

ICS

CCS

团 体 标 准

T/CMES XXXX—20XX

代替 T/CMES XXXX—20XX

无损检测 化工成套装置监测 第2部分 超声厚度监测

Nondestructive testing—Chemical plant equipment
monitoring—Part 2: Ultrasonic test for thickness monitoring

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会团体标准管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

目 次.....	II
前 言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 超声厚度监测方法.....	2
5 超声厚度监测系统.....	3
6 监测单元要求.....	3
7 服务器要求.....	4
8 安装.....	5
9 监测数据用于承压设备定期检验时的特殊要求.....	6
10 运行管理要求.....	7

中国机械工程学会标准征求意见稿

前 言

本标准依据 T/CAS 1.1—2017《团体标准的结构和编写指南》的有关要求编写。

本标准起草单位：中国特种设备检测研究院，

本标准起草人：

考虑到本标准中的某些条款可能涉及专利，中国机械工程学会不负责对该类专利的鉴别。

本标准首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会标准征求意见稿

无损检测 化工成套装置监测 第2部分 超声厚度监测

1 范围

本标准规定了超声厚度监测方法、方式、设备要求、系统要求、数据分析处理要求等。
本标准适用于在用期间化工成套装置中金属和非金属材料的超声厚度监测。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- JJF 1126 超声波测厚仪校准规范
- GB/T 11344 无损检测 超声测厚
- GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 17618-2015 电子电气产品-辐射骚扰电压试验
- GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义
- GB/T 22239-2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- GB/T 23900-2009 无损检测 材料超声速度测量方法
- GB/T 38881 无损检测 云检测 总则
- GB/T 50343-2017 建筑物电子信息系统防雷技术规范
- 202405-10008-C 无损检测 化工成套装置监测 第1部分 总则

3 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 20737 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 在线监测 online monitoring

应用现代电子、信息、通信及计算技术，采用仪器测量方法，实现管道壁厚数据实时采集、传输、分析、管理的活动。

3.2 监测点 monitoring point

直接或间接设置在被监测对象上能反映其壁厚变化特征的观测点。

3.3 监测单元 monitoring unit

将特定的被测量信息（包括温度、壁厚信息等）按一定的规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。

3.4 监测设备 monitoring instrument

监测单元、数据传输中继、监测服务器等硬件的统称。

3.5 监测系统 monitoring system

由监测设备组成，实现一定监测功能的软件和硬件的集成。

3.6 监测数据采集周期 monitoring data collection cycle

监测单元采集数据的时间间隔。

3.7 监测总时长 total duration of monitoring

在该监测点需要监测总时长。

4 超声厚度监测方法

4.1 方法概述

4.1.1 通过测量监测单元发出的超声波信号一次、二次或多次反射穿过被测材料的超声脉冲信号时间来确定被测材料的厚度。厚度通过已知声速与脉冲回波时间的乘积除以穿过次数来计算，见公式（1）。

$$d = \frac{v \times t}{n} \quad (1)$$

式中：

d——厚度；

v——声速；

t——测量时间；

n——超声波穿透次数。

4.1.2 测量声速会根据材料和温度变化而变化，声速确定方法参考 GB/T 23900-2009。

4.1.3 超声测厚方法包括：单次回波法、单次回波延时法、多次回波法，具体实现方法参考 GB/T 11344。

4.2 监测位置选择

4.2.1 在装置运行情况下，原则上应在易于进行保温拆卸及其他安装作业的位置进行监测。

4.2.2 部位选择应在容易发生壁厚减薄的设备或部位，如弯头、相变区等，具体布置位置建议见附录 A。

4.2.3 对于壁厚减薄严重的代表性部位，应适当加密厚度监测点数量。

4.2.4 监测数据采集周期应根据介质的腐蚀性、冲蚀情况、部位的重要性、设备或管道的使用年限而定。

4.3 设备选型要素

设备选型应重点考虑以下要素：

4.3.1 测量精度要求

- 4.3.2 被测对象的设计温度、使用温度；
- 4.3.3 监测数据采集周期和监测总时长；
- 4.3.4 被监测对象材料；
- 4.3.5 被监测对象厚度；
- 4.3.6 被监测对象表面状况；
- 4.3.7 被监测对象曲率；
- 4.3.8 现场供电条件、安装条件、通讯方式和超声厚度监测设备的可靠性指标；
- 4.3.9 应满足现场防护和防爆要求。

5 超声厚度监测系统

超声厚度监测系统宜满足 GB/T 38881 的要求，一般包括监测单元、服务器两部分，必要时可包含数据传输中继。

- 5.1 超声厚度监测系统是化工成套装置监测系统的一部分，用于提供厚度数据，支撑总体评价分析和预警。
- 5.2 超声厚度监测单元用于采集被监测对象超声信号，并上传到服务器。
- 5.3 服务器用于接收监测单元采集到的超声信号，分析信号质量、计算厚度以及其他数据处理，保存监测的数据。
- 5.4 当监测单元不具备依赖已有通讯设施同服务器进行通讯时，可增加数据传输中继，使得监测单元同服务器能够建立有效链接。

6 监测单元要求

6.1 功能要求

- 6.1.1 自带电池供电或外接电源供电；
- 6.1.2 通过无线或有线的方式，将数据传输至服务器中；
- 6.1.3 宜可通过服务器调节监测数据采集周期。

6.2 安装要求

- 6.2.1 满足被测对象曲率、温度等要求；
- 6.2.2 安装后应满足长周期使用要求，并给出维护建议。

6.3 出厂要求

- 6.3.1 示值的分辨力、重复性、最大允许示值误差测量方法应采用 JJF1126 中规定的要求；
- 6.3.2 示值的分辨力、重复性、最大允许示值误差应至少满足下表第一行的要求，宜满足下表第二

行的要求；

分辨力	重复性	最大允许示值误差	
		测量范围下限至 10mm 以下	10mm 至测量范围上限
0.1	0.1	± 0.1	$\pm \left(0.1 + \frac{H}{100} \right)$
0.01	0.03	± 0.05	$\pm \left(0.01 + \frac{H}{200} \right)$

注：表中 H 为标准厚度块的标称值。

6.3.3 当监测单元需要用于直径 40mm 以下曲面壁厚测量时，应考虑曲面的影响；分辨力、最大允许示值误差应根据适配的管径，至少满足下表要求；

分辨力	标准圆管的规格	最大允许示值误差
0.1	外径 $\phi 40$ 壁厚 3	± 0.2
0.01	外径 $\phi 30$ 壁厚 2	± 0.10

6.3.4 当监测单元不单独具备厚度测量功能时，应同服务器联合测试。

6.4 设备可靠性

6.4.1 设备应进行相应的可靠性测试实验；

6.4.2 设备可靠性应满足业主方或数据使用方需求。

6.5 环境适应性

6.5.1 具备同使用环境相适应的防水、防尘等级，一般宜不低于 IP67；

6.5.2 具备同使用环境相适应的防爆等级和温度适应性；

6.5.3 具备同使用环境相适应的电磁防护能力；

6.5.4 当在振动环境下使用时，具备同使用环境相匹配的振动适应能力。

6.6 安装前校准

6.6.1 安装前校准应参考 JJF 1126 使用校准试块进行校准。校准试块的声速和厚度应是已知的。试块的厚度宜覆盖被监测对象的厚度范围。其中一个试块的厚度值应不小于监测单元测量范围的最大厚度，试块的另一个厚度值应不大于监测单元测量范围的最小厚度。安装前校准可由厂家使用有效可溯源校准试块进行校准，必要时可由第三方进行校准。

6.6.2 监测设备应具备温度补偿，并应对温度测量准确性进行安装前校准。温度测量的安装前校准应由制造企业在出厂时进行。

7 服务器要求

7.1 超声厚度监测服务器，应具备以下基本功能：

- a) 能够显示监测设备的位置，以便现场巡查设备
- b) 数据自动采集；
- c) 数据存储；
- d) 监测数据分析；
- e) 显示、统计和报表；
- f) 对壁厚在线监测数据超出阈值后的预警指示；
- g) 其他辅助功能，一般包括：剩余电量指示、数据备份、自诊断及故障指示等功能；
- h) 监测数据采集周期可根据设备需要或业主方要求适时调整；

7.2 本地部署的超声厚度监测服务器应符合以下基本性能要求

- a) 系统平均无故障工作时间不应小于 40000 小时；
- b) 抗干扰及防雷接地应符合 GB 17618、GB 50343 的有关规定；
- c) 机房建设应满足 GB 50174 要求。

7.3 预警

7.3.1 当壁厚值低于壁厚预警门限或腐蚀减薄速率大于腐蚀减薄速率门限时，应进行预警。

7.3.2 壁厚预警门限应根据设备设计和业主方确定，一般不低于 1.2 倍最小允许壁厚。

7.3.3 壁厚减薄速率门限的正常值应根据对象内介质、设计要求、使用要求等方面综合确定。

7.3.4 预警信息应至少包括：点位编号和位置、设计壁厚、实测壁厚值、壁厚减薄速率、壁厚预警门限、壁厚减薄速率门限、被监测对象温度。

7.4 数据保存和数据安全性要求

7.4.1 数据保存要求

- a) 原始监测数据、数据操作日志等应保存不少于 10 年；
- b) 应建立双存储机制。

7.4.2 数据安全性要求

- a) 设置分级权限管理，禁止未授权访问；
- b) 个人登录宜采用双重认证；
- c) 关键操作（如数据删除、参数修改）应保留操作日志记录，；
- d) 监测单元与服务器之间、关联服务器之间的数据传输应采用加密协议，防止数据泄露或篡改。

8 安装

8.1 监测点位表面应无影响监测的障碍物和干扰监测的异物，如有影响监测的油漆、铁屑、疏松腐蚀残余或金属颗粒，以及易造成换能器接触面损坏的尖突等。

8.2 耦合

8.2.1 应充分考虑使用时长、工件温度等因素选择合适的耦合剂。

8.2.2 宜采用可以固化的有较好透声性能的材料作为耦合剂。

8.2.3 当被测材料可能出现较高温度时，可采用硬质耦合材料或者硬耦合的方式。当采用此方法时应完善安装工艺，保证探头对被测工件保持较高的压力。在使用过程中，应关注这个压力，并定期进行维护。

8.2.4 电磁超声监测可不考虑耦合剂。

8.2.5 对于监测过程的耦合状态，应参考第9章的相关规定依据波形可靠性指标进行评价。

8.3 应对超声测厚监测单元、线缆等加以必要的防护措施。

9 监测数据用于承压设备定期检验时的特殊要求

9.1 监测单元定期核验

9.1.1 对于在用阶段的校准，可将监测设备拆下来使用试块进行核验，也可通过其他物理量溯源实现对监测设备进行核验。当使用其他物理量核验时，应参考9.1.2中规定的内容执行。

9.1.2 当使用其他物理量核验时，应满足以下条件：

- a) 设备具备被测对象温度测量功能；
- b) 测量被测对象温度的传感器经过有效量值传递并在有效期内，或满足9.1.3条的规定；
- c) “温度-声速表”适配被测材料；
- d) 用于保证采样率的系统时钟可被有效溯源；
- e) 并应采用9.1.4中规定的波形可靠性指标对获得的每组波形数据进行评估。
- f) 耦合方式适用于长期监测；
- g) 对于监测位置没有发生移动时，应统计分析最近一段时间（不少于10个点）测量结果的分布，计算出平均值和方差；当测量结果偏差较大时应对监测结果的异常进行预警。

9.1.3 当使用期间不能将监测单元拆卸下来进行温度矫正时，应满足以下条件：

- a) 设备应至少包含两个温度校准监测单元，同时测量被检测对象的温度；
- b) 设备出厂时应温度校准监测单元进行校准，温度范围包含了被检测对象可能工作的温度；
- c) 在使用过程中，两个温度校准监测单元的测量结果应相近，温度波动趋势应一致；
- d) 温度校准监测单元测量结果的波动应同大气温度、工作工况，被测工件介质温度的波动规律、波动幅度吻合；
- e) 应依据本条c)~d)的内容，定期对监测单元温度监测单元测量结果进行人工评估，评估周期不大于6个月；当温度出现异常波动时也应进行人工评估。

9.1.4 波形可靠性指标，包括：

- a) 多次回波波形信噪比；
- b) 相近测厚结果一致性；
- c) 相邻回波厚度测量结果离散系数；
- d) 波形宽度；
- e) 波形畸变率。

具体计算方法见附录B。

9.2 服务器

- a) 原始监测数据、数据操作日志等保存时间不少于 30 年或永久保存；
- b) 主服务器数据应实时备份至独立存储设备；
- c) 应部署防火墙系统,并定期委托第三方机构对数据安全体系进行评估,应至少满足 GB/T 22239 规定的安全保护等级第二级要求。

10 运行管理要求

- 10.1 应指定人员负责监测设备的日常检查和维护工作。
- 10.2 监测单元位置信息应根据实际情况的变化及时更新。
- 10.3 应对监测系统每年至少进行 1 次系统检查,记录存档备查。
- 10.4 监测系统发出预警信息时,值班人员应按照规定程序及时处置,处置结果应记录备案。

附录 A
资料性附录
监测点布置位置建议

A.1 下列易腐蚀和冲刷部位应优先考虑布点：

- A.1.1 管线腐蚀冲刷严重的部位：弯头、大小头、三通及喷嘴、阀门、调节阀、减压阀、孔板附近的管段等；
- A.1.2 流速大（大于 30m/s）的部位，如：常减压转油线、加热炉炉管出口处、机泵出口阀后等；
- A.1.3 环烷酸腐蚀环境下的气液相交界处和液相部位；
- A.1.4 硫腐蚀环境下气相和气液相交界处；
- A.1.5 流体的下游端（包括焊缝、直管）容易引起严重冲刷的部位；
- A.1.6 同一管线的热端；
- A.1.7 换热器、空冷器的流体入口管端；
- A.1.8 塔、容器和重沸器、蒸发器的气液相交界处；
- A.1.9 换热器、冷凝器壳程的入口处；
- A.1.10 流速小于 1m/s 的管线（包括水冷却器管束），有沉积物存在易发生垢下腐蚀的部位；
- A.1.11 盲肠、死角部位，如：排凝管、采样口、调节阀副线、开停工旁路、扫线头等。
- A.2 输送腐蚀性较强介质的管道，直管段长度大于 20m 时，一般纵向安排三处测厚点，长度为 10~20m 时，一般安排两处，小于 10m 时可安排一处。
- A.3 介质腐蚀性较轻的管道一般在直管段（两个弯头间的连接管）安排一处测厚点，在弯头处安排一处测厚点。
- A.4 管线上的弯头、大小头及三通等易腐蚀、冲蚀部位应尽可能多布置测厚点。
- A.5 考虑现场实际，一般不要将在线测厚点选在测厚人员不易操作的位置（腐蚀特别严重，需特别重视的部位除外）。
- A.6 对大小头、弯头、三通管、调节阀或节流阀后、集合管等有关管道常见结构的布点位置可参考附图。
- A.7 管道上同一截面处原则上应安排 4 个测厚点，一般布置在冲刷腐蚀可能严重的部位和焊缝的附近（主要在介质流向的下游侧）

附录 B
资料性附录
波形可靠性指标计算方法

B.1 第 N 次回波信噪比

B.1.1 回波定位与特征提取

B.1.1.1 在原始信号中检测所有回波事件，确定各次回波的时域位置；

B.1.1.2 提取第 N 次回波的波峰幅值，记为 A_N

B.1.2 噪声基准计算

B.1.2.1 确定第 N 次与第 N+1 次回波之间的中间点时刻 $t_{mid}^{(N)}$

B.1.2.2 以 $t_{mid}^{(N)}$ 为中心，向两侧扩展 2 个振荡周期的时间窗口：

$$T_{noise}^{(N)} = [t_{mid}^{(N)} - 2T_{osc}, t_{mid}^{(N)} + 2T_{osc}]$$

其中：

T_{osc} ——信号振荡周期

$t_{mid}^{(N)}$ ——第 N 次与第 N+1 次回波间的中间时刻

B.1.2.3 在 $T_{noise}^{(N)}$ 时间窗口内提取信号幅值的最大值，记为 $N_{max}^{(N)}$

B.1.3 第 N 次回波信噪比计算

$$SNR^{(N)} = \frac{A_N}{N_{max}^{(N)}}$$

其中：

A_N ——第 N 次回波的波峰幅值

$N_{max}^{(N)}$ ——噪声窗口内的最大幅值

B.2 相近测厚结果一致性

B.2.1 相近测厚数据采集

B.2.1.1 取最近 N 次测量的厚度值 (N 宜大于 30) 构成历史数据集

$$H_{prev} = h_1, h_2, \dots, h_N$$

B.2.2 历史数据统计量计算

B.2.2.1 计算历史均值：

$$\mu_{\text{prev}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i$$

B.2.2.2 历史标准差（样本无偏估计）：

$$\sigma_{\text{prev}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (h_i - \mu_{\text{prev}})^2}$$

B.2.3 突变判定条件设定

B.2.3.1 计算当前值与历史均值的偏差：

$$\Delta h = |h_{\text{curr}} - \mu_{\text{prev}}|$$

其中：

h_{curr} ——本次测量的厚度值

B.2.3.2 若满足以下条件，判定为厚度发生突变：

$$\Delta h > k \cdot \sigma_{\text{prev}}$$

其中：

k ——判定系数（推荐 $k = 3$ ）

B.3 相邻回波厚度测量结果离散系数

B.3.1 回波时间差测量

B.3.1.1 测量相邻回波时间间隔：

$$\begin{cases} \Delta t_{12} = t_2 - t_1 \\ \Delta t_{23} = t_3 - t_2 \\ \Delta t_{34} = t_4 - t_3 \end{cases}$$

其中：

t_n ——第 n 次回波到达时刻

B.3.2 厚度转换计算

B.3.2.1 根据声速 v 计算层间厚度：

$$\begin{cases} d_{12} = \frac{v \cdot \Delta t_{12}}{2} \\ d_{23} = \frac{v \cdot \Delta t_{23}}{2} \\ d_{34} = \frac{v \cdot \Delta t_{34}}{2} \end{cases}$$

其中：

v ——材料声速

B.3.3 离散系数计算

B.3.3.1 计算厚度测量序列的统计量:

$$\begin{cases} \mu_d = \frac{1}{3}(d_{12} + d_{23} + d_{34}) \\ \sigma_d = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (d_{k(k+1)} - \mu_d)^2} \end{cases}$$

B.3.3.2 计算离散系数:

$$C_v = \frac{\sigma_d}{\mu_d} \times 100\%$$

B.4 时域半高宽

B.4.1 脉冲特征提取

B.4.1.1 定位超声脉冲 $S(t)$ 的时域峰值点, 记录峰值幅值:

$$A_p = \max(S(t))$$

B.4.2 阈值电平确定

B.4.2.1 计算 50%峰值对应的幅度阈值:

$$A_{th} = 0.5 \times A_p$$

B.4.3 边界点检测

B.4.3.1 在脉冲上升沿检测首次超过阈值的时刻 t_1 :

$$t_1 = \min\{t \mid S(t) \geq A_{th}\}$$

B.4.3.2 在脉冲下降沿检测最后低于阈值的时刻 t_2 :

$$t_2 = \max\{t \mid S(t) \geq A_{th}\}$$

B.4.4 半高宽计算

B.4.4.1 时域半高宽计算公式:

$$FWHM = t_2 - t_1$$

B.5 第 N 次回波的波形畸变率

B.5.1 参考波形标定

B.5.1.1 在设备安装稳定后, 采集首次测量的完整波形: $S_{ref}(t)$;

B.5.1.2 人工标定前 N 次回波的有效分析窗口:

$$T_{win}^{(n)} = t_2^{(n)} - t_1^{(n)}$$

$$\text{Rect}(x) = \begin{cases} 1 & x \in [0, 1] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$W_{\text{ref}}^{(n)}(t) = S_{\text{ref}}(t) \cdot \text{Rect}\left(\frac{t - t_1^{(n)}}{T_{\text{win}}^{(n)}}\right)$$

其中：

$t_1^{(n)}$ ——第 n 次回波窗口起始时间

$t_2^{(n)}$ ——第 n 次回波窗口终止时间

B. 5. 2 多维度特征提取

B. 5. 2. 1 计算时域特征（均方根误差）：

$$D_{\text{time}}^{(n)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_{\text{ref}}^{(n)}(i) - W_{\text{test}}^{(n)}(i))^2}$$

其中：

N ——采样点数

B. 5. 2. 2 计算频域特征（功率谱 KL 散度）：

$$D_{\text{freq}}^{(n)} = \sum_k P_{\text{ref}}^{(n)}(k) \log \frac{P_{\text{ref}}^{(n)}(k)}{P_{\text{test}}^{(n)}(k)}$$

其中：

$P(k) = |\text{FFT}(W^{(n)})|^2$ ——功率谱

B. 5. 2. 3 计算梅尔频率倒谱系数：

$$M_m = \sum_k |X(k)|^2 \cdot H_m(k)$$

$$c_i = \sum_{m=1}^M \log(M_m) \cdot \cos\left(\frac{\pi i(m-0.5)}{M}\right)$$

$$D_{\text{mfcc}}^{(n)} = \sqrt{\sum_{i=1}^L (c_{\text{ref},i}^{(n)} - c_{\text{test},i}^{(n)})^2}$$

其中：

$H_m(k)$ ——三角滤波器组

B. 5. 3 综合畸变率计算

B. 5. 3. 1 特征归一化：

$$\hat{D}^{(n)} = \frac{D^{(n)} - \mu_D^{(n)}}{\sigma_D^{(n)}}$$

B. 5. 3. 2 加权融合计算第 N 次回波的波形畸变率：

$$\eta^{(n)} = 0.4D_{\text{time}}^{(n)} + 0.3D_{\text{freq}}^{(n)} + 0.3D_{\text{mfcc}}^{(n)}$$

中国机械工程学会标准征求意见稿