

基于 PXI 总线的某高超声速风洞 测量系统研制

贾 霜, 蒲 麒, 陈 涌, 吴 鑫

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了解决某高超声速风洞测量系统设备老化、数据采集通道性能严重下降以及信号线路转接环节较多的问题, 开展了新测量系统研制工作; 构建了基于 PXI 总线的新测量系统, 选用高精度的信号调理系统和多类型数据采集卡, 软件采用模块化、多线程设计模式, 集成测力、测压和测热功能于一体, 可实现多种试验类型的灵活配置; 经试验测试, 测量系统的误差限优于 0.03%, 风洞速度场、温度场和标准模型试验结果满足国标要求, 新的测量系统稳定性好, 可靠性高, 数据采集精准度高, 可以满足先进飞行器测试需要。

关键词: 高超声速风洞; 测量系统; PXI; 信号调理系统

Development of a Certain Hypersonic Wind Tunnel Measurement System Based on PXI Bus

JIA Shuang, PU Qi, CHEN Yong, WU Xin

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

Abstract: The hypersonic wind tunnel measurement system has the features of aging equipment, serious degradation in data acquisition channel performance, and many signal line switching links. Based on this issues, a new measurement system is developed. Construct a new measurement system based on PXI bus, select a high-precision signal modulation system and multi type data acquisition card, The software adopts modular and multi-thread design, integrating force measurement, pressure measurement and thermal experiment into one, and can achieve flexible configuration of multiple experiments. After experimental testing, the error of the measurement system is better than 0.03%. Through wind tunnel velocity field, temperature field and standard model testing, the results meet the requirements of national standard. The new measurement system has good stability, high reliability and high acquisition accuracy, which can meet the testing needs of advanced aircraft.

Keywords: hypersonic wind tunnel; measurement system; PXI; signal modulation system

0 引言

某高超声速风洞自建成以来, 承担了大量的试验任务, 设备一直处于高负荷运行状态, 逐渐暴露出一些问题, 主要表现在:

1) 测量系统设备老化严重。具体表现有: 信号调理器使用了多年, 元器件老化严重, 出现了通道背板损坏、跳数、零点漂移过大、部分增益下通道指标超限等多发故障, 且呈愈发频繁的趋势。NI PXI-6031E 型数据采集卡已经停产, 且曾出现过故障, 后经维修后得以

继续使用。敷设的地沟线缆也出现了不同程度的发硬、绝缘老化、腐蚀、电缆接头接触不良等故障现象。

2) 微弱的模拟信号传输距离较远, 容易受到现场复杂的电磁环境干扰。风洞有功率是兆瓦级的高电压加热器, 有模型姿态机构运动的各种变频器和伺服电机等。在以往的经验中, 为了减少复杂电磁环境给测量系统尤其是信号调理器带来的干扰, 将信号调理器放置在测控间, 这样的弊端是微弱的模拟信号传输距离过远, 增加了传输过程中被电磁干扰的可能性。

3) 模拟信号传输路径中转接环节较多。从传感器

收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-07-03。

作者简介: 贾 霜(1977-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 贾 霜, 蒲 麒, 陈 涌, 等. 基于 PXI 总线的某高超声速风洞测量系统研制[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 11-18.

信号到采集系统 AD 转换共有 5 处转接, 且每处的连接航插件规格不统一, 航插针数不同, 且针脚定义也有差异, 这样既不利于微弱信号的稳定传输, 也给设备维护增加了难度。

4) 模拟信号通道数仅有 16 通道 (主要是受限于信号调理通道), 且由于信号调理器的多故障频发, 实际可使用的通道仅能刚刚满足基本风洞试验要求。

为了解决以上问题及满足后续试验任务的需要, 开展了新测量系统研制工作。

测量系统一般包括激励电源、天平、传感器、信号调理器、多路转换开关、程控放大器、A/D 转换器、接口电路、计算机等^[1], 新的测量系统只开展信号调理器选型、PXI 数据采集系统硬件选型及信号转接适配器设计以及软件开发工作。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^[3], 新测量系统的设计充分借鉴已有风洞设计、建设和运行经验^[4], 选择国内外技术先进的成熟产品, 并结合现场实际开展适应性设计, 综合考虑多种试验类型需求、多种文件存储模式、不同信号的同步处理, 统筹系统抗干扰能力, 完成了基于 PXI 总线的新测量系统设计。

1 测量系统总体设计

1.1 测量系统设计指标

测量系统设计指标以满足风洞测力、测压和测热试验要求以及后续先进飞行器研制需要为依据, 具体指标如下:

- 1) 信号调理通道数: 48, 输入电压范围 ± 10 V, 输入阻抗 ≥ 100 M Ω , 共模抑制比 ≥ 100 dB, 增益 1~1 000 程控可调, 增益精度 0.02%, 线性度 $\pm 0.005\%$ FS;
- 2) 模拟信号输入通道数: 48, 输入电压范围 ± 0.1 ~ ± 10 V, A/D 分辨率 18 位, 综合精度优于 0.03%;
- 3) 高电压采集通道数: 8, 输入电压 ≥ 24 V, 具有数字滤波功能;
- 4) 数字 I/O 通道数: 32;
- 5) 热电偶测量通道数: 64, 精度优于 0.5 °C, 支持常见热电偶。

1.2 测量系统设计方案

新的测量系统包括信号调理器、PXI 数据采集设备、数据采集软件、数据处理软件以及一次仪表激励电源等, 其组成框图如图 1 所示。图 1 中, 传感器、天平在一次仪表信号经过信号调理器放大滤波后, 进入数据采集卡进行 AD 转换, 超过 10 V 的电压则进入高电压采集卡进行 AD 转换并数字滤波, 热电偶信号则直接进入热电偶采集卡转换成温度值, 以上数据通过光纤由测

量系统数据采集计算机完成采集、存储。其中信号调理器和 PXI 数据采集系统位于风洞现场机柜, 实现了模拟信号特别是微弱天平信号现场 AD 转换, 避免了微弱模拟信号的远距离传输, 提高了测量系统抗干扰能力。测量系统与风洞模型姿态控制系统通过 DIO 板卡进行硬件触发通讯, 从而共同完成风洞试验流程。

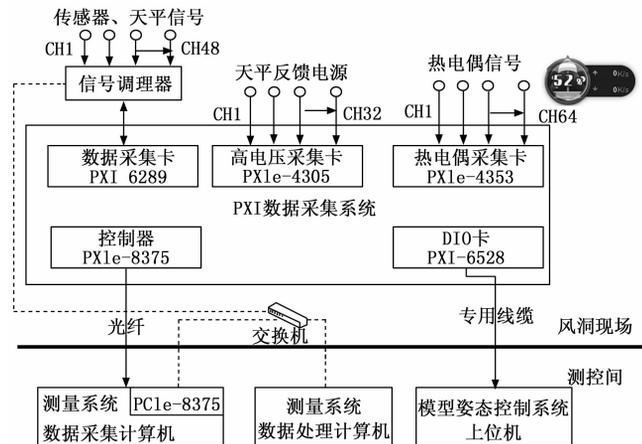


图 1 测量系统组成框图

2 硬件选型与设计

2.1 信号调理器选型

信号调理器的主要功能是对微弱模拟信号进行滤波放大, 主要包括增益、线性度、共模抑制比 (CMRR)、输入阻抗、滤波器截止频率等关键参数。根据风洞测量设计准则, 选用了某新一代信号调理器。它具有体积小、集成度高、采集信号源多样、扩展性强、程控等特点。一套信号调理系统由机箱、电源、信号调理卡、输入/输出接插件适配器和配套电缆组成。机箱选用共有 8 个插槽, 本方案仅使用了 6 个插槽, 提供了高品质的线性电源; 背板接口卡提供了 RS232、RJ45 接口以及测试总线接口; 信号调理卡共计 6 张 48 个信号调理通道, 其中滤波前和滤波后增益程控可调, 共模抑制比 160 dB, 输入阻抗单端方式 100 M Ω //100 pF、差分方式 200 M Ω //50 pF, 具有很强的抗干扰能力。该型信号调理器提供远程控制软件, 通过该软件, 用户可以设置通道名称、增益大小、截止频率、滤波器类型以及滤波前后增益组合等参数; 结合测试子系统的信号发生器和数字万用表, 用户还可以对信号调理器开展丰富的功能测试, 对于设备自检和故障排查提供了强大的支持。

2.2 PXI 数据采集系统

PXI 数据采集系统主要完成风洞传感器、天平信号及反馈电源模拟信号的采集, 完成测热试验热电偶信号的采集, 完成与风洞模型姿态机构控制系统的通信等功能。本文选用 NI 公司的 PXI 系统, 机箱选用

PXIe-1065, 具有 PXI 插槽和 PXIe 插槽, 包括 1 个 PXIe 系统定时插槽。控制器选用 PXIe-8375 套件, 该套件由插入 PXI 机箱零槽的 PXIe-8375 控制器和插入 PC 机 PCI 插槽的 PCIe-8375 通讯卡以及通讯光缆组成。光缆连接系统主机和 PXI 机箱零槽, PC 机通过 MXI-4 直接控制 PXI 模块。

PXI-6289 型数据采集卡, 具有单端 32, 差分 16 模拟量输入通道, AD 分辨率 18 位, 共模抑制比 120 dB。具有 7 个可编程控制量程: ± 10 、 ± 5 、 ± 2 、 ± 1 、 ± 0.5 、 ± 0.2 、 ± 0.1 V, 数据传输方式为 DMA, 支持模拟量及数字量可编程触发, 采样率 625 kS/s。系统选用 3 张共 48 个差分通道, 用于常规天平和压力传感器的信号采集。

为了采集超过 10 V 的天平反馈电源, 选用了一张高电压采集卡 PXIe-4305, 该卡是一款经滤波的模拟输入模块, 适用于高电压测量, 最高电压 42 V。各个通道可以选择相应的数字滤波器, 从而提高滤波性能。该卡分辨率 24 位, 通道数 32。

在风洞中, 温度传感器采用的是 K 型热电偶。在之前的系统中, 热电偶信号经调理放大后进入 AD 采集卡, 按照拟合经验公式将电压值转换成温度值。为了提高热电偶温度信号的采集精度, 选用 PXIe-4353 热电偶采集卡, 它支持各种类型热电偶信号测量, 每张卡可采集热电偶信号 32 路, 内置 8 路冷端温度补偿通道, 精度 0.3 $^{\circ}\text{C}$, 分辨率 24 位, 每通道最高 90 S/s 采样率。PXIe-4353 热电偶采集卡配备了 TB-4353 恒温接线盒, 该接线盒可优化热电偶终端和冷端补偿 (CJC) 通道之间的导热性, 提高测量精度。

2.3 信号转接适配器设计

为了适应现场各种信号的接入, 根据不同信号的类型及功能设置, 设计了不同类型的转接适配器, 主要有测力信号转接适配器、测热信号转接适配器和供电转接适配器 3 类。

测力信号转接适配器的功能是将传感器 (大气压、总压、总温、天平等) 的信号接入信号调理系统。测力信号转接适配器在机柜内上架安装, 共 48 通道。按照每 8 个通道一排, 每两排为一组设计 1 个测力信号转接适配器, 共计 3 个, 每个转接通道的下方丝印通道编号, 顺序为 1~48。测力信号转接适配器的实物图如图 2 所示。

测热信号转接适配器的功能是将风洞 K 型热电偶信号接入 PXI 采集系统。测热信号转接适配器在机柜内上架安装, 共 64 通道。按照每 16 个通道一排, 共 4 排。考虑到安装空间, 转接盒上安装微型的 K 型 OMEGA 面板式插座 MPJ-K-F, 与风洞 K 型热电偶匹配。测

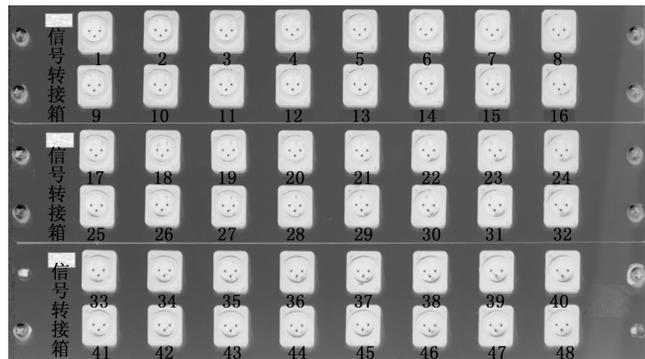


图 2 测力信号转接适配器

热信号转接适配器的实物图如图 3 所示。

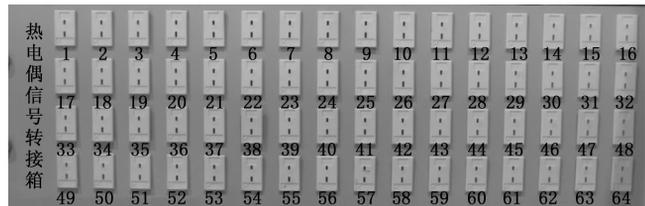


图 3 测热信号转接适配器

供电转接适配器的功能是为天平和传感器供电电源提供接口, 供电转接适配器在机柜内上架安装, 为天平供电的标识为 U1 和 U2, 为传感器供电的标识为 CH1 和 CH2, 采用红色字体, 以便与其他信号转接适配器区分, 防止岗位人员误操作。其中 U1、U2、CH1、CH2 四路供电各有 4 个 3 芯航插接口, 3 芯航插接口对应的针脚并联联通, 确保供电统一, 供电转接适配器的实物图如图 4 所示。

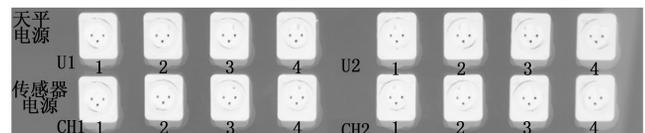


图 4 供电转接适配器

3 软件设计与实现

测量系统软件包括数据采集软件和数据处理软件。

数据采集软件主要完成测量系统设备管理, 完成风洞试验数据采集、存储、显示, 完成测量系统与控制系统的通信等。数据采集软件以风洞试验流程为核心, 按照系统功能进行模块化设计, 满足常规测力试验、测压试验、测热试验以及混合类型试验的需要。

数据处理软件主要实现速度场校测和温度场校测的数据处理和显示, 根据速度场和温度场数据处理规范完成压力数据和温度数据的处理、结果文件生成和显示, 并支持多车次结果数据显示。

软件基于 64 位 Windows 7 操作系统下的 LabVIEW

2018 软件开发平台。

3.1 软件架构设计

项目开发的 LabVIEW 软件架构是具有自主知识产权的通用软件架构，该架构可以灵活运用于多种测控系统的软件开发中。具有开发灵活、运行稳定、方便阅读和维护等特点，能加快系统软件功能开发的进度。该软件开发架构具有以下特点：

- 1) 快速搭建软件框架——在架构上只需做较少改变即可构建出整个系统的框架，缩短开发周期。
- 2) 同一平台——在架构基础上，所有的开发人员基于同一的框架和平台，增强程序的易读性和扩展性。
- 3) 模块化——引擎和线程概念的提出使程序模块耦合性下降，使程序既能系统化协调工作，又可单独使用功能模块。
- 4) 容错机制——框架增强了程序的容错机制，使系统鲁棒性更好。

软件设计在软件架构的基础上，采用多线程设计模式，对程序中需要并行处理的事件采用多线程嵌套的统一管理模式，保证各并行事件间独立、高效且互不干扰。各并行线程间采用队列一功能全局的方式保证各线程间可以进行数据高效共享，避免数据间发生竞争和堵塞的情况。

3.2 软件设计模式

数据采集软件采用高级设计模式，适合于对编程和系统理解都比较深刻，被控（测）对象参数复杂、各子系统相关性强的测控系统。在程序设计之初，完成命名主队列名、命名其他队列、创建主 VI 队列、定义中间变量、定义初始化分支、定义错误处理峰值等系列工作。主要包括以下几个部分。

1) 动态/重载程序段调用：

该分支的功能是动态调用一个不可重入的 VI，当这个 VI 有接收命令的队列时，主 VI 会将该队列名字传入，如果没有接收命令的队列时，可将 command

queue name 连线端置空。如果主 VI 传入队列名字，那么主 VI 将会等待该队列有效，默认等待 5 秒。

2) 引擎调用分支：

该分支的功能是动态调用引擎，主 VI 将引擎的名字传入给引擎，同时将主 VI 的队列传入给引擎，在引擎调用成功后，引擎将会创建自己的队列。

3) 关闭动态/重载程序段调用：

主 VI 收到关闭动态 [R] 程序段命令后，发送命令给动态程序段 VI，同时传递的数据为布尔常量 True。在 UI 分支中，动态/重载程序段 VI 将会收到命令，并按次序退出程序，销毁队列。

4) 关闭引擎调用：

主 VI 收到关闭重载程序命令后，发送命令给动态程序段 VI，同时传递的数据为布尔常量 True。在 UI 分支中，引擎将会收到命令，并按次序退出引擎，销毁队列。

5) 关闭线程分支：

主 VI 在该分支发送退出的命令给动态调用的线程，并同时等待各线程的队列是否销毁，默认等待时间为 5 秒。

6) 外部发出命令分支：

在这个分支中执行外部发出的命令；如果是引擎，它的外部命令往往来自于主 VI 的用户操作界面事件 (UI)。如果是子线程，那么它的外部命令则来自于引擎。

3.3 软件功能设计及实现

数据采集/处理软件的功能模块划分如图 5 所示，主要包括用户管理、系统参数配置、试验参数配置、试验运行以及数据处理共 5 个部分。

3.3.1 用户管理

用户管理模块功能分为：用户登录和用户信息管理。用户采用权限管理，分为管理员和操作员权限，其中管理员权限可以更改任意用户权限，包括查看、删

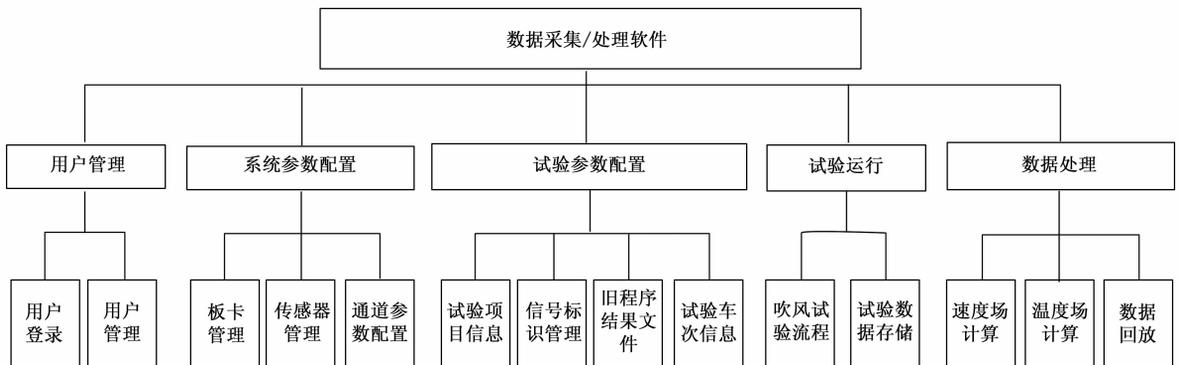


图 5 数据采集/处理软件功能框图

除、修改、增加用户信息等。

3.3.2 系统参数配置

系统参数配置模块主要包括: 板卡管理、传感器信息管理等、通道参数配置三部分。

板卡管理功能主要完成系统中涉及的全部硬件设备进行管理, 包括板卡选择、采样参数配置, 如图 6 所示。用户可以根据任务要求选择需要使用到的数据采集板卡, 并对板卡的参数进行, 其中板卡支持采样速率范围: 10 S/s~10 kS/s, 平均点数支持范围: 1~1 k; 扫描阀只支持 10 S/s 采样速率, 平均点数默认为 8。



图 6 板卡管理界面

通道参数配置针对系统使用的数据采集板卡进行参数配置, 从功能上分为: NI 6289 AI、NI 4305 AI、NI 6289 CI、NI6528 DI、NI 6528 DO 以及 NI 4353 T, 共六个配置界面。以 PXI-6289 为例, 参数配置界面针对 3 张 PXI-6289 数据采集硬件, 具体配置参数包括: 信号标识、通道使能、信号类型、接线方式、量程、单位、放大器通道、放大倍数、滤波频率以及对应传感器名称等。用户可以根据具体试验任务配置单通道参数信息, 其通道参数配置界面如图 7 所示。其他板卡的配置界面类似, 不再具体描述。需要注意的是:

NI6528 DI/DO 可以设置脉冲宽度, 单位为 ms。

NI 4353T 配置针对温度信号, 可以设置热电偶类型, 默认为 K 型。

信号号	通道名称	设备名称	资源名称	物理通道	信号类型	接口方式	量程	单位	放大倍数	滤波频率	放大器通道	放大倍数	滤波频率	传感器名称
1	Y	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a0	电压	差分	10	V	1	500.0	1	无	无	
2	X	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a1	电压	差分	10	V	2	500	1	无	无	
3	Mz	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a2	电压	差分	10	V	3	500	1	无	无	
4	Mx	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a3	电压	差分	10	V	4	500	1	无	无	
5	Z	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a4	电压	差分	10	V	5	500	1	无	无	
6	My	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a5	电压	差分	10	V	6	500	1	无	无	
7	To	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a6	电压	差分	10	V	7	200	1	无	无	
8	Pa	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a7	电压	差分	10	V	8	1	1	Pa	无	
9	PO1	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a16	电压	差分	10	V	9	1	1	PO	无	
10	PO2	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a17	电压	差分	10	V	10	1	1	PO	无	
11	Pb1	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a18	电压	差分	10	V	11	1	1	无	无	
12	Pb2	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a19	电压	差分	10	V	12	1	1	无	无	
13	Pb3	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a20	电压	差分	10	V	13	1	1	无	无	
14	Pb4	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a21	电压	差分	10	V	14	1	1	无	无	
15	U1	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a22	电压	差分	10	V	15	1	1	无	无	
16	I2	模拟	#1 NI 6289 PXI1S043	PXI1S04/a3	电压	差分	10	V	16	1	1	无	无	
17	Pst1	模拟	#2 NI 6289 PXI1S044	PXI1S04/a0	电压	差分	10	V	17	1	1	无	无	
18	Pst2	模拟	#2 NI 6289 PXI1S044	PXI1S04/a1	电压	差分	10	V	18	1	1	无	无	
19	Pst3	模拟	#2 NI 6289 PXI1S044	PXI1S04/a2	电压	差分	10	V	19	1	1	无	无	
20	Pst4	模拟	#2 NI 6289 PXI1S044	PXI1S04/a3	电压	差分	10	V	20	1	1	无	无	
21	Pst5	模拟	#2 NI 6289 PXI1S044	PXI1S04/a4	电压	差分	10	V	21	1	1	无	无	
22	Pst6	模拟	#2 NI 6289 PXI1S044	PXI1S04/a5	电压	差分	10	V	22	1	1	无	无	
23	Pst7	模拟	#2 NI 6289 PXI1S044	PXI1S04/a6	电压	差分	10	V	23	1	1	无	无	
24	Pst8	模拟	#2 NI 6289 PXI1S044	PXI1S04/a7	电压	差分	10	V	24	1	1	无	无	

图 7 通道参数配置界面

3.3.3 试验参数配置

试验参数配置针对吹风试验过程中的参数进行配置, 包括: 试验项目信息、信号标识输出排序、旧程序结果文件、试验车次信息等内容。

信号标识输出排序主要是用于将 PXI 采集板卡的通道进行手动排序, 通道的信号标识内容与板卡硬件参数配置信息保持一致。用户可以根据实际任务情况自行上下移动排序, 生成的最终数据文件顺序与排序结果一致。而“排序重置”则可重新将板卡的硬件参数配置信息进行导入, 恢复为板卡的物理通道顺序, 其设置界面如图 8 所示。



图 8 信号标识输出排序界面

试验车次信息包括: 车次号 (8 位数字)、马赫数、阶梯数、攻角序列、侧滑角序列、滚转角序列、阶梯延时 (ms)、触发方式、吹风模式等。其中触发方式包括: 手动触发、外部触发; 吹风模式包括: 走自重、扣自重。其设置界面如图 9 所示。

3.3.4 试验运行

试验运行界面如图 10 所示, 执行流程如下。

步骤 1: 状态选择

走自重/正式吹风;

步骤 2: 采集开始

启动连续采集任务, 开始采集数据, 并把当前采集数据显示到“动态数据”列表中。

步骤 3: 初读数

采集初读数, 并当前采集数据显示到“运行数据”列表中。

步骤 4: 初读数归稳

比较当前采集数据与初读数的差量, 将差量显示在颜色标记为绿色的列表里, 供岗位人员识别判断。



图 9 试验车次信息界面

步骤 5: 数据采集

程序根据吹风模式、触发类型执行不同吹风试验流程。当触发类型为手动触发时：鼠标点击运行界面的“手动触发”按钮，执行单次阶梯动作，待动作完成后重复点击“手动触发”按钮，当达到设定阶梯数后，流程执行完毕，数据自动保存，并停止采集。触发类型为自动时，则通过 PXI-6528 的 DI/DO 信号与控制系统完成阶梯交互直至流程结束。其中，系统运行状态显示所有阶梯动作（如：阶梯信息、数据存储等）。

步骤 6: 停止采集

单次吹风执行流程执行结束后，自动“停止采集”，岗位人员也可以手动干预，停止采集任务。在当前状态下点击“显示清屏”，界面恢复至初始状态。

步骤 7: 退出

点击“主界面”，退出当前吹风试验界面回到主界面。

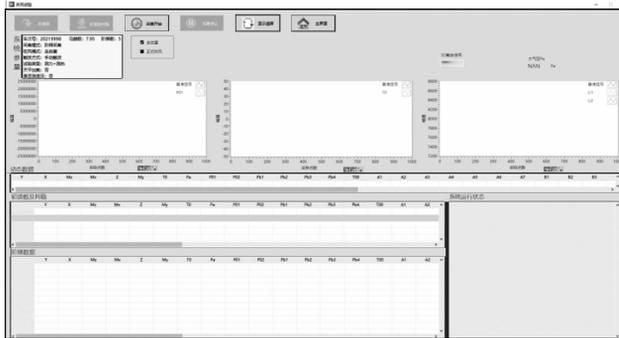


图 10 试验运行界面

3.3.5 数据处理

包括速度场计算、温度场计算和数据回放三部分。

其中，速度场计算主要包括：基础计算、绘图处理、数据整理结果、绘图分层显示以及总绘图显示五个部分。温度场计算主要包括数据处理和数据显示两部分。数据回放功能适用于连续数据，用户可以载入连续采集模式下的原始数据文件进行数据回放，并可以对比不同车次下试验数据的曲线差异情况。图 11 给出了温度场横向和纵向的数据曲线图。

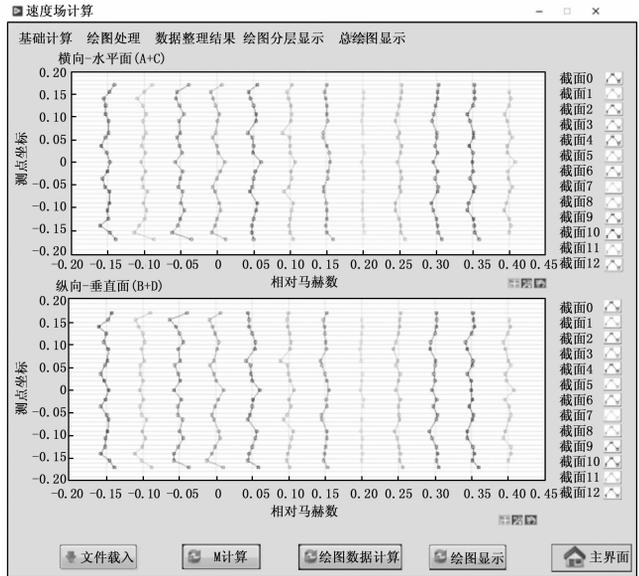


图 11 温度场数据曲线界面

4 关键技术及应用

4.1 数据文件存储设计

综合考虑高超声速风洞试验类型、试验模式和新老程序的原始数据格式等因素，试验过程数据文件分为以下几类：

- 1) 天平加载模式；
- 2) 测力（不含测底压）模式；
- 3) 测力+测底压模式；
- 4) 测压模式；
- 5) 测热模式；
- 6) 复合试验模式（测力/测热/测压任意组合）。

针对不同的模式，制定了相应的数据存储策略。测力（不含测底压）模式下，支持阶梯采集、连续采集、阶梯+连续采集和自由采集 4 种模式。而在测力+测底压模式、测压模式以及测热模式下，仅支持阶梯采集，对于不同模式下的数据文件均以不同命名方式加以区分。

4.2 测量系统抗干扰设计

放大器和数据采集设备均放置在现场，面临复杂的电磁环境和风洞运行时的抖动。在方案实施过程中，采取的主要措施有：

- 1) 信号线采用双绞屏蔽线;
- 2) 布线规范,强弱电分开;
- 3) 在机柜电源处增加滤波器,确保电源纯净;
- 4) 机柜内安装接地排,确保接地可靠;
- 5) 精密仪器和设备上架安装,并采取减振措施,确保设备在振动环境下运行稳定可靠。

4.3 数据采集信号同步处理

该风洞测量系统中涉及的信号有:

- 1) PXI-6289 采集的天平信号、压力传感器信号等;
- 2) PXI-6289 采集的攻角信号;
- 3) PXIe-4305 采集高电压信号;

信号同步策略设计如下:

- 1) PXI-6289 和 PXIe-4305 板卡采用 PXI-6289 的采样时钟为主时钟;
- 2) PXI-6289 中的电压采集任务和角度采集任务共用 PXI-6289 的采样时钟;
- 3) 采集任务保持每秒 10 次数据读取,保证数据采集硬件工作在较为稳定状态。

5 实验结果与分析

5.1 测量系统指标测试

按照《数据采集系统校准规范》要求,校准系统具有良好的屏蔽、接地,周围无任何影响数据采集系统及其校准系统性能的振动、冲击及电磁辐射等。校准源选用 JY921 多功能直流信号校准器,0.01 级最大允许误差 $\pm (0.006\% \text{ 读数} + 0.0001 \text{ V})$,分辨率 0.01 mV,满足校准要求。准备好信号输入线缆,开展信号调理系统和 PXI 数据采集系统在典型放大倍数下的线性度、误差限、增益、截距等指标测试工作。校准通道共计 48 个,放大倍数选择 1 倍、200 倍、400 倍和 500 倍。表 1 给出了 1~8 通道在不同放大倍数下的误差限。

表 1 部分通道误差限

放大倍数	1 倍/%	200 倍/%	400 倍/%	500 倍/%
通道 1	0.002 7	0.016 1	0.016 8	0.017 4
通道 2	0.023 9	0.020 1	0.019 2	0.012 4
通道 3	0.005 6	0.009 2	0.008 6	0.022 7
通道 4	0.001 5	0.002 8	0.001 7	0.004 2
通道 5	0.003 1	0.006 4	0.005 6	0.005 3
通道 6	0.005 0	0.004 9	0.005 1	0.006 3
通道 7	0.003 6	0.006 5	0.009 0	0.003 7
通道 8	0.001 0	0.017 3	0.015 7	0.004 7

测试结论:典型放大倍数下,48 路采集通道的误差限优于 0.02%,达到项目整体精度优于 0.03% 的预期指标。

5.2 测量系统干扰测试

干扰测试目的是测试新测量系统抗干扰的能力。风洞模型姿态驱动系统具有多种伺服变频电机,是一个典型的干扰源,可能会对天平弱信号产生较大的传导干扰。对此,分别在风洞模型姿态驱动系统未使能、使能、无风静态运行以及有风动态运行 4 种工况下采集、记录天平读数,通过查看天平读数变化量确定天平的工作稳定性,从而判定新的测量系统的抗干扰能力。测试天平选用六分量 5N6-20 G,供电 $U_1=6 \text{ V}$, $U_2=12 \text{ V}$,放大倍数 500 倍,接入 PXI-6289 采集卡的 1~6 通道,测试结果见表 2。

表 2 天平干扰测试结果

测试工况	未使能/mV	使能/mV	静态运行/mV	动态运行/mV
U_1	0.000 432	0.000 464	0.000 304	0.000 464
U_2	0.000 528	0.000 544	0.000 368	0.000 528
U_3	0.000 496	0.000 464	0.000 368	0.000 544
U_4	0.000 624	0.000 480	0.000 336	0.000 480
U_5	0.001 153	0.000 721	0.000 592	0.000 705
U_6	0.000 560	0.000 480	0.000 352	0.000 496

测试结论:各种测试状态下,天平读数折回到放大器前端的变化范围小于 0.003 mV,满足试验要求。

5.3 速度场测试

超声速风洞的速度场测量采用总压排架,测量风洞试验段各截面的马赫数分布^[8]。总压排架排架呈“十”字形,共计 49 个测点。试验时通过控制风洞模型姿态机构的 X 轴来实现排架在喷管出口的一 0.15~0.40 m 范围内运行,每个截面间隔 0.05 m,共计 12 个测量截面,从而测量出试验段内不同截面上的速度场特性。表 3 给出了马赫数为 5、6、7、8、9 时的均方根偏差 σ_M 的指标及结果,可以看出,测试结果满足要求。

表 3 马赫数均方根偏差 σ_M 指标及结果

马赫数	5	6	7	8	9
合格指标	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045
测试结果	0.013	0.011	0.012	0.015	0.034

5.4 温度场测试

超声速风洞的温度场测量采用总温排架,总温排架排架呈“十”字形,共计 29 个测点,测点的探头为双层屏蔽滞止型,内装 $\Phi 2 \text{ mm}$ 的 NiCr-NiSi 铠装小惯性热电偶,测量精度为 $\pm 0.75\%$ 。试验时通过控制风洞模型姿态机构的 X 轴来实现排架在喷管出口的一 0.15~0.40 m 范围内运行,每个截面间隔 0.05 m,共计 12 个测量截面,从而测量出试验段内不同截面上的温度场特性。表 4 给出了马赫数为 5、6、7、8、9 时的最大相对

偏差 $\epsilon_{T_{\max}}$ 的指标及结果,可以看出,测试结果满足要求。

表 4 温度场偏差 $\epsilon_{T_{\max}}$ 指标及结果

马赫数	5	6	7	8	9
合格指标/%	0.5	0.5	0.5	1	1
测试结果/%	0.44	0.45	0.47	0.79	0.84

5.5 标模试验

标模测力试验的主要目的是对整个风洞的流场、测量、控制与数据处理系统的综合技术性能进行考核测试,以确定风洞试验设备性能、试验数据质量是否满足规定要求。

本次标模试验采用 HB-2 (F70) 标模,采用尾支撑方式通过六分量应变天平连接在风洞模型姿态机构支臂上,当 $\alpha=0^\circ$ 时模型在风洞中的堵塞度约为 5%,满足风洞流场建立要求。试验时采用下投放方式进行,即待流场建立后,才通过风洞模型姿态机构将模型投放到试验段进行试验,零攻角时模型头部距离喷管口距离分别约为 0.02 m。表 5 给出了本期标模试验数据精度要求及结果,其中第一行为精度要求,第二行为本期测试数据。结果表明本期数据重复性良好,各马赫数的试验数据与国军标数据一致,不同期数据规律一致,量值相当,新的测量系统稳定可靠,可以投入试验运行。

表 5 高超声速风洞标模型测力精度要求及结果

马赫数	5	6	7	8	9
σ_{CN}	0.004	0.005	0.007	0.004	0.006
	0.002	0.003	0.004	0.003	0.004
σ_{CM}	0.002	0.004	0.006	0.005	0.007
	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004
σ_{CA}	0.002	0.003	0.003	0.003	0.008
	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004
σ_{XCP}	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003
	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002

6 结束语

新的测量系统配备了 48 通道的某型信号调理系统,数据采集卡升级为 18 位的 PXI-6289,实现了 48 路模拟信号输入通道、输入电压范围 ± 10 V 和 A/D 分辨率 18 位的目标,整体精度优于 0.03%;数字 I/O 通道数 32,热电偶测量通道数 64,达到批复的技术指标。开发了配套的数据采集程序和速度场/温度场数据处理程序,通过流校试验和标模试验,表明项目研制成功。

通过流场校测试验和标模测力试验验证了新的测量系统稳定性好,可靠性高,数据采集系统的精准度高,相关指标满足国军标要求,可以满足先进飞行器的测

力、测压和测热试验需要^[9-19]。

参考文献:

- [1] 施洪昌,张俊生,等.风洞测量系统设计与检定准则[S].GJB 5224-2004,2005.
- [2] 唐志共.高超声速气动力试验[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [3] 唐亮,李平,等.某跨超声速风洞测量系统[J].兵工自动化,2016,35(9):82-85.
- [4] 陈海峰,黄叙辉,等.0.6米暂冲式跨超声速风洞控制系统研制[J].自动化与仪器仪表,2021(4):35-39.
- [5] 黄昊宇,黄辉,等.基于PXI总线的 $\phi 0.5$ 米高超声速风洞测量系统研制与应用[J].计算机测量与控制,2017,25(9):21-24.
- [6] 李平,芮伟,等.2m \times 2m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.
- [7] 荣祥森,蒲泓宇,等.0.6m风洞研究性试验平台测控系统[J].兵工自动化,2017,36(9):50-54.
- [8] 林学东,胡向鹏,等.低速风洞和高速风洞流场品质要求[S].GJB1179A-2012,2012.
- [9] 陈海峰,熊波,等.0.6米跨超声速风洞安全联锁控制系统研制[J].计算机测量与控制,2019,27(8):69-73.
- [10] 秦建华,凌忠伟,等.0.6米暂冲式跨超声速风洞流场控制系统设计[J].计算机测量与控制,2017,25(11):50-54.
- [11] 吴辉,祁晓野.基于PXI和LabVIEW的通用数据采集系统设计[J].计算机测量与控制,2015,23(5):1686-1688.
- [12] 邓章林,贾霜,等.基于EtherCAT和LabVIEW的风洞安全联锁及状态监测系统设计[J].计算机测量与控制,2020,28(2):14-18.
- [13] 高延超,梁克,等.基于LabVIEW的高速多通道航天器通用测试系统设计[J].计算机测量与控制,2019,27(7):59-69.
- [14] 高川,刘烽,等.某超声速风洞测控系统[J].兵工自动化,2013,32(2):63-66.
- [15] 刘龙兵,郁文山,等.基于LabVIEW的状态监测系统在2.4m风洞的设计与实现[J].自动化与仪器仪表,2016(210):62-64.
- [16] 谭献忠,陈少松,等.基于PXI总线的风洞测控系统设计与应用[J].测控技术,2013,32(4):111-118.
- [17] 贾霜,蒲麒,等.0.5米高超声速风洞测量系统升级改造总结报告[R].CARD,2021.
- [18] 杨永能,黄颢,等.0.5米高超声速风洞2021年速度场校测[R].CARD-2,2021.
- [19] 黄颢,杨永能,等.0.5米高超声速风洞2021年标模试验报告[R].CARD-2,2021.