

ICS 17

P96

备案号:

JT

中华人民共和国交通运输行业标准

JT/T 583—××××

代替 JT/T 583—2004

水运工程 钢弦式锚杆测力计

Water transport engineering—Vibrating wire anchor rod stress gauge

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国交通运输部 发布

目 次

前言..... 1

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

 3.1 钢弦式锚杆测力计..... 1

 3.2 输出频带..... 1

 3.3 参比工作条件..... 1

4 产品的结构、工作原理和基本参数..... 1

 4.1 结构型式..... 1

 4.2 工作原理..... 1

 4.3 基本参数..... 2

5 技术要求..... 2

 5.1 正常工作条件..... 2

 5.2 参比工作条件..... 2

 5.3 工作参数..... 2

 5.4 防水密封性..... 2

 5.5 温度影响..... 2

 5.6 绝缘电阻..... 3

 5.7 电器性能..... 3

 5.8 过范围限..... 3

 5.9 稳定性..... 3

 5.10 耐运输颠簸..... 3

 5.11 耐盐雾..... 3

 5.12 外观..... 3

6 试验方法..... 3

 6.1 试验条件..... 3

 6.2 主要试验设备..... 3

 6.3 性能参数试验..... 3

 6.4 防水密封性试验..... 4

 6.5 温度影响试验..... 4

 6.6 绝缘电阻试验..... 4

 6.7 电器性能试验..... 4

 6.8 过范围限试验..... 4

 6.9 稳定性试验..... 4

 6.10 颠簸试验..... 4

 6.11 盐雾试验..... 4

 6.12 外观检验..... 4

7 检验规则..... 4

 7.1 出厂检验..... 5

 7.2 型式检验..... 5

8 标志、包装、运输、贮存 5

 8.1 标志 5

 8.2 包装 6

 8.3 运输 6

 8.4 贮存 6

附录 A 钢弦式锚杆测力计技术参数的计算方法 7

前 言

本标准是水运工程建筑物和岸坡稳定性检测仪器的系列标准之一。该系列标准包括：

JT/T580-2004《水运工程 钢弦式孔隙水压力计》

JT/T577-2004《水运工程 钢弦式钢筋计》

JT/T583-2004《水运工程 钢弦式锚杆测力计》

JT/T578-2004《水运工程 钢弦式锚索测力计》

JT/T584-2004《水运工程 差动电阻式应力计》

JT/T582-2004《水运工程 滑线电阻式位移计》

JT/T581-2004《水运工程 电位器式多点位移计》

JT/T579-2004《水运工程 伺服式测斜仪》

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

JT/T 583-××××《钢弦式锚杆测力计》自实施之日起代替JT/T 583-2004《钢弦式锚杆测力计》。与JT/T 583-2004《水运工程 钢弦式锚杆测力计》比较，JT/T 583-××××《水运工程 钢弦式锚杆测力计》对以下方面做了修订：

- 增加了输出频率范围、参比工作条件的定义（见3.2、3.3）；
- 增加了工作原理（见4.2）；
- 增加了参比工作条件（见5.2）；
- 修改了性能参数中的分辨力、线性度和综合误差（见5.3.1、5.3.4、5.3.5）；
- 修改了温度影响（见5.5）；
- 修改了稳定性（见5.9）；
- 增加了耐运输颠簸（见5.10）；
- 试验条件增加了相对湿度（见6.1）；
- 修改了主要试验设备（见6.1.2）；
- 增加了分辨力试验（见6.3.1）；
- 修改了性能参数试验的试验步骤（见6.3）；
- 修改了温度影响试验（见6.5）；
- 修改了贮存（见8.4）；
- 修改了锚杆测力计承受拉应力（压应力）的计算公式，式中增加了温度影响的参数（见附录A）；
- 增加了传感器系数、温度影响系数和最小启动压力对应的输出频率值的计算公式（见附录A）；
- 删除了参考文献。

本标准由交通运输部天津水运工程科学研究院提出。

本标准由全国港口标准化技术委员会（SAC/TC 530）归口。

本标准起草单位：交通运输部天津水运工程科学研究院。

本标准主要起草人：曹玉芬、窦春晖、赵晖、柳义成。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

——JT/T 583—2004。

钢弦式锚杆测力计

1 范围

本标准规定了钢弦式锚杆测力计的术语和定义、基本参数、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存等要求。

本标准适用于安装在岩石高边坡和地下围岩内部检测锚杆应力的钢弦式锚杆测力计（以下简称为锚杆测力计）的生产和使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。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标准。

- GB/T 9359-2001 水文仪器基本环境试验条件及方法
- GB/T 191 包装储运图示标志（GB/T 191-2000，eqvISO780:1997）
- GB/T 6388 运输包装收发货标志

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

锚杆测力计 vibrating wire anchor rod stress gauge
一种长期检测岩石高边坡和地下围岩中锚杆应力的传感器。

3.2

输出频带 exportable frequency band width
为钢弦式锚杆测力计零压力输出频率与满量程(拉、压)输出频率之差。

3.3

参比工作条件 reference work condition
为标准测试工作条件。

4 产品的结构、工作原理和基本参数

4.1 结构型式

钢弦式锚杆测力计由钢套、钢弦、线圈及专用电缆组成,如图 1 所示。

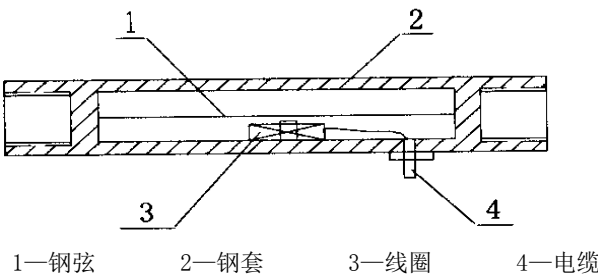
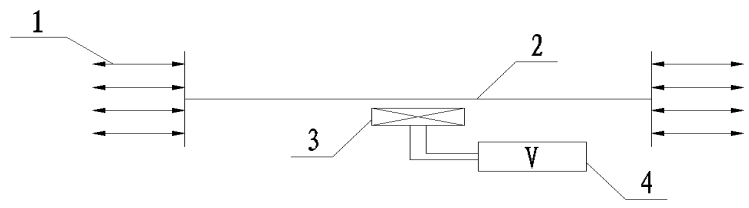


图 1 钢弦式锚杆测力计结构示意图

4.2 工作原理

当锚杆测力计的钢套受到拉力或压力时，引起锚杆测力计内部钢弦的张力发生变化，导致钢弦自振频率也发生变化，由二次仪表通过线圈对钢弦激振并接受其自振频率信号，便可求得作用在锚杆上的应力。其工作原理如图 2 所示。



1. 拉（压）力 2. 钢弦 3. 线圈 4. 激振电压

图 2 钢弦式锚杆测力计的工作原理示意图

4.3 基本参数

基本参数见表 1。

表 1 基本参数

锚杆直径, mm	16	18	20	22	25	28	32	36	40
钢套断面面积 ^a , mm ²	201	255	314	380	490	630	805	1020	1260
长度 ^a , mm	500								
拉力, kN	40	50	60	80	100	100	160	200	250
压力, kN	-20	-25	-30	-40	-50	-50	-80	-100	-130
分辨力 0.01F S ^b	≤0.10			≤0.05					
注: ^a 外形尺寸为推荐尺寸。 ^b F S 表示满量程测值, (下同)。									

5 技术要求

5.1 正常工作条件

- a) 应能在温度为-20℃~+60℃的环境中正常工作;
- b) 应能在水压力 500kPa 下正常工作。

5.2 参比工作条件

- a) 温度为 20℃±2℃;
- b) 相对湿度: ≤85%;
- c) 大气压力为 86kPa~106kPa。

5.3 工作参数

5.3.1 分辨力

锚杆测力计的分辨力 r 应符合表 1 中的规定。

5.3.2 滞后

锚杆测力计的滞后 a' 应不大于 ±1%F S。

5.3.3 重复性

锚杆测力计的重复性 a'' 应不大于 ±0.5%F S。

5.3.4 线性度

锚杆测力计的线性度 L 应不大于 ±2%F S。

5.3.5 综合误差

锚杆测力计的综合误差 ε_C 应不大于 ±2.5%F S。

5.4 防水密封性

锚杆测力计在水压力 500kPa 下连续正常工作 72h 无渗漏。

5.5 温度影响

在大气压状态、温度为在-20℃~+60℃的使用范围内, 锚杆测力计温度影响应不大于 ±0.4%F S /10℃。

5.6 绝缘电阻

锚杆测力计芯线与传感器壳体之间的绝缘电阻应大于 $50\text{M}\Omega$ 。

5.7 电器性能

在大气压状态下, 锚杆测力计的线圈间歇振荡电压不大于 160V , 振荡输出信号最大幅度一般不小于 $100\mu\text{V}$, 输出波形应稳定、无抖动。持续衰减时间不小于 1.5s 。

5.8 过范围限

锚杆测力计应能承受满量程 1.2 倍的拉力和压力, 当拉力(或压力)恢复至小于满量程拉力(或压力)后, 在参比工作条件下, 应符合 5.3 的规定。

5.9 稳定性

5.9.1 锚杆测力计在参比工作条件下, 按满量程拉力和压力值加、卸荷分别循环 3 次, 其零点漂移应不大于 $\pm 0.1\%F S$;

5.9.2 锚杆测力计静置 90d 后, 在参比工作条件下, 其零点漂移应不大于 $\pm 0.1\%F S$, 并符合 5.3 的规定;

5.9.3 锚杆测力计在温度 $-30^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ 的运输贮存环境中应不损坏, 当环境条件恢复至参比工作条件时, 其零点漂移应不大于 $\pm 0.25\%F S$ 。并符合 5.3 的规定。

5.10 耐运输颠簸

在包装运输时, 锚杆测力计能承受运输颠簸, 应能承受最大加速度为 $5g$; 进行历时 10min 的颠簸试验, 当恢复至参比工作条件时, 其零点漂移应不大于 $\pm 0.1\%F S$, 并符合 5.3 的规定。

5.11 耐盐雾

锚杆测力计耐盐雾性应符合 GB/T 9359-2001 中 9.3 的规定。

5.12 外观

锚杆测力计各部分应连接牢固, 表面在进行防腐处理后, 应无锈斑及裂痕, 引出的电缆、护套应无损伤。

6 试验方法

6.1 试验条件

应在参比工作条件下进行试验。

6.2 主要试验设备

- a) 准确度等级为 1 级的 600kN 万能材料试验机;
- b) 分辨力为 0.01Hz 的钢弦频率测定仪;
- c) 100V 绝缘电阻表;
- d) 示波器。

6.3 性能参数试验

6.3.1 分辨力试验

试验步骤如下:

- a) 在参比工作条件下, 锚杆测力计预先放置 24h 以上;
- b) 将锚杆测力计安装在应变传感器标定架上, 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;
- d) 按上述 c) 的步骤, 至少进行三次试验, 每次间隔不少于 5min ;
- e) 然后将锚杆测力计在万能材料试验机上, 静置 20min , 然后进行正式试验;
- f) 测量零压力(拉力)状态下的输出频率值, 然后按满量程拉力和压力加荷, 记录满量程拉力值和压力值及各自对应的输出频率值;
- g) 按上述 f) 的步骤, 至少进行三次试验, 每次间隔不少于 5min 。

6.3.2 其他参数试验

试验步骤如下：

- a) 在参比工作条件下，锚杆测力计应预先放置 24h 以上；
- b) 将锚杆测力计安装在万能材料试验机上，静置 20min，按满量程拉力和压力值预拉、压各 3 次，然后进行正式试验；
- c) 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；
- d) 加压到满量程拉力（压力）值后，按 c) 的方法逐级退荷至零点拉力（压力），并读取输出频率值；
- 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；
- f) 按 a)~e) 的步骤，至少进行 3 次试验。

6.3.3 参数的计算方法

按附录 A 计算锚杆测力计的参数，应符合 5.3 的规定。

6.4 防水密封性试验

将锚杆测力计放置在压力容器中加水压力 500kPa，持续 72h 应符合 5.4 的规定。

6.5 温度影响试验

锚杆测力计温度影响试验按下列要求进行：

- a) 在 0℃~40℃ 范围内进行试验；
- b) 每个温度环境下应保持 1h 后，方可读取输出频率值；
- c) 温度影响试验应不少于 10 个温度试验值，10 次试验每级温差不应小于 2℃。其测试温度范围不应小于 30℃；
- d) 温度影响系数计算方法按附录 A 中相关计算方法进行。

6.6 绝缘电阻试验

用万用表量测电路与密封壳体之间的绝缘电阻，应符合 5.6 的规定。

6.7 电器性能试验

在参比工作条件下，用示波器测量锚杆测力计的线圈间歇振荡电压及波形，应符合 5.7 的规定。

6.8 过范围限试验

将锚杆测力计置于万能材料试验机上施加满量程 1.2 倍的拉力（压力），在参比工作条件下恢复至额定拉力（压力），测量并计算锚杆测力计的工作参数，应符合 5.3 的规定。

6.9 稳定性试验

6.9.1 将锚杆测力计放置在万能材料试验机上，按满量程拉力（压力）值加荷，再卸荷，并按拉力和压力各重复 3 次。然后，恢复至零拉力（压力）状态，2h 后测其零点漂移值应符合 5.9.1 的规定；

6.9.2 将锚杆测力计静置 90d，在参比工作条件下，按 6.1 的规定重复做一次试验，并测试其零点漂移值，应符合 5.9.2 的规定；

6.9.3 将锚杆测力计置于高、低温箱中，取温度为-30℃和+70℃两个测点，加温后读取输出频率值，当环境条件恢复至参比工作条件时，应符合 5.9.3 的规定。

6.10 颠振试验

将包装好的锚杆测力计，固定在颠振试验台上，施加加速度为 5g，进行历时 10min 的颠振试验，当恢复至参比工作条件后，应符合 5.10 的规定。

6.11 盐雾试验

按 GB/T 9359-2001 中的 9.3 进行试验。试验后，受试产品应符合 5.11 的规定，并能正常工作。

6.12 外观检验

用目测进行外观检验，锚杆测力计表面应符合 5.12 的规定。

7 检验规则

7.1 出厂检验
7.1.1 检验项目

出厂检验项目见表 2。

表 2 检验项目

检验项目	检验要求	试验方法	出厂检验	型式检验
工作参数	5.3	6.3	+	+
防水密封性	5.4	6.4	+	+
温度影响	5.5	6.5	+	+
绝缘电阻	5.6	6.6	+	+
电器性能	5.7	6.7	+	+
过范围限	5.8	6.8	+	+
稳定性	5.9	6.9	+	+
颠簸	5.10	6.10	-	+
盐雾试验	5.11	6.11	-	+
外观	5.12	6.12	+	+

注：“+”表示应进行的检验项目，“-”表示不检验的项目

- 7.1.2 样本抽取
批量生产或连续生产的锚杆测力计，出厂前应进行全数检验。
- 7.1.3 合格判定
检验中，只要有一项检验要求不合格，则判为不合格。
- 7.1.4 处理
对于不合格的锚杆测力计可进行返修，返修后应重新进行检验。

7.2 型式检验
7.2.1 有下列情况之一时，应要求进行型式检验：

- a) 新研制的产品；
- b) 当设计、工艺、材料等方面有重大变更时；
- c) 停止生产满一年的产品再次生产时；
- d) 国家质量监督机构提出进行型式检验的要求时。

7.2.2 检验项目
型式检验项目见表 2。

- 7.2.3 样本抽取
型式检验应从定型前指定产品中随机抽取5%的样品进行检验。5%的样品不足5个时，按5个抽取。

7.2.4 合格判定
表2中规定的各项试验均合格，则判定型式检验合格；检验中，只要有一项检验要求不合格，则判为不合格。

- 7.2.5 结果的处理
检验中出现故障或某项通不过时，应停止检验；查明故障原因，排除故障，提出故障分析报告，重新进行该项检验。

8 标志、包装、运输、贮存

- 8.1 标志
8.1.1 锚杆测力计应在其显著部位标明其型号、名称、生产厂家、出厂编号及日期等内容。
8.1.2 外包装箱标志的内容：

- a) 产品型号、名称、件数;
- b) 箱体尺寸(mm): 长×宽×高;
- c) 箱体毛重(kg);
- d) 到站(港)及收货单位;
- e) 发站(港)及发货单位;
- f) 应有“精密仪器”、“小心轻放”等运输标志。

8.1.3 包装储运图示和收发货标志应按照GB/T 191和GB/T 6388的有关规定正确选用。

8.2 包装

锚杆测力计包装要求:

- a) 包装箱应牢固可靠;
- b) 包装箱内锚杆测力计各部分在运输中不应相互碰撞、摩擦;
- c) 包装箱应有防潮、防振等措施;
- d) 随同锚杆测力计装箱的技术文件有产品说明书、装箱单、产品合格证及有关的技术文件等。

8.3 运输

包装好的锚杆测力计应能适应各种运输方式。

8.4 贮存

包装好的锚杆测力计应能适应下列环境条件及贮存要求:

- a) 贮存环境温度: $-20^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$;
- b) 贮存环境相对湿度: 不大于 85%;
- c) 贮存锚杆测力计的附近不得有酸性、碱性及其他腐蚀性物质;
- d) 贮存时间最长不得大于一年, 超过一年应进行检验。

附录 A

(规范性附录)

钢弦式锚杆测力计技术参数的计算方法

A.1 锚杆测力计所承受拉应力和压应力 P 的计算

$$P_i = k\{f_0^2 - [f_i^2 + B(T_0 - T_i)]\} \dots\dots\dots (A.1)$$

由于试验时 $T_0 = T_i$ 所以:

$$P_i = k(f_0^2 - f_i^2) \dots\dots\dots (A.2)$$

式中: P_i —— i 时刻锚杆测力计受到的拉应力或压应力 (拉应力为正值、压应力为负值), 单位为千牛 (kN);

k ——传感器系数, 单位为千牛每二次方赫兹 (kN/Hz^2);

f_0 ——零点拉力 (压力) 输出频率, 单位为赫兹 (Hz);

f_i ——对应于 p_i 的输出频率, 单位为赫兹 (Hz);

B ——传感器温度影响系数, 单位为二次方赫兹每摄氏度 ($\text{Hz}^2/^\circ\text{C}$);

T_0 ——传感器标定时温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$);

T_i ——传感器观测时环境温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$);

校核曲线按式 (A.2) 处理, 其工作直线采用最小二乘法, 即:

$$N = a + bp_i \dots\dots\dots (A.3)$$

$$N = f_0^2 - f_i^2 \dots\dots\dots (A.4)$$

式中: N ——输出频率的平方差;

a ——最小二乘法直线的截距;

b ——最小二乘法直线的斜率

p_i —— i 时刻作用在锚杆测力计受到的拉应力或压应力 (拉应力为正值、压应力为负值), 单位为千牛 (kN);

f_0 ——零点压力输出频率, 单位为赫兹 (Hz);

f_i ——对应于 p_i 的输出频率, 单位为赫兹 (Hz)。

根据试验数据, 按式 (A.23) ~ (A.27) 计算相应的性能参数。校核曲线示意图如图 A.1 所示。

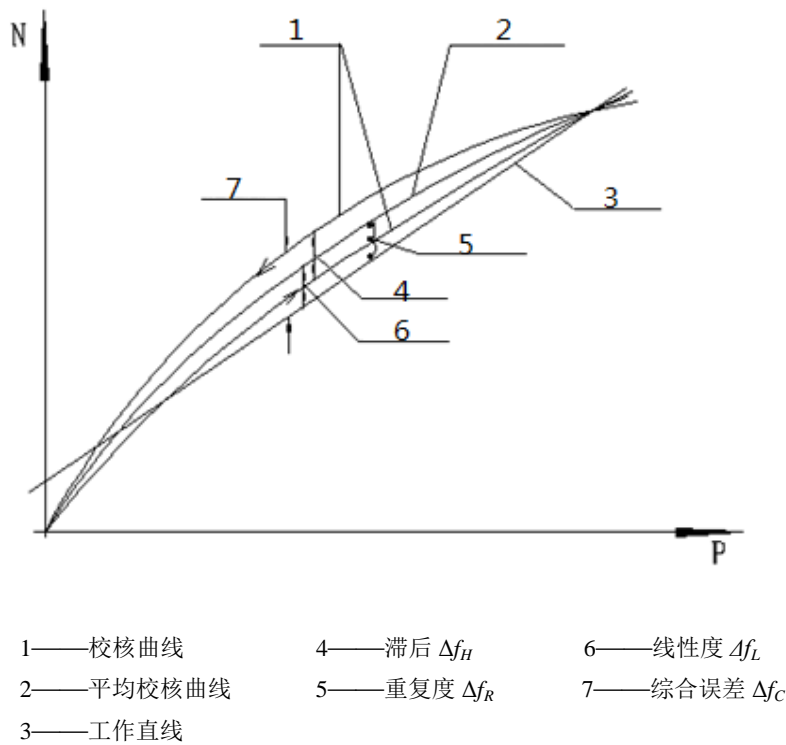


图 A.1 校准曲线示意图

A.2 锚杆测力计传感器系数 k 的计算

$$k_i = P_i / \{f_0^2 - [f_i^2 + B(T_0 - T_i)]\} \dots\dots\dots (A.5)$$

由于试验时 $T_0 = T_i$ 所以:

$$k_i = P_i / (f_0^2 - f_i^2) \dots\dots\dots (A.6)$$

$$k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_i \dots\dots\dots (A.7)$$

式中: k_i ——对应于 P_i 时的锚杆测力计系数【当压力试验时求得的 k_i 应乘以 (-1)】, 单位为千牛每二次方赫兹 (kN/Hz^2);

m ——试验的次数 ($i=1, 2, \dots, m$)。

A.3 锚杆测力计温度影响系数 B 的计算

$$B = (f_i^2 - f_j^2) / (T_i - T_j) \dots\dots\dots (A.8)$$

式中: B ——锚杆测力计温度影响系数, 单位为二次方赫兹每摄氏度 ($\text{Hz}^2/^\circ\text{C}$);

f_i ——对应于 T_i 的输出频率, 单位为赫兹 (Hz);

f_j ——对应于 T_j 的输出频率, 单位为赫兹 (Hz);

T_i ——锚杆测力计 i 时环境温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$);

T_j ——锚杆测力计 j 时环境温度, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$)。

A.4 零点压力输出频率 f_0 的计算

$$f_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_{0i} \dots\dots\dots (A.9)$$

式中：m——试验循环的次数（i=1, 2, ...m）；

f_{0i} ——第i次加荷和退荷测量时，零点压力（拉力）下的输出频率值，单位为赫兹（Hz）。

A.5 满量程压力时输出频率 f_{Ynr} 和满量程拉力时输出频率 f_{Lnr} 的计算

$$f_{Ynr} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_{Ynri} \dots\dots\dots (A.10)$$

$$f_{Lnr} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_{Lnri} \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：m——试验循环的次数（i=1, 2, ...m）；

f_{Ynr} ——满量程压力时输出的频率值，单位为赫兹（Hz）；

f_{Ynri} ——第i次加荷至满量程压力值时的输出频率值，单位为赫兹（Hz）；

f_{Lnr} ——满量程拉力时输出的频率值，单位为赫兹（Hz）；

f_{Lnri} ——第i次加荷至满量程拉力值时的输出频率值，单位为赫兹（Hz）。

A.6 最小启动压力对应的输出频率值 f_{Yr} 和最小启动拉力对应的输出频率值 f_{Lr} 的计算

$$f_{Yr} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_{Yri} \dots\dots\dots (A.12)$$

$$f_{Lr} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_{Lri} \dots\dots\dots (A.13)$$

式中：m——试验循环的次数（i=1, 2, ...m）；

f_{Yr} ——最小启动压力对应的输出频率值，单位为赫兹（Hz）；

f_{Yri} ——第i次试验测得的最小启动压力对应的输出频率值，单位为赫兹（Hz）；

f_{Lr} ——最小启动拉力对应的输出频率值，单位为赫兹（Hz）；

f_{Lri} ——第i次试验测得的最小启动拉力对应的输出频率值，单位为赫兹（Hz）。

A.7 分辨率 r 的计算

$$r = (r_L + r_Y) / 2 \dots\dots\dots (A.14)$$

$$r_L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_{Li} \dots\dots\dots (A.15)$$

$$r_Y = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_{Yi} \dots\dots\dots (A.16)$$

式中： r ——分辨力，单位为满量程的百分比（%FS）；

r_L ——锚杆测力计受拉时测得的分辨力，单位为满量程的百分比（%F S）；

r_Y ——锚杆测力计受压时测得的分辨力，单位为满量程的百分比（%F S）；

m ——试验的次数（ $i=1, 2, \dots, m$ ）；

r_{Li} ——锚杆测力计受拉时第*i*次试验测得的分辨力,单位为满量程的百分比（%F S）；

r_{Yi} ——锚杆测力计受压时第*i*次试验测得的分辨力,单位为满量程的百分比（%F S）。

$$r_{Li} = \frac{f_{Lc}}{f_{Ln i}} \times 100\% F \cdot S \dots\dots\dots (A.17)$$

$$r_{Yi} = \frac{f_{Yc}}{f_{Yn i}} \times 100\% F \cdot S \dots\dots\dots (A.18)$$

式中: f_{Lci} ——第*i*次试验测得的零拉力状态下输出频率值 f_{0i} 与第*i*次试验测得的最小启动拉力对应的输出频率值 f_{Lri} 之差，单位为赫兹（Hz）；即：

$$f_{Lci} = f_{0i} - f_{Lri} \dots\dots\dots (A.19)$$

f_{Yc} ——第*i*次试验测得的零压力状态下输出频率值 f_{0i} 与第*i*次试验测得的最小启动压力对应的输出频率值 f_{Yri} 之差，单位为赫兹（Hz）；即：

$$f_{Yci} = f_{0i} - f_{Yri} \dots\dots\dots (A.20)$$

f_{Lni} ——第*i*次试验测得的零拉力状态下输出频率值 f_{0i} 与第*i*次试验测得的满量程拉力时对应的输出频率值 f_{Lnri} 之差，单位为赫兹（Hz）；即：

$$f_{Lni} = f_{0i} - f_{Lnri} \dots\dots\dots (A.21)$$

f_{Yn} ——第*i*次试验测得的零压力状态下输出频率值 f_{0i} 与第*i*次试验测得的满量程压力时对应的输出频率值 f_{Ynri} 之差，单位为赫兹（Hz）；即：

$$f_{Yni} = f_{0i} - f_{Ynri} \dots\dots\dots (A.22)$$

A.8 滞后 a' 的计算

$$a' = \frac{\Delta f_H}{F} \times 100\% F \cdot S \dots\dots\dots (A.23)$$

式中: Δf_H ——回程平均校准曲线与进程平均校准曲线，压力（拉力）相同测试点输出偏差最大值，单位为赫兹（Hz）。

F ——零点压力输出频率与满量程压力时输出频率的平方差，单位为二次方赫兹（Hz²），即：

$$F = f_0^2 - f_{nr}^2 \dots\dots\dots (A.24)$$

f_0 ——零点压力输出频率，Hz；

f_{nr} ——满量程压力时输出频率，Hz。

A.9 重复度 a'' 的计算

$$a'' = \frac{\Delta f_R}{F} \times 100\% F S \dots\dots\dots (A.25)$$

式中： Δf_R ——进程和回程重复校准时，各测试点输出偏差的最大值，单位为赫兹（Hz）；

F ——零点压力输出频率与满量程压力时输出频率的平方差，单位为二次方赫兹（Hz²）。

A.10 线性度 L 的计算

$$L = \frac{\Delta f_L}{F} \times 100\% F S \dots\dots\dots (A.26)$$

式中： Δf_L ——平均校准曲线与工作直线偏差的最大值，单位为赫兹（Hz）；

F ——零点压力输出频率与满量程压力（拉力）时输出频率的平方差，单位为二次方赫兹（Hz²）。

A.11 综合误差 ε_C 的计算

$$\varepsilon_C = \frac{\Delta f_c}{F} \times 100\% F S \dots\dots\dots (A.27)$$

式中： Δf_c ——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，单位为赫兹（Hz）；

F ——零点压力输出频率与满量程压力时输出频率的平方差，单位为二次方赫兹（Hz²）。