

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005399

一种高精度气体流量控制算法设计*

岳彬

(北京航空工程技术研究中心 北京 100076)

摘要: 日前所使用的质量流量控制器普遍存在响应的滞后性,从而导致质量流量控制器出现滞后控制,导致油气浓度检测报警系统检定校准装置因配制气体浓度不精确而校准失败。针对油气浓度检测报警系统检定校准装置因所控气体流量变化慢而导致配制气体浓度不精确的问题,设计一种基于一阶加纯滞后模型的质量流量控制器的油气浓度检测报警系统检定校准装置,在原有质量流量控制器的模型中加入控制滞后补偿控制器,其作用是使得气体的控制摆脱滞后性的干扰,使其可以快速并稳定的达到指定的精度。首先使用 Simulink 仿真对一阶加纯滞后模型的质量流量控制器进行仿真来验证其功能性以及性能,结果为流量误差为 0.89%。最终,将设计的一阶加纯滞后模型的质量流量控制器用于实际测试,测得流量误差为 0.56%。结果表明,基于一阶加纯滞后模型的质量流量控制器可以减小控制滞后性带来的影响。

关键词: 油气浓度检测报警系统检定校准装置;质量流量控制器;响应迟滞;一阶加纯滞后模型

中图分类号: TP237.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Design of a high-precision gas flow control algorithm

Yue Bin

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: The mass flow controllers currently used generally have lag in response, which leads to lag control in the mass flow controller control, which leads to the failure of the calibration of the oil gas concentration detection alarm system verification and calibration device due to the inaccurate concentration of the prepared gas. Aiming at the problem of inaccurate gas concentration caused by the slow change of the controlled gas flow rate of the verification and calibration device of the oil and gas concentration detection and alarm system, this paper designs a verification and calibration of the oil and gas concentration detection and alarm system based on a mass flow controller with a first-order and pure lag model. The device adds a control lag compensation controller to the original mass flow controller model. Its function is to free the gas control from the lag interference, so that it can quickly and stably reach the specified accuracy. First use Simulink simulation to simulate the first-order mass flow controller with pure hysteresis model to verify its functionality and performance. The result is that the flow error is 0.89%. Finally, we used the designed mass flow controller with the first-order plus pure lag model for actual testing, and the measured flow error was 0.56%. The results show that the mass flow controller based on the first-order plus pure delay model can reduce the influence of control delay.

Keywords: verification equipment for oil vapor concentration alarmer detectors; gas mass flow controller; response lag; first-order plus time delay model

0 引言

油气浓度检测报警系统检定校准装置(以下简称“检定校准装置”),属于本级计量器具,主要用于油气浓度检测报警器检定、校准、标定的装置,由不同浓度气体自动配制模

块、报警器输出电信号测量模块、气体输出流量控制模块等组成。检定校准装置是与高浓度标准气体和纯净气体组成油气浓度检测报警系统现场检定装置^[1]。检定校准装置是一种集成度高并且具有高智能化的质量流量控制器的油气浓度检测报警系统的检定校准装置^[2]。油气浓度检测报警

收稿日期:2020-11-20

* 基金项目:国防基金项目(CX214J018)资助

系统现场检定装置的基础原理是通过检定校准装置,将高浓度的标准气体和纯净气体进行充分混合,最终配置出用于油气浓度检测报警器进行检定校准的标准气体,并且以一定的精度和流量输出到传感器中^[5]。最后对所检测的油气浓度检测报警系统的报警功能、示值误差、重复性、响应时间、漂移等计量性能进行测试^[4]。

检定校准装置中的气体质量流量控制器是决定该系统滞后性和性能的关键。通过检定校准装置中质量流量控制器检测的各种参数,来控制高浓度的标准气体和纯净气体,尽可能的减少系统滞后性和系统的迟滞效应^[5],并提高油气浓度检定校准器的影响速度^[6]。目前众多质量流量控制器对滞后性的指标要求不高时,可以选用常用的质量流量控制器^[7]。但是有高实时性和低滞后性需求的气体质量流量传感器^[8],如检定校准装置中的质量流量控制器,则会导致控制器的迟滞性,导致油气浓度检测报警系统检定校准装置的性能和精度受影响^[9]。

王婧娜等^[10]设计了一套高精度动态可持续输出的配气系统,虽然达到了高精度的气态配置,但是针对可变浓度气体的动态配置具有浓度的迟滞性。李建鹏等^[11]提出一种质量流量控制器动态配气装置,依据配制气示值误差调整质量流量控制器示值误差,从而提升动态配气装置配气精度,使其引入更小的示值误差及不确定度。该方法进一步的提升了质量流量控制器动态配气的精度,但是由于配气精度误差具有滞后性,将导致所配气体的精度在标准值上下浮动。曲宝军等^[12]提出一种新型的两级配气技术,采用基于流量控制的动态配气法,利用两级稀释提高稀释比,实现多组分气体的全量程配气。该方法可以标准气体的动态配气,由于没有考虑配置气体时,气体浓度检测的滞后性,这将导致配置动态配气时的不稳定性。

本文针对上述问题,设计了一个采用一阶加纯滞后模型的质量流量控制器。它与常见的质量流量控制器的区别是,对质量流量控制器的滞后性所引起的输入迟滞效应具有良好的抗性^[13]。尤其是针对非线性的连续输出变化具有良好的效果^[14]。由于一阶加纯滞后模型是预测性质,可能会有预测失败,所导致的不准确性。一阶加纯滞后模型的优点是响应快,本文选用一阶加纯滞后模型的原因是质量流量控制器校正时,需要利用动态配气的方法快速地配制出各种浓度的标准气体,用于校准各个浓度的参数。若采用具有迟滞性的配气方法会导致检定校准的曲线具有滞后性。

基于一阶加纯滞后模型设计的质量流量控制器的算法简单,响应迅速,并且对外界的干扰扰动具有良好的抗性^[10]。通过引入滞后模型很好地提高了系统的响应速度和配置气体的输出精度^[15]。

1 流量控制工作原理

传统的配置标准气体的方法往往是使用静态配气的方

法,即为将已知质量浓度的稀释气体加到已知体积并具有原料气体的高压容器中,均匀混合后制得的标准气体。但是该方法所制作的气体浓度单一,不能满足当今检验标定装置校准时,标准气体浓度可变的标定场景。现在主流使用的配气方法是动态配气方法,即为根据已知浓度的原料气体和已知浓度的稀释气体按照一定的比例加入混合容器中,最终得到标准气体。动态配气法符合油气浓度检测报警系统检定校准的使用场景,但动态配气时,由于气体浓度检测的迟滞效应将导致所配置的气体浓度具有滞后性,导致报警校准装置不准确。针对动态配气给标准气体浓度带来的滞后性问题,本文设计一种基于一阶加纯滞后模型的质量流量控制器的油气浓度检测报警系统检定校准装置,可以精确地控制高浓度标准气体和稀释气体流量,从而精确地控制标准气体的配制浓度。

标准气体的浓度是由质量流量控制器所控制的,利用高浓度的标准气体和纯净气体进行混合,最终混合出用于油气浓度检测传感器进行标定的标准气体,并且以一定的精度和流量输入到质量流量控制器中。标准气体的浓度是由两种气体的混合比例计算出来的,他们的质量流量之比即是标准气体的浓度,所以该控制器的功能就是调节两种气体的比例从而控制标准气体的浓度^[16]。配气结构原理如图 1 所示。

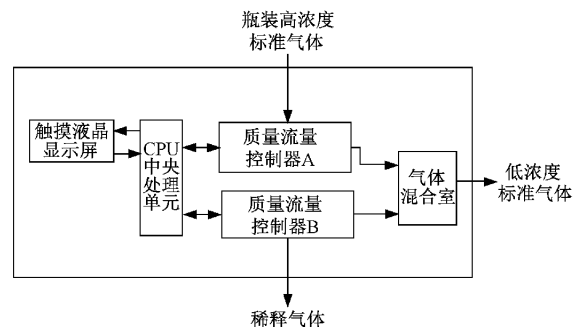


图 1 配气结构原理

本文需要先对高浓度标准气体的流量质量控制器和纯净气体的流量质量控制器进行标定,从而获得计算标准气体浓度的初始条件。在配置时,只需要计算二者释放的速度,就可以配制出标准气体^[11]。标准气体的浓度配置公式如下所示:

$$C_s = \frac{F_s}{F_s + F_a} \times C_0 \quad (1)$$

式中: C_s 是目标的标准气体浓度; F_s 是高浓度的标准气体的实际流量 (mL/min); F_a 是纯净气体的实际流量 (mL/min); C_0 是被稀释样品气体的已知浓度^[17]。综上所述,只需要控制两种气体的流速就可以得到不同浓度的标准气体^[18]。

质量流量控制器的响应曲线,基本上可以认为是非线性的不连续控制函数。但是,本控制系统所控制的气体流量不固定,而是根据配置气体中的浓度来动态平衡调整。

在本系统的动态配气过程中,需要设计一种动态平衡并消除滞后影响的控制算法,可以使得动态配置的气体浓度达到精确的浓度和非滞后性,称之为非滞后性控制,其表达式为:

$$U(t) = \eta \frac{S(t)}{|S(t) + \delta|} \quad (2)$$

式中: η 是控制使配置气体达到非滞后性的高精度控制配气速度参数; δ 是防止配气出现滞后性的函数;动态平衡函数 $S(t)$ 是非滞后性控制时配置气体的浓度随目标浓度变化的函数。

控制原理结构如图 2 所示, $r(t)$ 是浓度参考值, $y^-(t)$ 是系统的滞后性表示, $y(t)$ 是配气系统的控制参数和 $e_m(t)$ 滞后性所导致的误差。

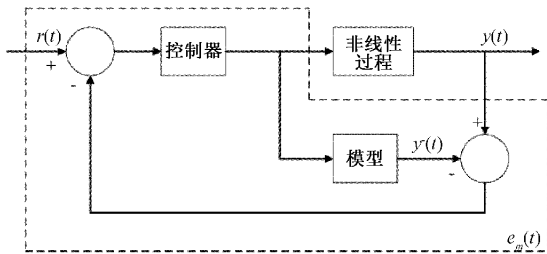


图 2 控制原理结构

由图 2 可以看出,质量流量控制器分为两个模块:质量流量控制器和控制滞后补偿控制器。质量流量控制器的功能是控制气体的闭环控制可以保证气体高精度的控制性,控制滞后补偿控制器作用是为了使得气体的控制摆脱滞后性的干扰,使其可以快速并稳定的达到指定的精度。在控制滞后补偿控制器中,主要是通过基于一阶加纯滞后模型实现滞后补偿的控制。之前的质量流量控制器往往由于控制器的调节具有较大的滞后性而造成时间延迟,导致控制具有迟滞性,为了提高动态配气的准确性和高实时性,本文在系统中引入一阶加纯滞后模型公式为:

$$G(S) = \frac{K}{\alpha S + 1} e^{-t_0 s} \quad (3)$$

式中: K 为与标准浓度差距的增减值; t_0 为控制器的滞后时间; α 为一阶滞后参数。本文一阶滞后模型由如下两个函数组成。

$$G^+ = e^{-t_0 s} \quad (4)$$

$$G = \frac{K}{\alpha S + 1} \quad (5)$$

式中: G^+ 是一阶滞后模型的滞后模型; G 是抵消本文模型中滞后性的抵消函数。将这两个模型组合引入上面图 1 的控制模型,形成改进的原理图,如图 3 所示。

油气质量流量函数 $S(t)$ 为:

$$S(t) = e^-(t) + \lambda \int_0^t \{[r(t) - y^-(t)] - e_m(t)\} dt \quad (6)$$

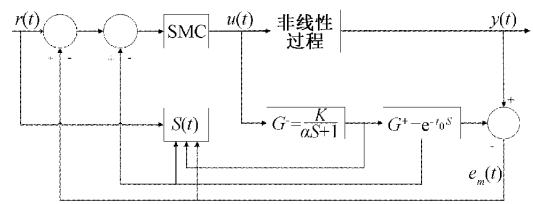


图 3 引入一阶加纯滞后后的控制原理

由油气质量流量函数的输入和输出以及控制控制误差函数协同影响本系统的输出特性,本文所控制的油气浓度是控制系统的反馈。根据上述的控制模型,将油气质量流量函数中的公式变形为:

$$r(t) - y^-(t) - e_m(t) = r(t) - y^-(t) - [y(t) - y^-(t)] = r(t) - y(t) = e(t) \quad (7)$$

则油气质量流量函数简化为:

$$S(t) = e^-(t) + \lambda \int_0^t e(t) dt \quad (8)$$

为了非滞后性控制的条件, $dS(t)/dt = 0$, 所以从式(7)和(8)可以推论出:

$$\frac{d(S)}{dt} = \frac{dr(t)}{dt} - \frac{dy^-(t)}{dt} + \lambda e(t) = 0 \quad (9)$$

把滞后函数式(5)代入式(2)并进行微分运算处理,推算出如下公式:

$$\alpha \frac{dy^-(t)}{dt} + y^-(t) = Ku(t) \quad (10)$$

把以上两个公式相加可以得到一阶加纯滞后的模型控制函数为:

$$u_e(t) = \frac{\alpha}{K} \left[\frac{dr(t)}{dt} + \frac{y^-(t)}{\alpha} + \lambda e(t) \right] \quad (11)$$

把一阶加纯滞后方程代入原油气流量浓度控制方程,计算出油气流量浓度的非滞后性方程,即:

$$u(t) = \frac{\alpha}{K} \left[\frac{dr(t)}{dt} + \frac{y^-(t)}{\alpha} + \lambda e(t) \right] + \eta \frac{S(t)}{|S(t) + \delta|} \quad (12)$$

式中: $u(t)$ 为控制输入。

2 实验分析

通过模拟仿真来验证所设计的一阶加纯滞后模型的质量流量控制器的非滞后性能。实验中需要验证设计的原理和设计的功能性和准确性。本文使用 Simulink 仿真对一阶加纯滞后模型的质量流量控制器进行仿真来验证其功能性以及性能。Simulink 仿真模拟原理如图 4 所示。

一阶加纯滞后模型的质量流量控制器对已知浓度的原料气体和稀释气体的流量进行动态控制,之后将两种气体在混合室中进行均匀并充分的混合后,在从混合室中输出所配置的气体。一阶加纯滞后模型的质量流量控制器。质量流量控制器控制范围为 0~1 000 mL/min,流量值在 0、200、400、600、800 和 1 000 mL/min 匀速增减。在 Simulink

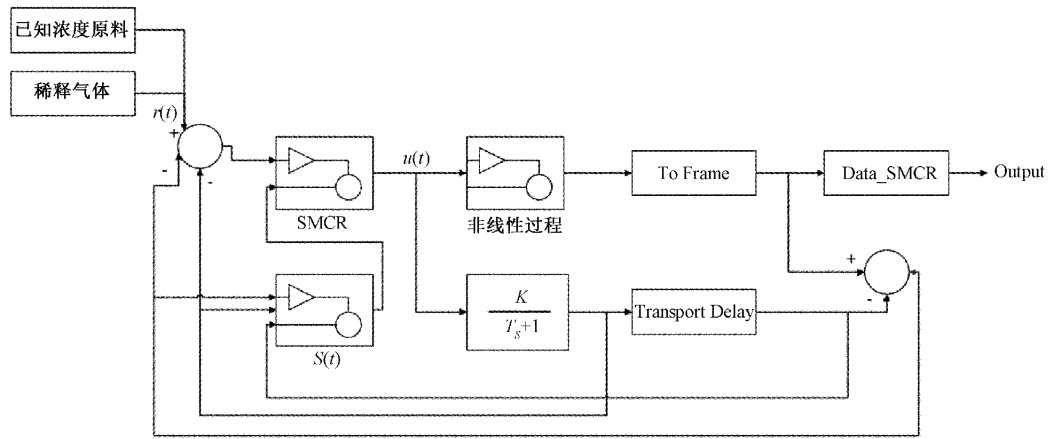


图 4 质量流量控制器一阶加纯滞后仿真模型

仿真的结果如图 5(a)和(b)所示。从仿真结果可以分析出,当气体高浓度的标准气体和纯净气体的流量发生变化时,一般常见的质量流量控制器具有很高的迟滞性,导致精度下降,但是本文所设计的基于一阶加纯滞后模型的质量流量控制器就可以准确并实时的输出所需浓度的标准气体。根据仿真结果,可以计算出基于阶加纯滞后模型的质量流量控制器的控制精度误差在 0.89%以内,如表 1 所示。可以证明出,所提出的方法响应迅速,并且对外界的干扰扰动具有良好的抗性。通过引入滞后模型很好地提高了系统的响应速度和配置气体的输出精度。基于一阶加纯滞后模型的质量流量控制器的油气浓度检测报警系统检定校准装置样机经国家认可的法定计量检定机构进

表 1 流量误差结果比较

控制器类型	一般控制器	一阶加纯滞后模型控制器
流量误差/%	2.63	0.89

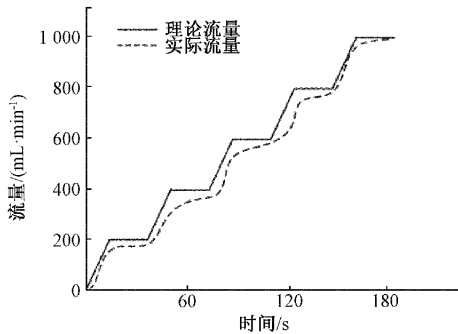
行了校准测试,测试结果表明,2个质量流量控制器的测量结果扩展不确定度均为 0.56%(k=2),配气精度高。

3 结 论

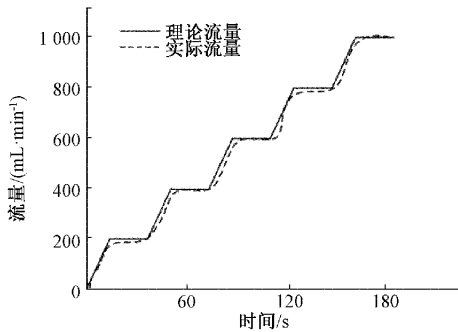
本文设计一种基于一阶加纯滞后模型的质量流量控制器的油气浓度检测报警系统检定校准装置,可以精确地控制高浓度标准气体和稀释气体流量,从而精确地控制标准气体的配制浓度。在原有质量流量控制器的模型中加入控制滞后补偿控制器,其作用是使得气体的控制摆脱滞后性的干扰,使其可以快速并稳定的达到指定的精度。Simulink 仿真模拟和实际计量校准测试结果,可以证明所提出的方法响应迅速,并且对外界的干扰扰动具有良好的抗性。通过引入滞后模型很好地提高了系统的响应速度和配置气体的输出精度。油气浓度检测报警系统检定校准装置可以应用于各类基于气体浓度的标定和验证等试验测试。本控制方案是针对油气浓度检测报警系统检定校准装置中质量流量控制器进行设计,当用于其他类型质量流量控制时,还需要进行初始值重新调校工作,以保证其鲁棒性。

参考文献

- [1] 陆海英. 浅谈可燃气体报警器的校准与检定[J]. 当代化工研究, 2020(11): 45-46.
- [2] 岳彬. 固定式可燃气体报警器检定方法的探讨[J]. 中国检验检测, 2019, 27(3): 33-34.
- [3] 林桂玲. 可燃气体检测报警器的校准与检定研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(2): 87-88, 102.
- [4] 周尚虎, 孙智铭, 康钧, 等. 油气在线监测系统中误差动态自动校准技术的应用[J]. 青海电力, 2013, 32(4): 44-46.



(a) 一般的质量流量控制器



(b) 加入一阶加纯滞后模型的质量流量控制器

图 5 控制器仿真结果

- [5] 孙广涛,张洪朋,顾长智,等.高精度微流体多参数液压油检测芯片设计[J].仪器仪表学报,2019,40(2):59-66.
- [6] 潘一廷,张国城,杨振琪,等.环境空气监测系统中气体稀释装置的性能比较[J].计量技术,2019(11):52-56.
- [7] 赵博文,梁西银,颜昌林,等.基于虚拟仪器的真空计参数自动测试系统[J].仪表技术与传感器,2020(6):63-67,82.
- [8] 赵柏滢,胡兆燕,夏许可,等.基于质量流量控制器的一氧化碳吸入装置研制[J].北京生物医学工程,2018,37(5):502-508.
- [9] 谭光韬,张文文,王磊.气体传感器阵列混合气体检测算法研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(7):95-102.
- [10] 王婧娜,刘志伟,严蕊,等.基于质量流量控制器的高精密配气系统[J].化工自动化及仪表,2016,43(3):277-279.
- [11] 李建鹏,闫继伟,许雪琼,等.质量流量控制器动态配气装置量值溯源方法分析[J].工业计量,2019,29(1):40-43,78.
- [12] 曲宝军,刘原勇.基于流量控制的两级动态配气系统的研究[J].山东理工大学学报(自然科学版),2016,30(5):29-31,35.
- [13] 郭广颂,靳占行,董淑晴.带纯滞后一阶惯性对象系统振铃问题分析[J].南方农机,2019,50(23):15-16,20.
- [14] 陈文军.基于变结构滑模控制的磨砂机自适应控制律[J].电子测量技术,2020,43(6):27-31.
- [15] 谢水英,韩承江.基于一阶加纯滞后模型的纺织生产过程温控 PI 系统设计[J].世界科技研究与发展,2015,37(5):556-559.
- [16] 潘素素,张国城,杨振琪,等.气体稀释装置检测方法初探[J].计量技术,2019(12):36-39.
- [17] 陈向辉,刘教民.动态气体校准仪的研究和应用[J].天津理工学院学报,2002(1):54-56.
- [18] 张秀丽.基于内模控制器的永磁同步发电机并网控制系统研究[J].国外电子测量技术,2020,39(3):93-97.

作者简介

岳彬,工程师,硕士,主要研究方向为油库自动化与安全、仪表检定等。

E-mail:yueyuanshuaiok@126.com