

药筒容积的高精度测量分析

郭浩¹, 冯进良¹, 张尧禹², 才存良¹, 李思琦¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 使用注水称重法测量药筒容积时, 由于注入的液体具有表面张力, 会出现液面中间高、边缘低的现象, 从而产生测量误差。提出一种基于注水称重法的高精度药筒容积测量系统: 采用不同深度的阵列电极测液位, 能够克服液体表面张力带来的影响; 通过无线传输模块, 将由特制电极采集传感信号传输到计算机, 并对流量进行控制, 以达到精确测量目的。经过系统精度分析, 分析结果表明: 该系统精度达到了0.01%, 满足精度指标要求。

关键词: 兵器科学与技术; 高精度; 容积测量; 阵列电极; 液体表面张力

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2015)04-0758-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.04.026

High Precision Measurement of Cartridge Volume

GUO Hao¹, FENG Jin-liang¹, ZHANG Yao-yu², CAI Cun-liang¹, LI Si-qi¹

(1. School of Optics Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China)

Abstract: A phenomenon that liquid level is low at the edge and high in the middle appears to cause the measuring errors due to the surface tension of the injected liquid when the cartridge volume is measured by water injection weighing method. A high precision measuring system based on the water injection weighing method is proposed. In the proposed system, the array electrodes are used to measure liquid level to overcome the effect of the liquid surface tension. The sensor signal is picked up by a specially made electrode, and then it is transmitted to a computer through a wireless module to control the flow until the cartridge is filled with the water, so as to achieve the purpose of accurate measurement. The accuracy of the system is analyzed. The analysis result shows that the accuracy of the system is up to 0.01%, which meets the requirement of precision index.

Key words: ordnance science and technology; high precision; volume measurement; array electrode; liquid surface tension

0 引言

随着科学技术的发展, 有更多种的方法用于弹药药筒容积的测量。目前, 在工程领域中测量容积的方法有几何测量法、音频检测法等, 应用最广泛的仍是注水称重法。音频检测法需要在特定

的环境中进行, 且存在内耗使振动衰减, 会影响振动响应曲线, 而且金属材料腔体结构与材料基体组织与内耗密切相关, 所以此方法的误差不确定度极大, 其频率检测相对误差可达0.15%^[1-2], 注水称重法却可以在大多数环境中进行, 且不会在药筒内部能量损耗而产生误差; 几何测量法适用

收稿日期: 2014-05-08

作者简介: 郭浩(1989—), 男, 硕士研究生。E-mail: guohao8963@163.com;

冯进良(1964—), 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: feng_20071101@163.com

于内部形状规则的药筒,在药筒内部不规则的地方会产生测量的不便且测量探头容易在药筒内壁留下划痕^[3-5],所产生的误差大约在 0.2%。注水称重法采用液体注入的形式不会对药筒内部造成损伤,精度更高,且比几何法要能适应更多类型的测量。药筒容积是炮弹的发射弹道、精度、爆炸威力等各项能力的重要影响因素之一,则对药筒容积的测量必须达到一个极高的精度才可以满足各项能力的达标。所以从军用环境等多方面因素来考虑,注水称重法具有原理简单、操作方便、成本低、可批量进行等诸多优点,让人们依旧偏爱此法。传统的注水称重法有无法克服液体表面张力致测量精度较低而需要改进的地方。采用传统液位检测装置来进行容积测量的误差极大,可高达 1.2%^[6]。所以针对提高其测量精度研究设计了一种新型容积测量装置。

1 测量系统原理

先采用可达到精度要求的称重计对空载的容器进行称重,并记录数据。然后注入液体通过传感器来确定水是否充满容器,同时对水的流量进行控制。当容器内充满水时再次对容器整体进行称重,并记录数据。最后通过公式计算得出容器容积。图 1 所示是原理流程图。

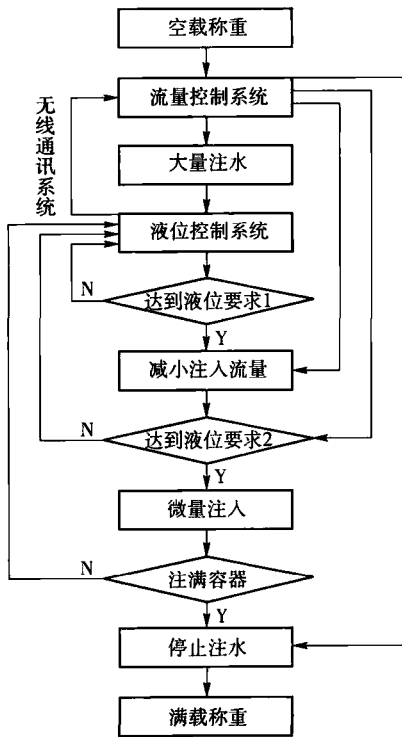


图 1 原理流程图
Fig. 1 Principle flow chart

首先,把称重计放在隔震台上,再对药筒及附件进行称重且记录下数据。然后安装好附件,即盖板和注液漏斗,盖板上的传感电路与发射模块相连。

在计算机上的相应界面上输入待测药筒的大致的容积等参数,便于计算机控制。系统工作,打开流量阀并对药筒注水,当液位达到第 1 个规定液位时,第 1 个液位探头收到信号,然后将液位信息通过无线发射模块发送到接收模块再传给计算机,由计算机通过比例、积分和微分(PID)对流量控制阀进行控制,减小注水的流量;当液位到达第 2 个规定液位时,第 2 个液位探头同样收到信号,将液位信息通过无线通讯模块传输给计算机,之后控制流量改为微量注入;当液面与盖板接触时,探头检测到后,计算机控制流量阀停止注水。此时,再次对药筒整体进行称重,前后两次称重的差值即是注水的质量,通过公式计算可得出药筒容积,即

$$V = (m_a - m_b) / \rho, \tag{1}$$

式中: V 为容器的容积; m_b 为未注水前容器的质量; m_a 为注水后容器及其内液体的质量; ρ 为液体密度。

2 液位控制系统

液位控制系统是影响测量精度的最重要的一个因素。因为在药筒内的水必须是刚好充满容器,不能多也不能少。这就对液位控制系统的精度有一个相对较高的要求。

其构成主要由容器口盖板(绝缘材料)、阵列电极、传感电路三部分组成。

2.1 液位控制系统原理

由不同深度的电极深入药筒内,主电极发出信号,液面依次到达规定液位检测电极后检测电极接收信号,发送给计算机来控制流量系统减小流量直至停止注水。由于液体具有表面张力,这会导致液面出现中间高、边缘低的现象,在接触盖板时会在边缘部分形成空隙,并未充满药筒,从而使测量得到的值存在误差。所以对此问题提出了解决方案。

2.2 液位控制系统设计方案

如图 2 所示,盖板选用绝缘材料来制作,电极采用直径非常小(丝状)且具有良好的导电性的金属材料制成。电极按照一定的阵列规律,长短不一的分布在盖板上。同时,盖板上留有一个注水孔和若干气孔以便往容器内注水和保持内外压强平衡。中间的电极为发射电极(即电极 1),长度要足够长,能够深入容器内。一开始大量注水,但要保证测量误差达到要求且后期液面平稳,则需要在水达到一定液

位时减缓注水速度,控制流量。此时在盖板上再放置一电极即电极 2,其长度要刚好达到减缓注水时的液位。当注水液位达到该液位时会连通两电极,从而接收到信号对注水流量流速进行控制。其他电极也是同原理。当快注满时,在盖板上配置一个与此液位相对应的电极(即电极 3),在液位到达时连通电极 3 使流量控制系统改为微量注入。由于液体具有表面张力,所以当液面触碰到盖板时注水实际还未充满整个容器,在盖板的边缘依旧留有空隙。所以在盖板的边缘周围也均设置若干电极,即电极 4~电极 8,其长度就与盖板面齐平。当水连通盖板边缘的所有电极后即可证明容器被装满了,此时发送信号停止注水。

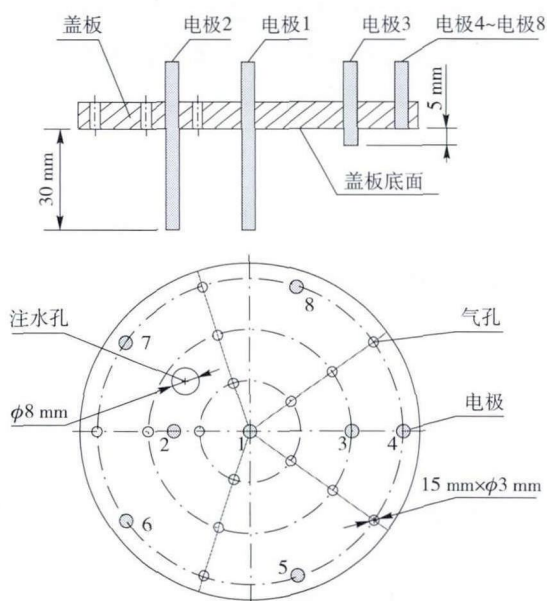


图 2 液位测量装置原理图

Fig. 1 The principle chart of liquid level measuring device

2.3 数据采集控制单元

药筒容积测量数据采集及控制单元需实现流量控制,液位判断等功能,如图 3 所示,系统采用开关阀控制、调节阀控制流量计,实现液位的精确判断和液量的微量控制。

3 流量控制系统

流量控制系统主要由 PID 智能算法、调节阀、流量传感器、控制单元组成,可实现对瞬时流量的测量、变换、显示、通讯和控制^[7-8]。

3.1 PID 算法

PID 控制为比例、积分和微分 3 环节叠加,公式为

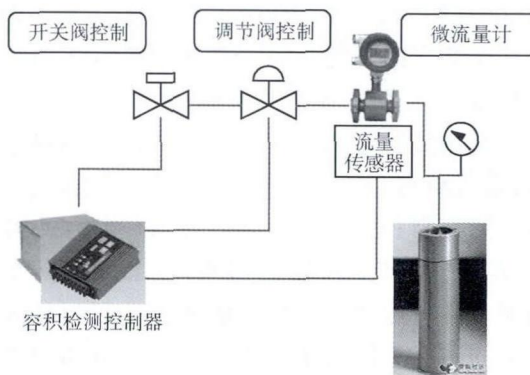


图 3 药筒容积检测系统控制单元

Fig. 3 Control unit of detection system of cartridge volume

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] + u_0, \tag{2}$$

式中: $u(t)$ 为输出信号; $e(t)$ 为输入偏差,即给定值与测量值之差; K_p 为比例系数; T_i 为积分时间; T_D 为微分时间; u_0 为控制常量。

3.2 PID 调节的可编程控制器实现方法

流量控制系统中采用青岛奥博仪表设备有限公司 ORB-LWGY 小口径涡轮流量计,依靠螺纹连接,适合测量低粘度的介质。采用上海奇众阀门制造有限公司 ZDSJP 型比例微分电动调节阀,配套德国进口 PS 或 3810 系列执行机构。采用西门子 S7-200 系列下的 226CN 作为控制 CPU,226CN 内部集成 4 路 PID 调节,此系统选择第 0 路 PID 控制回路。因为流量计与电磁阀均采用 4~20 mA 控制,因此,由设置向导生成的 PID 控制子程序如图 4 所示。

符号	变量类型	数据类型	注释
EN	IN	BOOL	
LW0	PI	INT	过程变量输入:范围从 6400 至 32000
LD2	Setpoint	IN	给定值输入:范围从 0.0 至 100.0
LE0	Auto_Manual	BOOL	启动/停止模式: 0=手动模式, 1=自动模式
LD7	ManualOutput	IN	手动模式时回路输出封锁值:范围从 0.0 至 1.0
	IN		
	IN_OUT		
LW11	Output	INT	PID 输出:范围从 6400 至 32000
	OUT		
LD13	Temp_DI	DWORD	
LD17	Temp_RI	REAL	
	TEMP		

图 4 PID 控制子程序

Fig. 4 PID control subroutine

数据采集部分由定时器中断程序采集,每 100 ms 采集一次,中断程序设置程序梯形图如图 5 所示。数据采集梯形图如图 6 所示。PID 调节部分主程序如图 7 所示。

4 无线通讯模块

在注水测液位时,如果采用有线通讯,传感器的引线在盖板和支架之间,会产生测量误差,从而影响

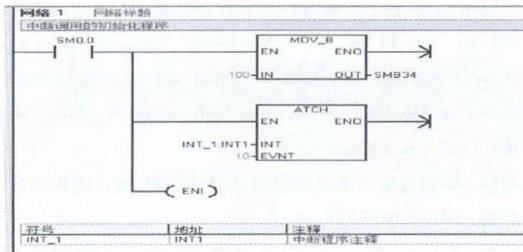


图 5 中断程序设置程序梯形图

Fig. 5 Interrupt program setup program ladder diagram

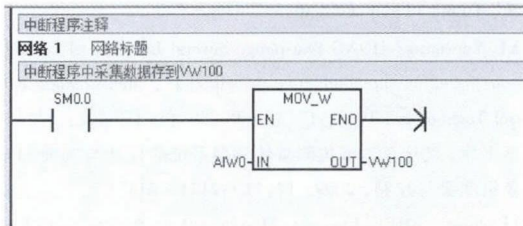


图 6 数据采集梯形图

Fig. 6 Data acquisition ladder diagram

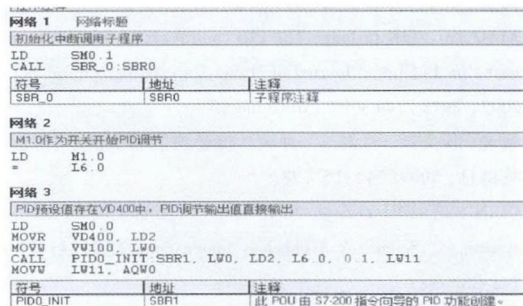


图 7 PID 调节部分主程序

Fig. 7 PID control part of the main program ladder diagram

测量结果的准确性。所以采用非接触式的形式,即液位信息通过无线通讯模块发送出去,接受模块接收后通过信号放大,A/D 转换后传输给计算机,然后发送控制流量的指令。如图 8 所示。

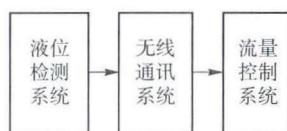


图 8 无线通讯模块工作示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the wireless communication module

5 全系统误差分析

设计可以分成两个量程进行测量,对其精度要

求亦不同,则药筒容积测量范围为 0.04 ~ 25 L,药筒容积测量误差:测量误差 ≤ 1 mL,测量容积 $V \leq 1$ L;测量误差 $\leq 1\% \times V$,测量容积 $V > 1$ L.

5.1 密度误差、称重误差引起的误差 ΔV_{mp}

按误差传递定律

$$\Delta V_{mp} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial m}\right)^2 \Delta m^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho}\right)^2 \Delta \rho^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \Delta m^2 + \left(\frac{m}{\rho^2}\right)^2 \Delta \rho^2}, \quad (3)$$

式中: m 为被测药筒盛放水的质量; Δm 为称重误差; ρ 为水密度; $\Delta \rho$ 为密度标定误差,取 0.000 1 g/mL;

测量时按容积为 1 L,则最大质量为 1 000 g. 由此计算:

$$\Delta V_{mp} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \Delta m^2 + \left(\frac{m}{\rho^2}\right)^2 \Delta \rho^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times 0.1^2 + \left(\frac{1\,000}{1^2}\right)^2 \times 0.000\,1^2} = 0.14\text{ mL}.$$

155 mm 弹药室容积略小于 25 L,测量时按最大容积为 25 L,则最大质量为 25 000 g,此时称重误差 Δm 为 0.5 g. 由此计算:

$$\Delta V'_{mp} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \Delta m^2 + \left(\frac{m}{\rho^2}\right)^2 \Delta \rho^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \times 0.5^2 + \left(\frac{25\,000}{1^2}\right)^2 \times 0.000\,1^2} = 2.55\text{ mL}.$$

5.2 液位判断引起的误差 ΔV_h

液面传感器响应时间及响应精度为 50 μm ,若判断液位的孔径(即注水孔,见图 2)为 $\phi 8$ mm,则由此引进的误差为

$$\Delta V_h = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Delta h, \quad (4)$$

式中: D 为判断液面位置孔径(即注水孔孔径), $D = 8$ mm; $\Delta h = 50$ μm 为液位判断误差。则 $\Delta V_h = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Delta h = 0.002\,5$ mL.

5.3 温度变化引起的误差 ΔV_t

由于水注射前后温度变化很小,并且水在温度较小变化下引起的密度变化很小,设计时采用温度补偿措施可有效控制该项误差,可忽略不计。

5.4 总的测量误差 ΔV

若按 1 L 测量,则 $\Delta V = \sqrt{\Delta V_{mp}^2 + \Delta V_h^2} = \sqrt{0.14^2 + 0.002\,5^2} = 0.14$ mL.

若按 25 L 测量时,则 $\Delta V' = \sqrt{\Delta V'_{mp}^2 + \Delta V_h^2} =$

$$\sqrt{0.55^2 + 0.0025^2} = 2.55 \text{ mL.}$$

若采用相对精度计算,则 $\frac{\Delta V}{V} = \frac{2.55}{25000} = 0.0102\%$.

综上所述,系统满足精度指标要求。

6 结论

通过对文献[1-2]查询,其他测量方法的最佳测量精度大约在 0.1%~0.2% 的范围内,而利用本文中设计的测量装置能够实达到 0.01% 的程度,基本可以达到系统技术指标。该系统成功减小了液体表面张力所引起的误差和流量控制的误差,使测量精度大幅度提高。这对于提高炮弹参数测量精度具有实用意义。

参考文献 (References)

- [1] 柏逢明,马莉. 弹体药室容积音频检测仪的研制[J]. 兵工学报, 1999, 20(1):19-23.
BAI Feng-ming, MA Li. A sonic testing instrument for bomb chamber volume[J]. Acta Armamentarii, 1999, 20(1):19-23. (in Chinese)
- [2] 李国平,赵雁. 弹体药室容积检测的新方法[J]. 济南大学学报:自然科学版, 2001, 15(4):328-330.
LI Guo-ping, ZHAO Yan. A new method of examining the bomb chamber volume[J]. Journal of Jinan University: Science, 2001, 15(4):328-330. (in Chinese)
- [3] 卫开夏,李斌,朱信诚. 导电性液体新型液位测量方法研究与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(10):964-968.
WEI Kai-xia, LI Bin, ZHU Xin-cheng. Research on level measurement technique of conductive liquid and it's application[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(10):964-968. (in Chinese)
- [4] 邓柳. 电极式水位测量传感器的设计[J]. 湖北成人教育学院学报, 2013, 19(3):1-4.
DENG Liu. Study on the design of electrode type water level sensor[J]. Journal of HuiBei Adult Education Institute, 2013, 19(3):1-4. (in Chinese)
- [5] 徐月明,洪树鹏. 几种电导式液位传感控制电路[J]. 测控技术, 1998, 17(1):49-50.
XU Yue-ming, HONG Shu-peng. Several liquid-level control systems based on the conductive principle[J]. Measurement & Control Technology, 1998, 17(1):49-50. (in Chinese)
- [6] 李书旗,沈金荣. 液位测量传感器系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(11):2131-2133.
LI Shu-qi, SHEN Jin-rong. Design and implementation of sensor system about liquid-level measurement[J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(11):2131-2133. (in Chinese)
- [7] 肖磊,谢菊芳. 一种基于 PLC 的 PID 流量控制设计[J]. 湖北大学学报:自然科学版, 2007, 29(1):44-46.
XIAO Lei, XIE Ju-fang. The PID control system of flow measuring based on PLC[J]. Journal of Hubei University: Natural Science, 2007, 29(1):44-46. (in Chinese)
- [8] 钱俊,侯义锋,肖磊. 一种液体流量控制系统的设计[J]. 科技信息, 2009(24):25-28.
QIAN Jun, HOU Yi-feng, XIAO Lei. Design of a liquid flow control system[J]. Science & Technology Information, 2009(24):25-28. (in Chinese)