

中华人民共和国工业和信息化部  
有色金属计量技术规范

JJF(有色金属) XXXX—XXXX

相控阵超声试块校准规范

Calibration Specification for Phased Array Ultrasonic Test Blocks

(报批稿)

XXXXX—XX—XX发布

XXXXX—XX—XX实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

# 相控阵超声试块校准规范

Calibration Specification for Phased Array Ultrasonic Test Blocks

JJF（有色金属）XXXX—XXXX

归口单位：中国有色金属工业协会

主要起草单位：西安汉唐分析检测有限公司

西南铝业（集团）有限责任公司

西部钛业有限责任公司

陕西天成航空材料有限公司

西部金属材料股份有限公司

有色金属技术经济研究院有限责任公司

东北轻合金有限责任公司

国标（北京）检验认证有限公司

洛阳航辉新材料有限公司

本规范委托有色金属行业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

刘泽晨（西安汉唐分析检测有限公司）  
田晓东（西南铝业（集团）有限责任公司）  
王晨曦（西安汉唐分析检测有限公司）  
吴晓东（西部钛业有限责任公司）  
孙宝洋（陕西天成航空材料有限公司）  
王礼营（西部金属材料股份有限公司）  
闫雁楠（有色金属技术经济研究院有限责任公司）  
马金萍（东北轻合金有限责任公司）  
吴承骏（国标（北京）检验认证有限公司）  
吴义舟（洛阳航辉新材料有限公司）  
陈栋辉（西安汉唐分析检测有限公司）  
李戈良（西安汉唐分析检测有限公司）

# 目 录

引言 .....	(II)
1 范围 .....	(1)
2 引用文件 .....	(1)
3 概述 .....	(1)
4 计量特性 .....	(1)
4.1 几何尺寸 .....	(1)
4.2 平底孔平面度 .....	(1)
4.3 垂直度和平行度 .....	(1)
4.4 声速 .....	(1)
5 校准条件 .....	(1)
5.1 环境条件 .....	(1)
5.2 测量标准及其他设备 .....	(2)
6 校准项目和校准方法 .....	(2)
6.1 准备工作 .....	(2)
6.2 几何尺寸 .....	(2)
6.3 平底孔平面度 .....	(4)
6.4 平行度、垂直度 .....	(4)
6.5 声速 .....	(5)
7 校准结果表达 .....	(6)
8 复校时间间隔 .....	(7)
附录 A 校准原始记录参考格式 .....	(8)
附录 B 校准证书内页参考格式 .....	(11)
附录 C 用三坐标测量机测量相控阵超声试块长度尺寸的测量不确定度评定 .....	(12)

## 引 言

JJF 1071 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001 《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1 《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制修订工作的基础性系列规范。

本规范主要参考了 JJF 1338 《相控阵超声探伤仪校准规范》、GB/T 12604.1 《无损检测 术语 超声检测》、GB/T 23905 《无损检测 超声检测用试块》、GB/T 11259 《无损检测 超声检测用钢参考试块的制作和控制方法》、GB/T 11337 《平面度误差检测》、JJF 1487 《超声波探伤试块校准规范》、JB/T 8428 《无损检测 超声试块通用规范》、GB/T 23900 《无损检测 材料超声速度测量方法》、GB/T 41114 《无损检测 超声检测 相控阵超声检测标准试块规范》。

本规范为首次发布。

## 相控阵超声试块校准规范

### 1 范围

本规范适用于相控阵超声检测设备用的校准试块（标准试块）和用于检测时使用的参考试块（对比试块）的校准。

### 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 1958—2017 产品几何技术规范（GPS） 几何公差 检测与验证

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 概述

相控阵超声试块分为校准试块（标准试块）和参考试块（对比试块）。校准试块是指具有规定的化学成分、表面粗糙度、热处理工艺及几何形状的材料块，用于校准相控阵超声检测设备，是用于仪器探头系统性能校准的试块。参考试块主要用于检测，按其制作方法和用途不同可分为通用对比试块和专用对比试块，对比试块中应含有意义明确的采用机加工方式制作的参考反射体。

### 4 计量特性

#### 4.1 几何尺寸

试块外形尺寸的最大允许误差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ；平底孔、横通孔直径的最大允许误差为 $\pm 0.2\text{mm}$ ；相关角度的最大允许误差为 $\pm 1^\circ$ 。

#### 4.2 平底孔平面度

试块平底孔平面度最大允许误差为 $\pm 0.03\text{mm}$ 。

#### 4.3 垂直度和平行度

试块相邻平面垂直度最大允许误差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ；试块对应平面平行度最大允许误差为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

#### 4.4 声速

试块声速最大允许误差为 $\pm 1\%$ 。

### 5 校准条件

#### 5.1 环境条件

校准试验应在温度 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ，相对湿度不大于65%的条件下进行，实验室内应无振动和磁场等影响测量的因素。

## 5.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 1。

表 1 测量标准及其他设备

序号	仪器设备名称	技术要求
1	坐标测量机	最大允许误差 (MPE): $\pm (2\mu\text{m} + 3 \times 10^{-6}L)$ , $L$ 单位为 m
2	影像测量仪	MPE: $\pm (3\mu\text{m} + 5 \times 10^{-6}L)$ , $L$ 单位为 m
3	万能工具显微镜	MPE: $\pm (1\mu\text{m} + 10 \times 10^{-6}L)$ , $L$ 单位为 m
4	游标卡尺	MPE: $\pm (0.02 \sim 0.05)$ mm
5	千分尺	MPE: $\pm 4\mu\text{m}$
6	针规	尺寸间隔为 0.01mm, MPE: $\pm 2\mu\text{m}$
7	塞尺	(0.02~1.00) mm, MPE: $\pm (5 \sim 16)$ $\mu\text{m}$
8	内径表	MPE: $\pm (7 \sim 20)$ $\mu\text{m}$
9	刀口形直尺	MPE: $\pm 2\mu\text{m}$
10	直角尺	1 级
11	百分表	任意 1mm MPE: $\pm 0.015$ mm; 全量程 MPE: $\pm 0.025$ mm; 回程误差 MPE: $\pm 0.005$ mm
12	平板	1 级
13	超声波发射接收仪 (或能产生、接收并显示超声波电信号的仪器)	频带宽度不小于 15MHz
14	数字示波器	频带宽度不小于 100MHz
15	纵波直探头	中心频率不小于 5MHz, 晶片直径: 10mm~12.5mm
16	横波直探头	使用频率: 4MHz~5MHz, 晶片直径: 10mm~12.5mm
17	声速试块	超声波速度已知
注: $L$ 为被测量长度。		

## 6 校准项目和校准方法

### 6.1 准备工作

校准前应清洁试块, 去除表面油污, 并确认无影响校准结果的因素。

### 6.2 几何尺寸

#### 6.2.1 试块外形尺寸

可采用接触或非接触的测量方法。在测量过程中, 选取垂直于试块边长的三分之一长

度作为测量间隔，测量每个间隔内的边长，取三个间隔测量的平均值  $L_x$  作为边长方向的几何尺寸。被校试块几何尺寸测量误差按公式 (1) 计算。

$$\Delta = L_N - L_x \quad (1)$$

式中：

$\Delta$ ——几何尺寸测量误差，mm；

$L_N$ ——被校试块标称值，mm（由试块加工图纸得到）；

$L_x$ ——几何尺寸测得值，mm。

#### 6.2.1.1 游标卡尺或千分尺测量

长度和厚度尺寸可选用相应分度值的游标卡尺或千分尺直接测量；所选用量具的最大允许误差应不超过被测尺寸公差 1/3。

#### 6.2.1.2 万能工具显微镜或影像测量仪测量

测量时调整仪器，使试块边缘清晰地出现在仪器视场内，按仪器操作方法进行测量，测量时应避免试块边缘倒角和毛刺等因素影响测量结果。用影像仪测量时，优先使用仪器自动寻边的方式瞄准和选点。被测尺寸按公式 (2) 计算。

$$L = A - A_0 \quad (2)$$

式中：

$L$ ——被测尺寸，mm；

$A$ ——第二个位置（终点）坐标值，mm；

$A_0$ ——第一个位置（起点）坐标值，mm。

#### 6.2.2 孔、槽尺寸

优先选择 6.2.1.1、6.2.1.2 的方法对孔、槽的尺寸进行测量，当无法满足测量要求时，可选用以下方法进行测量。对于有封口的孔、槽，经委托方同意后方可去掉封口对其进行测量。

##### 6.2.2.1 内径表测量法

内径表测量法适用于 2mm 及以上的孔直径测量。首先用内径表的校对环规调整内径表的初始值，然后直接用内径表测量孔直径，读数即为孔直径，以第一次测量位置为起始位置，将试块沿被测孔轴线方向旋转 120°后测量孔径，再次旋转 120°后测量孔径，取三次测量平均值作为最终测得值。

##### 6.2.2.2 试塞法

试塞法适用于 2mm 以下的孔直径（或槽宽度）测量，主要有针规试塞和塞尺试塞。

针规试塞适用于 2mm 以下的孔直径，可用尺寸间隔为 0.01mm 的针规测量。塞尺试塞适用于小于 1mm 的槽宽度的测量。测量时根据孔直径（或槽宽度）的标称值选择合适直径的针规（或塞尺）试塞，以刚刚能塞入孔（或槽）内的针规（或塞尺）的标称尺寸作为被测尺寸。取三次测量平均值作为最终测得值。

#### 6.2.2.3 倒模法

倒模法适用于无法实现直接测量的孔直径（或槽宽度）测量，需根据孔径选择适当大小的医用针头和注射器。首先用无油、无腐蚀性的溶剂（如无水乙醇或丙酮）清洗平底孔，然后用过滤干燥的空气吹干；将配置复制品用的有机硅凝胶混合液注入孔中（从孔底开始，逐渐填充至外面，确保没有气泡产生）；同时孔中插入一根金属丝以便于拔出复制品；待混合液固化后，用金属丝将复制品慢慢取出即可。复制品反映了平底孔的特征，使用影像测量仪测量出复制品的几何尺寸。取三次测量平均值作为最终测得值。

#### 6.2.2.4 深度指示表测量深度尺寸

深度指示表适用于孔（或槽）的深度测量，需根据被测孔、槽等深度尺寸选取合适的深度指示表。如果深度指示表的测头尺寸过大，可换上合适尺寸的探针。测量时，将深度指示表的基座放在试块基面上，调整深度指示表的测量端于孔（或槽）的顶部并记下深度指示表初始值。在试块基面上移动深度指示表的基座，使深度指示表的测头缓慢插入到孔（或槽）的底部，此时深度指示表的读数与初始值之差的绝对值即为该孔（或槽）的深度尺寸。取三次测量平均值作为最终测得值。

#### 6.2.3 角度

使用万能工具显微镜测量，测量前清洁测量面，测量时保证试块水平放置，取三次测量平均值作为最终测得值。

#### 6.3 平底孔平面度

按 6.2.2.3 要求取出复制品后，用刀口尺以光隙法测量。将刀口尺与复制品被测量面接触，并置于光源和眼睛之间的适当位置，用适当力度调整刀口尺，使最大光隙尽可能小。当校准方位上出现的间隙均在中间部位或两端部位时，取其中一方位间隙量最大的作为平面度。当其中有的方位中间部位有间隙，而有的方位两端部位有间隙，则平面度取中间和两端最大间隙量之和，取三次测量平均值作为最终测得值。

#### 6.4 垂直度和平行度

在用三坐标测量机测量试块外形尺寸时，可以通过三坐标测量机中的测量软件一并评

定出试块上对应面、线的相互位置误差，取三次测量平均值作为最终测得值。

试块的平行度可在平板上用打表法测量，垂直度可在平板上用直角尺比较测量。也可以选择其他满足测量不确定度要求的计量器具进行测量。测量应符合 GB/T 1958-2017 中 7.2 的要求。

## 6.5 声速

对于被校试块，声速误差按公式 (3) 计算，取三次测量平均值作为  $v_N$  测得值。

$$\Delta v = v_{Xj} - v_N \quad (3)$$

式中：

$\Delta v$ ——声速误差，m/s；

$v_{Xj}$ ——被校试块声速标称值，m/s；

$v_N$ ——被校试块声速测得值，m/s。

使用超声波发射接收仪（或能产生、接收并显示超声波电信号的仪器）、数字示波器、探头对被校试块声速进行校准。对于纵波速度测量，耦合剂应使用洁净的轻质油等材料；对于横波速度测量，耦合剂应使用树脂或固体粘结剂等高粘性的材料。

### 6.5.1 纵波速度

方法一：通过比较纵波在被校试块与在已知声速 ( $v_s$ ) 的标准试块中的传播时间，来测量纵波速度 ( $v_l$ )。

在每个试样（被校试块和标准试块）上各选择两个平行表面，测量其厚度，精度高于  $\pm 0.02\text{mm}$  或 0.1%。在每个试样上用探头测得一个信号模式，如图 1 所示，1~7 分别为 7 次反射回波， $d_k$  为第 1 次反射回波至第 7 次反射回波的声程。在清晰可分辨的条件下，尽可能使反射回波数多，两次测量的时基线（扫描线控制）应设置相同。

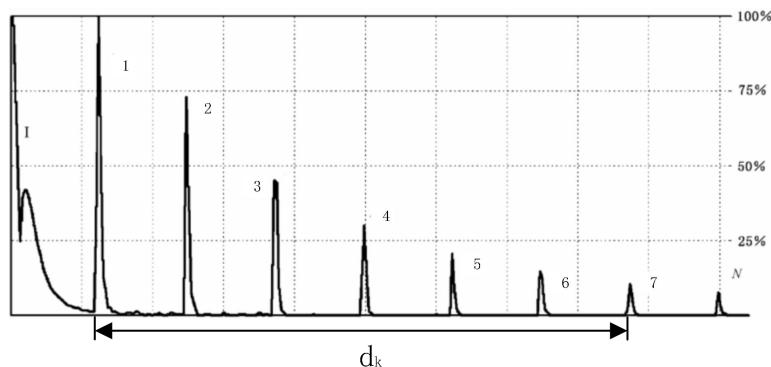


图 1 始波脉冲和反射回波示意图

用示波器测量功能分别测量被校试块和标准试块上第一个反射回波前沿和最后一个

可清晰识别的反射回波前沿之间的时基线距离。为了获得更高的精度，可在第一个反射回波的前沿位置固定之后，调节放大器使最后一个反射回波与第一个反射回波的高度一致。随后再确定最后一个反射回波前沿的位置。在任意两个反射回波之间，信号传播声程为试样厚度的 2 倍。信号传播通过试样并返回到入射点称为一次完整路径。例如，在图 1 中回波 1 和回波 7 之间信号通过了 6 次完整路径。计算在两个试样上从第一个反射回波到最后一个反射回波之间通过的完整路径次数。这个数字比反射回波的数目少 1。注意每次测量到的试样厚度、完整路径次数和从第一个到最后一个回波之间的距离不必相同。

被校试块的声速按公式 (4) 计算。

$$v_1 = (d_s n_1 t_1 v_s) / (d_1 n_s t_s) \quad (4)$$

式中：

$v_1$ ——被校试块的声速，m/s；

$d_s$ ——沿 A 扫描显示的时基线测量到标准试块从第一个到第 N 个反射回波之间的距离，m；

$n_1$ ——被校试块中完整路径的次数；

$t_1$ ——被校试块的厚度，m；

$v_s$ ——标准试块声速，m/s；

$d_1$ ——沿 A 扫描显示的时基线测量到被校试块从第一个到第 N 个反射回波之间的距离，m；

$n_s$ ——标准试块中完整路径的次数；

$t_s$ ——标准试块的厚度，m。

方法二：使用数字示波器观察回波模式，通过示波器测量连续多次反射回波之间的传播时间，被校试块的声速按公式 (5) 计算。

$$v_1 = \frac{2t_1}{t} \quad (5)$$

式中：

$v_1$ ——被校试块的声速，m/s；

$t_1$ ——被校试块的厚度，m；

$t$ ——传播时间，s。

## 6.5.2 横波速度

与 6.5.1 纵波速度的校准方法相同。

## 7 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如与实验室的地址不同）；
- 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) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次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) 校准结果及测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- m) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识以及签发日期；
- 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。

校准原始记录参考格式见附录A，校准证书参考格式见附录B。

## 8 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由试块的使用保养情况、使用者、试块本身质量等多重因素所决定的，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

## 校准原始记录参考格式

记录编号				证书编号			
送校单位				校准依据			
被校试块信息							
试块规格				出厂编号			
制造厂家							
校准地点				环境条件	℃	%RH	
测量标准信息							
名称	型号	编号	测量范围	不确定度/ 准确度等级/ 最大允许误差	证书编号	有效期至	
校准结果							
1、几何尺寸	试块外形尺寸 /mm	标称值	测得值			平均值	$U(k=2)$
			1	2	3		
	孔、槽尺寸 /mm	标称值	测得值			平均值	$U(k=2)$
			1	2	3		
	角度/°	标称值	测得值			平均值	$U(k=2)$
			1	2	3		
2、平底孔平面度/mm		测量次数	1	2	3	平均值	$U(k=2)$
		___孔					
		___孔					

3、垂直度和平行度	垂直度/mm	测量次数	1	2	3	平均值	$U(k=2)$
		$( ) \perp ( )$					
		$( ) \perp ( )$					
	平行度/mm	测量次数	1	2	3	平均值	$U(k=2)$
		面__//面__					
		面__//面__					
4、声速/（m/s）							
纵波：耦合剂：							
测量次数	1	2	3	$U(k=2)$			
$d_s(m)$							
$n_1$							
$v_s(m/s)$							
$d_1(m)$							
$n_s$							
$t_s(m)$							
$t(s)$							
$v_1(m/s)$							
横波：耦合剂：							
测量次数	1	2	3	$U(k=2)$			
$d_s(m)$							
$n_1$							
$v_s(m/s)$							
$d_1(m)$							
$n_s$							
$t_s(m)$							
$t(s)$							

$v_1(\text{m/s})$				
附图：				

## 附录 B

## 校准证书内页参考格式

校准证书编号: ××××

校 准 结 果					
1、几何尺寸					
试块外形尺寸/mm					
标称值					
实际值					
测量结果的不确定度:					
孔槽尺寸/mm					
标称值					
实际值					
测量结果的不确定度:					
角度/°					
标称值					
实际值					
测量结果的不确定度:					
2、平底孔平面度/mm					
_____孔	_____孔	_____孔	_____孔	_____孔	_____孔
垂直度/mm: ( ) 面⊥ ( ) 面____、( ) 面⊥ ( ) 面____、( ) 面⊥ ( ) 面____					
平行度/mm: ( ) 面// ( ) 面____、( ) 面// ( ) 面____、( ) 面// ( ) 面____					
测量结果的不确定度:					
4、声速/ (m/s)					
纵波:			横波:		
测量结果的不确定度:					

## 附录 C

### 用三坐标测量机测量相控阵超声试块长度尺寸的测量不确定度评定

#### C.1 概述

C.1.1 测量依据：本规范。

C.1.2 被测对象：超声波探伤试块（ $300 \pm 0.05$ ）mm 的长度尺寸。

C.1.3 测量标准：三坐标测量机，MPE： $\pm (2\mu\text{m} + 3 \times 10^{-6}L)$ ， $L$  为测量长度，单位为 m。

#### C.1.4 测量条件

- (1) 环境温度为  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，温度变化不应超过  $1^\circ\text{C/h}$ ，环境相对湿度不大于 65%；
- (2) 三坐标测量机常年安置在实验室内，被校试块在实验室内的平衡时间不小于 4h；
- (3) 假设三坐标光栅尺制造材料为光学玻璃；被校试块为钢制的。

#### C.1.5 测量方法

在三坐标测量机上测量。测量前应将仪器调整至满足测量需要的状态。测量时，首先校准测头，将被校试块放在工作台上。建立工件坐标，通过自动测量程序测量得到试块的尺寸。

#### C.2 测量模型

由测量原理和方法，得到测量模型：

$$L = A - A_0 \quad (\text{C.1})$$

式中：

$L$ ——被测尺寸，mm；

$A$ ——第二个位置（终点）读数，mm；

$A_0$ ——第一个位置（起点）读数，mm。

#### C.3 测量不确定度来源

用三坐标测量机测量相控阵超声试块长度尺寸的测量不确定度来源主要有：

- (1) 三坐标测量机的示值误差引入的标准不确定度分量  $u_1$ ；
- (2) 仪器分辨力/测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_2$ ；
- (3) 安装调试不到位引入的标准不确定度分量  $u_3$ ；
- (4) 环境温度引入的标准不确定度分量  $u_4$ ；
- (5) 被校试块形状误差引入的标准不确定度分量  $u_5$ 。

#### C.4 标准不确定度评定

C.4.1 三坐标测量机的示值误差引入的标准不确定度分量  $u_1$ 

三坐标测量机 MPE:  $\pm (2\mu\text{m}+3\times 10^{-6}L)$ , 符合均匀分布, 取  $k=\sqrt{3}$ , 被校试块的尺寸按 300mm 计算, 则:

$$u_1=a/k=(2+3\times 10^{-6}\times 300\times 10^3)/\sqrt{3}=1.7\mu\text{m}$$

C.4.2 仪器分辨力/测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_2$ 

三坐标测量机的分辨力为  $0.1\mu\text{m}$ , 则  $a=0.1/2$ , 符合均匀分布, 取  $k=\sqrt{3}$ , 则由分辨力引入的不确定度分量  $u_{21}$  为:

$$u_{21}=a/k=0.1/2\sqrt{3}=0.03\mu\text{m}$$

在各种条件均不改变的情况下, 在短时间内对标称值为 300mm 的尺寸进行重复性实验, 共测量 10 次 (即  $n=10$ )。试验数据见表 C.1。

表 C.1 重复性试验数据

测量次数	1	2	3	4	5
测得值(mm)	300.0152	300.0148	300.0156	300.0162	300.0154
测量次数	6	7	8	9	10
测得值(mm)	300.0132	300.0149	300.0138	300.0142	300.0155

由贝塞尔公式计算得到  $s=0.9\mu\text{m}$ , 实际取 10 次测量的平均值, 则重复性引入的不确定度分量  $u_{22}$  为:

$$u_{22}=s/\sqrt{n}=0.9/\sqrt{10}=0.3\mu\text{m}$$

分辨力引入的不确定度分量  $u_{21}$  和测量重复性引入的不确定度分量  $u_{22}$ , 取结果较大者, 则:

$$u_2=u_{22}=0.3\mu\text{m}$$

C.4.3 安装调整不到位引入的标准不确定度分量  $u_3$ 

由实验可知, 安装调整不到位影响可以控制在  $e_{\text{安装}}=\pm 1\mu\text{m}$ , 则  $a=1\mu\text{m}$ , 符合均匀分布, 取  $k=\sqrt{3}$ , 则:

$$u_3=a/k=1/\sqrt{3}=0.6\mu\text{m}$$

C.4.4 环境温度引入的标准不确定度分量  $u_4$ 

在测量前, 被校试块应充分恒温, 使得被校试块与测量仪器之间温差尽可能小 (即两

者温差可以忽略不计），此处主要考虑温度偏离 20℃，三坐标测量机与被校试块的线膨胀系数差的影响。在测量过程中，实验室温度保持在（20±5）℃范围内，已知三坐标测量机的线膨胀系数为 $\alpha_{\text{机}} = (8 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，被校试块的线膨胀系数为 $\alpha_{\text{试块}} = (11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，则：

当  $L=300\text{mm}$  时，由温度带来的极限误差为：

$$e_{\text{温度}} = L \times \Delta T \times \alpha_{\text{试块}} - L \times \Delta T \times \alpha_{\text{机}} = L \times \Delta T \times (\alpha_{\text{试块}} - \alpha_{\text{机}}) = \pm 8.2 \mu\text{m}$$

则  $a=8.2\mu\text{m}$ ，符合三角分布，取  $k=\sqrt{6}$ ，由温度引入的测量不确定度分量为：

$$u_4 = e_{\text{温度}} / \sqrt{6} = 3.4 \mu\text{m}$$

#### C.4.5 被校试块形状误差引入的标准不确定度分量 $u_5$

被校试块形状误差对测量结果产生影响的主要因素是平面度误差，机加工试块的平面度一般不大于  $20\mu\text{m}$ ，即  $a=20/2\mu\text{m}$ ，符合均匀分布，取  $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_5 = a/k = 20/2\sqrt{3} = 5.8 \mu\text{m}$$

#### C.5 合成标准不确定度

相控阵超声试块长度尺寸的标准不确定度分量见表 C.2，由于参与计算的各项标准不确定度分量之间不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = \sqrt{1.7^2 + 0.3^2 + 0.6^2 + 3.4^2 + 5.8^2} \mu\text{m} = 7.0 \mu\text{m}$$

表 C.2 标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	不确定度分量代号 $u_i$	标准不确定度分量 $u_i/\mu\text{m}$
1	三坐标测量机	$u_1$	1.7
2	重复性	$u_2$	0.3
3	安装调整	$u_3$	0.6
4	环境温度	$u_4$	3.4
5	试块形状误差	$u_5$	5.8
6	合成标准不确定度	$u_c$	7.0

#### C.6 扩展不确定度计算

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 7.0 = 14 \mu\text{m} \quad (k=2)$$