

# 基于 VITE 的风洞测量系统自动检测诊断平台

范金磊<sup>1</sup>, 邓晓曼<sup>1</sup>, 蔺元臣<sup>2</sup>, 贾霜<sup>1</sup>, 宋元<sup>2</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

**摘要:** 基于对高速风洞测量系统现状的分析和风洞试验现场对测量设备性能状态进行检测的需求, 在改进测量系统可测性、检测方法规范化、检测数据信息化等方面进行重点设计, 采用基于自动测试系统 (ATS) 的系统框架和虚拟仪器测试环境 (VITE), 以国家军用标准为依据开发了诊断和测试程序集, 建立了“测试/诊断/管理一体化”的通用平台; 系统在高速风洞中成功应用, 满足了风洞测量设备原位检测和在线状态监测的需求, 为试验前测量设备性能确认、试验期间设备状态监测、以及各项性能指标的定期检测与长期跟踪分析提供了自动化手段, 提升了风洞测量系统健康管理的水平。

**关键词:** 风洞; 数据采集; 可测性; 性能评估; 自动测试系统

## Auto Test and Diagnosis Platform for Wind Tunnel Measurement System Based on VITE

Fan Jinlei<sup>1</sup>, Deng Xiaoman<sup>1</sup>, Man Yuanchen<sup>2</sup>, Jia Shuang<sup>1</sup>, Song Yuan<sup>2</sup>

(1. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China

2. Aerospace Measurement and Control Corporation, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Analyzed the situation and testing requirement of the measurement system of high speed wind tunnels, focused on improving the system testability, standardization of testing methods and information management of test data, established a general test and diagnosis system based on auto test system (ATS) architecture and virtual instrument test environment (VITE). The general platform meets the requirement of in-situ automatic inspections and status monitoring and provides the automated means for accuracy verification before the wind tunnel test and status monitoring during the wind tunnel test, also provides functionality for periodic and long-term tracking of performance.

**Keywords:** wind tunnel; data acquisition; testability; performance evaluation; auto test system

## 0 引言

风洞测量系统主要是指进行风洞常规试验的基本测试系统, 是获取高精度试验数据的核心系统之一, 主要包括传感器、数据采集及其前端信号调理设备、信号线缆与转接插件、测量计算机和配套电源等。风洞测量系统的精度、测试规模、运行效率及长期稳定性等直接影响着风洞试验的质量与效率。以往在风洞试验现场缺乏对测量系统进行检测与性能评估、跟踪的自动化测试手段, 只进行年度校准测试或风洞试验结果出现问题时, 临时搭建系统进行检测来配合问题排查, 并依靠人工经验判读分析数据。这种方式难以实时监测设备状态, 风洞试验数据质量存在风险, 其性能检测的时效性、完整性以及在规范化、自动化等方面都难以满足日益提高的试验精细化要求, 与国外同类试验机构水平有较大差距。

国外风洞试验相关机构注重先进的自动测试技术在风洞测控系统的应用, 如法国 ONERA S2 风洞在测量系统中集成了基于 RS232、GPIB、USB、LAN 等总线的多类自动

测试仪器, 实现对系统中各类设备状态性能的自动检测、监测与告警; 美国 NASA Glenn 研究中心 SPF 试验设施中利用全远程管理组件、采用模块化架构设计建立了一个大规模、分布式的高速数据采集系统, 可满足多种试验设施的不同类型的测量与组合需求, 同时进行了系统可测性设计, 实现现场测量系统分析、可溯源校准、测量不确定度与数据质量报告<sup>[1-3]</sup>。

虚拟仪器测试环境 (Virtual Instrument Test Environment, VITE) 是北京航天测控技术有限公司针对产品全寿命周期测试保障过程推出的一套符合 ATML 标准的图形化集成开发平台, 主要用于复杂系统研制或维修过程中测试程序的自动生成, 具有被测对象建模、系统资源开发、用户界面定制、测试程序生成、测试执行服务、综合数据分析、专家知识生成、系统故障分析、维修信息管理等功能。基于该平台, 测试人员只需根据被测对象的测试需求, 在图形化开发接口上填写测试流程要素, 系统将根据要素自动生成测试任务的执行脚本, 无需编程。平台基于开放的软总线体系架构, 便于用户进行二次开发, 具有很高的扩展能力<sup>[4-5]</sup>。

通过借鉴和应用自动测试技术的思想和设备健康管理理念, 针对高速风洞测量系统检测需求, 基于 VITE 框架完成了通用规范的风洞常规试验测量系统一体化测试与诊断

收稿日期: 2017-12-08; 修回日期: 2018-01-08。

**作者简介:** 范金磊 (1983-), 男, 河南淮阳人, 中国空气动力研究与发展中心高速所工程师, 主要从事风洞测量、图像和信号处理方向的研究。

平台的设计与开发,并在高速风洞中得到成功应用<sup>[6-7]</sup>。

## 1 高速风洞测量系统检测需求

高速风洞测量系统原始输入信号幅值小、传输距离长、涉及环节多,使得测量结果的精准度与稳定性常常受到其他因素如传输线缆、接插头、电源、测控设备电磁干扰等的影响。对测量设备的年度检定不能全面体现和评价全年试验期间的真实情况,存在较大的局限性。对各风洞临时搭接系统进行检测的方式则存在如下问题:

- (1) 手动搭接临时校测通路,带来随机误差;
- (2) 校测周期长,不能及时发现问题;
- (3) 自动化程度低,人员劳动强度大;
- (4) 不能实时监测,难以主动发现异常;
- (5) 测试方法不规范,影响测试结果准确性。

因此,建立适用于风洞现场的自动化检测系统,实现对其关键设备的原位校准、试验前后设备状态快速检查与确认,可有效保障试验数据质量安全;通过对测量系统工作状态的准确评估、长期监测和跟踪分析,可以科学指导测量系统设备的维护保养,降低维护成本。

## 2 系统总体设计

### 2.1 设计的目标与原则

总目标是优化测量系统现场测试与检测工作的流程和方法,建立通用化、自动化测试平台,满足各主力风洞测量系统现场检测、故障分析和在线状态监测的需要;建立测量系统性能评价的指标体系,依托科研试验网络实现对各风洞测量设备与系统性能指标与检测数据的信息化管理,满足开展风洞测量系统分析的初步需要。主要检测项目包括<sup>[8-9]</sup>。

- (1) 系统级测试:重复性、再现性、准确度、稳定性;
- (2) 设备校测:系统增益、线性度、误差限;
- (3) 设备级性能:信号线缆导通特性、时间漂移、采集速率、通道间串扰、通气性测试、泄漏测试、稳压延时测试等;

系统设计遵循通用、可靠、高效、开放、安全原则:

- (1) 适应各风洞测量系统构成、操作模式,采用成熟技术设备,检测方法遵循国军标或行业标准;
- (2) 抗干扰设计,确保系统稳定可靠、不对风洞测量系统造成干扰,实现同步运行、互不干涉;
- (3) 系统组装方便、满足移动、运输、快速部署的使用要求;
- (4) 操作方便,执行流程自动化,运行高效;
- (5) 硬、软件设计为后续新增仪器设备预留扩展接口,并充分考虑人员和精密仪器的安全防护。

### 2.2 系统总体架构

系统总体架构如图 1。采用“通用测试资源”+“专用适配接口”的方式。通用测试资源提供各风洞测量系统检测所需的标准源、供电激励、指令信号、开关控制等资源,完成信号程控交互;专用适配接口实现通用资源向被测对象的物理通道映射,形成特定测试通路,从而使通用检测

平台可以覆盖各风洞测量系统检测的需求。

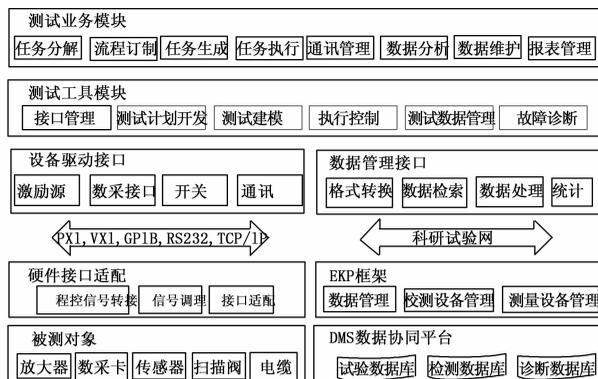


图 1 测量系统现场校测与诊断通用平台架构

(1) 硬件接口层,连接被测对象与测试层的各种测试资源,确保自动测试过程的顺利完成;进行必要的信号调理,如对被测对象的信号进行隔离、衰减、安全保护,对于差异较大的接口进行转换适配;

(2) 设备驱动层,对检测和被测设备的驱动进行封装,为上层模块控制设备提供通用的接口;

(3) 测试工具层,基于 VITE 平台,结合采用的硬件设备和驱动接口,针对测量系统的校测、诊断需求,形成完善的基础工具模块;

(4) 业务层,测试人员编辑开发特定的测试任务,协调使用接口层、测试层、工具层的全部资源,执行测试;对测试数据和测试报表进行分析。

### 2.3 系统硬件构成与工作模式

本系统包括测力和测压两个大的校测平台。测力平台的硬件设备主要包括校测主控单元、智能 PXI 平板、信号转接适配器、测量接口适配器、电缆测试适配器、信号调理组合等,其组成原理见图 2 (a);测压平台包括工控机、真空泵和压力控制器,见图 2 (b)。

针对每年年检、日常检测或换班检查等不同的测试与诊断需求,设计多种工作模式,并选择相应标准化接口的适配器连接,增加使用的灵活性、适应性和可靠性。测力平台通过在各风洞原有测量通路(天平—前置信号调理器—数据采集系统)上增加转接电缆、程控信号转接适配器、测量接口适配器,可将标准参考信号自动切换到信号调理器前端,将调理后信号自动切换到独立测试设备,校测主控单元与原有试验数据采集系统网络互连,实现多种在线、离线测试通路,完成通道电缆、放大器、数采通道等的校测、性能检查,见图 2 (c)~图 2 (f)。

### 2.4 系统软件

软件平台在系统的分层架构下,建立从仪器、驱动控制、测试程序(Test Program, TP)开发、测试任务管理、数据处理分析与诊断为一体的通用“测试/诊断/数据管理一体化”的软件框架。系统主界面如图 3 所示。

针对被测对象特性,以国军标的检测方法为依据,建立设备性能指标参数的测试 TP,按实际需求,组合形成多

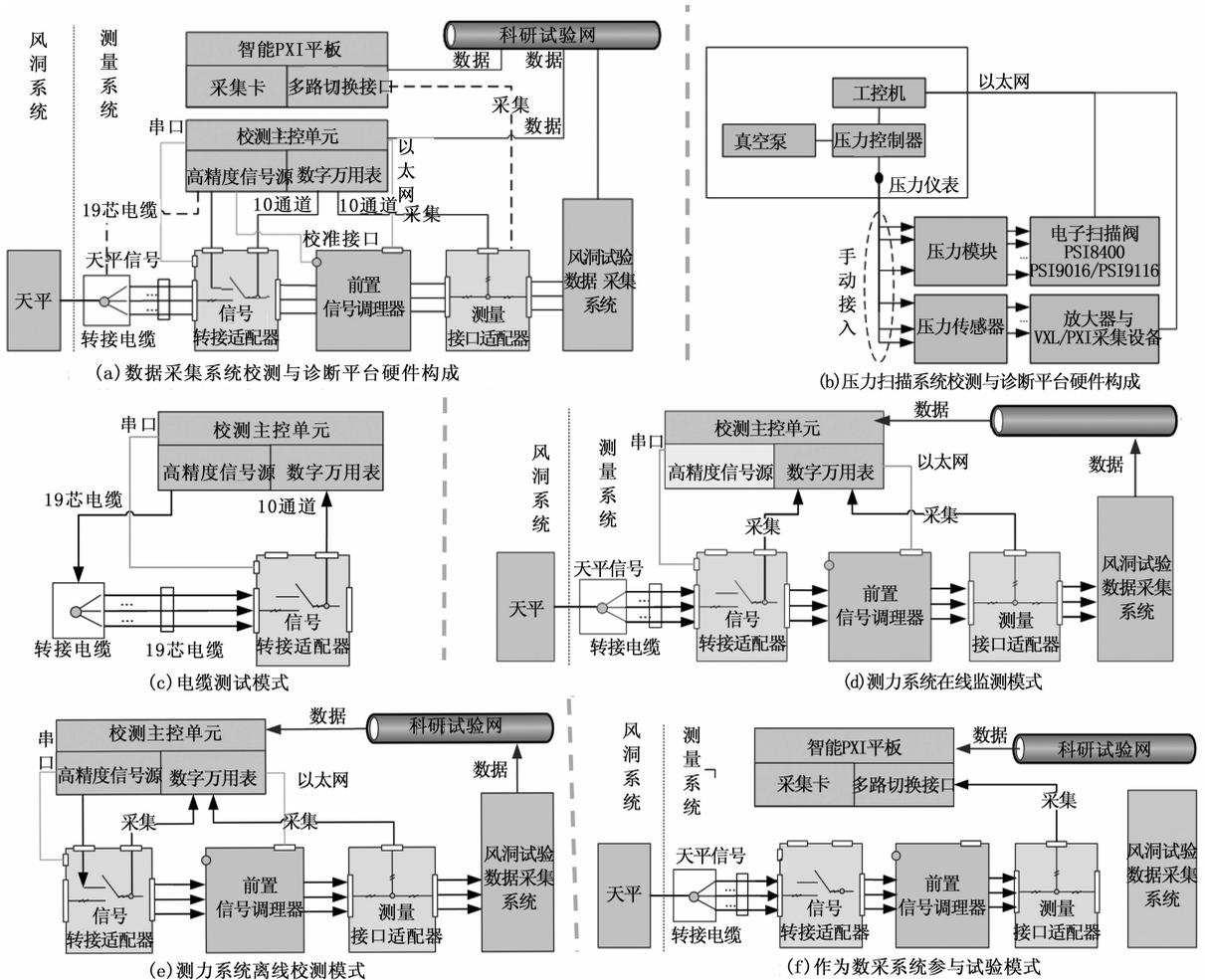


图 2 测量系统校测与诊断通用平台硬件组成与应用模式示意图



图 3 高速风洞测量系统现场检测诊断软件界面

种测试任务；提供多种实用化工具和数据处理工具，可实现全部数据测试处理分析，形成检测结论，查询对比历史数据，跟踪观察设备性能变化情况。

软件开发环境与工具包括：Visual Studio (C++)，VITE3.0 和 SQL Sever。

### 3 关键环节与解决方案

风洞测量系统的自动检测既包含对测量系统设备的校准，也包含对测量过程的监测和确认，是与风洞试验系统融为一体的，因此需要建立在对现场测量系统原位校准、在线监测和状态即时分析的基础上，同时检测过程要相对独立，不能对试验测量产生干扰或引入新的误差源，满足

稳定、规范、高效、可靠的设计原则，为此，检测平台的设计研制必须解决以下关键问题。

#### 3.1 测量系统的可测性改进

测量系统可测性设计是指传感器及测量仪器在安装位置上的可测量校准性<sup>[3]</sup>，风洞原有的测量系统在设计研制时一般以满足试验基本测试需求为目的，未考虑其现场原位的自动化校准问题，缺乏系统整体的可测性设计。因此，即使有了标准激励源，受仪器设备安装位置、空间、现场布线、工况要求等限制，很难实现信号的自动加载，更无法实现全自动化校准。在本项目检测平台设计中，首先要对原测量系统进行可测性改进，满足自动化的原位校准和在线监测的需要，主要包括：

(1) 风洞测量接口规范化改造。

制定相关规范并实施现场改造，统一各主力风洞测量系统信号输入线缆、转接接口与连接方式，形成标准规范的接口形式，便于风洞间设备共享、互换及外部测试资源接入。

(2) 通用接口适配器设计。

适配器的主要作用为快速建立信号通路、测试通路，使测量系统具备过程监控能力。程控信号转接适配器和测量接口适配器，实现了检测通道的自动切换、激励信号的

自动加载与测试; 电缆测试适配器, 可对多种型号电缆的导通及线序检测确认。适配器接口遵循风洞测量系统接口规范, 可在各风洞通用。

### (3) 微弱信号自动切换控制的抗干扰设计。

风洞试验过程中, 天平输出的信号非常微弱, 部分为微伏量级。如何确保信号经适配器切换后不失真、无干扰是研制的难点之一, 采用的解决方法是:

1) 控制板设计采用低热继电器切换微弱信号, 避免常规继电器自身发热对信号的干扰。选用德国 MEDER BT05-2A66 型继电器, 在满负载周期下最大只有  $1 \mu\text{V}$  热电压, 满足需求。利用 FPGA 芯片、MAX232 芯片等设计程控切换模块 (如图 4 所示), 控制继电器动作, 性能稳定、电磁兼容性好。

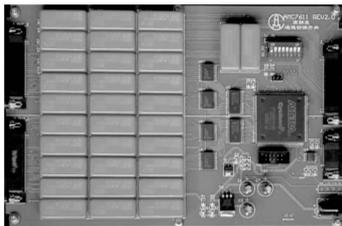


图 4 微弱信号通道自动转接开关

2) 转接线路的设计充分利用被测设备特性, 减少干扰。在进行定期离线校准时, 在原测量信号通路输入端加入程控信号切换控制适配器进行被测通道逐次切换, 完成原位检测; 当进行在线监测时, 不改变测量信号输入端连接, 被测信号依然连接测量信号调理器前端, 利用信号调理器固有测试性设计, 程控信号切换控制适配器提供触发信号和公共标准源信号, 完成对测量系统的状态检查, 最大限度地切断对测量信号的干扰。

## 3.2 检测过程的规范化与通用化

通过分析各风洞测量系统的校测需求, 依据 IEEE1226 广域测试环境体系的系列标准, 采用 VITE 的软总线技术、COM 技术、GDI+ 技术、BCG 界面技术等, 基于动态算法加载、自动化测试引擎、基本查询生成、测试参数库、多总线测试等, 建立了“测试/诊断/管理一体化”应用框架, 实现了规范化与通用化的测试流程。

### (1) 在 VITE 框架下开发标准接口仪器驱动。

检测平台采用了支持远程控制的测试仪器, 并对所有仪器开发了程控驱动, 提供显示直观、功能全面的仪器软面板以及标准的仪器调用接口, 在 VITE 软件框架下进行调用和管理, 提高了测试与诊断的流程化和自动化能力, 简化人员操作、以及测试与诊断过程, 便于今后仪器扩展。

### (2) 以国军标为依据设计开发基本测试参数库, 形成规范高效的测试程序集 (Test Program Sets, TPS)。

参数库开发是整个校测与诊断的核心基础。基于 VITE 框架的参数 TP 开发模块, 面向底层参数 TP 需求, 通过顺序、循环等控制逻辑, 使校测通路上各种仪器按照既定逻辑动作, 开发了测量系统中设备级、系统级参数的测试

TP, 形成基本测试参数库, 包括测量系统中通道增益、线性度、误差限、零点噪声、时间漂移、重复性等。

TP 开发遵循 GJB 5224-2004《风洞测量系统设计与检定准则》<sup>[8]</sup>、JJF 1048-1995《数据采集系统校准规范》<sup>[9]</sup>、JJF 1094-2002《测量仪器特性评定》<sup>[10]</sup>等, 形成了规范的测试流程, 纠正了以往各风洞进行测量系统校准测试时存在的疏漏问题, 如流程简化、参数设置不符合规范要求等。

测试流程以 TP 参数库的形式管理, 便于调用、组合与扩展, 用户在使用检测平台时, 可根据离线测试、在线检测或状态确认等的不同需要, 快速灵活地组合参数 TP 形成所需的检测计划, 规范高效地完成测试流程。参数库开发界面如图 5 所示。

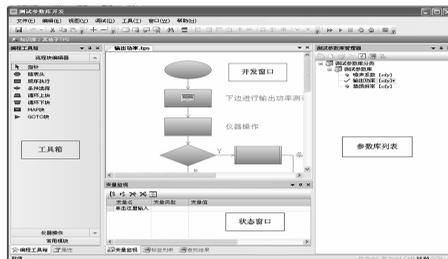


图 5 校测参数库开发界面

## 3.3 设备校测与评估信息系统

根据风洞测量系统的特点, 依托高速风洞 EKP 信息平台 and 科研试验网建立了校测与评估信息系统, 统一管理被测设备信息、校测任务信息、校测数据、校测结论评价标准等信息, 并实现了与风洞试验质量管理体系、风洞自主式维修系统的信息融合, 保障了各系统数据的一致性。通过将现场设备诊断信息和试验过程信息的紧密关联, 显著增强了数据质量问题溯源、设备故障跨系统实时连锁预警的能力, 提高了风洞试验的精细化管理水平。

系统的统计分析功能可对设备指标变化趋势及故障率进行综合分析, 见图 6, 提供故障预测、剩余寿命预测、部件寿命跟踪、性能降级趋势分析等数据支持, 以及测量设备使用、维护维修计划决策支持。

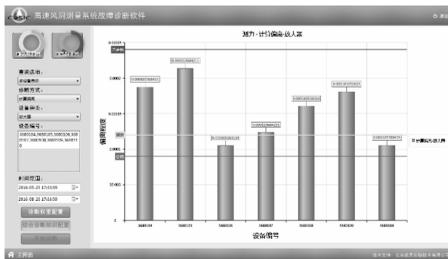


图 6 数据统计分析界面

## 4 应用情况

2016 年投入现场调试应用, 特别对平台接入前、后的测量系统精度进行了测试比对, 结果表明未影响原系统测量结果精准度, 测试结果见表 1。系统在 1.2 米跨超声速风洞某型号测力试验中获得的数据重复性对比曲线表明 (如

图 7), 接入平台前后测量系统测试结果精准确度量级相当。

在 2017 年维修月期间, 通过电缆测试及时发现了测量系统线路故障。平台成功应用到了 1.2 米跨超声速风洞的测量系统校准与日常检测工作中, 通过自动化的设备与软件, 提升了检测诊断效率, 见表 2。

表 1 小信号性能测试记录表(增益=200)

未接入	斜率	截距	线性度	误差限
ch 01	1.00019	-0.00005	0.00007	0.00014
ch 02	0.99874	0.00004	0.00016	0.00013
ch 03	0.99867	-0.00008	0.00019	0.00016
ch 04	0.99969	-0.00002	0.00008	0.00013
接入	斜率	截距	线性度	误差限
ch 01	1.00000	0.00002	0.00006	0.00014
ch 02	0.99860	0.00007	0.00015	0.00013
ch 03	0.99838	0.00004	0.00018	0.00016
ch 04	0.99839	0.00006	0.00017	0.00015

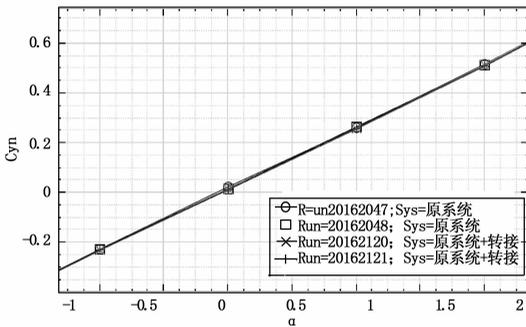


图 7 接入平台前后气动系数变化情况

表 2 新平台应用效果

类别	测试参数	新平台	老方法
测力系统试验前检测	增益	程控 1 分钟/ 10 通道	人工检查 确认
	截止频率	程控 15 分钟/ 10 通道	
测力系统定期性能确认	增益、线性度、误差限、重复性	程控 26 分钟/ 10 通道	临时搭建 校测系统
传感器性能定期确认	斜率、截距、回程误差、重复性误差	程控 15 分钟/只	维修月 送检
测压系统试验前检测	绝对/相对误差	程控全系统全量 程精度检测	手动单点 抽查比对
试验排故检测	线缆导通特性、增益、线性度、误差限、重复性等	电缆故障定位, 测量系统故障定位	人工分段 检查
检测数据管理	格式、存储方式	统一格式, 集中管理	格式不同, 分散存储

表 2 新平台应用效果类别测试参数新平台老方法测力系统试验前检测增益程控 1 分钟/10 通道人工检查确认截止频率程控 15 分钟/10 通道测力系统定期性能确认增益、线性度、误差限、重复性程控 26 分钟/10 通道临时搭建校测系统传感器性能定期确认斜率、截距、回程误差、重复性

误差程控 15 分钟/只维修月送检测压系统试验前检测绝对/相对误差程控全系统全量程精度检测手动单点抽查比对对试验排故检测线缆导通特性、增益、线性度、误差限、重复性等电缆故障定位, 测量系统故障定位人工分段检查检测数据管理格式、存储方式统一格式, 集中管理格式不同, 分散存储 5 结束语

风洞测量系统自动检测诊断通用平台参考了国军标的相关标准, 采用科学化、自动化、流程化的工作模式, 已在高速风洞成功应用, 为试验前后风洞测量系统状态检查、试验期间实时监测、定期全面技术指标检测提供了自动化手段, 系统主要特点有:

①可对十余种技术指标进行检测与评估, 并对其长期变化趋势进行跟踪, 解决了高速风洞测量系统检测不充分、故障诊断水平较低的问题;

②采用了小信号高精度程控切换技术升级风洞的传统测量回路, 支持在线监测、离线校准、参与试验等多种工作模式;

③支持动态、可合成的测试程序开发技术, 以定时运行、班前检查、在线监测运行等方式, 建立了以测试任务为核心的测试诊断模式。

通用平台的研发与应用在改进风洞测量系统可测性设计、提高风洞测量系统分析能力和自动化测试水平等方面进行了初步探索, 为今后新建风洞测量系统设计提供了有益的借鉴。

参考文献:

[1] 屈建兵, 军用自动测试系统的发展综述 [J]. 直升机技术, 2014 (1): 59-68.

[2] 李 杰, 朱 涛, 许晓斌, 等.  $\Phi 1$  米高超声速风洞自主式维修保障系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (2): 126-129.

[3] Gerald M. Hill, Richard K. Evans. Advanced distributed measurements and processing. 25th Aerospace Testing Seminar, 2009, 10.

[4] 刘 韬, 程恺英, 韩惠婕, 等. 测试软件开发工具发展现状及趋势 [J]. 电脑知识与技术, 2013 (18): 4234-4235.

[5] IEEE Standards Coordinating Committee. IEEE Std 1671-2010 IEEE Standard for Automatic Test Markup Language (ATML) for Exchanging Automatic Test [S]. New York, USA: IEEE-SA Standards Board, 1-388.

[6] 张素明, 赵小卓, 张 翔, 等. 一种通用测试系统故障诊断功能设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (7): 10-13.

[7] 马国辉. 4 m $\times$ 3 m 风洞自主式维修保障系统信息化平台设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.

[8] 施洪昌, 张俊生, 祝汝松, 等. GJB 5224-2004 风洞测量系统设计及检定准则 [S]. 北京: 总装备部军标出版社, 2004: 1-18.

[9] 梁志国, 周艳丽等. JJF 1048-1995 数据采集系统校准规范 [S]. 北京: 中航工业第三〇四所, 1995: 1-25.

[10] 施昌彦, 叶德培, 陈明华, 等. JJF 1094-2002 测量仪器特性评定 [S]. 北京: 全国法制计量技术委员会, 2002: 1-19.