

应变式称重传感器电路补偿与调整的理论基础

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】应变式称重传感器电路补偿与调整是研制与生产过程中的核心技术与关键制造工艺，科学、合理、可重复的电路补偿与调整工艺，是确保称重传感器准确度高、稳定性好的必要条件。本文从分析称重传感器电学原理的惠斯通电桥电路、圆柱式弹性元件的非线性误差入手，介绍了称重传感器零点温度补偿、零点输出调整、灵敏度温度补偿和线性补偿的理论基础，并推导出相应补偿电阻值的计算公式，为制定电路补偿与调整工艺提供依据。

【关键词】称重传感器；惠斯通电桥；电路补偿与调整；零点温度补偿；灵敏度温度补偿；线性补偿
文献标识码：B 文章编号：1003-1870（2023）04-0005-11

概述

应变式称重传感器按其外界信息和变换效应划分，它属于物理型传感器类别中的物性型传感器，是利用物理学中的物质定律——虎克定律构成的。任何应变式称重传感器最重要的机械部分是产生弹性变形的弹性元件，其功能是对作用载荷的反作用，同时把载荷的作用集中于一个独立的、最好是均匀的应力场内，使弹性元件应变区应力分布均匀，便于粘贴电阻应变计组成惠斯通电桥电路进行力-电转换。由于弹性元件的结构、机械加工和热处理的差异，电路元器件的性能不同，特别是环境温度变化的影响，而达不到设计准确度和稳定性的要求，因此还应实施相关的电路补偿与调整工艺，使其各项技术性能指标满足设计要求。这是研制与生产过程中的核心技术与关键工艺，它对企业生产出一贯符合称重传感器国家标准“高准确度”要求的产品至关重要。国内外处于市场引导者地位的企业，都对称重传感器的电路补偿与调整技术和工艺的研究有较大投入，研究出多项电路补偿与调整新技术、新工艺，并成功应用到批量生产工艺流程中，改善了称重传感器的温度性能，提高了准确度

和稳定性。其中以美国BLH公司研究实施的称重传感器灵敏度温度补偿技术与工艺；美国VISHAY公司研究的利用半导体应变计对称重传感器进行线性补偿的技术与工艺（美国专利No.3,034,346号）；德国PHILIPS公司研究的利用镍箔应变计对称重传感器进行线性补偿同时兼顾灵敏度温度补偿的技术与工艺；法国专利No.1204850利用非线性的盘状膜片进行线性补偿同时兼作横向力补偿技术与工艺最具代表性。这些新技术与新工艺在称重传感器制造工艺发展史上引起过较大变革，推动了称重传感器制造工艺技术的发展，时至今日，依然被世界各国称重传感器制造企业所应用。深入了解称重传感器电路补偿与调整中的零点温度补偿、零点输出调整、灵敏度温度补偿和线性补偿等机理，熟悉各类电路补偿电阻的计算公式和影响因素，并结合本企业生产工艺流程特点制定科学合理的各项电路补偿精度的内控指标，将其应用到各项温度补偿工艺中，对保证称重传感器制造工艺流程的稳定性，生产出力学性能、温度性能都符合称重传感器国家标准要求的“高准确度”产品具有一定的指导作用。

应变式称重传感器的工作原理可以从力学、

物理学和电学方面来理解。其力学原理是利用表示物质本身内在性质的虎克定律，它是表示称重传感器弹性元件所用金属材料客观性质的法则，即 $\sigma = E \varepsilon$ 。式中E为弹性元件材料的弹性模量，代表在外力作用下材料对弹性变形的抵抗能力，虎克定律的适用条件是应力不超过材料的比例极限。物理学原理是应变电阻转换原理，它是基于金属导线的应变电阻效应。若金属导线长度为L，截面积为A，电阻率为 ρ ，则电阻值为 $R = \rho \frac{L}{A}$ ，由此式可以推导出 $\frac{dR}{R} = K \varepsilon$ ，这就是“应变电阻效应”的表达式。式中K为电阻应变计敏感材料的灵敏系数，其物理意义为单位应变的电阻变化率。电学原理就是惠斯通电桥电路及其电路补偿与调整，这是本文重点讨论的内容。

1 应变式称重传感器电学原理

1.1 惠斯通电桥电路

应变式称重传感器由受力变形的弹性元件、粘贴在弹性元件上的电阻应变计和变换电路组成。被测量物体的重量作用在弹性元件上使其变形而产生应变，粘贴在弹性元件应变区上的电阻应变计将与物体重量成正比的应变转换为电阻变化。由于此电阻变化量是微小的，必须将其转换为电压变化才能进行测量，通常采用惠斯通电桥实现微小阻值变化的转换。惠斯通电桥是由粘贴在称重传感器弹性元件应变区上拉、压成双的四个电阻应变计 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 连成四边形组成的电路构成，通常称为惠斯通电桥电路。四边形电桥电路AC对角线连接直流电源，称为供桥端， U_i 称为供桥电压。BD对角线连接测量仪表，称为输出端， U_o 称为输出电压。惠斯通电桥的作用是将电桥四个臂上电阻变化转换成电压输出，测得此电压输出即可完成称重计量任务，这就是应变式称重传感器的电学原理。惠斯通电桥电路如图1所示。

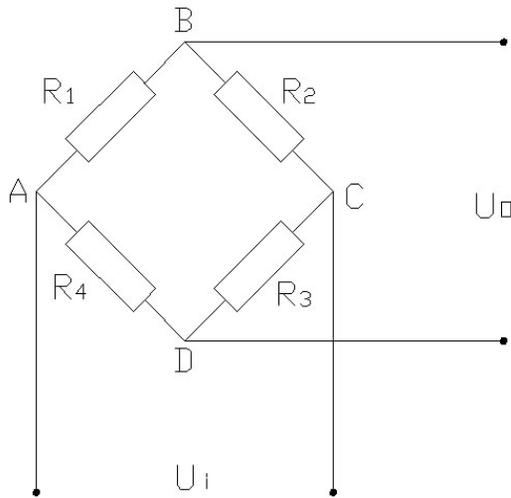


图1 惠斯通电桥电路

惠斯通电桥用于应变式称重传感器时有如下特点：起始状态（电桥四个臂的电阻未发生变化）时，输出电压 U_o 可以为零，工作时以输出电压从零开始的变化量 ΔU_o 反映电阻的变化量，可以达到较高的分辨率，对放大、显示、记录十分有利。温度变化等影响，通过全桥连接可以相互抵消。如果电阻应变计粘贴位置、方向和组焊电桥合理，可以消除或

减少偏心载荷、侧向载荷的影响；容易进行各项电路补偿与调整。应变式称重传感器多采用全桥式等臂电桥，在求电桥的输出电压时，通常把输入端看成是开路。

利用欧姆定律和克希霍夫定律，得

$$U_o = I_1 R_1 - I_2 R_4$$

$$\text{因为 } I_1 = \frac{U_i}{R_1 + R_2} \quad ; \quad I_2 = \frac{U_i}{R_3 + R_4}$$

$$\text{所以 } U_0 = \frac{R_1 U_i}{R_1 + R_2} - \frac{R_4 U_i}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_i \quad (1)$$

下面讨论应变式称重传感器常用的全桥式等臂电桥的线性度。设惠斯通电桥各桥臂电阻的初始值为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，因此满足平衡条件，电桥处于初始平衡状态。当电桥四个桥臂的电阻分别变化为 $R + \Delta R_1$ 、 $R + \Delta R_2$ 、 $R + \Delta R_3$ 、 $R + \Delta R_4$ 时，代入式 (1) 可得：

$$U_0 = \frac{(R + \Delta R_1)(R + \Delta R_3) - (R + \Delta R_2)(R + \Delta R_4)}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4)} U_i$$

为便于分析，将上式展开省略最小项，分子分母同除以 R_2 则为：

$$U_0 = \frac{U_i}{4} \cdot \frac{\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R}}{\left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) \right]} \quad (2)$$

因为称重传感器是采用相同型号、相同规格的电阻应变计，其电阻变化与各应变之间的关系为：

$$\frac{\Delta R_1}{R} = K \varepsilon_1 \quad \frac{\Delta R_3}{R} = K \varepsilon_3 \quad \frac{\Delta R_2}{R} = K \varepsilon_2 \quad \frac{\Delta R_4}{R} = K \varepsilon_4$$

代入 (2) 式可得：

$$U_0 = U_i K \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4}{4 \left[1 + \frac{K}{2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \right]} \quad (3)$$

式 (3) 说明：在一般情况下，恒压电桥的输出电压与弹性元件上应变之间是非线性关系，这样，载荷与输出电压之间也呈非线性关系。只有使弹性元件上电阻应变计的粘贴定位和惠斯通电桥接线满足下列要求，即

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\varepsilon \quad (4)$$

式 (3) 中的 $\frac{K}{2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) = 0$

则式 (3) 即变为：

$$U_0 = \frac{U_i K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5)$$

式中： U_0 ——电桥电路的输出电压；

U_i ——电桥电路的输入电压；

K ——电阻应变计的灵敏系数；

$\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$ ——电阻应变计 $R_1 \sim R_4$ 的应变变量。

式 (5) 说明，只要弹性元件上安装的电阻应变计所感受的应变值满足式 (4) 的要求时，电桥的输出电压与弹性元件的应变呈线性关系。因此，要求粘贴在称重传感器弹性元件应变区上的四片（或 8 片）电阻应变计所感受的应变值，拉伸与压缩应变大小相等且方向相反，即对称成双。此要求只是理论上的，在设计与生产实践中很难做到，只要尽量接近即可。

为了得到较大的输出电压 U_0 ，可采取如下措施：增大电桥电压 U_i ，但应变计的工作电流也大，将使称重传感器产生蠕变和零漂，因此，不要超过电阻应变计的最大工作电流。对于全等臂电桥，其最大桥压为：

$$U_{i(\max)} = 2RI_{\max} \quad (6)$$

式中： R ——电桥的单臂电阻，即电阻应变计电阻；

I_{\max} ——电阻应变计的最大工作电流。

例如 $I_{\max} = 20\text{mA}$

则 $U_{i(\max)} = 2 \times 350 \times 0.02 = 14\text{V}$

通过增大桥臂电阻或减小通过应变计的电流；增大应变计的灵敏系数 K 值；在弹性元件上粘贴应变计及组焊电桥时，应使应变 ε_1 、 ε_3 和 ε_2 、 ε_4 的符号相反，这样式 (5) 中分子值就大，从而提高了称重传感器的输出。

1.2 惠斯通电桥的灵敏度

电桥的输出电压与被测应变在电桥一个桥臂上引起的电阻变化率之间的比值，称为电桥的灵敏度 S_u ，即：

$$S_u = \frac{\Delta U}{\Delta R} = \frac{U_0 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}{\frac{\Delta R}{R}}$$

令

$$n = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}}{\frac{\Delta R}{R}}$$

则

$$S_u = n \frac{U_0}{4} \quad (7)$$

式中 n 为电桥的工作臂系数。

四臂工作电桥为全桥差动电路。R₁、R₂、R₃、R₄皆为工作臂，其电阻增量

$$\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R; \Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R$$

则(3)式变为:

$$\begin{aligned} \Delta U_0 &= \frac{U_0}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \\ &= 4 \left[\frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \right] = 4 \left[\frac{U_0}{4} K\varepsilon \right] \end{aligned} \quad (8)$$

同理可推导出单臂工作电桥的输出电压为:

$$\Delta U = \frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U_0}{4} K\varepsilon$$

双臂工作电桥(通常称为半桥)的输出电压为:

$$\Delta U_0 = 2 \left[\frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \right] = 2 \left[\frac{U_0}{4} K\varepsilon \right]$$

由式(8)可知,全桥(四臂工作电桥)输出电压是双臂工作电桥的2倍,单臂工作电桥的4倍。电桥的工作臂系数越大,则电桥的灵敏度越高,因此可以利用电桥的加减特性合理组桥。应变式称重传感器之所以采用全桥式等臂电桥,其原因是电桥的工作臂系数n=4,电桥的灵敏度最高,电桥四个桥臂参数一致,各种干扰造成的影响容易相互抵消。

2 称重传感器零点温度补偿机理

环境温度变化对称重传感器零点输出的影响主要是产生零点温度漂移。称重传感器在无外载荷作

用时的输出称为零点输出,此输出随温度变化而变化称为零点温度漂移。影响零点温度漂移的因素很多,归纳起来主要有:弹性元件、电阻应变计、应变胶粘剂的线膨胀系数、弹性元件的纵向和横向膨胀率不同,在环境温度发生变化时都会产生不同程度的热胀冷缩,使电阻应变计敏感栅伸长或缩短引起电阻变化。电阻应变计敏感栅材料的电阻温度系数不为零,各电阻应变计之间又有一定的分散度,而敏感栅材料的电阻率也随环境温度的变化而变化,这都会引起电阻值的改变等。上述因素的影响将使称重传感器产生较大的零点温度漂移,就是采用温度自补偿电阻应变计,由于其特性的分散以及粘贴、加压、固化等工艺影响,仍不能全部抵消引起零点温度漂移的各因素,因此就必须对称重传感器逐个进行零点温度补偿。

上述引起零点温度漂移各种因素的综合影响,都可以看成是组成惠斯通电桥各桥臂电阻应变计的电阻温度系数不一致而造成的。如果能使组成惠斯通电桥各桥臂电阻应变计的电阻温度系数一致或非常接近,就可以消除或最大限度地减小零点温度漂移。根据这一理论,首先要找出惠斯通电桥中电阻温度系数小的桥臂,以便在其上串入一个电阻温度系数大的零点温度补偿电阻R_t,以提高此桥臂总的电阻温度系数,使惠斯通电桥各桥臂的电阻温度系数一致或接近,就可抵消零点温度漂移的影响,其零点温度补偿电路如图2所示。

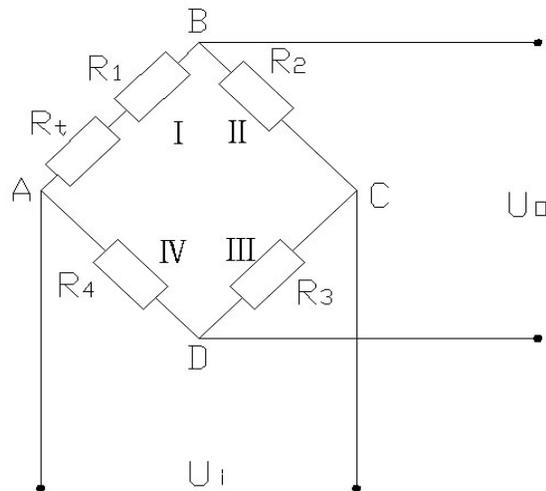


图2 零点温度补偿电路

通过理论计算可以求出零点温度补偿电阻值。设电桥各桥臂电阻均为R，若常温 t_0 时，温度补偿电阻为 R_t ，在高温 t_2 时， R_t 增加了 ΔR_t ，则

$$\Delta R_t = R_t \alpha (t_2 - t_0) \quad (9)$$

式中 α 为温度补偿电阻 R_t 的电阻温度系数。

在进行常温、高温试验测试时，高温 t_2 时的输出电压为 U_2 ，常温 t_0 时的输出电压为 U_0 ，设温度补偿电阻 R_t 串入I桥臂。

根据电桥输出电压公式，可求出串入温度补偿电阻 R_t 后，常温 t_0 到高温 t_2 的输出变化为：

$$\Delta U = U_2 - U_0 = \frac{R(R + \Delta R_t) - R^2}{(R + \Delta R_t + R)2R} \cdot U_i = \frac{\Delta R_t}{4R + 2\Delta R_t} \cdot U_i$$

移项

$$4R(U_2 - U_0) + 2\Delta R_t(U_2 - U_0) = \Delta R_t \cdot U_i$$

$$\Delta R_t = \frac{4R(U_2 - U_0)}{U_i - 2(U_2 - U_0)}$$

因 $2(U_2 - U_0) < U_i$ ，可忽略不计，则

$$\Delta R_t = \frac{4R(U_2 - U_0)}{U_i} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)，得

$$R_t \alpha (t_2 - t_0) = \frac{4R(U_2 - U_0)}{U_i}$$

则

$$R_t = \frac{4R(U_2 - U_0)}{\alpha U_i (t_2 - t_0)}$$

由于 U_2 、 U_0 均以毫伏为单位，所以将 U_i 变为毫伏单位，得

$$R_t = \frac{4R(U_2 - U_0)}{1000\alpha U_i (t_2 - t_0)} = \frac{R(U_2 - U_0)}{250\alpha U_i (t_2 - t_0)} \quad (\Omega) \quad (11)$$

式(11)就是因环境温度变化对称重传感器产生的零点温度漂移进行补偿的电阻值。

称重传感器零点温度补偿所用的电阻丝或金属箔式电阻片，实际上是一种热敏电阻元件，应尽量满足如下条件：温度系数大、热响应快，具有良好的线性和电阻—温度特性，优良的焊接性能。国内外多选用电阻温度系数较大的铜、镍和钴镍合金作为零点温度补偿电阻。

3 电桥电路零点输出调整机理

应变式称重传感器采用惠斯通全桥等臂电桥电路，由上述推导的公式知输出电压为：

$$U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_i$$

式中： R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ——称重传感器惠斯通电桥四个桥臂的电阻；

U_i ——电桥的激励电压。

由输出电压公式可以得出惠斯通电桥的平衡条件，（即 $U_0=0$ ）为：

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad \text{或} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

电阻应变计制造工艺决定了其电阻值必然有一定的分散度，使粘贴在同一个弹性元件上的电阻应变计的电阻值完全相同是不可能的，而且在粘贴、加压和固化工艺过程中电阻值还会发生变化。这就造成了组成电桥四个桥臂的电阻应变计的电阻值不同，甚至相差较大，造成称重传感器在无外载荷作用时产生较大的零点输出。这不仅给生产工艺流程中各项工序作业带来较大困难，而且在使用过程中也不便于称重显示控制仪表调零，还会增大测量误差。为使零点输出接近于零，或按照国标要求控制在 $\pm 1\%$ 额定输出范围内，必须对称重传感器逐个进行零点输出调整。其调整的方法是在无外载荷作用时，测量出零点输出值，根据零点输出值的极性和大小，判断零点输出调整电阻 R_z 应该串入哪个桥臂，串入多少电阻才能使电桥处于平衡状态。零点输出调整电路如图3所示。

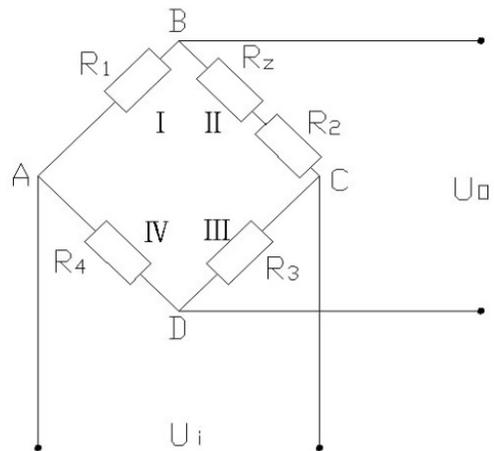


图3 零点输出调整电路

设称重传感器惠斯通电桥各桥臂电阻为： $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ 。

若调整前称重传感器的零点输出 $U_0>0$ ，则 $R_1R_3-R_2R_4>0, R_1R_3>R_2R_4$ ，零点温度补偿电阻 R_z 应串入电桥的 I、III 桥臂，调整后的零点输出为 U_0' 。

根据惠斯通电桥输出电压公式，零点输出的变化为：

$$\Delta U = U_0 - U_0' = \frac{(R + R_z)R - R^2}{(R + R_z + R)2R} \cdot U_i = \frac{R_z}{4R + 2R_z} U_i$$

移项

$$4R(U_0 - U_0') + 2R_z(U_0 - U_0') = R_z U_i$$

则

$$R_z = \frac{4R(U_0 - U_0')}{U_i - 2(U_0 - U_0')}$$

因 $2(U_0 - U_0') < U_i$ ，可忽略不计，补偿时一般都使 $U_0' = 0$ ，

则

$$R_z = \frac{4RU_0}{U_i}$$

由于调整前实测的零点输出电压 U_0 为毫伏单位，而供桥电压 U_i 是以伏为单位，所以上式变为：

$$R_z = \frac{4RU_0}{1000U_i} = \frac{RU_0}{250U_i} \quad (\Omega) \quad (12)$$

式中： R_z ——零点输出调整电阻的阻值（ Ω ）；

R ——电桥每个桥臂的阻值（ Ω ）；

U_0 ——调整前实测的零点输出电压（mV）；

U_i ——电桥的激励电压（V）。

由于零点输出调整电阻 R_z 是串联在电桥的桥臂上，因此对其精度和稳定性 ρ 要求比较严格，主要是电阻率 ρ 要高，电阻温度系数 α 要小，应变灵敏度系数 K 要低。

4 称重传感器灵敏度温度补偿机理

4.1 灵敏度温度补偿机理

作为称重传感器敏感器件的弹性元件所用金属材料多为合金钢或不锈钢，其弹性模量 E 的温度系数 β_E 为负值，所以当环境温度升高时，弹性元件材料的弹性模量 E 降低，称重传感器的灵敏度增大，其影响量即称重传感器的灵敏度温度误差可达（0.03 ~ 0.05）%FS/°C。称重传感器在使用过程中，温度每变化10°C，灵敏度就变化0.3% ~ 0.5%，这是非常可观的误差。

国内外称重传感器制造企业大量的试验测量数据证明，对同一种弹性元件结构而言，只要金属材料、电阻应变计和制造工艺不变，灵敏度温度误差的分散度比较小，一般小于10%，这主要是制造和补偿工艺引起的。由此不难得出，称重传感器输出灵敏度的温度误差是可以通过灵敏度温度补偿进行控制，以满足技术性能要求。如果在称重传感器灵敏度增大的同时，使电桥电路的实际供桥电压也与之成比例地减小，保持供桥电压与实际供桥电压的比值不变，则灵敏度也就保持不变，这就是灵敏度温度补偿原理。根据这一原理，在电桥的供桥回路中，串联一个随环境温度变化而变化的灵敏度温度补偿电阻 R_{Mt} ，当环境温度升高时， R_{Mt} 随之增大，尽管供桥电压 U_i 保持不变，由于电阻分压作用，使电桥的实际供桥电压 U_{AC} 减小，从而导致灵敏度减小，这就对因温度升高弹性模量降低、灵敏度增大起到补偿作用。灵敏度温度补偿电路如图4所示， R_p 为 R_M 的线性化调整电阻。

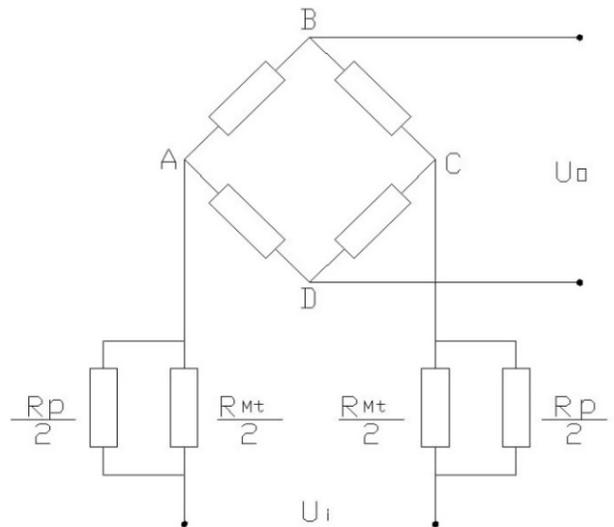


图4 灵敏度温度补偿电路

根据灵敏度温度补偿电路推导补偿电阻 R_{Mt} 的计算公式。设在常温 t 时，灵敏度温度补偿电阻为 R_{Mt} ，将其串联在电桥的供桥回路后，电桥的实际供桥电压 U_{AC1} 为：

$$U_{AC1} = \frac{R_{AC}}{R_{AC} + R_{Mt}} \cdot U_i \quad (13)$$

在高温 t_2 时，常温下的补偿电阻 R_{Mt} 随着温度的升高而增大，变为 R_{M2} ，电阻 R_{AC} 增加为 R_{AC2} ，则

$$R_{M2} = R_{Mt}[1 + \alpha_M(t_2 - t)]$$

$$R_{AC2} = R_{AC}[1 + \alpha_R(t_2 - t)] \quad (14)$$

式中: α_M ——电阻材料的电阻温度系数;
 α_R ——电阻应变计的电阻温度系数。
 此时,电桥的实际供桥电压为:

$$U_{AC2} = \frac{R_{AC2}}{R_{AC2} + R_{M2}} \cdot U_i \quad (15)$$

将式(14)代入式(15),得:

$$U_{AC2} = \frac{R_{AC}[1 + \alpha_R(t_2 - t)]U_i}{R_{AC}[1 + \alpha_R(t_2 - t)] + R_{Mt}[1 + \alpha_M(t_2 - t)]} \quad (16)$$

设常温 t 时,灵敏度为 S_1 ,串入 R_{Mt} 后灵敏度为 S'_1 ;
 高温 t_2 时灵敏度为 S_2 ,串入 R_{Mt} 后灵敏度为 S'_2 ,则

$$\frac{U_i}{U_{AC1}} = \frac{S_1}{S'_1} \quad \frac{U_i}{U_{AC2}} = \frac{S_2}{S'_2}$$

所以

$$S'_1 = \frac{S_1 \cdot U_{AC1}}{U_i} \quad S'_2 = \frac{S_2 \cdot U_{AC2}}{U_i}$$

由于 R_{Mt} 的补偿作用,使 $S'_1 = S'_2$,即

$$\frac{S_1 \cdot U_{AC1}}{U_i} = \frac{S_2 \cdot U_{AC2}}{U_i}$$

$$S_1 U_{AC1} = S_2 U_{AC2} \quad (17)$$

将式(13)、(16)代入式(17),得:

$$S_1 \frac{R_{AC} U_i}{R_{AC} + R_{Mt}} = S_2 \frac{R_{AC}[1 + \alpha_R(t_2 - t)]U_i}{R_{AC}[1 + \alpha_R(t_2 - t)] + R_{Mt}[1 + \alpha_M(t_2 - t)]}$$

$$S_1 R_{AC}[1 + \alpha_R(t_2 - t)] + R_{Mt}[1 + \alpha_M(t_2 - t)]$$

$$= S_2 R_{AC}[1 + \alpha_R(t_2 - t)] + S_2 R_{Mt}[1 + \alpha_M(t_2 - t)]$$

将上式除以 $1 + \alpha_R(t_2 - t)$ 则

$$S_1 R_{AC} + S_1 R_{Mt} \frac{1 + \alpha_M(t_2 - t)}{1 + \alpha_R(t_2 - t)} = S_2 R_{AC} + S_1 R_{Mt}$$

$$R_{Mt} \left[S_1 \frac{1 + \alpha_M(t_2 - t)}{1 + \alpha_R(t_2 - t)} S_1 - S_2 \right] = (S_2 - S_1) R_{AC} \alpha$$

所以

$$R_{Mt} = \frac{(S_2 - S_1) R_{AC}}{\frac{1 + \alpha_M(t_2 - t)}{1 + \alpha_R(t_2 - t)} S_1 - S_2} \quad (18)$$

由于粘贴在弹性元件上电阻应变计的电阻温度系数 α_R 很小,例如康铜箔式电阻应变计的

$\alpha_R = 0.00002/^\circ\text{C}$, 远远小于电阻材料的电阻温度系数 α_M , 可以忽略不计, 则式(18)可以简化为:

$$R_{Mt} = \frac{(S_2 - S_1) R_{AC}}{[1 + \alpha_M(t_2 - t)] S_1 - S_2} \quad (19)$$

式中: S_1 ——常温 t 时的输出灵敏度;

S_2 ——高温 t_2 时的输出灵敏度;

R_{AC} ——电桥AC间的电阻;

α_M ——灵敏度温度补偿镍电阻 R_{Mt} 的温度系数。

4.2 灵敏度温度补偿电阻 R_{Mt} 温度系数的影响

灵敏度温度补偿电阻 R_{Mt} 的温度系数对称重传感器温度特性的影响也不能忽视。根据灵敏度温度补偿原理, 当环境温度变化 Δt 时, 灵敏度温度补偿电阻 R_{Mt} 发生变化, 由于电阻分压作用导致 U_{AC} 发生变化, 使称重传感器的输出由 U_0 变为 U_{0t} , 两者存在下列关系:

$$\frac{U_0}{U_{AC}} = \frac{U_{0t}}{U_t}$$

$$U_{0t} = \frac{U_0}{U_{AC}} \cdot U_t \quad (20)$$

利用欧姆定律和克希霍夫定律, 有

$$U_{AC} = \frac{R_i}{R_i + R_{Mt}} \cdot U_i \quad (21)$$

$$U_t = \frac{R_i}{R_i + R_{Mt} + R_{Mt} \alpha_t \Delta t} \cdot U_i \quad (22)$$

将式(21)、(22)代入式(20), 得

$$U_{0t} = U_0 \frac{R_i + R_{Mt}}{R_i + R_{Mt} + R_{Mt} \alpha_t \Delta t} \quad (23)$$

式中: R_i ——补偿前的输入电阻;

R_{Mt} ——灵敏度温度补偿电阻;

α_t —— R_{Mt} 的电阻温度系数;

Δt ——温度变化;

U_0 ——补入 R_{Mt} 后的室温输出值。

R_{Mt} 随温度变化后, 其输出变化为:

$$\Delta U = U_{0t} - U_0$$

$$= \frac{R_i + R_{Mt}}{R_i + R_{Mt} + R_{Mt} \alpha_t \Delta t} \cdot U_0 - U_0$$

$$= \frac{-R_{Mt} \alpha_t \Delta t}{R_i + R_{Mt} + R_{Mt} \alpha_t \Delta t} \cdot U_0 \quad (24)$$

当 U_0 达到额定输出 U_n 时, 即 $U_0 = U_n$, 此时 R_{Mt} 的变化对灵敏度温度补偿的影响为:

$$\begin{aligned} \Delta S_t &= \frac{\Delta U_0}{U_n \cdot \frac{\Delta t}{10}} \times 100\% = \frac{\Delta U_0}{U_0 \cdot \frac{\Delta t}{10}} \times 100\% FS/10^0 C \\ &= -\frac{10R_M \alpha_t}{R_t + R_{M_t} + M \alpha_t \Delta t} \times 100\% FS/10^0 C \quad (25) \end{aligned}$$

式(25)说明, R_{M_t} 的电阻温度系数 α_t , 是称重传感器温度特性的主要影响因素。

5 称重传感器线性补偿机理

不是所有称重传感器都需要进行线性补偿, 此项补偿只适用于各项指标都符合要求, 唯独线性误差超标的称重传感器, 例如圆柱式、方柱式、圆筒式弹性元件结构。引起此类弹性元件输出与所测量载荷之间不成线性关系的因素主要有: 电桥电路的非线性误差、应变区面积效应影响、电阻应变计的非线性误差等。

5.1 圆柱式称重传感器非线性误差分析

5.1.1 电桥电路的非线性误差

圆柱式称重传感器弹性元件电阻应变计粘贴位置和电桥电路如图5、图6所示。

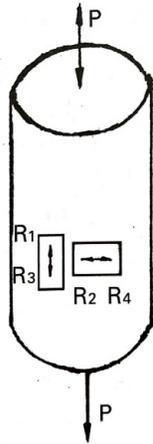


图5 电阻应变计粘贴位置图

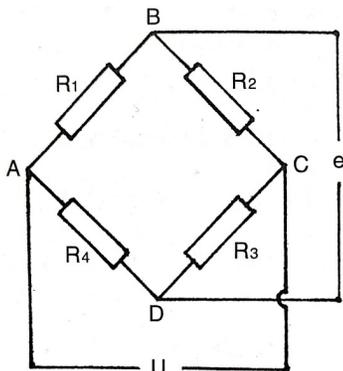


图6 电桥电路图

设各桥臂的电阻值相等, 即 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ 。当圆柱式弹性元件承受拉伸载荷作用时, 应变区产生轴向拉伸应变, 横向压缩应变, 使电桥四个桥臂的电阻发生变化, 即

$$\begin{aligned} R_1 &= R_3 = R(1 + \delta) \\ R_4 &= R_2 = R(1 - \mu \delta) \end{aligned} \quad (26)$$

根据电桥原理, 输出电压是 U_{DC} 与 U_{BC} 之间的差, 则

$$e = U_{DC} - U_{BC} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U - \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (27)$$

电桥的相对输出, 即称重传感器的灵敏度为:

$$S = \frac{e}{U} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (28)$$

将式(26)代入式(28)

$$S = \frac{R(1+\delta)}{R(1+\delta)+R(1-\mu\delta)} - \frac{R(1-\mu\delta)}{R(1+\delta)+R(1-\mu\delta)} = \frac{\delta(1+\mu)}{2+\delta(1-\mu)} \quad (29)$$

式中: δ ——电桥各桥臂电阻的变化量;

$$\text{即} \quad \delta = \frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} = K \varepsilon$$

μ ——弹性元件材料的泊松比, $\mu = 0.28$;

K ——电阻应变计的灵敏系数。

设: $\mu = 0.28$, $K = 2$, 则式(29)变为:

$$S = \frac{e}{U} = \frac{K\varepsilon(1+\mu)}{2+K\varepsilon(1-\mu)} = \frac{2\varepsilon(1+0.28)}{2+2\varepsilon(1-0.28)} = 1.28\varepsilon \frac{1}{1+0.72\varepsilon} \quad (30)$$

将式(30)用级数展开, 并省略高次项, 得

$$S = \frac{e}{U} = 1.28\varepsilon(1 - 0.72\varepsilon) \quad (31)$$

从式(31)可以看出, 电桥的相对输出与应变之间是非线性关系, 只有在 ε 足够小时, 电桥输出才与应变呈线性关系, 即

$$S = \frac{e}{U} = 1.28\varepsilon \quad (32)$$

比较(31)、(32)两式, 其非线性误差为:

$$\Delta_1 = \frac{1.28\varepsilon - 1.28\varepsilon(1 - 0.72\varepsilon)}{1.28\varepsilon} = 0.72\varepsilon \quad (33)$$

5.1.2 面积效应引起的非线性误差

圆柱式弹性元件受拉伸载荷时刚度连续减小, 承受压向载荷时的刚度连续增大, 这一论点是基于弹性模量保持恒定并与同时发生的密度变化无关的假设。然而, 实际上是受拉时弹性模量稍稍减小, 受压时弹性模量稍稍增大, 结果使得面积效应响应更加严重。虽然弹性模量的这种变化很小, 以至于

在一般材料性能试验中难以检测出来，但从现代称重传感器的准确度等级来说，其影响仍然是显著的。即使不考虑弹性模量随应力的变化，我们至少可以估算出由于面积变化引起的非线性误差。

设圆柱式弹性元件的轴向应力 σ ，轴向应变 ε ，初始截面积 A_0 与载荷 P 的关系为：

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad \sigma_0 = \frac{\sigma}{E}$$

则轴向应变为：

$$\varepsilon_0 = \frac{P}{A_0 E} \quad (34)$$

圆柱式弹性元件受拉向载荷作用时，截面积减小，受压向载荷作用时，截面积增大。由于泊松比的影响，轴向与径向应变相差较大，其径向应变为 $\varepsilon_r = \mu\varepsilon_0$ 。利用此轴向、径向应变组成电桥电路输出较小，为了提高灵敏度就必须增大应变变量，从而产生较大的非线性误差。这是因为在 $P-\varepsilon$ 函数中，当载荷 P 增大时，产生了非常量因子。对于半径为 r 的弹性元件，受压向载荷作用后应变区截面积产生增量。 $\varepsilon_r = \mu\varepsilon_0$ 可视为半径 R 的增量，则

$$\Delta A = \pi(r + \mu\varepsilon_0)^2 - \pi r^2 = 2\pi r\mu\varepsilon_0 + \pi\mu^2\varepsilon_0^2$$

略去高次项，得

$$\Delta A = 2\pi r\mu\varepsilon_0$$

弹性元件受载后的面积为：

$$A = A_0 + \Delta A = A_0 + 2\pi r\mu\varepsilon_0 \approx A_0(1 + 2\mu\varepsilon_0) \quad (35)$$

此时弹性元件的轴向应变为：

$$\varepsilon = \frac{P}{EA} = \frac{P}{EA_0(1+2\mu\varepsilon_0)} = \frac{P(1-2\mu\varepsilon_0)}{EA_0[1-(2\mu\varepsilon_0)^2]} \quad (36)$$

省略式(36)中的高次项，得

$$\varepsilon = \frac{P}{EA}(1 - 2\mu\varepsilon_0) \quad (37)$$

将式(34)代入式(37)得：

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 - 2\mu\varepsilon_0) \quad (38)$$

将式(38)变为：

$$\varepsilon_0^2 - \frac{\varepsilon_0}{2\mu} + \frac{\varepsilon}{2\mu} = 0$$

解此方程式，得 $\varepsilon_0 \approx \varepsilon - 2\mu\varepsilon^2$

同理对于承受拉向载荷有 $\varepsilon_0 \approx \varepsilon + 2\mu\varepsilon^2$

圆柱式弹性元件面积效应引起的非线性误差，

对于拉向载荷为：

$$\Delta_2 = \frac{(\varepsilon + 2\mu\varepsilon^2) - \varepsilon}{\varepsilon} = 2\mu\varepsilon = 0.56\varepsilon$$

对于压向载荷为：

$$\Delta_2 = \frac{(\varepsilon - 2\mu\varepsilon^2) - \varepsilon}{\varepsilon} = -2\mu\varepsilon = -0.56\varepsilon$$

当圆柱式弹性元件的轴向应变每变化 $100\mu\varepsilon$ 时，面积变化所引起的非线性约为 0.003% 。

5.1.3 电阻应变计的非线性误差

人们通常认为，粘贴在称重传感器弹性元件上的电阻应变计在弹性元件变形时产生的应变值与电阻的相对变化量成严格的线性关系，实践证明这种认识是不全面的，它只是在一定的应变范围内才保持线性关系。当电阻应变计承受较大的应变变量时，应变值与电阻变化量的非线性关系便突出地表现出来，应变变量越大，非线性误差越大。由于圆柱式弹性元件结构轴向应变值与横向应变值相差很大，为了提高输出灵敏度，必须提高电阻应变计的应变变量，必然引起较大的非线性误差。

电阻应变计灵敏系数 K ，是电阻应变计在轴线方向上的单向应力作用下电阻的相对变化 dR/R 与轴向应变 dL/L 的比值，即

$$K = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}}$$

$$\text{则} \quad \frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L} \quad (39)$$

式中： dR ——电阻应变计敏感栅电阻 R 的微量变化；

dL ——电阻应变计敏感栅长度 L 的微量变化。

对式(39)两边积分

$$\int_{R_0}^{R_0+\Delta R} \frac{dR}{R} = \int_{L_0}^{L_0+\Delta L} K \frac{dL}{L}$$

$$[\ln R]_{R_0}^{R_0+\Delta R} = K[\ln L]_{L_0}^{L_0+\Delta L}$$

$$\ln(R_0 + \Delta R) - \ln R_0 = K[\ln(L_0 + \Delta L) - \ln L_0]$$

$$\ln\left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0}\right) = K \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right)^K$$

$$\text{故} \quad \frac{R_0 + \Delta R}{R_0} = \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right)^K$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right)^K - 1 \quad (40)$$

将式(40)第一项用级数展开,得

$$\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)^K = 1 + K \frac{\Delta L}{L_0} + \frac{K(K-1)}{2!} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)^2 + \frac{K(K-1)(K-2)}{3!} \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)^3 + \dots \quad (41)$$

将式(41)代入式(40),整理后得:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon + \frac{K(K-1)\varepsilon^2}{2!} + \frac{K(K-1)(K-2)\varepsilon^3}{3!} \quad (42)$$

从式(42)可以看出,电阻应变计电阻值的相对变化 $\Delta R/R$ 与应变 ε 呈非线性关系。只有在第二项以后可以忽略不计时,电阻的相对变化与应变才近似为线性关系,即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (43)$$

由式(42)、(43)可以求出电阻应变计的非线性误差为:

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= \frac{K\varepsilon - \left[K\varepsilon + \frac{K(K-1)\varepsilon^2}{2!} + \frac{K(K-1)(K-2)\varepsilon^3}{3!} \right]}{K\varepsilon} \\ &= - \left[\frac{K-1}{2!} \varepsilon + \frac{(K-1)(K-2)}{3!} \varepsilon^2 \right] \end{aligned} \quad (44)$$

因为弹性元件所用金属材料在塑性范围内的应变只有百分之几的量级,故式(44)中的高次项可以忽略不计,则 Δ_3 的绝对值为:

$$\Delta_3 = \frac{K-1}{2!} \varepsilon \quad (45)$$

由式(45)知,设计高精度称重传感器,必须严格控制弹性元件特别区的应变值。若要将 Δ_3 控制在0.05%以内,利用式(43)可以减少出在此误差下的应变值,即

$$\varepsilon = \frac{2\Delta_3}{K-1} = \frac{2 \times 0.0005}{2-1} = 0.001 = 1000 \times 10^{-6}$$

5.2 称重传感器线性补偿机理

对于具有上述固有线性差的圆柱式称重传感器必须进行线性补偿,国内外称重传感器制造企业多采用以下两种线性补偿方法:批量生产时需逐个在称重传感器上进行补偿;单个使用时可在称重仪表上采取措施进行线性补偿。

圆柱、圆筒式称重传感器在承受压向载荷时,其输出都成递减的抛物线,可通过改变电桥电路的实际供桥电压,来调整输出值进行线性补偿,以达到提高线性度的目的。为此在圆柱式弹性元件应变区内位于电阻应变计的上方,沿轴线方向对称的粘

贴2片线性补偿电阻应变计 R_L ,并将它串联在电桥的供桥电路中。当圆柱式弹性元件承受压向载荷时,非线性补偿电阻应变计因承受压向应变而使电阻值减小,电桥的供桥电压 U_i 恒定不变,根据电阻分压原理,线性补偿电阻 R_L 减小,使得电桥的实际供桥电压 U_{AC} 增大。随着外载荷逐渐增大,非线性补偿电阻 R_L 不断减小,实际供桥电压 U_{AC} 不断增加,使电桥输出呈递增的抛物线。由前面的分析知,圆柱式称重传感器的非线性误差是递减的抛物线,非线性补偿后,电桥输出的递减和递增互补,而使实际输出近似为直线,达到线性补偿的目的。称重传感器的线性补偿电路如图7所示。

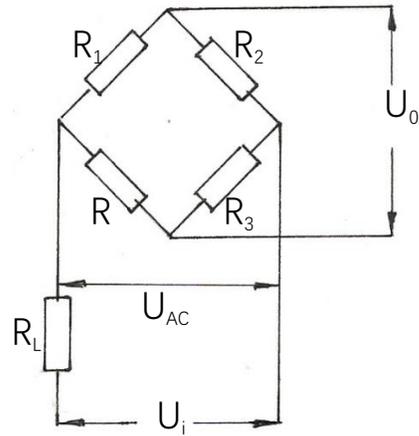


图7 线性补偿电路

在接入线性补偿电阻 R_L 的电桥电路中,实际供桥电压 U_{AC} 与电桥恒定电压 U 存在下列关系:

$$\frac{U_{AC}}{U} = \frac{1}{1 + \frac{R_L}{R}} \quad (46)$$

式中: U_{AC} ——电桥的实际供桥电压;

U ——电桥的恒定供桥电压;

R_L ——线性补偿电阻;

R ——电桥的桥臂电阻。

因为线性补偿电阻 R_L 粘贴在轴向应变为 ε 的弹性元件上,故

$$\frac{\Delta R_{L0}}{R_{L0}} = K_L \varepsilon = K_L \varepsilon_0 X \quad (47)$$

式中: K_L ——线性补偿应变计的灵敏系数;

ε_0 ——载荷 P_0 时线性补偿电阻 R_L 承受的应变;

X ——载荷 P 时线性补偿电阻 R_L 承受的应变(表示为满载荷时应变的百分比)。

$$R_L = R_{L0} \left(1 + \frac{\Delta R_{L0}}{R_{L0}} \right) = R_{L0} (1 + K_L \varepsilon_0 X) \quad (48)$$

将式(46)代入式(48),得

$$\frac{U_{AC}}{U} = \frac{1}{1 + \frac{R_{L0}}{R} (1 + K_L \varepsilon_0 X)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_{L0}}{R} \right) + \frac{R_{L0}}{R} K_L \varepsilon_0 X}$$

将上式分母最后一项的分子、分母同乘以 $(1 + R_{L0}/R)$, 经运算整理得:

$$\frac{U_{AC}}{U} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_{L0}}{R} \right) \left(1 + \frac{K_L \varepsilon_0 X}{1 + \frac{R_{L0}}{R}} \right)} \quad (49)$$

将需要补偿的非线性表示为:

$$\frac{e}{U_{AC}} = aX(1 + bX) \quad (50)$$

由式(49)、(50)可以得出电桥的相对输出, 即称重传感器的灵敏度为:

$$S = \frac{e}{U} = \frac{aX(1+bX)}{\left(1 + \frac{R_{L0}}{R} \right) \left(1 + \frac{K_L \varepsilon_0 X}{1 + \frac{R_{L0}}{R}} \right)} \quad (51)$$

$$\text{令 } b = \frac{K_L \varepsilon_0}{1 + \frac{R_{L0}}{R}}$$

则式(49)变为:

$$S = \frac{e}{U} = \frac{aX}{1 + \frac{R_{L0}}{R}} \quad (52)$$

此时, 圆柱式称重传感器的输出便是线性了,

其代价是输出要降低一个系数C, 即 $C = \frac{1}{1 + \frac{R_{L0}}{R}}$

非线性补偿电阻 R_L 接入电桥电路输入端后, 必然降低输出灵敏度, 所以应尽量选取灵敏系数大的非线性补偿电阻应变计, 以使 R_{L0} 值较小。根据线性化的要求, 可得出下列公式:

$$\frac{R_{L0}}{R} = \frac{1}{\frac{K_L \varepsilon_0}{b} - 1} \quad (53)$$

现以 $R=350\Omega$, $b=510^{-3}$, $\varepsilon_0=1300 \times 10^{-6}$ 的圆柱式称重传感器为例进行计算, 将各项参数代入式(53)得:

$$\frac{R_{L0}}{R} = \frac{1}{\frac{K_L \times 1300 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-3}} - 1} = \frac{1}{0.26K_L - 1}$$

则

$$R_{L0} = \frac{R}{0.26K_L - 1} \quad (54)$$

由式(54)不难看出, 为了得到尽量小的 R_{L0} , 就必须选取尽量大的 K_L , 这就是线性补偿电阻必须选用半导体电阻应变计(灵敏系数 $K=67\sim 177$)和镍箔电阻应变计($K=-12\sim -20$)的原因。最好选择半导体电阻应变计, 设 $K_L=110$, 则

$$R_{L0} = \frac{350}{0.26 \times 110 - 1} = 12.681 (\Omega)$$

综上所述, 从理论上已经证明圆柱式称重传感器因电桥电路、应变区面积效应、电阻应变计等因素引起的非线性误差, 可以通过串联在电桥电路输入端的非线性补偿电阻应变计的电阻变化, 来改变电桥电路的实际供桥电压进行非线性补偿。

国内长春试验机研究所对称重传感器进行非线性补偿的经验是: 为了精细调整非线性补偿特性, 可以在非线性补偿电阻 R_L 上并联一个非线性补偿调整电阻, 只要改变的电阻值, 就可以得到比较理想的非线性补偿结果。半导体电阻应变计非线性补偿电阻 R_L 计算公式如下:

$$R_L = K_1 K_2 \frac{L(R + R_M + R_S)}{K_L \varepsilon} \quad (55)$$

式中: L ——称重传感器的实测线性;

R ——电桥的桥臂电阻;

R_M ——灵敏度温度补偿电阻;

R_S ——灵敏度标准化调整电阻, 当 R_M 、 R_S 尚未确定时, 可取 $R_M + R_S = 0.2R$;

K_L ——半导体电阻应变计灵敏系数;

ε ——半导体电阻应变计的应变变量;

K_2 ——经验系数, 对于圆柱式弹性元件 $K_2 = 6$;

K_1 ——调整余量系数, 考虑到批量生产时, 实测线性及各项因素的偏差, 可以取 $K_1 \geq 1.5$ 。

对固有线性差的称重传感器进行线性补偿时, 应特别注意非线性误差的定义方法, 也就是选择哪一条拟合直线作标准直线, 它直接影响线性补偿精度。《称重传感器》国家标准对标准拟合直线做了明确规定: “误差包络线以一条直线为基准, 此直线是以 20°C 时载荷试验中的两个输出确定的, 一个是

最小载荷输出，另一个是递增加载时取得的量程的75% 载荷时称重传感器的输出”。此方法接近最小二乘法的标准拟合直线，可以得到较高的线性补偿精度。

目前，称重传感器线性补偿方法主要有三种：

(1) 在惠斯通电桥电路的输入端，接入粘贴在弹性元件上的半导体过补偿应变计 R_L ，并在其上并联一个线性补偿精调金属膜电阻，对 R_L 进行精密调整。

(2) 在惠斯通电桥电路的输入端，接入粘贴在弹性元件上的镍箔线性补偿电阻应变计，兼作灵敏度温度补偿电阻。

(3) 利用非线性的盘状膜片进行线性补偿，同时可兼作横向力补偿，见法国专利No1204850。

参考文献

[1] 周旭. 现代传感器技术[M]. 国防工业出版社, 2007年1月.

[2] B.I.Wilson and G.Borkowski. Temperature Coefficients for Proving Rings.NBS Special Publications 300,Vol.8.

[3] VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC. 电桥非线性所引起的误差 [R]. 测量集团技术评论, 第TN-507号.

[4] F.Abdullah, U.Erdcm, M.K.Mirza, 王键, 王志正译. 高精度力传感器的线性和加荷误差 [C]. IMEKO TC-3 测力与称重技术论文集, 1982年, 166~169页.

[5] Lngp.Tegelaar. ir. H.Wieringa (荷兰), 林自强翻译, 荷兰TNO机械研究院对称重传感器的某些改进, VDI-BerichteNr.137.

[6] 林自强. 国外高精度应变式测力传感器技术与探讨, 计量技术专辑第二期, 1988年.

[7] 费奥多谢夫著, 卢文达, 熊大樟译. 精密仪器弹性元件的理论与计算 [M]. 科学出版社, 1963年.

[8] 刘九卿. 电阻应变式称重传感器, 中国衡器协会专业技术培训教材, 中国衡器协会2006年12月.

作者简介

刘九卿(1937—), 男(汉族), 1960年毕业于吉林工业大学。中国航天科技集团公司下属中国运载火箭技术研究院第七零二研究所研究员, 享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问, 衡器技术专家委员会顾问, 《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》《国家职业资格培训教程——称重传感器装配调试工》, 在有关杂志上共发表学术论文140多篇。