

doi: 10.7690/bgzdh.2024.05.001

2 m 量级高速风洞测量系统的规范化改进

曹宇晴, 蒋 鸿, 贾 佳, 石 宇, 陈星豪

(中国空气动力学研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高 2 m 量级高速风洞的试验效率和试验能力, 对测量系统进行改造与升级。采用更换信号调理器、风洞驻室电源改造、信号电缆改进、软件的通用化改进等手段, 构建规范的测压试验平台, 分析测量系统的现状和规范化改进。结果表明: 对测量系统进行改造与升级, 为推动 2 m 量级高速风洞试验向世界一流水平建设发展提供了保障。

关键词: 隔开规范化; 通用化; 交互性

中图分类号: TJ011; V211.74 **文献标志码:** A

Standardization and Improvement of Measurement System in 2 m High Speed Wind Tunnel

Cao Yuqing, Jiang Hong, Jia Jia, Shi Yu, Chen Xinghao

(High Speed Institute, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the test efficiency and capability of the 2 m high speed wind tunnel, the measurement system is reformed and upgraded. By means of replacing the signal conditioner, transforming the power supply of the wind tunnel chamber, improving the signal cable, and improving the software generalization, a standardized pressure measurement test platform was constructed, and the current situation and standardized improvement of the measurement system were analyzed. The results show that the transformation and upgrading of the measurement system provide a guarantee for promoting the development of 2 m high speed wind tunnel test to the world first-class level.

Keywords: separation normalization; generalization; interactivity

0 引言

2.4 m 跨声速风洞和 2 m 超声速风洞是我国航空航天事业的重要地面模拟试验设备之一, 这 2 座 2 m 量级生产型风洞的试验质量和试验效率, 不仅直接关系到我国重大武器装备型号的研制质量和研制节点, 也关系到 2.4 m 跨声速风洞和 2 m 超声速风洞本身地位和作用的充分发挥。作为风洞试验数据出口的风洞测量系统, 是获取精准试验数据的关键。为提高这 2 座风洞的试验数据质量和测量系统的智能化、通用化水平, 笔者一直致力于测量系统规范化建设。在前期完成测压系统规范化建设的基础上, 此次, 针对信号调理系统能力不足、现场信号线缆不规范、采集管理不完善、测量设备管理软件不通用等问题, 对测量系统软硬件进行规范化改进, 以满足型号试验对风洞的需求。

1 测量系统现状

2.4 m 风洞测量系统由 VXI 系统、70A 信号调理器、PSI8400 DTC 电子扫描阀压力测量系统和各种传感器组成。压力传感器、倾角传感器等一次仪

表的驻室供电、信号线缆通常在风洞驻室转接, 并传输到现场测量间进行数据采集。

2 m 超声速风洞测量系统由 PXI 测量系统、30 个通道的 70A 信号调理器、PSI8400 DTC 电子扫描阀压力测量系统和各种传感器组成。2 m 超声速风洞使用的压力传感器、倾角传感器等一次仪表通常可将线缆直接接在风洞现场。

2 座风洞采用的 70A 信号调理器使用年限较久, 设备老化, 抗干扰能力差。70A 信号调理器增益精度只能达到 0.02%。2 m 超声速风洞信号调理通道不足, 不能满足多天平测力试验的需求。

2.4 m 跨声速风洞传输信号距离远, 易受干扰, 且传感器等与 2 m 超声速风洞接线方式不同, 对通用的压力传感器、倾角传感器使用带来不便。

2 座风洞的数据系统不同, 软件开发平台不同, 在通道配置、传感器系数管理、加载计算或攻角校准等功能模块差异大, 造成人员操作不熟悉, 影响试验进度。

同类设备远程控制软件不通用, 造成设备使用不方便。

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-02-25

第一作者: 曹宇晴(1992—), 女, 四川人。

为使风洞试验进一步规范有序，有必要对风洞测量系统现场软硬件进一步规范，从而促进 2 座生产型风洞测量设备使用更加规范、软件平台更加通用、系统智能化水平更高。

2 测量系统规范化改进

2.1 信号调理器的升级

风洞现场离测控间 70 余米的距离使得天平小信号在传输中受到了较大干扰，降低了天平测量的精度。为获得高质量的试验数据，必须在驻室内增加一级信号调理器，对天平的输出信号进行放大滤波。2.4 m 跨声速风洞原有 70A 信号调理器增益精度只能达到 0.02%，且设备老化，抗干扰能力差。2 m 超声速风洞信号调理通道不足，不能满足多天平测力试验的需求，对 2 座风洞的信号调理通道进行统一规划，选用 PFI-28124(以下简称“PFI”)信号调理器，该调理器具有低漂移、低噪声、高精度及高动态范围共模抑制，可提供快速的过载恢复和稳定时间。具有较高线性度，满足 0.005%的标称指标。提供 2 种模式的低通滤波器：LP4F 模式和 LP4P 模式。较为复杂的大驻室中 PFI 的抗干扰能力更优。另外，利用 PFI 信号调理器滤波前后 2 级放大的独特优势，对信噪比低的倾角传感器进行滤波前 2 倍放大、滤波后 5 倍放大，获得了更准确的倾角数据。由信号调理器的供电功能，直接为温度传感器提供恒流电源，比之前使用的温度变送器模块性能更稳定；恒压供电，可为每只压力传感器提供独立的优良供电，简化传感器信号供电线路交错零乱的线路情况。PFI 诸多优点更有利于攻角传感器、温度传感器等的测量，方便实现特种试验的静/动态同步采集，以及提高故障排查效率^[1-2]。

PFI 信号调理器调试成功后，在 2 m 超声速风洞标模试验中得到验证。通过使用 PFI 信号调理器与 70A-5 信号调理器的 GBM-04 标模数据对比(图 1 和 2)，20190054 为 70A 结果，20190055 为 PFI 结果，可以看出使用 2 种信号调理器的 C_D-C_L 、 $C_L-\alpha$ 、 C_m-C_L 曲线吻合很好，精度和准度都满足先进指标要求。

2020 年 4 月，某项目大比例模型舵面铰链力矩高速风洞试验在 FL-28 风洞完成。该试验项目共使用 5 台铰链力矩天平，采集通道共计 42 个。拓展后的测力通道能力及时满足了型号试验的要求。2.4 m 跨声速风洞与 2 m 超声速风洞信号调理通道拓展建设项目已按照计划完成所有研制内容，达到设计技

术指标要求。系统在静态调试和风洞试验中，运行稳定可靠，软件功能完善，交互性好，表明系统研制取得成功，提升了 2 m 超声速风洞多天平测力试验能力，为多天平试验项目的完成提供了必要的保障。

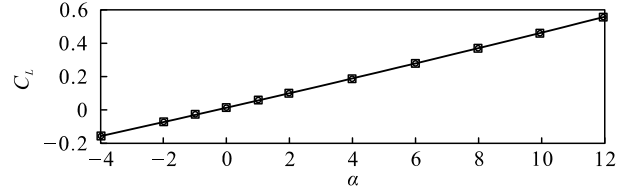


图 1 GBM-04 标模同期重复性试验 $C_L-\alpha$ 特性曲线($M=2.0$, $\beta=-3^\circ$)

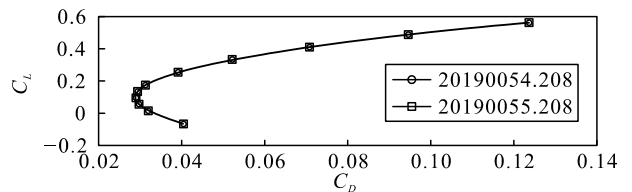


图 2 GBM-04 标模同期重复性试验 C_L-C_D 特性曲线 ($M=2.0$, $\beta=-3^\circ$)

2.2 电源电缆规范整理

2.2.1 2.4 m 风洞驻室电源改造

2.4 m 跨声速风洞现场测量间到风洞驻室的电源，仅有 3 个 220 V 的电源插头，很多试验需要在风洞驻室为测量设备提供电源，如 Initium 系统、振动传感器、需要独立供电的倾角传感器、风标传感器等，当增加设备时，通常零时串联接线板来保障设备供电。由于 2.4 m 跨声速风洞试验过程中驻室振动较大，时常出现接线板电源掉电的情况，造成试验车次报废。为此，利用驻室内试验段更换装置的空间，如图 3 所示，设计加工了电源箱接电，增强电源供电的可靠性，大大降低了接线板使用带来的隐患。

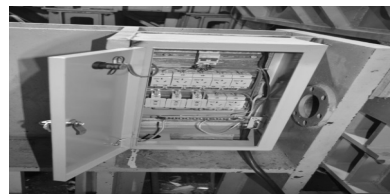


图 3 驻室电源箱

2.2.2 信号转接盒设计

由于 2.4 m 跨声速风洞测量系统使用的传感器较多，传感器供电和信号电缆分布比较复杂，不方便操作管理，并且由于试验段的经常更换，使得传感器电缆的使用需要满足拆装方便的要求。笔者设计如图 4 所示的专门信号转接盒，集供电和信号中

转为一体，操作人员只需通过接插件就可以快速完成连通或是断开设备的任务。同时，电源集中放置在 204 房间内实现远程供电，减少了驻室内设备的数量，简化了线路的复杂程度。操作人员仅需按照标号完成对应接头的连接，即可完成线路的配置，提高了试验准备的效率，减小了人为操作失误的可能性。

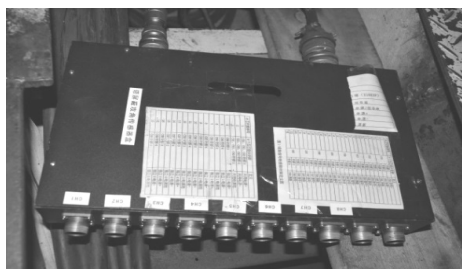


图 4 信号转接盒

2.2.3 信号电缆的改进

PSCB 扫描模块电缆，连接 SDI 和测压模块，最大长度为 30 ft(约 9 m)，该电缆传送模拟信号，所以越短越好。在使用上模块内置放置容易导致模块电缆损耗。电缆从国外公司进口，购买渠道价格高。笔者采用原 PSCB 扫描模块电缆标准设计定制了国产电缆，价格仅为国外电缆价格的 1/3，与 PSCB 扫描模块电缆完全匹配。针对原电缆的不足做了改进：连接器的规范、针脚定义的规范；线缆与连接器处的尾部保护处理；线缆与连接器处固定螺钉的优化；电缆标签外加热缩管使编号不易脱落；电缆最大长度为 25 m 便于应对各种试验要求。

2.3 软件的通用化改进

2.3.1 数据采集辅助工具软件开发

整合资源，优化软件功能，目的就是要使现有功能更加完善，使之达到整体最优。整合后，2.4 m 跨声速风洞和 2 m 超声速风洞的数据采集软件实现统一，如表 1 所示。通过软件功能的有效整合，为通用的试验平台带来了以下实效：

1) 实现了试验能力的快速无缝衔接。同一模型在这 2 座风洞交替进行的试验，只需导入通道配置，就能实现试验快速无缝衔接。

2) 实现了装备的高效利用。设备资源整合后，实现了 2 座风洞的采集程序完全兼容。

3) 实现了功能更加完善的试验平台操作软件。通过将 2 座风洞原 VXI 和 PXI 操作软件进行整合，吸收 2 座风洞原功能上的优点，形成统一的兼容 2 座风洞的操作软件。

表 1 整合性能比较

整合	分类	性能
整合前	2.4 m 跨声速风洞	支持 1 台天平公式管理
		手动录入信号调理器系数
	2.0 m 超声速风洞	支持倾角传感器校准
		支持导入通道配置
整合后	数据采集辅助工具	信号调理器通道手动逐个添加
		支持 1 台天平公式管理
		手动录入信号调理器系数
		不支持倾角传感器校准
整合后	数据采集辅助工具	不支持导入通道配置
		信号调理器通道手动逐个添加
		支持 20 台天平公式管理
		读取通道信号调理器系数库自动录入
整合后	数据采集辅助工具	支持倾角传感器校准
		支持导入通道配置
整合后	数据采集辅助工具	信号调理器校准通道批量生成

2.3.2 压力控制软件通用

原有压力控制软件不能同时兼容 2 台不同型号 Ruska 7250xi 和 Fluke 6270a 数字压力控制器。为此，根据现有 2 台数字压力控制器编写出了能同时兼容的压力控制软件。如图 5 所示，基于 WPF 的数字压力控制器监控软件能够同时兼容 Fluke 6270a 和 Ruska 7250xi，并且新增了校准模式，根据压力控制方式(压差、绝对)，输入多个压力校准值，能够按照预先设置的压力值按序控制压力到目标压力值，并按预先设置的稳定时间，延迟稳定一段时间，直至所有压力阶梯值控制完成^[3-5]。



图 5 基于 WPF 的数字压力控制器监控软件

3 应用效果

目前，已顺利完成了 10 余项模型的跨风洞试验，取得了显著效果：

1) 大幅提升了试验的运行效率。以前更换放大器通道倍数，需要到风洞现场手动调倍数，容易出现差错。现在只需使用 PFI 软件更改倍数，还可批量更改。

2) 提高了测压试验能力。PSCB 扫描模块电缆加长后，能够完全满足各种测压试验的要求。