

# 基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统 加热气流模拟软件设计

杨立英, 刘晓敏

(吉林大学 应用技术学院, 长春 130022)

**摘要:** 目前设计的自由射流风洞系统加热气流模拟软件测量得出的气流面受力值容易发生耦合共振, 导致测量流量误差较大; 为解决上述问题, 基于 LabVIEW 设计一种新的自由射流风洞系统加热气流模拟软件, 软件程序包括自由射流风洞系统加热气流流量调节、加热气流时序控制、气流模拟软件等, 通过与采集节点的配合完成数据采集、处理、分析等工作; 利用 LabVIEW 技术, 在程序软面板显示加热气流压力、增益频率等数据, 直观地表现加热气流的压力大小以及变化; 根据加热气流模拟软件, 简化开发测试以及控制系统的程序, 使软件调试过程更加简单, 容易操作, 实现了软件测试程序以及控制程序流程开发的平台化和通用化; 实验结果表明, 基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件能够减少气流面受力值耦合共振, 测量误差在 0.2% 以内, 实现自由射流风洞系统加热气流的准确模拟。

**关键词:** LabVIEW; 自由射流风洞; 加热气流; 模拟软件

## LabVIEW-based Design of Heating Air Flow Simulation Software for Free Jet Wind Tunnel System

YANG Liying, LIU Xiaomin

(College of Applied Technology, JiLin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The current design of the free-jet wind tunnel system heating air flow simulation software measured the force value of the airflow surface is prone to coupling resonance, resulting in a large error in the measurement flow. In order to solve the above problems, a new free jet wind tunnel system heating air flow simulation software is designed based on LabVIEW. The software program includes free jet wind tunnel system heating air flow adjustment, heating air sequence control, air flow simulation software, etc., through and acquisition node cooperate to complete data collection, processing, and analysis. Using LabVIEW technology, data such as heating air pressure and gain frequency are displayed on the program soft panel, and the pressure and changes of the heating air flow can be visually displayed. According to the heating airflow simulation software, the program of the development, testing and control system is simplified, the software debugging process is simpler and easier to operate, and the platformization and generalization of the development of the software test program and the control program flow are realized. The experimental results show that the LabVIEW-based free jet wind tunnel system heating air flow simulation software can reduce the coupling resonance of the force value of the air flow surface, and the measurement error is within 0.2%, realizing the accurate simulation of the free jet wind tunnel system heating air flow.

**Keywords:** LabVIEW; free jet wind tunnel; heated air flow; simulation software

## 0 引言

基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件需要通过大量的程序测试其功能的有效性和可靠性, 在具体实验过程中, 风洞为发动机提供高速运转的气流以此实现模拟软件正常运行的状态, 为了更进一步分析自由射流风洞系统的性能, 本文采用了 LabVIEW 技术<sup>[1-2]</sup>。LabVIEW 是一种编程语言, 其图形编程能力强, 可视化编程环境良好, 能够实现风洞的温度、湿度、流量等数据清晰显示, 与其它自由射流风洞系统软件不同的是, LabVIEW 能够充分实现用户的特殊需求, 并且可进行复杂的算法

分析<sup>[3]</sup>。

自由射流风洞系统加热气流模拟软件能够与各种控制器相连, 通过工具包装拓展其性能从而加快设计进度, 采用数据保存与监测模块, 实现软件控制界面的搭建, 基于 LabVIEW 技术, 应用于各种类型的系统软件平台。自由射流风洞系统加热气流软件不管是在调试阶段或者是应用阶段, 需要利用实验数据参数、算法, 实现对系统的扩充, 例如增加程序设计步骤、调整试验算法、增加主界面通道、读取通讯 PLC 地址、连接系统客户端等。

### 1 自由射流风洞系统加热气流流量调节

自由射流风洞的核心是加热器, 在运行时需要恒定温

收稿日期: 2021-02-09; 修回日期: 2021-03-24。

作者简介: 杨立英(1971-), 女, 吉林榆树人, 博士, 副教授, 主要从事计算机仿真与控制方向的研究。

引用格式: 杨立英, 刘晓敏. 基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 156-160.

度、湿度、酒精以及有氧浓度的合适配比, 在热气以及真空的环境下, 加热气流流量需要调节到目标值以便实验的顺利进行<sup>[4]</sup>。气流加热器如图 1 所示。

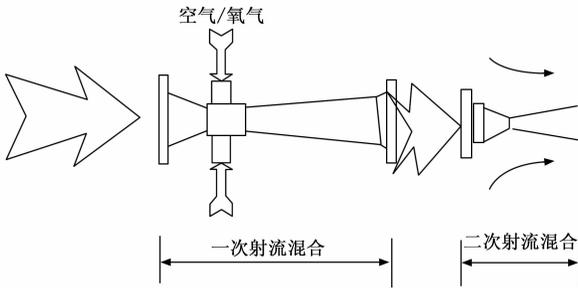


图 1 气流加热器

与固定流量的孔板型风洞不同的是, 自由射流风洞在运行时使用大型调节阀, 使加热气流流量满足系统自由射流风洞系统软件的需求, 可调节范围控制在 3 125.4~6 578 km/h, 高度 0~20 km。大型调节阀在系统软件运行时存在延迟以及个体差异, 在某些情况下出现线性奇异点, 所以在设计自由射流风洞系统软件时, 它的控制方案要优先考虑设置开度, 从而使加热气流流量接近标准值, 进行 PID 调节, 在调节过程中, 由于阀门的非线性奇异点, 对 PID 进行参数调节<sup>[5-6]</sup>。

分析自由射流风洞系统加热气流的内部流量, 建立数学模型, 计算阀门开度, 在调节阀冷吹实验中, 得到加热气流流量以及阀门开度、加热气流流量压力, 湿度和加热器面积的数据参数, 根据加热气流流量模型计算。计算公式如公式 (1) 所示:

$$K = acv^5 + bcv^4 + acv^3 + dcv^2 + ecv + fcv = 2P_0 > (P_0 - P_1) \quad (1)$$

其中:  $K$  表示计算得到的阀门开度;  $P_0$  表示自由射流风洞系统加热气流的内部压力;  $a, b, c, d, e, f$  表示不同流量数据阶的拟合多项式系数;  $v$  表示气流速度;  $P_1$  表示自由射流风洞系统加热气流的原始气压;  $C$  表示自由射流风洞系统加热气流的气流流量。原始气压和内部压力满足公式 (2):

$$\begin{aligned} True &= \sqrt{\frac{T}{(P_0^r - P_1^r)}} Q_m a \times 1.42 \\ False &: \frac{\sqrt{T}}{P_0} Q_m a \times 1.42 \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $Q_m$  表示目标所对应的空气流量。

根据公式 (1) 和公式 (2) 得到空气气流和气压之间的关系:

$$Q_m a = 0.042 \frac{P_1 A_1}{1.293 \sqrt{T}} \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{Q_m \sqrt{T}}{A_s \times 0.042} \quad (4)$$

自由射流风洞系统加热气流的流量控制效果如图 2 所示。

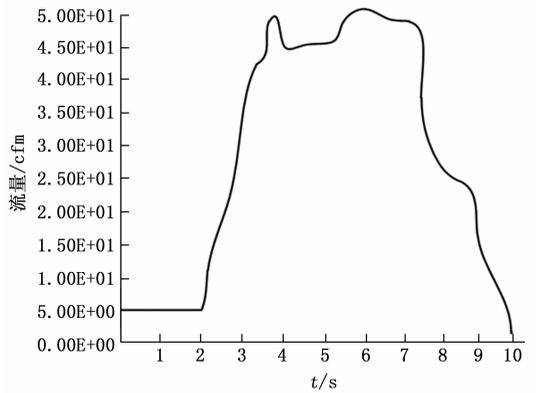


图 2 自由射流风洞系统加热气流的流量控制效果

根据图 2 可知, 加热气流被控流量在开始时迅速达到标准范围, 虽然存在一定的误差, 但 PID 将加热气流流量稳定在标准值, 以此实现了预期的效果<sup>[7]</sup>。

## 2 自由射流风洞系统加热气流时序控制

在设计自由射流风洞系统软件时, 编辑主界面程序使用的语言不同, 自由射流风洞需要频繁改变加热器以及控制时序的数据参数, 主控软件功能依赖于测试器执行, 扩充系统的操作功能, 编辑非线性流程序列<sup>[8-9]</sup>。得到的自由射流风洞系统加热气流时序如图 3 所示。

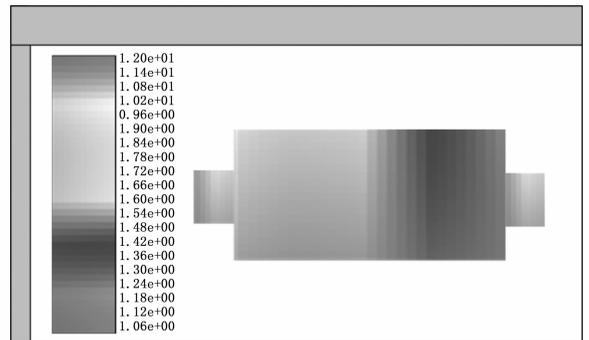


图 3 自由射流风洞系统加热气流时序

自由射流风洞系统在每个操作步骤需要配置开度动作、PID 计算方法、读取通信地址、调节条件限制等, 对预先判断的状态进行跳转, 使复杂流程结构实现并行, 编辑过程中的时序序列以图形化的形式进行。实验开始时进行高压预冷, 操作系统复位、液氧复位、水系统复位和主气路复位, 编辑触发中止, 限定酒精预调以及报警线程<sup>[10-11]</sup>。气流时序程序执行过程如图 4 所示。

## 3 基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件

LabVIEW 是一种基于 C 语言的软件开发辅助工具, 可用于数据采集、数据分析、数据显示等, 它的框图程序相当于一种源代码, 在编辑程序后, 系统才能正常运行。在设计自由射流风洞系统软件时, LabVIEW 实际上主要对各

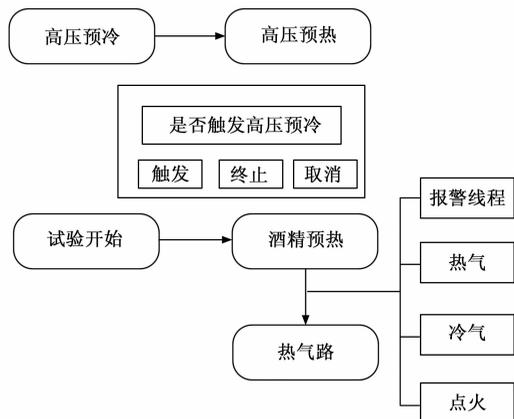


图 4 气流时序程序执行过程

个节点、端口参数和线路进行实时控制，对模拟仪器进行编程，操纵前面板上的输入和输出数据，控制面板上会自动生成对应的节点构成功能模块<sup>[12-14]</sup>。在 LabVIEW 程序中为了显示功能模块，通常需要拖动程序窗口的子模板将不同程序按照不同工具连接起来，加热气流流量的数据采集、处理、保存功能由控制模板调节控制，不同功能模块由子程序连接，以便完成数据的传送和处理。LabVIEW 以多种线型不同颜色代表设计的程序类型，如果要查询程序框图中的数据参数，可在执行程序前点击数据流动按钮，实现对数据流动的实时跟踪。

基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件工作流程如图 5 所示。

如图 5 所示，自由射流风洞系统加热气流模拟软件工作流程首先要确认模拟参数是否正常，然后采集自由射流风洞系统加热气流数据，通过历史数据对其进行相关信息检索，并显示实时曲线图，实现对自由射流风洞系统加热气流的模拟。

### 3.1 加热气流测试

在具体了解测试程序后，需要进行试验的下一步，同时重新命名保存文件的名字以及切换路径，之后按照步骤进行加热气流测试<sup>[15-17]</sup>。加热气流测试程序如图 6 所示。

在测试时，选择自由射流阀门双管压力流量，测试程序与流程同步进行，自由射流风洞系统加热气流模拟软件程序的前面板在进行加热气流测试前需要进行初始化，寻找数据处理所需要的内存空间，处理后保存数据。对测试程序输入端输入的数字信号进行滤波处理，然后设置转向、流量、压力等测试信号，测试完毕后对其进行实时控制，在设置控制信号结束后，各类传感器在检测时采集的物理量由自由射流风洞系统软件自动输入到工控机内部，并且在编辑程序的前面板上显示出来。如果检测出的控制信号满足实验要求，点击编辑程序软面板上的“测量”按钮，对实验过程中测量出来的各类数据进行采集，在同一种开度下，通过改变转角信号来改变压力信号。采集数据结束

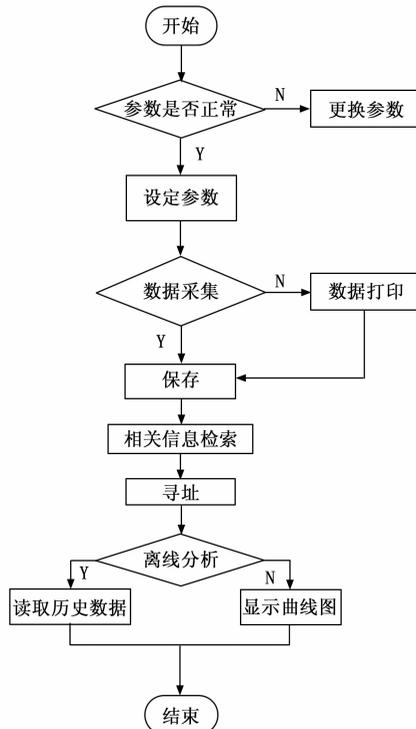


图 5 基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件工作流程



图 6 加热气流测试软件程序

后，在主界面上点击“储存”按钮，数据就会按照之前设置的形式保存在硬盘上，在控制信号过程中采集到的数据成为软件智能分析数据的依据，加热气流测试程序完成<sup>[18-20]</sup>。

### 3.2 加热气流控制

启动加热气流控制程序后，根据软件程序要求确定控制程序波形的合成方式，之后进行加热气流控制程序设计。在自由射流流量特性控制实验中，需要控制 3 个软件程序，以控制程序 1 为例，首先对控制程序前面板进行初始化，对输入端输入的数字信号进行滤波处理，然后对输出的单一波形进行合成使它成为满足实验需要的控制信号波形<sup>[21]</sup>。加热气流控制程序如图 7 所示。

当程序输出单一波形时，软件程序主界面上的有线输出控制信号会转变成无线输出控制信号，这时工控机将会

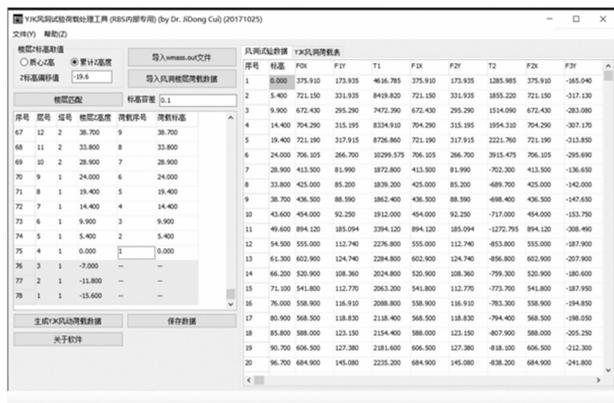


图 7 加热气流控制程序软件程序

输出合成波形控制信号, 用户在选择输出控制信号长度时需要设定时间以及周期顺序, 以便对加热气流进行控制。软件程序主界面输出合成波形时, 需要对合成波形的频率、压力、幅度偏移、转角偏移、加热气流进行设置, 设置完成后点击软件程序上的“预览”按钮, 浏览设置好的各类流量值以及控制界面输出的波形图。当加热气流模拟软件程序软面板不能清晰显示预先设置的波形图时, 需要对加热气流合成波形进行转换, 直到软件程序能够正常工作为止。合成波形中的增益随着波形的变化会发生小幅度变化, 需要按软件程序中的“开始输出信号”按钮来调节控制波形, 然后对被控对象进行设定和调节, 在软件程序滤波处理中, 需要在软件程序内部设计 LIP 语言编辑, 以保证控制信号在输出过程中不失真, 加热气流控制程序编辑完成。

### 3.3 加热气流数据分析

在加热气流控制程序编辑完成之后, 需要对编辑过程中产生的加热气流数据进行分析处理, 处理数据时需启用数据分析程序, 选择需要分析的加热气流数据, 分析结束后将数据保存在云端存储软件中。读取已经保存的加热气流分析数据文件, 通过加热气流模拟软件程序自动筛选数据文件类别, 统计出加热气流数据文件中的各种存储信息, 根据用户的要求提取数据文件例如: 文件域名、增益参数、频率幅值以及波形曲线等等。然后需要更细致分析并选择哪条波形曲线与加热气流数据相拟合, 最终分析的结果会通过软件程序的面板显示出来。如果加热气流数据符合计算的标准值, 可按自由射流软件程序前面板上的“输出数据”按钮, 自由射流风洞系统加热气流模拟软件会自动识别出所需要的数据文件, 此数据文件会以报告的形式拟合到软件程序中去。当软件程序中的所有拟合流程完成后, 按“输出结果”按钮, 软件程序将符合标准的数据文件以报告的形式显示出来, 并存储在软件硬盘当中。

## 4 实验结果与分析

为了测量本文提出的基于 LabVIEW 的自由射流风洞系

统加热气流模拟软件的有效性, 与传统的基于加热均匀性的自由射流风洞系统加热气流模拟软件、基于回归分析法的自由射流风洞系统加热气流模拟软件进行实验对比。

设定实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

自由射流风洞固有频率阶	自由射流风洞固有频率
1	15.369 Hz
2	16.871 Hz
3	21.556 Hz
4	24.336 Hz
5	27.842 Hz

流量测试系统如图 8 所示。

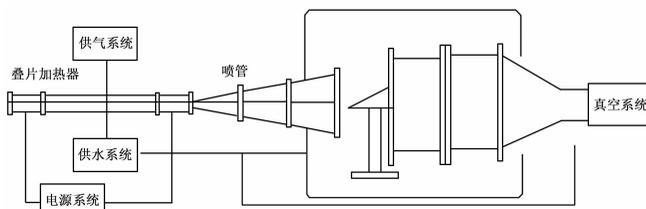


图 8 流量测试系统

得到的输入工控机电压气流面受力值如图 9 所示。

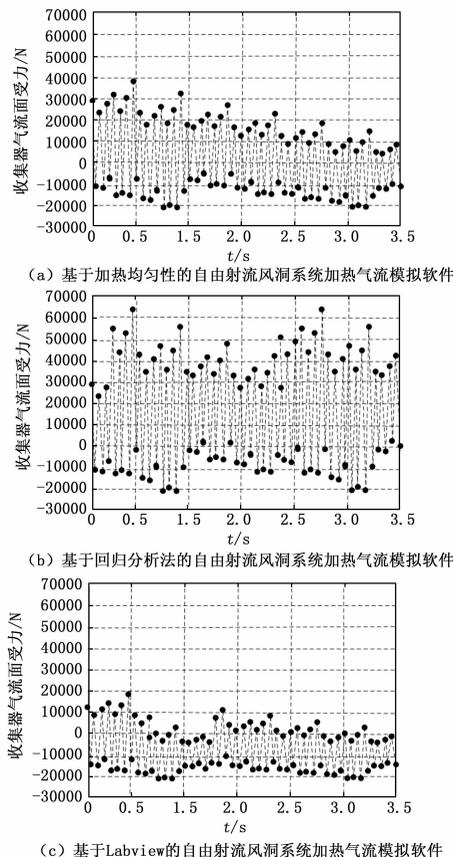


图 9 输入工控机电压气流面受力值

测量误差实验结果如表 2 所示。

根据图 9 及表 2 可知, 本文提出的基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件的测量误差小于传统软件, 测量误差在 0.2% 之内, 满足提出的精度要求。

表 2 测量误差实验结果

软件	测量精度/%
基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件	0.18
基于加热均匀性的自由射流风洞系统加热气流模拟软件	0.25
基于回归分析法的自由射流风洞系统加热气流模拟软件	0.46

基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件程序添加各类嵌套功能, 能够完成各个段点之间的数据采集、频率的并行时序、客户端之间的通信、重叠自定义缓冲。自由射流风洞系统软件程序优化过程中, 主控机将加热气流数据板卡从程序主界面中缓存溢出, 模拟软件工作流程出现时序偏差 3~100 ms、加热气流模拟软件的软面板更新数据缓慢、CPU 占用高、加热气流数据误差大等问题。自由射流风洞系统加热气流模拟软件程序优化首先要解决以上出现的问题, 所以需要将加热气流模拟软件功能进行分别测试, 查找出现以上问题的原因以及确定各个系统功能的 CPU 占用率, 分析引起加热气流数据误差大的因素, 对软件功能的资源消耗点进行系统优化。以数据采集优化为例, 在编辑 PL 系统软件队列时序时, 在时序地址上传数据的速率低, 若换成 PL-HIOP 能够加快传输数据的速率, 进而可以提高效率, 增益频率采集节点少, 但数据库中的数据池可以升频传输以此来显示增益频率中的节点, 减少网络传输过程中消耗的资源。在加热气流模拟软件优化时, 为了提高加热气流数据的传输效率, 可以采用合理的数据结构, 用合成数据组替换单点节点作为存储数据的数据库, 降低自由射流风洞系统的资源消耗, 减少编辑程序时的动态调用, 加快控制程序执行测试任务的速度。

## 5 结束语

本文详细分析了基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件的组成, 介绍了一种全新的 LabVIEW 编程技术, 软件程序设计采用了 C 语言编程思想, 软件主界面清晰, 简单易学且编程方便, 能够长时间保存自由射流风洞系统传输中的关键数据, 对基于 LabVIEW 的自由射流风洞系统加热气流模拟软件的开发和研究具有重要意义。

### 参考文献:

[1] 谢强, 虞择斌, 高鑫宇, 等. 某高速自由射流风洞扩压器设计与分析 [J]. 机械设计, 2019, 36 (11): 107-113.  
 [2] 陈鹏飞, 吴锋, 徐全勇, 等. 可变面积的非对称姿态模拟射流喷管设计与仿真 [J]. 机械工程学报, 2018, 54 (2): 184

-190.  
 [3] 谢永康, 林雅文, 朱广飞, 等. 基于加热均匀性的射频干燥系统结构优化与试验筒 [J]. 农业工程学报, 2018 (5): 248-255.  
 [4] 谭国宾, 胥福顺, 杨钢, 等. 轧制油回收设备中布风系统优化模拟研究 [J]. 工业加热, 2017, 46 (4): 55-57.  
 [5] 周猛, 付东翔. 基于回归分析法的汽车散热试件风洞测控系统 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (15): 93-97.  
 [6] 李小平, 唐敏, 肖虹. 加热器燃料对冲压发动机模拟来流的影响 [J]. 火箭推进, 2019, 45 (6): 45-52.  
 [7] 张晨, 方慧, 程瑞锋, 等. 基于风洞系统的生菜空气动力学研究 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 24 (12): 96-103.  
 [8] 秦建华, 凌忠伟, 王博文. 0.6 米暂冲式跨超声速风洞流场控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 50-54.  
 [9] 刘哲, 尹猛, 徐志刚, 等. 一种新型跨声速风洞捕获轨迹系统的设计与分析 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (1): 90-94.  
 [10] 杜强, 张礼达, 余波. 大型山地风电场建设对局地气候影响的数值研究 [J]. 大电机技术, 2019, (2): 71-74.  
 [11] 李亦凡, 张卫君, 邱洋, 等. 基于一体化平台的蓄能电厂仿真技术研究 [J]. 水电站机电技术, 2019, 42 (12): 38-40.  
 [12] 高川, 周波, 蒋婧妍. 基于 CompactRIO 的风洞喷管执行器位置监测系统开发 [J]. 自动化与仪器仪表, 2020, 243 (1): 80-82.  
 [13] 牛彦泮, 徐惊雷, 许保成, 等. 并联 TBCC 排气系统流场结构数值模拟及实验研究 [J]. 推进技术, 2017, 38 (12): 2686-2691.  
 [14] 罗昌俊, 马永一, 明丽洪. 基于隔离耦合的风洞群集中监测系统设计与实现 [J]. 测控技术, 2019, 38 (11): 29-32.  
 [15] 顾艺, 车兵辉, 曹宇, 等. 面向风洞群的装备自主式维修保障系统框架设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 171-175.  
 [16] 谢晴, 郭晓亮, 谢军龙, 等. 基于气体动力学格式的自由射流数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2019, 40 (7): 48-52.  
 [17] 曾星, 顾光武, 张文清, 等. 风洞通用压力扫描阀综合数据采集系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 211-215.  
 [18] 姜一通, 田宁, 肖虹, 等. 高温风洞气氧/煤油燃烧加热装置设计与试验 [J]. 推进技术, 2020, 41 (6): 16-22.  
 [19] 朱浩, 张冰冰, 余亦甫. 膜片非理想打开行为对自由活塞激波风洞运行的影响 [J]. 实验流体力学, 2020, 34 (1): 55-59.  
 [20] 王鹏, 金鑫. 尖锥前体飞行器 FADS 系统的人工神经网络建模及风洞试验研究 [J]. 实验流体力学, 2019 (5): 57-63.  
 [21] 曹旭, 黄明星. 充气式再入与减速系统用柔性热防护材料高焓风洞试验研究 [J]. 航天器环境工程, 2020, 37 (2): 184-190.