

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220781-12

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220781

# 涡轮发动机供气系统流量和压力的控制方案

薛永建<sup>1,2</sup>, 刘高文<sup>1</sup>, 马佳乐<sup>1</sup>, 白 杨<sup>1,3</sup>, 龚文彬<sup>1</sup>, 林阿强<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129;

2. 明阳智慧能源集团股份公司, 广东 中山 528400;

3. 中国船舶集团有限公司 第七〇五研究所, 西安 710075)

**摘 要:** 开展了供气系统质量流量(简称流量)和压力的控制方案研究, 提出采用多元线性回归预测和自适应比例调节的改进控制方法, 对实验台各流路的电动阀门集成控制。设计一台测量控制系统操作台, 采用西门子 programmable logic controller(PLC)作为主控制器, 可实现对 46 台电动阀门的自动控制, 并且保留远程手动控制功能。该控制方式可根据不同电动阀门调节速度改变增加幅度, 使得阀门调节更加平顺。基于实验台的管路情况, 该控制方式相较于常规 proportion integral differential(PID)控制, 实验台各气路压力和流量超调量减少 20% 以上, 调节时间缩短 40 s 以上, 对于大流量工况, 稳态性能可提高 2% 以上。

**关 键 词:** 涡轮发动机; 预旋供气系统; 气路耦合; 阀门调节; 线性回归; 自适应比例调节

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

## Control strategy of mass flow rate and pressure in an air supply system of gas turbine engine

XUE Yongjian<sup>1,2</sup>, LIU Gaowen<sup>1</sup>, MA Jiale<sup>1</sup>, BAI Yang<sup>1,3</sup>, GONG Wenbin<sup>1</sup>, LIN Aqiang<sup>1</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Ming Yang Smart Energy Group Limited, Zhongshan Guangdong 528400, China;

3. The 705 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** The mass flow rate and pressure control scheme of the gas supply system was studied, and the improved control method of using multiple linear regression prediction and adaptive proportional regulation was put forward to integrate the control of the electric valve of each flow path of the experimental platform. The design of a measuring control system operation table, using Siemens programmable logic controller (PLC) as the main controller, can realize automatic control of 46 electric valves, and retain the remote manual control function. The control mode can be adjusted according to different electric valve speed change/increase amplitude, making the valve adjustment more smooth. Based on the pipeline condition of the experimental platform, compared with the conventional proportion integral differential (PID) control, the control mode can reduce the overshooting of the pressure and mass flow rate of each gas path of the experimental platform by more than 20%, shorten the adjustment time by more than 40 s, and improve the steady-state performance by more than 2% for the large mass flow rate condition.

**Keywords:** gas turbine engine; pre-swirl air supply system; pneumatic coupling; regulating valve; linear regression; adaptive proportion adjustment

收稿日期: 2022-10-10

基金项目: 陕西省自然科学基金(2023-JC-YB-305); 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-A-II-007-001)

作者简介: 薛永建(1997—), 男, 硕士, 主要从事 PLC 自动化集成控制和发动机空气系统方面研究。

通信作者: 刘高文(1974—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事发动机空气系统和传热分析方面研究。E-mail: gwliu@nwpu.edu.cn

引用格式: 薛永建, 刘高文, 马佳乐, 等. 涡轮发动机供气系统流量和压力的控制方案[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220781. XUE Yongjian, LIU Gaowen, MA Jiale, et al. Control strategy of mass flow rate and pressure in an air supply system of gas turbine engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220781.

提高涡轮前温度及增压比是改善燃气涡轮发动机功率输出和热效率的重要途径<sup>[1]</sup>。针对涡轮温度远高于转子部件的材料许用温度的问题,涡轮转子叶片的冷却至关重要<sup>[2]</sup>。预旋供气系统是二次空气系统的关键组成部分,负责为涡轮转子叶片提供高品质冷气。因此,开展对燃气涡轮供气系统流量和压力的控制方案研究是预旋供气系统性能改进实验中不可缺少的一部分。

燃气涡轮预旋供气系统流动温变实验中一般同时存在着多个被控变量和多种操作变量方法,这种多变量控制系统存在一定程度的耦合,这就为多变量控制系统的设计增加了不小的难度<sup>[3]</sup>。在进行多气路相互耦合的测量控制系统设计时,需要确定各气路之间的耦合关系,将各气路视为单变量系统,根据电动阀门的调节特点,设定更加高效、精确的调节方法<sup>[4]</sup>。根据系统控制需求,王素珍等<sup>[5]</sup>针对一类连续搅拌反应釜,提出了基于扩张状态观测器和反步法的自适应控制方法,设计 continuous action reinforcement learning automata (CARLA) 算法快速搜索控制器参数最优值,提升了控制品质。姜崑等<sup>[6]</sup>提出一种能够使系统输入输出约束的基于模糊模型的“准-最小-最大”预测控制方法,该方法可以较好地减小系统超调,改善系统的动态性能。韩贺永等<sup>[7]</sup>建立位置压力非线性自适应双闭环控制,通过李雅普诺夫函数算法的稳定性探索闭环系统的稳定性,该方法使得控制误差值明显减小。刘晓宇等<sup>[8]</sup>针对高速列车停车过程不确定性阻力干扰,采用鲁棒模型控制方法,提高停车的舒适度。姜庆丰等<sup>[9]</sup>采用模糊 PID 控制的方法,通过控制堆芯的功率来实现对液态熔盐堆的燃料熔盐出口温度的控制,基于能量守恒原理建立堆芯非线性模型,采用微扰理论对该模型进行线性化。采用模糊 PID 控制器设计堆芯的功率控制系统,能够减小系统响应的上冲幅度和超调量,并且能够实现较好的跟踪效果。张亚军等<sup>[10]</sup>针对一类具有强非线性、机理不清且动态特性随不同运行条件而变化的复杂过程,提出未建模动态及其未知增量补偿驱动的非线性 PID 控制方法。可见,系统参数自动化控制方法对系统运行的准确性和可靠性具有重要作用。

航空发动机流动传热的实验对参数控制测量和精度要求高。本文重点以涡轮空气系统中关键的预旋供气系统存在复杂的控制问题为研究对象。预旋供气系统流动温变实验要求控制精度较高,

通常存在的问题有:首先,针对转动参数测量的数据记录仪采集时间有限,要求控制系统具有反应迅速、稳态误差较低的特点,然而单独采用 PID 控制方式调节时间长,超调量较大,不能较好满足实验要求;其次,流动温变实验台的电动阀门位置分散,管路复杂,多条管路相互耦合,采用常规的控制方法难以达到良好的控制效果;另外,高速电动机通过配电间空气开关进行切换,操作麻烦,转速调节需要调节变频器远程控制面板旋钮。因此,开展预旋供气系统流量和压力的控制方案实验研究显得尤为重要。

## 1 系统结构及控制系统设计

### 1.1 系统结构

燃气涡轮预旋供气系统能够显著降低冷却气流的相对总温,为高温涡轮转子部件提供满足流量和压力需求的高品质冷气,因此开展预旋供气系统的实验研究是评估涡轮动叶供气品质的有效途径<sup>[11]</sup>。本文以多进多出预旋供气系统实验台为研究对象,如图 1 所示,该系统主要由预旋喷嘴、预旋腔、接受孔、盖板腔、供气孔以及内外封严腔组成。实验台采用轴端中心进气的方法,气流先流入进气腔,然后通过预旋喷嘴膨胀加速后产生高品质的冷气,冷气依次经过预旋腔、接受孔、盖板腔和供气孔,最后从出气腔排出。图中  $m_0$  是主进气流,  $m_1$  是内封严气流,  $m_2$  是外封严气流,  $m_3$  是轴向力气流。

预旋供气系统多平台控制的整体流路系统示意图如图 2 所示,该系统共计 6 个实验台。1#实验台为预旋实验台,2#实验台为流动温变实验台,3#实验台为转动孔实验台,4#实验台为封严实验台,5#实验台为传热实验台,6#实验台为篦齿实验台。以上 6 个实验台主进气由电动阀门组进行控制,由于 6 个实验台不同时进行实验任务,实验段的主进气由手动阀门进行切换。

空压机组将常温空气压入大体积储气罐中,根据实验工况不同,气体通过不同量程的孔板流量计进入实验台,孔板流量计前后有稳压罐,减少流量计测量误差。在进行控制方案改造前,实验段的多路流量/压力调节依靠实验人员手动旋钮调节阀门,部分依靠实验人员通过仪表手动调节电动阀门开度来完成。实验过程中,需要多人进行配合作业,气路噪声大,实验环境恶劣,并且高速电动机通过变频器面板控制,增加电动机转

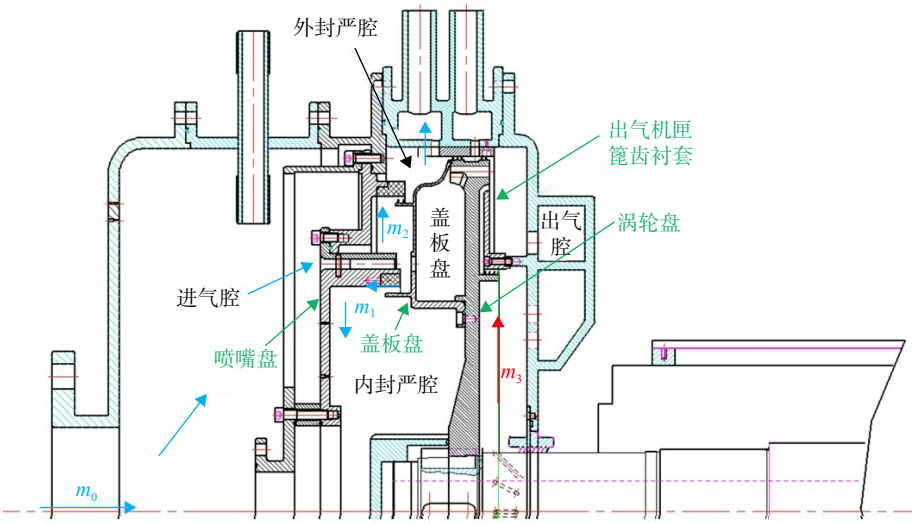


图 1 预旋供气系统流动温变实验台

Fig. 1 Pre-swirl air supply system flow temperature change test bench

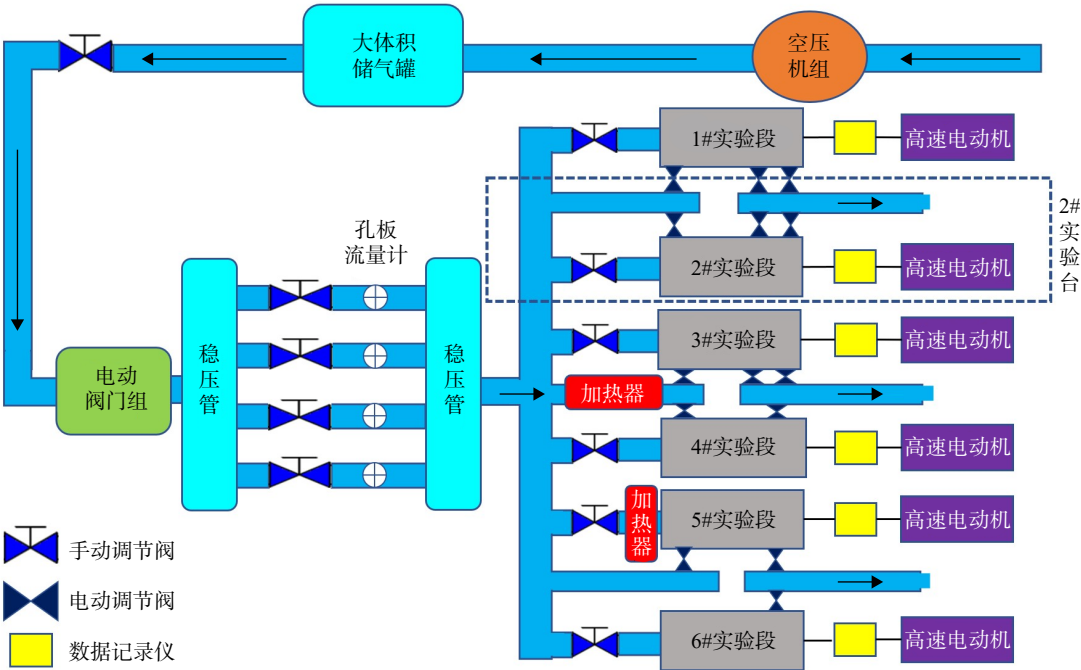


图 2 预旋供气系统多平台控制的整体流路系统示意图

Fig. 2 Overall flow-path schematic diagram of multi-platform control system for pre-swirl air supply systems

速过程需要一名实验人员不断在面板上操作，步骤麻烦。因此，迫切需要开展预旋供气系统流量和压力的控制方案实验研究。在尽量保持原有管道不变的基础上，增加电动阀门组、支路电动阀门和高速电动机控制模块等，通过 PLC 实现电动阀门对气路流量/压力的自动控制，设计一台测量控制系统操作台，实现实验工况的自动调节，具有较强的兼容性，减少实验人员的劳动强度。

预旋供气系统流动温变实验台测量控制系统主要由电动阀门控制系统、高速电动机及其冷却

控制系统组成。系统配置主要参数如表 1 所示。该测量控制系统通过组态王绘制可视化操作界面，控制 PLC 给电动阀门、变频器、调功器等设备输出控制信号，控制这些设备达到实验条件。

1.2 控制系统设计

根据各实验台的实验工况需求，测量控制实验台需要满足能够实现自动控制 24 台电动阀门，5 台 50 kW 高速电动机、一台 75 kW 变频器以及相关冷却系统等执行设备，并可以通过智能仪表进行手动远程控制，满足一定的电动阀门扩充余量。

表 1 系统配置主要技术参数

Table 1 System configuration main technical parameters

| 配套装置  | 数量/台 | 技术参数       | 数值或说明           |
|-------|------|------------|-----------------|
| 高速电动机 | 5    | 功率/kW      | 50              |
| 变频器   | 1    | 功率/kW      | 75              |
| 电动阀门  | 24   | 直径/mm      | 150, 80, 50, 30 |
| 油泵    | 1    | 功率/kW      | 7.5             |
| 水泵    | 1    | 功率/kW      | 7.5             |
| 智能控制台 | 1    | 尺寸/(m×m×m) | 3×1.3×1.6       |
| PLC   | 1    | 型号         | S7-200smart     |

该控制系统采用 STEP-7 软件编写 PLC 底层控制程序, 可实现对 24 台电动阀门的逻辑控制。通过 RS485 通讯协议与 75 kW 变频器完成实时通讯, 所有控制线路和通讯线路均采用带屏蔽的双绞线, 减少信号干扰<sup>[12]</sup>。利用组态王软件绘制可视化操作界面, 组态王数据接口完成对 PLC 控制程序对接, 简化实验人员操作步骤。利用 Visual Basic(VB)软件完成把仪表测量数据传输给 PLC 的工作, 计算机 1 通过 RS485 转 universal serial bus (USB)接口与 PLC 连接, 控制系统流程图如图 3 所示。

该系统以西门子 S7-200PLC 作为控制核心,

由电源模块、线路切换模块、仪表控制模块、安全监测模块和两台计算机组成。电源模块为西门子 PLC、控制仪表、监测模块、24 台电动阀门和计算机供电, 线路切换模块由 100 余个中间继电器组成, 通过线路切换模块可以完成对 40 余台电动阀门的手动/自动切换控制。仪表控制模块共由 12 台智能控制仪表组成, 采用 4~20 mA 控制信号对电动阀门进行控制。安全监测模块对高速电动机温度、冷却系统流量以及电动机电流等参数进行测量, 切实保护重要执行器件。采用差压变送器、压力扫描阀和孔板流量计组等设备对实验参数进行测量, 所有测量设备都进行过校准, 以保证测量结果的准确性。数据采集需要计算机为 XP 系统, 因此整个测量控制系统由两台计算机完成, 一台负责通过 MODBUS RTU(remote terminal unit)通讯协议把测量数据传送给 PLC, 另一台绘制可视化操作界面对执行器进行控制。流动温变实验台流路图如图 4 所示, 储气罐中存储 300 m<sup>3</sup> 压缩空气, 1 号和 2 号手动截止阀调节不同开度会使通过实验段管道气流有总压损失, 管道压力低于储气罐压力, 利于电动阀门调节。

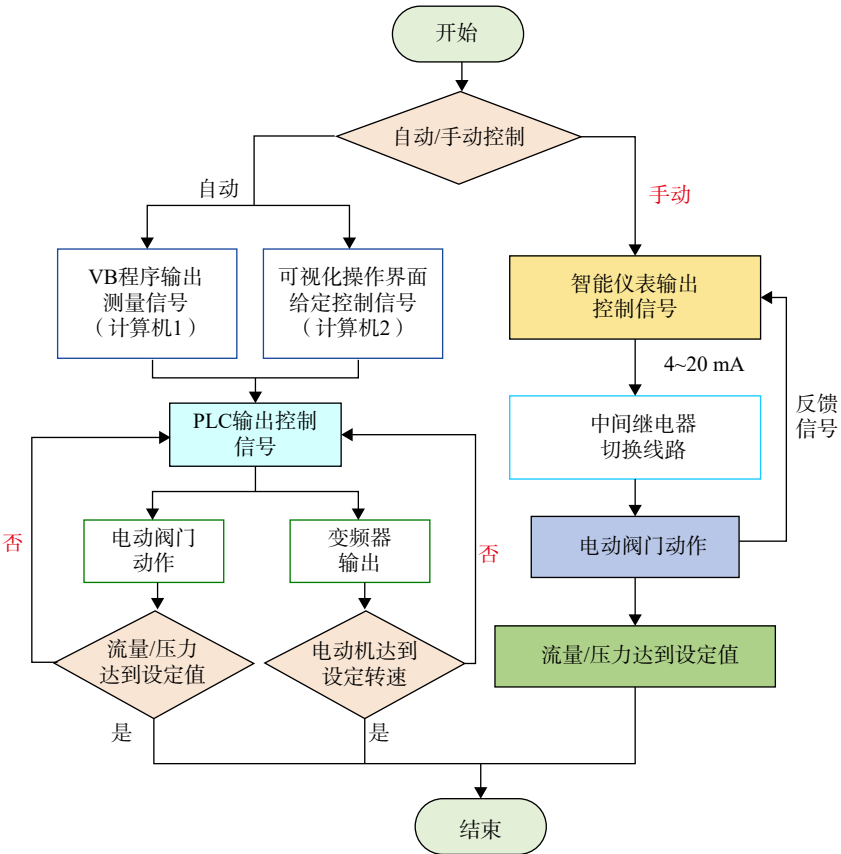


图 3 控制系统流程图

Fig. 3 Flow chart of control system

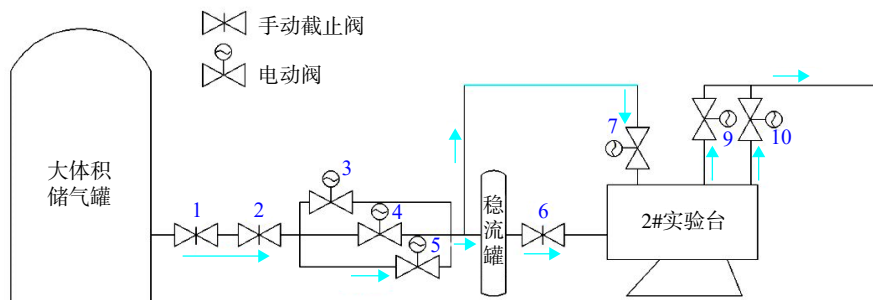


图 4 流动温变实验台流路图

Fig. 4 Flow path diagram of flow temperature variation test bench

3 号、4 号和 5 号三级电动阀门联动调节, 利于精准控制实验台主进气流量/压力, 气流通过稳流罐使气流均匀分布, 提高孔板流量计准确度。6 号阀门可对实验台进行切换, 7 号和 8 号阀门可对实验台内封严腔和外封严腔压力进行调节, 9 号和 10 号阀门可调节调节环腔压力和实验台出气口背压。

## 2 供气系统控制方案

### 2.1 供气系统流量和压力智能仪表控制

实验室现有电动阀门共计 24 台, 实验过程中并不会出现所有阀门同时使用的情况, 所以实验台设计过程中, 为了考虑扩展余量, 保留手动控制, 缩减成本, 电动阀门智能仪表控制采用复用形式, 共 12 台智能控制仪表, 可以实现对 46 台电动阀门的调控, PLC 控制线路和智能仪表控制线路走同一条线道, 通过中间继电器实现切换。电动阀门的手动远程控制区域在操作台的右侧, 仪表自上至下, 从左到右标号为 1~12 号。1 号、2 号和 3 号为主进气控制区, 该智能控制仪表可实现 3 台电动阀门联动控制, 每个仪表可复用控制两台电动阀门。4~9 号为实验台控制区, 该仪表可通过中间继电器进行实验台电动阀门切换, 每个仪表可复用控制 6 台电动阀门。10 号为出口背压控制仪表, 该仪表复用控制两台电动阀门, 11 号和 12 号仪表为备用控制仪表。

### 2.2 供气系统流量和压力控制算法设计

#### 2.2.1 线性回归预测

以燃气涡轮预旋供气系统流动温变实验台为例, 该实验台最大使用三路进气三路出气, 由于气路之间会相互影响, 主进气气路由 3 个阀门组成, 分别为 150、80、30 mm 直径电动阀门, 对应 1 号、2 号和 3 号仪表控制。由于 150 mm 电动阀门直径较大, 储气罐压力在 0.5 MPa 以上时, 阀门

开度每变化 1%, 气路流量变化大于 70 g/s, 另外两台电动阀门需要较长时间才能补偿, 将会导致其他气路流量极度不稳定, 此时应该是 150 mm 直径阀门调节到目标流量以下时停止调节, 由另外两个电动阀门进行二级微调。

在工程应用中, 电动阀门多采用 PID 调节, PID 调节具有适用范围广、调节简单的特点, 但是缩短调节时间, 系统将会出现一定的超调量, 显而易见主进气流路 150 mm 直径阀门不能接受出现超调, PID 调节过阻尼状态将会相应增加调节时间。采用常规控制方式, 电动阀门会根据设定值和反馈值进行多次粗调, 对于大直径电动阀门, 这一过程中不仅会引起过量超调, 而且影响其他气路阀门调节, 浪费大量时间。因此为了能够快速达到实验工况, 电动阀门自动控制系统采用线性回归预测和自适应比例调节的控制方式<sup>[13-15]</sup>。当储气罐压力一定时, 根据电动阀门开度和气体流量/压力的数据进行线性回归预测分析, 待实验操作时, 根据实验工况所要求实验台进气流量/压力, 可直接得到阀门初始预估开度, 然后电动阀门开到相应开度后, 根据实际值和设定值的差值关系, 电动阀门通过自适应比例调节到设定值<sup>[16-17]</sup>。

线性回归是利用数理统计中回归分析来确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法, 运用十分广泛<sup>[18]</sup>。多元线性回归模型的基本形式为

$$\hat{y} = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \cdots + \omega_n x_n + b \quad (1)$$

式中  $\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n$  是和  $x$  无关的未知参数,  $x_1, x_2, \cdots, x_n$  为自变量,  $\hat{y}$  为预测值,  $b$  为偏移量。

为了更好地进行线性预测, 现采用多次函数的形式进行线性回归。设储气罐在某一压力下, 电动阀门开度和通过管路流量的回归模型为

$$\hat{y} = \omega_5 x^5 + \omega_4 x^4 + \omega_3 x^3 + \omega_2 x^2 + \omega_1 x^1 + b \quad (2)$$

通过回归结果发现,采用五次函数进行模型预测效果更好。

损失函数  $L$  为

$$L = \sum_{i=1}^n [\hat{y}^{(i)} - (\omega_1 x^{(i)} + \omega_2 x^{(i)} + \dots + \omega_5 x^{(i)} + b)]^2 \quad (3)$$

求取损失函数最小值,需要找到一组最佳  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5, b$ 。梯度下降算法是机器学习模型训练中常用的优化算法,具有收敛速度快、运算量小等优势,因此采用梯度下降法求取损失函数最小值<sup>[19-20]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\omega, b)}{\partial \omega_1} = 2 \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)}) (-x^{(i)}) \\ \vdots \\ \frac{\partial L(\omega, b)}{\partial \omega_5} = 2 \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)}) (-x^{(i)}) \\ \frac{\partial L(\omega, b)}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)}) (-1) \end{cases} \quad (4)$$

对损失函数求偏导,得到损失函数中  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5, b$  的偏导值,然后对  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5, b$  进行初始化,初始化设定  $\omega_1=0.1, \omega_2=-0.1, \omega_3=0.1, \omega_4=-0.1, \omega_5=0.1, b=0$ ,学习率  $\eta=0.000\ 01$ 。

$$\begin{cases} \omega_1^{(2)} = \omega_1^{(1)} - \eta \frac{\partial L(\omega, b)}{\partial \omega_1} \Big|_{\omega=\omega_1^{(1)}} \\ \vdots \\ \omega_5^{(2)} = \omega_5^{(1)} - \eta \frac{\partial L(\omega, b)}{\partial \omega_5} \Big|_{\omega=\omega_5^{(1)}} \\ b^{(2)} = b^{(1)} - \eta \frac{\partial L(\omega, b)}{\partial b} \Big|_{b=b^{(1)}} \end{cases} \quad (5)$$

根据第一次初始化的值,  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5, b$  减去学习率乘以偏导数值,不断迭代,最终可求得  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5, b$  的最优值<sup>[21-22]</sup>。

储气罐压力为 0.53 MPa, 高速电动机转速为 5 000 r/min, 现以航空发动机预旋供气系统流动温变实验台为例,该实验台一般最大进气流量不超过 600 g/s, 主进气阀门 1 的开度和管道流量的关系如图 5 所示,实验数据为样本点,红色曲线为线性回归所生成预测曲线,主进气阀门 1 直径为 150 mm,该直径较大,一般最大开度只需要开到阀门直径的 13%。

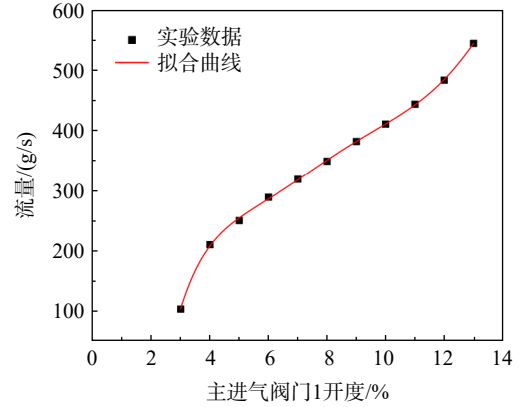


图 5 主进气阀门 1 开度和流量关系预测图

Fig. 5 Valve 1 opening of main inlet and mass flow rate relationship prediction diagram

主进气阀门 2 直径为 80 mm, 根据阀门 2 开度和管道中流量的关系生成预测曲线,如图 6 所示。

主进气阀门 3 直径为 30 mm, 由于该阀门直径较小,一般用于微调,根据该阀门开度和流量关系所生成的预测图如图 7 所示。

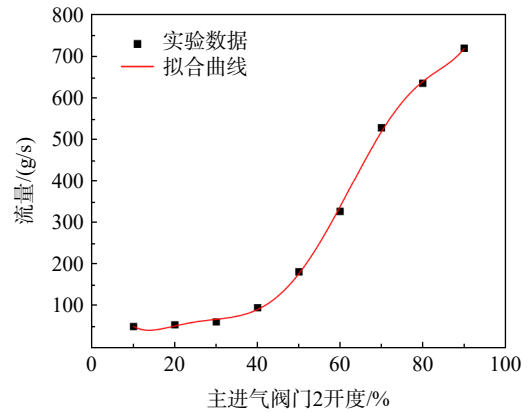


图 6 主进气阀门 2 开度和流量关系预测图

Fig. 6 Valve 2 opening of main inlet and mass flow rate relationship forecast diagram

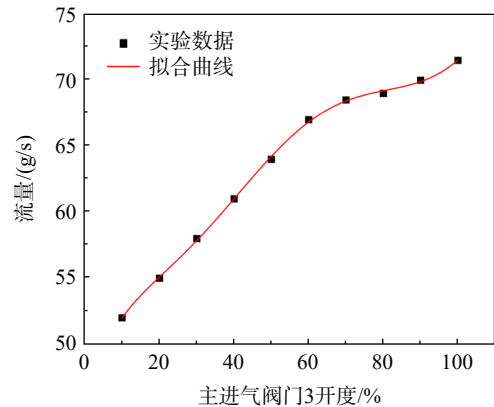


图 7 主进气阀门 3 开度和流量关系预测图

Fig. 7 Valve 3 opening of main inlet and mass flow rate relationship forecast diagram

### 2.2.2 自适应比例调节

由于电动阀门执行机构进行调节需要一定的响应时间,且实验工况要求主进气流量和设计点相差在 $\pm 4$  g/s 以内,当设计点流量在 200 g/s 以上时,电动阀门的轻微转动将会引起流量的较大波动,所以设定以下调节方式:当实际流量值和设定值相差较大时,希望电动阀门以最大速度调节,实际流量值和设定流量值趋近时,次级电动阀门缓慢调节,达到精确流量值<sup>[23-25]</sup>。因此,电动阀门控制系统需要能够满足可实现三级阀门控制调节速度不同,并且可根据不同储气罐压力状况,实验人员可根据经验设定不同调节速度,使该系统具有良好的适应性。

主管道进气口由 3 个电动阀门联动控制,出口阀门为 150 mm 直径电动阀门单独控制,点击一楼主管道和一楼出口阀启用,即可触发所在线路继电器,完成手动模式和自动模式的切换。实验人员可设定阀门的起始开度,通过设定阀门的增加幅度,可实现每秒以不同的速率给定电动阀门开度信号,根据实验人员的经验,可以更好地对电动阀门转动速率进行吻合,达到更快的调节速度。压力控制启用条件对压力控制和流量控制都可适用,通过压力控制启用条件对 3 台电动阀门进行分级调节,现选定流量控制规则如下:当设定流量和实际流量值相差大于 70 g/s 时,150 mm 直径电动阀门进行调节,设定流量值和实际流量值相差在 5~70 g/s 之间时,80 mm 直径电动阀门进行调节,设定流量值和实际流量值相差 5 g/s 以内时,30 mm 直径电动阀门进行调节<sup>[26]</sup>。实验人

员可以根据储气罐压力变化实时修改压力控制启用条件,并且实验人员可实时监测电动阀门反馈值。

实验台操作界面以流动温变实验台为例,在流动温变实验台可视化操作界面上,点击 2#实验台启用,相应线路继电器锁止,即可完成对实验台电路的切换。流动温变实验台进气阀门 17 和出气阀门 22 为预留接口,进气气路为主进气和调节环腔,出气气路为内封严和外封严,每个阀门可单独设置增加幅度,改变控制速度,操作简单,实验人员可由原来的 3 人减为 1 人,并且通过计算机端操作即可完成实验工况的调节,极大程度上减轻了实验人员的劳动强度。

### 2.3 高速电动机及其冷却控制系统

实验室现有 5 台 50 kW 高速电动机以及 5 条对应油水冷管路,高速电动机通过塑壳继电器与 90 kW 变频器连接,塑壳继电器外接线路到控制台可实现一键切换高速电动机及冷却系统,如图 8 所示。PLC 通过 RS485 通讯协议传输信号控制变频器,设定该变频器以固定加速度给电动机加到设定转速值,停机模式设定为自由停机,高速电动机和轴承箱连接处为软连接,当电动机负载过大时会自动断开以保护电动机。

实验人员在可视化操作界面上可设定转速,实现一键设定转速、一键启停和通讯故障复位等功能,当控制器改变输出频率时,电动机转速为

$$\eta_1 = \frac{60f_1}{p} (1-s) \quad (6)$$

式中 $\eta_1$ 为电动机转速, $p$ 为电动机旋转磁场极对数, $f_1$ 为电动机频率, $s$ 为转差率。通过可视化操

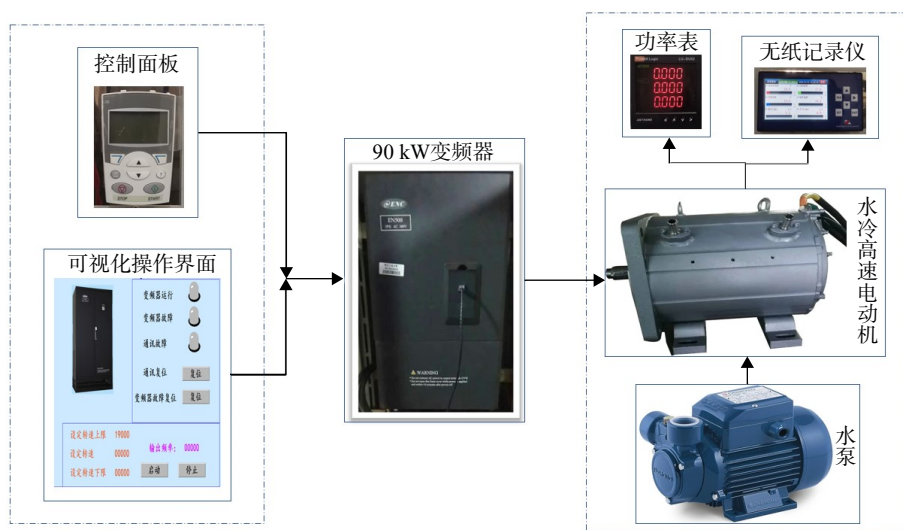


图 8 高速电动机及冷却系统控制图

Fig. 8 Control diagram of high speed motor and cooling system

作界面调节转速,实现对变频器的远程控制,并可监测变频器工作状态,操作更加方便,降低开发成本。

KSB 系列无纸记录仪对高速电动机轴伸端温度、绕组温度和轴承温度进行实时监测,当温度超过安全值时,记录仪进行报警,同时记录仪实时监测油水冷却系统流路的流量。由于实验过程中,实验人员不允许再次进入实验间,油水冷却系统出现故障时,实验人员不能及时发现,会对高速电动机和轴承箱造成损坏,所以油水冷却系统流量监测可以帮助实验人员及时发现系统是否出现故障,确保实验安全进行。数显功率表可实时监测 5 台高速电动机运行过程中输入电流、功率等参数,当电动机电流超过额定电流时,提醒实验人员切断电动机。

### 3 实验结果分析

以流动温变实验台为例,流动温变实验台共两路进气、两路出气,进气管路分别为主进气、调节环腔,出气管路为内封严、外封严和背压。由于 2#实验台现装配某型航空发动机涡轮盘,实验台调节环腔和出口背压管路暂时停用无法调节,涡轮高压盖板式预旋系统示意图如图 9 所示。

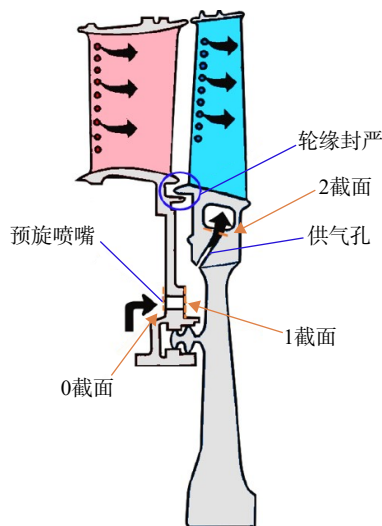


图 9 涡轮高压盖板式预旋系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of turbine high pressure cap plate pre-swirl system

系统压比  $\Pi_n$  定义为 0 截面处的进口总压  $p_0^*$  与 2 截面处静压  $p_2$  的比值:

$$\Pi_n = \frac{p_0^*}{p_2} \quad (7)$$

PID 控制方式在工业现场中应用非常广泛,

供气系统的控制方案首先采用 PID 控制方式进行测试。测试过程中发现,由于实验台主进气管道采用 3 台电动阀门联动控制,主进气阀门 1 直径过大,一旦出现开度过调,其他阀门无法及时弥补,容易导致主进气流量参数超调过大的情况。实验室的各实验台由于项目需求和控制精度的要求,安装了两种调节速度不同的电动阀门,各管路电动阀门有时需要适当切换,采用 PID 控制方式需经常更改参数,较为麻烦。因此,后期决定采用自适应控制方式,实验人员可根据电动阀门类型和实验精度要求,直接在可视化操作界面上调节增加幅度,能够让 PLC 的输出开度指令的速度和电动阀门的执行速度较好贴合,从而达到更好的控制效果,以下对两种控制方法进行实验验证。

采用 PID 控制方式对主进气阀门 2 进行单独控制,改变 PID 参数进行测试,控制曲线如图 10 所示,根据曲线图可得,参数  $P=40$ 、 $I=45$ 、 $D=2$  时控制效果较好,因此各实验台其他支路电动阀门控制参数均设置为此值。考虑到主进气阀门 1 直径过大,容易引起过调,其控制参数设定为  $P=15$ 、 $I=100$ 、 $D=0$ 。

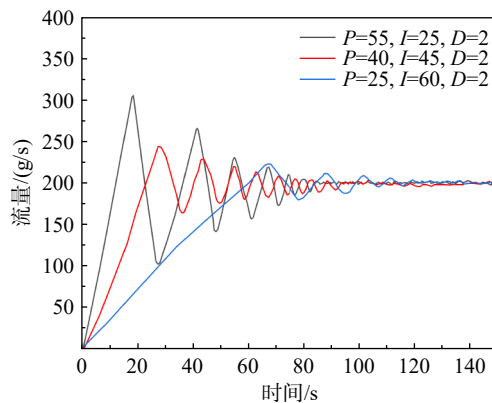


图 10 电动阀门 PID 控制曲线图

Fig. 10 PID control curve of electric valve

储气罐压力为 0.73 MPa,维持高速电动机在 5 000 r/min,分别实验 3 个工况对 PID 控制和线性回归预测及自适应控制进行对比。实验工况 1 为控制主进气流量为 85.5 g/s,内封严腔压力为 98.5 kPa,外封严腔压力为 98.5 kPa,调节环腔压力为 101 kPa;实验工况 2 为控制主进气流量为 200 g/s,内封严腔压力为 99.5 kPa,外封严腔压力为 101.5 kPa,调节环腔压力为 111.5 kPa;实验工况 3 为控制主进气流量为 300 g/s,内封严腔压力为 101.5 kPa,外封严腔压力为 105.5 kPa,调节环

腔压力为 128 kPa。主进气流量控制稳态误差在 5% 以内, 超调量不能高于 50%, 其他腔压控制稳态误差在 5% 以内即可。

主进气流量变化曲线如图 11 所示, 图中红色曲线为 PID 控制曲线, 黑色曲线为线性回归预测和自适应控制曲线。图 11(a)~图 11(c) 分别是主进气流量为 300、200、85.5 g/s 的控制曲线。从图中可以看出, 主进气流量采用自适应控制相较于 PID 控制超调量可以减少 30% 以上, 并且稳态误差能够满足系统要求, 调节时间随着主进气流量的增大减少得愈发明显, 当控制主进气流量为 85.5 g/s 时, 自适应控制方法比 PID 控制方法减少 40 s 以上; 当控制主进气流量为 300 g/s 时, 调节时间减少了 80 s 以上。

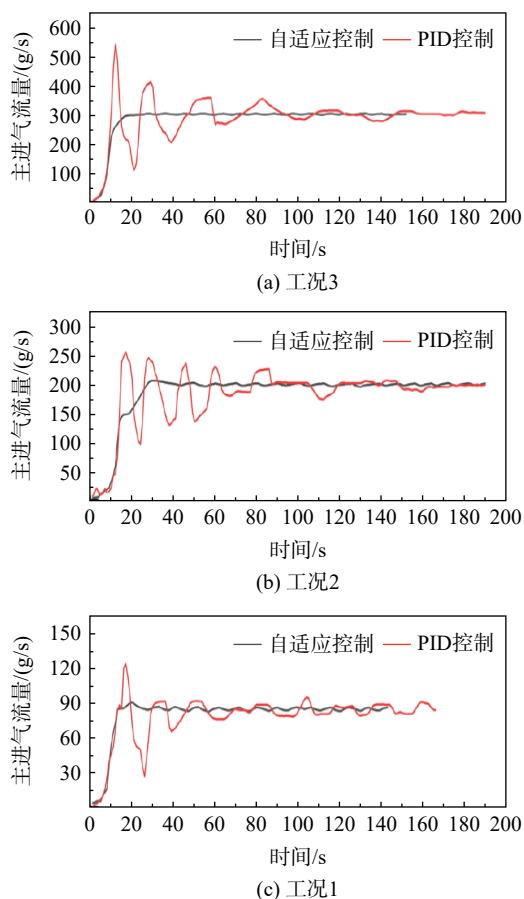


图 11 主进气流量变化曲线

Fig. 11 Mass flow rate change curve of main inlet

调节环腔压力变化曲线如图 12 所示, 从图中可以看出, 该图中 PID 控制曲线线条不够顺滑, 并且随着时间变化流量的变化率并不固定, 这是由于管路中连接了 10 余台阀门, 每台阀门都是采用 PID 控制在不断地调整开度, 相互之间影响较大, 造成曲率变化不一致。图中 PID 控制超调量

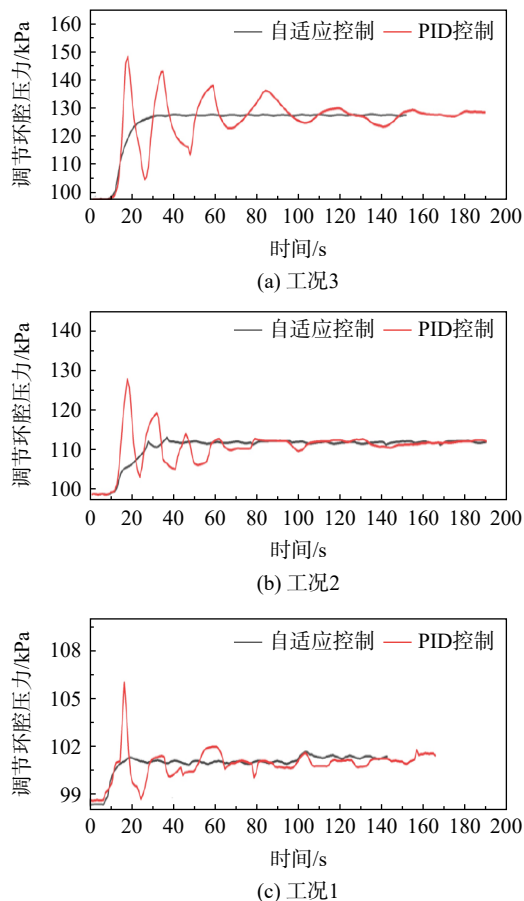


图 12 调节环腔压力变化曲线

Fig. 12 Pressure change curve of adjustable ring cavity

较大主要原因是由于管道设置不合理, 在进行控制系统设计之前管路布局已经设置好较长时间, 如若修改管路布局, 工程量巨大, 并且成本较高, 出于尽量减少工程量、缩减成本的角度出发, 通过采用线性回归预测电动阀门初始开度值来缩减超调量。主进气一级调节阀直径为 150 mm, 该型号调节阀最佳调节开度范围在 25%~75% 之间, 由于直径过大, 实验工况下该阀门最大开度不超过 15%, 所以调节能力较差, 该阀门开度过调 3%, 将会导致主进气二级和三级阀门弥补不了, 所以造成较大的超调量, 且实验工况流量越大, 超调愈加明显。

采用线性回归预测和自适应控制能够很好地抑制超调较大的现象, 根据实验工况预设开度值, 只有实际值和设定值相差较大的时, 一级阀门才会进行调节, 其余情况二级和三级阀门分别调节, 不会出现 3 个阀门同时在调节的情况, 并且调节速度可以实时控制, 有更好的稳态性能。

调节环腔压力变化曲线如图 12 所示, 图 12(a)~图 12(c) 分别是实验工况 3~工况 1, 设定压力分

别为 128、111.5、101 kPa。由图可以看出,自适应控制相较于 PID 控制方法超调量更小,并且调节时间更短,有更好的稳态性能。由于管路相互耦合,主进气流量对调节环腔进气调节影响较大,所以该变化曲线和主进气流量曲线有相同的变化趋势。

内封严腔压力变化曲线如图 13 所示,图 13(a)~图 13(c)设定内封严腔压力分别为 102、100、98.5 kPa。由图可以看出自适应控制方式超调量极小,这是因为自适应控制初始开度值是由线性回归预测所得,设定开度值时,由于主进气一级阀门的调节特性,会适当减小开度避免过调。自适应调节方式可以根据不同阀门的调节特性改变调节速度,相较于传统 PID 控制在多流路耦合调节方面有更好的适用性。

外封严腔压力变化曲线如图 14 所示,图 14(a)~图 14(c)中外封严腔压力分别为 103、100、98.5 kPa。由图可以看出自适应控制曲线相较于 PID 控制调节效果更好,主进气调节得越快,有助于其他流路的稳定。由图 11~图 14 可以发现,实

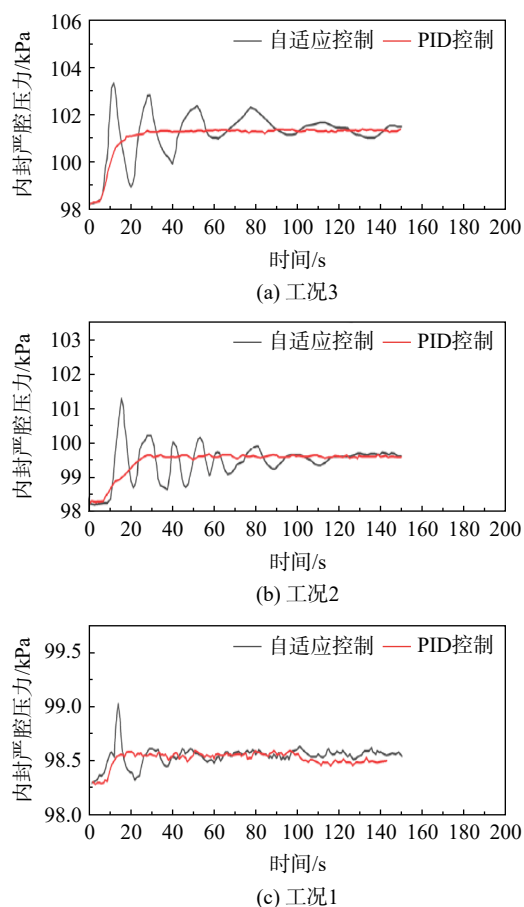


图 13 内封严腔压力变化曲线

Fig. 13 Pressure change curve of inner sealing cavity

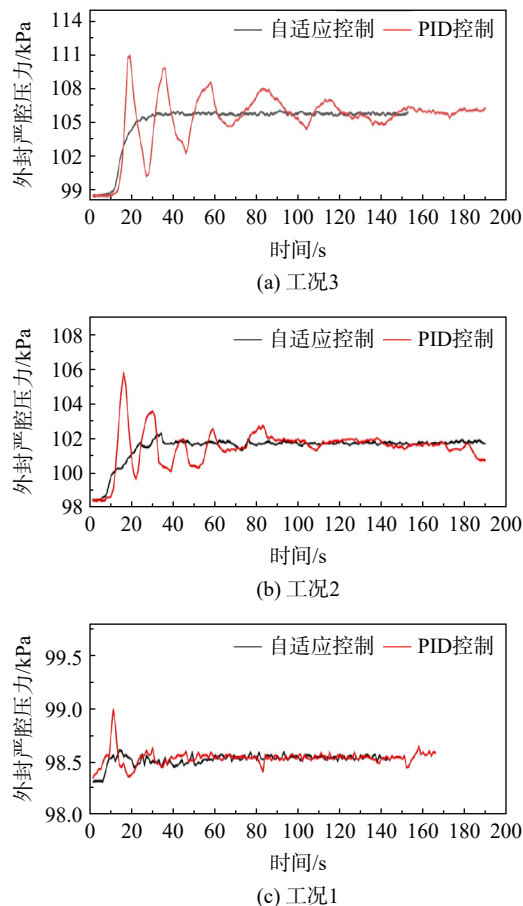


图 14 外封严腔压力变化曲线

Fig. 14 Pressure change curve of outer seal cavity

际采样曲线会出现一些不规则波动,分析原因有二,其一为实验过程中测量仪器的测量数据会出现一些扰动,容易引起电动阀门开度调整,电动阀门的响应时间在 2 s 以上,因此容易造成扰动放大。另一原因为储气罐是学院公共气源,其他实验室的突然使用会造成气罐压力不稳定,容易导致波形不稳定。

## 4 结 论

根据涡轮发动机流量和压力实验需求,设计测量控制系统实验台,能够更好地集成旋转盘腔流动传热实验室测量控制设备,采用智能控制仪表复用的形式,极大节省成本。PLC 作为主控制器,采用中间继电器完成手动和自动控制的线路切换,简化设备接线。采用该测量控制系统实验台和线性回归预测及自适应控制方法效果如下:

1) 控制端上位机与 PLC 通信,绘制可视化操作界面,简化实验人员操作步骤,可通过可视化操作界面实现一键控制电动机启停和设定转速等功能,完成对电动阀门的上电、掉电以及实验台

切换工作,使得整个实验过程中可减少实验人员两人以上。

2) 根据以往电动阀门开度和管道中流量关系的样本数据,采用线性回归生成拟合曲线,能够提前预估电动阀门的开度值,再根据自适应比例控制调节电动阀门开度,该控制方式可方便根据不同阀门的性能控制调节速度,有效提高系统的稳态性能。根据实验数据可得,该控制方式相较于传统 PID 控制方式超调量减少 20% 以上,缩短调节时间 40 s 以上,当主进气流量处于 300 g/s 以上时,结果更加显著,并且稳态精度提高 2% 以上。

## 参考文献:

- [1] 雷昭, 刘高文, 吴衡, 等. 盖板式预旋系统温降特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(8): 2036-2043.  
LEI Zhao, LIU Gaowen, WU Heng, et al. Experimental investigation on the temperature drop of a cover-plate pre-swirl system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(8): 2036-2043. (in Chinese)
- [2] 马佳乐, 庞亮玮, 隋宏人, 等. 涡轮预旋供气系统跑道型接受孔对性能影响的实验评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2761-2771.  
MA Jiale, PANG Liangwei, SUI Hongren, et al. Influence of the runway-shaped receiver holes on the performance experimental evaluation of the turbine pre-swirl air supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2761-2771. (in Chinese)
- [3] 龚文彬, 刘高文, 王斐, 等. 叶型接受孔对高位预旋供气系统流动温降影响的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(7): 97-105.  
GONG Wenbin, LIU Gaowen, WANG Fei, et al. Experimental study on the influence of vane-shaped receiver holes on flow and temperature drop of a high-radius pre-swirl air supply system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(7): 97-105. (in Chinese)
- [4] 王雨辰, 林德福, 王伟, 等. 大跨域条件下的自适应滚转稳定容错控制方法[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 324368.  
WANG Yuchen, LIN Defu, WANG Wei, et al. Adaptive fault-tolerance control method for roll stability during phase of large span flight[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 324368. (in Chinese)
- [5] 王素珍, 辛诚, 孙国法. 连续搅拌反应釜的自适应输出反馈控制及参数整定[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(10): 1587-1596.  
WANG Suzhen, XIN Cheng, SUN Guofa. Adaptive output feedback control and parameter tuning for continuous stirred tank reactor[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(10): 1587-1596. (in Chinese)
- [6] 姜岷, 刘向杰. 核电站蒸汽发生器水位模糊预测控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1705-1712.  
JIANG Di, LIU Xiangjie. Fuzzy-model predictive control on water level of U-tube steam generator[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(12): 1705-1712. (in Chinese)
- [7] 韩贺永, 秦丽霞, 柳渊, 等. 电液系统位置压力非线性自适应双闭环控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 155-161.  
HAN Heyong, QIN Lixia, LIU Yuan, et al. Position pressure non-linear adaptive double closed-loop control of electro-hydraulic system[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(1): 155-161. (in Chinese)
- [8] 刘晓宇, 荀径, 高士根, 等. 高速列车精确停车的鲁棒自触发预测控制[J]. 自动化学报, 2022, 48(1): 171-181.  
LIU Xiaoyu, XUN Jing, GAO Shigen, et al. Robust self-triggered model predictive control for accurate stopping of high-speed trains[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(1): 171-181. (in Chinese)
- [9] 姜庆丰, 谢金森, 曾文杰, 等. 液态熔盐堆堆芯功率模糊 PID 控制[J]. 核动力工程, 2020, 41(1): 93-98.  
JIANG Qingfeng, XIE Jinsen, ZENG Wenjie, et al. Fuzzy-PID control for core power of liquid molten salt reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(1): 93-98. (in Chinese)
- [10] 张亚军, 魏萃, 柴天佑, 等. 未建模动态增量补偿驱动的非线性 PID 控制及应用[J]. 自动化学报, 2020, 46(6): 1145-1153.  
ZHANG Yajun, WEI Cui, CHAI Tianyou, et al. Un-modeled dynamics increment compensation driven nonlinear PID control and its application[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(6): 1145-1153. (in Chinese)
- [11] 王锁芳, 朱强华, 张羽, 等. 预旋进气位置对转静盘腔换热影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 1227-1232.  
WANG Suofang, ZHU Qianghua, ZHANG Yu, et al. Numerical studies of heat transfer in a rotor-stator cavity with different radial positions of pre-swirl inlet[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1227-1232. (in Chinese)
- [12] 刘晶, 汪超, 谢鹏, 等. 基于 PD 控制的仿昆虫扑翼样机研制[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 223678.  
LIU Jing, WANG Chao, XIE Peng, et al. Development of insect-like flapping wing micro air vehicle based on PD control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 223678. (in Chinese)
- [13] 束洪春, 代月, 安娜, 等. 基于线性回归的柔性直流电网纵联保护方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3213-3226, 3288.  
SHU Hongchun, DAI Yue, AN Na, et al. Pilot protection method of flexible DC grid based on linear regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3213-3226, 3288. (in Chinese)
- [14] 赵家豪, 魏民祥, 丁玉章, 等. 增程式 APU 混沌退火混合粒子群优化模糊 PID 动态控制[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1213-1221.  
ZHAO Jiahao, WEI Minxiang, DING Yuzhang, et al. Dynamic control strategy of extended-range APU based on fuzzy PID optimized by CAHPSO[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1213-1221. (in Chinese)
- [15] 张普, 薛惠锋, 高山. 基于分布式自适应的多智能体容错一致性控制[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 323539.  
ZHANG Pu, XUE Huifeng, GAO Shan. Distributed adaptive fault-tolerance consensus control for multi-agent system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 323539. (in Chinese)
- [16] HAN Shuo, XU Jinliang, YAN Menghua, et al. Using multiple linear regression and BP neural network to predict critical meteorological conditions of expressway bridge pavement icing[J]. Public Library of Science One, 2022, 17(2): e0263539.
- [17] SHINJAE KIM J. COVID-19 prediction and detection using machine learning algorithms: catboost and linear regression[J]. American Journal of Theoretical and Applied Statistics, 2021, 10(5): 208.
- [18] 黄金泉, 刘楠, 唐钰婷. 航空发动机 PI 控制参数频域最优整定方法[J]. 航空动力学报, 2015, 30(4): 979-984.

- HUANG Jinquan, LIU Nan, TANG Yuting. Frequency domain optimal tuning method of PI control parameters for aero-engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(4): 979-984. (in Chinese)
- [19] 张强, 杨吉斌, 张雄伟, 等. CS-Softmax: 一种基于余弦相似性的 Softmax 损失函数[J]. *计算机研究与发展*, 2022, 59(4): 936-949.
- ZHANG Qiang, YANG Jibin, ZHANG Xiongwei, et al. CS-softmax: a cosine similarity-based softmax loss function[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2022, 59(4): 936-949. (in Chinese)
- [20] QU Hongchun, ZHENG Jian, TANG Xiaoming. Effects of loss function and data sparsity on smooth manifold extraction with deep model[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 198: 116851.
- [21] 张炳力, 秦浩然, 江尚, 等. 基于 RetinaNet 及优化损失函数的夜间车辆检测方法[J]. *汽车工程*, 2021, 43(8): 1195-1202.
- ZHANG Bingli, QIN Haoran, JIANG Shang, et al. A method of vehicle detection at night based on RetinaNet and optimized loss functions[J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(8): 1195-1202. (in Chinese)
- [22] 于艳君, 崔明恺, 陈叹辞, 等. 基于模糊自适应转速调节器的绕组切换型电机控制[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(23): 8708-8718.
- YU Yanjun, CUI Ming kai, CHEN Tanci, et al. Winding switching motor control based on fuzzy adaptive speed regulator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(23): 8708-8718. (in Chinese)
- [23] 史加荣, 王丹, 尚凡华, 等. 随机梯度下降算法研究进展[J]. *自动化学报*, 2021, 47(9): 2103-2119.
- SHI Jiarong, WANG Dan, SHANG Fanhua, et al. Research advances on stochastic gradient descent algorithms[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(9): 2103-2119. (in Chinese)
- [24] 卫星光, 房方, 刘玉升. 基于自适应观测器的燃气轮机控制系统传感器故障容错控制[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(19): 6658-6670.
- WEI Xingguang, FANG Fang, LIU Yusheng. Sensor fault tolerant control for gas turbine control system based on adaptive observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(19): 6658-6670. (in Chinese)
- [25] 杜宪, 郭迎清, 陈小磊. 基于非线性模型预测控制方法的航空发动机约束管理[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(7): 1766-1771.
- DU Xian, GUO Yingqing, CHEN Xiaolei. Limit management of aircraft engine based on nonlinear model predictive control method [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(7): 1766-1771. (in Chinese)
- [26] CHEN Xiaming, TANG Bohao, FAN Jun, et al. Online gradient descent algorithms for functional data learning[J]. *Journal of Complexity*, 2022, 70: 101635.

(编辑: 秦理曼)