



黑龙江省地方计量技术规范

JJF (黑) XX—2025

复合材料平面应力超声测量仪校准规范

Calibration Specification for Ultrasonic Measurement of Planar

Stress in Composite Materials

(审定稿)

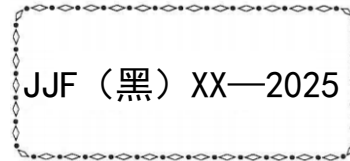
XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

黑龙江省市场监督管理局 发布

复合材料平面应力超声测量 仪校准规范

Calibration Specification for Ultrasonic
Measurement of Planar Stress in Composite
Materials



归口单位：黑龙江省市场监督管理局

主要起草单位：哈尔滨工业大学

黑龙江省计量检定测试研究院

中国铁路哈尔滨局集团有限公司质量技术

监督所

黑龙江省知识产权保护中心

本规范委托哈尔滨工业大学负责解释

本规范主要起草人：

赵 勃（哈尔滨工业大学）

张 博（黑龙江省计量检定测试研究院）

孙伟波（黑龙江省计量检定测试研究院）

张 娜（中国铁路哈尔滨局集团有限公司质量技术监督
所）

曹福成（黑龙江省知识产权保护中心）

周 彤（黑龙江省计量检定测试研究院）

张 蕊（黑龙江省计量检定测试研究院）

参加起草人：

李金龙（黑龙江省计量检定测试研究院）

陈 文（黑龙江省计量检定测试研究院）

周星辉（黑龙江省计量检定测试研究院）

目 录

引言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和计量单位.....	(1)
3.1 术语.....	(1)
3.2 计量单位.....	(1)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(2)
5.1 时基线性误差.....	(2)
5.2 幅度线性误差.....	(2)
5.3 应力示值相对误差.....	(2)
6 校准条件.....	(2)
6.1 环境条件.....	(2)
6.2 测量标准及其他设备.....	(2)
7 校准项目和校准方法.....	(3)
7.1 时基线性误差.....	(3)
7.2 幅度线性误差.....	(3)
7.3 应力示值误差.....	(4)
8 校准结果表达.....	(5)
9 复校时间间隔.....	(6)
附录 A 复合材料平面应力超声测量仪校准记录格式(推荐性)	(7)
附录 B 复合材料平面应力超声测量仪校准证书内页格式(推荐性)	(8)
附录 C 复合材料平面应力超声测量仪示值误差测量结果的不确定度评定示例 ...	(9)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

复合材料平面应力超声测量仪校准规范

1 范围

本规范适用于采用临界折射纵波原理的复合材料平面应力超声测量仪(以下简称测量仪)的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJG 746—2024 超声探伤仪

JJG 475—2008 电子式万能试验机

GB/T 27664.1—2011 无损检测超声检测设备的性能与检验 第1部分：仪器

GB/T 27664.3—2011 无损检测超声检测设备的性能与检验 第3部分：组合设备

GB/T 32073—2015 无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 术语

GB/T 27664.1—2011 界定的及以下术语适用于本规范

3.1.1 时基线性 linearity of time base

由经校准的时间发生器或由已知厚度平板的多次反射所提供的输入信号，与其在时基线上所指示的信号位置之间成正比关系程度的一种量度。

[GB/T 27664.1—2010, 3.15]

3.1.2 幅度线性 linearity of vertical display

输入到测量仪接收器的信号幅度与其在测量仪显示屏（或附加显示器）上所显示的幅度接近成正比关系程度的一种量度。

[GB/T 27664.1—2010, 3.16]

3.2 计量单位

——衰减量的单位：分贝，dB；

——频率的单位为：赫兹，Hz；

——应力的单位为：兆帕斯卡，MPa。

4 概述

测量仪是一种基于临界折射纵波原理的用于测量材料或者构件中残余应力和载荷应力的精密仪器。该仪器主要由超声发射/接收模块、信号处理单元、探头系统及数据分析软件组成,广泛应用于航空航天、桥梁工程、轨道交通、核电装备等领域的应力状态监测与寿命评估。

5 计量特性

5.1 时基线性误差

参考信号与理想位置的偏差应不超过全屏宽度的 $\pm 1\%$

5.2 幅度线性误差

幅度线性误差: $\leq 4\%$

5.3 应力示值相对误差

应力示值相对误差: $\pm 10\%$

注:以 bu 上所有计量特性技术指标仅提供参考,不适用于符合性判定

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度: $(15\sim 35)^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度: $25\%\sim 90\%$ 。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 信号发生器: 应包含猝发音功能, 频率范围至少覆盖 $0.5\text{ MHz}\sim 25\text{ MHz}$, 频率准确度优于 5×10^{-4} , 电压幅度误差不超过 $\pm 1\%$, 正弦波幅度平坦度优于 $\pm 0.2\text{ dB}$, 总谐波失真优于 0.3% 。

6.2.2 标准衰减器: 在 $0.5\text{ MHz}\sim 25\text{ MHz}$ 频率范围, 总衰减范围不小于 80 dB , 至少应有 10 dB 、 1 dB 和 0.1 dB 三种衰减步级; 衰减误差为 $\pm (1\%A+0.05)\text{ dB}$, 其中 A 为衰减量。

6.2.3 固定衰减器: 可耐受 1000 V 的发射脉冲电压, 总衰减范围不小于 40 dB 。

6.2.4 示波器: 带宽不小于 100 MHz , 在 $0.5\text{ MHz}\sim 25\text{ MHz}$ 频率范围内幅度测量不确定度优于 5% ($k=2$), 时间测量不确定度优于 0.2% ($k=2$)。

6.2.5 电子式万能试验机: 0.5 级

6.2.6 拉伸试块: 符合 GB/T 32073—2015 要求

7 校准项目和校准方法

7.1 时基线性误差

测量仪的时基线性误差测量原理如图 1 所示，调节信号发生器产生具有 11 个规则的彼此分开的脉冲测试信号，选择适当的频带将测量仪的增益设置为总增益的 50%，调节信号发生器的输出信号幅度，直到测量仪的测试脉冲为测量仪显示屏全屏高度的 80%，调节正弦波脉冲的时间关系，使得第 3 个脉冲的前沿位于水平刻度尺的 20%，同时第 9 个脉冲的前沿位于水平刻度尺的 80%；记录其余 9 个脉冲的前沿超出水平刻度尺理想位置的偏差，取偏差最大者，按照公式（1）计算时基线性误差：

$$\Delta L = \frac{a_{\max}}{B} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

ΔL ——时基线性误差，%；

$a_{\max}$ ——其余 9 个脉冲与理想位置的最大偏差；

B ——水平满刻度数。

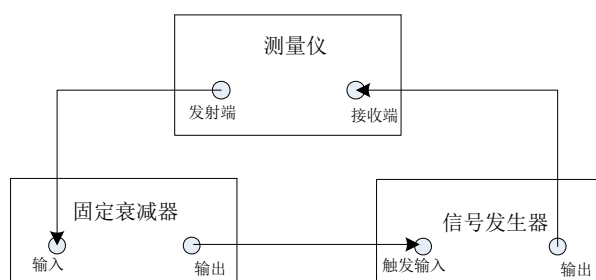


图 1 时基线性误差测量原理图

7.2 幅度线性误差

测量仪的幅度线性误差测量原理如图 2 所示，在开始检测时，设定信号发生器的初始设定增益值；以规定间隔从全屏高的 0dB~26dB 测量幅度线性，按测量仪频率响应测量的中心频率进行测试，将标准衰减器设置到 2dB 并调整测量仪的输入信号和增益，使该信号达到全屏高度的 80%，在不改变测量仪增益的情况下，将标准衰减器设置到表 1 第 1 列所列数值，分别测量不同衰减量下测量仪屏幕上的信号幅度，按公式（2）计算幅度线性误差：

$$\Delta = \left| A_{m \text{ d} x} + \Delta \right| - \left| A \right|_n \quad (2)$$

式中：

- Δ ——幅度线性误差，%；
- $|\Delta+\max|$ ——幅度线性最大正偏差的绝对值，%；
- $|\Delta-\max|$ ——幅度线性最大负偏差的绝对值，%。

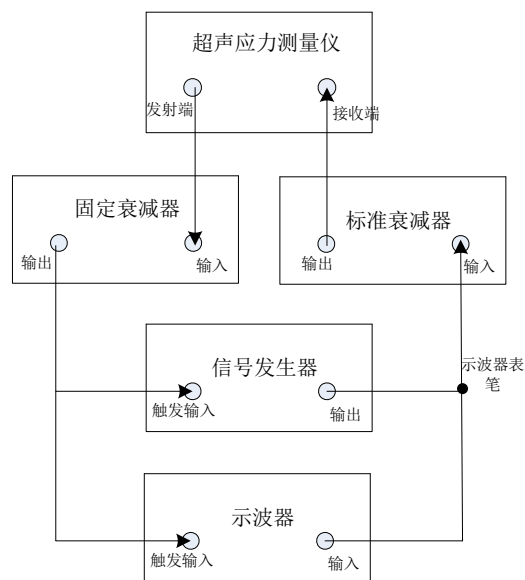


图 2 幅度线性误差测量原理图

表 1 不同衰减量对应信号幅度理论值

标准衰减器设置 (dB)	所显示信号幅度的理论值 (全屏高度的百分比/%)
1	90
2	80
4	64
6	50
8	40
12	25
14	20
20	10
26	5

7.3 应力示值相对误差

测量仪示值相对误差校准示意图如图 3 所示，测量标准主要由电子式万能试验机、拉伸标准试样件等组成，将超声探头安装在试样表面，拉伸试验机对试样进行加载，在加载的同时，确保探头与试样表面平行且稳固，根据力传感器的反馈值确定加载的力值大小，根据材料的泊松比补偿拉伸过程中材料截面积的变化，再计算施加的加载应力大小。在不同应力下利用测量仪获得应力测量值，校准点通常在测量仪的测量范围内至少

选择 3 个点, 建议选取 20%、60%、100% 作为校准点 (或者根据客户需求选取校准点)。

以电子式万能试验机产生的应力标准值为准, 在测量仪上读数时, 按公式(3)计算示值相对误差。

$$C = \frac{\overline{F}_i - F_B}{F_B} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

C ——测量仪的示值相对误差;

F_B ——电子式万能试验机的参考应力值, MPa;

$\overline{F}_i$ ——第 i 个校准点测量仪 3 次示值的平均值, MPa。

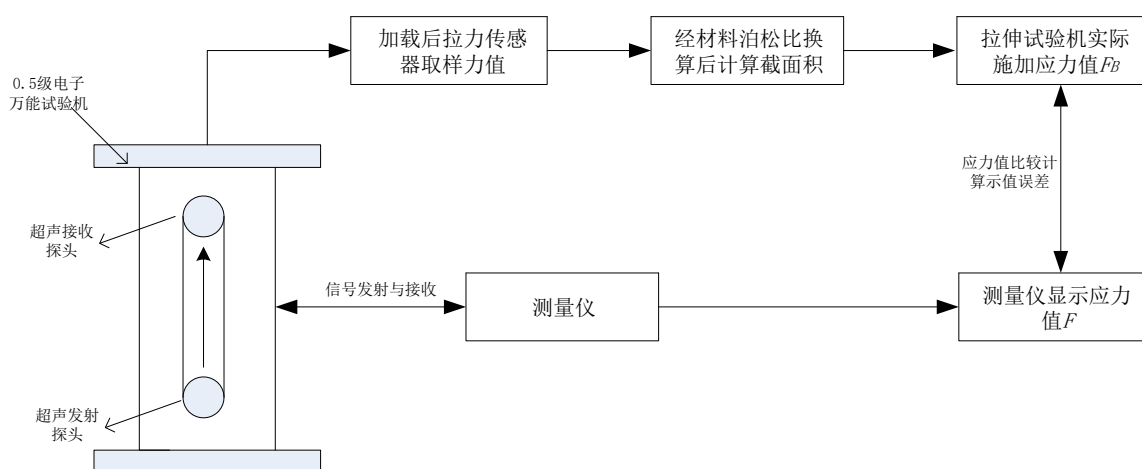


图 3 测量仪示值相对误差校准示意图

8 校准结果表达

8.1 校准记录

校准记录推荐格式参见附录 A。

8.2 校准结果的处理

校准证书由封面和校准数据组成。校准证书内页推荐格式见附录 B。证书上的信息至少包括以下内容:

- a) 标题: “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点 (如果与实验室地点不同);
- d) 证书的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校仪器的描述和明确标识 (如型号、产品编号等);

- g) 进行校准的日期;
- h) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称和代号;
- i) 校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- j) 校准环境的描述;
- k) 校准结果及其测量不确定度说明;
- l) 校准员及核验员的签名;
- m) 校准证书批准人的签名、职务或等效说明;
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- o) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明;
- p) 对校准规范的偏离的说明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议为 12 个月。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的, 因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

复合材料平面应力超声测量仪校准记录格式（推荐性）

委托单位		记录编号	
仪器名称		温 度	
型号规格		相对湿度	
出厂编号		校准依据	
制 造 厂		校准地点	
校准人员		校准日期	
核验人员		备 注	

校准使用的计量标准器具

标准器名称	型号/规格	测量范围	不确定度/ 准确度等级/ 最大允许误差	证书编号及 有效期

时基线性误差/%: _____

脉冲 1 偏差	脉冲 2 偏差	脉冲 4 偏差	脉冲 5 偏差	脉冲 6 偏差	脉冲 7 偏差	脉冲 8 偏差	脉冲 10 偏差	脉冲 11 偏差	最大偏差

幅度线性误差/%: _____

标准衰减器设置 (dB)	1	2	4	6	8	12	14	20	26
显示信号幅度 (%)									

应力示值相对误差:

序号	电子式万能 试验机应力值 MPa	测量仪应力值 MPa			平均值 MPa	示值相对误差 %	扩展不确定度 $U(k=2)$
1							
2							
3							
4							
5							

附录 B

复合材料平面应力超声测量仪校准证书内页格式（推荐性）

校准结果

序号	电子式万能 试验机应力值 MPa	平均值 MPa	示值相对误差 %	扩展不确定度 $U (k=2)$
1				
2				
3				
4				
5				

时基线性误差/%: _____ 幅度线性误差/%: _____

以下空白

附录 C

复合材料平面应力超声测量仪示值误差测量结果的不确定度评定示例

C.1 概述

C.1.1 被校对象：复合材料平面应力超声测量仪。

C.1.2 测量标准：0.5 级电子万能试验机、Q345R 材质拉伸试块（长×宽× 厚的尺寸为 215mm×45mm×6mm，小宽度为 30mm，最大允许误差 $\pm 0.1\text{mm}$ ，表面粗糙度 Ra 小于 $10\mu\text{m}$ 。）

C.1.3 测量环境：温度：20℃；相对湿度：40%。

C.1.4 测量方法：采用本规范规定的方法进行测量。

C.2 测量模型

$$\Delta F = \bar{F} - F_B \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔF ——复合材料平面应力超声测量仪的示值误差，MPa；

$\bar{F}$ ——复合材料平面应力超声测量仪 3 次示值的算术平均值，MPa；

F_B ——测量标准的标准应力值，MPa。

C.3 灵敏系数

各影响量的灵敏系数计算：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta F}{\partial \bar{F}} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial \Delta F}{\partial F_B} = -1$$

C.4 标准不确定度评定

C.4.1 输入量 $\bar{F}$ 的标准不确定度的 $u(\bar{F})$

其不确定度一是由环境条件、人员操作等各种随机因素，体现在测量重复性引入的不确定度 $u_1(\bar{F})$ ；二是由检测仪分辨力引入的不确定度 $u_2(\bar{F})$ 。

C.4.1.1 测量重复性引入的不确定度 $u_1(\bar{F})$

用测量标准测量复合材料平面应力超声测量仪，选取 100MPa 作为测量点，在重复性条件下进行 10 次测量，结果如下表：

表 1 测量数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (MPa)	98.2	99.5	96.5	102.5	101.6	103.5	99.1	96.8	103.0	98.0

$$\text{则: } \bar{F} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} F_i = 99.67 \text{ MPa}$$

单次实验标准偏差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n-1}} = 1.665 \text{ MPa}$$

实际测量中是在重复性条件下测量 3 次, 取 3 次算术平均值为测量结果。

$$u_1(\bar{F}) = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.961 \text{ MPa} \text{ 或表示为 } u_{1rel}(\bar{F}) = 0.096\%$$

C. 4. 1. 2 复合材料平面应力超声测量仪分辨力引入的不确定度 $u_2(\bar{F})$

若被校复合材料平面应力超声测量仪的分辨力为 δ , 则分辨力引入的不确定度分量为 0.289δ , 按公式进行计算。

$$u_2(\bar{F}) = 0.289\delta$$

检测仪的分辨力为 0.1 MPa , 则 $u_2(\bar{F}) = 0.0289 \text{ MPa}$ 或表示为 $u_{2rel}(\bar{F}) = 0.029\%$, 重复性和分辨力引入的不确定度取较大者 0.096% 。

C. 4. 2 输入量 F_B 的标准不确定度 $u_2(F_B)$

其不确定度主要来源于电子万能试验机, 可根据证书, 以 B 类方法评定。电子万能试验机为 0.5 级, 估计为均匀分布, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 按公式进行计算。

$$u_2(F_B) = \frac{F_B \times \delta_r \%}{\sqrt{3}}$$

$$\text{在 } 100 \text{ MPa 校准点: } u(F_B) = \frac{a}{k} = \frac{100 \times 0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ MPa} \text{ 或表示为: } u_{rel}(F_B) = 0.289\%。$$

C. 5 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总表， 见下表：

表 2 标准不确定度分量汇总表

分量 $u(X_i)$	不 确 定 度 来源	输入量标准不确定度/（%）	C_i	输出量标准不确定 度分量/（%）
$u(F_B)$	电子万能试 验机的准确 度	0.289	-1	0.289
$u(\bar{F})$	复合材料平 面应力超声 测量仪的测 量重复性及 示值分辨力 大者	0.096	1	0.096

合成标准不确定度的计算：

$$u_c(\Delta F) = \sqrt{[c_1 u(\bar{F})]^2 + [c_2 u(F_B)]^2} = \sqrt{(0.173)^2 + (0.022)^2} = 0.30\%$$

C.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U_{\text{rel}}=0.6\%$

