

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.019

# 热膜式无线风速廓线仪\*

陈智 郭旺 宣传忠 张永 武佩

(内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

**【摘要】** 针对目前常用的压差式风速廓线仪测量误差大、移动不便等问题,设计了一种热膜式无线风速廓线仪,并在风蚀风洞中进行了标定。该测试系统可实现多点数据采集和无线传输,具有结构简单、性能可靠、便于携带安装、抗污染和测速范围宽等优点。结果表明,经过标定后的热膜式无线风速廓线仪标定误差在 $0.3798\text{ m/s}$ 以内,所测试的风速廓线呈指数分布,符合近地表风速垂直分布规律。

**关键词:** 风蚀 风洞 风速廓线仪 热膜传感器 标定

**中图分类号:** TH765.4<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0099-04

## Wireless Hot-film Wind Speed Profiler

Chen Zhi Guo Wang Xuan Chuanzhong Zhang Yong Wu Pei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

### Abstract

A wireless hot-film wind speed profiler as well as its data acquisition and processing system were developed in order to avoid large measuring errors and inconvenience of moving by using conventional pressure differential wind profiler. The tested system was calibrated in soil-erosion wind tunnel. The system can implement multi-points data acquisition and wireless transmission, with the advantages of simple construction, reliable performance, easy carry and installation, anti-contamination and wide range of speed measurement. The experimental result showed that for the calibrated wireless hot-film wind speed profiler, the calibrated error is less than  $0.3798\text{ m/s}$ , and the measured wind velocity profiler is in exponential distribution, which is in accordance with the characteristic of wind speed perpendicular distribution at near soil surface.

**Key words** Wind erosion, Wind tunnel, Wind profiler, Hot-film sensor, Calibration

## 引言

土壤风蚀是导致干旱、半干旱地区土地退化和土地荒漠化进程最主要、最直接的作用过程之一<sup>[1-3]</sup>。利用移动式风蚀风洞开展测试是定量研究土壤风蚀问题的主要措施之一,而风速廓线仪是风洞测试时获取近地表风速数据必不可少的设备。

目前,研究土壤风蚀所采用的风速测量装置主要有风杯(叶轮)式风速仪、热线(膜)式风速仪和压差式风速仪。风杯式风速仪与热线式风速仪常用于

野外风速观测,压差式风速仪用于风洞测试时风速数据的采集。但在实际测试过程中,风杯(叶轮)式风速仪其感应元件响应滞后,加之在风沙环境中可动元件造成的磨损和卡滞,使仪器的可靠性低,误差大;热线式风速仪置于风沙流中易受尘土污染,影响传热效果,且由于热线(直径为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的铂丝)强度较低,常受风沙颗粒冲击而损坏,从而影响测试精度<sup>[4]</sup>;热膜风速仪虽然探头强度较高,但仍有低信噪比、功耗大等缺点;压差式风速仪的皮托管在风沙流中易被堵塞,既影响测试精度,也影响测试效率。

收稿日期: 2011-09-29 修回日期: 2011-11-30

\* 国家自然科学基金资助项目(40861013)

作者简介: 陈智,教授,博士,主要从事土壤风蚀、环境控制工程与技术装备研究, E-mail: sgchenzhi@imau.edu.cn

以上几种风速仪在实际测试风速廓线时都需要大量的线路连接,特别是利用移动式风蚀风洞进行野外测试时,压差输出需要的管路多而长,由此造成的压力延程损失和经常移动的不方便性,严重影响了测试的精度与效率<sup>[5]</sup>。因此,在综合分析各种风速仪优缺点并重点考虑风沙环境和测试实际的基础上,本文设计一种热膜式无线风速廓线仪。

## 1 总体结构与工作原理

### 1.1 结构组成

热膜式无线风速廓线仪由硬件系统和软件系统组成。

#### 1.1.1 硬件系统

硬件系统主要包括热膜传感器、无线发送设备、无线接收设备、蓄电池、支架、计算机等,其主体轮廓尺寸为 400 mm × 81 mm × 667 mm,结构如图 1 所示。

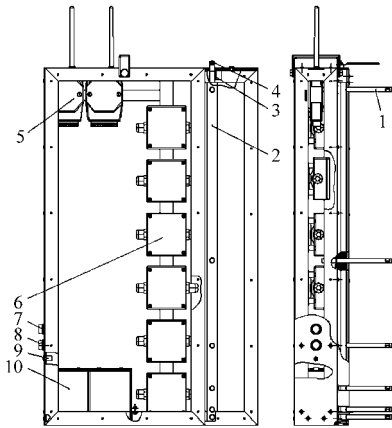


图 1 热膜式无线风速廓线仪主体结构

Fig. 1 Configuration of wireless hot-film wind speed profiler

1. 热膜传感器 2. 转动手柄 3. 转轴 4. 机架 5. 无线发送设备 6. 热膜传感器接线盒 7. 电源开关 8. 电压显示器 9. 充电接口 10. 电池

热膜传感器是镀在细长石英柱上的一层金属薄膜,具有较大的温度系数<sup>[6-7]</sup>。由于土壤风蚀导致的风沙流活动层主要集中在距地表 60 cm 高度内,其近地表风速分布在高度上符合对数规律<sup>[8]</sup>,热膜传感器在风速廓线仪垂直方向上的固定方式应按对数坐标排列。因此,热膜传感器距地面高度分别设计为 2、4、8、16、32 和 64 cm。热膜传感器属易损元件,为便于移动,将所有热膜传感器固定在一个转轴上,搬运时将传感器靠向外壳体,以免损伤。测试时,转动转轴使传感器垂直于外壳表面。

信号发送设备选用 YD06-01 系列无线采集模块,由工业标准的 24 V 供电,配备了 MODBUS 工业标准的总线接口,采用在无线传输部分符合 ZigBee 协议标准的射频收发器和微处理器,可以实现数据

的广播方式发送、按照目标地址发送模式。接收设备选用 YD02 系列无线通信模块,集成了符合 ZigBee 协议标准的射频收发器和微处理器,配有标准 USB1.0 及 RS485 数据接口。无线发送与接收设备具有通信距离远、抗干扰能力强、组网灵活、性能可靠稳定等优点,能够实现点对点、一对多点、多点对多点之间的设备数据透明传输与接收。

为了尽可能减小风速廓线仪迎风面积,其迎风面设计成楔形,以减小对风洞气流稳定性和均匀性的影响,确保所采集的数据真实有效。由于该仪器经常在野外风沙环境中使用,设计时还考虑了结构的密封性,其外部采用厚度为 0.5 mm 的铁皮密封。

#### 1.1.2 软件系统

风速廓线仪的软件系统即数据采集与处理系统,是一个多通道采集系统,采用模块化结构设计,以便于扩充、调试及修改,可完成风速、温度等参数的同步采集。

该系统由多通道数据采集模块、无线数据发送模块、无线数据接收模块、数据库存储模块、数据分析处理模块组成<sup>[9]</sup>,界面友好、清晰、智能化程度较高,方便操作。系统软件编写采用 Visual C++, 软件操作界面如图 2 所示,其风速测控程序流程图如图 3 所示。

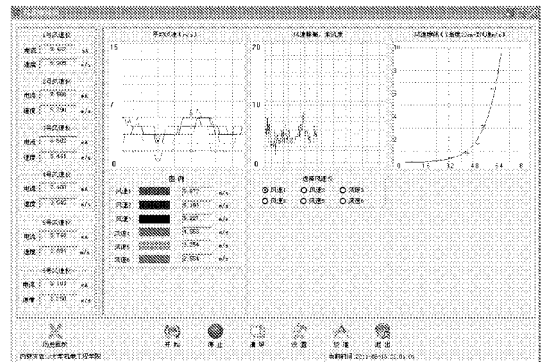


图 2 热膜式无线风速廓线仪软件操作界面

Fig. 2 Software interface of wireless hot-film wind speed profiler

### 1.2 工作原理

测试时,热膜传感器采集到的风速信号经校准后转换成电压信号送到数据采集卡中的 A/D 转换器,无线发送设备分时地将 A/D 转换器的数字信号以无线的方式向外发送,无线接收设备将接收的信号输入计算机,利用风速采集与处理软件系统对风速数据进行分析与处理。其工作原理如图 4 所示。

无线发送设备与无线接收设备分别具有 ZigBee 无线模块,两者之间采用 ZigBee 无线通信协议进行通信。无线发送设备与数据采集卡之间、无线接收设备与计算机数据采集与处理系统之间还配备了通

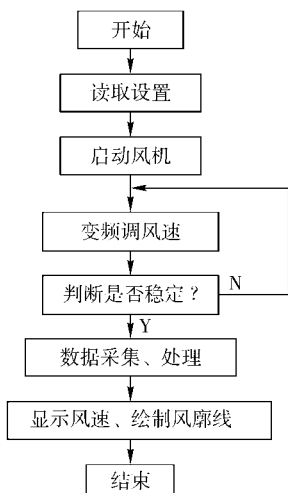


图 3 风速测控程序总流程图

Fig. 3 Flow chart of wind velocity measuring program

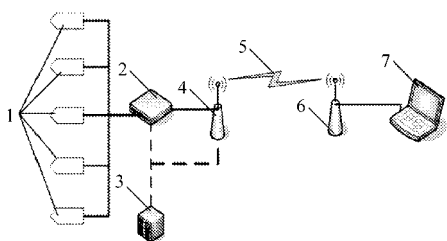


图 4 热膜式无线风速廓线仪工作原理图

Fig. 4 Elementary diagram of wireless hot-film wind speed profiler

- 1. 热膜传感器 2. 数据采集卡 A/D 转换器 3. 蓄电池 4. 无线发送设备 5. 无线通信链路 6. 无线接收设备 7. 计算机数据采集与处理系统

用工业标准的 MODBUS 总线接口, 以实现数据采集卡、计算机数据采集与处理系统分别与其对应的 ZigBee 无线模块之间的串行数据通信。无线发送设备一侧的 MODBUS 总线接口将热膜电流值传送给无线发送设备的 ZigBee 模块, 无线接收设备一侧的 ZigBee 模块将其收到的电流值经 MODBUS 总线接口送入计算机数据采集与处理系统进行处理。由于采集终端(即数据采集卡)和采集节点(即热膜探头)的关系是点对多点的通信关系, 而各个采集节点具有基本相同的结构且都在采集终端的无线信号覆盖范围之内, 彼此之间相互独立, 因此, 与传统的有线系统相比, 不但解决了复杂的现场连线, 而且应用起来更加灵活可靠。

计算机数据采集与处理系统具有插值运算、数据存储和数据分析功能, 信号接收设备将其接收的风速数据传输到计算机数据采集与处理系统, 并进行存储和数据分析, 绘制出风速廓线。数据存储于 Access 数据库, 因此, 能满足多通道实时数据采集的要求, 在数据量大时也能快速对历史数据进行回放和分析。

## 2 标定

### 2.1 热膜传感器自动温度校准

热膜风速仪的测速原理是建立在热膜探头与被测流体间的强迫对流换热的基础上。风速仪输出信号的大小不仅与流速有关, 而且还与被测介质温度有关。本文采用自动温度校准方法, 即将惠斯登电桥中与热膜探头相对的桥臂电阻改成包含补偿电阻的串并联电路(图 5)。其中,  $R_C$  为具有正温度系数的铂电阻, 将其安放在与热膜探头  $R_F$  相同的流场中<sup>[10]</sup>。

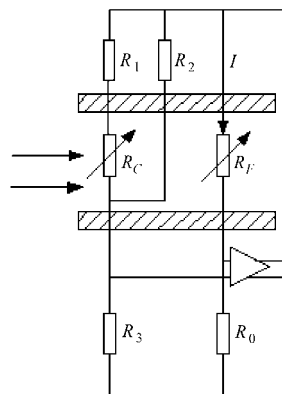


图 5 温度补偿电路

Fig. 5 Temperature compensation circuit

补偿电路设计的依据是热膜探头的温度特性和补偿铂电阻的电阻温度参数。为了使传感器输出不随环境温度变化, 理论上在任何环境温度下应满足

$$\frac{R_0}{R_F} = \frac{R_3}{R_x}$$

其中

$$R_x = \frac{(R_1 + R_C)R_2}{R_1 + R_C + R_2}$$

式中  $R_x$ ——与热膜探头相对的桥臂电阻

这样, 在环境温度变化时, 测量桥臂和补偿桥臂上两电阻之比的曲线应该重合。

### 2.2 热膜式无线风速廓线仪的标定

为了确保热膜式无线风速廓线仪的测试精度, 在投入使用前必须对其进行标定。本文采用德国研制的 testo-425 型热线风速仪所测风速值作为基准风速, 对热膜式无线风速廓线仪的 6 个测点进行标定。标定曲线拟合采用最小二乘法, 即寻求与给定点的距离平方和为最小的曲线。为了保证拟合曲线的精度和光滑性, 标定采用三次拟合函数。设给定数据  $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, m$ 。求三次拟合曲线

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1)$$

式中  $x$ ——原始风速

$P(x)$ ——标定风速

确定  $a_0, a_1, a_2, a_3$ , 使得均方差达到最小, 即离均差

平方和达到最小,此处离均差平方和计算公式为

$$Q(a_0, a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^m (P(x_i) - y_i)^2 = \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 - y_i)^2$$

由极值的必要条件得到

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 - y_i) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 - y_i) x_i = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_2} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 - y_i) x_i^2 = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_3} = 2 \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 - y_i) x_i^3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

约定  $\sum = \sum_{i=1}^m$ , 得到方程

$$\begin{bmatrix} m & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 y_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

解式(3)可得出  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  的值并代入式(1),得到所求的拟合曲线函数。

标定实验在内蒙古农业大学 OFDY-1.2 型移动式风蚀风洞中进行,标定流体介质为风洞净风。根据 GB/T 19068.8-2003 中的比恩法规定,当平均风速小于或等于 15 m/s 时,推荐比恩宽度为 0.5 m/s,因此标定分别在风洞中心风速为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0、11.0 和 12.0 m/s 下进行,每组风速下读取 30 组数据,求取其平均值。以热膜式无线风速仪的风速值,即原始值作为横坐标,以热线风速仪的风速值,即标定值作为纵坐标,可在坐标系中得到 22 个点,然后采用最小二乘法将这些点拟合成光滑的曲线。以距地面高度为 64 cm 的风速传感器为例,拟合后的曲线如图 6 所示,其拟合曲线方程为

$$f(x) = 6.0446 \times 10^{-4} x^3 - 6.2726 \times 10^{-2} x^2 + 1.9472x - 0.42127 \quad (4)$$

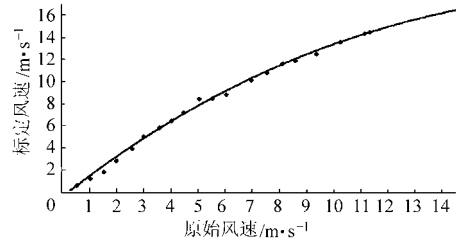


图6 风速传感器标定曲线

Fig.6 Calibration curve of wind speed sensor

经过标定后的热膜式无线风速廓线仪,其标定误差在 0.3798 m/s 以内,在不同的风速下,即可得到近地表的风速廓线。表 1 是风洞中心风速分别为 2、4、6、8、10 和 12 m/s 下的风速廓线及回归方程和复回归系数。

表1 不同中心风速下风速廓线的回归方程和复回归系数

Tab.1 Regression equation and coefficient of multiple regression for wind speed profile under different wind speeds

风速/m·s <sup>-1</sup>	回归方程	复回归系数 R <sup>2</sup>
2	$y = 0.016e^{4.6186x}$	0.9877
4	$y = 0.0158e^{2.0639x}$	0.9830
6	$y = 0.4170e^{0.8205x}$	0.9805
8	$y = 0.1186e^{0.7728x}$	0.9797
10	$y = 0.2724e^{0.5388x}$	0.9677
12	$y = 0.2267e^{0.4872x}$	0.9755

标定后的风速廓线在垂直高度上符合指数分布,且复回归系数均在 0.9677 以上。其风速廓线能准确反映近地表的风速垂直分布规律。

### 3 结束语

构建了热膜式无线风速廓线测试系统,可实现多点数据采集,采集到的电流信号经 A/D 转换成数字信号以无线方式传输,数据经无线接收后进行存储、处理,计算出风速并绘制出风速廓线,弥补了有线数据采集处理系统的不足。应用最小二乘法对风速廓线仪进行了精确标定,标定误差在 0.3798 m/s 以内,能够满足野外测试的需要。

### 参 考 文 献

- 赵永来,陈智,孙悦超,等. 作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):38~42,37. Zhao Yonglai, Chen Zhi, Sun Yuechao, et al. Testing on anti-wind erosion effect of soil for crop stubble coverage farmlands [J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):38~42,37. (in Chinese)
- 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 旱作农田近地表风沙运动与防风蚀效果[J]. 农业机械学报,2011,42(1):54~58. Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Drought farm land near surface blown sand and wind erosion controlling effect [J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):54~58. (in Chinese)

- 13(4): 914 ~ 921.
- 13 Westerhof R J M, Kuipers N J M, Kersten S R A, et al. Controlling the water content of biomass fast pyrolysis oil[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(26): 9 238 ~ 9 247.
- 14 Scholze B. Long-term stability, catalytic upgrading, and application of pyrolysis oils-improving the properties of a potential substitute for fossil fuels[D]. Hamburg: Hamburg University, 2002.
- 15 Bayerbach R, Meier D. Characterization of the water-insoluble fraction from fast pyrolysis liquids (pyrolytic lignin). Part IV: structure elucidation of oligomeric molecules[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 85(1~2): 98 ~ 107.
- 16 Luo Z Y, Wang S R, Liao Y F, et al. Mechanism study of cellulose rapid pyrolysis[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, 43(18): 5 605 ~ 5 610.
- 17 Ingram L, Mohan D, Bricka M, et al. Pyrolysis of wood and bark in an auger reactor: physical properties and chemical analysis of the produced bio-oils[J]. *Energy and Fuels*, 2008, 22(1): 614 ~ 625.
- 18 Mullen C A, Stranhan G D, Boateng A A. Characterization of various fast-pyrolysis bio-oils by NMR spectroscopy[J]. *Energy and Fuels*, 2009, 23(5): 2 707 ~ 2 718.
- 19 常胜, 赵增立, 郑安庆, 等. 生物油中热解木质素特性[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 99 ~ 105.  
Chang Sheng, Zhao Zengli, Zheng Anqing, et al. Properties of pyrolytic lignin from bio-oil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 99 ~ 105. (in Chinese)
- 20 常胜, 赵增立, 郑安庆, 等. 杉木分级催化热解-气质联用实验分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 93 ~ 97.  
Chang Sheng, Zhao Zengli, Zheng Anqing, et al. Step-wise catalytic pyrolysis of fir using pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6): 93 ~ 97. (in Chinese)
- 21 Diebold J P. A review of the chemical and physical mechanisms of the storage stability of fast pyrolysis bio-oils[R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2000.

~~~~~

(上接第 102 页)

- 3 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 北方农牧交错区草原地表土壤风蚀原位测试技术[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 49 ~ 52.  
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. In situ testing on soil erosion of grassland surface in the northern farming-pastoral zone [J]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6): 49 ~ 52. (in Chinese)
- 4 杨松迎, 梁国伟, 黄震威, 等. 组合铂膜探头线性风速仪的研究[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(7): 941 ~ 942.  
Yang Songying, Liang Guowei, Huang Zhengwei, et al. The study of linear-output anemograph based on assembled platinum-film [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(7): 941 ~ 942. (in Chinese)
- 5 艾延廷, 黄福幸, 李国文. DFD 风洞数据采集与控制系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(8): 821 ~ 823.  
Ai Yanting, Huang Fuxing, Li Guowen. Design of the data acquisition and control system for DFD wind tunnel [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(8): 821 ~ 823. (in Chinese)
- 6 高正明, 姚文杰, 王英深, 等. 应用热膜风速仪测定搅拌槽内气-液两相流的流体力学参数[J]. *化学反应工程与工艺*, 1994, 10(1): 90 ~ 91.  
Gao Zhengming, Yao Wenjie, Wang Yingshen, et al. Application of hot-film anemometer to gas-liquid two-phase flow study in aerated stirred tanks [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 1994, 10(1): 90 ~ 91. (in Chinese)
- 7 梁一灵, 梁国伟, 王雨辰. 组合热膜探头在气体流速测量中的应用[J]. *中国计量学院学报*, 2007, 18(3): 191 ~ 193.  
Liang Yiling, Liang Guowei, Wang Yuchen. The application of assembled hot-film probe in measuring the velocity of gas flow [J]. *Journal of China Jiliang University*, 2007, 18(3): 191 ~ 193. (in Chinese)
- 8 陈智, 麻硕士, 赵永来, 等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 118 ~ 122.  
Chen Zhi, Ma Shuoshi, Zhao Yonglai, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 118 ~ 122. (in Chinese)
- 9 石坤. OFDY-1.2 型风洞风速控制与数据采集处理系统的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.  
Shi Kun. Research on wind velocity control and data acquisition processing system for OFDY-1.2 wind tunnel [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 10 闻帆, 李长武. 热膜风速计温度校正研究[J]. *传感器与微系统*, 2006, 25(4): 26 ~ 28.  
Wei Fan, Li Changwu. Research on temperature calibration with hot-film anemometer [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, 25(4): 26 ~ 28. (in Chinese)