

中华人民共和国交通运输部部门计量检定规程

水运工程 钢弦式锚索测力计

# 编制说明

(征求意见稿)

规程编写组

2016 年 10 月

# 水运工程 钢弦式锚索测力计部门计量检定规程

## 编制说明

### 1 任务来源

本交通运输部门计量检定规程是依据《交通运输部关于下达 2016 年交通运输标准化计划的通知》交科技发【2016】506 号，立项修订的，规程修编计划号为 JJG2016-17。

### 2 编制过程

原检定规程于 2002 年 10 月成立了《水运工程 钢弦式锚索测力计》计量检定规程编写组。2003 年 3 月提出该检定规程的征求意见稿，经过修改先后形成送审稿和报批稿。于 2004 年 6 月 3 日发布，2004 年 9 月 1 日实施并定为中华人民共和国交通部部门计量检定规程，规程代号与规程顺序号为 JJG（交通）036，年号为 2004。

水运工程 钢弦式锚索测力计（JJG（交通）036-2004）公开发布并实施至今已有 12 年之久，根据该规程实施运行情况和工程检测技术的发展变化，原规程有必要进行修编，一些技术要求和技术指标以及试验程序、计算方法需要修改。依据交科技发【2016】506 号文，于 2014 年 10 月成立了《水运工程 钢弦式锚索测力计》计量检定规程修编组。

本规程在修编过程中广泛收集了国内外钢弦式锚索测力计的研究单位、生产单位、使用单位，以及相关企标准、行业标准、国家标准、国外标准的有关资料，，依据 JJF 1002-2010《国家计量检定规程编写规则》，结合土木工程检测技术的实际需求对 JJG（交通）036-2004《水运工程 钢弦式锚索测力计》进行了修编，2016 年 10 月完成了 JJG（交通）036-XXXX《水运工程 钢弦式锚索测力计》征求意见稿。

### 3 标准编制原则

根据此类产品的国内生产水平，内容上以国内先进技术为依据，参考 JT/T 578《水运工程 钢弦式锚索测力计》中的技术要求；形式上按 JJF1002《国家计量检定规程编写规则》的要求修编。

#### 4 修编内容及依据

修编内容及依据见下表。

序号	JJG（交通）036-XXXX	JJG（交通）036-2004	依 据
1	<p><b>1 范围</b></p> <p>本规程适用于钢弦式锚索测力计的首次检定、后续检定和使用中检查。</p> <p><b>7 计量器具控制</b></p> <p>计量器具控制适用于首次检定、后续检定和使用中检查。</p>	<p><b>1 范围</b></p> <p>本规程适用于钢弦式锚索测力计的首次检定和后续检定。</p> <p><b>6 计量器具控制</b></p> <p>计量器具控制适用于首次检定和后续检定。</p>	JJF1002-2010 国家计量检定 规程编写规则
2	<p><b>5.2 铭牌</b></p> <p>锚索测力计应标明制造厂或厂标、型号、测量范围及出厂编号、出厂日期。</p>	<p><b>5.2 铭牌</b></p> <p>锚索测力计应标明制造厂或厂标、型号及出厂编号、出厂日期。</p> <p><b>5.3 产品合格证书</b></p> <p>每支孔隙水压力计的合格证书应包括：制造厂名、产品名称、型号、测量范围、主要性能参数、制造日期、产品编号、检验员印章。</p>	
3	<p><b>7.1 检定条件</b></p> <p><b>7.1.1 参比工作条件</b></p> <p>7.1.1.1 温度为 <math>20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}</math>。</p> <p>7.1.1.2 相对湿度为 <math>\leq 85\%</math>。</p> <p>7.1.1.3 大气压力为 <math>86\text{ kPa} \sim 106\text{ kPa}</math>。</p> <p>7.1.1.4 应在周围无影响测量的机械振动、冲击、电磁干扰等环境下进行检定</p>	<p><b>6.1 试验条件</b></p> <p><b>6.1.1 参比工作条件</b></p> <p>6.1.1.1 环境温度为 <math>20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}</math>。</p> <p>6.1.1.2 大气压力为 <math>86\text{ kPa} \sim 106\text{ kPa}</math>。</p> <p><b>6.1.2 环境条件</b></p> <p>应在周围无影响测量的机械振动、冲击、电磁干扰等环境下进行检定。</p>	JT/T 578-XXXX 钢弦式锚索测 力计
4	<p><b>7.1.2 检定设备</b></p> <p>7.1.2.1 准确度等级为 1 级的 6000kN 万能材料试验机；</p> <p>7.1.2.2 100V 绝缘电阻表；</p>	<p><b>6.1.2 检定设备</b></p> <p>6.1.2.1 1%精度的 6000 kN 万能材料试验机；</p> <p>6.1.2.2 0.2 级精密压力表；</p>	

	7.1.2.3 分辨力为 0.01 Hz 的钢弦频率测定仪； 7.1.2.4 示波器。	6.1.2.3 分辨力为 0.01 Hz 的钢弦频率测定仪。				
5	表 2 检定项目和检定类别				JJF1002-2010  国家计量检定  规程编写规则	
	检定项目	检定方法	检定类别			
			首次检定	后续检定		使用中检查
	外观	7.3.1	+	+		+
	分辨力	7.3.2	+	+		+
	滞后	7.3.3	+	+		-
	重复性	7.3.3	+	+		-
	线性度	7.3.3	+	+		-
	综合误差	7.3.3	+	+		+
	注：+表示应检定，“-”表示可以不检定。					
6	表 2 检定项目和检定类别				无	
	检定项目	检定方法	检定类别			
			首次检定	后续检定		
	外观	6.3.1	+	+		
	分辨力	6.3.2	+	+		
	滞后	6.3.2	+	+		
	重复性	6.3.2	+	+		
	线性度	6.3.2	+	+		
	综合误差	6.3.2	+	+		
	注：+表示应检定。					
6	7.3.2 分辨力 7.3.2.1 试验步骤 a) 在参比工作条件下，钢弦式锚索测力计预先放置24h以上； b) 将钢弦式锚索测力计安装在万能材料试验机上，静置20min，然后进行正式试验； c) 测量零压力(拉力)状态下的输出频率值,然后按0.01% F S逐级加荷，观察输出频率的变化，直到输出频率发生了变化，记录输出频率第					

	<p>一次发生变化时的压力或拉力值（最小启动压力或拉力）和对应的输出频率值；</p> <p>7.3.2.2 计算方法</p> $f_n = f_0 - f_{nr} \quad (1)$ <p>式中： <math>f_n</math> ——额定输出频率，Hz；</p> <p><math>f_0</math> ——零点拉力（压力）输出频率，Hz；</p> <p><math>f_{nr}</math> ——加载至满量程拉力（压力）时输出的频率值，Hz。</p> $r = \frac{1}{f_n} \times 100\% F \cdot S \quad (2)$ <p>式中： <math>r</math> ——分辨力，%；</p> <p><math>f_n</math> ——额定输出频率，Hz。</p>		
7	<p>7.3.3 其他参数</p> <p>7.3.3.1 试验步骤</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>在参比工作条件下，钢弦式锚索测力计预先放置24h以上；</li> <li>将钢弦式锚索测力计安装在万能材料试验机上，静置20min，然后进行正式试验；</li> <li>按量测范围取相隔两点间拉力增量为10% F S，逐级加荷至满量程拉力值。每级拉力至少保持1min后再读取输出频率值；</li> <li>加荷到满量程拉力值后，按c)的方法逐级卸荷至零点拉力，并读取输出频率值；</li> <li>退回零点拉力值后，保持3min，读取零点拉力输出频率值；</li> </ol>	<p>6.3.2 性能参数</p> <p>检定步骤如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>在参比工作条件下，锚索测力计预先放置24h以上；</li> <li>将锚索测力计安装在万能材料试验机上，按满量程拉力和压力值预拉、压各三次，然后进行正式试验；</li> <li>按量测范围取相隔两点间拉力（压力）增量为10% F • S，逐级加荷至满量程拉力（压力）值。每级拉力（压力）至少保持1min后再读取输出频率值；</li> <li>加荷到满量程拉力（压力）值后，按c)的方法逐级卸荷至零点拉力（压力），并读取输出频率值；</li> </ol>	<p>JT/T 578-XXXX</p> <p>钢弦式锚索测力计和</p> <p>JJF1002-2010</p> <p>国家计量检定规程编写规则</p>

	<p>f) 检定记录表格式见附录A。</p> <p>6.3.3.2 计算方法</p> <p>a) 钢弦式锚索测力计所承受拉力<math>P</math>的计算</p> $P_i = k\{f_0^2 - [f_i^2 + B(T_0 - T_i)]\} \quad (3)$ <p>由于试验时 <math>T_0 = T_i</math> 所以:</p> $P_i = k(f_0^2 - f_i^2) \quad (4)$ <p>式中: <math>P_i</math>——<math>i</math>时刻钢弦式锚索测力计受到的拉应力或压应力, kN;</p> <p><math>k</math>——传感器系数, kN / Hz<sup>2</sup>;</p> <p><math>f_0</math>——零点拉力(压力)输出频率, Hz;</p> <p><math>f_i</math>——对应于 <math>P_i</math> 的输出频率, Hz;</p> <p><math>B</math>——传感器温度影响系数, Hz<sup>2</sup>/°C;</p> <p><math>T_0</math>——传感器标定时温度, °C;</p> <p><math>T_i</math>——传感器观测时环境温度, °C;</p> <p>b) 钢弦式锚索测力计传感器系数 <math>k</math> 的计算</p> $k_i = P_i / \{f_0^2 - [f_i^2 + B(T_0 - T_i)]\} \quad (5)$ <p>由于试验时 <math>T_0 = T_i</math> 所以:</p> $k_i = P_i / (f_0^2 - f_i^2) \quad (6)$ $k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_i \quad (7)$	<p>e) 退回零点拉力(压力)值后, 保持3min, 读取零点拉力(压力)输出频率值;</p> <p>f) 按a)至e)的步骤, 至少进行三次试验;</p> <p>g) 检定记录表格式见附录 A; 按附录 B 计算分辨力、滞后、重复性、线性度、综合误差。</p>	
--	--	--	--

	<p>式中：<math>k_i</math>——对应于 <math>P_i</math> 时的钢弦式锚索测力计系数 <math>\text{kN} / \text{Hz}^2</math>。</p> <p>c) 滞后 <math>a'</math>、重复度 <math>a''</math>、线性度 <math>L</math> 和综合误差 <math>\varepsilon_C</math> 的计算</p> <p>根据 6.3.3.1 的试验步骤获得的数据，绘制校核曲线图（如图 3 所示），计算滞后 <math>a'</math>、重复度 <math>a''</math>、线性度 <math>L</math> 和综合误差 <math>\varepsilon_C</math>。其工作直线采用最小二乘法，即：</p> $N = a + bP_i \quad (8)$ $N = f_0^2 - f_i^2 \quad (9)$ <p>式中：<math>N</math>——输出频率的平方差；</p> <p><math>a</math>——最小二乘法直线的截距；</p> <p><math>b</math>——最小二乘法直线的斜率；</p> <p><math>P_i</math>——<math>i</math> 时刻作用在承受膜上的压力, <math>\text{kN}</math>；</p> <p><math>f_0</math>——零点压力输出频率，<math>\text{Hz}</math>；</p> <p><math>f_i</math>——对应于 <math>p_i</math> 的输出频率，<math>\text{Hz}</math>。</p>	
--	--	--

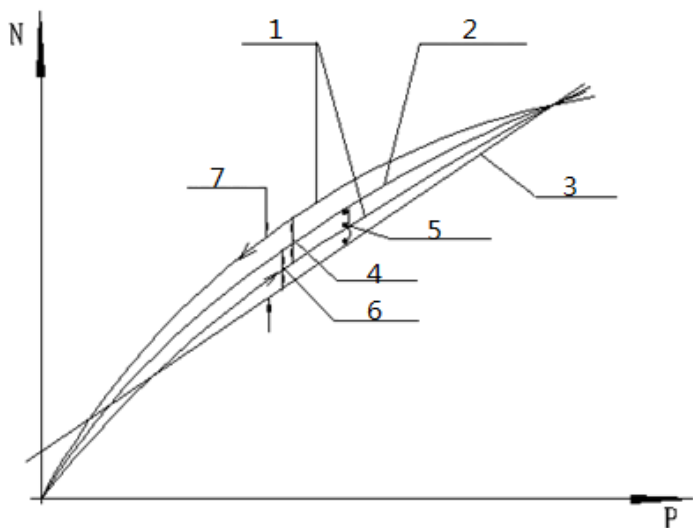


图 3 校准曲线示意图

- 1——校核曲线            4——滞后  $\Delta f_H$             6——线性度  $\Delta f_L$   
 2——平均校核曲线    5——重复度  $\Delta f_R$             7——综合误差  $\Delta f_C$   
 3——工作直线

c.1) 滞后  $a'$  的计算

$$a' = \frac{\Delta f_H}{F} \times 100\% F \cdot S \quad (10)$$

式中:  $\Delta f_H$ ——回程平均校准曲线与进程平均校准曲线, 拉力相同  
 测试点输出偏差最大值, Hz。

$F$ ——零点压力输出频率与满量程拉力时输出频率的平方



	<p>差, <math>\text{Hz}^2</math>。</p> $F = f_0^2 - f_{nr}^2 \quad (11)$ <p><math>f_0</math>——零点压力输出频率, <math>\text{Hz}</math>;</p> <p><math>f_{nr}</math>——满量程压力时输出频率, <math>\text{Hz}</math>。</p> <p>c.2) 重复度 <math>a''</math> 的计算</p> $a'' = \frac{\Delta f_R}{F} \times 100\% F \cdot S \quad (12)$ <p>式中: <math>\Delta f_R</math>——进程和回程重复校准时, 各测试点输出偏差的最大值, <math>\text{Hz}</math>;</p> <p><math>F</math>——零点压力输出频率与满量程拉力时输出频率的平方差, <math>\text{Hz}^2</math>。</p> <p>c.3) 线性度 <math>L</math> 的计算</p> $L = \frac{\Delta f_L}{F} \times 100\% F \cdot S \quad (13)$ <p>式中: <math>\Delta f_L</math>——平均校准曲线与工作直线偏差的最大值, <math>\text{Hz}</math>;</p> <p><math>F</math>——零点压力输出频率与满量程拉力 (压力) 时输出频率的平方差, <math>\text{Hz}^2</math>。</p> <p>c.4) 综合误差 <math>\varepsilon_C</math> 的计算</p>		
--	---	--	--

	$\varepsilon_c = \frac{\Delta f_c}{F} \times 100\% F \cdot S \quad (14)$ <p>式中: <math>\Delta f_c</math>——进程平均校准曲线和回程平均校准曲线二者 与工作曲线偏差的最大值, Hz;</p> <p><math>F</math>——零点压力输出频率与满量程拉力(压力)时输出 频率的平方差, Hz<sup>2</sup>。</p> <p>其滞后<math>a'</math>、重复度<math>a''</math>、线性度<math>L</math>和综合误差<math>\varepsilon_c</math>的检定结果应符合 4.2、4.3、4.4、4.5的规定。</p>		
8	删除了原“附录 B 钢弦式锚索测力计参数的计算方法”	附录 B 钢弦式孔锚索测力计参数的计算方法	JJF1002-2010 国家计量检定 规程编写规则

9

检定证书第 3 页

证书编号 ××××××- ××××

检 定 结 果

序号	被检项目	检定结果	结论
1	外观		
2	分辨力		
3	滞后		
4	重复性		
5	线性度		
6	综合误差		

注：

1 本报告检定结果仅对该计量器具有效；  
2 本证书未加盖“XXXXXX”无效；  
3 下次检定时请携带（出示）此证书。

未经授权，不得部分复印本证书。

以下空白

第 3 页 共 3 页

钢弦式锚索测力计检定合格证书背面格式

检定结果

检定项目	技术要求	检定结果	结论
外观			
分辨力			
滞后			
重复性			
线性度			
综合误差			

注：下次检定请携带此证。

JJF1002-2010  
国家计量检定  
规程编写规则

JJF1002-2010  
国家计量检定  
规程编写规则

10	检定结果通知书第 3 页					钢弦式锚索测力计检定不合格通知书背面格式			JJF1002-2010  国家计量检定  规程编写规则
	证书编号 ××××××-××××					序号	检定不合格项目	技术要求	
	检 定 结 果					1			
		序号	不合格项目	技术要求	检定结果	2			
		1				3			
		2				4			
		3				5			
		4				6			
		5				处理意见及建议：			
		6							
<div>注：<div>1 本报告检定结果仅对该计量器具有效；</div><div>2 本证书未加盖“XXXXXX”无效；</div><div>3 下次检定时请携带（出示）此证书。</div></div> <div>未经授权，不得部分复印本证书。</div>									
<div>附加说明：</div> <div>说明检定结果不合格项</div> <div>以下空白</div>									
第 3 页 共 3 页									

## 5 社会效益预测

钢弦式锚索测力计不仅被应用于水运工程的水工钢筋混凝土建筑物，而且还广泛应用于公路工程、水利工程、建筑工程、铁路及桥梁工程中。修编后的计量检定规程颁布后，更贴近于工程需求，实用性更强将促进钢弦式锚索测力计的生产、使用与管理工作的完善，实现规范化管理，具有间接的经济效益和社会效益。

## 6 其它说明

本计量检定规程为交通运输部部门计量检定规程。

本计量检定规程由交通运输部天津水运工程科学研究院提出。

## 附件 1

### 钢弦式锚索测力计示值误差测量结果的不确定度评定

#### 1 概述

1.1 测量依据：JJG（交通）036-2004 《水运工程 钢弦式锚索测力计》。

1.2 测量环境：温度为（20±2）℃（每小时温度变化应不大于 2℃），大气压力为 86kPa~106kPa。

1.3 测量标准：（20~600）kN 微机电液伺服万能试验机，准确度等级为 1 级。

1.4 测量对象：钢弦式锚索测力计，范围为（20~250）kN，综合误差±2.5%F S。

1.5 测量方法：

钢弦式锚索测力计和钢弦式钢筋计在测量范围、计量性能、使用计量标准及试验方法基本相同，故以下不确定评定以钢弦式锚索测力计为例。将钢弦式锚索测力计预先放置 24h 以上。按满量程拉力值预拉 3 次，然后进行正式试验。按测量范围取相隔两点压力增量为 10%F S，逐级加荷至满量程拉力，读取微机电液伺服万能试验机的值，作为标准值。每级拉力值至少保持 1min 后再读取输出的频率值。加拉到满量程后，再逐渐减压至零点拉力，并读取输出频率值。退回零点拉力值后，保持 3min，读取零点压力输出频率值。

#### 2 数学模型

$$\Delta F = k(f^2 - f_0^2) + c - F_N$$

式中： $\Delta F$ ——钢弦式锚索测力计的示值误差，kN；

$k$ ——频率换算为拉力时的斜率值；

$c$ ——频率换算为拉力时的截距值；

$f$ ——钢弦式锚索测力计的频率值，Hz；

$f_0$ ——拉力为 0 时钢弦式锚索测力计的频率值，Hz；

$F_N$ ——万能试验机示值，kN。

#### 3 灵敏系数和合成方差

$$c(k) = \frac{\partial \Delta F}{\partial k} = f^2 - f_0^2$$

$$c(c) = \frac{\partial \Delta F}{\partial c} = 1$$

$$c(f) = \frac{\partial \Delta F}{\partial f} = -2kf$$

$$c(f_0) = \frac{\partial \Delta F}{\partial f_0} = 2kf_0$$

$$c(F_N) = \frac{\partial \Delta F}{\partial F_N} = -1$$

由于  $f$  和  $f_0$  由同一频率测量设备测量得到，因此具有相关性； $k$ （斜率）， $c$ （截距）是在进行直线

拟合时的参数，同样具有相关性。根据不确定度的传播律，不确定度应当由下面公式计算得到：

$$u^2 = c^2(k)u^2(k) + c^2(f)u^2(f) + c^2(f_0)u^2(f_0) + c^2(c)u^2(c) + c^2(F_N)u^2(F_N) + 2c(f)c(f_0)r(f, f_0)u(f)u(f_0) + 2c(k)c(c)r(k, c)u(k)u(c)$$

#### 4 不确定度评定

##### 4.1 由频率到拉力工作直线拟合时引入的不确定度分量

###### 4.1.1 由频率到拉力换算时的斜率值引入的不确定度分量 $u(k)$

频率到拉力的转换，采用的是直线拟合的方法，采用最小二乘法，拟合频率和拉力的关系。若计算拟合系数  $k$ （斜率）和  $c$ （截距）的不确定度，应首先计算拟合结果  $y_i$  的不确定度  $s$ ，则：

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^n \left\{ y_i - [k(f_i^2 - f_0^2) + c] \right\}^2} = 1.4 \times 10^{-1}$$

则斜率  $k$  的不确定度分量

$$u(k) = s_k = s \sqrt{\frac{N}{N[\sum (f_i^2 - f_0^2)^2] - (\sum f_i^2 - f_0^2)^2}} = 2.2 \times 10^{-8}$$

###### 4.1.2 由频率到拉力换算时的截距值引入的不确定度分量 $u(c)$

$$u(c) = s_c = s \sqrt{\frac{\sum (f_i^2 - f_0^2)^2}{N[\sum (f_i^2 - f_0^2)^2] - \sum (f_i^2 - f_0^2)^2}} = 2.7 \times 10^{-1}$$

###### 4.1.3 拟合系数具有相关性，其系数直线的相关性 $r(k, c)$

$$r(k, c) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[ \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = 0.9998$$

##### 4.2 由频率测量引入的不确定度分量

###### 4.2.1 钢弦式锚索测力计的频率值引入的不确定度分量用 100kN 点作为试验点

表 9-1 智能测量仪 100kN 处 10 次测量结果表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

测量值 Hz	1726.60	1726.09	1727.20	1732.17	1725.48	1728.21	1726.30	1731.56	1730.14	1728.36
-----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

采用测量不确定度的 A 类评定方法进行评定，则：

$$u(f) = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 2.35$$

#### 4.2.2 拉力为 0kN 时钢弦式锚索测力计的频率值引入的不确定度分量

表 9-2 智能测量仪 0 kN 处 10 次测量结果表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 Hz	1366.37	1366.44	1366.44	1366.31	1366.44	1366.44	1366.44	1366.31	1366.44	1366.37

采用测量不确定度的 A 类评定方法进行评定，则：

$$u(f) = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 5.5 \times 10^{-2}$$

#### 4.2.3 智能测量仪引入的不确定度分量

由上一级检定机构直接给出的不确定值，则

$$u(F_n) = 1 \times 10^{-4}$$

智能测量仪引入的不确定度分量远小于  $u(f)$ ， $u(f_0)$ ，可以忽略不计。

#### 4.2.4 相关系数 $r(f, f_0)$

$f, f_0$  来源于同一频率测量仪器，则认为两个分量为正相关，则： $r(f, f_0) = 1$

### 4.3 微机电液伺服式万能试验引入的不确定度分量

由自身引入不确定度分量，其最大允许误差是  $\pm 1\%$ ，钢弦式锚索测力计测量范围为 (0~250) kN。

按不确定度的 B 类评定方法，则

$$u(F_N) = \frac{2.5}{\sqrt{3}} = 1.4$$

表 9-3 标准不确定度分量汇总表

标准不确定度 分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值	灵敏度系数
$u(k)$	频率换算为拉力 时的斜率值	$2.2 \times 10^{-8}$	$-1.1 \times 10^6$



$u_{(c)}$	频率换算为拉力时的截距值	$2.7 \times 10^{-1}$	1
$u_{(f)}$	钢弦式锚索测力计的频率值	2.35	$-3.1 \times 10^{-1}$
$u_{(f_0)}$	拉力为 0 时钢弦式锚索测力计的频率值	$5.5 \times 10^{-2}$	$-2.6 \times 10^{-1}$
$u_{(F_n)}$	微机电液伺服万能试验机	1.4	-1

## 5 合成不确定度

根据不确定度的传播律，将上述不确定度的分量进行合成，则：

$$\begin{aligned}
 u_c &= \sqrt{c^2(k)u^2(k) + c^2(f)u^2(f) + \cdots + 2c(k)c(c)r(k,c)u(k)u(c)} \\
 &= \sqrt{5.8 \times 10^{-1} + 7 \times 10^{-1} + 5.3 \times 10^{-2} + 2.07 \times 10^{-1} + 1.96 \times 10^{-1}} \\
 &= 1.6 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

## 6 扩展不确定度

取扩展因子  $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 1.6 = 3.2 \text{ kN}$$

## 7 结论

依据 JJG（交通）037-2004 《水运工程 钢弦式锚索测力计》建设的锚索测力计检定装置，由微机电液伺服万能试验机、智能测量仪和被检设备钢弦式锚索测力计合成后其扩展不确定为  $U = 3.2 \text{ kN}$ ， $k=2$ 。