

文章编号:1671-5497(2006)05-0644-06

# 虚拟仪器在汽车尾流测量中的应用

傅立敏,胡兴军

(吉林大学 汽车工程学院,长春 130022)

**摘要:**为有效地进行汽车尾流速度测量进而弄清汽车尾流结构特性,在热线风速测量的基础上,针对传统测试仪器功能单一固定、开发周期长、价格昂贵且不易维护升级的弊端,引入虚拟仪器的概念,用 NI 公司的 LabVIEW 软件,通过可视化编程,为汽车风洞开发了尾流速度测量虚拟仪器系统,弥补了尾流测试设备在开发、维护以及升级等方面的不足。使用该系统进行某国产轿车尾流速度测量试验,所得结果与先前进行的试验研究和数值计算结果均保持一致,证明了虚拟仪器的有效性。

**关键词:**汽车空气动力学;虚拟仪器;热线;尾流测量

中图分类号:U461.1 文献标识码:A

## Application of virtual instrument in wake measurement of road vehicle

Fu Li-min, Hu Xing-jun

(College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to measure the velocity distribution in the wake of a driving vehicle to clarify the wake structure, considering the shortcomings of the traditional test instruments including their function singularity, tedious development, high price, and difficult maintenance and update, the concept of virtual instrument was introduced, and a virtual instrument system was developed based on hot-wire anemometer to measure the wake velocity distribution of the road vehicles in the automotive wind tunnel by means of visual programming through LabVIEW software, a product of National Instrument Company, USA. With this system, being without the deficiencies of the traditional instruments in the aspects of development, maintenance and update, experiments were made to gain the wake velocity distribution behind a certain car made in China, and the results are in accordance with those of the numerical simulation and the former experimental research, validating the virtual instrument system.

**Key words:** vehicle aerodynamics; virtual instrument; hot wire; wake measurement

汽车行驶时,前方来流经前脸、发动机罩、车身顶盖流向车身尾部形成尾流,其结构受到车身各部分气流流态的影响,表征了各部分影响的综合效果。在空气动力学试验研究中进行汽车尾流速度测量,弄清尾流结构进而改善汽车空气动力

特性对开发低阻力新型汽车、降低汽车燃油消耗具有重要意义<sup>[1,2]</sup>。

在进行尾流试验研究中,传统的测试仪器是功能单一、固定、已封装好的专用于某项具体试验或任务,且价格昂贵。开发测试系统时,对设计人

收稿日期:2005-07-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(6022207);吉林大学“985 工程”资助项目。

作者简介:傅立敏(1942-),女,教授,博士生导师。研究方向:汽车空气动力学。E-mail:iaa@jlu.edu.cn

员的要求高,需要掌握测试仪器底层硬件知识,有广泛的计算机编程知识,并能编写硬件的驱动程序,从而导致了传统测试系统开发周期长、灵活性很差<sup>[3]</sup>。为了缩短速度测试系统的开发时间,并方便以后用户对其进行维护、扩展和升级,在热线风速测量的基础上引入虚拟仪器的概念,为汽车尾流测量开发出专用的虚拟仪器系统。

## 1 虚拟仪器和热线测量

### 1.1 虚拟仪器的概念

LabVIEW 是一种可视化编程语言,利用功能图标创建应用程序,即创建虚拟仪器(VI, Virtual Instrument)。虚拟仪器是操作和外观均仿照示波器或万用表等物理仪器并实现同样功能的程序软件。在基于文本语句的编程语言中指令语句决定了程序执行;在 LabVIEW 中由数据流决定程序的执行,编程时根据数据流进行编程。

### 1.2 热线测量及其原理

热线风速仪的出现是流体力学试验技术进步的新突破,它是研究非定常流(特别是湍流)的有力工具。尽管 20 世纪 60 年代出现了激光测速技术,但是,通过试验研究发现,测量湍流参数时激光测速常因丢失粒子信号而导致测量结果不可靠<sup>[4]</sup>,并且由于激光测速仪价格和维持费用昂贵,在湍流场研究的应用范围上远不如热线技术广泛。今后热线技术仍将是汽车湍流,特别是汽车尾流场速度测量的主要手段。

对不可压缩气流强迫对流传热而言, $Nu$  数仅与雷诺数、热线的物理状态和工作状态有关<sup>[5,6]</sup>。为了方便,用热线风速仪测量风速  $u$  时通常采用下式

$$e^2 = A + Bu^n \quad (1)$$

式中:  $n$  值随雷诺数  $Re$  的变化而变化,试验测得的指数  $n$  为  $0.45 \sim 0.51$ ;在热线恒温工作时,热线的热电阻  $R_w$  为常数; $e$  为与风速  $u$  相对应的热线电路输出电压值。

## 2 热线风速测量系统

作者在 LabVIEW 平台上开发了汽车尾流测量虚拟仪器系统,该系统包括校准和测量两个子系统。

### 2.1 热线校准子系统

汽车外流场属于不可压缩的连续流动,采用式(1)为热线测速的静态校准方程表达式。在热

线测速校准子系统中,将  $n$  作为变量对待,因而就不必用专门的线化器硬件来线性化热线的输出电压。下面的工作直接通过软件编程实现,即连续变换  $n$  的值进行不同的指数拟合,并用拟合曲线与试验数据之间的均方误差大小来判断拟合质量的优劣。这也体现了虚拟仪器开发过程简便、节省时间和开支的优越性。

#### 2.1.1 硬件构成

热线测速校准子系统的硬件由两部分构成(见图 1):一部分是热线风速计电路,产生热线电路输出电压  $e$ ;另一部分是皮托管部分,产生相应的压差(动压)的电信号  $E_p$ 。

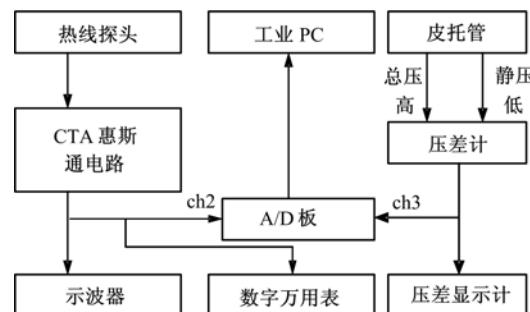


图 1 热线测速校准子系统的硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of hot-wire calibration system

热线测速时采用恒温式热线风速计(CTA)基本电路(反馈电路)。当整个系统连接完毕并接通电源后,惠斯通电桥达到平衡。当气流速度加大时,热线与周围流体的热交换增加,热线就会变冷,结果电阻减小。根据前面论述的恒温式热线风速仪的工作原理,输出电压将增加。反之,输出电压将减小。输出电压随时间的变化波形通过示波器显示,而具体数值通过数字万用表显示。同时,通过 A/D 板将此输出电压  $e$  模拟信号转换成数字信号再经数据采集卡读入 VI 系统。另外,皮托管的压差电信号  $E_p$  也同时被采集卡读入 VI 系统。数据的采集完全由虚拟仪器软件控制。

#### 2.1.2 虚拟仪器构成

热线风速测量校准子系统的软件构成和用户界面分别如图 2、图 3 所示。

该测速校准系统具有以下功能:

(1) 进行数据采集和参数设置。数据采集系统可设置信号增益放大倍数、采样频率、信号扫描次数以及被测量信号的上限和下限等。在计算机不溢出的条件下可任意改变测量虚拟仪器的测量

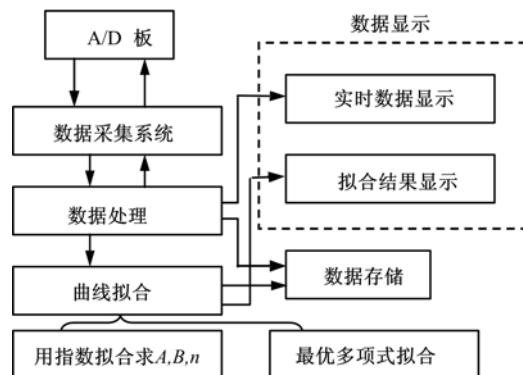


图2 热线风速测量校准系统虚拟仪器结构图

Fig. 2 Virtual instrument structure of the calibration system

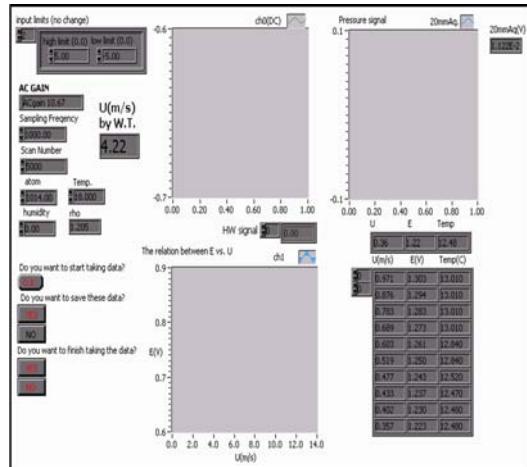


图3 热线风速测量校准系统虚拟仪器用户界面

Fig. 3 User interface of anemometry calibration system  
信号的范围,这点是传统测试仪器做不到的。

(2)进行环境变量初始化,包括大气压和温度的初始化。通过给定的大气压和温度等初始条件,系统还可算出试验当时风洞中空气的密度和湿度。

(3)进行待测信号实时显示,包括与皮托管压力差对应的电信号和热线风速仪的输出电压信号的显示。这些任务由虚拟仪器中的图像指示器(Indicator)来完成,其功能与实际示波器相同。根据信号显示可以知道待测信号的变化何时剧烈、何时稳定,并根据需要进行采样控制。但是,示波器的显示范围很受限制,不如图像指示计灵活。虚拟仪器中的图像指示计的显示范围可根据需要在计算机不溢出的情况下进行任意设置。

(4)数据采集和存储的控制。

(5)数据处理。数据处理包括两部分:①初

步处理。根据压差电信号与压差之间的已知关系,首先将电信号变成压差值,然后根据压差与风速间的关系将压差转变为速度。②曲线拟合。该曲线拟合功能由一专门的子虚拟仪器(SubVI)完成,如图4所示。将初步处理的数据 $u$ 和热线输出电压作为曲线拟合VI的数据输入。然后根据King指数定律,即采用式(1)进行指数曲线拟合,求出 $A$ 、 $B$ 、 $n$ ,典型的拟合曲线结果见图5。此外,还进行了最优多项式拟合。通过对两种拟合方法的比较可知,根据King指数定律的曲线拟合误差较小。由校准系统得到的系数 $A$ 、 $B$ 、 $n$ 的值可通过文件I/O存储到硬盘或其他存储设备中。

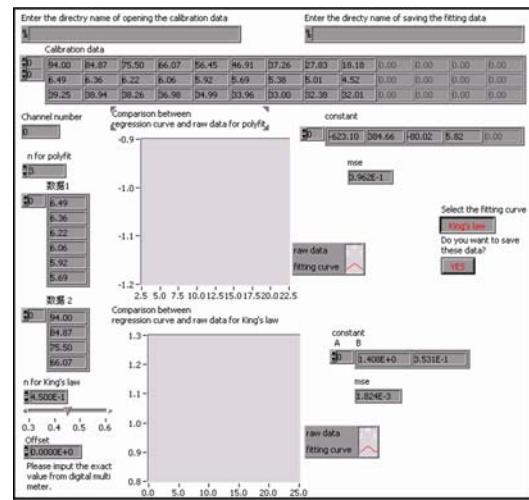
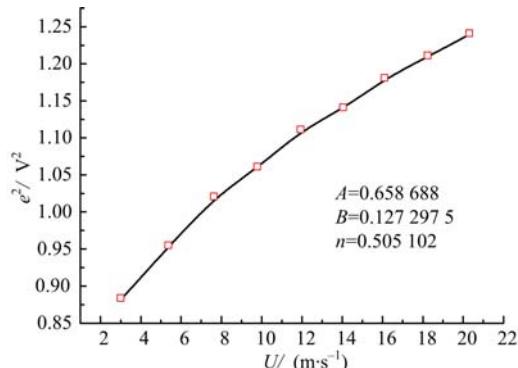
图4 曲线拟合求 $A, B, n$ 的子虚拟仪器Fig. 4 User interface of VI for curve fit of  $A, B, n$ 

图5 指数曲线拟合结果

Fig. 5 Result of curve fit with King's law

## 2.2 热线尾流速度测量子系统

该虚拟仪器子系统调用热线测速校准子系统得到校准关系式,用热线风速仪就可以进行汽车尾流风速的测量,获得相应的电信号,并经虚拟仪器处理得到风速。

### 2.2.1 硬件构成

测量子系统的硬件系统结构如图 6 所示。

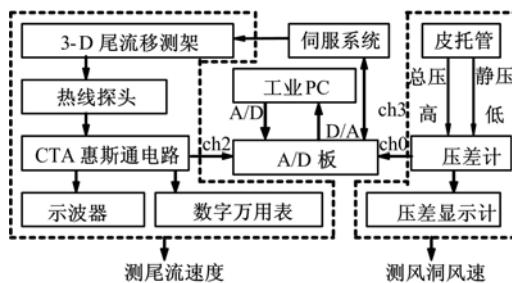


图 6 热线风速测量系统硬件组成

Fig. 6 Hardware structure of measurement system

与热线校准系统相比,该系统的硬件增加了固定热线探头的移测架和控制系统的执行机构——伺服系统,并且 A/D 板必须是双向的,即能进行 A/D 与 D/A 的转换,以便实现测控系统的闭环控制。

在进行风速测量之前,需进行风洞风速的测量,此风速由皮托管风速计完成(见图 6 右边虚线框部分)。皮托管应放在试验段远离轿车模型的上游,以保证此处的流场未受到试验模型绕流场的干扰。

A/D 板将虚拟仪器发出的  $y, z$  坐标数字信号转换成模拟信号,并通过通道 3(ch3)发送给伺服器,触发驱动器驱动移测架移至测量位置。此后就可以通过 LabVIEW 编写的虚拟仪器程序控制完成数据的测量和处理。

### 2.2.2 虚拟仪器构成

热线风速测量系统 VI 部分构成及其用户界面如图 7、图 8 所示。

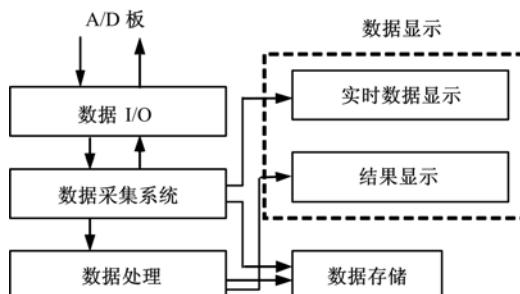


图 7 热线风速测量系统 VI 结构图

Fig. 7 VI structure of measurement system

该测速系统能完成以下功能:

(1) 数据采集的参数设置,与校准系统参数设置相同。

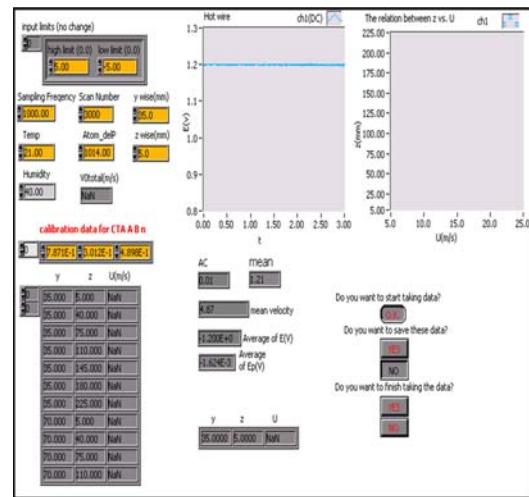


图 8 热线风速测量系统的用户界面

Fig. 8 User interface of the measurement system

(2) 试验环境变量初始化,除了校准系统的环境变量初始化外,还需给定热线风速计的热线探针所应测量的位置( $y, z$ )。

(3) 测量风洞风速,即测量风洞中试验段前部均匀来流的速度。如图 6 中右边虚线框部分所示,将压差传感器感应到的皮托管的压差变成电信号经 A/D 板转换后,由数据处理系统处理变为风速在面板的指示计里显示( $V_{0\text{total}}$ , m/s),并暂存在缓存器,试验完成后一并存入存储器。数据处理原理与前面相同。

(4) 给  $A, B, n$  赋值,将校准系统得出的  $A, B, n$  赋给控制矩阵,系统将这 3 个系数带入拟合函数,从而确定风速与热线输出电压信号间的对应关系。在测速试验过程中,热线输出的电压信号通过拟合函数可直接转换成风速值。

(5) 待测信号的时间变化显示。

(6) 数据采集和存储的控制。

## 3 试验及结果

用本虚拟仪器系统对某国产轿车的 1:10 模型进行了汽车尾流速度分布试验研究,并与先前试验研究的结果进行比较,以验证该虚拟仪器的有效性。

### 3.1 试验内容

试验风速:21 m/s。

堵塞比: $\varepsilon = 6\%$ 。采用英国汽车联合会 MIRA 风洞推荐的修正公式  $\Delta q/q = 2\varepsilon/(1 - \varepsilon)$  修正后,试验风速为 22.3 m/s。

测量横截面:试验对3个尾流速度测量横截面进行了速度分布测量。3个对应截面1、2、3距离汽车尾端分别为20 mm、60 mm、120 mm(如图9所示)。

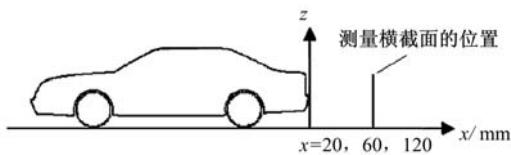


图9 3个测量剖面的位置图

Fig. 9 Three measured sections for wake velocity

测点布置:测量剖面分6个高度,第1个高度距地板表面5 mm,第1至第5高度为等间距,间距为35 mm。在剖面宽度方面有7个测点,间距均为35 mm,因而每一剖面共有42个测点。测点布置既要考虑到汽车模型正投影面积,又要照顾三维坐标移测架的调节范围<sup>[7]</sup>。

### 3.2 试验结果

尾流测量试验开始前,通过热线校准子系统进行空风洞校测试验获得热线电压与风速的两列数据,并通过该系统获得热线校正公式的系数分别为: $A = 0.658\ 688$ ,  $B = 0.127\ 297\ 5$ ,  $n = 0.505\ 102$ 。汽车尾流中气流速度按此校正公式用热线测速虚拟仪器系统测量并处理得到。距汽车尾端 $x = 20$  mm,即截面1处的尾流测量横截面内各点的速度试验值如表1所示。对数据进一步处理后得到该尾流横截面的速度分布等值线图,见图10(a)。

表1 在截面1内测得的速度/(m·s<sup>-1</sup>)

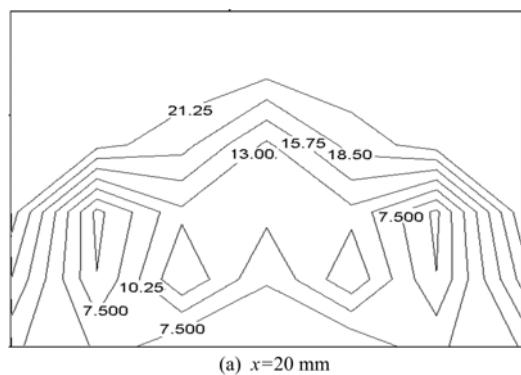
Table 1 Velocity in section 1

23.25	22.58	22.52	21.84	22.45	22.72	23.25
22.65	22.72	22.29	20.81	22.35	22.68	23.01
22.85	21.33	20.29	13.21	19.84	21.49	23.15
22.17	7.07	11.39	12.14	11.4	5.17	22.49
18.43	5.32	12.32	9.02	11.92	5.4	18.35
11.85	8.55	3.21	3.9	3.28	8.51	12.14

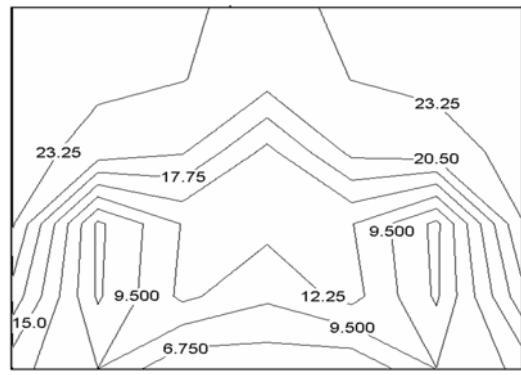
利用该虚拟仪器系统在车尾部继续测量了2、3两个尾流横截面,经过同样的处理过程后分别得到了各截面的速度分布等值线图,如图10(b)、图10(c)所示。

试验结果表明,汽车横摆角为0°时,尾流两侧相对于中心的速度分布具有良好的对称性。由图10可知,阶背式轿车在其尾流横截面内有着相

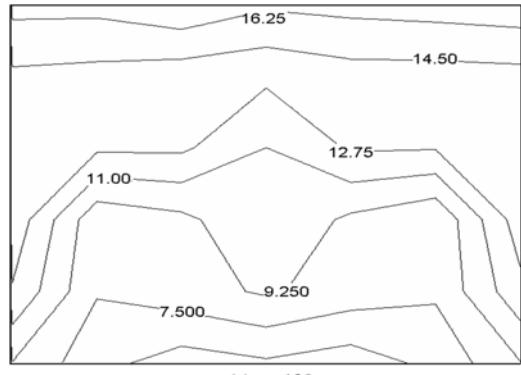
似的速度分布,在行李箱盖后缘形成两个横向对称的拖拽涡,与先前研究所得的试验结果<sup>[6]</sup>(见图11)均保持一致。将图10与图11中对应的各测点值进行比较后表明,两者测量值也是基本相同的。有一点需要说明的是,在图11中速度分布图是测量结果经过拉格朗日插值后得到的,因而图11中的等值线图比较光滑。



(a)  $x=20$  mm



(b)  $x=60$  mm



(c)  $x=120$  mm

图10 3个尾流横截面内的速度分布图

(虚拟仪器所测)

Fig. 10 Contours of wake velocity in 3 sections  
(measured by virtual instrument)

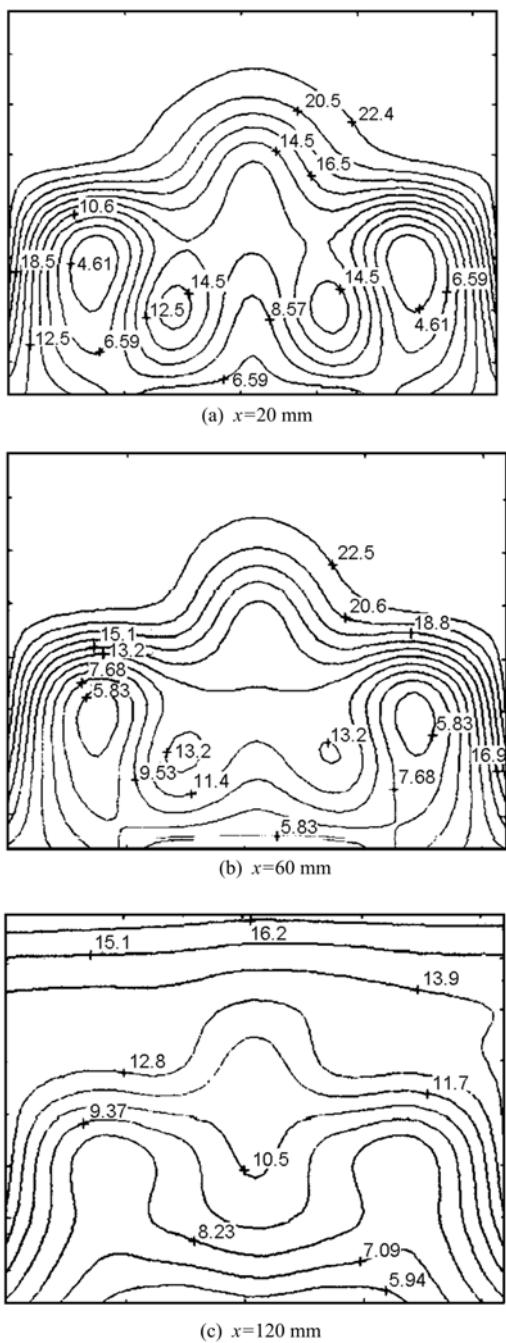


图 11 3个尾流横截面内的速度分布图

Fig. 11 Contours of wake velocity in 3 sections

## 4 结论

(1) 传统仪器存在种种弊端,因而在汽车风

洞中引入虚拟仪器的概念,开发了基于热线风速计的、专门用于汽车尾流测速的虚拟仪器系统,该系统能够方便地进行维护、扩展和升级。

(2) 使用该虚拟仪器系统对某国产轿车进行了尾流测速试验,测试结果与以前的数值计算结果和试验结果均保持一致,证明使用本虚拟仪器进行汽车尾流测速是有效且可行的。

(3) 应用该虚拟仪器系统进行汽车尾流测速,进而研究改善尾流结构的措施,对提高汽车空气动力特性,开发低阻力国产汽车,降低汽车燃油消耗有重要意义。

(4) 将测量的热线探头换成压力传感器,该系统就可变为尾流的压力测量虚拟仪器系统。

## 参考文献:

- [1] 傅立敏. 汽车空气动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 傅立敏. 红旗轿车尾流结构特性的研究 [J]. 吉林工业大学自然科学报, 1999, 29(1): 14-17.
- [3] Fu Li-min, Hu Xing-jun. Virtual instrument system of measuring automotive wake velocity based on hot-wire anemometer [C] // Proceedings of IBEC2003. Yokohama: SAE International, 2003: 565-569.
- [4] 魏中磊, 魏庆鼎, 王开健. 热线风速及其探针的发展在湍流实验研究上的贡献 [C] // 湍流理论新进展及其应用. 上海: 上海大学出版社, 2000: 135-138.
- [5] Freymuth P. Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot wire anemometer [J]. Journal of Physics Engineering, 1977, 10: 705-713.
- [6] Bruun H H. Hot-wire anemometry principles and signal analysis [M]. London: Oxford University Press, 1999: 23-49.
- [7] 傅立敏, 靳春宁. 轿车三维分离流动特性的研究 [J]. 汽车工程, 1998, 20(6): 338-342, 346.
- Fu Li-min, Jin Chun-ning. Study on car's 3D separated flow characteristics [J]. Automotive Engineering, 1998, 20(6): 338-342, 346.