

基于反射内存网络的风洞测量系统 状态监测系统设计

贾 霜¹, 蒲 麒¹, 邓章林¹, 邓晓曼¹, 郑 磊²

(1. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 为了解决某风洞测量系统监测覆盖面不全、监测手段缺乏、监测数据管理效率低下等不足, 在现有设备基础上搭建了环形反射内存网络, 构建了状态监测系统; 介绍了系统的硬件组成和软件设计方案及实现; 状态监测软件基于 LabVIEW 和 SQL Server 开发, 将测量设备状态信息集中采集、处理、存储, 实现了对测量系统设备的实时监测和数据分析等功能; 应用结果表明, 系统具有良好的实时性和可靠性, 功能完备, 界面友好, 满足风洞试验运行监测要求。

关键词: 风洞; 测量系统; 反射内存; 状态监测

Condition Monitoring System for Measurement System in Wind Tunnel Based on Reflective Memory Network

Jia Shuang¹, Pu Qi¹, Deng Zhanglin¹, Deng Xiaoman¹, Zheng Lei²

(1. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co. Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: In order to solve the problems of incomplete monitoring coverage, lack of monitoring means and low efficiency of monitoring data management of a wind tunnel measurement system, a ring reflection memory network was built on the basis of existing equipment, and the condition monitoring system was constructed. The hardware composition, software design and implementation of the system are introduced. The condition monitoring software is developed based on LabVIEW and SQL server. It collects, processes and stores the status information of measuring equipment, and realizes the functions of real-time monitoring and data analysis of measurement system equipment. The application results show that the system has good real-time performance and reliability, complete functions and friendly interface, which can meet the requirements of wind tunnel test operation and monitoring.

Keywords: wind tunnel; measurement system; reflective memory; condition monitoring

0 引言

1.2 米×1.2 米半回流暂冲式跨超声速风洞(以下称 1.2 米风洞)是我国自行设计和建造的一座半回流暂冲式跨超声速风洞^[1], 自建成以来, 该风洞测量系统进过几次设备升级和技术改进, 设备数量逐渐增多, 但受限于设备位置比较分散, 虽然也采取了一些监测手段, 但总体上来看, 具有以下不足: 1) 监测面覆盖不全, 对重要的采集设备关注多, 对附属辅助设备如供电电源和超扩段压力缺少监测; 2) 监测手段缺乏, 仅仅局限于设备已有的监测能力, 比如吹风过程只能看见基本的流场压力和机构角度, 对天平的载荷监测缺失; 3) 各设备监测比较零散和碎片化, 缺乏系统性设计, 各设备相对独立, 自成系统; 4) 监测数据管理效率低下, 数据格式多样, 存放分散, 形成信息孤岛, 不便于数据的查询和分析。

反射内存网络是一种基于高速网络的共享内存技术的实时网络, 具有严格的传输确定性和可预测性, 可靠性高、传输速度快、平台适应性强、支持中断信号传输等特点^[3]。

针对以上风洞测量系统现有不足, 结合反射内存网络特点, 研制一套测量系统状态监测系统, 将设备状态信息进行集中采集、处理、存储, 实现对测量系统各设备全过程的状态检查、性能确认、实时监测和数据分析等功能, 为风洞试验的顺利进行提供有力支撑。

1 反射内存网络

反射内存网络(Reflective Memory Network)是一种高速的、强实时性、传输确定性和可预测性的实时网络^[4], 支持不同总线结构的多计算机系统, 并且可以使用不同的操作系统来共享高速的、稳定速率的实时数据。其实现方法是在每个节点(可以是计算机, 也可以是总线系统)上

收稿日期: 2020-07-15; 修回日期: 2020-09-16。

作者简介: 贾 霜(1977-), 男, 四川渠县人, 硕士, 工程师, 主要从事风洞测控技术方向的研究。

引用格式: 贾 霜, 蒲 麒, 邓章林, 等. 基于反射内存网络的风洞测量系统状态监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 23-26, 31.

插入一块对应接口的反射内存卡，卡与卡之间通过光纤连接成环型网络或者星型网络。当一张反射内存卡上的数据写入或更新后，反射内存卡自动地通过光纤将更新后的数据映射到连接在网络上的其他反射内存卡的内存里，其他的反射内存卡上的数据将同步更新，数据更新的时间仅仅是纳秒（ns）级，而各节点在访问这些共享数据时，只要访问本地的反射内存卡中的内存即可。反射内存卡使用简单的读写方式，网络上的数据传输全部由硬件（反射内存卡/交换机）完成，不需要考虑网络的通信协议，简单的软件操作即可实现对反射内存卡的读、写操作。

反射内存网络主要有两种连接方式，一种是星型连接，另一种是环形连接，具体见图 1。

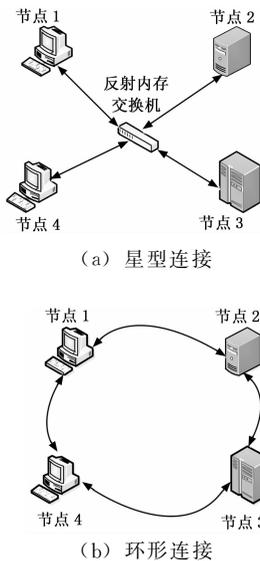


图 1 反射内存网络拓扑结构图

星型连接的特点是所有节点通过光纤连接到反射内存交换机上，共享数据的交互通过反射内存交换机实现，可靠性和灵活性较高，一个节点发生故障，不会影响整个反射内存网络，反过来，若交换机发生故障，则整个网络将失效。环形连接的特点则是各节点形成一个环形网络，每个节点接受上一节点的数据并将数据传输到下一节点，缺点是若某节点发生故障，则整个网络将失效。综合比较二者特点及经济性考虑，本系统选用环形连接反射内存网络。

2 基于反射内存网络的状态监测系统

2.1 硬件系统设计

2.1.1 硬件系统总体方案

风洞测量系统一般包含一次仪表、二次仪表（检测系统）、前端信号调理器和相应的管理上位机等^[2]。一次仪表完成物理信号到电信号的转变，在风洞中，一次仪表主要有压力传感器、温度传感器、角度传感器及天平等。二次仪表也叫数据采集系统，主要有 VXI 系统、PXI 系统、压力扫描阀系统。本文描述的测量系统中，压力传感器 1、角度传感器 1 信号进入 VXI 核心控制系统，为风洞的流场调节和模型姿态控制提供原始数据；压力传感器 2、角度传

感器 2、温度传感器和天平信号等进入 PXI 数据采集系统，为风洞流场计算和模型气动力计算提供原始数据；模型表面压力数据采集则通过电子扫描阀系统完成，以上 3 个系统属于风洞已有的系统。而测量系统状态监测系统（以下简称监测系统）将以上系统进行整合，全面纳入监测范围，实现对测量系统所属设备全方位、全时段的监测，通过在以上 3 个系统的上位机和监测系统上位机之间安装反射内存卡建立环形反射内存网络，实现数据共享。此外，风洞超扩段的壁面压力传感器和设备供电电源则通过 RS232/485 串口连接至串口服务器，直接在监测软件界面显示。整个测量系统的状态监测系统结构框图见图 2。监测系统上位机作为反射内存网络中的关键设备，完成反射内存数据的收集、处理、显示和存储。所有数据最后写入数据库，便于后期的查询、数据分析和故障排查。

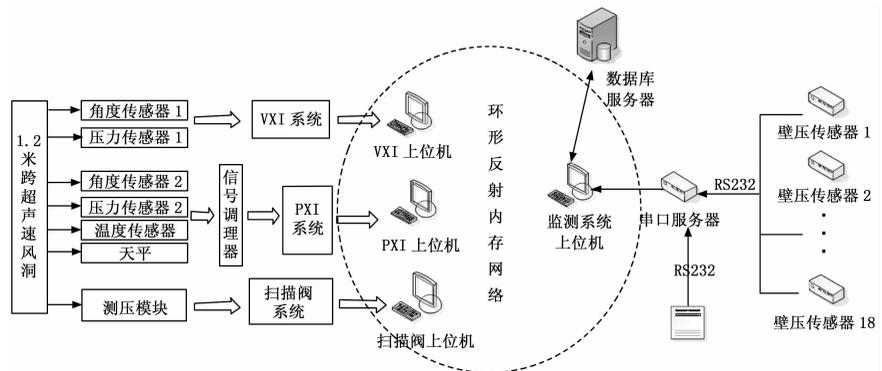


图 2 测量系统状态监测系统结构框图

2.1.2 反射内存卡

反射内存卡选用中科泛华 PS PCI-3550 卡，它是基于 PCI 总线，板载 512MB DDR II 内存，可以在局域网互连的多达 128 个计算机间提供高速的数据传输共享，数据速率最高支持 170 MB/S，并提供极低的通信延迟，支持环形网络；断网自动恢复及网络初始化；支持多模光纤，适用于分布式仿真与测试的高带宽数据的交互和高速测试场合。提供 Windows（XP 及以上）系统下驱动及范例程序，支持 VxWorks、Linux 等操作系统；提供标准的 LabVIEW 库文件及 DLL 动态链接库，支持 LabVIEW、VC、VB、Delphi、CVI 等标准开发平台。

系统一共采用 4 张 PCI 总线的反射内存卡，使用时，在每台节点（上位机）上插入一块 PCI-3550 反射内存卡，安装相应的板卡驱动，并将各节点通过光纤连在一起，即构成了测量系统反射内存网络。需要注意的是卡与卡之间的光纤连接要注意方向性，即每张反射内存卡的发送端口和要与下一节点的接收端口相连接，而接收端口则与上一节点的发送端口相连。

2.1.3 壁面压力传感器

壁面压力监测点共有 18 个，如果采用模拟输出信号的传感器，则目前现有的采集系统通道数量无法满足，因此选用数字式压力传感器。根据风洞运行压力及监测实时性要

求, 选用 HM29 系列的绝对压力传感器, 量程 0~200 kPa, 分辨率 20 bit, 精度 ±0.25%FS, 采样率 10 Hz, RS485 输出, 补偿温度范围 -10~60 ℃。

2.1.4 串口服务器

串口服务器主要实现对壁面压力传感器数据的采集直流电源设备信号的采集。选用卓岚 ZLAN5G00A 串口服务器, 有 16 个串口, RJ45 形式, 支持 RS232/485/422, 16 个串口可独立全双工工作, 互不干扰, 可配置为不同的波特率, 每一个串口可作为 TCP 服务端、TCP 客户端、UDP、UDP 组播等。另外还有 4 个网口, 可当交换机使用。系统一共配置 2 台串口服务器。

2.2 软件系统设计方案

软件系统包括各上位机的软件系统, 其中 VXI 系统、PXI 系统和电子扫描阀系统的上位机软件只需在管理软件中加入对所属反射内存卡的配置、读写等操作环节即可。而监测系统软件还需要实现对反射内存网络系统节点配置、反射内存卡管理、数据读写逻辑关系管理, 以及共享数据的处理、显示、存储和后期的查询回放等, 本文着重介绍监测系统软件在 Windows7 操作系统下使用图形化编程软件 LabVIEW 2015 编写, 数据库采用 SQL Server 2012。

2.2.1 反射内存卡设置

PCI-3550 反射内存卡配套光盘里有驱动程序, 运行安装程序时, 注意要安装配套的组件, 工具包提供了支持 C 和 LabVIEW 的开发库以及相关的工具、文档和事例, 具体见图 3。



图 3 反射内存卡安装组件选项

利用自带的管理软件可以查看反射内存卡卡的基本信息并进行配置。驱动程序安装完成后, 可以在安装目录下找到 P3550.h、P3550.dll、P3550.lib 等文件, 文件里包含了板卡的相关操作函数, 主要有四大类:

- 1) 基本设备操作, 如: 初始化设备、打开设备、关闭设备、设备复位、获取设备属性等。
- 2) 配置设备, 如: 分配/释放内存映射、检查环网建立、获得板卡 ID、获得节点数量等。
- 3) 数据传输, 如读取/写入数据、查询数据、更新数据等。
- 4) 中断事件, 如使能事件、屏蔽事件、发送事件、等待事件及清空事件等。

2.2.2 反射内存卡数据写入

以 VXI 系统为例, 该节点的任务是将采集的传感器数据和攻角数据写入反射内存卡, 供状态监测软件上位机读取, 该节点的上位机软件采用 LabWindows/CVI 编写, 具体的操作过程及相关函数见图 4。

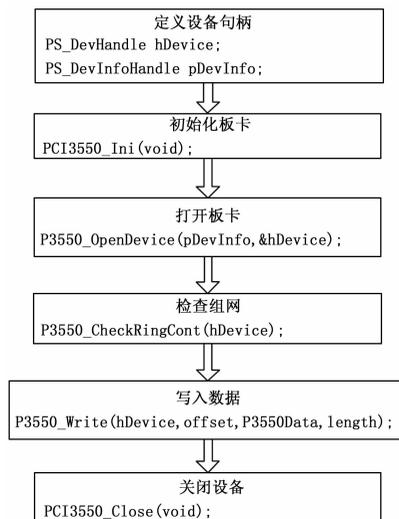


图 4 板卡操作流程

在操作板卡时, 首先要定义设备句柄变量, 并在其他引用该句柄的文件中定义为外部变量方可正常操作板卡, 外部变量的定义格式为:

```
extern PS_DevHandle hDevice;
extern PS_DevInfoHandle pDevInfo;
```

2.2.3 反射内存卡数据读取

监测系统软件的核心功能就是将其他节点的共享数据进行读取、换算成相应的物理量值, 以图表、曲线等方式显示出来并写入数据库。该软件采用 LabVIEW2015 编写, LabVIEW 软件是 NI 公司推出的图形化语言开发环境, 广泛地应用于工业界、学术界和实验室, 被视为一个标准的数据采集和仪器控制软件。LabVIEW 集成了与满足 GPIB、VXI、RS-232 和 RS-485 协议的硬件及数据采集卡通讯的全部功能, 还内置了便于应用 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数。利用它可以方便地建立自己的虚拟仪器控制平台。

安装 PCI-3550 驱动后, 在软件项目里载入的动态链接库 (DLL) 文件, 相关的操作会出现在前面板上, 见图 5。



图 5 PCI-3550 函数选板

每个选项都是以子 vi 的形式进行了封装，以获取板卡信息为例，根据槽位号识别反射内存卡 ID 并作为后期其他操作的唯一句柄，板卡被识别后，可以读取板卡 ID，并将错误信息输出供操作人员查看。其程序框图见图 6。

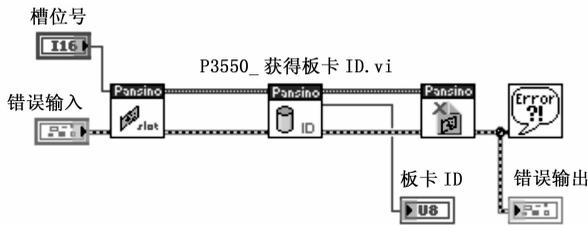


图 6 获取 P3550 板卡信息子 vi

2.2.4 天平载荷计算及显示

天平是风洞测力试验中各种气动力测量的主要设备。本文中，天平数据通过 PXI 系统上位机写入反射内存卡，监测系统上位机读取本机反射内存卡内容，进行迭代计算，当迭代收敛时，则迭代结果即为天平载荷。其实现原理见图 7。

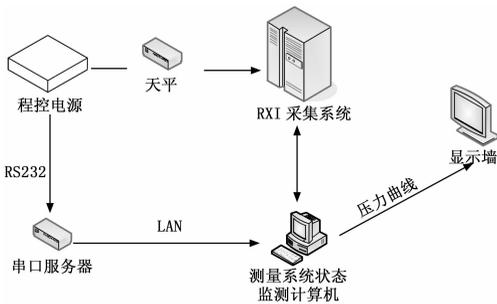


图 7 天平载荷计算实现原理图

天平载荷的计算是通过调用 banlance 子 VI 模块来实现的。在风洞试验过程中，天平载荷被实时的计算出来并投影在大屏幕上，既显示天平的实时载荷，也以天平的实测值与设计载荷的百分比这种更直观的形式显示出来，便于岗位人员观察天平工况并快速确认天平的工作状态。显示的设计原则是：如果天平载荷超出量程范围，则显示的颜色会根据载荷大小的百分比以不同颜色显示，当载荷为 100% 时显示黄色，达到 120% 时显示橙色，超过 120% 则显示为红色，岗位人员可以根据颜色的不同快速直观的得出天平的工作状态，以便采取相应的紧急措施保护模型和天平的安全。

2.2.5 过程数据存储管理

监测系统软件除了实时计算显示数据外，另一个更重要的功能是历史数据的追溯，便于通过对过程数据的分析，识别出设备性能状况，并在气动数据分析和设备故障排查中提供最直接的数据支撑。为了实现数据的管理，监测系统软件将试验过程数据以车次号作为关键字存入数据库，数据库采用 SQL Server 2012。SQL Server 数据库具有更好的安全性和高可用性，具有快速的数据访问和数据发现功能，为后期的历史数据分析提供了数据支撑。

风洞试验过程数据存储于表 TestDataTable 中，该表的字段包含车次号，试验时间、试验基本信息、压力数据信息、天平载荷信息等，表字段的设计见图 8，其中车次号设置为 主键，不能为空。表的字段名称可以以中文命名，在不影响数据库访问效率的同时提升了可读性。

列名	数据类型	允许 Null 值
datetime	datetime	☑
Y	float	☑
Mz	float	☑
X	float	☑
Mx	float	☑
Z	float	☑
Myy	float	☑
马赫数	float	☑
总压P1	float	☑
总压P2	float	☑
静压Pst1	float	☑
静压Pst2	float	☑
实际攻角	float	☑
底压1	float	☑
底压2	float	☑
底压3	float	☑
底压4	float	☑
底压5	float	☑
底压6	float	☑

图 8 数据库表的设计

3 状态监测系统实现及应用效果

3.1 监测软件主界面

监测软件主界面包含风洞运行过程的相关信息，主要有：当前试验车次基本信息、实时流场信息、天平载荷、传感器压力值、电源值和超扩段壁面压力值等，这些信息以文本、曲线、图表等方式显示。显示界面按照功能区域划分，一共有 6 个功能区：试验信息区、流场信息区、天平信息区、底压信息区、壁面压力区和电源监测区域其中天平载荷以实际载荷与设计载荷的百分比显示，便于观察天平工作状态。如图 9 所示。

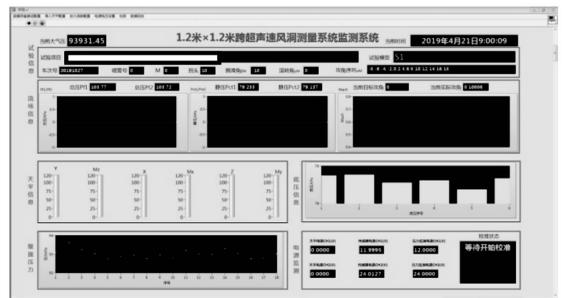


图 9 监测软件主界面

3.2 数据查询与回放

历史数据查询支持单车次和多车次查询。单车次查询时，可以显示多变量随着某个变量（如时间）的变化关系曲线，不同变量以不同颜色区分；多车次查询时，可以显示不同车次的同一变量随着某个变量（如时间）的变化规律，方便分析数据和故障排查。如图 10 所示，显示 4 个车次的攻角随着时间的变化关系。

3.3 应用效果

测量系统状态监测系统研制完成后一直应用于风洞试验中，运行期间，设备工作正常，实时性好，数据传输快速

(下转第 31 页)