

基于组态方式的风洞运行安全 关车控制方法

马列波, 高鹏, 陈海峰, 阎成, 唐子奇

(中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对某亚跨超声速风洞复杂的安全关车工况, 设计了一种基于组态方式的风洞安全关车控制方法, 通过灵活组态调压阀压力调节、模型迎角回零以及调压阀关闭功能模块, 形成 5 种运行工况对应的安全关车控制策略; 经调试运行: 各功能模块能够实现设计功能, 稳定段总压控制精度为 0.2%, 满足压力控制精度要求; 安全关车控制策略可以在异常报警情况下实现压力调节, 模型迎角回零以及调压阀关闭, 完成安全关车, 保证风洞安全。

关键词: 风洞; 组态方式; 安全关车

Safety Shutdown Control Method of Wind Tunnel Operation Based on Configuration Mode

Ma Liebo, Gao Peng, Chen Haifeng, Yan Cheng, Tang Ziqi

(The High Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the complex safety shutdown conditions of the transonic and supersonic wind tunnel, a safety shutdown control method based on configuration was designed. By flexible configuration function module of pressure regulating valve, model angle of attack zeroing and pressure regulating valve closing, a safety shutdown control strategy corresponding to five operating conditions was formed. After debugging and running: each function module can realize the designed function, the total pressure control precision of the stable section is 0.2%, meeting the requirement of pressure control precision; in the case of abnormal alarm, the control strategy of safety shutdown can realize pressure adjustment, return model angle of attack to zero and close pressure regulating valve to complete the safety shutdown, ensure safety of the wind tunnel.

Keywords: wind tunnel; configuration; safety shutdown

0 引言

在风洞运行过程中, 为了保证风洞试验运行安全, 需要设计风洞运行安全关车控制方法, 当风洞运行过程中出现异常状况时, 能够自动执行相关安全关车操作, 保证风洞设备安全^[1]。

某风洞为新建风洞, 是 1 米量级的半回流暂冲式亚跨超声速风洞, 试验马赫数范围 $M=0.3\sim 4.5$ 。风洞设备主要包括: 主进气路管路系统、引射进气管路系统、稳定段、收缩段、喷管段、试验段 (2 个)、支架段、超扩段、吸入引射器、亚扩段和增量引射器等, 其中主进气路管路系统包括主闸阀、主快速阀及其均压阀和主调压阀, 引射进气管路系统包括引射闸阀、引射快速阀及其均压阀和引射调压阀。

该风洞运行方式复杂, 针对不同运行工况, 共有 5 种运行方式: 增量引射式、下吹式、下吹吸入引射式、增量+吸入引射式、增量+下吹吸入引射式, 通过主进气管路

路系统、引射进气管路系统以及增量引射器的组合使用, 实现了 0.3~4.5 的宽马赫数试验运行范围。运行方式组合如表 1 所示。

表 1 风洞运行方式组合表

运行方式	主进气管路系统	引射进气管路系统	增量引射器
增量引射式	使用	—	使用
下吹式	使用	—	—
下吹吸入引射式	使用	使用	—
增量+吸入引射式	—	使用	使用
增量+下吹吸入引射式	使用	使用	使用

风洞处于不同的运行方式和运行工况时, 对应关车涉及到的风洞设备及其关闭时间逻辑不同, 导致安全关车控制方法设计复杂。以往风洞安全关车控制方法仅针对已知工况进行一体化设计^[2-6], 当新增运行方式时, 需要对原有的控制方法进行重新设计, 对控制程序的结构和逻辑进行

收稿日期: 2021-03-06; 修回日期: 2021-04-16。

作者简介: 马列波 (1992-), 男, 重庆永川人, 硕士, 工程师, 主要从事风洞测量与控制方向的研究。

通讯作者: 阎成 (1973-), 男, 陕西西安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事风洞测量与控制方向的研究。

引用格式: 马列波, 高鹏, 陈海峰, 等. 基于组态方式的风洞运行安全关车控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 114-118.

更改, 无法在现有控制方法基础上仅针对新工况单独添加相应安全关车功能, 可扩展性差, 同时可能降低程序运行的可靠性, 带来新的不安全因素。

为了提高新风洞调试效率, 便于后期添加新运行方式时快速调整添加安全关车控制策略, 同时保证程序的可靠性, 设计了一种基于组态方式、易于扩展的风洞运行安全关车控制方法。

1 安全关车流程

在风洞运行过程中, 需要实时监测风洞各系统状态, 当出现异常报警时, 将根据当前风洞运行方式自动选择对应安全关车流程进行安全关车。在风洞安全关车过程中, 为了保证洞体和试验模型的安全, 需要保证稳定段总压和集气室压力在相应范围之内, 同时待模型迎角回到零位即模型回零后再切断气源^[7]。

针对风洞目前的 5 种运行方式, 风洞安全关车流程包括: 1) 当使用“增量引射式”与“下吹式”运行方式时, 安全关车流程为主调压阀调节稳定段总压, 同时模型支撑机构控制模型回到零位, 然后关闭主调压阀; 2) 当使用“下吹吸入引射式”运行方式时, 安全关车流程为主调压阀调节稳定段总压、引射调压阀调节集气室压力, 同时模型支撑机构控制模型回到零位, 关闭主调压阀, 待稳定段总压下降至给定值时关闭引射调压阀; 3) 当使用“增量+下吹吸入引射式”运行方式时, 安全关车流程为主调压阀调节稳定段总压、引射调压阀调节集气室压力, 同时模型支撑机构控制模型回到零位, 然后同时关闭主调压阀和引射调压阀; 4) 当使用“增量+吸入引射式”运行方式时, 安全关车流程为引射调压阀调节集气室压力, 同时模型回零, 然后判断稳定段总压是否小于设定值, 若小于, 则启动主调压阀调节稳定段总压, 当稳定段总压不小于设定值时, 同时关闭主调压阀和引射调压阀。

2 功能模块

根据风洞安全关车流程, 风洞运行安全关车控制方法涉及到的装置包括主调压阀、引射调压阀、弯刀机构、半模机构、控制器、电液伺服阀、换向阀及压力传感器等。通过对风洞安全关车时涉及到的所有装置功能进行分析, 分解形成各装置关车功能模块, 包括调压阀压力调节功能: 主调压阀压力调节功能、引射调压阀压力调节功能; 模型回零功能: 弯刀机构模型回零功能、半模机构模型回零功能; 调压阀关闭功能: 主调压阀关闭功能、引射调压阀关闭功能。然后针对不同的试验运行工况, 将各装置关车功能模块按照一定时序和判断条件进行组态, 形成各工况下的安全关车控制策略。

根据调压阀压力调节功能、模型回零功能以及调压阀关闭功能, 将安全关车功能模块细分为主调压阀压力调节功能模块 A, 引射调压阀压力调节功能模块 B, 模型回零功能模块 C, 主调压阀关闭功能模块 D, 引射调压阀关闭功能

模块 E。

2.1 调压阀压力调节功能模块

调压阀为环状缝隙阀, 通过改变气流通截面积改变气流量, 从而改变相应部段压力, 即通过控制调压阀油缸位置调节相应部段压力^[8-13]。调压阀采用液压油缸驱动, 通过控制器输出控制电流至电液伺服阀控制油缸伸缩, 安装于油缸内部的直线位移传感器实时反馈油缸位移至控制器, 形成调压阀位置闭环控制, 同时根据安装于相应部段的压力传感器实时反馈压力信号实现调压阀压力闭环调节。

当进行安全关车调压阀调节压力时, 首先判断电液伺服阀阀芯位置是否大于 S (S 值可根据具体设备工况确定), 若大于 S , 则不调节压力, 保持阀位不变; 若阀芯位置小于 S , 则继续判断实际压力 P_r 是否小于启动压力 P_q , 若小于, 则不调节压力, 保持阀位不变, 若大于, 则进行调压阀压力调节。为了防止压力调节出现超调过大的情况, 采用两种输出电流计算方法, 一是采用计算函数根据循环周期计算输出电流, 逐渐增加电流值, 当计算电流值绝对值超出 8 mA 时, 输出电流绝对值为 8 mA, 电流计算函数为:

$$I_c = \pm (CV \times 2 + 2) \quad (1)$$

其中: I_c 为计算输出电流值, CV 为控制器启动计算循环次数, 当前压力小于目标压力时电流输出值为正值, 当前压力大于目标压力时电流输出值为负值。二是根据压力传感器反馈的实际压力 P_r 与目标压力 P_m 采用模糊 PID 算法^[14-20], 实时计算电流值 I_d 。实时比较两种计算方法的电流差值, 当差值在误差范围之外时, 采用 I_c 输出至电液伺服阀, 当差值在误差范围之内时, 采用 I_d 输出至电液伺服阀, 控制调压阀调节压力至目标值。调压阀压力调节功能模块原理如图 1 所示, 根据调节对象的不同, 分为主调压阀压力调节功能模块 A 和射调压阀压力调节功能模块 B, 为了防止压力波动大导致模型抖动, 要求压力控制精度要求为 1%。

2.2 模型回零功能模块

模型回零功能模块 C 原理如图 2 所示, 进行安全关车模型回零时, 有三种工况, 其中全模机构采用液压驱动, 通过控制油缸伸缩来调节模型迎角; 半模机构采用电机驱动, 通过控制电机转动来调节模型迎角; 特种机构仅进行回零信号监测不进行模型回零控制。如果使用全模机构, 首先判断模型迎角阶梯数是否为 0, 若为 0, 则判断模型已回到零位; 若不为 0, 则判断当前弯刀机构控制方式为自动还是手动; 若为自动, 则根据当前角度打开换向阀 1 控制模型回到零位; 若为手动, 则手动操作相应按钮打开换向阀 1 控制模型回到零位。如果使用半模机构, 首先判断模型阶梯数是否为 0, 若为 0, 则判断模型已回到零位; 若不为 0, 则根据当前角度控制电机转动使模型回到零位。如果使用特种机构, 在进行安全关车时, 仅向特种机构控制器

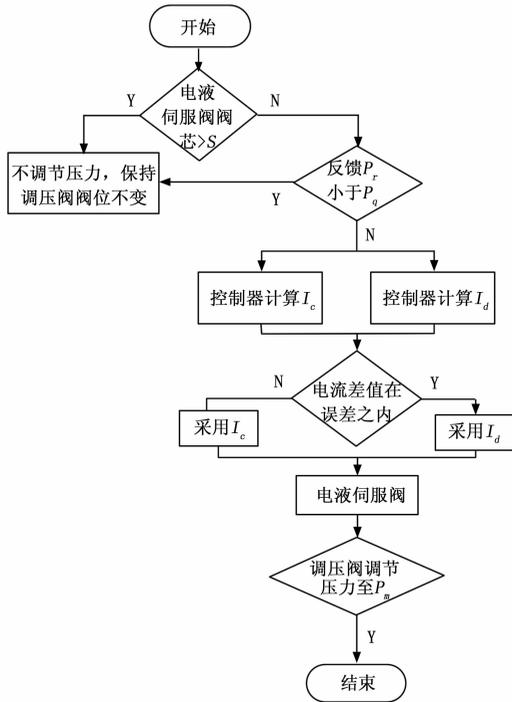


图 1 调压阀压力调节功能模块原理图

发送回零信号, 接收到特种机构的回零到位信号后, 判断机构回到零位。

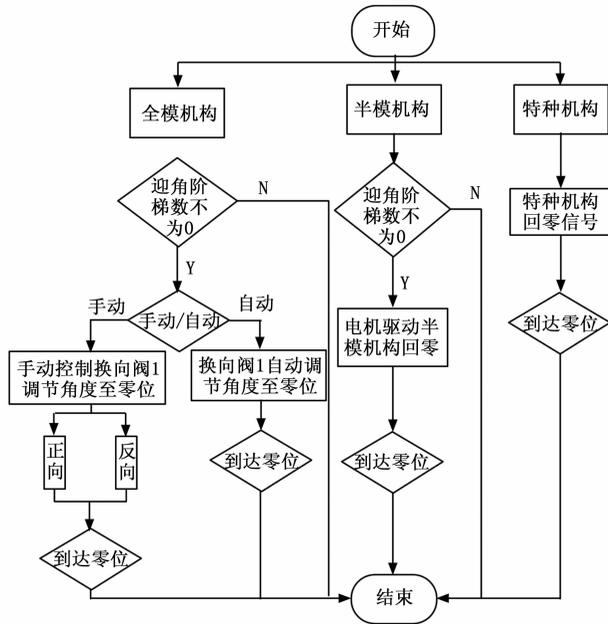


图 2 模型回零功能模块原理图

2.3 调压阀关闭功能模块

进行安全关车调压阀关闭时, 首先判断电液伺服阀阀芯位置是否小于 S , 若小于 S , 则控制器向电液伺服阀发送控制电流 I_g 并保持 T_1 秒, T_1 秒后, 打开换向阀 2 关闭调压阀并保持 T_2 秒, T_2 秒后再关闭换向阀 2; 若大于 S , 则直接打开换向阀 2 关闭调压阀 T_2 秒, T_2 秒后再关闭换向阀

2. 调压阀关闭功能模块原理如图 3 所示, 根据控制对象的不同, 分为主调压阀关闭功能模块 D 和引射调压阀关闭功能模块 E。

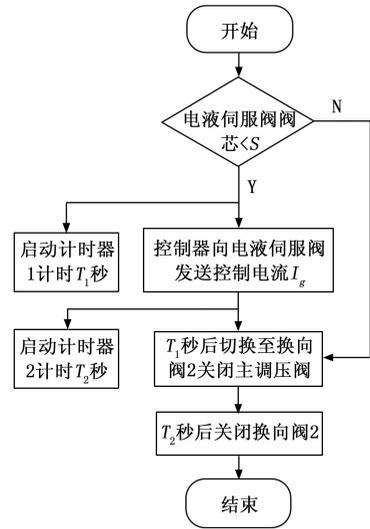


图 3 调压阀关闭功能模块原理图

3 安全关车控制策略

根据风洞试验运行方式, 将安全关车功能模块 A、B、C、D、E 按照设计时序进行组合, 组态形成对应工况的安全关车控制策略。风洞运行方式对应调用的安全关车功能模块如表 2 所示, 当进行新工况扩展时, 可通过增加新的关车功能模块以及将各关车功能模块按照新的设计时序进行组合实现。针对风洞目前的 5 种运行方式, 现有 4 种安全关车控制策略。

表 2 风洞运行方式对应关车功能模块表

序号	运行方式	调用功能模块
1	增量引射式	ACD
2	下吹式	ACD
3	下吹吸入引射式	ABCDE
4	增量+下吹吸入引射式	ABCDE
5	增量+吸入引射式	ABCDE
...
n	新增运行方式	...

安全关车控制策略 1: 针对“增量引射式”和“下吹式”风洞运行方式的安全关车控制策略如图 4 所示, 试验过程中仅使用主调压阀, 当进行安全关车时, 若稳定段总压 P_0 大于等于设定总压 P_s , 使用主调压阀压力调节功能模块 A 将稳定段总压调节至关车总压 P_g , 若稳定段总压 P_0 小于设定总压 P_s , 使用主调压阀压力调节功能模块 A 保持稳定段当前总压; 同时使用模型回零功能模块 C 控制模型回到零位; 待模型回到零位后, 使用主调压阀关闭功能模块 D 关闭主调压阀。

安全关车控制策略 2: 针对“下吹吸入引射式”风洞运

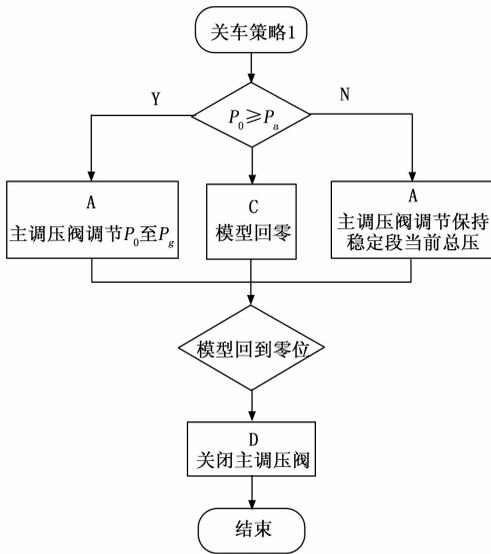


图 4 安全关车控制策略 1

行方式的安全关车控制策略如图 5 所示, 试验过程中同时使用主调压阀和引射调压阀, 当进行安全关车时, 若稳定段总压 P_0 大于等于设定总压 P_s , 使用主调压阀压力调节功能模块 A 调节稳定段总压 P_0 至关车总压 P_g , 若稳定段总压 P_0 小于设定总压 P_s , 使用主调压阀压力调节功能模块 A 保持稳定段当前总压; 同时使用引射调压阀压力调节功能模块 B 调节集气室压力 P_1 至关车压力 P_{g1} , 使用模型回零功能模块 C 控制模型回到零位; 待模型回到零位后, 使用主调压阀关闭功能模块 D 关闭主调压阀, 待稳定段总压降至设定值 P_j 时, 使用引射调压阀关闭功能模块 E 关闭引射调压阀。

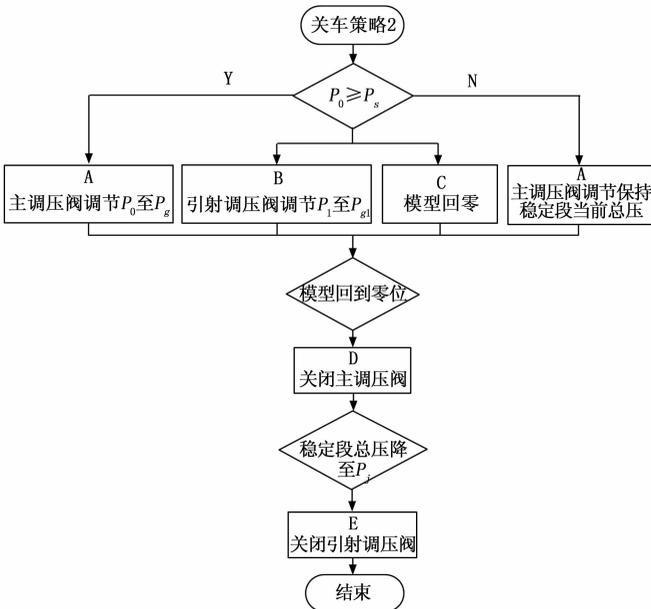


图 5 安全关车控制策略 2

安全关车控制策略 3: 针对“增量+下吹吸入引射式”风洞运行方式的安全关车控制策略如图 6 所示, 试验过程中同时使用主调压阀和引射调压阀, 当进行安全关车时, 使用主调压阀压力调节功能模块 A 调节稳定段总压 P_0 至关车总压 P_g , 同时使用引射调压阀压力调节功能模块 B 调节集气室压力 P_1 至关车压力 P_{g1} , 使用模型回零功能模块 C 控制模型回到零位; 待模型回到零位后, 同时使用主调压阀关闭功能模块 D 和引射调压阀关闭功能模块 E 关闭主调压阀和引射调压阀。

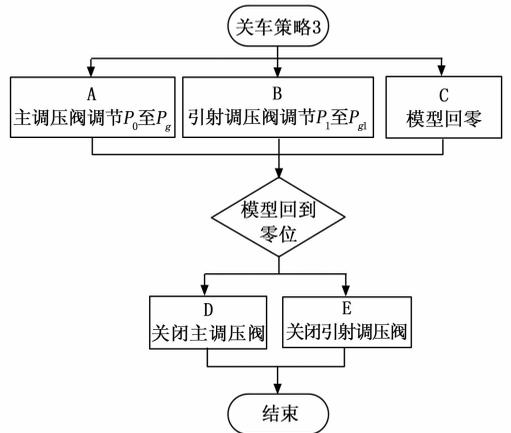


图 6 安全关车控制策略 3

安全关车控制策略 4: 针对“增量+吸入引射式”风洞运行方式的安全关车控制策略如图 7 所示, 当进行安全关车时, 使用引射调压阀压力调节功能模块 B 调节集气室压力 P_1 至关车压力 P_{g1} , 使用模型回零功能模块 C 控制模型回到零位; 待模型回到零位后, 若稳定段总压 P_0 小于判断设定值 P_z , 则使用主调压阀压力调节功能模块 A 调节稳定段总压 P_0 至判断设定值 P_z , 当稳定段总压达到判断设定值 P_z 后, 同时使用主调压阀关闭功能模块 D 和引射调压阀关闭功能模块 E 关闭主调压阀和引射调压阀; 若稳定段总压 P_0 大于等于判断设定值 P_z , 使用引射调压阀关闭功能模块 E 关闭主调压阀和引射调压阀。

4 试验调试结果与分析

对控制功能模块进行调试, 由于调压阀压力调节功能需要在试验状态下进行调试, 因此未单独进行调试, 在控制策略联调中进行相关调试。对模型回零功能进行调试, 在使用全摸机构自动工况下, 在模型迎角为 20° 时, 手动模拟发送回零信号, 模型能够自动回到 0° 并发送回零到位信号。对调压阀关闭功能进行调试, 在主调压阀开度为 200 mm 时, 手动发送主调压阀关闭信号, 调压阀能够自动关闭。

在空风洞时对 5 种安全关车控制策略进行调试, 在试验运行过程中当弯刀机构运行到 20° 时, 手动触发异常报警进行安全关车, 经调试运行, 各安全关车控制策略能够按照设计时序和逻辑进行安全关车。5 种安全关车控制策略调试得

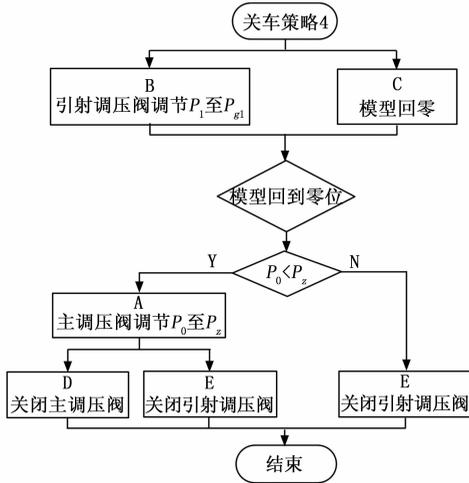


图 7 安全关车控制策略 4

到的稳定段总压曲线趋势基本一致，因此以安全关车控制策略 1 工况调试时的稳定段总压曲线图进行分析。

图 8 为进行安全关车控制策略 1 工况调试时的稳定段总压曲线图，从图中可以看到，稳定段总压稳定在目标总压 115 kPa 时，触发了异常报警，此时能够自动进入安全关车控制流程，进行稳定段总压调节，同时进行模型回零，然后自动关闭主调压阀，完成安全关车流程。图中 PLC 关车阶段稳定段总压波动最大值为 114.76 kPa，稳定段总压控制精度为 0.2%，满足压力控制精度要求。

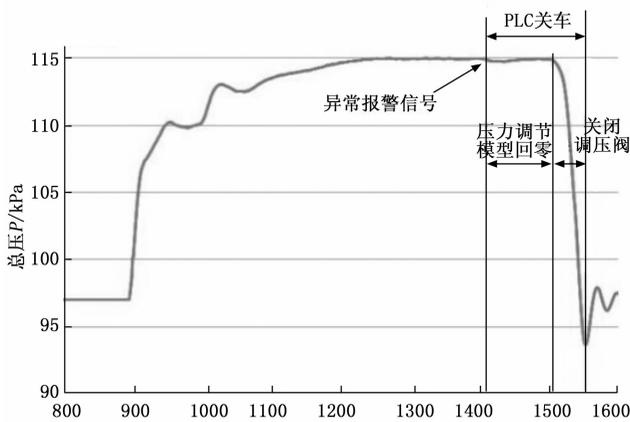


图 8 稳定段总压曲线图

5 结束语

针对某亚跨超声速风洞复杂的试验运行工况，为了保证试验运行安全，在异常情况下能够自动进行安全关车，设计了基于组态方式的风洞安全关车控制方法，采用压力调节、模型回零及调压阀关闭功能模块灵活组态形成五种安全关车控制策略，可扩展性强。经调试运行，各功能模块可以实现设计功能，安全关车控制策略可以在异常报警情况下实现压力调节，模型回零以及关闭调压阀，完成安全关车，保证风洞安全。

参考文献:

- [1] 施洪昌. 高超声速风洞测量与控制系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 谢明伟, 宋巍巍, 王 飞, 等. 基于实时以太网的某连续式风洞安全连锁系统 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (9): 50-53.
- [3] 陈海峰, 高 鹏, 阎 成, 等. 某跨超声速风洞运行监测及故障诊断系统 [J]. 兵工自动化, 2019, 38 (9): 35-38.
- [4] 陈海峰, 熊 波, 阎 成, 等. 0.6 米跨超声速风洞安全连锁控制系统研制 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (8): 69-73.
- [5] 邓章林, 贾 霜, 阎 成. 基于 EtherCAT 和 LabVIEW 的风洞安全连锁及状态监测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 14-18.
- [6] 褚卫华, 林辰龙, 谢明伟. 0.6 m 暂冲式跨超声速风洞控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 69-73.
- [7] 熊 波, 林学东, 杨 洋, 等. 2 m 超声速风洞冲击载荷抑制方法研究 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (11): 35-38.
- [8] 侯良学, 崔晓春, 陈志敏. 环状缝隙调压阀的一种设计方法和特性计算 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31 (6): 1005-1009.
- [9] 李 哲, 魏志军, 张 平. 调压阀内流场数值模拟及动态特性分析 [J]. 北京理工大学学报, 2007, 27 (5): 390-394.
- [10] 李 哲, 魏志军, 张 平. 自力式调压阀变开度流场及特性分析 [J]. 推进技术, 2008, 29 (5): 622-626.
- [11] Lafond A. Numerical simulation of the flowfield Inside a Hot-Gas Valve [R]. AIAA-99-1087, 1999.
- [12] 陈 旦, 杨孝松, 李 刚, 等. 连续式风洞总压和调节阀相关性研究及其应用 [J]. 西北工业大学学报, 2014, 28 (3): 139-141.
- [13] 黄知龙, 徐大川, 张国彪. 大型暂冲式风洞调压阀设计与特性实验 [J]. 实验流体力学, 2012, 26 (6): 87-90.
- [14] 周海涛, 周建华, 杭小宇. 基于自适应模糊 PID 控制方法的研究 [J]. 机械工程与自动化, 2014, 28 (3): 139-141.
- [15] 张 奎, 雷 勇. 无刷直流电机智能 PID 控制系统建模与仿真 [J]. 测控技术, 2015, 34 (4): 81-84.
- [16] 杨海滨, 张 伟, 罗承友, 等. 模糊控制在风洞主气流压力自动调节系统中的应用 [J]. 兵工自动化, 2015, 34 (4): 39-42.
- [17] Fan Z, Xiao W, Jiong S. Extended state observer based fuzzy model predictive control for ultra-supercritical boiler-turbine unit [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118 (25): 90-100.
- [18] Savran A. A multivariable predictive fuzzy PID control system [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13 (5): 2658-2667.
- [19] 王 晗, 郭 奇, 孟繁哲, 等. 预测模糊 PID 控制在常减压装置中的试验研究 [J]. 控制工程, 2020, 27 (9): 1495-1501.
- [20] 魏秋月, 王文庆. 大滞后系统模糊自适应 PI-Smith 控制 [J]. 自动化与仪表, 2011, 26 (4): 27-30.