

航空发动机单管燃烧室试验器测控系统设计

张 毫,王日先,熊进星

(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为满足新型燃烧试验需求,针对航空发动机燃烧室试验中单管试验器的特点,提出并设计了1种基于以太网的分布式测控系统。详细阐述了该系统的总体设计方案,分别从软件和硬件两方面研究分析了该系统的详细设计过程,并对其进行了测量不确定度分析。目前该系统已经完成试验前调试,并已顺利完成了多项单管燃烧室燃烧试验任务。结果表明:该系统可靠性高、稳定性良好、通用性强,满足试验器测控需求,具有较高的工程应用价值。

关键词: 单管燃烧室;分布式测控系统;燃烧试验;航空发动机

中图分类号: V211.72

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.03.015

Design of Instrumentation System of Aeroengine Can Combustor Test

ZHANG Hao, WANG Ri-xian, XIONG Jin-xing

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to meet the requirements of new combustion tests, a distributed measurement and control system which based on Ethernet technology was proposed and designed for the characteristic of can combustor tester in the test of aeroengine combustion chambers. The overall design scheme of the system are described in detail. The detailed design process of the system was researched and analyzed in hardware and software aspects, then the measurement uncertainty was analyzed. At present, the system has been Debugged and verified by tests before experiment, and has successfully completed multiple can combustor tasks. The result shows that the system has high reliability, stability, and strong versatility, and can satisfy the test and control requirements.

Key words: can combustor; distributed measurement and control system; combustion test; aeroengine

0 引言

航空发动机单管燃烧室试验是对燃烧室结构、性能、火焰燃烧、流场分布等进行系统研究的手段,试验成果对燃烧室的研发、定型产品的派生研制和改造等具有较高的参考价值^[1-2]。该试验器承担的试验项目种类较多,试验任务重、难度高、测试需求弹性大。同时在试验过程中还具有工作环境恶劣、危险性较高、状态调节复杂、试验持续时间长等特点。

针对单管试验器的试验需求及特点,采用传统集中测控方式搭建的测控系统虽然具有可靠性高、维护方便等特点,但其通道成本较高、灵活性有限,不符合单管燃烧室试验器试验任务开展的需求。随着各类结

构紧凑、可靠性更高、可直接应用于试验现场的分布式测控产品不断问世及成功应用^[3],给试验器测控系统设计提供更多选择。

为满足新型燃烧试验需求,本文提出1种基于LXI总线的以太网分布式测控系统设计方案,遵循标准化、模块化、通用化的设计原则,搭建测控系统,可以有效控制研制、使用和维护成本,使测控系统具有系统配置灵活、功能可拓展性和兼容能力强、开发周期短等特点^[4-10]。

1 试验器测试需求

试验器测试参数数量大、类型多,包括电压、频率、压力和温度等,通道总数不少于350个,单通道采

收稿日期:2017-11-12 基金项目:国防重点科研项目资助

作者简介:张毫(1987),男,硕士,工程师,从事航空发动机试验测试工作;E-mail:zhanghao870325@163.com。

引用格式:张毫,王日先,熊进星.航空发动机单管燃烧室试验器测控系统设计[J].航空发动机,2018,44(3):86-90. Zhang Hao, WANG Rixian, XIONG Jinxing. Design of instrumentation system of aeroengine can combustor test [J]. Aeroengine, 2018, 44(3): 86-90.

样率不低于 100 Hz, 同时为了确保得到可靠精确的数据, 用于后续分析和处理, 要求具有较高的测试系统参数技术设计指标, 见表 1。

表 1 主要测量参数技术指标要求

测点参数	测量范围	精度要求	测量不确定度
温度 / °C	0~1800	≤0.5%	0.25%
压力 / MPa	0~6	≤0.5%	0.25%
燃油流量 / (g/s)	0~100	≤0.5%	0.25%
空气流量 / (kg/s)	0~26	≤1%	0.5%

不同类型的试验任务要求测控系统能够覆盖各种试验, 保证测试系统具有高稳定性和可靠性。测控软件要满足各型试验任务需求, 具有通用性好、功能完备、操作简便, 实时记录和保存测试数据, 并按需求生成试验报表等。

2 测控系统总体方案

测控系统是单管燃烧室试验器重要组成系统。该系统按实现功能由数据服务器、测试系统、空气控制系统、燃油控制系统、冷却水控制系统和加温系统等子系统组成。测试系统主要对燃烧室试验件性能参数和试验器状态参数进行测量, 能够对试验过程中关键参数进行监控和报警, 对试验数据实时采集、分析、处理并生成试验报告; 空气、燃油和冷却水控制系统用来对空气系统、燃油系统、冷却水系统和加温系统进行匹配调节, 保证试验器在给定工作状态下完成试验任务内容; 数据服务器负责协调和管理各系统之间的数据流, 保障各系统之间信息共享, 数据同步。各子系统由以太网连接, 组建试验器局域网络。试验器测控系统按照试验设备特性分布式放置, 测试设备与计算机之间通过 TCP/IP 网络协议进行通信, 控制设备与控制计算机通过 OPC 协议进行通信。测控系统总体方案如图 1 所示。

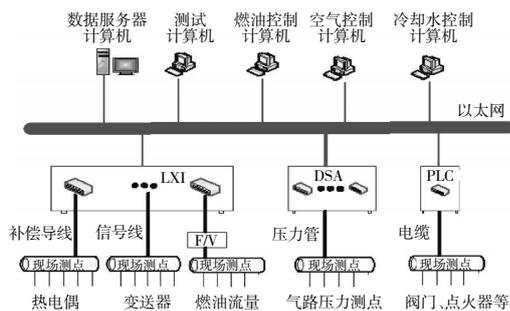


图 1 测控系统总体方案

2.1 测控系统硬件架构

测控设备选用基于以太网接口的数据采集和控制设备, 以利于构建统一数据接口的测控系统平台, 为满足测量精度的要求, 测试仪器不确定度需小于标准需求的 1/3 ~ 1/5, 该系统选用仪器精度均小于 0.05%, 可以满足需求。测控设备安装在测控机柜内, 测控机柜要符合现场高温、震动、灰尘等恶劣工况环境要求。测控机柜分布式放置在集中测点部位旁边, 有效减少测试线缆长度, 减小信号传输过程中引起的误差, 同时提高系统的响应速度和测量精度。

2.1.1 测试系统硬件设计

测试系统采集参数按采集信号类型分为压力、温度、流量、电压等; 按测点数量、位置类型需求以及测控性能指标要求综合考量, 选取适合的测控仪器。VTI 公司 EX1000A-TC 测试仪器作为当前市场上最高级的热电偶和电压测量解决方案, 具备上述考量指标。该仪器具有 48 通道对电压信号 / 热电偶信号进行高精度测量能力, 仪器本身还带有端对端自校准、内置冷端补偿和开路监测功能, 可用于恶劣的试验环境, 使用局域网连接方式, 方便快捷搭建网络化测试平台。电偶信号、变送器信号和流量信号通过 EX1000A-TC 进行采集, 并通过 IEEE1588 协议进行时间精准同步^[11-13]。其中流量信号需利用 F/V 转换装置将频率信号转换成电压信号, 再进行测量; 另外, 空气压力信号采用美国扫描阀公司的 DSA3217 进行采集, 具有 16 个压力输入通道, 零点校验采用内置的电磁阀配置, 每秒每通道采样为 500 次, 每通道 16 Bit A/D 转换。系统具有集成度高、体积小、通道扫描和计算速度快、采集精度稳定、安装简单方便等特点。并且具有以太网接口, 能直接将压力信号转换成工程化数据。测试设备通过交换机与测试计算机进行连接。通过以太网协议进行数据通信, 完成试验数据测量。

2.1.2 控制系统硬件设计

控制系统依照各自子系统技术功能要求进行开发设计, 必须具有良好的兼容性, 能在不同试验任务中重复使用。采用 OMRON PLC 作为控制单元, 控制电气设备及监控试验设备工作状态。控制计算机通过以太网对 PLC 发出控制指令, PLC 完成对控制器件 (阀门、点火器等) 的信号输入, 实现控制功能, 控制系统原理如图 2 所示。阀门位置反馈和极限位置信号由 PLC 采集并反馈给上位机监控软件进行显示。PLC 用

存储逻辑代替接线逻辑,大大减少了控制设备外部接线,使控制系统设计、建造和维护的周期大为缩减。更重要的是针对特殊电气系统功能要求只需要修改软件程序即可适应不同任务的需求。同时为了保证试验过程中突发情况下设备安全,在操作台上设计了应急按钮,可快速切断燃油供应。

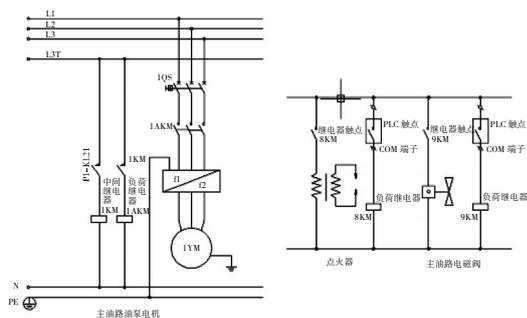


图 2 控制原理

2.2 测控系统软件架构

测控系统软件由测试软件、控制软件和数据服务器软件 3 部分组成。测试软件采用 VC6.0 开发,模块化设计;控制软件又分上位机控制软件和嵌入 PLC 软件,其上位机控制软件采用组态王 6.55 软件开发,按各岗位功能分别设计;嵌入 PLC 软件采用 CX-ONE 软件开发,并植入到 PLC 内部。数据服务器软件作为测试系统和控制系统数据交互媒介,完成数据存储、数据管理和数据发放。测试软件和控制软件数据交互采用通信方式为 OPC 协议^[14-15]。

2.2.1 测试软件设计

根据测控领域内成熟的软件架构并结合单管燃烧室试验器特点,测试软件采用层次结构设计,遵循面向接口的设计理念,软件形成各层次结构间低耦合、高内聚的组织关系。方便软件维护和扩展,最大程度增加软件通用性。测试软件架构分为 4 层。

(1)界面层:提供人机交互接口,完成对测试系统的管理和调度。

(2)数据处理和功能实现层:向界面层提供访问接口,将处理结果返回界面层,完成与数据库的交互。

(3)数据访问层:为业务层提供数据服务,业务层通过本次与数据服务器进行交互。数据库基于 Access2003 开发。用于试验任务数据、结果数据、过程数据管理。

(4)仪器驱动层:是应用程序实现仪器控制的途径。其中 LXI 测试仪器驱动程序封装成 DLL 动态链

接库格式,程序直接调用即可。DSA3217 驱动程序按产品说明书提供的通信指令自行开发。

软件开发时还采用了多线程设计,数据流模式采集、多仪器时间同步等多项技术,确保软件整体最佳性能。测试软件具有数据采集、数据处理、实时显示以及生成试验报表等功能,能够满足试验器开展不同试验任务需求。软件流程如图 3 所示,软件主界面如图 4 所示。

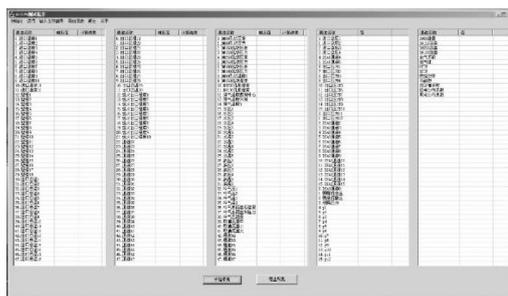


图 3 软件流程

2.2.2 控制软件设计

控制上位机软件采用组态王 6.55 版本开发,主要基于虚拟仪器技术开发,构建虚拟仪表、按钮开关、指示灯、阀门开度等控制组件。操作显示软件主要包括操作岗位监控,调节参数实时显示、状态报警、阀门等电气操作以及数据发布等功能。控制上位机软件与 PLC 之间通过 OPC 协议进行数据通信。控制上位机软件通过数据服务器与测试软件进行实时数据共享,方便操作人员监控状态参数。各子系统控制软件单独开发,控制软件界面为相应系统管路示意图。嵌入 PLC 软件采用 CX-ONE 软件用梯形图进行编程,实现对电气设备的自动控制。控制系统软件界面直观友好,方便操作人员进行状态调节,实时监控相应岗位状态参数,有效保证试验安全有序进行。以空气控制系统为例,界面如图 5 所示。

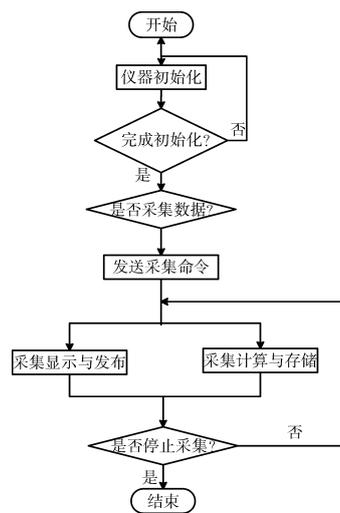


图 4 测试系统软件主界面

3 性能验证与调试

该测控系统建成后,进行了充分的调试验证工

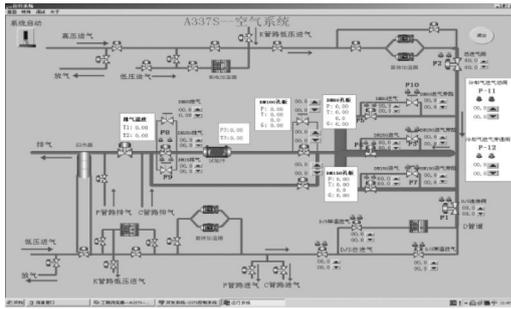


图5 空气控制系统软件主界面

作。首先进行单元调试,采用标准信号源对测试系统输入信号通道进行标定验证,并利用测量不确定度方法对标定数据进行不确定度分析。计算方法如下:

计算 \bar{X}

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (1)$$

式中: \bar{X} 为 N 次测量的平均值; N 为测量次数; X_i 为第 i 次测量的结果。

计算 A 类标准不确定度

$$S(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N(N-1)}} \quad (2)$$

计算 B 类标准不确定度

$$U_B = A / \sqrt{3} \quad (3)$$

式中: A 为仪器误差限。

计算合成不确定度

$$U_c(X) = \sqrt{S^2(\bar{X}) + U_B^2} \quad (4)$$

计算扩展不确定度

$$U = k U_c \quad (5)$$

一般取置信概率 $P=95\%$ 时, $k=2$ 。

计算相对扩展不确定度

$$U_r = \frac{U}{\bar{X}} \quad (6)$$

各主要测量参数测量不确定度指标见表 2,表明测试系统测量参数满足指标要求。

其次在现场试验管道未通气情况下,进行各电气控制回路调试,确保开关动作符合控制要求;单元调试无误后,对测控系统以及试验器设备进行联合热态调试,保证各

表 2 主要测量参数较验结果

测点参数	测量不确定度
温度	0.17%
压力	0.07%
燃油流量	0.16%
空气流量	0.4%

设备之间运行正常,相互间无干扰。

最后,开展某型单管燃烧室性能试验,结果表明:测控系统各项性能指标满足试验器测试需求,运行安全、稳定、可靠。

4 结束语

单管燃烧室试验器测控系统建成以后,已经过 1 年多的试验考核并完成多项试验任务。运行结果表明,该测控系统具有建设周期短,运行稳定可靠,使用维护方便,扩展能力强等特点。测试系统满足试验器开展各类科研试验任务的测试要求。

参考文献:

- [1] 曾文,陈潇潇,马洪安,等.单管火焰筒内燃烧过程的反应动力学数值模拟[J].推进技术,2012,33(6):914-922.
ZENG Wen, CHEN Xiaoxiao, MA Hongan, et al. Kinetic simulation of combustion process in individual flame tube [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(6): 914-922. (in Chinese)
- [2] 杨文,张冬梅,曹文杰,等.煤基喷气燃料在地面单管燃烧室内燃烧和排放特性研究[J].航空动力学报,2016,31(8):1874-1882.
YANG Wen, ZHANG Dongmei, CAO Wenjie, et al. Studies on combustion and emission characteristics of coal-based jet fuel in ground individual can combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(8): 1874-1882. (in Chinese)
- [3] 曲兴华,丁金明,韩双来,等.一种基于串行通讯和数显尺的分布式测量系统[J].天津大学学报,2004, 8(8):745-749.
QU Xinghua, DING Jinming, HAN Shuanglai, et al. A kind of distributed measuring system based on serial port communication and electronic micrometer [J]. Journal of Tianjin University, 2004, 8(8): 745-749. (in Chinese)
- [4] 张守鹏,崔强,彭钢锋.基于 VXI 总线的自动测试系统设计[J].航空计算技术,2010(4):125-126.
ZHANG Shoupeng, CUI Qiang, PENG Gangfeng. Design of automatic test system based on VXI bus [J]. Aeronautical Computing Technique, 2010(4): 125-126. (in Chinese)
- [5] 范宇.空空导弹测试系统应用 LXI 总线研究[J].计算机测试与控制, 2015, 23(6):1856-1858.
FAN Yu. Application of LXI bus in air-to-air missile test system research [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(6): 1856-1858. (in Chinese)
- [6] 王珺,叶卫东. LXI 数据采集器软件测试方法 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(4):139-144.
WANG Jun, YE Weidong. Software testing methods of data collector based on LXI [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(4): 139-144. (in Chinese)
- [7] 陈峰,李自荣.基于 LXI 总线的自动测试系统方案设计[J].现代电子

- 技术,2012,35(12):63-65.
- CHEN Feng,LI Zirong. Design of automatic testing system based on LXI bus [J].Modern Electronics Technique,2012,35 (12):63-65. (in Chinese)
- [8] 陈兴敏,康国钦.LXI的精准时间同步触发方式分析 [J].理论与研究,2008,4(12):12-14.
- CHEN Xingmin,KANG Guoqin.The analysis of the precision timing synchronization triggering of LXI[J].Theory and Research,2008,4(12):12-14. (in Chinese)
- [9] 杨庆华,袁海文.基于 LXI 总线的高速数据采集系统的研制[J].信息化技术与控制,2011,21(3):17-19.
- YANG Qinghua,YUAN Haiwen. The development of high speed data acquisition system based on LXI bus [J]. Information Technique & Control ,2011,21(3):17-19. (in Chinese)
- [10] 支超有,唐长红.基于 LXI 的合成仪器测试系统 [J].测控技术,2007,26(4):24-25,31.
- ZHI Chaoyou,TANG Changhong.Testing system with synthetic instrument based on LXI [J]. Measurement & Control Technology,2007,26(4):24-25,31. (in Chinese)
- [11] 于鹏飞,喻强,邓辉,等.IEEE1588 精确时间同步协议的应用方案 [J].电力系统自动化,2009,33(12):99-103.
- YU Pengfei,YU Qiang,DENG Hui,et al. The research of precision time protocol IEEE1588 [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(12):99-103. (in Chinese)
- [12] 崔全胜,魏勇,何永吉,等.PTP1588 协议的分析[J].电力系统保护与控制,2011,39(10):148-154.
- CUI Quansheng,WEI Yong,HE Yongji,et al.Analysis of PTP 1588 protocol [J]. Power System Protection and Control. 2011,39(10):148-154.
- [13] 黄治,陈伟,王向群.IEEE1588 在工业以太网交换机中的关键应用 [J].现代电子技术,2012,35(23):90-93.
- HUANG Zhi,CHEN Wei,WANG Xiangqun.Application of IEEE1588 protocol on industrial Ethernet switch [J].Modern Electronics Technique,2012,35(23):90-93.(in Chinese)
- [14] 张勇,吴爱国,张洁.基于组态软件和 PLC 的润滑油生产控制系统 [J].仪表技术与传感器,2015(9):70-72.
- ZHANG Yong,WU Aiguo,ZHANG Jie. Design of control system of lubricating oil production based on configuration software and PLC[J]. Instrument Technique and Sensor,2015(9):70-72.(in Chinese)
- [15] 徐庆坤,王军伟,毛建伟.基于 NI OPC Servers 实现 PC 与 PLC 实时通讯[J].工业控制计算机,2013,26(7):51-52.
- XU Qingkun,WANG Junwei,MAO Jianwei. Implementation of NI OPC-based real-time communication between PC and PLC[J].Industrial Control Computer,2013,26(7):51-52. (in Chinese)

(编辑:张宝玲)