

VK-4100/4150
振弦式点焊型应变计
操作使用手册

(Rev Y, 8/15)

基康仪器股份有限公司编译

地址：北京市海淀区彩和坊路8号天创科技大厦1111室

电话：010-62698899

邮编：102488

传真：010-62698866

网址：www.geokon.com.cn

目录

1.概述	1
2.安装	2
2.1. 初始检验	2
2.2. 调节应变针弦松紧	2
2.2.1. 用于压缩应变测量应变计的调节.....	3
2.2.2. 用于拉伸应变测量的应变计调节.....	3
2.3. 点焊方式安装应变计（需要佩戴护目镜）	4
2.4. 环氧粘接方式安装应变计	8
2.5. 应变计及电缆线保护	9
2.6. 应变计用做钢筋应力计（仅供参考）	10
2.6.1. 加工安装基面.....	10
2.6.2. 划线.....	11
2.6.3. 安装应变计	11
2.6.4. 焊接.....	11
2.6.5. 安装线圈盒组件.....	12
2.6.6. 钢筋计保护	12
2.7. 电缆及其连接	13
2.8. 电气干扰	13
2.9. 雷电防护	13
3.读取数据	14
3.1. GK-401读数仪操作	15
3.2. GK-402读数仪操作	15
3.3. GK-403读数仪操作	16
3.4. 温度测量	16
3.5. 初始读数	16
4.数据说明	16
4.1. 将读数转化为应变变化量	17
4.2. 应变分辨率	17
4.3. 应变转化为应力	17
4.4. 温度影响	21
4.5. 焊接影响	21
4.6. 末端影响	22
5.故障排除	22
附录A—技术指标	24
A.1. 应变计	24
A.2. 半导体温度计（参照附录C）	24
附录B—工作原理	25
附录C—半导体温度计温度推导公式	28
附录D—在混凝土中使用时的温度修正	29

1. 概述

VK-4100和VK-4150振弦式应变计主要用于测量钢结构构件上的应变，诸如：桥梁、桩、隧道衬砌、建筑物等。VK-4100由振弦式应变针（这里指没有线圈的金属体）和可拆卸线圈构成，VK-4150的振弦式应变计和线圈组件是一体化结构。

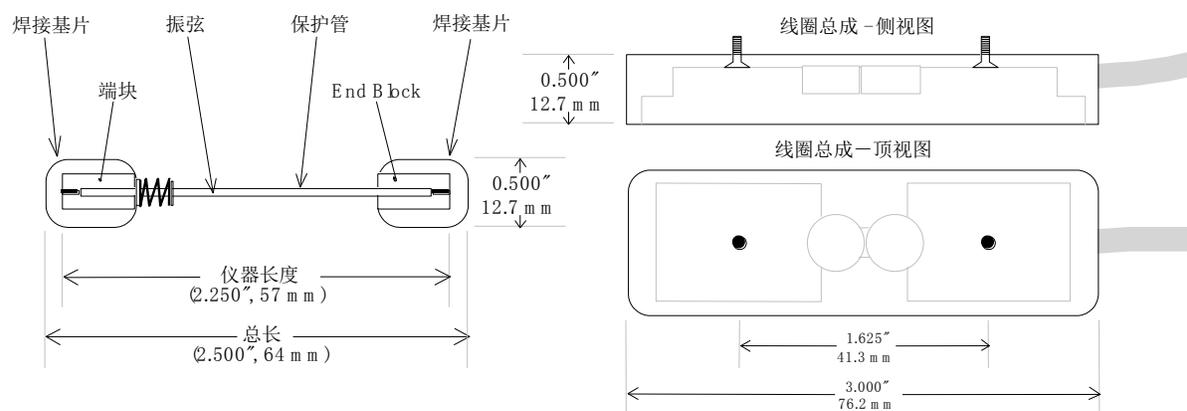


图1 - VK-4100弦式应变计和线圈组件

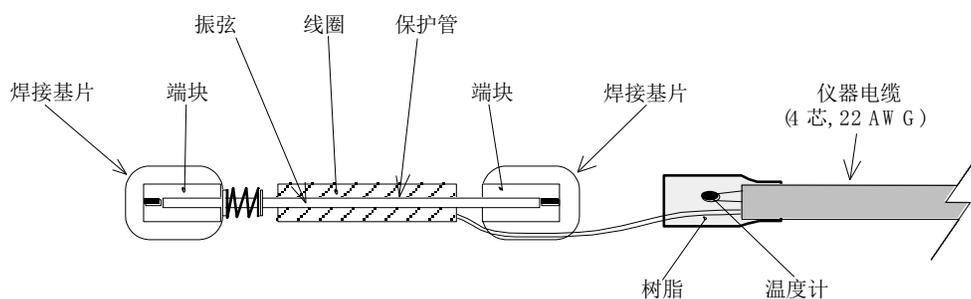


图2 - VK-4150弦式应变计

主要固定方式是采用点焊方式，也可以用环氧或其它高强粘接剂把它们粘接到钢或混凝土表面。

应变测量采用振弦原理：把一根钢弦张拉在两块安装块之间，安装块焊接在待测钢件表面。

表面的变形（如应变变化）导致两个安装块相对运动，从而引起钢弦张力改变。用紧靠钢弦的电磁线圈激励钢弦并测出其共振频率，然后测出张力。

振弦读数仪与应变计连接后，读数仪就可以提供必要的电压脉冲去激励并且直接显示振动结果的微应变周期或其它量。

本手册中包括安装指导、读数指导、相关的维护和故障检修步骤，应变计原理会在数据解释说明中进行阐述。

2. 安装

2.1. 初始检验

所提供的VK-4100和VK-4150应变计为全密封并呈绷紧的状态。VK-4100的激励线圈是可拆卸的，而VK-4150是集成一体的。将激励线圈的导线接入读数仪并观测显示的读数即可获得应变计初始读数（对于VK-4100应需将线圈盒扣到应变针上）。更详尽的信息见第3节中的读数仪操作和读数档位，观测读数应在2000~2500微应变之间。轻轻压应变计的两末端，微应变读数应减小。拉应变计的末端，显示的读数增加。不能在应变计一端加压（或拉伸）过大（>4.5kg），否则可能损坏钢弦。

检查两根振弦应变计导线阻之间的电（通常为红、黑线），对于VK-4100，正常的线圈电阻应在大约 $180\ \Omega \pm 10\ \Omega$ 之间；对于VK-4150，大约为 $50\ \Omega \pm 10\ \Omega$ 。当检测时，应加上电缆电阻（22AWG双绞铜线电阻大约为 $14.7\ \Omega / 1000$ 英尺或 $48.5\ \Omega / \text{KM}$ ，双向乘以2）。热敏电阻温度计（温度感应元件）的电阻也应检查（通常为白绿线）。用附录C表中的参数检查电阻。

如应变计出现故障，请送返厂家。

2.2. 调节应变针弦松紧

在安装应变计之前应调节其初始松紧即根据结构监测目的来调整应变计的预拉或预压状态。厂家提供的应变计弦松紧程度在出厂时均设置在中间量程，其给出的**应变范围**大约为 ± 1250 微应变，一般适用于大多数应用场合。即使应变计将其弦设置在中间量程进行安装，先检查所有应变计是否正常再安装是至关重要的。

如果已知应变变化方向，钢弦的松紧程度可在更大范围内调节其为压缩或拉伸状态。

2.2.1. 用于压缩应变测量应变计的调节

首先装上线圈盒（VK4100）读取应变计的一个读数，然后将线圈脱离应变针，通过调节应变针上的调节螺丝来使应变计呈预拉或预压状态（如图3所示）。

小心调节螺丝1/4圈（顺时针，如图3），然后装上线圈盒并检查读数（推荐读数见表1）。如果是设置VK-4150，设置时直接用一台便携式读数仪即可监测其读数。重复此步骤直至获得所期望的读数。

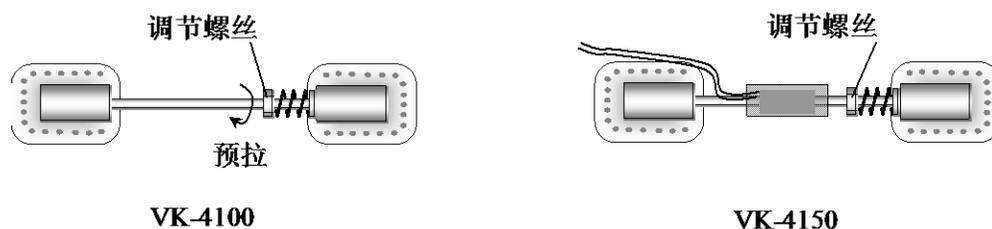


图 3—预张拉调节定位

2.2.2. 用于拉伸应变测量的应变计调节

方法与上述预拉调节相似，只是调节螺丝为逆时针方向为预压缩（见图4）。

小心调节碟形螺丝1/4圈（逆时针），若是4100需要拆卸线圈组件，然后检查读数（读数见表1）。如果是设置VK-4150，设置时用一台便携式读数仪即可监测其读数。重复此步骤直至获得所期望的读数。

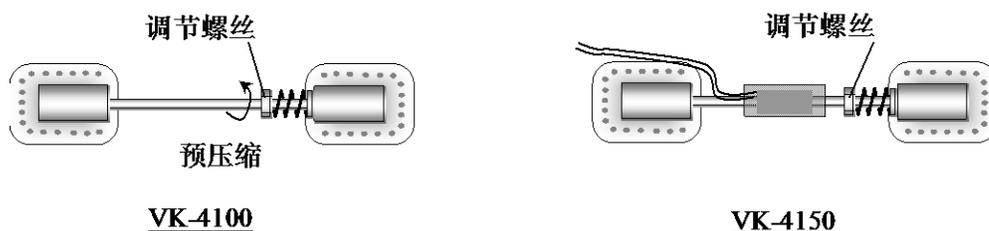


图 4—预压缩调节定位

设置量程	应变读数	适用应变范围	
		张拉	压缩
中间-量程	2200	1250	1250
张拉（量程的67%）	1775	1675	825
压缩（量程的67%）	2625	825	1675

表1 - 初始松紧设置（使用GK-403E档读数）

设置量程	应变读数(模数)	适用应变范围 ($\mu\epsilon$)	
		张拉	压缩
中间-量程	5600	1250	1250
张拉 (量程的67%)	4500	1675	825
压缩 (量程的67%)	6700	825	1675

表1b - 初始松紧设置 (使用BGK-408的D档读数)

2.3. 点焊方式安装应变计 (需要佩戴护目镜)

在应变计松紧设置好后, 即可进行安装。由点焊方式将VK-4100或VK-4150安装到钢构件上需要以下工具和附件:

- 电动磨床或打磨机、锉、钢刷、砂纸。
- 安装用试验片。
- 点焊机和手控焊把。
- 氰基丙烯酸粘合剂。
- 防水复合膏, 如道氏粒状RTV-3145。
- 线圈盒和不锈钢固定片 (VK-4100)。
- 用于固定应变计电缆的固定片 (VK-4150)。
- 电缆扎线及胶带 (数量根据需要)。

注意按照下列步骤进行:

- 1) **安装基面准备** - 钢件表面应平整和清洁、无锈、无油渍及无腐蚀。用适当的清洁剂擦拭除油, 然后用电动磨床或打磨机、锉、钢刷或砂纸以获得一平整、光滑的安装基面。
- 2) **点焊试验片** - 在点焊应变计之前应进行点焊机的测试, 以保证其功能正常, 并且所采用焊接能量适度。从一定程度上来说, 焊接能量即接触压力决定焊接的质量。对VK-4100或VK-4150应变计来说, 大约20~40瓦特/秒焊接能量比较合适, 采用随应变计所提供的试验片进行一系列的试验, 以确定适当的焊接能量, 然后完成如下图所示的剥离试验。

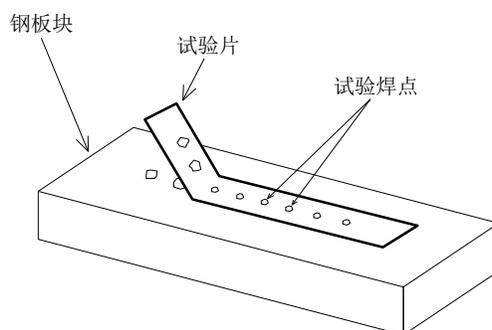


图5 - 剥离试验

当采用的焊接能量适当时，用钳子将试验片从钢表面揭下后，在焊点处会出现一系列的小孔。如果采用的焊接能量不足，试验片可以很松的拉开，揭下后在安装基面上不会有小孔。如果焊接能量过大，试验片会变色、熔化并可能从焊点喷溅出来。

放电打火通常表明试验片和安装基面之间不洁净，也可能表明能量不足，此时需要调整手控焊把的力度。

如点焊区域出现过大的变形，则需减小手控焊把所施加的力度或降低焊接能量。

- 3) **点焊应变计** - 按照如图6所示的焊接方式和顺序点焊应变计的一端，如果是点焊VK-4150，应先从电缆引出线的一端开始，小心移开导线使其不阻碍焊接。开始点应从安装基片上后面一行标记点的中间开始，沿离开后面一行的方向完成焊接。当基片上所有的点均焊完后，再按同样顺序点焊另一端。焊接时应轻压并保持外观上应一致，不得产生移位，要保持焊把尖端清洁，不要留有焊渣。要定时地用400号粗砂纸上轻轻磨一下，要保持尖端表面平滑，适当的清理可使得尖端不致于在点焊中与应变计基片粘接。

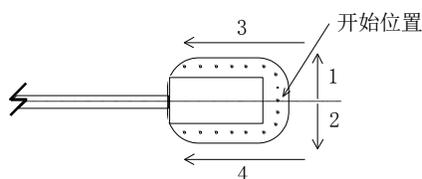


图6 - 点焊顺序

注意：当应变计用在曲面上时，建议在安装片边缘加焊第二行焊点(在周围或标记点之间)，在平面上这也是一个好的方法。

当应变计两端点焊完后，用一个小改锥，轻轻敲打两端。注意只需敲打凸缘上的点（见下图）。

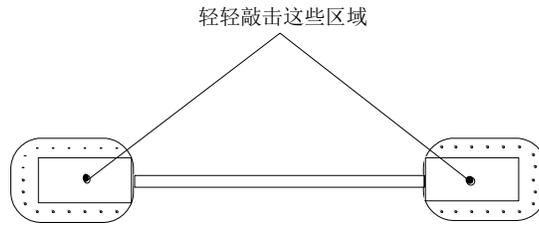


图7-敲击点

在两端块上敲打四、五次后，再进行仪器读数，继续敲打直至读数稳定为止。

- 4) **应变计保护** - 安装完应变计之后，必须防止焊点氧化腐蚀，应变计本身不会被腐蚀，因它是不锈钢制成的，但结构件的基材本身可能被腐蚀，尤其在焊点。除非用防水复合剂进行保护，保护的具体步骤如下：
 - a) 在基片边缘小心滴几滴粘合剂，粘合剂就会渗入凸缘和基片之间的空隙，这样就形成“第一道防线”。
 - b) 在基片区涂一层防水复合剂，为保护基片焊点，因此要小心涂满基片，尤其要注意在应变计保护管下的基片的焊点。
- 5) **安装振荡线圈盒**（仅VK-4100）- 在防水层凝固之前，有必要把振荡线圈盒安在应变计上，不要使用过多的防水复合剂。不要让防水复合剂进入应变计保护管，以不阻碍其相对于两端钢端块的自由变形为准。

如果要想激励线圈盒可调节、移动，需要将过多的防水复合剂除开，以便安装时使激励线圈盒安放在合适位置。

如果线圈盒要长期固定到某一地点，需把它安到应变针上，观察半透明的线圈盒，直至你能看清应变计为止。然后应用点焊机去焊接固定片，使线圈盒固定到结构上。理所当然，焊接固定片的结构区域仍需按前面所提的要求保护安装基面，即干燥、平滑等。另外，固定片仍需按前面所提的要求予以保护使其免受腐蚀。

- 6) **固定应变计电缆**（仅VK-4150）- 可使用配备的固定片，将电缆导线接头牢牢点焊到钢块上，并在导线上留出一些空隙。在导线接头后约1英寸（25毫米）处，

再用另一个固定片将电缆点焊到钢块上，对于VK-4100或VK-4150，用电缆扎线或胶带将应变计电缆固定到结构上。

- 7) **检查应变计读数**—连接便携式读数仪（第3节），检查应变计读数是否在所期望的范围内。如果应变计无读数，可查看故障排除章节内的说明。

2.4. 环氧粘接方式安装应变计

设置应变针弦松紧请查阅2.2章节。由环氧粘接方式将VK-4100或VK-4150安装到钢构件上需要以下工具和附件：

- 电动磨床或打磨机、锉、钢刷、砂纸。
- 快速调好两种粘合剂，如RexiteP-50环氧或Loctite 410及促凝剂。
- 应变计设置调节架。
- 氰基丙烯酸胶合剂。
- 防水复合膏，如道氏粒状RTV-3145。
- 电缆扎线及胶带（数量根据需要）。

按照如下规程操作：

- 1) **安装基面准备**—按照点焊章节中的说明操作。
- 2) **环氧粘接应变计**—将应变计放入设置固定片槽缝内。将环氧涂抹在应变计安装基片上，在放置安装片的大致位置将活化剂涂到钢结构粘接基面上。然后将应变计压紧，持续30秒种或直到环氧凝固。
- 3) **应变计保护**—在安装片区域涂一层防水胶合剂。
- 4) **安装激励线圈盒**（仅VK-4100）—在防水层凝固之前，有必要把激励线圈盒安在应变计上，不要过多使用防水复合剂。不要让防水复合剂进入应变针保护管，以便不阻碍其相对于两端钢板的自由变形。

如果要想激励线圈盒可调节、移动，需要将过多的防水复合剂排开，以便安装时使激励线圈盒安放在合适位置。

如果线圈盒要长期固定到某一地点，需把它安到应变计上，观察一下半透明的线圈盒，直至你能看清应变计为止。然后应用点焊机去焊接固定片，使线圈盒固定到结构上。理所当然，焊接固定片的结构区域仍需按前面所提的要求保护安装基面，即干燥、平滑等。另外，接片仍需按前面所提的要求予以保护使其免受腐蚀。

- 5) **固定应变计电缆**（仅VK-4150）—可使用配备的固定片，将电缆导线接头牢牢点焊到钢块上，并在导线上留出一些空隙。在导线接头后约1英寸（25毫米）处，再

用另一个固定片将电缆点焊到钢块上，对于VK-4100或VK-4150，用电缆扎线或胶带将应变计电缆固定到结构上。

6) **检查应变计读数**—连接便携式读数仪（第3章节），检查应变计读数是否在所期望的范围内。如果应变计无读数，可查看故障排除章节内的说明。

2.5. 应变计及电缆线保护

应变计和接头应予以保护，使其免受机械损伤和浸水，其典型保护系统见图8。

应变计由角钢或槽钢做成的盖板保护，盖板扣在应变计顶部，双头螺栓可用自动焊机直接焊到盖板表面，或用六角螺栓弧焊连接。在后一种情况，厂家可提供特制盖板夹具用以准确定位。盖板套在双头螺栓或螺栓里，拧紧螺母将其固定在适当位置。双头螺栓与应变计距离要远于6英寸，当拧紧螺母时不应用力过大，以免损害下面的钢构件表面并造成不准确读数。焊接时避免靠近应变计，否则会使金属板产生大的变形。典型的盖板构造见图8。

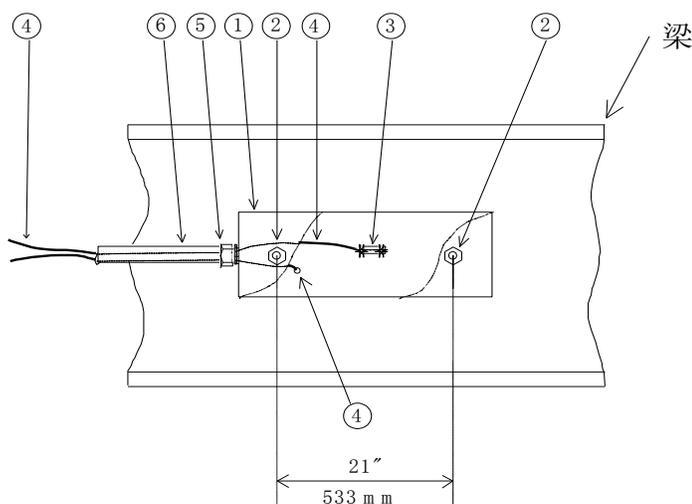


图8 — 典型安装

图8零件表

	说明	生产厂家	零件号
	VK-4100应变计	Geokon	4100-2

1	盖板(L×W×H) 21×4×2", 533×100×50	Geokon	4100-7
2	螺栓1/2-13×3"		
3	应变计激励线圈	Geokon	4100-3
4	应变计电缆, 四芯屏蔽, PVC外壳	Geokon	2-187V3
5	管道接头	T&B	5231
6	弯管	Seal Tite	3/8"

如果没有弧焊机, 上述保护将无法操作。4100线圈盒所提供的保护在多数情况下均可胜任, 4150有一金属盖在多数情况下也能胜任。

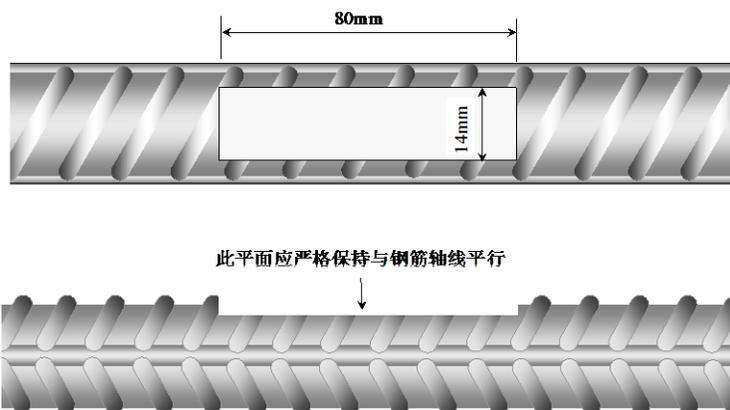
2.6. 应变计用做钢筋应力计 (仅供参考)

VK4100/4150振弦式点焊型应变计具有体积小、灵敏度高、性能优良、经济适用的特点, 它除可安装于大中型金属或混凝土构件上外, 更可直接安装于小型圆柱构件上, 工程上亦多用于锚杆、钢筋的应力监测, 特别是某些工程设计要求在不破坏原有钢筋整体长度、又要达到监测钢筋应力的时候尤为适用。

在钢筋上安装VK4100/4150应变计的步骤如下:

2.6.1. 加工安装基面

VK4100/4150应变计在钢筋 (圆钢、螺纹钢均适用) 上安装的前提是须事先在钢筋上铣出一个安装平面, 安装平面的尺寸如下图所示:



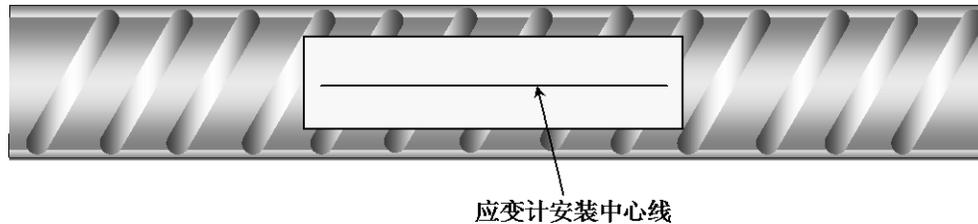
需要说明的是, 铣出的平面应平整, 严格与钢筋的轴线保持平行, 否则在安装应变计后振弦与钢筋轴线因不平行将造成测值失真或传感器失灵。

如果现场没有车铣设备，可以使用角磨机用手工打磨也可达到同样效果。

安装平面铣出后，应使用电动磨床或打磨机、锉、钢刷或砂纸以获得平整、光滑的基面。

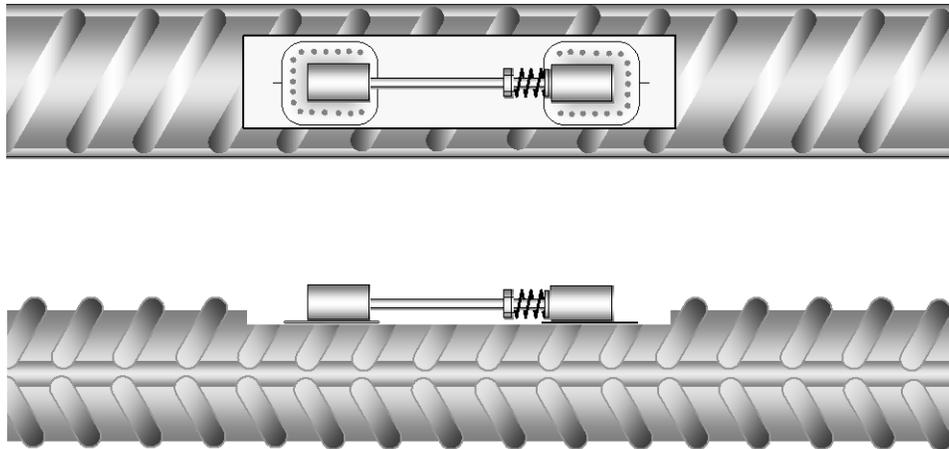
2.6.2. 划线

在已加工好的基面上应采用金属划线工具划线，划线的目的主要是在安装应变计时保持应变计与钢筋的轴线平行。划线的工具可以是坚硬的金属，也可以是较细的记号笔。见图2。



2.6.3. 安装应变计

将应变计按安装中心线的位置放置在钢筋的安装平面上,应注意应变计的中心线与划好的安装中心线保持一致。



2.6.4. 焊接

焊接前应将应变计调节到期望的初始读数位置，这主要取决于结构要达到什么样的监测效果，如受拉或受压。通常在监测混凝土中的钢筋受拉情况时，可调节至 $1775 \mu \epsilon$

左右，以预留30%的压缩量。

用手指压紧待焊应变针一端的端块，注意不能压在中间钢弦保护管的部位，以避免损坏传感器。将点焊机接通电源，按照上述说明的焊接顺序进行焊接。最佳焊接能量为35焦耳·秒，焊接时注意要压紧焊把，使焊接时的接触电阻最小。如果没有压紧，则可能出现打火飞溅的现象，严重者出现熔孔或虚焊等情况。在没有熟练掌握焊接技巧前，可采用试验片进行练习。

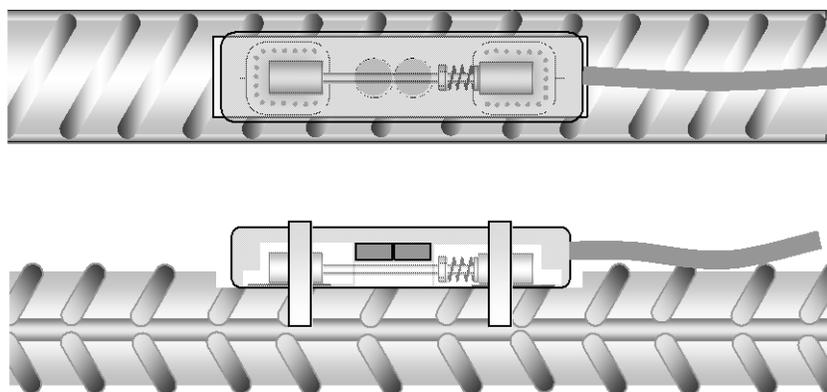
焊接过程中应使用读数仪检查读数是否偏离预期值过大或过小，否则应敲击应变计两端的端块进行调节。

2.6.5. 安装线圈盒组件

VK4100应变计线圈与温度计为一组件。将应变针焊接完成并仔细检查没有问题后，即可将线圈盒组件罩在应变针上，此步骤并不是随意的，往往需要仔细调节。

正确的线圈组件安装位置是保持线圈盒罩在应变针上后，其两端及两侧保持与应变针对称。同时接上读数仪，慢慢前后左右移动线圈，使读数仪上显示的读数最小，此时即为最佳位置，然后将线圈盒与钢筋结合面上用502一类的快干胶固定。

最后用随传感器部件附带的不锈钢固定片将线圈盒用点焊机固定在钢筋上。



2.6.6. 钢筋计保护

为防止施工造成的损坏，安装好的钢筋计在埋设前通常要采取必要的保护措施。保护的措施很多，比如在传感器部位用橡皮泥进行包裹后，用宽的双面泡沫胶带甚至是普

通的宽胶带进行直接缠绕。亦可用PVC管或其它薄壁的金属管、或用环氧树脂等材料进行保护。

2.7. 电缆及其连接

电缆应做以严格限制,以免由于拉电缆,线圈盒(VK-4100)被扯开或导线(VK-4150)被拉出的危险。在电缆头上,应用不锈钢条(随仪器提供)标识电缆,并焊接到位。捆扎线,带子或接线也可用于固定仪计电缆。

应对电缆予以保护,使其免受由于移动设备或飞石带来的意外破坏。最好的方法是将电缆穿入软管内,并将软管尽量放在安全的地方。软管可以通过软管接头与盖板和读数仪附件相连(见图8)。读数仪附件中有一密封盖,可以移开它来读仪器读数。用此方法,电缆头端或插头端应保持清洁和干燥。如果有多支应变计从同一终端箱读数,则需一个专门的接线板。接线板上有接头或接线柱,便于各种仪器与读数仪相连。

电缆可拼接加长而不影响应变计读数。始终保持接头完全防水,最好使用一个环氧拼接装置,如3M Scotchcast™、82-A1型,这些装置可从厂方购到。

2.8. 电气干扰

在进行仪器电缆安装操作中,应当心尽可能使其远离电干扰源如:动力线,发电机,电动机,变压器,弧焊机等等。电缆线绝不允许与交流电缆一同埋设或敷设,否则仪器电缆将从电力电缆中拾起50或60Hz或其他频率)噪音,这给获得稳定读数带来一定麻烦。用于VK-4100和VK-4150应变计的屏蔽和过滤器选择件可与厂方联系订购。

2.9. 雷电防护

VK-4100与VK-4150振弦式应变计,不象基康其他多数产品在仪器内部设有雷电防护器件,如:等离子浪涌电压放电器。

这里提供几条建议:

如果应变计与终端箱或多路集线箱与等离子浪涌电压放电器(避雷器)相连,应

将避雷器置入终端箱或多路集线箱内得到瞬间防护。终端箱和多路集线箱可从基康公司订购，该设备已经留出安装这些元件的位置。

避雷板和外壳可从基康公司购得，并可安装在监测结构仪器电缆出口处。外壳有一可拆卸的盖，因此当避雷板 (LAB-3) 损伤时，用户可维修或更换此元件。外壳接地端子与地面相连，便于瞬间电流从仪器导入大地。见图9。有关详细信息或想更换雷电防护设计请向厂方咨询。

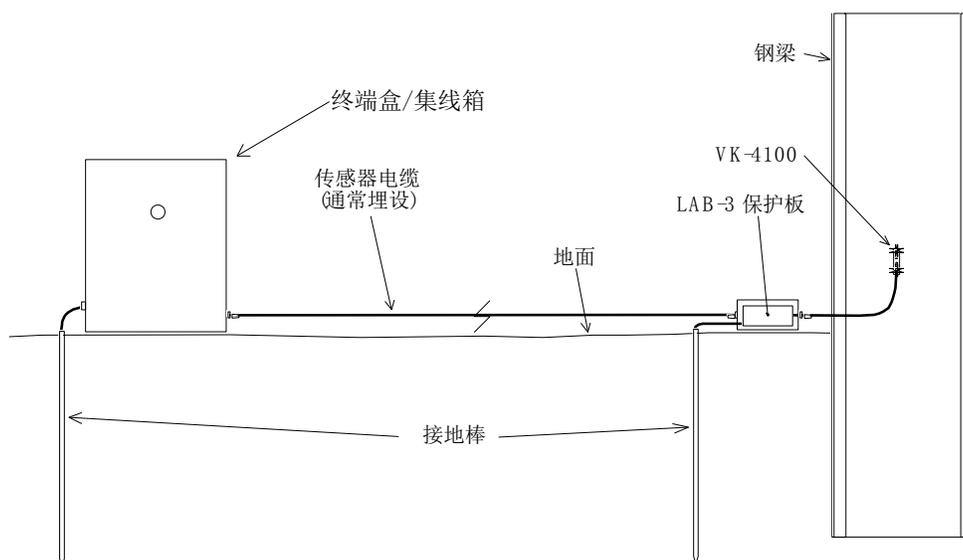


图9—雷电防护设计图

等离子浪涌电压放电器能够靠近传感器并装入仪器电缆。用编铁连接放电器与地面，或用接地棒或不锈钢结构自身。

3. 读取数据

下面三节叙述如何用基康提供的三种读数仪中的任一种进行读数。

型号:	VK-4100	VK-4150
读数位置:	E	E
显示单位:	微应变 ($\mu \epsilon$)	微应变 ($\mu \epsilon$)
频率范围:	1400-3500Hz	1400-3500Hz
中值读数:	2500	2500

最小读数:	1000	1000
最大读数:	4000	4000

表2-应变计读数位置

注意:对VK-4150进行读数时,由于线圈热效应读数会持续有少许变化,故在开始几秒钟内记录读数比较好。

3.1. GK-401读数仪操作

GK-401是所有振弦仪器的基本读数仪。

用读数仪所带的连接线与读数仪连接,或在有终端箱(集线箱)的测站用一连接插头连接。红、黑色线夹用于连接振弦传感器,绿色或蓝色线夹用于连接屏蔽线,GK-401不能测读半导体温度计(见3.4章节)。

- 1) 将显示选择键旋到“E”档。
- 2) 打开仪器,读数将显示在面板显示窗,当读数时,最后一位数可能会变化一到二个数,记录所显示数值。如果显示出零或读数不稳定见第5节故障排除建议。
- 3) 在大约4分钟后,读数仪会自动关闭以节省能源。

3.2. GK-402读数仪操作

GK-402有储存仪器读数和测量半导体温度计阻值的附加功能。

用读数仪所带的连接线与读数仪连接,或在有终端箱(集线箱)的测站用一连接插头连接。红色和黑色线夹用于连接振弦传感器,白色或绿色线夹用于连接半导体温度计,电缆屏蔽线可以连接到黑色线夹。

- 1) 打开读数仪,按任意键进入主菜单。
- 2) 按“1”进入读数屏幕,如果选择了正确(从读数屏上按“2”,“4”为VK-4100/4150),按“1”储存所显示数字。
- 3) 通过选择正确的范围代码读取半导体温度计(在读数屏上选“2”为范围,然后选“6”为半导体温度计)。在表C-1中查找所测电阻对应的温度,用公式C-1温度也能计算温度。

3.3. GK-403读数仪操作

GK-403能存储仪器读数可应用率定系数将读数转化为工程单位，有关读数仪“G”档的更多信息，请查找GK-403使用手册。GK-403能直接以摄氏度读出温度计温度。

用读数仪所带的连接线与读数仪连接，或在有终端箱（集线箱）的测站用一连接插头连接。红、黑色线夹用于连接振弦传感器，白、绿色线夹用于连接半导体温度计，兰色线夹连接电缆屏蔽线。

- 1) 将显示选择键旋到“E”档位置。
- 2) 打开仪器，读数将显示在前板显示窗口，当读数时，最后一位数可能会变化一到二个数，按“储存”键记录所显示数值。如果没有读数显示或读数不稳定，查看第5节故障排除建议。读数仪能读出温度计温度，并且输出值单位直接为摄氏度。
- 3) 约2分钟后，仪器将自动关闭节省能源。

3.4. 温度测量

所有振弦式应变计都装有一个读取温度的半导体温度计，半导体温度计随温度的变化给出不同的阻值，通常白色和绿色导线与内部半导体温度计连接。

- 1) 把一欧姆表与应变计中的半导体温度计两根导线相连。（由于电阻随温度变化非常大，电缆电阻的影响通常微不足道。）
- 2) 在表C-1中查找所测电阻对应的温度，用公式C-1温度也能计算出来。

注意：GK-403读数仪将自动读取半导体温度计并以摄氏度为单位显示温度。

3.5. 初始读数

所有读数都要参照一个初始读数，因此细心应采集一个初始读数。最好将应变计安装在尚处空载状态的钢板上例如在部件装入结构之前。这样，初始读数与零压力相对应，否则初始读数会与未知的压力水平相一致。

4. 数据说明

将VK-4150或VK-4150读数转化为微应变，自动由基康生产的GK-401，GK-402或

GK-403完成。理论计算可用下面的公式进行转换：

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

公式 1-微应变换算

这里：f—应变计钢弦谐振频率（Hz）

当用VW-403观测时，显示的读数F为 $f^2 \times 10^{-3}$ ，当要换算为微应变时，则有：

$$\mu \varepsilon = F \times 0.391$$

4.1. 将读数转化为应变变化量

初始读数(R)与随后读数间的变化可以通过从随后应变中减去初始应变计算得到。注意压缩应变引起读数减少（ $R_1 - R_0$ 的差为负数），而拉伸应变引起读数增加（ $R_1 - R_0$ 的差为正数）。

$$\mu \varepsilon_{\text{当前}} = (R_1 - R_0) B$$

公式2 — 当前应变计算

4.2. 应变分辨率

当在使用GK-401读数仪“D”档时，应变计整个读数范围的应变分辨率始终为1微英寸/英寸（即微应变）。在“A”档读应变计可得到更大的分辨率，在应变范围最上端（10000周期）分辨率为0.8微应变，而在最低端（20000周期）分辨率为0.1，在中间分辨率为0.3微应变。

当在使用GK-403读数仪“E”档，应变计整个量程分辨率为 $\pm 0.1 \mu \varepsilon$ 。

4.3. 应变转化为应力

尽管应变计测量的是应变或结构的变形，但设计者更倾向于测量结构荷载或应力，这就要求将所测应变转化为应力。

应变的变化可以通过不同时间采集的应变计读数与零时间采集的初始读数的比较计算出来。这一初始读数最好是在结构板无应力时采集，例如钢件在钢铁厂或仓库时就可安装应变计。

但这并非容易，应变计通常在存在压力的情况下安装的，这样随后的应变变化可能由于一些未知压力而消失。然而，采取技术措施，也就是“盲目钻孔法”，可以测出残余或现存应力。步骤是将应变计盒粘接至表面，然后分析由盒中央钻短盲孔造成的应变的变化。我们知道应变计在钢板制造时就可以装到钢板里面。

有时在建筑被拆除后，还可能测量结构构件内的应变，尤其在临时支撑被监测的时候。如果采集一个读数，则此时空载读数应与初始空载时的读数相一致，任何的不相符都可能是仪器零漂移的显示，尽管不能忽略钢板的永久塑性变形，尤其是测量的应变大到接近屈服点时。

每次读数时应把温度记录下来，还要注意发生的结构活动，此数据可为观测到的读数变化提供一个合理原因。

就钢结构来说，要测表面某一点的应变，如果能保证在钢板上没有弯曲就足够了。但实际上长而窄的钢板因受张拉力会在中间产生弯曲，在别的地方，也常会出现弯曲。当出现弯曲时，就会在这些地方周围出现一个中性轴。

如果要把弯矩的影响也考虑进去，那么在结构板每一个交叉部分则需要不止1支应变计，为了进行完整分析，至少需要3支甚至更多。在柱形桩支撑上，围绕支撑每隔120度设置三支应变计即可（4支更好）。在H形桩或I形梁上，至少需要4支应变计。在钢板桩上，两支应变计需背对背地安装在桩两侧。当钢构件弯曲并且只有前表面可接触到时，如隧道钢板衬砌或钢板桩的外部，可通过在距中性轴不同距离处安装两支振弦式应变计测出弯矩。

参照图10A中I字梁的例子，四支应变计（1、2、3和4）每两支背对背地焊在中央I字梁腹。应变计位于高于I字梁腹中央的高度（d），两组应变计相距（2c），I字梁有两个凸缘，宽为2b，梁腹深为2a。

轴应力通过四支应变计应变读数平均并乘以模量而得出。

$$\sigma_{\text{轴向}} = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4)}{4} \cdot E$$

公式3—轴应力计算

弯矩是通过计算安装在中性轴的相对两支应变计的读数的差计算而得出，yy轴最大弯矩为：

$$\sigma_{yy} = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - (\varepsilon_2 + \varepsilon_4)}{4} \times \frac{b}{d} \times E$$

公式4—yy 轴弯矩

xx轴最大弯矩为：

$$\sigma_{xx} = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (\varepsilon_3 + \varepsilon_4)}{4} \times \frac{a}{c} \times E$$

公式5— xx 轴弯矩

$$\sigma_{\text{最大}} = \sigma_{\text{轴向}} + \sigma_{xx} + \sigma_{yy}$$

公式6 — 最大应变

在以上所有计算中，一定要注意应变正负号。

注意：交叉部分任一点的总应变为弯矩应变和轴应变的代数和。通过观察可知，凸缘外角处的应变要大大高于梁腹处的应变，局部的故障可能从这些点处开始。因此，弯矩的分析显得非常重要。

通过以上分析，我们可以得出，要得到最精确的读数，最好是把应变计焊接于翼缘转角处，如图10B。但把应变计焊于此也有很大缺点，即仪器保护变得困难，电缆易受损伤，而且实际应用中又会引起另一更为严重问题：每一支应变计易受到当地弯力的影响，但只影响一只而不影响其它。因此把应变计成功地焊接在 I 梁腹中性轴的两侧，这很有必要，这就是图10A更为适当的原因。图10A还有另一优势即，梁腹上的应变计容易保护。

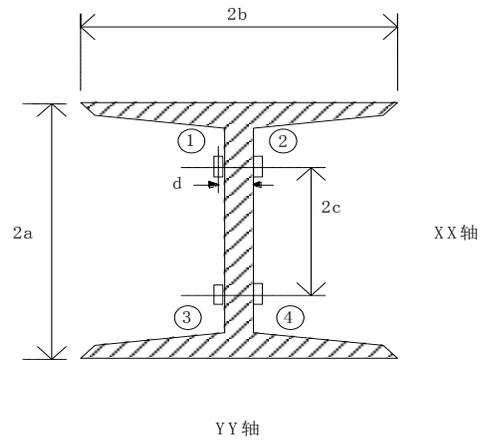


图10A—安装在中央梁腹上的应变计

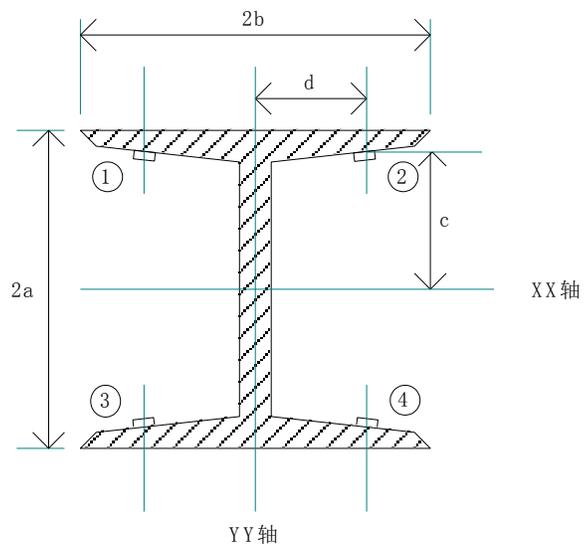


图10B—安装在翼缘上的应变计

图10C图解说明只用2支应变计测量轴应变的另一方法。

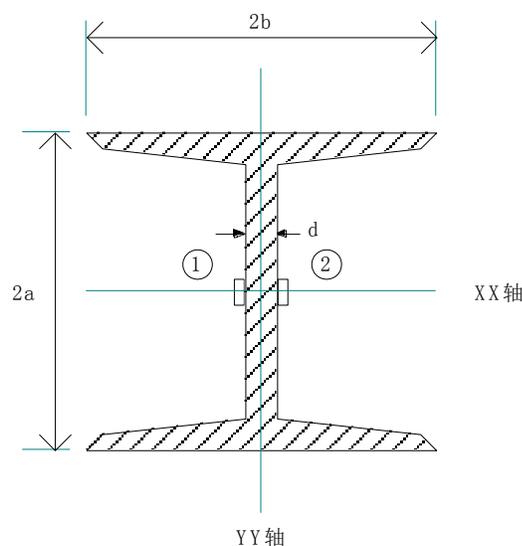


图10 C 一轴应变测量

4. 4. 温度影响

钢弦膨胀的温度系数与安装有应变计的钢结构的系数相同，因此测量应变无需温度校正。然而这只能在钢弦和钢结构处于相同温度时才能实现，当阳光直射到应变计上，应变计温度比钢板要高，导致应变变化明显。因此，要在应变计上加屏蔽以避免阳光直射。另外在读数前，要避免用过大的力攥应变计，或快速采集读数，或在读数前有充足的时间让应变计温度重新稳定。总之，每次在对应变计读数时记录温度总是一个好办法，这样，我们可以估计由温度改变引起的实际应变。为了便于测温，每支应变计都安装有一支温度计，它位于激励线圈附近。可使用欧姆计或GK-403读数仪连接绿、白线来读取温度，如果使用欧姆计，电阻与温度之间的关系见附录C，如果应变计连接在混凝土上参见附录D。

4. 5. 焊接影响

靠近应变计进行弧焊焊接对钢结构会产生非常大的应变。因为，将双头螺杆焊到支撑桩，这样能够在应变计或电缆之上焊接盖板或电缆保护槽、支撑板条或喷射混凝土加强网，均会产生大的应变变化。钢结构焊接前后始终要对应变计进行读数，这样，对明

显的应变变化可提供修正。

4.6. 末端影响

如果要避免末端影响，应变计不应放置在支撑杆末端，因为会受到局部卡紧或栓接变形。对于大多数结构钢件来说，距末端5英尺就足够了。

另外，末端影响又有好的一面，因为它会增加荷载并大到足以可能引起末端损坏，而不是结构钢件中部的损坏。

5. 故障排除

对振弦式钢筋应变计的维修和故障排除局限于定期检查电缆接头，一旦安装好，通常接触不到仪器，维修也受限制。

出现故障可查阅下列问题及可能的解决办法，有关更多的故障排除帮助可向厂方咨询。

症状：应变计读数不稳

- √ 读数仪挡位设置是否正确？如果使用数据记录仪自动记录读数，扫描频率激励设置是否正确？
- √ 应变计读数超出仪器额定范围(压缩或张拉)了吗？应变计可能太松或太紧，检查数据可以发现这一可能。
- √ 附近有电噪声源吗？大多数可能的电噪声源为马达、发动机和天线。将设备移开安装现场或安装滤波器。不管是使用便携式读数仪还是数据记录仪，要应确保屏蔽线接地。
- √ 读数仪在读取另一个应变计吗？如果没有，读数仪有可能电池不足或失效。
- √ 线圈装置与另一应变计相连使用吗？如果没有，线圈装置可能出现故障。

症状：应变计不能读数

- √ 电缆被切断或被压破了吗？这可以用欧姆表来检测。对于VK-4100，通常仪器芯线（通常红线和黑线）之间的电阻为 $180\ \Omega$ ， $\pm 10\ \Omega$ ；对于VK-4150为 $50\ \Omega \pm 10\ \Omega$ ，记住当检测时应加上电缆电阻（22AWG双绞铜线大约为 $14.7\ \Omega/1000$ 英尺或 $48.5\ \Omega/\text{km}$ ，双向乘以2）。如果电阻无穷大或非常大（兆欧），应怀疑电缆断路。如果电阻很低（VK-4100 $<100\ \Omega$ ，VK-4150 $<25\ \Omega$ ），电缆有可能短路。维修断路或短路的电缆，厂方可提供拼接套件和说明。有关更详细情况可向厂方咨询。

- √ 读数仪或数据记录仪与另一应变计相连了吗？如果没有，读数仪或数据采集仪有可能失灵。

- √ 线圈装置与另一应变计相连使用吗？如果没有，线圈装置可能出现故障。

附录A—技术指标

A. 1. 应变计

型号:	4100	4150	4150-5
标准量程:	3000 $\mu\epsilon$		10,000 $\mu\epsilon$
分辨率:	0.4 $\mu\epsilon$ ¹		1.3 $\mu\epsilon$
校准精度	0.1%F.S.		0.1%F.S.
系统精度:	2.0% F.S. ²		2.0% FS3
稳定性:	0.1%F.S./yr		0.1%F.S./yr
线性度:	$\pm 2.0\%$ F.S.		$\pm 7.5\%$ F.S.
温度系数:	12.2 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$		请参阅附录
频率量程:	1400~3500 Hz		1400~3500 Hz
应变计尺寸: (长×直径)	2.250 x 0.250" 57.2 x 6.4 mm		2.250 x 0.250" 57.2 x 6.4 mm
线圈尺寸: (L x W x H)	3.000 x 0.875 x 0.500" 76.2 x 22.2 x 12.7 mm	0.750 x 0.250" (直径) 19.1 x 6.4 mm (直径)	0.750 x 0.250" (直径) 19.1 x 6.4 mm (直径)
线圈电阻:	180 Ω	50 Ω	50 Ω
温度范围:	-20~+80 $^\circ\text{C}$		-20~+80 $^\circ\text{C}$

注意:

¹ 随读数仪而定，以上数据适用于GK-403读数仪。

² 通过单个率定精度可达到1.0%FSR

A. 2. 半导体温度计（参照附录C）

范围：-80至+150 $^\circ\text{C}$

精确度： $\pm 0.5^\circ\text{C}$

附录B—工作原理

安装在变形体表面的钢弦也会以同样方式变形，变形改变弦的应力，因此也改变它的自然谐振频率（共振）。频率（周期）与变形（应变）之间的关系如下：

- 1) 振弦的固有频率（共振频率）与应力，长度和质量有关，公式如下：

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

这里：

L_w 为弦的长度，单位英寸。

F 为弦的应力，单位为磅。

m 为每单位长度弦的质量（磅， $\text{sec.}^2/\text{in.}^2$ ）。

- 2) 注意：

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

这里：

W 为 L_w 英寸长的弦重量（磅）

g 为重力加速度（ $386 \text{ in.}/\text{sec.}^2$ ）

- 3) 并且

$$W = \rho a L_w$$

这里：

ρ 为弦密度（ $0.283 \text{ lb.}/\text{in.}^3$ ）

a 为弦横截面积（ in.^2 ）

- 4) 合并公式1, 2和3, 得出：

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

- 5) 注意应力(F)可用应变表示，如：

$$F = \epsilon_w E a$$

这里：

ϵ_w 为弦应变（ $\text{in.}/\text{in.}$ ）

E为弦的杨氏模数 ($30 \times 10^6 \text{Psi}$)

6) 合并公式4和5, 得出:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{\epsilon_w E g}{\rho}}$$

7) 用所给数值代替 E, g和 ρ , 得出:

$$f = \frac{101142}{L_w} \sqrt{\epsilon_w}$$

8) 在显示振动周期T的“A”档上, 乘以系数 10^6

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

9) 合并公式7和8, 得出:

$$\epsilon_w = \frac{97.75 L_w^2}{T^2}$$

10) 公式9现在必须用安装有应变计的钢件表面的应变来计算。因为钢件的形变必须与弦的形变一致:

$$\epsilon_w L_w = \epsilon L_g$$

这里;

ϵ 为钢件中的应变

L_g 为应变计长度 (英寸)

11) 合并公式9和10, 得出:

$$\epsilon = \frac{97.75}{T^2} \cdot \frac{L_w^3}{L_g}$$

这里; (针对VK-4100或VK-4150)

L_w 为2.000英寸

L_g 为2.250英寸

12) 因此:

$$\epsilon = 0.391 \times 10^3 \left[\frac{1}{T^2} \right]$$

13) GK-401/403读数仪“E”档上的显示读数基于下面的公式:

$$\varepsilon = 0.391 \times 10^9 \left[\frac{1}{T^2} \right]$$

平方、转换和乘以系数 0.391×10^9 在微信息处理器内都已完成，因此，显示读数单位为 ε 。

附录C—半导体温度计温度推导公式

半导体温度计类型：YSI 44005,Dale # 1C3001-B3,Alpha # 13A3001-B3

电阻转化为温度的公式：

$$T = \frac{1}{A + B(\ln R) + C(\ln R)^3} - 273.2$$

公式 C-1 半导体温度计阻值-温度换算关系

这里：
 T=摄氏温度
 LnR =阻值的自然对数
 A=1.4051×10⁻³(在-50至+150℃范围内计算有效)
 B=2.369×10⁻⁴
 C=1.019×10⁻⁷

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

表 C-1 半导体温度计阻值-温度对应表

附录D—在混凝土中使用时的温度修正

振弦所用钢材的温度膨胀系数为 $12.2 \mu \varepsilon / ^\circ\text{C}$ ，因此，由于应变计中温度影响，混凝土总应变修正值用下面公式可计算出：

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

公式D-1由于应变计温度影响的总混凝土应变修正值

上面公式中 $\mu \varepsilon$ 全部包括混凝土中温度引起的应变和应力变化引起的应变，在自由区混凝土温度应变由下面公式给出：

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

公式D-2混凝土温度应变

在公式D-2中 CF_2 代表混凝土膨胀系数，除非这个数值已知，假定额定值为 $10.4 \mu \varepsilon / ^\circ\text{C}$ 。

因此，计算混凝土中应力变化引起的应变：

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

公式D-3应力变化引起的应变计算

注意下列实例：

$$R_0 = 3000 \text{微应变}, T_0 = 20^\circ\text{C}$$

$$R_1 = 2900 \text{微应变}, T_1 = 30^\circ\text{C}$$

1. $\mu \varepsilon_{\text{当前}} = (2900 - 3000) = -100$ (压缩)
2. $\mu \varepsilon_{\text{当前}} = (2900 - 3000) + (30 - 20) \times 12.2 = +22$ (张拉)
3. $\mu \varepsilon_{\text{当前}} = (30 - 20) \times 10.4 = +104$ (压缩)
4. $\mu \varepsilon_{\text{当前}} = (2900 - 3000) + (30 - 20) \times (12.2 - 10.4) = -82$ (压缩)

注意：由于混凝土温度系数已作假定，这些公式只作为总的指导。同样，如果系数已知，可不考虑温度而计算总应变（假定没有蠕变）。