果中关于水汽修正项的影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6):103-111.

Design of 90 m/s Circumfluence Open/Closed Dual-Purpose Strong Wind Tunnel for Meteorological Application

KONG Shiyuan¹ LIU Xin² BIAN Zeqiang² SUN Wenbo¹ WANG Xu¹ LU Hua³

(1 Jilin Atmospheric Observation and Technical Support Center, Changchun 130062; 2 CMA Meteorological Observation Center, Beijing 100081; 3 Kunshan Three-Dimensional Heat Exchanger Co. Ltd, Jiangsu, Kunshan 215300)

Abstract: In order to solve the problem that there is no verification and calibration capability for wind speed sensors above 70 m/s in China, this paper designs a wind tunnel with the 90 m/s upper limit of wind speed. The moving guide rail makes the test section with open/close dual-purpose. The overall size of the wind tunnel is 26 m×10 m×4.2 m (length, width and height). The velocity range is 0.4 to 90.74 m/s. The control system adopts the fully digital design of physical quantity to meet the automatic demand of metrological experiments. The performance indicators have passed the acceptance test, which means that the tunnel fulfills the test specification for meteorological low speed wind tunnel performance.

Keywords: strong wind tunnel; open/closed dual-purpose tunnel; meteorology; low speed wind tunnel