

激光动态液位测量技术研究

杨润泽, 汤玉美, 邱 剑, 刘克富

(复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要: 如今, 运载火箭大量使用液氧、煤油等液体推进剂, 其液位测量技术主要有浮子式、激光式、电容式、雷达式等。介绍并实现了一种激光液位测量系统, 该系统体积小、功耗低, 可适应多种测量环境, 能满足航天燃料液位测量高精度、高动态、连续稳定测量的要求。系统利用相位式激光测距技术, 通过测量激光回波信号的相位延迟, 计算激光光程从而得到距离数据并通过客户端进行直观展示和数据存储。系统最大测量距离可达 100 m, 精度为 ± 1 mm。该系统为非接触测量, 耐腐蚀, 通过加入反射板可实现透明、非透明液体测量。

关键词: 液体推进剂; 液位测量; 激光测距; 相位式

中图分类号: V24

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2021) 01-0037-05

Research on Laser Liquid Level Measurement Technology and Its System Integration

YANG Runze, TANG Yumei, QIU Jian, LIU Kefu

(School of Information Science and Technology, FUDAN, Shanghai 200433, China)

Abstract: Nowadays, launch vehicles generally use liquid propellants, such as liquid oxygen and kerosene. Liquid level measurement technology mainly includes float type laser type, capacitive type, radar type, etc. This paper introduces the basic principles of several liquid level measurement techniques and implements a phased laser level measurement system. The system is small in size and low in power consumption, and can adapt to a variety of measurement environments, which can meet the requirements of high-precision, high-dynamic, continuous and stable measurement of aerospace fuel level measurement. The system uses phase laser ranging technology to calculate the laser path length through the phase delay of the laser echo signal to obtain the distance data and the data is displayed and stored by the client terminal. The system has a maximum measuring distance of 100 m with the accuracy of ± 1 mm. The system uses non-contact measurement, which is corrosion resistant. In addition, transparent, non-transparent liquid measurement can be achieved by adding a reflector.

Key words: Liquid propellant; Liquid level; Laser ranging; Phase type

0 引言

在航天领域, 液体推进剂具有比冲大、可自由调节推进动力、可多次点火等优势^[1]。航天发

动机的液体推进剂的使用量和剩余情况以及实时流量是非常重要的飞行数据, 需要精确测量并实时监控。

激光作为新兴技术以其高亮度、高方向性和

收稿日期: 2019-03-15; 修订日期: 2020-08-24

作者简介: 杨润泽 (1996-), 男, 硕士在读, 主要研究方向为光电系统。E-mail: 19210720059@fudan.edu.cn

高相干性等独特优势, 可被应用于测距领域。激光的高方向性使其能在长距离传输的同时, 仍保证极高的功率密度, 可作为长距离的信号传输载体。激光的高相干性使其能够克服湍流等大气带来的负面影响, 并且可进行精确的相位控制和测量。由此可见, 激光在测距领域具有其独特的优势。本文研制了一种新型相位式激光液位测量装置, 可对推进剂液位进行实时高频率精确测量。

1 几种常用液位测量技术原理及其特性

运载火箭对推进剂液位精度要求高, 同时贮箱处于加速度大幅变化和振动剧烈的飞行工况中, 这对液位测量装置提出了更高的要求。表1介绍了几种常用的液位测量装置的原理和特点, 并分析比较了其在航天测量的适用性。

表1 液位测量方法比较^[2]

Tab. 1 Comparison of several liquid level measurement methods^[2]

方法	原理	精度	功能	适用性
浮子法	伺服液位计通过测量液位升高引起的浮子受浮力变化计算液位高度	± 0.7 mm	接触式测量, 精度高, 目前应用普遍	测量范围小, 机械结构稳定性低, 倾斜和动态情况无法测量
微波法 ^[3]	由天线、壳体、接收器组成。通过测量调制信号与回波信号频率差计算液面高度	± 1 mm	高精度, 数字设计稳定度高	对反射板要求高, 受罐内雾气影响较大导致测量不准确
电容法	利用不同高度液体电容不同, 通过测量电容得到液位高度	± 2 mm	接触式测量, 结构简单, 最大范围为 3 m	无法测量腐蚀性液体, 精度低, 无法测量动态液面
激光法 ^[4]	顶部激光器发出激光到液面反射板, 通过测量激光相位变化得到光程	± 1 mm	最大范围 50 m, 测量时间为 0.3 s, 可实时监控动态液面并回传客户端显示	非接触式设计可用于多种液体, 不受罐内雾化影响, 精度高且安装成本低

由表1可见, 相位式激光液位测量装置较之传统方法具有一定优越性, 能满足航天发动机推进剂液位测量的要求。

2 运载火箭相位式激光液位测量系统

本文设计的相位式激光液位测量系统由激光发射器、信号接收器、反光板和实时监控与控制客户端组成。客户端有控制测量时间、测量频率及历史数据储存等功能。

相位式激光测距的原理流程如图1所示, 信号发生器产生测量信号并与激光调制后经过光学系统发射至待测物体。反射光波通过光学透镜汇聚后由光电接收器接收, 接着通过电路进行滤波和放大得到低频的返回测距信号。

调制信号发生器同时会发出一个与回波信号同频的参考信号, 这是为了确定信号传播过程中的相移, 该相移与光程成正比例关系。因此, 确定光波的总相位移就可以得到光程。

设从发射到接收到回波信号的时间为 t , 与待测物体距离为 L , c 为空气中的光速。则距离 L 可由下式求得

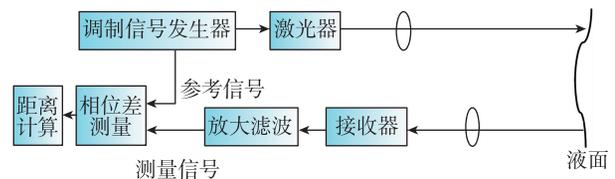


图1 相位式激光测距原理流程图

Fig. 1 Phased laser ranging principle

$$L = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

在得到相位差后如图2, t 可通过另一个公式得到

$$t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{2\pi N + \Delta\varphi}{2\pi f} \quad (2)$$

$$t = \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \frac{1}{f} \quad (3)$$

式中, ω 为光波的角频率, f 为光的频率, N 为相移的完整周期数, $\Delta\varphi$ 为不足一周期的相移。

因此

$$L = \frac{ct}{2} = \frac{\lambda}{2} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \quad (4)$$

式中, λ 为调制信号波长。

故只需得到光波走过的完整周期数 N 和 $\Delta\varphi$ 就

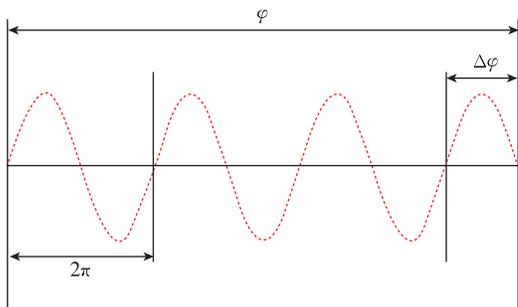


图 2 相位差示意图

Fig. 2 Phase difference diagram

可以得到待测距离。若把用于测量的调制激光看作距离的测尺，则相位激光是一把光尺，光尺长为 $\lambda/2$ ，那么 N 就是待测距离容纳的整尺数， $\Delta\varphi/2\pi$ 为余下不足一整尺的距离。可见，当待测距离小于光尺时， $N = 0$ 。本文采用调制频率为 1.5 MHz 的测量光束，因此其光尺长度为 100 m，考虑到液位测量距离远小于 100 m，故只需确定 $\Delta\varphi$ 便可得到待测距离。

在实际的测量中 $\Delta\varphi$ 可直接由鉴相器得到，而 N 可通过分散的直接测尺频率方法^[5]求得。

为保证相位测量精度，需要选取高的调制频率^[6]，但考虑到高频时鉴相难度较大，故先通过混频将参考和测量信号转为中频信号，这样频率降低后信号周期将扩大上百倍，从而提高测相的分辨率。接着利用差频测相法测量，原理如图 3 所示。从得到的参考混频信号可以看到，经过差频所得到的信号相位差没有改变，仍为 $\Delta\varphi = \omega_L t_{2D}$ 。

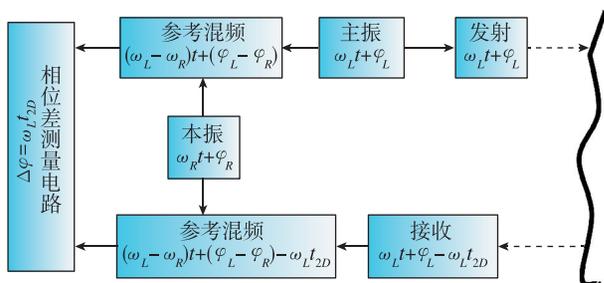


图 3 差频测相法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of difference frequency phase measurement

对经过混频的差频信号做自动数字鉴相处理^[7]。数字鉴相器通过采样得到离散数字信号，利用两同频率正弦信号的零时延互相关函数值与其相位差成正比的原理得到相差，同时由于噪声与测量和回收信号相关很小，故数字鉴相法有较

好的噪声抑制能力。数字鉴相器使用 CPU 处理器作为核心处理单元，测量精度高，抗干扰能力强，可应用于高精度鉴相。考虑到电路中温补晶振的误差为 $\pm 1 \times 10^{-6}$ ，其对应的相位测量精度为 $3.6 \times 10^{-4}^\circ$ ，则在调制频率为 1.5 MHz 时理论最小测距误差为 0.1 mm。但受到大气流动和探测器接受的回光信号的随机噪声影响，实际测量误差为 ± 1 mm。

3 实验结果与误差分析

本文设计并搭建了液位测量实验平台，如图 4 所示。实验以水为待测液体，根据 Daimon 等^[8]研究得到纯水对光的反射率约为 0.02，可见其对光信号反射较弱，因此加入反射板以保证实验测量结果准确。图 5 为激光液位测量系统的客户端监控窗口，发送区可发送串口指令对测距仪进行调试，接受区可实时显示并记录液位高度并导出历史数据，右侧 2 维画面可直观显示当前液位高度。图 6 为测距仪结构图。



图 4 实验测量平台

Fig. 4 Experimental measurement platform

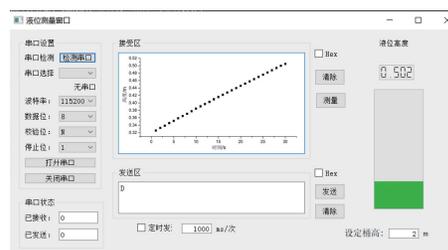


图 5 液位测量客户端

Fig. 5 Level measurement client terminal

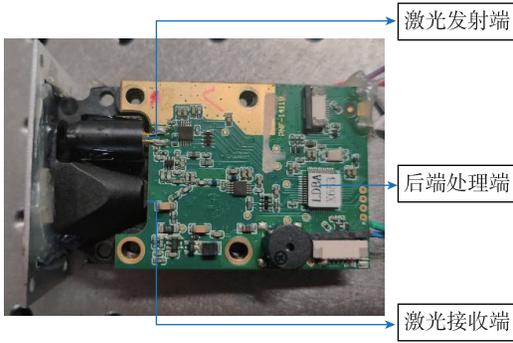


图 6 测距仪器结构图
Fig. 6 Structure the device

实验将液位每次提高标准刻度 100 mm，多次测量将测量值差值与标准刻度 100 mm 比较，最终得到数据如图 7 所示。可见平均误差在 ±1 mm，满足应用要求。

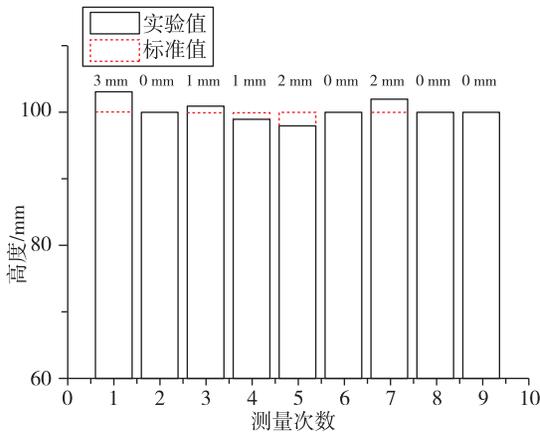


图 7 液面每增加 100 mm 的测量差值图
Fig. 7 Measurement difference for each 100 mm increase in liquid level

飞行过程全箭的振动将导致推进剂液面波动，因此液位测量仪要能对燃料罐内动态液面进行实时监控。为模拟燃料罐的晃动，引入气泵使容器内液面产生波动，实验分别测量波动液面和静止液面的数据，对比结果如图 8 所示。测量数据显示液面振动周期约为 3 s，振幅约为 2 mm。可见激光测距仪高频测量的特点能很好地满足动态液面的测量需求。

在实际环境中，液体推进剂会存在部分雾化的情况，这些雾气会对诸如雷达测距仪等测量仪器产生干扰。由于激光具有高相干性，其在浓雾中有很强的穿透性，能保持较好的准直和高功率密度。本文通过在容器中加入烟雾来模拟实际应

用场景，在 PM10 烟雾浓度为 0.8 g/m³ 时测得的数据如图 9 所示。两种场景下测量差值小于 1 mm，属于测量误差范围。由此可见，浓雾并不能对激光液位测量造成干扰。

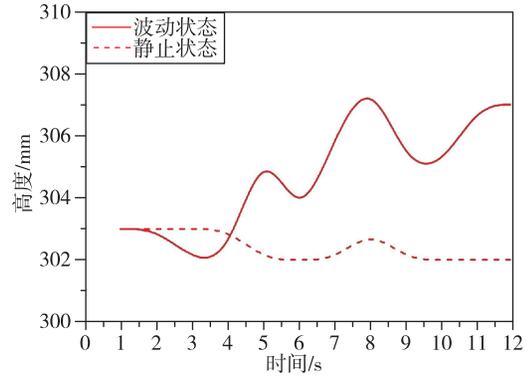


图 8 动态液面与静止液面对比图
Fig. 8 Measured dynamic liquid level and static liquid level

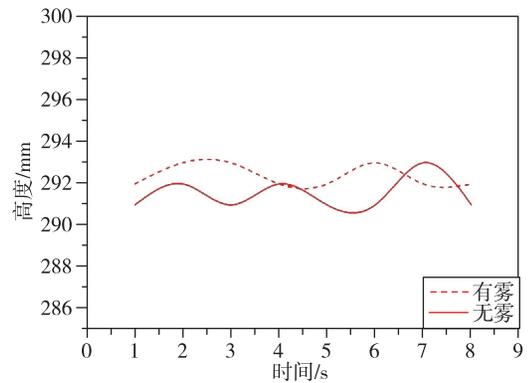


图 9 雾对激光测距产生的影响图
Fig. 9 Effect of fog on laser ranging

4 结论

本文设计的测量系统由激光器、信号接受和处理装置以及客户端软件组成，该系统在实时监测液位的基础上，能够计算当前燃料加注和使用的流量。同时，激光器和信号处理装置可安装在罐外，非机械和非接触式的设计使该系统具有相当的可靠性和安装便捷性。因此验证了激光液位测量的可行性。

激光测距系统能满足航天推进剂液位测量要求，并且相比于其他测量方式具有高精度、高反应速度和适应多种测量环境的优越性。激光液位测量系统能实现多点动态测量，并进一步绘制 3D 动态罐内液面情况，是一项具有广阔应用前景的新技术^[9]。

参考文献

- [1] 符全军. 液体推进剂的现状及未来发展趋势[J]. 火箭推进, 2004, 30(1): 1-6.
- [2] 朱永炉, 冯红亮, 吴硕, 等. 低温推进剂测量技术研究及系统实现[J]. 遥测遥控, 2017, 38(5): 36-43.
- [3] 李娜, 马赠惠. 雷达液位测量系统的设计[J]. 南方农机, 2017, 48(18): 61-62.
- [4] Yoon H, Park K. Development of a laser range finder using the phase difference method[C]. *Optomechanronic Sensors & Instrumentation, International Society for Optics and Photonics*, 2005.
- [5] 李晨光. 相位式激光测距系统的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [6] 汪涛. 相位激光测距技术的研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(1): 29-31.
- [7] 汪友生, 徐小平. 相位法激光测距的实现[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(4): 424-427.
- [8] Daimon M, Masumura A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3811-3820.
- [9] Oggier T, Lehmann M, Kaufmann R, et al. An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (Swiss-Ranger)[C]. *Optical Design and Engineering, International Society for Optics and Photonics*, 2004.

引用格式: 杨润泽, 汤玉美, 邱剑, 等. 激光动态液位测量技术研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(1): 37-41.

Citation: Yang R Z, Tang Y M, Qiu J, et al. Research on laser liquid level measurement technology and its system integration [J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2021, 5(1): 37-41.