

基于光纤传感器与激光测距原理的 物位检测系统设计

摘要：设计了一种对固体火箭发动机推进剂装药高度进行物位测量、显示以及预警的检测系统。系统采用了基于光纤传感器与激光测距原理的非接触式物位检测方案，使用光纤传导激光，使带电设备远离检测现场，在现场完全不带电的环境下，完成高精度物位检测；通过系统主控单元控制多个传感器可实现多点同步检测，从而能够在装药表面不是绝对平面的情况下得到更为可靠的检测结果。实验表明，该系统平均误差为 0.875mm，量程为 4.122m，且具有完善的显示、预警功能，达到了设计要求，在石油、化工等相关领域具有广泛的应用前景。

关键词：固体火箭发动机；物位检测；激光测距；光纤传感器；推进剂

中图分类号：TP212.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-883X(2011)10-0013-04

赵祥云 张敬帅

一、引言

固体火箭发动机推进剂在装药过程中，需要对装药进程实时监控以确保装药量精确可靠。在这个过程中，不允许检测系统接触被测物质，且装药现场也不能使用带电检测设备。传统的机械仪表或者基于电参数变化的物位检测法存在实时性差的缺点，而且，由于需要将探针或传感器本身浸入被测物质才能获得物位参数，都属于接触式检测，因此，难以满足测量要求^[1]。近年来基于光纤技术与激光技术的传感器已经成为研究热点，并出现了一大批新型传感器。这类传感器具有许多传统传感器无法比拟的优点，其中光纤传感器、激光测距技术以及将两者相结合的物位检测方式具有精度高、非接触式测量等优点^[2]。

本文设计了基于光纤传感器与激光测距原理的物位检测系统，能够在检测现场不带电的前提下完成对固体火箭发动机推进剂装药高度的非接触式多点同步检测。该系统具有精度高、量程大以及功能完备等优点，具有广阔的市场前景。

二、系统整体设计方案

固体推进剂装药采用真空花板浇注工艺^[3]，检测需要在推进剂通过花板不断落入发动机的同时进行。物位检测的目的是指导现场操作人员掌握装药物位状况，并在达到指定装药高度时得到信息提示。基于以上功能需求，将系统划分为物位传感器、控制单元、主显示单元及上位机等部分，其总体结构框图如图 1 所示。

系统工作过程为：控制单元控制传感器进行物位检测，检测结果返回控制单元经过处理后，送至主显示单元进行显示与预警。通过上位机可以对检测的物位初值，目标高度，预警高度等进行设置与调整，以适应不同类型装药物位检测的需求。

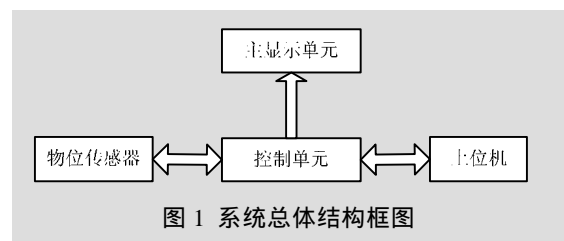


图 1 系统总体结构框图

三、物位传感器的原理与设计

1、物位传感器的总体设计

传感器结构框图如图 2 所示。物位传感器通过透镜将发射激光耦合入发射光纤，激光顺光纤传至另一端由准直透镜准直后发射出去，激光经被测目标反射后由接收透镜汇聚后耦合入接收光纤，并传递到激光测距传感器^[4]。

由于真空花板装药工艺中是将固体火箭发动机置于真空缸内进行装药的，若采用光纤传感器进行物位检测就需要将探头与真空缸密封成一个整体，本文采用光纤连接器将传感器分为端耦合部分与测距探头两部分，这样大大增加了传感器的灵活性。

2、激光测距原理

激光测距技术根据原理可以分为相位差法与时差法两种。其中，时差法是通过光束在待测距离上往返传播时间来计算距离的，采用这种原理的脉冲型激光测距仪一般是用于大范围测量的，其检测量程一般较大，可以达到几公里，但测量精度一般较低，只能达到米级。

系统所采用的是 DLSB15 型激光测距传感器，它是基于相位差法的，其相位式激光测距原理如图 3 所示。激光测距传感器将激光的光强进行正弦调制并通过光学系统发射出去，光信号经被测目标反射后由测距系统接收并放大，接收到的光信号的相位与参考信号即当前正在发送的信号相位会产生相位差 $\Delta\phi$ 。通过测定参考信号与经被测目标反射后的信号的相位差，便可以间接求得 Δt ，而激光在同一介质中传播速度是确定的常数，从而可以得到待测距离 D ，即：

$$D = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \frac{\Delta\phi}{2\pi f} \quad (1)$$

其中， $\Delta\phi$ —光信号往返测距系统与目标一次所产生的相位差；

f —激光光强调制信号的频率。

将 $\lambda = C/f$ 代入上式得：

$$D = \frac{\lambda \Delta\phi}{4\pi} \quad (2)$$

相位式激光测距理论中一般将 $\lambda/2$ 称为测尺。由式 (2) 可以看出，系统的最远检测距离受到测尺 $\lambda/2$ 的限制。另外鉴相精度也是有限的，直接鉴相所能达到的鉴相精度约在千分之一量级，因而测尺的大小对系统的检

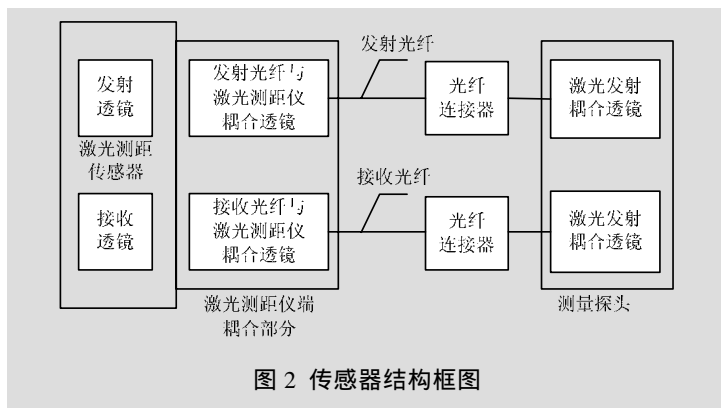


图 2 传感器结构框图

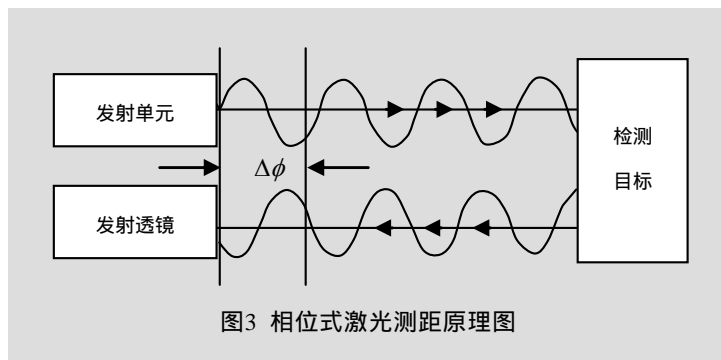


图 3 相位式激光测距原理图

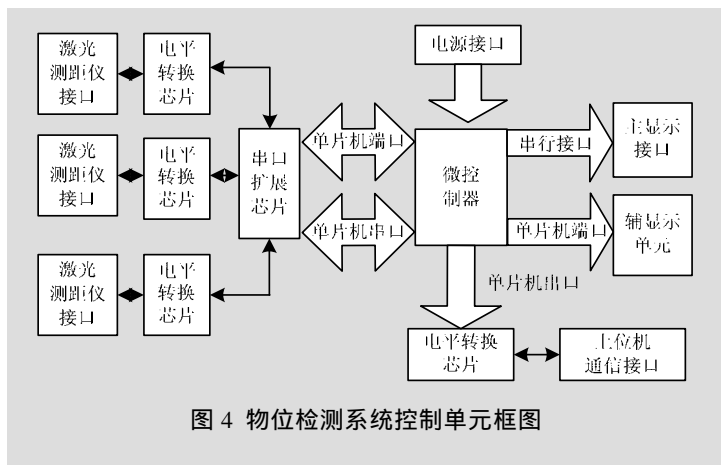


图 4 物位检测系统控制单元框图

测精度有决定性的影响，测尺越短检测精度则越高，而测尺越长则系统的最远检测距离越长。在激光测距系统中经常采用两个频率不同的光强调制，其中低频信号用于粗测，高频信号用于精测，将两者的优势相结合，便可以达到较远距离的高精度检测，为保证检测精度，须采用较高的光强调制频率。

在对高频信号鉴相时为消除电路寄生参量的影响，相位式激光测距系统一般都采用差频法测相，即将高频信号 f_1 与本振信号 f_2 混频、滤波后得到频率为 $(f_2 - f_1)$ 的差频信号，由于差频信号大幅降低了信号频率，从而较好的提高了测距精度^[5]。

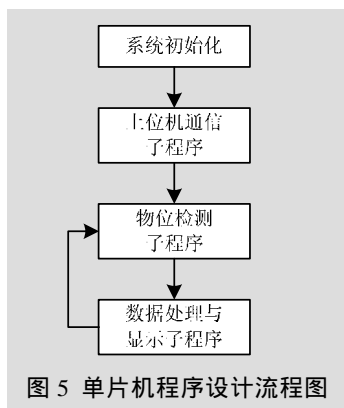


图5 单片机程序设计流程图

四、控制单元原理与设计

控制单元是系统的核心，负责控制检测过程、显示、数据处理及与上位机通信等，其系统框图如图4所示。

1、微控制器及其外围电路设计

系统选取 ATMEGA162 型单片机作为微控制器，该单片机是一种新型高性能 8 位单片机，它采用精简指令集，低功耗 CMOS 技术，具有最高 MIPS/mw 运行效率。为了减小 PCB 板面积，优化步局，系统选 QFP44 封装形式^[6]。

单片机基本外围电路设计主要包括两部分：复位电路设计与时钟电路设计。本文采用复位芯片 MAX 811 设计了外部复位电路，该设计方案具有性能稳定、可靠，电路简单的优点；针对串行通信方式对时钟精度要求不高的特点，系统采用了 7.3728MHz 石英晶振与 22 pF 多层陶瓷电容构成了时钟电路，保证系统运行中产生准确的时钟信号。

2、辅显示单元设计

辅显示单元由七段 LED 数码管组及其驱动电路组成，用于在调试状态下对检测数据的显示。系统采用 MAXIM 公司出品专用的数码管驱动芯片 MAX7219。该芯片内部集成了多路扫描器、段驱动电路、位驱动电路、BCD 译码器，并具有 8 位双口静态 SRAM，可保存 8 位显示数据，连线简单、使用方便

3、控制单元单片机程序设计

控制单元的单片机程序主要负责控制硬件系统的运行。该程序主要包括以下几个子程序：系统初始化、与上位机通信并对检测参数进行修改、控制传感器进行检测、数据处理、将结果送至主显示单元及辅显示单元显示。系统涉及多个传感器及对串行接口扩展的控制等，单片机程序较为复杂。程序是在 ICCAVR 集成编译环境编写、调试、编译的。其流程图如图5所示。

4、主显示单元原理与设计

在系统工作时，主显示单元通过实时显示装药物位信息，以及当装药物位达到指定高度时发出预警信号来指导技术人员的装药操作。主显示单元采用数码管与发光二极管组成，具体为 5 支 2.3in. 数码管用于显示当前物

位数值，三组红黄绿色的发光二极管，通过点亮、闪烁等方式预警当前检测值与目标物位的接近程度，其效果如图6所示。

五、系统软件设计

系统软件的作用是通过系统的参数进行设置，使系统在装药环境或装药类型改变时可以及时更改参数，以适应装药要求。软件操作界面如图7所示。

当打开软件时，软件系统处于等待状态，收到控制单元发出的联机命令时，会立刻给出回应命令，使下位机处于联机状态。这时操作人员可以根据检测系统的检测环境，在界面上分别输入目标高度、预警高度等信息，其中：“初始高度”在默认情况下是自动检测的，当用户需要手动设置该值时，可点击“自动检测”前的复选框，这时便可以在输入框内输入相应的初始值；在传感器使能选项中，用户点击传感器前的复选框可以使能该传感器，默认情况下是 3 路传感器全部使能的。当点击“确定设置”时，软件通过计算机串口将数据发给下位机。当控制单元回复确认信息后，界面会弹出“设置成功”窗口，标志着系统参数设置成功。

六、系统验证与结果分析

检测量程实验：将目标从距测量探头约 1m 远处逐渐靠近，当主显示单元因接收信号太弱而显示错误代码时，表示此时为传感器所能检测的最近距离，经多次测量得知该系统的最小检测距离为 0.198m；同样方法将目标逐渐远离测量探头，得到系统的最远检测距离为

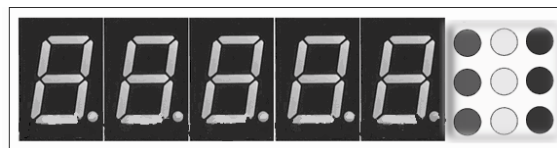


图6 主显示单元效果图

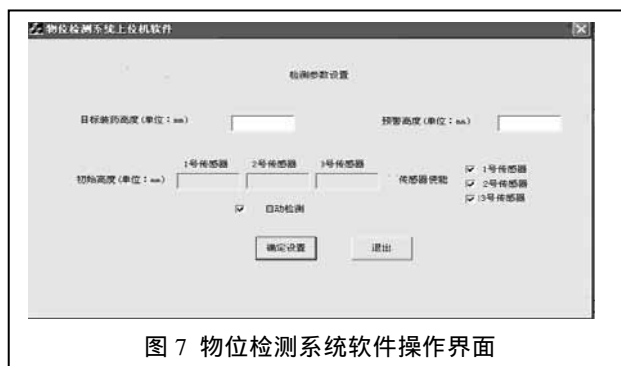


图7 物位检测系统软件操作界面

5.04m。

检测精度实验：将目标放置在测量探头前 A 处，此时的检测结果 L_1 ，然后将目标平移 ΔL ，此时检测结果为 L_2 ， $|L_2 - L_1|$ 与 ΔL 的差即为系统的检测精度。在系统检测量程范围内选取 8 个固定点，位移 ΔL 分别取 5mm、10mm 进行实验。实验结果如表 1 所示。

表 1 物位检测系统精度实验数据

固定点 检测值 (mm)	位移后检测值与误差				平均误差 (mm)
	$l = +5\text{mm}$	绝对 误差	$l = +10\text{mm}$	绝对 误差	
467	469	3.000	476	1.000	2.000
782	787	0	791	1.000	0.500
1124	1129	1.000	1131	1.000	1.000
1531	1533	0	1540	1.000	0.500
1872	1875	0	1881	1.000	0.500
2203	2209	1.000	2212	1.000	1.000
2621	2625	2.000	2631	0	1.000
3054	3060	1.000	3046	0	0.500
平均 误差	0.875mm				

由实验数据可知系统在各个固定点处平均误差最大为 2mm，总平均误差为 0.875mm，性能指标达到了系统对检测精度的要求。

七、结语

本文为解决固体火箭发动机推进剂装药过程中的物位检测问题，设计了基于光纤传感器与激光测距原理的物位检测系统。实验证明，该系统能够安全、准确的完成装药过程中的物位检测，且操作简单，性能稳定，具有广阔的市场前景。

参考文献

[1]李竞武.物位检测新技术及我国的物位仪表行业概况[J].中国仪器仪表.2007.(9):21-26
 [2]戒华北.光纤传感器的现状和应用[J].厦门科技.2005.(4):34-36
 [3]张艳,程春梅.激光物位传感器在炸药装药中的检测应用[J].测试技术学报.2008,22(2):183-187
 [4]彭伟,戚兵等.激光雷达光纤液位传感系统中光学非接触在线测量方法的研究[J].仪表技术与传感器.1997.(12):19-22
 [5]何平安,李松等.基于无合作目标激光测距仪的激光物位检测

系统[J].测绘信息与工程.2002,27(8):3-5

[6]张森,刘占华等.光纤传感器的研究及应用[J].光通信研究.2007,(3):2-5

Design of level measuring system based on the principle of optical fiber sensor and laser ranging

ZHAO Ju-yun ZHANG Jing-shuai

(Department of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the paper, a propellant level measuring system used for level measurement, result display, alert and modifying the parameters online is designed for solid rocket engines. A non-contact level measuring scheme based on the principle of optical fiber sensor and laser ranging is put forward in this paper. By transmitting laser in fiber and taking the live equipments part away from the test site, a perfect working environment without live equipments are got and the high-precision level measurement is achieved. Multiple sensors are controlled by control unit to receive multi-point measurement synchronously, and more accurate test results can be obtained even though the propellant surface is not absolutely flat. The propellant level measuring system for solid rocket engine can work safely and accurately with the average accuracy of 0.875mm and measuring range up to 4.122m. It has the functions of display, alert and parameter modification. The system can be used for solid rocket engine and has very wide application prospects in petroleum and chemical fields.

Keywords: solid rocket engine; level measurement; laser ranging; optical fiber sensor; propellant

作者简介

赵桦云,中北大学信息与通信工程学院 硕士研究生,主要从事信号与信息处理方面的研究。

地址:山西省太原市中北大学 305 信箱 邮编:030051
 邮箱:blessyou23@sina.com

张敬帅,中北大学信息与通信工程学院 硕士研究生,主要从事信号与信息处理方面的研究。

读者服务卡编号 002