

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.008

风洞流场控制系统规范化研究与应用

王博文, 秦建华, 黄叙辉, 高川

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为不断提高风洞试验能力、减少风洞建设成本, 对风洞流场控制系统的规范化进行研究。分析目前中国空气动力研究与发展中心高速所测控系统规范化建设情况, 阐述进行风洞流场控制系统规范化的必要性, 重点对软件的规范化进行分析, 主要开展软件结构分层、主要被控参数控制方法和复杂流程实现等方面的探索和设计, 并对下一步工作提出展望。研究结果表明: 规范化的风洞流场控制系统具有功能完善、结构清晰、适应性强等优点, 可为今后相关系统的研发提供借鉴。

关键词: 风洞; 流场控制; 软件; 规范化

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Research and Application about Standardization of Flow Field Control System in Wind Tunnel

Wang Bowen, Qin Jianhua, Huang Xuhui, Gao Chuan

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

Abstract: For improving wind tunnel test ability and reducing wind tunnel establishment cost, research on the standardization of flow field control system in wind tunnel. Based on the analysis of the standardization of the measurement and control system in the High Speed Institute China Aerodynamics Research and Development Center, this paper expounds the necessity of the wind tunnel flow control system's standardization construction. Mainly by analyzing the standardization of software, the paper focuses on the exploration and design of the software structure, the control method of the main parameters, the realization of the complex process and the future work is also be prospected. The results show that: the standardized wind tunnel flow control system has the advantages of perfect function, clear structure and strong adaptability, which provides a reference for the future research and development of related systems.

Keywords: wind tunnel; flow control; software; standardization

0 引言

风洞测控系统主要由数据采集、数据处理和流场控制 3 部分组成。风洞流场控制作为风洞控制最为重要的系统, 是顺利完成风洞试验的关键^[1]。为提高软件的设计质量, 增强人员跨风洞操作使用和技术交流, 降低新建、改造风洞流场控制软件研制成本和风洞调试风险, 工程人员需要对风洞流场控制系统规范化问题进行研究, 进而提高流场控制系统的通用化水平和代码复用水平, 提供一个统一的系统平台。

笔者结合目前中国空气动力研究与发展中心高速所(简称高速所)测控系统规范化建设情况, 主要针对某暂冲式风洞测控系统研制过程中风洞流场控制系统的规范化进行研究, 目的是实现一套流场控制软件, 满足所有暂冲式风洞的试验要求, 从而实现软件的通用化。通过对风洞测控系统总体要求进行分析, 笔者完成了流场控制软件

结构分层、规范化风洞流场控制方法、多工况复杂试验流程实现等方面的探索和设计工作, 并对后续工作提出展望。

1 风洞流场控制系统规范化建设的必要性

当前, 高速所的风洞试验设备正处在新老交替的重要时期, 一些老设备的测控系统亟需改造升级, 新风洞正在抓紧建设; 同时, 随着测控技术的不断发展和完善, 人们意识到通过提高风洞测控系统规范化建设实现风洞试验质量效率提升的重要性。近年来, 高速所在此方面进行了积极的探索和实践, 大幅提升了风洞试验能力, 取得了显著效果。

高速所测控团队首先对数据采集系统硬件架构和软件规范进行了统一, 统一后的数据采集系统具有功能完善、技术指标先进、操作界面友好和使用维护方便的特点^[2]。持续的开发和完善使得数据采集系统软件具有较高的成熟度, 达到了在后续新建和改建风洞中直接复用的程度。

收稿日期: 2018-04-05; 修回日期: 2018-04-23

作者简介: 王博文(1990—), 男, 山西人, 硕士, 助理工程师, 从事风洞测控技术研究。

同时，高速所确立了跨超声速风洞的常规试验标准化数据处理方法和流程，建立数据中心实现常规试验数据规范管理。创新数据处理系统的维护与运行模式，实现了面向服务架构(SOA)的数据处理和远程访问，为全所的风洞提供通用的计算服务，实现了数据处理软件全所统一维护，统一升级扩展，为参试人员在各风洞现场提供进行参数配置、数据计算和查询等功能的统一操作环境^[3]。这些努力实现了数据处理方法、流程的规范统一，提高了数据处理质量，降低了操作人员的学习和使用门槛。

与数据采集、数据处理系统相比，风洞的流场控制系统由于系统复杂、设备耦合度高、调试成本高和风险大等因素，导致风洞流场控制系统的规范化建设相对滞后。存在各风洞控制软件独自开发、独立维护，软件版本多，维护管理困难，操作使用复杂，人员跨风洞操作难实现等情况。为进一步推进风洞测控系统规范化建设，结合高速所某暂冲式风洞测控系统建设项目，对风洞的流场控制规范化进行研究，具有十分重要的意义。

2 风洞流场控制系统规范化的研究与应用

2.1 风洞流场控制系统总体设计

某型风洞是高速所建设的一座 0.6 m×0.6 m 暂冲式跨超声速风洞，风洞流场控制系统的任务是根据试验工况的具体要求，完成对各阀门系统、迎角系统和栅指等执行机构的准确调节，以及总压、马赫数和引射压力等被控参数的精确控制。流场控制系统采用如图 1 所示的基于现场总线和网络化的开放式集散结构设计，由测控间的运行管理系统和风洞现场核心控制系统 2 部分组成。

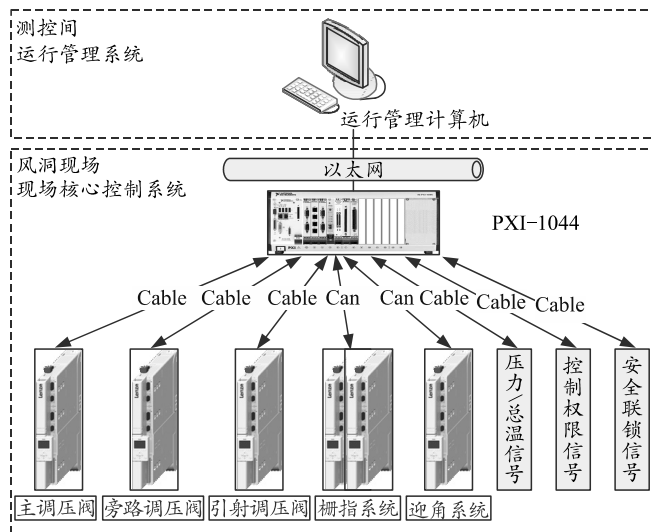


图 1 流场控制系统结构

风洞流场控制系统规范化主要包括控制系统硬件设备的规范化和软件的规范化。目前高速所新建和改造风洞流场控制系统均采用如图 1 所示的基于以太网和现场总线相结合的分布式硬件结构，选用具有面向对象及图形化编程的 LabVIEW 软件开发平台。硬件架构与软件平台的统一为后续通用流场控制软件研究奠定了基础，在这样的条件下，重点对流场控制软件的规范化进行研究，提高软件的通用性和适用性^[4]。

流场控制软件由上位机运行管理软件和现场核心控制软件 2 部分组成。其中：运行管理软件负责用户与设备双向交互；现场核心控制软件负责风洞流场控制领域的业务功能实现。作为流场控制系统的上位机软件，运行管理软件的主界面如图 2 所示。主要实现现场设备参数、传感器参数、试验参数的管理，传感器配置、机构单动控制与监测、风洞试验控制与监测和数据分析等多项功能。

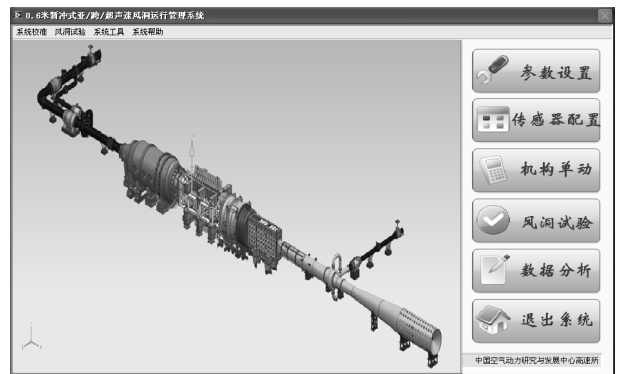


图 2 运行管理软件主界面

现场核心控制软件是软件设计的重点，其主要功能是：通信管理、试验进程管理、压力与位置闭环控制、安全连锁监控和风洞现场设备信号读取等内容。

2.2 风洞流场控制系统软件结构设计

流场控制系统软件结构是软件设计的基础，是实现控制系统软件规范化的前提。现场核心控制软件与运行管理软件相比，具有业务流程多、功能复杂等特点，因而成为笔者设计关注的焦点。

为提高暂冲式风洞流场控制软件的规范化和通用化水平，实现一套软件适用于多座风洞的目标，笔者根据风洞现场核心控制软件的功能和业务流程，将软件在纵向上划分为如图 3 所示的 3 层软件结构。各层的数据发布和接收均通过 LabVIEW 提供的 NI-PSP 数据传输协议来完成，具体功能如下：

1) SI 层，即系统交互层，负责与测控间运行管

理系统进行信息的双向交互和通信，同时还负责将来自运行管理系统的控制指令或试验参数信息发布至下一功能层；

2) PD 层，即应用层，实现风洞流场控制领域的业务功能，主要包括试验流程控制、安全连锁控制、稳定段总压、驻室静压、引射压力和攻角阶梯控制等功能；

3) GE 层，即设备驱动层，也是现场传感设备和执行机构的输入输出接口层，主要负责采集、接收 PXI 接入设备的信号、信息，同时将控制信号、指令发送到被控设备对象，其监测、控制设备对象主要包括各类传感器、主调压阀、旁路调压阀、栅指、引射器和攻角机构等。

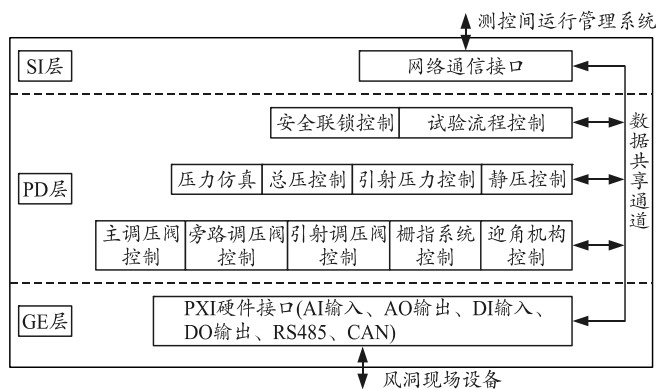


图 3 风洞核心控制软件结构

应用层作为流场控制软件的核心，是实现风洞

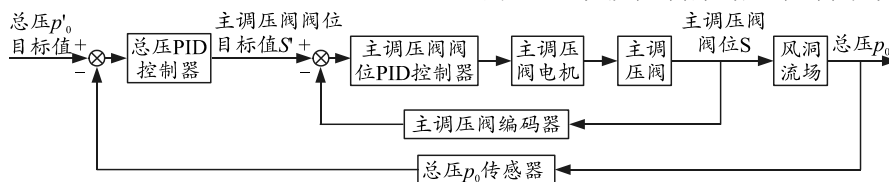


图 4 风洞总压串级控制原理

从图 4 中可以看出，总压控制系统包含控制外环的压力控制系统和控制内环的阀门位置控制系统。为加快风洞建立速度，提高运行效率和试验经济性，同时满足风洞测控系统的高精度要求，将该风洞运行分为启动阶段和流场调节阶段。根据内外环控制的不同特点，阀门位置内环始终采用闭环 PID 控制方式，压力外环则针对风洞的不同试验阶段采用开闭环结合的 PID 控制方法，下面重点对压力外环的控制方法进行介绍。

1) 在风洞启动阶段采用总压开环控制方式，原因是此时风洞总压同目标总压偏差较大，若直接接入 PID 控制器容易造成较大的系统震荡。同时，在确保主调压阀阀位精确控制的前提下，采用总压开

各项功能的主要部分。通过应用层中建立分类明确、功能完善的软件模块集合来实现不同风洞控制系统中的各项功能要求，当将流场控制软件移植到其他风洞时，只需根据风洞的自身特点来修改软件的系统交互层和驱动层，然后根据风洞的功能需求调用应用层中相应的功能模块即可。通过这样的结构分层设计，可提高系统的可移植性和适用性，使得风洞流场控制软件规范化成为可能。

2.3 风洞流场控制方法规范化研究

风洞流场品质是风洞试验的核心，而控制方法是提高流场品质的关键^[5]。高速所各个风洞由于建设于不同的年代，且早期缺乏相应的总体规划，导致各风洞流场控制方法和流场品质存在一定差异。为了进一步提高流场控制水平，需要针对高速所现有风洞的流场控制方法进行统计分析，研究各种方法的优缺点，提出效果更优的流场控制方法，并对其进行规范化后应用于通用化的流场控制软件中。笔者以某 0.6 m 风洞流场控制软件中总压的控制方法为例进行介绍。

在暂冲式风洞中，由于风洞稳定段容积很大，同时气体具有可压缩性的特点，风洞总压控制属于典型的滞后系统。因此为了实现总压控制的“快速、稳定、精确”要求，总压控制系统采用开闭环结合的 PID 串级控制策略，控制系统原理如图 4 所示。

环控制的方式可以加快风洞内气体的填充速度，大幅缩短流场建立时间，提高风洞试验的运行效率。

2) 在启动阶段完成后，风洞进入流场调节阶段，压力外环采用闭环控制的方式。此时系统使用积分分离和变速积分 PID 控制算法进行控制，目的是实现风洞试验中总压控制的精确性和稳定性。

2.4 多工况、复杂流程实现方法

高速所部分风洞由于在建设和改造过程中缺乏相应的总体规划，导致这些风洞的一套流场控制软件无法满足所有的试验工况要求。随着试验工况的增加，软件版本也不断增多，一旦更换试验工况和试验流程，就需更换相应的软件版本，为软件的管理、使用和维护带来诸多不便。在这样的背景下，

工程人员在某风洞流场控制软件开发过程中对试验工况进行了综合分析和提炼，在软件的应用层设计了工况/动作 2 层条件分支的嵌套结构，结构如图 5 所示。

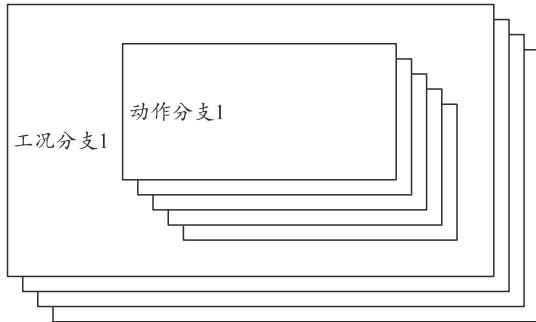


图 5 流场控制软件分支结构

其中，外层为试验工况条件分支，内层为执行机构的动作条件分支。以主调压阀控制总压工况为例，工况条件分支为每种总压工况分配了对应的分支，用以处理相应业务功能，以解决不同总压调节的工况问题。动作条件分支为每种阀门动作分配了对应的分支，用以处理相对应的机构行为。每种工况条件分支都嵌套有多个按控制逻辑依次执行的动作条件分支，用以解决复杂流程问题^[6]。

通过这样的 2 层嵌套结构，将多种试验工况集成在一套软件中，有效解决了风洞试验工况多、流程复杂和软件版本多的问题，便于软件的集中管理和升级。同时，可以将不同风洞的各种试验工况集成于应用层中。当将该风洞流场控制程序移植到其他风洞时，只需根据不同风洞特定的控制对象选择或设计相应的条件分支即可，而无需修改程序的总体结构。这样就提高了流场控制程序的通用性和适用性，降低了程序的开发成本和研制周期，便于将规范化程序应用于不同风洞中。

2.5 风洞实际运行效果分析

某风洞测控系统通过 2 年半的集成、研制与调试，累计完成数百次调试试验任务，顺利完成了风洞综合性能调试和控制系统参数整定调试，实现了一套流场控制软件完成跨声速条件和超声速条件下的常压、降速压和增压试验等多种工况，系统结构清晰，便于操作使用和后期维护。

风洞多项调试结果表明：流场控制系统获得的试验结果控制精度高，重复性良好，数据规律合理，系统可靠性强。流场校测试验结果表明，所有马赫数喷管型面下模型区马赫数分布均方根偏差均达到国军标指标。标模试验结果表明：整个速域范围的

标模试验数据准确可靠，马赫数试验精度均达到国军标要求。这些测试结果证明了将流场控制系统标准化研究应用于风洞控制系统设计的正确性，为后续风洞控制系统设计提供一种可行方案。

3 工作展望

3.1 创新风洞流场控制软件维护与运行模式

依托于高速所的试验管理网络，通过网络中心服务器和各风洞现场服务器，为全所的风洞提供通用的流场控制软件，实现流场控制软件全所统一维护，统一升级扩展。当某风洞新增试验工况时，只需在网络中心服务器升级相应的软件版本，随后为该风洞流场控制软件进行配置和调用即可。这样就改变了各风洞专用程序维护难度大和软件版本混乱的传统模式，提高了流场控制系统软件的运行维护能力。

3.2 试验流程配置实现方法研究

试验流程配置的作用是实现特定试验工况下，对参试对象设备进行调度配置，最终完成试验过程中设备对象的顺序动作等功能^[7]。笔者设计了如图 5 所示的软件分支结构，实现了利用一套软件满足多种工况的试验要求。但是这种结构存在的问题是当新增工况时，必然会增加代码的维护工作量。后续的改进方法：去除现有的工况分支，仅保留各个被控对象的动作分支，且将动作分支进一步细化。通过流程配置表顺序调度相应的动作分支，进而实现不同工况下的试验流程。具体流程调度结构如图 6 所示。

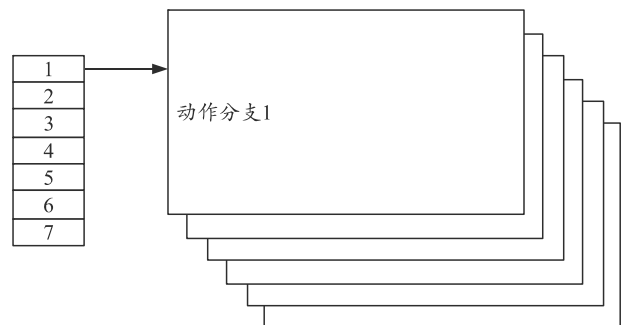


图 6 流程调度结构

采用图 6 所示的软件结构，由风洞运行管理软件完成试验流程的编辑维护，风洞核心控制软件负责流程的解析和功能模块的调度。当试验工况调试完成后，将编辑的各种试验流程以模板的方式进行保存，并定义为相应工况的试验流程控制文件。当进行某种试验工况试验时，则加载此试验流程控制

文件,即可进行该项试验。通过这样的方式进行流程配置,当增加风洞的试验工况时,无需修改原有控制程序的条件分支,只需修改流程配置表后调用执行相应的动作分支即可。采用这样的设计使得软件结构能够灵活适应不同试验流程的变化,实现同一风洞流程变更的零代码维护。同时各风洞间软件差异仅存在于硬件接口对象的差异,从而可以实现多座风洞只有一套流场控制软件,统一维护升级。

4 结束语

在高速所某风洞测控系统开发过程中,笔者对规范化建设进行初步探索,设计的流场控制软件功能分层清晰,便于理解;控制方法合理,满足系统快速性、准确性和稳定性要求;软件功能完善,解决了一套软件中完成多种工况、复杂流程的设计问题。该设计模式为新建和改造风洞流场控制系统软件提供了参考,为后续风洞控制系统的规范化提供了可借鉴的方案。

(上接第 27 页)

4 结论

通过对 FL-12 风洞螺旋桨带动力试验系统的研制,使得该系统在转速控制精度和系统自动化程度等方面都有了很大提高,部分技术指标达到国际先进水平,提高了 FL-12 风洞在该领域的试验能力。

参考文献:

- [1] 倪章松,黄勇,巫朝君,等. FL-12 风洞勤务指南[S]. 绵阳,中国空气动力研究与发展中心,2014: 67.
- [2] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京:国防工业出版社,2002: 156-157.
- [3] 李征初,王勋年,陈洪,等. 螺旋桨滑流对飞机机翼流场影响试验研究[J]. 流体力学实验与测量,2000,14(2): 44-48.
- [4] 霍国,王政. FL-12 风洞带动力试验系统改造技术总结

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]. 实验空气动力学,2012,26(4): 96-100.
- [3] 邓晓曼,范金磊,李春彦,等. 风洞试验数据系统规范化建设的思考与实践[C]//中国空气动力学学会测控专委会六届六次全国学术交流会议论文集. 惠州:中国空气动力学学会测控专委会,2015: 55-58.
- [4] 田正波,杨家军,史玉杰. 一种新的风洞试验支撑机构横向弹性角校准方法[J]. 兵器装备工程学报,2017(8): 32-35.
- [5] 褚卫华,汤更生,王帆. 2 m×2 m 超声速风洞流场控制策略研究与实现[J]. 实验流体力学,2012,26(5): 98-102.
- [6] 张德久,朱本华,姜德龙,等. 1.8 m×1.4 m 低速风洞模型支撑系统研制[J]. 兵工自动化,2017,36(5): 12-16.
- [7] 韩丽芳. ERP-NC 流程管理系统的研究与实现[D]. 天津:天津大学,2004: 5-8.
- [R]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2012,10: 3.
- [5] 张晖. 螺旋桨带动力试验电机需求[R]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2016,10: 4-5.
- [6] 霍国,康洪铭,李涵,等. 风洞螺旋桨试验电机现状及发展方向[J]. 兵工自动化,2016,35(11): 20-23.
- [7] 周润,黄叙辉,高荣钊,等. 风洞 CTS 试验并联装置的速度控制方法[J]. 兵工自动化,2017,36(4): 63-68.
- [8] 吴晓溪,张亮. FL-12 风洞带动力试验系统改造技术总结[R]. 绵阳:西安微电机研究所,2012,10: 18-23.
- [9] 薛伟. DDL 螺旋桨带动力天平说明书[R]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2012,11: 2-3.
- [10] 霍国,王政. FL-12 风洞带动力试验系统调试报告[R]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2012,12: 1-2.
- [11] 英国 CT. 艾默生 Unidrive SP 1-9 型用户手册[S]. 英国 CT,2005: 129-130.