

文章编号: 1001-4888(2022)05-0638-11

极低风速标定系统密闭室扰动衰减时间研究^{*}

周廷波¹, 田永强², 刘佳航², 张正科², 张国彪¹, 郝忠祥², 高超²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 四川绵阳 621000;

2. 西北工业大学 翼型叶栅空气动力学国家重点实验室, 陕西西安 710072)

摘要: 极低风速标定装置的研制是热线风速仪能准确测量极低风速流动的基本前提和保障。标定装置密闭室作为热线探头运动的空间, 流场扰动衰减归静特性是标定装置设计的关键技术问题。本文基于运动重叠网格技术, 对这一问题进行了数值模拟。令支杆在密闭室以恒定速度运动至接近前方端壁时突然停止运动, 由此建立起扰动流动的初始流场; 后续计算就是对扰动流场的非定常衰减过程的计算。为了验证数值计算结果, 建立了小型密闭腔实验装置, 用一根蚕丝的摆动来表征空气的扰动运动, 对流场扰动进行实验观察。实验结果与数值结果接近, 二者都与文献结果接近, 证明数值模拟和实验是可信的。综合 CFD 模拟、实验结果和文献结果, 可将标定系统密闭室的流场扰动衰减归静时间确定为 12min~15min。

关键词: 极低风速; 标定系统; 扰动衰减; 数值模拟; 实验观察

中图分类号: O351; V211.7

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-176

0 引言

极低风速流动广泛存在于农田小气候、气象学、大气有害排放物生态监测、飞机制造与飞行、采矿、高海拔设备安全保障建设、精细化工、医药和其他很多领域中, 其速度低于 1m/s (例如, 室内自然空气对流流动的典型值为 0.05m/s)。随着现代科技的发展和人们对工作、生活、生态环境要求的不断提高, 环境问题越来越受到关注, 其中就牵扯到对空气流速进行定量测量, 因为空气是最常见的流体之一, 它为污染物提供了对流介质, 因此对极低风速流动研究的重要意义也越来越突出。

热线风速仪具有响应快、测速范围宽、灵敏度高、使用简单方便等特点, 其在极低风速测量方面也有着不可忽视的潜力。热线风速仪是利用放置在流场中通有电流的细金属丝 (直径 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$) 来测量风速的仪器。金属丝通过电流后由于电阻的存在而被加热, 当流体流过金属丝时, 如果流体速度足够大, 就会形成强迫对流, 在强迫对流作用下, 金属丝的温度就会随流速而变化, 从而产生电信号。因为电信号和风速之间具有一一对应的关系, 因此测出了这个电信号就相当于测出了风速^[1]。

热线风速仪根据其工作原理的差异可分为恒流式和恒温式。恒流热线风速仪由于热滞后效应大、电子补偿困难多, 并且补偿本身还必须随流速而变, 致使其在实际使用上存在着诸多不便, 因而发展速度缓慢。而恒温热线风速仪由于电子技术的发展以及它自身热滞后效应小、反应迅速、频率响应宽而获得了飞速发展, 成为了目前主要的热线风速仪类型^[2]。

要使热线风速仪能准确地测量风速, 首先就要对其进行标定, 也就是要找出热线输出电压 E 和风速 U 之间的一个函数关系, 或离散数据的一个拟合关系式。将热线风速仪置于流体中, 它会对流过它的流体的速度做出响应, 这样人们就可以按一个已知的速度 U , 对应地在风速仪上读出一个电压值 E

^{*} 收稿日期: 2021-07-24; 修回日期: 2021-09-28

通信作者: 张正科 (1961—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 空气动力学。Email: zkzhang@nwpu.edu.cn

来做出 E-U 曲线,这就是标定。产生这种已知速度 U 的装置被称为标定装置。

标定装置的建设是风速仪能准确测量风速的前提和保障。世界各国都不同程度地建有不同速度段的热线标定装置。对于中等速度和高速情形(标定速度 $U \geq 1.5 \text{ m/s}$)热线风速仪的标定可以很容易地用一个皮托管和一个压力计(或皮托静压管)通过传统方法(如风洞、喷管、层流管等装置)完成。例如美国国家标准和技术研究院 20 世纪 70 年代建设的双试验段风洞和低速风洞,风速最高分别为 67 m/s 和 11.2 m/s ^[3]。法国航空和热工技术中心有一座闭口回流式标定风洞,速度为 $0.05 \text{ m/s} \sim 2 \text{ m/s}$,可进行温湿度控制,在标定区内,温度预设值与实际值差在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内,温度均匀性优于 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,相对湿度预设值和实际值偏差为 $\pm 4\% \text{ RH}$,均匀性优于 $\pm 0.5\% \text{ RH}$ 。从开始控制温湿度直到达到温湿度设定值所需时间低于 2 h ^[4,5]。德国工程物理研究所有一座低速标定风洞,速度为 $0 \text{ m/s} \sim 60 \text{ m/s}$ ^[5]。西班牙“埃斯特万·特拉达斯”国家空天技术研究所有一座回流式低速标定风洞,速度为 $0 \text{ m/s} \sim 60 \text{ m/s}$ ^[5]。比利时鲁汶天主教大学低速标定风洞风速为 $0.3 \text{ m/s} \sim 60 \text{ m/s}$ ^[5]。英国诺丁汉特伦特大学有一座可调节气流温度的热标定射流风洞,速度为 $0.7 \text{ m/s} \sim 9 \text{ m/s}$,温度为 $20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$,温度和速度控制精度分别为 0.1°C 和 0.5% ^[6]。俄罗斯圣彼得堡门捷列夫全俄计量研究所有一座回流式标定风洞,速度为 $0.05 \text{ m/s} \sim 5 \text{ m/s}$ ^[7]。伊朗科学技术研究院有一座开口直流式射流型标定风洞,气流速度为 $5 \text{ m/s} \sim 35 \text{ m/s}$,气流温度可控,温度为 $20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ ^[8]。阿根廷国立拉普拉塔大学直流式双收缩段标定风洞,速度为 $0.2 \text{ m/s} \sim 1.25 \text{ m/s}$,最大扩展不确定度为 0.06 m/s ^[9]。土耳其加齐安泰普大学有一座低速层流管流标定装置,速度为 $0.029 \text{ m/s} \sim 1.79 \text{ m/s}$,还有一座在滞止空气中以已知角速度作旋转运动的圆盘标定装置,速度为 $0.05 \text{ m/s} \sim 1.05 \text{ m/s}$ ^[10]。

在极低风速情形(特别当 $U < 1.0 \text{ m/s}$),由于流动中的压差太小,以至于很难准确地用压力计读出其值,因此以压差来控制速度的风洞、喷管类标定装置就无法得到准确的速度值,从而不能准确地标定热线^[10-12]。为了能在极低风速下对热线进行标定,人们提出了依赖于探头本身的已知运动的方法,也就是让热线探头在静止空气中作已知速度的匀速运动的方法。比如英国布莱顿理工学院步进电机驱动皮带轮带动运动小车和车载热线风速仪沿封闭通道内轨道运动的标定装置,封闭通道长为 2.6 m ,横截面为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$,风速为 $0.02 \text{ m/s} \sim 1 \text{ m/s}$,小车速度最大误差为 $\pm 0.8\%$ ^[11]。新加坡南洋理工大学同步轮同步带带动热线探头在导轨做匀速运动的标定设备,速度为 $0 \text{ m/s} \sim 0.35 \text{ m/s}$,根据数字伺服放大器每转脉冲数估算的运动速度精度为 $\pm 0.001 \text{ m/s}$,对运动机构速度校核后获得的速度控制精度为 7.0% ,标定曲线拟合的最大误差为 15.04% ^[12]。意大利都灵理工大学国家计量研究所流体力学部有一个在拖曳槽道牵引小车和热线沿轨道运动的标定装置,拖曳槽道长 29.60 m ,矩形横截面高 1.0 m ,宽 2.2 m ,可用于标定的长度有 22 m ,标定速度为 $0.1 \text{ m/s} \sim 1.2 \text{ m/s}$,总体(扩展)不确定度为 0.012 m/s ,最大达到 8% ^[13]。英国布莱德福德大学有一个低速摇摆臂标定装置,速度为 $1 \text{ m/s} \sim 6 \text{ m/s}$ ^[14]。加拿大渥太华大学机械工程系有一座将探头安装在单摆式摇摆臂上的低速标定装置,最大速度为 $0.3 \text{ m/s} \sim 10 \text{ m/s}$ ^[15]。沙特阿拉伯法赫德国王石油矿产大学有一座水平摆臂式标定装置,摆臂长 76.2 cm ,摆臂以其一端为中心进行旋转,标定速度为 $0 \text{ m/s} \sim 0.15 \text{ m/s}$,在 95% 置信水平上的测量值最大不确定度约为 4.1% ^[16]。日本计量研究院力学部 1989 年在地下 8 m 建成一台沿导轨拖拉台车式极低风速标定装置,导轨长 45 m ,台车长 1 m ,宽 0.7 m ,标定风速为 $0.05 \text{ m/s} \sim 1 \text{ m/s}$,标定的不确定度为 $7 \text{ mm/s} + \text{标定风速的 } 0.7\%$ ^[17]。

中国在大气物理和气象学领域也建造了一些低风速或极低风速标定装置。例如,中科院大气物理所 1984 年建成的双试验段闭口单回路回流式极低速标定风洞,洞体长 17.5 m ,小试验段直径 1 m ,大试验段直径 2 m ,稳定段直径 3 m ,标定风速为 $0.15 \text{ m/s} \sim 22 \text{ m/s}$ ^[18]。中国国家气象局气科院计量所有一座直流闭口串式双试验段(工作段及测速段)标定风洞,速度为 $0.1 \text{ m/s} \sim 2.4 \text{ m/s}$ ^[19]。中国计量科学研究院有一座低速风洞标定装置,风速为 $0.1 \text{ m/s} \sim 1 \text{ m/s}$ ^[20],一座射流型极低风速标定装置,流速为 $0.13 \text{ m/s} \sim 1.43 \text{ m/s}$ ^[21],还有一座建在地下 8.3 m 深的导轨气浮滑车极低风速标定装置,滑车运动速度为 $0.1 \text{ m/s} \sim 1.05 \text{ m/s}$ ^[22]。

综上所述可以看出:(1)热线风速仪标定方法有两大类:第一类热线探头是静止的,流体是运动的,

比如风洞、喷管、层流管装置等,称为静态方法(或间接方法);第二类热线探头是运动的,空气是静止的,探头在静止空气中运动,比如雪橇法、同步轮同步带轨道拖动法、旋转臂法、单摆法、摇摆臂法、转盘法等,称为动态方法(或直接方法)。(2)建立在压差控制速度基础上的风洞法、喷管射流法等静态方法在极低速时的速度控制精度不够理想。(3)国际上标定装置的速度控制精度或不确定度处于 $0.5\% \sim 8\%$ 。(4)除法国航空和热工中心风洞能控制温湿度^[4],英国诺丁汉特伦特大学风洞^[6]、伊朗科学技术研究院风洞^[8]可控制温度外,其余各国标定装置均不对温湿度进行控制。

对于一座采用电机驱动同步轮同步带带动热线支杆运动的“动态法”标定装置,为了避免对气流的扰动,并能控制温湿度,有一种设计是把热线探头和支杆的一部分圈到一个密闭室里,与外界隔开。这样,密闭室内支杆运动等对密闭室内空气的扰动多长时间可以回归静止,就成为标定装置设计中的一个重要技术问题。本文拟对某动态标定装置总体方案进行简述,并对标定装置密闭室空气扰动衰减归静时间进行数值模拟和实验观察,从而为标定装置的设计提供理论支撑。

1 总体方案

由于风洞、喷管等静态法标定装置在极低速情形很难精确控制流速,从而无法准确标定热线,所以要设计和建造速度为 $0.1\text{m/s} \sim 1.0\text{m/s}$ 的极低风速标定装置,宜首选探头运动、空气静止的动态方法。在动态法这个总原则下,标定装置中探头的运动方式可采用直线式或回转式,回转式还可再分为圆周形和带有直线段的跑道形布局。直线式布局(或带有直线段并将直线段作为标定段的回转式)运动时探头两侧感受到的风速是对称的、相等的、均匀的,符合实际情况。而在回转运动方式中的曲线运动段,探头两侧的气流速度不对称、不相等、不均匀,另外,也不容易保证探头运动方向恰好在运动轨迹的切线方向,所以至少在标定段,要保证探头是直线运动的。回转式布局虽然从理论上讲可长时间连续标定,但其速度场会残存前一圈运动遗留下来的速度扰动,所以它的这一优势其实是发挥不出来的,因为无论是曲线运动还是直线运动,运动后都会对空气造成扰动,都必须等待空气静止下来(归静)后才可以进行新的标定操作,所以回转式其实并不能进行连续的标定。既然如此,直线运动模式当为最优选择了,它在结构上比回转模式更简单。在驱动方式上,可采用电机驱动同步轮、同步带,同步带带动运动小车在直线导轨上运动,运动小车上竖直安装载有热线探头的支杆,这样热线探头就会随着运动小车进行匀速直线运动,与静止空气形成相对运动,实现对热线的标定。电机可远离热线探头,固定安装在地面上,避免对热线信号造成干扰(如图 1 所示)。

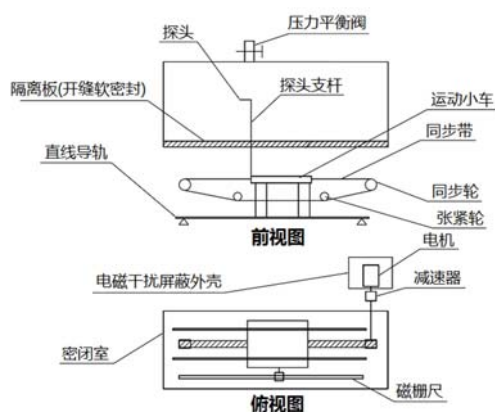


图 1 某标定装置总体布局

Fig. 1 Schematic diagram of the calibration facility in overall layout

文献[13]研究表明,当运动小车的前缘为钝表面时,它对前方流场造成的显著扰动可达到小车上游约 3.5m 处;当把运动小车前缘变成流线型后,它对前方造成的显著扰动就只能达到小车上游 0.6m 处,此时如果将热线探头伸到这个影响域的前方,运动部件对上游的扰动影响就只剩下探头自己的贡献了,这就是真实的探头在静止流体中运动的情形,此时就不存在对前方扰动的问题了。为了消除热线探头之外其他物体对前方空气的扰动,将热线主机、数据采集计算机等钝头物体安放到运动小车上,用一个隔板把它们与探头运动区域隔离开,使探头运动区域形成一个“密闭室”,密闭室内只有一根细长支杆和探头本身,可以免除干扰气流、热线主机、采集计算机等钝头物体对热线探头前方(上游)静止空气

的扰动(图 1)。

由于恒温热线风速仪(constant temperature anemometer, CTA)的工作原理是基于流过热丝或热膜传感器的流体的对流冷却效应,传热过程对空气的速度和温度都很敏感,所以任何温度和速度的变化

都会引起传热的变化,从而引起输出的电信号的变化;另外,空气性质(比如传热系数)随温度变化,也引起传热过程本身的变化。当有温度变化时,热线输出的电信号(比如电压)就混杂着速度和温度的影响,电信号就不能与速度唯一对应,要受到温度的制约,这个就称为温度变化对速度~电信号关系(“~”表示“速度”是“电信号”的函数)的污染,温度污染会引起较大的测量速度误差,例如,在没有温度校正的情况下,每升高 1°C ,速度测量中引入的相对误差为每摄氏度 $1.5\% \sim 1.9\%$ 。只有在等温流动中,流体温度保持不变时热线风速仪的输出信号才与风速一一对应。一般来说,使用 CTA 克服流体温度变化问题的方法有几种,即电子补偿、数学校正、手动调节传感器热阻。当然,要克服温度污染问题,还有一种方法是在所有涉及的温度下对每一个温度单独标定热线^[4,6,23],这就要求标定装置有能力控制气流温度,能对气流加热、降温,维持某一指定温度足够长的时间。

空气的湿度变化会对空气的组分产生影响,从而改变空气的输运特性等物理性质,如密度、黏性、比热、热传导系数、热传递系数,这些物理性质会影响气流速度和热线之间的传热特性,当把热线应用到湿度不同于标定时的湿度环境时,就会产生误差,影响热线测量精度^[24]。在同样的气流速度和温度下,不同的湿度可能导致热线输出不同的电信号,所以也需要在不同湿度下对热线进行标定,这需要标定装置能对气流湿度进行控制,即能加湿、除湿,维持某一指定湿度值足够长的时间。

密闭室不仅隔离了外界对气流的扰动,也阻止了热量和湿度的漏失,使密闭室能保持指定的温度、湿度足够长的时间。而由于探头支杆安装在密闭室下方的运动小车上,它上半部分又必须在密闭室内运动,所以支杆必然要穿过密闭室下壁,这需要在下壁开一槽缝,供支杆沿水平方向运动。为防止槽缝漏气、漏热、漏湿,需要对槽缝进行密封处理。

图2给出了标定系统概念设计图。由图可见,密闭室被安装在一个安装平台上方,安装平台上还安装了导轨支座,导轨支座上安装导轨,导轨支撑运动小车沿导轨运动,探头支杆安装在运动小车上,支杆上半部分及其顶部安装的热线探头在运动小车带动下在密闭室内运动。对于密闭室尺寸,考虑到运动加速、减速、两端安全距离余量及数据采集时间等与长度有关的因素,以及装置的安放空间限制、制造成本等与密闭室体积有关的因素,采用数值模拟方法,对密闭室洞壁干扰、前端壁反射的影响进行了研究,最后确定密闭室长度为 9.4m ,密闭室横截面宽为 800mm ,高为 600mm ,圆柱形热线探头支杆横截面直径为 10mm 。图3为密闭室的横截面示意图,热线支杆长 300mm 。标定系统的设计速度为 $0.1\text{m/s} \sim 1\text{m/s}$ 。



图2 极低风速标定系统结构示意图

Fig. 2 Structure of the of the calibration facility in conception

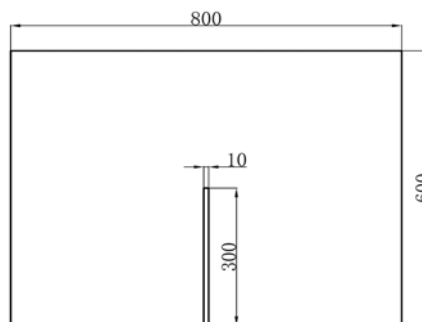


图3 密闭室横截面示意图(单位:mm)

Fig. 3 Cross section of the sealed chamber(unit: mm)

密闭室作为热线探头运动的空间,其中的空气必须在探头即将起动前处于静止状态,否则,如果有干扰流动或残余流动,将使得探头相对于地面的运动速度不等于探头相对于空气的速度,使热线输出的电信号不对应于控制系统所记录的探头相对于地面的运动速度,而造成标定误差。尤其当做完一次标定,热线回到原来起动位置,准备进行下一次标定时,两次标定之间需要等待的时间,就是上一次支杆运动对流场造成的扰动衰减、恢复到静止的时间(归静时间),是标定运行操作的一个重要参考数据。本文拟用数值模拟方法对扰动衰减问题进行研究,并用实验进行验证。

2 数值模拟

要数值模拟密闭室流场扰动演化衰减过程,必须先有一个扰动场。这可以让支杆先从密闭室一端附近匀速运动到另一端附近,然后停止运动,这就形成一个扰动速度场。对支杆匀速运动过程和停止运动后的流场进行连续计算,扰动衰减过程从支杆停止运动那一时刻算起,这样比较接近真实标定过程支杆对流场的扰动。

2.1 控制方程

将坐标系建立在支杆上,来流速度为 1m/s。考虑到圆柱在有限长密闭室中的运动是一个非定常流动,采用 URANS 方法进行非定常计算,控制方程为三维不可压时平均 Navier-Stokes 方程组:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ 为二阶相关项,又称为雷诺应力; p 为压力值; u_i 为*i*方向分速度; x_i 为*i*方向坐标; $i=1, 2, 3$ 和 $j=1, 2, 3$ 分别表示*x*,*y*,*z*三个直角坐标方向。变量上方有“ $\bar{}$ ”者为时均值,变量上标有“ $'$ ”者为脉动量。

2.2 计算网格

由于密闭室是一个长方体,直接用笛卡尔直角坐标网格最合适。但因为里边有一个竖直圆柱形支杆,所以可以选择分块网格或重叠网格技术,也就是围绕圆柱支杆生成一个 O 型结构,如果把它和密闭室直角网格对接起来,就形成分块网格;如果把它和密闭室直角背景网格相重叠,就形成重叠网格。如果计算的是定常问题,也就是管道无限长,定常流动在管道里流过竖直圆柱,那么圆柱网格和直角背景网格在计算过程中相互位置不发生改变,从而分块网格和重叠网格都可以用;但当要模拟圆柱在有限长密闭室里的真实运动过程时,随着圆柱向前运动,圆柱网格就会不断地在密闭室背景网格中移动位置,分块网格技术很难应对这种状况,这时就只能选择重叠网格。扰动衰减问题涉及到圆柱在有限长度密闭室内的运动,圆柱及其网格一直在改变位置,尽管计算衰减过程时圆柱是不动的,但在支杆从一端运动到另一端、创造一个扰动速度场的过程中,支杆是运动的,所以为了一体化连续计算,整个计算都采用重叠网格技术。CFD 数值模拟的几何模型为图 4 所示的长方体域,长方体长宽高分别为 9.4m、0.8m、0.6m,笛卡尔坐标系原点取在密闭室左端面底边的中点,*x*轴为支杆运动的水平方向,*y*轴在水平面,指向侧面,*z*轴在竖直方向,正方向向上,支杆的初始位置(图 4 中竖直细线处)位于距密闭室左端面 0.7m 处。

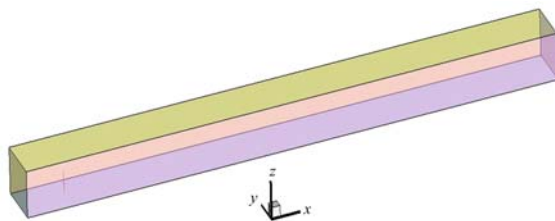


图 4 几何模型

Fig. 4 Geometric model of the sealed chamber

图 5 为计算采用的重叠网格,其中图 5(a)为整体网格,图 5(b)为背景网格中的部件网格,图 5(c)为部件网格局部放大。在密闭室的几何模型(无支杆)中生成背景网格,背景网格为三维笛卡尔结构网格,网格数为 1000905;针对支杆生成部件网格,支杆网格为三维 O 型结构网格,网格数为 159264,支杆在接近密闭室底板部分截去了少许长度,从而使其底端和背景网格边界留出一定的间隙,这样可以方便部件网格与背景网格之间的插值,减小计算的误差,所以支杆的长度略小于 300mm;将背景网格与部件网格在同一几何坐标下合并之后就得到计算所用的重叠网格,合并后的重叠网格数为 1160619。

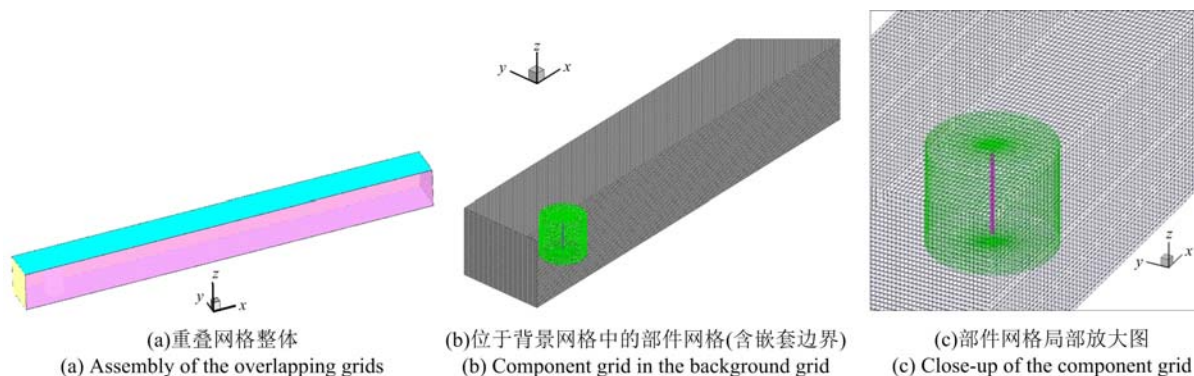


图5 计算网格

Fig. 5 Grid for computations

2.3 流场计算

将重叠网格导入 Fluent 中后,使用瞬态计算,Laminar 模型,设置背景网格为背景域,部件网格为运动域,并设置嵌套边界 Overset interface,利用 udf 文件编程定义内部部件网格和支杆的运动方式,即 x 方向速度为 1m/s ^[25],使支杆从距密闭室左端面 0.7m 处运动至距右端面 0.7m 处后停止运动,然后继续非定常计算,监测计算域内的 x 方向速度变化,直至密闭室内 x 方向最大速度减小至 0.003m/s (即 0.3% ,小于设计指标 $\pm 3\%$ 一个量级)以下。圆柱支杆表面速度取圆柱运动速度,左右端壁、四周侧壁都取无滑移边界条件。运动过程中,内部边界刚性运动,不发生变形。背景网格和运动网格通过交界面(interface)或重叠区进行连接,计算过程中 Fluent 会自动对重叠区的网格进行网格之间的插值和信息传递。

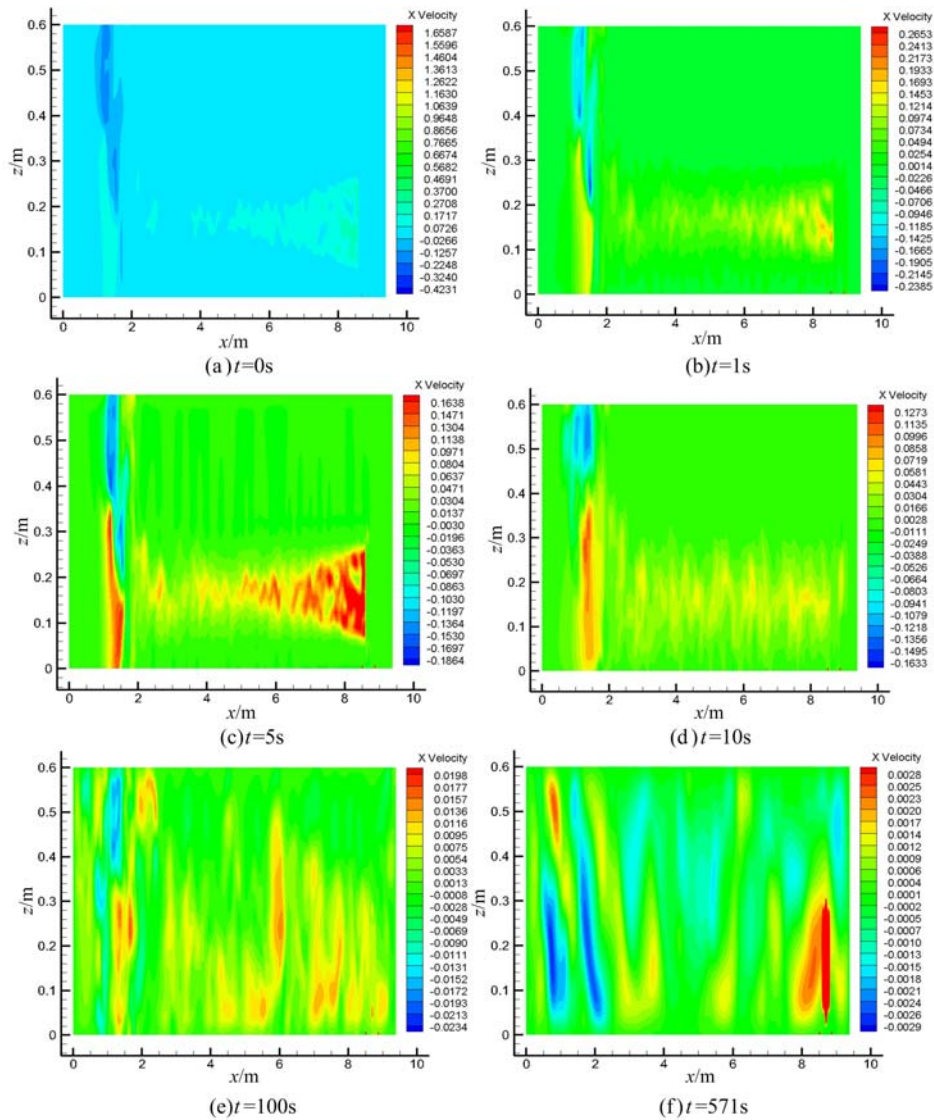
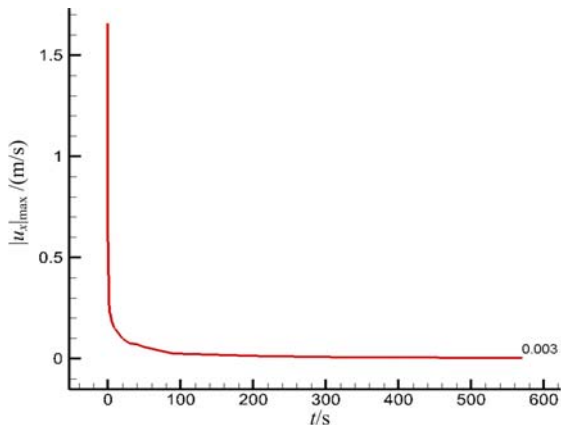
支杆运动停止时为流场扰动衰减的初始时刻,设此时为 $t=0$ 。图 6 显示了 t 为 0s 、 1s 、 5s 、 10s 、 100s 和 571s 时中心竖直对称面($y=0$ 截面) x 方向扰动速度云图(为方便显示, x 方向长度进行了压缩),由图可知,扰动速度的值随时间推移不断减小。

图 7 为全流场 x 方向扰动速度绝对值最大值随时间变化的曲线,由图可以看出,速度最大值在最初很短时间内衰减很快(前 5s 衰减了一个量级),随着时间的推移,衰减变慢。 $t=571\text{s}$ 时,扰动速度最大值衰减到 0.003m/s (标定速度的 0.3% ,比设计指标 $\pm 3\%$ 低一个量级),所以可以把 $t=571\text{s}=9\text{min}31\text{s}$ 作为扰动速度衰减到可以忽略的程度的一个参考时间。

3 实验观察

为了观察空气扰动衰减过程,确定扰动衰减归静时间,搭建了一个长 1m 、宽 0.8m 、高 0.6m 的小型密闭腔。如图 8 所示,该小型密闭腔四周侧壁由透明的有机玻璃板拼接而成,底板和顶板为光滑的铝板,底板与四周的玻璃板,以及各玻璃板拼接处均用热熔喷胶进行了密封加固,以保证密闭腔的气密性。密闭腔顶板可移动,实验开始时顶板未合拢,在密闭腔内产生一定的空气扰动(如吹气、扇风等)后,开始录像计时,再将顶板盖上,此过程约 10s ,其间密闭腔内存在不同程度的空气扰动。密闭腔一侧壁上粘贴有黑色背景纸,在其上方侧壁上固连一根细棍,在细棍上悬挂着一根直径、质量极小,对空气扰动十分敏感的白色蚕丝。实验全程通过密闭腔内支架支撑的摄像装置进行录像,观察蚕丝摆动,通过蚕丝摆动情况了解空气扰动衰减过程。

图 9 为录像开始后 1s 、 4s 、 8s 、 20s 、 25s 、 30s 、 35s 、 40s 、 50s 、 60s 、 2min 、 3min 、 5min 、 7min 、 10min 、 12min 时密闭腔内蚕丝的摆动录像截图。由图可见,在 $t=1\text{s}$ 、 $t=4\text{s}$ 时蚕丝有较大幅度的摆动,说明此时存在较大的扰动速度;在 $t=8\text{s}$ 时,摆动明显,但幅度减小,说明扰动速度有所减小; t 在 $20\text{s}\sim 40\text{s}$ 期间,蚕丝摆动还很明显,说明还有明显扰动速度; t 在 $50\text{s}\sim 60\text{s}$ 期间,蚕丝还有摆动,但不易察觉; t 在 $2\text{min}\sim 3\text{min}$ 期间,蚕丝还有微小摆动; t 在 $3\text{min}\sim 7\text{min}$ 期间,蚕丝形状变化微小,摆动很难察觉; t 在 $7\text{min}\sim 10\text{min}$ 期间,蚕丝形状和位置几乎不发生改变;在 $t=10\text{min}$ 后,蚕丝已经几乎没有摆动, $t=12\text{min}$ 与 $t=10\text{min}$ 时的位置几乎相同,说明此时扰动已经基本不存在,可认为密闭腔内空气已经静止。

图 6 不同时刻垂直对称面 x 向扰动速度云图Fig. 6 Disturbance x -direction velocity contours in central plane of symmetry at different instants图 7 x 向扰动速度最大值随时间的变化Fig. 7 Variation of maximum x -direction disturbance velocity with time

基于上述观察,可以认为该小型密闭腔的扰动衰减归静时间为 12min。

对比计算和实验,两者都得出扰动速度会在扰动之后很短时间内急速减小,然后缓慢减小。实验观察得到的 12min 扰动衰减归静时间与 CFD 模拟得到的 9min31s 相差不大,其差别主要是判断标准不易统一所致。文献[13]观察到,要消散操作人员在拖曳槽池内活动引起的空气扰动需要 15min。综合 CFD 模拟、实验结果和文献[13]结果,可将标定系统密闭室的流场扰动衰减归静时间确定为 12min~15min。



图 8 透明密闭腔

Fig. 8 Transparent sealed chamber

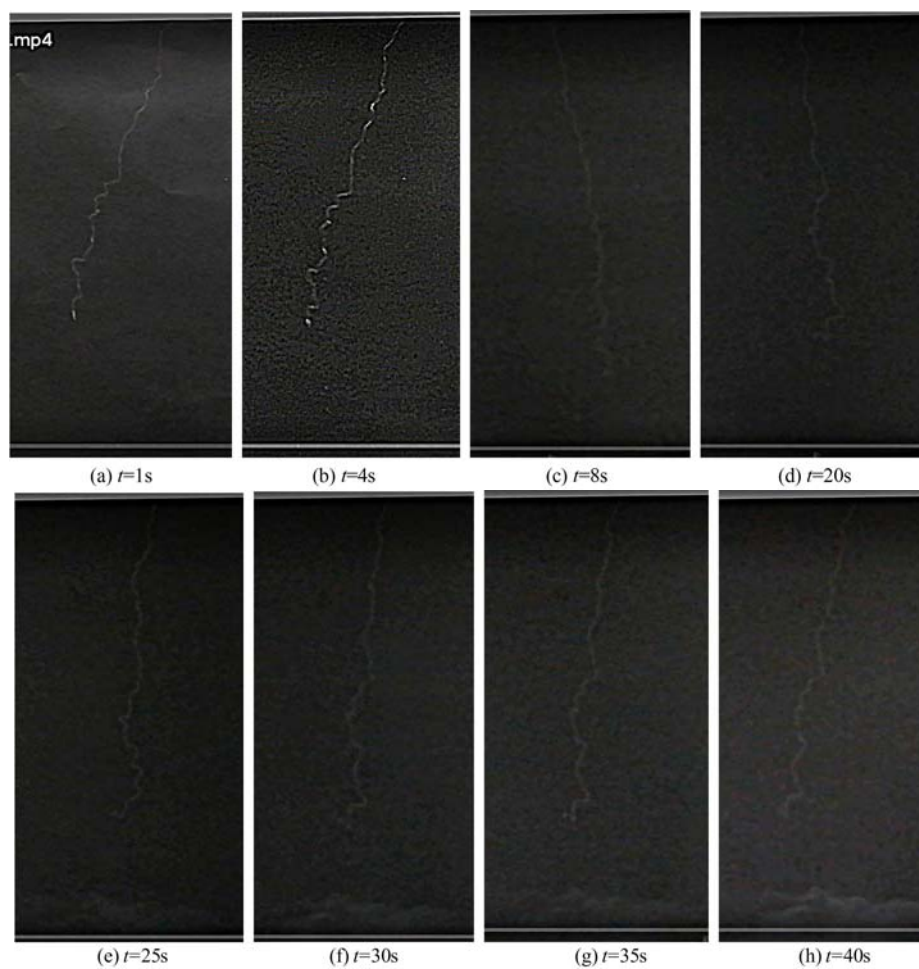


图 9 不同时刻蚕丝位置和状态

Fig. 9 Position and shape of the silk at different instants

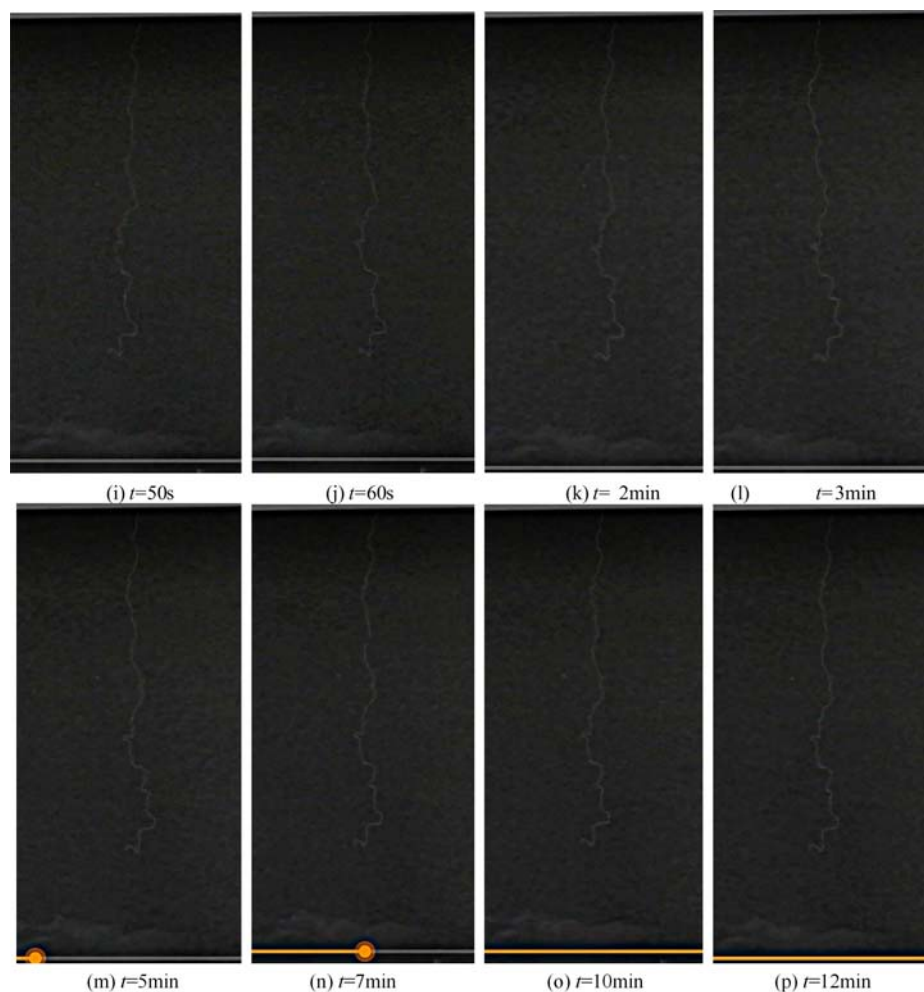


图 9(续) 不同时刻蚕丝位置和状态

Fig. 9(Continued) Position and shape of the silk at different instants

4 结论

对极低风速标定系统设计中的密闭室流场扰动衰减归静时间这一关键气动问题进行了数值模拟,并用实验进行了验证,数值模拟结果和实验结果比较接近,二者与文献结果相差不大,说明数值模拟和实验是可信的;综合 CFD 模拟、实验结果和文献结果,可将标定系统密闭室的流场扰动衰减归静时间确定为 12min~15min。

参考文献:

- [1] 盛森芝, 沈熊, 舒玮. 流速测量技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 1987:45—86 (SHENG Senzhi, SHEN Xiong, SHU Wei. Flow velocity measurement technique[M]. Beijing: Peking University Press, 1987 (in Chinese))
- [2] 盛森芝, 徐月亭, 袁辉靖. 热线热膜流速计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003:1—55 (SHENG Senzhi, XU Yueting, YUAN Huijing. Hot wire and hot film anemometers[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003:1—55 (in Chinese))
- [3] Mease N E, Cleveland W G Jr, Mattingly G E, et al. Air speed calibration at the national institute of standards and technology[C]//Proceedings of Measurement Science Conference, 1991.
- [4] Care I. Characterization of a new calibration wind-tunnel within low air velocity range[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Flow Measurement, 2004.
- [5] Sánchez J R, Müller H, Care I, et al. Air velocity sensors' calibration intercomparison using LDA as standards [C]//Proceedings of 12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics,

- 2004.
- [6] Ball S J, Ashforth-Frost S, Jambunathan K, et al. Appraisal of a hot-wire temperature compensation technique for velocity measurements in non-isothermal flows[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42: 3097—3102.
- [7] Popov K V, Polikarpov S A, Chistyakov Yu A. National primary special standard for the unit of air flow velocity GET 150—2012[J]. *Measurement Techniques*, 2014, 57(8):845—847.
- [8] Ardekani M A, Farhani F. Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2009, 20:174—179.
- [9] Pezzotti S, D'Iorio J I, Nadal-Mora V, et al. A wind tunnel for anemometer calibration in the range of 0.2~1.25m/s[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, 22:338—342.
- [10] Özahi E, Çarpinlioğlu M Ö, Gündoğdu M Y. Simple methods for low speed calibration of hot-wire anemometers [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21:166—170.
- [11] Heikal M, Antoniou A, Cowell T A. A rig for the static calibration of constant-temperature hot wires at very low velocities[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1:221—223.
- [12] Chua L P, Li H-S, Zhang H. Calibration of hot wire for low speed measurements [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2000, 27(4):507—516.
- [13] Spazzini P G, Piccato A, Malvano R. Metrological features of the linear low-speed anemometer calibration facility at INRIM[J]. *Metrologia*, 2009, 46:109—118.
- [14] Bruun H H, Farrar B, Watson I. A swinging arm calibration method for low velocity hot-wire probe calibration [J]. *Experiments in Fluids*, 1989, 7:400—404.
- [15] Guellouz M S, Tavoularis S. A simple pendulum technique for the calibration of hot-wire anemometers over low-velocity ranges[J]. *Experiments in Fluids*, 1995, 18:199—203.
- [16] Al-Garni A M. Low speed calibration of hot-wire anemometers[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2007, 18:95—98.
- [17] 日本计量研究所力学部. 日本和美国的微风速标准的比较[J]. 实用测试技术, 1997(4):48—49 (Mechanics Division, Japanese National Research Laboratory of Metrology. Comparison of extremely low speed standards between Japan and the United States[J]. *Practical Measurement Technology*, 1997(4):48—49 (in Chinese))
- [18] 中国科学院大气物理研究所. 极低速气象标定风洞[J]. 地球科学进展, 1986(Z1):84—85 (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Extremely low speed meteorological calibration wind tunnel [J]. *Advances in Earth Science*, 1986(Z1):84—85 (in Chinese))
- [19] 张佩龙, 苏锁群, 杨云. 极低速范围风速仪的标定[J]. 气象科技, 1991(2):93—96 (ZHANG Peilong, SU Suoqun, YANG Yun. Calibration of extremely low speed range anemometer [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1991(2):93—96 (in Chinese))
- [20] 李鹏, 崔骊水, 李金海, 等. 热线风速仪微风速(0.1~1m/s)下的校准实验研究[J]. 计量技术, 2016(9):3—7 (LI Peng, CUI Lishui, LI Jinhai, et al. Calibration experiment of hot-wire anemometer at very low speed (0.1~1m/s) [J]. *Metrological Technology*, 2016(9):3—7 (in Chinese))
- [21] 吴琼. 热线风速仪现场校准的微风速射流装置的研究[D]. 保定:河北大学, 2018 (WU Qiong. Research on the field calibration of the hot air anemometer for the micro wind speed jet device[D]. Baoding: Hebei University, 2018 (in Chinese))
- [22] 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 (CUI Lishui, LI Peng, QIU Lirong, et al. Experiment investigation on calibration of hot wire anemometer based on low air speed reference facility[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(3):289—293 (in Chinese))
- [23] Lundström H, Sandberg M, Mosfegh B. Temperature dependence of convective heat transfer from fine wires in air: a comprehensive experimental investigation with application to temperature compensation in hot-wire anemometry[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 32:649—657.
- [24] Durst F, Noppenberger S, Still M, et al. Influence of humidity on hot-wire measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 1996, 7:1517—1528.

- [25] 胡坤, 顾中浩, 马海峰. ANSYS CFD 疑难问题实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017 (HU Kun, GU Zhonghao, MA Haifeng. Detailed analysis of knotty problems in ANSYS CFD with examples[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2017 (in Chinese))

Research on disturbance attenuation time in an extremely low wind speed calibration facility

ZHOU Tingbo¹, TIAN Yongqiang², LIU Jiahang², ZHANG Zhengke²,
ZHANG Guobiao¹, XI Zhongxiang², GAO Chao²

(1. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: The construction of extremely low wind speed calibration facility is the basic premise and guarantee for the hot-wire anemometer to accurately measure the flow velocity at extremely low speed. For the sealed chamber to serve as the site for the hot wire probe to move through, the attenuation characteristics of the probe support disturbance in the chamber flow field is a key technical problem in the design of the calibration facility. Based on moving overlapping grid technique, this key aerodynamic problem was numerically investigated. The disturbed flow field was created by letting the probe support travel axially in a straight line in the chamber at a constant velocity and suddenly stopping near one end wall of the chamber which the support rod was approaching. Continued computation after the support stopped started the unsteady attenuation process of the disturbed flow field. To verify and validate the computed result, a pony-size sealed chamber test rig was set up and experimental observation was performed with silk in the chamber representing the motion of disturbed air. Experiments and computations agree with each other and both are close to the result in literature, which indicates that both the computation and the experiment are reliable. The time needed for the disturbed flow field to return to rest was determined to be 12 ~ 15 minutes by judging from the computation, the experiment in this paper and the result in literature.

Keywords: extremely low wind speed; calibration facility; disturbance attenuation; numerical simulation; experimental observation