

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106916

基于标准金属量器建模的液位控制方法

梁豪杰 赵翠莲

(上海大学 机电工程与自动化学院 上海 200444)

摘要: 标准金属量器是计量行业中一种常用的计量器具,在计量行业中得到了广泛的应用。针对标准金属量器人工检定流程中存在的效率低下、实验精度不高等问题,提出了一种液位控制方法。该方法首先对标准金属量器罐体进行建模分析,并计算大小流量阀的切换点,然后采用液位传感器实时读取罐颈玻璃管处的液位高度,通过可编程控制器(programmable logic controller, PLC)对小流量阀的占空比进行控制,从而实现高精度液位控制的目的。最后基于仿真平台对标准金属量器玻璃管处的液位控制进行仿真,液位控制误差为 ± 0.05 mm。该结果表明本文所提方法能够提高标准金属量器液位控制精度,有较好的推广价值。

关键词: 液位传感器;可编程控制器;标准金属量器建模;液位控制

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Liquid level control method based on standard metal gauge modeling

Liang Haojie Zhao Cuilian

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Standard metal gauge is a common measuring instrument in the measurement industry, which has been widely used in the measurement industry. This paper aims at the problems of low efficiency and low experimental accuracy in the manual verification process of standard metal gauge, a liquid level control method is proposed. Firstly, the standard metal gauge tank is modeled and analyzed, and the switching points of large and small flow valves are calculated. Then, the liquid level sensor is used to read the liquid level height at the glass pipe of the tank neck in real time, and the duty cycle of the small flow valve is controlled by the programmable logic controller, so as to achieve the purpose of high-precision liquid level control. Finally, based on the simulation platform, the liquid level control at the glass tube of the standard metal gauge is simulated, and the liquid level control error is ± 0.05 mm. The results show that the method proposed in this paper can improve the liquid level control accuracy of standard metal gauge and has good popularization value.

Keywords: liquid sensor; PLC; modeling of standard metal gauge; level control

0 引言

标准金属量器是用于计量流体介质容积的一种计量器具,是用于油船上石油产品和其它物料部门贸易结算、运输费结算的主要计量器具之一^[1],也是检测容积式流量计的标准,因此对计量精度具有极高的要求。标准金属量器由桶体、计量颈、玻璃管、读数装置、标尺、阀门、支架和调平螺栓等器件组成。按照不确定度的等级,标准金属量器可分为一等、二等和三等。按照容量,标准金属量器可分为50 L、100 L、200 L、500 L、1 000 L等多种规格。标准金属量器的容量是以其计量颈连通的玻璃管中水的弯月面最低点来定位的^[2]。

由于一等标准金属量器不确定度为 5×10^{-5} ,在给一

等标准金属量器进水过程中,不仅对进水完成时的液位精度要求,还对整个进水过程中的效率有要求^[3]。传统的检定方法是人工手动控制三通阀给标准金属量器进水,使液位到达玻璃管的标定刻度线处关闭三通阀,完成整个进水流程^[4],但这种方法存在着效率低下,可靠性差等问题,因此国内外学者针对这一问题进行了研究。陈文琳等^[5]以多型号金属量器容量检定研究对象,在现有检定手段和方法基础上,利用先进的计算机监控及数据处理技术,开发出一套三等金属量器容量检定装置;吕妍等^[6]设计了移动式付油仪表检定装置,主要用于对在线液体流量计的检定和核查;黄雪莲^[7]针对标准金属量器进水,利用电磁流量计获取进水的累计流量,最后通过磁致伸缩液位计读取玻璃管

处的液位信息,虽然对标准金属量器检定效率有一定的提升,但该方法所使用的液位计为插入式,对标准金属量器的容积有影响,控制精度不高。周艳^[8]设计了一套精确监控环境温度与水温温差的控制系统,该系统实现了液位自动准确读数以及一等金属量器量值传递过程的自动化控制。杨铭^[9]基于软 PLC 的液位控制方法并采用大小阀门装置给标准金属量器进水,虽然是对传统检定方法的一种改进,但是并未对大小阀门的切换点作分析,因此在整个液位控制中仍存在效率低以及液位控制精度不高等问题。

为提高标准金属量器进水过程中的液位控制精度以及检定效率,本文提出一种基于标准金属量器液建模的液位控制方法。该方法采用大小阀门的装置对标准金属量器进水,其中小阀门选用的是高速开关阀。首先对标准金属量器罐体进行建模,并对阀门的迟滞现象以及流量传感器的误差进行分析,通过建模计算出大小阀门的最佳切换点,即大阀的累计流量到达计算值后,关闭大阀,开启小阀。管路中的流量传感器用来实时显示阀门的累计流量。当液位到达液位传感器的量程范围内时,液位传感器获取玻璃管处的液位高度并将液位信息实时反馈给 PLC,PLC 根据得到的液位信息采用比例、积分、微分 (proportion integration differentiation, PID) 算法控制高速开关阀的脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 占空比直至液位到达标定刻度线处后关闭阀门。最后通过仿真验证了所提方法的可行性与有效性。

1 标准金属量器建模

1.1 标准金属量器模型分析

一个好的物理系统数学模型对于控制系统的实现是至关重要的。数学模型应尽可能准确地描述过程的动态,使基于该模型设计的控制系统有良好的性能^[10]。标准金属量器的物理模型如图 1 所示。其中 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 分别表示倒梯形、矩形、正梯形、计量颈底部到计量颈标定刻度线处的罐体高度。

建立如图 1 所示的直角坐标系,罐体上下两个梯形的右斜边可以分别表示为式(1)、(2)所示的一次函数:

$$x_1 = K_1 h_1 + B_1 \tag{1}$$

$$x_3 = K_3 h_3 + B_3 \tag{2}$$

其中, h_1 、 h_3 分别为罐体两个梯形部分对应的高度; x_1 、 x_3 分别为不同高度处对应的罐体直径。

为了提高标准金属量器的进水精度以及效率,本文把标准金属量器进水过程分为两个阶段。第 1 阶段通过大流量的电磁阀快速进水,第 2 阶段关闭大流量阀,打开小流量的高速开关阀慢速进水,直至液位到达标定刻度线后关闭高速开关阀。其中大小阀门的切换点非常重要,通过对标准金属量器的建模计算出理论的最佳切换点。

罐体容积与高度的数学关系可表示为: $V_h = F(h)$, 其中不同高度对应的罐体容积也不同,可分别由式(3)~(4)

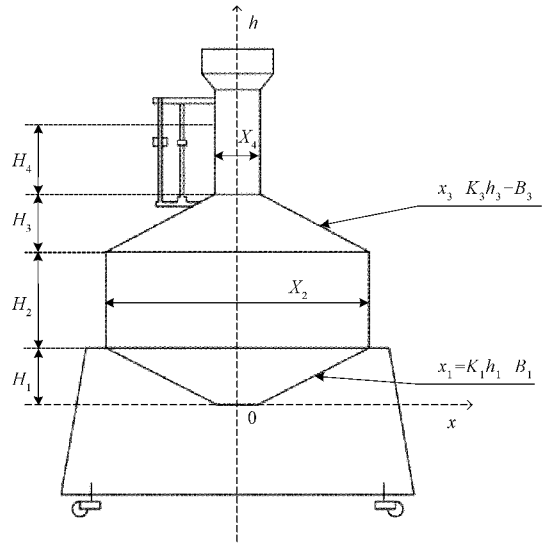


图 1 标准金属量器物理模型图

表示(其中 V_h 为坐标系中罐体不同高度对应的体积, h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 分别为罐体 4 个部分对应的高度):

$$V_h = \pi \int_0^{H_1} (K_1 h_1 + B_1)^2 d h_1 + \pi \int_{H_1}^{\sum_{i=1}^2 H_i} \left(\frac{X_2}{2}\right)^2 d h_2 + \pi \int_{\sum_{i=1}^2 H_i}^h (K_3 h_3 + B_3)^2 d h_3 \quad \left(\sum_{i=1}^2 H_i < h < \sum_{i=1}^3 H_i\right) \tag{3}$$

$$V_h = \pi \int_0^{H_1} (K_1 h_1 + B_1)^2 d h_1 + \pi \int_{H_1}^{\sum_{i=1}^2 H_i} \left(\frac{X_2}{2}\right)^2 d h_2 + \pi \int_{\sum_{i=1}^2 H_i}^{\sum_{i=1}^3 H_i} (K_3 h_3 + B_3)^2 d h_3 + \pi \int_{\sum_{i=1}^3 H_i}^h \left(\frac{X_4}{2}\right)^2 d h_4 \quad \left(\sum_{i=1}^3 H_i < h < \sum_{i=1}^4 H_i\right) \tag{4}$$

1.2 电磁阀的迟滞现象与进水时间的关系分析

为了提高标准金属量器的进水精度以及效率,把进水过程分为两个阶段。第 1 阶段采用大流量阀给标准金属量器快速进水,管路中的流量传感器实时显示大流量阀的累计流量。第 2 阶段为关闭大阀,开启小阀,本文选用的液位传感器为 CMOS 摄像机,该传感器用于实时获取计量颈玻璃管处的液位高度,当液位到达液位传感器的量程范围内时,根据液位传感器实时测得的液位高度通过 PLC 来控制小流量阀给标准金属量器慢速进水,直至液位到达标定刻度线处,关闭阀门。

由于该液位传感器的量程为 80 mm,且 50 L 的标准金属量器计量颈底部到标定刻度线的高度为 52.37 mm,小于液位传感器的量程。因此为了保证进水精度以及提高进水效率,50 L 标准金属量在距离标定刻度线 50 mm 的范围内采用小流量电磁阀进水。其他容量的标准金属量器在距离标定刻度线 80 mm 的范围内采用小流量电磁阀进水。但在整个进水流程中,由于阀门、PLC 等元器件存在延迟问

题,所以大小阀的切换点不确定,需要对大流量阀延迟关闭问题进行分析,从而确定大小阀的切换点。

电磁阀是电磁控制的工业设备,主要由电磁线圈、铁芯、弹簧、阀体、阀芯等部分组成。其工作原理为:电磁线圈的通电和断电会带动电磁芯的移动和复位,引起电磁阀内部的流动路径发生改变,从而直接或间接的控制流体的方向和电磁阀开启或关闭的状态。电磁阀在通断电这一个周期 T 内的动作可分 5 个阶段,如图 2 所示。电气延迟阶段 t_1 ; 阀芯开启阶段 t_2 ; 阀芯全开阶段 t_3 ; 断电延迟阶段 t_4 ; 阀芯关闭阶段 t_5 [11]。

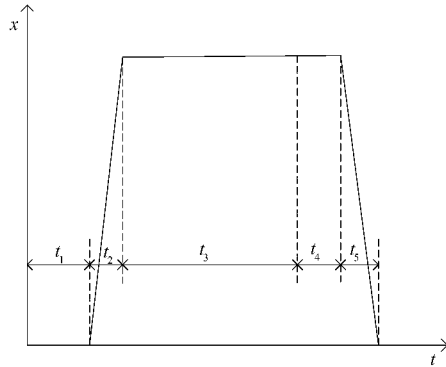


图 2 阀芯位移波形图

根据上述可以得到标准金属量器中的液位高度 h 和进水时间 t 的关系,如图 3 所示。

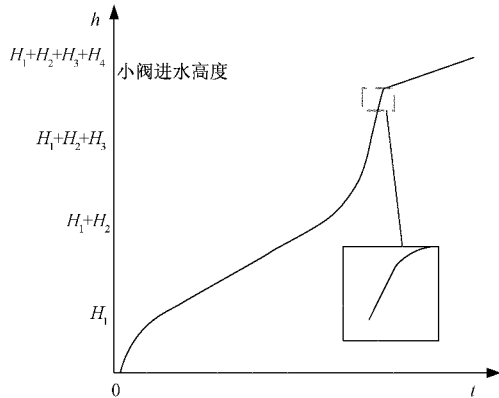


图 3 液位高度 h 和进水时间 t 的关系简图

1.3 标准金属量器大小阀切换点理论分析

本文大流量阀和小流量阀切换点是根据流量传感器的数值来表示的,即流量传感器可以实时获取大小阀门的累计流量,当流量传感器显示大流量阀的累计流量到达计算值时,关闭大阀,开启小阀。

开启大流量阀时,大流量阀从电气延迟阶段到阀芯开启阶段再到阀芯全开这 3 个阶段的累计流量为 $\sum_{i=1}^3 V_{t_i}$, 关闭大流量阀时,大阀从断电延迟阶段到阀芯关闭这两个阶段的累计流量为 $\sum_{i=1}^5 V_{t_i}$, 由于 PLC 等元器件的延迟,大阀

的累计流量为 V' , 小阀慢速进水的累计流量为 $V_{\text{小阀}}$, 流量计的误差为 Δe , 罐体的总容积为 $V_{\text{总}}$ 。由上述可得式(5):

$$V_{\text{总}} = \sum_{i=1}^3 V_{t_i} + \sum_{i=1}^5 V_{t_i} + V_{\text{小阀}} + V' + \Delta e \quad (5)$$

因此大小阀门的切换点为:当大阀的累计流量为: $V_{\text{总}} - \sum_{i=1}^5 V_{t_i} - V_{\text{小阀}} - V'$ 时,就可以关闭大阀,开启小阀了。标准金属量器的大小阀切换点如图 4 所示。

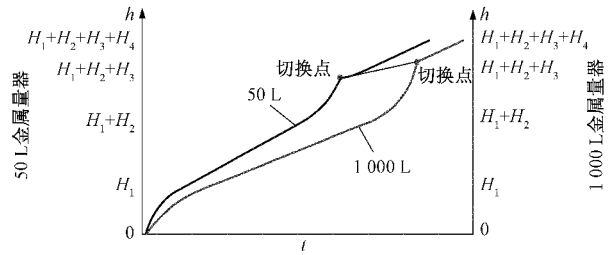


图 4 标准金属量器大小阀切换点

2 标准金属量器进水模型分析与仿真

本文的实验目的为设计一种液位控制方法,对液位进行高精度控制。该方法为对标准金属量器的罐体进行建模分析,计算出大小阀门切换的最佳时间点,在仿真平台上采用 PID 算法对阀门进行控制,并设置一组对照实验:不计算大小阀门切换时间点,即大小阀门的切换点为液位传感器检测到液位时,关闭大阀,开启小阀,同时采用 PID 算法对阀门进行控制。

本文研究的一等标准金属量器的容积通过玻璃管处的液位进行标定,对慢速进水过程中高速开关阀控制标准金属量器液位进水系统进行建模与研究,控制目标为最终稳定后的满液位水位保持在标定高度的 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 范围内。整体的控制框图如图 5 所示,采用液位传感器实时采集液位信号高度,根据液位高度给定值与反馈值间的偏差量,通过 PID 控制器对高速开关阀的占空比进行控制以改变阀的流量,最终实现高精度的慢速进水控制。

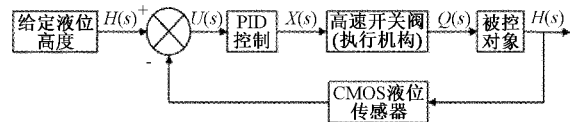


图 5 基于高速开关阀的标准金属量器进水控制结构图

2.1 标准金属量器的液位进水模型分析

1) PWM 控制的高速开关阀与流量的关系

根据高速开关阀的静态特性,其输出流量与 PWM 占空比的变化实际上并不呈线性关系 [12]。一般情况下可将高速开关阀的数学模型近似等效成一阶非线性环节 [13], 同时考虑高速开关阀的延迟和实际控制中各种控制元器件存在的响应时间,则高速开关阀中占空比与流量的传递函数可表示为:

$$W_1(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (6)$$

其中, K 表示 PWM 脉冲信号占空比为 1, 阀门常开时, 高速开关阀的流量, T 表示 PWM 脉宽调制周期, τ 表示元器件响应时间。

2) 流量与液位高度的关系

高速开关阀进水的简化模型如图 6 所示, 其中 $Q(t)$ 表示单位时间内高速开关阀向标准金属量器进水的流量, $H(t)$ 表示液位高度, A 表示标准金属量器的横截面积, 在 $H(t)$ 变化范围内标准金属量器的截面积 A 为定值。

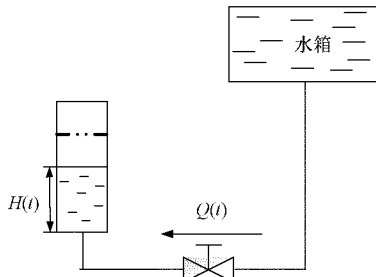


图 6 高速开关阀进水简化模型图

根据流量连续性方程, 可得:

$$Q(t) = A \cdot \frac{dH(t)}{dt} \quad (7)$$

通过拉式变换得到流量与液位高度的传递函数为:

$$W_2(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{As} \quad (8)$$

结合式(6)、(8), 根据所选的高速开关阀参数以及标准

金属量器的截面积(以 100 L 标准金属量器为例), 可得标准金属量器液位进水系统模型的传递函数为:

$$W(s) = W_1(s)W_2(s) = \frac{K}{ATs^2 + As} e^{-\tau s} = \frac{220}{s^2 + 80s} e^{-0.2s} \quad (9)$$

尽管流体的运动存在时变性, 但对同一管路来说, 在相同的初始液位、压力条件下的相关参数变动不大。以 1 000 L 量器为例, 计量颈管径 155 mm, 玻璃管管径 12 mm, CMOS 液位传感器能检测到的刻度范围(80 mm)内的容量为:

$$V = 80 \times \pi \left[\left(\frac{155}{2} \right)^2 + \left(\frac{12}{2} \right)^2 \right] = 1\,518.4 \text{ ml} \quad (10)$$

供水水箱的截面积 S 为 2 m^2 , 所以在这段范围内水箱下降的高度为:

$$\Delta h = V/S = 0.759\,2 \text{ mm} \quad (11)$$

可见该范围内水箱水位下降非常小, 可以认为高速开关阀前后两端的压差是恒定的。

2.2 标准金属量器大小阀切换点计算

本文提出的标准金属量器液位控制方法的关键在于对小流量阀进水阶段的控制。因此大小阀门的切换点计算非常重要。通过理论分析: 当大流量阀的累计流量为: $V_{\text{总}} - \sum_{i=1}^5 V_{t_i} - V_{\text{小阀}} - V'$ 时, 即为大小阀的切换点。表 1 分别对 50 L、100 L、200 L、500 L、1 000 L 这 5 种标准金属量器进行分析, 其中计量颈分度容积为: 在计量颈处液位每上升 1 mm 所需的液体体积。大小流量阀切换点表示的是: 当流量传感器显示的数值到达表 1 计算的大小流量阀切换点值时, 即可关闭大流量阀, 开启小流量阀。

表 1 大小流量阀切换表

标准金属量器容量	50 L	100 L	200 L	500 L	1 000 L
罐颈底部到标定线高度/mm	52.4	140.5	166.9	93.7	136.6
小流量阀进水高度/mm	50	80	80	80	80
计量颈分度容积/(ml/mm)	1.12	2.25	3.94	11.55	23.65
大小流量阀切换点/L	49.92	99.78	199.63	498.99	998.00

2.3 标准金属量器的液位进水模型计算机仿真

基于标准金属量器的液位进水模型, 采用 MATLAB/Simulink 软件对图 5 所示的控制系统进行仿真, 其中控制器采用 PID 控制。

Simulink 是 MATLAB 中一种可视化仿真工具, 被广泛应用于线性系统、非线性系统、数字控制及数字信号处理的建模和仿真中^[14]。Simulink 具有适应面广、结构和流程清晰及仿真精细、贴近实际、效率高、灵活等优点^[15], 已被广泛应用于控制系统。

在 Simulink 中建立两组仿真, 一组为大小阀门切换点经过计算的 PID 控制, 另一组为大小阀门切换点没有经过计算的 PID 控制, 其中未经过计算的这组大小阀门切换点

为: 当液位传感器检测到液位时开始切换。两组的控制仿真模型如图 7 和 8 所示。

由于 CMOS 相机视野内液位高度变化范围为 80 mm, 将阶跃输入信号的幅值设为 80, 其中 PID 控制器的比例系数设为 $K_p=1$, 积分系数设为 $K_i=0.000\,005$, 微分系数设为 $K_d=0.38$ 。两个实验的仿真结果如图 9 和 10 所示, 其中虚线表示液位反馈值, 实线表示液位给定值。仿真结果可得: 大小阀门切换点经过计算的这组实验稳定时液位静态误差约为 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 满足精度要求, 大小阀门切换点未经过计算的这组实验稳定后的液位静差为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。结果表明经过计算的这组实验的液位误差远远小于未经过计算的这组实验误差。由此可知基于标准金属量器建模

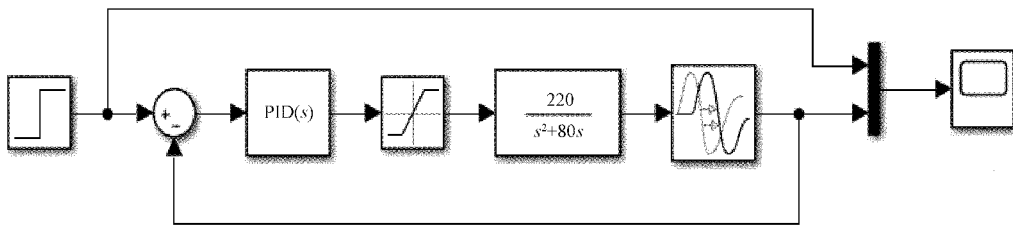


图 7 大小阀切换点经过计算的液位进水 Simulink 模型

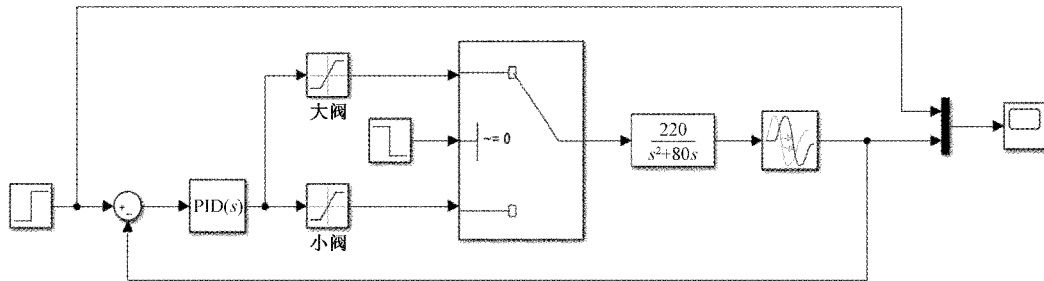


图 8 大小阀切换点未经过计算的液位进水 Simulink 模型

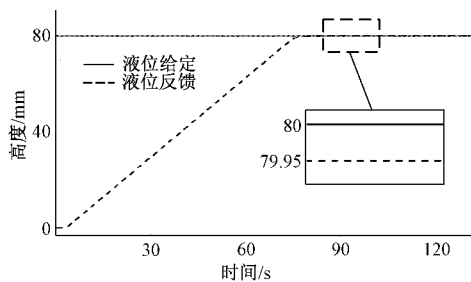


图 9 大小阀切换经过计算的液位进水仿真曲线图

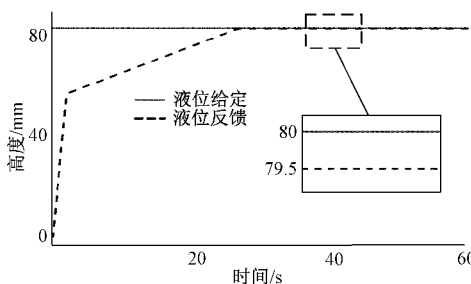


图 10 大小阀切换点未经过计算的液位进水仿真曲线图

的液位控制方法可以提高液位控制精度以及在液位控制的精度上具有一定的优越性。

3 结 论

本文提出一种基于标准金属量器建模的液位控制方法,通过对标准金属量器不同阶段的进水情况进行分析,计算大小流量阀的最佳切换点,并采用液位传感器对计量颈玻璃管处的液位进行监测,通过 PID 算法对该处的液位进行高精度控制。从仿真实验结果可以看出,基于标准金属量器建模的控制方法对液位具有较好的控制精度,液位

控制精度能够达到 ± 0.05 mm。因此该方法对实际标准金属量器的检定具有一定的参考价值。但本文只对该方法进行了仿真,并未设计实际实验来验证,后续可以设计具体实验验证该方法的可行性。

参考文献

- [1] 张松,蒋聪,龚磊. 燃油加油机无线远传自动检定装置设计[J]. 工业计量,2021,31(3):46-48.
- [2] 贲杰明. 标准金属量器的动态液位图像跟踪[J]. 电子测量技术,2020,43(17):110-114.
- [3] 陈晨. 100 L 二等标准金属量器检定结果的测量不确定度评定[J]. 中国计量,2019(3):112-113.
- [4] 张璋,邵欣铭. 计量颈倾斜对标准金属量器计量的影响分析[J]. 科技展望,2016,26(19):138-160.
- [5] 陈文琳,王顺利,许德福,等. 三等金属量器容量检定装置的研究及开发[J]. 工业计量,2015(1):26-28.
- [6] 吕妍,刘勇. 高精度移动式付油仪表检定装置的设计[J]. 计量技术,2019(8):25-26.
- [7] 黄雪莲. 关于标准金属量器自动进出水系统研制的探讨[J]. 计量与测试技术,2014,41(11):3,5.
- [8] 周艳. 新型金属量器标准装置的研制[J]. 自动化仪表,2020,41(9):23-27.
- [9] 杨铭. 标准金属量器检定的监控系统的研究与实现[D]. 上海:上海大学,2006.
- [10] SALEH A, SHA A. The design and implementation of a fuzzy gain-scheduled PID controller for the Festo MPS PA compact workstation liquid level control[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2020,307-315.

- [11] 刘奔奔. 基于高速开关阀的液压缸速度控制系统仿真研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2017.
- [12] 胡杰. 基于 PWM 高速开关阀的气缸位置控制的研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- [13] 马杨. 基于 PWM 间歇式调压控流喷雾的沉积率试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [14] 傅依新. 基于 Amesim 和 Simulink 仿真的采棉机液压系统控制设计[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- [15] 杨凯. 基于改进 PID 的三容水箱液位控制方法研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2020.

作者简介

梁豪杰, 在读硕士研究生, 研究方向为机电一体化、自动化控制等。

E-mail: 1085635484@qq.com

赵翠莲(通信作者), 教授, 研究方向为生机电一体化。

E-mail: clzhao@i. shu. edu