

一种小型一体化小管径超声波管外测压装置

杨志勇,蔡 伟,黄先祥,孙凌逸

(第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室,陕西西安 710025)

摘 要: 针对当前超声波管外测压设备体积较大、能耗高、使用不方便、不能测量小管径内流体压力的难题,研制了一种小型一体化小管径超声波管外测压装置.该装置通过发射电路、高速采集与存储电路的超低功耗设计,大幅降低了设备功耗;设计了一种新型探头夹具提高了回波信号的稳定性;通过锂电池供电、EMD(Empirical Mode Decomposition)去噪等方式增强了回波信号的质量;建立了较为精确的测压模型,实现小管径内流体的压力测量.对多种不同尺寸的小管径内流体进行了压力测量精度验证试验,试验结果表明:该装置体积小、功耗低、使用方便,以内径 14mm 的小管径内流体压力测量为例,最大测量误差不超过 8%.

关键词: 超声波;测压;小管径;小型一体化

中图分类号: TB551

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2012)09-1858-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.024

A Minitype Integrative Equipment in Ultrasonic Pressure Measurement Outside Tubule

YANG Zhi-yong, CAI Wei, HUANG Xian-xiang, SUN Ling-yi

(Laboratory of Armament Launch Theory and Technology Key Discipline of China,

The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract: There are some faults for the current ultrasonic pressure measurement system, such as large volume, high-energy consumption, inconvenience, and it can not measure the pressure of liquid in tubule. A minitype integrative equipment in ultrasonic pressure measurement outside tubule is presented. Low-consumption design of emitting circuit and high-speed data collection-storage circuit were used to decrease the energy consumption of system, and a new kind of clamp was designed to improve the stability of echo signal. Lithium batteries as the power, and denoising with empirical mode decomposition (EMD) were used to improve the quality of echo signal. At last, the pressure measurement model was established to calculate the pressure of liquid in tubule. The liquid in multiple tubules in different size were measured to test the measurement precision of system, and experimental results show that the equipment shows advantage on small volume, low-energy consumption and convenience. When we measure the pressure of liquid in tubule with diameter 14mm, the maximal measurement error is less than 8%.

Key words: ultrasonic wave; pressure measurement; tubule; miniature integrative

1 引言

在火箭导弹发射设备、起重设备、转载运输设备、工程机械等大型装备中,液压系统是传动与控制的核心机构,压力作为液压系统的重要参数直接关系到系统的运行状态,因此液压系统压力检测是非常必要的.虽然市场上有多种多样的压力表,但多为介入式检测,操作不方便.超声波管外压力测量凭借其非接触式测量、安装方便、不受液体物理、化学性质影响的优点,使它在工程液压机械故障诊断、测量等多方面应用前景广阔^[1~3].

目前针对超声波管外压力测量的研究,有的系统反应慢、操作繁琐、信号质量差^[4,5],有的系统体积庞大、功耗大、不能测量小管径^[6,7],有的仅仅是针对回波信号去噪或者发射电路设计等系统局部进行研究^[8~10],

均不能有效解决小型一体化小管径超声波管外测压的难题.

本文设计了一种小型一体化小管径超声波管外测压装置,该装置以 MSP430F1611 为核心,通过发射电路、数据采集电路的低能耗设计降低了系统功耗,利用设计的新型探头夹具增强了探头装夹的稳定性,首次将经验模态分解理论用于回波信号去噪,取得了较好的效果,采用广义互相关时延估计方法测算时差,利用建立的压力测量模型可以比较准确的测量得到管路内油液的压力.

2 系统原理

2.1 系统结构原理

如图 1 所示,系统开始工作后,首先通过键盘输入管路的内外径、油液种类等参数,然后由 MSP430F1611

控制产生一脉冲信号激励发射电路,发射电路正常工作产生高压脉冲信号激励探头,探头发出的超声波信号穿透油路管壁,经液压油,携带液压油压力信息后再次穿透管壁进入接收电路,回波信号经过接收电路初级处理,通过采集电路以数字信号的形式进入 MSP430F1611,在 MSP430F1611 内部经过一定的算法处理得到系统压力值,并实时显示出来。

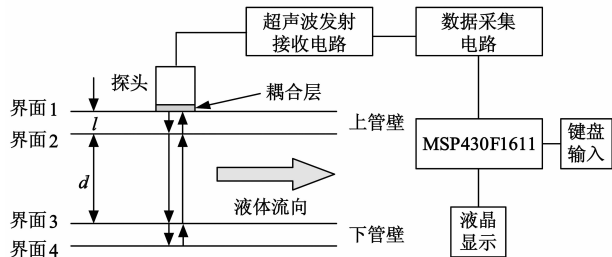


图1 系统结构图

2.2 测压模型的建立

以 10 号航空液压油为例,通过多次试验测量得到某温度下该型号液压油的压力—声速模型为

$$c(P) = 4.5054P + 1370.86 \quad (1)$$

式中, P —液压油压力,单位为 MPa;

$c(P)$ —某温度下油液中超声波的传播速度,单位为 m/s。

由于液体介质没有剪切弹性,只能传播纵波,所以液压系统管外测压采用纵波直探头,如图 1 所示。超声波在各个分界面上都会发生反射和透射,其中穿过管径从界面 3 反射回来的信号为承载油液压力变化信息所需的主要回波信号。

设管路内径为 d ,壁厚为 l ,则超声波在油液中传播的声程为 $2d$,声时为 t ,管壁中的声程为 l ,传播的声时为 t_s 。初始时刻油液中声速为 c_0 ,声波在管路内部传播声时为 t_0 ,则可得超声波传播时间变化量:

$$\Delta t = (t - t_s) - (t_0 - t_s) = \frac{2d}{c} - \frac{2d}{c_0} \quad (2)$$

可得

$$c = \frac{2d}{\Delta t + \frac{2d}{c_0}} \quad (3)$$

代入式(1)可得管路内 10 号航空液压油的管外测压模型为

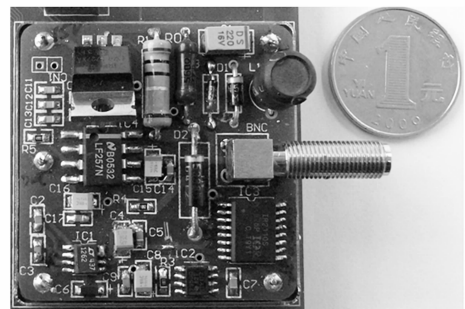
$$P = \frac{\left(\frac{2d}{\Delta t + \frac{2d}{c_0}} - 1370.86 \right)}{4.5054} = \frac{\left(\frac{2d \cdot c_0}{\Delta t \cdot c_0 + 2d} - 1370.86 \right)}{4.5054} \quad (4)$$

由上述分析可知,测得压力变化前后的超声波传播时间变化量,即可推算出管路内油液的压力;并且该模型消除了管壁等因素的影响,可有效提高超声波管外测压设备的智能化水平。

3 系统主要部分设计

3.1 电池供电的低能耗发射电路设计

常见的超声波管外测压方案采用数百伏的高电压脉冲激励超声探头,大都需要用市电作为供电电源,体积庞大、安全性差。文献[7]中提到采用电感储能式脉冲发射电路,利用晶体三极管对电感导通充电后进而关断,利用电感的暂态恒流特性获得瞬间高压,但是由于晶体三极管关断速度低,特别是由于驱动电路难以与高压发射电路有效隔离,电感输出高压对驱动电路的逆向影响导致暂态特性不理想,高压幅值和脉宽难以达到理想水平,且容易导致元件击穿。



(a) 发射电路板实物图



(b) 屏蔽效果图

图2 发射电路实物图

本文设计了一种新型发射电路,采用低汲源电阻 ($R_{DS} = 0.48\Omega$) 和具有极高速电压变化梯度 ($dv/dt = 4.0V/ns$) 的场效应管 IRF740 作为快速电子开关,通过高压悬浮隔离和门锁抗干扰芯片将低压输入通路和高压输出通路有效隔离,通过高速关断已储能电感,利用瞬时放电过程中产生脉冲高电流的原理对超声波换能器进行激励。可通过调整电感参数以及控制信号的频率,以达到换能器的共振频率。该电路无需高压供电,可以采用自行设计的小型锂电池长时间独立供电工作,既减小了超声波管外测压节点的体积,便于安装和使用,也消除了安全隐患,此外锂电池的使用也有效降低了电源对微弱回波信号的影响。

3.2 高速采集与存储电路超低功耗设计

系统中超声波探头的工作频率对系统的测量精度

影响很大^[11],课题组通过多次试验确定采用 5MHz 基频的超声波发射接收一体化探头,为了实现对回波信号的准确探测,采样频率应大于 8 倍基频,实际设计中课题组采用了 60MHz 的采样速率.如此高速的采样速率,普通微控制器根本无法接收处理,通常都需要采用 DSP 作为处理器.但是 DSP 功耗较大,外围电路复杂,难以满足本系统中管外测压装置的小体积和低功耗要求.

针对上述问题,本文提出了一种基于高速 A/D 芯片 AD9226、中速微控制器 MSP430F1611 和超同步 FIFO 芯片 72V2105 的高速采样与处理方案.这种方案最大的特点是采用单一的超低功耗微控制器 MSP430F1611 作为主控芯片,结合灵活的电源管理功能和多模式功率控制机制可以使测试装置的功耗降至极低,满足电池供电条件下测试装置长时间工作的需要.超同步 FIFO 芯片 72V2105 具有读写时钟完全独立的特性,使 FIFO 能在 AD9226 和 MSP430F1611 之间搭建一个完美的桥梁,同时其具有丰富的控制管脚能与 A/D 芯片协调工作,使 A/D 采样的输出数据无需 MSP430F1611 控制就能直接按要求存入到 72V2105 中,此时 MSP430F1611 仅需完成事件探测与存储启动即可.一旦数据存储完毕, MSP430F1611 可以关闭功耗较大的 A/D 而独自读取 72V2105 中的数据,并进行后续的计算与传输,这样可以进一步降低功耗.

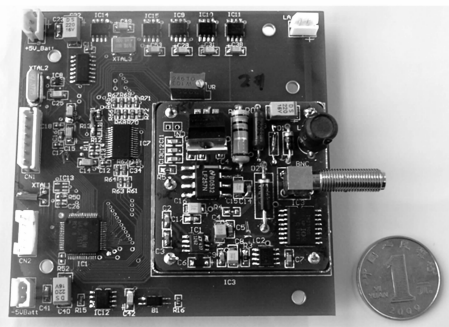


图3 超声波管外测压装置实物照片

本采集和存储方案具有功耗低、体积小等特点,实测结果显示这种方案能够在 7.2V/2Ah 锂电池供电条件下连续可靠工作 20h 以上.整个超声波管外测压装置实物图如图 3 所示.

3.3 新型探头夹具设计增强回波信号的稳定性

目前超声波测压探头主要采用纵波直探头,而液压系统的液压油主要通过圆形管道进行传输,这就存在换能器的安装固定问题.

本文设计了如图 4 所示的探头夹具,夹具由底座、探头两部分组成,均为有机玻璃或铝合金材质.底座上有一与管壁外径相配合的 U 型槽,U 型槽两侧的有机玻璃中心各有一带螺纹的螺孔,用来固定探头;底座中心由上而下贯通一圆孔,用于安装探头;探头仍然采用

纵波直探头,为了便于与底座固定相连,在探头与信号线连接端加有一有机玻璃垫片,垫片两侧与底座螺孔对应位置分别有两个带弹簧垫片的紧固螺栓孔^[12].

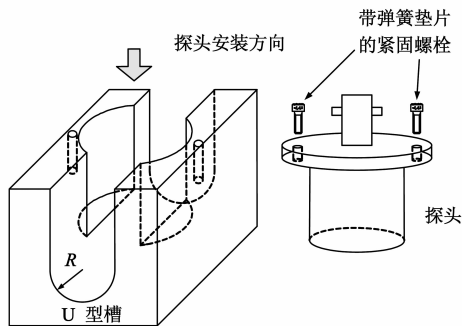
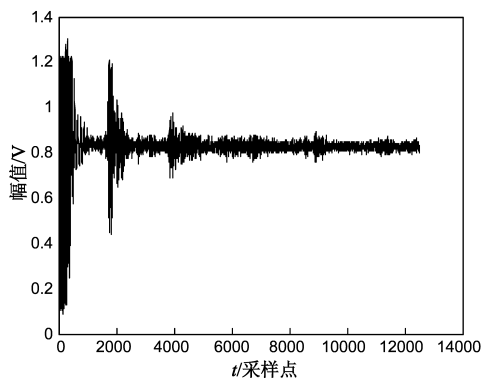
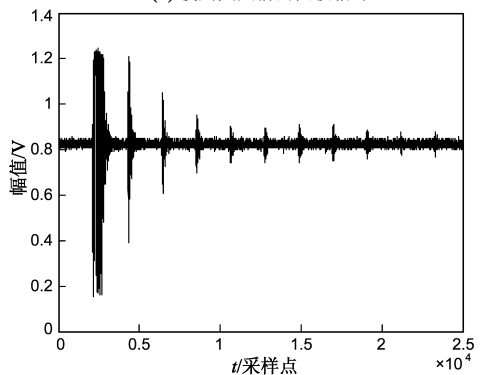


图4 液压系统管路压力测量探头装夹示意图



(a) 使用夹具前的回波信号



(b) 使用夹具后的回波信号

图5 夹具使用前回波信号对比图

图 5 为使用夹具前后收到的回波信号,通过两图中回波信号的对比,可以看出使用夹具后增强了回波信号的稳定性,非常利于实际使用.

3.4 经验模态分解去噪

本文首次将经验模态分解 (EMD) 用于超声波管外测压的回波信号去噪中,首先利用 EMD 求出回波信号的本征模态函数 (IMF),然后通过对比分析,利用反映信号主要特征的模态分量对信号进行重构以实现去噪^[13].图 6 为采用经验模态分解去噪前后回波信号对比图.

实验结果表明该方法能够有效地去除噪声,提高

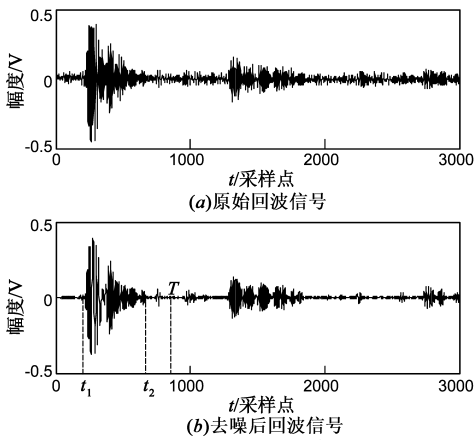


图6 去噪前后回波信号对比

超声回波信号的信噪比。

4 实验验证

为了检验超声波管外测压装置的实用性,以实验室中的 GYZT-2 液压试验台为基础,对多种不同管径内的流体进行了压力测量试验.以外径 18mm,壁厚 2mm,内径 14mm 的管路内的 10 号航空液压油压力测量为例,对测试管路内油液加压时,超声波探头检测的回波信号产生变化,测压装置将实时采集超声波一次回波信号,并利用内嵌的算法进行压力计算.试验设定以 2MPa 为步长进行加压,升至 20MPa 后,再逐次降压至 0MPa. 试验时,各级压力均采集 30 组数据.

图 7 所示是压力为 6MPa 时随机选取时的 30 组一次回波信号,纵坐标 1~30 为各组信号编号,0 处为均值信号.可见相同压力时各次测量结果保持了良好的一致性.

不同压力条件下一次回波信号及局部细化对比如图 8 所示,可明显看出随着管路内油液压力增大,油液中超声波声速增高,回波信号传播时间逐渐缩短,波形逐次左移.

利用前述的模型和计算方法对一次回波信号进行分析后,求得不同压力条件下的测试结果如表 1 所示,绘制曲线如图 9 所示.

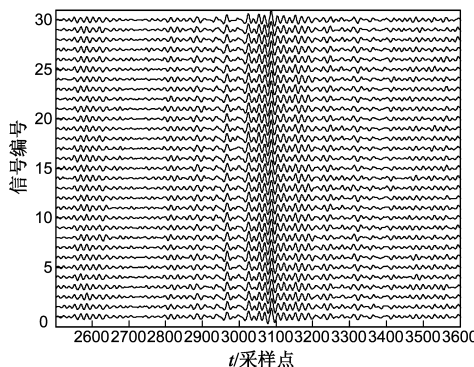


图7 6MPa压力时30组测试信号与均值对比(一次回波)

表 1 超声波管外测压装置压力测量结果

标准压力 表示值 压力/MPa	升压过程试验			降压过程试验		
	测量值 /MPa	误差 /MPa	相对 误差	测量值 /MPa	误差 /MPa	相对 误差
2	1.44	-0.56	—	2.27	0.27	—
4	3.76	-0.24	—	4.35	0.65	—
6	6.05	0.05	0.83%	6.44	0.44	7.33%
8	8.30	0.30	3.75%	8.61	0.61	7.63%
10	10.19	0.19	1.90%	10.74	0.74	7.40%
12	12.22	0.22	1.83%	12.48	0.48	4.00%
14	14.23	0.23	1.64%	14.39	0.39	2.78%
16	16.05	0.05	0.31%	16.27	0.27	1.69%
18	17.85	-0.15	-0.83%	17.80	-0.20	-1.11%
20	19.64	-0.36	-1.80%	19.31	-0.69	-3.45%

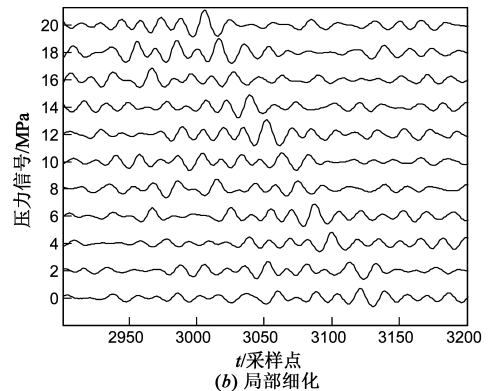
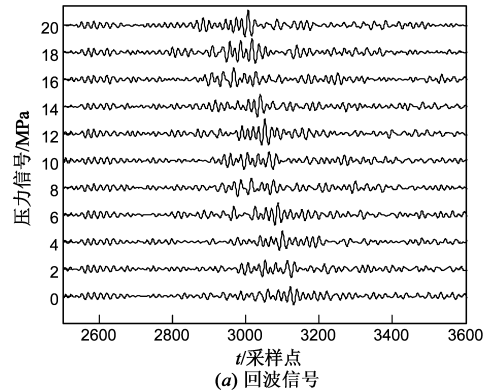


图8 升压过程各级压力一次回波信号及局部细化图

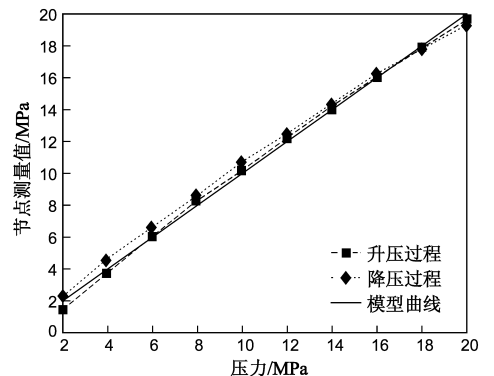


图9 不同压力条件下超声波管外测量值与标准示值的对比曲线
在整个测量范围内,最大误差不超过 0.75MPa. 在 6MPa~20MPa 典型压力范围内,相对误差不超过 8% ,

实现了超声波小管径内流体压力测量,能够满足测试精度要求不是很高或者系统故障诊断的要求。

5 结论

本文针对超声波小管径管外测压这一技术难题,设计了一种小型一体化小管径超声波管外测压装置。该装置通过发射电路和高速数据采集与存储电路的超低功耗设计、新型探头夹具设计、经验模态分解去噪等多种措施保证和增强了回波信号的质量,利用建立的较精确的测压模型实现了小管径内流体的压力测量。以测量 10 号航空液压油为例,实验结果表明:该装置不仅体积小、功耗低、使用方便,而且在对内径 14mm 的小管径内油液压力测量时,最大测量误差仍然不超过 8%,能够满足测试精度要求不是很高或者系统故障诊断的需求。

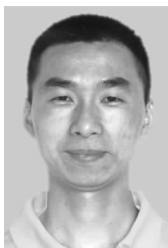
参考文献

- [1] 丁爱玲,石光明,陈旭阳,焦李成.基于完全匹配小波的新型信号检测方法[J].电子学报,2008,36(9):1759-1762.
DING Ai-ling, SHI Guang-ming, CHEN Xu-yang, JIAO Li-cheng. A new approach for ultrasound echo detection based on best matched wavelet [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9):1759-1762. (in Chinese)
- [2] 孟庆浩,兰少莹,姚振静,李根旺.基于混沌脉冲位置调制的实时超声测距系统串扰抑制[J].电子学报,2008,36(11):2268-2273.
MENG Qing-hao, LAN Shao-ying, YAO Zhen-jing, LI Gen-wang. Rejecting crosstalk of real-time ultrasonic ranging system based on chaotic pulse position modulation [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(11):2268-2273. (in Chinese)
- [3] 郭纲,王树勋,孙晓颖,赵晓晖.超声信号的双指数模型及参数确定方法[J].电子学报,2009,37(7):1501-1504.
GUO Gang, WANG Shu-xun, SUN Xiao-ying, ZHAO Xiao-hui. Ultrasonic double exponential model and its parameter determination [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7):1501-1504. (in Chinese)
- [4] 邸乃谦,刘先煜,蒋志明,杜中东,黄先祥.超声波管外测压方法及仪器[P].中国专利:92108777.2,1992-07-29.
- [5] 蒋志明.单片机在超声波管外测压仪中的应用[J].计算机应用研究,1995,(2):54-56.
- [6] 李艾华,杨金岩,黄轶,王爱明.一种超声波管外压力检测装置及方法[P].中国专利:03114623.6,2003-04-09.
- [7] 李芳,王爱明,吴朝军,冯永保,李艾华,赵霞.液压超声波小管径压力测量研究[J].液压与气动,2004,(7):38-40.
LI Fang, WANG Ai-ming, WU Zhao-jun, FENG Yong-bao, LI Ai-hua, ZHAO Xia. Research on ultrasonic hydraulic pressuremeter for small diameter line [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004, (7):38-40. (in Chinese)
- [8] 谢建,李良,陈显敏,罗志军.小波阈值去噪在超声测压回

波处理中的应用[J].机床与液压,2009,37(12):157-160.
XIE Jian, LI Liang, CHEN Xian-min, LUO Zhi-jun. Application of wavelet threshold denoising method in echo processing of ultrasonic pressure measurement [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(12):157-160. (in Chinese)

- [9] 丁丽娟,宋寿鹏,肖俊,易立单.小波滤波在超声管外测压回波处理中的应用[J].测控技术,2008,27(8):41-43,46.
DING Li-juan, SONG Shou-peng, XIAO Jun, YI Li-dan. Application of wavelet filtering to echo processing in ultrasonic pressure measuring outside pipe [J]. Measurement & Control Technology, 2008, 27(8):41-43,46. (in Chinese)
- [10] 丁丽娟,宋寿鹏,高福学,易立单.超声管外测压中发射电路的设计[J].仪表技术与传感器,2009,(8):94-96.
DING Li-juan, SONG Shou-peng, GAO Fu-xue, YI Li-dan. Design of emitting ultrasonic circuit in ultrasonic pressure measuring outside pipe [J]. Instrument Technique and Sensor, 2009, (8):94-96. (in Chinese)
- [11] 刘贵民,马丽丽.无损检测技术[M].北京:国防工业出版社,2010.91-93.
- [12] 蔡伟,高钦和,黄先祥,杨志勇,孙凌逸,戴民强.一种超声波小管径管外反射式测压换能器夹具[P].中国专利:201120154646.7,2011-05-16.
- [13] 孙凌逸,黄先祥,蔡伟,杨志勇.基于经验模态分解的超声波管外测压信号去噪[J].声学技术,2011,30(5):427-431.
SUN Ling-yi, HUANG Xian-xiang, CAI Wei, YANG Zhi-yong. An EMD-based signal de-noising method for ultrasonic pressure measurement outside pipeline [J]. Technical Acoustics, 2011, 30(5):427-431. (in Chinese)

作者简介



杨志勇 男,1983年出生于河北保定.现为第二炮兵工程大学博士研究生.主要研究方向为自动检测与故障诊断.

E-mail: yangzhiyong121@126.com



蔡伟 男,1974年出生于湖南湘潭.现为第二炮兵工程大学副教授,硕士生导师.主要研究方向为自动检测与故障诊断.

E-mail: clwn@163.com

黄先祥 男,1940年出生于江苏如东.中国工程院院士,现为第二炮兵工程大学教授,博士生导师.主要研究方向为兵器发射理论与技术.