

GK-4350BX 双轴向应力计 安装使用手册

((Rev C, 11/04))

基康仪器（北京）有限公司编译

地址：北京良乡凯旋大街滨河西路 3 号

邮编：102488

网址：www.geokon.com.cn

电话：010-89360909/2929/3939/4949/5959

传真：010-89366969

电子邮件：info@geokon.com.cn

保修申明

基康公司保证其产品在正常的使用和保养下, 出售之日的13个月内不会有材料和工艺缺陷。如果仪器发生故障, 用户一定送还工厂以作评估并预付运费。以经基康检查, 若发现为仪器自身缺陷, 将为用户免费维修或更换。但是超出基康规定的操作规范致使仪器故障的保修是无效的, 如有证据标明涂改保修期或有证据标明误用、滥用、不按规范、过分振动、潮湿、热、电流、腐蚀等引起的仪器故障。另外, 诸如保险丝、电池等用旧或误用损坏的元件不予保修。

误用基康科学仪表有潜在危险。因此安装和使用仪表旨在只能由合格技工来完成。没有除本保修申明外的任何保修, 也没有其它明示的或隐含的, 也没有包括但不限于任何对适销性或供特定用途之适用性的保修。基康公司不承担对其它设备的损害或损失的责任不论是由直接的、间接的、偶然的、专门的, 还是凭经验安装或使用产品的原因引起的。买方因基康任何违约或违犯这一协定而得到的唯一补偿金不超过违约直接影响的、买方付给基康的设备、仪器或元件购买价值。基康决不接受因拆卸和/或重新设置设备的损失索赔。

尽管在编制/译制手册和/或软件时已采取一切准确性防范措施, 但是基康既不对任何遗漏或错误负责任, 也不对任何根据手册和/或软件包含的信息使用仪器而发生的损害或损失承担责任。

目录

1. 工作原理	2
2. 安装	2
2.1. 初步测试.....	2
2.2. 钻孔要求.....	2
2.3. 灌浆.....	3
2.4. 安装应力计	3
2.5. 读取初始读数.....	3
3. 读数	3
3.1. GK-403 或 GK-401 读数仪操作.....	3
3.2. GK-404 读数仪操作.....	4
4. 数据处理	4
4.1. 仪器定位.....	6
4.2. 纵向传感器.....	6
4.3. 温度.....	6
4.4. 环境因素.....	6
5. 故障排除	7
附件 1 技术参数	8
附件 2 双轴向应力计原理	9
附件 3 线路代码	15

1. 工作原理

基康4350型双轴向应力计是用于测量硬质岩，盐岩，钾碱，混凝土，冰层和其他弹性及粘弹性材料的应力变化。传感器组件是一个厚壁钢筒，可将其水泥浇筑于钻孔或埋设于待检测体。钢筒的径向变形由3或6个振弦式传感器测得，借助理论推导公式，即可获得相关应力变化。在垂直于钻孔平面相隔60°角进行的三个测量决定传感器周围物体的双轴向应力变化。传感器也可组合成双轴向应力计，用于测量应力计的纵向变形。由于沿钻孔应力指向的不同，所以影响纠正是允许的。

传感元件是一个振弦式应变传感器，沿筒体直径固定，用于精确测量筒体变形。一线圈和磁铁配件，紧靠弦线放置，用于激活弦线并感应振动产生的频率。连接应力计时，一个变化频率脉冲作用于线圈和磁铁配件并引起弦线共振。弦线持续振动并在仪器频率使线圈内产生感应电流，这个电流被传输到读数仪进行度量和显示。

该仪器被称作应力计是因为其有效模量有意地保持高状态(13×10^6 psi)，以便周围介质模量的变化只引起仪器模数的微小变化。例如，如果介质模量变化以一个10的系数变化，那么仪器标定的变化只是一个2的系数。

使用安装工具或自定位安装杆，将仪器插入充满灌浆的钻孔内，完成安装。当仪器取得合适的定位和放置时，拉伸连接在锚释放栓的电缆，让仪器就地随灌浆凝固而固定，允许安装设备事后拆除。通常应用专用膨胀灌浆 以确保仪器与周围介质完全接触。附件里给出理论计算方式，是假定应力计与周围介质最佳接触。

2. 安装

2.1. 初步测试

在收到应力计并在安装之前，应当检查并记录零读数。接线图在附件3-。

在记录零读数之前，仪器应慢慢达到周围环境温度，对于仪器质量较大者，这需要几个小时。读数应校对到非常接近出厂零读数。

2.2. 钻孔要求

4350 型应力计设计在一个BX (2.36英寸)的金刚钻钻孔内灌浆固定。应力计主体直径2.250英寸，中心按钮可达直径2.32英寸的圆周。一个直径2.250英寸的测试插头被推入孔内检查最小孔径。如果中心按钮凸出太多，那么要搓掉。如果钻孔过大，那么中心按钮可用一个螺栓或别的设备装配，以便扩大中心圆周。一个大的环形体意味着一层较厚的灌浆体，对仪器的输出会有一些影响。

对于一些水平孔，打孔应略向下并足以保证灌浆不会流出钻孔且应力计被灌浆完全包围。向上钻孔是不推荐的。

钻好孔后，用水彻底清洗或压缩空气吹钻孔。

如果钻孔直径通过检查，那么安装即可开始。

2.3. 灌浆

为确保仪器与周围岩石紧密接触，一定要使用膨胀灌浆。一种已被成功应用的灌浆是由美国灌浆公司生产的名叫：

五星微骨料

专用灌浆 400

这是一种高强度的微细锚索灌浆

灌浆应从钻孔底部注满，拿走灌浆管后，将应力计推入灌浆内直至合适位置。

注意：遇高度碎裂岩石，钻孔需要灌浆并重新打孔，为的是使仪器被彻底灌浆固定。

2.4. 安装应力计

装运时，两个带开口环的锚，固定于应力计的后端。一拉销使锚处于可伸缩的位置。当拔去拉销时，开口环伸展并紧贴钻孔壁，随着灌浆进行，应力计被安置在合适位置。

当心锚过早失效！

使应力计后部的拉销啮合于安装工具的卡口以将应力计固定于安装工具。拉销与 1 号线对齐，将一根电缆连接到另一个锚的拉销上，并将第一安装杆连接到安装头。仪器保持确定方向被慢慢推入钻孔，并增加安装杆直到最终位置。此时，检查方位时，拉销 1 号经常对准垂直或其他指定的方向。安装前，为作最后检查，多取几个读数是值得的。当仪器就要安装时，通过安装杆反作用拉动锚的拉销电缆。当安装锚时，要去除钻孔内的拉销和电缆。小心卸掉安装工具和小心移除它，小心从孔内撤掉杆。一定要彻底地从工具和杆清洗掉灌浆。此时，建议堆积灌浆在孔上在仪器区域维持一定灌浆压力。

2.5. 读取初始读数

为了确保良好的零数据，也为看到是否灌浆对仪器有预负荷，在紧接的后续安装中要不时地取读数。按照生产商说明书，灌浆应增加强度，满强度应几天时间内达到。

3. 读数

3.1. GK-403 或 GK-401 读数仪操作

GK403 或 GK401 读数仪可为 4300 型系列应力计提供必要的励磁和信号条件。读数仪

经线夹或在终端站带接头的一根跳线与仪器连接，即可读取数据。

1. 将显示屏的选择器置于“F”档的 EX 尺寸或“B”档的 BX 和 NX 尺寸；
2. 打开仪器，一个读数将显示在显示屏窗口。最后的一位数总是波动于几个数字，稍后解释；
3. 显示零，可能是接头故障，或仪器损坏，或高度电噪声。将接地线连接到屏蔽，如果还是没有信号，需要查找故障（见 6 节）；
4. 为节省电源，仪器在约 4 分钟后自动关闭。

如上所述，显示屏最后一位数将会经常出现几个数字的波动，这不应看作是非正常操作。就应力计而言，其振弦线非常短且信号也不象其它仪器的信号纯。这些与我们提出的频率的平方联系起来，引起了一些不稳定性，表现于最低有效数字。这不是说读数不准确，仅指振动周期从一次轻微地变化到下一次。在多数情况下，显示数字是以下个最低有效数字出现而结束。对于很稳定的应力计，最后一位数给出了微小应力变化的重要信息，也正因为此，数字的电子化显示没有进位。

3.2. GK-404 读数仪操作

GK-404 读数仪只有手掌大小，可以显示振弦值和摄氏温度值。

GK-404 振弦读数仪配有一根软线，适合连接振弦仪器，一端是一个 5-pin 插头，用于连接读数仪附件底部的插座；另一端是带弹簧夹的 5 个线端子，其颜色有红、黑、绿、白和蓝。红色代表振弦仪器正极导线，黑色负极；绿色是热敏电阻正极，白色负极；蓝色为传感器电缆地线。振弦仪器电缆要接到各自颜色的弹簧夹导线上。

对于 EX 尺寸，将 POS（定位）按钮调到 F 位置，MODE 按钮置于 Dg（数字）。

对于 BX 和 NX 尺寸，将 POS（定位）按钮调到 B 位置，MODE 按钮置于 Dg（数字）。

其它功能的选择如 GK-404 手册所述。

GK-404 将持续测量并显示读数直到按下 OFF 按钮，或者若启用，让自动断电计时器关闭 GK-404。GK-404 不断地检测(2) 1.5V AA 电池状态，当复合电压降到 2V 时，显示屏会给出电池电压低的提示，此时需要安装一套新的 1.5V AA 电池。

4. 数据处理

GK-401 读数仪通过 6.144MHz 石英晶体振荡器刺激仪器和测定仪器振动 255（或偏低）周期的时间，“A”档周期显示的分辨率可达 0.1 微妙。在 B 档，应力计使处理器将周期读数转换成频率平方的单位，直接比例于振弦应变，仪器挠度和应用应力。

振弦应力计原理见附件2，数据处理过程如下：

- a. 首先根据等式3，计算径向变形 V_1 ， V_2 和 V_3 ；
- b. 根据岩石、混凝土或冰的杨氏模量和泊松比知识，参考图2（或由计算）得出系数A和B的值；
- c. 把 V_1 ， V_2 ， V_3 ，A 和B 代入等式31，32 和33可求得p，q and θ ；
- d. 钻孔轴向的纵应力需要做一些纠正，这是由应力计组合成纵向应变传感器测量 ϵ_ℓ 的唯一可能。

例如：

对于杨氏模量 5×10^6 psi和泊松比0.3，

B档初始读数（GK-401读数仪）是：

轴线1 6050

轴线2 6235

轴线3 6198

施加应力后，P和Q读数是：

轴线1 5020

轴线2 6405

轴线3 6400

根据等式3可得：

$$V_{r1}=371 \times 10^{-6}$$

$$V_{r2}=-61 \times 10^{-6}$$

$$V_{r3}=-73 \times 10^{-6}$$

根据图2或计算可得：

$$A=0.0325 \times 10^{-6}$$

$$B=0.138 \times 10^{-6}$$

根据等式31，32和33可得：

$$p=2273 \text{ psi}$$

$$q=157 \text{ psi}$$

$$\theta=0^\circ$$

4.1. 仪器定位

传感器1与仪器后部的销子一致，传感器2位于俯视钻孔顺时针60°处，传感器3在顺时针120°处。（4350-2型有6个传感器，传感器4与传感器1，传感器5与传感器2和传感器6与传感器3分别并列放置，这些额外的传感器用于测量余量）。

4.2. 纵向传感器

纵向传感器是通过在仪器两端连接一段振弦线测量应力计长度的整体变化。确保仪器与周围岩石完全连接时，沿着钻孔的纵向应变公式是：

$$\varepsilon \ell = (R_0 - R_T) \times G \text{ 微应变}$$

其中， R_0 为初始读数（GK-401或GK-403“B”档），

R_T 为当前读数，

G 为仪器系数（和传感器一起提供）。

例如：如果 $R_0=5,000$ ，

$$R_T=4,800,$$

$$\text{则 } \varepsilon \ell = (R_0 - R_T) \times G = (5,000 - 4,800) \times 0.3574 = 71.48 \text{ 钻孔缩减微应变。}$$

纵向传感器有轻微的温度敏感性，是可以纠正的，温度缩减系数是0.461微应变/°C，公式如下：

$$\varepsilon \ell T = (R_0 - R_T) G + (T_T - T_0) \times 0.461$$

注意：当温度升高时，纠正是正数。

实施纵向应变纠正，增量 $\nu_i \varepsilon_i E_i$ 应当增加到由 p 和 q 计算的值上。

ν_i 是岩石、混凝土或冰的泊松比。

E_i 是岩石、混凝土或冰的杨氏模量。

$\varepsilon \ell$ 是纵向应变，对于压缩应变，其值为正。

4.3. 温度

对于径向传感器，一般不需要温度纠正，因为在某个非限制性区域热敏感性几乎是零。受条件限制的温度变化纠正是很复杂的，现场校准要求精确测定热性能。

4.4. 环境因素

应力计安装的目的在于检测现场状况和因素，而这些状况和因素可能影响应力计，故要观测和记录应力计状况。状况看似微小，却可对正在检测的结构特征产生实质的影响，并可给出潜在问题的早期迹象。这些因素包括但不限于爆炸、降雨、潮汐、开挖、回填等系列活动、交通、温度和气压变化、人员变动、邻近施工、季节变化等。

5. 故障排除

对振弦应力计的维修和故障排除局限于定期检查光缆接头和端子维修。传感器本身是密封的，不可打开检查。

如果一个元件不能读数，应采取如下步骤：

1. 检查线圈电阻，所指元件线圈电阻是 $90\ \Omega$ （温度纵向传感器的是 $180\ \Omega$ ） $\pm 5\ \Omega$ ，加电缆电阻（22 号铜线每 1000 英尺约 $20\ \Omega$ ）。

- a. 如果电阻大或无限大，可能是电缆断路；
- b. 如果电阻小或接近零，可能是电缆短路；
- c. 如果电阻在所指范围且不能读数，可能是传感器故障，需咨询厂家；
- d. 如果所有电阻均在所指范围且所有传感器不能读数，可能是读数仪问题，需咨询厂家。

2. 如果是电缆短路或断路，可以根据推荐的规程接通电缆。

附件 1 技术参数

规格

量程（仅指压力）	30,000 psi
近似灵敏度*（流体静力）	5.4 psi
精度（流体静力）	± 0.1% F.S.
工作温度标准	-30 ~+65°C
高温选项	-60° ~+200°C
频率范围	1400~3500 Hz
钻孔直径	BX, (2.36 inch), (60mm)

尺寸

R ₂	1.125 inch (28.6mm)
R ₁	0.650 inch (16.5mm)
R _c	1.000 inch (25.4mm)
带端帽长度	12.5 inch (317.5mm)
不带端帽长度	7.0 inch (177.8mm)
重量	7 lbs. (15.4kgm)

可选传感器

振弦纵向变形传感器

量程	2,000 微应变
灵敏度	0.4 微应变.

振弦温度传感器

量程	-60° ~+200°C
灵敏度	0.035°C

配件

安装杆—6英尺或2米自定位型
安装头
锚收张缆线

* 使用GK-401 读数仪的B档

附件 2 双轴向应力计原理

双轴向应力原理

使用埋设的传感器测量岩石、混凝土或冰的应力要求精确了解传感器内的应变及其不同负荷条件下传感器具体的和隐含的应力-应变关系。幸运的是，我们知道双轴向钢弦传感器模量，可以应用振弦技术精确测定仪器变形，解析法也可用于说明在负荷下的金属板里筒体内含物特征。

因为我们普遍的兴趣是压缩应力、压缩位移，且如常在岩石力学中应力取正值的做法。主应力用 p 和 q 表示，最大主应力 p 是一个较大的压缩应力，如 $p > q$ ，所有角度是从 P 方位起始的顺时针测量的。

仪器变形

仪器的径向变形由测量三振弦线每一根的共振频率来确定，每根弦线的基频与弦线应变成比例且有一定的等式关系：

$$f = \frac{1}{2\ell_w} \sqrt{\frac{\epsilon E_w}{p_w}} g \quad (\text{等式1}), \text{ 其中 } f \text{ 指弦线固有频率} (s^{-1}), \ell_w \text{ 弦线长度 } 5.08 \times 10^{-2} m (2.00$$

ins.), ϵ 弦线应变, E_w 弦线模量 207 Gpa (30×10^6 psi), p_w 弦线密度 $7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (0.283 lbs./cu.ins), g 重力加速度 386 in./sec./sec.

$$\text{等式1也可以表示为: } E = kf^2 \text{ 或 } \Delta\epsilon = k \Delta(f^2) \quad (\text{等式2}), \text{ 其中 } k = \frac{4\ell_w^2 p_w}{E_w g} \quad (\text{理论上}),$$

$\Delta(f^2) = (f_0^2 - f_T^2) = (R_0 - R_T) \times 10^3 / \text{sec}^2$, 其中 R_0 和 R_T 分别指读数仪在计时0和T时B档上的GK-401读数。

在实践中，应力计的校准是在工厂的液压试验室，施加已知的径向压力，测定弦线的实际变形。此方法测出并用了一个凭经验得出的因数 K 。对于标准的BX大小的应力计，因数 K 约为 $0.36 \times 10^{-9} \text{ sec}^2$ ，工厂提供仪器实际的校准因数 K 。

$$\text{因为筒体径向变形 } V_r, \text{ 在半径 } \ell_w/2 \text{ 时, } V_r = \ell_w/2 \Delta\epsilon, \text{ 即 } V_r = \frac{\ell_w}{2} k \Delta(f^2), \text{ 且由于 } \ell_w = 2.00 \text{ ins.}, \Delta(f^2) = (R_0 - R_T) \times 10^3 / \text{sec}^2, V_r = k(R_0 - R_T) \times 10^{-6} \text{ ins.} \quad (\text{等式3}).$$

筒体传感器相关应力

对于筒体内含的弹性和粘弹性材料的应力-变形关系已经获得分析和实验的检验。塞文(Savin)于1961年、贝里和菲尔赫斯特(Berry and Fairhurst)于1966年、威廉姆斯(Williams)

于1973年及其他人发展了弹性材料的解析法。铃木（Suzuki）于1969年和威尔逊（Wilson）于1961实验证明解析法是准确地描述了一个弹性金属板内的应力分布。霍克斯（Hawkes）于1969年、斯克顿（Skilton）于1971年、威廉姆斯(Williams)于1973年、布色尔等人（Busell et al）于1975年、约翰逊和考克斯（Johnson and Cox）于1980年也用解析法描述了筒体内含的粘弹性和其它随时间变化的材料的在单轴向和双轴向负荷实验下的变形。

应力和位移等式的如下应用是为了描述双轴向应力传感器与周围的岩石、混凝土或冰的特征，基于塞文（Savin）于1961年提出的一套解析等式，描述了焊接在一个弹性金属板上的弹性环的特征，而尽管岩石、混凝土或冰有随时间变化的特性，但是贝里和菲尔赫斯特 (Berry and Fairhurst) 的分析结果和霍克斯（Hawkes）的实验指出塞文等式仍可使用。

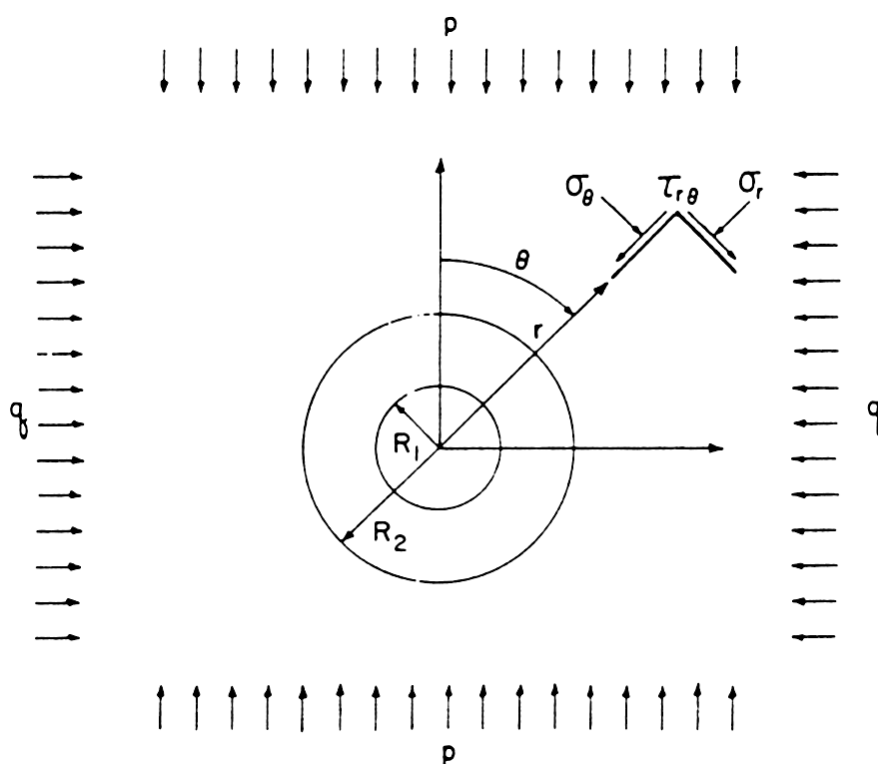


图1-埋设于岩石、混凝土或冰的筒体传感器平面图

一般地，我们的兴趣是测出岩石、混凝土或冰的平面应力，对于一个筒体传感器埋设于一种无限各向同性介质（图1），因受平面内主应力 p 和 q 作用，传感器一般是向着平面的，传感器有外径 R_2 和内径 R_1 。

在极坐标内传感器（ $R_1 < r < R_2$ ）的应力（ σ_r 、 σ_θ 和 $\tau_{r\theta}$ ）和位移（ V_r 和 V_θ ）等式是：

$$\sigma_r = \left(\frac{p+q}{2}\right) \left(C_2 - \frac{C_5}{2} \frac{R_2^2}{r^2}\right) + \left(\frac{p-q}{2}\right) \left(\frac{C_7}{2} - 2C_1 \frac{R_2^2}{r^2} - \frac{3}{2} C_4 \frac{R_2^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{p+q}{2}\right) \left(C_2 + \frac{C_5}{2} \frac{R_2^2}{r^2}\right) - \left(\frac{p-q}{2}\right) \left(\frac{C_7}{2} - 6C_3 \frac{r^2}{R_2^2} - \frac{3}{2} C_4 \frac{R_2^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\tau_{r\theta} = \left(\frac{p-q}{2}\right) \left(3C_3 \frac{r^2}{R_2^2} - \frac{C_7}{2} - C_1 \frac{R_2^2}{r^2} - \frac{3}{2} C_4 \frac{R_2^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (6)$$

$$V_r = \frac{(p+q)}{8\mu_s} R_2 \left(C_2 (X_s - 1) \frac{r}{R_2} + C_5 \frac{R_2}{r}\right) + \frac{(p-q)}{8\mu_s} R_2 \left(C_3 (X_s - 3) \frac{r^3}{R_2^3} + C_7 \frac{r}{R_2} + C_1 (X_s + 1) \frac{R_2}{r} + C_4 \frac{R_2^3}{r^3}\right) \cos 2\theta \quad (7)$$

$$V_\theta = \frac{(p-q)}{8\mu_s} R_2 \left(C_3 (X_s + 3) \frac{r^3}{R_2^3} - C_7 \frac{r}{R_2} - C_1 (X_s - 1) \frac{R_2}{r} + C_4 \frac{R_2^3}{r^3}\right) \sin 2\theta \quad (8)$$

在周围介质 ($r > R_2$) 中, 应力和位移等式是:

$$\sigma_r = \left(\frac{p+q}{2}\right) \left(1 - \frac{C_6}{2} \frac{R_2^2}{r^2}\right) + \left(\frac{p-q}{2}\right) \left(1 - 2C_8 \frac{R_2^2}{r^2} - \frac{3}{2} C_9 \frac{R_2^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{p+q}{2}\right) \left(1 + \frac{C_6}{2} \frac{R_2^2}{r^2}\right) - \left(\frac{p-q}{2}\right) \left(1 - \frac{3}{2} C_9 \frac{R_2^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (10)$$

$$\tau_{r\theta} = - \left(\frac{p-q}{2}\right) \left(1 + C_8 \frac{R_2^2}{r^2} + \frac{3}{2} C_9 \frac{R_2^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (11)$$

$$V_r = \frac{(p+q)}{8\mu_i} R_2 \left((X_i - 1) \frac{r}{R_2} + C_6 \frac{R_2}{r}\right) + \frac{(p-q)}{8\mu_i} R_2 \left(2 \frac{r}{R_2} + C_8 (X_i + 1) \frac{R_2}{r} + C_9 \frac{R_2^3}{r^3}\right) \cos 2\theta \quad (12)$$

$$V_\theta = \frac{(p-q)}{8\mu_i} R_2 \left(-2 \frac{r}{R_2} - C_8 (X_i - 1) \frac{R_2}{r} + C_9 \frac{R_2^3}{r^3}\right) \sin 2\theta. \quad (13)$$

传感器的几何形体和岩石、混凝土或冰的物质性能决定着系数 C_1 和 C_9 :

$$C_1 = 2 \left(\frac{1+X_i}{D}\right) \left[\left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1\right) + n^6 \left(1 + X_s \frac{\mu_i}{\mu_s}\right)\right] \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{n^2(1+X_i)}{2 \left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1\right) \cdot n^2 \left[\left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1\right) - \left(1 + X_s \frac{\mu_i}{\mu_s}\right)\right]} \quad (15)$$

$$C_3 = -2 \frac{(1+X_i)}{D} n^4 (n^2-1) \left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1 \right) \quad (16)$$

$$C_4 = -2 \frac{(1+X_1)}{D} \left[\left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1 \right) + n^4 \left(1 + X_s \frac{\mu_i}{\mu_s} \right) \right] \quad (17)$$

$$C_5 = \frac{2C_2}{n^2} \quad (18)$$

$$C_6 = 2 - 2 \frac{(n^2-1)}{n^2} C_2 \quad (19)$$

$$C_7 = 2 \frac{(1+X_i)}{D} \left[\left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1 \right) (4 - 3n^2) + n^6 \left(1 + X_s \frac{\mu_i}{\mu_s} \right) \right] n^2 \quad (20)$$

$$C_8 = 2 - 2 \frac{(1+X_i)}{D} \left[\left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1 \right) (3n^6 - 6n^4 + 4n^2 - 1) + n^6 (n^2 - 1) \left(1 + X_s \frac{\mu_i}{\mu_s} \right) \right] \quad (21)$$

$$C_9 = -2 + 2 \frac{(1+X_i)}{D} \left[\left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1 \right) (4n^6 - 7n^4 + 4n^2 - 1) + n^4 (n^4 - 1) \left(1 + X_s \frac{\mu_i}{\mu_s} \right) \right] \quad (22)$$

在上面的等式中：

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

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$X = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} \quad \text{for plane stress}$$

$$X = (3-4\nu) \quad \text{for plane strain}$$

$$\begin{aligned} D = & \left(X_i + \frac{\mu_i}{\mu_s} \right) n^2 \left[\left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1 \right) (3n^2 - 6n^2 + 4) + n^6 \left(1 + X_s \frac{\mu_i}{\mu_s} \right) \right] \\ & + \left(X_s \frac{\mu_i}{\mu_s} - X_i \right) \left[\left(\frac{\mu_i}{\mu_s} - 1 \right) + n^6 \left(1 + X_s \frac{\mu_i}{\mu_s} \right) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

E是杨氏模量和ν是泊松比，s和i分别指传感器物质性能和周围介质，θ指从主应力方向P为方向顺时针到传感器1所在方向的角度。

介质内应力的确定

通过测量传感器在三个方向的径向变形可以确定介质中主应力的方向和大小，在双轴向应力传感器中，从eq 7方向间隔120°测量三根弦线的位移即可。

$$V_{r1} = A(p+q) + B(p-q) \cos 2\theta_1 \quad (24)$$

$$V_{r2} = A(p+q) + B(p-q) \cos 2\theta_2 \quad (25)$$

$$V_{r3} = A(p+q) + B(p-q) \cos 2\theta_3 \quad (26)$$

其中

$$A = \frac{R_2}{8\mu_s} \left[C_2(X_s - 1) \frac{R_c}{R_2} + C_5 \frac{R_2}{R_c} \right] \quad (27)$$

$$B = \frac{R_2}{8\mu_s} \left[C_3(X_s - 3) \frac{R_c^3}{R_2^3} + C_7 \frac{R_c}{R_2} + C_1(X_s + 1) \frac{R_2}{R_c} + C_4 \frac{R_2^3}{R_c^3} \right] \quad (28)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + 60^\circ \quad (29)$$

$$\text{且 } \theta_3 = \theta_1 + 120^\circ \quad (30)$$

在如上等式中， θ_1 是主应力方向p顺时针到测量方向 V_{r1} 的角度， $2R_c$ 是振弦传感器长度(1inch)，关于p、q和 θ ，可以得出：

$$p = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3B} \left((2V_{r1} - V_{r2} - V_{r3})^2 + 3(V_{r2} - V_{r3})^2 \right)^{1/2} + \frac{1}{3A} (V_{r1} + V_{r2} + V_{r3}) \right] \quad (31)$$

$$q = \left[\frac{1}{3A} (V_{r1} + V_{r2} + V_{r3}) - p \right] \quad (32)$$

$$\text{且 } \theta_1 = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[\frac{V_{r1} - A(p+q)}{B(p-q)} \right]$$

但是由于 $\cos(\theta) = \cos(-\theta)$ ，所以等式(33)分两种情况：

如果 $V_{r2} = A(p+q) + B(p-q) \cos 2(\theta_1+60^\circ)$ ，那么 θ_1 取正值；

如果 $V_{r2} = A(p+q) + B(p-q) \cos 2(\theta_1+120^\circ)$ ，那么 θ_1 取负值。

通常检验测得的径向变化的相对大小可以凭直觉知道P向的大约位置，由此可以解决 θ 朦胧两可的问题。

传感器的几何形体和周围介质的机械性能决定着系数A和B，对于双轴向应力传感器的A和B，图2再次描述了周围介质因不同泊松比的杨氏模量。

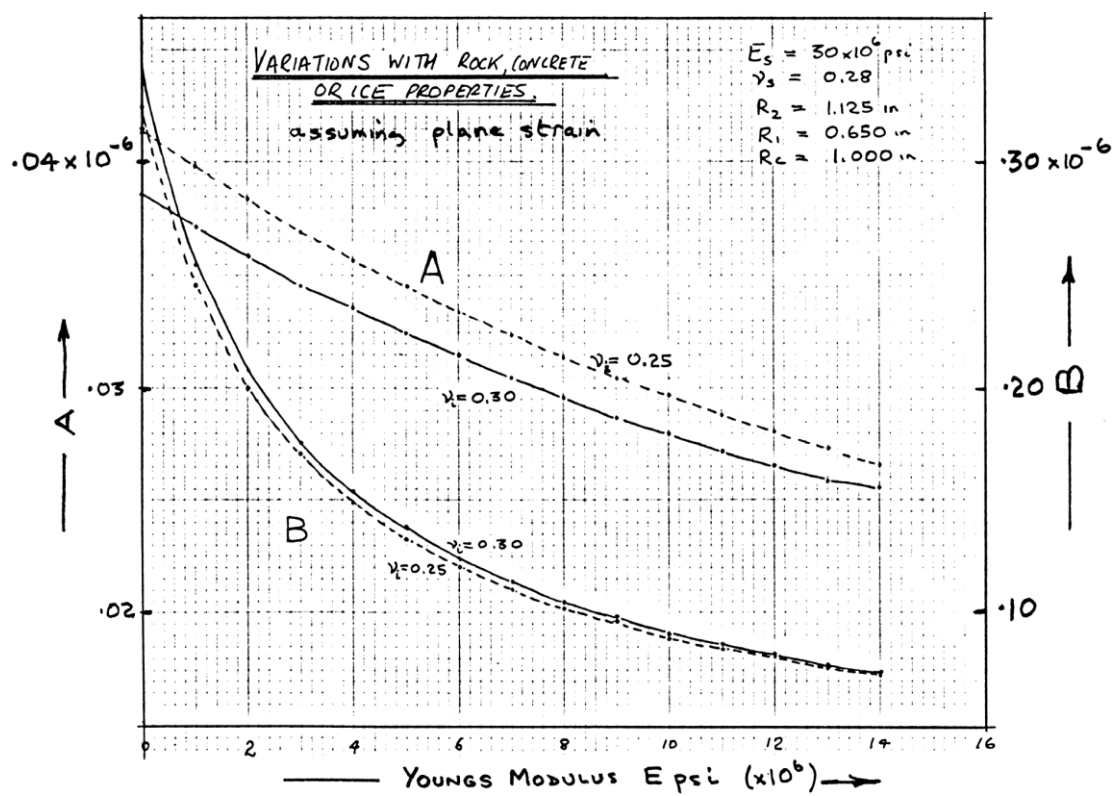


图2

附件 3 线路代码

线路代码

振弦双轴向应力计：4350型

应力计使用6对电缆，每对均有一根黑色导线，细心注意线路代码是取得真确读数的关键。

传感器编号（俯视孔）			
1	0°	红色	成对
2	60°	黑色	
3	120°	褐色	成对
L ₁		黑色	
L ₂		黄色	成对
T ₁		黑色	
4	0°	蓝色	成对
5	60°	黑色	
6	120°	绿色	成对
T ₂		黑色	
	1、2、 3、 L ₁ 、 L ₂ 、 T ₁ 接普通导线（用于3径向仪器）	黑色	成对
	4、5、6、 T ₂ 接普通导线（用于6径向仪器）	白色	