

doi: 10.7690/bgzdh.2024.12.005

# 大型低速风洞结构健康监测系统

王 强, 黎壮声, 李树成, 杜立强

(中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为提高风洞调试和运行时的结构安全性, 设计研制一种大型低速风洞结构健康监测系统。针对风洞监测对象位置散、可移动的特点, 对结构健康监测 (structural health monitoring, SHM) 需求进行精准分析。在分析基础上, 系统采用基于光纤环网和星形连接的混合网络架构, 实现对分散结构状态数据的分布式采集、边缘计算和高效传输。运行系统表明: 该系统在消声室流致振动监测评估、防护网拦截异物监测诊断等方面发挥了显著作用, 有力保障了大型低速风洞运行安全。

**关键词:** 大型低速风洞; 结构健康监测; 消声室; 防护网

**中图分类号:** TJ011; TP212 **文献标志码:** A

## Structural Health Monitoring System for Large Low Speed Wind Tunnel

Wang Qiang, Li Zhuangsheng, Li Shucheng, Du Liqiang

(Facility Design and Testing Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to improve the structural safety of wind tunnel during commissioning and operation, a structural health monitoring system for large low-speed wind tunnel is designed and developed. According to the characteristics of scattered and movable monitoring objects in wind tunnel, the requirements of structural health monitoring (SHM) are analyzed accurately. Based on the analysis, the system adopts the hybrid network architecture based on optical fiber ring network and star connection to realize the distributed acquisition, edge computation and efficient transmission of the distributed structure state data. The operation system shows that the system plays a significant role in the monitoring and evaluation of flow-induced vibration in the anechoic chamber and the monitoring and diagnosis of foreign bodies intercepted by the protective net, and effectively guarantees the operation safety of the large low-speed wind tunnel.

**Keywords:** large low-speed wind tunnel; structural health monitoring; anechoic chamber; protective net

## 0 引言

结构健康监测 (SHM), 是一门融合了先进传感器技术、信息系统技术、故障诊断和预测技术等多学科融合技术, 在复杂系统、大型结构件、土木工程、典型机电设备等领域已开展了相关研究和应用<sup>[1-4]</sup>。

随着装备保障信息化、精细化要求的不断提高, SHM 技术在风洞领域也得到不同程度的研究和应用实践。中国空气动力研究与发展中心针对早期已建成的 4 m×3 m 风洞、2.4 m 跨声速风洞、 $\Phi$ 1 m 高超声速风洞等在役风洞补充建设了一批自主式维修保养系统<sup>[5-10]</sup>, 利用阀门振动和应变数据对风洞阀门正常和异常状态特征进行分析<sup>[5]</sup>, 基于规则推理 (rule-based reasoning, RBR) 和主元分析 (principal component analysis, PCA) 方法对风洞单一装备故障和控制过程故障进行诊断<sup>[8]</sup>, 利用概率神经网络对风洞设备故障征兆与故障原因之间的非线性关系进

行分析<sup>[9]</sup>, 利用有限元分析技术对风洞第 1 扩散段在运行过程中出现的裂纹现象进行分析诊断<sup>[10]</sup>。

近年来, 伴随多座新风洞的设计和建设, 健康监测系统进入到与风洞同步设计建设的新阶段, 有利于测试设备的预设预埋, 以便更精准地感知风洞状态。笔者在分析大型低速风洞结构健康监测需求的基础上, 描述基于多传感器的光纤环网和星形连接混合结构的系统设计; 并重点就系统在消声室流致振动监测评估、防护网拦截异物监测诊断的典型结构健康监测实际应用场景进行介绍。

## 1 系统需求与设计

大型低速风洞是开展空气动力学前沿问题基础研究和工程应用研究的重要平台, 其气动轮廓如图 1 所示, 主要包含动力系统、洞体机械、建筑工程和测控系统等。

结构健康监测系统主要以洞体机械、建筑工程

收稿日期: 2024-06-21; 修回日期: 2024-07-20

第一作者: 王 强(1990—), 男, 重庆人, 硕士。

的关键设备或薄弱位置为对象，针对具体故障模式开展相应的故障监测和报警，其主要故障模式和系统需求如表 1 所示。系统采用混合网络结构形式实现对设备对象状态参数的数据采集、边缘计算、数据传输、数据管理、数据分析和终端显示，拓扑结构如图 2 所示。在风洞调试运行过程中，系统在消声室流致振动监测评估和防护网拦截异物监测诊断方面挥了重要作用。

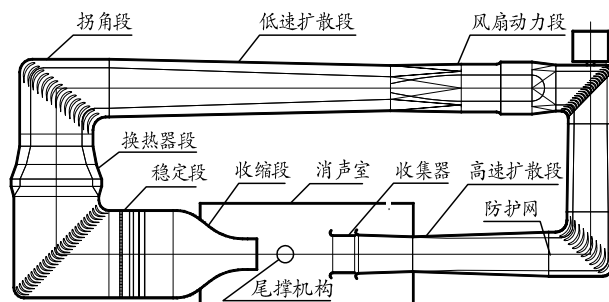


图 1 大型低速风洞气动轮廓

表 1 大型低速风洞设备对象故障模式及需求分析

序号	类别	对象	故障模式	故障原因	故障影响	故障检测/监测方法
1	建筑工程	消声室	墙体剧烈振动致消声尖劈脱落	风洞开口试验时，气流低频压力脉动引起消声室共振	剧烈振动可能危及风洞建筑结构安全，风洞停机	消声室墙体预埋振动传感器进行监测和识别
2	建筑工程	防护网	受到流道内脱落异物撞击	风洞内有设备脱落或遗留异物进入内流道，受气流作用撞击防护网	撞击可能冲破防护网运动到风洞下游，危及动力系统安全	防护网结构上安装振动传感器进行监测和识别
3	洞体机械	收集器	收集器剧烈振动	风洞开口试验时，气流低频压力脉动引起收集器共振	剧烈振动可能导致结构变形过大，危及结构安全	收集器结构上安装振动传感器进行监测和识别
4	洞体机械	换热器	表冷器剧烈振动	气流激励引起表冷器共振	剧烈振动可能导致结构变形过大，危及结构安全	表冷器结构上安装振动传感器进行监测和识别
5	洞体机械	尾撑机构	尾撑剧烈振动	气流激励引起尾撑共振	剧烈振动可能导致结构变形过大，危及结构安全	收集器结构上安装振动传感器进行监测和识别

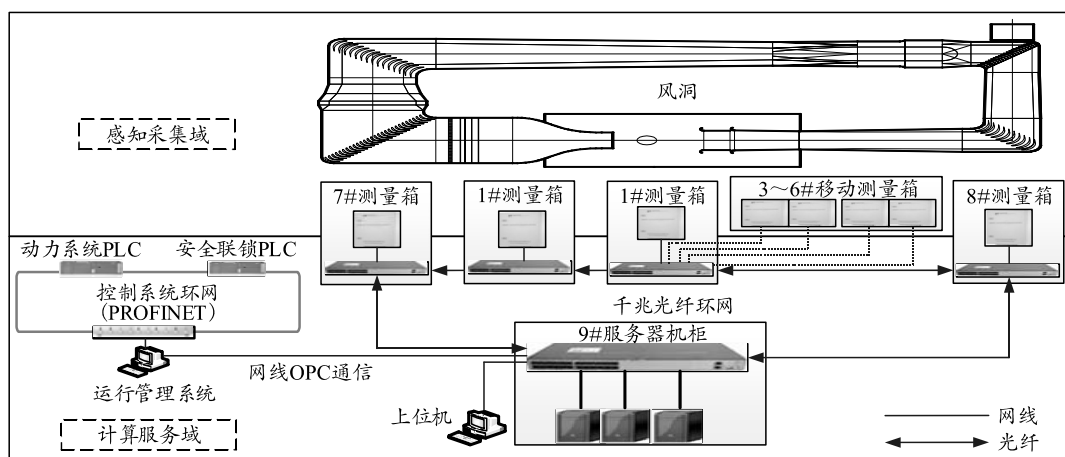


图 2 大型低速风洞结构健康监测系统网络拓扑

## 2 消声室流致振动监测评估应用

大型低速风洞具有 2 个闭口试验段和 1 个开口试验段，在使用开口试验段进行试验时，由于开口射流引起的低频压力脉动，会引起消声室试验大厅强烈的结构振动，甚至可能达到危及结构安全的程度；因此，消声室结构的实际振动状态直接影响能否达到风洞设计最大开口射流速度。

1981 年欧洲 DNW 开口射流首次校测时，从 60 m/s 开始，试验大厅的侧墙和天花板出现明显的能级振动；在速度为 84 m/s 时，部分结构从天花板上脱落，导致校测被迫停止，且在后来的试验过程中其开口射流的最大速度被要求限制在 80 m/s，严重影响了其试验效能<sup>[11]</sup>。图 3 为 DNW 消声室。



图 3 DNW 风洞消声室

大型低速风洞消声室试验大厅尺寸为 70 m×35 m×22 m(L×W×H)，主体为混凝土结构，四周表面挂装消声尖劈，通过计算仿真获得消声室的结构振型如图 4 所示。

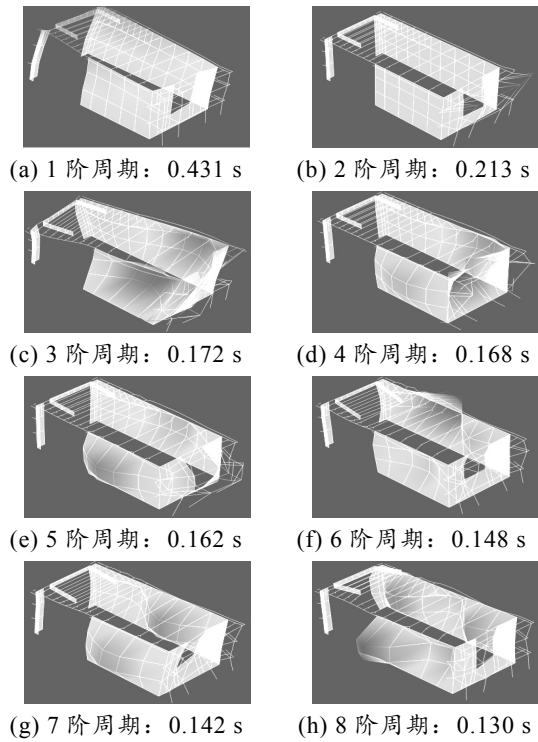


图 4 消声室结构振型计算仿真

为探究消声室实际振动特性,在消声室的顶壁、南侧壁、北侧壁、东侧壁、西侧壁、大门均安装磁电式振动速度传感器(频响范围 0.17~80 Hz),用于测试不同风速下结构振动,消声室内同时安装麦克风传感器用于测试流场低频压力脉动特性。测点位置如图 5 所示,传感器安装实物如图 6 所示。

从幅值角度分析,图 7 为消声室大门全关状态下,垂直于消声室大门或墙体方向的振动峰值与气流风速的关系。其中,消声室大门振动峰值从风速 50 m/s 开始迅速增长,风速 70 m/s 后再次提升,并在风速 85 m/s 时达到最大。而消声室墙体振动峰值同样从风速 50 m/s 开始增长,风速 70 m/s 后明显提升,并在风速 95 m/s 时达到最大。图中可见:1) 消声室墙体或大门垂直方向的振动峰值总体呈现随气流风速提高而增大的现象,且均表现为平稳、增长和高振动 3 阶段;2) 消声室大门的振动峰值明显比墙体振动峰值更大;3) 墙体振动中,顶壁、南侧壁、北侧壁的振动相比于东、西侧壁更为明显。

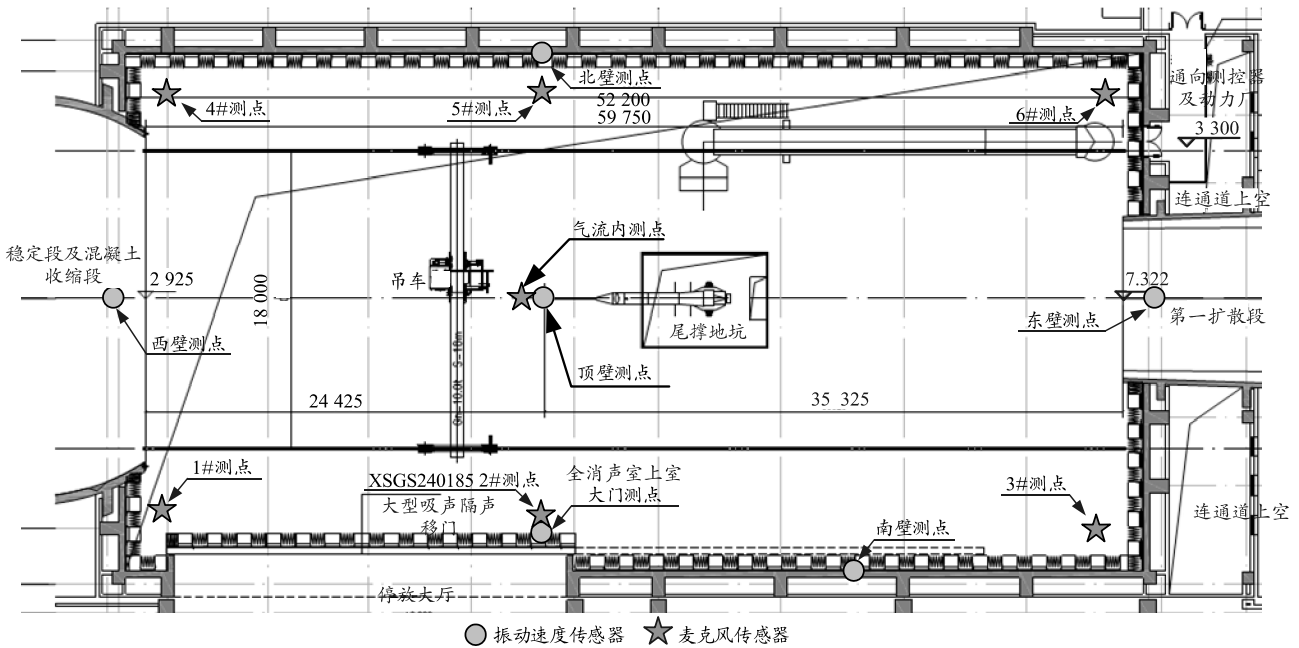


图 5 消声室振动测点布置(俯视)

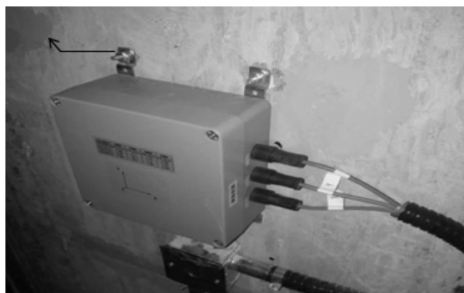


图 6 磁电式速度传感器

从频域角度分析,图 8 描述了消声室计算固有频率(1—8 阶)、实测气流内脉动压力频率和实测振动峰值频率。区域 I 可见,风速 50 m/s 时的气流内脉动压力频率与消声室计算二阶固有频率接近,导致该风速时振动峰值明显增长;区域 II 可见,消声室大门刚性弱于消声室墙体,其实测振动频率明显更低且更接近于计算低阶固有频率,是导致消声室大门振动峰值明显高于墙体振动峰值的原因之一;

区域Ⅲ可见，消声室墙体实测振动频率远离计算低阶固有频率，使墙体振动得到一定程度的抑制。

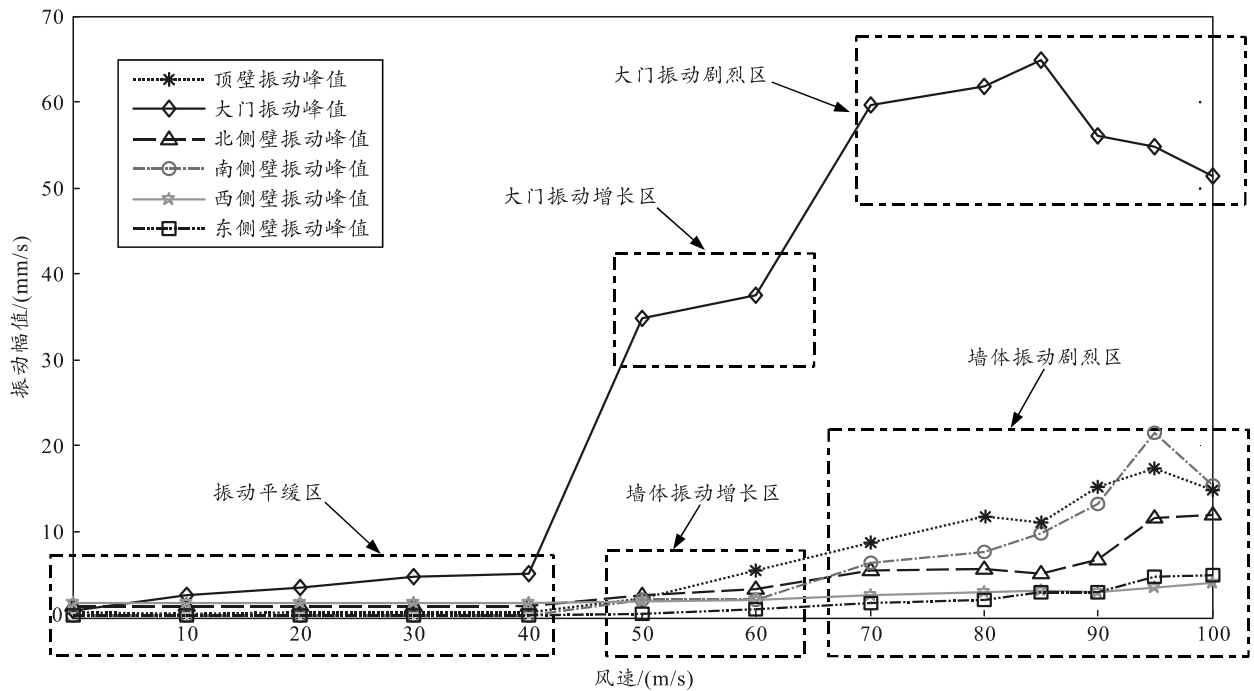


图 7 风速与消声室振动峰值关系

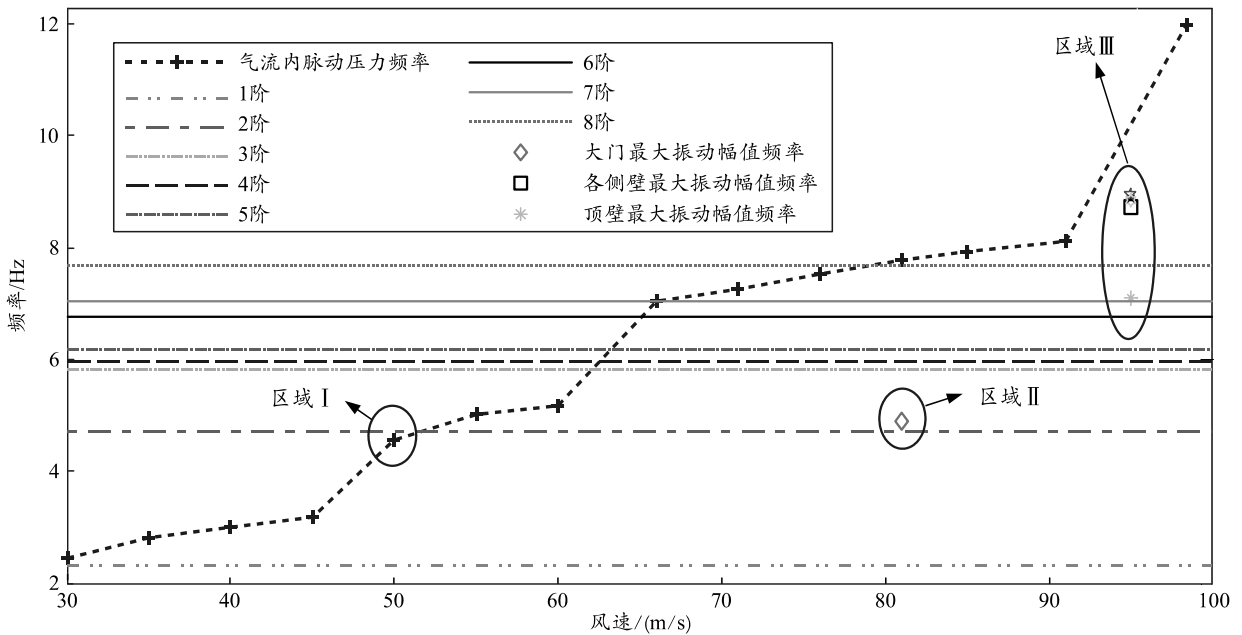


图 8 消声室振动峰值频率、脉动压力频率与固有频率关系

通过上述分析以及风洞运行过程观察，健康监测系统给出大型低速风洞开口试验运行评估建议：

- 1) 消声室大门振动峰值偏高，风洞运维过程中应着重关注大门固定件的结构疲劳破坏情况；
- 2) 消声室墙体的振动峰值总体得到有效抑制，但应尽量避免 95 m/s 风速下长时间运行。

### 3 防护网异物拦截监测诊断应用

防护网是风洞重要的结构组件，布置在动力风

扇系统的上游，主要作用是对风洞流道中偶发的脱落异物进行拦截，防止风洞吹风试验过程中脱落异物直接撞击拐角导流片和风扇叶片造成破坏和安全事故。以往的风洞中，防护网缺乏监测感知和报警能力，即便风洞试验过程中发生脱落异物撞击防护网，试验运行人员也难以第一时间获知，若得不到及时有效处理，仍存在脱落异物冲破防护网撞击下游重要结构和设备的安全风险。

为提高对异物撞击防护网的感知能力，大型低速风洞结构健康监测系统在防护网 4 个底边的张紧结构中安装振动加速度传感器，实现对风洞试验过程中防护网振动状态的实时监测，硬件组成如图 9 所示，工作原理如图 10 所示。具体实施过程中应注

意传感器安装位置的选取，应安装在防护网固定槽盖板以下区域，传感器信号线缆敷设于固定槽内，避免传感器及信号线缆直接承受风洞气流载荷造成信号干扰，同时也避免气流直接流经传感器安装座和传感器产生噪声影响风洞流场品质。

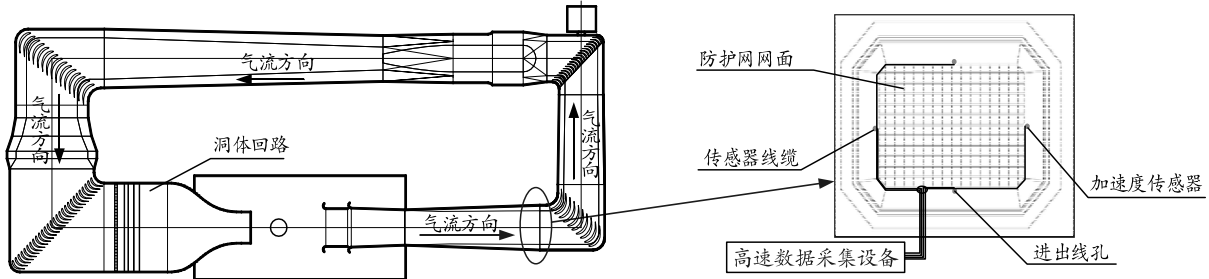


图 9 防护网监测硬件组成

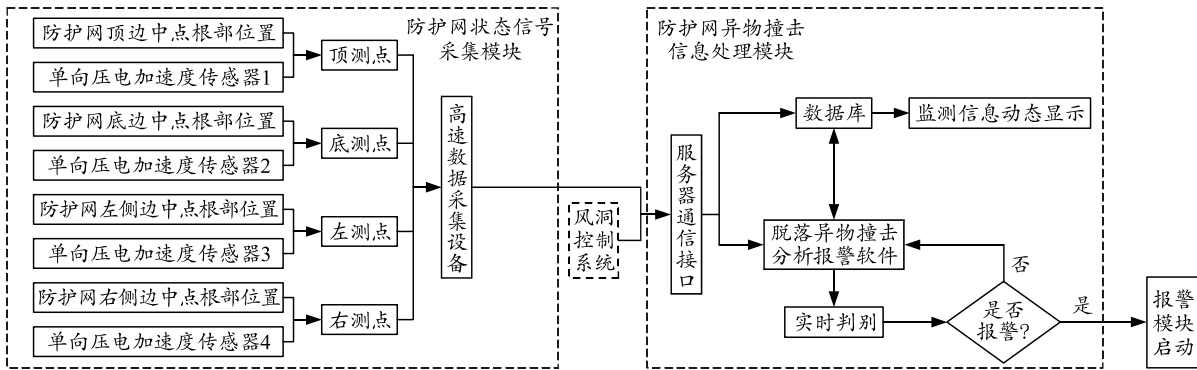


图 10 防护网监测工作原理

在风洞调试初期，消声室内的消声尖劈外包装袋未完全清理干净，风洞运行吹风时隐藏的外包装袋随气流移动到下游并最终撞击到防护网，如图 11 所示。此时，健康监测系统监测到振动信号出现明显的异常增大，如图 12 所示，系统发出报警提示风洞运行人员停车检查，排除异物后再继续试验，有效保障了风洞运行安全。在风洞中实现对防护网的实时状态监测，并成功用于异物撞击防护网报警中。

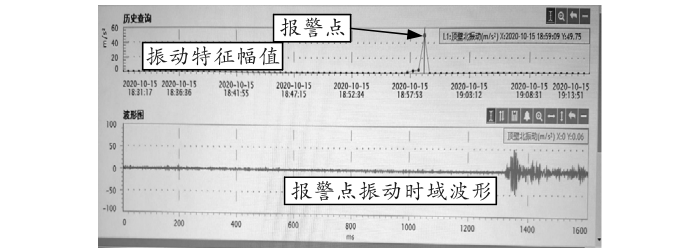


图 12 防护网顶测点异物撞击振动信号

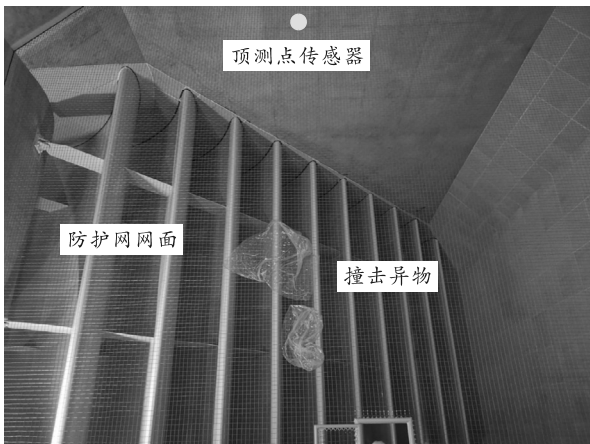


图 11 异物撞击防护网实例

#### 4 结束语

针对大型低速风洞结构健康监测需求，设计构建基于光纤环网和星形连接的混合结构形式的健康监测系统，实现了对宽范围分布设备对象状态数据的采集、分析、监测和报警。在风洞实际调试和运行过程中，该系统发挥了重要作用，在消声室流致振动监测评估和防护网拦截异物监测诊断中尤为显著。其中，系统对消声室流致振动特性进行实时监测，基于监测数据的分析对风洞运维提出了合理建议；另外，对防护网振动状态进行实时监测，成功识别出了异物撞击防护网事件并报警，有效保障了风洞运行安全。