

# 航空大气数据参数仿真系统设计

韦海楠<sup>1</sup>, 徐涛<sup>1</sup>, 邹晟男<sup>2</sup>

<sup>1</sup>沈阳航空航天大学自动化学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>中国石油吉林石化公司动力厂, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年5月12日; 录用日期: 2025年6月12日; 发布日期: 2025年6月20日

## 摘要

大气数据机向飞行器提供实时的高度和空速信息, 是飞行器关键的设备。为满足在地面定期校验大气数据机准确性的需求, 本文设计了一套航空大气数据参数仿真系统, 此系统主要由气路系统、气压传感器、下位机、上位机组成。气路系统包括气泵、电磁比例阀、高频电磁阀、以及储气罐等。气压传感器包括绝压传感器和差压传感器, 会实时采集气压数据, 并反馈给上位机完成闭环控制。下位机以单片机 FM33LE025 为核心搭建了电源模块、数模转换模块、PWM 输出模块等多个功能电路。上位机将用户输入的设定气压值和传感器采集到的实际气压值生成相应的控制指令, 并将其传输至下位机控制气路系统输出满足需求的气压。系统调试后运行稳定, 仿真出的静压值和动压值符合测试标准及预期效果, 验证了该参数仿真系统的可行性。

## 关键词

大气数据机, 航空大气数据参数仿真系统, 下位机, 上位机

# Aeronautical Atmospheric Data Parameters Simulation System Design

Hainan Wei<sup>1</sup>, Tao Xu<sup>1</sup>, Shengnan Zou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>China Petroleum Jilin Petrochemical Company Power Plant, Jilin Jilin

Received: May 12<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 12<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 20<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The atmospheric data machine is a key component of the aircraft, and it supplies real-time altitude and airspeed information. To satisfy the requirement for regular ground calibration of the atmospheric data machine's accuracy, the aeronautical atmospheric data parameter simulation systems have been designed. These systems consist of an air circuit system, barometric pressure sensors, a

文章引用: 韦海楠, 徐涛, 邹晟男. 航空大气数据参数仿真系统设计[J]. 仪器与设备, 2025, 13(2): 237-244.

DOI: 10.12677/iae.2025.132030

lower computer, and an upper computer. The air circuit system is comprised of an air pump, electromagnetic proportional valves, high-frequency solenoid valves, and storage tanks. The barometric pressure sensors include absolute and different pressure sensors. They are responsible for the real-time collection of air pressure data, which is then fed back to the upper computer to achieve closed-loop control. The lower computer is centered on the MCU FM33LE025, and incorporates several functional circuits, including a power supply module, digital-to-analog conversion module, PWM output module, etc. Control instructions are generated by the upper computer using the user-defined setpoint and sensor-collected pressure data. These instructions are then transmitted to the lower computer for air circuit system regulation, enabling the required air pressure to be produced. Following debugging, stable system operation is confirmed, with simulated static and dynamic pressures verified to comply with test standards and expected outcomes. This confirms the viability of the parameter simulation system.

## Keywords

Atmospheric Data Machine, Aeronautical Atmospheric Data Parameter Simulation System, Lower Computer, Upper Computer

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

军用飞机、民用飞机、导弹都属于飞行器。在空中飞行时，飞行器通过大气数据机收集并处理大气参数，可得出飞行器的高度、空速等[1]。大气参数的精准度，对战斗机作战效能、客机飞行安全、无人机稳定飞行以及导弹制导精度等，都有着直接影响。大气数据机是飞行器的关键设备，其参数的准确性与飞行器性能和安全紧密相关[2]。因此设计航空大气数据仿真系统在地面模拟不同飞行环境定期校验和维护大气数据机十分必要[3]。

当前国内外航空领域的大气参数仿真模拟技术已形成较为完善的技术体系。美国洛克希德马丁公司[4]推出的航空大气数据参数仿真系统 ATC-NA 能够模拟出高空环境中的压力变化，但该产品体积过大，不能便携地移动；美国雷神技术公司[5]生产的航空大气数据参数仿真系统 ADTS-542 属于无线便携设备，减少了线缆的使用，移动方便，但操作复杂，维修难度大。另外，为了提高飞行器静、动压传感器反馈的参数的可靠度，我国研究人员粟强[6]等为实现直升机的全向测速和低速时精准测速，设计了一种随动式大气数据传感器。但此传感器占用较大体积。胡声曼[7]提出了嵌入式大气数据系统(Flush air data system)，FADS 以嵌入在机身表面的多测压孔压力信息测量为基础，占用体积较小，但此方法的精度还有提高空间。朱恒[8]等为提高 FADS 系统测量精度提出了一种基于改进粒子群算法优化的神经网络以提升 FADS 系统的精度。为了进一步提高采集到的大气参数精度，梁巍[9]等提出基于 FPGA 实现多路传感器高速同步采集，并在软件上对静压和动压数据分别进行了二阶温度补偿和滤波，并采用线性插值算法进行误差补偿提高精度。

无论是国内还是国外，都大力研发气路控制系统以达到提高精度的目的，国内的一些公司通过开展自主研发工作，在航空大气数据参数仿真系统气压控制精度这一关键指标上，国内的产品已经能够达到甚至超越国外同类产品的水平[10]。不过，依然存在成本偏高，对应用环境的要求相对较高等问题。对于国内外各大公司推出的系统价格高昂，本文设计的航空大气数据参数仿真系统在兼顾精度的同时具有低成本、易维护的特点。

## 2. 系统总体设计

系统的整体框图如图 1 所示。航空大气数据参数仿真系统是将用户设定的高度参数及空速参数进行解析生成控制指令，之后传给气路系统进行调节并且显示出调节后的压力值最后输出到机载待测设备。



Figure 1. System architecture diagram  
图 1. 系统整体框图

## 3. 气路系统设计

整个气路系统包括 2 个气泵(NPK-09-10.06)、3 个气体过滤组件、4 个电磁比例阀(ITV00XX)，2 个高频电磁阀(34B-ABA)、2 个储气罐及 2 个压力传感器。下位机控制气泵产生气体，经过过滤器干燥之后流向电磁比例阀和电磁阀，整个气压控制过程通过电磁比例阀粗调，高频电磁阀微调最后在气罐内输出符合要求的其他值，传感器将采集到的气压值在上位机显示出来。气路系统框图如图 2 所示。



Figure 2. Pneumatic system schematic diagram  
图 2. 气路系统框图

## 4. 系统硬件设计

### 4.1. 控制芯片基本电路设计

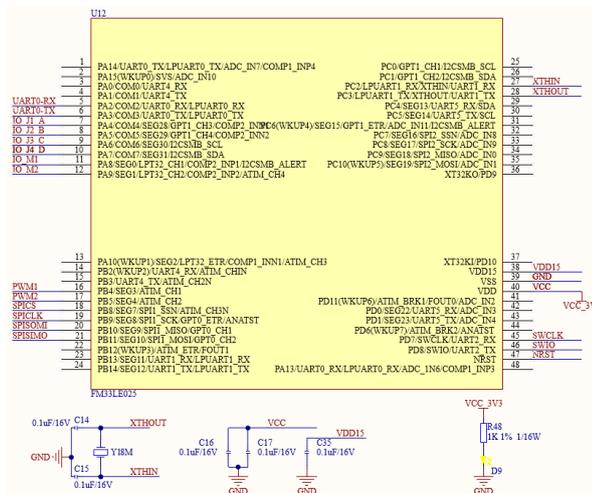


Figure 3. Schematic diagram of a microcontroller module  
图 3. 微控制器电路原理图

微控制器是复旦微电子的 FM33LE025 型号芯片。微控制器电路原理图如图 3 所示。该电路中 C14 和 C15 是电容量为 0.1  $\mu\text{F}$ 、额定电压为 16 V 的陶瓷电容，与 8M 晶振 Y1 组成晶体振荡电路，XTHIN 和 XTHOUT 是振荡信号的输出和输入引脚，分别接到微控制器的 P27 和 P28 引脚，此晶体振荡电路为微控制器提供稳定的时钟信号。电源滤波电路部分：C16、C17、C16 是不同容值的电容(分别为 0.1  $\mu\text{F}/16\text{V}$ 、0.1  $\mu\text{F}/16\text{V}$ 、0.03  $\mu\text{F}/16\text{V}$ )，用于对电源 VCC 和 VDD15 进行滤波，去除电源中的高频噪声，使电源更加稳定。采用 R481 K $\Omega$ 、1/16W 作为上拉电阻与一个发光二极管 D9 连接 VCC\_3V3 和地之间，作电源指示灯。

#### 4.2. 电磁比例阀数模转换电路设计

本系统选用日本 SMC 公司制造的 ITV00XX 系列电磁比例阀。该系列电磁比例阀的控制信号为 0 V~10 V 的直流电压信号，气体控制精度可达 1%，通过精准调节内部阀门的开度来控制气体流量。在电路需要 SGM5347-12 数模转换芯片输出 0 V~10 V 工作电压，SGM5347-12 的 SPI 接口采用标准四制，分别是时钟线(CLK)、从设备使能线(LD)、主设备输出从设备输入线(DIN)、主设备输入/从设备输出线(DOUT) CLK：为数据处理模块内部时钟，由 FM33LE025 时钟逻辑实现，支持频率配置。

数模转换模块原理图如图 4 所示。SGM5347-12 的 P11、P12、P13、P14 作为 SPI 协议的主入从出、使能、时钟、主出从入分别与微控制器的 P20、P18、P19、P21 连接。P2、P3、P4、P5 分别于对应的电磁比例阀控制电路连接。U18 是参考电源芯片 CLREF2025 产生 0 V~2.5 V 电压接到数模转换芯片 P8 引脚使其能产生可调的直流 0 V~2.5 V。

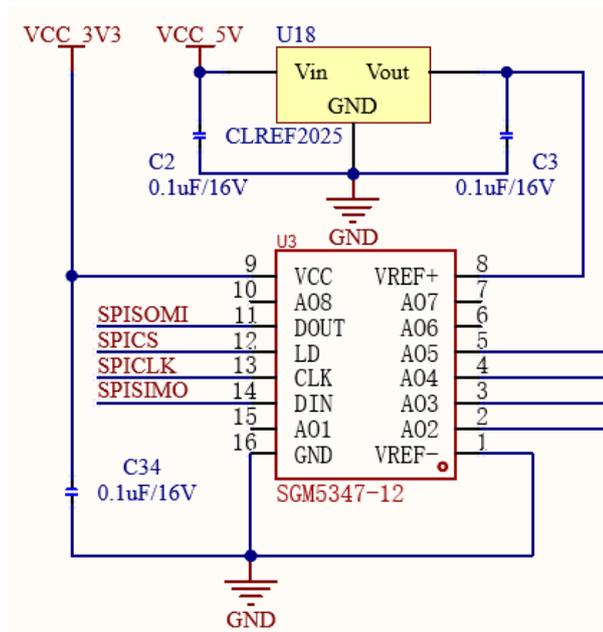


Figure 4. Schematic diagram of the digital-to-analog conversion module  
图 4. 数模转换模块原理图

### 5. 软件设计

#### 5.1. 上位机前面板设计

系统上位机采用 LabVIEW 搭建，上位机前面板如图 5 所示。首先进行初始化包括初始化上位机的串

口和下位机的 GPIO 端口等，之后用户输入设定的飞行高度和飞行速度，上位机将实际气压值与解析后的设定气压值进行对比，同时生成控制指令传递给下位机，系统会判断指令是否成功传输给下位机，若没成功传输则会从新生成指令进行再一次传输；若成功传输，下位机开始解析控制指令生成控制信号并将控制信号传递给气路系统中各个执行器件调节输出的气压值。系统程序会判断调节的气压值是否等于设定值，若不等于则上位机将生成新的控制指令；若等于则输出压力值。

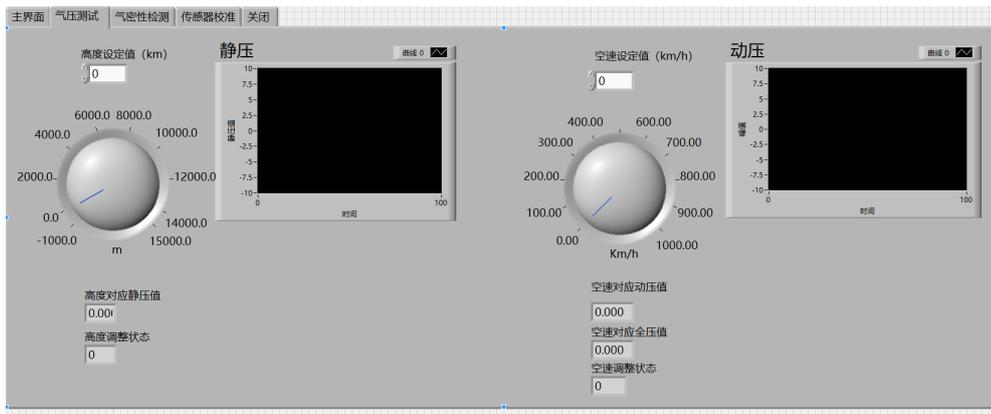


Figure 5. The front panel diagram of the upper computer  
图 5. 上位机前面板图

### 5.2. 传感器采集程序设计

本系统采用的传感器是德国 HELM 公司制造的 HM29A-5-S1-F2-W 绝压力传感器、及 HM29D-5-S1-F2-W-2-T 差压传感器。此传感器以 RS485 通信协议通过串口与上位机通讯，其采用 Modbus RTU 通信协议。本系统的气压传感器使用的波特率为 9600 bps，地址码是 01，读取功能码是 03，寄存器的起始地址从 0X00 开始，第 4 组和第 5 组的代表应用到的寄存器个数。后台采集程序整体使用 while 循环，在 VISA 写入串口写入传感器采集的数据帧，经过延时之后，VISA 串口读取会收到传感器发送的包含压力信息的数据帧。在接收到此数据帧之后从数据的第 3 组开始截取 4 位长度的字符串，经过强制类型转换之后，将气压单位从 psi 换算成 Pa。确保读取到的数据单位单位 Pa，便于测试。其中调用传感器后台程序如图 6 所示。

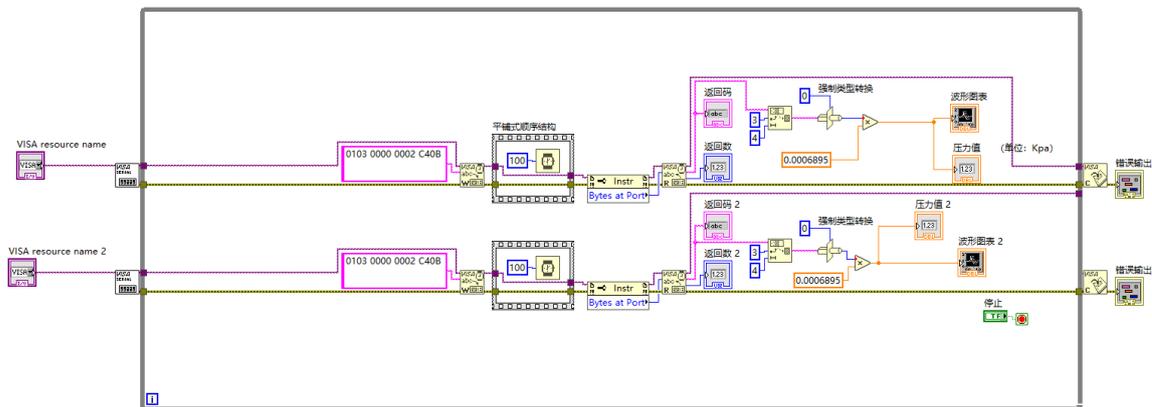


Figure 6. Sensor background program  
图 6. 传感器后台程序

## 6. 系统调试与试验

### 6.1. 系统调试

传感器上电之后，进行传感器采集调试。首先将传感器与上位机通过 RS485 串口标准连接，选用 COM3 端口、设置为 9600、无奇偶校验位。配置好之后进行传感器调试，传感器采集的压力值会发送给上位机，上位机显示传感器采集的压力值与压力变化曲线。传感器采集的压力曲线如图 7 所示。

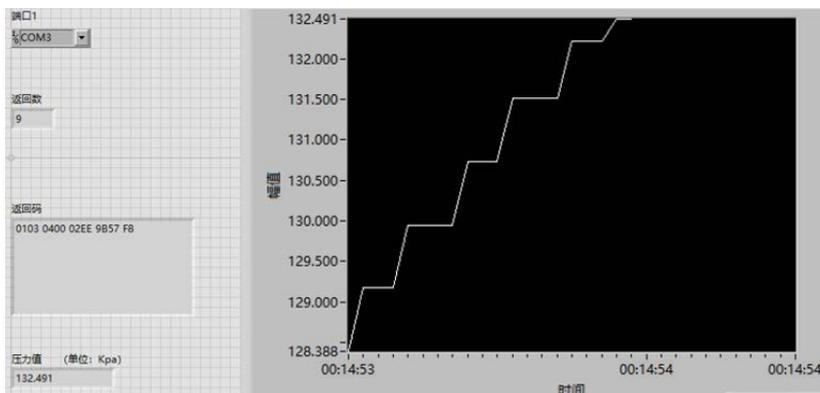


Figure 7. Transmission and reception diagram of the host computer  
图 7. 传感器采集压力曲线

### 6.2. 系统试验

本参数仿真系统建立了 0 m~15000 m 飞行高度范围的高度仿真环境，对应静压的测试区间为 12031 Pa~101325 Pa。为评估气路系统的动态响应特性，选取 0 m (101325 Pa)、6000 m (47148 Pa)、10000 m (26422 Pa)、15000 m (12031 Pa) 四个特征高度点进行双向压力测试

图 8 所示为静压调节曲线，其初始压力设定为 12031 Pa，经过 3 调节阶段后最终稳定在 101325 Pa。三个调节阶段的调节时长呈现不同特点第一阶段从 12031 Pa 到 26422 Pa 耗时最短，第二阶段从 26422 Pa 到 47148 Pa 耗时中等，第三阶段从 47148 Pa 到 101325 Pa 耗时最长。出现这种差异是由于设定值是标准大气压值为 101325 Pa 而初始压力为 12031 Pa 小于标准大气压，且 3 个调节阶段的初始压力均低于大气压，因此整个调节过程可以引入大气压作为气压源，当静压罐内气压值越低，大气压作为气压源作用调节效果越好，因此初始压力值最低的第一调节时间最短。

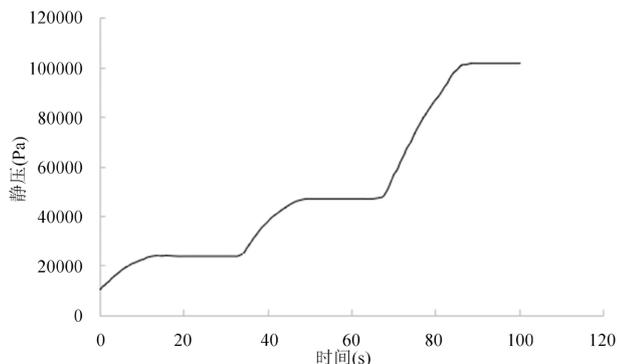


Figure 8. Static pressure reverse pressure adjustment curve  
图 8. 静压调节曲线

鉴于空速与静压、动压均存在关联，为便于观测仿真参数，选取固定的高度进行分析，本文选择选取的高度为 8000 m，由于多数飞机在此高度处的最小飞行速度大约为 300 km/h，本参数仿真系统的空速测验范围为 300 km/h~1000 km/h，此高度处，空速 300 km/h~1000 km/h 对应的动压范围为 0 Pa~24759 Pa。为全面试验本系统动压控制效果，测试以最小压力值 1858 Pa (空速 300 km/h)为初始压力，依次调节至 7842 Pa (空速 600 km/h)、24759 Pa (空速 1000 km/h)。

分析图 9 所示的动压调节曲线，从图中可以看出第一阶段调节时间最短，第二阶段调节时间最长，原因是两个阶段的调节时间与动压变化量有关，第一阶段的动压变化量为 5984 Pa，动压变化幅度小，调节时间相较于第二阶段约缩短 15 s。第二调节区，动压变化量为 16917 Pa，调节时间大概 30 s。两个调节阶段的调节速率都比较快，这归因于两个调节阶段的初始压力均小于大气压，可以引入大气压作为辅助气源进行调节，提高了调节的速率。

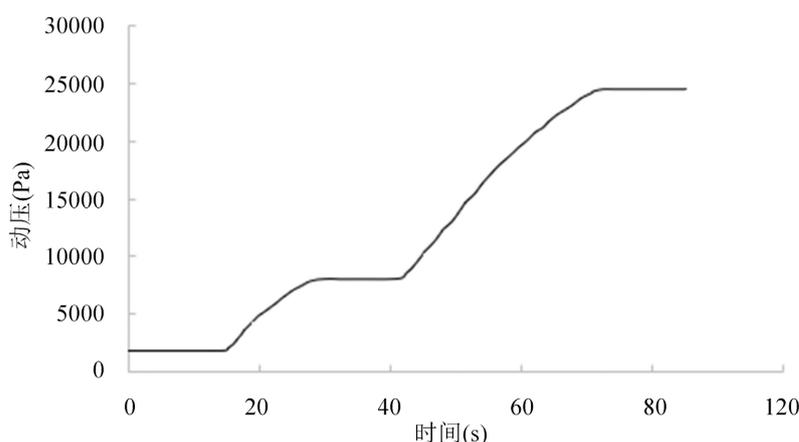


Figure 9. Pressure regulation curve of forward dynamic pressure test  
图 9. 动压调节曲线

## 7. 结论

本文针对需要在地面定期校验机载大气数据机的需求，设计了航空大气数据参数仿真系统用于模拟大气环境测试，通过控制该系统仿真出不同压力值，之后得到对应的高度和空速。相较于国内外各个公司生产的大气数据机校验系统几十万到几百万的价格与高昂的维护成本，本系统成本约为 4~5 万，同时维护成本也较低。本系统具有很强的灵活性，在上位机可以输入不同的设定值让系统先后仿真出不同的压力值。

## 参考文献

- [1] 陕西飞机工业有限责任公司. 一种测试大气数据系统传感器的设备和方法[P]. 中国专利, 202411400711.8. 2025-02-21.
- [2] Jozef, G., Cassano, J., Dahlke, S. and de Boer, G. (2022) Testing the Efficacy of Atmospheric Boundary Layer Height Detection Algorithms Using Uncrewed Aircraft System Data from Mosaic. *Atmospheric Measurement Techniques*, **15**, 4001-4022. <https://doi.org/10.5194/amt-15-4001-2022>
- [3] Zhou, X., Yang, C., Ming, X., Dai, M., Lu, W. and Zhang, F. (2025) Mechanical Characteristics and Calculation Method of Static Pressure Pile Installation for PHC Pipe Piles in Sandy Soil Foundation with Pebble Interlayer. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 13756. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98127-4>
- [4] Lockheed Martin (2024) ATC-NA: Next-Generation Air Data Test and Simulation System. Lockheed Martin Official Website.

- [5] Raytheon Technologies (2024) ADTS-542 Advanced Air Data Test System. Raytheon Technologies Official Website.
- [6] 粟强, 谭向军, 周游, 等. 某型大气数据传感器优化设计及其性能测试[J]. 振动测试与诊断, 2023, 43(4): 738-745, 831.
- [7] 胡声曼, 祁琪, 梁禄扬, 等. 重复使用飞行器嵌入式大气数据系统试验验证方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S1): 74-79.
- [8] 朱恒, 李荣冰, 何梓君, 等. 基于 PSO-BP 的嵌入式大气数据系统算法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(22): 67-75.
- [9] 梁巍, 黄振峰, 贾继阳, 等. 五孔探针高精度大气数据采集系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(10): 272-279.
- [10] 孙钦翰, 罗定钊, 韦山峰, 等. 基于 AMESim 的电气比例阀仿真研究[J]. 阀门, 2022(6): 460-462.