

低雷诺数壁面约束流动皮托管测速误差分析与校正*

张怀宝¹, 王靖宇¹, Bailey Sean C. C.², 王光学¹, 邓小刚³

(1. 中山大学物理学院, 广东广州 510006; 2. 肯塔基大学工程学院, 美国肯塔基州 40506;

3. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对低雷诺数壁面约束流动中皮托管测速误差产生的两大主要影响因素——剪切速度与近壁效应, 采用计算流体力学技术分别对其进行数值模拟, 并研究各自引起的误差变化规律。数值模拟结果表明: 虽然剪切速度引起的流线偏移规律与相关文献结论基本一致, 但是数值结果预测的流线偏移量并不是一个渐近函数; 近壁距离在5倍管径即出现较为明显的测量误差, 并且发现近壁距离在1倍管径处出现误差的非单调性变化。最后通过将数值模拟结果与现有的修正方法进行对比, 提出了更为合理的修正方程。

关键词:低雷诺数; 壁面约束流动; 皮托管; 计算流体力学

中图分类号: V211.71 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2018)03-037-05

Investigation of mean velocity measurement for low Reynolds number wall-bounded flow using Pitot tubes

ZHANG Huaibao¹, WANG Jingyu¹, Bailey Sean C. C.², WANG Guangxue¹, DENG Xiaogang³

(1. School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Engineering, University of Kentucky, Kentucky 40506, USA;

3. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The numerical investigation of two main factors, velocity shear and wall proximity effect, which affects mean velocity measurement for low Reynolds number wall-bounded flow using Pitot tubes, was carried out. Their effects were separated through careful numerical simulation and cases were run for each of them respectively for error analysis. The simulation results show that: for velocity shear, the result of current work basically agrees with that of related literature, however, the non-dimensional streamline shift does not asymptotically approach to a constant value; noticeable wall vicinity effect can be found within 5 tube diameters to the wall, and errors are decreasing within 1 tube diameter to the wall. Comparisons were made among the numerical solutions in this work and the corrections being used in the literature, and the new corrections based on simulation results of current work were given in the end.

Key words: low Reynolds number; wall-bounded flow; Pitot tube; computational fluid dynamics

实验过程中测量壁面约束流动的时均速度通常采用皮托管或热线探针。其中皮托管技术是一种传统方法, 原理是应用伯努利方程将测量的总压与静压之差转换为速度值, 装置简单易于实现, 成本也较为低廉; 而热线探针方法应用热敏电子元件的热平衡原理, 将来流的速度信号转换为电信号, 再通过电路系统转换得到速度值, 使用与发展较晚, 通常涉及测量电路的设计与校正, 具有尺寸小、响应频率高等特点^[1], 其系统较为复杂, 成本也相对较高。皮托管的测量结果通常受到剪切速度、近壁通流阻塞效应的影响, 此外还可能受到流动情况如湍流效应或者低雷诺数效应影响, 同时非标准条件下检测杆和安装角度也会引起附

加误差^[2]。热线探针法的测量通常需要通过皮托管来校正, 其测量结果主要受到壁面处的传热、对流效应等影响。

随着热线探针技术的广泛使用, 实验中通常不再倾向选择传统的皮托管技术^[3]。如果单纯测量湍流数据, 热线探针能够较为方便的测量速度的瞬时脉动值与统计平均值, 特别适应于低速流体湍流度的测量^[4]。而且与皮托管相比, 使用热线探针通常可以使得测点进一步靠近壁面, 更加深入边界层内^[5]。但是, 热线探针测量系统类型不一又各有差异, 误差源较难以统一确定与消除, 另外测量系统的稳定性又受到电子元器件以及控制电路品质的影响, 需要结合相应的稳定性控制方法以保证和提

* 收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家部委基金资助项目(41406030101)

作者简介: 张怀宝(1985—), 男, 山东高密人, 研究员, 博士, E-mail: zhanghb28@mail.sysu.edu.cn

高测量性能。使用皮托管的好处是,可以使其初始测量位置紧贴壁面,通过皮托管的内外直径等设计参数能够方便地标定距壁面的距离,从而确定参考距离,这对热线探针来说较难做到。综上所述,在测量壁面约束流动时,采用皮托管与热线探针两种技术孰优孰劣尚未有定论。

2008年,加州理工学院等单位的研究人员发起了一项关于实验湍流的国际合作与实验研究(International Collaboration on Experimental Turbulence, ICET),研究内容为壁面约束湍流的测量方法与技术。具体来说,在一系列相同的实验条件下,参与合作的各个实验室采用各自的测量手段进行独立试验,然后通过对比实验结果,进行测量方法的评估以及测量装置的误差分析与校正研究。作为上述研究的一部分,本文的相关工作是配合肯塔基大学实验流体实验室(Experimental Fluid Dynamics Lab, EFDL)对皮托管测量的误差分析与校正等相关研究。为克服实验条件的约束,特别是针对实验方法中难以将主要影响因素分离的难点,引入三维计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟技术,对传统皮托管测量过程中的两大主要影响因素——剪切速度与近壁效应分别进行研究,并对比文献中现有的各种修正方法,分析优劣,最后在此基础上发展更为精确的修正方法。

1 皮托管测量主要影响因素

采用皮托管测量边界层内的速度受到多种因素影响,McKeon等^[6]通过研究充分发展的管内湍流,总结了以下主要影响因素以及修正方法:

- 1) 低雷诺数影响,需引入低雷诺数修正,也称作黏性修正;
- 2) 剪切速度影响,需引入剪切速度修正,也称为速度梯度修正;
- 3) 近壁效应,需引入近壁修正;
- 4) 湍流效应,需引入湍流修正。

如果采用管壁取压口测量静压,可能还需要引入额外的雷诺数修正。实验表明当 $Re_d > 100$,黏性修正可以忽略,其中皮托管雷诺数 Re_d 的计算中速度采用当地时均速度 U ,长度采用皮托管的外径 d ^[7]。本文主要针对剪切速度与近壁效应两大影响因素引起的测量误差进行分析,为了避免黏性与湍流等因素可能造成的干扰,选取皮托管测头迎风面中心处 $Re_d = 129$;为了避免管壁取压口选取位置的影响,皮托管将简化为一端敞开、另一端封闭的简单管状几何模型。

采用皮托管方法测量流速时需要将皮托管装置置入流场,测量区域的流体由于皮托管的存在不得不绕流皮托管,当地流场的流动情况发生改变,即“所测量的流场”与没有放入皮托管时的“原流场”相比有一定差别。当皮托管测头前存在剪切速度场时,首先会引起测头迎风面处平均压力的非线性变化,从而影响所测得的平均压强,另外从流线图1(a)可以看出,皮托管前端的流线产生了向下的偏移量。另一个主要影响因素是近壁效应,如图1(b)所示的均速入口下的流动侧视图,当皮托管不断靠近壁面处,皮托管与壁面处之间的间隙不断减小,通流面积不断减小,流动出现阻塞,从流线上观察,皮托管测头迎风面中心处的流线与其起点相比产生了向上的偏移量。当皮托管继续靠近壁面,并进入边界层内,会同时受到剪切速度与近壁效应的影响,近壁效应引起的流线偏移与速度剪切效应引起的流线偏移作用相反,此时引起的净偏移量较难以定量分析。

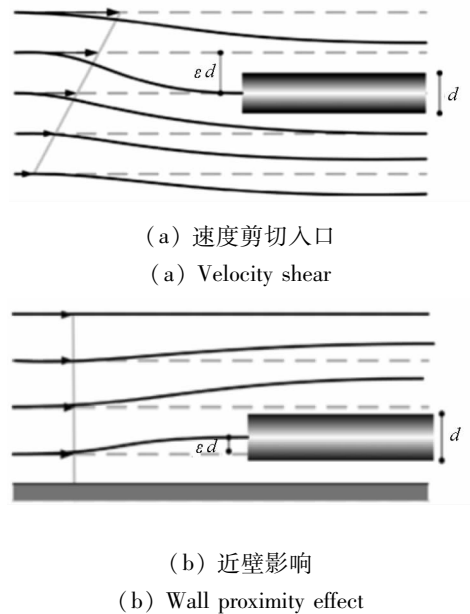


图 1 流场中放入皮托管后对流线的的影响示意图^[6]

Fig. 1 Illustration of effects on streamlines after placing the Pitot tube^[6]

2 数值模拟方法

承接上文,实验测量过程中,剪切速度与近壁效应同时存在,相互作用。因此,想要单独针对其中一种影响因素进行专门研究,就需要首先将两者进行分离(这对实验设计来说是一个难点),通过CFD方法能够很好地解决这个问题。

采用ANSYS CFX 17.0作为解算器,以三维不可压缩N-S方程(不考虑能量方程)为控制方

程,应用有限体积法进行离散。为加速收敛过程,采用自动时间步长方法,计算结果的均方根误差收敛至 10^{-12} 以下。计算域与几何参数如图 2 所示,皮托管测头表面处网格分布如图 3 所示,计算域采用非结构网格,为保证计算质量对皮托管附近区域进行了局部网格加密;为提高皮托管内腔区域的计算准确度并便于计算结果后处理,该区域采用较为规则的六面体网格;皮托管壁外侧位于流场内的网格应用了径向过渡与拉伸,选择拉伸度值为 1.05,避免网格密度变化过大引起数值误差。整个流场的计算网格规模达到 500 万,保证了计算单元数在较高的计算水平。自由来流的状态参数如表 1 所示。

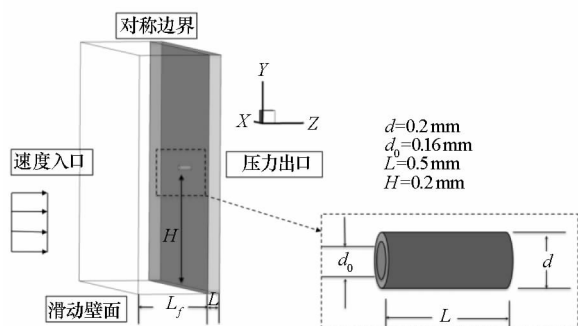


图 2 三维计算域与皮托管几何参数

Fig. 2 Simulation layout with Pitot tube geometry

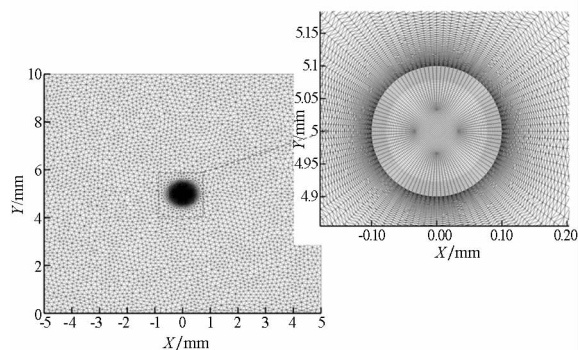


图 3 皮托管测头表面处网格

Fig. 3 Pitot tube inflow surface mesh

表 1 自由来流状态参数

Tab. 1 Free stream properties

变量	取值	标准单位
速度 U	10	m/s
密度 ρ	1.185	kg/m ³
黏度 μ	1.831×10^{-5}	kg/(ms)

2.1 剪切速度效应

本小节仅研究皮托管测头受到剪切速度影响而导致的测量误差规律。计算域如图 2 所示,定

义皮托管测头迎风面中心距壁面距离为 H 。MacMillan^[8]指出当皮托管距离壁面在两个皮托管外直径 d 内,近壁效应较为明显。本文选取 $H=25d$ 作为忽略壁面效应的条件。入口边界采用剪切速度,并定义无量纲速度梯度

$$\alpha = \frac{d}{2U} \frac{dU}{dH} \quad (1)$$

另外选取皮托管测头迎风面中心处速度为 $u = 10 \text{ m/s}$,使得 $Re_d = 129$ 。

如图 1(a) 所示,由于皮托管置入流场对当地流动产生影响,来流的流线会向下偏移,皮托管所测得的流速会偏高。通常的修正方法是按照图 1(a) 所示规律,在测头位置对 streamline 偏移量进行补偿,补偿后对应新位置的速度值即为准确值。补偿量(或者偏移量) Δy 表达式为

$$\Delta y = \varepsilon d \quad (2)$$

式中, ε 为无量纲 streamline 偏移量。

主要的剪切速度修正方法有: MacMillan^[8] 提出采用常数值 $\varepsilon = 0.15$,而其他学者提出该值位于一个范围 $0.15 < \varepsilon < 0.19$ ^[9]。McKeon 等^[6]在 Lighthill^[10] 的基础上引入了一个关系式,建立了 ε 与 α 的联系,如图 4 灰色实线所示,该修正的优点是在速度梯度较强的区域,修正值渐近于 McKeon 常数;而当入口为均速时, $\varepsilon = 0$,不影响数值结果。

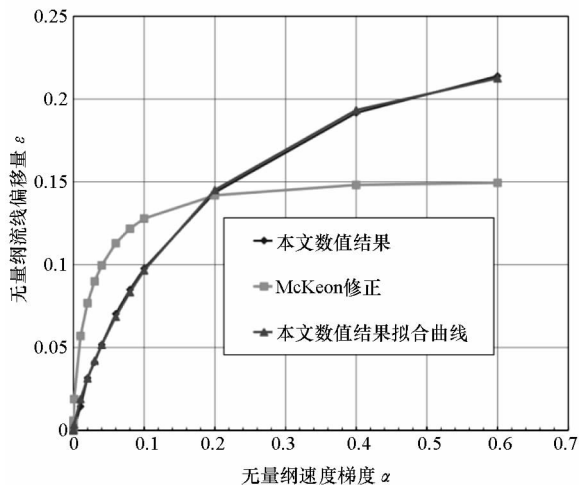


图 4 无量纲 streamline 偏移量与无量纲速度梯度关系图

Fig. 4 Non-dimensional streamline shift versus non-dimensional velocity gradient

如图 4 所示,本文的数值模拟结果与 McKeon 的修正结果形状基本一致,说明采用 McKeon 修正函数比 MacMillan 常数修正以及其他学者提出的范围修正更加符合流动规律,修正值也更加精确。然而,与 McKeon 修正结果不同的是,本文的数值结果表明,增大 α 值,曲线并不渐进于一个常数值。需要指出的是,当 α 值增大到一定程

度,即速度梯度增大到一定程度,会对实验条件带来困难,而 McKeon 修正函数是一种基于有限实验条件下对测量数据的曲线拟合,采用数值方法可以将 α 值进一步增大,从而增大曲线拟合使用的基础数据范围。通过与数值结果的对比,McKeon 修正函数在强速度梯度区域的渐进特征有待商榷。

根据本文的数值模拟结果,选取合适的函数表达式,采用最小二乘法进行曲线拟合得到关于无量纲流线偏移量的修正函数

$$\varepsilon = a \tanh(b\alpha^c) \quad (3)$$

式中, $a = 0.227\ 502$, $b = 2.462\ 67$, $c = 0.735\ 155$ 。

2.2 近壁效应

本小节研究皮托管靠近壁面时,由于通流阻塞而产生的误差规律(如图 1(b)所示)。计算域如图 2 所示,入口边界条件采用均匀速度,为避免因黏性作用形成壁面边界层,底部边界采用滑移边界。皮托管测头迎风面中心距壁面距离 H 从初始值 $25d$ 不断减小到 $0.5d$ 。所测速度随距离 H 的变化如图 5 所示。MacMillan^[8]指出当距离壁面在两个皮托管外直径 d 内,近壁效应较为明显。本文的数值结果表明由于皮托管的存在会对当地流场产生影响,即使在远离壁面 25 倍管径距离可视作自由流场的区域,所得速度值也会比来流速度值略高。定义速度相对误差 $\frac{u-U}{U} \times 100\%$, 25

倍管径距离对应的速度相对误差为 $+0.5\%$ 。当距壁面距离由 25 倍管径减小到 15 倍管径时,速度的变化约为 0.01% ,认为壁面的影响可以忽略不计。当 H 值在 10 倍管径的范围内,速度曲线斜率较大,壁面效应较为明显,其中在 5 倍管径时的速度误差约为 $+0.6\%$;当 H 值为 1 倍管径时,误差达到最大,约为 $+0.68\%$;当皮托管继续靠近壁面处,测量误差不增反减,当皮托管管壁接触到壁面,仍有测量误差,约为 $+0.4\%$ 。

流场放置皮托管后,流体不得不绕流皮托管,局部的流速与压力分布发生变化。一个明显的特征是当流体遇到皮托管测头,在其迎风面形成一个由等压力面(或者等速度面)包围而成的球形分布区域(如图 6 所示)。理论上由于皮托管的置入使得通流面积减小,从质量守恒可知该区域内的平均速度高于来流速度,皮托管所测值与前方自由来流速度值相比应略有增加,数值结果也表明这一点。另外在近壁距离 1 倍管径时,继续靠近壁面,误差不增反降,即误差曲线非单调,造成的原因可能是流动的非线性因素。

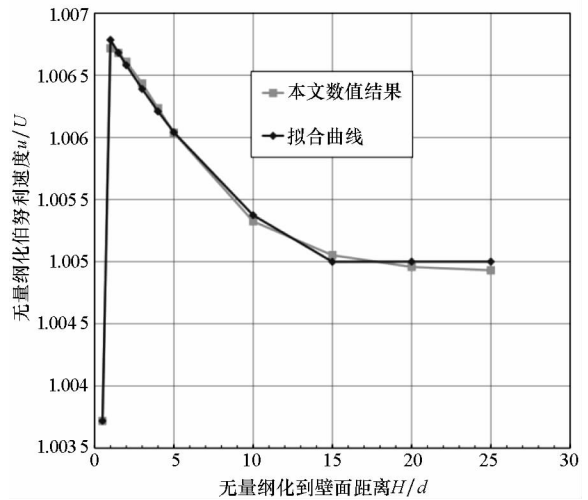


图 5 无量纲化伯努利速度与壁面距离关系图

Fig. 5 Normalized Bernoulli velocity versus wall distance

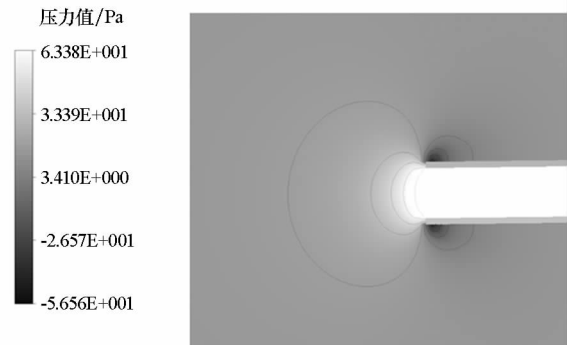


图 6 均速入口下的压力云图

Fig. 6 Pressure contour for uniform inlet

为了修正边界层内的速度值,MacMillan^[8]指出需要引入式(4)所示修正方程用以补偿所测量的速度值:

$$\frac{u-U}{U} = 0.015e^{-3.5(H/d-0.5)} \quad (4)$$

并指出该修正仅适用于 $30 < d^+ < 230$, 其中 $d^+ = du_\tau/\nu$, $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$, τ_w 为壁面剪切应力, ν 为流体运动黏度。图 7 给出了本文数值模拟的无量纲化伯努利速度 u/U 与壁面距离 H/d 的关系图,不难看出该无量纲速度变量为单调渐近函数。

McKeon 等^[6]则立足于无量纲流线偏移量 ε , 指出当 $H/d < 2$ 时,综合剪切速度与近壁效应修正,需采用以下修正函数

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.150 & d^+ \leq 8 \\ 0.120 & 8 < d^+ < 110 \\ 0.085 & 110 \leq d^+ < 1600 \end{cases} \quad (5)$$

基于本文对近壁效应的研究,拟合数值模拟结果,单独建立针对近壁效应的修正函数,直接对速度值进行修正,修正函数为

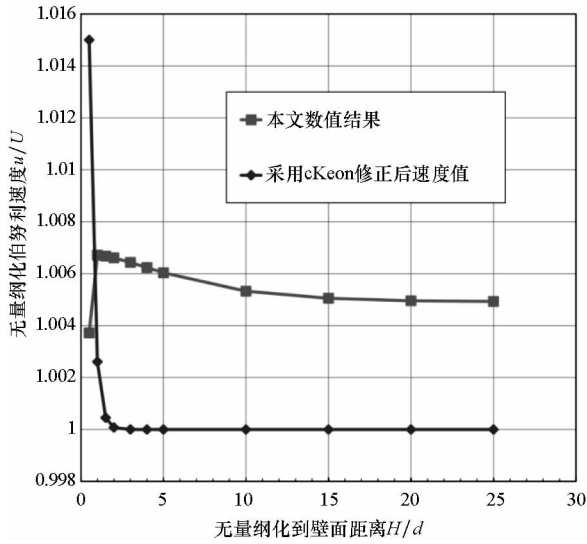


图7 本文数值结果与 McMillan 修正结果对比

Fig.7 Comparison of current work with McMillan correction

$$\frac{\Delta U}{U} = - \begin{cases} 0.006 \frac{H}{d} + 7.18 \times 10^{-4}, & \frac{H}{d} \leq 1 \\ 5.84 \times 10^{-6} \left(\frac{H}{d}\right)^2 - 2.21 \times 10^{-4} \left(\frac{H}{d}\right) + 0.007, & 1 < \frac{H}{d} < 15 \\ 5 \times 10^{-3}, & \frac{H}{d} \geq 15 \end{cases} \quad (6)$$

3 结论

采用数值模拟的方法,针对皮托管测量误差的两大主要影响因素——剪切速度与近壁效应,分别对各自引起的误差变化规律进行了研究。数值模拟采用较大的网格量与较高的网格质量,并做了网格收敛性的验证,保证了数值结果的可靠性与准确度。模拟结果与相关文献结论吻合,并得到如下结论:

1) 剪切速度方面:无量纲流线偏移量 ε 是无量纲剪切速度梯度 α 的单调增函数,且 α 增大时,无量纲流线偏移量 ε 不具有渐近特性。

2) 近壁效应方面:当 H 值在 5 倍管径距离,

即存在明显误差,大约为 +0.6%; H 值在 1 倍管径距离时,误差达到最大,约为 +0.68%;当皮托管继续靠近壁面处,测量误差不增反减,当皮托管管壁接触到壁面,仍存在测量误差,约为 +0.4%。

3) 根据数值模拟结果与相关文献结果的对比分析,对关于剪切速度和近壁效应的修正函数重新进行了拟合,提出了更为合理的参数选取方法。

参考文献 (References)

[1] 杜钰锋,林俊,马护生,等. 可压缩流体恒温热线风速仪校准方法[J]. 航空学报, 2017, 38(6): 6-13.
DU Yufeng, LIN Jun, MA Husheng, et al. Calibration method for constant temperature hot-wire anemometer for compressible fluid [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(6): 6-13. (in Chinese)

[2] 孙志强,周子民,张宏建,等. 皮托管测量影响因素分析 I. 检测杆与安装角的影响[J]. 传感技术学报, 2007, 20(3): 690-693.
SUN Zhiqiang, ZHOU Jiemin, ZHANG Hongjian, et al. On the influencing factors in a Pitot tube measurement I. influence of air horn and mounting angle[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(3): 690-693. (in Chinese)

[3] Bailey S C C, Vallikivi M, Hultmark M, et al. Estimating the value of von Karman's constant in turbulent pipe flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 749: 79-98.

[4] 马护生,刘会龙,秦天超,等. 基于可压缩流体的热线探针校准风洞研制[J]. 实验流体力学, 2017, 31(1): 93-99.
MA Husheng, LIU Huilong, QIN Tianchao, et al. Development of hot-wire probe calibration wind tunnel based on compressible fluid [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(1): 93-99. (in Chinese)

[5] Bailey S C C, Hultmark M, Monty J P, et al. Obtaining accurate mean velocity measurements in high Reynolds number turbulent boundary layers using Pitot tubes [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 715(1): 642-670.

[6] McKeon B J, Li J, Jiang W, et al. Pitot probe corrections in fully developed turbulent pipe flow [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(8): 1449-1458.

[7] MacMillan F A. Viscous effects on Pitot tubes at low speeds [J]. Journal of the Royal Aeronautical Society, 1954, 58(524): 570-572.

[8] MacMillan F A. Experiments on Pitot-tubes in shear flow [M]. London, UK: HM Stationery Office, 1957.

[9] Tavoularis S, Szymczak M. Displacement effect of square-ended Pitot tubes in shear flows [J]. Experiments in Fluids, 1989, 7(1): 33-37.

[10] Lighthill M J. Contributions to the theory of the Pitot-tube displacement effect [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1957, 2(5): 493-512.