

飞机空速校准用静压测量装置轮廓结构绕流影响分析

刘笃喜, 王新刚, 朱云龙, 张森

(西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: 介绍了针对一种面向飞机空速校准的外置式静压测量方法, 为了减小测量装置轮廓结构绕流对静压测量的影响, 从而提高静压测量精度, 应用 FLUENT 对装置轮廓结构进行绕流影响分析, 得到绕流影响最小的轮廓结构类型, 并采用正交试验方法对收缩角度 β 、过渡长度 L 、最大直径 ΦD 、最小直径 Φd 共 4 个参数进行优化; 仿真结果表明, 测量装置轮廓采用圆弧型收缩过渡结构绕流影响最小, 轮廓最大直径和过渡长度对静压测量绕流影响较为显著; 最优参数组合为: $\beta=33^\circ$, $L=40\text{ mm}$, $\Phi D=50\text{ mm}$, $\Phi d=22\text{ mm}$, 优化后的结构对静压管的绕流影响减小了 37.5%, 提高了静压测量精度。

关键词: 静压测量装置; 绕流; 轮廓结构; 正交试验

Analysis of Impact of Flow Around Caused by Profile of Static Pressure Measurement Device for Aircraft Airspeed Calibration

Liu Duxi, Wang Xingang, Zhu Yunlong, Zhang Seng

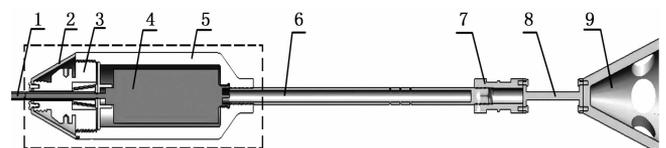
(Ministerial Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Outboard static pressure measurement method was proposed for aircraft airspeed calibration. In order to reduce the impact of flow around caused by profile of the measurement device and to improve static pressure measurement accuracy, we analyze the impact of flow with commercial software package, FLUENT. From our analysis, the types of transitional structures with the minimum flow range are obtained. Then the structural geometric include contraction angle β , transition length L , maximum diameter ΦD , minimum diameter Φd are optimized based on the orthogonal test design method. It shows that the optimum structure shape is arc transition; the maximum diameter and transition length of the profile produce significant impact on air flow; the optimal combination of parameters is $\beta=33^\circ$, $L=40\text{ mm}$, $\Phi D=50\text{ mm}$, $\Phi d=22\text{ mm}$. And by optimization, the structure has reduced the impact of flow around by 37.5% for the static pressure tube and greatly improved static pressure measurement accuracy.

Key words: static pressure measurement device; flow around; profile of structure; orthogonal test

0 引言

在飞机空速校准领域, 普遍应用的是拖锥法, 针对拖锥法迟滞效应显著、测量精度不高及管路泄露等缺点, 作者提出了一种新型远程外置式大气静压精密测量方法。此方法能实现静压测量的实时性、有效性, 具有较高的测量精度^[1]。但是新方法必然引起新的问题, 由于测量装置左右两侧轮廓结构尺寸相差较大, 势必对静压测量产生绕流影响^[2], 进而影响静压测量精度。文献[2-5]对结构不同过渡角产生的绕流影响进行了研究, 并采用 PIV 测量方法研究流动过程及特性, 但其研究环境均为低速。对外置式静压测量装置而言, 结构绕流对静压测量精度影响较大。因此, 测量装置轮廓结构类型的合理选择及其几何参数的设计有助于减小对静压测量绕流场的影响, 提高外置式静压测量精度。



1. 铠装线缆; 2. 导流壳体; 3. 马笼头; 4. 压力传感器; 5. 测量装置壳体; 6. 静压管; 7. 转接头; 8. 浇铸钢索; 9. 拖锥锥体
图1 外置式静压测量装置三维模型图

1 测量装置结构设计及模型数值求解

1.1 测量装置结构设计

分析新型远程外置式大气静压精密测量方法, 设计测量装置结构, 利用 Pro/Engineer 对测量装置进行三维建模, 如图 1 所示。

如虚线框内结构所示, 导流壳体 2、马笼头 3、压力传感器 4 及测量装置壳体 5 构成测量装置, 进行压力测量和处理。得到的测量结果通过铠装线缆 1 传输至飞机内部, 静压管 6 的左端与测量装置连接, 右端通过转接头 7 和浇铸钢索 8 与拖锥锥体 9 连接^[1]。

由于传感器结构尺寸限制, 使得测量装置轮廓结构最大直径约为静压管的 5~6 倍, 从而产生绕流现象, 影响静压管上压力的分布, 进而影响静压测量精度。通过 FLUENT 对静压

收稿日期: 2013-12-21; 修回日期: 2014-02-08。

基金项目: 航空科学基金项目(2011ZD53044)。

作者简介: 王新刚(1987-), 男, 陕西华县人, 硕士研究生, 主要从事机械制造及其自动化方向的研究。

刘笃喜(1963-), 男, 副教授, 陕西富平人, 硕士生导师, 主要从事精密机电测控技术、自动检测技术、虚拟测试及空气静压测量等方面的研究。

测量装置结构外部流动进行数值模拟，静压分布如图 2 所示。

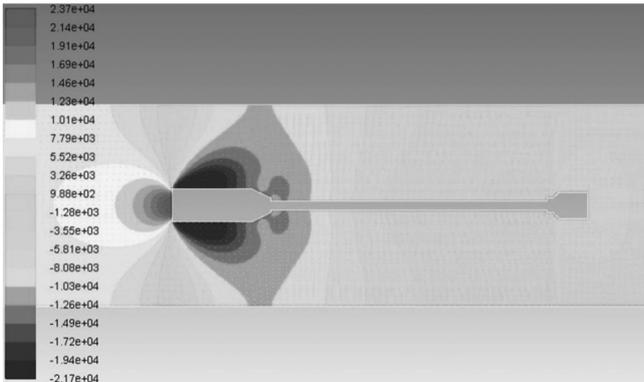


图 2 静压测量装置结构外部流动静压分布图

由图 2 可以看出，在结构左端面处产生激波，激波前后空气的压力与温度等参数会发生剧烈变化^[6]。流体流过测量装置后产生绕流场，压力由绕流状态缓慢恢复到测量的参考标准压力状态。由此可以看出测量装置对静压测量的绕流影响较大，下面就对引起绕流的测量装置进行分析。

1.2 分析测量装置轮廓结构绕流影响的流动模型

静压测量装置一般在高雷诺数黏性流体环境下工作。根据普朗特边界层理论，边界层利用 N-S 方程求解。Spalart-Allmaras 湍流模型非常适用于存在负压梯度的边界层流动，能更好地模拟分离流动，计算稳定性更好，计算效率更高^[7]。因此选用 Spalart-Allmaras 模型来模拟结构外部绕流流动。Spalart-Allmaras 模型的求解变量是 $\tilde{\nu}$ ，表征出了近壁（黏性影响）区域以外的湍流运动黏性系数。 $\tilde{\nu}$ 的输运方程为：

$$\rho \frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = G_\nu + \frac{1}{\sigma_\nu} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \tilde{\rho}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right) \right] - Y_\nu \quad (1)$$

其中： G_ν 为湍流黏性产生项， Y_ν 为湍流黏性减少， σ_ν 为常数， C_{b2} 为常数， ν 为运动黏性系数。

1.3 测量装置轮廓结构绕流影响的数值求解

由于静压测量装置为轴对称结构，在不影响分析结果的情况下对模型进行适当简化，建立仿真分析结构模型如图 3 所示。

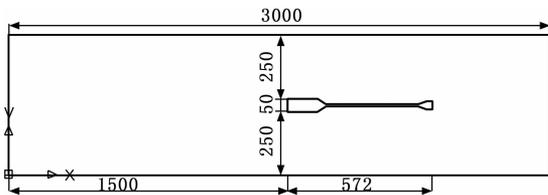


图 3 仿真分析结构模型

建立计算流体域为 $3 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$ （长 \times 宽），结构左端距流场入口为模型长度的 2.5 倍，右端距流场出口为模型长度的 1.5 倍，上下边界距模型距离为模型的 5 倍。采用结构化网格划分，结构网格能准确得到绕流特性，提高计算离散精度，避免出现假离散现象^[8]。

根据飞行大气参数标准表（HB6127-1986），取马赫数为 $Ma = 0.8$ 。入口条件为速度入口边界条件，速度为 246.45 m/s ，攻角为 0 ，温度为 236.15 K 。出口条件为压力出口边界条件，其余的边界条件全部设置为 Wall 即壁面边界条件。

采用稳态数值计算，选择基于压力耦合的求解器，压力-速度耦合方式选择 Coupled，有助于加快收敛。能量方程的差分格式为二阶迎风格式，求解边界层和激波问题上更准确。采用 Full Multigrid (FMG) 初始化，可以使初始场更加合理，可以在较少的迭代次数内获得收敛。

2 测量装置轮廓结构类型绕流影响分析

主要影响绕流场的是测量装置轮廓结构类型及其几何参数，由于测量装置左端结构已定，所以主要研究测量装置右端与静压管连接的测量装置轮廓结构。装置轮廓收缩过渡结构主要有圆锥型结构、圆弧型结构、圆弧直线混合型结构 3 种^[9]，圆弧直线混合结构中 R 取定值，如图 4 所示。

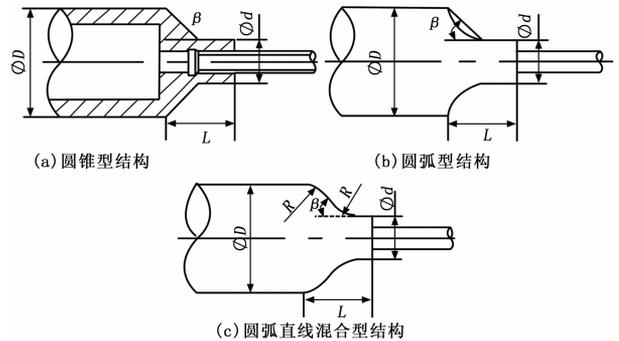


图 4 测量装置与静压管连接轮廓结构图

测量装置轮廓结构主要参数有：①收缩过渡结构类型；②收缩角度 β ；③过渡长度 L ；④轮廓最大直径 ΦD ；⑤轮廓最小直径 ϕd 。为了更有效地确定结构参数，先将 L 、 ΦD 和 ϕd 取满足要求的最小值，对 3 种收缩过渡结构取不同收缩角度进行仿真分析，得出绕流影响最小的结构类型和收缩角度范围。在此基础上通过正交试验法对 β 、 L 、 ΦD 、 ϕd 共 4 个参数进行优化，得出测量装置轮廓的最优几何参数，并分析各因素的影响程度。

收缩过渡结构的优劣用其对静压管的绕流范围 Y 来表征，绕流范围指在静压管上，沿轴线方向压力从绕流状态恢复到测量参考状态的距离，绕流范围小的结构较优。对 3 种过渡结构分别取不同的收缩角度进行仿真分析，收缩角度 β 范围为： $25 \sim 60^\circ$ ^[10]，直线型结构的收缩角度取 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° 、 55° 。圆弧型结构的收缩角度取 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 50° 、 55° 。圆弧直线型结构的收缩角度取 35° 、 40° 、 45° 、 50° 、 55° 、 60° 。得到 3 种结构的绕流范围 Y ，如图 5 所示。

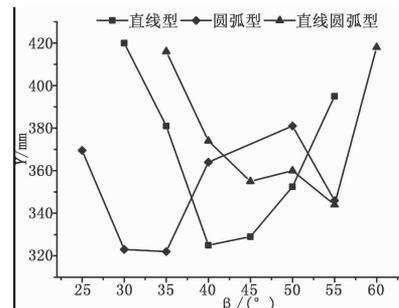


图 5 3 种不同结构绕流范围

从图 5 可以看出，不同收缩角度下的 3 种结构绕流范围变化总体趋势相同，均随收缩角度的增大，先减小后增大，在变化范围内 Y 有最小值。圆弧型结构相比其他两种结构收缩角度

较小时 Y 有最小值, 且值较小。通过分析, 圆弧型结构过渡处圆弧底会形成缓冲旋涡, 就像一个驱动力^[11], 有利于压力的加速恢复。收缩角度在 35° 左右时 Y 值相差不大, 确定理想收缩角度在 35° 左右取值。

3 测量装置轮廓结构几何参数优化

3.1 基于正交试验的装置轮廓结构几何参数优化

在上述结论基础上, 采用正交试验方法对装置轮廓结构几何参数进行优化。优化前初始参数为: $\beta = 35^\circ$, $L = 30$ mm, $\Phi D = 50$ mm, $\Phi d = 2$ mm。采用正交表安排试验可以减少完成试验要求所需的试验次数, 数据点分布均匀, 只需要较少的试验次数就能够了解各因素对对象影响程度。

正交试验的因素有: L 、 ΦD 、 Φd 、 β 共 4 个参数, 进行 4 因素 4 水平正交试验。部分参数水平参考锥体结构尺寸选取。正交表头如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平表

水平	影响因素				误差项	指标
	L (mm)	ΦD (mm)	Φd (mm)	β ($^\circ$)		
1	30	50	22	30		
2	35	52	24	33		
3	40	54	26	35		
4	45	56	28	38		

表 1 中: E 是误差项, 也即空列, 用于试验结果数值分析。静压分布用压力系数 C_p 来评价, C_p 表示单位速度的变化所引起的压强的相对变化, 能较好表征压力分布情况。

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{1/2\rho_\infty v_\infty^2} \quad (2)$$

式中, C_p 为静压孔处压力系数, P 为静压孔处静压值; P_∞ 为理想状态下的标准静压值, v_∞ 为来流的速度, ρ_∞ 为来流空气的密度。

为了分析各个因素对静压分布的影响, 确定 16 组不同几何参数组合的设计方案, 并利用 FLUENT 仿真得到绕流影响下静压管上的压力分布, 静压管结构参数已定。为了确定测量装置轮廓结构几何参数, 以静压管上静压孔处为参考点, 仿真计算得到此处的压力系数, 其值越接近 0, 静压值越接近标准值, 结构参数最优。初始参数下仿真得到静压孔处压力系数 $C_p = -0.119 1$ 。16 组不同几何参数组合的设计方案及仿真结果如表 2、表 3 所示。

表 3 中, k_{1j} 、 k_{2j} 、 k_{3j} 、 k_{4j} 分别表示第 j 列各水平所对应的指标 C_p 的平均值, Σ 表示 C_p 值总和, \bar{y} 表示 C_p 的平均值。 R_j 表示各水平的极差, 用来表征各因素的影响大小顺序, R_j 的计算公式为:

$$R_j = \max\{k_{1j}, k_{2j}, k_{3j}, \dots\} - \min\{k_{1j}, k_{2j}, k_{3j}, \dots\} \quad (3)$$

偏差平方和 S_j 的计算公式为:

$$S_j = 4(k_{1j} - \bar{y})^2 + 4(k_{2j} - \bar{y})^2 + 4(k_{3j} - \bar{y})^2 + \dots \quad (4)$$

方差之比代表各因素对指标 C_p 影响的显著性, 计算公式为: $F_j = V_j/V_e$, V_j 是方差; $V_j = S_j/f_j$; V_e 是误差列的方差, $V_e = S_e/f_e$; f_j 是自由度, $f_j =$ 第 j 列的水平数 - 1。

3.2 各因素影响显著性分析

根据表 3 结果, 通过《F 分布数值表》可得

1) 因素 L 在 $\alpha = 0.2$ 水平上显著, 因素 ΦD 在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著, 因素 Φd 、 β 在 $\alpha = 0.25$ 水平上仍不显著。

表 2 测量装置轮廓几何参数正交试验结果

试验号	试验因素					指标
	L (mm)	ΦD (mm)	Φd (mm)	β ($^\circ$)	E	
1	1	1	1	1	1	-0.1263
2	1	2	2	2	2	-0.1041
3	1	3	3	3	3	-0.2369
4	1	4	4	4	4	-0.1884
5	2	1	2	3	4	-0.0897
6	2	2	1	4	3	-0.0969
7	2	3	4	1	2	-0.2023
8	2	4	3	2	1	-0.1714
9	3	1	3	4	2	-0.0614
10	3	2	4	3	1	-0.1046
11	3	3	1	2	4	-0.1181
12	3	4	2	1	3	-0.1705
13	4	1	4	2	3	-0.0784
14	4	2	3	1	4	-0.0986
15	4	3	2	4	1	-0.1744
16	4	4	1	3	2	-0.1256

表 3 16 组试验 C_p 值的分析结果

试验号	试验因素				误差项	指标
	L (mm)	ΦD (mm)	Φd (mm)	β ($^\circ$)		
K_{1j}	-0.655 7	-0.355 8	-0.466 9	-0.597 7	-0.576 7	$\Sigma =$
K_{2j}	-0.560 3	-0.404 2	-0.538 7	-0.472 0	-0.493 4	
K_{3j}	-0.454 6	-0.731 7	-0.568 3	-0.556 8	-0.582 7	
K_{4j}	-0.477 0	-0.655 9	-0.573 7	-0.521 1	-0.494 8	
k_{1j}	-0.163 9	-0.089 0	-0.116 7	-0.149 4	-0.144 2	$\bar{y} =$ $\Sigma/16 =$
k_{2j}	-0.140 1	-0.101 1	-0.134 7	-0.118 0	-0.123 4	
k_{3j}	-0.113 7	-0.182 9	-0.142 1	-0.139 2	-0.145 7	
k_{4j}	-0.119 3	-0.164 0	-0.143 4	-0.130 3	-0.123 7	
R_j	0.050 2	0.093 9	0.026 7	0.031 4	0.022 3	$-0.134 2$
S_j	$6.236 6 \times 10^{-3}$	$0.853 1 \times 10^{-2}$	$0.604 7 \times 10^{-3}$	$0.711 6 \times 10^{-3}$	$1.836 6 \times 10^{-3}$	
F_j	3.395 8	13.935	0.987 7	1.162 4		

2) 由极差的大小确定各因素的影响大小顺序为 $\Phi D > L > \beta > \Phi d$ 。

3) 各因素与指标 C_p 的变化规律如图 6 所示。

仿真分析结果表明, 测量装置轮廓采用圆弧型收缩过渡结构绕流影响最小, 最大直径 ΦD 和过渡长度 L 是影响静压测量精度的较为显著的两个因素, 得到的最优几何参数组合为: $\beta = 33^\circ$, $L = 40$ mm, $\Phi D = 50$ mm, $\Phi d = 22$ mm。最优几何参数仿真得到压力系数 $C_p = -0.074 4$, 与初始参数的 C_p 值相比较增大了 37.5%, 即绕流影响减小了 37.5%。

4 结论

分析了外置式静压测量装置结构绕流对静压测量的影响。确定了绕流影响最小的收缩过渡结构类型为圆弧型。利用正交试验法进行结构参数优化, 得到最优几何参数。分析了各因素的影响程度, 优化后, 测量装置对静压测量的绕流影响减小了 37.5%, 提高了外置式静压测量的精度。

(下转第 1911 页)

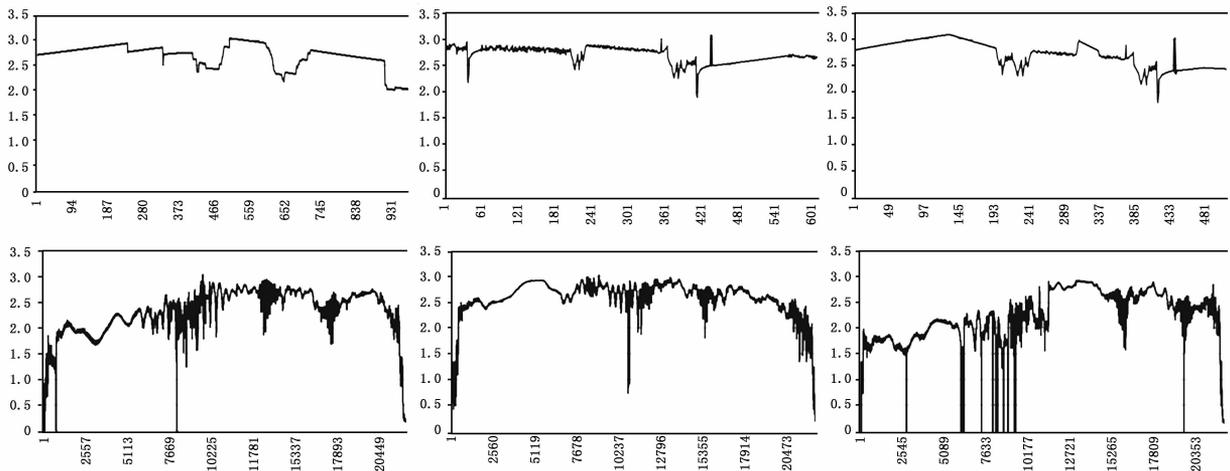


图 6 某型号任务三目标仿真及实际 AGC 电平变化情况

算和实际任务的数据融合制作控制文件, 能够有效地模拟空间飞行目标在飞行过程中的信号动态变化, 实现了对跟踪设备的动态性能和扩频基带抗多址干扰性能的有效检测。目前, 该系统经过 5 次多目标任务的检验, 证明其方法科学有效、操作方便快捷、运行稳定可靠, 达到了充分检验设备性能、配合进行应急处置训练的目的。

参考文献:

[1] 陈步康, 毛燕军, 刘 咏. 扩频多目标跟踪训练系统设计 [J]. 遥测遥控, 2010, 31 (1): 33-36.

[2] 蔚保国, 罗伟雄. 航天飞行器多目标测控系统研究 [J]. 无线电工程, 2005, 35 (7): 26-28.
 [3] 李其福, 毛南平, 刘 洋, 等. 舰载多目标模拟器的构建与应用 [J]. 飞行器测控学报, 2011, 30 (3): 40-43.
 [4] 杨 帆. 测控站大动态高频接收分系统的设计 [J]. 机电信息, 2010, 208 (12): 103-107.
 [5] 宋春雷, 董春雷, 黄宇辉. 浅论用 C 语言实现 RS232 串口通信的方法 [J]. 电子技术, 2011, 3: 87-89.
 [6] 蔡礼田, 逢 博, 邱 政, 等. 基于 STC89C52RC 的雷达模拟器数字键盘设计 [J]. 电子测试, 2011, 10: 55-57.

(上接第 1889 页)

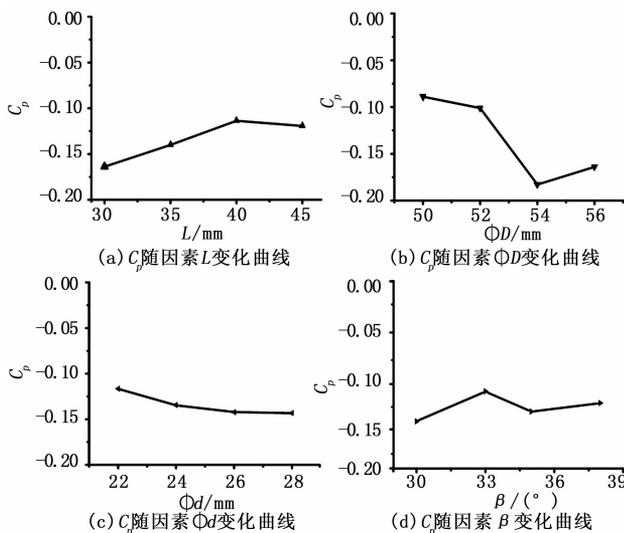


图 6 试验指标随各因素的变化趋势

参考文献:

[1] 刘笃喜, 赵小军, 覃秋霞, 等. 以拖锥为载体的飞机外置式空气静压测量装置 [P]. 201210375966. 4. 2013-01-02.
 [2] 邱 兰, 齐鄂荣. 二维矩形突起物绕流流动特性的实验分析 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2007, 40 (6): 36-41.

[3] 谭福大, 梁荣光. 催化转换器扩张角对流体流动特性的影响 [J]. 山东交通学院学报, 2008, 16 (1): 16-18.
 [4] Thacker A, Aubrun S, Leroy A, et al. Effects of suppressing the 3D separation on the rear slant on the flow structures around an Ahmed body [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 107: 237-243.
 [5] Kim K C, Ji H S, Seong S H. Flow structure around a 3-D rectangular prism in a turbulent boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91 (5): 653-669.
 [6] 李云娇, 蒋东方, 等. 一种无人机高度与空速测量系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (5): 1174-1177.
 [7] Qiang Z, Yong Y. A new simpler rotation/curvature correction method for spalart-allmaras turbulence model [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26 (2): 326-333.
 [8] 何晓聪, 曹红松, 赵捍东, 等. 弹箭外部绕流数值仿真中网格的选择 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29 (2): 191-194.
 [9] 何 立. 车用催化器扩张段结构及其气流径向分布特性研究 [D]. 东北林业大学, 2005.
 [10] 许建民, 刘金武. 收缩管角度对车用催化转换器流动特性的影响 [J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版. 2011, 34 (3): 233-235.
 [11] Zhang C, Ren L, Han Z. Numerical simulation of external flow over a dimpled axisymmetric bluff body for drag reduction [J]. Journal of Jilin University, 2006: 479-483.