

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508344

应变式氧气流量传感器设计与应用*

魏梦颖 华国环

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/集成电路学院 南京 210044)

摘要:针对医用制氧机中传统浮子流量计测量精度低、显示不直观、无累计计量功能等问题,设计了一种基于应变片传感器的智能化氧气流量监测系统。该系统采用单端固定的悬臂梁式应变片结构,结合改进型惠斯通电桥与高精度仪表放大器,实现对气体流动引起微弱应变信号的灵敏捕捉与高效转换;利用 MATLAB 拟合电压-流速多项式方程,并引入卡尔曼滤波与自修正算法,有效抑制温漂与噪声干扰,提升系统在复杂环境下的测量稳定性与可靠性。实验结果为在 0.5~5 L/min 测量范围内,传感器在-10℃~40℃环境下的最大绝对误差小于 0.2 L/min,响应时间小于 2 s;在 168 h 连续工作中输出稳定,未出现明显漂移或失效现象;在 86~106 kPa 气压变化下测量稳定性良好。结果表明,该系统具备实时显示瞬时流量与累计用量的功能,具有结构简单、成本低、精度高、环境适应性强的特点,为医用制氧机的智能化升级提供了可靠解决方案。

关键词:应变片;氧气流量传感器;惠斯通电桥;自修正算法

中图分类号: TP806; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Design and application of strain gauge oxygen flow sensor

Wei Mengying Hua Guohuan

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/School of Integrated Circuits, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In response to the problems of low measurement accuracy, non-intuitive display, and lack of cumulative measurement function in traditional float flowmeters used in medical oxygen generators, an intelligent oxygen flow monitoring system based on a strain gauge sensor was designed. The system adopts a single-ended fixed cantilever-beam strain gauge structure, combined with an improved Wheatstone bridge and a high-precision instrumentation amplifier, to achieve sensitive capture and efficient conversion of weak strain signals caused by gas flow. A voltage-flow rate polynomial equation was fitted using MATLAB, and Kalman filtering with a self-correction algorithm was introduced to effectively suppress temperature drift and noise interference, thereby enhancing the measurement stability and reliability of the system in complex environments. The experimental results are as follows: within the measurement range of 0.5~5 L/min, the maximum absolute error of the sensor is less than 0.2 L/min under ambient temperatures ranging from -10℃ to 40℃, with a response time of less than 2 s; the output remains stable during 168 h of continuous operation, with no significant drift or failure observed; and the measurement stability is well maintained under pressure variations from 86 to 106 kPa. The results indicate that the system is capable of real-time display of instantaneous flow rate and cumulative oxygen consumption, featuring a simple structure, low cost, high accuracy, and strong environmental adaptability. It provides a reliable solution for the intelligent upgrading of medical oxygen generators.

Keywords: strain gauge; oxygen flow sensor; Wheatstone bridge; self-correction algorithm

0 引言

氧是人体不可缺少的生命元素,是产生机体功能活动所需能量的重要物质^[1]。氧疗保健是利用补给氧气干预人体的生理、生化内环境,促进代谢过程的良性循环,以达到治疗疾病、缓解症状、促进康复、预防病变和增进健康的目的。临床实践证明,氧疗保健以其独特的治疗机理,对临床各科的急慢性缺血缺氧症状和因缺氧引起的继发性疾病,具有显著的疗效。医用制氧机是一种用于治疗呼吸系统疾病的重要医疗设备,它能够将空气中的氧气浓缩并提供给患者使用,被广泛应用于急救、重症监护、康复护理等领域,对于患者的生命安全和健康状况起着至关重要的作用。而医用制氧机流量计作为医用制氧机的核心部件,其准确性和稳定性对于保障患者的治疗效果和安全至关重要^[2]。

目前市场上大多数制氧机中,浮子流量计被广泛应用于测量氧气流量,然而,浮子流量计在医用制氧机中也存在一些弊端:1) 计量不准确,随供氧气压力的变化,流量变化可达 30%;2) 流量显示不直观;3) 只能测量实时流量,不能记录累积数量及吸氧时间。这些问题可能会导致氧气流量的不准确,甚至出现氧气流量过大或过小的情况,从而影响患者的治疗效果和安全。浮子流量计的结构简单,压力损失小,价格低廉,一般只能垂直安装,易损坏,精度较低^[3],因此,随着医疗器械的高速发展,对于氧气流量的高精度测量需求迫在眉睫^[4]。

近年来,氧气流量测量技术已从传统的机械式流量计向电子式、微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)方向发展。国内外学者提出了多种基于热式、超声波、压差式等原理的流量传感器^[5]。热式流量计的优势在于测量精度高,可直接获取质量流量,但该类型传感器存在功耗大、响应速度慢的缺陷,难以适配医用制氧机低功耗的使用需求^[6];超声波流量计利用声波传播特性实现流量测量,其非接触式测量的特点可减少压力损失,然而该传感器结构复杂、成本高昂,且易受气体成分与温度变化的干扰,不利于在民用医用设备中普及^[7];差压式流量计技术成熟、应用广泛,但存在结构复杂、压力损失大的问题,同时对安装条件要求严苛,不适用于小型化制氧机的集成设计^[8]。应变片传感器因其结构简单、灵敏度高、易于集成等特点,在医疗电子领域展现出潜力,但仍面临温漂、长期稳定性等挑战。

综上所述,现有电子式流量传感器在医用制氧机这一特定场景中,往往难以兼顾高精度、低成本、低功耗与强抗干扰能力。本文在分析各类传感器优缺点的基础上,提出一种结合自修正算法与卡尔曼滤波的应变式氧气流量传感器。本研究的核心思想是通过结构仿真优

化、电路低漂移设计与算法融合,突破传统浮子式的性能瓶颈,实现低成本、高精度、强抗干扰的流量监测,以满足医用制氧机对实时、准确、可靠流量数据的实际需求,推动制氧设备向智能化、数字化方向发展。

1 应变式氧气传感器设计

1.1 应变片原理分析

应变片是一种常用的敏感元件,通常由敏感栅、基底、引线、覆盖层等部分组成,其工作原理基于电阻应变效应^[9],当外界力(如气体压力或流量引起的冲击力)作用于应变片时,应变片会发生形变,导致敏感栅电阻值发生变化^[10],间接得到被测物体的应变。通过这一原理,可以建立应变片电阻变化与外部应力之间的数学模型^[11],在实际的应用中,这种电阻变化可以通过惠斯通桥电路进行转换和测量^[12],将应变片接入电桥的一个或多个桥臂,当应变片电阻发生变化时,电桥的平衡被打破,输出一个与电阻变化成正比的电压信号。应变传感器广泛应用于医疗保健和结构健康监测^[13]。过去开发的应变传感器种类多样,如光学式^[14]、电阻式^[15]、压电式^[16]和电容式传感器^[17]。

敏感栅的材料是一段金属丝,金属丝的电阻 R 与电阻率 ρ 、长度 L 、横截面积 S 的关系为:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

对式(1)两边同时取对数且进行全微分得到:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} \quad (2)$$

式中: $\frac{dL}{L}$ 为长度的相对变化,即线应变 ε 。

设金属丝直径为 a , $S = \frac{\pi a^2}{4}$, 则 $\frac{dS}{S} = 2 \frac{da}{a}$, $\frac{da}{a}$ 为直径的相对变化,直径变化属于横向应变,在材料力学中,弹性范围内,横向应变 ε_r 与纵向应变 ε 的关系为:

$$\varepsilon_r = -\mu \varepsilon \quad (3)$$

式中: μ 为材料的泊松比。因为 $\frac{da}{a} = \varepsilon_r$, 可以得到:

$$\frac{dS}{S} = -2\mu \varepsilon \quad (4)$$

将 $\frac{dL}{L} = \varepsilon$ 和式(4)代入式(2)得到:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (5)$$

令 $K = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon} = (1 + 2\mu) + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon}$, 得到:

$$\frac{dR}{R} = K\varepsilon \tag{6}$$

式中： K 为应变片的灵敏系数，表示单位应变所引起的电阻相对变化。通过测量电阻相对变化 $\frac{dR}{R}$ ，就可以得到应变 ε 。

1.2 氧气流量传感器的模拟仿真

氧气流量传感器腔体的结构如图 1 所示，流体域为 20 mm×20 mm 正方体，应变片长 16 mm，宽 4 mm，厚 2 mm。腔体中的另一片应变片作为静态温度补偿片，通气时不发生形变，因此建模时忽略这一片温度补偿片。绿色部分表示流体域，深色部分表示测试应变片，应变片被粘贴在气体喷嘴前面的支架上，当氧气从进气口进入腔体，经喷嘴冲击在应变片上，应变片发生形变，使接入电桥的电阻发生变化，输出电压也随之变化^[18]。

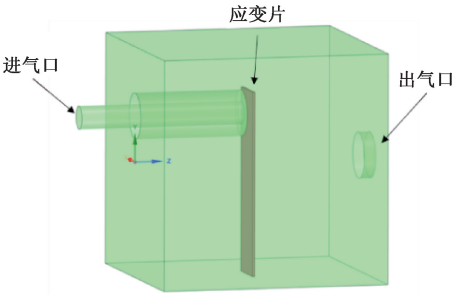


图 1 氧气流量传感器腔体结构
Fig. 1 Diagram of oxygen flow sensor cavity structure

利用 ANSYS Workbench 的 Space Claim 工具建立氧气流量计几何模型，通过改变应变片固定方式、氧气进气口半径和位置构建不同的计算模型，探究流体作用对应变片形变量的影响。

1) 固定方式

对比单端固定和两端固定，单端固定的应变片在受 Z 轴方向氧气流体冲击后，形变量(最大 0.6 mm)大于两端固定(0.02 mm)，单端固定结构传感器灵敏度更高，故采用单端固定。图 2 和 3 所示分别是单端固定和两端固定的形变。

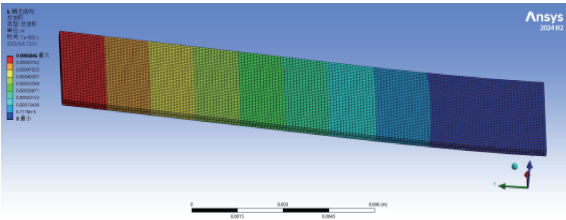


图 2 单端固定的形变
Fig. 2 Single-ended fixed deformation diagram

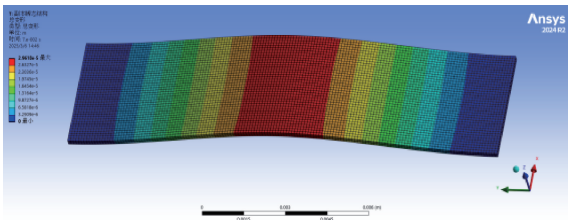


图 3 两端固定的形变
Fig. 3 Fixed deformation diagram at both ends

2) 进气口半径

设定半径为 0.5、1、1.5、2、2.5 mm，进气口位置位与距应变片顶端 2 mm 处，单端固定。分析不同半径进气管道下应变片形变云图及形变量随时间变化折线图，如图 4 所示。发现半径越小形变量越大，但半径过小会使氧气流速骤增，超出家用制氧机承受压力，综合考虑将进气管道半径设计为 1 mm。

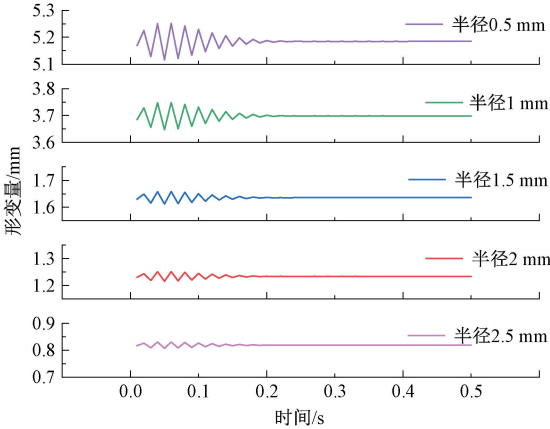


图 4 不同进气管道半径下应变片的最大形变量随时间变化
Fig. 4 Plot of the maximum deformation of the strain gauge over time at different inlet pipe radii

3) 进气口位置

设置进气口在应变片顶端、1/4 处、1/2 处，半径 1 mm 且单端固定。根据形变云图，进气口在顶端时应变片形变最大、灵敏度最高，因此将进气口位置设置为对准应变片顶端。

气体喷嘴的出气口与应变片之间的间隙设计，需确保不能够出现晃动，出气口与应变片二者的间隙需要控制在 0.5 mm 以内，否则会影响应变片的形变量；根据以上仿真分析得到的实物如图 5 所示。氧气流量传感器实物是用亚克力材料加工气流腔体，环氧树脂片制作支架，两片应变片固定在支架上，并且是正反放置；应变片之间留有间隙，防止气流量较大时产生共振啸叫声；应变片的电极引出腔体外面，焊接在信号调理电路板上。

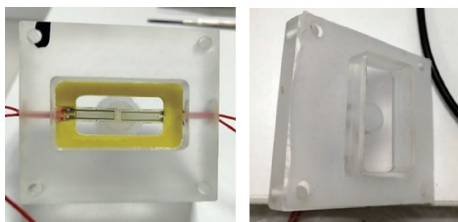


图5 氧气流量传感器实物

Fig. 5 The physical object of the flow rate sensor

2 氧气流量传感器应用电路设计

基于应变片传感器的制氧机用流量计硬件组成主要包括单片机模块(内置ADC采集数据)、电源模块、氧气流量传感器、放大电路、显示模块和蓝牙通信模块。整体结构框图如图6所示。

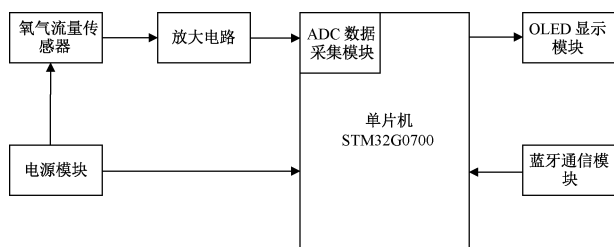


图6 流量计的模块结构示意图

Fig. 6 The schematic diagram of the flow meter's structure

2.1 单片机模块

单片机模块采用STM32G070作为主芯片,基于全新的高级精简指令集机器(advanced RISC machines, ARM) Cortex-M0+内核,主频达64 MHz,内置12 bits模数转换(analog-to-digital conversion, ADC),具有成本低、功耗低、性能高等优点。是数据处理的核心,采集的数据经处理后与显示模块进行信息交互。ADC数据采集模块将放大后的模拟信号转化为单片机模块能处理的数字信号。采集的是经过信号放大电路处理后的电压信号,确保从氧气流量传感器获得的微弱信号能够被精准转换为数字信号,提供给单片机进行后续处理。通过配置合适的采样时间和转换速度,ADC模块能够提供平衡的性能,满足系统对数据处理速率和功耗的需求。

2.2 电源模块

电源模块包括降压模块AMS1117-3.3和低压差线性稳压器(low dropout regulator, LDO)芯片SGM2201,降压模块AMS1117-3.3为单片机模块、氧气流量传感器、放大电路、显示模块提供稳定电压,LDO芯片SGM2201为惠斯通电桥提供0.8 V的低电压,抑制发热引起的温度漂移^[19]。

2.3 电桥及其放大电路

为了进一步提高信号的灵敏度和准确性,通常会在惠斯通电桥电路之后加入放大电路。放大电路可以放大桥路的输出电压,从而更容易地进行信号处理和测量。

图7所示为本文设计的惠斯通电桥式电路及其放大电路原理,对于应变式敏感元件的测量,一般采用惠斯通电桥,惠斯通电桥一般由4个电阻组成,用来测量其中一个电阻阻值,其余3个电阻已知。设惠斯通电桥供电电压为 V_{ref} ,电桥电路输出电压 U 为:

$$U = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_{ref} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{ref} \quad (7)$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 或者 $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$,则无论输入多大电压,输出 U 始终为0,这种状态称为平衡状态。如果平衡被打破,就会产生与电阻变化相对应的输出电压。为了有效增加灵敏度、提高测量准确性,设计采用改进的惠斯通电桥^[20],将第1电阻和第2电阻换成第1应变片P1和第2应变片P2;设第1应变片P1应变片的电阻值为 R_1 ,其改变量为 ΔR_1 ;第2应变片P2应变片的电阻值为 R_2 ,其改变量为 ΔR_2 ;当 $R_3 = R_4$,根据式(1)可以求得输出电压 U 为:

$$U = \frac{V_{ref}}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \quad (8)$$

其中,第1应变片P1、第2应变片P2采用同一种应变片,阻值一致。当第1应变片P1受到气流压力发生形变时,由电阻不断变化引起输出电压 U 不断变化。

为了方便后续检测该电压信号并将其作为信号源进行滤波、模数转换等处理,采用高性能运放芯片SGM8276和精密电阻组成的高精度差分放大器对输出电压放大处理,用LDO芯片SGM2201提供的0.8 V的直流电压为应变片电桥电路供电,可以明显抑制应变片通电发热的温度漂移。

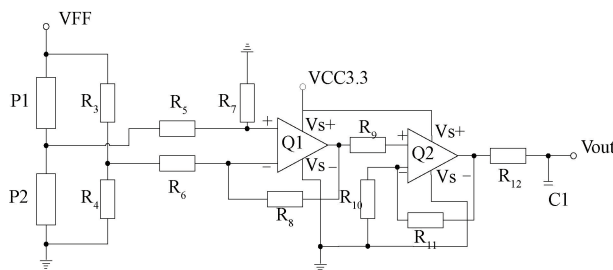


图7 惠斯通电桥式电路及其放大电路原理

Fig. 7 Schematic diagram of the Wheatstone bridge circuit and its amplifier circuit

2.4 显示模块

显示模块将单片机模块处理的测量数据和处理结果

直观地展示出来。设计中选用 0.96 in (1 in = 25.4 mm) OLED 显示屏,可以显示实时流量、累计流量、环境温度以及时间日期信息。

2.5 蓝牙模块

蓝牙通信模块选用 HC-08 模块,将主控芯片的串口信息转换为蓝牙信息传输,因此,制氧机的各项监测信息,比如实时氧气流速、累计使用时间等,均可借助蓝牙便捷地传输至上位机。上位机可将这些信息以动态形式直观展示,极大地提升了制氧机状态监测的可视化程度,便于用户随时精准掌握设备运行状况。

3 氧气流量传感器应用程序设计

软件设计基于 MATLAB 和微控制器开发套件(microcontroller development kit,MDK) Keil 开发平台。通过 MATLAB 软件拟合出电压-流速多项式方程,将电压值代入得到氧气流速。在测量程序中引入修正系数 ΔV ,仪器出厂时先在单片机模块的 FLASH 中记录一个标准的零流量电压值,并在仪器每次开机测量前,测量并记录一个实时零流量电压值,两个零流量电压值的差值即为修正系数 ΔV ,在任意一次测量氧气流速之前,均先对测得的流速值进行数据修正。拟合出氧气流速 S 与电压值 V 的函数关系如下:

$$S = aV^6 + bV^5 + cV^4 + dV^3 + eV^2 + fV + g \tag{9}$$

其中,拟合参数 $a\sim g$ 取值如下:

- $a = -1.838\ 149\ 073\ 916\ 09e^{-15}$
- $b = 1.266\ 920\ 814\ 253\ 45e^{-11}$
- $c = -3.607\ 706\ 399\ 664\ 34e^{-8}$
- $d = 5.435\ 580\ 396\ 664\ 36e^{-5}$
- $e = -0.045\ 719\ 972\ 738\ 807\ 5$
- $f = 20.375\ 763\ 023\ 261\ 3$
- $g = -3\ 761.270\ 100\ 617\ 90$

将式(9)中氧气流速 S 与电压值 V 的函数关系通过代码存储在测试软件中,作为流速-电压值转换的依据,从而实现不同氧气流速的测量。自修正算法的程序流程如图 8 所示。

自修正算法程序的工作原理如下:流量计组装完毕之后,通过测量并记录一次零流量下的输出电压值 V_0 ,保存在 FLASH 中。之后每次通电初始化,判断是否首次开机工作。

若是首次测量,则通过测量并记录一次零流量下的输出电压值 V_1 ,将 V_1 和 V_0 求差值得到修正系数 ΔV 并存入 FLASH。

若系统不是首次测量,则自动引入修正系数 ΔV 对测试电压进行修正,然后再代入式(9)进行电压值和氧气流速转化。

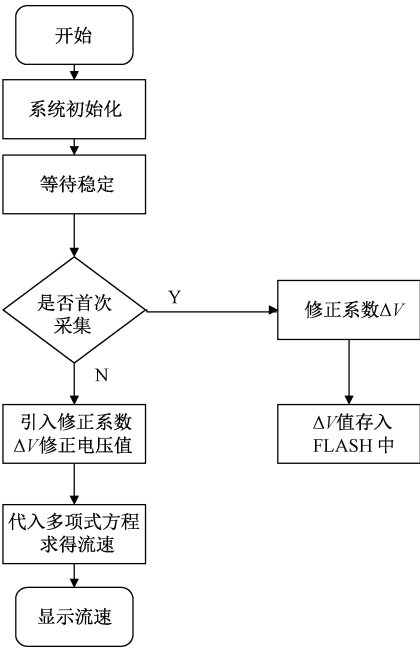


图 8 自修正算法的程序流程
Fig. 8 Flow chart of the self-correcting algorithm

但是其过程中存在噪声信号^[21],所以引入卡尔曼滤波算法^[22],对电压数据进行处理,消除噪声^[23],提高数据的准确性和可靠性。

4 测量与分析

为了验证氧气流量传感器及其信号调理电路的稳定性,通过商用制氧机提供固定流量的氧气,测试信号调理电路的输出电压的稳定性以及软件算法计算的氧气流量的稳定性,结果分别如下。

4.1 信号调理电路的输出电压测试

本文设计采用的 LDO 芯片是 SGM2201,这是一款精密稳压芯片,可提供稳定的参考电压输出,具有低噪声、高稳定性和高精度的特点^[24]。使用这种供电方式,在室温 26 ℃、零流量下持续供电,用高精度万用表测量惠斯通桥式电路及其放大电路的输出电压,每隔 5 min 记录一次数据,多组数据如表 1 所示。

表 1 输出电压数据

Table 1 Output voltage data (mV)				
电压初始值	5 min 电压值	10 min 电压值	15 min 电压值	20 min 电压值
775	776	779	778	778
775	776	776	776	776
776	778	778	778	778
775	776	778	778	778
775	776	777	777	777

从表 1 可以看出,在持续供电的情况下,应变片发热带来的零点漂移,导致的电压波动低于 4 mV,LDO 芯片 SGM2201 能提供稳定的电压输出,通过这种方式输出的电压非常稳定,因此能够明显抑制应变片通电发热的温度漂移,也是测量误差低的保证。

4.2 氧气流量测试

流量计的使用环境,尤其是温度发生变化后对氧气流速测量的结果影响较大,所以在温度环境下,多次实验,测量数据,分析温度对数据的影响。

整个实验系统由鱼跃家用制氧机、标准热式气体流量计、氧气流量计实物以及多端通气软管连接构成。实验开始前,首先需确保氧气气源已就绪,以便为实验提供必要的气体输入;接着利用气体流量调节旋钮控制气体在进入标准热式流量计之前的流量,确保达到实验所需的氧气流量大小;最后与氧气流量计实物连接,经过上述步骤调节的氧气将通过热式流量计的出口顺利流入氧气流量计进气口,以供后续的测试和分析。实验环境如图 9 所示。



图 9 实验环境
Fig. 9 Experimental Environment

本文实验使用的恒温箱为 CTE-SGU9006-02F 型超低温型高低温试验箱,温度范围为-90 ℃ ~ +150 ℃。将氧气流量计放置于恒温箱中,根据家用制氧机的适宜工作温度,设定实验温度区间,测试氧气流量计的稳定性。

对不同温度下的氧气流速测量结果如表 2 所示。

表 2 不同温度环境下的氧气流速测量结果

Table 2 Oxygen flow velocity measurement results in different environments (L·min⁻¹)

氧气流速	-10 ℃	0 ℃	15 ℃	25 ℃	40 ℃
0	0	0	0	0	0.4
1	0.3	0.5	0.7	1.1	1.3
2	1.4	1.6	1.8	2	2.4
3	2.3	2.6	2.8	3	3.4
4	3.4	3.6	3.9	4.1	4.3
5	4.3	4.5	4.7	5	5.3

观察表 2 可以发现,在常温环境下,测量结果最为准确;在高温和低温环境下,测量误差较大。为解决这一问题,在软件设计中引入自修正算法优化。

引入自修正算法程序之后,再对氧气流量计进行不同温度下的测量,测量结果如表 3 所示。

表 3 引入修正算法后氧气流速测量结果

Table 3 Oxygen flow velocity measurement results after correcting the correction algorithm

(L·min ⁻¹)					
氧气流速	-10 ℃	0 ℃	15 ℃	25 ℃	40 ℃
0	0	0	0	0	0.2
1	0.8	0.9	1	1	1
2	1.8	1.9	1.9	2	2.1
3	2.9	2.9	2.9	3	3
4	3.9	3.9	4	4.1	4.1
5	4.8	4.9	5	5	5

从表 3 可以看出,在引入自修正算法程序之后,流量计能在温度变化较大的情况下,依然准确地测出氧气流速,保证误差小于 0.2 L/min。同时本设计的实现方法也避免了由于仪器长时间使用,元器件老化、应变片疲劳问题等客观因素对测量结果的影响。

4.3 传感器响应时间测试

通过调气阀控制氧气流速为 3 L/min,在传感器的进气管由闭合状态打开瞬间,对应变式流量计的显示屏进行录像。通过慢速播放来记录传感器显示值的变化,结果如表 4 所示。

表 4 传感器响应时间

Table 4 Response time of the sensor

响应时间/s	流量/ (L·min ⁻¹)	响应时间/s	流量/ (L·min ⁻¹)
0	0	1.8	3.1
0.4	0.8	2.0	3.1
0.8	1.8	2.4	3.1
1.2	2.4	2.8	3.1
1.6	2.8	3.5	3.1

从表 4 可以看出,传感器的数值在 1.8 s 之后就稳定在 3.1 L/min,所以该传感器的响应时间小于 2 s。

4.4 环境干扰测试

商用 5 L 制氧机内部的分子筛能有效吸附氮气,并有抗潮能力,所以用制氧机作为氧气来源时,其产生的氧气是干燥的,不用考虑空气湿度对氧气流量传感器的影响。由于商用 5 L 制氧机的工作气压范围是 86 ~ 106 kPa,有必要对氧气流量传感器在不同气压条件下的工作情况进行测试。

将应变片式流量计放入压力试验箱,设定试验箱工作温度为 25 ℃。制氧机和热式流量计置于试验箱外部,跟应变片式流量计的进气口和出气口分别用软管串接。实验环境如图 10 所示。不同气压下的氧气流速测量结果如表 5 所示。

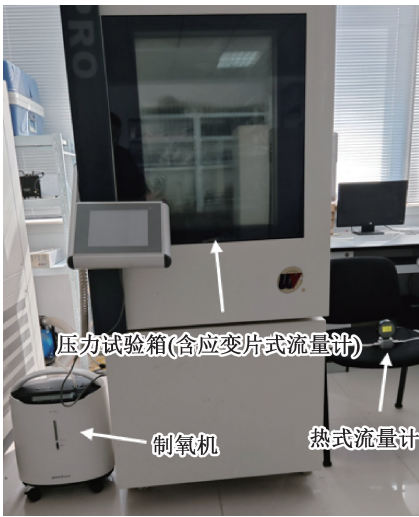


图 10 气压测试现场

Fig. 10 Barometric pressure test site diagram

表 5 气压变化对氧气流速测量结果

Table 5 Air pressure variation impact on oxygen flow rate measurements

氧气流速/(L·min ⁻¹)	86 kPa	96 kPa	106 kPa
0	0	0	0
1	1.1	1.0	0.9
2	2.0	2.1	2.0
3	3.1	3.0	3.0
4	4.1	4.1	4.0
5	5.0	5.0	4.9

从表 5 可以看出,在 86、96、106 kPa 3 种气压下,氧气流速的测量结果变化较小。

4.5 老化寿命测试

将应变片式流量计连续工作 168 h,在老化过程中记录流量计的测量结果。测量过程中保持温度不变,氧气流速保持在 3 L/min,老化测试结果如表 6 所示。

表 6 疲劳测试结果

Table 6 Fatigue test results

老化时间/h	实测流量/(L·min ⁻¹)	老化时间/h	实测流量/(L·min ⁻¹)
24	3.1	100	3.1
40	3.1	115	3.1
58	3.1	132	3.2
60	3.1	150	3.2
84	3.1	168	3.2

从表 6 可以得到,在整个 168 h 的老化过程中,传感器的输出波动非常小,仅介于 3.1 和 3.2 之间,没有出现跳变、漂移过大或失效的情况,证明其具备较好的可靠性和耐久性。

传感器在老化测试中表现稳定,未出现严重性能衰退,具备良好的应用潜力。

5 结 论

本文设计并实现了一种基于应变片传感器的制氧机用智能流量计,系统包括氧气流量传感器、信号调理电路、单片机模块、电源模块、显示模块及蓝牙通信模块。该流量计在 0.5~5 L/min 范围内实现了高精度测量,最大绝对误差小于 0.2 L/min,响应时间低于 2 s,并在 -10 ℃~40 ℃ 温域及 86~106 kPa 气压范围内表现出良好的稳定性。168 h 老化测试中输出稳定,验证了其长期可靠性。本工作的主要创新点在于通过仿真确定最优传感结构,结合低漂移供电与高增益放大电路,并嵌入自适应算法,系统性地提升了测量精度与环境适应性以及采用通用元器件与开源算法,在保证性能的同时显著降低了成本,并通过蓝牙模块实现了数据无线传输与远程监控,符合医疗设备智能化发展趋势。后续工作将围绕传感器量程扩展、多参数融合以及嵌入式人工智能在线校准等方面展开,进一步提升其在复杂环境下的鲁棒性与自适应能力,为智慧医疗与居家健康监护提供更可靠的硬件支持。

参考文献

[1] 牛航舵,朱子孚,胡丹丹,等. 医用制氧设备研制及发展趋势[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47(3): 294-297,303.
NIU H D, ZHU Z F, HU D D, et al. Development and development trends of medical oxygen generation equipment [J]. Chinese Journal of Medical Devices, 2023, 47(3): 294-297,303.
[2] 孙立军,党士忠,张涛,等. 流量计性能受流量稳定性影响实验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(4): 422-432.
SUN L J, DANG SH ZH, ZHANG T, et al. Experiment on the influence of flow stability on the performance of flowmeters [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(4): 422-432.
[3] 张靓,陆春,孙国杰,等. 小微气体流量计量技术的应用[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2022(2): 15-17.
ZHANG L, LU CH, SUN G J, et al. Application of micro and small gas flow measurement technology [J]. Standardization and Metrology of Instruments and Meters, 2022(2): 15-17.
[4] 刘爱琦. 天然气流量测量与泄漏检测技术研究[D]. 常州:常州大学, 2021.
LIU AI Q. Research on natural gas flow measurement and leakage detection technology [D]. Changzhou:

- Changzhou University, 2021.
- [5] 罗莉,冯全源,何璇,等. 基于恒定功率的热式流量计设计与测试[J]. 仪表技术与传感器, 2024(1): 41-45,75.
- LUO L, FENG Q Y, HE X, et al. Design and test of thermal flowmeter based on constant power [J]. Instrument Technique and Sensor, 2024(1): 41-45,75.
- [6] 张晨,冯坚强,沈悦,等. 基于双测试原理的热式质量流量计的设计[J]. 测控技术, 2021, 40(12): 9-13.
- ZHANG CH, FENG J Q, SHEN Y, et al. Design of thermal mass flowmeter based on dual-test principle[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(12): 9-13.
- [7] 余嘉芸,娄倩男,丁优婷,等. 超声波流量计误差因素与技术研究进展[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(4): 50-59.
- YU J Y, LOU Q N, DING Y T, et al. Research progress on error factors and technologies of ultrasonic flowmeter[J]. Metrology Science and Technology, 2024, 68(4): 50-59.
- [8] 黄浩钦,李国占,赵鹏,等. 压力位差式层流流量传感技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 72-79.
- HUANG H Q, LI G ZH, ZHAO P, et al. Research on pressure differential laminar flow sensing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 72-79.
- [9] 代国红,杨天宇,万书函,等. 基于应变片全桥差动电路的悬臂梁杨氏模量测量实验[J]. 南昌大学学报(理科版), 2024, 48(6): 521-527,534.
- DAI G H, YANG T Y, WAN SH H, et al. Experiment on measuring the Young's modulus of a cantilever beam based on the full-bridge differential circuit of strain gauges [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science Edition), 2024, 48(6): 521-527,534.
- [10] 丰远,边健,刘慧,等. 基于电阻应变效应的惠斯通电桥测量重量实验[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2020, 20(10): 45-48.
- FENG Y, BIAN J, LIU H, et al. Experiment on measuring weight using a wheatstone bridge based on the resistance strain effect [J]. Journal of Heilongjiang University of Technology (Comprehensive Edition), 2020, 20(10): 45-48.
- [11] 陈碧海,陈杉杉,程宝进. 惠斯通电桥式压力传感器温度补偿电路设计[J]. 遥测遥控, 2020, 41(2): 15-19,26.
- CHEN B H, CHEN SH SH, CHENG B J. Design of the temperature compensation circuit for a wheatstone bridge type pressure sensor [J]. Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(2): 15-19,26.
- [12] 杨双龙,徐科军,舒张平,等. 应变式多维力传感器的故障诊断方法与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1361-1371.
- YANG SH L, XU K J, SHU ZH P, et al. Fault diagnosis method and implementation of a strain-type multi-dimensional force sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9): 1361-1371.
- [13] AGA R S, DUNCAN L, DAVIDSON L, et al. Design and fabrication of a metal resistance strain sensor with enhanced sensitivity [J]. IEEE Sensors Letters, 2024, 8(10): 1-4.
- [14] 潘睿智,冯艳,张洪涛,等. 基于 DDS 信号和插值法的 FBG 解调系统研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(24): 6-13.
- PAN R ZH, FENG Y, ZHANG H P, et al. Research on FBG demodulation system based on DDS signal and interpolation method [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24): 6-13.
- [15] 孙英,汪忠晟,韩智昊,等. 镓基液态金属柔性应变传感器的设计优化与实验验证[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 16-26.
- SUN Y, WANG ZH SH, HAN ZH H, et al. Design optimization and experimental verification of a flexible strain sensor based on gallium-based liquid metal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 16-26.
- [16] 田英威. 阵列式柔性压电应变传感器的设计、加工与性能研究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.
- TIAN Y W. Design, fabrication and performance study of an array-type flexible piezoelectric strain sensor [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [17] GAJULA B R, MAHATA S, PINGALI A, et al. MEMS capacitive pressure sensor: Analysis, theoretical modeling, simulation and performance comparison of the effect of a conical notch [J]. Engineering Research Express, 2024, 6(4): 045337.
- [18] PARK Y, LUAN H, KWON K, et al. Soft, full Wheatstone bridge 3D pressure sensors for cardiovascular monitoring[J]. npj Flexible Electronics, 2024, 8:6.
- [19] 田传升,王俊强. 一种用于压力传感器的温度补偿电路的设计与实验[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(7): 104-110.
- TIAN CH SH, WANG J Q. Design and experiment of a temperature compensation circuit for pressure sensors [J]. Micronano Electronic Technology, 2024, 61(7): 104-110.

- [20] 金宇,黄薪薪,冯卓宏,等. 基于惠斯通电桥的非极值电阻自动测量方法[J]. 实验室科学,2020,23(5):29-31,36.
- JIN Y, HUANG X X, FENG ZH H, et al. An automatic measurement method of non-extreme resistance based on Wheatstone bridge [J]. Laboratory Science, 2020, 23(5): 29-31,36.
- [21] 张丽丽,陈余寿. 一种基于电阻应变片式传感器的简易电子秤设计[J]. 电子科学技术,2017,4(4):96-100.
- ZHANG L L, CHEN Y SH. Design of a simple electronic scale based on a resistance strain gauge sensor [J]. Electronic Science and Technology, 2017, 4(4): 96-100.
- [22] 陈星燎,刘通,卢姗,等. 高精度电子分析天平参数估计与滤波[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(10):65-73.
- CHEN X L, LIU T, LU SH, et al. Parameter estimation and filtering of high-precision electronic analytical balances [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10): 65-73.
- [23] 江丹,刘祖深,安宇宁. 基于噪声与干扰抑制的 5G 波束检测算法与实现[J]. 国外电子测量技术,2023,42(4):31-37.
- JIANG D, LIU Z SH, AN Y N. Algorithm and implementation of 5G beam detection based on noise and interference suppression [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(4): 31-37.
- [24] 杨靳. 宽输入电压低功耗 LDO 芯片设计[D]. 西安:

西安邮电大学,2024.

YANG J. Design of a micro-power LDO chip with wide input voltage [D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2024.

作者简介



魏梦颖,2024 年于淮阴工学院获得学士学位,现为南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为传感器技术和嵌入式系统。

E-mail: 2199646163@qq.com

Wei Mengying received her B. Sc. degree from Huaiyin Institute of Technology in 2024. Now she is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Information Science & Technology. Her main research interests include sensor technology and embedded systems.



华国环(通信作者),2004 年于东南大学获得学士学位、2008 年于东南大学获得硕士学位、2013 年于东南大学获得博士学位,现为南京信息工程大学副教授,主要研究方向为传感器信号采集系统和数模混合集成电路。

E-mail: hgh20010@163.com

Hua Guohuan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Southeast University in 2004, M. Sc. degree from Southeast University in 2008, and Ph. D. degree from Southeast University in 2013, respectively. Now he is an associate professor at Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interests include sensor signal acquisition systems and mixed-signal integrated circuits.