

板式称重传感器偏载的优化补偿及其应用

郑州恒科实业有限公司 谷建斌

【摘要】 分析了板式称重传感器，尤其是计量汽车轴重的称重板的偏载成因，通过理论分析和试验测试，提出了解决称重板偏载的几种方法及其原理，为称重板抗偏载性能的提高和在实际中的应用提供完整的偏载优化补偿方法。

【关键词】 称重板 有限元法 补偿

Keywords: weigh-bridge FEM Compensation

一、引言

一般，称重传感器在使用过程中，要求其固定方式不变，并且相对于称重传感器而言其加载位置保持不变，这样以保证计量的准确度和多次计量的重复性。然而，对于某些称重传感器，由于其工作环境和实际应用的限制，其工作特点是称重传感器的固定方式基本不变，但其工作载荷的施加位置随着每次的加载而不同。

特别是应用于公路衡器中的整体板式轴重计量称重传感器，以下简称称重板。汽车不能保证每次都沿着同一路线，同一位置通过称重板。因此，对于安装（放置）在路面上的称重板而言，同一辆汽车多次通过称量时，也就无法保证加载位置的相对不变。

二、板式称重传感器偏载的形成

假设称重板为无限长，根据

弹性体的连续性，只要在整个长度方向均匀布置足够多的应变计，则我们可以知道，在无限长范围内的任何一个位置加载，称重板的输出不变¹。

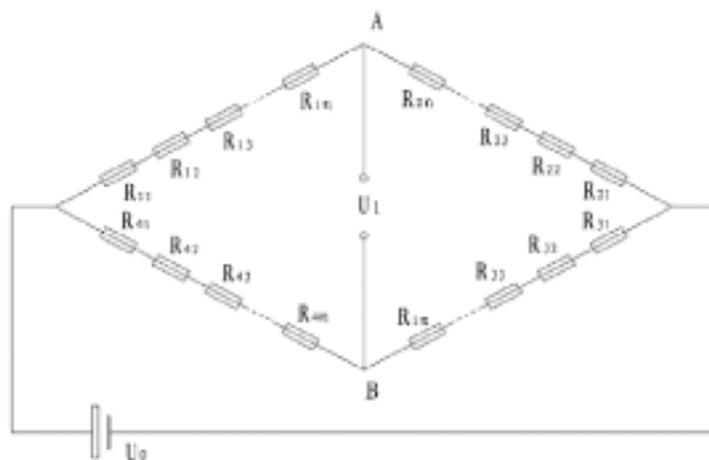


图1 惠斯通电桥电路

¹ 由式（1）可见，在无限长范围内的任一位置加载，称重板微应变之和可认为是不变的，即输出不变。

那么，在称重板长度方向布置 n 组应变计，组成如图 1 的惠斯通电桥，应变计由左至右的编号记为 1, 2, 3... n ，宽度 W 方向上，载荷中心点位于 $W/2$ 处²（参见图 2），我们可作如下推导：

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_{12} = R_{13} = \dots = R_{1n} = R, \\ R_{21} &= R_{22} = R_{23} = \dots = R_{2n} = R, \\ R_{31} &= R_{32} = R_{33} = \dots = R_{3n} = R, \\ R_{41} &= R_{42} = R_{43} = \dots = R_{4n} = R, \end{aligned}$$

当载荷中心点位于 $W/2$ 处，可以设计特定的结构的弹性体，使得每一组应变计处的微应变绝对值相等，分别记为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots \varepsilon_n$ ，则基于应变计的转换原理，在弹性体弹性范围内有，

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_{11}}{R_{11}} &= -K\varepsilon_1, \quad \frac{\Delta R_{12}}{R_{12}} = -K\varepsilon_2, \quad \frac{\Delta R_{13}}{R_{13}} = -K\varepsilon_3 \dots \frac{\Delta R_{1n}}{R_{1n}} = -K\varepsilon_n, \\ \frac{\Delta R_{21}}{R_{21}} &= K\varepsilon_1, \quad \frac{\Delta R_{22}}{R_{22}} = K\varepsilon_2, \quad \frac{\Delta R_{23}}{R_{23}} = K\varepsilon_3 \dots \frac{\Delta R_{2n}}{R_{2n}} = K\varepsilon_n, \\ \frac{\Delta R_{31}}{R_{31}} &= -K\varepsilon_1, \quad \frac{\Delta R_{32}}{R_{32}} = -K\varepsilon_2, \quad \frac{\Delta R_{33}}{R_{33}} = -K\varepsilon_3 \dots \frac{\Delta R_{3n}}{R_{3n}} = -K\varepsilon_n, \\ \frac{\Delta R_{41}}{R_{41}} &= K\varepsilon_1, \quad \frac{\Delta R_{42}}{R_{42}} = K\varepsilon_2, \quad \frac{\Delta R_{43}}{R_{43}} = K\varepsilon_3 \dots \frac{\Delta R_{4n}}{R_{4n}} = K\varepsilon_n, \end{aligned}$$

称重板上施加载荷 Q 时，称重板产生弹性变形，弹性体微应变传递至应变计造成惠斯通电桥不平衡，

$$\therefore R'_{11} = R_{11} + \Delta R_{11} = R_{11} - R_{11}K\varepsilon_1 = R_{11}(1 - K\varepsilon_1) = R(1 - K\varepsilon_1), \text{ 同理有,}$$

$$R'_{li} = R'_{3i} = R(1 - K\varepsilon_i), \quad i=2, 3, \dots, n$$

$$R'_{2i} = R'_{4i} = R(1 + K\varepsilon_i), \quad i=1, 2, 3, \dots, n$$

$$\therefore U_A = \frac{\sum (R'_{21} + R'_{22} + R'_{23} + \dots + R'_{2n})}{\sum (R'_{11} + R'_{12} + R'_{13} + \dots + R'_{1n}) + \sum (R'_{21} + R'_{22} + R'_{23} + \dots + R'_{2n})} U_0$$

² 本文中所述施加的载荷都是载荷中心点位于 $W/2$ 处。

³ 《新编传感器技术手册》，国防工业出版社

$$= \frac{R \sum_{i=1}^n (1 + K\varepsilon_i)}{R \sum_{i=1}^n (1 - K\varepsilon_i + 1 + K\varepsilon_i)} U_0 = \frac{U_0}{n} \sum_{i=1}^n (1 + K\varepsilon_i), \quad \text{同理有,}$$

$$U_B = \frac{U_0}{n} \sum_{i=1}^n (1 - K\varepsilon_i),$$

$$\therefore U_1 = U_A - U_B = \frac{2U_0}{n} K \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \dots\dots\dots (1)$$

也就是说，称重板以图 1 所示组成惠斯通电桥作为测量称重板负荷的输出电路时，称重板的输出就是贴片位置处的弹性体微应变之和除以应变计的片数。当称重板无限长时，我们认为在同一载荷在称重板长度范围内加载时，输出不变，我们也称之为横向灵敏度一致。

因此，在认为称重板是无限长时，只要在称重板的长度方向均布足够多的应变计，则可以认为称重板长度方向上的灵敏度一致。

在实际应用中，我们按照前述的方式在长为 L 的称重板长度方向均匀布置了 21 组应变计，在 B 范围内的任何位置施加同一载荷 Q，称重板的输出基本保持不变，当在两端头 d 范围内加载时，如图 2“位置 1”和“位置 5”，输出则急剧增加，产生了很大的变化。

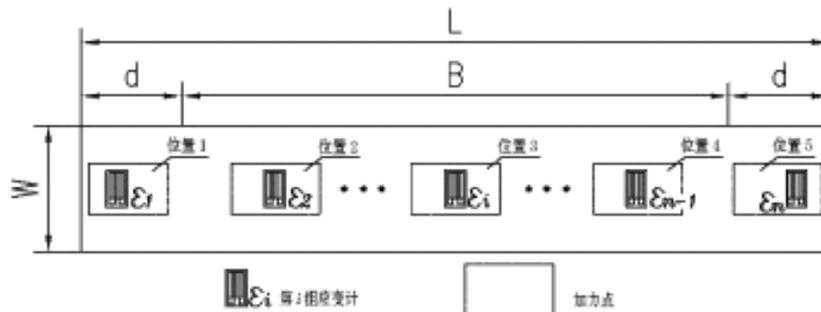


图 2 称重板电阻应变计位置图

这是不是说明当载荷施加到两端 d 范围内，式 (1) 中弹性体微应变总和发生了变化呢？

为此我们将 21 组应变计分别组桥，记录载荷由左至右分别位于位置 1 到位置 5 的每组应变计单独组桥的输出，见表 1。从表 1 中可以看到载荷位于位置 2、位置 3 和位置 4，即载荷处于 B 范围内时，分别组桥的桥路输出之和基本相当，而在位置 1 和位置 5，即载荷处于 d 范围内时，两端侧编号为 1、2，20、21 的应变计组输出急剧增加，并且其桥路输出之和也大于 B 范围桥路输出之和。同一载荷 Q 在 5 个位置加载时，重复性误差达到 6.4%。

由式 (1) 可知，造成称重板两端 d 段内应变计输出增加的原因是弹性体微应变急剧增加，由

表 1 可看出 ε_1 、 ε_2 、 ε_{20} 、 ε_{21} 增加过大，也就是说在称重板弹性体两端头的边界效应造成了称重板输出的增加，从而使得当同一辆汽车在 B 段内任意多次通过时，称重板输出信号基本不变，在两端 d 段内通过时，输出信号增加。

三、偏载补偿方法

在计量工作中，为了保证多次重复称量的重复性，就要求称重板具有良好的横向灵敏度一致性。对于有限长度的称重板为了满足计量性能的要求，就必须对处于两端 d 段内的载荷，也就是偏载作用力输出进行补偿。

表 1 的测试数据说明，当载荷位于位置 1 和位置 5 时， ε_1 、 ε_2 或 ε_{20} 、 ε_{21} 的急剧增加，当载荷位于位置 3 或位置 2 与位置 4 之间的任意位置时， ε_1 、 ε_2 或 ε_{20} 、 ε_{21} 则近乎为零，可见 ε_1 、 ε_2 ， ε_{20} 、 ε_{21} 是式（1）中变化梯度最大的项，所以偏载补偿的基本方法就是降低 ε_1 、 ε_2 或 ε_{20} 、 ε_{21} 的变化梯度。

基于此，可从软件、机械和桥路三个方面入手进行偏载输出补偿。

表 1 各加载位置测试数据

单位： $1 \times 10 \mu\text{V}$

No.	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
1	1245	180	11	2	1
2	1229	234	16	2	1
3	905	399	16	2	1
4	775	486	25	3	2
5	602	689	66	3	2
6	553	887	147	7	4
7	435	946	289	7	5
8	386	845	500	23	5
9	265	675	721	51	15
10	117	456	874	118	37
11	82	284	942	278	78
12	34	122	868	463	172
13	14	53	735	662	274

No.	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
14	7	21	499	824	391
15	4	8	289	987	426
16	3	5	150	875	549
17	2	3	67	672	611
18	2	3	25	495	740
19	1	2	16	389	900
20	1	2	16	241	1230
21	1	2	11	182	1239
sum	6663	6302	6283	6286	6683

1. 软件补偿法

各加载位置的变化是输出变化的直接原因，只要能够识别每次加载的位置，就可以通过软件修正的方法调整输出结果的示值。这种方法的关键在于正确识别每次加载的位置，并且针对多个位置进行标定修正，最后各标定位置点之间插值计算整个长度方向上的修正系数。

笔者称这种通过识别加载位置，在软件中修正输出示值的方法为软件补偿法。

2. 机械优化补偿法

称重板的两端的边界效应是 ε_1 、 ε_2 或 ε_{20} 、 ε_{21} 急剧增加的根本原因，只要从称重板弹性体的设计上避开或减小两端的边界效应影响，就可以直接的降低 ε_1 、 ε_2 或 ε_{20} 、 ε_{21} 。然而，弹性体两端边界效应造成的应力集中并不是必定可以消除的，或者降低了应力集中会带来传感器性能的破坏。这种情况下，应该从贴片位置的局部改变从而避开微应变变化较为剧烈的点而实现式（1）对偏载载荷的敏感性最小。

这种通过改变弹性体机械结构设计和贴片点局部，减小剧烈变化微应变对于式（1）影响的方法，笔者称为机械补偿法。

3. 桥路补偿法

由前述可知，当同一载荷分别施加到图 2 所示位置 3 和位置 1（或位置 5）时，图 1 所示惠斯通桥臂中 ΔR_{11} 、 ΔR_{1n} ， ΔR_{21} 、 ΔR_{2n} ， ΔR_{31} 、 ΔR_{3n} 、 ΔR_{41} 、 ΔR_{4n} 绝对变化量由于 ε_1 、 ε_n 的急剧改变而产生极大幅度的变化，造成桥路输出电压 V_2 改变。

为此，如果我们在微应变变化比较急剧位置处的应变计 R_{11} 、 R_{1n} 、 R_{21} 、 R_{2n} 、 R_{31} 、 R_{3n} 、 R_{41} 、 R_{4n} 上并联如图 3 所示 R_c ，则可以减小该应变计对于整个桥路输出的影响，从而达到补偿称重板横向灵敏度一致性的效果。

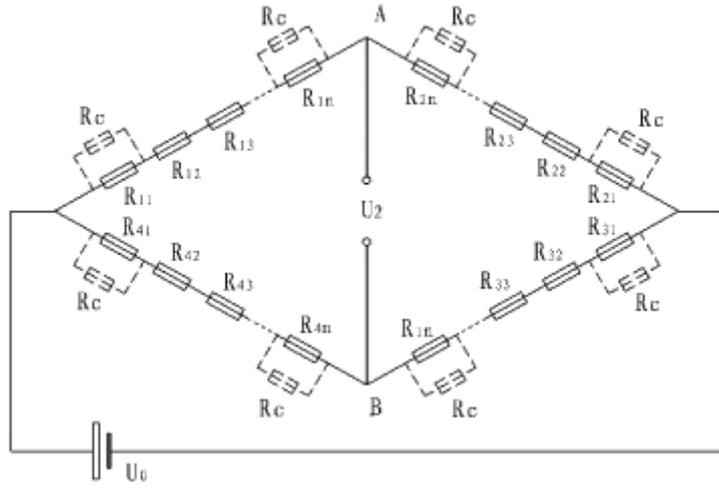


图 3

当在称重板上施加载荷 Q 时，惠斯通电桥失去平衡，其输出推导如下：

$$R'_{1i} = R'_{3i} = R(1 - K\varepsilon_i), \quad i=2, 3, \dots, n-1,$$

$$R'_{2i} = R'_{4i} = R(1 + K\varepsilon_i), \quad i=2, 3, \dots, n-1,$$

$$R'_{11} = \frac{R_c \cdot R_{11}}{R_c + R_{11}(1 - K\varepsilon_1)} (1 - K\varepsilon_1), \quad \text{分母中略去极小项,}$$

$$R'_{11} \approx \frac{R_c \cdot R_{11}}{R_c + R_{11}} (1 - K\varepsilon_1) = \frac{R_c \cdot R}{R_c + R} (1 - K\varepsilon_1),$$

同理有，

$$R'_{31} = R'_{11} = \frac{R_c \cdot R}{R_c + R} (1 - K\varepsilon_1), \quad R'_{1n} = R'_{3n} = \frac{R_c \cdot R}{R_c + R} (1 - K\varepsilon_n),$$

$$R'_{21} = R'_{41} = \frac{R_c \cdot R}{R_c + R} (1 + K\varepsilon_1), \quad R'_{2n} = R'_{4n} = \frac{R_c \cdot R}{R_c + R} (1 + K\varepsilon_n),$$

$$\therefore U_A = \frac{R'_{21} + R'_{2n} + \sum_{i=2}^{n-1} R'_{2i}}{(R'_{11} + R'_{2n} + \sum_{i=2}^{n-1} R'_{1i}) + (R'_{21} + R'_{2n} + \sum_{i=2}^{n-1} R'_{2i})} U_0$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\frac{R_c \cdot R}{R_c + R} [2 + K(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] + R \sum_{i=2}^{n-1} (1 + K\varepsilon_i)}{\left\{ \frac{R_c \cdot R}{R_c + R} [2 - K(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] + R \sum_{i=2}^{n-1} (1 - K\varepsilon_i) \right\} + \left\{ \frac{R_c \cdot R}{R_c + R} [2 + K(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] + R \sum_{i=2}^{n-1} (1 + K\varepsilon_i) \right\}} U_0 \\
&= \frac{U_0}{\frac{4R_c}{R_c + R} + (n-2)} \left\{ \frac{R_c}{R_c + R} [2 + K(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] + \sum_{i=2}^{n-1} (1 + K\varepsilon_i) \right\},
\end{aligned}$$

同理有，

$$U_B = \frac{U_0}{\frac{4R_c}{R_c + R} + (n-2)} \left\{ \frac{R_c}{R_c + R} [2 - K(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] + \sum_{i=2}^{n-1} (1 - K\varepsilon_i) \right\},$$

$$\therefore U_2 = U_A - U_B$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{U_0}{\frac{4R_c}{R_c + R} + (n-2)} \left\{ \frac{R_c}{R_c + R} [2 + K(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] + \sum_{i=2}^{n-1} (1 + K\varepsilon_i) \right\} - \\
&\quad - \frac{U_0}{\frac{4R_c}{R_c + R} + (n-2)} \left\{ \frac{R_c}{R_c + R} [2 - K(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] + \sum_{i=2}^{n-1} (1 - K\varepsilon_i) \right\} \\
&= \frac{2KU_0(R_c + R)}{(n+2)R_c + (n-2)R} \left[\frac{R_c}{R_c + R} (\varepsilon_1 + \varepsilon_n) + \sum_{i=2}^{n-1} \varepsilon_i \right] \\
&= \frac{2KU_0(R_c + R)}{(n+2)R_c + (n-2)R} \cdot \left(\frac{R_c}{R_c + R} \sum \varepsilon_{\text{补}} + \sum \varepsilon_{\text{余}} \right) \dots\dots\dots (2)
\end{aligned}$$

其中， $\varepsilon_{\text{补}}$ 为桥路中进行补偿应变计处的微应变， $\varepsilon_{\text{余}}$ 为桥路中未进行补偿应变计处的微应变。

由式 (2)，当 $R_c \rightarrow 0$ ，有，

$$\begin{aligned}
U_2 &= \frac{2KU_0(R_c + R)}{(n+2)R_c + (n-2)R} \left[\frac{R_c}{R_c + R} (\varepsilon_1 + \varepsilon_n) + \sum_{i=2}^{n-1} \varepsilon_i \right] \\
&= \frac{2KU_0(0+R)}{(n+2) \times 0 + (n-2)R} \left[\frac{0}{0+R} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \sum_{i=2}^{n-1} \varepsilon_i \right]
\end{aligned}$$

$$= \frac{2U_0}{n-2} K \sum_{i=2}^{n-1} \varepsilon_i \dots\dots\dots (3)$$

由式 (1) 和式 (3) 有,

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_1 - U_2 \\ &= \frac{2U_0}{n} K \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \frac{2U_0}{n-2} K \sum_{i=2}^{n-1} \varepsilon_i \\ &= \frac{2U_0 K}{n(n-2)} [(n-2) \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - n \sum_{i=2}^{n-1} \varepsilon_i] \\ &= \frac{2U_0 K}{n(n-2)} \{ (n-2) \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - n \cdot [\sum_{i=1}^n \varepsilon_i - (\varepsilon_1 + \varepsilon_n)] \} \\ &= \frac{2U_0 K}{n(n-2)} [n \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_n) - 2 \sum_{i=1}^n \varepsilon_i] \\ \therefore \Delta U &= \frac{2U_0 K}{n(n-2)} [n \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_n) - 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)] \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

考虑到式 (4) 的物理意义, $n > 2$, 因为称重板的长度为 L , 并且考虑到产品成本的问题, n 不应无限大, 所以笔者定义 $2 < n < 35$, 且 n 为整数,

当在偏载位置 1 加载 Q 时, 有,

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_i, \quad i=1, 2, 3, \dots, n, \quad \text{则}$$

由式 (4) 补偿前后桥路的输出变化 ΔU 为:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{2U_0 K}{n(n-2)} [(n-2) \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_n) + 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_n) - 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)] \\ &\geq \frac{2U_0 K}{n(n-2)} [(n-2) \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_n) + 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n) - 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)] \\ &= \frac{2U_0 K}{n(n-2)} (n-2) \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_n) > 0 \end{aligned}$$

$$\therefore U_1 > U_2,$$

即桥臂上补偿电阻 R_c 后, 当施加偏载于位置 1 时, 其输出小于补偿之前。

当在称重板中心位置 3 施加载荷 Q 时, 由表 1 也可以知道, 在位置 3 处的称重板弹性体的微应变 $\varepsilon_{mid} \gg \varepsilon_1$, 由式 (4) 有,

$$\Delta U \approx \frac{2U_0 K}{n(n-2)} [-2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)] < 0$$

$$\therefore U_1 < U_2$$

即桥臂上并入补偿电阻 R_c 后，当在中心位置 3 施加载荷 Q 时，其输出大于补偿之前。

同理可以知道，桥臂上并入补偿电阻 R_c 后，当施加偏载于位置 5 时，其输出小于补偿之前。

所以，在惠斯通电桥中的适当桥臂上并入补偿电阻 R_c 后，称重板整个长度方向上输出会被拉近，并趋于一致。

这种由惠斯通桥电路入手，减小剧烈变化应变计阻值变化的方法，笔者称为桥路补偿法。

四、仿真研究与应用

根据产品特点，上述 3 种偏载补偿的方法都可以达到对板式称重传感器的偏载进行补偿。软件补偿法中最为关键的就是识别确切的载荷加载位置，一般来讲，需要为此而特别的安装能够识别载荷位置的传感器，所以，这种方法增加整个产品的故障隐患点，同时也增加了产品成本。

基于此，笔者解决问题的方案是机械补偿后，根据对横向灵敏度不同精度的要求，适当辅以桥路补偿法对称重板偏载进行二次深度补偿。

建立称重板弹性体 3D 模型，导入有限元软件中利用其强大而丰富的前处理功能对 3D 模型建立 p 单元结有限元模型，笔者定义的最大有限单元长度为 4mm，设定边界和优化条件，使用 ModuleSolution 模组优化设计弹性体结构，降低最大应力和边界效应。

在有限元模型上从左至右的 15 个位置上分别施加同一大小的模拟载荷 Q ，载荷宽度为 300mm，分别输出每个桥臂上 567 个单元上微应变 ε 组成的列向量，由数学计算工具编程对有限元输出结果列向量进行仿真模拟，优化应变计的贴片位置和应变计的贴片数量，从而通过有限元分析和数学仿真使得式 (1) 在所有载荷位置均保持近似一致。

优化结果为，贴片数量降为每个桥臂上 9 片应变计，在称重板从左至右 15 个位置上的输出偏差为 1.1%，如图 4 所示。

同时，我们可以看到，由于由于每个桥臂上应变计数量减少，同一载荷 Q 下称重板的输出信号增加，这与式 (1) 所表达结果也是一致的。

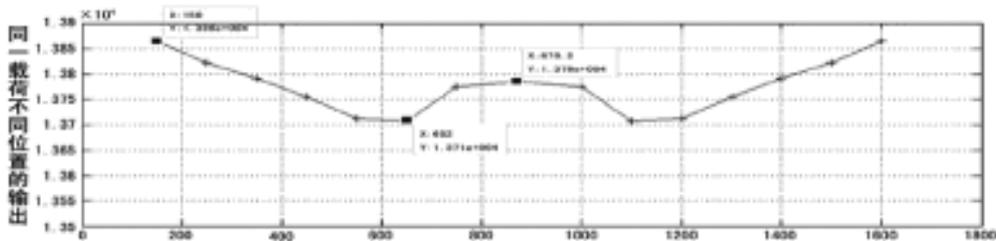


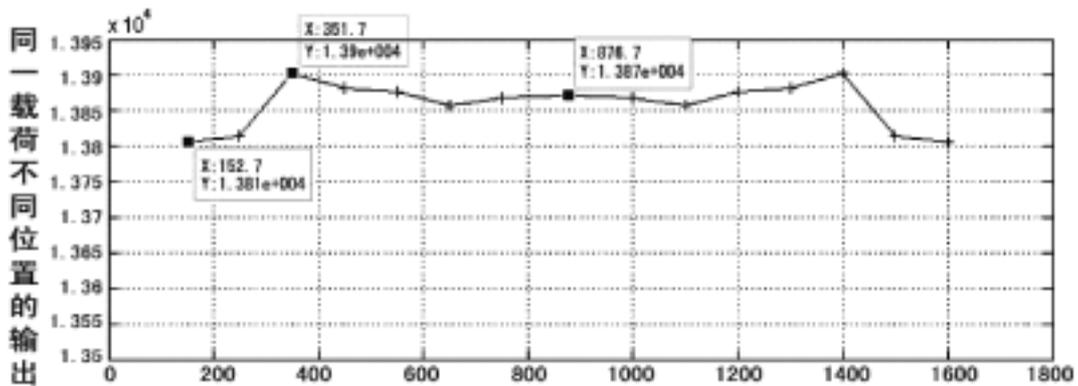
图 4 仿真模拟不同位置的输出

式 (2) 可以写为如下:

$$f(R_c, \varepsilon_{\text{补}}, \varepsilon_{\text{余}}) = \frac{2KU_0(R_c + R)}{(n+2)R_c + (n-2)R} \cdot \left(\frac{R_c}{R_c + R} \sum \varepsilon_{\text{补}} + \sum \varepsilon_{\text{余}} \right),$$

假设, 给定精度要求 $\text{Accuracy}=0.8\%$, 求解对于不同加载位置的每一组微应变 ε , 使得任意两个函数值之差 $\Delta f < \text{Accuracy}$, 可求得其中一个有效 $R_c=493\Omega$, 为了便于生产组织, 我们取标准色环电阻 470Ω 进行补偿。

在每一桥臂的起、始应变计上并联 R_c , 本例中即在桥臂上第 1、9 号应变计上并联补偿电阻, 在称重板从左至右 15 个位置上模拟加载 Q , 其仿真结果显示输出偏差 0.74% , 如图 5 所示。



称重板模拟加载中心

图 5 仿真结果的输出偏差

由图 5, 我们亦可以看到, 采用桥路补偿之后, 当载荷位于称重板中心位置时, 其输出比补偿前要增加, 并且, 当载荷位于称重板偏载位置时, 补偿点的输出将会被拉低。使得输出趋于一致, 验证了上述结论。同时可以看到由于我们实际补偿所用的 R_c 为 470Ω , 小于计算的理想阻值 493Ω , 所以在补偿点出现了过补偿现象, 见图 5 曲线。

机械补偿和桥路补偿后的称重板固定在平整的试验路面, 其上放置压头, 使用 8 吨重的标准砝码加载验证, 其偏载试验结果如下表 2, 补偿后的精度达到 0.69% 。

表 2 偏载试验结果

单位: kg

标准砝码	压头位置从中间至最右侧 (kg)							最大误差 (kg)	精度
	875mm	750mm	650mm	550mm	350mm	250mm	150mm		
8000kg	8000	7990	7990	8005	8025	7980	7970	55	0.69%

五、结论

通过对板式称重传感器的偏载成因分析,提出其可行的解决方案,并运用有限元法和数学仿真程序优化设计称重板弹性体结构,确定最优的贴片位置,并采用桥路补偿的方法提高板式称重传感器的横向灵敏度的一致性。仿真结果和实测输出验证了优化补偿方法的有效性,大幅提升了产品抗偏载性能,降低了产品成本。

板式称重传感器偏载补偿方法的应用将会为我国公路运输安全,尤其是高速公路超限超载治理提供性能更为优越、计量更为精确的产品,保证了执法的可靠和高效。

参考文献

- (1) 刘九卿,《国内外便携式电子轮重秤的发展概况》,《衡器》,2001, No.3。
- (2) 刘鸿文,《材料力学》第三版上册,高等教育出版社,1996, P322。
- (3) 李科杰,《新编传感器技术手册》,国防工业出版社,2002, P398。
- (4) 徐灏,《机械设计手册》第1卷,机械工业出版社,1994, P4-188。
- (5) 施汉谦,宋文敏,《电子秤技术》,中国计量出版社,1990。
- (6) 张志勇,《精通 matlab6.5 版》,北京航空航天大学出版社,2003。
- (7) Karl Hoffmann,《Applying the Wheatstone Bridge Circuit》,HBM,2005。
- (8) Simulation Projects,《Optimization Redesign》,2004。

作者简介

姓名: 谷建斌

单位和部门: 郑州恒科实业有限公司开发部

职称: 助理工程师

地址: 郑州市郑汴路45号

邮编: 450004

手机: 13838520979

座机: 0371-66315687 转 8311

Email: gx_yao@yahoo.com.cn cling_gu@yahoo.com.cn gx_yao@sina.com