

doi: 10.7690/bgzdh.2016.09.020

某跨超声速风洞测量系统

唐 亮, 李 平, 秦建华, 王博文

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了提高风洞试验中数据采集的同步性和精准度, 针对跨超声速风洞的特点, 设计某跨超声速风洞测量系统。介绍风洞测量系统的总体设计, 详细阐述了连续与阶梯同步采集、反射内存、NI-PSP 技术协议等新技术新方法。给出第 1 期标模试验, 结果表明: 该系统运行稳定可靠, 具有数据采集精准度高, 采集频率高, 保存数据完整, 数据通信可靠性高和传输时延短等特点, 具有较高的自动化程度和拓展能力, 并利于国内自主开发。

关键词: 风洞; 测量系统; 同步采集; 反射内存; NI-PSP

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A

Measure System of Transonic and Supersonic Wind Tunnel

Tang Liang, Li Ping, Qin Jianhua, Wang Bowen

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve synchronization and precision wind tunnel data acquisition, for transonic and supersonic wind tunnel characteristics, design of a transonic and supersonic wind tunnel measurement system. The overall design of the wind tunnel measurement system is introduced, and the new technology and new method of continuous synchronous acquisition with ladder, reflective memory, NI-PSP technical protocol and so on are described in detail. Give the first a standard mold test results. Test results show that: the system is stable and reliable, with data acquisition accuracy, high frequency acquisition, data integrity preservation, high reliability data communication, transmission delay is short and so on, with a high degree of automation and the ability to expand and facilitates domestic self-development.

Keywords: wind tunnel; measurement system; synchronous acquisition; reflective memory; NI-PSP

0 引言

某风洞是中国空气动力研究与发展中心的一座直流型暂冲式跨超声速风洞, 试验段横截面尺寸为 0.6 m×0.6 m, 试验马赫数范围为 0.3~4.5。风洞于 2012 年 12 月开工建设; 2014 年 8 月完成测控系统设备安装; 2015 年 8 月完成流场校测试验, 获得了风洞亚跨超声速范围的流场性能指标; 2015 年 9 月完成标模试验。

测量系统担负着风洞试验数据采集计算的任务, 对采集数据的同步性、精准度起着至关重要的作用^[1]。数据的实时监测、远程查看的需求对风洞测量系统研制提出了很高的要求。笔者以风洞运行安全可靠为前提, 综合利用国内外的先进技术和成熟产品, 成功研制风洞测量系统, 并兼顾系统的先进性和经济性。

1 风洞测量系统总体设计

风洞测量系统就是通过传感器把压力、温度、力、力矩、角度、位移、速度等物理量, 转化成电压或电流信号, 然后通过数据采集系统逐个采样,

再量化成数字信号送入计算机处理、计算, 并显示、打印试验结果^[2]。测量系统由风洞测力数据采集系统、风洞测压数据采集系统、数据处理系统组成。

1.1 风洞测力数据采集系统

风洞测力数据采集系统主要完成天平信号和流场信号的采集和处理, 由前置传感器、天平、放大器和 PXI 数据采集系统组成。风洞试验过程中, 该系统进行信号的实时采集、相关试验参数的实时显示、原始数据保存。

如图 1 所示, 系统采用反射内存技术构建实时网络, 选用 NI 公司的数据采集卡实现数据采集, 应用 NI 公司的 LabVIEW 进行系统软件开发的总体研制方案。其中, 信号采集(A/D 转换)位于风洞现场, 减少了模拟信号远距离传输带来的干扰。具体选用美国 NI 公司 PXI 数据采集系统进行数据采集(PXI-1050 机箱、PXI-8336 嵌入式控制器、PXI-6289 数据采集卡)。

测力数据采集系统软件采用 LabVIEW2012 编写, 包含参数设置、资源管理、系统校准、风洞试验 4 个功能模块。软件运行界面见图 2。

收稿日期: 2016-05-05; 修回日期: 2016-06-23

作者简介: 唐 亮(1983—), 男, 四川人, 本科, 工程师, 从事风洞测控技术研究。

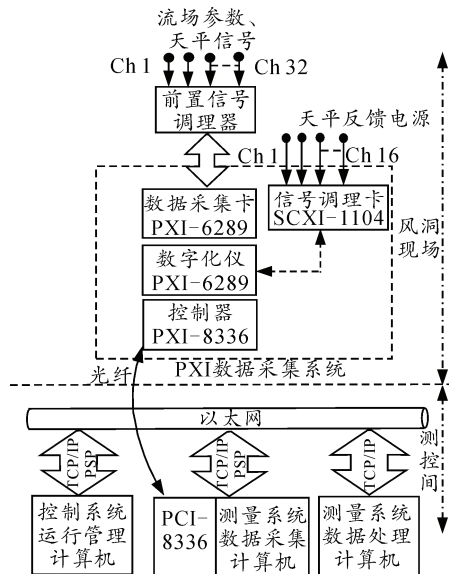


图1 风洞测力数据采集系统结构



图2 测力数据采集软件运行界面

1.2 风洞测压数据采集系统

风洞采用 PSI 9016(9116)电子扫描阀作为风洞测压数据采集系统，主要完成流场压力参数测量和模型表面压力测量。PSI 9016(9116)电子扫描阀通过网络交换机，实现与主控计算机的信息交换，完成对风洞和模型压力测量。系统可以实现 16 个 PSI 9016(9116)模块，256 个点的风洞和模型压力测量。

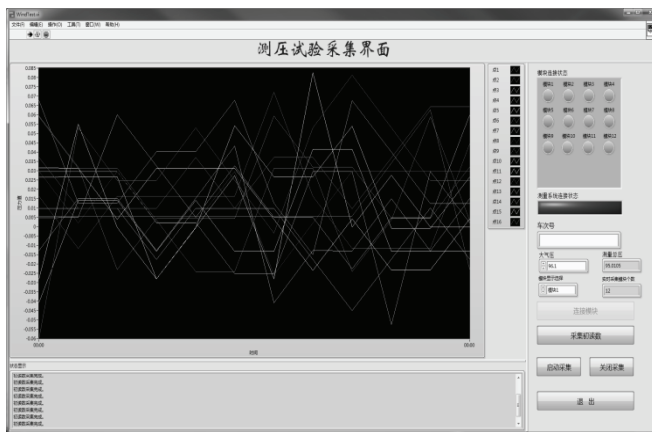


图3 测压数据采集系统运行界面

测压数据采集软件包含参数设置、模块配置表设置、风洞试验 3 个功能模块，运行界面见图 3。

1.3 数据处理系统

数据处理系统是根据采集的总压、静压传感器、温度传感器以及天平电压值，计算出马赫数、力、力矩及气动系数等风洞试验所需的结果数据软件^[3]。系统包含数据处理、天平管理、参数管理、输出管理 4 个功能模块，其中天平公式管理界面见图 4。

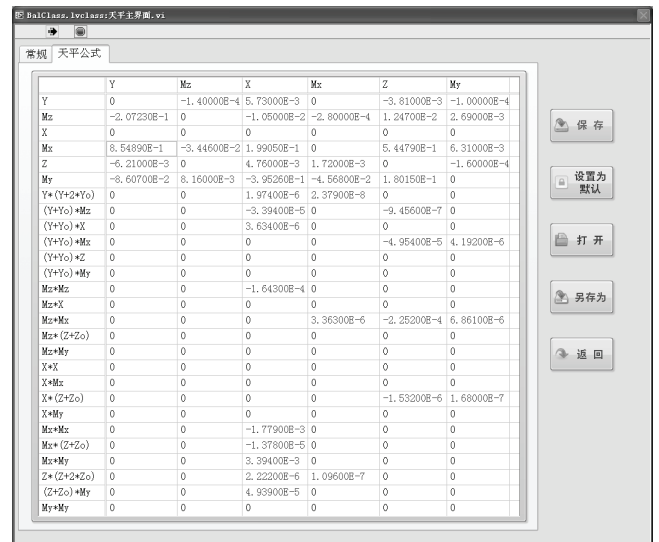


图4 数据处理系统软件运行界面

2 测量系统新技术新方法的应用

2.1 基于光纤传输的连续与阶梯同步采集的应用

测量系统在风洞试验中一般采用阶梯测点方式，即根据试验要求，在流场建立后，当迎角运行至设定值，保持迎角不变，控制系统通知测量系统采数。测量系统采集该状态下传感器、天平的电压值后，通知控制系统采集完毕，等待控制系统的下一步指令。如果该试验车次有 10 个阶梯，则测量系统在整个试验过程中采集 10 次。

传统的阶梯测点方式具有占用系统资源少，网络吞吐量小的优点；但不利于实时监测风洞、模型状态。例如在某个状态下，风洞已经异常运行，压力传感器感受到的压力已超过极限压力，或者模型的天平载荷已超过设计指标，这时需要立即停止试验。但传统采集方式只在阶梯到位时才会采集试验数据，并且不能实时监测，存在安全隐患。

该测量系统根据阶梯测点要求和实时监测需求，采用连续采集与阶梯采集同步运行，数据同时保存的方式。当试验开始时，测力数据采集系统和测压数据采集系统开始连续采集数据，同时以 0.1 s

为间隔，将数据保存至连续文件，同时实时计算对应的物理量，在软件界面上实时显示。当接收到控制系统发送的阶梯采集信号，测量采集系统将最新的采集数据保存至阶梯文件中。试验完成后，同时生成连续和阶梯数据文件。

图 5 为试验过程中 Y 元电压值随迎角变化的曲线图，在攻角 8°~12°时，由于迎角的加减速变化和受力载荷的作用，电压值变化并不线性，阶梯数据遗漏了这部分数据。

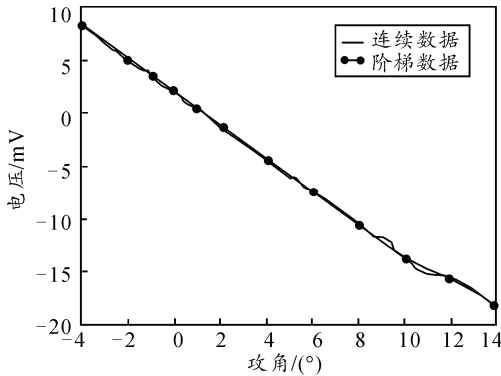


图 5 Y 元电压值随迎角变化的曲线图

传统测量系统将数据采集设备放置于测控间，位于风洞现场的传感器、天平采集的电压、电流等模拟信号通过线缆传输至采集系统，采集系统再通过 USB 总线或者 GPIB 总线连接电脑。由于模拟信号经过长距离的传输，信号衰减大，传统测量系统不利于数据的精确采集。该系统采用了 PXI 数据采集系统前置的设计思路，通过数字信号传输采集数据。采集方案对比见图 6。

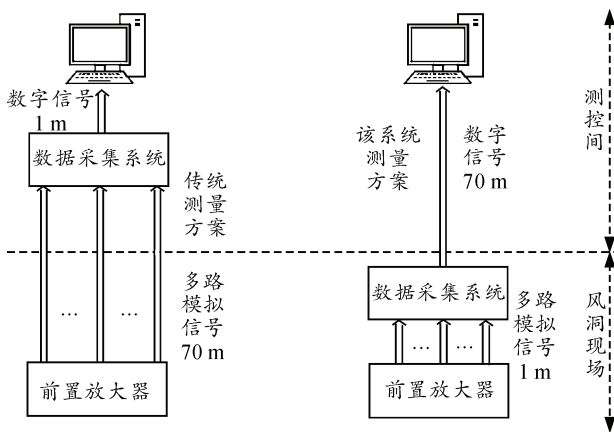


图 6 测量采集方案对比

由于连续采集数据吞吐量大，如果 PXI 数据采集系统与测量主机之间采用网线通信，接入测控系统总线会影响测控系统网络整体的处理能力，引起网络拥塞，增加网络时延。而风洞试验为保证试验的精准度，对数据的同步性要求高，需要尽可能降

低网络时延。该测量系统将测量采集计算机和 PXI 数据采集设备通信从测控网络独立出来，单独采用光纤进行全双工通信，保证试验采集数据量和试验信号同步。

2.2 反射内存与 NI-PSP 共享变量的应用

传统测控系统网络通信是在测控系统之间传递少量的、风洞流程必须的指令。例如阶梯到位后，发送“STEP”采集指令。一般使用 TCP/IP 协议，该协议提供可靠的、点对点、全双工模式通信。

如今以太网传输带宽至少在 100 Mb/s 以上，随着网络带宽的拓展，对测控系统的通信提出了更高的要求。测控系统通信不仅要满足在试验过程中的可靠通信，还需要对外实时发布数据，保证在以太网内部任何电脑都可以实时查看风洞的试验状态和实时数据。

测控系统通信可以分为 2 类：一是数据量小，实时性、可靠性要求高，例如在风洞试验时，测控系统之间的通信命令；二是数据量大，实时性要求不高，例如供以太网内部实时查看的力、力矩测值。

该系统根据通信分类，运用反射内存技术传输实时、可靠的通信命令；基于 NI-PSP 技术的网络共享变量，传输大数据量和一对多数据，如图 7。

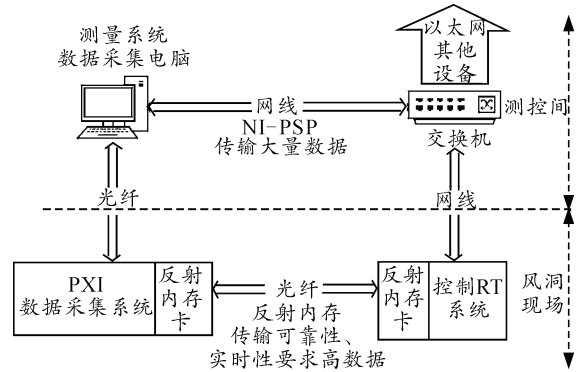


图 7 测量系统网络通信

该系统采用反射内存技术实现测控系统实时、同步地交换试验指令及试验数据信息。通过在控制 RT 系统 PXI 机箱和测量系统 PXI 机箱中，分别插入一块泛华恒兴公司的 PXI-3550 反射内存卡，构建实时网络。

反射内存技术是一种通过局域网，在互连的计算机间提供高速的数据传输与共享的技术^[4]。网络上的每台计算机中插入一块反射内存卡，从而形成网络上的各个节点，而每个节点的反射内存卡上的存储器中都有反射内存网上其他节点的共享数据拷贝。每个反射内存卡上的存储器都被分成若干个地址段，每个地址段对应网络上的 1 台计算机。网上

任何计算机向本地反射内存卡对应的地址段写数据时，该数据和相应内存地址被广播到网上所有其他反射内存卡并存储在相同的位置。所以计算机将数据写入其本地反射内存卡后的极短时间内，网上所有计算机都可以访问这个新数据。

反射内存的数据传输是全双工光纤传输，不会出现以太网 CSMA/CD 协议那种检测数据碰撞，随机重发的情况；因此，它与以太网等其他传统网络相比具有更低的数据传输延迟、更高的传输速度和更稳定的传输时延^[5]。经测试采用反射内存技术后，测控系统间的数据传输时延由 2 ms 降低为 0.3 ms。

NI-PSP 技术协议 (ni publish-subscribe protocol) 是美国国家仪器公司为了方便操作共享网络变量，在 TCP/IP 技术协议的基础上开发的协议。

美国国家仪器公司在 1 GB/s 的网络条件下，比较了使用 NI-PSP 协议与直接使用 TCP/IP 协议的网络吞吐量，见图 8^[6]。从图中可知，基于 NI-PSP 协议的网络共享变量的吞吐量与 TCP/IP 协议接近，并且不受装载的数据量影响。

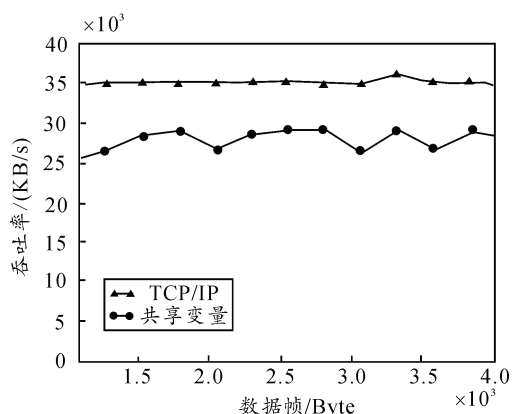


图 8 TCP/IP 与网络共享变量的吞吐量比较

TCP/IP 协议是点对点的，无法复用和分用网络信息，不适应对外发布信息。共享变量在保证数据通信吞吐量的基础上，简化编程工作，使网络数据能够复用和分用，以太网的其他电脑能够直接查看交互数据。

3 风洞的调试与运用

风洞建成后，至今已进行了上千次流场调试和标模试验，其间测量系统运行稳定可靠，数据精准度高，软件交互性强。采用同一标准模型分别在该风洞和法国 S2 风洞进行了标模对比试验，图 9 给出了标模纵向特征值对比结果，可以看出标模试验数据准确度与参考风洞试验结果趋势一致，量值相当，

表明该风洞试验数据准确度可靠。从表 1 可知，风洞 7 次同期重复性精度全部达到先进指标，表明该风洞具有很高的同期重复性精度。

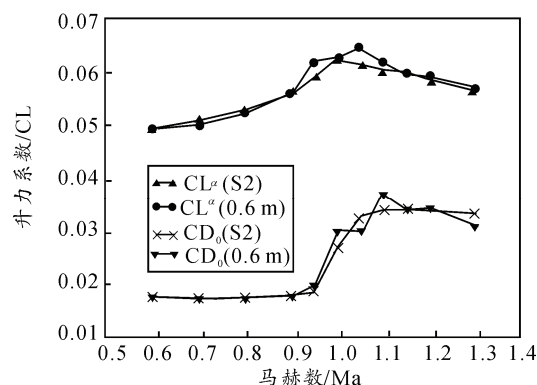


图 9 标模纵向特征值对比结果

表 1 标模同期重复性精度

角度	M2.0 σ_{CL}	M2.0 σ_{CD}	M3.0 σ_{CL}	M3.0 σ_{CD}
-4	0.000 12	0.000 06	0.000 09	0.000 06
-2	0.000 11	0.000 06	0.000 10	0.000 06
-1	0.000 18	0.000 07	0.000 11	0.000 06
0	0.000 10	0.000 06	0.000 10	0.000 06
1	0.000 13	0.000 08	0.000 08	0.000 05
2	0.000 09	0.000 09	0.000 07	0.000 05
4	0.000 09	0.000 12	0.000 10	0.000 06
先进指标	0.000 50	0.000 08	0.000 50	0.000 08
合格指标	0.001 50	0.000 30	0.001 50	0.000 30

4 结论

笔者以风洞运行安全可靠为前提，采用了基于现场总线和网络化的开放集散结构方法，运用连续与阶梯同步采集、反射内存、NI-PSP 技术协议等新技术新方法研制了该风洞测量系统。试验结果表明：该系统具有数据采集精准度高，采集频率高，保存数据完整，数据通信可靠性高、传输时延短等特点，具有较高的自动化程度和拓展能力。

参考文献：

- [1] 高川, 刘烽, 周波, 等. 某超声速风洞测控系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 63-66.
- [2] 李平, 芮伟, 秦建华, 等. 2 m×2 m 超声速风洞测量系统与运行管理系统研制[J]. 实验流体力学, 2012, 26(4): 96-100.
- [3] 赵佳勇, 毛春刚, 陈鹏飞, 等. 短距离无线电能传输装置的实验研究[J]. 机电工程, 2015, 32(9): 1242-1245.
- [4] 刘太阳, 王仕成, 刘志国, 等. 基于 LabVIEW RT 的数据实时传输系统[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(2): 270-273.
- [5] 纪红. 基于反射内存网络的实时网络关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [6] NI 公司. 使用 LabVIEW 共享变量[EB/OL]. NI 官网. 2011[2016-2-16]. <http://www.ni.com/white-paper/4679/zhs>.