

doi: 10.7690/bgzd.2019.02.008

# 某超声速风洞控制系统安全策略优化研究

涂清, 周波, 苏北辰

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对某超声速风洞试验运行中面临的主调压阀位移传感器故障导致阀门失控、试验段正激波回退以及不同马赫数的总压超压保护功能不足等安全隐患, 提出了主调压阀智能判定规则及处理措施, 研制了正激波位置实时监测系统, 完善了总压保护值全域匹配等安全控制策略。实验结果表明: 上述优化措施运行稳定、可靠, 提高了控制系统智能化和自动化水平, 对保障风洞试验安全运行有重要作用。

**关键词:** 安全控制策略; 试验运行; 智能化; 自动化

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Research on Security Control Strategy Optimizing for the Supersonic Wind Tunnel

Tu Qing, Zhou Bo, Su Beichen

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

**Abstract:** To solve the problems in the certain type supersonic wind tunnel test about the runaway valve causing by the main pressure valve displacement sensor fault, the normal shock wave return to test-section and total-pressure excessive pressure protection insufficiency for different mach numbers. This paper presents the intelligence decision rule and treatment measure of the main pressure valve, researches the real-time monitoring system for normal shock wave position and improves the universe matching of total-pressure excessive pressure protection. The test results show that the above optimizing measures run stably and reliable, raise the intelligent and automatic level of control system, and play an important role for ensuring the wind tunnel test security.

**Keywords:** security control strategy; test run; intelligence; automation

### 0 引言

某超声速风洞是我国先进超声速飞行器研制重要的地面模拟设备, 其运行基本特点是: 流量大、压力高、冲击载荷大、运行成本高。风洞控制系统采用美国 NI 公司的 PXI 嵌入式控制器<sup>[1]</sup>, 并基于 LabVIEW 软件和 RT 实时操作系统开发研制了风洞运行管理程序<sup>[2]</sup>。风洞控制系统主要负责实验全流程控制和设备状态实时监测, 其紧跟当前技术发展前沿, 采用基于现场总线的集散系统、内存反射技术、迎角冗余控制技术<sup>[3]</sup>、喷管控制技术<sup>[4]</sup>和实时安全监控技术等先进手段, 为实验运行发挥了关键作用。然而在近年的运行过程中, 控制系统也暴露出几点问题, 仍然存在着不足和安全隐患。

笔者结合实际情况, 为解决主调压阀位移传感器故障导致阀门失控、试验段正激波位置实时监测以及总压超压保护功能不足等问题, 介绍在安全控制策略优化与改进方面开展的研究以及提升控制系统智能化、自动化水平的成效<sup>[5]</sup>。

### 1 控制系统存在的安全隐患

#### 1.1 主调压阀传感器系统故障

风洞试验中获取高精度的稳定段总压是保证风洞流场品质的关键。稳定段总压控制系统采用串级双闭环结构, 系统原理如图 1<sup>[6]</sup>所示。其中, 阀门位置反馈参与风洞稳定段总压控制, 其值由主调压阀位移传感器直接测量所得。因此可见, 一旦主调压阀位移传感器及其信号传输系统发生故障, 很有可能使得阀门失控, 使风洞和模型面临巨大的风险。

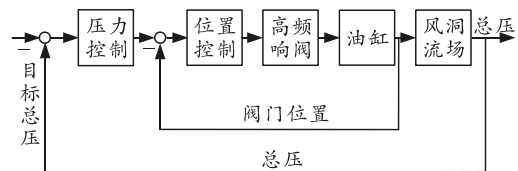


图 1 总压控制原理

某次试验主调压阀位置和总压曲线如图 2 所示。试验运行过程中, 主调压阀位移反馈值由正常位置 300 mm 陡降至 -210 mm, 总压迅速爬升到 1 300 kPa, 风洞总压严重超压。其原因为: 试验过

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-12-13

作者简介: 涂清(1987—), 男, 重庆人, 硕士, 助理工程师, 从事风洞试验控制及控制系统的设计研究。

程中，主调压阀位移传感器信号传输线缆断开，控制系统采集到的主调压阀反馈值为错误信号，控制系统进行闭环调节，从而使得主调压阀持续高开，总压超压。同理，当主调位反馈值为极大值，阀门将会迅速关闭，如果此时迎角  $\alpha \neq 0^\circ$ ，模型所受到的冲击载荷远大于正常启动和关车时的冲击，严重危害模型安全。

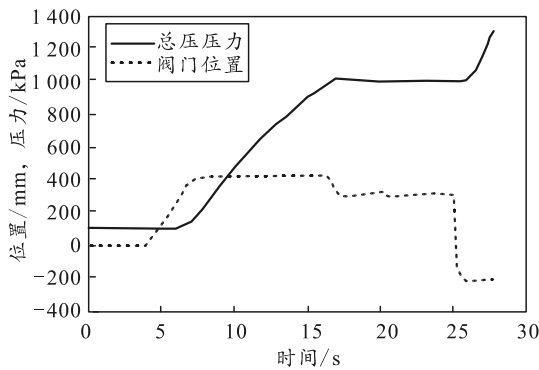


图 2 阀门-压力曲线

### 1.2 正激波位置无法常态化监测

超声速风洞启动和关车阶段都会有一道正激波穿过试验段，对模型和天平造成很大的冲击；因此，正激波能否被推过试验模型区并稳定在试验段下游某一位置是流场建立的重要判据。试验过程中，随着迎角角度变化，会造成堵塞度改变，从而引起正激波位置的变化；对于某些无主天平的特种试验，由于模型刚度大，激波回退时模型抖动不明显，但严重影响试验数据的有效性。对不同模型不同堵塞度时正激波稳定位置进行分析，可以优化风洞总压、超扩段第二喇叭道高度等运行参数，使风洞运行更加安全经济；通过对同一马赫数大量实验正激波稳定位置的分析，还可以给出该马赫数下所允许的最大堵塞度要求，为模型设计提供依据。

风洞试验运行以来，通常采用电子扫描阀系统采集侧壁静压来分析正激波的位置，但是该方式存在 3 方面的问题：1) 电子扫描阀系统设备昂贵，对使用环境要求高，不适合作为常态化的监测设备；2) 测压试验时，电子扫描阀系统不能进行正激波位置监测；3) 试验段和超扩段侧壁静压探测点接入到电子扫描阀系统的采集气路长，使得压力稳定时间长，影响数据采集和分析。

### 1.3 总压超压保护功能不足

风洞控制系统只设置了一个总压保护值高限，一旦实验中总压超过该值风洞将自动关车，用以保护模型和烧结丝网等风洞内构件安全。风洞马赫数

范围为 1.5~4.25，常规运行总压全域范围为 140~1 000 kPa，低马赫数时，风洞常规运行总压同样也较低。即使低马赫数试验时，风洞实际运行总压远超过目标值，但是由于其仍低于总压保护值高限，控制系统无法自动采取关车等处理手段，使得总压超压保护功能无法起到作用，对模型和洞体设备存在安全隐患。

## 2 控制系统安全策略优化研究

### 2.1 主调压阀故障智能判定及处理规则

主调压阀位移传感器位于阀门内部，工况环境十分复杂恶劣，突发性、偶然性因素影响强，静态条件下的维护检测不能完全防止故障发生。

根据数据分析，实验时主调传感器一旦发生故障，其位移反馈值会发生突变，远超出阀门正常的运行范围；因此，在安全策略上提出主调压阀故障智能判定及处理规则，增加控制系统对于主调压阀的位置反馈，用以判断主调传感器系统故障。

主调压阀故障智能判定及处理规则原理如图 3 所示。其具体可表述为，试验时控制系统实时采集主调压阀位移反馈值，如果其值超出正常范围区间，即小于等于 -20 或者大于等于 660，系统认定主调位移反馈值异常。为防止尖峰脉冲等干扰或不定因素造成的误判，系统只有在连续 3 个控制周期以上主调位移反馈值均异常时，才判定位移传感器系统故障并采取应对措施，否则实验正常进行。一旦判定主调压阀位移传感器发生故障，此时控制系统不再将传感器的电压值作为反馈信号参与总压控制，而是强制持续给定一个电压常量 5 V 作为控制信号，使得阀门位置保持在当前位置不变，从而使总压变化较为平缓，最后正常关车结束实验。主调压阀智能判定规则主要基于核心 RT 程序改进，在软件的逻辑和流程方面进行了优化<sup>[7]</sup>。

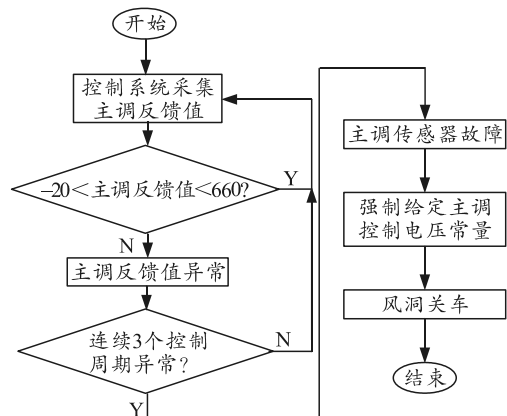


图 3 主调压阀智能判定规则原理

## 2.2 正激波位置实时监测系统

正激波位置监测系统原理为：激波通过后的波后静压值会突然升高，因此就可以通过采集风洞侧壁压力的方式，根据所测压力曲线实现激波位置的监测。

正激波位置监测系统结构如图4所示，选用NI-9208电流采集模块采集压力传感器数值，23个侧壁压力监测点分布在试验段和超扩段，主要集中在超扩段第二喉道后。通过采集到的侧壁静压值绘制出压力分布曲线，根据正激波前后的压力波动变化以及波后压力大幅上升原理，即可简单直观判断出正激波所在的监测点位置。激波监测系统自动接收风洞实验信号，以实验的开关车信号作为触点并加以延时，自动采集侧壁压力值并直观排列。一旦激波位置靠近超扩段第二喉道前端，系统将会提示岗位人员注意激波回退的风险并采取关车等措施<sup>[8]</sup>。此外，通过对正激波位置的数据积累分析，对运行总压和超扩段参数的优化，使得正激波稳定位置更加合理，风洞实验运行更加安全和经济。

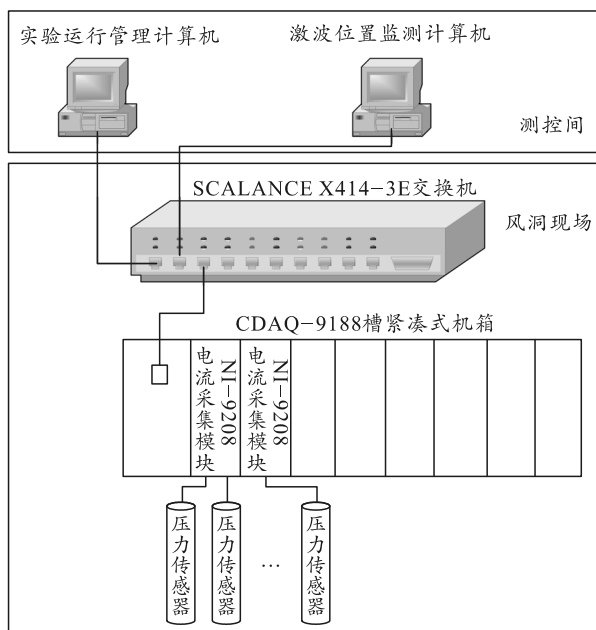


图4 正激波位置实时监测系统结构

## 2.3 总压超压保护全域匹配功能

控制系统运行管理程序新增总压超压保护全域匹配功能，通过如图5所示的总压保护值表格，实现每个马赫数设置一个总压超压保护值，一旦压力超过相应的总压保护值，总压超压保护策略就会主动介入实验，使风洞进入自动关车流程，控制模型迎角回到零位，然后关闭主调压阀和主快速阀，确保模型和实验安全。

总压保护值			上传总压保护值		
ID	马赫数	总压保护值	ID	马赫数	总压保护值
1	M1.5	200	1	M1.5	200
2	M1.6	210	2	M1.6	210
3	M1.75	240	3	M1.75	240
4	M1.8	245	4	M1.8	245
5	M2.0	250	5	M2.0	250
6	M2.1	260	6	M2.1	260
7	M2.2	270	7	M2.2	270
8	M2.25	280	8	M2.25	280
9	M2.5	330	9	M2.5	330

图5 总压保护值表格

## 3 应用效果分析

### 3.1 主调传感器故障得以有效处理

在某次实验中，总压闭环调节阶段主调压阀位移传感器突发性故障，阀门位置由正常试验位置360 mm突变至660 mm，控制系统自动启用主调压阀智能判定规则，强制给定阀门控制电压值为5 V，使得阀门基本保持在当前位置，此时总压基本维持不变，然后控制系统自动控制迎角回零及关车，避免了总压剧烈波动对试验和模型的威胁。实验主调压阀和总压曲线如图6所示。

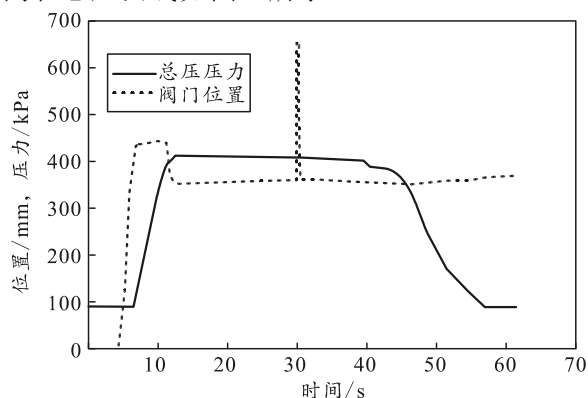


图6 优化后阀门-压力曲线

实验结果表明：主调压阀智能判定规则能够有效应对主调传感器突发性故障导致的阀门失控，保障风洞实验安全，提高控制系统的智能化和自动化水平。

### 3.2 正激波位置实现常态化监测

激波位置判读规则为：实验过程中监测系统实时采集侧壁压力传感器测得的压力值并绘制曲线，计算相邻两点之间的斜率，当连续3个斜率大于指定阈值时，即判定为激波通过后的压力曲线，其起点作为激波位置予以显示。正激波实施监测软件如图7所示，根据上述规则即可判断出实验时正激波位置并且每0.5 s刷新显示。

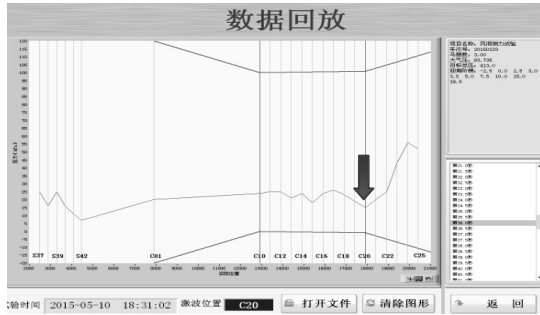


图 7 正激波位置实时监测软件压力

正激波位置监测系统为风洞安全运行提供监测手段，随着实验数据的积累，必将为风洞运行参数的合理调整发挥重要作用，使风洞运行更加安全和经济。

### 3.3 总压超压保护实现全域匹配

在运行管理程序的总压保护值表格中，通过“保护值下传”功能实现在运行管理程序上位机设置和修改各马赫数总压保护值，然后通过“保护值校验”读取核心 RT 中存储的总压保护值。实验前，运行管理程序根据参数设置，自动调用目标马赫数对应的总压保护值并参与到风洞试验控制中。

某次 M3.0 试验的压力曲线如图 8 所示。在最后阶段风洞运行总压超过了 M3.0 设定的总压保护值 520 kPa，此时控制系统自动调用总压超压保护全域匹配功能，使风洞进入关车流程，总压迅速下降，从而起到了总压保护作用。

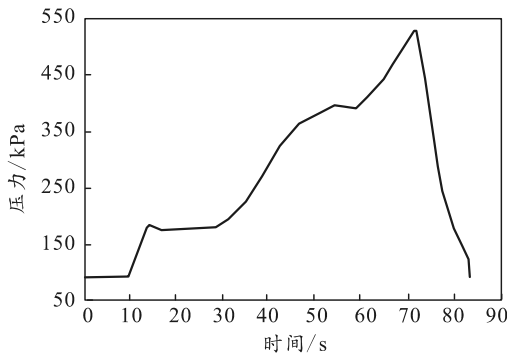


图 8 总压超压保护压力

总压超压保护全域匹配功能实现了风洞各马赫数总压值在风洞运行的全速域范围内保护，其功能可靠、使用方便，有效应对了总压超压等严重情况。

## 4 结束语

笔者针对某超声速风洞控制系统安全策略优化问题，提出了主调压阀智能判定规则及处理措施、研制了正激波位置实时监测系统，完善了总压保护值全域匹配等安全控制策略，为保证风洞安全运行起到重要作用。此外通过上述的优化和改进，风洞控制系统的智能化和自动化水平也得到提高：智能化方面，将增加对应的判定规则和连锁条件内嵌于程序中，实现智能判定和决策；自动化方面，控制系统针对上述隐患实现全程的实时值守，一旦发生故障，系统就能够及时主动介入，实现标准化处理模式下的快速响应和有效处理。

### 参考文献：

- [1] 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]. 实验流体力学, 2012, 26(4): 96-100.
- [2] 陈锡辉. LabVIEW8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 15.
- [3] 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.
- [4] 涂清, 周波, 高川. 某超声速风洞喷管控制系统的设计与应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(10): 92-94.
- [5] 何福, 杜轶焜, 徐涛, 等. 以信息化思维驱动风洞装备保障智慧化变革——基于 EKP 的装备信息化平台规划、设计与建设[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 17-20.
- [6] 周波, 喻波, 周润. 冗余技术在某风洞迎角机构控制中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(4): 58-60.
- [7] 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.
- [8] 周波, 杨洋. 大型超声速风洞正激波位置实时监测系统研制[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 65-67.