

分布式测控系统在发动机试验中的应用

祝 敏, 张 辉, 雷 震

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍一种基于网络的分布式测控系统设计方案, 并以 NI-cRIO 产品为载体, 详细描述了系统的体系结构、硬件和软件架构, 具体给出了系统的设计目标和硬件选型。系统在发动机试验中的成功应用, 验证了该方案的可行性。

关键词: 分布式测控系统; NI-cRIO; 网络

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 05-0098-05

Application of distributed measurement and control system in liquid rocket engine test

ZHU Min, ZHANG Hui, LEI Zhen

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The design plan of distributed measurement and control system based on the network is proposed in this paper. The architecture of the system and the configuration of the hardware and software are described in detail by taking NI-cRIO product as an example. The system design object and the hardware selection are put forward in the paper. This system was used successfully in a rocket engine test and the feasibility of the design plan was verified by the test.

Keywords: distributed measurement and control system; NI-cRIO; network

0 引言

目前, 液体火箭发动机试验大多采用“活动电缆-转接柜-主干缆-集线柜-测控设备”的集中测控方式, 具有可靠性高、分段检查和维护方便等特点。但该测控方式通道成本较高、转接环节较多、灵活性有限, 不能适应日益增加的试验任务需要。随着测控技术发展, 各类体积小、可靠性高、可直接应用于试验现场的分布式测控产品

不断问世^[1]。本文以美国国家仪器(NI)公司的 Compact RIO 系列产品为载体, 提出一种基于网络的分布式测控系统设计方案, 可方便地实现试验系统的参数测量和对象控制。

1 系统原理

1.1 系统总体架构

分布式测控系统总体架构如图 1 所示, 系统由操作员站、集中控制站和网络交换机组成^[2]。

收稿日期: 2012-11-20; 修回日期: 2013-02-12

作者简介: 祝敏 (1985—), 女, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

操作员站分布在试车前间、煤油容器间、气瓶场等场所, 主要进行现场对象控制和传感器信号采集。集中控制站位于测控间, 主要完成操作员站的系统设置 (采集速率、通道名称配置等)、通道校验、参数显示和数据处理等操作。集中控制站和操作员站之间通过以太网实现数据通信。

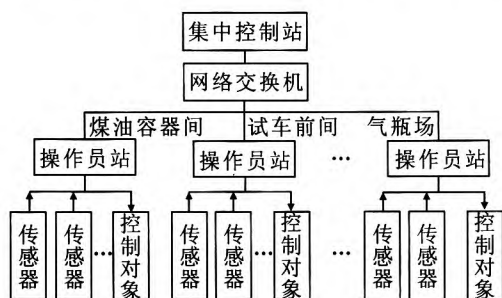


图 1 系统总体框图

Fig. 1 Block diagram of distributed system

1.2 硬件系统简介

目前市场上分布式测控产品品牌和系列较多, 如 IMC 公司的 CANSAS 系列、ABB 公司的 Compact Products 800 和 NI 公司的 Compact RIO 系列产品等。NI 公司的 Compact RIO 产品体积小、坚固可靠、工作温度范围广且能耗低^[3], 特别适合振动、噪声恶劣的液体火箭发动机试车环境下使用, 并且在军用远程监测、民用嵌入式测控等领域中均有成功应用案例^[4-6], 下面以 NI 公司的 Compact RIO 系列产品为例, 详细介绍分布式测控系统软硬件设计。

1.2.1 操作员站

操作员站采用三层嵌入式架构, 由实时控制器、机箱和 I/O 模块组成 (如图 2 所示)。

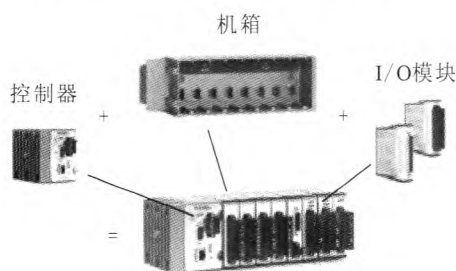


图 2 操作员站硬件组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hardware composition in operator station

1) 实时控制器 (Real time Controller, RT)

实时控制器位于操作员站的顶层, 用于接收集中控制站指令, 完成采集速率设定、通道配置和采集启停控制等, 以及接收机箱的数据, 完成数据运算、数据存储、数据上传和嵌入式界面网络发布。

新型实时控制器功能强大, 安装 WindowsXP 或 VxWorks 实时操作系统, 采用 1.33 G 酷睿 II 处理器, 拥有 100M/1000M 以太网口、RS232 串口、双冗余电源接口和高速 USB 存储器扩展端口。

2) 机箱

机箱位于操作员站的中间层, 主要实现 I/O 模块访问及测控实现、简单数据运算及向实时控制器上传数据, 是嵌入式架构的核心。机箱内置的 FPGA 芯片、逻辑门电路及嵌入式 RAM 块以星型拓扑方式和 I/O 模块连接, 通过定时、触发、输入/输出和同步等操作, 实现对 I/O 模块的精确控制和数据采集。机箱和实时控制器之间通过 PCI 总线连接, 完成数据高速传输; 与级联机箱之间通过菊花链方式级联, 完成系统扩展, 机箱与级联机箱之间通过 Ethernet 和 EtherCAT 标准局域网通信协议实现网络通信。

3) I/O 模块

I/O 模块位于操作员站底层, 内置信号调理电路和驱动电源, 可直接与传感器连接。目前发动机试车使用的 I/O 类型包括热电偶 (K, E, T 型)、100 Ω RTD 铂电阻、120 Ω 1/4 桥应变、1/4 桥压力测量, 27 \pm 3V 电磁阀控制, 5V TTL 阶段信号 DIO 触发等, 经常使用的激励源为 0.5 mA, 1 mA, 1.5 mA 恒流源, 8~12 V 恒压源等。

1.2.2 集中控制站

集中控制站采用普通工控计算机, 通过 Ethernet 标准局域网通信协议, 实现与实时控制器的网络通信。

1.3 软件架构及工作流程

1.3.1 软件结构

系统软件设计基于 LabVIEW 开发环境, 包括 PC 程序、RT 程序和 FPGA 程序三部分。PC 程序在集中控制站计算机上执行, 完成试验信息

配置、测量参数实时显示、系统校验和数据处理等功能。RT 程序在实时控制器上执行，完成数据本地存储和网络通讯。FPGA 程序在可重新配置机箱上执行，通过操控 I/O 模块，实现对象控制和参数采集。

1.3.2 软件流程

用户经 PC 程序向网络发出配置信息和控制、测量指令，RT 程序接收到信号后，将信号传输至 FPGA 程序，由 FPGA 程序进行 I/O 模块的对象控制和参数采集。然后，I/O 模块再将采集到的数据逐层上传至 FPGA 程序、RT 程序和 PC 程序，进行数据存储和显示。

2 系统实现

2.1 设计目标

系统主要实现电磁阀控制，热电偶、铂电阻、缓应变及压力参数测量，以及“点火”、“关车”阶段信号判读功能，主要参数指标见表 1。

表 1 分布式测控系统设计指标
Tab. 1 Design indexes of distributed measurement and control system

类型	参数指标
热电偶	K, T, E 型, ADC 分辨率 24 位, 采集速率 100 S/s, 测量精度优于 1%
铂电阻	100 ΩRTD, ADC 分辨率 16 位, 采集速率 100 S/s, 测量精度优于 1%
应变	1/4 桥, ADC 分辨率 24 位, 采集速率 100 S/s, 测量精度优于 1%
压力	1/4 桥, 内置电压源激励, ADC 分辨率 24 位, 采集速率 100 S/s, 测量精度优于 0.5%
电磁阀	27±3 VDC, 800 mA 电流, 响应时间<10 ms
阶段信号	5 V TTL 电平, 响应时间<2 ms

2.2 硬件选型

按照设计目标，进行分布式测控系统软、硬件设备选型，主要设备见表 2。

操作员站各模块主要性能指标如下：

- a) 控制器 NI cRIO-9025
800 MHz CPU, 512 M DRAM, 4G 存储，双

10/100BaseT 以太网端口（支持机箱级联），双冗余电源接口。

表 2 分布式测控系统设备选型表
Tab. 2 Primary equipments of distributed system

名 称	型 号	备注
实时控制器	NI cRIO-9025	
机箱	NI cRIO-9116	
级联机箱	NI cRIO-9144	
热电偶测量模块	NI cRIO-9213	
铂电阻测量模块	NI cRIO-9217	操作员站
应变测量模块	NI cRIO-9235	
压力测量模块	NI cRIO-9237	
电磁阀控制模块	NI cRIO-9475	
阶段信号测量模块	NI cRIO-9401	
计算机	联想 M8400T	集中控制站
Labview 开发套件	NI LabVIEW	软件

- b) 可重新配置机箱 NI cRIO-9116
8 槽，FPGA 类型 LX50 Virtex-5 LX5，支持所有 Compact RIO I/O 模块。
- c) 级联机箱 cRIO-9144
8 槽，兼容 EtherCAT，网络接口 100BaseTX 以太网。
- d) 热电偶测量模块 NI cRIO-9213
内置 CJC（冷端补偿），高速模式总计 1 200 S/s 采集率，24 位 ADC，支持 J, K, T, E, N, B, R 和 S 型热电偶，测量精度优于 0.25 ℃，工作温度-40~70 ℃。
- e) 铂电阻测量模块 NI cRIO-9217
100 kS/s 采集速率，16 位 ADC，同步采样模式，测量精度优于 0.3 ℃。
- f) 应变测量模块 NI cRIO-9235
1/4 桥电压测量，24 位同步 ADC，内置电压激励（2 V），最大采样率 10 kS/s，校准后测量精度优于 0.4%。
- g) 压力测量模块 NI cRIO-9237
全桥电压测量，24 位同步 ADC，内置电压

激励(10 V), 最大采样率 50 kS/s, 校准后测量精度优于 0.25%。

h) 电磁阀控制模块 NI cRIO-9475

最大电压 60 VDC, 单通道电流 1 A, 响应时间 1 μ s。

i) 阶段信号同步模块 NI cRIO-9401

500 ns, $\pm 5 \sim \pm 24$ V, 差分/单端数字输入。

2.3 系统建立

系统设立在液体火箭发动机试验区, 建成后具备 8 路电磁阀控制和 194 路热电偶、铂电阻、缓应变及压力参数测量能力。操作员站位于发动机试车台 3 个不同位置, 阶段信号接入操作员站的同步模块 (NI cRIO-9401), 通过等长电缆向其它操作员站的同步模块转接信号, 实现各站间的自动同步。集中控制站位于测控间, 通过光纤与操作员站连接, 各操作员站与传感器、电磁阀之间通过活动电缆转接。

系统软件按照 1.3 节设计, 发动机试车时接收“点火”、“关车”阶段信号, 开始、停止数据采集和电磁阀时序控制。

2.4 系统测试及应用

系统建成后, 采用高精度温度炉加标准温度信号, 测量结果见表 3。

表 3 温度测量结果
Tab. 3 Temperature data of system

温度炉值	系统校准前测量值	系统校准后平均测量值
200 $^{\circ}$ C	202.5 $^{\circ}$ C	200.3 $^{\circ}$ C
300 $^{\circ}$ C	303.4 $^{\circ}$ C	300.5 $^{\circ}$ C
最大偏差	-1.13 %	0.17 %

采用 DR-6 型标准应变校准仪对应变测量通道进行校准^[7], 校准后加给定应变值, 系统测量结果见表 4。

表 4 应变测量结果
Tab. 4 Strain values of system

给定值	300	600	900	1 200	1 500	2 000	2 500	3 000	4 000
测量值	299.60	599.92	900.46	1 199.76	1 499.85	1 999.96	2 499.54	3 000.43	4 000.18
	298.82	598.19	898.42	1 197.54	1 497.56	1 998.16	2 498.52	2 999.58	4 003.43
	300.00	598.96	898.65	1 198.09	1 498.00	1 999.46	2 499.03	2 999.54	4 001.35
最大偏差/%	-0.39	-0.30	-0.18	-0.21	-0.16	-0.06	-0.02	0.09	0.09

采用高精度电压源对压力通道校准后, 用压力计加给定压力值, 测量结果见表 5。

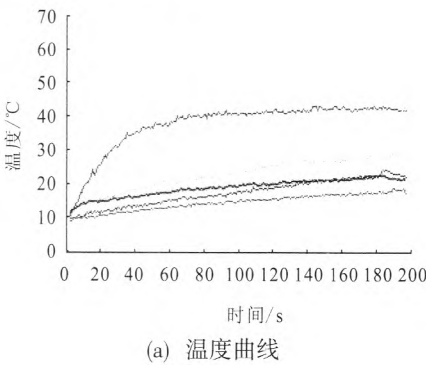
表 5 压力测量结果

Tab. 5 Pressure values of system

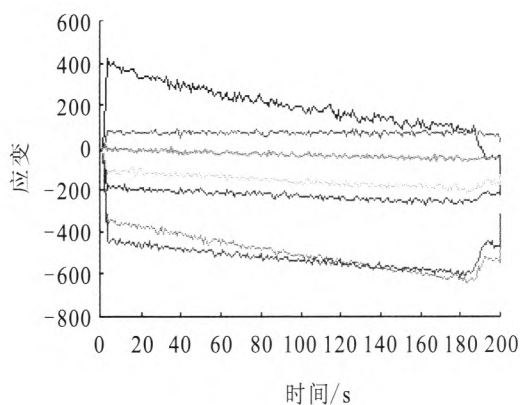
压力给定值/MPa	系统测量值/MPa	偏差/%
0.599 8	0.600 4	0.10
0.200 2	0.200 2	0.00
0.408 3	0.409 0	0.17
0.609 3	0.609 4	0.02

变和压力测量精度满足设计要求。

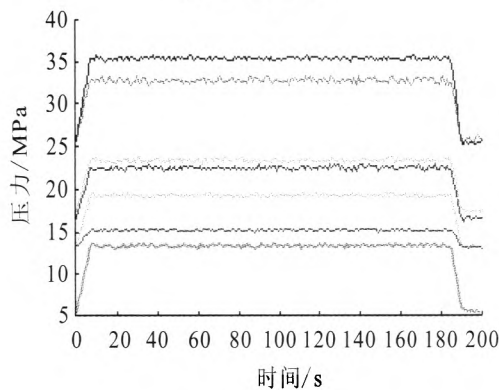
系统建成后, 参加了发动机热试车, 系统工作正常、可靠, 参数测量准确。部分温度、应变和压力测量曲线见图 3。



以上测量结果表明, 校准后系统的温度、应



(b) 应变曲线



(c) 压力曲线

图3 温度、应变、压力测量曲线

Fig. 3 Temperature, strain and pressure curves of system

3 结束语

介绍了一种新型的基于网络的分布式测控系统设计方案。与试验区使用的传统测控系统相比,该系统具有体积小、覆盖能力强、操作维护方便和扩容能力强等优点,测控装置位于现场,通过以太网就可以完成整个试验系统的测量控制,避免了大量电缆的敷设,降低了建设成本。系统在发动机试验中的成功应用进一步验证了该方案的可行性。

参考文献:

- [1] 于英杰. 现代测控技术的发展及应用[J]. 学术研究, 2006, 4(1): 88.
- [2] 赵众, 冯晓东, 孙康. 集散控制系统原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [3] 王洪超. cRIO 远程数据采集装置及应用[J]. 油气储运, 2011, 30(12): 951-952.
- [4] 彭泓. 基于 cRIO 远程数据采集终端[J]. 电子产品世界, 2010, 17(8): 67-68.
- [5] 陈宝江, 米佳. 基于 LabVIEW 和 cRIO 的大中型建筑机械嵌入式监控系统[J]. 起重运输机械, 2010 (4): 72-74.
- [6] 侯大军, 李徽. 无人机液压发射试验台数据采集系统[J]. 国外电子测量技术. 2009, 28(9): 38-40.
- [7] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究[J]. 火箭推进, 2006, 36(5): 51-55.
- [8] 蒋兴加, 李正兵, 陈刚. 液氧/煤油发动机试车测量系统的抗干扰技术[J]. 火箭推进, 2005, 31(3): 54-58.
- [9] 赵万明. 液氧煤油发动机试车测量工艺技术[J]. 火箭推进, 2002, 28(6): 25-30.
- [10] 朱明策. 液体火箭发动机地面试验稳态参数测量技术综述[J]. 火箭推进, 2003, 29(3): 29-33.
- [11] 阎成, 邓晓曼, 高峰, 等. 基于分布式测控技术的风洞运行状态监测系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 67-70.
- [12] 杜承烈, 李言俊, 龚德辉. 分布式测控环境下的实时通信研究[J]. 航空学报, 1999, 20(1): 83-85.
- [13] 余力凡, 张磊. 运载火箭测发控网络设计[J]. 航天控制, 2008, 26(4): 68-74.
- [14] 赵志军, 唐锦江, 姜维, 等. 分布式网络拓扑管理系统研究与实现[J]. 科技资讯, 2012 (31): 4-7.
- [15] 张祖超, 季振山, 肖炳甲, 等. 基于 PXI 和 FPGA 的 EAST 中央定时系统的研制[J]. 计算机测量与控制, 2011 (9): 2241-2244.
- [16] 赵建, 陈强. 在 LabVIEW 中数据库建立与管理功能实现方法研究[J]. 仪表技术, 2005 (3): 62-64.

(编辑: 王建喜)