

应变式称重传感器的设计与计算

[美国]理查德·富兰克林

此篇文章的形成是基于对称重传感器设计者能有所帮助。它深入分析推导出一些公式，这些公式能够计算出位于称重传感器上的某些尺寸大小，并提供所需要的输出。此篇文章还介绍了各种误差来源及设计建议。

粘贴式电阻应变计广泛应用于当今高精度测力与称重传感器的制造中。本篇文章为帮助称重传感器设计者计算出称重传感器尺寸大小，从而为获得唯一需要的输出作了充分的准备。设计者既可以运用有限元分析法经计算机程序（如果可能）来确定称重传感器所需要的尺寸，或运用本文所提供的公式来计算此尺寸。应力公式选自一部非常好的书——应力与应变公式（见参考文献[1]）。除了公式汇编，本文还讨论了误差的可能来源及设计建议，有关误差来源的信息主要是基于作者的实验。文中所描述的相关称重传感器没有作专利调查，在考虑把所讨论的设计用于产品的生产或推向市场前，有必要作一下调查。

通过某些假设得出的这些计算公式，另外还有电阻应变计的特性、应力形式、材料特征以及机械加工的偏差都会导致计算结果的一定误差。在批量制造称重传感器前，应制造几个样机进行组装、测试和标定。

在某些工业中，如航天工业也许只需要一次性的称重传感器，为决定其非线性、重复性和滞后等误差，在使用前对其进行标定是十分重要的。当计算机被应用于数据处理时，非线性、零点漂移及灵敏度变化，是很容易修正的。如果称重传感器在使用时要经历强烈的温度变化和外部附加载荷的影响，我们应进行试验并测量出这些影响量所造成的误差。如果某部分结构（如接头、销子、压杆）用来测量或是被用作称重传感器时，标定和测试就尤为重要了。

称重传感器设计包括许多方面，这里对其制造生产不予讨论，例如，需要对电阻应变计安装技术知识的全面了解，一些电阻应变计制造商提供技术资料的同时，还应提供电阻应变计安装的分类等。

有关称重传感器设计的附加内容见参考文献[2]（a）和[2]（b）。这份小册子及计算机程序比较完整，可以从制造商那里获得。

在过去十年中，计算机技术的发展改变了称重传感器的设计、制造与记录方式，例如在电阻应变计被安装后，所有的称重传感器都有一个原始的不平衡（当没有载荷作用时，也有输出信号存在）。通常零点调整电阻被应用于商业称重传感器，以便消除这种不平衡。运用计算机程序，零点不平衡

数据很容易被除掉。除了零点调整电阻外，在精密的商业称重传感器中安装了许多电阻，便于补偿诸如零点和灵敏度温度影响。如果在记录数据的同时，称重传感器的温度也进行了测量，并且当这个称重传感器被标定时，温度造成的误差已被测定，那么就应该运用计算机程序修正最终数据。商业称重传感器制造商不为计算机提供用于修正原始不平衡或温度影响的数据，因为他们不想局限市场。商业称重传感器不安装零点平衡及温度补偿电阻会节省大量资金，尤其是需求量很大时效果更明显。

符号定义

a—结构系数。

A—横截面面积。

A' —中性轴上横截面面积。

A₁—中性轴上翼缘面积。

A₂—中性轴上腹板面积。

b—应变梁翼缘或矩形截面的宽度。

c—从中性轴到应变梁或翼缘上表面的距离。

d—从中性轴到翼缘下表面的距离。

e—拉伸或压缩应变。

e₁、e₂、e₃、e₄—应变计 1、2、3、4 的应变值。

|e₁|—应变计 1 应变的绝对值。

e_s—应变梁表面应变。

e_t—电桥的总有效应变。

E_i—电桥的激励电压。

E₀—电桥的输出电压。

E_m—弹性模量。

f—翼缘厚度。

G_r—应变计灵敏系数。

h—应变梁厚度。

J—横截面的惯性矩。

l—从应变梁中心到应变计中心线的距离。

L—应变梁上两个应变计中心线之间的距离。

μ—泊松比。

M—应变计中心的弯矩。

N—电桥应变放大系数。

p—分载荷。

P—主载荷。

r—圆柱式弹性体半径。

S—拉伸或压缩应力。

S_a—平均应力。

S_b—弯曲应力。

S_s—剪切应力。

t—中性轴处腹板的厚度。

T—轴的扭矩。

V—剪力。

Z' —从中性轴到 A' 质心的距离。

Z₁—从中性轴到翼缘质心的距离。

Z₂——从中性轴到腹板质心的距离。

称重传感器的输出计算

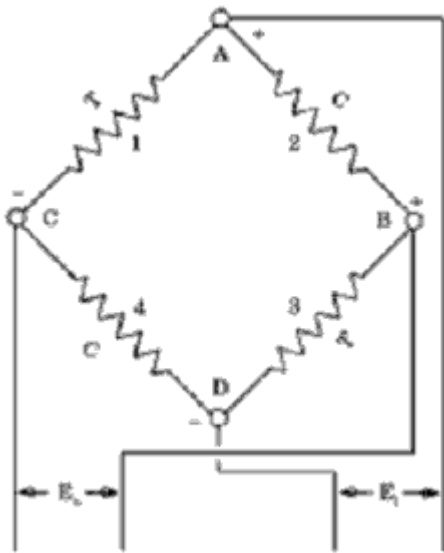


图 1 称重传感器电路简图

图 1 是一个不含温度补偿电阻的称重传感器电路简图。四个电阻应变计呈现在惠斯通电桥的桥臂上。请注意，应变方向相同的两个电阻应变计安装在电桥的相对桥臂上，以保证电桥灵敏度最大。例如，电阻应变计 1 和 3 受拉伸应力，2 和 4 受压缩应力，那么这种安装的结果是当称重传感器承载后，增加了电桥从 B 点到 C 点的最终电压输出。相反，当称重传感器由于温度影响而改变它的电阻时，由于增加或减少相同的量，电桥的最终输出不会变化。这种电桥的构造由于温度产生单一的最小输出值，而使称重传感器产生最大输出值。

如图 1 所示，电桥输出 E_0 与输入 E_i 之比为：

$$\frac{E_0}{E_i} = \frac{G_f e_t}{4} \quad (1)$$

式中： G_f —应变计系数，由应变计制造商提供的非尺寸大小因素。

e_t —电桥上应变计的全部有效应变产生的总的应变输出。

变化公式 (1)，得到总应变：
$$e_t = \frac{4 \times \frac{E_0}{E_i}}{G_f} \quad (2)$$

通过这两个公式，便可以计算称重传感器的输出灵敏度 E_0/E_i ，如果给出了电桥各桥臂的应变值，

就可以计算出总的应变值 e_t 。如果给出了所需要的电桥输出值，要想确定电桥的总应变值 e_t ，我们必须知道每个桥臂的应变值：

$$e_t = e_1 - e_2 + e_3 - e_4$$

式中： e_1 —应变计 1 的单轴应变值（通常是称重传感器上最大最主要的应变）。

e_2 、 e_3 和 e_4 —应变计 2、3 和 4 上的单轴应变值。

上述公式 e_t 中的加号和减号是由其在电桥上的位置而决定的。如果应变计 1 和 3 处于拉伸应力，使得电阻增加（或者相对于C、B处得到一个正的输出），应变计 2 和 4 处于压缩应力，使得电阻减小（或者是得到一个负的输出），则公式为：

$$e_t = e_1 - (-e_2) + e_3 - (-e_4)$$

最后，由于电桥的位置，应变计电阻的变化 e_t 的公式如下：

$$e_t = |e_1| + |e_2| + |e_3| + |e_4|$$

在全部称重传感器设计中，应变计 1、2、3 和 4 上的应变值存在着一个固定的关系 N（电桥应变放大系数），则上式可以写为：

$$N = \frac{|e_t|}{|e_1|} = \frac{|e_1|}{|e_1|} + \frac{|e_2|}{|e_1|} + \frac{|e_3|}{|e_1|} + \frac{|e_4|}{|e_1|} \quad (3)$$

和

$$e_t = N (\pm e_1) \quad (4)$$

用公式（1）代替 e_t ，结果是：

$$\frac{E_0}{E_i} = \frac{G_f N e_1}{4} \quad (5)$$

公式（2）变化为：

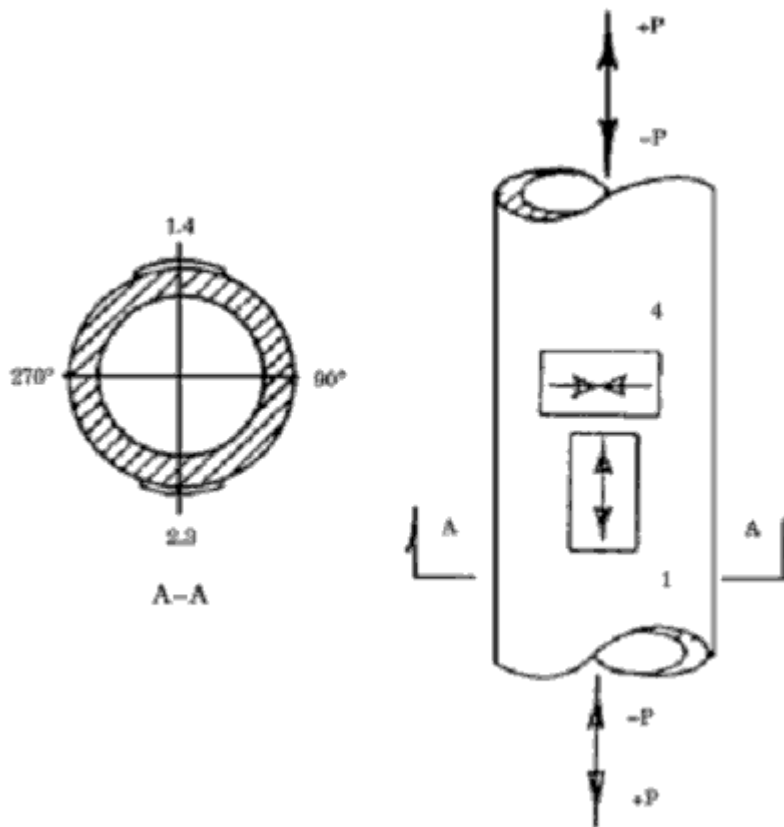
$$e_1 = \frac{4 \times \frac{E_0}{E_i}}{G_f N} \quad (6)$$

有三种应力被应用于称重传感器的设计中，即拉伸与压缩应力，弯曲应力和剪切应力。

利用拉伸与压缩应力的称重传感器

利用拉伸应力与压缩应力的多为商业称重传感器，它是利用单一载荷产生的应力，代替被称物体产生的应力。由于有较小的纵剖面设计，能为所给的受力状态提供较大的输出。

在航空工业中，通常用圆柱形弹性体作称重传感器（处于拉伸应力或压缩应力的圆柱）是比较方便的。最好是将圆柱的两端固定或设计成双球面，若是作不到这一点，就把应变计粘贴在附加弯矩最小区域，那里的横截面存在有规律的变化，并产生最小的弯曲应力。



- 注意：1、应变计 1、4 和 2、3 为单轴结构或 90° 应变花，在圆筒表面相隔 180° 粘贴。
2、在载荷 P 方向，应变计 1、3 受拉伸，应变计 2、4 受压缩。

图 2 电阻应变计位置图

图 2 是圆柱式称重传感器的一个例子，有关计算圆柱应力 S 的传统公式如下：

$$S = \frac{P}{A} \quad (7)$$

式中：P—轴向载荷。

A—圆柱横截面面积（图 2 的 A-A 部分）。

S—拉伸或压缩应力。

既然这是一个单轴向载荷的圆柱，就可应用虎克定律，其应力、应变可用如下公式计算：

$$e_1 = \frac{S}{E_m} \quad (8)$$

$$S = e_1 E_m \quad (9)$$

式中： E_m —弹性模量。

e_1 —1号应变计的轴向应变值。

圆柱式称重传感器电桥的输出应由公式（5）计算。

既然圆柱的尺寸大小是固定的，正如下面例子所给出的：假设一个额定载荷为 $P=2500\text{lb}$ （磅）的钢制弹性体，弹性模量 $E_m=10.6\times 10^6\text{psi}$ （磅/英寸²），圆筒的外径为2.0英寸，内径为1.75英寸。通过计算其横截面面积为 $A=0.736$ 英寸²。

为通过公式（3）和（4）确定 N ， $e_1=e_3$ ， $e_2=e_4=\mu e_1$ ，式中 μ 为泊松比。代入公式（3）和（4），其结果为：

$$N=1+\mu+1+\mu=2(1+\mu)$$

由于钢的 μ 值为0.32，所以 $N=2.64$ 。

利用公式（7）计算应力，即

$$S = \frac{P}{A} = \frac{2500}{0.736} = 3396 \text{ 磅/英寸}^2。$$

通过公式（8）确定应变计1的应变值，即

$$e_1 = \frac{S}{E_m} = \frac{3396}{10.6 \times 10^6} = 320 \times 10^{-6}$$

通常写为 $e_1=320\text{microinches/inch}$ （微英寸/英寸）。

如果应变计灵敏系数（由制造商提供）为2.0，代入公式（5）中，计算结果如下：

$$\frac{E_0}{E_i} = \frac{2.0 \times 2.64 \times 320 \times 10^{-6}}{4} = 0.422 \text{ mv/v}$$

这说明如果给电桥施加 $E_i=10\text{V}$ 激励电压，一个2500磅的载荷施加在称重传感器上时，输出的变化应为 $E_0=4.22\text{mv}$ 。一个典型的商用称重传感器的额定输出为从2.00到3.00mv/v或从20到30mv（施加10v激励电压时），所以0.422mv/v是一个较低的输出。

若要增大这个例子中圆筒式称重传感器的输出，我们可以作很多工作。

（A）为求所需要的横截面面积 A ，假定计算灵敏度为2.0mv/v，就必须选择能形成这一面积的外径。可在圆柱弹性体表面粘贴应变计并使其受载进行验证，直到得出满足要求的直径为止。如果这种方法不行，可以试验下一个方法。

（B）电桥输出电压 E_0 与输入电压 E_i 成正比，输入电压受材料，电桥电阻，应变计尺寸等限制（见参考文献[3]）。假定施加在电桥上的最大推荐电压为10V，要想应用更高的电压，可通过加大电桥电阻的方法，即采用更大电阻的应变计。图2展示的4个应变计，其中两个应变计在 0° 位置上（或粘贴一个 90° 的应变花），另两个应变计在 180° 位置上（或粘贴第2个应变花）。应用8个应变计的电桥，在圆柱表面沿 0° ， 90° ， 180° 和 270° 粘贴 90° 的应变花，电桥各臂电阻会增大一倍。这时输入电压可增大，但是由于推荐应用于电桥的电压与电阻的平方根成比例，所以这只能

增加输出值的 1.41 倍。另外，如果应变计的栅长和栅宽分别由 1/8 英寸增大到 1/4 英寸时，应变计的面积便增加了 4 倍，而输出增加一倍。现在总输出增加了 (1.41×2) 或 2.82 倍，电桥电压会增加到 28.2V，输出由 11.9mv 取代了 4.22mv。

柱式称重传感器的误差来源

一个泊松电桥（两个应变计测量主应变，另两个应变计测量由于泊松比影响而产生的应变）是固有的非线性电桥。对于一个灵敏度为 2.0mv/v 的称重传感器，这种固有的非线性大约为 0.10%。电桥的非线性可以被另一个非线性部分所抵消一些。引起另一个非线性的原因是由于泊松比使得柱式弹性体横截面面积增加或减少。例如，当称重传感器承受压向载荷时，横截面面积增加，使压缩应力减小；当承受拉向载荷时，就是相反的情况。对于一个灵敏度为 2.0mv/v 的称重传感器，由于截面积变化引起的非线性误差大约为 0.05%，所以总的非线性误差为 0.10%~0.05% 或者 0.05%。这是非常小的通常可以忽略不计，但是在称重传感器检测数据中，这是应该被检测的误差。精密的商用称重传感器应利用附加的半导体应变计，此半导体应变计被粘贴在弹性体上，并串联在电桥电路的供桥端来补偿非线性。

注意图 2 圆柱式弹性体上应变计的安排，全部应变计被粘贴在同一个平面上，例如纵向应变计 1 和 3 为 0° 和 180°，横向应变计 2 和 4 为 90° 和 270°，且所有应变计的中心线处于一个横截面的水平线上。圆柱上的应变计如图 2 安排，有两个原因：

(A) 弯曲应力是误差的来源之一，必须使之最小化。理论上，当应变计如图 1 和 2 粘贴连线时（如测量拉伸与压缩应力），弯曲应力被消除。因为并不存在准确完美的贴片，建议采取其它方法使得弯曲应力产生的误差尽可能接近于零。在圆柱上弯曲力矩的方向通常是可以确定的，应变计应粘贴在圆柱弯曲力矩最小处，且在中轴线上（见图 2），那里的弯曲应力理论上为零。

(B) 如果圆柱大且应变计在同一个平面间隔 90° 粘贴，圆柱周围的任何温度变化都会导致信号漂移。所以电桥相邻两臂的应变计应尽量靠近粘贴，从而减少温度误差，这也是利用 90° 应变花的原因之一。

弯曲型称重传感器

设计过程与柱式结构有所不同，概述如下：

(A) 由公式 (3) 和 (4) 确定有效应变 N ，通常是用公式 (4)。

(B) 为提供所需要的输出，由公式 (6) 确定要求的应变。

(C) 通过公式 (9)，由应变算应力。

(D) 根据载荷与尺寸大小建立应力公式。

(E) 为计算所需尺寸大小，用 (C) 中计算出的应力替代 (D) 中产生的应力。

这是为满足所需要的输出，求得称重传感器尺寸大小的最普通方法。另一方面，如果已给出了尺寸大小，而输出 E_0/E_i 是所要求得的，那么应依照前面所介绍的圆柱式称重传感器计算过程，应用公式 (3) 和 (4)，之后是公式 (7) 和 (8)，最后是公式 (5) 得到输出灵敏度 E_0/E_i 。

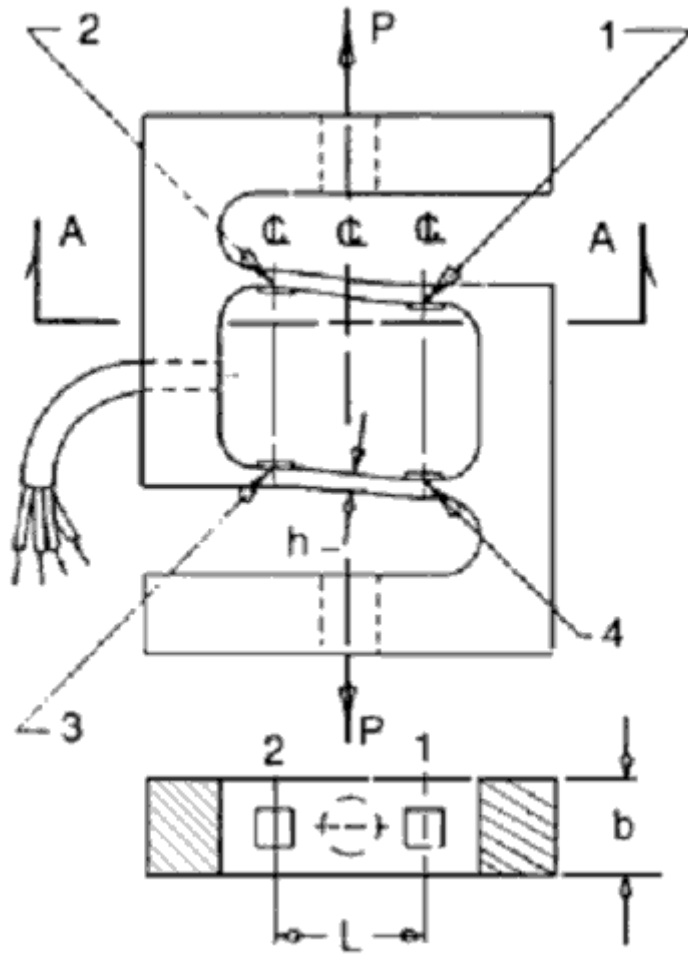


图3 在载荷 P 作用下标准的双梁弯曲型称重传感器

图3是在载荷 P 作用下一个典型的双梁弯曲型称重传感器简图，为了看得清晰，去掉了外壳并加大了偏转度。这种商用称重传感器用于测量较低的载荷，应变计粘贴位置如图3所示。图1所示的电桥电路仍然有效。

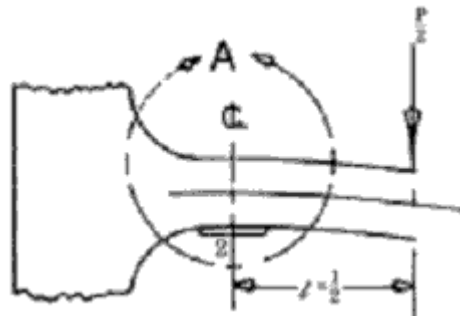


图4 半根弯曲梁显示的2片应变计位置图

图 4 是一个自由体的简图，粘贴有 2 个应变计的半根应变梁。通常梁的大多数尺寸是固定的，厚度 h 根据所需要的输出进行计算。例如假定所需要的输出灵敏度 E_0/E_i 是 3.0mv/v ，首先计算出有效应变值，既然所有的应变计产生相等的应变，由公式 (3) 和 (4) 得出 $N=4$ 。制造商提供的应变计灵敏系数为 2.1，接下来为提供所需要的输出，需要求出的应变 e_1 可以通过公式 (6) 求得，即

$$e_1 = \frac{4 \times \frac{E_0}{E_i}}{G_f N} = \frac{4 \times 0.003}{2.1 \times 4} = 0.001429 \text{ 英寸/英寸}$$

又可写为：

$$e_1 = 1429 \text{ 微英寸/英寸。}$$

弹性体材料为 17—4PH 不锈钢， $E_m = 29.1 \times 10^6$ 磅/英寸²。弯曲应力 S_b 由公式 (6) 计算出应变 e_1 ，代入公式 (9) 得出，即

$$S_b = e_1 E_m = 1429 \times 10^{-6} \times 29.1 \times 10^6 = 41.580 \text{ 磅/英寸}^2。$$

在弯曲梁中求弯曲应力的传统公式如下：

$$S_b = \frac{Mc}{J}$$

式中：M—应变计 2 在中心线上的弯矩。

C—从中性轴到梁表面的距离。

J—应变计所在截面的惯性矩。

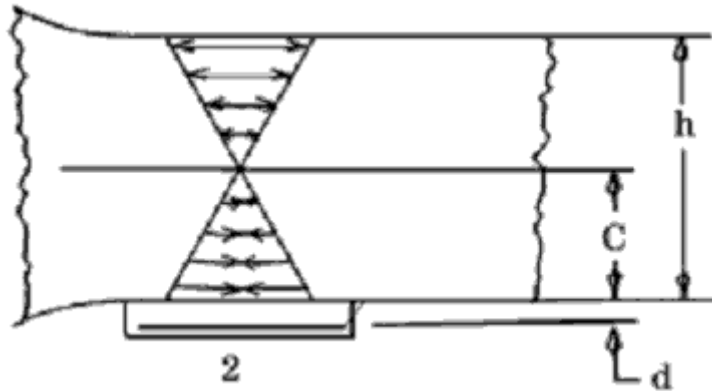


图 5 弯曲梁上应变计到表面距离引起的误差

图 4 和图 5 给出 $p=P/2$ ， $C=h/2$ ， $l=L/2$ ， $M=pl$ ，对于矩形截面 $J=bh^3/12$ ，把这些值代入 $S_b=Mc/J$ 中，得出 $S_b=6pl/bh^2$ ， h 的计算公式为：

$$h = \sqrt{\frac{6pl}{S_b b}} \quad (10)$$

现以用数值表示的实例进行说明，假设截面尺寸与载荷如下：

L—应变计中心线之间的距离，L=1.00 英寸，l=L/2=0.50 英寸。

P—满量程载荷，P=100 磅，p=P/2=50 磅。

b—梁的宽度，b=0.625 英寸。

代入公式（10）得出的结果是：

$$h = \sqrt{\frac{6 \times 50 \times 0.50}{41.580 \times 0.625}} = 0.076 \text{ 英寸}$$

弯曲型称重传感器的误差来源

弯曲型称重传感器的误差来源，其一是由于粘贴在梁上的应变计，所用的应变粘结剂和防护涂料增加了非常薄的应变梁的刚度。因为应变计、应变粘结剂和防护涂料不会完全具有弹性，这一附加刚度就会引起滞后和非线性误差。根据估算如果钢制弹性应变梁贴片处的厚度小于 0.017 英寸（0.43mm），铝制弹性应变梁的厚度小于 0.030 英寸（0.76mm），就会出现小的误差。其二如果不考虑被粘贴的应变计与表面的那段距离（见图 5 中的d），那么当你计算非常薄的梁的厚度时就会出现误差。因为应变计的应变值与其到中性轴的距离成正比，所以梁的表面应变 e_s 比应变计的应变 e_2 小一些。为阐明这点，我们假定上面梁的厚度h为 0.018 英寸，为了求出所需要的输出，仍需假定应变计的应变为 1429 微英寸/英寸，则重新计算的表面应变为：

$$e_s = \frac{1429c}{c+d}$$

式中：C=h/2=0.018/2=0.009 英寸。

d≈0.0015 英寸。

被利用的新的应变为：

$$e_s = \frac{1429 \times 0.009}{0.009 + 0.0015} = 1225 \text{ 微英寸/英寸。}$$

为提供所需要的输出计算应变的误差，应该比这个例子大约高出 17%，这只是计算梁厚度的一个估计的误差，并不是一个操作性的误差。

剪切型称重传感器

当载荷超过了弯曲型称重传感器的要求时，应设计成剪切型结构，但是，当载荷超过 200000 磅（90718kg）时，建议采用柱式结构。

剪切应变是一个角应变，不能像轴向应变那样进行测量，只能间接测量。莫尔圆有关纯剪切应力情况及应变计粘贴简图如图 6 所示。

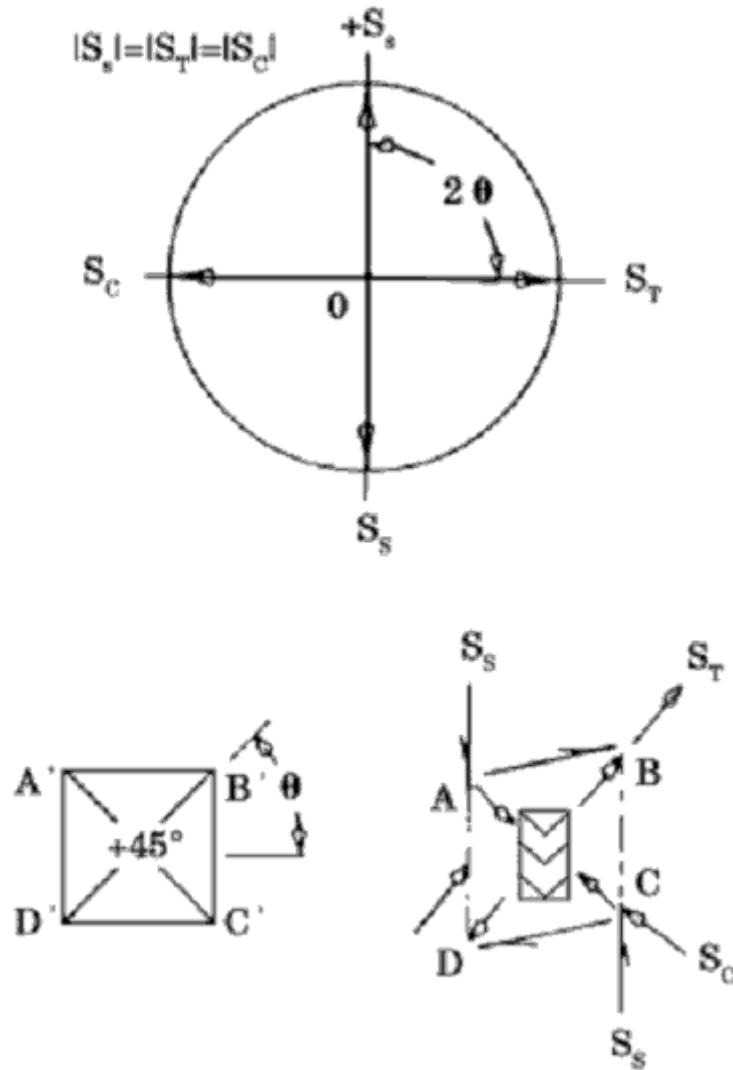


图 6 莫尔圆及应变计分布简图

莫尔圆表明切应力的最大值与处于拉伸状态的主应力的最大值是相等的，并且与梁的中性轴成 45° 方向。应变计是测量主应力产生的应变，因此应变计也同样应与中性轴成 45° ，如图 6 所示。此图同样表明一个没有载荷作用的平面部分正方形单元，当有载荷作用时正方形会变成菱形，使得一个应变计处于拉伸状态，而另一个应变计处于压缩状态。请注意应力是双轴的，其处于拉伸状态的主应力的轴向应变值不但与 S_T 成正比，而且随泊松比 μS_C 而增加：

$$e_1 = e_1' (1 + \mu) \quad (11)$$

式中： e_1 —应变计 1 的测量应变。

e_1' —单轴向范围内的基准应变， $e_1' = S/E_m$ 。

μ —泊松比。

电桥各桥臂上的应变计承受同样的应变值，所以利用电桥总应变公式，可写为：

$$\begin{aligned} e_t &= |e_1'(1+\mu)| + |e_1'(1+\mu)| + |e_1'(1+\mu)| + |e_1'(1+\mu)| \\ &= 4e_1'(1+\mu) \end{aligned}$$

因为
$$N = \frac{e_t}{e_1'}$$

所以
$$N=4(1+\mu)$$

泊斯特 (Purest) 会议有学者认为这是不符合规则的，因为 e_1' 并没有真实的存在，但是它确实提供了正确的答案，并在 N 值计算中有它是很方便的。用于计算所要求的可以提供所需输出的应变计算公式 (6) 可变为：

$$e_1' = \frac{\frac{E_0}{E_i}}{G_f(1+\mu)} \quad (12)$$

计算出所要求的单轴应变 e_1' 后，应力通过公式 (9) 获得，即

$$S_s = S_t = -S_c = e_1' E_m$$

能否准确计算出称重传感器上的应力，因切应力的种类和弹性体的结构不同而产生很大的差异。例如，一个承受纯剪切应力状态的扭转轴，其切应力计算可由下面典型的公式得出：

$$S_s = \frac{Tr}{J}$$

式中： S_s —切应力（与主应力的最大值相等）。

T —轴上的扭矩。

r —轴的半径。

J —横截面极惯性矩。

另一方面，直接利用剪切载荷准确的确定称重传感器上的切应力是极为困难的。对于剪切型轴销式称重传感器更是如此，下面列举了一些不够精确的原因：

(A) 应变计是通过其栅长测量的是应变区的平均应变。如果在应变区内切应力的变化曲线非常陡，且应变计尺寸非常大，所测量的应变值就会比峰值小。

(B) 最大切应力只用了直接作用于其上的最大剪切载荷的一部分。公式假设剪切载荷在一个已知的面积内，从底部到顶部较均匀分布，且切应力最大值均匀分布在中性轴上。

(C) 称重传感器上的载荷分布还应与安装接头的影响相吻合，如剪切型轴销式称重传感器，其载荷分布取决于轴销与安装接头两者之间的公差，所受载荷由于安装间隙不同而异。

我们将讨论三种切应力称重传感器。准确计算为保证所需输出的弹性体尺寸，与以前所用的程序完全一样。首先进行粗略计算，最后给出准确结果。切应力称重传感器尺寸大小的计算准确率，

不如圆柱、弯曲和扭转型称重传感器。

工字形截面切应力称重传感器

最普通的用于计算切应力的公式为：

$$S_a = \frac{V}{A}$$

式中： S_a —平均切应力。

V —剪切载荷。

A —受剪部分的截面积。

这个公式可以用来计算破坏载荷，但不能给出弹性体粘贴应变计处中性轴上切应力的最大值。对于切应力的最大值的计算公式，应随着受剪截面的形状不同而变化。

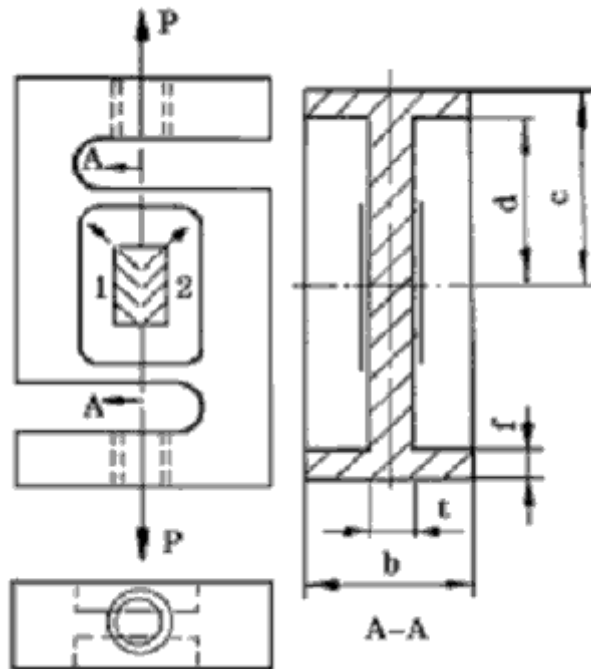


图 7 S 形剪切式称重传感器

图 7 是另一个 S 形称重传感器简图，除了利用剪切应力代替弯曲应力外，其它均无变化。图中 A-A 截面对于两个轴都是对称的，从侧面角度看呈现两倍的尺寸关系。应变计粘贴在工字形截面的腹板上，其截面尺寸为 b 、 c 、 d 、 f 和 t 。根据上述给定的尺寸，按计算程序计算出腹板的厚度 t 。

下列中性轴切应力 S_s 最大值计算公式，引自参考文献[1]第 91 页公式 (2)，即

$$S_s = \frac{VAZ}{Jt} \quad (14)$$

式中：V—剪力。

t—腹板厚度。

A' —中性轴以上横截面面积。

Z' —从中性轴到面积 A' 形心的距离。

$A' Z' = A_1 Z_1 + A_2 Z_2$

$A_1 Z_1$ —中性轴以上翼缘面积乘以中性轴到翼缘形心的距离，依照图 7， $A_1 Z_1 = fb(d+f/2)$ 。

$A_2 Z_2$ —中性轴以上腹板的面积乘以中性轴到腹板形心的距离， $A_2 Z_2 = td \times (d/2)$ 。

J—中性轴以上截面的惯性矩

$$J = \frac{b(2c)^3}{12} - \frac{(b-t)(2d)^3}{12}$$

例如图 7 中的称重传感器，假设所需的输出是 3.0mv/v，弹性体由 17—4PH 不锈钢制成， $E_m = 29.1 \times 10^6$ 磅/英寸²， $\mu = 0.29$ ，利用公式 (6)、(9) 及 $N = 4(1 + \mu)$ ，求得应力为 33800 磅/英寸²，其中 $E_0/E_i = 3.0\text{mv/m}$ ， $G_f = 2.0$ ，假设所给的载荷及尺寸如下：

$P = V = 15000$ 磅， $d = 0.80$ 英寸， $f = 0.20$ 英寸， $c = 1.00$ 英寸， $b = 1.50$ 英寸。把这些数值代入公式 (14)，即可得到一个有关 t 的二次方程式，解此方程求得 $t = 0.273$ 英寸。

为确定强度，还需要其它尺寸大小，例如确定承受载荷螺纹的允许直径，符合螺纹外径要求的宽度 b 一定要足够大等。图中 A-A 部分的箭头指向是高弯曲应力与拉伸应力合二为一的结合面，必须具有足够大的强度才能安全的承受载荷。粘贴有应变计的腹板两侧的盲孔部分可以是方形、矩形，也可以是圆形使得加工简单。据估计称重传感器任意部分的应力都比应变计处的应力小。

工字形截面切应力称重传感器的误差来源

依照惯例，当计算工字梁的应力时，假设腹板承受所有载荷。如果我们采用这种方法，那么将利用平均应力 $S_a = V/A$ 的计算公式来确定腹板的厚度。采用上面的例子，承受载荷的腹板截面面积是 $A = 2ct$ ，又因为 $A = V/S_a$ ，则腹板厚度 t 计算如下：

$$t = \frac{V}{2cS_a} = \frac{15000}{2 \times 1.0 \times 33800} = 0.222 \text{ 英寸}$$

此值比通过公式 (14) 得出的 t 值小 18%，尽管公式 (14) 略显繁琐，但对于不同的截面形状，它的计算是比较准确的。

轮辐式称重传感器

图 8 是一个轮辐式称重传感器简图，这种设计是为了生产高准确度的称重传感器。

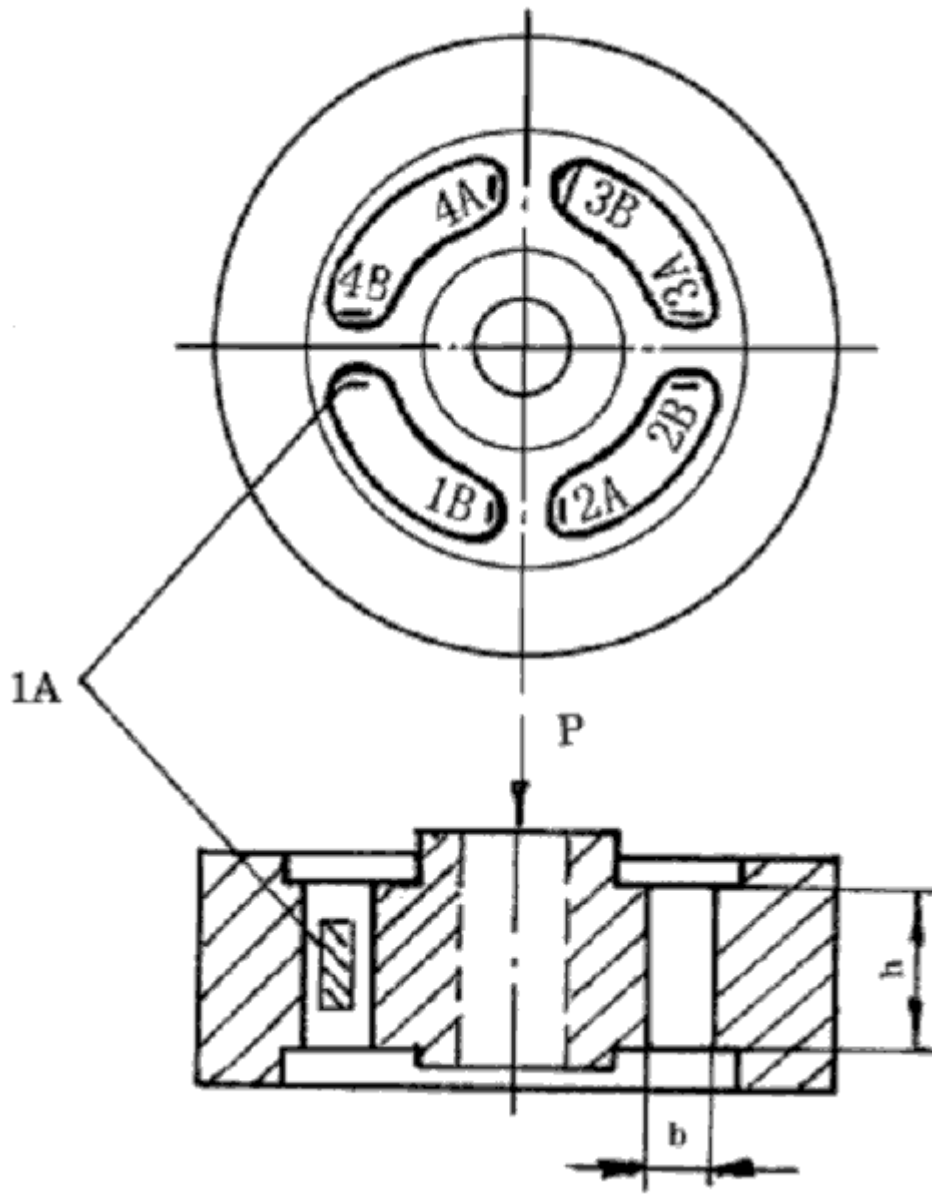


图 8 轮辐式称重传感器

粘贴应变计的轮辐是一个矩形截面梁，通常高度 h 比宽度 b 长一些。把公式 (14) 应用于矩形截面见参考文献[1]第 92 页公式 (3)，得出切应力计算公式如下：

$$S_s = \frac{aV}{A} \quad (15)$$

式中： V —剪力， $V=P/4$ 。

a —形状系数。

A —矩形截面的面积， $A=bh$ 。

轮辐式称重传感器的误差来源

参考文献[1]指出，对于矩形截面其形状系数 $a=3/2$ ，但是如前所述最终的输出是几个因素共同作用形成的。比较截面的高度，及截面的宽度与高度比，我的经验是 a 随着应变计的尺寸变化而变化。现举例说明，一个 200000 磅的称重传感器，截面高度 h 为 2.386 英寸，宽度 b 为 1.172 英寸。这么大的高度解决了通过应变计基长测量平均应变的问题，因为应变计基长只有 1/8 英寸。形状系数 a 为 1.25，并不是参考文献[1]中所述的 1.50，表 1 给出了 a 的数值。

表 1 形状系数 a 值

D	a
3.0	1.63
2.0	1.71
1.5	1.84
1.0	1.97

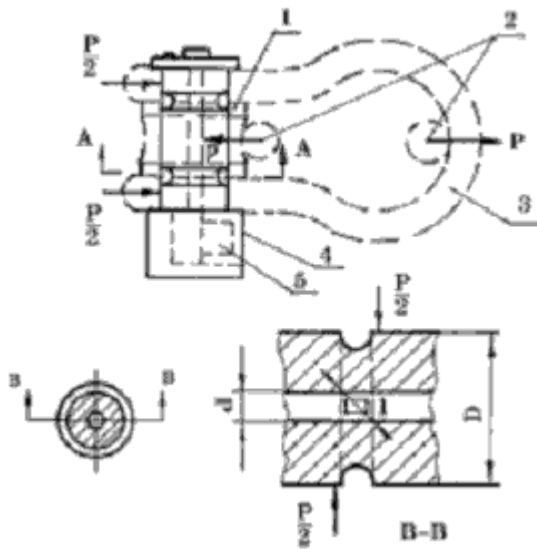
建议设计者形状系数最好选取 1.25，组装一台称重传感器样件，校准所需要的截面面积。一旦在样件上建立了准确的计算模型，调整截面的宽度，就可以求得所需要的输出值，然后再组装一台称重传感器样件，并进行校核以确定最终输出。

图 8 给出了 8 片应变计的情况，应变计 1A 和 1B 串联，作为图 1 中的应变计 1；应变计 2A 和 2B 串联作为图 1 中的应变计 2，如此等等，这种联结组桥方式提供了最精确的称重传感器。但是采用 4 片应变计的称重传感器价格会低一些，只是准确度为中等水平。4 片应变计可粘贴在图 8 中 1A、1B、3A 和 3B 的位置上。购买的应变计应具有与中性轴成 45° 或 135° 的敏感栅，选择一个具有适当方向敏感栅的应变计是非常重要的。参考图 6 确定应变计的粘贴位置，使 2 片应变计处于拉伸状态，而另外 2 片应变计处于压缩状态。

较大量程的轮辐式称重传感器，例如容量超过 200000 磅（90718kg）时，会出现较大的滞后误差。这已形成了理论，即滞后误差是在泊松比作用下，在轮辐受载过程中轮箍底部产生向外移动的力，从而形成力矩。由于存在摩擦力，轮箍移出时的力矩与移回时的力矩是不同的，因而产生滞后。处于压缩状态的大型柱式称重传感器不会出现滞后现象，所以，既然大多数用户都希望轮辐式称重传感器的设计会提供精确的结果，那么轮辐式称重传感器的最大容量最好限定为 200000 磅之内。

轴销剪切式称重传感器

图 9 是在一个吊环内装有轴销剪切式称重传感器的简图，这个组合表明切应力称重传感器应用的多样性和广泛性。本文展示的这台轴销剪切式称重传感器取自生产厂家的产品目录，见参考文献[4]。



1. 承载卷筒, 2. 挂钩或吊链, 3. U形吊环,
4. 剪切轴销, 5. 凹陷部分连线插头

图9 轴销剪切式称重传感器

应变计粘贴在轴销上的直径 d 为 1/8 英寸到 1/2 英寸的圆孔内, 并处于有凹槽的位置上。应变计的粘贴位置必须准确, 这项工作应该由一名熟练的机械师利用特殊的工具完成。

参考文献[5]详尽的讨论了轴销剪切式称重传感器, 如果对制造类似的称重传感器有兴趣, 建议读者重新读一下那篇文章。计算轴销上切应力的公式选自参考文献[1], 在参考文献[5]中也给出了计算公式。此作者的研究展示了初始原型的真实应力, 它与计算公式有着非常大的差异。例如需要为所计算的弹性体提供 1.0mv/v 的输出时, 那么直径小的轴销切应力大约是 11500 磅/英寸², 而要求弹性体提供相同的输出时, 直径大的轴销切应力却是 7500 磅/英寸²。称重传感器的输出受很多因素影响, 比如说穿过中心孔的直径 d , 凹槽的直径 D , 轴销与支撑之间的间隙, 支撑的硬度, 应变计的尺寸等。可以被利用计算轴销剪切式称重传感器输出的最好公式是 (15) 式, 其中形状系数 a 在 1.5 到 2.0 之间变化。

表 1 列举了经试验得出的 a 的一些数值, 凹槽直径 D 从 1.0 到 3.0 之间变化, 轴销是钢制的, 称重传感器的输出灵敏度为 2.0mv/v , 而中间孔的直径 d 为 0.50 英寸。

轴销剪切式称重传感器的误差来源及设计建议

参考文献[5]指出“当几何形状没有问题时, 传统的称重传感器要优于轴销剪切式称重传感器”。轴销剪切式称重传感器在具体应用中, 有很多误差来源, 归纳起来主要有:

(A) 为了具有最好的重复性和最小的滞后误差, 轴销剪切式称重传感器的输出灵敏度应设计为 1.00mv/v , 所以当轴销卸载时, 不会因椭圆变形在轴销中引起较大的弯曲应力, 这就增加了安全载荷和疲劳寿命。

(B) 轴销的凹槽必须是应变计敏感栅宽度的 2 倍。但是, 如果凹槽过宽, 当轴销卸载时就会产生较大的弯曲应力而引起误差, 同时也降低了安全载荷。参考文献[5]提供了有关凹槽宽度的设计建议。

(C) 轴销与支撑之间的间隙应尽量小一些, 以减少弯曲变形。当轴销的直径为 1.0 英寸时, 最大间隙为 0.004 英寸; 当直径为 4.0 英寸时, 最大间隙为 0.007 英寸。如图 9 中吊环式称重传感器的情况, 要求吊环为轴销提供紧密的配合。

(D) 支撑应具有足够的刚度来抵抗弯曲变形，越刚硬越好。测试与校准轴销时，应该与实际安装使用时是同一个支撑。

(E) 在使用寿命内，如果轴销需要承受冲击载荷或许多循环载荷时，凹槽就需要有足够大的半径。另外，如果轴销要在很冷的天气（0° 以下）工作并承受冲击载荷时，就不要选用较脆的钢种如 17-4PH 来制造轴销。

(F) 与轮辐式称重传感器相似，大型轴销剪切式称重传感器（200000 磅或更高）会出现滞后误差。一个二百万磅的轴销剪切式称重传感器的滞后误差大约是 1.0%到 3.0%，为了减小（并不是消除）这一误差，所有大型切应力称重传感器都应该将输出灵敏度限制在 1.00mv/v 之内。

(G) 如果公式（15）被应用于实心轴销剪切式称重传感器时，形状系数 a 是一个常数 4/3 或是 1.33，这个公式假设最大切应力均匀分布在轴销的中性轴上。

(H) 由四只称重传感器组装的承载器，每个称重传感器必须具有相同的输出灵敏度。如果一只称重传感器的输出灵敏度是 3.0mv/v 其它几只的输出灵敏度也应该是 3.0mv/v。如果不具备这一特点，任何一个偏于承载器的载荷都会得到不同的测量结果。一个轴销就是一台电子衡器，由两个称重传感器并联组成（每个槽内有一只称重传感器），如果输出灵敏度不同，测量结果就会随着偏心载荷的不同而变化。图 8 中的中心通孔就是用来把外载荷集中于称重传感器中心而设计的。

结语

本篇论文是基于对称重传感器设计者能有所帮助而写的，它提供了一些公式，这些公式可用于计算称重传感器上的某个尺寸的大小，并提供所需要的其它计算结果。它同样介绍了用于计算圆柱式结构称重传感器输出的公式（通常被用于航空工业）。

本篇论文全面介绍了称重传感器的误差来源和设计建议。但是应该强调的是影响称重传感器第一个样件输出的尺寸计算误差，应该在生产第二个样件前对这一尺寸进行更正。

本篇论文中的电桥电路（图 1）并没有串入温度补偿电阻。例如应变计的灵敏系数、绝大多数材料的弹性模量都随着温度的变化而变化，所以称重传感器的输出灵敏度也随着变化，这个误差在商用称重传感器中通常是被补偿的。在商用称重传感器中电桥串联了温度补偿电阻，当温度变化时，补偿电阻会进行补偿。如果称重传感器串入了灵敏度温度补偿电阻，对于一个给定的输入电压，输出一定是一个符合要求的标准值。考虑到补偿电阻将减少输出值，所以设计的电桥输出值一定要比标准值高。表 2 是本篇论文所介绍公式的总结。

表 2 称重传感器计算公式

载荷方式	拉伸/压缩	弯曲	剪 切	
			工字形截面	轮辐式/轴销式
应力公式 (见注 1 和 2)	$S=P / A$	$S_b=Mc / J$	$S_s=VA' Z' / Jt$	$S_s=aP / A$

载荷方式	拉伸/压缩	弯曲	剪 切	
			工字形截面	轮辐式/轴销式
输出公式 (见注 3)	$E_0 / E_i = G_i e_i (1 + \mu) / 2$	$E_0 / E_i = G_i e_i$	$E_0 / E_i = G_i e_i (1 + \mu)$	同上
N 的一般值	$N = 2 (1 + \mu)$	$N = 4$	$N = 4 (1 + \mu)$	同上
钢的 N $\mu = 0.29$	$N = 2.58$	$N = 4$	$N = 5.16$	同上
铝的 N $\mu = 0.32$	$N = 2.64$	$N = 4$	$N = 5.28$	同上

注释 1、在全部公式中假设应力是单向的并且符合虎克定律，或者是应用公式将应力转换为应变或是相反将应变转换为应力，即 $S = e E_m$ 或 $e = S / E_m$ 。

注释 2、为了得到需要求得的尺寸重新整理了公式。

注释 3、用在公式 (5) 中代入 N 的方法求得输出值。

参考文献

(1) Roark, Raymond J. and Young, Warren C., Formulas for Stress and Strain, Fifth edition, McGraw-Hill, 1975. (罗克·雷蒙德·杰和杨格·沃伦·希：应力与应变公式，第五版，麦克格来—希尔出版，1975 年。)

(2) (a) The technical staff of Measurements Group Inc., Strain Gage Based Transducers-Their Design and Construction, P.O.Box 27777, Raleigh, North Carolina, 27611, (919) 365-3800, 1988.

(b) T-Design (Computer Software), B.L.H. Electronics, 75 Shawmut Rd. Canton, MA 02021, (617) 821-2000. [(a) 测量技术人员集团公司，应变式传感器的结构与计算。(b) T—程序 (计算机软件)。]

(3) Measurements Group Technical Note TN-502, Optimizing Strain Gage Excitation Levels (计量集团技术注释 TN-502，选择最佳应变值。)

(4) Metrox, Inc, Load Pins, Drawing no. LP102-0000, 1991 catalog. (梅特罗伊公司，轴销式称重，1991 年目录第 LP102-0000 号图。)

(5) Yorgiadis, Alexander, The Shear Pin Force Transducer, Instruments and Control Magazine, October 1986. (约吉艾迪斯，亚历山大，轴销剪切式力传感器，仪器与控制杂志，1986 年 10 月)。

作者简介

理查德·富兰克林在 purdue (珀杜) 大学机械工程专业获得工学学士学位。在工作期间他继续深造于 San Diego (圣·迪格) 大学，同样是机械工程专业他获得了工学硕士学位。在获得硕士学位不久，他在加利福尼亚获注册专业工程师执照。富兰克林先生拥有一个小的应变计技术咨询公司。

他从事航空工业已有 23 年，并作为通用原子能公司的设计和测试工程师 18 年。他为商业杂志，西部应变计委员会及报纸撰写文章。晚上他在西海岸大学及卡耶麦克亚大学教授测试设备及应用数学已 8 年。

可用如下方式与富兰克林先生联系：Versatile Instruments, P.O.Box 876, Del Mar, CA 92014, 619/755-2944

译自 Measurements & Control, October 1996.

翻译：宋玉梅

校对：刘九卿