GEOKON®

GK-4100/4150 系列
振弦式(微型)应变计

安装使用手册

（REV.A）

基康仪器股份有限公司译
www. geokon.com.cn

版权声明

目　　录

1. 概述

基康 4100/4150 系列振弦式应变计主要用于测量钢结构构件的应变，如隧道衬砌、钢拱架、支柱、桩基、钢板桩等。

- 4100 型由一个振弦式应变计与可拆卸线圈组件构成。（另有一种型号为 4100-9，该型号测量范围为 10000 个微应变。欲获取更多信息，参考附录 G。）
- 4150 型由一个振弦式应变计和一体化的线圈组成。（另有一种型号为 4150-5，该型号测量范围为 10000 个微应变。欲获取更多信息，参考附录 G。）
- 4151 型是 4150 型应变计的改进型，其在端块上焊接有销钉来替代点焊焊接基片。该型号是通过在被测材料上钻孔并灌注胶液来固定的。

4151 型的不同版本具有更大的测量范围。这些应变计用于在高应变状态下测量，比如塑料管或桩基以及玻璃纤维结构件和钢筋等。由于体积小，因此特别适合安装在空间狭小的位置使用。

4100/4150 型应变计与钢结构的常用固定方法是点焊，但也可以利用环氧树脂或瞬干胶粘接到钢结构的表面（粘接仅适合短期测量，参见见 4.3 节）。

应变计是利用振弦原理，将一根钢弦的两端张紧并焊接固定到被测钢结构的表面。当钢结构表面发生形变时，钢弦的两端将发生相对位移并导致钢弦的应变发生变化。利用钢弦的谐振频率变化来测量该应变变化。

两个线圈靠近钢弦的位置，一个被插入磁铁而另一个被插入极靴。在线圈上施加扫频信号，激励钢弦在谐振频率处振动。

基康还供便携式读数仪和数据记录仪，这些设备如果结合振弦式应变计使用，可提供线圈所需的激励脉冲。钢弦振动期间，频率信号被线圈感应并通过电缆传输到读数设备，该信号最终被读数设备处理和显示。

本说明书包括安装、读数以及推荐的维护步骤和故障排除程序，并介绍应变计的基本工作原理以及针对数据处理分析给出建议。

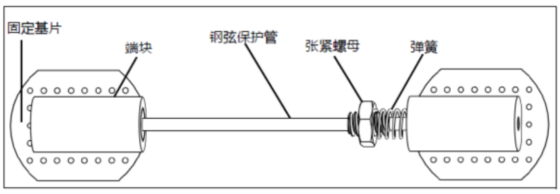

图 1　4100 振弦式应变计

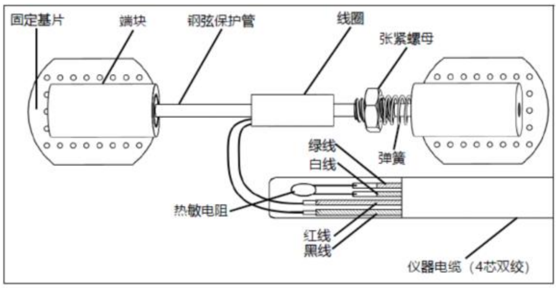

图 2　4150 型振弦式应变计

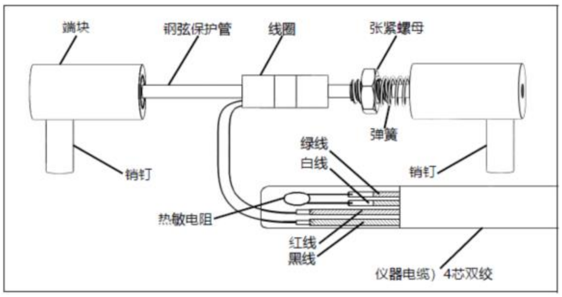

图 3　4151 型振弦式应变计

2. 初步检查

2.1 使用读数仪

在现场安装应变计之前需进行初步检查，按照以下步骤完成检查：

1) 如为 4100 型应变计，先将应变计卡进线圈组件（线圈盒）的底部；
2) 将应变计的导线连接到读数设备，必要时参见第 6 节；
3) 观察显示的读数，（应变计在自由状态下）读数应接近第 6 节定义的中间量程，温度读数应与环境温度一致。

注意：应变计在出厂时已经把钢弦的应变读数设置在中间量程附近，这为大多数应用场合提供了足够的拉伸和压缩测量范围。如果需要调整应变测量范围，请参见 4.1 节。但在应变计焊接之后，在何情况下都不能再使用第 4.1 节描述的程序进行操作。

4) 在应变计的两个端点轻拉振弦，确认读数仪显示的读数随着张力增加而增加。切勿施加过度张力（超过 10Kgm），否则可能拉断钢弦！

2.2 使用欧姆表

如果没有读数仪，可以利用欧姆表执行初步检查，操作步骤如下：

1) 使用万用表电阻档检查电气连接。应变计引线（通常是红色和黑色）之间的电阻应在 180 欧姆左右（4150 型系列应变计的电阻应为 50 欧

姆）。

注意：确保增加电缆电阻，在 20℃温度下，芯线的线电阻约为 50Ω/km。双向回路应取 2 倍阻值。

2) 热敏电阻引线（通常是绿色和白色）之间的电阻将随着温度而改变，参见附录 C。任何芯线与屏蔽层之间的电阻都应超过 2MΩ。

如果上述初步测试中的任何一项出现问题，请参阅第 8 节查找如何排除故障的相关内容。

3. 应变计保护

3.1 电缆连接和末端初六

基康公司提供带有密封电缆引入口的集线箱，这些集线箱适合所有类型的应用场合，并允许在同一个位置接多支仪器，还提供了完备的电缆引线保护。集线箱内部设有导线连接点和多通道选择开关以分别与每支传感器连接，更多详情请联系基康公司。

由于振弦传感器输出的信号是频率而非电流或电压，电缆电阻的变化对仪器读数几乎没有影响；因此，电缆连接加长不会产生不良影响，而且在某些情况下还能发挥有益作用。用来加长的电缆类型应是高品质的双绞线，具有 100%屏蔽层和一条接地裸线。电缆加长时应把所有屏蔽地线拼接在一起，这一点非常重要。应按照相同颜色连接芯线，以便保持导线极性一致。

基康推荐的电缆连接组件包括使用专用的电缆接头模具，然后填充环氧树脂达到防水保护的目的。如果制作方法得当，这种接头的强度和电气性能可以等于或优于电缆本身。如需提供连接组件以及更多的电缆连接指导，请联系基康公司。

电缆末端应将每根导线剥皮并焊锡处理，然后将这些导线连接到读数设备的接线端子或者连接器上。

3.2 防机械性损坏保护措施

4100 型应变计的线圈盒本身就为应变计本身具有一种保护能力，在大多数情况下足以提供充分的保护。但在极端环境中，和/或在需要长期使用的环境，应变计和电缆应采取额外的保护以防止电缆老化、腐蚀和机械损伤等。

3.3 电缆固定

应采取充分的约束措施将电缆端部固定，避免由于拉拽电缆导致线圈组件（线圈盒）受损（4100 型）或者电缆脱落（4150 型）导致的危险。可使用随附的不锈钢带点焊固定电缆，并在电缆末端适当位置点焊固定。也可使用扎带、胶带或铁丝等固定电缆。

3.4 保护罩

在应变计的外侧还可以使用 100×50mm（4×1.5"）的槽钢或≥L63mm 的角钢作为保护罩并焊接固定，以提供进一步保护。

为避免高温损坏电缆，应变计安装和电缆敷设之前应焊接好保护罩。为此，在应变计安装位置上方的保护罩应设置开口。

提示：不要使用连续焊缝来焊接保护罩，使用点焊就足够，只要使角钢或槽钢牢固不动即可。此外还必须焊接螺柱来固定电缆，螺柱的间距为 3m。

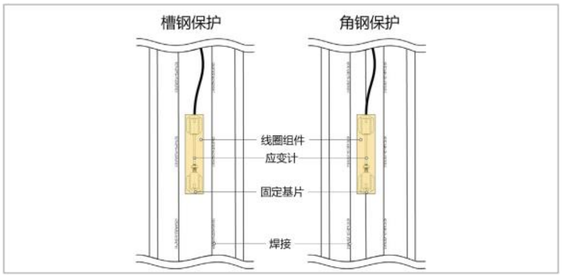

图 4　4100 型应变计保护罩安装示意图

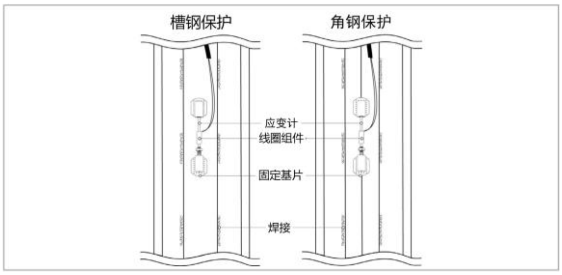

图 5　4150 型应变计保护罩安装示意图

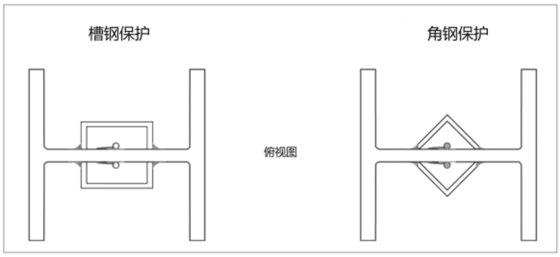

图 6　保护罩端部视图

按以下步骤安装传感器保护罩：

1) 将两颗 M10×50mm 的螺栓头部朝下焊接，螺栓的间距应与保护罩的孔距一致。或者可能将保护罩翻转过来，利用保护罩上的安装洞孔标记螺栓的焊接位置。由于保护罩上已开有安装孔，因此进行定位并不困难。应避免在靠近应变计的地方焊接，否则将导致金属发生极大的局部形变并且高温可能损坏应变计。可使用专

业的螺柱焊机或电弧焊机将螺栓头焊接到结构表面。

2) 将保护罩放置到已经焊接的螺栓上。
3) 先安装垫片，再安装螺母。拧紧螺母时应避免过度用力，否则将导致下面的钢结构表面变形，并可能导致产生虚假的应变读数。

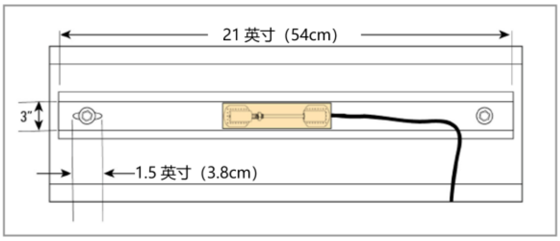

图 7　螺栓固定保护罩俯视图

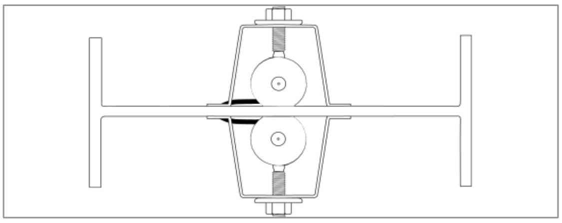

图 8　螺栓固定保护罩端部视图

3.5 电缆和连接保护

应保护电缆免受移动设备或飞石造成的意外损坏。最好将电缆敷设在软管内（软管可从 GEOKON 购买），并将软放置在尽可能安全的地方。软管可通过软管穿板连接器连接到保护罩(GEOKON 保护罩上预留有冲压形成的敲落孔，移除后形成一个用于固定软管连接器的孔。）

3.6 防腐保护

如果存在安装焊接点，则必须做好防锈腐保护。尽管应变计是不锈钢的不会发生锈蚀，但被监测的基材（如钢铁）却会产生锈蚀，尤其是焊接点更易腐蚀，除非覆盖防水层。基康建议执行以下流程步骤：

1) 在所有点焊固定基片的边缘涂几滴氰基丙烯酸酯（如 502）粘合剂，这些粘合剂将渗入安装片与基材之间的缝隙中，从而形成第一道防线。
2) 覆盖需要点焊的区域。
3) 在固定基片以及所有裸露的金属区域表面喷涂防腐底漆（当地可以购买），这是为了保护基底焊点。底漆层必须完全覆盖固定基片边缘，并应注意应变计下方的安装片，这一点非常重要。在适当条件下，务必确保在线圈盒的下方喷涂；如果底漆喷涂到应变计表面，也无需多虑。
4) 在已经涂底漆区域的表面再涂一层漆。

如果在恶劣环境中使用，并且需要采取长期保护措施，在线圈盒与 4100 型应变计之间的空间以及保护罩与 4150 型应变计之间的空间可以填充高粘稠润滑脂（如轴用润滑脂）。如需要更多保护，整个组件可以覆盖一层绝缘胶粘剂（例如，Plymouth 10 Plyseal，可从基康购买）。

3.7 电气噪声防护措施

当敷设仪器电缆时，必须确保尽可能远离电气干扰源，比如电源线、发电机、电机、变压器、弧焊机等。电缆绝对不能与交流电源线放在一起埋设或铺设。否则，仪器电缆将拾取电源线的噪声，由此可能导致难以得到稳定的读数。

3.8 防日晒及温度变化的保护措施

如果被安装在钢结构上，应变计内部的钢弦热膨胀系数与钢结构相同，意味着在计算载荷引起的应变时，测得的应变值不需要进行温度校正。但是，只有当钢弦与其被测的钢结构处于相同温度时，该理论才能成立。如果允许阳光直接照射到应变计上，则可能使钢弦的温度高于钢结构的温度，并使表观应变发生较大变化。因此，应始终避免应变计受到阳光照射。最好的方法方法就是在应变计表面覆盖一层绝热材料，比如聚苯乙烯泡沫塑料或玻璃纤维棉来防止发生热效应。

3.9 防雷击保护

不同于基康的其它诸多类型的仪器，振弦式应变计未安装内置防雷组件，比如 TVS 二极管（transorbs）或者防浪涌避雷器。

建议的防雷击保护方案：

■　基康可以提供 Lab-3 防雷模块和外壳。这些设备被安装在被监测结构的仪器电缆引出的位置。壳体上盖可以拆卸，以便客户在设备被雷击损坏时维修组件或更换电路板。当雷击导致设备受损时，客户可以检修组件或更换模块板件。在壳体和接地之间建立连接，以促进浪涌远离监测仪器，参见下图。

■　利用环氧树脂电缆连接组件将等离子体避雷器封装到仪器电缆中，且其位置应尽可能靠近应变计。然后用接地电缆将避雷器连接到接地位置，如接地桩或钢结构。

欲获取更多的防雷击保护方案，请咨询基康公司。

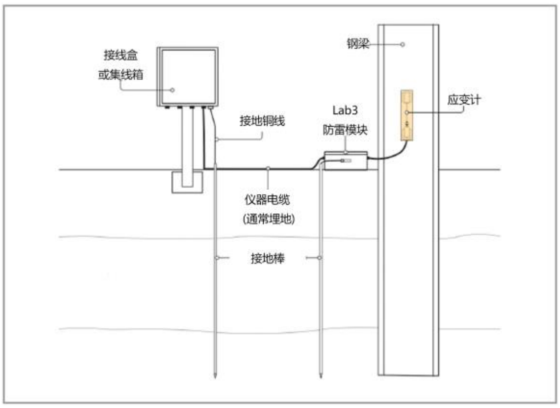

图 9-防雷击保护方案

4. 应变计安装

4.1 调整应变计的安装时的读数（钢弦张力）

警告！无论任何情况，在应变计焊接之后，禁止再调整张力范围。

应变计出厂时的初始读数约为 2500 微应变，此时给出±1500 微应变量程。通常来说，这个量程足以满足绝大多数用途。除非特殊情况，否则不得修改。

如果已知应变方向，可通过执行以下操作，通过调整弦应力来扩大压力或张力测量范围：

1) 将读数仪的档位（POS）设置到 E 档，把红、黑芯线与读数仪连接；
2) 保持应变计在静止。如为 4100 应变计，则将振弦应变计卡入线圈盒并用手指捏住钢弦保护管，如为 4150 应变计则用手指捏住线圈组件部分；
3) 使用微型扳手旋转张紧螺母。弹簧张力受螺母位置控制，如果需要测量更大压应变，则顺时针方向旋转螺母，并将初始读数设置在 2500～3000με之间。如要测量更大的拉应变，则沿逆时针旋转螺母，并将初始读数设置在 1500～2000με之间。注意，螺母每旋转 1/2 圈，将产生大约 600με的变化。表 1 给出了设置量程初始值的推荐值。

表 1 初始应变读数设置

设置量程	微应变读数（με）	对应频率模数(字)	对应频率（Hz）	适用范围（με）	
				拉伸	压缩
中间量程	2500	6394	2529	1500	1500
拉伸(量程的 67%)	2000	5115	2262	2000	1000
压缩(量程的 67%)	3000	7672	2770	1000	2000

提示：表 1 所示微应变读数仪当使用 GK-403/404/405 等读数仪的 E 档读数显示的读数。如使用其它读数仪，请设置为中频段来读取频率模数或频率进行设定。

4) 应变计的固定基片可能会随着张紧螺母转动，因此在旋转螺母时务必将两端的固定基片轻轻压住，并使两端的基片对齐在一个平面上，避免相对转动，否则将会导致传感器性能下降甚至永久损坏。
5) 检查读数，如无问题，在螺母上涂一滴螺纹锁固剂固定螺母，使钢弦张力保持稳定。

4.2 使用点焊安装 4100/4150 系列应变计

注意！进行以下操作时应佩戴护目镜并做好响应劳动保护措施。

4.2.1 准备安装基面

钢结构表面应平整、清洁、无锈蚀、油污和麻点。使用适当的清洗剂去除表面的油污，然后使用电动磨床或砂光机、锉刀、钢丝刷或砂纸将表面磨平、抛光，获得平整光滑的安装基面。用于应变计点焊的安装基面必须为同一平面上，两侧的平整度误差不得超过±0.05mm。（因容易导致基面平整度差，通常不推荐使用砂纸基的抛光轮、砂轮、磨光机等进行打磨）

4.2.2 点焊测试带

焊接前，必须对点焊机进行测试，以确定合适的焊接能量。在某种程度上，焊接能量和接触压力决定着焊缝质量。若将 4100 或 4150 系列应变计正确焊接到结构钢上，大约需要 20 到 40 瓦秒的焊接能量。

使用随仪器提供的试验材料（钢带），通过执行一系列试验来确定正确的焊接能量。当使用正确的能量焊接后，如用钳子将测试钢带从钢结构基面剥离后，在测试钢带上将出现相应的孔洞，而焊接的带材将会留在焊接基面的焊点处，如图 10 所示。

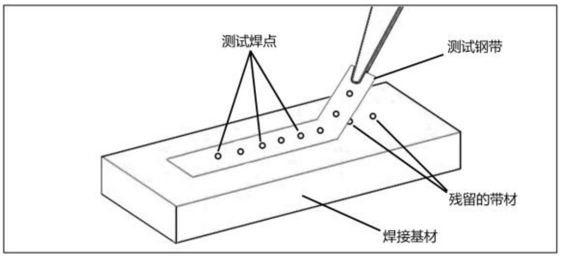

图 10 焊接剥离测试

如果没有足够的焊接能量，测试钢带在撕扯时将很容易剥离而不会形成孔洞。如果所用焊接能量过大，测试钢带将会变色、熔化成孔洞并从焊点出现飞溅。如果出现打火，通常表示测试条与基材之间有污物，也可能是施加在焊嘴的压力不足。在这种情况下，除清洁待焊区域或焊嘴外，还应调整手动焊极的压力设

定值。如果焊接过程中被待焊区域出现较大形变，则表示需要减少施加的压力，或需要降低焊接能量。

4.2.3 4100 应变计焊接

先点焊应变计其中一端，严格按照下图所示的顺序进行点焊，将固定基片上的每个标记点作为焊点进行操作。这一步完成之后，按照第 4.2.5 节中的指导的方法焊接第二个安装片。

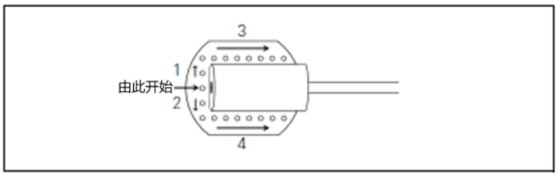

图 11 外侧排焊点点焊顺序

提示：在焊接操作时，强烈建议使用厂家配套的安装对正工具卡住应变计进行点焊，以确保传感器两端块对齐在同一轴线上。

4.2.4 4150 应变计焊接

先点焊应变计的导线引出一端，严格按照下图所示的顺序点焊，在固定基片上的每个标记点上进行焊接。焊接开始之前，应小心移开引出导线以留出点焊操作空间。

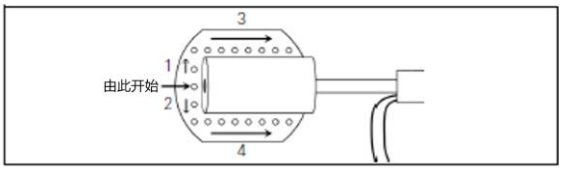

图 12 4150 外侧排焊点点焊顺序

接下来，在前一排各焊点之间增加一排焊点，这一排焊点应尽可能靠近应变计的端块根部，如图 13 所示。这一步完成之后，按照第 4.2.5 节中的操作指导焊接另一端的固定基片。

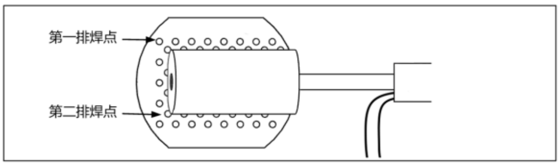

图 13 内侧排点焊顺序

4.2.5 焊接另一端固定基片

当第一个固定基片的所有焊点都已焊接完毕后，按以下步骤焊接另一端：

将对正工具卡住应变计的两端端块并垂直向焊接面施加压力，如图 14 所示，这有利于确保应变计的两端焊接成一条直线。如果不使用对正工具，很容易导致两端块不同轴、焊后的读数偏离预期较大，甚至出现无读数的现象而导致安装失败。

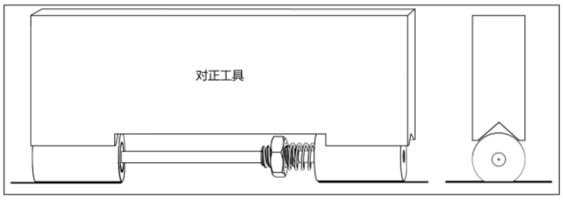

图 14 使用对正工具辅助安装

焊接保持对正工具不动并垂直向安装基面施加压力，先在第二个固定基片的端部中心位置与外边缘点一个焊点，做为初始焊点以定位。当该焊点完成焊接之后，将应变计连接到读数仪检查读数。

- 如果读数在可接受范围内，沿着端部再点焊两个焊点。移除对齐工具，采用与第一个固定基片相同的模式和顺序焊接该固定基片的其余部分。
- 如果读数不能接受，则在靠近焊点位置，使用单面剃须刀片插入固定基片下侧将初始焊点切开以便重焊。

焊点表面应轻微凹陷、外观均匀。点焊机的焊嘴必须保持清洁、无毛刺，并定期用 400 目砂纸轻轻打磨，应注意使焊嘴尖端保持圆球面，适当的修整可以防止焊头在焊接过程中与安装片产生粘连。

提示：如果在在曲面上安装应变计时，应在固定基片的外边缘（刻印标记点行与基片外边缘之间）增加第三排焊点。

4.2.6 焊接环向加固钢带

在应变计的端块上增加焊接环向钢带可以增强应变计的性能。预先把钢带折成 L 形，并按如下方式焊接到应变计两端的端块上：

1) 取一条 6mm 宽的不锈钢带环向包裹应变计端块，使钢带边缘与应变计端块的端面保持平齐。
2) 利用焊枪尖头将钢带紧压入应变计端块与固定基片形成的夹角深处，保持钢带紧贴端块柱面和固定基片柱面，如下图所示。

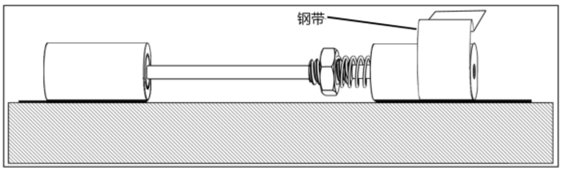

图 15 锁紧钢带

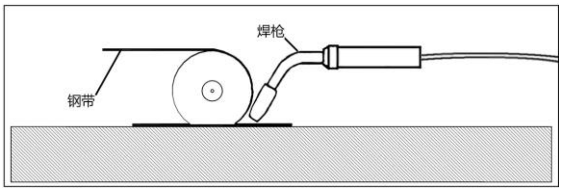

图 16 点焊固定环向钢带

3) 在靠近夹角根部焊 3 个焊点，并在环向钢带的外边缘再焊 3 个焊点，将 L 形钢带的末端焊接到固定基片上。
4) 按照之前的方法，利用焊枪尖头使环向钢带弯曲包裹端块柱面，并利用焊头将焊带压紧到另一侧的夹角。
5) 按照前述方法，总计加 6 个焊点将环向钢带点焊到夹角处。
6) 在应变计末端的最高点，利用 3 个焊点将锁颈垫片焊接到终端挡块上，如下图所示。

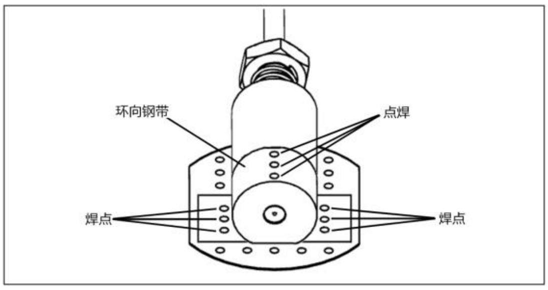

图 17　加固钢带焊接完成

7) 在应变计另一端重复上述步骤。
8) 当应变计的两端都已经点焊完毕，使用小螺丝刀的手柄轻轻敲击应变计两端的端块，目的是消除焊接中产生的局部应力。
9) 将每个应变计端块敲打四、五下，然后读取应变计的数值。然后继续敲击，直到读数趋于稳定、波动不超过几个数字为止。

所有读数都称为初始读数，因此，获取记录初始读数非常很重要。最好将应变计安装在无荷载的钢结构上，也就是说在钢机构与整个结构件组装之前安装应变计，这样可以使初始读数对应于零负载。否则，初始读数将对应一定程度的未知负载。

记录每次读数时的环境温度，同时记录正在进行的施工活动，这些数据可以为监测到的读数变化的分析处理提供依据。

关于在混凝土上使用的温度修正系数，参阅附录 D。

4. 2. 7 安装线圈盒（仅用于 4100 型）

拆除所有遮盖物，把线圈盒安装到应变计上面。连接应变计与读数盒，并调整线圈盒的位置，直到获取稳定读数。然后在该位置使用点焊机和随附的钢带将线圈盒固定到结构表面。

接下来做好固定钢带和周围金属裸露部位的防腐保护，方法参见第 3.4 节。

4. 2. 8 安装应变计保护罩（仅用于 4150 型）

基康 4150 型应变计配套提供一个半圆金属保护罩。使用钢带将该保护罩在应变计上进行点焊固定，参见下图所示。

接下来，做好已点焊固定钢带的防水保护，参见第 3.4 节。

图 18　保护罩点焊固定

4. 2. 9 固定 4150 应变计电缆

使用随附的不锈钢带并用点焊的将电缆固定在钢结构表面，钢带包裹在细导线接头的位置，应确保给端部细导线预留一定的松弛量。使用另一片钢带，在距离导线接头约 25 mm 的位置将电缆用点焊固定到钢结构表面。

4. 3 利用胶粘安装

提示：由于胶粘剂存在若干可变因素（热循环、紫外线照射、振动、冲击、湿度、钢基体腐蚀等），仅限在进行短期测试及温度相对稳定的环境下才能使用胶粘剂安装。若作为永久监测，绝不推荐使用任何类型的胶粘剂来固定应变计且必须采用点焊焊接固定。

使用以下工具和附件，并利用环氧树脂胶粘剂将 4100 或 4150 应变计安装到钢表面：

- 电动磨光机或砂光机、锉刀、钢丝刷、砂纸；
- 快凝双组份胶粘剂，以及带促进剂的乐泰 410 型瞬干胶；
- 应变计安装工具（即对正工具）；
- 道康宁 RTV-3145 等防水胶；
- 尼龙扎带或管道胶带（根据需求）。

按照以下步骤安装应变计：

1) 安装基面处理：按照点焊章节的操作方法进行。
2) 固定应变计：将应变计放入安装工具的卡槽中。在应变计的固定基片上涂抹乐泰 410 胶粘剂。在带安装应变计的大致位置，将活性剂涂抹到钢结构表面。将应变计放置在安装基面，通过安装工具横梁上压紧应变计，并保持压紧至少 30 秒，直到乐泰胶粘剂完全凝固。
3) 应变计保护措施：在安装区域表面涂抹一层 RTV-3145 防水胶。
4) 安装线圈盒（仅 4100 型）：防水胶层硬化之前，将线圈盒固定在应变片上。切勿使用过量的防水剂，防水胶应远离钢弦保护管，以免妨碍钢弦保护管相对于端块之间的活动自由。

如果线圈盒需要反复使用，应把多余的防水胶挤

出，使其凝固之后不会妨碍线圈盒的准确放置。

如果线圈盒是永久安装，则应放在应变计上方，并通过透明外壳观察应变计，同时不断移动位置直到能够稳定显示应变计读数。然后利用提供的钢带，并按照上述第 2 步所述的步骤将其固定于此。对于焊接固定基片的基板区域，需按照第 4.2.1 节所述清理安装基面。还应按照第 3.4 节所述给固定基片做好防腐保护。

5) 固定应变计电缆：对于 4150 系列，利用提供的钢带固定在靠近应变计处的电缆，使导线接头牢牢固定于结构表面，同时确保给导线留出一定的松弛量。使用另一片钢带，在距离导线接头约 25mm 的位置将电缆点焊固定到钢结构表面以加强固定。对于 4100 或 4150 应变计，使用电缆扎带或管道胶带将应变计电缆固定在钢结构上。
6) 固定 4150 保护罩：在盖板上涂满防水剂，然后将半圆保护罩盖住应变计，并利用随附的钢带将保护罩焊接固定。

所有读数都称为初始读数，因此，获取记录初始读数非常很重要。最好将应变计安装在无荷载的钢结构上，也就是说在钢机构与整个结构件组装之前安装应变计，这样可以使初始读数对应于零负载。否则，初始读数将对应一定程度的未知负载。

记录每次读数时的环境温度，同时记录正在进行的施工活动，这些数据可以为监测到的读数变化分析处理提供依据。

关于在混凝土上使用的温度修正系数，参阅附录 D。

4.4 4151 应变计安装

按照 51 mm 的间距钻两个Φ5mm 、深 13mm 的孔。为方便操作，基康提供选用选装的钻孔定位工具。钻完第一个孔洞之后，将定位销固定到孔洞上，然后再利用定位工具确定第二个安装孔的位置。

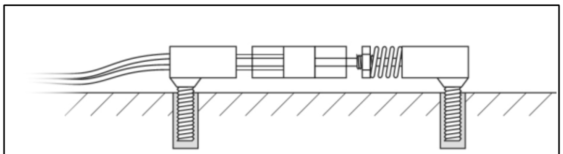

图 19 4151 型应变计安装

5. 应变计布置

5.1 末端效应

为避免末端效应，应变计的位置应远离支撑支柱末端安装，否则可能受到局部夹紧变形或螺栓紧固变形影响，对大多数结构件而言保持 1.5m（5ft）距离即可。另外，由于末端效应可能进一步加重载荷引起的效应，并且这种效应可能非常大，足以诱发结构件的端部而非中间位置产生破坏，因此可能需要引起关注。

5.2 焊接影响

如果在应变计附近执行电弧焊操作，可能导致钢结构内部出现非常大的局部应变。若在围护桩、喷射混凝土增强网上焊接螺柱，都可能导致产生大面积的应变变化，在焊接应变计保护罩和电缆保护罩等情形也是如此。在钢结构上执行任何电弧焊前后都需要记录应变读数，如有任何明显的变化方便及时进行修正。

5.3 弯矩

对于钢结构而言，如能保证结构不产生弯曲，用应变计测量表面的某一点的应变即可。实际上，该情况仅出现在承受拉伸载荷的细长构件的中心附近，而其它位置则无一例外地都存在弯矩，且所有弯曲都将围绕一条中性轴线发生。

由于必须考虑弯曲效应，在构件的每个截面上都需安装一支以上的应变计。要进行完整的分析至少需要三支以上的应变计，而且通常需要更多。对于圆形支撑管，在支撑管外围以 120 度的间隔安装三只应变计即可（见附录 F）。在 H 桩或工字梁上，至少需要安装四只应变计。对于钢板桩，在两侧面背靠背地安装两只应变计即可。在构件受到弯曲并且只有前表面可接近的情况下，例如隧道的钢结构衬砌或钢板桩的外侧，可以通过在距离中性轴不同距离处安装两支应变计来测量弯矩（见附录 H）。

以工字梁为例，如下图所示。

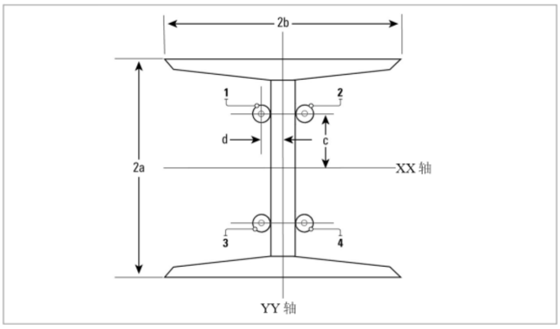

图 20 在工字梁的中心腹板上安装应变计

最好成对安装应变计，中心轴线的两侧各安装一支，安装的应变计与工字梁截面对称。这样沿腹板安装应变计就容易避免意外损坏，这也是优选上图所示方法更可取。

提示：上述方法不建议用于隧道拱架的应变计布置

安装在中心腹板上的应变计可以测量轴向应变，还可以测量XX轴和YY轴周围的弯矩。在这个配置中，4支应变计（上图所示的1、2、3和4号应变计）分为两对，背靠背地焊接在中心腹板上。这些应变计在腹板中心点（YY轴）上方的高度为d，距离为c。2b表示工字梁法兰的宽度，2a表示腹板的高。

4支应变计的应变读数平均值乘以弹性模量，即可求得轴向应力，参见如下方程所示：

$$\sigma_{轴向} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{4} \times E$$

方程1 轴向应力计算

通过观察中性轴线相对两侧的成对的应变计之间的差异，可计算得到弯曲应力。因此，利用以下方程分别求得围绕yy与绕xx轴的最大弯曲应力：

$$\sigma_{yy} = \frac{(\varepsilon_1+\varepsilon_3) - (\varepsilon_2+\varepsilon_4)}{2} \times \frac{b}{d} \times E$$

方程2 YY轴上的弯曲应力

$$\sigma_{xx} = \frac{(\varepsilon_1+\varepsilon_2) - (\varepsilon_3+\varepsilon_4)}{2} \times \frac{a}{c} \times E$$

方程3 XX轴上的弯曲应力

$$\sigma_{maximum} = \sigma_{axial} + \sigma_{xx} + \sigma_{yy}$$

方程4 最大应力计算

在执行上述所有计算时，须注意应变的符号，正值表示拉应变，负值表示压应变。

注意：横截面中任何一点的总应变是弯曲应变和轴向应变的代数和。但翼缘处的应变可能比腹板上测得的应变高得多，并且截面的破坏可能从这些点开始，因此分析弯矩很重要。

以上考虑可以会引出以下结论（从获取最大应变的最佳测值的角度分析）：应变计布置的理想位置是工字梁的翼缘处，如下图所示。然而，这种布置很难保护应变计和电缆免受意外损坏。此外，四支应变计都可能受到局部弯曲力影响，这只会影响其中一支而不影响其它应变计，这是事实，但可能会导致产生严重问题。例如，在应变计附近进行焊接的情况并不罕见；但这往往会使应变计发生较大的应变变化。另外，局部阻塞（如隧道拱架支撑）和增加支柱的情况也不罕见，但会导致其附近的一支应变计的应变产生变化。

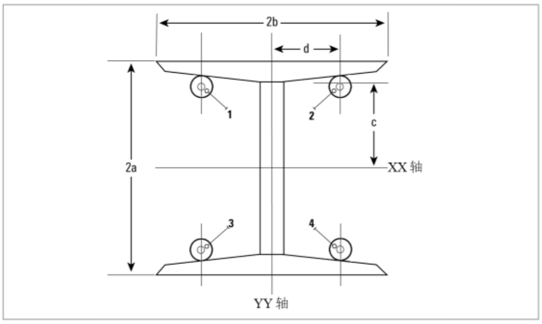

图21 安装在翼缘上的应变计

出于经济性考虑，如果确定每个横截面仅使用2只应变计，则可使用下图所示的布置。这种布置将只在短轴YY轴周围产生轴向应变和弯矩。

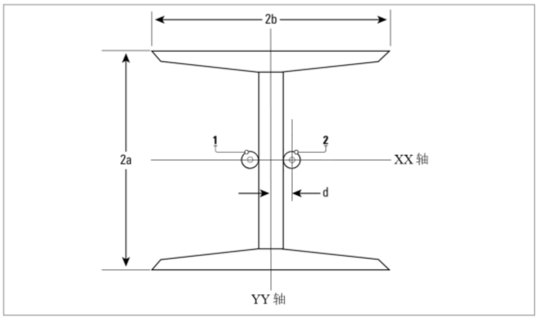

图22 YY轴的轴向应变测量/弯曲力矩

这种布置有利于为仪器及电缆提供保护措施。如果需要，可以在腹板中央钻一个孔，让其中一支应变计的电缆可以穿至腹板另一侧，从而利用一根管保护两条电缆。

另一种采用两支应变计布置方法参见图23。

这种布置允许计算长轴XX轴周围的轴向应变和弯矩，缺点是翼缘外侧的应变计暴露处需要给予更多地保护。另外，当一支应变计发生局部弯曲时，另一支应变计可能感知不到。这是一个真实案例：在靠近一支应变计的一个围护桩的外露翼缘上进行焊接时，该应变计发生了较大的应变变化，但桩背面的另一支应变计却感知不到这种变化。

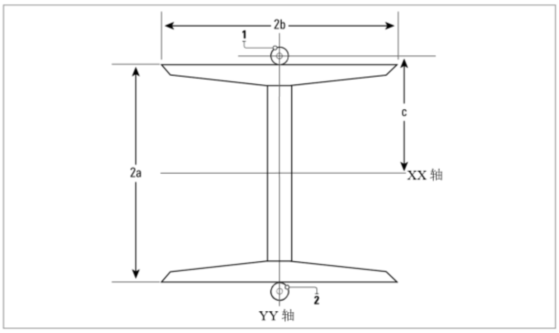

图23 XX轴向应变和弯矩

下图所示布置方法已得到应用，它能够计算出轴

向应变以及测量绕 XX 长轴的弯矩。但绕 YY 短轴的任何弯曲都会在一定程度上影响读数。更重要的是，还存在以下风险：局部弯曲可能影响其中一支应变计，但不影响另一只应变计。因此不建议使用该布置。

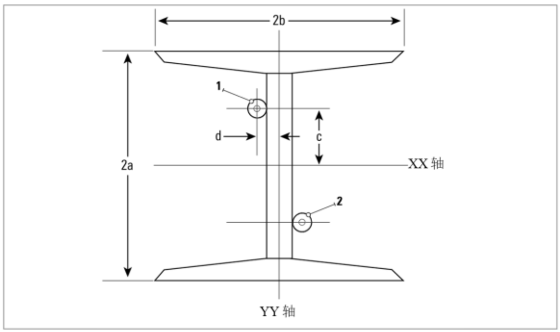

图 24　XX 轴向应变和弯矩（不建议使用）

6. 获取读数

6.1 读数仪档位设置

表 2　应变计读数仪档位

型号	4100/4150 (3000με)	4100-8/4150-4 (5000με)	4100-9/4150-5 (10000με)
读数仪档位	E	B	B
显示单位	微应变(με)	Digits(字)	Digits(字)
频率范围	1400-3500 Hz	1400-3500Hz	1400-3500Hz
中间量程读数	2500 με	6500	6000
最小读数	1000 με	3500	2500
最大读数	4000 με	9500	10,000

提示：当读取 4150 的读数时，受线圈加热效应影响，读数可能继续出现轻微跳动。建议在连接应变计之后记录最初几秒钟内的读数。

6.2 GK-404 振弦式读数仪

GK-404 型振弦读数仪是一种手持式读数仪，使用两节 AA 电池，低功耗可连续工作 20 小时以上。他专用于所有基康振弦式仪器的读数输出，能够显示频率模数（Digit）、频率(Hz)、周期(µs)和微应变(με)。GK-404 能直接显示热敏电阻的温度，分辨率为 0.1℃。

图 25　GK404 读数仪

图 26　GK404 的 Lemo 连接器

GK-404 操作方法：

1) 将银色 Lemo 连接器上的红色圆点与 GK-404 顶部的插座的红线对齐（参见图 26），然后插入 GK-404，直至锁定到位。
2) 将电缆接线夹与待测仪器的同色芯线依次连接，蓝色为屏蔽线（裸线）。
3) 按下该仪器前端面板上的开/关（ON/OFF）按钮启动 GK-404，将显示初始屏幕。
4) 等候数秒后 GK-404 将开始显示读数，并根据 Pos（档位）按钮和 Mode（模式）按钮的设置显示读取的内容。

该仪器显示的内容（从左到右）如下：

- 当前档位：根据 Pos 按钮的设置，显示 A～F。
- 当前读数：根据 Mode 按钮的设置，显示数值和测量单位。
- 所测仪器的温度，单位：℃（摄氏度）

利用 Pos 按钮和 Mode 按钮，可以设置所接入仪器的档位和显示单位。

GK-404 将持续采集测量并显示读数，直到通过手动或自动关机（如已启用）。

欲知更多信息，请查阅 GK-404 产品说明书。

6.3 GK-405 振弦式读数仪

GK-405 读数仪由两部分组成：

- 读数仪，由一台运行 GK-405 振弦读数应用程序的 Windows Mobile 掌上电脑组成；
- GK-405 遥测模块，安装在防风雨外壳中。

遥测模块可通过以下方式与传感器连线：

- 使用带有鳄鱼夹的电缆连接；
- 使用 10 针连接器（航插）直接连接。

上述两个部分设备模块之间使用蓝牙®进行无线通信，利用蓝牙技术可以在遥测模块的托架上操作该读数仪，也可以取下来在距离遥测模块 20 米远的地方操作该读数仪（如果这样做更方便）。

GK-405 还能同时显示热敏电阻的摄氏温度。欲知

更多详情请查阅 GK-405 产品说明书。

图 27-GK405 读数仪

6.3.1 利用安装的 10 针插座连接传感器

将传感器连接器（公头连接器）上的凹槽与读数仪上的插座（母连接器、标有 Sensor 或 Load Cell）对齐，将连接器推入位，然后旋转公连接器的壳套直至锁定不动。

6.3.2 使用裸引线连接传感器

将连接电缆的各线夹与传感器电缆的同色芯线连接，蓝色线夹为屏蔽线（裸线），通过该方法连接基康振弦式传感器。

6.3.3 GK-405 操作方法

按下读数仪上的电源按钮。启动程序完成后，蓝色指示灯开始闪烁，表示两个模块开始准备无线连接。执行以下步骤启动 GK-405 VWRA 程序：

轻触掌上电脑主窗口的点击【Start】开始；

选择【Programs】图标；

点击【GK-405 VWRA】图标。

几秒钟后蓝色指示灯应停止闪烁并保持常亮，掌上电脑将显示实时读数窗口。

将显示模式设置为所接入仪器对应的字母代表的档位，如 4100 型则设置为 E。

更多信息请查阅 GK-405 产品说明书。

6.4 温度测量

所有基康振弦式仪器都内置有热敏电阻温度传感器，热敏电阻随着温度变化对应不同的电阻输出值。通常仪器电缆的绿色和白色芯线与内置热敏电阻连接。

GK-404 和 GK-405 读数仪将读取热敏电阻并显示摄氏温度（℃）。

利用欧姆表读取温度：

1) 将数字万用表的欧姆档连接到该仪器的绿色和白色导线即热敏电阻引线。由于电阻随温度变化较大，电缆的电阻影响一般不明显。对于较长的电缆，在 20℃时芯线电阻大约为 48.5Ω/km，双向电阻回路则取 2 倍值。
2) 附录 C 列出了热敏电阻阻值与温度的转换关系和对应数值。

7. 数据处理

GK403/404/405 读数仪“E”档显示的读数是以微应变（με）为单位的理论值，即：

$$\mu\varepsilon_{理论} = 0.391 \times (f^2 \times 10^{-3})$$

方程 5 微应变理论值

式中：με 表示以微应变为单位的振弦应变

f 是振弦的振动频率

7.1 将读数转换为应变变化

实际上每一批的应变计钢弦锁定的长度可能略有误差，使应变计产生一定的测量误差。在每批应变计随附的率定表（即校准报告）中提供了该批量应变计的修正系数 B，利用该系数可以消除这种不均匀影响。

$$\mu\varepsilon_{理论值} = (R1 - R0) \times B$$

方程 6-应变计算

式中：R0-表示 E 档的初始读数；

R1-表示 E 档的当前读数；

B-批检修正系数，一般在 0.9～1.1 之间。

提示：当(R1-R0)为正时，表示拉应变。

当计算附录 B 第二步至第四步方程中的应力时，需要使用从以上方程获取的数值。由此计算的应力是由施工活动和可能发生的任意温度变化引起的应力的总和。

7.2 应变转换为应力

应变计用于测量结构件的应变或形变，但设计者往往更关注结构荷载或结构应力。这需要将应变测量值转换为应力计算值。

应力的计算方法是应变测量值与杨氏模量之积，钢材的杨氏模量的变化范围为 190～206 Gpa，应力乘以截面面积即为被测钢结构的荷载。

关于应变变化的计算，可利用不同时间获取的应变计读数与初始读数进行比较计算求得。初始读数最好在被结构件处于无荷载状态时读取，也就是说在钢结构尚未进行组装时安装应变计。

8. 故障排除

维护和故障排除仅限于定期检查电缆连接和对电缆末端的维护。应变计在安装之后通常无法进行检修，补救措施也很有限。如果出现问题，请参阅以下问题列表和可能的解决方案。仪器安装前有任何问题可退回工厂，不可在现场打开仪器。如需其它的故障排除和技术支持，请联系基康。

症状：热敏电阻器的电阻值太大

- 检查是否出现开路。检查所有的电缆接头、电缆连接点以及插头等。如果电缆断开，应按照 3.1 节的操作指导重新连接并连接做好绝缘处理。

症状：热敏电阻器的电阻太小

- 检查是否出现短路。检查所有的电缆接头、电缆连接点以及插头等。如果电缆断开，应按照 3.1 节的操作指导重新连接并连接做好绝缘处理。
- 仪器内部可能已经进水。这种情况无法补救。

症状：仪表读数不稳定

- 读数盒位置设置是否正确？如果使用数据记录仪自动记录读数，激励档位（或频率范围）设置是否正确？
- 附近是否有电噪声源？发电机、电机、弧焊设备、高压线路等都可能是噪声源。仪器电缆应尽量远离电源线和电气设备，或者加装电子滤波器。
- 确保屏蔽裸线已经接地。在读数时使用蓝色线夹将屏蔽裸线连接到读数仪。
- 将读数仪或数据记录仪连接其它仪器电缆是否也有同样现象？如果仍存在，则可能是读数设备电池电量不足或出现故障。

症状：仪器无法读取数据

- 将读数仪或数据记录仪连接另一支仪器电缆进行读数是否正常？如果依然不能读数，则可能是读数设备电池电量不足或出现故障。
- 电缆是否断开或者被挤伤？使用万用表欧姆档检查电缆电阻，基康所配置电缆的电阻为 48.5～50Ω/km。如果电阻值极高或者无穷大，很可能电缆断路。如果电阻值极小，则电缆可能短路。如存在短路或断路，则重新连接电缆。

基康应变计电缆芯线电阻参考值如下：

红-黑芯线电阻：4100 型≈180Ω，4150 型≈50Ω

绿-白芯线电阻：3000Ω （25 ℃时）

其它任意芯线间的电阻均应为无穷大。

附录 A. 技术规格

A.1 振弦式应变计

表 3　应变计规格

型号	4100	4150/4151	4150-5
量程（标称）	3000με		10,000με
分辨率 1	0.4με		1.3με
精度 2	0.5% F.S		0.5% F.S
稳定性	0.1% F.S/年		0.1% F.S/年
线性	±2.0% F.S.R		±7.5% F.S.R
热胀系数	12.2 με /		参见附录 G
频率范围	1400 – 3500 Hz		
尺寸(应变计）（LxD）	57.2x6.4 mm		
尺寸(线圈）（LxWxH）	76.2x22.2x12.7mm	19.1x6.4 mm	19.1x6.4 mm
线圈电阻	180 Ω	50 Ω	50 Ω
温度范围	-20～+80℃		

型号	4100-8	4150-4	4100-9
量程（标称）	5000 με		10,000με
频率范围	1400–3500Hz		
尺寸(应变计)（LxD）	57.2x6.4mm		
尺寸(线圈)（LxWxH）	76.2x22.2x12.7mm	19.1x6.4mm	76.2x22.2x12.7mm
线圈电阻	180Ω	50Ω	180Ω
温度范围	-20～+80℃		

注：1、分辨率取决于读数仪，此处使用的是 GK-404。

2、0.1% F.S 精度需单独校准。

应变计外形尺寸：

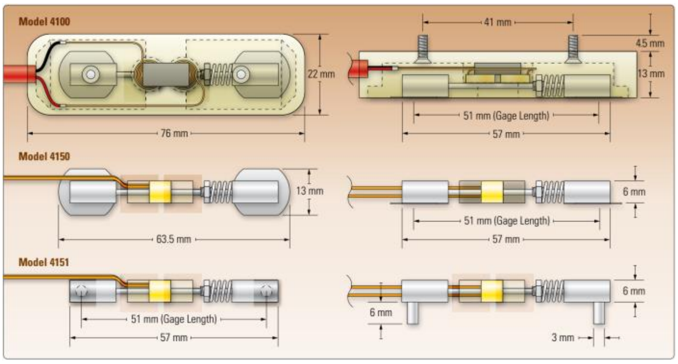

图 28　应变计外形尺寸

A.2 热敏电阻温度传感器

范围：-80℃~ +150℃

精确度：±0.5℃

热敏电阻温度计的更多信息参见附录 C。

附录 B. 工作原理

对于在一个形变体表面安装的振弦，将按照与形变体相似的方式产生形变。这些形变不仅改变弦的张力，也改变其固有的振动频率（谐振）。

以下内容描述了钢弦频率(周期)与形变（应变）的关系：

1.弦的振动基频（共振频率）与其张力、长度和质量相关。可通过以下方程确定基频：

$$f=\frac{1}{2L_W}\sqrt{\frac{F}{m}}$$

式中：L_w 表示弦长，单位：mm 或英寸

F 表示弦的张力，单位：N 或磅

m 表示每单位长度的弦质量(磅，S^2/IN^2)。

2.注意：

$$m=\frac{W}{L_w g}$$

式中：W 表示 L_w 英寸的弦重量，单位：磅或 kg

g 表示重力加速度(386 英寸/S^2 或 9.8m/S^2)。

3.以及：

$$W=\rho a L_W$$

式中：ρ -表示弦的材料密度（0.283 磅/立方英寸或 kg/m^3）。

a-表示弦的截面积，单位：平方英寸或 m^2。

4.第一、第二和第三步方程组合得出：

$$f=\frac{1}{2L_W}\sqrt{\frac{Fg}{\rho a}}$$

5.请注意，张力（F）可以表示为应变，例如：

$$F=\varepsilon_W Ea$$

式中：ε_W 表示钢弦的应变（英寸/英寸）

E 表示弦的杨氏模量（30×10^6 Psi）。

6.第四步和第四步方程组合得出：

$$f=\frac{1}{2L_W}\sqrt{\frac{\varepsilon_W Eg}{\rho}}$$

7.替代 E、g 和 ρ 的给定值得出：

$$f=\frac{101142}{L_W}\sqrt{\varepsilon_W}$$

8.在 A 位置，（显示振动周期 T）乘以系数 10^6：

$$T=\frac{10^6}{f}$$

9.第七步和第八步方程组合得出：

$$\varepsilon_W=\frac{97.75{L_W}^2}{T^2}$$

10.现在，上一步的方程必须表示为固定仪器的主体表面应变。由于主体的形变量必须等于弦的形变量，因此：

$$\varepsilon_W L_W=\varepsilon L_g$$

式中：ε 表示主体中的应变。

L_g 表示仪表长度，单位：英寸。

11.第九步和第 10 步的方程结合得出：

$$\varepsilon=\frac{97.75}{T^2}\cdot\frac{{L_W}^3}{L_g}$$

式中：（针对型号 4100/4150 应变计）

L_w 是 2.000 英寸

L_g 是 2.000 英寸

12. 因此：

$$\varepsilon=0.391\ \mathrm{x}\ 10^3\left[\frac{1}{T^2}\right]$$

13. 读数仪“E”位置显示的数据是基于以下公式计算求得的：

$$\varepsilon=4.062\ \mathrm{x}\ 10^9\left[\frac{1}{T^2}\right]$$

系数 0.391×10^9 的平方、求逆和乘积都是由读数仪的微处理器在内部完成的，因此 C 档所显示读数的单位是每英寸的微英寸数(ε)。

提示：在前面的两个步骤中，T 表示秒数乘以 10^6，ε 表示每英寸的微英寸数。

另外：

ε=0.391×$10^{-3}f^2$ 微应变。式中，f 表示频率，单位：Hz。

附录 C. 热敏电阻及温度转换

C.1 3KΩ热敏电阻（标准型）

热敏电阻类型：NTC 负温度系数热敏电阻

电阻-温度方程：

$$T=\frac{1}{A+B(LnR)+C(LnR)^3+D(LnR)^5}-273.15$$

式中：T=温度，单位：℃

LnR=热敏电阻器电阻的自然对数

$A=1.4051\times10^{-3}$

$B=2.369\times10^{-4}$

$C=1.019\times10^{-7}$

注：以上系数在-50℃～+150℃范围内有效。

电阻	温度	电阻	温度	电阻	温度	电阻	温度
201.1K	-50	9796	0	1081	50	203.8	100
187.3K	-49	9310	1	1040	51	197.9	101
174.5K	-48	8851	2	1002	52	192.2	102
162.7K	-47	8417	3	965.0	53	186.8	103
151.7K	-46	8006	4	929.6	54	181.5	104
141.6K	-45	7618	5	895.8	55	176.4	105
132.2K	-44	7252	6	863.3	56	171.4	106
123.5K	-43	6905	7	832.2	57	166.7	107
115.4K	-42	6576	8	802.3	58	162.0	108
107.9K	-41	6265	9	773.7	59	157.6	109
101.0K	-40	5971	10	746.3	60	153.2	110
94.48K	-39	5692	11	719.9	61	149.0	111
88.46K	-38	5427	12	694.7	62	145.0	112
82.87K	-37	5177	13	670.4	63	141.1	113
77.66K	-36	4939	14	647.1	64	137.2	114
72.81K	-35	4714	15	624.7	65	133.6	115
68.30K	-34	4500	16	603.3	66	130.0	116
64.09K	-33	4297	17	582.6	67	126.5	117
60.17K	-32	4105	18	562.8	68	123.2	118
56.51K	-31	3922	19	543.7	69	119.9	119
53.10K	-30	3748	20	525.4	70	116.8	120
49.91K	-29	3583	21	507.8	71	113.8	121
46.94K	-28	3426	22	490.9	72	110.8	122
44.16K	-27	3277	23	474.7	73	107.9	123
41.56K	-26	3135	24	459.0	74	105.2	124
39.13K	-25	3000	25	444.0	75	102.5	125
36.86K	-24	2872	26	429.5	76	99.9	126
34.73K	-23	2750	27	415.6	77	97.3	127
32.74K	-22	2633	28	402.2	78	94.9	128
30.87K	-21	2523	29	389.3	79	92.5	129
29.13K	-20	2417	30	376.9	80	90.2	130
27.49K	-19	2317	31	364.9	81	87.9	131
25.95K	-18	2221	32	353.4	82	85.7	132
24.51K	-17	2130	33	342.2	83	83.6	133
23.16K	-16	2042	34	331.5	84	81.6	134
21.89K	-15	1959	35	321.2	85	79.6	135
20.70K	-14	1880	36	311.3	86	77.6	136
19.58K	-13	1805	37	301.7	87	75.8	137
18.52K	-12	1733	38	292.4	88	73.9	138
17.53K	-11	1664	39	283.5	89	72.2	139
16.60K	-10	1598	40	274.9	90	70.4	140
15.72K	-9	1535	41	266.6	91	68.8	141
14.90K	-8	1475	42	258.6	92	67.1	142
14.12K	-7	1418	43	250.9	93	65.5	143
13.39K	-6	1363	44	243.4	94	64.0	144
12.70K	-5	1310	45	236.2	95	62.5	145
12.05K	-4	1260	46	229.3	96	61.1	146
11.44K	-3	1212	47	222.6	97	59.6	147
10.86K	-2	1167	48	216.1	98	58.3	148
10.31K	-1	1123	49	209.8	99	56.8	149
						55.6	150

C.2 10KΩ热敏电阻（高温型）

热敏电阻器的类型：NTC 负温度系数热敏电阻

电阻-温度方程：

$$T=\frac{1}{A+B(LnR)+C(LnR)^3+D(LnR)^5}-273.15$$

式中：T=温度，单位：℃

LnR=热敏电阻器电阻的自然对数

$A=1.127670\times10^{-3}$

$B=2.344442\times10^{-4}$

$C=8.476921\times10^{-8}$

$D=1.175122\times10^{-11}$

注：以上系数在 0℃～+250℃范围内有效。

欧姆	温度	欧姆	温度	欧姆	温度	欧姆	温度
32,650	0	2,157	64	316.6	128	76.5	192
31,029	1	2,083	65	308.7	129	75.0	193
29,498	2	2,011	66	301.0	130	73.6	194
28,052	3	1,942	67	293.5	131	72.2	195
26,685	4	1,876	68	286.3	132	70.8	196
25,392	5	1,813	69	279.2	133	69.5	197
24,170	6	1,752	70	272.4	134	68.2	198
23,013	7	1,693	71	265.8	135	66.9	199
21,918	8	1,637	72	259.3	136	65.7	200
20,882	9	1,582	73	253.1	137	64.4	201
19,901	10	1,530	74	247.0	138	63.3	202
18,971	11	1,480	75	241.1	139	62.1	203
18,090	12	1,432	76	235.3	140	61.0	204
17,255	13	1,385	77	229.7	141	59.9	205
16,463	14	1,340	78	224.3	142	58.8	206
15,712	15	1,297	79	219.0	143	57.7	207
14,999	16	1,255	80	213.9	144	56.7	208
14,323	17	1,215	81	208.9	145	55.7	209
13,681	18	1,177	82	204.1	146	54.7	210
13,072	19	1,140	83	199.4	147	53.7	211
12,493	20	1,104	84	194.8	148	52.7	212
11,942	21	1,070	85	190.3	149	51.8	213
11,419	22	1,037	86	186.1	150	50.9	214
10,922	23	1,005	87	181.9	151	50.0	215
10,450	24	973.8	88	177.7	152	49.1	216
10,000	25	944.1	89	173.7	153	48.3	217
9,572	26	915.5	90	169.8	154	47.4	218
9,165	27	887.8	91	166.0	155	46.6	219
8,777	28	861.2	92	162.3	156	45.8	220
8,408	29	835.4	93	158.6	157	45.0	221
8,057	30	810.6	94	155.1	158	44.3	222
7,722	31	786.6	95	151.7	159	43.5	223
7,402	32	763.5	96	148.4	160	42.8	224

7,098	33	741.2	97	145.1	161	42.1	225
6,808	34	719.6	98	142.0	162	41.4	226
6,531	35	698.7	99	138.9	163	40.7	227
6,267	36	678.6	100	135.9	164	40.0	228
6,015	37	659.1	101	133.0	165	39.3	229
5,775	38	640.3	102	130.1	166	38.7	230
5,545	39	622.2	103	127.3	167	38.0	231
5,326	40	604.6	104	124.6	168	37.4	232
5,117	41	587.6	105	122.0	169	36.8	233
4,917	42	571.2	106	119.4	170	36.2	234
4,725	43	555.3	107	116.9	171	35.6	235
4,543	44	539.9	108	114.5	172	35.1	236
4,368	45	525.0	109	112.1	173	34.5	237
4,201	46	510.6	110	109.8	174	33.9	238
4,041	47	496.7	111	107.5	175	33.4	239
3,888	48	483.2	112	105.3	176	32.9	240
3,742	49	470.1	113	103.2	177	32.3	241
3,602	50	457.5	114	101.1	178	31.8	242
3,468	51	445.3	115	99.0	179	31.3	243
3,340	52	433.4	116	97.0	180	30.8	244
3,217	53	421.9	117	95.1	181	30.4	245
3,099	54	410.8	118	93.2	182	29.9	246
2,986	55	400.0	119	91.3	183	29.4	247
2,878	56	389.6	120	89.5	184	29.0	248
2,774	57	379.4	121	87.7	185	28.5	249
2,675	58	369.6	122	86.0	186	28.1	250
2,579	59	360.1	123	84.3	187		
2,488	60	350.9	124	82.7	188		
2,400	61	341.9	125	81.1	189		
2,316	62	333.2	126	79.5	190		
2,235	63	324.8	127	78.0	191		

附录 D. 在混凝土上使用时的温度校正

在自由环境下因无荷载作用，利用下式得到混凝土热膨胀应变：

$$\mu\varepsilon_{\text{热胀}} = (T_1-T_0)\times CF_2$$

CF_2 表示混凝土的膨胀系数。除非已知，一般取 10.4με/℃的名义值。

若要计算混凝土结构的实际应变（即单位长度的变化，该变化可以由固定在表面的千分表测量），可利用以下公式计算：

$$\mu\varepsilon_{\text{实际}}=(R_1-R_0)B+(T_1-T_0)\times CF_1$$

式中：CF_1 表示钢弦的膨胀系数=12.2 微应变/℃，

$(R_1-R_0)B$ 表示读数设备显示或记录的应变值。

计算仅仅由于荷载变化使混凝土发生的应变：

$$\mu\varepsilon_{\text{荷载}}=\mu\varepsilon_{\text{实测}}-\mu\varepsilon_{\text{热膨胀}}=(R_1-R_0)B+(T_1-T_0)\times(CF_1-CF_2)$$

以下为示例，其中 B=0.91

R_0=3000με，T0=20℃

R_1=2900με，T1=30℃

$\mu\varepsilon_{\text{显示值}}$ =(2900-3000)×0.91 = －91(压缩)

$\mu\varepsilon_{\text{实际值}}$=(2900-3000)×0.91 +(30-20)×12.2=31（张拉）

$\mu\varepsilon_{\text{热膨胀}}$= (30-20)×10.4 = 104(张拉)

$\mu\varepsilon_{\text{荷载}}$=(2900-3000) × 0.91+(30-20) × (12.2-10.4)

=-73(压缩)

提示：因为已经针对混凝土的热膨胀系数进行了假设，因此这些方程仅做一般指南。

解释：当使用批量灵敏度修正系数 B 之后，通过读数仪显示的指示值应变变化量是$(R_1-R_0)\times B$=-91με。如果混凝土的应变没有变化，钢弦将膨胀而变松驰相当于产生(30-20)×12.2=-12.2με。因此，混凝土必须膨胀 31με才能解释仪表测量到的应变。由于温度升高，混凝土应膨胀(30-20)×10.4=+104με，但事实上并没有达到这个值，这就意味着存在一个等于 104-31=-73με的压应变叠加值。该值乘以杨氏模量，将得出到外部施加的荷载使混凝土产生的实际应力。

附录 E. 温度效应

如果结构件的端部可以不受约束地自由膨胀或收缩，则可能出现应变变化而应力读数却不会发生任何改变。但如果钢结构的端部受到某些半刚性介质约束，那么，结构的任何温升都会导致在结构中与压力载荷相关的应变计的累计，即使实际应变为拉应变。

因为钢弦不受膨胀约束，即使构件受到约束，应变计仍然可以精确测量这种温度引起的压应力增加的大小。在读数仪上将显示膨胀，构件中减少的应变读数相当于温度导致增加的压缩应力。膨胀量将在读数仪以应变读数的减少来显示，该减少等于结构中温度引起的压应力的增加。

通过经常获取应变计的应变和温度，就可以将这些温度导致的应力与任何外部载荷导致的应力分开。在建筑施工活动产生的外部负荷保持不变时获取这些数据。当将这些应变变化与相应的温度变化作曲线图时，结果显示为直线关系，利用该直线斜率得到经验修正系数—CF_{emp} 微应变/℃。该经验修正系数可用于计算总应变和温度数据，以消除热膨胀产生的应力，只留下由于改变外部荷载而产生的应力，即：

$$\sigma_{\text{外部}}=[(R_1-R_0)\times B+(T_1-T_0)\times CF_{cmp}]\times E$$

应注意的是，因为约束的刚度可能改变，所以修正因子 CF_{emp} 可能随时间和施工活动而改变。为了计算一个新的温度修正系数，重复上述步骤也是个好主意。

在自由场中，如果没有载荷作用，钢结构可以自由膨胀或收缩而不受约束，则 R_1 等于 R_0，结构中的热

应变由下式给出：

$$\mu\varepsilon_{热胀}=(T_1-T_0)\times CF_1$$

式中，CF_1 表示钢的膨胀系数=+12.2με/℃。

无论出于任何原因，如果要计算钢结构的实际应变（即单位长度的变化，该变化可以由固定在表面的千分表测量），可以利用以下方程计算：

$$\mu\varepsilon_{实际}=(R_1-R_0)\times B+(T_1-T_0)\times CF_1$$

CF_1 表示钢的膨胀系数=12.2με/℃。当构件端部受到充分约束时，仅温度变化引起的压缩应变$(R_1-R_0)\times B$ 将被$(T_1-T_0)\times CF_1$ 完全抵消，膨胀应变和 με实际将等于零。

附录 F. 在圆形管上 60 度角均布三支应变计的计算

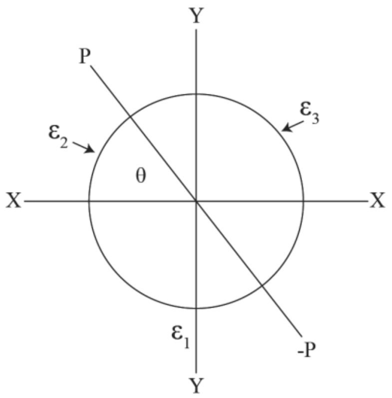

图 29 在圆管上安装三支应变计

$$A=(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3)/3$$

$$Y=\pm[((\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3)/3)-\varepsilon_1]$$

$$X=\pm[(\varepsilon_2-\varepsilon_3)/1.732]$$

$$P=\pm[X\cos\theta+Y\sin\theta]+A \text{ 和 } \tan\theta=Y/X$$

示例：

假定 ε_1=20，ε_2=192，ε_3=88 （均为拉应变）

平均轴向的应变：A=(20+192+88)/3=100με，拉应力；

X=±(104/1.732)=±60

Y=±(300/3-20)=±80

Tanθ=80/60=1.333 即θ=53 度，自 X 轴测量

P=±[60×0.6+80+0.8]+100=200με，拉应力，最小微应变等于 0。

附录 G. 4150-5 型大量程应变计

4150-5 型应变计是 4150 型应变计的大量程改进版本，量程为 10,000 微应变。当使用 4150-5 型应变计时，注意以下几点：

- 该应变计的安装方式与标准 4150 应变计相同。但是，在量程内的位置应由用户设置，可利用每支应变计的校准报告（率定表）作为参考。
- 在点焊第二个固定基片之前，轻轻推拉应变计。
- 请使用多项式来计算以获取最大精度。
- 由于这项技术用于获取所需大量程，因此 4150-5 应变计需要单独校准。
- 使用 B 档读数，读数单位为字（Digit）。
- 该应变计的热膨胀系数也不同于标准应变计，且在整个读数范围内的热膨胀系数也存在差异。

建议使用下述的操作指南来进行温度修正：

当使用线性方程计算时：

$$应变=G\times[(R_1-R_0)-K_t\times(T_1-T_0)]$$

式中：$K=(M*R_1+B)$

M 为 0.0002205

B=-0.03886

G 是线性应变系数=1.0296με/字（B 档读数）

R_1 为当前读数

R_0 为初始读数

T_1 表示 R_1 的温度

T_0 表示 R_0 的温度

例如：

R_1=6682

R_0=6596

T_1=30.13℃

T_0=20.09℃

K=[(0.0002205*6682)-0.03886]=1.4345

当完成温度修正计算后：

应 变 =1.0296*[(6682-6596)+1.4345*(30.13-20.09)]

=+103με。

当使用多项式方程时：

在使用多项式方程之前，必须对 R_1 值进行温度修正。

利用以上示例，R_1 的修正值是 $K\times(T_1-T_0)$=1.4345×(10.04)=+14.4。

因此，如 R_1 的当前值是 6682，在多项式中必须输入温度修正后的值，即 6682+14.4=6696.4。

附录 H. 零部件选购清单

下表列出了 4100/4150 系列应变计的选购组件。

4100 配套零件号	**描述**
4100	应变计
4100A-1	振弦式应变计，点焊型，2"标距，可点焊基片，配套提供 3 m 电缆和热敏电阻。
4100A-2	振弦式应变计，点焊型，2"标距，可点焊基片，电缆单独出售。
4100-1	4100 线圈盒，配备热敏电阻和固定钢带，电缆长度可变，电缆单独出售。
4100-2	4100 线圈盒，配备热敏电阻和固定钢带，3m 电缆长度。
02-187V3-M	红色 PVC 电缆，0.187" θ，2 对双绞线，用于上述应变计，以米计。
4150-3	点焊定位工具（对正工具）
4100-4	张紧扳手，张力调节用
4100-5	可焊接保护罩， 2" 槽宽 ×12"长（50㎜×300㎜），配备安装螺栓
4100-6	700 型点焊机，应用于 4100/4150 型点焊。包含一只弯头焊嘴和一只直焊嘴。
4100-7-A	700 型点焊机焊嘴（弯头）
4100-7-S	700 型点焊机电极（直嘴）
4100-8	振弦应变计，5,000 微应变，单独校准，点焊型
4100-9	振弦应变计，10,000 微应变，单独校准，点焊型
4100-10	应变计保护套件，包括 128 RTV (ADH-124B)和 Permabond 910 强力胶（ADH-104）以及胶粘带（足够大约 25 只应变计使用）。所有货物都要求提供《材料安全数据表》。
4100-10A	应变计保护套件，包括 128 RTV (ADH-124B) 和 Permabond 910 强力胶（ADH-104）（大足够约 25 只应变计使用）。所有货物都要求提供《材料安全数据表》。
4100-15	胶粘剂组合套件。乐泰 410 粘合剂（0.70 oz.）和乐泰 712 瞬干胶促进剂（0.70 oz. ），足够 50 只应变计使用。要求提供《材料安全数据表》。
4150 配套零件号	**描述**
4150	振弦式应变计，3,000 微应变量程，带点焊基片、带一体化线圈、保护罩和热敏电阻。电缆单独出售。
4150-4	振弦式应变计，5,000 微应变量程，带点焊基片、带一体化线圈和保护罩。包括热敏电阻，单独校准。电缆单独出售。
4150-5	振弦式应变计，10,000 微应变量程，带点焊基片、带一体化线圈和保护罩。包括热敏电阻，单独校准。电缆单独出售。
4150-1	带焊接钢带的额外保护罩
02-187V3-M	红色 PVC 电缆，0.187" θ，2 对双绞线，用于上述应变计，以米计
4150-3	点焊定位工具（对正工具）
4150A	振弦式应变计，3,000 微应变量程，不提供点焊基片，带一体化线圈和热敏电阻。电缆单独出售。
4150A-4	振弦式应变计，5,000 微应变量程，不提供点焊基片，带一体化线圈。包括热敏电阻，单独校准。电缆单独出售。
4150A-5	振弦式应变计，10,000 微应变量程，不提供点焊基片，带一体化线圈。包括热敏电阻，单独校准。电缆单独出售。
4150A-1	用于 4150A 系列应变计的末端块。（如要求，可增加 4150A-2 保护罩和 4150A-3 定位工具）。
4150A-2	带焊接钢带的防护罩，在 4150A-1 末端块上应用。
4150A-3	定位工具，与 4150A-1 末端块结合使用
4151 配套零件号	**描述**
4151	振弦式表面安装应变计，量程 3,000 微应变，带一体化线圈，末端块带有灌浆销钉，保护罩和热敏电阻。电缆单独出售。
4151-1	同上，但量程为 5,000 微应变，含单独校准。
4151-2	同上，但量程为 10,000 微应变，含单独校准。
02-187V3-M	红色 PVC 电缆， 0.187" θ，2 对双绞线，用于上述应变计
4151-3	4151 的钻孔模板（工具）

为人类感知自然
提供高品质的产品与服务！

请告知我们您的需求

基康仪器股份有限公司
地址：北京市海淀区彩和坊路8号天创科技大厦1111室（100080）
电话：010-62698899　传真：010-62698866　客服专线：010-62698855　网址：www.geokon.com.cn