



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

## 同轴空气介质传输线校准规范

Calibration Specification for Coaxial Air Dielectric Transmission Line

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

# 同轴空气介质传输线校准规范

JJFXXXX-XXXX

Calibration Specification for Coaxial Air Dielectric Transmission Line

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

北京芯宸科技有限公司

参加起草单位：中国电子科技集团有限公司第 41 研究所

中国电子技术标准化研究院

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

# 目 录

引 言 .....	V
1 范围 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 概述 .....	1
4 计量特性 .....	1
4.1 内导体外直径.....	1
4.2 外导体内直径.....	1
4.3 特征阻抗 .....	2
4.4 机械长度 .....	2
5 校准条件 .....	2
5.1 环境条件 .....	2
5.2 测量标准及其它设备 .....	2
6 校准项目和校准方法 .....	2
6.1 校准项目 .....	2
6.2 外观检查 .....	2
6.3 内导体外直径.....	3
6.4 外导体内直径.....	3
6.5 特征阻抗 .....	3
6.6 机械长度 .....	3
7 校准结果表达.....	4
8 复校时间间隔.....	5
附录 A .....	6
记录格式（参考件） .....	6
附录 B.....	8
测量不确定度评定示例 .....	8
附录 C .....	13
实际测量数据示例.....	13
附录 D .....	15
同轴空气介质传输线结构 .....	15

# 引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》编写，相关术语及测量不确定度评定遵循 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》两个文件。

本规范为首次编写。

# 同轴空气介质传输线校准规范

## 1 范围

本规范适用于 300 kHz~67 GHz 频率范围内 N、7mm、3.5mm、2.92mm、2.4mm 以及 1.85mm 接头形式的 50Ω 同轴空气介质传输线(以下简称空气线)的校准,其它接头形式和阻抗的空气线校准可参照执行。

## 2 引用文件

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

IEEE Std 287™-2007 IEEE Standard for Precision Coaxial Connectors (DC to 110 GHz)

凡是注日期的应用文件,仅是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

空气线是由空气介质填充的一种同轴传输线,由外导体管和内导体针组成,其特征阻抗可以由外导体内直径和内导体外直径等参数计算得到。精密空气线可作为微波阻抗的绝对标准器,也可用作网络分析仪校准件、检验件以及标准延迟器等。

## 4 计量特性

### 4.1 内导体外直径

同轴端口类型	内导体外直径 (mm)	最大允许误差 (mm)
N 型	3.040	±0.003
7mm	3.040	±0.003
3.5mm	1.520	±0.003
2.92mm	1.270	±0.003
2.4mm	1.042	±0.004
1.85mm	0.804	±0.004

### 4.2 外导体内直径

同轴端口类型	外导体内直径 (mm)	最大允许误差 (mm)
N 型	7.000	±0.005
7mm	7.000	±0.005
3.5mm	3.500	±0.005
2.92mm	2.920	±0.005
2.4mm	2.400	±0.005

1.85mm	1.850	±0.005
--------	-------	--------

### 4.3 特征阻抗

50Ω，最大允许误差：±(0.1~1)%。

### 4.4 机械长度

$L \leq 30$  cm，最大允许误差：±(2.5~25)μm。

注：以上技术指标不作合格性判定，仅提供参考。

## 5 校准条件

### 5.1 环境条件

- 环境温度：23 °C±2 °C；
- 相对湿度：≤50%；
- 供电电源：电压 220 V±11 V，频率 50 Hz±1 Hz；
- 其它：周围无影响校准正常工作的机械振动和电磁干扰。

### 5.2 测量标准及其它设备

#### 5.2.1 内导体外直径测量装置

针规：具备 4.2 所列空气线内导体外直径校准用的针规；

内导体外直径测量不确定度优于 2 μm ( $k=2$ )。

#### 5.2.2 外导体内直径测量装置

环规：具备 4.3 所列空气线外导体内直径校准用的环规；

外导体内直径测量不确定度优于 2 μm ( $k=2$ )。

#### 5.2.3 机械长度测量装置

长度测量范围：≤30 cm；

测量不确定度优于 10 μm ( $k=2$ )。

#### 5.2.4 空气线长度参考面测量夹具

用于连接空气线建立长度测量参考面，连接接头满足 IEEE Std 287™-2007 相应类型精密接头的要求，空气线连接端面与长度测量参考面的平行度优于 10 μm。

## 6 校准项目和校准方法

### 6.1 校准项目

校准项目见表 1。

表 1 校准项目表

序号	项目名称	条款
1	外观检查	6.2
2	内导体外直径	6.3
3	外导体内直径	6.4
4	特征阻抗	6.5
5	机械长度	6.6

### 6.2 外观检查

6.2.1 检查被校空气线内、外导体的表面状况，应无影响正常工作的机械损伤，各种必要的附件和文件应齐全。

### 6.3 内导体外直径

6.3.1 根据内导体外直径测量装置要求采用尺寸与被测空气线内导体外直径相当的针规对内导体外直径测量装置进行校准；

6.3.2 根据空气线长度在空气线内导体上大致均匀选取 3~6 个测量位置（如图 1 所示），在所选取的测量位置上分别多次测量其外直径，将测量结果记录于附件 A 表 A. 2 中，计算测量平均值为内导体外直径测量结果。



图 1 空气线内导体外直径测量选点示意图

### 6.4 外导体内直径

6.4.1 根据外导体内直径测量装置要求采用尺寸与被测空气线外导体内直径相当的环规对外导体内直径测量装置进行校准；

6.4.2 根据空气线长度在空气线外导体内大致均匀选取 3~6 个测量位置（如图 2 所示），在所选取的测量位置上分别多次测量其内直径，将测量结果记录于附件 A 表 A. 3 中，计算测量平均值为外导体内直径测量结果。

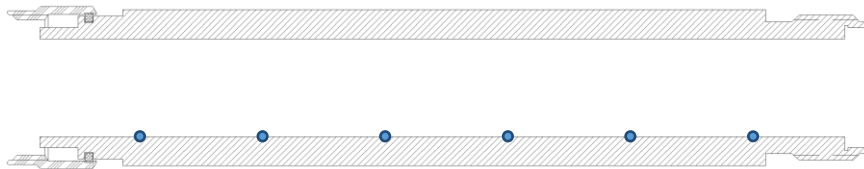


图 2 空气线外导体内直径测量选点示意图

### 6.5 特征阻抗

将 6.3 和 6.4 的测量结果代入下式可以计算出被测空气线的特征阻抗，结果记录于附件 A 表 A. 4 中。

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot l \cdot n \frac{b}{a} \approx \frac{59.9585}{\sqrt{\epsilon_r}} l \cdot n \frac{b}{a} \quad (1)$$

其中： $b$  为同轴空气介质传输线的外导体内半径， $a$  为同轴空气介质传输线的内导体外半径， $\mu$  为空气磁导率， $\epsilon$  为空气介电常数， $\epsilon_r$  为空气的相对介电常数。标准大气压下，23℃，50%相对湿度环境下空气的相对介电常数为 1.000649。

### 6.6 机械长度



6.6.1 根据机械长度测量装置使用要求进行自校准；

6.6.2 如图3a连接空气线长度参考面测量夹具，采用对应接头形式的力矩扳手将二者紧密连接，测量参考面之间的长度，记录在表A.5中测量夹具长度一栏；

6.6.3 如图3b连接空气线和参考面测量夹具，采用对应接头形式的力矩扳手将长度测量夹具和空气线紧密连接，测量测量夹具参考面之间的长度，记录在表A.5中夹具+空气线长度一栏，减去6.6.2测量结果便得到空气的长度；

6.6.4 重复6.6.2和6.6.3多次测量，将结果记录在表A.5，采用多次测量平均值作为最终测量结果。

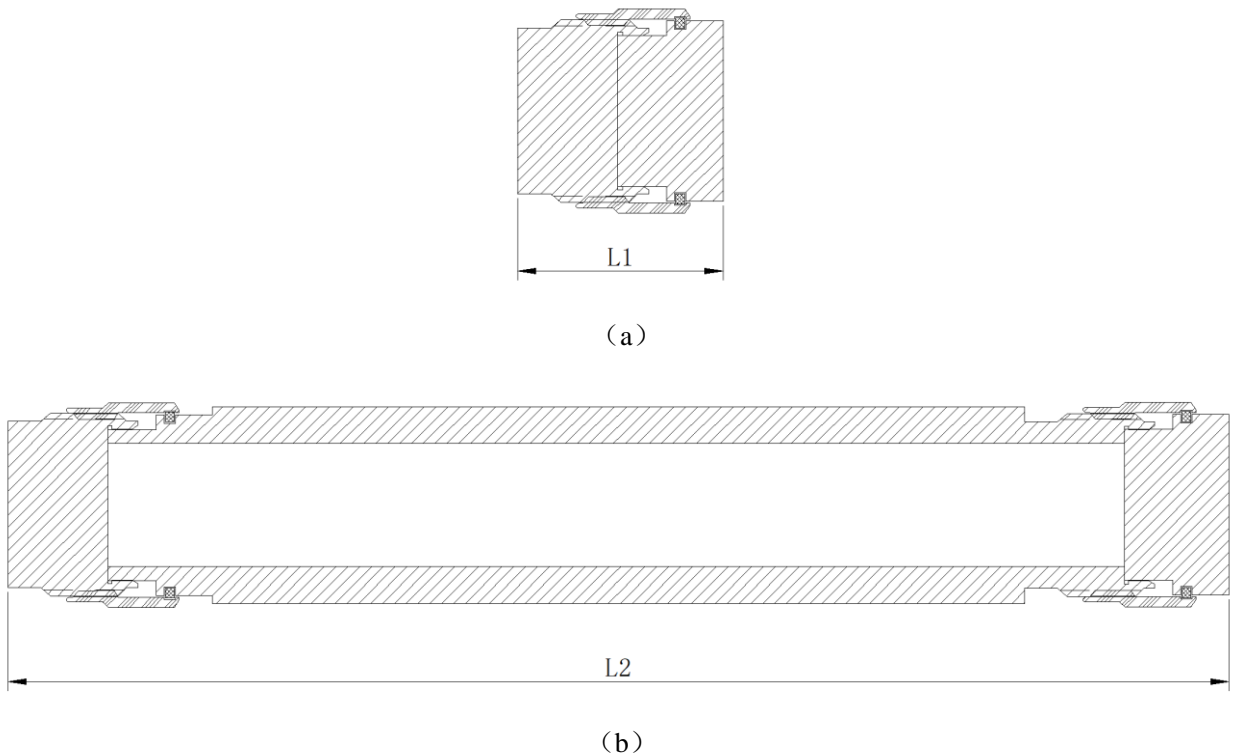


图 3 空气线内导体长度示意图

## 7 校准结果表达

校准证书或校准报告应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果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) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

## **8 复校时间间隔**

同轴空气介质传输线的复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定，推荐为 1 年。

## 附录 A

## 记录格式（参考件）

表 A.1 外观检查

检查项目	结果
外观	

表 A.2 内导体外直径

测量位置	测量次数	结果
1	1	
	2	
	⋮	
	n	
2	1	
	2	
	⋮	
	n	
N	1	
	2	
	⋮	
	n	
平均值		

表 A.3 外导体内直径

测量位置	测量次数	结果
1	1	
	2	
	⋮	
	n	
2	1	
	2	
	⋮	
	n	
N	1	
	2	
	⋮	
	n	
平均值		

表 A.4 特征阻抗

内导体外直径	外导体内直径	特征阻抗

表 A.5 机械长度

测量次数	测量夹具长度	夹具+空气线长度	空气线长度
1			
2			
3			
⋮			
N			
平均值			

## 附录 B

## 测量不确定度评定示例

## B.1 内导体外直径

内导体外直径测量装置以激光测径仪为例，用激光测径仪测量 7 mm 空气线的内导体外直径，先用外直径接近 3.04 mm 的针规校准激光测径仪，随后测量被测内导体的外径。

## B.1.1 测量模型

$$d_x = d_s + \delta d_T + \Delta d \quad (1)$$

其中： $d_x$  为被测空气线的内导体外直径， $d_s$  为针规的外直径， $\delta d_T$  为针规的温度修正值， $\Delta d$  为激光测径仪校准后测量示值的修正量。

根据测量模型空气线的内导体外直径测量误差来源包括：针规标准值的误差、针规使用时温度系数的修正、激光测径仪读数分辨力、漂移误差和测量重复性五个方面。

## B.1.2 测量不确定度传播公式

根据（1）有：

$$u(d_x)^2 = c_1^2 u(d_s)^2 + c_2^2 u(\delta d_T)^2 + c_3^2 u(\Delta d)^2 \quad (2)$$

其中  $c_1=c_2=c_3=1$ 。

## B.1.3 标准不确定度分量评定

1、针规引入的不确定度  $u(d_s)$ 

装置中所采用的针规由长度计量部门在环境温度 20 °C 下完成校准，校准结果的标准不确定度为 0.5 um，服从正态分布。

2、针规的温度修正值引入的不确定度  $u(\delta d_T)$ 

针规的校准环境温度为 20 °C，通常电子测量实验室温度为 23 °C，针规的热膨胀系数为 10 ppm/°C，由温度引入的修正值为 30 ppm×3.04 mm=0.091 um，考虑该修正量的误差为 100 %，服从均匀分布，该项标准不确定度为 0.053 um。

3、激光测径仪校准后测量示值修正量引入的不确定度  $u(\Delta d)$ 

该项误差主要由激光测径仪读数分辨力和漂移两部分组成。激光测径仪分辨率为 0.01 um，分辨力带来的标准不确定度为 0.003 um，服从均匀分布；漂移误差带来的标准不确定度为 0.003 um，服从正态分布。

4、测量重复性引入的标准不确定度  $u_a$ 

由 A 类统计方法得到  $u_a=0.017$  um。

## B.1.4 标准不确定度分量一览表

内导体外直径标准不确定度分量一览表如表 B.1。

表 B.1 内导体外直径标准不确定度分量一览表

不确定度来源	标准不确定度		灵敏系数	输出量标准不确定度分量 (um)
	符号	数值 (um)		
针规引入的不确定度	$u(d_s)$	0.5	1	0.5
针规的温度修正值引入的不确定度	$u(\delta d_T)$	0.053	1	0.053
激光测径仪校准后测量示值修正量引入的不确定度	分辨力	0.003	1	0.003
	漂移	0.003	1	0.003
测量重复性引入的标准不确定度	$u_a$	0.017	1	0.017

## B.1.5 扩展不确定度

以上各不确定度分量不相关，由不确定度传播率得合成标准不确定度为 0.503 um，根据 B.1.3 标准不确定度分量的分布情况判定合成不确定度服从正态分布，扩展不确定度为 1.0 um ( $k=2$ )。

## B.2 外导体内直径

外导体内直径测量装置以电容测微仪为例，用电容测微仪测量 7 mm 空气线的外导体内直径，先用内直径接近 7 mm 的环规校准电容测微仪，随后测量被测空气线的外导体内直径。

## B.2.1 测量模型

$$D_x = D_s + \delta D_T + \Delta D \quad (3)$$

其中： $D_x$ 为被测空气线的外导体内直径， $D_s$ 为环规的内直径， $\delta D_T$ 为环规的温度修正值， $\Delta D$ 为电容测微仪后测量示值的修正量。

根据测量模型空气线的外导体内直径测量误差来源包括：环规标准值的误差、环规使用温度与校准环境温度差修正量引入的误差、电容测微仪读数分辨力、漂移误差和测量重复性等五个方面。

## B.2.2 测量不确定度传播公式

根据 (3) 有：

$$u(D_x)^2 = c_1^2 u(D_s)^2 + c_2^2 u(\delta D_T)^2 + c_3^2 u(\Delta D)^2 \quad (4)$$

其中  $c_1=c_2=c_3=1$ 。

## B.2.3 标准不确定度分量评定

1、环规引入的不确定度 $u(D_s)$ 

装置中所采用的环规由长度计量部门在环境温度 20 °C 下完成校准，校准结果的标准不确定度为 0.5 um，服从正态分布。

2、环规的温度修正值引入的不确定度 $u(\delta D_T)$ 

环规的校准环境温度为 20 °C，通常电子测量实验室温度为 23 °C，环规的热膨胀系数为 10 ppm/°C，由温度引入的修正值为 30 ppm×7 mm=0.21 um，考虑该修正量的误差为 100 %，服从均匀分布，该项标准不确定度为 0.121 um。

3、电容测微仪校准后测量示值修正量引入的不确定度 $u(\Delta D)$ 

该项误差主要由电容测微仪读数分辨力和漂移两部分组成。电容测微仪分辨率为 0.25  $\mu\text{m}$ ，分辨力带来的标准不确定度为 0.072  $\mu\text{m}$ ，服从均匀分布；漂移误差带来的标准不确定度为 0.005  $\mu\text{m}$ ，服从正态分布。

4、测量重复性引入的标准不确定度  $u_a$ 

由 A 类统计方法得到  $u_a=0.09 \mu\text{m}$ 。

## B.2.4 标准不确定度分量一览表

外导体内直径标准不确定度分量一览表如表 B.2。

表 B.2 外导体内直径标准不确定度分量一览表

不确定度来源	标准不确定度		灵敏系数	输出量标准不确定度分量 ( $\mu\text{m}$ )
	符号	数值 ( $\mu\text{m}$ )		
环规引入的不确定度	$u(D_s)$	0.5	1	0.5
环规的温度修正值引入的不确定度	$u(\delta D_T)$	0.121	1	0.121
电容测微仪校准后测量示值修正量引入的不确定度	分辨力	$u(\Delta D)$	1	0.072
	漂移		1	0.005
测量重复性引入的标准不确定度	$u_a$	0.09	1	0.09

## B.2.5 扩展不确定度

以上各不确定度分量不相关，由不确定度传播率得合成标准不确定度为 0.527  $\mu\text{m}$ ，根据 B.2.3 标准不确定度分量的分布情况判定合成不确定度服从正态分布，扩展不确定度为 1.1  $\mu\text{m}$  ( $k=2$ )。

## B.3 特征阻抗

空气线的特征阻抗根据测量得到的外导体内直径和内导体外直径计算得到。

## B.3.1 测量模型

$$Z_0 \approx \frac{59.9585}{\sqrt{\epsilon_r}} l \ln \frac{D}{d} \quad (5)$$

其中  $Z_0$  为被测空气线的特征阻抗， $D$  为被测空气线的外导体内直径， $d$  为被测空气线的内导体外直径， $\epsilon_r$  为空气的相对介电常数。

根据测量模型空气线的特征阻抗测量误差来源包括：空气线外导体内直径测量误差、空气线内导体外直径测量误差和测量重复性等三个方面。这里没有考虑空气线本身几何结构不完善、安装不理想等因素引入的误差，如内导体、外导体圆度不够、内导体安装后偏离外导体圆心等。实际对于精密空气线来说这些影响很小，可以忽略。

## B.3.2 测量不确定度传播公式

根据 (5) 有：

$$u(Z_0)^2 = c_1^2 u_r(D)^2 + c_2^2 u_r(d)^2 \quad (6)$$

其中：

$$c_1 = -c_2 = \frac{59.9585}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

### B.3.3 标准不确定度分量评定

#### 1、空气线外导体内直径测量相对误差 $u_r(D)$

以测量的7 mm空气线为例，外导体内直径测量结果为：7.0013 mm，测量不确定度为：1.1 um( $k=2$ )，那么标准相对不确定度为：1.57e-4，服从正态分布。

#### 2、空气线内导体外直径测量相对误差 $u_r(d)$

以测量的7 mm空气线为例，内导体外直径测量结果为：3.0425 mm，测量不确定度为：1.0 um( $k=2$ )，那么标准相对不确定度为：3.29e-4，服从正态分布。

#### 3、测量重复性引入的标准不确定度 $u_a$

由A类统计方法得到 $u_a=0.005 \Omega$ 。

### B.3.4 标准不确定度分量一览表

特征阻抗标准不确定度分量一览表如表 B.3。

表 B.3 特征阻抗标准不确定度分量一览表

不确定度来源	标准不确定度		灵敏系数	输出量标准不确定度分量 ( $\Omega$ )
	符号	数值		
外导体内直径测量相对误差	$u_r(D)$	1.57e-4	59.939	0.009
内导体外直径测量相对误差	$u_r(d)$	3.29e-4	-59.939	0.020
测量重复性	$u_a$	0.005	1	0.005

### B.3.5 扩展不确定度

以上各不确定度分量不相关，由不确定度传播率得合成标准不确定度为 0.0224  $\Omega$ ，根据 B.3.3 标准不确定度分量的分布情况判定合成不确定度服从正态分布，扩展不确定度为 0.045  $\Omega$ ( $k=2$ )。

## B.4 机械长度

以复合三坐标测量仪通过参考面测试夹具测量被测空气线机械长度为例，复合三坐标测量仪的测量精度为(2.5 + L/200) um (其中 L 为 mm 单位的长度值)。

### B.4.1 测量模型

$$L_x = L_1 - L_{ref} \quad (7)$$

其中 $L_x$ 为被测空气线的机械长度， $L_1$ 为被测空气线连接参考面测试夹具的长度， $L_{ref}$ 为参考面测试夹具直接连接的长度。

### B.4.2 测量不确定度传播公式

两次长度为单独测量，不考虑二者间的相关性，根据 (7) 有：

$$u(L_x)^2 = c_1^2 u(L_1)^2 + c_2^2 u(L_{ref})^2 \quad (8)$$



其中： $c_1 = -c_2 = 1$ 。

#### B.4.3 标准不确定度分量评定

##### 1、被测空气线连接参考面测试夹具的长度测量误差 $u(L_1)$

以测量的 7 mm 空气线为例，被测空气线连接参考面测试夹具的长度测量结果为：15.0543 mm，根据复合三坐标测量仪的测量精度，测量结果的标准相对不确定度为：0.86  $\mu\text{m}$ ，服从正态分布。

##### 2、参考面测试夹具直接连接的长度测量误差 $u(L_{ref})$

以测量的 7 mm 空气线为例，参考面测试夹具直接连接的长度测量结果为：5.0524 mm，根据复合三坐标测量仪的测量精度，测量结果的标准相对不确定度为：0.84  $\mu\text{m}$ ，服从正态分布。

##### 3、测量重复性引入的标准不确定度 $u_a$

由 A 类统计方法得到  $u_a=0.24 \mu\text{m}$ 。

#### B.4.4 标准不确定度分量一览表

机械长度标准不确定度分量一览表如表 B.4。

**表 B.4 机械长度标准不确定度分量一览表**

不确定度来源	标准不确定度		灵敏系数	输出量标准不确定度分量 ( $\mu\text{m}$ )
	符号	数值 ( $\mu\text{m}$ )		
被测空气线连接参考面测试夹具的长度测量误差	$u(L_1)$	0.86	1	0.86
参考面测试夹具直接连接的长度测量误差	$u(L_{ref})$	0.84	-1	0.84
测量重复性	$u_a$	0.24	1	0.24

#### B.4.5 扩展不确定度

以上各不确定度分量不相关，由不确定度传播率得合成标准不确定度为 1.23  $\mu\text{m}$ ，根据 B.4.3 标准不确定度分量的分布情况判定合成不确定度服从正态分布，扩展不确定度为 2.5  $\mu\text{m}(k=2)$ 。

## 附录 C

## 实际测量数据示例

## C.1 内导体外直径

空气线内导体外直径测量结果

测量位置 (mm)	外直径 (mm)
3.5	1.0457
5.5	1.0467
7.5	1.0463
9.5	1.0476
11.5	1.0487
13.5	1.0484
15.5	1.0463
平均值	1.04711

## C.2 外导体内直径

空气线外导体内直径测量结果

测量位置 (mm)	外直径 (mm)
3.5	2.4038
5.5	2.4040
7.5	2.4047
9.5	2.4055
11.5	2.4063
13.5	2.4063
15.5	2.4061
平均值	2.40523

**C.3 特征阻抗**

空气线特征阻抗

内导体外直径	外导体内直径	特征阻抗
1. 04711	2. 40523	49. 85

**C.4 机械长度**

空气线序列号	长度平均值(mm)
1	12.9952
2	15.4914
3	25.4964

## 附录 D

## 同轴空气介质传输线结构

同轴空气介质传输线由外导体圆筒和内导体针构成，其结构如图 1 所示，其中  $a$  为内导体外半径， $b$  为外导体内半径。

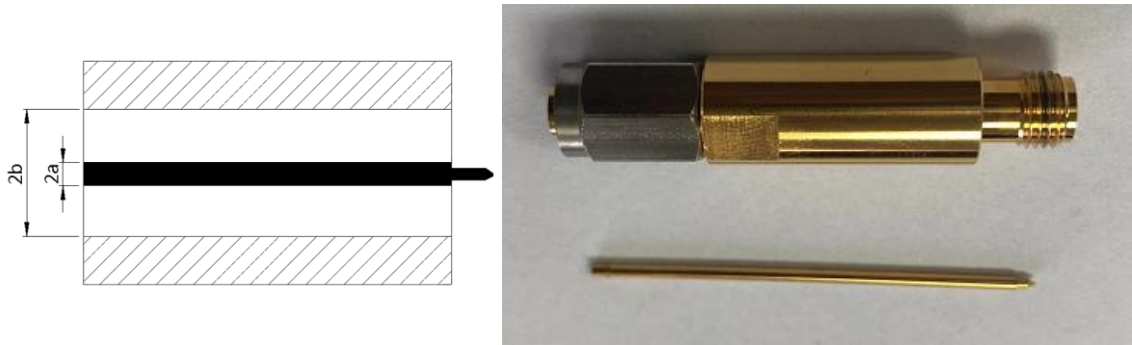


图 1 同轴空气介质传输线结构，左图为示意图，右图为空气线实物