

# 流道形式对舰艇用消声风洞流场和声学特性的影响研究

金哲民, 方斌, 李瀚钦

(海军工程大学 舰船与海洋学院, 武汉, 430033, Email:jzm\_kim@163.com)

**摘要:** 消声风洞可用于舰艇流体动力设计和声隐身技术研究, 其性能在很大程度上取决于实验段流场特性和消音室背景噪声水平, 而流道形式将对其产生重要影响。采用分离涡 (DES) 方法和声类比 FW-H 方程, 对消声风洞两种不同流道设计方案进行了数值模拟研究。结果表明, 拐角流道形式会降低流场的均匀性, 但是对实验段中心区域影响不大; 拐角流道可降低消音室低频段 ( $<200\text{Hz}$ ) 背景噪声, 并且随着速度的增加, 拐角流道使高频段 ( $>1000\text{Hz}$ ) 背景噪声也有所降低。此外, 由于拐角流道形式在声传播途径上对消声风洞动力段噪声源有一定的抑制作用, 因此, 为使消声风洞总体性能更优, 应选取有拐角的流道形式。

**关键词:** 消声风洞; 流道; 拐角段; 流场特性; 背景噪声

## 1 引言

声隐身性能是潜艇发挥作战效能和保持水下生存的重要能力, 一直受到各国海军的高度重视, 其中噪声水平是衡量潜艇声隐身性能的重要指标。一般而言, 潜艇噪声主要来自水动力噪声、螺旋桨噪声和艇体机械噪声<sup>[1]</sup>。由壁面上的脉动压力以及艇体周围湍流边界层内的扰动共同引起的噪声, 通常称为流噪声, 是水动力噪声的主要组成部分。潜艇低速航行时, 机械噪声占主导, 流噪声在总噪声中所占比例较小, 但是由于水的低可压缩性, 很小的声功率便能产生较大的声压<sup>[2]</sup>。在高频段, 声功率谱密度与来流速度的 6 次方成正比<sup>[3]</sup>, 航速增加一倍, 流噪声级将增加  $15\sim 18\text{dB}$ <sup>[4]</sup>。在中高航速 (大于  $12\text{kn}$  左右) 下, 流噪声将会在水下辐射噪声中占据较大比例, 并且随着机械噪声以及螺旋桨噪声得到有效的控制, 潜艇流噪声问题将日益凸显, 甚至会成为主要噪声源<sup>[2]</sup>, 如图 1 所示。准确预测流噪声, 研究流噪声的产生控制技术, 对潜艇声隐身性能的提升具有重要的工程实际意义。

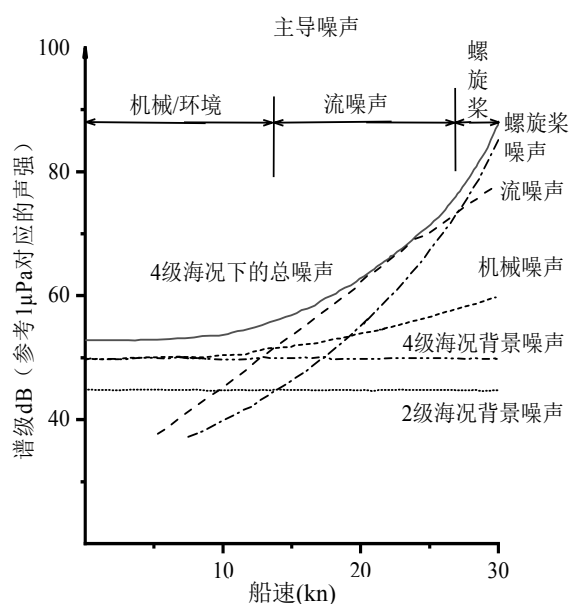


图1 自噪声随航速的变化

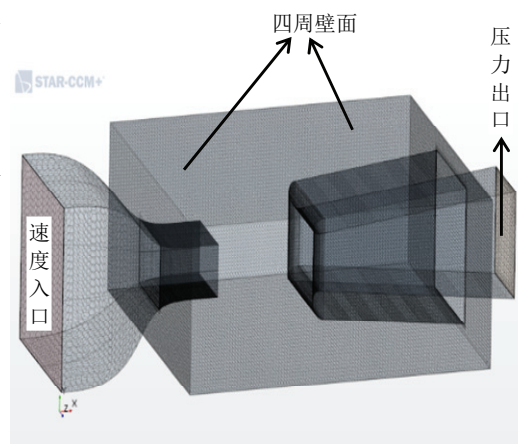


图2 佛罗里达州消声风洞网格

提高航速的同时，保持优良的声隐身性能已成为舰艇设计研究技术领域的研究重点。由于舰艇周围流场复杂，并且难以从舰艇总噪声中分离出流噪声和螺旋桨噪声，因此直接在水中开展相关研究存在很大的困难<sup>[5]</sup>。根据空气中消声比水中容易的特点，借鉴气动声学领域的研究成果，拟设计建造舰艇用消声风洞，在空气中开展舰艇流噪声和螺旋桨噪声的研究<sup>[6]</sup>。由于消声风洞涉及流场和声学问题，为了保证设计目标的实现，需要在设计阶段开展流场和声学特性仿真分析。

本文主要研究不同流道形式消声风洞实验段的流场和背景噪声特性。利用 STAR-CCM+软件，对不同流道形式的消声风洞进行流场仿真，采用分离涡模拟（Detached Eddy Simulation, DES）方法和 FW-H 声学模块进行声场模拟。首先依据与设计方案相近的佛罗里达州消声风洞（计算模型如图 2 所示）实验结果，验证计算方法的准确性。然后对舰艇用消声风洞不同流道设计方案（如图 3 所示）进行数值仿真研究，比较实验段流场和消音室背景噪声特性。

## 2 计算理论与方法

### 2.1 控制方程

由于风洞设计风速在 60m/s 以下，所以流场流动可看做是不可压缩流动，采用连续方程和雷诺平均 Navier-Stokes 方程作为流场的控制方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (2)$$

式中： $\rho$  为流体密度； $p$  为压力， $\mu$  为动力学黏性系数； $x_i$ 、 $u_i$  分别为坐标、速度分量； $i=1,2,3$ ； $S_i$  为广义源项。

声场控制方程采用 Lighthill 声类比方程。将连续方程和 N-S 方程整理变换，即得到 Lighthill 声类比方程：

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3)$$

式中： $\rho' = \rho - \rho_0$ ，应力张量  $T_{ij} = \rho u_i u_j - \tau_{ij} + \delta_{ij}[(p - p_0) - c_0^2(\rho - \rho_0)]$ ，黏性应力张量

$\tau_{ij} = \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right]$ ， $\delta_{ij}$  为 Kronecker 张量。

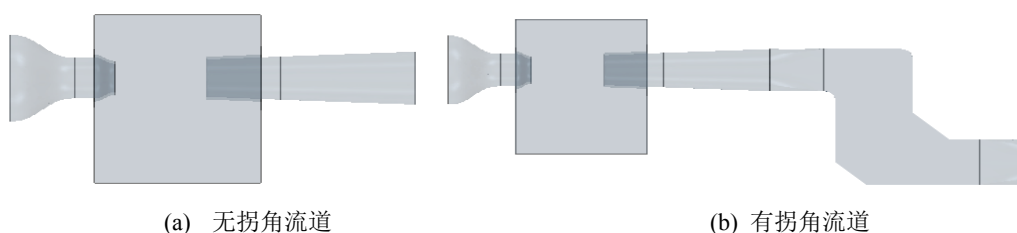


图 3 消声风洞两种流道形式

## 2.2 湍流模型

SST  $k-\omega$  湍流模型使用标准  $k-\omega$  湍流模型求解近壁面区域，使用  $k-\varepsilon$  湍流模型求解湍流区域，并且能在两者之间平滑过渡，所得结果更为准确，因此选用 SST  $k-\omega$  湍流模型。由 RANS 计算得到定常流场后，将结果作为 DES 模拟的初始值进行非定常计算。

Menter<sup>[7]</sup>提出的 SST  $k-\omega$  湍流模型输运方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + u_i \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} = P_k - \frac{\rho k^{3/2}}{l_{k-\omega}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x_i} &= C_\omega P_\omega - \beta_\omega \rho \omega^2 \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + 2\rho(1-F_1) \frac{1}{\omega} \sigma_\omega \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $k$  为湍动能； $\omega$  为比耗散率，涡黏系数  $\mu_l = \min\left[\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{\Omega F_2}\right]$ ，湍流长度尺度

$l_{k-\omega} = \frac{k^{1/2}}{\beta_k \omega}$ ， $F_1$  和  $F_2$  为混合函数， $C_\omega$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_{\omega^2}$  和  $\beta_\omega$  为模式参数； $P_k, P_\omega$  为湍流生成项，依据文献[7]定义具体参数。使用 DES 方法模拟时， $l = \min(l_{k-\omega}, \Delta C_{DES})$ ，网格单元最大边长  $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ， $C_{DES} = 0.65$ 。

### 2.3 FW-H 方程

消声风洞实验段声场的声学计算采用 FW-H 方程。FW-H 方程是直接推导连续方程与 N-S 方程得到非齐次波动方程：

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij} H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{[P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f)\} \quad (6)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial t} \{[\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f)\}$$

式中： $P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right]$  为压应力张量， $p'$  为远场声压； $u_n$  为  $f=0$  面上

的流体法向速度分量， $v_i$  为  $x_i$  方向上的表面速度分量， $v_n$  为  $f=0$  面上的法向表面分量； $\delta(f)$  为狄拉克函数； $H(f)$  为 Heaviside 函数； $n_i$  为表面指向外部区域的单位法向量； $a_0$  为远场声速。对式 (6) 积分之后，可得到分别代表单极子噪声、偶极子噪声和四极子噪声的表达形式。

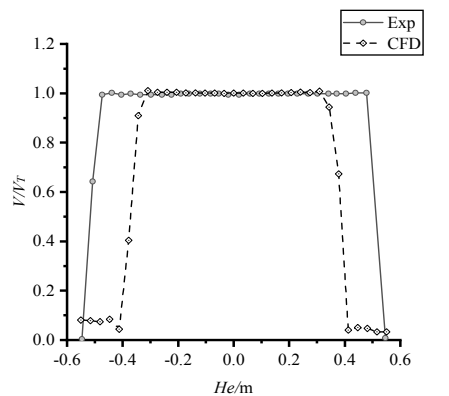
## 3 计算方法验证

针对舰艇用消声风洞实验段的流场和背景噪声问题，由于设计的消声风洞的结构尺寸与美国佛罗里达大学的消声风洞<sup>[8,9]</sup>相近，因此引用其相关实验结果验证本文所采用的流场和声场模拟方法的准确性。主要对影响流场和背景噪声的收缩段、消声室和扩散段三部分，建立图 2 所示的模型。

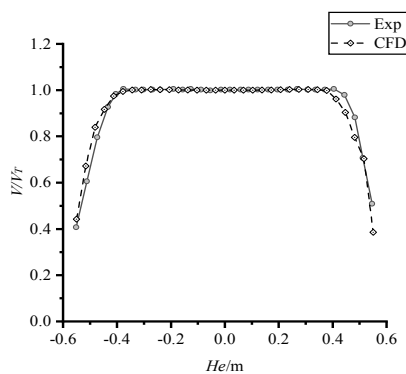
在风速为 17.0m/s、18.1m/s 和 24.4m/s 三种工况下，在距离收缩段出口  $X/X_e=3\%$ 、43% 及 83% 的实验段位置，测量流场沿风洞高度方向的速度分布情况，其中  $X$  为测点与收缩段出口的轴向距离， $X_e$  为收缩段出口与扩散段入口距离。图 4 为仿真值与佛罗里达消声风洞实验值的对比结果，横坐标代表位于实验段纵向对称面上的高度坐标  $He$ ，纵坐标代表测点速度与实验段中心参考点速度比  $V/V_T$ 。流场结果表明：实验段前后的速度变化不太均匀；实验段中心附近 ( $X/X_e=43\%$ ) 仿真结果与实验值基本吻合。

图 5 给出了 3 种风速下 100~5000Hz 范围内的声压级频谱对比情况。结果表明，仿真值与实验值具有相对应的变化趋势；1000Hz 以下的仿真值基本大于实验值。误差产生的原因主要在于：消声风洞的声学优化措施复杂，计算模型未精确模拟实际情况。

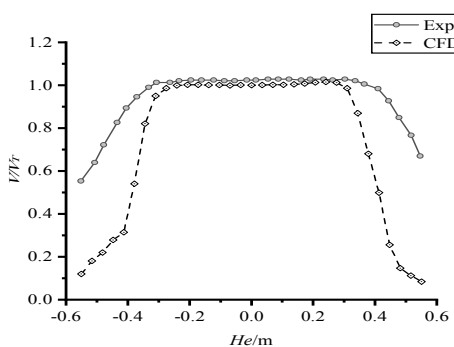
综合流场与声场的结果，采用上述数值模拟方法可以较为准确地模拟消声风洞的流场，以及定性分析消声风洞的不同流道形式下消声室内声场的特性，为最终确立流道形式提供依据。



(a)  $X/X_e=3\%$

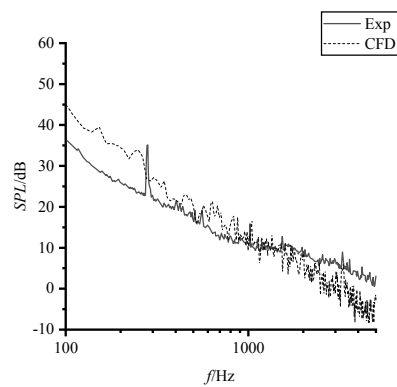


(b)  $X/X_e=43\%$

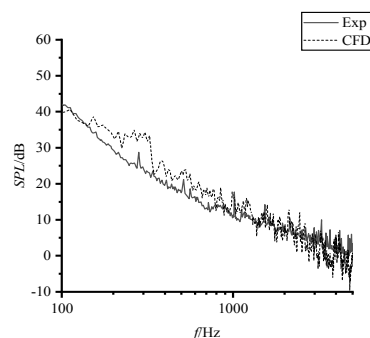


(c)  $X/X_e=83\%$

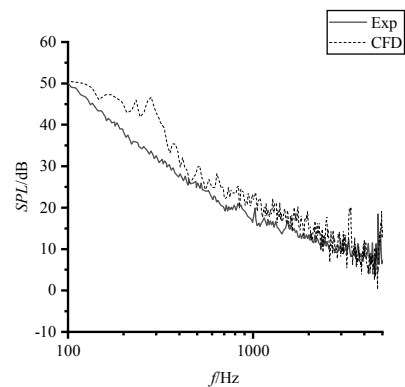
图4 收缩段出口不同位置处速度均匀性



(a)  $V_T=17.0\text{m/s}$



(b)  $V_T=18.1\text{m/s}$



(c)  $V_T=24.4\text{m/s}$

图5 不同风速下声压级曲线

## 4 结果与分析

使用上述数值模拟方法，从实验段流场和消声室声场特性两个方面，仿真比较了舰艇用消声风洞不同的设计方案，其中包括：(1) 无拐角流道形式；(2) 有拐角流道形式。

### 4.1 实验段流场特性

不同流道形式下，在距离收缩段出口 1m 的剖面位置设置流速监测点，将各测点的速度值  $V$  除以该剖面中心轴线处参考点的速度值  $V_T$ ，得到归一化速度  $V/V_T$ 。整理得到如图 6 所示的不同速度下有无拐角流道的速度均匀性对比图。可以看出，在不同速度下有无拐角流道的归一化速度几乎没有差别。

### 4.2 消声室声场特性

进一步比较不同方案下消声风洞背景噪声。图 7 声压级频谱曲线图表明：流速较低时，拐角流道会降低消声风洞低频段 ( $<200\text{Hz}$ ) 背景噪声；并且随着速度的增加，拐角流道使高频段 ( $>1000\text{Hz}$ ) 背景噪声也有所降低。

## 5 结论

针对舰艇流体动力与声隐身技术实验室消声风洞，本文采用了 DES 方法和 FW-H 方程对消声风洞两种不同流道形式的设计方案进行了数值研究。

(1) 拐角流道会降低实验段流场品质，对实验段中心区域流场均匀性影响不大。

(2) 拐角流道可降低消音室低频段 ( $<200\text{Hz}$ ) 背景噪声，并且随着速度的增加，拐角流道使高频段 ( $>1000\text{Hz}$ ) 背景噪声也有所降低。

(3) 由于拐角流道形式在声传播途径上对消声风洞动力段噪声源有一定的抑制作用，因此，消声风洞选取有拐角流道形式的。

(4) 为了更为精确地掌握消声风洞内部流场与声场特性，需要建立更为完善的模型，进一步开展深入研究。

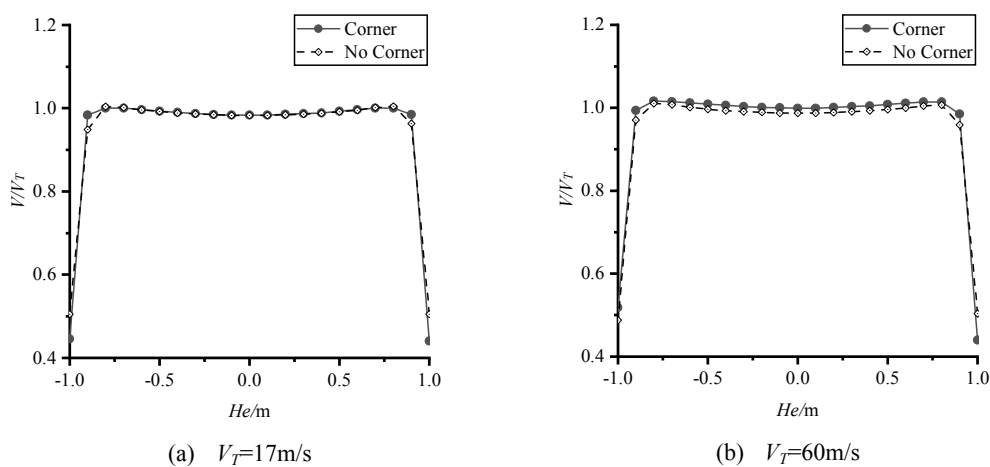


图6 不同速度下速度均匀性

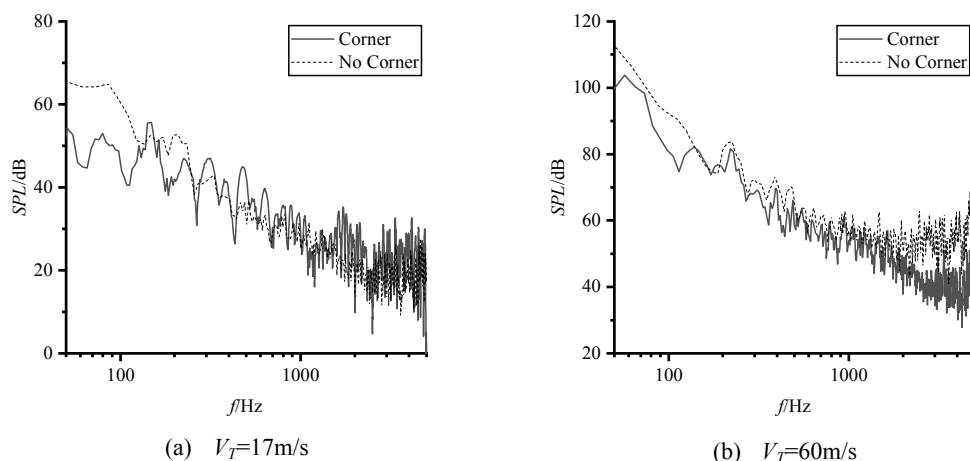


图7 不同速度下有无拐角流道背景噪声

## 参考文献

- 1 俞孟萨, 吴有生, 庞业珍. 国外舰船水动力噪声研究进展概述[J]. 船舶力学, 2007, 11(1): 152-158.
- 2 WAITE A D. 王德石译. 实用声呐工程. 第三版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- 3 周连第. 船舶与海洋工程计算流体力学的研究进展与应用[J]. 空气动力学学报, 1998(1): 122-131.
- 4 李东升, 吕世金, 俞孟萨. 水面舰船水动力辐射噪声工程估算[J]. 水下噪声学术论文选集 (1985-2005), 2005.

- 5 孟庆昌, 周其斗, 方斌, 等. 用于声学测量的消声风洞研究综述[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(9):9-15.
- 6 方斌, 周其斗, 李瀚钦. 军队院校实验室建设中军民融合问题探究[J]. 中国现代教育装备, 2017(9):13-16.
- 7 Menter F. Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows[C]//23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference. 1993: 2906.
- 8 Mathew J, Bahr C, Carroll B, et al. Design, fabrication, and characterization of an anechoic wind tunnel facility[C]//11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2005: 3052.
- 9 Mathew J, Bahr C, Sheplak M, et al. Characterization of an anechoic wind tunnel facility[C]//ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2005: 281-285.

## Study on the influence of flow channel form on the flow field and acoustic characteristics of the anechoic wind tunnel for vessels

JIN Zhe-min, FANG Bin, LI Han-qin

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, 430033,  
Email: jzm\_kim@163.com)

**Abstract:** Anechoic wind tunnel can be used for the research of vessel fluid dynamic design and acoustic stealth technology. The performance of the anechoic wind tunnel depends largely on the flow field characteristic of its experimental zone and the background noise level, and flow channel layout will have an important impact on it. DES method and FW-H equation are used on numerical simulation study of two different flow channel schemes for the anechoic wind tunnel. The results show that the flow channel with corner will reduce the uniformity of the flow field, but has little effect on the central area of the experimental section. The flow channel with corner will reduce the background noise of the low frequency bands (<200Hz) of the anechoic chamber. With the increase of flow velocity, it also reduces the background noise of high frequency bands (>1000Hz). In addition, considering the flow channel with corner has a certain inhibitory effect on the noise source of the anechoic wind tunnel power section on the sound propagation path, the anechoic wind tunnel with corner channel should be selected for better performance.

**Key words:** anechoic wind tunnel; flow channel; corner section; flow field characteristics; background noise.