

一种微流量控制原理的标准压力发生器设计

关卫军,边松岩,路宗敏,王爱华

(陕西省计量科学研究院,陕西 西安 710100)

摘要:标准压力发生器作为压力计量标准器被广泛应用于压力仪表的检定和校准中。该文设计了一种基于微流量控制的标准压力发生器,通过对进气、泄气流量控制的方式实现对装置输出压力的精确调节。该文内容包含总体设计、硬件设计和软件设计三部分,分别对装置的电路、气路、流量控制装置、软件界面、软件驱动以及软件控制流程等作了阐述。设计的装置可通过触屏人工输入目标压力值自动发生并稳定输出一个气体标准压力值,压力最高可达 25 MPa,压力精度等级可以达到 0.05 级,实现了压力控制自动化,提高了高压气介质压力仪表检定和校准效率。

关键词:标准压力发生器;流量控制;压力控制;串级控制

中图分类号:TP23;TH812

文章编号:1000-0682(2024)04-0042-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.009

Design of a standard pressure generator with micro flow control principle

GUAN Weijun, BIAN Songyan, LU Zongmin, WANG Aihua

(Shaanxi Institute of Metrology, Shaanxi Xi'an 710100, China)

Abstract: The standard pressure generator, as a pressure measurement standard, is widely used in the verification and calibration of pressure instruments. This article designs a standard pressure generator based on micro flow control, which precisely adjusts the output pressure of the device by controlling the intake and exhaust flow rates. This article includes three parts: overall design, hardware design, and software design, which respectively explain the circuit, gas path, flow control device, software interface, software driver, and software control process of the device. The designed device can automatically generate and stably output a gas standard pressure value by manually inputting the target pressure value through the touch screen, with a maximum pressure of 20 MPa and a pressure accuracy level of 0.05, achieving pressure control automation and improving the efficiency of high-pressure gas medium pressure instrument calibration and calibration.

Keywords: standard pressure generator; flow control; pressure control; cascade control

0 引言

标准压力发生器(Standard Pressure Generators, 简称 SPG)也叫压力测量控制器(Pressure Measurement Controller, 简称 PMC),是一种可以根据设定值自动发生与之匹配的标准气体压力或液体压力并实时测量的自动化控制装置,常作为压力计量标准器用于压力仪表的检定和校准^[1-3],国家 2015 年发布了 JJG 1107-2015《自动标准压力发生器》计量检

定规程,为其作为计量标准器提供的溯源保障^[4]。根据工作介质的不同常分为液体介质 SPG 和气体介质 SPG 两种,液体介质 SPG 主要用于高压校准,压力发生范围一般从 2 MPa 起步,最高可达 200 MPa,这是液体介质 SPG 的最大的优点,其缺点也比较明显,不能校准工作介质为气体的压力仪表,比如氧气压力表、氧气吸入器和气体减压器等。气体介质 SPG 主要用于低压校准,压力可以从 -0.1 MPa 起步,一般不超过 10 MPa。目前主流的气体介质 SPG 压力控制原理如图 1,是通过接收标准压力传感器的反馈信号控制高频电磁阀通断,从而实现标准压力输出。这种原理的 SPG 控制相对简单,已被广泛应用^[5]。

收稿日期:2024-03-06

第一作者:关卫军(1980—),男,陕西西安人,工程硕士,高级工程师,研究方向为仪器仪表工程、计量检定校准。

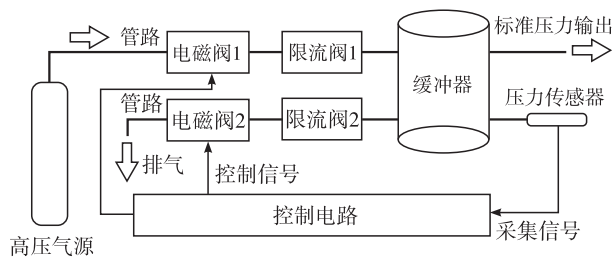


图1 电磁阀通断压力控制原理图

以上压力控制原理的 SPG 为了实现精确的压力控制,对电磁阀的通断频率响应求较高,电磁阀工作压力不高时,高频响应容易实现。但高频响应随着工作压力的升高变得越来越困难^[6-7]。因此目前市面大多数的高频电磁阀工作压力在 10 MPa 以下。这种控制原理的 SPG 工作压力总体不高。随着技术的快速发展,高压气体介质的压力仪表应用越来越广泛,比如氧气吸入器、正压呼吸器以及高压气充气装置上的压力表,压力上限均在 15 MPa ~ 40 MPa 之间。压力表示值的准确涉及到人民的生命安全,校准需求尤为重要。为了实现气体介质高压力的精确控制,该文提出了一种基于伺服流量控制原理的 SPG,可以实现对 25 MPa 以下气体压力的控制。

1 总体设计方案

该方案设计思路利用联轴器将伺服电机与微流量调节阀连接起来,通过这种组合的方式控制气体进出流量,从而达到压力控制的效果。这种方式结构简单,压力调节连续性好,超调较小,最高可实现 25 MPa 气体压力的控制。

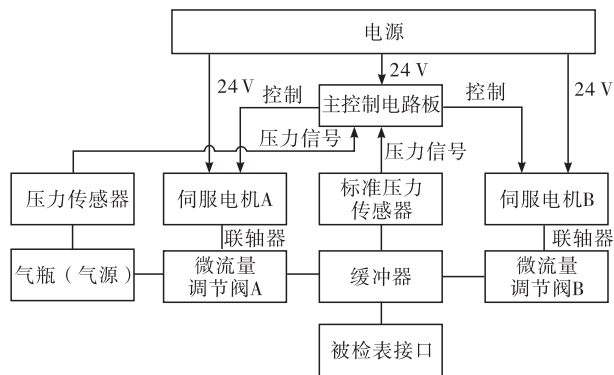


图2 原理框图

该装置如图 2 所示,主要由伺服电机、微流量调节阀(该阀通过旋转调节旋钮可以调节通过阀体的流量大小)、标准压力传感器、缓冲器、高压气压源以及主控制电路等组成,装置结构如图 3 所示。原理图中 2 个伺服电机分别通过联轴器与 2 支微流量调节阀相连构成的流量调节装置如图 4 所示,用于

控制进气和泄气。

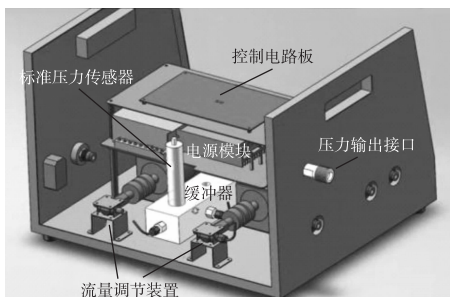


图3 装置结构图

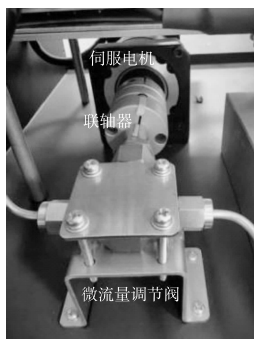


图4 流量调节装置结构实物图

该装置中主控制电路接收用户输入的目标压力和采集到的压力传感器实时压力值,按照一定的算法进行数据处理后,通过调节 2 个伺服电机的旋转角度分别控制进气微流量调节阀与泄气微流量调节阀开度,来调整缓冲器内的压力,再通过标准压力传感器反馈的实时压力测量数据不断修正进气阀和泄气阀的开度,从而实现对缓冲器内压力的精确控制。缓冲器连接标准压力输出接口,可连接被检的压力仪表,实现对压力仪表的检定校准。由于微流量调节阀工作压力可以到 25 MPa 甚至更高,因此该装置可实现气体高压的精确控制。

2 硬件系统设计

标准压力发生器的硬件系统组成如图 5 所示。

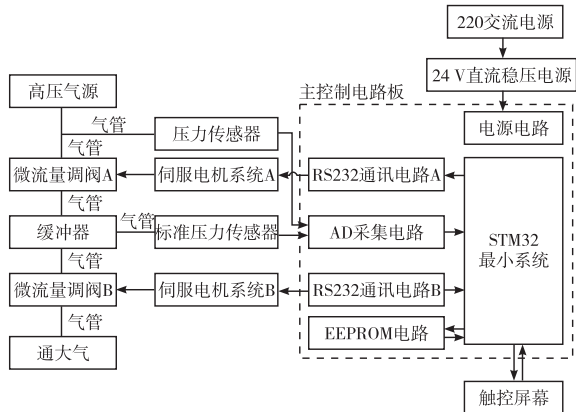


图5 硬件系统组成

24 V 直流稳压电源将 220 V 交流电源转换为 24 V 直流电源,为伺服系统以及主控制电路提供稳定电源输入。

主控制电路板中包含 STM32 最小系统、电源电路、RS232 通讯电路、AD 采集电路以及 EEPROM 电路。

电源电路,其作用是将 24 V 电源转化为 5 V、3.3 V 供给各个功能电路。

标准压力传感器,用来实时采集缓冲器内的压力数值,将气压转化为模拟信号,本项目采用的标准压力传感器,测量范围 25 MPa,准确度等级 0.05 级。

AD 采集电路采集标准压力传感器反馈的模拟输出信号并将其转换为数字信号,通过 SPI 通讯传输给微控制处理器 STM32F429 芯片进行处理与运算。该系统采用的 AD 芯片为 ADS1256,具有高达 23 位无噪声分辨率,±0.001% 非线性(最大值),数据输出速率达到 30 kSPS,带传感器检测的灵活输入多路复用器,有 4 个差分输入或者 8 个单端输入。在采集输入端加入了滤波电路,其采集的范围为 (0~5) V。

EEPROM 电路用来断电保存必要的参数,通过 I²C 通讯与微控制芯片进行通信。

控制芯片 STM32F429 通过 RS232 通信电路与伺服电机系统实现相互通信,控制伺服电机的旋转位置。伺服电机与微流量调节阀通过膜片联轴器相连,利用伺服电机的转动来控制微流量调节阀的开合程度,从而实现对缓冲器内压力的精确控制。

触控屏幕,其作用是作为人机交互的界面,操作装置以及显示数据。使用 7 寸的 TFT_LCD 屏幕作为触控屏来使用。

高压气源作为控制系统的气压源,提供气体流动的压力差,在高压气源处接入压力传感器,采集高压气源的压力值。

缓冲器作为气体的存储介质,为压力控制提供缓冲,降低压力调节的波动,提高控制气压的精度。

微流量调节阀 A,是用来调节高压气源进入到缓冲器的进气量,控制缓冲器内的压力升高。微流量调节阀 B,是用来调节缓冲器排出气量,控制缓冲器内的压力降低。对于流量调节阀的选型要求,在进行旋钮调节时,每单位角度调节的阀的开合量要尽可能的均匀且大小合适,过大会造成压力变化过快,调节的精度降低,过小会影响到调节速度。具体

需要通过实验进行测试。还要求调节阀调节死区和调节重复性尽可能小。根据本设计要求,阀体工作压力不低于 25 MPa。目前市面上很难找到没有调节死区的微流量调节阀,但重复性较好的阀体相对较多。该项目选用针型微流量调节阀,如图 6 所示。经过大量试验发现随着调节阀两端的压力差变化阀体开启零点和关闭零点的位置也随之变化,如图 7 所示。虽然仍有一段死区,但是其开启零点与关闭零点位置相对很接近。经过软件上重新找零点,可将压力控制在一个稳定的范围内,硬件接口也可完全匹配。



图 6 微流量调节阀

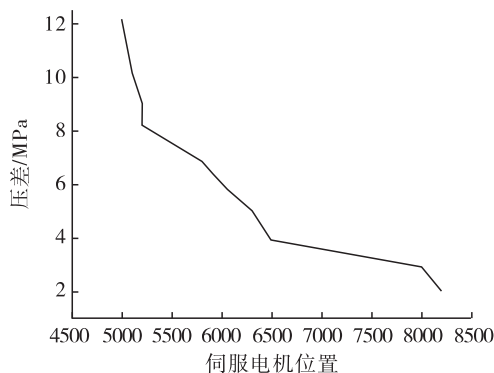


图 7 阀体零点位置与压差之间的关系图

高压气源,微流量调节阀 A,缓冲器,流量调节阀 B,之间通过不锈钢气管进行连接,组成完整的气路结构。

伺服系统,主控制电路板通过与伺服电机的通讯,控制伺服电机对流量调节阀进行调节。根据对流量调节阀扭矩测试实验能够确定开关阀所需要的最小扭矩,通过实验可知选用的伺服电机扭矩应不小于 1.62 N·m,转速 75 RPM 为宜。项目最终选取的伺服电机,使用 24 V 电压供电,额定扭矩为 3.2 N·m,满足流量调节阀的调整对扭矩的要求。

3 软件系统设计

系统的软件组成如图 8 所示,SPG 的软件采用

uC/OS - III 实时操作系统,多线程进程^[8],主要的功能程序包括文字图像显示程序,AD 采集程序,伺服电机控制程序,压力控制算法程序。

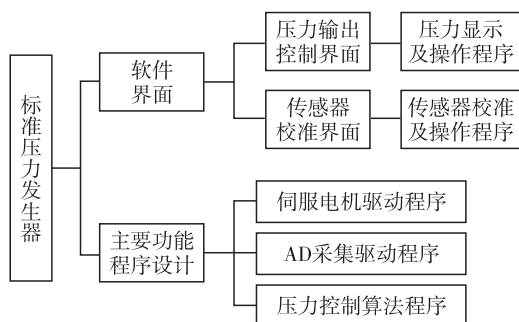


图 8 系统软件组成图

AD 采集程序用于压力数据的采集,与数字滤波处理,所采集的压力数据作为标准压力用于压力控制;伺服电机驱动程序,用作执行基本的伺服电机转动控制的指令;压力控制算法程序,根据特定算法控制 2 个伺服电机进行进气与排气的操作,将缓冲内的压力控制在设定值范围内。

使用 emWin 图形界面进行 UI 界面设计,包括压力输出控制界面与传感器校准界面^[9]。压力输出控制界面中有压力显示及相应的操作程序,传感器校准界面中有压力传感器的校准及相应的操作程序,可以对压力传感器定期进行校准,确保 SPG 的压力输出准确。

3.1 压力输出控制界面

压力输出控制界面如图 9 所示。压力输出控制界面中包括压力传感器数据的显示,作为实时的压力显示;设定值的收入框,用于输入压力控制的设定值;步距输入框,用于输入压力控制步距量(每步增量);步进与步退按钮,用于用户根据步距执行步进或步退的压力控制操作;控制按钮,用于执行输出压力控制控制程序;通大气按钮,缓冲器中连接到大气压,释放缓冲器内的压力;测量按钮,不执行压力控制程序,保持缓冲器内的压力,并实时测量显示。



图 9 压力检测界面

3.2 主要驱动程序设计

ADC 采集驱动程序,主要是根据 AD1256 硬件芯片采集通讯方式与寄存器设置的规则,进行设计的。在单端输入模式下,采用 AIN0 与 AIN1 的通道,分别进行标准压力传感器与压力传感器的数据采集,从 AD 芯片采集的数据经传感器的校准参数修正后输出准确的压力值,传感器的校准参数保存在 EEPROM 的存储芯片中,保证断电不丢失,在每次设备上电时进行读取。

伺服电机作为压力输出功能的主要控制部件,采用了 RS232 通讯控制方式,根据通讯的格式和驱动器进行数据传送。使用串口 1 与串口 2,分别向进气控制伺服电机与放气伺服电机发送特定的控制指令,调整电机转动的角度。

在程序的开始阶段,通过 RS232 发送电机启动指令和发送设定位置模式的指令。在进行调整电机转动的位置时,向电机发送位置数据。在需要监控 2 个电机状态时,发送指令读取当前的电机状态。

3.3 压力控制程序设计

该项目采用了串级控制的思路,将压力的变化率控制与压力控制结合起来^[10-11]。串级控制中,外环为压力环,内环为压力变化速率环。压力环的输入是整个控制系统的压力设定值,主对象为缓冲器内的压力值,其由压力传感器采集;压力变化速率环的输入由压力环的输出值计算得出,构成随动系统,副对象为压力变化速率,由压力传感器采集与定时器计算得出。

若实测压力值与目标压力值(控制设定值)的偏差增加,则将控制器的压力变化速率设定值增大,保证在一定的范围内,压力值快速提升;若偏差降低,则将控制器的压力变化速率设定值变小,以维持压力值的缓慢增加,防止超调。压力变化速率控制的设定值随系统压力值偏差的变化而变化^[12-13]。压力输出控制的串级控制方框图如图 10 所示。

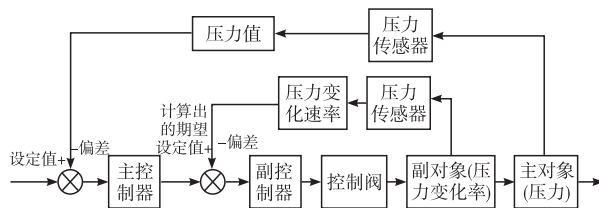


图 10 串级控制方框图

整体的压力输出控制程序流程如图 11 所示。

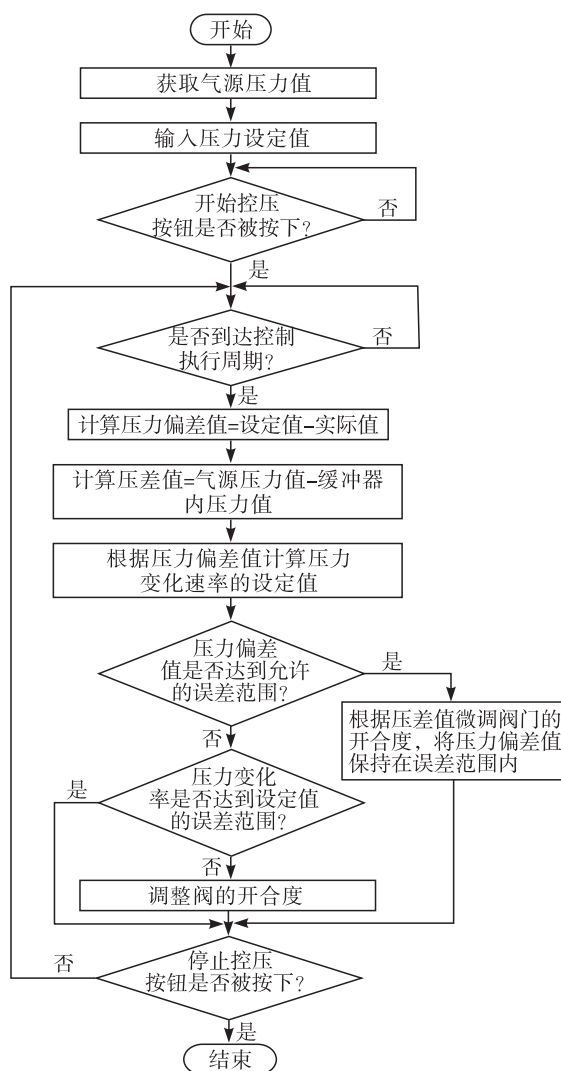


图 11 压力输出控制程序流程图

进入压力控制界面后,获取气源压力值用于与进气阀体的两端压差的计算。打开压力控制界面后,在压力设定值的输入框输入目标压力值。当控制的按钮被按下,开始进行压力控制功能。依照定时器的控制间隔,当达到执行周期时,开始执行控制,由实际测量值(标准压力传感器测量反馈值)减去目标压力值得到压力偏差值,由气源压力值减去缓冲器内压力值得到阀体两端压差值。从而根据压力偏差值计算压力变化速率的设定值。再对压力偏差值是否达到允许的误差范围进行判定,若是,则需要根据当前压差值微调阀门的开合度,重新设置阀状态,将压力偏差值保持在控制允许范围内;若否,则直接进行下一步的操作。判断压力变化率是否达到允许的偏差范围,若为否,则根据参数进行阀的开合度调整;若为是,则不进行调整。最后进行停止控

压按钮是否被按下的判断,如果持续为否,则不停地进行控压程序的循环;如果为是,则结束整个控压程序。

4 总结语

该文所设计的 SPG 较传统的电磁阀控制原理的 SPG,发生的标准压力值更高,输出更稳定。实现最高 25 MPa 标准气体压力发生,压力的准确度等级达到 0.05 级,可作为压力计量标准器用于高压气介质压力仪表检定校准,保障高压气介质压力仪表量值的准确可靠,具有很好的推广价值。

参考文献:

- [1] 王洋,盛晓岩,彭铁. 多量程并行输出自动标准压力发生器的设计[J]. 自动化仪表,2023,44(04): 8-11.
- [2] 罗昶,闫晋平,姚晓东,等. 自动标准压力发生器控制原理及检定方法研究[J]. 计测技术,2021, 41(04): 36-43.
- [3] 欧雷. 自动标准压力发生器控制性能检定的探讨[J]. 计测技术,2017, 37(S1): 168-170.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. 自动标准压力发生器: JJG 1107-2015 [S]. 2015.
- [5] 邓金华,何昭志. 便携式微压压力发生器现场校准装置的设计[J]. 电子测试,2021(05): 26-27.
- [6] 黎德祥. 基于电磁直驱阀的制动系统设计与压力控制技术[D]. 淄博:山东理工大学, 2022.
- [7] 李文静,龚国芳,刘建,等. 基于高频电磁阀压力控制的列车制动电液系统仿真[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(02): 340-348.
- [8] 吴尧辉,冯冲,吴昊珍. 基于 $\mu C/OS-III$ 和 emWin 的供电综合保护器设计[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(12): 101-104.
- [9] 周彬,程进军,马宏锋. 基于 emWin 的仓储物流机器人的无线充电管理系统设计[J]. 无线电工程, 2020, 50(02): 167-170.
- [10] 顾超越,王彪,唐超颖. 基于串级模型预测控制的倾转旋翼机过渡段控制[J]. 控制工程, 2024, 31(01): 161-167.
- [11] 刘悦婷,孟维华,丁建中. 一种 PID-PID 串级控制系统的设计及其性能分析[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2023, 49(04): 358-365.
- [12] 褚伟,王亚刚,徐闯. 串级控制系统模型矩量辨识方法[J]. 控制工程, 2023, 30(04): 629-636+648.
- [13] 于蒙,邹志云. 基于改进差分进化算法-径向基神经网络的电热水浴串级控制系统研究[J]. 化工学报, 2019, 70(12): 4680-4688.