

基于 STM32 的航天发动机管路多余物控制系统

曹 纯, 张 伟, 李志刚, 管 理
(北京航天试验技术研究所, 北京, 100074)

摘 要: 航天产品多余物控制是保证和提高航天型号研制质量的一项重要内容。现有的航天产品多余物控制方法和装置普遍存在检测效率低、精度低及价格高等问题。针对上述现象, 设计了一种基于 STM32 微处理器的液体火箭发动机管路的多余物自动检测及清洗系统。系统由超声波管路清洗装置、多余物检测装置、上位机和信号采集装置组成。基于 STM32 微处理器的控制功能, 能够实现对发动机管路多余物的自动清洗和检测, 并能够实现液位信息和清洗结果的实时采集、传输、显示和存储, 并可根据检定结果触发清洗装置进行二次清洗。同时, 系统能在自动清洗和手动清洗之间进行切换。旨在解决液体火箭发动机管路多余物的检测和排除的问题, 并有效地提高多余物检测和控制的效率和可靠性。

关键词: 液体火箭发动机管路; STM32 微处理器; 多余物控制; 超声波清洗

中图分类号: V432-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 06-0086-06

STM32-based control system for foreign object debris in pipelines of liquid rocket engine

CAO Chun, ZHANG Wei, LI Zhigang, GUAN Li

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The control of foreign object debris is an essential part in the design and testing of aerospace products. However, since efficiency and accuracy of current foreign object debris detecting methods are low, a STM32-based system for detecting and cleaning the foreign object debris in pipelines of liquid rocket engine was designed. It is composed of ultrasonic pipe cleaning device, foreign object debris detecting device, signal acquisition device and industrial computer. With the control function of STM32, the system can realize automatic detection and cleaning of the foreign object debris in pipeline of liquid rocket engine, real-time acquisition, transmission, display and storage of liquid level information and cleaning effect. In addition, re-cleaning procedure can be started according to the detection result. The system can be switched between automatic cleaning and manual cleaning, which can effectively improve the cleaning and detecting efficiency and reliability.

Keywords: pipeline of liquid rocket engine; STM32 micro-controller; foreign object debris control; ultrasonic cleaning

收稿日期: 2014-12-05; 修回日期: 2015-01-14

作者简介: 曹纯 (1989—), 女, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机试验测量技术

0 引言

航天发动机是导弹、火箭和航天器等的推进装置, 其可靠性直接决定了航天系统的性能和寿命。多余物是影响发动机性能的主要原因之一。1992 年 3 月 22 日, 我国与澳大利亚合作的第一颗澳星, 由于火箭内存在铝质多余物而点火失败并造成了巨大的航天事故^[1-2]。发动机的生产制造包含诸多工艺环节, 在焊接和组装等加工过程中会引入各种颗粒, 如金属屑, 焊锡渣及点焊飞溅物等微粒, 最终封闭在产品内形成多余物; 发动机在工作中常处于高加速度或剧烈冲击下, 多余物移动过程具有很大随机性, 或悬浮于腔体内,

或掉落在某些接触部位, 可能引起电路短路、管道堵塞及运转部件卡死, 导致飞行试验失败, 造成严重的航天事故^[3]。因此, 多余物的检测和控制是航天发动机设计和试验过程中一项重要内容。

1 航天产品多余物检测技术现状

根据 QJ2850-96《航天产品多余物预防与控制》中对多余物的定义: “多余物”是指产品中存在的由外部进入或内部生产与产品规定状态(包括设计文件、工艺文件和标准文件规定)无关的一切物品^[4]。目前, 对多余物可被分为以下几类, 如表 1 所示。

表 1 发动机多余物分类

Tab. 1 Classification of engine foreign object debris

类型	常见多余物
金属多余物	保险丝头、铅封块、铝封块、金属屑、弹簧垫圈碎块、工具碎块、导线头、焊渣及金属密封件碎块等
非金属多余物	毛发、漆皮、塑料皮、锦丝线头、电缆线头、塑料管、腻子块、环氧树脂块、橡胶皮块、胶木碎块、仿羊皮纸屑、胶布块、绸布、布块、清洗液残留物、油类、油膏石棉布、高温搪瓷碎块及非金属密封件碎块等
多余零部件	平垫片、弹簧垫片、螺钉、螺母、工艺堵盖、工艺件、螺丝刀、镊子钳及其他工具
其他多余物	灰尘、指甲屑、钮扣、硬币、钥匙、昆虫、鞋带、手套、口罩、氧化物、锈蚀、其他化合物、人体汗水、静电、火花及各种有害气体等

目前, 国内外对多余物检测的研究主要集中在密封电子元器件的检测, 检测方法主要有人工检测法、X 光检测法、马特拉方法和微粒碰撞噪声检测法^[5-6]。针对火箭发动机的多余物检测研究刚刚起步, 仍具有很大的发展空间。

针对火箭发动机的多余物检测所采取的最常用的方法为人工检测。包括借助低倍放大镜或工业内窥镜检查, 即在试验前依靠技术人员使用放大镜等观察器件内部是否存在多余物。此外, 人工检测还包括转动听声检查, 用于组件和整机的总检, 通过晃动或滚动听多余物的响声。人工检测受被测试件结构影响极大, 仅具备检测器件表层多余物的能力, 且检出多余物的概率极大程度受人员疲劳程度的影响。此外, 在检测过程中易引入发丝、碎屑等其他多余物, 并且无法在测量

前端器件连接后进行检测。

X 光镜检测法克服了人工检测的部分不足, 使得检测可在器件密封后进行, 该方法主要是对发动机试验管道和腔体内部检查。即采用 X 光照射被测试件, 通过观察 X 光成像以确定试件是否存在多余物。但该方法的检测精度易受试件结构和多余物密度的影响, 分辨率较低且成本较高^[7]。

目前, 常用的航天发动机管路多余物清洗主要依靠酒精和四氯化碳等脂溶性溶剂进行冲洗。在清洗后对管路进行晾干、吹干或用棉丝擦拭。清洗过程无法由单人操作, 需两人及以上配合完成, 且清洗过程耗时较长, 需通过人工进行反复清洗。然而, 在此过程中, 容易引入酒精、棉屑等其他多余物, 影响管路的洁净度。针对测压管路的洁净度要求目前尚无权威性的文件, 根据试

验任务书的要求,通常将 5~15 μm 的颗粒物控制在 1 500 个以下; 15~25 μm 的颗粒物控制在 500 个以下; 25~50 μm 的颗粒物控制在 50 个以下; 尺寸大于 100 μm 的颗粒物控制在 10 个以下。

本文旨在搭建一种发动机管路的多余物检测清洗设备。旨在解决发动机管路传统多余物检测方法效率低、精度差、运行状态不平稳造成机械冲击干扰等问题。对于多余物的检测和排除具有重要意义。

2 系统组成及工作原理

本系统基于 STM32 微处理器的控制功能设计,根据液体火箭发动机管路的结构、尺寸、形状、体积、重量及不允许造成损伤等因素考虑,采用超声波清洗的方式,排除管路内的多余物。

超声波清洗与其他清洗相比具有洗净率高、残留物少,清洗时间短,清洗效果好的优点。凡是能被液体浸到的清洗件,超声波均有清洗作用,如深孔、狭缝、凹槽都能得到清洗,不受清洗件结构和形状的限制。

发动机管路多余物清洗检测系统主要包括超声波清洗装置、颗粒物检测装置和信号采集及调理部分。系统总体结构框图如图 1 所示。

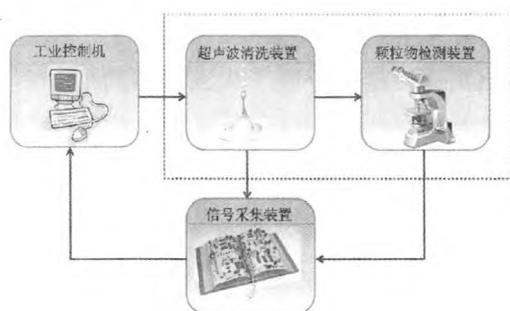


图 1 系统总体结构图

Fig. 1 Overall structure of contaminants control system

超声波管路清洗装置的工作过程如下:将发动机管路放入清洗槽内,清洗槽的内部由聚四氟乙烯包裹,保证管路在清洗过程中不受震荡或冲击。开始清洗时,放液槽通过进液管向清洗槽内放洗涤溶剂,在清洗槽内设置液位计,实时监测

容器内的液体,至液面满足程序设定要求。洗涤溶液足够后则开始清洗,由超声波发生器发出的高频振荡信号,通过电缆联结线传导给换能器,换能器随之产生高频共振,清洗容器中的溶剂受超声波作用对污垢进行洗净。清洗装置示意图如图 2 所示。

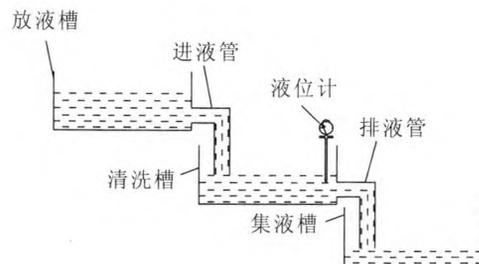


图 2 超声波清洗装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic cleaning device

清洗管路后的洗涤溶剂静置后,部分洗涤溶剂通过排液软管流入颗粒物检测设备,实现在线检测。通过检验洗涤溶剂样本的颗粒大小和数量,实现对发动机管路多余物含量的鉴定。若清洗结果未达到规定的颗粒物含量等级,且本次清洗结果与上次清洗结果的差异超过规定颗粒物含量的 5%,则自动对发动机管路进行 2 次清洗,至检定的颗粒物含量达到规定标准为止。若颗粒物计数仪连续 3 次检测结果相同,且均超出规定的颗粒物含量,则认为清洗溶剂已饱和。此时,将清洗槽内现有的液体排出,放液槽重新放液,并重复上述清洗步骤。

3 信号采集装置设计

信号采集方式采用自动控制和手动控制 2 种控制模式,自动控制可以实现多余物的自动检测和清洗,手动控制便于工人安装和拆卸传感器。信号采集装置包括数据采集模块、通讯模块和继电器模块,组成如图 3 所示。

自动控制方式的主控芯片微控制着来自液位计和颗粒物计数器的数据信息的采集、转换与传输,以及超声波清洗装置的启动。本文选用 STM32107VCT6 芯片。该微处理器简洁轻便,可以直接通过线路与外接模块相连接,同时也便于

与机械装置集成。

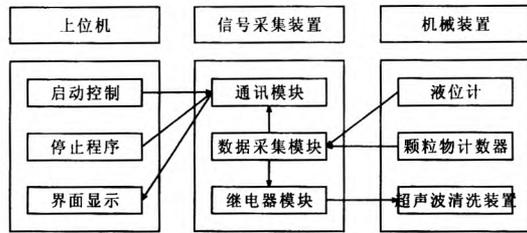


图 3 信号采集装置结构图

Fig. 3 Block diagram of signal acquisition device

STM32 芯片需要 12 V 的工作电压, 晶振频率为 8 MHz, 工作时钟频率达到 72 MHz。STM32 芯片电路的设计目的是以低电压实现高性能, 有效延长电池供电设备的充电间隔^[8]。片上模拟功能的最低工作电源电压为 1.8 V。数字功能的最低工作电源电压为 1.65 V, 在电池电压降低时, 可以延长电池供电设备的工作时间。以 STM32 微处理器为核心的最小系统包括: 电源模块、时钟模块、复位模块、LED 指示灯、JTAG 接口及 I/O 接口。本系统中涉及的数据采集模块、继电器模块和通讯模块均以此最小系统为基础建立。图 4 为 STM32 微处理器的最小系统设计框图。

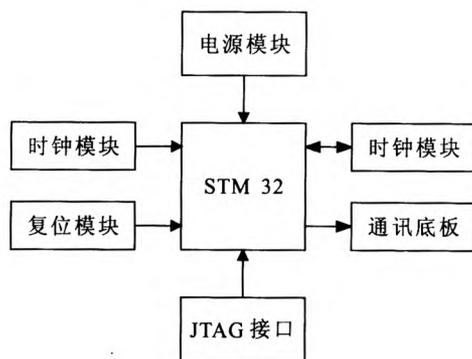


图 4 STM32VC107 的最小系统

Fig. 4 Minimum system based on STM32VC107

当通讯模块接收到上位机发送的启动命令时开始工作。信号采集模块前端与液位计相连, 实时采集的超声波清洗装置中液位信息和颗粒物检测装置中的多余物含量信息; 主控芯片通过继电器模块控制超声波清洗装置的启动和停止以及放

液和排液的过程; 由通讯模块将各装置的信息发送到上位机, 进行实时显示。

手动控制方式设计了超声波清洗装置和颗粒物检测装置的开关按钮, 通过手动方式实现多余物的检测和清洗功能, 同时可以手动接入其他种类和数量的传感器进行信号采集。双重控制的方式保证了清洗和检测过程的灵活性。

3.1 数据采集模块

数据采集模块具有双通道数据同步实时采集的特点。通信模块接收到上位机的启动命令后, 微处理器采集液位信息, 并通过 A/D 转换将其转化为数字量, 清洗过程结束后采集颗粒物数量信息, 由通讯模块向上位机传输。上位机采集及监控界面如图 5 所示。数据采集模块主要包括: 数据读取、解算、显示和数据存储。其中数据解算是上位机的核心部分, 通过对数据的转换, 读取各次清洗的颗粒物数量和尺寸信息和液位信息, 并输入到后续的清洗和检测步骤中。

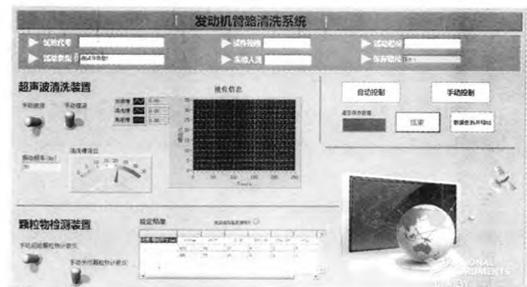


图 5 上位机采集界面

Fig. 5 Signal acquisition interface

3.2 继电器模块

继电器模块是连接控制部分和机械装置的纽带, STM32107 微处理器通过继电器模块向超声波清洗装置提供控制信号, 从而启动管路清洗过程。继电器模块选用欧姆龙系列的 G2R-1 继电器, 最大功率为 450 W。微处理器通过弱电控制强电, 即通过三极管驱动继电器 (图 6)。当输入为高电平时, 三极管饱和, 继电器线圈有电流流过, 则继电器吸合, 触发超声波清洗系统启动。续流二极管用于释放三极管开关关断时线圈产生的反电动势。

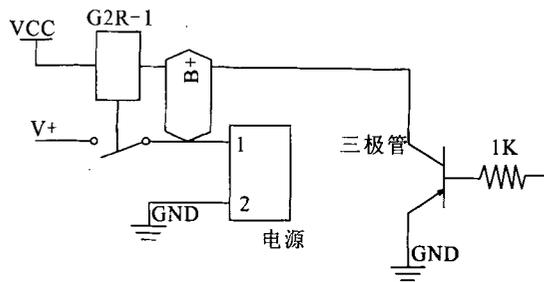


图6 三极管驱动继电器电路图

Fig. 6 Circuit diagram of transistor driving relay

3.3 通讯模块

无线通信模块的任务是将数据从数据采集模块传送到上位机处理系统。即收集来自微处理器处理的数据，通过无线通讯将数据传送到工控机进行下一步操作。本系统通过 STM32VC107 微处理器驱动 ZigBee 无线通讯模块进行数据收发。通过在 STM32 电路板上加工 ZigBee 通讯板插槽，支持基于 ZigBee 的无线通讯。整个 ZigBee 协议规定的技术是一种短距离、低功耗的无线通信技

术。在本项目中，CC2530 ZigBee 模块配合 STM32 芯片驱动引脚使用，大大节省了空间，且减少了连接线路^[9]。在清洗过程中，CC2530 通过 USB 和 RS232 串口，把采集到的数据直接传到上位机。

本系统降低了多余物检测及控制的复杂性，能够实现液体火箭发动机管路多余物的自动检测及排除。因此，可进行进一步的安装调试，调整适合的洗涤溶剂量、超声波振荡频率、清洗次数和颗粒物数量值，有效地控制管路中多余物的含量。

4 实验结果分析

通过对人工清洗的管路进行检定，能够得到洗涤溶液中的多余物含量。目前，根据 NAS 航空管路洁净度标准^[10-11]，以及颗粒物计数器检定的每 100 ml 多余物的尺寸和数量信息，人工清洗水平可达到下表所示的标准。

表2 人工清洗水平

Tab. 2 Manual cleaning levels

清洗次数	清洗水平	5~15 μm	15~25 μm	25~50 μm	50~100 μm	$\geq 100 \mu\text{m}$
1	5级	8 000	1 425	253	45	8
2	4级	4 000	712	126	22	4
3	3级	2 000	356	63	11	2
4	2级	1 000	178	32	6	1
5	2级	1 000	178	32	6	1

通过表 2 可以看出，由于人工清洗操作的限制，清洗 4 次后随着清洗次数的增加，多余物的颗粒度将不再有明显变化，最高清洗洁净度可达 2 级，且 5 次人工清洗所需时间为 3~4 h。根据自动控制的基本实现方法，结合 STM32 微处理器的自身性能，能够得到相应的超声波清洗洁净度和颗粒物检定信息。本系统在对管路清洗 2 小时后，其清洗水平可达到如下标准 (表

3 所示)。

在多余物清洗过程中，无法 100% 地将多余物排除。从表 3 可以看出，经本系统清洗后，管路的多余物主要分布在 5~15 μm 的范围内，目前尚无法达到更高水平的精细洗要求，而 100 μm 以上的多余物基本可以通过超声波清洗全部排出。但相比于人工清洗，超声波清洗能够有效提高发动机管路的精细洗水平。

表 3 系统清洗水平

Tab. 3 Cleaning levels of STM32-based ultrasonic cleaning system

清洗时间/h	清洗水平	5~15 μm	15~25 μm	25~50 μm	50~100 μm	$\geq 100 \mu\text{m}$
1	1 级	500	89	16	3	1
1.5	0 级	250	44	8	2	0
2	0 级	250	44	8	2	0

5 结束语

在液体火箭发动机管路的加工、使用、管理和维护过程中, 采用各种有效可行的手段监测并排除多余物, 以保证使用性能。本项目基于 STM32 微处理器搭建多余物控制系统, 使用超声波清洗装置、颗粒物计数仪以及基于工控机和微处理器的控制装置。利用 STM32 微处理器的控制功能, 通过自动和手动方式, 实现对发动机管路多余物的检测和排除, 有效地提高了多余物检测和控制的效率和可靠性。对于其他航天组件在使用和管理过程中控制多余物方面, 也具有一定的参考意义。航天发动机的多余物检测和控制是一个长期的研究课题, 还需要在今后的工作中不断总结积累。

参考文献:

- [1] 袁牧. 多余物的过程控制[J]. 质量与可靠性, 2013, 16(7): 37-38.
- [2] KANG P J, TAE K J, CHUL S M. High performance single chip implementation for a digital protective relay using FPGA [C]// Proceedings of the International Conference on VLSI. [S.l.]: [s.n.], 2004, 6: 504-508.
- [3] 王育红, 郑世才. 活动多余物的检测[J]. 宇航计测技术, 1996, 16(3): 55-58.
- [4] QJ2865-1996 航天产品多余物预防和控制[S].
- [5] 王淑娟, 张辉, 王世成. 航天继电器检测技术探讨[J]. 低压电器, 2004 (1): 6-9.
- [6] PRAINE R R, ZIMMER W J. Statistical modeling for particle impact noise detection testing[C]// Proceedings of Annual Reliability and Maintainability symposium, 1991, 8: 536-540.
- [7] 张辉, 王淑娟, 王立忠, 等. 航天继电器多余物检测方法的综合分析与讨论[J]. 机电元件, 2003, 23(2): 53-60.
- [8] Anon. STM32 32-bit ARM cortex MCUs [EB/OL]. (2013-02-20) [2013-11-18]. <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169>.
- [9] POLASTRE J, SZEWCZYK R, MAINWARING A, et al. Analysis of wireless sensor networks for habitat monitoring[J]. Wireless Sensor Networks, 2004 (3): 399-423.
- [10] 丁瑞荣. 产品多余物控制[J]. 航空精密制造技术, 1993 (2): 43-44.
- [11] 郑世才. 航天产品活动多余物的检测[J]. 上海航天, 1997 (5): 56-60.
- [12] 单黎波, 王建昌, 内窥镜检测方法技术研究 [J]. 火箭推进, 2006, 32(4): 54-62.
SHAN Libo, WANG Jianchang, Study on endoscope check method[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32 (4): 54-62.
- [13] 窦双庆, 变推力发动机高模试验真空压力测量技术研究[J]. 火箭推进, 2013, 38(3): 99-104.
DOU Shuang-qing, Research on measurement technology of vacuum pressure in altitude simulation test of rocket engine with variable thrust, Journal of Rocket Propulsion, 2013, 38(3): 99-104.

(编辑: 马 杰)