

# 基于 LXI 总线的压气机试验台喘振试验系统研制

孙海清<sup>1</sup>, 李 娇<sup>2</sup>, 韩公海<sup>1</sup>, 杨松柏<sup>2</sup>

(1. 中国航天科工集团 第三研究院 31 所, 北京 100074; 2. 北京瑞风协同科技股份有限公司, 北京 100098)

**摘要:** 压气机喘振是气流沿压气机轴线方向发生的低频率、高振幅的震荡现象, 会导致压气机部件强烈机械振动和热端超温, 会在短时间内造成部件或整机严重损坏, 因此压气机试验台建设时喘振系统建设尤为重要; 介绍了一种基于 LXI 总线的压气机试验台喘振试验系统的实现方法, 阐述了该系统的主要特点和优势; 试验中, 对压力、温度、电压参数进行采集和记录, 然后通过判喘准则, 进行判断, 并快速发出控制信号, 实现压气机快速退喘; 通过验证, 该系统在压气机发生喘振时能够迅速发出信号, 实现压气机快速退喘, 达到了建设的目的, 可有效防止压气机喘振对试验部件造成损坏。

**关键词:** LXI 总线; 数据采集系统; 喘振试验

## Studies About Compressor Surge Test System Based on the LXI bus

Sun Haiqing<sup>1</sup>, Li Jiao<sup>2</sup>, Han Gonghai<sup>1</sup>, Yang Songbai<sup>2</sup>

(1. 31st Research, Third Academy of CASIC, Beijing 100074, China;

2. Beijing Rainfe Technology CO. LTD, Beijing 100098, China)

**Abstract:** Compressor surge is a low-frequency and high-amplitude shock phenomenon of the air that along the axial direction of the compressor, it will cause strong mechanical vibration of the compressor part and over-temperature, it will cause damage to the parts or the whole in a short time. So the surge test of the compressor is particularly important. This article introduced a surge test system that based on the LXI bus, and describes the main features and advantages of this system. In the test, acquired and recorded the voltage, temperature and pressure signal. It is validated that the system can send the signals quickly when the surge occurred, reaching the purpose of the construction and can effectively prevent the damage to the test components.

**Key words:** LXI bus; data acquisition systems; anti-surge test

## 0 引言

喘振是气流沿压气机轴线方向发生的低频率(通常只有几赫兹或十几赫兹), 高振幅(强烈的压强和气流波动)的气流振荡现象。一旦出现喘振, 则有可能致使整台压气机遭受严重破坏, 因此, 对喘振的监测和故障诊断显得尤为重要, 随着技术的发展, 喘振试验的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。喘振的发展过程以及对其征兆的检测是涡轮发动机研究的热点问题之一, 及时可靠地在喘振前期检测并发出报警信号, 继而触发防喘机构动作<sup>[2]</sup>, 不仅可有效保障飞行安全, 也是喘振主动控制技术的关键。

## 1 喘振试验的需求

### 1.1 信号类型、精度和可靠性的要求

随着技术的发展和试验的需求, 喘振试验的重要性越来越突出, 并且对试验的要求也越来越高。喘振试验中信号参数类型较多, 包括电压、压力及温度等, 通道数不少于 240 通道, 单通道采样率不低于 1 kHz, 因此需要专业的测试设备以满足多种信号的采集。同时为了确保得到可靠精确的数据, 用于后续分析和处理, 要求采用高精度的测试系统, 精度要求满量程的 1%。

由于喘振试验测点类型众多, 因此要求测试系统能够完全覆盖测试需求, 并且具有高集成度, 高稳定性和可靠性等特

点。另外试验的准备工作较复杂且可重复性低, 因此要求测试系统具有足够的可靠性以保证试验成功<sup>[3]</sup>。

### 1.2 测试网络的要求

喘振试验中测量信号类型众多、数据量大, 因此要求测试网络中数据可实时、稳定、可靠地传输以及存储并实时应用, 构建测试网络时, 必须充分考虑数据流的要求, 以及网络容错及网络异常的处理机制。

### 1.3 测试软件的要求

由于需要对测到的数据进行分析 and 处理, 添加相应的判喘准则判断, 以确定压气机状态, 因此需要功能完备、操作简便的测试软件, 以准确地记录测试数据, 通过对时域和频域信号进行分析对比, 编写判喘程序, 准确得出压气机发生喘振时的临界条件, 并实时进行监控。且在喘振发生初期, 通过判断按要求发出相应的喘振信号发给退喘执行机构<sup>[4]</sup>。

## 2 系统的设计

本文主要介绍已经建设的某型压气机试验台喘振试验系统。压气机喘振试验系统主要采用 VTI 公司的 EX1000A-TC 产品进行架构, EX1000A-TC 是一款基于 LXI 总线, 满足 LXI A 类标准的 48 通道电压/温度测量仪, 系统共 288 通道, 共配置 6 台 EX1000A-TC。系统设计遵循系统完整性、高可靠性、操作简捷、模块化设计及可方便扩展等原则。

### 2.1 系统硬件设计

EX10XXA 仪器家族是目前市场上最高级的热电偶和电压测量解决方案, 遵从 LXI A 类规范, 这款 EX1000A 可升级的独立模块凭借完整的内置信号调理, 增强的冷端补偿和完全的

收稿日期: 2013-12-17; 修回日期: 2014-01-26。

作者简介: 孙海清(1979-), 男, 北京市人, 工程师, 主要从事发动机和部件试验及其相关研究工作。

端对端自校准,为用户提供卓越的测量精度和可重复性。EX1000A 一站式满足用户的分布式测量应用,并具有良好的易用性。EX1000A-TC 每通道既可用于电压测量,也可用于热电偶测量。

- (1) 每台 48 通道,可扩展 10 000 通道以上。
- (2) 每通道既可用于电压测量也可用于热电偶测量。
- (3) 温度分辨率: 0.1 °C。
- (4) 电压测量精度: 0.05% FS。

(5) 内置冷端补偿 (CJC): 冷端补偿 (CJC) 为任何真实热电偶测量系统的关键。EX10XXA 整合了多个精密热电阻,提供高精度的参考端,通过软件进行选择,简化了外部线缆连接,并且显著提供测量精度。

(6) 具有热电偶传感器开路监测每个通道配备热电偶开路监测功能,可独立配置开启,连续给出通道状态指示。监测机制内嵌在信号调理电路中,在中断或间歇的情况下能够精确地提供开路电流指示。

(7) 端对端自校准为每个信号通路提供完全的端对端自校准。高精度校准源提供参考信号,在模拟滤波和增益电路之前对漂移、老化和温升进行补偿。自校准简单快捷,用户可以根据需要随时进行。

## 2.2 系统软件设计

系统软件选用北京瑞风协同科技股份有限公司开发的成熟的数据采集软件 Explab。Explab 是一款功能强大、应用灵活、操作简单的数据采集软件,除了硬件控制、通道配置、数据采集、实时显示、数据存储和数据回放等基本功能外,还具有自定义算法、传感器库及数据发布等实用的特色功能。

总控计算机可控制操作各个设备,也可进行试验配置,并且可连接服务器,将数据实时入库。试验时,可以接收、存储所有通道的试验数据,并在局域网中进行数据发布。局域网中配置多台监视端,可任意选择通道进行实时数据显示。并且总控计算机还可与控制系统进行实时通讯、接收控制信号或发出反馈数据。

系统配置的 Explab 软件,提供的算法功能包括工程值转换、自定义公式、自定义算法,可以添加简单的工程单位转换和线性变换,同时也可以导入复杂的算法,用于更复杂的试验需求。退喘试验系统软件部分正是基于此功能,根据判喘准则编制判喘程序,通过 LXI 测试计算机实时对接收的采集数据根据判喘准则进行判断,当满足条件时通过 I/O 通道输出电压信号接通退喘执行机构,执行机构迅速打开排气电磁阀达到快速退喘的目的。

系统配置的 Explab 软件,内嵌一个功能齐全的传感器库,管理温度、压力、应变、位移及流量等各种传感器。当被测信号类型较多时,可以编辑、存储和调用传感器的参数信息,提高测试效率,降低人为输入误差发生的几率。在喘振试验中,可内置温度传感器分度表,现场试验时直接调用。

## 3 关键技术

### 3.1 全系统精密同步

对于日益增长的测试需求,几百上千甚至几千通道的大型测试系统趋于平常。大型测试系统并不仅仅是通道的简单叠加,由此而带来通讯、控制等多方面的技术难点。如何使所有通道能够同步工作,便是大型测试系统的关键技术。

LXI 总线定义了两种同步方式: B 类产品满足 IEEE-

1588 (网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准),通过 PTP 时钟同步实现全系统  $\mu\text{s}$  级别同步;而 A 类产品定义了快速硬件触发总线 LXI TriggerBus,通过 LXI 触发线的连接实现全系统 ns 级别的同步<sup>[5]</sup>。EX1000-TC 便是满足 A 类标准的 LXI 设备。

本系统中有 6 台 EX1000A-TC,共 288 通道,系统的同步通过 LXI 触发线缆来实现。LXI TriggerBus 定义其中一根线用于传递时钟信号 (Clock signal);另有一根线用于传递同步脉冲 (Sync pulse)。而设备之间设置主从模式 (Master/Slave),所有从设备都通过这两条线来与主设备同步,并且都使用主设备的时钟,由此达到全系统纳秒级别的同步。

### 3.2 判喘准则

第一阶段: LXI 每接收到一个  $P_i$  (总压) 数据,就将其与  $\Delta t$  (单位: ms) 前收到的数据进行对比,如果满足  $-P_1$  (kPa/s)  $<$   $dP_i/dt <$   $-P_2$  (kPa/s),则记录下来,如果连续两次出现这种情况,则认为可能发生了喘振,并开始第二阶段的判断。

在第二阶段的判断中,从每收到一个点,则将其与  $\Delta t$  前收到的数据进行对比,如果满足  $kP_2$  (kPa/s)  $<$   $dP_i/dt <$   $P_1$  (kPa/s),则记录下来 ( $k$  为经验数据),如果连续两次出现这种情况,则认为确实发生了喘振,立即向退喘控制器发送喘振信号,并重新开始第一阶段的判断<sup>[6]</sup>。

如果超过某一规定时间仍没有出现连续的上升波形,那么认为是干扰信号;重新开始第一阶段的判断。

判喘程序具备以下功能:

- 1) 各经验数值 ( $\Delta t$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ ) 均可在界面上实时可调 (提供输入窗口),便于修正;
- 2) 利用 3 个压力通道数据判喘,确保数据的可靠性;
- 3) 三路数据用同样的法则同时进行判喘,判断结果之间的关系在界面上进行“或”、“与”选择;
- 4) 显示判喘用各压力实时脉动波形和喘振信号波形;
- 5) 在屏幕上设置喘振指示灯,判断出喘振时灯亮,判断不喘振时灯灭;
- 6) 记录每次的判断结果;

7) 喘振信号要求是开关量,硬件上要求接一个继电器,提供两个 I/O 通道,一个信号给执行机构,另一个信号给喘振指示灯。当喘振信号发生时,继电器关闭接通了执行机构回路,控制压气机试验器后排气管路上的电磁阀迅速打开,达到迅速排气退喘的目的。

### 3.3 退喘执行过程

在 LXI 测试系统采集程序中根据判喘准则嵌套判喘程序,通过对试验过程测试计算机实时接收的采集数据进行判断,当满足判喘准则时通过 EX1000A-TC 设备 I/O 通道输出一定电压,使退喘系统执行机构回路中继继电器吸合,从而接通退喘执行控制机构,随即压气机台试验件后排气管路阀门迅速打开,达到迅速退喘的目的。

## 4 试验结果与分析

EX1000A-TC 所有通道既可用于电压测量,也可用于温度测量,前端接口为 Mini TC 接头形式,可方便地进行热电偶测量。同时 EX10xx 系列还提供不同通道配置的多种型号,可

(下转第 1845 页)

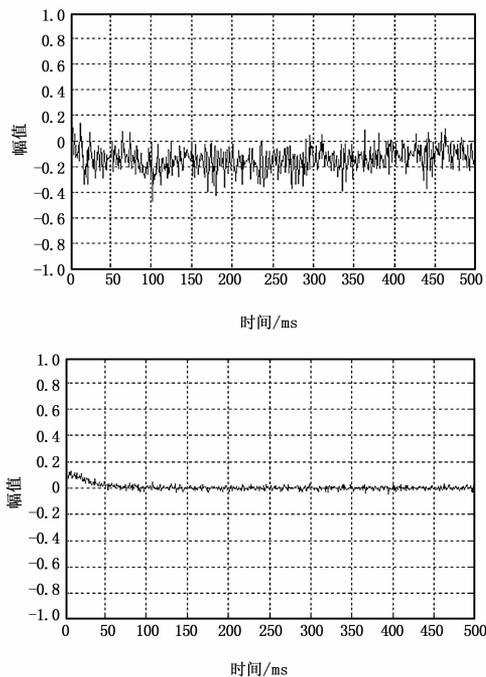


图 3 AEKF 方法相位差跟踪图

## 参考文献:

[1] Schon S, Bielenberg O. On the capability of high sensitivity GPS for precise indoor positioning [A]. IEEE Proceedings of the 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication [C]. 2008: 121 - 127.

(上接第 1834 页)

根据具体电压和温度通道需求灵活的选择测试设备, 充分满足了退喘试验系统中信号类型众多的需求。

系统中所有设备既可以通过触发线缆进行级联, 实现精密同步, 同时也可以单独使用, 根据测点分布, 灵活地进行分配。

配置了测试机柜, 将所有设备固定在机柜中, 采用集中式架构<sup>[7]</sup>, 机柜中配置千兆网交换机, 所有 LXI 设备均连接到交换机上, 再连接到控制计算机, 实现控制计算机对每台设备的控制。

同时系统中配置了功能强大的测试软件, 通过硬件的控制及软件中的判喘程序的执行, 经试验验证在检测到压气机试验中发生喘振现象时, 进行准确地判断并执行退喘程序, 有效地实现压气机退喘。

## 5 结束语

本文叙述了压气机试验台退喘试验系统的实现方法, 表明基于 LXI 总线建立的这套系统, 具有灵活的系统架构、先进的测量设备、方便的系统扩展及简单的软件操作等优势, 完全

[2] 郑 奎, 胡永辉, 吴华兵, 等. 微弱 GPS 信号卡尔曼滤波跟踪算法研究 [A]. 第三届中国卫星导航学术年会电子文集——S01 北斗/GNSS 导航应用 [C]. 2012.

[3] Jee G, Kim H S, Lee Y J. A GPS C/A code tracking loop based on extended Kalman filter with multipath mitigation [A]. ION GPS 2002 [C]. Portland, USA: The Institute of Navigation, 2002: 446 - 451.

[4] Psiaki M L, Jung H. Extended Kalman filter methods for tracking weak GPS signals [A]. Proceedings of ION GPS 2002 [C]. Portland, OR: Institute of Navigation, 2002: 2539 - 2553.

[5] Psiaki M L. Smoother-based GPS signal tracking in a software receiver [A]. Proceedings of ION GPS 2001 [C]. Salt Lake City, UT: Institute of Navigation, 2001: 2900 - 2913.

[6] 张 婧, 茅旭初. 基于平淡卡尔曼滤波的微弱 GPS 信号跟踪算法 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41 (11): 1834 - 1838.

[7] Jee G, Kim H S, Lee Y J. A GPS C/A code tracking loop based on extended Kalman filter with multipath mitigation [A] // ION GPS 2002 [C]. Portland, USA: The Institute of Navigation, 2002: 446 - 451.

[8] 李理敏, 龚文斌, 刘会杰, 等. 基于自适应扩展卡尔曼滤波的载波跟踪算法 [J]. 航空学报, 2012, 33 (7): 1319 - 1328.

[9] Papić V D, Djurović Z M, Kovacević B D, et al. Adaptive Doppler-Kalman filter for radar systems [J]. IEE Proceedings Vision Image and Signal Processing, 2006, 153 (3): 379 - 389.

[10] Mohamed A H, Schwarz K P. Adaptive Kalman filtering for INS/GPS [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73 (4): 193 - 203.

[11] Almagbile A, Wang J I, Ding W D. Evaluating the performances of adaptive Kalman filter methods in GPS/INS integration [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2010, 9 (1): 33 - 40.

\*\*\*

满足压气机试验发生喘振时退喘的应用要求, 为压气机试验台退喘提供了有效的解决方案。随着后续对试验台功能扩展等各项要求越来越高, 基于 LXI 总线和 Exlab 的喘振试验系统将得到更广泛的应用。

## 参考文献:

[1] 谢彦文, 崔耀欣, 顾 伟, 等. 压气机喘振机理及防喘措施研究 [J]. 热力透平, 2008, 37 (2): 15 - 17.

[2] 胡江峰, 欧阳华, 何 磊, 等. 多级轴流压气机喘振特性分析 [J]. 汽轮机技术, 2010, 52 (4): 250 - 252.

[3] 杨庆华, 袁海文. 基于 LXI 总线的高速数据采集系统的研制 [J]. 工业计量, 2011, 21 (3): 17 - 20.

[4] 张 彤, 吴 蔚. 涡轮发动机的喘振机理及预防与控制的研究 [J]. 锦州师范学院学报, 2003, 24 (3): 37 - 38.

[5] 叶卫东, 张卫庄. LXI 总线触发方式介绍及触发总线的 PCB 技术 [J]. 测控技术, 2007, 09: 35 - 38.

[6] 李小彪, 余海生, 孙健国, 等. 一种涡轮发动机喘振信号判定方法 [J]. 推进技术, 2009, 30 (6): 27 - 28.

[7] 吴又美, 鄢小清. 基于 LXI 仪器总线的分布式测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (12): 1685 - 1687.