



中华人民共和国国家标准

GB/T 3409.1—2008
代替 GB/T 3409—1994

大坝监测仪器 钢筋计 第 1 部分：差动电阻式钢筋计

Instrument for dam monitoring—Rebar strain meter—
Part 1: Unbonded elastic wire resistance rebar strain meter

2008-04-09 发布

2008-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

GB/T 3409《大坝监测仪器 钢筋计》分为三个部分：

- 第1部分：差动电阻式钢筋计；
- 第2部分：振弦式钢筋计；
- 第3部分：电阻式钢筋计。

本部分为 GB/T 3409 的第1部分，代替 GB/T 3409—1994《差动电阻式钢筋计》。

本部分是对 GB/T 3409—1994《差动电阻式 钢筋计》的修订，本部分与 GB/T 3409—1994 相比主要变化如下：

- 在 4.3 的表 1 中，增加了大断面直径的钢筋计规格；
- 在第 5 章中，修改了“过范围限”、“稳定性要求”等内容；
- 在 6.10.5、7.11 中，增加了机械环境适应性指标及试验方法；
- 修改并补充了“标志”、“使用说明书”、“包装”、“运输”及“贮存”等相关内容。

本部分的附录 A 为规范性附录。

本部分由中华人民共和国水利部提出并归口。

本部分主要起草单位：水利部水文仪器及岩土工程仪器质量监督检验测试中心、国电南京电力自动化设备总厂、国网南京自动化研究院、水利部南京水利水文自动化研究所。

本部分参加起草单位：全国工业产品生产许可证办公室水文仪器及岩土工程仪器审查部。

本部分主要起草人：张德康、赵越、卢有清、章一新、石明华。

本部分参加起草人：陆旭。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB 3409—1982, GB/T 3409—1994。

大坝监测仪器 钢筋计
第 1 部分：差动电阻式钢筋计

1 范围

GB/T 3409 的本部分规定了差动电阻式钢筋计的结构组成、规格及主要参数、技术要求、试验方法、检验规则及标志、使用说明书、包装、运输和贮存等。

本部分适用于埋设在混凝土建筑物内部监测结构中钢筋应力的差动电阻式钢筋计。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 3409 的本部分的引用而成为本部分的条款。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部分，然而，鼓励根据本部分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，其最新版本适用于本部分。

GB/T 191 包装储运图示标志

GB/T 5080.7—1986 设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案

GB/T 6388 运输包装收发标志

GB 9969.1 工业产品使用说明书 总则

GB/T 15406—2007 岩土工程仪器基本参数及通用技术条件

GB/T 15464 仪器仪表包装通用技术条件

GB/T 50279 岩土工程基本术语标准

3 术语和定义

GB/T 50279 确立的以及下列术语和定义适用于 GB/T 3409 的本部分。

3.1

钢筋计 rebar strain meter

测量钢筋应力的传感器。

3.2

差动电阻式钢筋计 unbonded elastic wire resistance type rebar strain meter

以一对差动变化的金属丝作为敏感元件测量钢筋应力的钢筋计(以下简称钢筋计)。

3.3

电阻比(Z) resistance ratio

敏感元件中两个差动变化的金属丝电阻值 R_1 和 R_2 之比。

$$Z = \frac{R_1}{R_2}$$

3.4

自由状态电阻比(Z_0) free state resistance ratio

钢筋计在与电阻比变化量相对应的输入量为零时的电阻比测值。

3.5

0℃ 计算电阻值(R'_0) 0℃ calculated resistance value

对钢筋计 0℃ 以上部分的电阻值与温度之间的校准曲线。用独立线性度方法拟合的直线在电阻值轴上的截距，单位为欧姆(Ω)。

3.6

0℃ 以上的温度常数(K') temperature constant above 0℃

对钢筋计 0℃ 以上部分的电阻与温度之间的校准曲线。用独立线性度方法拟合的直线的斜率,单位为摄氏度每欧姆($^{\circ}\text{C}/\Omega$)。

3.7

0℃ 以下的温度常数(K'') temperature constant under 0℃

用于计算差动电阻式钢筋计 0℃ 以下温度用的温度常数,单位为摄氏度每欧姆($^{\circ}\text{C}/\Omega$)。

3.8

最小读数(f) minimum reading

钢筋计在全量程内相应于输出电阻比变化 0.01% 时的被测量的值。

3.9

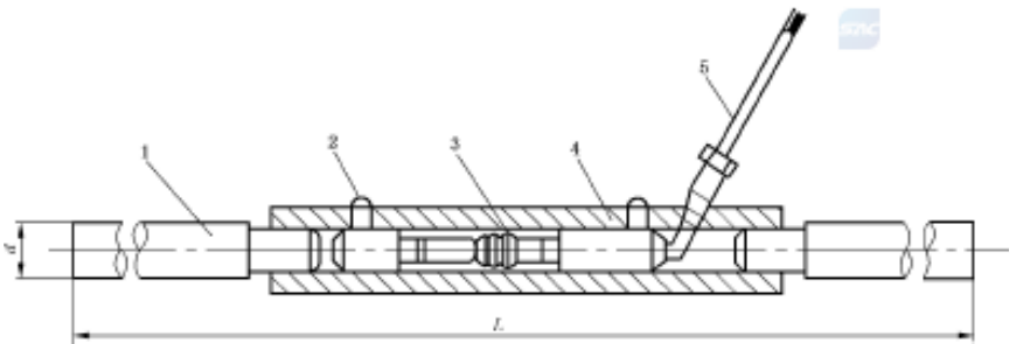
温度修正系数(b) temperature correction coefficient

用于修正钢筋计的电阻比测值中因温度变化所引起的系统误差,按每 1℃ 需修正的被测量计。

4 结构组成、规格及主要参数

4.1 结构组成

钢筋计由连接杆、钢套、应变敏感元件及引出电缆四个主要部分组成,如图 1 所示。

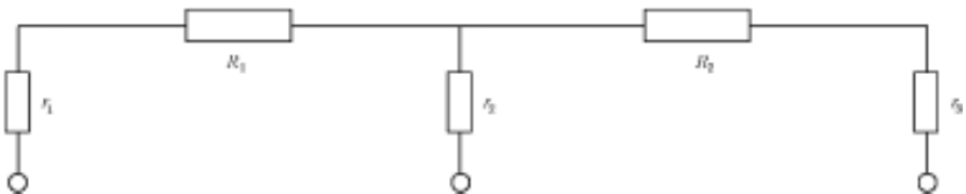


- 1——连接杆;
- 2——制紧螺钉;
- 3——应变敏感元件;
- 4——钢套;
- 5——引出电缆。

图 1 钢筋计结构图

4.2 电路简图

钢筋计的电路简图如图 2 所示。



- R_1 ——与钢筋计变形同向的钢丝的电阻值,单位为欧姆(Ω);
- R_2 ——与钢筋计变形反向的钢丝的电阻值,单位为欧姆(Ω);
- r_1, r_2, r_3 ——引出电缆三芯线的电阻值,单位为欧姆(Ω)。

图 2 电路简图

4.3 规格及主要参数

差动电阻式钢筋计主要参数应符合表 1 的规定。

表 1 主要规格参数

| | | | | |
|------|-----------------------------|--------|----------------------------|-------|
| 规格参数 | 长度(L)/mm | | ≤800 | |
| | 有效端面直径(d)/mm | | 16、18、20、22、25、28、32、36、40 | |
| 性能参数 | 应力测量范围 | 压缩/MPa | 0~100 | |
| | | 拉伸/MPa | 0~200 | 0~300 |
| | 最小读数(f)/MPa/0.01% | | <1.0 | <1.3 |
| | 0℃时自由状态电阻比(Z ₀) | | 0.800 0~1.200 0 | |
| | 温度测量范围/℃ | | -25~+60 | |

5 技术要求

5.1 工作环境条件

钢筋计应在以下环境中正常工作：

- a) 温度：-25℃~+60℃；
- b) 大气压力：86 kPa~106 kPa；
- c) 在 0.5 MPa 或规定的水压力下。

5.2 外观

钢筋计的密封壳体不应有锈斑、明显划痕及凹陷损伤；端部表面应光洁；引出电缆橡胶套应无损伤。

5.3 性能参数

5.3.1 最小读数(f)

钢筋计最小读数(f)应符合表 1 中有关规定。

5.3.2 0℃时自由状态电阻比(Z₀)

钢筋计在 0℃时自由状态电阻比(Z₀)应符合表 1 中有关规定。

5.3.3 端基线性度(α)

钢筋计的端基线性度不应超过拉量程输出量的±2.0%。

5.3.4 滞后(α')

钢筋计的滞后误差不应超过拉量程输出量的±1.0%。

5.3.5 不重复度(α'')

钢筋计的不重复度不应超过拉量程输出量的±1.0%。

5.4 温度测量误差

钢筋计的温度测值经电阻比变化量修正后，其误差不应超过±0.5℃。

5.5 绝缘性能

在下列条件下钢筋计的绝缘电阻应大于 50 MΩ：

- a) 在温度为 0℃冰水混合物中；
- b) 在温度为 60℃水中；
- c) 在 0.5 MPa 或规定压力的水中。

5.6 过范围限

5.6.1 应力过范围限

钢筋计应具有承受测量范围上限值 1.2 倍的能力，恢复至正常测量范围后，其性能应满足 5.3.3、5.3.4、5.3.5 等的要求：

- a) 端基线性度误差不应超过拉量程输出量的 $\pm 2.0\%$;
- b) 非直线度不应超过拉量程输出量的 1.0% ;
- c) 不重复度不应超过拉量程输出量的 1.0% 。

5.6.2 温度过范围限

钢筋计应具有能承受 -30°C 及 $+70^{\circ}\text{C}$ 的温度过范围限能力。当环境温度自然恢复至常温后,其性能仍应满足 5.3、5.4、5.5 等的要求。

5.7 温度修正系数及温度修正误差

钢筋计温度修正的校准曲线(因温度变化所引起的应力测值的误差与温度之间的关系曲线)其端基线性度误差以电阻比值计,不应超过 $\pm 0.02\%$ 。

5.8 稳定性

5.8.1 高温稳定性

钢筋计在经受环境温度为 $+60^{\circ}\text{C}$ 历时 48 h 的高温试验后,其性能应满足如下要求:

- a) 实测的 0°C 电阻值变化量不应超过 $\pm 0.1\ \Omega$;
- b) 最小读数 f 值的相对变化量不应超过 $\pm 2\%$;
- c) 绝缘电阻应符合 5.5 的规定。

5.8.2 长期稳定性

钢筋计拉伸至测量范围上限值后,卸载至自由状态,如此循环 20 个周期后,其性能应满足如下要求:

- a) 实测的 0°C 电阻值变化量不应超过 $\pm 0.1\ \Omega$;
- b) 最小读数 f 值的相对变化量不应超过 $\pm 2\%$;
- c) 绝缘电阻应符合 5.5 的规定。

5.9 机械环境适应性

在包装状态下,钢筋计应能承受运输、装卸、搬运过程中可能出现的振动、跌落等意外情况,其各项性能及功能应正常。

经机械环境适应性试验后,其性能仍应满足如下要求:

- a) 实测的 0°C 电阻值变化量不应超过 $\pm 0.1\ \Omega$;
- b) 最小读数 f 值相对变化量不应超过 $\pm 2\%$;
- c) 绝缘电阻应符合 5.5 的规定。

5.10 可靠性

钢筋计的可靠性要求用平均寿命(MTTF)来描述,其 MTTF 应不小于 40 000 h。

6 试验方法

6.1 试验设备

试验设备包括:

- a) 压力容器(增压装置);
- b) 一级材料试验机;
- c) 精密压力表;
- d) 差动电阻式钢筋计检测仪;
- e) 高低温湿热试验箱;
- f) 恒温水槽(工作区域最大温差不应超过 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$);
- g) 冰点槽;
- h) 二等水银温度计;
- i) 100 V 兆欧表;

- j) 跌落试验台;
- k) 振动系统。

6.2 环境试验条件

6.2.1 参比试验大气条件

参比性能试验应在以下大气条件下进行:

- a) 温度: 18℃~22℃;
- b) 相对湿度: 60%~75%;
- c) 大气压力: 86 kPa~106 kPa。

6.2.2 正常试验大气条件

当钢筋计不可能或无必要在参比测试条件下进行试验时, 推荐采用下述大气条件:

- a) 温度: 15℃~35℃(在每项试验期间, 允许的温度变化不大于 1℃/h);
- b) 相对湿度: 不大于 85%;
- c) 大气压力: 86 kPa~106 kPa。

6.3 试验方法

6.3.1 工作环境测试

必要时, 以 5.1 规定环境按 GB/T 15406—2007 的 7.3.4 进行试验, 结果应工作正常, 表面无锈蚀、剥落等。

6.3.2 外观

目测检验, 应满足 5.2 的要求。

6.3.3 性能试验

6.3.3.1 试验要求

6.3.3.1.1 钢筋计应在正常试验大气条件下预先置放 24 h 以上。

6.3.3.1.2 钢筋计安装于材料试验机后的电阻比与安装前的自由状态电阻比之间相差不应超过 $\pm 20 \times 0.01\%$ 。

6.3.3.1.3 校准点通常应包括基点和满量程点, 并均匀取布 5~11 点; 校准循环一般取 3 次。校准所得原始数据应尽可能不含可疑数据和不合理数据, 以保证校准的可靠性和计算结果的正确性。

6.3.3.2 端基线性度

对受试钢筋计施加不少于 3 次的加、卸负荷校准循环后, 先测量钢筋计零测试点的电阻比之后, 逐渐拉伸钢筋计(上行)。每到一测试点测读一个电阻比, 全量程共测得 n 个电阻比。然后, 反向(下行)重复上述过程, 同样测得 n 个电阻比, 共完成 3 次循环。分别计算上行及下行各测试点电阻比测值的平均值 $(Z_u)_i$ 及 $(Z_d)_i$ 。而后, 按式(1)计算各点总平均值。

$$(Z_a)_i = \frac{(Z_u)_i + (Z_d)_i}{2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$(Z_a)_i$ ——上、下行第 i 测试点电阻比测值的总平均值;

$(Z_u)_i$ ——上行第 i 测试点电阻比测值的平均值;

$(Z_d)_i$ ——下行第 i 测试点电阻比测值的平均值。

各测试点的理论值 Z_t 由式(2)确定:

$$(Z_t)_i = \frac{\Delta Z_i}{n-1} + (Z_a)_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

i ——测试点序数(0、1、...、 n);

ΔZ ——测量范围上限值及下限值各自的三次电阻比测值的平均值之差。

计算各测试点电阻比测值的偏差 δ_i , 按式(3)计算:

$$\delta_i = (Z_a)_i - (Z_t)_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

令偏差值中最大者为 Δ_1 , 则钢筋计的端基线性度误差 α , 按式(4)计算:

$$\alpha = \frac{\Delta_1}{\Delta Z} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

钢筋计的端基线性度误差应满足 5.3.3 的要求。

6.3.3.3 滞后(α')

滞后检验可结合 6.3.3.2 同时进行。计算出端基线性度误差检验时的每一次循环中各测试点上行及下行两个电阻比测值之间的差值。其中最大差值令为 Δ_2 , 则钢筋计的滞后 α' 按式(5)计算:

$$\alpha' = \frac{\Delta_2}{\Delta Z} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

钢筋计的滞后应满足 5.3.4 的要求。

6.3.3.4 不重复度(α'')

不重复度误差检验可结合 6.3.3.2 同时进行。计算出端基线性度误差检验时的三次循环中各测试点上行及下行各自的三个电阻比测值之间的最大差值, 其中最大者令为 Δ_3 , 则钢筋计的不重复度误差 α'' 按式(6)计算:

$$\alpha'' = \frac{\Delta_3}{\Delta Z} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

钢筋计的不重复度误差应满足 5.3.5 的要求。

6.3.3.5 最小读数(f)

最小读数 f 值由式(7)确定:

$$f = \frac{P}{A_e \Delta Z} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

A_e ——钢筋计有效端面面积, 单位为平方厘米(cm^2);

P ——试验的最大拉力, 单位为千牛(kN)。

钢筋计的最小读数应满足 5.3.1 的要求。

6.3.4 温度测量误差

钢筋计在 -25°C 、 0°C 、 30°C 、 60°C 四个温度点附近的任一测试点的实际温度与通过实测电阻比和电阻值所计算的温度(见附录 A)之间的最大差值应满足 5.4 的要求。

6.3.5 0°C 时自由状态电阻比(Z_0)

在温度测量误差检验时, 实测的钢筋计 0°C 时自由状态电阻比(Z_0)应符合表 1 的要求。

6.3.6 绝缘性能

钢筋计在 5.5 规定的试验条件下, 分别进行历时 0.5 h 的试验(试验时引出电缆端部应防止进水)。然后用额定直流电压为 100 V 的兆欧表量测电路与密封壳体之间的绝缘电阻。绝缘电阻应不小于 50 M Ω 。

6.3.7 过范围限

6.3.7.1 应力过范围限

对性能检验合格的钢筋计施加测量范围上限值及下限值的 1.2 倍的应力, 恢复到自由状态, 重复三次; 然后按本标准 6.3.3 进行静态性能检验, 结果应满足 5.6.1 的要求。

6.3.7.2 温度过范围限

将钢筋计先后置于 -30°C 及 70°C 两种环境温度下, 各恒温 6 h, 钢筋计输出稳定, 当环境条件恢复至参比测试条件后, 其性能应满足 5.6.2 的要求。

6.3.8 温度修正系数及温度修正误差

然后将钢筋计放入冰点槽及恒温水槽中。在 0℃、20℃、40℃以及 60℃四个温度点附近各选择一个测试点,到达每档温度并稳定后各保温 2 h,测量各测试点稳定温度下的电阻比,钢筋计的温度修正系数 b 及温度修正误差由下式算出:

温度修正系数 b :

$$b = b_0 - \frac{f(Z_2 - Z_1)}{T} \dots\dots\dots (8)$$

温度修正误差 δ_t :

$$\delta_t = |Z_i - Z_{ij}|_{\max} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

b_0 ——固定装置的线膨胀系数,单位为负一次方摄氏度(℃⁻¹);

T ——最高温度,单位为摄氏度(℃);

Z_2 ——最高温度时实测电阻比;

Z_1 ——0℃时实测电阻比;

Z_i ——各测试点实测电阻比;

Z_{ij} ——各测试点对应的电阻比端基线理论值。

钢筋计的温度修正误差应满足 5.7 的要求。

6.3.9 稳定性检验

6.3.9.1 高温稳定性

将钢筋计置于恒温箱内,逐渐升温至 60℃。恒温 48 h 后随箱恢复至常温,其性能应满足 5.8.1 的要求。

6.3.9.2 长期稳定性

将钢筋计安装在材料试验机上,在正常试验大气条件下,拉伸至测量范围上限值后再卸荷至零点,如此循环 20 个周期。试验后,其性能应满足 5.8.2 的要求。

6.3.10 机械环境适应性

6.3.10.1 振动

在运输包装状态下,设置振动系统的扫频振动频率为 10 Hz~150 Hz~10 Hz,扫频速度为 1 倍频程/min,加速度为 2g,对钢筋计进行循环三个周期/单轴振动试验。试验后测试其性能,应能满足 5.9 的要求。

6.3.10.2 自由跌落(选做)

在运输包装状态下,设置自由跌落机的跌落高度为 300 mm,将钢筋计自由跌落在平滑、坚硬的混凝土面或钢质面上,共进行三次跌落试验。试验后测试其性能,应能满足 5.9 的要求。

6.3.11 可靠性试验

可靠性试验参照 GB/T 5080.7—1986 规定执行。

7 检验规则

7.1 出厂检验

7.1.1 钢筋计应逐台进行出厂检验。

7.1.2 出厂检验应按 6.3.2~6.3.6 的规定分别进行检验,检验结果应完整保存、备查。

7.1.3 钢筋计经检验合格并签发产品检验合格证后方可出厂。

7.2 型式检验

7.2.1 钢筋计当出现下列情况之一时,应进行型式检验:

- a) 正常生产过程中,定期或积累一定产量时应进行检验;

- b) 正式生产后,因结构、材料、工艺有较大改变,可能影响设备性能时;
- c) 产品长期停产后又恢复生产时;
- d) 出厂检验结果与上次型式检验结果有较大差异时;
- e) 国家质量技术监督机构提出进行型式检验要求时;
- f) 新型设备或老产品转厂生产的试制定型鉴定;
- g) 合同规定进行型式检验时。

7.2.2 型式检验应按 6.3 规定的全部试验项目(设备可靠性试验除外)进行全性能检验。

7.2.3 型式检验的样品应从经出厂检验合格的产品中随机抽取,一般单机台数不应少于三台,若产品总数少于三台,则应全检。

7.2.4 可靠性试验为非型式检验项目,可通过专项试验进行,也可以在运行或鉴定移交时进行统计。

7.2.5 检验结果的评定:型式检验中有一台及以上单机产品不合格时,应加倍抽取该产品进行检验。若仍有不合格时,则判该批产品为不合格;若全部检验合格,则除去第一批抽样不合格的单机产品,该批产品应判为合格。

8 标志、使用说明书

8.1 标志

8.1.1 产品标志

在钢筋计上应具有产品型号及出厂编号等。

8.1.2 包装标志

在钢筋计的包装箱的适当位置,应标有显著、牢固的包装标志,内容包括:

- a) 设备型号及名称;
- b) 设备数量;
- c) 箱体尺寸(mm);
- d) 净重或毛重(kN);
- e) 运输作业安全标志;
- f) 到站(港)及收货单位;
- g) 发站(港)及发货单位;
- h) 国家工业产品生产许可证标志及编号。

8.1.3 钢筋计的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 使用说明书

钢筋计的使用说明书内容应按 GB 9969.1 的规定。

9 包装、运输、贮存

9.1 包装

9.1.1 钢筋计的包装应符合牢固、美观和经济的要求,应做到结构合理、紧凑、防护可靠,在正常储运、装卸条件下,应保证设备不致因包装不善而引起设备损坏、散失、锈蚀、长霉和降低准确度等。

9.1.2 产品包装时,周围环境及包装箱内应清洁、干燥、无有害气体、无异物。

9.1.3 产品包装后,其包装件重心应尽量靠下且居中,在箱内必须予以支撑、垫平、卡紧,设备可移动的部分应移至使产品具有最小外形尺寸,并加以固定。

9.1.4 产品的防震、防潮、防尘等防护包装按 GB/T 15464 中的有关规定进行。

9.1.5 随机文件应齐全,文件清单如下:

- a) 装箱单;
- b) 产品出厂合格证明书;

- c) 产品使用说明书;
- d) 出厂前的检验测试文件;
- e) 产品技术条件规定的其他文件。

9.1.6 随机文件应装入塑料袋中,并放置在包装箱内。

9.2 运输

按本标准的规定进行包装的产品应能适应各种运输方式。

9.3 贮存

9.3.1 包装状态下的钢筋计应能适应以下贮存环境条件:

- a) 贮存环境温度: $-30^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$;
- b) 贮存环境相对湿度:不大于 85%。

9.3.2 长期贮存状态下的钢筋计,其贮存场所应选择通风、干燥的室内,附近应无酸性、碱性及其他腐蚀性物质存在。

附录 A

(规范性附录)

差动电阻式钢筋计测量温度的参数

A.1 差动电阻式钢筋计电阻值与温度之间的校准曲线

当钢筋计的电阻不变时,钢筋计的电阻值与温度之间的校准曲线在其温度测量范围内用式(A.1)二次方程拟合时,可以得到小于 0.1℃ 的一致性误差。

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

式中:

R_t ——钢筋计在 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值,单位为欧姆(Ω);

t ——被测温度,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$);

R_0 ——钢筋计在 0°C 时的实测电阻值,单位为欧姆(Ω);

α ——一次项电阻温度系数,单位为负一次方摄氏度($^\circ\text{C}^{-1}$);

β ——二次项电阻温度系数,单位为负二次方摄氏度($^\circ\text{C}^{-2}$)。

同一种规格的钢筋计,一次及二次项的电阻温度系数 α 和 β 值取决于所用钢丝及钢筋计内部引线材料的性质,同一批材料做成的同一种规格的钢筋计具有相同的系数 α 和 β 值。

A.2 校准曲线的拟合折线

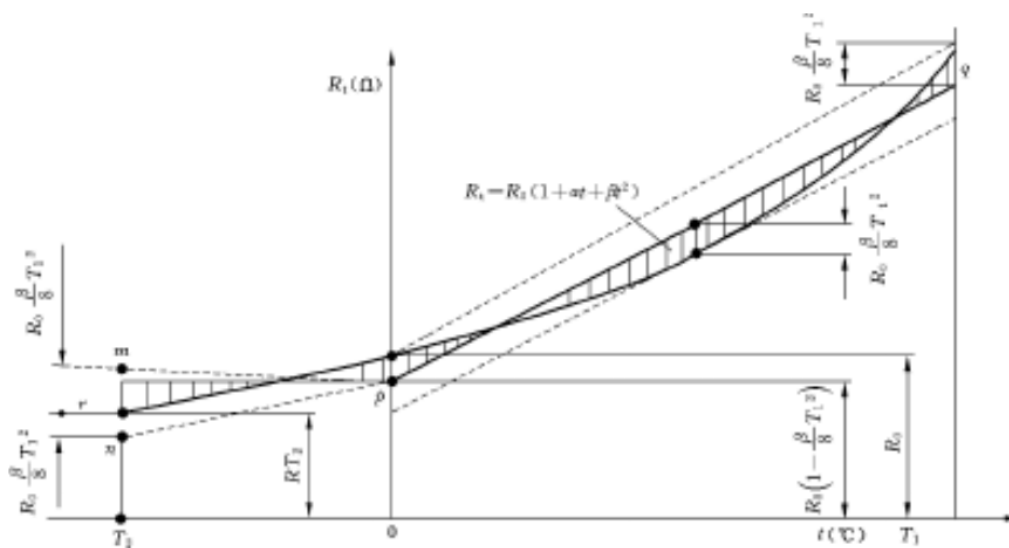


图 A.1 校准曲线的拟合折线

二次的拟合曲线在使用上很不方便,而采用直线拟合在整个温度测量范围内误差太大。

因此,根据温度测量精度的要求,并考虑到应用上的方便,对差动电阻式钢筋计的电阻温度校准曲线的拟合作如下规定:

a) 在零上温度测量范围内,以独立线性度方法作拟合直线,如图 A.1 中直线 pq ,其方程式为:

$$R_t = R_0\left(1 - \frac{\beta}{8} T_1^2\right) + R_0(\alpha + \beta T_1)t \quad \dots\dots\dots (\text{A.2})$$

式中:

T_1 ——温度测量范围的上限值,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$);

t ——被测温度, $t \geq 0^\circ\text{C}$ 。

这样,在零上温度范围内,最大误差出现在 0 、 $\frac{T_1}{2}$ 及 T_1 三处,误差的绝对值均为 $R_0 \frac{\beta}{8} T_1^2$ 。

- b) 从等精度的原则出发,将温度量程下限值 T_2 处的实测电阻值 R_{T_2} 分别加上及减去 $R_0 \frac{\beta}{8} T_1^2$, 得到 m 及 n 两点(见图 A.1)。于是,射线 pm 及 pn 所界限的锐角范围内的任一条射线,例如 图 A.1 中 pr ,在整个零下温度测量范围内与校准曲线之间在同一温度下的电阻差值均不大于 $R_0 \frac{\beta}{8} T_1^2$ 。射线 pm 的方程式如下:

$$R_t = R_0 \left(1 - \frac{\beta}{8} T_1^2\right) + R_0 \left(\alpha + \beta T_2 + \frac{\beta T_1^2}{4 T_2}\right) t \quad \text{..... (A.3)}$$

式中:

T_2 ——温度测量范围的下限值(负值),单位为摄氏度($^\circ\text{C}$);

t ——被测温度, $t \leq 0^\circ\text{C}$ 。

射线 pn 的方程式如下:

$$R_t = R_0 \left(1 - \frac{\beta}{8} T_1^2\right) + R_0 (\alpha + \beta T_2) t \quad \text{..... (A.4)}$$

射线 pm 的斜率 K_{pm} 与零上拟合直线的斜率 K_{pq} 之比为:

$$K_{pm}/K_{pq} = \left(\alpha + \beta T_2 + \frac{\beta T_1^2}{4 T_2}\right) / (\alpha + \beta T_1) \quad \text{..... (A.5)}$$

对于差动电阻式钢筋计有:

$T_2 = -25^\circ\text{C}$;

$T_1 = 60^\circ\text{C}$;

α 和 β 值取决于所用钢筋计钢丝材料的性质,同一批材料做成的钢筋计具有相同的系数 α 和 β 值。

A.3 差动电阻式钢筋计的温度计算

根据第 A.2 章的原则。本部分规定差动电阻式钢筋计的温度测量参数及测量温度的计算公式如下:

- a) 钢筋计的温度测量参数:

0°C 时计算电阻值 R_0' 由式(A.6)决定:

$$R_0' = R_0 \left(1 - \frac{\beta}{8} T_1^2\right) \quad \text{..... (A.6)}$$

0°C 以上的温度常数 K' 由式(A.7)决定:

$$K' = \frac{1}{R_0 (\alpha + \beta T_1)} \quad \text{..... (A.7)}$$

0°C 以下的温度常数 K'' 由式(A.8)决定:

$$K'' = r K' \quad \text{..... (A.8)}$$

r 值取决于所用钢筋计钢丝材料的性质,同一批材料做成的钢筋计具有相同的系数。

- b) 钢筋计测量温度的计算公式:

当温度 $t \geq 0^\circ\text{C}$ 时:

$$t = K' (R_t - R_0') \quad \text{..... (A.9)}$$

当温度 $t \leq 0^\circ\text{C}$ 时:

$$t = K'' (R_t - R_0') \quad \text{..... (A.10)}$$