



中华人民共和国工业和信息化部
石油和化工计量技术规范

JJF（石化）0**-202*

制动软管屈挠疲劳试验机校准规范

Calibration Specification for Brake Hose Flexural Fatigue

Testing Machines

(报批稿)

20**-**-**发布

20**-**-**实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

制动软管屈挠疲劳 试验机校准规范

Calibration Specification for Brake

Hose Flexural Fatigue Testing Machines

JJF (石化) 0**—202*

归口单位：中国石油和化学工业联合会

主要起草单位：青岛中化新材料实验室检测技术有限公司

青岛中化新材料实验室

参加起草单位：青岛北橡计量检测技术有限公司

青岛奥博森新材料科技有限公司

本规范委托全国石油和化工行业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

吴 康（青岛中化新材料实验室检测技术有限公司）

盛晓磊（青岛中化新材料实验室检测技术有限公司）

贾志杰（青岛中化新材料实验室检测技术有限公司）

吴香迪（青岛中化新材料实验室）

参加起草人：

张 程（青岛北橡计量检测技术有限公司）

宋 帅（青岛北橡计量检测技术有限公司）

孙文瑞（青岛奥博森新材料科技有限公司）

许 艺（青岛奥博森新材料科技有限公司）

目录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 概述	(1)
4 计量特性	(2)
5 校准条件	(3)
5.1 环境条件	(3)
5.2 测量标准及其他设备	(3)
6 校准项目和校准方法	(3)
6.1 校准项目	(3)
6.2 校准方法	(3)
7 校准结果	(5)
7.1 校准记录	(5)
7.2 校准证书	(5)
7.3 不确定度	(5)
8 复校时间间隔	(5)
附录 A 制动软管屈挠疲劳试验机校准记录格式	(6)
附录 B 制动软管屈挠疲劳试验机校准证书内页格式	(7)
附录 C 转速示值误差测量结果不确定度评定示例	(8)
附录 D 压力示值误差测量结果不确定度评定示例	(11)
附录 E 转盘中心与轴承中心距测量结果不确定度评定示例	(15)

引言

本规范依据 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》等基础性系列规范进行制定。

本校准规范主要参考 GB 16897—2022《制动软管的结构、性能要求及试验方法》制定。

本规范为首次发布。

制动软管屈挠疲劳试验机校准规范

1 范围

本规范适用于测试液压制动软管屈挠疲劳性能的试验机的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则

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

制动软管屈挠疲劳试验机（以下简称试验机）是测试制动软管屈挠疲劳性能的专用设备，主要由可动部分和固定部分组成。可动部分由水平连杆及转盘组成，可动水平连杆的两端通过轴承垂直安装在转盘上，转盘的中心与轴承的中心相距 $101.60\text{mm} \pm 0.12\text{mm}$ ，固定部分为可调的固定水平连杆，固定水平连杆平行于同转盘中心在同一水平面内的可动水平连杆，两个连杆上都装有可平行安装液压制动软管总成的若干个接头。可动水平连杆上的接头是封闭的，固定水平连杆上的接头与液压源连通，试验时主动软管一端固定在固定水平连杆上，一端固定在可动水平连杆上，转盘带动可动水平连杆使制动软管旋转，试验设备的液压源容积及管路设置应不影响试验结果。试验机结构示意图见图 1，转盘中心与轴承中心相距距离示意图见图 2。

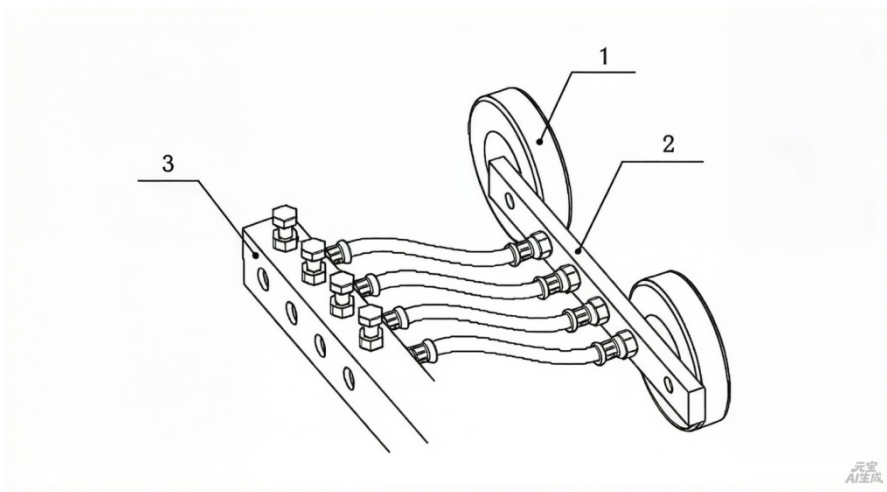


图1 试验机结构示意图

1—转盘；2—可动水平连杆；3—固定水平连杆

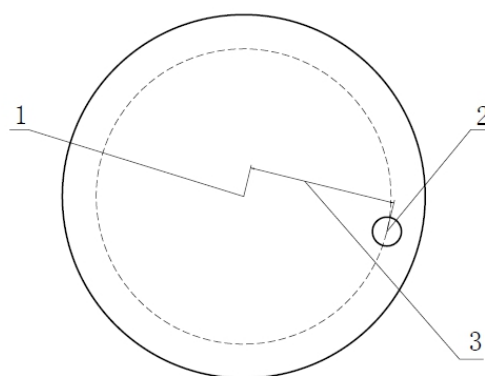


图2 转盘中心与轴承中心相距距离示意图

1—转盘中心；2—轴承中心；3—转盘中心与轴承中心相距距离

4 计量特性

具体计量特性见表1。

表1 试验机计量特性一览表

序号	项目		技术要求
1	转速示值误差/（r/min）	800	MPE：±10
2	动态压力示值误差/MPa	1.62	MPE：±0.10
3	转盘中心与轴承中心距/mm	101.60	MPE：±0.12
注：以上指标不适用于合格性判别。			

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 温度条件

环境温度：（5~30）℃。

5.1.2 湿度条件

相对湿度：不大于 85 % 。

5.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 2。

表 2 校准项目和测量标准

序号	校准项目	测量标准名称及技术要求
1	转速示值误差	转速表：测量范围（0~1000）r/min；准确度等级 0.1 级
2	动态压力示值误差	数字压力表：测量范围（0~2.5）MPa；准确度等级 0.25 级
3	转盘中心与轴承中心距	游标卡尺：测量范围（0~300）mm；MPE：±0.04mm 高度卡尺：测量范围（0~300）mm；MPE：±0.04mm
注：也可使用满足准确度要求的其他标准器。		

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

试验机的校准项目见表 2。

6.2 校准方法

6.2.1 校准前检查

校准前检查试验机转盘是否可正常转动，水平可动连杆是否可正常移动，各管路有无漏油情况。

6.2.2 转速示值误差

将反光条贴在试验机转盘外缘处，试验机转速设定为 800r/min，启动试验机，待转速稳定后，记录试验机显示转速 N ，使用转速表测量实际转速 N_1 ，按下式（1）计算转速示值误差 ΔN ，重复测量 3 次，结果取 3 次示值误差的算术平均值作为测量结果，保留到 1 r/min。

$$\Delta N = N - N_1 \quad (1)$$

式中:

ΔN —— 转速示值误差, r/min;

N —— 试验机显示值, r/min;

N_1 —— 转速表示值, r/min。

6.2.3 动态压力示值误差

通过转接头, 将数字压力表安装在试样固定端, 再安装试样, 设定好参数后, 开启试验机, 运行稳定后, 记录设备压力测量传感器显示值 P , 数字压力表显示值 P_1 , 按式 (2) 计算动态下压力示值误差 ΔP , 重复测量 3 次, 取 3 次测量值的算术平均值作为测量结果, 保留到 0.01MPa。

$$\Delta P = P - P_1 \quad (2)$$

式中:

ΔP —— 动态压力示值误差, MPa;

P —— 试验机压力显示值, MPa;

P_1 —— 精密压力表示值, MPa。

6.2.4 转盘中心与轴承中心距

将试验机上样品拆下后, 使可动水平连杆处于最下方位置, 用高度卡尺测量轴承外圆距转盘外圆的距离 l , 用游标卡尺测量转盘直径 D , 轴承外径 d , 按式 (3) 计算出中心距, 取 3 次测量值的算术平均值作为测量结果, 保留到 0.01mm。

$$L = \frac{D}{2} - \frac{d}{2} - l \quad (3)$$

式中:

L —— 转盘中心与轴承中心距, mm;

D —— 转盘直径, mm;

d —— 轴承外径, mm;

l —— 轴承外圆距转盘外圆距离, mm。

7 校准结果

7.1 校准记录

校准记录应详尽记录测量数据和计算结果。推荐的校准记录格式见附录 A。

7.2 校准证书

经校准的试验机应出具校准证书。校准结果应在校准证书上反映。校准证书包括的信息应符合 JJF 1071—2010 中 5.12 的要求，推荐的校准证书内页格式见附录 B。

7.3 不确定度

校准证书应给出各校准项目测量结果的扩展不确定度，评定示例见附录 C、附录 D、附录 E。

8 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间间隔。建议一般不超过 12 个月。

附录 A

制动软管屈挠疲劳试验机校准记录格式

共 页 第 页

基本信息												
委托单位				原始记录号				校准证书号				
仪器名称				规格型号				设备编号				
制造厂商				环境温度	℃			相对湿度	%			
标准器												
名称	编号		溯源单位及证书号		测量范围		有效期		不确定度或准确度等级或最大允许误差			
校准前检查:												
校准结果												
校准点	试验机示值/(r/min)			转速表示值/(r/min)			转速示值误差/r/min					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
800 r/min												
转速示值误差平均值/r/min				扩展不确定度 ($k=2$)								
校准点	试验机示值/MPa			数字压力表示值/MPa			动态压力示值误差/MPa					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1.62MPa												
动态压力示值误差平均值/MPa			扩展不确定度 ($k=2$)									
转盘中心与轴承中心距/mm	转盘直径/mm			轴承外径/mm			轴承外圆距转盘外圆的距离/mm			中心距/mm		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
中心距平均值/mm				扩展不确定度 ($k=2$)								
技术依据												
校准地点						校准日期 年 月 日						
备注												

校准员:

核验员:

附录 B

制动软管屈挠疲劳试验机校准证书内页格式

证书编号					
校准机构授权说明					
校准的技术依据 JJF (石化) 0**-202*制动软管屈挠疲劳试验机校准规范					
校准环境条件及地点					
地点					
环境温度	℃	相对湿度	%	其他	
标准器					
名称编号	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	标准器溯源单位及证书号	有效期至	
校准结果					
校准项目		技术要求	实测值	扩展不确定度 ($k=2$)	备注
1	转速示值误差 /(r/min)	800 ± 10			
2	动态压力示值 误差/MPa	1.62 ± 0.10			
3	转盘中心与轴承中心距/mm	101.60 ± 0.12			

附录 C

转速示值误差测量结果不确定度评定示例

C.1 校准方法

校准方法如本规范 6.2.2。

C.2 建立测量模型

转速示值误差测量模型见式 (C.1)：

$$\Delta N = N - N_1 \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔN —— 转速示值误差, r/min;

N —— 试验机显示值, r/min;

N_1 —— 转速表示值, r/min。

方差和灵敏系数：

由式 (C.1) 得方差传播公式：

$$u^2(\Delta N) = c_1^2 u^2(N) + c_2^2 u^2(N_1) \quad (\text{C.2})$$

式中：

$u(\Delta N)$ —— 转速示值误差的测量不确定度；

$u(N)$ —— 被校试验机引入的不确定度分量；

$u(N_1)$ —— 转速表引入的不确定度分量。

$$c_1 = \frac{\partial \Delta N}{\partial N} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial \Delta N}{\partial N_1} = -1$$

所以式 (C.2) 简化为

$$u^2(\Delta N) = u^2(N) + u^2(N_1) \quad (\text{C.3})$$

C.3 测量结果不确定度的评定

C.3.1 不确定度来源

转速示值误差测量结果不确定度来源主要由被检试验机引入的不确定度分量和转速表最大允许误差引入的不确定度分量组成。

C.3.2 被校试验机引入的不确定度分量 u_1 C.3.2.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{11}

按照本规范 6.2.2 步骤进行操作, 将反光条贴在转盘外缘处, 试验机转速设定为 800r/min, 启动试验机, 待转速稳定后, 记录试验机转速和转速表的数据, 重复测量 10 次, 测量结果见表 C.1。

表 C.1 转速 10 次测量结果

单位: r/min

第 <i>i</i> 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
试验机转速示值	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
转速表实测值	812.4	807.1	811.7	805.8	809.6	806.5	805.1	808.9	807.2	808.3
示值误差/ ΔN_i	-12.4	-7.1	-11.7	-5.8	-9.6	-6.5	-5.1	-8.9	-7.2	-8.3

计算转速示值误差的算术平均值:

$$\overline{\Delta N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_i = -8.26 \text{r/min} \quad (\text{C.4})$$

采用贝塞尔公式计算单次测量的实验标准偏差 $s(\Delta N_i)$

$$s(\Delta N_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \overline{\Delta N})^2}{n-1}} = 2.42 \text{r/min} \quad (\text{C.5})$$

式中:

ΔN_i ——第*i*次测量结果, r/min;

$\overline{\Delta N}$ ——10 次测量结果的平均值, r/min;

n ——测量次数。

实际测量以 3 次测量值的平均值作为测量结果, 故标准不确定度:

$$u_{11} = \frac{s(\Delta N_i)}{\sqrt{3}} = 1.40 \text{r/min} \quad (\text{C.6})$$

C.3.2.2 设备的显示分辨力引入的不确定度分量 u_{12}

试验机转速的显示分辨力为 1r/min, 区间半宽 $a=0.5\text{r/min}$, 估计服从均匀分布, $k=\sqrt{3}$, 故:

$$u_{12} = \frac{a}{k} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \text{ r/min} = 0.3 \text{ r/min} \quad (\text{C.7})$$

因测量重复性和分辨力引入的不确定度分量中取较大值, 故:

$$u_1 = 1.40 \text{ r/min} \quad (\text{C.8})$$

C.3.3 转速表最大允许误差引入的不确定度分量 u_2

转速表给出的准确度等级为 0.1 级, 转速示值取 800r/min 计算区间半宽, 估计服从均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 故:

$$u(N_1) = \frac{800 \times 0.001}{\sqrt{3}} \text{ r/min} = 0.46 \text{ r/min} \quad (\text{C.9})$$

C.3.4 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 C.2

表 C.2 不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	不确定度分量的值/ (r/min)	灵敏系数 $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_i u(x_i)$
u_1	被校试验机引入的不确定度	1.40	1	1.40
u_2	转速表最大允许误差引入的不确定度	0.46	-1	0.46

C.3.5 合成标准不确定度

各输入量之间相互独立, 互不相关, 因此:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{1.40^2 + 0.46^2} \text{ r/min} = 1.47 \text{ r/min} \quad (\text{C.10})$$

C.3.6 扩展不确定度

扩展不确定度 $U = ku_c$, 取包含因子 $k = 2$,

$$U = ku_c = 2 \times 1.47 = 2.94 \text{ r/min} \approx 3.0 \text{ r/min} \quad (k = 2) \quad (\text{C.11})$$

附录 D

动态压力示值误差测量结果不确定度评定示例

D.1. 校准方法

校准方法如本规范 6.2.3。

D.2 建立测量模型

动态压力示值误差测量模型见式 (D.1)：

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (\text{D.1})$$

式中：

ΔP ——动态压力示值误差，MPa；

P_1 ——试验机设备显示值，MPa；

P_2 ——数字压力表示值，MPa。

方差和灵敏系数

由式 (D.1) 得方差传播公式：

$$u^2(\Delta P) = c_1^2 u^2(P_1) + c_2^2 u^2(P_2) \quad (\text{D.2})$$

式中：

$u(\Delta P)$ ——动态压力示值误差的测量不确定度；

$u(P_1)$ ——被校试验机引入的不确定度；

$u(P_2)$ ——数字压力表最大允许误差引入的不确定度。

$$c_1 = \frac{\partial \Delta P}{\partial P_1} = 1 ; \quad c_2 = \frac{\partial \Delta P}{\partial P_2} = -1 ; \text{ 所以式 (D.2) 简化为:}$$

$$u^2(\Delta P) = u^2(P_1) + u^2(P_2) \quad (\text{D.3})$$

令 $u_c = u(\Delta P)$ ； $u_1 = u(P_1)$ ； $u_2 = u(P_2)$ ；则式 (D.3) 转化为：

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 \quad (\text{D.4})$$

式中：

u_c ——动态压力示值误差的合成标准不确定度；

u_1 ——被校试验机引入的不确定度分量；

u_2 ——数字压力表最大允许误差引入的不确定度分量。

D.3 测量结果不确定度的评定

D.3.1 不确定度来源

动态压力示值误差测量结果不确定度来源主要由被校试验机引入的不确定度分量 u_1 和数字压力表最大允许误差引入的不确定度分量 u_2 组成。

D.3.2 被校试验机引入的不确定度分量 u_1

D.3.2.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_{11}

将数字压力表安装在设备上固定端，再安装试样，设定好试验压力 1.62MPa 后，开启试验机，运行稳定后，记录试验机压力显示值和数字压力表的显示值，作 10 次重复测量，测量结果见表 D.1。

表 D.1 压力 10 次测量结果

单位：MPa

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
试验机压力示值	1.66	1.68	1.69	1.65	1.67	1.64	1.70	1.68	1.66	1.65
数字压力表示值	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
示值误差/ ΔP_i	0.04	0.06	0.07	0.03	0.05	0.02	0.08	0.06	0.04	0.03

计算示值误差的算术平均值：

$$\overline{\Delta P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta P_i = 0.05 \text{MPa} \quad (\text{D.5})$$

采用贝塞尔公式计算单次测量的实验标准偏差 $s(\Delta P_i)$ ：

$$s(\Delta P_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2}{n-1}} = 0.02 \text{MPa} \quad (\text{D.6})$$

式中：

ΔP_i ——第 i 次测量结果，MPa；

$\overline{\Delta P}$ ——10 次测量结果的平均值，MPa；

n ——测量次数。

实际测量以 3 次测量的平均值作为测量结果，故标准不确定度：

$$u_{11} = \frac{s(\Delta P_i)}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ MPa} \quad (\text{D.7})$$

D.3.2.2 试验机测压装置分辨力引入的标准不确定度分量 u_{12}

试验机测压装置的分辨力为 0.01 MPa, 区间半宽 a 为 0.005 MPa, 估计为均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 故:

$$u_{12} = \frac{a}{k} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} \text{ MPa} = 0.003 \text{ MPa} \quad (\text{D.8})$$

因重复性和分辨力引入的标准不确定度分量中取较大值, 故:

$$u_1 = u_{11} = 0.012 \text{ MPa} \quad (\text{D.9})$$

D.3.3 数字压力表最大允许误差引入的标准不确定度分量 u_2

数字压力表的精度等级为 0.25 级, 区间半宽 $a = 0.00625 \text{ MPa}$, 估计为均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 故:

$$u_1 = \frac{a}{k} = \frac{0.00625}{\sqrt{3}} \text{ MPa} \approx 0.0036 \text{ MPa} \quad (\text{D.10})$$

D.3.4 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 D.2。

表 D.2 标准不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	不确定度分量的值 / MPa	灵敏系数 $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_i u(x_i)$
u_1	被校试验机引入的不确定度	0.012	1	0.012
u_2	数字压力表最大允许误差引入的不确定度	0.0036	-1	0.0036

D.4 合成标准不确定度

各输入量之间相互独立, 互不相关, 因此:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.012^2 + 0.0036^2} \text{ MPa} = 0.013 \text{ MPa} \quad (\text{D.11})$$

D.5 扩展不确定度

扩展不确定度 $U = ku_c$ ，取包含因子 $k = 2$ ，压力示值误差测量结果的扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.013 \text{MPa} = 0.026 \text{MPa} \approx 0.03 \text{MPa} \quad (k = 2) \quad (\text{D.12})$$

附录 E

转盘中心与轴承中心距测量结果不确定度的评定示例

E.1 校准方法

校准方法如本规范 6.2.4。

E.2 建立测量模型

转盘中心与轴承中心距测量模型如式 (E.1)：

$$L = \frac{D}{2} - \frac{d}{2} - l \quad (\text{E.1})$$

式中：

L ——转盘中心与轴承中心距, mm;

D ——转盘直径, mm;

d ——轴承外径, mm;

l ——轴承外圆距转盘外圆距离, mm。

方差和灵敏系数

由式 (E.1) 得方差传播公式：

$$u^2(L) = c_1^2 u^2(D) + c_2^2 u^2(d) + c_3^2 u^2(l) \quad (\text{E.2})$$

式中：

$u(L)$ ——转盘中心与轴承中心距的测量不确定度；

$u(D)$ ——测量转盘直径引入的不确定度分量；

$u(d)$ ——测量轴承外径引入的不确定度分量；

$u(l)$ ——测量轴承外圆距转盘外圆距离引入的不确定度分量。

$$c_1 = \frac{\partial L}{\partial D} = \frac{1}{2}; \quad c_2 = \frac{\partial L}{\partial d} = -\frac{1}{2}; \quad c_3 = \frac{\partial L}{\partial l} = -1$$

令 $u_c = u(L)$; $u_1 = u(D)$; $u_2 = u(d)$; $u_3 = u(l)$, 则式 (E.2) 化为：

$$u_c^2 = c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 \quad (\text{E.3})$$

式中：

u_c ——转盘中心与轴承中心距的测量不确定度；

u_1 ——测量转盘直径引入的不确定度分量；

u_2 ——测量轴承外径引入的不确定度分量；

u_3 ——测量轴承外圆距转盘外圆距离引入的不确定度分量。

E.3 测量结果不确定度的评定

E.3.1 不确定度来源

转盘中心与轴承中心距的测量结果不确定度来源主要由测量转盘直径引入的不确定度分量 u_1 ，测量轴承外径引入的不确定度分量 u_2 ，测量轴承外圆距转盘外圆距离引入的不确定度分量 u_3 组成。

E.3.2 测量转盘直径引入的不确定度分量 u_1

E.3.2.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{11}

按照本规范 6.2.4 步骤进行操作，记录测量结果如表 E.1。

表 E.1 转盘直径 10 次测量结果

第 <i>i</i> 次测量	1	2	3	4	5
转盘直径/mm	250.03	250.02	250.02	250.02	250.01
第 <i>i</i> 次测量	6	7	8	9	10
转盘直径/mm	250.03	250.02	250.01	250.01	250.02

计算转盘直径的算术平均值：

$$\overline{D_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = 250.02 \text{ mm} \quad (\text{E.4})$$

采用贝塞尔公式计算单次测量的实验标准偏差 $s(D_i)$

$$s(D_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \overline{D_i})^2}{n-1}} = 0.007 \text{ mm} \quad (\text{E.5})$$

式中：

D_i ——第*i*次测量结果，mm；

$\overline{D_i}$ ——10次测量结果的平均值，mm；

n ——测量次数。

实际测量以 3 次测量值的平均值作为测量结果，故标准不确定度：

$$u_{11} = \frac{s(\Delta D_i)}{\sqrt{3}} = 0.004 \text{ mm} \quad (\text{E. 6})$$

E. 3. 2. 2 游标卡尺最大允许误差引入的不确定度分量 u_{12}

游标卡尺给出的最大允许误差为 $\pm 0.04 \text{ mm}$ ，区间半宽 $a = 0.04 \text{ mm}$ ，估计为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u_{12} = \frac{a}{k} = \frac{0.04}{\sqrt{3}} \text{ mm} = 0.023 \text{ mm} \quad (\text{E. 7})$$

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2} = \sqrt{0.004^2 + 0.023^2} \text{ mm} = 0.023 \text{ mm} \quad (\text{E. 8})$$

E. 3. 3 测量轴承外径引入的不确定度分量 u_2

E. 3. 3. 1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{21}

按照本规范 6. 2. 4 步骤进行操作，记录测量结果如表 E. 2。

表 E. 2 轴承外径 10 次测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
轴承外径/mm	20.12	20.11	20.13	20.12	20.11
第 i 次测量	6	7	8	9	10
轴承外径/mm	20.11	20.12	20.11	20.12	20.12

计算轴承外径的算术平均值：

$$\bar{d}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = 20.117 \text{ mm} \quad (\text{E. 9})$$

采用贝塞尔公式计算单次测量的实验标准偏差 $s(d_i)$

$$s(d_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d}_i)^2}{n-1}} = 0.007 \text{ mm} \quad (\text{E. 10})$$

式中：

d_i ——第 i 次测量结果，mm；

$\bar{d}_i$ —— 10 次测量结果的平均值, mm;

n —— 测量次数。

实际测量以 3 次测量值的平均值作为测量结果, 故标准不确定度:

$$u_{21} = \frac{s(\Delta d_i)}{\sqrt{3}} = 0.004 \text{ mm} \quad (\text{E. 11})$$

E. 3. 3. 2 游标卡尺最大允许误差引入的不确定度分量 u_{22}

游标卡尺给出的最大允许误差为 $\pm 0.04 \text{ mm}$, 区间半宽 $a = 0.04 \text{ mm}$, 估计为均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 故:

$$u_{22} = \frac{a}{k} = \frac{0.04}{\sqrt{3}} \text{ mm} = 0.023 \text{ mm} \quad (\text{E. 12})$$

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = \sqrt{0.004^2 + 0.023^2} \text{ mm} = 0.023 \text{ mm} \quad (\text{E. 13})$$

E. 3. 4 测量轴承外圆距转盘外圆距离引入的不确定度分量 u_3

E. 3. 4. 1 测量重复性引入的不确定度分量 u_{31}

按照本规范 6. 2. 4 步骤进行操作, 记录测量结果如表 E. 3。

表 E. 3 10 次测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
轴承外圆距转盘 外圆距离/mm	13. 37	13. 38	13. 37	13. 37	13. 38
第 i 次测量	6	7	8	9	10
轴承外圆距转盘 外圆距离/mm	13. 38	13. 38	13. 37	13. 38	13. 38

计算轴承外圆距转盘外圆距离的算术平均值:

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i = 13.38 \text{ mm} \quad (\text{E. 14})$$

采用贝塞尔公式计算单次测量的实验标准偏差 $s(d_i)$

$$s(l_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l}_i)^2}{n-1}} = 0.005 \text{ mm} \quad (\text{E. 15})$$

式中:

l_i ——第*i*次测量结果, mm;

$\bar{l}_i$ ——10次测量结果的平均值, mm;

n ——测量次数。

实际测量以3次测量值的平均值作为测量结果, 故标准不确定度:

$$u_{31} = \frac{s(\Delta l_i)}{\sqrt{3}} = 0.003 \text{ mm} \quad (\text{E. 16})$$

E. 3. 4. 2 高度卡尺最大允许误差引入的不确定度分量 u_{32}

高度卡尺给出的最大允许误差为 $\pm 0.04 \text{ mm}$, 区间半宽 $a = 0.04 \text{ mm}$, 估计为均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 故:

$$u_{32} = \frac{a}{k} = \frac{0.04}{\sqrt{3}} \text{ mm} = 0.023 \text{ mm} \quad (\text{E. 17})$$

$$u_3 = \sqrt{u_{31}^2 + u_{32}^2} = \sqrt{0.003^2 + 0.023^2} \text{ mm} = 0.023 \text{ mm} \quad (\text{E. 18})$$

E. 3. 5 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 E. 4。

表 E. 4 不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	不确定度分量的值 /mm	灵敏系数 $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_i u(x_i)$
u_1	转盘直径测量引入的不确定度	0.023	0.5	0.0115
u_2	轴承外径测量引入的不确定度	0.023	-0.5	0.0115
u_3	轴承外圆距转盘外圆距离测量引入的不确定度	0.023	-1	0.023

E. 3. 6 合成标准不确定度

各输入量之间相互独立, 互不相关, 因此:

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2} = \sqrt{0.0115^2 + 0.0115^2 + 0.023^2} \\ &= 0.028 \text{ mm} \end{aligned} \quad (\text{E. 19})$$

E. 3. 7 扩展不确定度

扩展不确定度 $U = ku_c$ ，取包含因子 $k = 2$ ，

$$U = ku_c = 2 \times 0.028 \text{ mm} = 0.056 \text{ mm} \approx 0.06 \text{ mm} \quad (k = 2) \quad (\text{E. 20})$$

JJF（石化）0**~ 202*