

doi: 10.7690/bgzdh.2024.04.010

2 m 量级高速风洞测量系统常见故障及分析

曹宇晴, 赵莉, 贾佳, 乔至远, 覃源远

(中国空气动力学研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为助力解决风洞试验中的疑难问题, 对风洞试验中测量系统常见故障整理汇总进行分析。通过对 2 m 量级高速风洞试验中记录的常见故障汇总分析, 整理出故障类型及其处理方式, 使风洞试验中出现故障时能快速通过该分析报告找到问题所在并解决故障。在 2 m 量级高速风洞试验中的应用表明: 该方法能实现常见故障出现后快速查找问题关键的可行性, 为风洞试验安全及试验效率提供有力支撑。

关键词: 风洞试验; 测量系统; 常见故障; 故障分析

中图分类号: TJ011; V211.74 **文献标志码:** A

Common Faults and Analysis of Measuring System in 2 m High Speed Wind Tunnel

Cao Yuqing, Zhao Li, Jia Jia, Qiao Zhiyuan, Qin Yuanyuan

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

Abstract: In order to solve the difficult problems in the wind tunnel test, the common faults of the measurement system in the wind tunnel test are summarized and analyzed. By collecting and analyzing the common faults recorded in the 2-meter high speed wind tunnel test, the fault types and their treatment methods are sorted out, so that the problems can be found and solved quickly through the analysis report when the faults occur in the wind tunnel test. The application in 2 m high speed wind tunnel test shows that the method realizes the feasibility of quickly finding the key problems after the common faults occur, and provides a strong support for the safety and efficiency of wind tunnel test.

Keywords: wind tunnel test; measurement system; common fault; fault analysis

0 引言

作为跨超声速风洞体系中最为重要的组成部分, 由 2.4 m 跨声速风洞和 2 m 超声速风洞构成的 2 m 量级高速风洞承担了一系列重大型号项目研制和配套课题研究的风洞试验任务。近年来, 随着国家各类重点航空器研制任务的相继启动, 以及对飞行器性能指标要求的不断攀升, 2 m 量级高速风洞试验呈现出时间紧、任务重、试验方式复杂特殊、个性化需求多和数据精准度要求高等特点^[1-3]。为满足这些多样化、高标准的试验需求, 2 m 量级高速风洞测处系统开展了长期持续性的升级改造工作, 通过大量新设备、新技术、新方法的广泛应用, 风洞的试验能力继续拓展、试验技术不断完善、试验任务逐年增加, 已成为我国先进飞行器研制不可或缺的主力高速风洞。这些新系统的引入, 在提升风洞测处系统性能的同时, 也增加了风洞试验过程中故障发生的几率和环节, 有必要对历史故障进行系统全面的分析与总结, 为 2 m 量级高速风洞接轨世界一流, 实现风洞试验的高效安全运行提供有力

支撑。

1 测量系统构成

2 m 量级高速风洞测处系统是整个测处系统的核心, 主要由 VXI/PXI 数据采集(测力)、电子扫描阀压力测量(测压)、数据处理分析、风洞运行实时显示、VMD 视频测量、模型振动测试系统等子系统构成。其中 VXI/PXI 数据采集系统、电子扫描阀压力测量系统负责完成风洞流场、模型气动力和力矩、模型表面压力等参数的采集, 并与其他辅助测量系统进行通信, 以实现多系统的协调同步运行; 数据处理分析系统负责采样数据的数字滤波、信号同步等预处理, 并根据风洞试验数据处理规范及型号项目需求, 完成原始电压值到物理量的转换, 实现对数据的简单分析^[4-5]。

VXI/PXI 数据采集系统包含的主要设备有天平、前置信号调理器、各类传感器(压力、温度、角度、位移等)。其主要工作方式: 天平、传感器等一次仪表采集到的信号通过前置信号调理器进行信

收稿日期: 2023-12-17; 修回日期: 2024-01-15

第一作者: 曹宇晴(1992—), 女, 四川人。

号放大、滤波等处理后进入 PXI/VXI 主机，再经其配置的信号调理单元进行信号的二次滤波处理；然后，再经 A/D 转换，将模拟信号转换为数字信号，提供给数据处理分析系统进一步处理。

电子扫描阀压力测量系统又分为 PSI8400 DTC 系统和 DTC INITIUM 系统 2 种。其中 PSI8400 主要由测量主机、系统处理器(system processor, SP)、远程处理器(remote processor, RP)、光纤接口单元(fiber interface unit, FIU)、扫描数字接口(scan digital interface, SDI)、压力校准单元(pressure calibration unit, PCU)、8491 远程供电设备和测压模块(ESP-64HD DTC)等组成。与其相比，DTC INITIUM 系统则具有系统简化、使用方便、可实现数据的连续采集等特点，与 PSI8400 DTC 系统互有长短，相互补充。

2 常见故障及其分析

2.1 一次仪表损坏、线缆气路故障

作为试验中不可或缺的组成部分，试验中常用的一次仪表主要有天平、各类传感器及线缆气路、VMD 采集设备、测压模块等。其中，天平用于测量试验中作用在模型上的气动力与力矩；各类传感器及气路则用于采集风洞实时总压、静压，模型角度，震动情况等；VMD 采集设备用于采集模型运行实时角度及模型的变形量等；测压模块则用于采集模型实时压力值。

试验过程各类一次仪表在强震动环境下，或因碰撞、线缆气路损坏及多种偶发因素造成故障，最直观的判断依据为采数异常，典型实例如下：

1) 某飞行器测力试验中，模型在运行过程突发抖动天平 X 元超载 300%，紧急关车后检查发现由于模型抖动剧烈导致天平与模型碰撞， X 元焊点脱落，重新焊接后恢复正常。

2) 某飞行器全机测压试验时，前期试验准备校准及加压检查正常，吹风试验时其中一个测压模块没有采值，打开模型盖板后发现模块 RREF 运行参考端气路被压，重新更换软管后恢复正常。

3) 某飞行器 VMD 视频测量试验中，由于是增压试验，总压较高，相机安装处迎风面有一个透风孔，相机线缆被吹松动，导致采集过程中相机卡顿，某些角度未采集到数据；找到故障原因后，设计了一块挡风板安装在相机迎风面挡住来流风，降低了高压对相机造成的影响，试验恢复正常。

由此可见，通常一次仪表出现问题最直观的判

断方式为观察采集系统采值是否正常。对于突发性采值异常时，常使用排除法，从线缆气路直至天平及各类传感器依次排查故障始因并解决故障，试验前因做到在首次风前对一次仪表及线缆气路进行系统地排查，将故障发生的可能性降至最低。

2.2 二次处理系统性能不稳定及多系统匹配问题

风洞试验中二次处理系统主要是采集设备，如 VXI/PXI 采集设备、PSI8400 测压系统、DTC Initium 测压系统等，在试验过程中系统或多或少会由于软件 BUG、硬件问题及多系统兼容性问题引起故障现象。

通常软件 BUG 等问题引起的故障会直观地显现在采集时，且时隐时现，并不固定出现，所以解决这些系统不稳定问题可以提高吹风成功率，对试验进度及完成度都能提供有力支撑。

2.3 外部因素干扰、软件鲁棒性及兼容性有待完善

外部因素的干扰在试验中也有着较大影响，虽然所使用的电缆线都有屏蔽层，但当遇到有较强电流的电机距离线缆太近，就会对数据采集造成影响。如 2 m 超进气道试验时，电机通电后，模块的零飘会相应增大很多，加上隔离变压器后，测值会有明显好转。

某些特种试验时，测量系统与控制系统分别与外部系统联机。由于 2 套系统暂时无法实现联机，导致测量监控无法实施检测试验流场数据，且 VXI 采集结果也需要手动生成原始文件，对试验造成一定影响。

可见，排除外部干扰因素，提高软件兼容性及鲁棒性在试验中是必不可少的一环。

2.4 人为因素等其他原因

人为因素等其他原因引起的故障主要体现在试验前期准备期间，因试验人员经验不足或疏忽导致的系统故障或软件故障，如试验准备不充分、未做加压检查导致底压传感器无测值、吹风试验时误触鼠标键盘等情况，但是经过系统地培训以及参试人员对试验流程越来越熟练，基本不会出现人为因素引起的故障现象。可通过更加精细化的系统培训，对软件及系统的升级来达到完全避免人为因素引起的故障。

3 故障排查的一般方法

风洞试验作为一项复杂化工程应用的实例，故

障问题多种多样、千差万别。正确分析问题现象，合理运用检查手段，才能使故障的排查起到事半功倍的效果。

1) 经验查询法。

2 m 量级高速风洞经过数十年的风洞运行，获取了大量的风洞运行数据，也积累了丰富的故障排查经验。通过建立全面的故障数据库，并辅以强大的检索分析平台，不仅可以快速定位故障，探求最佳解决途径；同时，也有利于故障频发点的定位与预测，为故障的提前预判提供帮助。

2) 最小系统法。

风洞测处系统不仅自身包含了多个子系统，有时还需与控制、监测、CTS 等特种试验系统之类的多个外部系统交互；因此，在出现问题时，应尽可能使出现问题的系统最小化，首先排除系统间和外围因素的干扰，再在最小系统内使用二分法逐段开展故障排查，尽快找到问题所在并加以解决。

3) 替换排查法。

替换排查是风洞试验中使用最为普遍的故障排查方式。特别是在怀疑通道、线缆等存在问题时，可以尝试将相邻的确认没有问题的通道、线缆与之交换，通过对替换前后采样数据的比较分析，对所替换部件的工作状态作出准确判定。

4) 模拟测试法。

大型暂冲式高速风洞冲击载荷大、运行时间短的特点，使得一些故障表现为条件性、偶发性出现。如风洞静态调试时系统一切正常，但正式吹风时，甚至在某些特定马赫数条件下，问题才会暴露。而生产型风洞不允许反复动态调试的性质，更使得这类故障的排查变得极为复杂棘手。只有在初步预判问题的基础上，使用多种手段对吹风时的攻角运行情况、模型振动情况、电磁干扰情况进行场景模拟和复现，才能最大化暴露问题。

4 提升故障排查效率的一些探索

为尽量降低故障出现的概率，快速定位问题，除需加强经验归纳总结，做好试验设备的日常维护保养，确保设备的无故障运行；试验前反复检查确认状态，防止出现人为失误导致的错误；提升操作人员业务水平，增强其发现问题、解决问题的能力等常规手段外，还从以下方面进行了探索。

1) 突出各自特点，做好试验及准备工作。

近年来，2 m 量级高速风洞试验小型化、复杂

化、新型化的特点日益明显，非常规试验的常态化运行和各类新系统的不断加入，使得测处岗位人员的职责范围不断扩展，再加上长期单人单岗的运行模式，使得操作人员在林林总总的系统面前，往往显得应接不暇。针对岗位特点提出了“专家型准备，傻瓜型吹风”的设想，强调试验前的精细化准备，力求做到将问题解决在萌芽状态；强调试验中的单线程操作和规范化处理，减少因环节众多和人员疲劳造成的人为疏漏。

2) 加强比对分析，做好事前预测。

随着试验领域的不断拓展和性能要求的持续攀升，2 m 量级高速风洞测处系统的提升式改造始终没有间断过，大量新型测试技术的加入既是一种机遇也是一种挑战。在这些新设备投入使用前，应做好其与原有系统的兼容性测试、指标对比分析等工作，才能在充分发挥新设备、新技术先进性能的同时，实现新旧系统的无缝更换和平稳过渡。

3) 发掘设备潜能，拓展排查手段。

目前，新一代测试设备在努力提升设备主要性能指标的同时，也注重相关辅助功能的完善与集成。例如，2 m 量级高速风洞更新后的高端信号调理产品，不仅具有稳定、可靠、优质的信号调理能力，还配备了传感器健康监测功能，可以在系统运行过程中实时监测传感器的回路电阻、短路/断路、激励电流、泄露电阻等指标。如何充分发挥好这些设备的新功能，应成为下一步快速便捷定位故障的一个发展方向。

4) 借助多种手段，提升自动化水平。

在加强人员培训的同时，提升测处系统的智能化、自动化水平，同样可以明显降低故障出现的几率。例如，目前 2 m 量级高速风洞的 VMD 视频测量系统、VXI 双工采集系统、模型振动测量系统等，都做到了无人值守，仅需在试验前设置好采集通道、采样频率等少量参数，就可在吹风试验时自动完成与测量主机的联机、待测数据的采集、数据的存盘等操作，在降低人员劳动强度、提升试验效率的同时，减少了风洞试验过程中人为干预的环节，提高了系统可靠性。

5) 创新思维模式，增强故障排查能力。

故障排查离不开人的创造性运用，只有摒弃过去简单的拼凑型使用的思维模式，才能产生 1+1>2 的效果。例如，过去的风洞阶梯运行模式是在模型到位并稳定后，测量系统采集一定区间的数据，如

此反复,完成所有阶梯的采集。这样得到的只是零散的数据片段,在出现问题时很难还原事件的全貌。笔者提出了“系统连续采集,阶梯点标注”的数据采集模式,使得吹风过程的整个信息链变得完整,故障排查更为直观准确。

5 结束语

风洞试验是一项复杂的系统性工程,故障排查涉及的点多面广,故障问题多种多样、千差万别。正确分析问题现象,合理运用检查手段,才能使故障的排查起到事半功倍的效果。通过对 2 m 量级高速风洞试验中记录的常见故障汇总分析,提出几种排查问题方法,提升了故障排查效率,为尽量降低

(上接第 18 页)

图 10 中,ADRC 和 WNN-ADRC 都可较为准确地跟踪输入信号,局部放大图中显示 WNN-ADRC 的跟踪精度更高。图 11 中, e_1 为 WNN-ADRC 误差曲线, e_2 为 ADRC 误差曲线。系统稳定后 ADRC 的误差曲线峰值为 2.83° ;而 WNN-ADRC 误差曲线峰值仅为 0.78° 。仿真结果表明,WNN-ADRC 的跟踪精度更高,动态性能更好。

5 结论

为解决火箭炮交流伺服系统中的非线性问题,笔者在传统 ADRC 的基础上,将小波神经网络可以任意逼近各种函数的思想引入其中,用于在线整定 ADRC 中扩张状态观测器的参数,设计出 WNN-ADRC。通过 WNN-ADRC 与 ADRC 控制火箭炮伺服系统的对比仿真试验来验证其控制效果。最终仿真结果表明:用 WNN 在线整定 ADRC 可提高其响应速度、跟踪精度和鲁棒性等性能,为火箭炮伺服系统改善控制效果提供了一种可行方案。

参考文献:

- [1] 胡小林. 永磁同步电机控制器参数自整定技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [2] LYU M P, GAO S Y, WEI Y J, et al. Model-Free Parallel Predictive Torque Control Based on Ultra-Local Model of Permanent Magnet Synchronous Machine[J]. Actuators,

故障出现的概率提供帮助。

参考文献:

- [1] 贺德馨. 近代空气动力学丛书风动天平[M]. 北京:国防工业出版社,2001:63-70.
- [2] 易国庆,史玉杰,米鹏. 风洞常规天平结构设计优化方法及支持平台[J]. 兵工自动化,2019,38(11):44-50.
- [3] 张鹏,谢艳,苏宁. 基于 Matlab 的风洞信号延迟时间计算方法[J]. 兵工自动化,2014,33(6):74-77.
- [4] 张鹏,杨兴锐,陈龙. 基于概率神经网络的风洞设备故障预测诊断方法[J]. 兵工自动化,2015,34(10):72-75.
- [5] 成垒,段丕轩,康洪铭,等. 一种风洞天平信号电磁干扰补偿方法[J]. 兵工自动化,2021,40(3):32-35.
- [6] 2022,11(2):31.
- [7] GAO Q, HOU Y L, LU B C, et al. Passivity-Based Control for Rocket Launcher Position Servo System Based on ADRC Optimized by IPSO-BP Algorithm[J]. Shock and Vibration,2018(4):1-14.
- [8] 李寅生. 基于优化 ADRC 的高性能永磁同步电机控制系统的研究[D]. 荆州:长江大学,2021.
- [9] 唐冲,童仲志,侯远龙. 火箭炮位置伺服系统的神经网络自抗扰控制[J]. 电气自动化,2020,42(4):115-118.
- [10] 李磊,任元,陈晓岑,等. 基于 ADRC 和 RBF 神经网络的 MSCSG 控制系统设计[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(10):1966-1972.
- [11] 侯润民. 某舰载火箭炮交流伺服系统控制策略研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [12] 杜雪. 小波神经网络研究及其在 PID 控制器参数整定中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- [13] 王攀伟. 基于 ITAE 的某舰载火箭炮随动系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2021.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008:20-25.
- [15] 于开平,邹经湘,杨炳渊. 小波函数的性质及其应用研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2000(2):36-39.
- [16] 赵林峰,徐磊,陈无畏. 基于自抗扰控制的自动泊车路径跟踪[J]. 中国机械工程,2017,28(8):966-973.
- [17] 崔海龙,王磊,张雷. 基于改进的 BP 神经网络 PID 控制器[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊),2015(6):191-192.