

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306860

风速传感器风洞校准的阻塞影响及修正方法研究*

邱实^{1,2,3} 孙嫣^{1,2} 陈曦³ 边泽强³ 白赢策³ 任燕^{1,2}(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室 济南 250031; 2. 山东省气象工程技术中心 济南 250031;
3. 中国气象局气象探测中心 北京 100081)

摘要:为研究阻塞现象的形成原理及其对风速校准结果的影响,建立高阻塞比和低阻塞比工况对应的气象风速校准流场仿真模型,分析不同阻塞比工况对圆柱形结构和长方体结构风洞试验段流场影响。现有理论模型和比较法使用单一的修正系数修正所有校准点风速示值,导致低风速校准点风速传感器示值修正存在偏差,针对该问题提出一种各校准点独立计算阻塞修正系数的分段修正方法。结合 EC9-1 型、EL15-1A 型和 ZQZ-TF 型等常用气象风速传感器校准数据,分析分段修正法与既有理论模型和比较法对传感器测量特性的影响。实验结果表明,3 种阻塞修正方法都可改善风速传感器示值误差和频率方程等测量特性,使传感器示值、频率方程的斜率和截距更接近标准风洞的校准数据,分段修正法对传感器偏离程度的改善效果最为显著,经分段修正法修正后的传感器偏离程度最接近标准风洞测得值。

关键词: 风速传感器;阻塞;修正系数;风洞;校准;CFD

中图分类号: P414.7;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Study on obstructing influence and correction of method of wind tunnel calibration for anemometer

Qiu Shi^{1,2,3} Sun Yan^{1,2} Chen Xi³ Bian Zeqiang³ Bai Yingce³ Ren Yan^{1,2}(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China;
2. Shandong Meteorological Project and Technology Center, Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China;
3. Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the formation principle of obstructing phenomenon and its influence on the results of wind speed calibration, this paper establishes the flow field simulation models of meteorological wind speed calibration for different blockage ratio. The influence of different blockage ratio conditions on the flow field of cylindrical and cuboid wind tunnel test section is simulated. The existing theoretical model and comparison method adopt a single correction coefficient to correct the wind speed indication value at all calibration points, which leads to deviation in the correction of low. With this in mind, a piecewise correction method is proposed to calculate the blocking correction coefficient independently for each calibration point. Combined with the anemometer calibration data of EC9-1, EL15-1A and ZQZ-TF, the influence of the piecewise correction method and the existing methods on the anemometer measurement characteristics of is compared. The experimental results indicate that the three obstruction correction methods can improve the measurement characteristics of anemometer, such as measurement error and frequency equation, which makes the indexes of slope, intercept, indicating value and frequency equation of anemometers are closer to the calibration data in standard wind tunnel. The piecewise correction method has the most significant effect on improving the overall deviation degree of the three types of anemometers. The deviation degree of the anemometer corrected by the piecewise correction method is closest to the value measured by the standard wind tunnel.

Keywords: velocity anemometer; obstructing; correction coefficient; wind tunnel; calibration; CFD

0 引言

近地面风的精细化测量对气象观测具有重要意义,准确的近地面风观测数据可对风能利用、污染物扩散和局地微尺度气候评价等研究提供数据支撑^[1-3]。现阶段地面气象观测站普遍采用三杯式风速传感器在距地面 10 m 的位置测量近地面风速值^[4]。确保风速传感器测量误差处于受控区间内的方法是利用风洞对传感器进行定期校准^[5-7],以期科学合理地评价风速传感器的计量特性。

根据《JJG(气象)004-2011 自动气象站风速传感器检定规程》和《JJF1935-2021 自动气象站风速传感器校准规范》,风速传感器应定期检定或校准,以保证风速测量的准确可靠^[8-9]。具体方法是在风洞的试验段内依次按 2、5、10、15、20、25 和 30 m/s 校准点顺序,向风速传感器施加速度稳定且方向平直的气流,传感器示值与试验段风速的差值即为传感器的测量误差。在气象观测过程中传感器可能会长期暴露在灰尘、盐雾和酸雨等环境中,导致传感器的内部轴承生锈或风杯变形,这种传感器测量误差可通过风洞校准直接测量得到^[10-13]。然而,现阶段省级直路风洞在校准过程中存在阻塞效应,数据处理时应应对这种影响加以修正。

事实上,由试验段壁面和传感器外壳对气流的阻挡是影响风洞试验段流场稳定的重要因素。在校准过程中,由于风洞试验段边界壁面的约束,导致内部流场在水平和垂直方向上产生不均匀流动,试验段边界平均流速增大,风杯转速减小,同时传感器的外壳和用于固定传感器的夹具干扰了气流方向,这些现象统称为风速传感器校准的阻塞效应。在外界相同风速下,阻塞效应使传感器示值与实际的近地面风场流速存在差异^[14],因此风洞试验段内的阻塞效应是不可避免的,但可通过经验公式和对比实验放大传感器在风洞内的示值,以最大化消除阻塞效应对风速校准的影响。相关研究普遍关注通过经验公式和对比实验确定风速传感器的阻塞修正系数。文献[15]提出一种适用于气象杯式风速传感器校准的阻塞修正系数计算方法,这种方法可操作性强,适用于各种低速风洞的传感器示值修正。文献[16-17]利用实验和比较的方法,将省级风洞与国家气象计量站标准风洞进行对比实验,各得到一类风速传感器的阻塞修正系数。文献[18]提出一种将被测模型等比缩小的测试方法,减小阻塞效应对气流偏角的影响。文献[19]结合定常雷诺平均方程(RANS)和 SST k- ω 湍流模型模拟风洞试验段校准仪器的过程,指出在低风速下被测仪器旋转、转子力矩、转子个数等因素都可加剧风洞试验段内的阻塞效应,且这种影响随风速增加逐渐减小。文献[20]通过计

算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)仿真和实际测试分析了风洞壁面对阻塞效应的贡献。

上述研究确定了部分类型传感器在风洞校准时的阻塞修正系数,但仍存在一定的局限性。1)既有的修正方法普遍在全校准点均使用同一个阻塞修正系数,这个系数不一定适用于全部的风速区间。2)上述对比实验仅得到一种风速传感器的阻塞修正系数,而未涉及其他型号的风速传感器,计算阻塞比也未考虑夹具贡献的投影面积。3)相关研究未指出阻塞现象对风洞试验段流场的具体影响。针对上述问题,本文基于 CFD 仿真分析阻塞现象对风洞试验段流场的影响,计算气象部门用于近地面风观测的各类风速传感器在两种风洞的实际阻塞比,针对基于高阻塞比工况传感器示值修正问题,提出一种分段修正的阻塞修正方法,分别计算各类风速传感器通过理论模型、比较法和分段修正法得到的阻塞修正系数,分析 3 类阻塞修正方法对风速传感器示值误差、频率方程和偏离程度的影响,以期为省级气象部门高阻塞比风洞的校准数据提供合适的阻塞修正方法。

1 阻塞现象对传感器校准的影响

1.1 风洞试验段模型

本文采用 DZS-II 型直路风洞(试验段截面为直径 0.5 m 的圆形,长 1.0 m,最大风速为 40 m/s)和 QXFD-I 型回路风洞(试验段截面为 0.8 m×0.8 m 的正方形,长 1.6 m,最大风速为 70 m/s)开展气象风速校准工作,直路风洞和回路风洞分别配合皮托静压管、微差压计、环境监测仪构成测风仪器校准装置。风洞内部气流经加速、整流、减压,向试验段提供速度恒定且方向平直的气流。如图 1 所示,风洞试验段建模与实际尺寸完全一致。试验段内部包含被测传感器及一个用于固定传感器的夹具。被测传感器中心在直路风洞距试验段气流入口 0.2 m,在回路风洞距气流入口 0.9 m。传感器的风杯部分受气流入口来流作用开始旋转,待转动频率值依次在各校准点稳定后,记录传感器示值和标准风速值,二者差值为传感器的测量误差。标准风速值的计算方法为:

$$V = 1.278 K_p \sqrt{r \xi K_c P_e} \quad (1)$$

式中: K_p 为试验段内部空气密度修正系数; r 为微差压计修正系数; ξ 为皮托管系数; K_c 为微差压计系数; P_e 为实测风压值。其中,后两项系数通过定期的计量溯源由上一级计量检定机构给出,试验段内部空气密度修正系数为:

$$K_p = \sqrt{\frac{1.013 \cdot 25(273.15 + t)}{288.15(P - 0.378u_e)}} \quad (2)$$

式中: t 为试验段内部流场温度; u 为试验段内部流场的

相对湿度; P 为环境大气压力; e_w 为试验段内部流场温度对应的饱和水汽压。

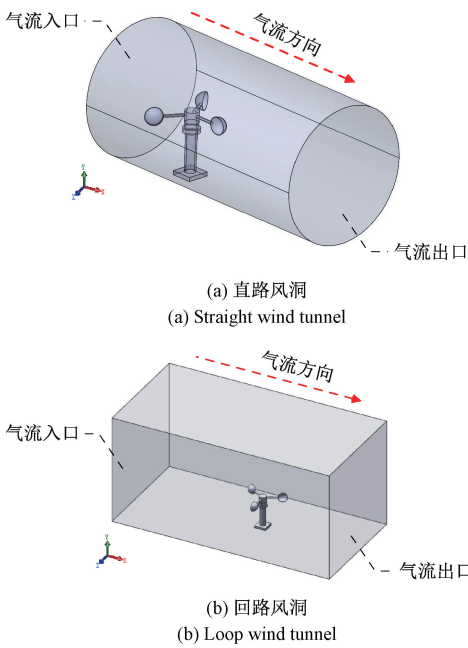


图 1 风洞试验段模型

Fig. 1 Geometry model of test section of wind tunnel

1.2 阻塞比

采用风洞校准风速传感器过程中,阻塞比的定义是风速传感器不动部分(通常为传感器的外壳、底座以及固定夹具)在风洞试验段气流方向上的投影面积与风洞试验段气流入口面积的比值。国内检定规程《JJG(气象) 004-2011 自动气象站风向风速传感器检定规程》、《JJG431-86DEM6 型轻便三杯风向风速表检定过程》和国外 ASTM 测试规范《Standard Test Method for Determining the Performance of a Cup Anemometer or Propeller Anemometer》均规定,若阻塞比超过 5.0%,则阻塞修正系数应参与传感器示值误差的计算过程,传感器在各校准点的测量误差计算方法为:

$$e = v_i E_i - V_i \tag{3}$$

式中: e 为传感器的测量误差值; v_i 为传感器在第 i 个校准点的示值; E_i 为传感器在第 i 个校准点的阻塞修正系数,阻塞比不超过 5.0% 时为 1,阻塞比超过 5.0% 时其计算方法在后续给出; V_i 为第 i 个校准点的标准风速值的。

山东省用于气象近地面风速观测的杯式风速传感器主要有 EC9-1 型、EL15-1A 型和 ZQZ-TF 型。在文献[11]提出的传感器阻塞面积基础上,对 3 类传感器及其夹具的总外观尺寸重新测量,如表 1 所示,测得的总阻塞面积为传感器固定不动部分和夹具在气流方向上共同形成的投影面积。

表 1 传感器阻塞面积和阻塞比
Table 1 Obstructing area and blockage ratio of anemometers

传感器型号	直路风洞试验段		回路风洞试验段	
	总阻塞面积/ cm ²	阻塞比/ %	总阻塞面积/ cm ²	阻塞比/ %
EC9-1	107.46	5.5	97.86	1.5
EL15-1A	133.40	6.8	113.34	1.8
ZQZ-TF	124.90	6.4	115.30	1.8

从表 1 可以看出,在直路风洞试验段中 3 种杯式风速传感器阻塞比均超过 5.0%,因此基于直路风洞测得的传感器示值在各校准点上应乘以阻塞修正系数加以修正。在回路风洞试验段中各类传感器阻塞比最大为 1.8%,远小于规程要求,阻塞效应可以忽略。

1.3 网格和计算方法

以直路风洞试验段和回路风洞试验段两种模型为数值模拟的计算域。计算域网格如图 2 所示,模型采用以六面体单元为主的非结构化网格,并在传感器固定不动部分和风杯部分进行局部加密。计算域被测仪器模型以 ZQZ-TF 型风速传感器为代表,在绿色网格中 3 个风杯及与其连接的主轴为转动部分,与主轴末端相连的圆柱部分虽然可以旋转,但旋转时在气流方向上的投影面积恒定,因此在计算阻塞面积时视其为不动部分,蓝色网格为传感器的外壳和固定夹具,均为固定不动部分。

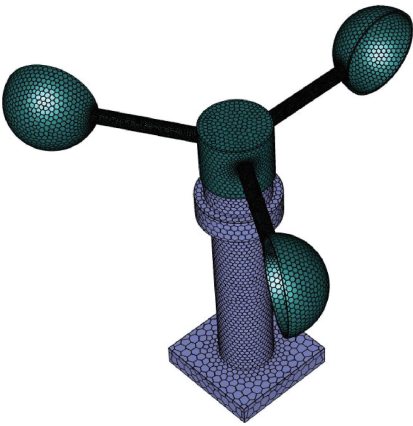


图 2 计算域网格分布

Fig. 2 Mesh distribution of computational domain

理想状态下,ZQZ-TF 型传感器的频率方程为:

$$v = 0.1F \tag{4}$$

式中: v 为传感器示值; F 为脉冲频率。风杯组每旋转一圈,在霍尔电路中触发 18 个脉冲信号,则风速示值与风杯转速的关系为:

$$r = 33.3v \tag{5}$$

式中: r 为风杯转速。CFD 仿真中的风杯转速以此方法

设置,仿真采用有限体积法求解 Navier-Stokes 方程,选用 SST $k-\omega$ 进行数值计算,压力速度耦合基于 SIMPLE 算法。

1.4 阻塞现象的影响

直路风洞试验段为圆柱体结构,回路风洞试验段为长方体结构。为研究阻塞现象对风速校准的影响,调整两种模型气流入口的尺寸,获得两类风洞低阻塞比(小于 5.0%)和高阻塞比(大于 5.0%)模型。将圆柱体结构模

型气流入口径径分别设为 0.80 和 0.35 m,对应的直路风洞阻塞比分别为 2.5%和 13.0%。将长方体结构模型气流入口径边长分别设为 0.80 和 0.35 m,对应回路风洞阻塞比分别为 2.0%和 10.2%。

选择 XZ 平面上穿过风杯中心的剖面,图 3 给出该剖面上低阻塞比(小于 5.0%)和高阻塞比(大于 5.0%)对应的速度矢量。理想状态下气流入口流速恒定,且方向平行于 x 轴。

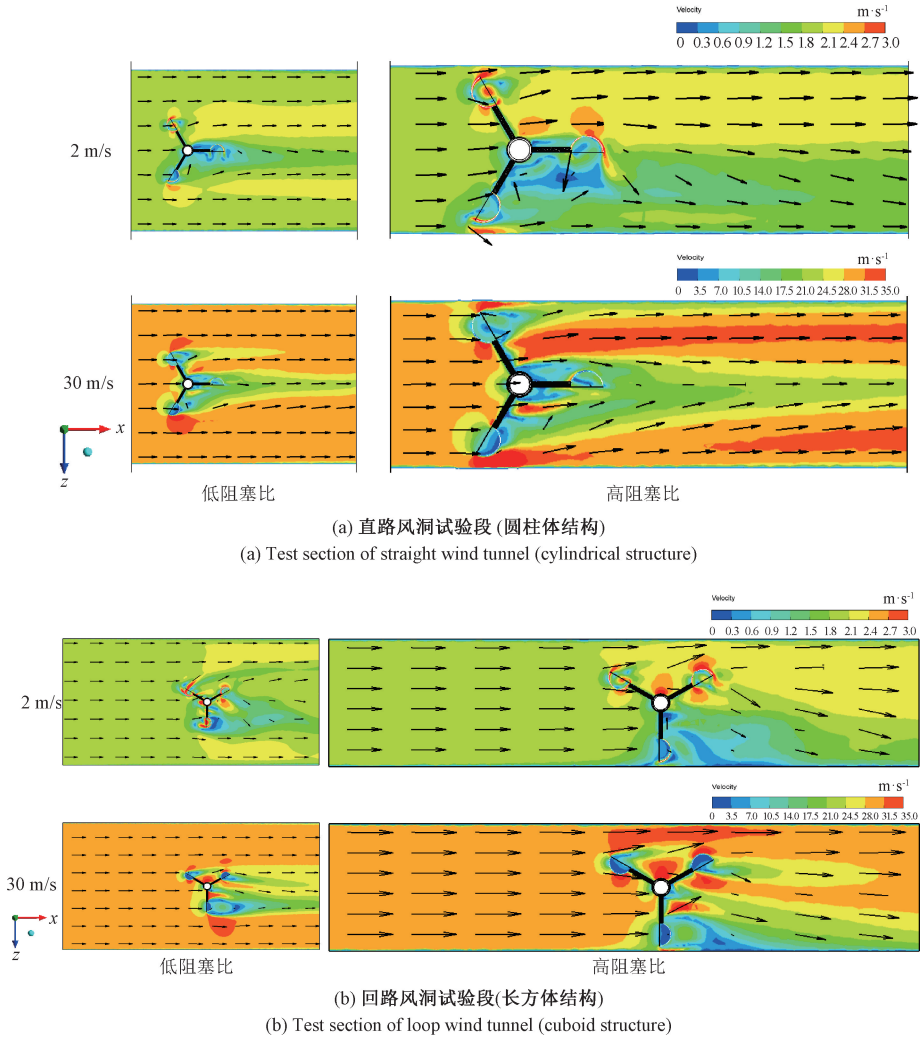


图 3 试验段速度矢量剖面图

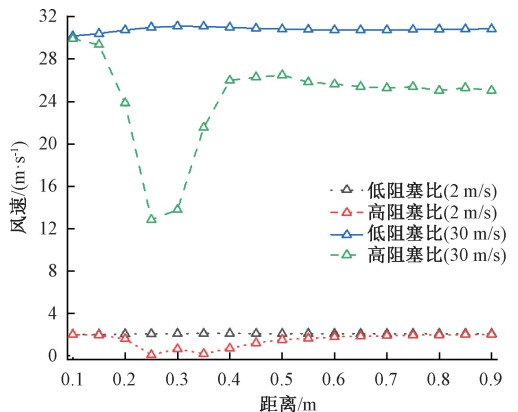
Fig. 3 Cut plots of velocity vector of test section

对于圆柱体结构试验段,低阻塞比工况不同风速下的气流流线分布较为一致,靠近试验段壁面的气流流速分布与气流入口流速相近。高阻塞比工况在 2 m/s 时,风杯旋转造成上、下壁面附近流场存在超过 3 m/s 的流速部分,30 m/s 时距上壁面 0~0.2 m 处、距下壁面 0.1 m 处部分流速超过 35 m/s,因此高阻塞比圆柱体结构试验段无法为风杯旋转提供稳定流场。

对于长方体结构试验段,低阻塞比工况在 2 和 30 m/s 风速下的气流流线分布较为一致。高阻塞比工况在 2 m/s 时下半部分方向不水平,距下壁面 0~0.1 m 处部分流速低于 0.6 m/s,在 30 m/s 时气流方向总体趋势与 2 m/s 基本一致,距上壁面 0~0.2 m 处部分流速超过 35 m/s,距下壁面 0~0.1 m 处部分流速低于 25 m/s,因此高阻塞比长方体结构试验段无法为风杯旋转提供稳

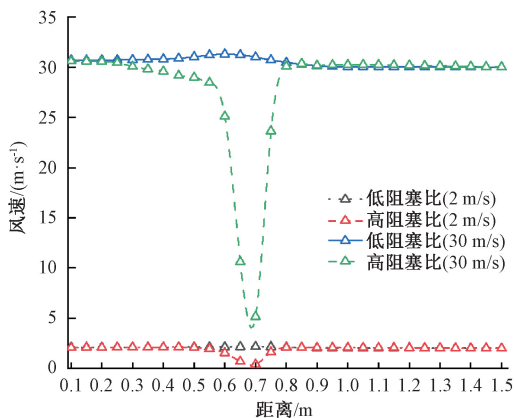
定流场。

参考《QX/T84-2007 气象低速风洞性能测试规范》规定的轴向流速梯度测试方法,在仿真中提取直路风洞和回路风洞中轴线的流速梯度。中轴线以风洞试验段气流入口平面中心为起点,沿 x 轴方向至气出口平面中心结束,得到的两类风洞试验段中轴线速度梯度如图 4 所示。同低阻塞比工况相比,直路风洞高阻塞比工况中轴线速度在风杯旋转区域 2 m/s 时最大衰减达 96.0%, 30 m/s 时最大衰减 58.5%;回路风洞高阻塞比工况中轴线速度在风杯旋转区域 2 m/s 时最大衰减达 81.9%, 30 m/s 时最大衰减 83.4%。



(a) 直路风洞试验段(圆柱体结构)

(a) Test section of straight wind tunnel (cylindrical structure)



(b) 回路风洞试验段(圆柱体结构)

(b) Test section of loop wind tunnel (cuboid structure)

图 4 中轴线流速梯度仿真结果

Fig. 4 Simulation results of central axial velocity gradient

综上所述,阻塞现象使壁面附近形成湍流,造成试验段内流速分布不均;阻塞现象导致试验段中轴线流速小于标准风速,中轴线速度梯度衰减较明显;同时,气流入口提供的标准风速不同,两类风洞受阻塞现象影响形成的速度梯度衰减比例也不同。因此,不同风速下对风速传感器示值的修正应使用不同的修正系数进行修正。

2 阻塞修正系数计算方法

2.1 理论模型

杯式风速传感器匀速旋转时其修正值与示值满足如下关系^[11]:

$$\frac{\Delta V_f}{V_b} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{S_m}{S_w} \quad (6)$$

式中: ΔV_f 为传感器示值修正值; V_b 为未修正的传感器示值; S_m 为传感器阻塞面积; S_w 为试验段气流入口最大内切圆面积。传感器阻塞修正系数为:

$$E = \frac{V_b + \Delta V_f}{V_b} \quad (7)$$

式中: E 为阻塞修正系数。将式(6)代入式(7)得:

$$E = 1 + \frac{\pi}{3} \cdot \frac{S_m}{S_w} \quad (8)$$

根据国家计量量值传递体系,DZS-II 型直路风洞引用国家气象计量站标准风洞比对结果得到的阻塞修正系数 E'_1 的数学模型为:

$$E'_1 = 1 + \frac{\pi}{3} \left(\frac{S_m}{S_w} - \frac{S_m}{S_o} \right) \quad (9)$$

式中: S_o 为国家气象计量站标准风洞试验段气流入口最大内切圆面积。

按理论模型得到 EC9-1 型、EL15-1A 型和 ZQZ-TF 型风速传感器的在各校准点的阻塞修正系数 E'_1 分别为 1.035、1.043 和 1.041。

2.2 比较法

比较法参考行业标准《JJG(气象)004-2011 自动气象站风向风速传感器检定规程》,其原理是挑选两台或多台性能稳定的传感器,分别在 DZS-II 型直路风洞和国家气象计量站标准风洞在 30 m/s 校准点测试,则通过比较法计算每台传感器的阻塞修正系数 E 的方法为:

$$E = \frac{V_o}{V_b} \quad (10)$$

式中: V_o 为每台传感器在标准风洞 30 m/s 校准点测得的示值; V_b 为每台传感器在 DZS-II 型直路风洞 30 m/s 校准点测得的示值。对于同一类型的传感器,利用比较法测得的阻塞修正系数 E 的最大值和最小值相差不超过 2.0%。所有 E 值的平均值为该类型传感器通过比较法测得单一的阻塞修正系数,本研究对 3 类传感器各挑选两支计算阻塞修正系数。如表 2 所示,同一类型两个风速传感器阻塞系数相差均未超过 2.0%,按比较法得到 EC9-1 型、EL15-1A 型和 ZQZ-TF 型风速传感器在各校准点的阻塞修正系数 分别为 1.039、1.033 和 1.036。

表 2 基于比较法得到的阻塞修正系数

Table 2 Obstructing correction coefficient based on the comparison method

传感器 类型	编号	$V_a/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$V_b/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$E/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	二者 相差	$\bar{E}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
EC9-1	1	30.1	28.8	1.045	0.3%	1.039
	2	30.7	29.7	1.034		
EL15-1A	1	29.7	28.6	1.038	1.1%	1.033
	2	30.3	29.5	1.027		
ZQZ-TF	1	30.4	29.4	1.034	0.3%	1.036
	2	30.4	29.3	1.038		

表 3 基于分段修正法得到的阻塞修正系数

Table 3 Obstructing correction coefficient based on the piecewise correction method

校准点/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\bar{E}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		
	EC9-1	EL15-1A	ZQZ-TF
2	1.112	1.083	1.047
5	1.056	1.059	1.035
10	1.052	1.042	1.025
15	1.053	1.040	1.031
20	1.063	1.041	1.041
25	1.053	1.038	1.046
30	1.042	1.040	1.033

2.3 分段修正法

基于理论模型得到的阻塞修正系数本质上是一种估计值,这种方法可操作性强,只要得到传感器在风洞试验段气流方向上的投影面积,都可利用这种方法快速获得较为准确的阻塞修正系数估计值。而比较法利用省级风洞与标准风洞在 30 m/s 最大校准点的示值比对获得阻塞修正系数,在计量学角度,比较法更符合国家规定的量值传递体系,通过对比实验,将阻塞比超过 5.0% 风洞的校准数据与行业最高计量标准建立量值传递关系,但 2~25 m/s 校准点的传感器示值也按 30 m/s 校准点计算的阻塞修正系数进行放大,这种修正方法对低风速示值的修正仍存在一定误差。事实上,同一类型传感器只需两台就可通过比较法得到的阻塞修正系数,其值具有一定随机性,也不一定适用于全部校准点。因此,基于前述不同风速对应的阻塞效应不同及相关仿真分析,针对每一类用于气象近地面风速观测的杯式风速传感器提出分段修正法:

- 1) 挑选同一型号多个性能稳定的风速传感器,按 2、5、10、15、20、25 和 30 m/s 校准点顺序,在 DZS-II 型直路风洞测得传感器示值。
- 2) 按上述校准点顺序,在国家气象计量站标准风洞测得传感器示值。
- 3) 按式(10)给出的计算方法,得到每个被测传感器在上述校准点的阻塞修正系数。各校准点对应全部阻塞系数的平均值即为该校准点最终的阻塞修正系数。

基于分段修正法得到阻塞修正系数如表 3 所示,传感器在各校准点阻塞修正系数均不一致,且不具备线性关系。但 3 类传感器的阻塞修正系数最大值均位于 2 m/s 校准点,表明在该校准点传感器示值需要更高的阻塞修正系数,才能使高阻塞比风洞得到的传感器示值更接近于标准风洞。

3 结果与分析

3.1 阻塞修正对传感器示值的改善

为验证 3 种阻塞修正方法对省级直路风洞校准结果的影响,分别挑选 3 类传感器各一支,对传感器示值添加阻塞系数,得到的阻塞修正结果如表 4 所示。阻塞修正前的示值为省级直路风洞测得的传感器示值,阻塞修正后的示值为修正前示值与对应阻塞修正系数的乘积。不同的阻塞修正方法都可提高传感器的示值,使修正后的示值在各校准点更接近于标准风洞测得的示值。

3.2 阻塞修正对传感器频率方程的改善

省级风速校准过程中,可测得传感器在 7 个校准点的风洞试验段标准流速和传感器频率值的对应关系,对两种变量进行拟合可建立传感器的频率方程。频率方程是对风洞校准结果的应用,根据 7 组数据得到的频率方程建立标准流速和传感器频率值的线性关系,使传感器任意频率值都可代入到频率方程中,获得对应的传感器标准风速值。

如表 5 所示,对 3.1 节挑选的 3 支传感器分别计算阻塞修正前后的频率方程, f 为传感器频率值, v 为拟合后频率值对应的风速值。阻塞修正前的频率方程基于省级高阻塞比风洞校准数据拟合,标准频率方程基于标准风洞校准数据拟合。

阻塞修正前频率方程的斜率和截距大于标准频率方程,3 种阻塞系数修正方法都可使修正前频率方程的截距变小,使其更接近于标准频率方程,同时,3 种修正方法能维持或减小修正前频率方程的斜率值。上述分析表明,3 种阻塞方法修正后都可使传感器频率方程更接近于标准频率方程。

3.3 阻塞修正对传感器偏离程度的改善

传感器的偏离程度指测量误差的绝对值,表示校准

表 4 阻塞修正结果
Table 4 Obstructing correction results

传感器类型	阻塞修正前的传感器示值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	阻塞修正后的传感器示值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			传感器在标准风洞的示值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
		理论计算值	比较法	分段修正法	
EC9-1	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0
	4.8	5.0	5.0	5.1	5.0
	9.9	10.2	10.3	10.4	10.3
	14.9	15.4	15.5	15.7	15.5
	19.9	20.6	20.7	21.2	21.0
	24.7	25.6	25.7	26.0	25.9
	29.9	30.9	31.1	31.2	31.1
EL15-1A	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9
	4.7	4.9	4.9	5.0	5.0
	9.6	10.0	9.9	10.0	10.0
	14.6	15.2	15.1	15.2	15.0
	19.5	20.3	20.1	20.3	19.9
	24.6	25.7	25.4	25.5	24.8
	29.3	30.6	30.3	30.5	29.8
ZQZ-TF	1.7	1.8	1.8	1.8	1.9
	4.6	4.8	4.8	4.8	5.0
	9.6	10.0	9.9	9.8	9.9
	14.6	15.2	15.1	15.1	15.3
	19.5	20.3	20.2	20.3	20.3
	24.3	25.2	25.2	25.4	25.4
	29.4	30.6	30.5	30.4	30.4

表 5 传感器频率方程对比
Table 5 Comparison of anemometer frequency equations

频率方程类型	EC9-1	EL15-1A	ZQZ-TF
阻塞修正前	$v = 0.096f + 0.164$	$v = 0.050f + 0.447$	$v = 0.101f + 0.300$
理论模型修正	$v = 0.096f + 0.113$	$v = 0.047f + 0.435$	$v = 0.097f + 0.272$
比较法修正	$v = 0.096f + 0.118$	$v = 0.048f + 0.438$	$v = 0.097f$
分段修正法修正	$v = 0.095f + 0.111$	$v = 0.048f + 0.359$	$v = 0.097f$
标准频率方程	$v = 0.096f + 0.008$	$v = 0.049f + 0.282$	$v = 0.097f + 0.151$

时传感器示值与标准值之间的差异。偏离程度反映了传感器的测量结果与标准值之间的差异,计算偏离程度有助于识别传感器的漂移量。偏离程度越低,则传感器测量结果准确度越高。

根据 DZS-II 型直路风洞校准数据,计算 3 类传感器在 DZS-II 型直路风洞测得的平均偏离程度以及阻塞修正对偏离程度的影响,根据标准风洞校准数据,计算 3 类传感器在标准风洞测得的平均偏离程度。原始数据中 3 类传感器数量均为 3 支以上。得到的偏离程度变化如图 5 所示。校准点 1~7 分别代表风洞试验段标准流速为 2、5、10、15、20、25 和 30 m/s 的工况。

3 类阻塞修正方法都可改善传感器示值,使传感器在高阻塞工况的 DZS-II 型直路风洞校准测得的偏离程度更接近标准风洞测得值,且分段法修正对传感器偏离程度的改善效果最优。修正前 EC9-1 型、EL15-1A 型、ZQZ-TF 型 3 类传感器平均偏离程度与标准风洞测得的平均偏离程度差值的绝对值范围分别为 0.15~0.31 m/s、0.11~0.88 m/s、0.12~0.48 m/s,经理论模型修正后平

均偏离程度差值绝对值范围分别为 0.05~0.23 m/s、0.01~0.16 m/s、0.04~0.28 m/s,经比较法修正后平均偏离程度差值绝对值范围分别为 0.03~0.26 m/s、0.01~0.06 m/s、0.05~0.32 m/s,经分段修正法修正后平均偏离程度差值绝对值范围分别为 0.01~0.12 m/s、0~0.04 m/s、0~0.07 m/s。

4 结 论

为研究阻塞现象的形成原理及其对直路风洞校准结果的影响,将计算流体仿真技术应用在气象风速校准业务,针对高阻塞比、低阻塞比两种工况,基于直路风洞和回路风洞试验段内部结构,建立了气象风速校准流场仿真模型。提出一种分段修正的阻塞修正方法,通过对比实验计算 EC9-1 型、EL15-1A 型和 ZQZ-TF 型风速传感器 3 种阻塞修正系数,分析阻塞修正系数对传感器示值误差、频率方程和偏离程度的影响。根据数值计算和实验结果,得出如下结论:

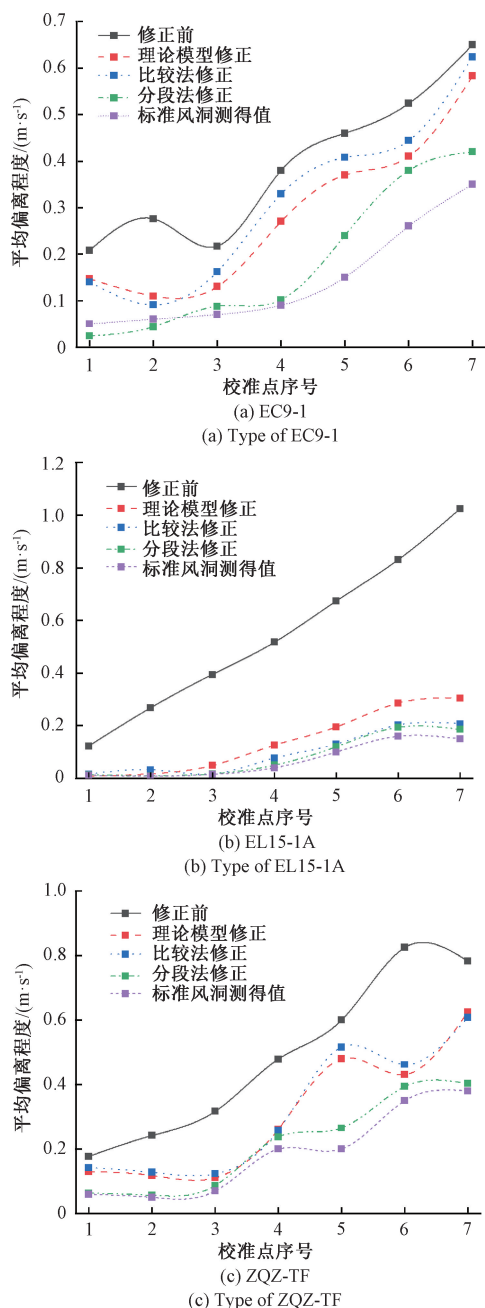


图5 3类传感器平均偏离程度对比

Fig.5 Comparison of average deviation of three types of anemometers

阻塞比大于5.0%时,阻塞现象的表现形式为壁面附近形成湍流,造成试验段内流速分布不均;阻塞现象导致试验段中轴线流速小于标准风速,中轴线速度梯度衰减较明显;同时,气流入口提供的标准风速不同,两类风洞受阻塞现象影响形成的速度梯度衰减比例也不同。

既有阻塞修正方法得出的阻塞修正系数均为单一常数,而传感器示值在2 m/s时需要更高的阻塞修正系数放大后才能更加接近标准风洞测得的示值。

3种阻塞修正方法都可改善风速传感器示值误差和频率方程等测量特性,使传感器示值、频率方程的斜率和截距更接近标准风洞的校准数据。

对于地面气象观测常用的3类风速传感器,分段修正法对其整体偏离程度的改善效果最优。

因此,研究皮托管对风洞试验段流场影响、校准方法优化、气流偏角分析、风洞试验段选型、新型风速传感器选型等问题,都可按本文给出的建模方法对风洞内部流场进行分析。业务中高阻塞比条件下对风速传感器进行校准时,为获得更准确的被检传感器示值,应按本文提出的分段修正法,为各类杯式风速传感器在所有校准点分别计算阻塞修正系数。

参考文献

- [1] 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.
WEI M M. Analysis of the influence of water vapor correction term in wind speed measurement results [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 103-111.
- [2] 魏昱洲, 许西宁. 基于LSTM长短期记忆网络的超短期风速预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 64-71.
WEI Y ZH, XU X N. Ultra-short-term wind speed prediction model using LSTM networks [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2): 64-71.
- [3] 王贺, 陈燕峰, 熊敏, 等. 融合CEEMDAN和ICS-LSTM的短期风速预测建模[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 17-23.
WANG H, CHEN H F, XIONG M, et al. Short-term wind speed forecasting modeling integrating CEEMDAN and ICS-LSTM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 17-23.
- [4] MO H M, HONG H P, FAN F. Estimating the extreme wind speed for regions in China using surface wind observations and reanalysis data [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 143: 19-33.
- [5] RAMOS-CENZANO A, LOPEZ-NUNEZ E, ALFONSO-CORCUERA D, et al. On cup anemometer performance at high altitude above ground [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 79: 101956.
- [6] AL-QURAAN A, STATHOPOULOS T, PILLAY P. Comparison of wind tunnel and on site measurements for urban wind energy estimation of potential yield [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 158: 1-10.
- [7] ALFONSO-CORCUERA D, Ogueta-Gutiérrez M,

- FERNÁNDEZ-SOLER A, et al. Measuring relative wind speeds in stratospheric balloons with cup anemometers: the TASEC-Lab mission [J]. *Sensors*, 2022, 22(15):5575.
- [8] 中国气象局. 自动气象站风速传感器检定规程: JJG (气象)004-2011[S]. 北京: 中国气象局.
China Meteorological Administration. Wind direction and wind speed sensor of automatic meteorological station: JJG (Meteorology) 004-2011 [S]. Beijing: China Meteorological Administration.
- [9] 国家市场监督管理总局. 自动气象站风速传感器校准规范: JJF1935-2021 [S]. 北京: 中国标准出版社.
State Administration for Market Regulation. Calibration specification for cup wind speed transducers of automatic weather stations: JJF1935-2021 [S]. Beijing: China Standards Press, 2021.
- [10] ALFONSO-CORCUERA D, VEGA E, OGUETA-GUTIÉRREZ M, et al. Effect of ice/dirt on cup anemometer rotors [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2023, 89: 102267.
- [11] 李文博, 颜平江, 武灿灿. 一种叶轮式风速仪的校准方法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 129-133.
LI W B, YAN P J, WU C C. Calibration method for impeller anemometers [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39(8): 129-133.
- [12] 胡苍龙, 陈涛. 三杯式风速传感器现场检测装置改进及使用方法研究 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(12): 137-142.
HU C L, CHEN T. Research on improvement and application of field detection device for three-cup wind speed sensor [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(12): 137-142.
- [13] 行鸿彦, 于祥, 邹水平, 等. 风杯式风速传感器启动风速校准实验箱的分析与设计 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1996-2004.
XING H Y, YU X, ZOU SH P, et al. Analysis and design of the experiment box for the starting wind velocity threshold calibration of cup anemometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2015, 36(9): 1996-2004.
- [14] ELTAYESH A, HANNA M B, CASTELLANI F, et al. Effect of wind tunnel blockage on the performance of a horizontal axis wind turbine with different blade number [J]. *Energies*, 2019, 12(10): 1988.
- [15] 李松奎, 边泽强, 刘昕. 风速仪阻塞系数修正可行性研究 [J]. 计量与测试技术, 2018, 45(4): 38-39, 45.
LI S K, BIAN Z Q, LIU X. Feasibility study on block coefficient correction of anemometer [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2018, 45(4): 38-39, 45.
- [16] 支询, 李施, 刘源, 等. 风洞阻塞比系数试验与研究 [J]. 计测技术, 2017, 37(S1): 356-358.
ZHI X, LI SH, LIU Y, et al. Test and study of blockage ratio coefficient in wind tunnel [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2017, 37(S1): 356-358.
- [17] 吴宇, 吴丹, 李学. 风速表在环形风洞检测的阻塞修正研究 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 7-10.
WU Y, WU D, LI X, et al. Research on blocking correction of anemometer in annular wind tunnel detection [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39(9): 7-10.
- [18] 贾青, 黄磊, 鞠树彬, 等. 阻塞比对开口式风洞喷口风速测量方法的影响 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 1641-1647.
JIA Q, HUANG L, JU SH B, et al. Influence of blockage ration on nozzle wind speed measurement method in open-jet wind tunnel [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1641-1647.
- [19] ELTAYESH A, HANNA M B, CASTELLANI F, et al. Effect of wind tunnel blockage on the performance of a horizontal axis wind turbine with different blade number [J]. *Energies*, 2019, 12(10): 1988.
- [20] KLEIN A C, BARTHOLOMAY S, MARTEN D et al. About the suitability of different numerical methods to reproduce model wind turbine measurements in a wind tunnel with a high blockage ratio [J]. *Wind Energy Science*, 2018, 3(1): 439-460.

作者简介



邱实, 2018 年于山东建筑大学获得硕士学位, 现为山东省气象工程技术中心工程师、中国气象局气象探测中心访问学者, 主要研究方向为气象计量。

E-mail: sdjinqius@163.com

Qiu Shi received his M. Sc. degree from Shandong Jianzhu University in 2018. Now he is an intermediate engineer in Shandong Meteorological Project and Technology Center and visiting scholar in Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration. His main research interest includes technology of meteorological metrology.



孙嫣(通信作者), 2007 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为山东省气象工程技术中心正研级高级工程师, 主要研究方向为气象计量。

E-mail: 573315258@qq.com

Sun Yan (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science and Technology in 2007. Now she is a professorial senior engineer in Shandong Meteorological Project. Her main research interests include technology of meteorological metrology.