

多管点火脉冲爆震发动机测控系统设计

张文龙, 裴承鸣, 李江红, 范玮

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要:根据多管点火脉冲爆震发动机工作原理及实际工作中对移动性、安全性、快速频率调节、便携性、消除控制器对发动机推力测试影响等方面的要求,设计出基于Lora无线通讯的多处理器脉冲爆震测控系统。详细阐述了测控系统整体方案,本地高速信号采集、存储及数据导出及点火控制方案。长期试车表明,该测控系统能够实时精准进行8管脉冲爆震发动机的协调控制,动态调节工作参数,高速实时采集爆震管信息,试车时操作人员在观察室远程操作,消除PDE工作过程中产生的爆炸强声对人体造成的伤害,具有移动便携、集成度高、操作方便、稳定可靠等特点。

关键词:多管点火脉冲爆震发动机;快速频率调节;移动便携;测控;高速采集

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2018)01-0162-07

脉冲爆震发动机(pulse detonation engine, PDE)是一种新型发动机,利用间歇式或脉冲式爆震波产生高温、高压燃气获得推力。具有结构简单、高推重比、大比冲、热循环效率高(0.49)等优点,被认定为21世纪新型航空航天飞行器的动力装置^[1-3]。

测控系统是脉冲爆震发动机的重要组成部分,燃料和氧化剂的填充时刻、点火时刻、点火频率、燃烧产物排出等控制对脉冲爆震发动机成功起爆具有决定性作用。氧化剂、燃料的当量比、填充和点火之间的时序配合决定爆震成功与否,DDT(爆燃向爆震转变)时间,爆震波传播速度、燃烧产物排出决定发动机工作频率,发动机工作过程中爆震管压力、震动等参数对发动机DDT转变、爆震过程、起爆时刻等参数的精确监测,控制决策等提供可靠依据。然而,PDE工作过程为间歇式,且单次工作时间很短(ms级),属于典型的非线性多变量复杂系统;目前,PDE的精确数学模型和控制策略仍处于探索阶段^[4],因此,在实际应用中,需通过压力、震动等参数监测与大量试验探索来确定控制器的工作参数。

1 多管点火脉冲爆震发动机系统及测控要求

1.1 多管点火 PDE 系统

多管点火的脉冲爆震发动机是由多个爆震管组成的脉冲爆震发动机,在单个工作周期中,每个爆震管工作处于不同状态,燃料和催化剂可统一进行填充,也可分别进行填充,每个爆震管进行一次点火,多管循环交替点火^[5]。每个爆震管工作周期可能不同,可能有多个爆震管处于同一工作阶段,爆震管之间的进气和燃烧产物排出可能会相互影响,导致PDE进气或排气不稳定。因此,研究各爆震管的进气、点火、排气时刻及各爆震管物理参数的实时监测,对多管点火PDE稳定工作机理研究、性能调节具有重要意义。

1.2 多管点火 PDE 测控要求

PDE工作过程中,爆震会产生高达160~180 dB的强噪声^[6],对试车人员造成极大的听觉损伤,特别是在未佩戴隔音装置的情况下,由意外爆震造成的损伤。若试车员在观察室通过手持终端遥控控制

PDE,爆震强声对人体造成的伤害可消除。

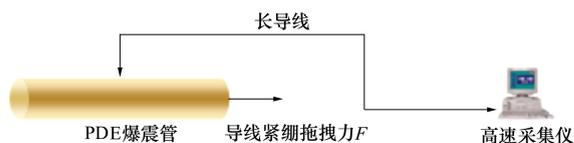


图 1 爆震管信号有线监测方案

通过数据采集仪 DEWESOFT633 高速采集爆震管压力、震动等信号时,采集仪和控制器通过导线连接,如图 1 所示,通常采集仪放置于观察室,由试车员在 PDE 每次启动和停止时操作采集仪的启动和停止来进行数据记录,采集仪和 PDE 之间较长的连线会导致以下问题:

- 1) 信号衰减,特别是对于压力、震动等模拟信号,造成采集结果不准确。
- 2) 推力测试中,连线需随 PDE 运动,会产生拖拽力,造成推力测试不准确^[7-8]。
- 3) 由 PDE 运动拖拽导致连线损坏,降低工作效率。

将高速数据采集功能集成在控制器内部,并通过 Lora 远程控制,不仅提高控制系统的稳定性,而且消除拖拽对 PDE 推力测试影响^[9]。单个 PDE 工作周期通常为 ms 级,爆震管压力、震动信号变化周期为 100 μ s 左右,每周期采样 10 个点,需采样率达到 100 kHz。

各爆震管反应物填充时刻、点火时刻、不同工况下当量比、点火频率是多管点火 PDE 工作的关键参数^[10]。考虑目前研究现状及后期研究通道冗余,需测控系统具有 8 个爆震管通道控制功能,每个爆震管由 1 个点火器和 2 个电磁阀分别控制点火和反应物填充,由 1 个压力传感器和 1 个震动传感器分别测量各爆震管压力和震动信号;各爆震管点火器、电磁阀通道频率、占空比、相位单独调节。为进一步研究 PDE 工作过程中参数快速改变对其影响,要求 8 个点火通道具有 1~400 Hz 快速频率调节功能。

2 测控系统方案设计

2.1 无线通讯方案设计

Lora(基于扩频技术的超远距离无线传输方案)技术是继 wifi、蓝牙、Zigbee 技术之后发展起来的一

种基于扩频技术的超远距离无线传输方案,工作于 433、868、915 MHz 等相对安静的 ISM 频段,接收灵敏度高达 -148 dBm,明显高于 WiFi(-92 dBm)、蓝牙(-106 dBm)、Zigbee(-100 dBm);通讯距离达 3 km,是其他无线通讯技术的数倍;同等发射功率条件下,电流消耗比 Zigbee 略高,低于 wifi 和蓝牙;数据传输速度 0.2~37.5 kB/s,和 Zigbee 技术相当。实际工况中,PDE 试车室和观察室距离约 50 m,隔离性很强,仅可通过观察室和试车室之间的玻璃窗口进行试验观察,要求无线通讯穿透性强、信号灵敏度高、传输距离远。以 Lora 作为无线通讯技术,满足试车工况强穿透、远距离、实时数据传输等需求。

2.2 单元划分及各单元方案设计

根据测控单元远程操作、参数调节、高速信号采集、高精度多通道控制等要求,将测控系统划分为手持远程操作终端和本地测控执行单元,二者之间通过 Lora 无线互联,如图 2 所示。

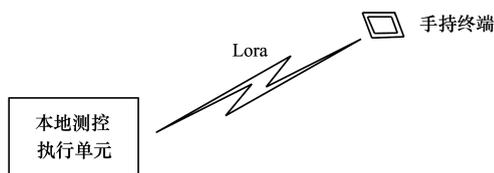


图 2 PDE 测控系统单元划分

2.2.1 手持终端方案设计

手持终端完成多管点火 PDE 8 个点火通道、16 个电磁阀通道信号周期、占空比、相位参数设置,8 个点火通道频率快速调节,PDE 工作启动、停止控制,通讯状态监测等功能。整体方案设计如图 3 所示,由组态串口触控屏作为人机交互接口,CPU 通过串口和触控屏进行交互,完成数据显示、参数设置、PDE 工作状态控制;通过组态屏的数字滑块功能,实现 8 个点火通道频率快速调节;CPU(微处理器)通过串口和串口透传 Lora 模块进行交互,实现手持终端和本地测控执行单元的实时通讯;通过 LED(指示灯)实现通讯状态、PDE 工作状态指示;CPU 通过 TWI(两线制串行总线接口)接口和电池电量监测模块通讯,实时获取手持终端电池电量状态,当电量过低时,通过蜂鸣器进行充电提示;手持终端通过电池取电,由供电系统将电池 12 V 供电转换为触摸屏工作所需 5 V、处理器、状态指示、通讯模块、电量监测、蜂鸣器工作所需 3.3 V 电源。

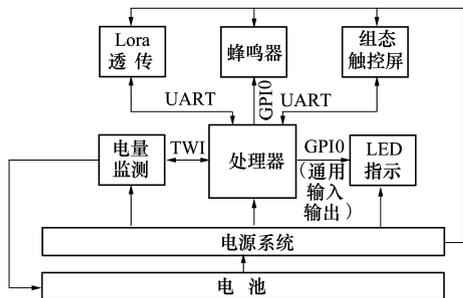


图3 手持终端整体方案

2.2.2 本地测控执行单元方案设计

本地测控执行单元完成和手持终端的实时通讯、控制命令执行和结果反馈、各爆震管压力、振动等参数高速实时采集、存储、数据导出、自身电量监测等功能。根据点火器、电磁阀频率、相位、占空比24通道控制、时间分辨率 $7\ \mu\text{s}$ 的控制需求及数据采集方面16通道100K采样率等对实时性要求苛刻的控制需求,为满足测控单元高精度实时控制和高速数据采集、批量数据存储等需求,采用三处理器协同控制方案,分别为主处理器、点火控制处理器、信号监测处理器;主处理器完成无线通讯、电量监测、同步其他2个处理器的功能,点火控制处理器根据主处理器所传参数和同步信号,进行PDE各点火通道点火器和电磁阀频率、相位、占空比的控制;信号监测处理器根据主处理器的同步信号,进行数据高速采集、存储,并通过USB导出。

3个处理器均选用ST公司的STM32F407系列高性能处理器,其主频可达168 MHz,指令执行能力210million instructions executed per second,具有17个16位和2个32位速度可达168 MHz的高精度定时器;满足点火控制处理器 $7\ \mu\text{s}$ 的时间调度要求。片上集成3个2.4million samples per second、最多24通道的高速12位AD转换器,16通道2KB FIFO (first in first off) 功能的DMA (direct memory access),信号监测处理器通过100 kHz定时器进行AD采集控制,AD转换结果通过DMA的FIFO来缓冲,FIFO半满和全满时进行数据处理,待存储数据通过DMA的FIFO进行缓冲,然后通过FSMC (flexible static memory controller) 接口向NAND Flash (非易失性存储器) 存储。高速数据采集和数据存储均通过DMA来辅助完成^[11-14]。

3 测控系统软硬件设计

3.1 系统硬件设计

测控系统硬件设计核心模块为各单元供电、最小系统外围、模拟量调理设计。

手持终端采用12 V航模电池供电,电池供电经过开关、整流桥、LM2596-5.0V电源模块将电池供电转换为5 V供电,5 V供电经过一级LDO(线性稳压器)转变为3.3 V,进一步滤除电源中的纹波,为系统提供可靠供电。

本地测控执行单元由24 V锂离子电池供电,经10A保险管、24 V转5 V DC/DC隔离模块,转变为5 V供电,经过一级LDO转变为3.3 V供电。系统电源设计如图4所示。

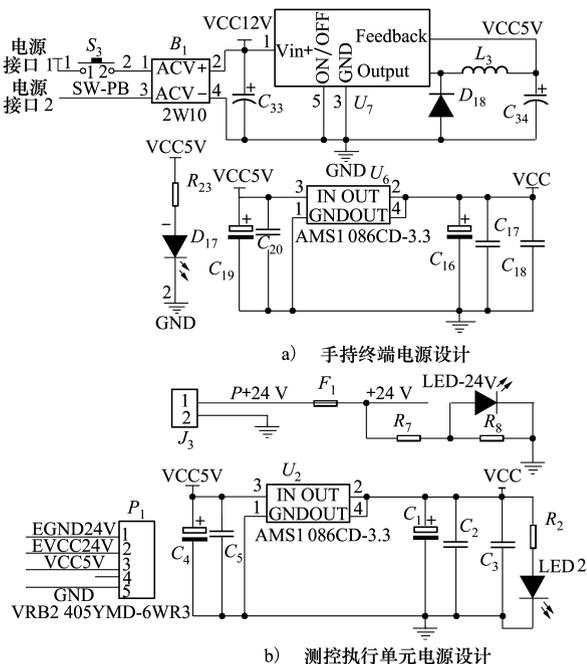


图4 系统电源设计

最小系统外围设计包括处理器的外部时钟系统和复位系统设计,使用8 MHz有源晶振模块作为处理器的外部时钟系统,具有使用方便、稳定性好的特点,为系统精准的时间控制提供保障。复位系统由SP706R看门狗复位器件和PESD5V2S2UT电磁兼容器件组成,具有系统供电稳定性监测、上电复位、防止软件跑飞、防止电磁干扰造成系统意外复位等功能^[15-16]。硬件原理如图5所示。

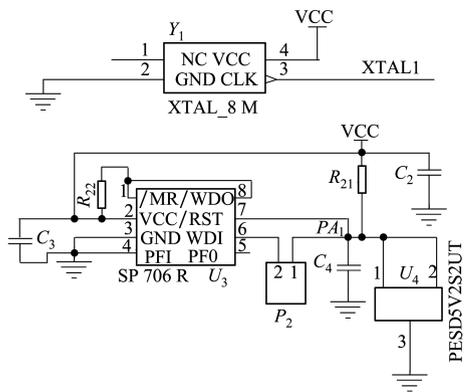


图 5 最小系统外围硬件设计

模拟量调理部分首先将压力、振动传感器输出的小于模拟参考电压的电压信号进行差分放大,使其幅值接近参考电压,然后对其进行抗混叠滤波,将高于 2 倍采样频率的高频干扰滤除。采用差模放大能有效降低系统由点火器和电磁阀开关动作引起的共模干扰,提高系统的可靠性,在放大器输入端设计限幅器件,能有效防止过大的干扰脉冲对放大器件造成的损害^[17-18]。

3.2 系统软件设计

系统软件设计包括手持终端软件设计、测控执行单元主处理器、信号监测处理器、点火控制处理器 4 个部分的软件设计。

3.2.1 手持终端软件设计

手持终端采用模块化软件设计思想,根据其功能,主要模块包括液晶通讯模块、Lora 通讯模块、业务处理模块。液晶通讯模块通过串口和触控屏的实时交互,获取用户参数、控制等数据并提交至业务处理模块进行解析,并将显示数据通过串口发送至触控屏显示;Lora 通讯模块通过串口和测控执行单元交互,根据业务处理模块输出的参数下发、PDE 启动、停止、频率快速调节等业务需求,将相应数据通过串口发送至 Lora 透传模块,并实时监听测控执行单元的执行结果,输出至业务处理模块;业务处理模块根据通讯协议进行用户需求分析、需求响应和响应结果监测,软件流程如图 6 所示。

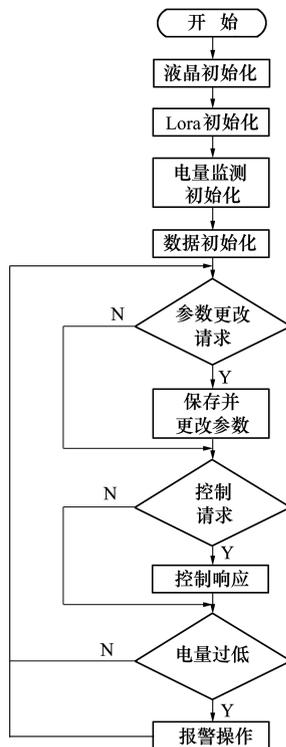


图 6 手持终端软件流程

3.2.2 测控执行单元主处理器软件设计

测控执行单元主处理器是测控执行单元的控制协调中心,根据用户下发的参数,进行点火器控制和爆震管参数监测协调。其软件设计包括 Lora 通讯模块、业务处理模块、控制同步模块、点火控制通讯模块、电量监测模块。Lora 通讯模块接收和 Lora 透传模块交互串口的输入数据,将其输出至业务处理模块,接收业务处理模块提出的通讯请求,进行相应通讯数据发送;业务处理模块根据 Lora 交互串口输入的数据,进行业务分析,参数存储和控制动作,并向 Lora 通讯模块提出通讯请求,告知手持终端命令执行结果;控制同步模块根据业务处理模块发出的 PDE 启动、停止命令,通过 GPIO 向点火控制和信号监测处理器发出控制同步信号,控制 PDE 的启动、停止和各爆震管信号监测的启动和停止;点火控制通讯模块完成测控执行单元主处理器和点火控制处理器之间的参数传递,当业务处理模块解析到用户的参数设置需求后,向点火控制处理器发出参数设置的通讯请求,由点火控制通讯模块进行参数转发;电量监测模块实时监测自身电量并通过 LED 指示,当电量不足时,立即中断 PDE 的工作,并向业务处理模块发出缺电提醒业务,由业务处理模块通过

Lora 通讯模块传输至手持终端,软件流程如图 7 所示。

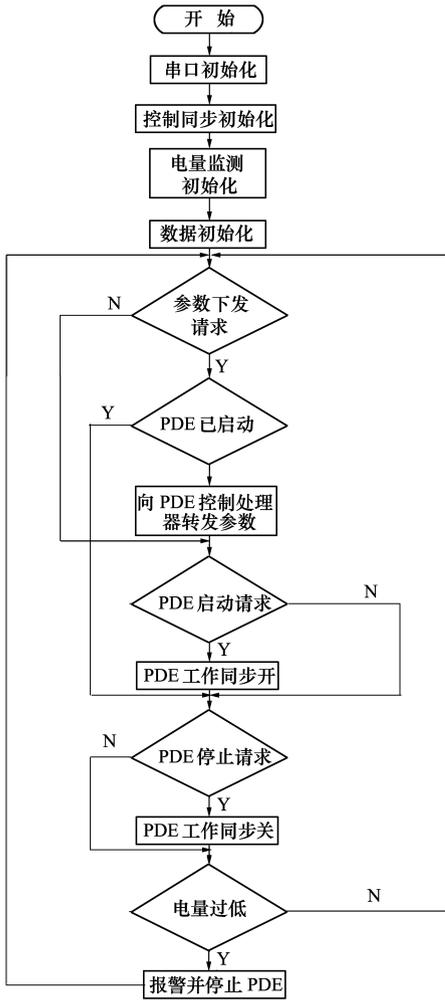


图 7 测控执行单元主处理器软件流程

PDE 点火控制处理器根据 PDE 的启动、停止同步信号,控制各爆震管点火器和电磁阀的状态,其软件核心模块为各通道状态调度模块,调度模块执行在一个定时器中断服务中执行,中断周期为 $5\ \mu\text{s}$,其中,通道使能模块的主要工作是判断工作中本通道是否工作,其软件流程如图 8 所示。

信号监测处理器根据测控执行单元主处理器发出的 PDE 启动、停止同步信号,启动各爆震管压力、振动信号的高速采样,将采样数据存储至 NAND Flash,实时监测 USB 口的输入情况,当用户 U 盘插入时,主动以文件格式将数据导出至用户 U 盘,并通过指示灯提示用户数据已导出,其软件流程如图 9 所示。

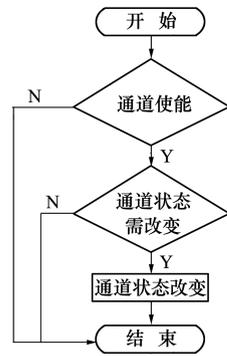


图 8 PDE 点火控制处理器通道状态调度流程

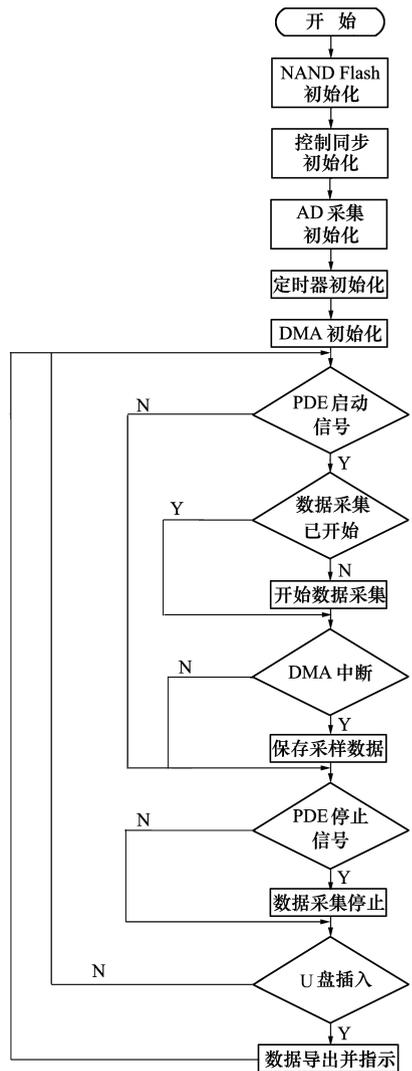


图 9 信号监测处理器软件流程

4 结 论

针对多管点火 PDE 整体移动、远程操作、参数配置、工作中频率快速调节等需求,设计出基于 Lora 无线通讯,由手持终端和本地测控执行装置组成的多管点火 PDE 测控系统,实现对 8 管 PDE 整体点火协调控制、爆震管压力、振动信号高速采样、存储、数据导出等功能。具有体积小、重量轻、便携性强、

集成度高、远程操作、使用方便、结构简单等特点,消除 PDE 工作过程中产生的强噪声对试车人员造成的听觉损伤;基于嵌入式方案本地监测爆震管压力、振动信息,消除连线引起的拖拽力对 PDE 推力测试造成的影响;用户可通过触控屏进行 PDE 点火频率快速调节,便于多管点火 PDE 动态性能研究。经反复试车测试、控制系统工作稳定可靠、实时性高、人机交互友好、实际应用价值高。

参考文献:

- [1] Fickett W, Davis W C. Detonation[M]. California, University of California Press, 1979
- [2] 江日红,武晓松,余陵,等. 脉冲爆震发动机新型点火系统的优化设计[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,2009: 225-229
Jiang Rihong, Wu Xiaosong, Yu Ling, et al. Optimization Design of New Ignition System for Pulse Detonation Engine[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2009: 225-229 (in Chinese)
- [3] 鲍冬梅,郑龙席,严传俊,等. 混合式脉冲爆震发动机原理性试验系统测控单元设计[J]. 计算机测量与控制,2010, 18(1): 113-115
Bao Dongmei, Zheng Longxi, Yan Chuanjun, et al. Design of Monitoring and Control Unit of Principle Test System of Hybrid Pulse Detonation Engine[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(1): 113-115 (in Chinese)
- [4] 戴轶,屈卫东. 脉冲爆震发动机性能模型控制策略分析[J]. 控制系统,2009, 1: 3-5
Dai Yi, Qu Weidong. Control Strategy Analysis for Pulse Detonation Engine Performance Model[J]. Control System, 2009(1): 3-5 (in Chinese)
- [5] Philip Koshy Panicker. The Development and Testing of Pulsed Detonation Engine Ground Demonstrators[D]. Arlintong, The University of Texas, 2008
- [6] Fran K, Lu J, David C, et al. Development of a Large Pulse Detonation Engine Demonstrator[R]. AIAA-2011-5544
- [7] 何立明,严传俊,范玮. 脉冲爆震发动机的推力计算方法[J]. 推进技术,1997,18(5): 22-26
He Liming, Yan Chuanjun, Fan Wei. A Method of Calculating Thrust of Pulsed Detonation Engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(5): 22-26 (in Chinese)
- [8] 张义宁,王家骅,张靖周. 多循环吸气式脉冲爆震发动机推力直接测量[J]. 推进技术,2006, 27(5): 459-462
Zhang Yining, Wang Jiahua, Zhang Jingzhou. Impulse of Cyclic Air-Breathing Pulse Detonation Engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(5): 459-462 (in Chinese)
- [9] Rouser K P, King P I, Schauer F R, et al. Experimental Performance Evaluation of a Turbine Driven by Pulsed Detonations [R]. AIAA-2013-1212
- [10] Rankin B A, Core J P, Hoke J L, et al. Radiation Measurements and Temperature Estimates of Unsteady Exhaust Plumes Exiting from a Turbine Driven by Pulsed Detonation Combustion[R]. AIAA-2013-0886
- [11] 李亚娟. 远距离多通道数据采集控制系统[D]. 太原:中北大学,2009
Li Yajuan. Long-Range Multi-Channel Data Acquisition and Control System[D]. Taiyuan, North University of China, 2009 (in Chinese)
- [12] 胡肖斌. 多通道实时数据采集存储系统的设计与实现[D]. 太原:中北大学,2012
Hu Xiaobin. Design and Realization of Multi-Channel Real-Time Data Acquisition and Storage System[D]. Taiyuan, North University of China, 2012 (in Chinese)
- [13] Wang Zhenyu, Wang Mingshuo, Gu Weiru, et al. A High-Linearity Pipelined ADC with Opamp Split-Sharing in a Combined Front-End of SIH and MDAG[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 2013, 60(11): 2834-2844
- [14] Asorey H, Cazar-Ramírez D, Mayo-García R, et al. Data Accessibility, Reproducibility and Trustworthiness with LAGO Data

Repository[C]//34th International Cosmic Ray Conference, 2015: 1-8

- [15] Akagi H, Dounoto T. A Passive EMI Filter for Preventing High Frequency Leakage Current from Flowing through the Inverter Neat Sink of an Adjustable Speed Motor Drive System[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(5): 1215-1223
- [16] Wu S, Wu D W. Analysis and Design of EMC on Airborne Navigation Equipment[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(Suppl 2): 96-99
- [17] Zhang Y. Electromagnetic Compatibility Technology in Refitting of an Airplane[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(Suppl 2): 218-220
- [18] Chaitanya K, Chava J, Silva M. A Frequency Compensation Scheme for LDO Voltage Regulators[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2004, 51(6): 1041-1050

Design of Monitoring and Control System for Multi - Tube Ignition Pulse Detonation Engine

Zhang Wenlong, Pei Chengming, Li Jianghong, Fan Wei

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A multi-processors monitoring and control system, which use the Lora as wireless communication technology, was designed to meet needs of mobility, safety, fast frequency adjustment, portability, none affect on PDE thrust test and so on. This paper elaborated on scheme of whole system, local high-speed signal acquisition, storage, data export and ignition control method. Experimental results show that the monitoring and control system was able to implement timely and accurately control and data acquisition of detonation tubes, dynamical parameters changing, remote control and eliminate the damage for human beings caused by PDE, with mobile and portable, high integration, convenient operation, reliable performance characteristics.

Keywords: multi-tube ignition pulse detonation engine; fast frequency change; mobile and portable; monitor and control; high-speed data acquisition