

ICS 号

CCS 号

# 团 体 标 准

T/CWEC XXX—202X

## 混流式水轮机空化声学在线监测系统 技术规范

Technical specification for acoustic on-line monitoring system of

Francis Turbine Cavitation

(征求意见稿)

请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国水利企业协会 发布



# 目 次

ICS 号 .....	i
T/CWEC XXX—202X .....	i
前 言 .....	I
引 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总则 .....	3
5 技术要求 .....	3
6 安装 .....	8
7 空化判断 .....	10
8 维护保养 .....	10
9 文件与资料 .....	10
附 录 A .....	11
(资料性) .....	11



# 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件共分为 9 章和 1 个附录，主要内容包括范围、规范性引用文件、术语和定义、总则、技术要求、安装、空化判断、维修养护、文件与资料等。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国水利企业协会归口。

本文件主要起草单位：水利部产品质量标准研究所、浙江理工大学、扬州大学、浙江大学、南京市水利规划设计院股份有限公司、欣皓创展信息技术有限公司、北京博华信智科技股份有限公司、水利部杭州机械设计研究所、杭州江河机电装备工程有限公司、杭州市质量技术监督检测院、北京河湖智慧水利技术中心、水利部农村电气化研究所、西安理工大学

本文件主要起草人：马光飞、贾晓奇、杨帆、吴大转、黄天增、王启锋、徐朝辉、彭恒义、徐海峰、刘锦南、闫贺、张树涛、丁鹏、王达、黄滨、王环、徐伟、方勇、冯新红、郭鹏程、林哲

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国水利企业协会。

本文件为首次发布。

# 引 言

混流式水轮机内发生空化时，伴随着空泡的产生、发展和溃灭。空泡（群）的存在会造成水体压力波动，混流式水轮机能量特性降低，并影响机组安全稳定运行。空泡（群）溃灭形成的冲击波或者微型射流甚至会造成过流部件表面破坏，使得机组使用寿命大幅度缩短。不断提高水利工程运行和安全监测自动识别准确率，构建水利智能业务应用体系，有效投资智能装备，是我国水利工程数字化改革理念的重要组成部分。

混流式水轮机因适宜于中高水头，且机组运行稳定，结构紧凑，平均效率较高，立轴、卧轴式布置均可，为我国水电站（厂）广泛使用的一种机型。混流式水轮机其工作运行的可靠性和效率决定了整个水电机组的可靠性和效率。建立可信的实时空化在线监测系统，实现对机组空化状态的在线评价和预警，对水轮发电机组的可靠性、高效运行和维修有着积极的意义。

# 混流式水轮机空化声学在线监测系统技术规范

## 1 范围

本文件规定了混流式水轮机空化声学在线监测系统的技术要求,监测项目和测点布置、传感器要求、数据采集设备、数据采集与分析、安装、文件资料等方面的基本要求。

本标准适用于符合下列条件之一的混流式水轮机产品:

- (1) 适用于机组功率在 500 kW~50 000 kW (不含 50 000 kW) 的混流式水轮机;
- (2) 额定水头 15m 至 310m 的混流式水轮机;
- (3) 空化频谱集中在 4kHz~800kHz 频段内空化声波信号的混流式水轮机。

其他类型的混流式水轮机可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 7894-2009	水轮发电机基本技术条件
GB/T 8564—2003	水轮发电机组安装技术规范
GB/T 13384—2008	机电产品包装通用技术条件
GB/T 15468-2020	水轮机基本技术条件
GB/T 15469.1—2008	水轮机、蓄能泵和水泵水轮机空蚀评定 第1部分:反击式水轮机的空蚀评定
GB/T 21718—2021	小型水轮机基本技术条件
GB/T 28570—2012	水轮发电机组状态在线监测系统技术导则
GB/T 51217-2017	通信传输线路共建共享技术规范
DL/T 507-2014	水轮发电机组启动试验规程
DL/T 578-2008	水电厂计算机监控系统基本技术条件
NB/T 35042-2014	水力发电厂通信设计规范

## 3 术语和定义

GB/T 2900.45—2006 国家标准界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

声学在线监测系统 online monitoring system

对混流式水轮机的空化信号进行声学（含振动声学）在线监测、智能分析与故障识别的系统。

### 3.2

**混流式水轮机 francis turbine (randial-axial flow turbine)**

轴面水流接近于径向进入转轮，在固定的转轮叶片上逐渐变向，至转轮出口接近于轴向的反击式水轮机。

### 3.3

**空化 cavitation**

在水轮机流道中局部压力降低至临界压力(一般接近汽化压力)时，水流中的气核开始发育成为气泡，气泡的聚积、流动、分裂和溃灭过程的总称。

### 3.4

**背景噪声 background noise**

水轮机在运行过程中，因叶片转动、尾水管涡带、撞击、机械磨损、电磁振动等而产生噪声的来自测试源以外的所有来源的噪声。

### 3.5

**空化噪声 cavitation noise**

由空泡发生、发展和溃灭过程中产生的诸多随机的脉冲噪声信号叠加而成的噪声。

### 3.6

**可闻声段 audible segment**

指正常人可以听到的声音频率范围：20Hz~20kHz。

### 3.7

**超声段 ultrasonic section**

声音频率高于 20kHz 的声波。

### 3.8

**翼型空化 hydrofoil cavitation**

指的是发生在水轮机转轮叶片上的由于翼型的空间变化导致绝对压力分布不均匀引起的空化。

### 3.9

**间隙空化 clearance cavitation**

指的是由于存在高低压压力差，水流流经窄缝时，由于流速的上升引起局部压力过低而造成的空化。

### 3.10

**空腔空化 cavity cavitation**

指尾水管中心形成涡带所产生的空化。

### 3.11

**局部空化 partial cavitation**

指的是发生在转轮叶片头部和尾部，导叶的端部，形成的叶道涡、叶片脱流以及卡门涡等现象的空

化。

### 3.12

#### 包络谱分析 envelope spectrum analysis

针对非平稳调制信号的处理算法，对声信号进行包络检波，得到包络谱来反映声信号的瞬时频率和能量分布。

### 3.13

#### 循环平稳解调 cyclostationary demodulation

指的是对时间序列具有周期性时变的循环平稳信号进行解调。

### 3.14

#### 功率谱密度 power spectral density

指的是信号功率含量相对于频率的量度。

## 4 总则

### 4.1 基本要求

4.1.1 混流式水轮机空化声学在线监测系统应具备数据采集、数据存储和管理、系统诊断、提供报告、自恢复等基本功能。

4.1.2 声学在线监测系统的信息采集应能对混流式水轮机空化进行识别并预测其发展趋势，具体过程包括：信号测取、特征提取、状态识别和状态分析。混流式水轮机空化声学在线监测系统典型结构流程示意图见附录 A。

4.1.3 声学在线监测系统获得的混流式水轮机空化的声压信号应能够转换成电压信号，经滤波放大等前处理后，对声信号进行实时采集处理并具有报警、保存和结果输出等功能。

4.1.4 混流式水轮机空化的变化趋势，应以数据、图形、表格、曲线和文字等形式进行显示和描述，能及时对设备的异常状态进行预警和报警。

4.1.5 混流式水轮机空化声学在线监测系统宜与水电站计算机监控系统配合使用。

4.1.6 混流式水轮机空化声学在线监测系统应具有良好的扩展功能和系统升级功能，以不断满足水轮机运行管理的需要。

### 4.2 数据来源

4.2.1 监测数据应从布置在混流式水轮机转轮进口位置处、转轮下环接近转轮出口处及尾水管直管段接近转轮出口处等位置处安装的传感器直接采集，工况参数和过程量参数可从相关资料或设备获取。

4.3 混流式水轮机空化声学在线监测系统宜遵循统一的数据标准。

## 5 技术要求

### 5.1 一般要求

5.1.1 声学在线监测系统应根据混流式水轮机安装的地理位置和使用环境条件选用传感器单元和数据

采集单元，上位机宜布置在室内。

## 5.2 系统功能

### 5.2.1 数据采集

在线监测系统应具有历史数据回放功能、数据下载功能，可根据数据检索条件下载相关数据。

### 5.2.2 数据存储与管理

数据存储和管理一般应满足以下要求：

1) 在线监测系统数据服务器存储的数据应满足空化识别需要，至少存储 24 个月的机组稳态、暂态过程（包括瞬态）监测数据，完整记录机组出现异常前后的数据，确保系统能提供完整详尽的数据用于分析水轮机的空化特性。

2) 在线监测系统应有自动管理、检查、清理和维护数据库功能，实时监测硬盘容量信息；当剩余容量低于设定值时应自动发出警告信息，对超过存储时限的数据应进行清理；数据库应提供自动备份和手动备份、增量备份数据的功能。

3) 在线监测系统应具备自动检索功能，用户可通过输入检索运行工况参数快速获得满足条件的数据。

4) 在线监测系统应具有历史数据回放功能；在线监测系统应具备数据下载功能，可根据数据检索条件下载相关数据。

5) 数据库应具备多级权限认证功能，只有授权用户才能访问权限范围内的数据。

### 5.2.3 数据分析

声学在线监测系统具有数据分析的能力，应能提供各种专业的数据分析工具，并根据监测参量的变化，预测空化发展趋势，提供趋势预报的功能。

### 5.2.4 报警功能

1) 声学在线监测系统应提供报警功能，报警定值可根据机组特性和运行工况设定，具体定值应符合 GB/T 8564、DL/T 507 以及主机合同保证值。出现报警时，系统应在监测画面上以醒目的方式进行提示。

2) 声学在线监测系统一般不直接作用于机组停机。

### 5.2.5 辅助诊断

声学在线监测系统应能对水轮机的常见故障或异常现象进行辅助诊断，并能通过历史数据趋势进行分析、评价，提供辅助诊断结论，为机组故障处理或检修提供决策参考。

### 5.2.6 提供报告

声学在线监测系统应能提供混流式水轮机的 2 种主要空化（即翼型空化和空腔空化）监测报告。空化监测报告应反映水轮机运行过程中空化的数值和变化趋势，应对水轮机运行状态提出初步评价，并附有相关图形和图表。报告宜采用 WPS、Word、Excel 等兼容的文件格式。

### 5.2.7 远程监测

声学在线监测系统应具有通过网络实现远程实时在线监测分析的功能。

#### 5.2.8 其他功能

声学在线监测系统还应满足可靠性、安全性、可维修性等功能要求。

### 5.3 系统的基本构成

#### 5.3.1 在线监测系统的组成

声学在线监测系统宜采用分布式开放系统结构，由传感器单元、数据采集单元、传输设备和上位机组成。

#### 5.3.2 传感器单元

声学在线监测系统传感器可采用声传感器（也称声压计、传声器，含水听器）、超声波传感器（俗称超声波压电换能器或者探头）、声发射传感器、振动加速度传感器等。

#### 5.3.3 数据采集单元

声学在线监测系统数据采集单元应由数据采集装置、相关软件、传感器供电电源等设备组成。

#### 5.3.4 传输设备

声学在线监测系统数据采集单元与上位机之间的数据传输可采用有线或无线通信的网络设备联接。

#### 5.3.5 上位机

声学在线监测系统的上位机应由数据服务器、显示器、屏柜、操作台、打印输出、网络服务器、网络安全装置等设备组成。

### 5.4 测点布置

#### 5.4.1 测点布置原则

1) 水轮机空化声学在线监测主要监测特征信号量声波，包括可闻听声波和超声波。混流式水轮机中的空化大体可以分为：翼型空化、局部空化、间隙空化和空腔空化，其中翼型空化和空腔空化最为常见。

2) 空化声学在线监测系统的测点布置应根据不同类型的混流式水轮机的结构特点和特性参数进行合理有效配置。测点应进行编号，并在上位机显示器端用图形显示出测点的位置分布。

3) 传感器的安放应视注重研究的空化发生的部位而定，其原则是距离空化发生的位置愈近愈好，且与声源之间的金属厚度最小（具体依据传感器类型安放）。

4) 传感器应安放在水轮机顶盖上最接近转轮进口位置处、转轮下环接近转轮出口处及尾水管直管段接近转轮出口等处。

#### 5.4.2 可闻声段空化信号

1) 宜采用振动加速度传感器或水听器监测。

2) 振动加速度传感器一般安装在尾水管检修入口门及导叶拐臂处。

3) 水听器一般安装在尾水管直锥段靠近转轮出口处。

#### 5.4.3 超声段空化信号

- 1) 宜采用声发射传感器、水听器或超声波传感器监测。
- 2) 声发射传感器一般安装在尾水管检修入口门及导叶拐臂处。
- 3) 水听器一般安装在尾水管直锥段靠近转轮出口处。
- 4) 超声波传感器一般安装在导叶拐臂、转轮下环底部。

表 1 声传感器安装位置

编号	传感器名称	安装位置	数量 (个)
1.1	振动加速度传感器	可安装在尾水管检修入口门及导叶拐臂处。	1~2
1.2	水听器	可安装在尾水管直锥段靠近转轮出口处。	1
1.3	声发射传感器	可安装在尾水管检修入口门、导叶拐臂处转轮下环、蜗壳等处。	2~4
1.4	超声波传感器	可安装在导叶拐臂、转轮下环底部、尾水管检修入口孔附近、支持盖或者导叶拐臂等处。	1~2

## 5.5 系统的数据采集与分析

### 5.5.1 数据采集与分析功能要求

声学在线监测系统应对水轮机的空化声信号数据进行实时采集和监测，并能够以结构图、表格和曲线等进行显示。应满足下列要求：

- 1) 应提供数据分析工具，根据工况参数、监测量的变化预测水轮机空化状态的发展趋势。
- 2) 应提供数据导入/导出、离线分析功能，并在数据出现异常或超限时应给出报警信号并分析原因。
- 3) 系统能不能准确实现自动分析时，还应依靠人工去进行判断。

## 5.6 传感器

### 5.6.1 振动加速度传感器

振动加速度传感器测量可闻声段空化信号，其性能指标应满足下列要求：

- 1) 灵敏度 ( $\pm 5\%$ )，不宜低于 100 mV/g。
- 2) 频率范围 ( $\pm 3\text{dB}$ )，频响范围宜为 0.8 Hz~20 kHz。
- 3) 测量范围宜为 -50~+50 g。
- 4) 敏感原理宜采用应变式。
- 5) 非线性误差不应大于  $\pm 2\%$  F.S。
- 6) 谐振频率不应小于 26 kHz。
- 7) 适用温度范围宜为 -10 °C~+120 °C。

### 5.6.2 水听器

水听器用于测量可闻声段空化信号或超声段空化信号，其性能指标应满足下列要求：

- 1) 频率范围一般为 0.1Hz~400kHz。

- 2) 最大工作静压力不宜超过 252 dB。
- 3) 带电缆电压灵敏度宜为  $30 \mu\text{V}/\text{Pa} \pm 8 \mu\text{VC}$ 。
- 4) 机组额定功率 60MW 以内。
- 5) 适用温度不应小于  $-10^{\circ}\text{C} \sim +120^{\circ}\text{C}$ 。

### 5.6.3 声发射传感器

声发射传感器用于测量超声段空化信号，其性能指标应满足下列要求：

- 1) 频率范围一般为 50~500 kHz。
- 2) 中心频率不宜超过 150 kHz。
- 3) 最大灵敏度  $1 \text{ V}/(\text{m/s})$  不宜低于 69 dB。
- 4) 带通滤波频率：20k~500 kHz。
- 5) 输出形式宜为电压、差分输出。
- 6) 适用温度宜为  $-10^{\circ}\text{C} \sim +120^{\circ}\text{C}$ 。

### 5.6.4 超声波传感器

超声波传感器用于测量超声段空化信号，一般采用超声压电换能器，其性能指标应满足下列要求：

- 1) 频率范围一般为 10kHz~800kHz。
- 2) 线性频率范围 10 kHz~500kHz。
- 3) 接收灵敏度宜为  $-228 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}(1\text{V}/\mu\text{Pa})$ 。
- 4) 输出形式宜为电压、差分输出。
- 5) 适用温度宜为  $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ 。

## 5.7 硬件与软件

### 5.7.1 数据采集装置

数据采集装置应满足以下基本要求：

- 1) 数据采集装置内的部件应标准化、模块化，易于扩展和替换。
- 2) 数据采集装置应采用容错设计，具有自诊断和抗干扰功能。
- 3) 数据采集装置应能完成数据采集、存储、分析、传送、显示等功能。
- 4) 数据采集装置应实现对振动加速度信号和超声波信号的高速实时采集。
- 5) 数据采集装置应能对信号进行预处理，如滤波和放大。
- 6) 加速度传感器用来获得噪声信号，超声波传感器用来获得空化过程中释放出的超声波信号，为水轮机健康状态提供评价依据。
- 7) 数据采集装置应具有串行通信接口或以太网通信接口。
- 8) 数据采集模块应能设定采样周期，便于进行整周期采样。
- 9) 各数据采集模块应具有通道和模块状态指示灯。
- 10) 各数据采集模块之间应相互独立、互不影响，单个模块故障应不影响系统整体运行。

### 5.7.2 上位机设备

声学在线监测系统的上位机应采用标准化、开放式的硬件结构，所选设备应具备数据存储和管理功能，应采用成熟经济的主流产品，并能够满足在线监测系统的远景发展要求。

### 5.7.3 操作系统

声学在线监测系统应采用多任务、分级管理功能的可靠的操作系统，应具有文件的打开、关闭、读出和记录等基本管理功能。

### 5.7.4 支持软件

声学在线监测系统应配备成熟的支持软件，系统应采用时钟同步软件。

### 5.7.5 应用软件

声学在线监测系统应提供用于完成本文件 5.5.1 所述功能的应用软件，功能软件模块或任务模块应具备完整性和独立性，软件环境的设计应易于应用软件的补充、修改或移植。

### 5.7.6 数据库

声学在线监测系统的数据库应提供符合相关标准的开放的数据访问接口、支持快速实时存取和处理、保持数据的完整性和统一性，并应满足以下要求：

- 1) 数据库的结构定义应包括在线监测系统所需要的全部数据项。
- 2) 实时数据应具有报警允许、数据质量码或控制闭锁等相关属性。
- 3) 历史数据库应提供历史数据存储、查询和备份功能。

### 5.7.7 通信软件

声学在线监测系统的通信软件设计应采用开放系统互联(OSI)协议或适于工业控制的标准协议，并应满足以下要求：

- 1) 局域网络通信协议宜采用标准协议，网络及传输宜采用传输控制/网际(TCP/IP)协议。
- 2) 局域网通信交换数据量及其额度应满足功能要求和特性需求。
- 3) 通信故障时应保证在线监测系统的稳定运行不受通信状态的干扰。
- 3) 通信设计应符合 GB/T 51217-2017 规范的有关规定。

### 5.7.8 系统自诊断软件

声学在线监测系统应提供自诊断软件，系统自诊断软件应满足以下要求：

- 1) 在线诊断软件在发现故障时应报警显示和记录。
- 2) 在线诊断软件应对在线监测系统的设备进行测试检查。
- 3) 离线诊断软件和工具应对在线监测系统的设备进行查找故障的诊断。

## 6 安装

### 6.1 传感器的安装

6.1.1 声学在线监测系统的传感器安装应满足以下要求：

- 1) 安装位置应符合设计要求。
- 2) 安装位置的表面应平整, 无焊疤、凹坑、变形等表面缺陷, 设备与传感器的接触面应经打磨处理露出金属光泽, 安装完成后应将处理表面进行补漆。
- 3) 安装方式不应改变被检测设备的完整性和影响设备的正常运行。
- 4) 传感器与被测工件表面应牢固结合, 可采用螺栓固定、胶粘接、磁吸等方法。
- 5) 传感器安装完成后宜采用护罩进行保护, 护罩的结构和安装方式不应影响传感器产生干扰, 传感器外壳和护罩应采用耐腐蚀、抗老化的材料制作。
- 6) 安装场地应采用防尘措施, 宜在主体工程施工完成后安装在线监测系统设备, 或采取有效措施防止施工期间内粉尘对在线监测系统设备造成损坏。

## 6.2 线缆敷设与防护

### 6.2.1 在线监测系统线缆敷设与防护应满足以下要求:

- 1) 传感器信号线缆敷设应根据被测设备的结构形式布置, 并应满足“平、齐、直”的外观要求。
- 2) 线缆的折弯半径不应小于线缆直径的 12 倍。
- 3) 固定布置的传感器信号线缆应采用固定的套管或护罩防护, 套管或护罩应采用耐腐蚀、抗老化材料制作。
- 4) 随被检工件移动的传感器信号线缆应采用内置钢丝绳、具有收放功能的专用线缆。

## 6.3 数据采集箱安装与防护

6.3.1 声学在线监测系统的数据采集箱应安装在固定建筑物上, 应采取措施避免电磁干扰、雨雪、风沙、粉尘、有害物等的影响。

6.3.2 数据采集箱应采用耐腐蚀、抗老化的材料制作, 应具有检查、维护所需的作业平台和照明设施。

## 6.4 接线

### 6.4.1 声学在线监测系统的接线应满足下列要求:

- 1) 传感器信号线的连接应采取锡焊搭接, 焊剂采用无腐蚀性焊剂, 并采取防水、密封、绝缘等措施。
- 2) 位于水下的信号线与传输线缆的连接, 接头应集中放置在密封的承受外水压力的固定容器内。

## 6.5 系统接地

6.5.1 声学在线监测系统接地应与水电站接地网可靠地联接, 在线监测系统的设备外壳、交流电源、逻辑回路、信号回路和电缆屏蔽层应符合 DL/T 578 的有关规定, 并应满足下列要求:

- 1) 设备外壳或裸露的非载流的金属部分应接地。
- 2) 电压超过 150 V 的经过隔离的交流电源应接地。
- 3) 未隔离的所有计算机直流回路中应只有一个接地点。
- 4) 信号和电缆屏蔽层的接地宜考虑相应传感器或其他链接设备的接地点, 避免两点接地, 宜选择在线监测系统接收端接地。

## 7 空化判断

### 7.1 包络谱分析方法判断空化

包络频谱出现低频谱线，其频率范围在轴频的 20%~40%，用以下公式计算幅值监测因子 factor:

$$\text{factor} = \frac{A(f_i)}{\frac{1}{2f_b} \left[ \int_{f_i-f_b}^{f_i+f_b} A(\alpha) d\alpha - A(f_i) \right]} \quad (7-1)$$

上式中， $\alpha$ 为频率值， $f_b$ 为带宽，通常取 2~5Hz， $f_i$ 为对应低频谱线的频率值， $A(f_i)$ 为对应谱线包络谱幅值，当幅值  $A(f_i)$ 监测因子大于等于 1.5 时可以判断空腔空化。

### 7.2 循环平稳解调方法判断空化

循环平稳解调方法通过图谱载波功率  $RP$  进行判断，载波功率  $RP$  计算式如下:

$$RP = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} |\gamma_x(\alpha, f)| df \quad (7-2)$$

$\gamma_x(\alpha, f)$ 表示谱相干，定义如下:

$$\gamma_x(\alpha, f) = \frac{SC_X(\alpha, f)}{\sqrt{SC_X(f)SC_X(f - \alpha)}} \quad (7-3)$$

$SC_X(\alpha, f)$ 表示谱相关，定义如下:

$$SC_X(\alpha, f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{T\Delta f} \int_{-T/2}^{T/2} x_{\Delta f}(t, f + \alpha) x_{\Delta f}^*(t, f) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (7-3)$$

当循环频率等于轴频率时，即 $\alpha=f_s$ ，计算出轴频处相对载波功率指标  $RPf_s$ ，当  $RPf_s \geq 0.1$  时，可以判断为翼型空化。 $x_{\Delta f}(t, f)$ 表示带宽为 $\Delta f$ 中心频率为 $f$ 的信号，\*代表共轭， $T$ 代表周期， $SC_X(\alpha, f)$ 代表的谱相关， $SC_X(f)$ 代表频率为 $f$ 处的谱函数， $\gamma_x(\alpha, f)$ 代表谱相干，是一个二维函数。

### 7.3 功率谱密度方法判断空化

超声段（20kHz 以上）功率谱密度能量大于可闻声段（0~20kHz）功率谱密度能量 120%以上，可以判段间隙空化或者局部空化。

## 8 维护保养

8.1 声学在线监测系统应按照使用说明书的要求，进行定期维护和保养，开展系统测试和试验，并提供相应报告。

## 9 文件与资料

9.1 声学在线监测系统文件应包括方案设计书、安装手册、使用手册、维护手册和试验文件等完整的、格式统一的纸质文件，全部最终文件应反映在线监测系统现场安装应用时的情况。

# 附录 A

## (资料性)

### 混流式水轮机空化声学在线监测系统典型结构流程示意图

混流式水轮机空化声学在线监测系统典型结构流程示意图见图 A.1。

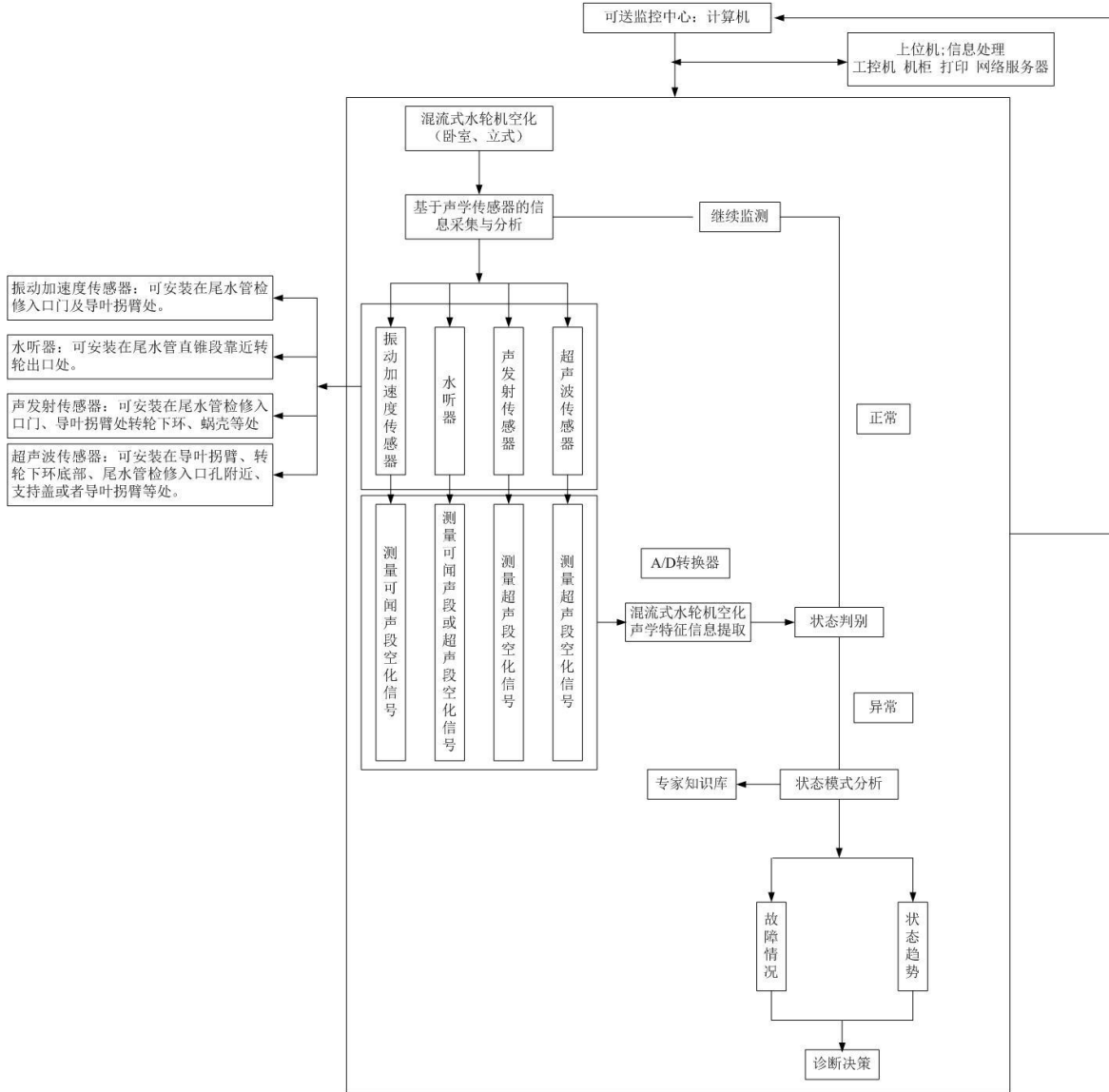


图 A.1 混流式水轮机空化声学在线监测系统典型结构流程示意图